

7 Diskussion der Ergebnisse

7.1 Betrieb der Versuchsanlage

7.1.1 Anlagenbetrieb und -belastung

Das Belebungsbecken wurde als batchweise beschickter MBR-Reaktor betrieben. Diese Kombination wird allgemein gebräuchlich als SBMBR – sequencing batch membrane bioreactor - bezeichnet. Der Grund für diese Betriebsweise war einerseits die Problematik der Abwasserzudosierung bei kleinen Reaktorgrößen im Pilotmaßstab. Hätte man die Abwasserbeschickung kontinuierlich geplant, so hätte man eine Zudosierung von 1-1,5 l/min permanent gewährleisten müssen. Andererseits wäre bei der hier stattfindenden Diskussion der Ergebnisse, ein möglicher Permeatabzug von ungereinigtem Abwasser durch Kurzschlussströmungen über die Membranen im Raum gestanden. Dies ist durch die hier gewählte Betriebsweise ausgeschlossen.

Die Anlage ging Ende Oktober 2008 in Betrieb. Seit Beginn des Betriebs war eine Ultrafiltrationsmembran (Ultra L1) und eine Mikrofiltrationsmembran (Mikro L2) eingesetzt. Der Beginn der Einfahrphase war geprägt durch eine sehr intensive Belüftung und kurze Intervallzeiten zwischen den Beschickungen. Das Ziel war das rasche Durchfahren der Einfahrphase und die Produktion von Belebtschlamm. Durch die zu diesem Zeitpunkt gewählte Betriebsweise fand jedoch keine vollständige Denitrifikation statt, was schließlich zu Betriebsproblemen durch einen sinkenden pH-Wert führte. Stabile Verhältnisse waren nach Umstellung der Intervallzeiten Anfang bis Mitte Februar 2009 erreicht. Der anschließende Vollbetrieb lief sehr erfolgreich, ohne weitere Probleme mit dem Belebtschlamm, bis Mitte Februar 2010. Die Anlage war somit 3 Monate in der Einfahrphase und 12 Monate im Vollbetrieb.

Nachdem beim Ultrafiltrationsmodul (Ultra L1) im Zuge des mikrobiologischen Monitoringprogramms wiederholt Fäkalbakterien im Permeat feststellbar waren, wurde dieses zuerst durch ein Modul gleicher Bauart ersetzt. Die Untersuchungsergebnisse zeigten jedoch nach kurzem Betrieb ein ähnliches Verhalten wie das getauschte Modul. Schlussendlich wurde dieser Modultyp entfernt. An dessen Stelle wurde Anfang Oktober 2009 ein zweites Mikrofiltrationsmodul in das Belebungsbecken eingebracht.

Als Grund für die mangelnde Filtrationsleistung der Ultra L1 mag gelten, dass es sich um ein von Hand gefertigtes Versuchsmodul gehandelt hat, bei dem die Permeatabdichtung nicht optimal ausgeführt war und deshalb im Lauf des Betriebs zu der erkennbaren Undichtheit geführt hat.

Die Versuchsanlage wurde über den gesamten Zeitraum mit steigender hydraulischer Belastung betrieben. Dadurch ergaben sich, wie in Abbildung 57 dargestellt, auch über die Zeit ansteigende EW-Belastungen bzgl. BSB₅ (EW₆₀) und CSB (EW₁₂₀). Während die Trendkurve der EW₆₀-Belastung ein konstantes Verhalten aufweist, ist die CSB-Belastung im Vollbetrieb sehr schwankend (zwischen 400 und 800 mg/l), was zu einer instabilen EW₁₂₀-Belastung führte. Wie in Kapitel 4.2 ausgeführt, lagen die Mediane während der Einfahrphase bei 8,3 EW₆₀ und 9,7 EW₁₂₀ und während des Vollbetriebs bei 9,8 EW₆₀ und 14,9 EW₁₂₀.

Das CSB:N:P Verhältnis der vorgeklärten Abwassermischung war sowohl während der Einfahrphase als auch während des Vollbetriebs bei 100:19:2, das C:N:P Verhältnis war äquivalent bei 100:50:6. Das Verhältnis von CSB:BSB₅ war über den gesamten Versuchszeitraum ca. 2,6.

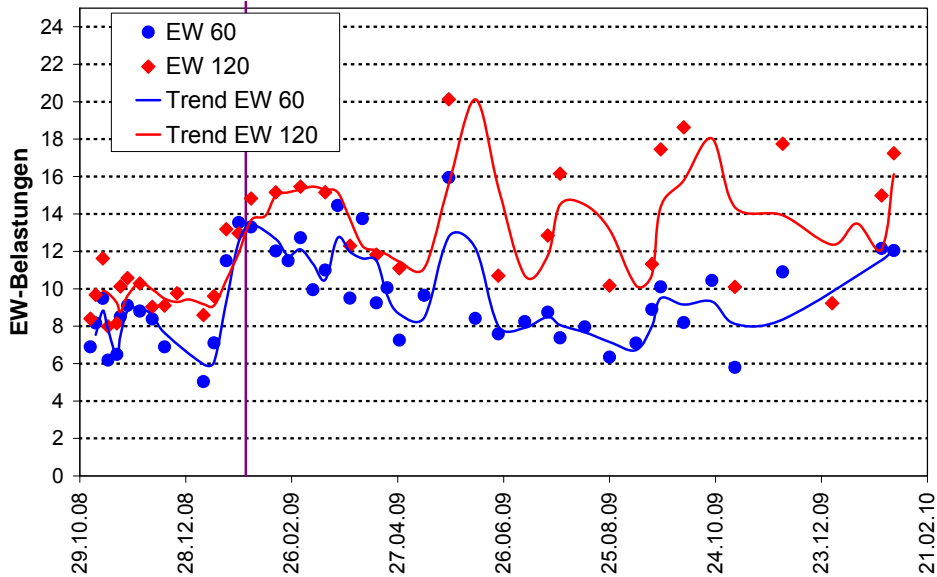


Abbildung 57 Entwicklung der EW-Belastung über die gesamte Versuchsdauer (vertikale Linie = Grenze zwischen Einfahrphase und Vollbetrieb).

Die Überschussschlammproduktion wurde nach ATV-DVWK-A 131 (2000) für den Vollbetrieb und dem Ansatz für MBR-Anlagen von WICHERN und ROSENWINKEL (2002) für die Einfahrphase berechnet. Dieser geht gegenüber der Berechnung laut ATV-DVWK-A 131 (2000) von einer geringeren Schlammproduktion durch das hohe Schlammalter bei einer MBR-Anlage aus. Dieser Ansatz ist jedoch nur bis zum Zeitpunkt des ersten Schlammabzugs mit einem Schlammalter von 325 Tagen zu verwenden. Danach wurde anhand der tatsächlich abgezogenen Schlammmenge festgestellt, dass die Schlammproduktion wiederum dem Ansatz nach dem ATV-DVWK-A 131 folgt. Der Grund dürfte das nicht mehr so hohe rechnerische Schlammalter von 95 Tagen sein.

Nach GÜNDER (1999) kann, indem ein extrem hohes Schlammalter eingestellt wird, die Überschussschlammproduktion minimiert werden. Die dafür notwendigen BSB₅-Schlammbelastungen von unter 0,01 kg/(kg.d) sind jedoch i.d.R. nicht wirtschaftlich.

In Tabelle 28 sind die Eliminationsleistungen der chemischen Parameter während des Versuchsbetriebs angeführt. Ein größerer Unterschied zwischen der Einfahrphase und dem Vollbetrieb ist nur beim Parameter TNb festzustellen. Hier steigerte sich die Eliminationsleistung von 25,7 % (Median, n=14) durch die Veränderung der Betriebsweise auf eine vorgeschaltete Denitrifikation auf 84,2 % (Median, n=18)

Tabelle 28 Eliminationsleistungen chemischer Parameter während des Versuchsbetriebs.

ELIMINATION		Einfahrphase					Vollbetrieb				
		TNb	NH ₄ -N	BSB ₅	CSB	TOC	TNb	NH ₄ -N	BSB ₅	CSB	TOC
n	[-]	14	16	14	14	14	18	21	18	19	18
Median	[%]	25,7	97,1	98,7	93,1	93,2	84,2	97,8	98,5	95,6	95,8
Mittelwert	[%]	30,4	96,0	98,5	93,3	93,3	83,6	97,2	98,4	95,8	96,1
Stabw	[%]	14,5	4,6	0,3	2,2	2,0	8,3	3,1	0,5	0,9	1,0
Max	[%]	64,24	99,95	98,95	96,34	96,31	94,79	99,96	99,08	97,21	97,69
Min	[%]	8,26	84,55	97,92	89,01	89,36	65,11	90,23	97,41	94,58	94,79

Die nach ÖNORM B 2502-1 (2007) geforderten chemischen Reinigungsziele für Kleinkläranlagen bis 50 Einwohnerwerte wurden zu jeder Zeit problemlos eingehalten. Die $\text{NH}_4\text{-N}$ -Ablaufkonzentrationen waren in der Einfahrphase nur bei zwei Probenahmen über dem erlaubten Grenzwert.

7.1.2 Zeitlicher Verlauf der Reinigungsleistung über einen Gesamtzyklus

Abbildung 58 und Abbildung 59 zeigen die Entwicklung von Ammonium und Nitrat während jeweils eines gesamten Reinigungszyklus t_z . Gegenübergestellt sind die online Parameter Redox-Potential, gelöster Sauerstoff und pH-Wert. Dadurch ist es möglich den aktuellen Zustand im Reaktor sehr gut abzubilden.

Der gesamte Reinigungszyklus am 11.02.2009 betrug zu diesem Zeitpunkt rund $t_z = 3,0$ Stunden: $t_F = 10$ Minuten Befüllung, $t_{AX} = 60$ Minuten Denitrifikation, $t_{AE} = 15$ Minuten Beckenbelüftung (hier mit 5 Minuten Wartezeit), $t_{P(AE)} = 90$ Minuten Filtration.

Die Filtrationszeit $t_{P(AE)}$ teilte sich wie folgt auf: 8 Subzyklen bei Ultra L1 mit 8 Minuten Filtrieren (2,0 l/min) und 1 Minute Rückspülen (2,8 l/min); 9 Subzyklen bei Mikro L2 mit 8 Minuten Filtrieren (1,25 l/min) und 1 Minute Rückspülen (2,8 l/min).

Die $\text{NH}_4\text{-N}$ -Konzentration der Beschickung von rund 190 Liter lag bei 105 mg/l. Bei Annahme einer $\text{NH}_4\text{-N}$ -Endkonzentration nach der Filtration von $<0,03$ mg/l im Reaktor (ca. 3 m^3 Inhalt) kann nach der Durchmischung im Reaktor mit einer $\text{NH}_4\text{-N}$ -Startkonzentration von rund 6,3 mg/l gerechnet werden.

Damit wäre prinzipiell der Grenzwert der ÖNORM B 2502-1 (2007) von < 10 mg/l eingehalten. Tatsache ist jedoch, dass diese theoretische Überlegung ohne nachfolgende biologische Reinigung nur einmal durchgeführt werden kann. Eine weitere Befüllung von Rohabwasser würde einen Wert > 10 mg/l ergeben. Da unter anderen die Startkonzentration von $\text{NH}_4\text{-N}$ diesen niedrigen Wert aufwies, war es möglich, die Betriebsweise dahingehend zu verändern, dass der Beginn des Permeatablaufs (= Beginn der Mischprobe für den Ablauf) in Folge ohne vorherige Beckenbelüftung durchgeführt werden konnte. Für den nachfolgenden biologischen Reinigungsprozess reichte der Sauerstoffeintrag für die Nitrifikation über die Belüftungseinrichtungen für die Crossflow-Belüftung. Diese Art des Betriebs ist besonders anschaulich in Abbildung 59 während des Vollbetriebs dargestellt.

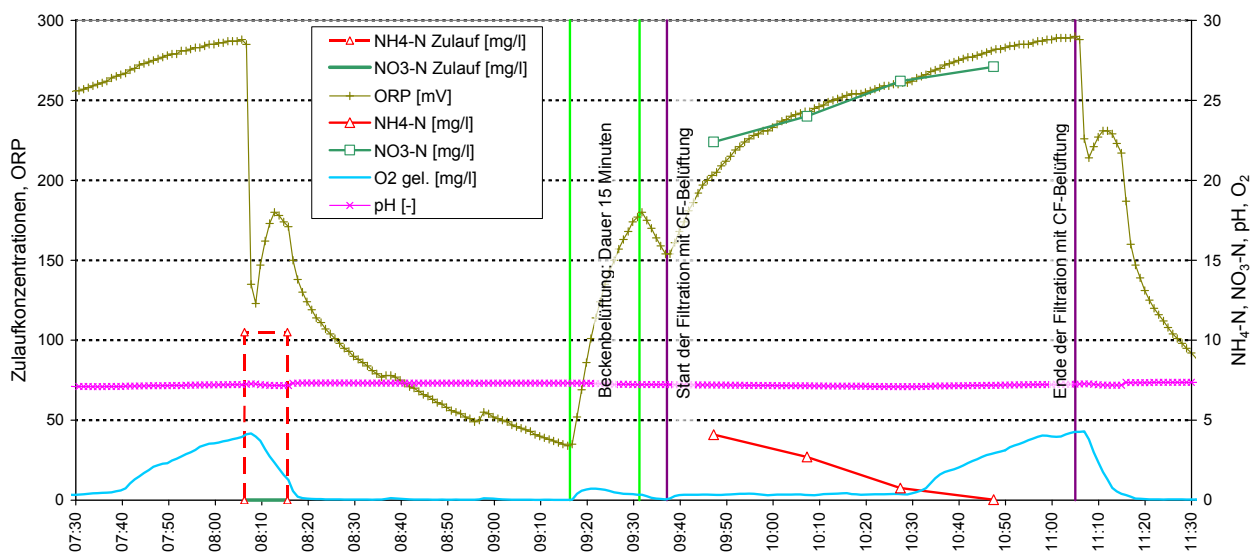


Abbildung 58 Verlauf ausgewählter chemischer und physikalisch-chemischer Parameter während eines gesamten Reinigungszyklus am 11.02.2009.

Die Ablaufproben in Abbildung 58 wurden während des 2., 4., 6. und 8. Subzyklus nach der Permeatpumpe gezogen. Gut erkennbar ist die Nitrifikation während des Filtrationszyklus durch die Crossflow-Belüftung. Die Endkonzentration von $\text{NH}_4\text{-N}$ lag bei $<0,03 \text{ mg/l}$, die von $\text{NO}_3\text{-N}$ bei $27,1 \text{ mg/l}$. Die hohe Nitrat-Ablaufkonzentration weist auf die zu diesem Zeitpunkt noch nicht aktivierte vorgeschaltete Denitrifikation hin. Ebenfalls auffallend ist das hohe Redox-Niveau zu Beginn der Untersuchungen. Zu diesem Zeitpunkt hatte der Reaktor einen TS-Gehalt von nur 6 g/l . Dies resultiert in einer raschen Nitrifikation mit einem darauf folgenden Anstieg der Sauerstoffkonzentration auf ca. 5 mg/l und damit einhergehend mit dem Ansteigen des Redox-Potentials im Reaktor.

Aufgrund dieser Erkenntnisse wurde ein weiteres Intensivmessprogramm während eines Reinigungszyklus am 16.02.2010 durchgeführt.

Der gesamte Reinigungszyklus am 11.02.2009 betrug zu diesem Zeitpunkt $t_z = 3,5$ Stunden: $t_F = 20$ Minuten Befüllung, $t_{AX} = 60$ Minuten Denitrifikation, $t_{P(AE)} = 130$ Minuten Filtration.

Die Filtrationszeit $t_{P(AE)}$ teilte sich wie folgt auf: 12 Subzyklen bei Mikro L1 mit 8 Minuten Filtrieren ($1,61 \text{ l/min}$) ohne Rückspülen; 13 Subzyklen bei Mikro L2 mit 8 Minuten Filtrieren ($2,0 \text{ l/min}$) und 1 Minute Rückspülen ($3,15 \text{ l/min}$).

Die $\text{NH}_4\text{-N}$ -Konzentration der Beschickung von rund 330 Liter lag bei 63 mg/l . Bei Annahme einer $\text{NH}_4\text{-N}$ -Endkonzentration nach der Filtration von $0,08 \text{ mg/l}$ im Reaktor (ca. $2,9 \text{ m}^3$ Inhalt nach der Filtration) kann nach der Durchmischung im Reaktor mit einer $\text{NH}_4\text{-N}$ -Startkonzentration von rund $6,6 \text{ mg/l}$ gerechnet werden. Wie in Abbildung 59 dargestellt korreliert diese theoretische Berechnung gut mit dem tatsächlichen Messwert.

Die Ablaufproben wurden während der Denitrifikationszeit und während des 2., 3., 4., 5., 6., 7., 9., 11. und 13. Subzyklus nach der Permeatpumpe gezogen. Dieses enge Probenahmeintervall erlaubt die exakte Abbildung des Verlaufs der Nitri-/Denitrifikation. Die Endkonzentration von $\text{NH}_4\text{-N}$ lag bei $0,04 \text{ mg/l}$, die von $\text{NO}_3\text{-N}$ bei $6,4 \text{ mg/l}$. Das Redox-Potential war den Zuständen im Reaktor entsprechend im negativen oder positiven Bereich. Zu diesem Zeitpunkt hatte der Reaktor einen TS-Gehalt von 13 g/l . Der Sauerstoffgehalt steigt gegenüber dem oben dargestellten Zyklus vom 11.02.2009 daher erst nach dem Ende der Nitrifikation kurz auf 2 mg/l .

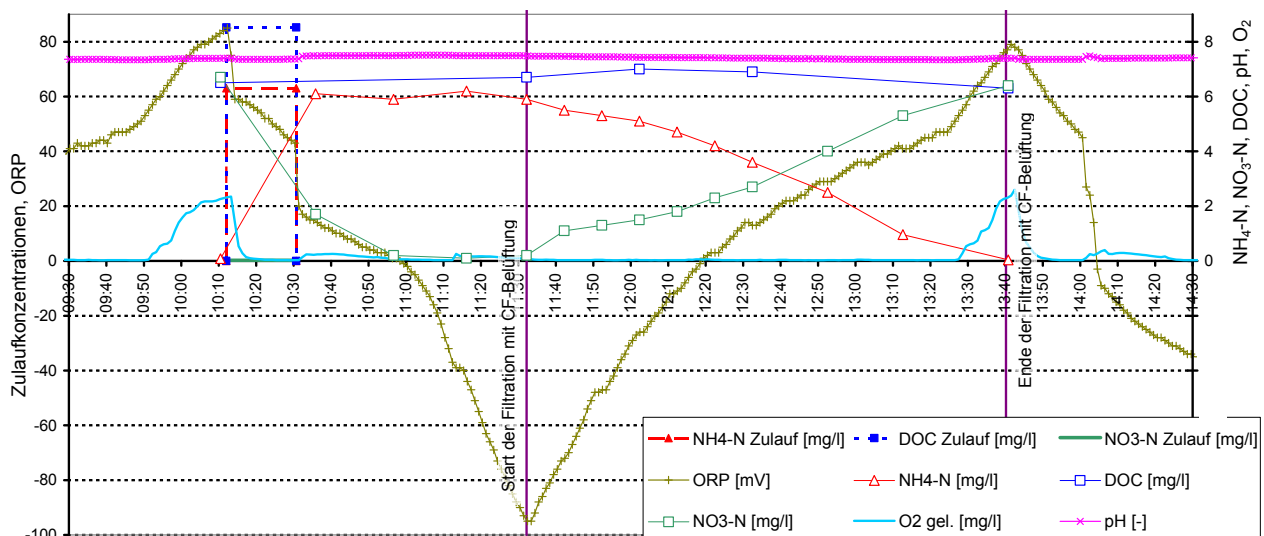


Abbildung 59 Verlauf ausgewählter chemischer und physikalisch-chemischer Parameter während eines gesamten Reinigungszyklus am 16.02.2010.

7.1.3 Detailbetrachtung des Zeitraums 21. bis 28. Juli 2009

Am 21. und 28. Juli 2009 wurden mikrobiologische Intensivbeprobungen durchgeführt, um mögliche Veränderungen bei der Filtrationsleistung vor und nach einer Membranreinigung (23.07.2009) auf Biofouling und Scaling zu untersuchen. Zu dieser Zeit herrschten an der Anlage besondere Betriebsbedingungen. Es wurden beide Membranen (Ultra L1 und Mikro L2) über zwei Monate mit einer sehr hohen Belastung betrieben. Die Ultra L1 lief mit 20 l/(m².h) (ansonst 15 l/(m².h)) und die Mikro L2 lief mit 35 l/(m².h) (ansonst 30 l/(m².h)). Das Ziel war in einer adäquaten Zeitspanne eine provozierte Verblockung der Membranen herbeizuführen, was Ende Juli 2009 auch bei beiden Membranen gelang. Das Resultat waren extrem starke Verblockungen zwischen den Membranplatten, die v.a. bei der Ultra L1 sehr stark ausgeprägt waren (siehe Kapitel 4.6). Zu diesem Zeitpunkt war im Belebungsbecken ein TS-Gehalt von ca. 15 g/l. Laut den Herstellerangaben der Ultra L1 war der Einsatzbereich von < 12 g/l deutlich überschritten.

Die mikrobiologischen Parameter zeigten vor und nach der Reinigung am 23.07.2009 unterschiedliche Ergebnisse. Wie in Tabelle 20 dargestellt, dürfte trotz vorsichtiger Reinigung eine Beeinträchtigung der „Dichtigkeit“ des Moduls stattgefunden haben. Tatsache ist jedoch, dass auch schon vorher die Leistungsfähigkeit bzgl. einer Abtrennung von Mikroorganismen nicht mehr voll gegeben war.

Abbildung 60 zeigt den Zustand des Reaktors im Zeitraum der beiden Untersuchungen. Die zweitägige Datenlücke beruht u.a. auf einem Ausfall des Steuer-PC's und damit der Datenaufzeichnung. Diese Pause wurde gleichzeitig dazu genutzt, die Membranen intensiv zu reinigen (siehe Kapitel 4.6). Nach Behebung des Schadens erreichte die Anlage kurz darauf wieder stabile Verhältnisse.

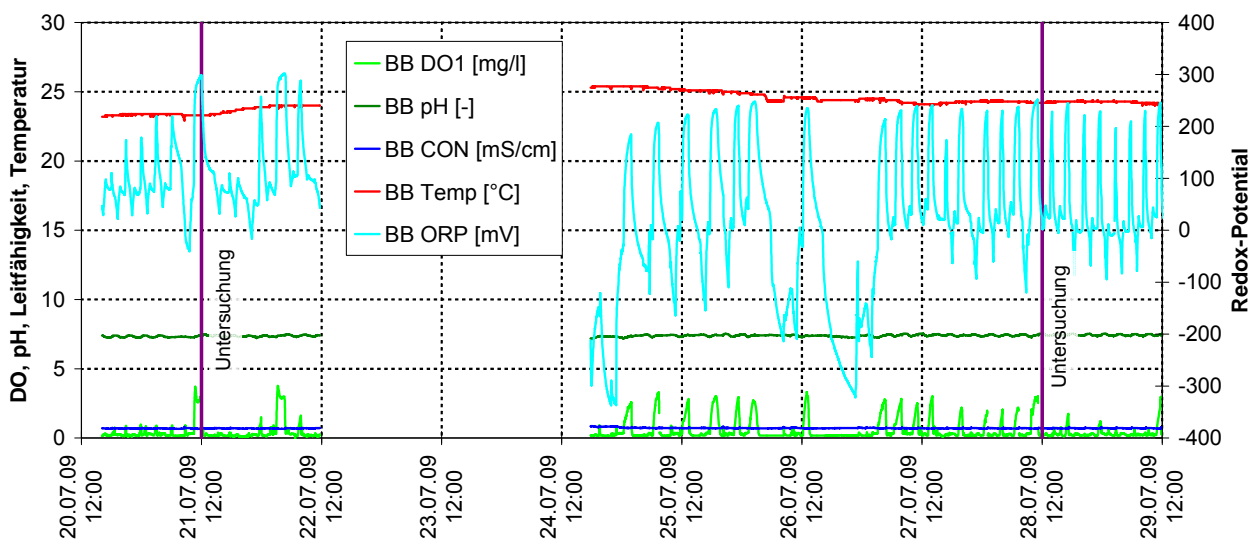


Abbildung 60 Zustand der Anlage während der Beprobung am 21. und 28. Juli 2009.

7.1.4 Säurekapazität

Die Säurekapazität im Zulauf zum Reaktor resultiert in erster Linie aus der Säurekapazität des Trinkwassers sowie der durch die Ammonifikation des Harnstoffs und des organisch gebundenen Stickstoffs gebildeten Säurekapazität (ATV-DVWK-A 131, 2000). Die Säurekapazität in Versuchsreaktor nimmt hauptsächlich durch den Prozess der Nitrifikation ab. Ein Rückgewinn durch die Denitrifikation war zu Beginn der Einfahrphase durch die gewählte Betriebsart nicht gegeben. Daher nahm der pH-Wert im Reaktor stetig ab, so dass dieser zu diesem Zeitpunkt nur

noch chemisch durch händische Zugabe von NaOH angehoben werden konnte. Prinzipiell sollte die Säurekapazität im Ablauf des Reaktors den Wert von 1,5 mmol/l nicht unterschreiten (ATV-DVWK-A 131, 2000). Wie am 17.12.2008 durch eine Analyse festgestellt wurde, herrschte im Reaktor ein Ks-Wert von 0,7 mmol/l (Zulauf 11 mmol/l) welcher nach Zugabe von NaOH auf 2,0 mmol/l angehoben werden konnte. Die Probleme mit der stetigen pH-Wert-Absenkung verschwanden, nachdem sich - nach Umstellung der Betriebsweise ab dem Vollbetrieb - eine stabile Nitri-/Denitrifikation ausbildete.

7.1.5 Membranreinigungen und Standzeiten

Es wird von den meisten Membranherstellern empfohlen, kleinere Reinigungen mit automatisierten Abläufen in kurzen Intervallen in-situ, als große Intensivreinigungen z.B. alle 6 Monate ex-situ durchzuführen. Im gegenständlichen Forschungsprojekt wurde bewusst auf eine in-situ-Reinigung verzichtet, da man die Mikroorganismen im Reaktor nicht durch die eingebrachten Chemikalien beeinflussen wollte. Es wurde daher bei Bedarf immer eine ex-situ-Reinigung durchgeführt. Es wurde nur einmal versucht bei der Mikro L2 eine in-situ-Reinigung mit H₂O₂ durchzuführen. Durch die geringe Konzentration der verwendeten Chemikalie, um die Mikroorganismen nicht zu beeinträchtigen, zeigte sich eine nur kurzzeitige Verbesserung der Permeabilität.

Wie schon im Kapitel 4.6 beschrieben kam gegen Biofouling immer Natriumhypochlorit NaOCl und Natronlauge NaOH zum Einsatz. Ein Scaling war im gegenständlichen Fall nicht zu erwarten, es wurde jedoch trotzdem einmal eine Reinigung mit Zitronensäure C₆H₈O₇*H₂O durchgeführt.

Wie in Abbildung 29 ersichtlich nahm bei der Mikro L2 bei einer gleich bleibenden Fluxleistung von 30 l/(m².h) der TMP von anfänglich -0,1 bar innerhalb von 7 Monaten auf -0,6 bar zu. Man kann daher darauf schließen, dass dieser Membrantyp mit den gegebenen Bedingungen alle 6 Monate intensiv gereinigt werden müsste, um dessen Leistungsfähigkeit über ein halbes Jahr zu erhalten. Ausdrücklich darauf hingewiesen sei, dass diese Aussage nicht auf die Praxis-Bedingungen vor Ort angewendet werden kann. Eine weitere Einschränkung ist auch die Wirtschaftlichkeit. Wie in Abbildung 62 dargestellt, sinkt in diesem Zeitraum die Permeabilität von 250 auf nur 50 l/(m².h.bar). Man erzielt bei gleichem Energieeinsatz daher um 80% weniger Permeatmenge.

Der untersuchte Zeitraum der Mikro L1 von 09.10.2009 bis Mitte Februar 2010 lässt noch keine Aussagen über eine Langzeitstabilität zu. Ebenso ist eine Aussage bei der Ultra L1 nicht möglich, da diese nicht über einen längeren Zeitraum bei gleichen Bedingungen beobachtet werden konnte.

7.1.6 Hydraulische Verhältnisse und Leistung der Membranen

Die theoretische hydraulische Verweilzeit war zu Beginn der Einfahrphase 16 Stunden und am Ende des Vollbetriebs nur noch 10 Stunden. Die Anzahl der Zyklen pro Tag m_Z lag am Ende der Einfahrphase bei 6 bis 7, und steigerte sich im Vollbetrieb auf maximal 8. Die große Bandbreite der Zykluszeit t_Z von 1,8 bis 4,3 Stunden über die gesamte Versuchsdauer resultiert hauptsächlich von den Einstellungen für die verschiedenen Reaktionszeiten t_R. Eine genaue Erklärung der Zeiten siehe Kapitel 4.3.

$$\begin{array}{ll} \text{Zykluszeit} & t_Z = t_F + t_{AX} + t_{AE} + t_{P(AE)} \\ \text{Reaktionszeit} & t_R = t_{AX} + t_{AE} + t_{P(AE)} \end{array}$$

Bei einer Beschickungsmenge von 300 Liter/Zyklus (z.B. Oktober 2009) und den gegebenen Abwasserkonzentrationen konnte mit einer Denitrifikationszeit t_{AX} von 60 Minuten und einer aeroben Filtrationsphase t_{P(AE)} von rund 120 Minuten gute Reinigungsleistungen erzielt werden. Dies entspricht einer t_R von rund 3 Stunden und einer t_Z von ca. 3,5 Stunden.

Laut Merkblatt DWA-M 210 (2009) haben sich in der Praxis bei SBR-Anlagen Zykluszeiten von ca. 6 bis 8 Stunden (bei Trockenwetterzufluss) gut bewährt. Dabei werden bei ausschließlichem Kohlenstoffabbau kürzere Zyklen und bei kombinierter Kohlenstoff-, Stickstoff- und Phosphorentfernung tendenziell längere Zyklusdauern benötigt. Zyklusdauern < 4 Stunden sind als Bemessungsgrundlage für den Normalbetrieb von SBR-Anlagen nicht zu empfehlen, da sich die Sedimentationsphase nicht verkürzen lässt.

In Bezug zur gegenständlichen SBMBR-Anlage lässt sich Folgendes anmerken: Die Reaktionszeit t_R einer SBR-Anlage entspricht den gleichen Zeittypen wie bei einer MBR-Anlage. Die Füllzeit t_F ist bei beiden Anlagentypen ident. Einen grossen Unterschied gibt es daher nur bei den SBR-Phasen Belüftung / Sedimentation / Klarwasserabzug. Diese entsprechen beim gegenständlichen SBMBR der t_{AX} , t_{AE} bzw. $t_{P(AE)}$ wobei hier die aerobe Nitrifikationsphase der Beckenbelüfter t_{AE} durch Betriebsoptimierung in die aerobe Permeatabzugsphase $t_{P(AE)}$ integriert werden konnte. Es ergibt sich daher gegenüber der klassischen SBR-Betriebsweise eine Verkürzung der Gesamtzykluszeit t_Z . Die tatsächlich erreichbare Zeitverkürzung ist jedoch durch die aktuelle Permeabilität eingeschränkt. Wie nachgewiesen wurde, erhöht sich bei einer niedrigen Permeabilität die Permeatabzugszeit $t_{P(AE)}$.

Betriebsprobleme während der Einfahrphase führten bei beiden Membrantypen (Ultra L1 und Mikro L2) zu einem raschen Verlust der Permeabilität (siehe Abbildung 61 und Abbildung 62). Dies ist hauptsächlich auf die damals vorhandenen Schlammeigenschaften zurückzuführen, welche zu Biofouling führten. Die erste Membranreinigung am 17.12.2008 mit NaOCl ließ die Permeabilität bei beiden Membranen wieder extrem ansteigen. Der weitere Betrieb im noch nicht stabilen Belebungsbecken führte jedoch rasch wieder zu einer Reduzierung der Leistungsfähigkeit beider Membranen. Auch ein Beschickungsausfall während der Weihnachtsfeiertage 2008/2009 war negativ für den Betrieb.

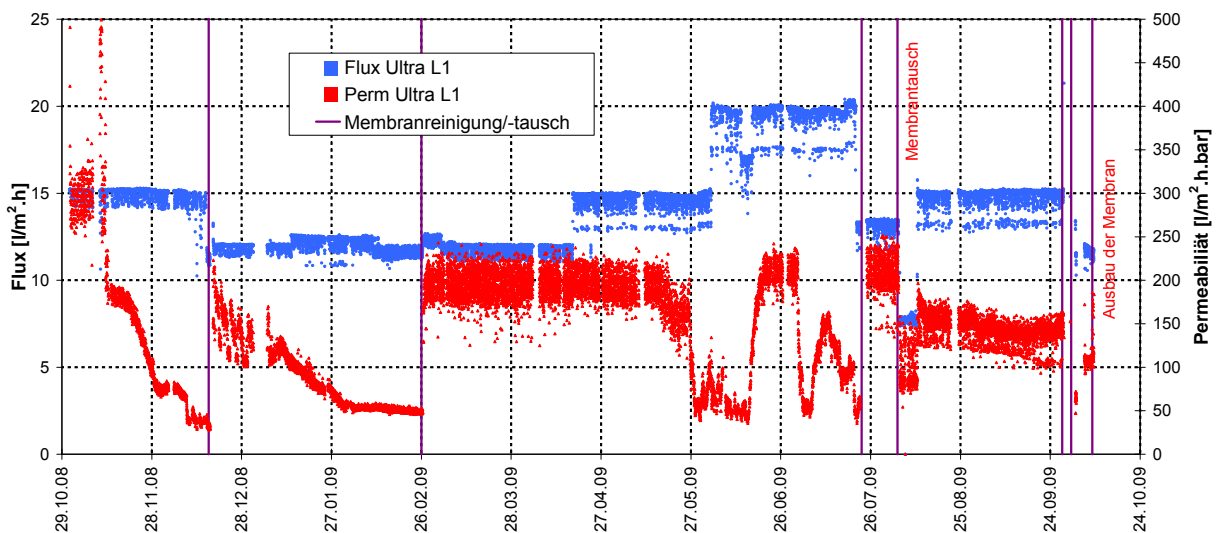


Abbildung 61 Ultrafiltration Linie1: Gegenüberstellung des Flux und der Permeabilität über die gesamte Versuchsdauer.

Nach Erreichen eines stabilen Betriebs wurde am 26.02.2009 die zweite große Membranreinigung mit NaOCl durchgeführt. Die Permeabilität beider Membranen zeigte danach stabile Verhältnisse an, wobei darauf hingewiesen werden muss, dass die Mikro L2 eine stetig sinkende Durchlässigkeit zeigt. Durch die Vorgabe innerhalb des Projektteams die Bedingungen während einer Verblockung der Membranen zu untersuchen, wurde die Leistung beider Membranen erhöht. Dies führte zu einer raschen Verminderung der Permeabilität beider Membranen. Nach der mikrobiologischen Untersuchung am 21.07.2009 (im Zustand der

„Verblockung“) wurde eine umfassende Reinigung beider Membranmodule auf Biofouling und Scaling durchgeführt.

Danach wurde die Mikrofiltrationsmembran L2 mit einem Flux von 30 l/(m².h) dauerhaft bis zum Ende der Untersuchungen betrieben. Bei Aufrechthaltung der gewählten Fluxleistungen, war eine kontinuierliche langsame Erhöhung des während des Permeatabzugs anstehenden Unterdrucks festzustellen, was auch in der sinkenden Permeabilität erkennbar ist.

Das Ultrafiltrationsmodul (Ultra L1) zeigte am Ende schlechte mikrobiologische Ablaufwerte, und wurde daher am 04.08.2009 durch ein baugleiches Modul ersetzt. Jedoch auch dieses Modul zeigte ähnliches Verhalten bzgl. der mikrobiologischen Kontamination des Ablaufs und wurde daher am 08.10.2009 außer Betrieb genommen und aus dem Reaktor entfernt. Wie in Abbildung 63 dargestellt, kam an dessen Stelle ein weiteres Mikrofiltrationsmodul zum Einsatz (Mikro L1). Dieses wurde von Beginn an mit 20 l/(m².h) betrieben und es zeigte in den ersten 4 Monaten Betrieb ein nur langsames Abnehmen der Permeabilität.

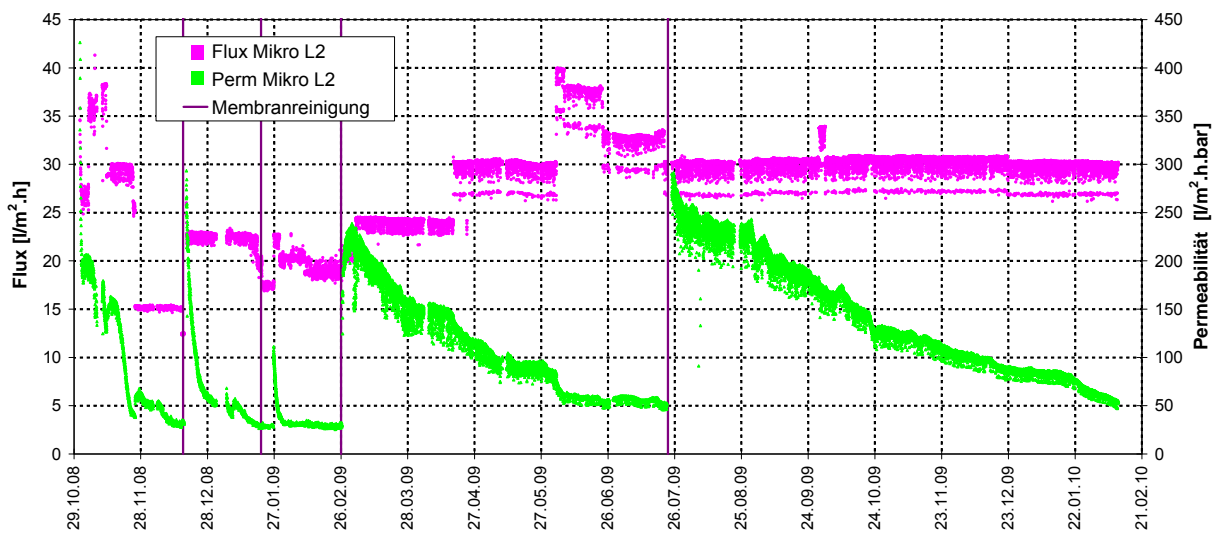


Abbildung 62 Mikrofiltration Linie2: Gegenüberstellung des Flux und der Permeabilität über die gesamte Versuchsdauer.

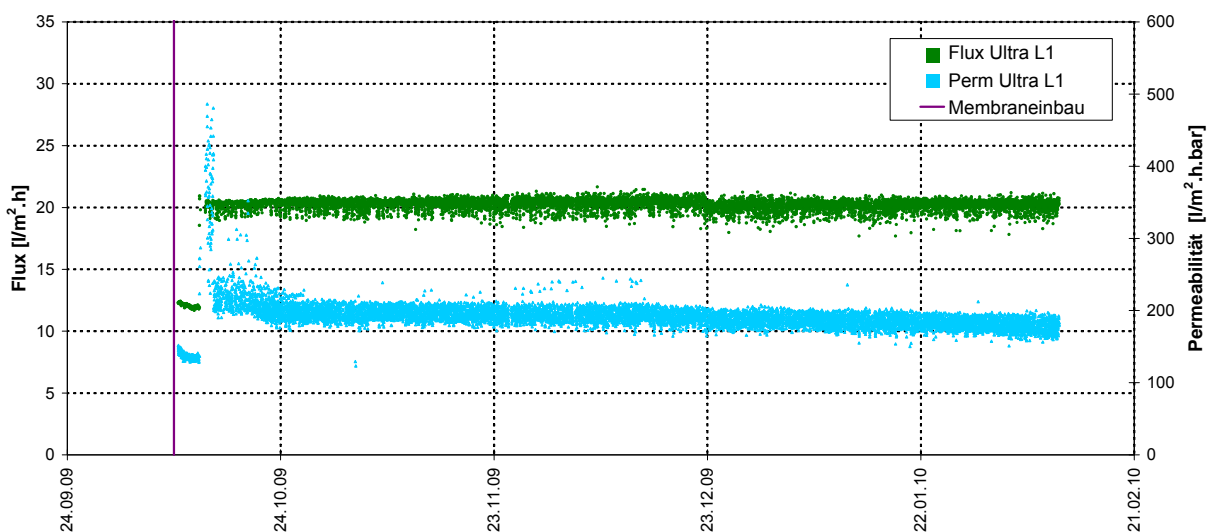


Abbildung 63 Mikrofiltration Linie1: Gegenüberstellung des Flux und der Permeabilität über die entsprechende Versuchsdauer.

7.2 Rückhalt von Mikroorganismen

7.2.1 Mechanik der Filtration

Man unterscheidet anhand der Dynamik des Filtrationsprozesses zwei grundlegende Mechanismen: Die Dead-end-Filtration und die Crossflow-Filtration. Beim statischen Dead-end-Betrieb wird auf der Innenseite der Membran ein Unterdruck angelegt. Durch den Rückhalt suspendierter Stoffe auf der Außenseite der Membran wird eine Deckschicht ausgebildet, die mit fortschreitender Prozessdauer die Filtrationsleistung vermindert und den Filterwiderstand erhöht.

Im Gegensatz dazu wird bei der dynamischen Crossflow-Filtration die Ausbildung eines Filterkuchens an der Membranoberfläche durch die Scherkräfte der sich parallel zur Membranoberfläche fortbewegenden Luftblasen vermindert. Der Permeatfluss durch den anliegenden Unterdruck bleibt über einen langen Zeitraum gewährleistet. Dieser Betriebsvorteil beinhaltet allerdings durch einen hohen Energieeinsatz zur Erzeugung der Druckbelüftung einen ökonomischen Nachteil. Man kann den abreinigenden Effekt durch die Crossflow-Belüftung noch durch einen schrittweisen Permeatabzug erhöhen. Dies bedeutet während der Intervallpausen entweder eine Entspannungsphase oder gar eine Rückspülung von Permeat in das Membranmodul.

Diese letztgenannte Betriebsart wurde beim gegenständlichen Forschungsprojekt als die fortschrittlichste ausgewählt und durch die Aufteilung der gesamten Filtrationszeit in einzelne Subzyklen umgesetzt.

Bei der Mikrofiltration können Stoffe einer Größenordnung von etwa $> 0,1 \mu\text{m}$ und bei der Ultrafiltration Stoffe einer Größenordnung $> 0,01 \mu\text{m}$ abgetrennt werden. Die tatsächliche Abtrennung kann während des Betriebes auch Gruppen geringfügig kleinerer Größenordnungen umfassen, da die auf der Membranoberfläche ausgebildete Deckschicht ebenfalls eine Barrierewirkung aufweist. Etliche Hersteller von Mikrofiltrationsmembranen weisen darauf hin, dass durch die Ausbildung einer Deckschicht, eine so genannte deckschichtkontrollierte Filtration mit einer effektiven Trennschärfe von $< 0,01 \mu\text{m}$ entstehen kann.

Ein weiterer Aspekt der Filtration ist die Verteilung der Porengrößen. Eine Aussage über die vorherrschenden Porengrößen der verwendeten Filtrationsmodule war nur von ItN Nanovation zu bekommen. Der Hersteller gibt die maximale Porengröße mit 660 nm und die minimale Porengröße mit 110 nm an. Die durchschnittliche Porengröße soll bei 150 nm liegen, wobei die nominale Porengröße laut Datenblatt mit 200 nm ($0,2 \mu\text{m}$) angegeben wird. Getestet wurde hierbei nach DIN 58355 Teil 2 (Membranfilter - Teil 2: Prüfung des Blasendrucks).

Durch die heutigen Herstellungsverfahren und die vorhandene Qualitätskontrolle kann man erwarten, dass die in den Handel gelangenden Membranplatten selbst einen hohen Standard aufweisen. Die einzelnen Membranplatten sind jedoch untereinander durch einen Permeatabzugskanal in der zugehörigen Moduleinheit miteinander verbunden. Eine Schwachstelle bleibt daher das Design, die Ausführung der Verbindungen und die Wartung der Membranmodule nach dem Einbau.

7.2.2 Mikrobiologisches Monitoringprogramm

Ausgehend von hohen fäkalen Belastungen im Belebungsbecken (Tabelle 29) kam es zu deutlichen Rückgängen der Koloniezahlwerte im Permeat der jeweiligen Membranmodule.

Tabelle 29 Minimum-, Maximum-, Mittel- und Medianwerte, Belebungsbecken.

Parameter KBE/100 ml	Minimum	Maximum	Mittelwert	Median
<i>E. coli</i>	40.000	1.750.000	404.069	300.000
Coliforme	186.000	3.450.000	1.209.828	880.000
Enterokokken	230.000	13.500.000	3.732.800	2.600.000

Eine Bewertung der mikrobiologischen Permeatqualität an Hand von nur 100 ml Probe reicht nicht aus, um entscheiden zu können, ob eine gefahrlose Versickerung des gereinigten Abwassers möglich ist oder nicht. Aus diesem Grund wird in einer 2006 veröffentlichten Studie (BMLFUW, 2006) davon ausgegangen, dass *E. coli* in einem Untersuchungsvolumen von 250 ml in 95% der Untersuchungen nicht nachweisbar sein darf, „um die Qualitätsziele im Grundwasser bei der Versickerung von mechanisch-biologisch gereinigtem Abwasser aus Kleinkläranlagen zu gewährleisten“.

Im gegenständlichen Fall wurden Volumina bis zu 5.000 ml in die Beobachtung mit einbezogen. Der Grund für die Untersuchung größerer Volumina liegt darin, nur auf diese Weise jene Information erhalten zu können, die Einblick in die bestehende „mikrobiologische Grundbelastung“ des aufbereiteten Abwassers liefert, wobei nicht nur die Höhe der Werte, sondern auch deren Schwankung von Interesse ist. Darüber hinaus lässt sich durch diese Vorgehensweise auch ein genaueres Bild über die Effizienz der Abwasserreinigung mittels Membranfiltration (Berechnung von Reduktionsraten) erzielen. Ein weiterer Vorteil liegt darin, dass sich anbahnende Verschlechterungen der Permeatqualität in Folge unterschiedlicher technischer Gebrechen zu einem wesentlich früheren Zeitpunkt erkennen lassen als dies bei der Untersuchung von lediglich 100 ml Probe möglich wäre. Offen bleibt, wie hoch der tolerierbare KBE-Wert (250 ml) bei den zulässigen 5 % positiven Befunden sein darf.

In Abbildung 64 bis Abbildung 66 ist dargestellt, in wieviel Prozent der untersuchten Fälle der Wert von 0 KBE (Fäkalbakterien) im Permeat eingehalten bzw. überschritten wurde. Um eine umfassende Bewertung der verwendeten Membranmodule vornehmen zu können, wurde neben dem in der Literatur genannten Bezugsvolumen von 250 ml eine Erweiterung auf 1.000 ml und 5.000 ml vorgenommen.

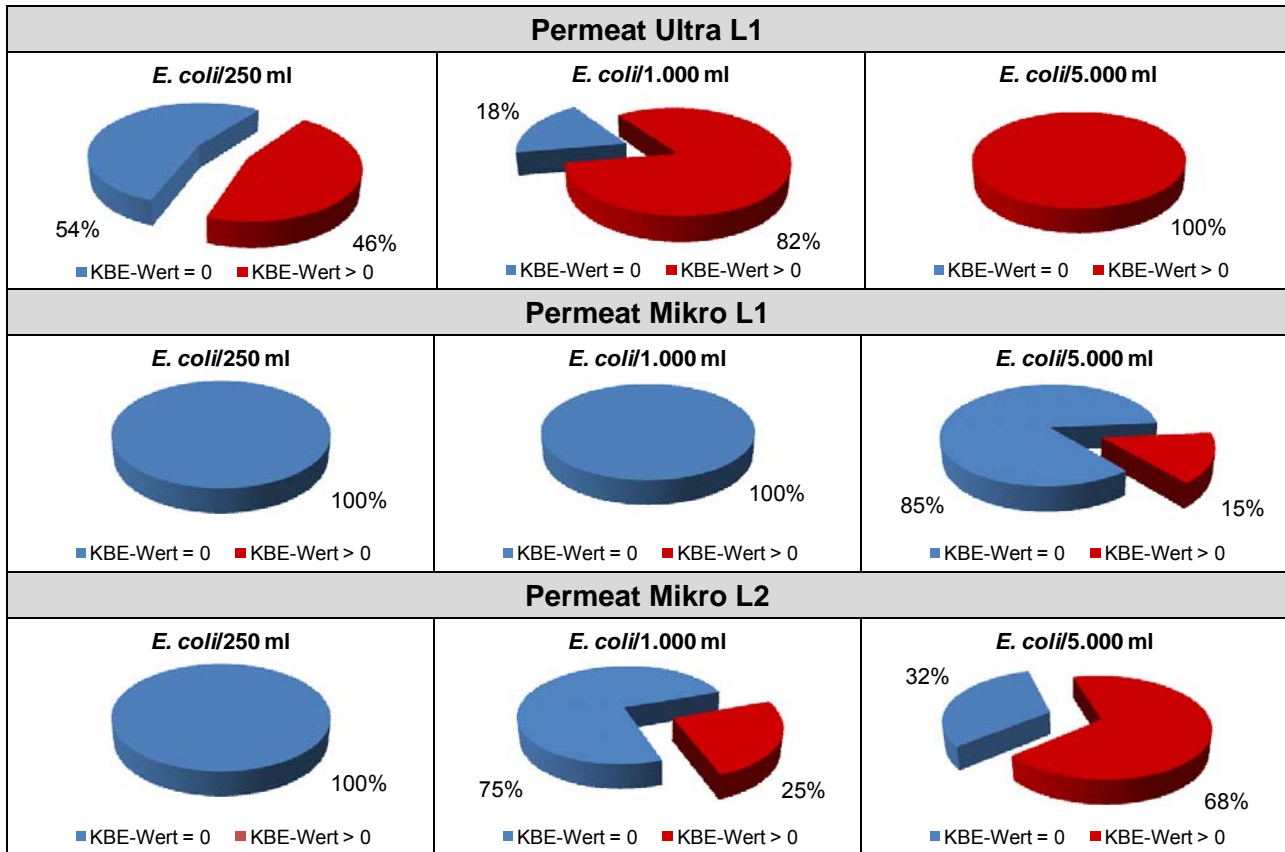


Abbildung 64 Prozentanteil positiver und negativer *E. coli*-Befunde im Permeat von Ultra L1, Mikro L1 und Mikro L2

Während beide Mikrofiltrationsmodule die Forderung – kein Nachweis von *E. coli* in 250 ml – einhielten und dies sogar zu 100 % (!), kam es in 46% der Untersuchungen des Permeats der Ultra L1 zu positiven Befunden mit Koloniezahlwerten zwischen 2 und 40 *E. coli* pro 250 ml. Es kann davon ausgegangen werden, dass dieses Untersuchungsergebnis mit dem in Kapitel 4.6 beschriebenen Ablöseeffekt in Zusammenhang steht. Als weiterer Grund für die mangelnde Filtrationsleistung der Ultra L1 ist anzuführen, dass es sich um ein von Hand gefertigtes Versuchsmodul gehandelt hat, bei dem keine optimale Permeatabdichtung vorlag, welche im Verlauf des Betriebs zu einer Undichtheit geführt hat. Auf Grund der Porengröße der Ultra L1 wäre ein effektiverer Rückhalt von *E. coli* zu erwarten gewesen.

Wird die Beobachtung auf ein Untersuchungsvolumen von 1.000 ml ausgedehnt, zeigt sich folgendes Ergebnis:

- * Mikro L1: 0% positive Befunde
- * Mikro L2: 25% positive Befunde mit Koloniezahlwerten zwischen 1 und 3

Wird ein Volumen von 5.000 ml als Beurteilungskriterium herangezogen, ergibt sich folgendes Bild:

- * Mikro L1: 15% positive Befunde
- * Mikro L2: 68% positive Befunde

Wird nur jener Zeitraum für die Bewertung herangezogen, in dem beide Mikrofiltrationsmodule in Betrieb waren (Untersuchungen von 22.10.2009 bis 02.02.2010) war das Ergebnis für *E. coli* wie folgt:

1.000 ml	5.000 ml
* Mikro L1: 0% positive Befunde	* Mikro L1: 15% positive Befunde
* Mikro L2: 0% positive Befunde	* Mikro L2: 46% positive Befunde

Das geringfügig bessere Abschneiden von Mikro L1 dürfte mit der besonderen Betriebsweise des Membranmoduls (keine Rückspülung!) in Zusammenhang stehen.

Ein anderes Ergebnis ergaben die Untersuchungen auf Coliforme (Abbildung 65). Mit Ausnahme von 250 ml Permeat der Mikro L2 waren immer Coliforme nachweisbar.

Der Grund für den hohen Prozentsatz positiver Coliformenbefunde – vor allem bei Mikro L1 – dürfte weniger auf eine mangelnde Reinigungsleistung dieses Membranmoduls zurückzuführen sein, als auf eine Verunreinigung in der Permeatlinie mit Coliformen. Wäre die Reinigungsleistung des Membranmoduls nicht ausreichend, müssten auch die im Abwasser stets in hoher Zahl vorhandenen *E. coli* und Enterokokken im Permeat in höherer Konzentration nachweisbar sein. Da eine Reinigung/Desinfektion oder ein Austausch der Permeatlinie zu einer unerwünschten Unterbrechung im Beprobungsablauf geführt hätte, muss eine Ursachenabklärung offen bleiben. Es sei in diesem Zusammenhang jedoch darauf hingewiesen, dass es sich bei den Coliformen um einen Indikatorparameter handelt, der geringere hygienische Relevanz besitzt als die stets ausreichend aus dem Abwasser entfernten *E. coli* und Enterokokken.

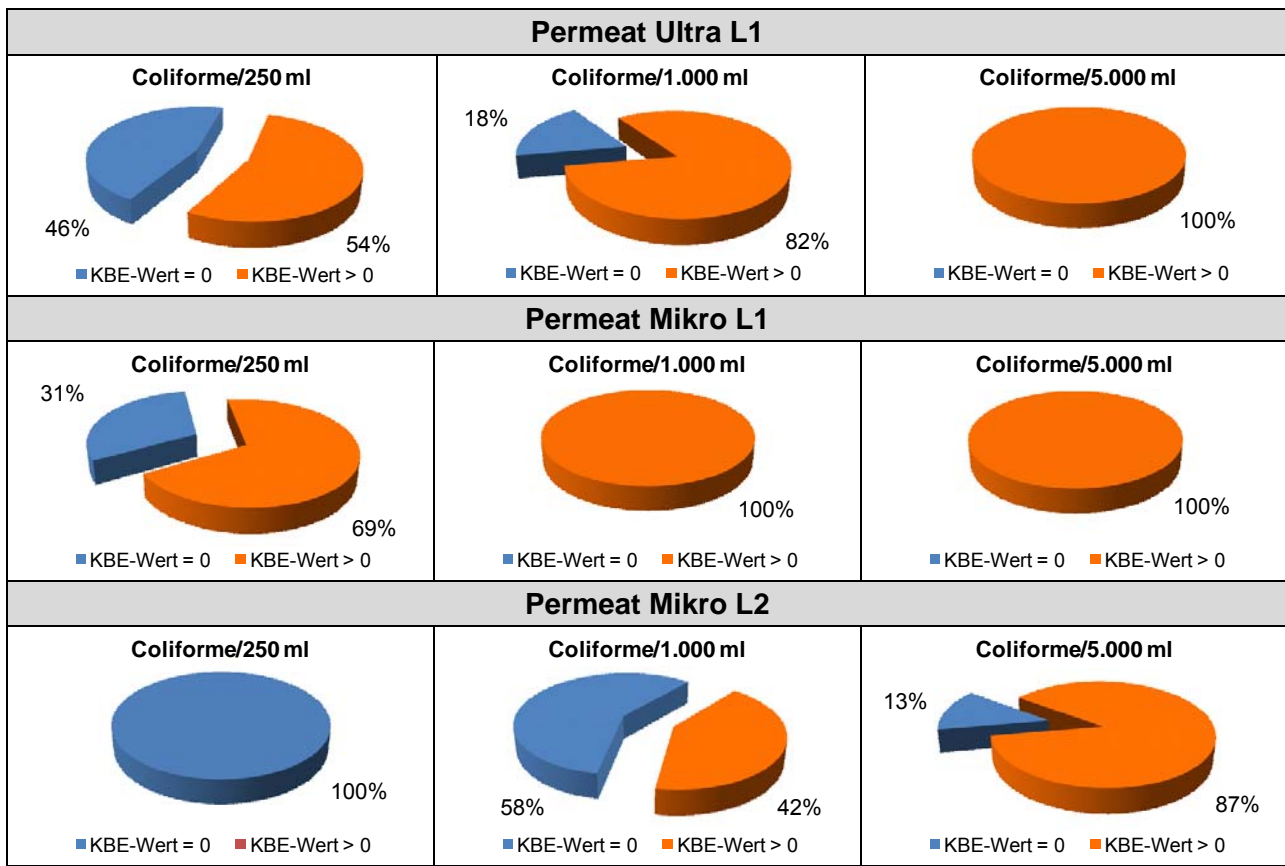


Abbildung 65 Prozentanteil positiver und negativer Coliformen-Befunde im Permeat von Ultra L1, Mikro L1 und Mikro L2

Die Untersuchungen auf Enterokokken (Abbildung 66) zeigen ein Bild, das mit den Ergebnissen der *E. coli*-Untersuchungen weitgehend deckungsgleich ist.

Positive Enterokokken Befunde in 250 ml Permeat der Ultra L1 (Koloniezahlwerten zwischen 1 und 95) waren in 46% der Fälle zu beobachten, und negative Befunde bei beiden Mikrofiltrationsmodulen. Im Untersuchungsvolumen von 1.000 ml waren bei der Mikro L1 keine Enterokokken nachweisbar, bei der Mikro L2 wurde dreimal (15%) eine Koloniebildende Einheit nachgewiesen. Im gegenständlichen Fall waren sogar 5.000 ml Permeat der Mikro L1 frei von Enterokokken.

Wird nur jener Zeitraum für die Bewertung herangezogen, in dem beide Mikrofiltrationsmodule in Betrieb waren (Untersuchungen von 22.10.2009 bis 02.02.2010) war das Ergebnis wie folgt:

- | | |
|----------------------------------|----------------------------------|
| 1.000 ml | 5.000 ml |
| * Mikro L1: 0% positive Befunde | * Mikro L1: 0% positive Befunde |
| * Mikro L2: 11% positive Befunde | * Mikro L2: 44% positive Befunde |

Auch in diesem Fall dürfte das bessere Abschneiden von Mikro L1 mit der besonderen Form der Betriebsweise, bei der keine Rückspülung erfolgt, in Zusammenhang stehen.

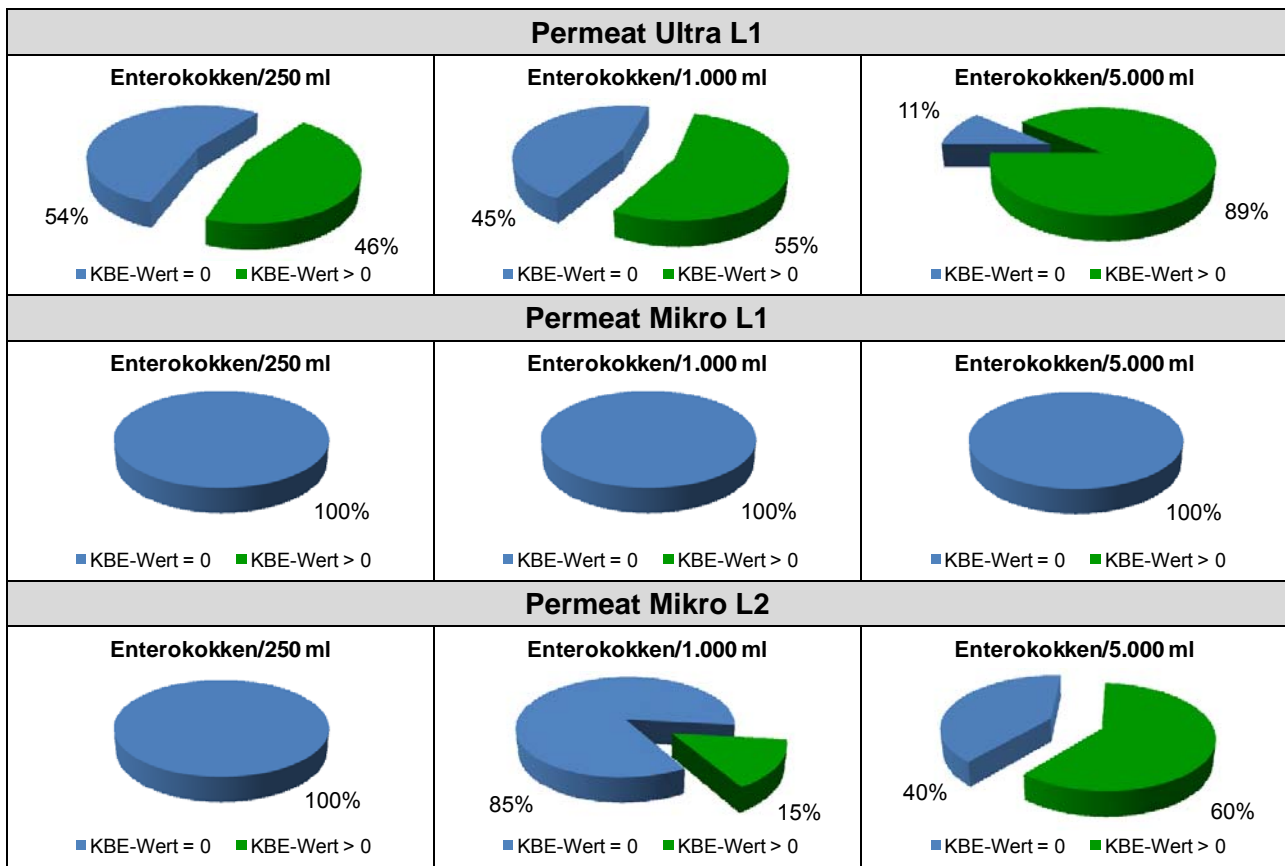


Abbildung 66 Prozentanteil positiver und negativer Enterokokken-Befunde im Permeat von Ultra L1, Mikro L1 und Mikro L2

Eine Auflistung aller Ablaufwerte findet sich in Tabelle 35 bis Tabelle 44 im Anhang (Kapitel 14.8). Eine Zusammenstellung der Minimum-, Maximum-, Mittel- und Medianwerte der im Permeat aller Membranmodule nachgewiesenen Fäkalbakterien zeigen Tabelle 45 bis Tabelle 47 im Anhang (Kapitel 14.8).

Ein Vergleich der Koloniezahlwerte (*E. coli*, Coliforme, Enterokokken) im Belebungsbecken mit denen der Abläufe zeigt, dass die natürlich im Belebungsbecken vorkommenden Fäkalbakterien zu einem hohen Prozentsatz durch den Filtrationsprozess zurückgehalten werden. Im Vergleich zur Ultra L1 zeigten Mikro L1 und Mikro L2 hinsichtlich *E. coli* höhere Rückhaltungen. Für Mikro L2 gilt die Einschränkung, dass in der Anfangsphase die Retentionen geringer waren und erst ab Mitte September 2009 höhere/stabilere Werte erreichte.

- * Ultra L1: log -3,55 bis log -6,08
- * Mikro L1: log -7,50 bis log -7,70
- * Mikro L2: log -5,24 bis log -6,52 (Anfangsphase), log -7,08 – log -7,45 (ab Mitte September 2009)

Als Bezugsvolumen wurden 5.000 ml Permeat herangezogen. Überall dort, wo das Untersuchungsergebnis den Wert von 0 aufwies, wurde die Retention als \geq angegeben. Wie bereits an anderer Stelle erwähnt, war die Untersuchung eines größeren Probenvolumens aus methodischen (Begleitflora) sowie betriebstechnischen Gründen (zur Verfügung stehende

Permeatmenge) nicht möglich. Sämtliche ermittelten Retentionen sind im Anhang in Tabelle 48 bis Tabelle 51 zusammengestellt.

Dass entgegen allen Erwartungen (PINNEKAMP, 2006) die Ultra L1 schlechtere Rückhalteraten aufwies als die beiden Mikrofiltrationsmodule, ist aller Wahrscheinlichkeit nach auf die händische Herstellung des Ultramembranmoduls (unzulängliche Permeatabdichtung) und die im Verlauf des Betriebs entstandene Undichtheit mit ihrer Folgewirkung (Kontamination der anschließenden Bauteile der Permeatlinie 1) zurückzuführen.

Bei Serienmodulen, die im Gegensatz zu Versuchsmodulen auf einer vollautomatischen, qualitätsgesicherten Fertigungsstraße hergestellt werden, ist von einer Langzeitstabilität für den Dauerbetrieb in kommerziellen Anlagen auszugehen. Schwachstellen können jedoch das Design, die Ausführung der Verbindungen sowie die Wartung des Membranmoduls und der Permeatleitung nach dem Einbau im laufenden Betrieb sein.

Am 02.02.2010 wurden die Koloniezahlwerte (KBE/ml) der Permeate von Mikro L1 und Mikro L2 untersucht. Wie der Tabelle 30 zu entnehmen ist, war der Ablauf der Mikro L1 durch höhere Koloniezahlen gekennzeichnet. Dieses Ergebnis deckt sich mit dem Ergebnis der Coliformen-Untersuchungen, bei dem ebenfalls der Ablauf von Mikro L1 eine höhere Belastung aufwies als der Ablauf von Mikro L2. In diesem Zusammenhang kann nicht ausgeschlossen werden, dass eine ungenügende Reinigung nach dem Austausch der Ultrafiltrationsmembran (Ultra L1), vor allem der Abzugspumpe der Permeatlinie 1, dafür verantwortlich zu machen ist.

Tabelle 30 Koloniezahlwerte der Permeate, Mikro L1 und Mikro L2.

Parameter	Mikro L1	Mikro L2
KBE/ml, 22°C	130	42
KBE/ml, 37°C	42	13
KBE/ml, R2A	1.000	750

Zur Ermittlung der Nährstoffsituation im Permeat wurden Bestimmungen des Wachstumspotentials durchgeführt (siehe Tabelle 31 anschließend und Tabelle 50 im Anhang).

Bei der Bestimmung des Wachstumspotentials (WP) für Koloniebildende Einheiten wird die Koloniezahl nach sieben Tagen Standzeit ermittelt (WRICKE et al., 2002). Um zu überprüfen in welchem Umfang Tendenzen zu Aufkeimungen vorliegen, werden Wasserproben in Parallelansätzen bei 10°C inkubiert. Die Beurteilung erfolgt an Hand eines Vergleichs der Ausgangskoloniezahl mit der Koloniezahl nach sieben Tagen Standzeit. Bei Werten ≤ 1.000 KBE/ml ist kein Wachstumspotential nachweisbar, Werte zwischen 1.001 KBE/ml und 10.000 KBE/ml sind ein Hinweis auf ein geringes bis mittleres Wachstumspotential und Werte von > 10.000 KBE/ml weisen auf ein hohes Wachstumspotential hin.

Tabelle 31 Wachstumspotential für Koloniebildende Einheiten, Permeat von Mikro L1 und Mikro L2.

Parameter	Mikro L1	Mikro L2
WP _{KBE-22°C}	hoch	hoch
WP _{KBE-37°C}	hoch	hoch
WP _{KBE-R2A}	hoch	hoch

Das Untersuchungsergebnis zeigt, dass im Permeat der beiden Membranmodule (Mikro L1 und Mikro L2) ein hohes Potential zur Aufkeimung vorhanden war. Dies weist darauf hin, dass eine für Mikroorganismen ausreichende Nährstoffmenge vorliegt. Während davon ausgegangen werden kann, dass Mikro- und Ultrafiltrationsmodule in der Lage sind Partikel und Mikroorganismen in hohem Maße zurückzuhalten, wird die Tendenz zur Wiederverkeimung durch den Filtrationsprozess nicht reduziert (KRAUSE et al., 2001).

Bei einer geplanten Versickerung des Permeats ist dieser Umstand zu berücksichtigen, da es zu Verkeimungen in den jeweiligen Rohrleitungen kommen kann. Technische oder naturnahe Systeme können dazu eingesetzt werden, um diese Effekte zu kontrollieren.

7.2.3 Testorganismen (Testvirus und Bakteriensporen)

In Tabelle 32 sind die Retentionen der beiden Testorganismen für Ultra L1 und Mikro L 2 über den gesamten Versuchszeitraum zusammengestellt. Die Werte stellen Mittelwerte aus jeweils 3 Untersuchungsserien (B, C, D) verteilt über einen Filtrationssubzyklus dar, die im 3-fach Ansatz analysiert wurden.

Tabelle 32 Retentionen (log N/No) der Ultra L1 und Mikro L2 von Bakteriensporen und dem Testvirus über die Versuchsdauer.

	Retention (log N/No)							Mittelwert	Stabw.
	20.10.2008	19.11.2008	03.02.2009	15.04. 2009	21.07. 2009	28.07. 2009	02.02. 2010		
Ultra L1									
Bakteriensporen (<i>B. subtilis</i>)	-5,29	-6,18	-6,64	-6,42	-4,98	-4,86	--	-5,73	0,78
Testvirus (MS2)	-3,43	-3,70	-3,60	-4,37	-1,45	-3,54	--	-3,35	0,99
Mikro L2									
Bakteriensporen (<i>B. subtilis</i>)	-5,49	-6,55	-6,95	-6,25	-6,85	-6,00	-7,33	-6,49	0,63
Testvirus (MS2)	-0,02	-1,47	-3,69	-3,17	-1,14	-2,04	-4,54	-2,30	1,58

Die höchste Rückhaltung $\log -6,49 \pm 0,63$ wurde für die Bakteriensporen bei der Mikro L2 erzielt, die Ultra L1 hielt Bakteriensporen im Ausmaß von $\log -5,73 \pm 0,78$ zurück. Die höhere Retention der Mikro L2 war überraschend, da die nominale Porenweite der Mikrofiltrationsmembran L2 (200 nm) fünfmal so groß wie jene der Ultrafiltrationsmembran L1 (40 nm) ist und somit der stärkere Eliminationseffekt bei der Ultra L1 zu erwarten wäre.

In allen Permeatabläufen waren Bakteriensporen nachweisbar. Dies belegt, dass die nominale Porenweite der Mikro- oder Ultrafiltrationsmembran nicht als absolutes Maß für die Abtrennung herangezogen werden kann. Die Größe der verwendeten Bakteriensporen betrug 1500 nm x 500 nm und war somit deutlich größer als die nominalen Porendurchmesser beider Membranen.

Wie aus Abbildung 68 und Abbildung 67 ersichtlich, erreichten beide Filtrationsprozesse über den gesamten Versuchszeitraum eine ziemlich konstante Retention für Bakteriensporen von zumindest $\log -4,86$.

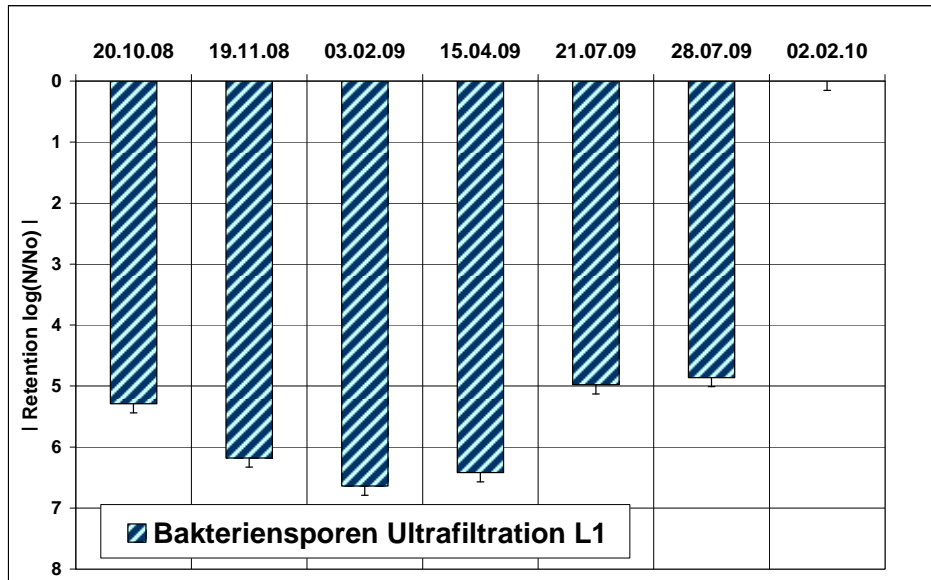


Abbildung 67 Retention (log N/No) der Bakteriensporen bei der Ultra L1 über die gesamte Versuchsdauer. Am 02.02.2010 war anstelle der Ultra L1 die Mikro L1 in Betrieb. Die Werte der Retention sind als absolute Beträge dargestellt.

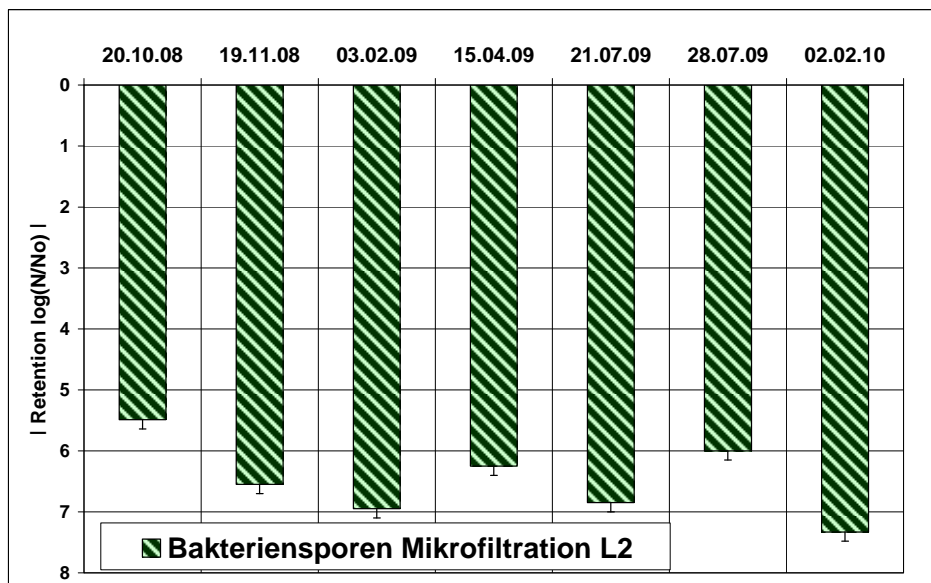


Abbildung 68 Retention (log N/No) der Bakteriensporen bei der Mikro L2 über die gesamte Versuchsdauer. Die Werte der Retention sind als absolute Beträge dargestellt.

Wie in Tabelle 32 dargestellt ergab sich bei der Retention des Testvirus (Bakteriophage MS2; Durchmesser 27 nm) ein ganz anderes Bild. Die Werte variierten viel stärker als bei den Bakteriensporen. Bei der Mikro L2 (siehe auch Abbildung 70) betrug der Mittelwert der Retention $\log -2,30 \pm 1,58$ wobei ein Minimumwert von $\log -0,02$ und ein Maximumwert von $\log -4,45$ auftraten. Hier erwies sich anscheinend die Ausbildung eines Biofilms als Deckschicht auf der Membranoberfläche oder innerhalb der keramischen Platten als besonders wichtig für die Rückhaltung, da das Testvirus lediglich eine Größe von 27 nm aufweist. Der Verlauf der Retention ist grafisch in Abbildung 70 dargestellt.

Die Retention des Testvirus bei der Ultra L1 (Abbildung 69) wies geringere Schwankungen auf. Eine Ausnahme bildete der Versuch vom 21.07.2009 als die Anlage wegen Verblockung

automatisch abschaltete, und der Flux für die weiteren Untersuchungen reduziert werden musste. Nach Reinigung der Membranen am 23.07.2009 wurden wieder vergleichbare Retentionen wie in der Untersuchungsphase vor der Reinigung erzielt. Der Mittelwert der Retention über den gesamten Versuchszeitraum betrug $\log -3,35 \pm 0,99$.

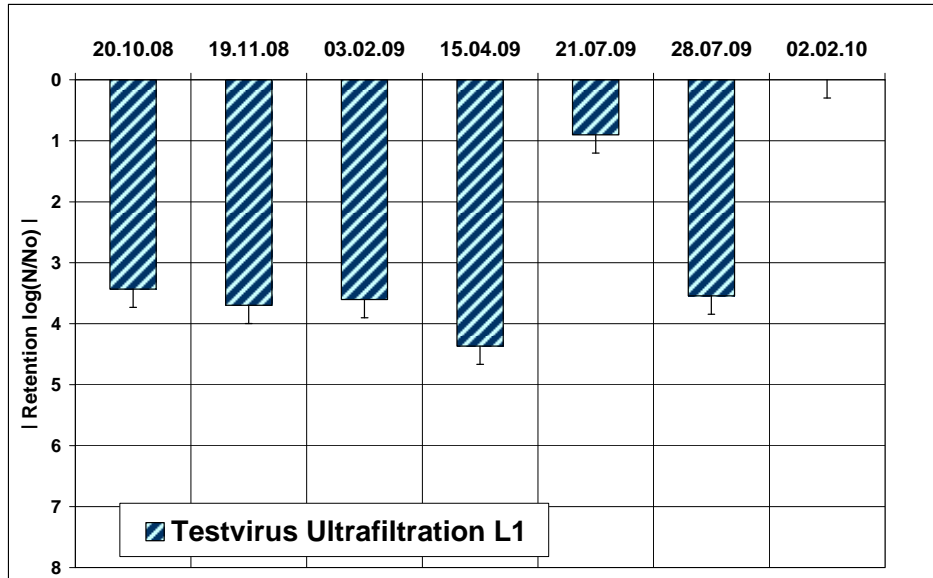


Abbildung 69 Retention (log N/No) des Testvirus bei der Ultra L1 über die gesamte Versuchsdauer. Am 02.02.2010 war anstelle der Ultra L1 die Mikro L1 in Betrieb. Die Werte der Retention sind als absolute Beträge dargestellt.

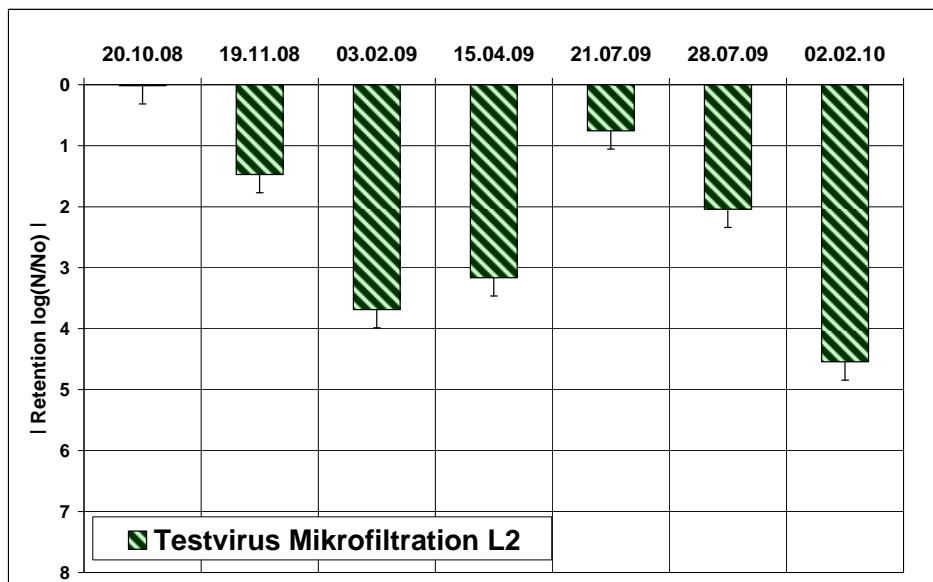


Abbildung 70 Retention (log N/No) des Testvirus bei der Mikro L2 über die gesamte Versuchsdauer. Die Werte der Retention sind als absolute Beträge dargestellt.

In der Literatur werden die unterschiedlichen Retentionen von Mikroorganismen durch physikalische Effekte (z.B. Reduktion der Porengröße), chemische Effekte (insbesondere Adsorption) und biologische Effekte erklärt (UEDA und HORAN, 1999). Der an den Membranen aufgebaute Biofilm hat dabei aber den größten Einfluss (SHANG et al., 2005; OTTOSON et al., 2006; HEISTADT et al., 2009).

Am 02.02.2010 wurde eine Vergleichsuntersuchung der beiden Mikrofiltrationsmembranen Mikro L1 und Mikro L2 durchgeführt. Die beiden Mikrofiltrationsmembranen ergaben die gleiche Retention für Bakteriensporen (Tabelle 33). Hinsichtlich der Retention des Testvirus wies die Mikro L2 einen deutlich höheren Wert (log -4,54) als die Mikro L1 (log -2,42) auf.

Eine Begründung könnte in der unterschiedlichen nominalen Porengröße liegen, die bei der Mikro L2 200 nm und bei der Mikro L1 400 nm beträgt. Es muss jedoch betont werden, dass es sich hierbei um den Vergleich an einem einzigen Tag handelt, die Ergebnisse also eine Momentaufnahme darstellten. Vergleicht man die an diesem Tag erhaltene Retention der Mikro L1 (log -2,42) mit den Ergebnissen der Verlaufsuntersuchung der Mikro L2 (Abbildung 70) zeigt sich, dass der Wert innerhalb der Bandbreite der Mikro L2 (Retention log -0,02 bis log -4,54) liegt. Für einen zuverlässigen Vergleich der beiden Mikrofiltrationsmembranen müsste daher ebenfalls eine Langzeituntersuchung durchgeführt werden.

Tabelle 33 Retentionen (log N/No) der Mikro L1 und Mikro L2 von Bakteriensporen und dem Testvirus am 02.02.2010. Die Werte stellen Mittelwerte aus jeweils 3 Untersuchungsserien (B, C, D) verteilt über einen Filtrationssubzyklus dar, die im 3-fach Ansatz analysiert wurden.

	<i>Retention (log N/No)</i>
	02.02.2010
Mikro L1	
Bakteriensporen (<i>B. subtilis</i>)	-7,31
Testvirus (MS2)	-2,42
Mikro L2	
Bakteriensporen (<i>B. subtilis</i>)	-7,33
Testvirus (MS2)	-4,54

7.3 Akut toxische und gentoxische Effekte

Die Voruntersuchungen ergaben, dass der Hauptteil der gentoxischen Belastungen der untersuchten Abwässer aus WC-Anlagen stammt. Dies zeigten sowohl die Ergebnisse der bakteriellen Tests als auch die Resultate, die mit den primären Leberzellen erhalten wurden. Die in den Bakterientests gefundenen "Richtcharakteristika" lassen weitere Schlussfolgerungen im Hinblick auf die chemische Struktur der Substanzen zu, die diese Effekte verursachen.

Wie erwähnt, wurde nach der Anreicherung im Rotavapor in TA98 nach der Zugabe von S9 ein deutlicher Effekt gefunden. In Experimenten mit „Blue Cotton“ wurde ein leichter Anstieg in dem Bakterienstamm YG1024 detektiert. Bei diesem Stamm handelt es sich um ein Derivat der TA98, der keine N-Acetyleraseaktivität besitzt. Diese Befunde deuten darauf hin, dass die Ursachen der Belastungen der Wässer durch heterozyklische aromatische Amine bedingt sein könnten. Diese Substanzen lösen in geringerem Ausmaß in TA98 und sehr deutlich in YG1024 eine Leserasterverschiebung aus. Diese Verbindungen entstehen durch Zubereitung von Fleisch, und sind auch in Harn und Stuhl enthalten (SKOG und ALEXANDER, 2006) wobei deren kanzerogene Eigenschaften in Tierstudien bewiesen worden sind. In humanen Fäzes wurden auch andere Mutagene nachgewiesen z.B. Fekapentaene. Diese Substanzen wirken in Bakterien Tests direkt aktiv (ohne Zugabe von S9).

Die positiven Ergebnisse der Untersuchung mit Leberzellen zeigen, dass auch die in den vorliegenden Wasserproben enthaltenen Substanzen eine gentoxische Wirkung auf diese Indikatorzellen zeigen.

Die Resultate der Experimente mit den verschiedenen Membranmodulen zeigen, dass sowohl in den Experimenten mit den Bakterien als auch mit den Hepatozyten eine Abnahme der gentoxischen Effekte feststellbar ist.

Es ist allerdings bemerkenswert, dass zwischen Ultrafiltration und Mikrofiltration kein großer Unterschied in der Effizienz der Reduktion der Mutagenität feststellbar war.

8 Kosten für Membranbelebungsanlagen sowie deren Vergleich mit konventionellen Abwasserreinigungsanlagen

8.1 Allgemeines

In Österreich gibt es bzgl. Kleinkläranlagen < 50 EW nur wenig relevante Richtlinien. Einerseits gibt es für konventionelle vor Ort hergestellte Anlagen die ÖNORM B 2502-1 (2007) bzw. ÖNORM EN 12566-3 (2009), andererseits für bepflanzte Bodenfilter die ÖNORM B 2505 (2009). Da der heimische Markt trotz mancher Prognosen verschiedener Hersteller sehr klein ist, gibt es wenig nationale Hersteller. Viele heimische Anbieter beziehen daher die hier angebotenen technischen Kleinkläranlagen (KKA) aus dem Ausland, mit dem Schwerpunkt Deutschland.

Die derzeit stattfindende Diskussion mit Kennzeichnung und Prüfzeichen für KKA ist sehr verwirrend und veranlasst manche(n) Betroffene(n) zu einem distanzierten Verhalten bzgl. der Anschaffung einer entsprechenden KKA. Weiters ist die unterschiedliche Akzeptanz der zuständigen Behörden in den jeweiligen Bundesländern in Bezug auf die gewünschte Entsorgungsstruktur (dezentral / semizentral / zentral) in der Anzahl der Bewilligungen deutlich zu sehen.

Dies alles macht eine Kostenermittlung nicht leicht. Um die Ergebnisse von einigen Unwägbarkeiten zu entkoppeln wurde daher beschlossen, gewisse Kostenfaktoren nicht zu berücksichtigen. Das waren unter anderem Lieferkosten, Planungskosten und Kanalerrichtungskosten am Grundstück zur KKA.

8.2 Kostenermittlung

Es wurden aktuelle Preise aus dem Jahr 2009 von Herstellern, Vertriebspartnern und Technischen Büros für mehrere Typen von Kleinkläranlagen erhoben. Da für manche Anlagentypen zu wenige Daten vorlagen, wurden diese für die weitere Betrachtung des Kostenvergleichs ausgeschlossen. Alle Anlagen sind in der Lage, die geforderten Ablaufgrenzwerte laut ÖNORM B 2502-1 (2007) einzuhalten.

Aus diesem Grund kommt es bei der Auswertung nur zu einer Darstellung folgender Verfahren:

- *Belebungsanlagen mit Aufstaubetrieb (SBR - Sequencing Batch Reactor)*
- *Membranbioreaktor (MBR)*
- *Belebungsanlage im Durchlaufprinzip (BB+NKB)*
- *Bepflanzter Bodenfilter (BBF)*

Im Rahmen der Kostenermittlung wurde nach den Investitionskosten/Reinvestitionskosten und laufenden Kosten für Betrieb und Unterhaltung unterschieden.

- Investitionskosten: Investitionskosten sind einmalig aufzuwendende Kosten, die zur Erstellung der funktionstüchtigen Anlage, allenfalls zum Erwerb von Grundstücken, erforderlich sind.
- Reinvestitionskosten: Den Anlagenteilen ist eine durchschnittliche Nutzungsdauer zuzuordnen. Dies ist zur Bestimmung der Reinvestitionskosten für jene Anlagenteile notwendig, die während der Nutzungsdauer der Gesamtanlage zu ersetzen sind.
- Betriebskosten: Sind die für den Betrieb, Wartung, Instandhaltung und Überwachung von Anlagen erforderlichen finanziellen Aufwendungen. Wesentlichen Anteil daran haben Personal, Energie und Betriebsmittel.
- Gesamtkosten: Für den Vergleich der Kosten werden die spezifischen Jahreskosten herangezogen. Die Errichtungs- und Reinvestitionskosten werden dazu mittels Umrechnungsfaktoren, die sich aus der Lebensdauer und einem angenommenen volkswirtschaftlichen Zinssatz ergeben, in Jahreskosten umgerechnet.

In die Gesamtkosten gehen üblicherweise Kosten für weitere Ausstattungsteile bzw. Baumeistertätigkeiten der Kleinkläranlage ein, v.a. Aushub und Versatz sowie Zu- und Ableitung durch Kanalrohre. Diese Kostenanteile wurden bewusst nicht in die Kostenermittlung integriert, da sie stark von den örtlichen Verhältnissen (Bodenstruktur, Hanglage, Anlieferungsmöglichkeit, etc.), aber auch von der Höhe der Eigenleistung abhängen, die von dem/der Betreiber/in erbracht werden kann.

8.3 Vergleich verschiedener Kleinkläranlagensysteme

Im Rahmen dieses Projekts wurden für die **spezifischen Investitionskosten** nur die Nettoanschaffungskosten der Komplettanlage berücksichtigt. Kleinkläranlagen werden zumeist vorgefertigt und komplett angeboten. Falls statt einer Komplettanlage nur ein Nachrüstsatz angeboten wurde, wurden Marktpreise für Schächte aus Beton in monolithischer Bauweise ermittelt. Ab 20 EW werden dazu üblicherweise zwei Schächte benötigt. Wenn ein Hersteller mehrere Schachtmaterialien für eine Komplettanlage anbietet, wurde die günstigste Bauart verwendet.

Für die **spezifischen Betriebskosten** wurden folgende Kostenfaktoren berücksichtigt:

Wartungsvertrag

Der Wartungsvertrag umfasst die Funktionskontrolle der eingebauten Aggregate und aller Anlagenfunktionen, sowie die Probenahme und Analyse der Ablaufwerte durch ein Labor (Fremdüberwachung).

Die Standzeiten der in kommunalen Belebungsanlagen eingesetzten Membranen sind zum gegenwärtigen Zeitpunkt noch sehr schwer einschätzbar. Die Angaben der Hersteller reichen, je nach Verfahren, bis zu acht Jahren, wobei diese Angaben jedoch skeptisch zu betrachten sind. Eine Lebensdauer von 5 Jahren ist wohl eher als realistisch anzunehmen. Alle Hersteller von Membrananlagen als Komplettanlage oder Nachrüstsatz bieten entsprechende Wartungsverträge an. Im Rahmen dieser Wartungsverträge werden üblicherweise die Membranmodule ein Mal pro Jahr gegen regenerierte (gereinigte) oder neue Module ausgetauscht, wobei die Häufigkeit des Membranwechsels prinzipiell von der Abwassermenge und -qualität abhängig ist.

Ein Membranmodul für eine 4-5 EW Anlage kostet zwischen 600 € und 1200 €. Die Preisspanne reichte bei den Wartungsverträgen für die Systeme SBR sowie BB+NKB und BBF von 200 € (5 EW) bis 300 € (20 EW). Bei MBR-Anlagen kann man ungefähr mit den doppelten Kosten rechnen.

Energiekosten

Man kann davon ausgehen, dass nicht verbrauchsabhängige Kosten (Netznutzung, Energie-Grundpreis, etc) bei Anlagen < 10 EW vom Eigentümer der zu entsorgenden Liegenschaft bezahlt werden. Semizentrale Anlagen müssten aber mit einem eigenen Stromanschluss versorgt werden, was die Gesamtkosten erhöht. Als Energiekosten wurden dementsprechend 0,18 €/kWh angenommen. Der Stromanteil für die Steuerung ist meist vernachlässigbar.

Schlamm Entsorgung

Der Schlammfall ist zwar je nach Reinigungsverfahren unterschiedlich, doch nur beim Membranbioreaktor, durch das hohe Schlammalter, wirkt sich dieser Kostenfaktor aus. Es wurde mit Entsorgungskosten von 17 €/m³ gerechnet.

Der Aufwand für die Eigenüberwachung blieb unberücksichtigt, da man davon ausgehen muss, dass dieser bei allen Anlagensystemen ähnlich strukturiert ist. Nur dadurch ist gewährleistet, dass die verwendete KKA ordnungsgemäß funktioniert und die behördlichen Vorschriften einhält.

Es wurde bei der Betrachtung von einer 25-jährigen Nutzungsdauer der Anlagen ausgegangen. **Reinvestitionskosten** sind Kosten für Anlagenteile die vor Ablauf der angenommenen 25 Jahre ausgetauscht werden müssen. Zu diesen Anlagenteilen gehören: Belüfter, Filtratpumpe, Ventile, Verdichter, Überschussschlammpumpe, Kompressorverschleißteile, Elektronik für die Steuerung, etc.

Die Reinvestitionskosten wurden wie die Investitionskosten mit einem Zinssatz von 6,5% auf die gesamte Betrachtungszeit versehen, da die verfügbaren Quellen von heutigen Marktpreisen ausgehen. Dies ist zwar nicht ganz korrekt, spiegelt jedoch die Tatsache wider, dass die Preise von Dienstleistungen und Waren im Vergleich zum heutigen Niveau zukünftig steigen. Ein dynamisches Ermittlungsverfahren der heutigen Kapitalwerte für den Status „zum Zeitpunkt des Vergleichs“ wurde wegen des hohen Aufwands zur Datenbeschaffung nicht durchgeführt.

In Abbildung 71 sind die unverzinsten spezifischen Investitionskosten der vier ausgewerteten KKA-Systeme graphisch dargestellt. Es wurden Daten von jeweils mehreren Herstellern bzw. Anbietern bei den verschiedenen Anschlussgrößen verwendet.

Bei Vergleich dieser Kosten ist festzustellen, dass weniger gebräuchliche KKA-Systeme mit einer Höchstgrenze von 1500 €/EW bei kleinen Anschlussgrößen angeboten werden, sogar die MBR-Anlagen. Dies ist darauf zurückzuführen, dass man sich bei der Kalkulation der Preise an den maximalen üblichen Marktpreisen orientiert. Interessant dabei ist, dass die sehr häufig anzutreffenden SBR-Systeme teilweise mit bis zu 2000 €/EW verkauft werden. Bei den Herstellern von SBR-Anlagen dürfte sich durch die große Anzahl an Anbietern am Markt eine größere Kostenbandbreite entwickelt haben.

Die folgende Abnahme der spezifischen Investitionskosten bei größeren Anlagen ist bei allen 4 Systemen deutlich ausgeprägt.

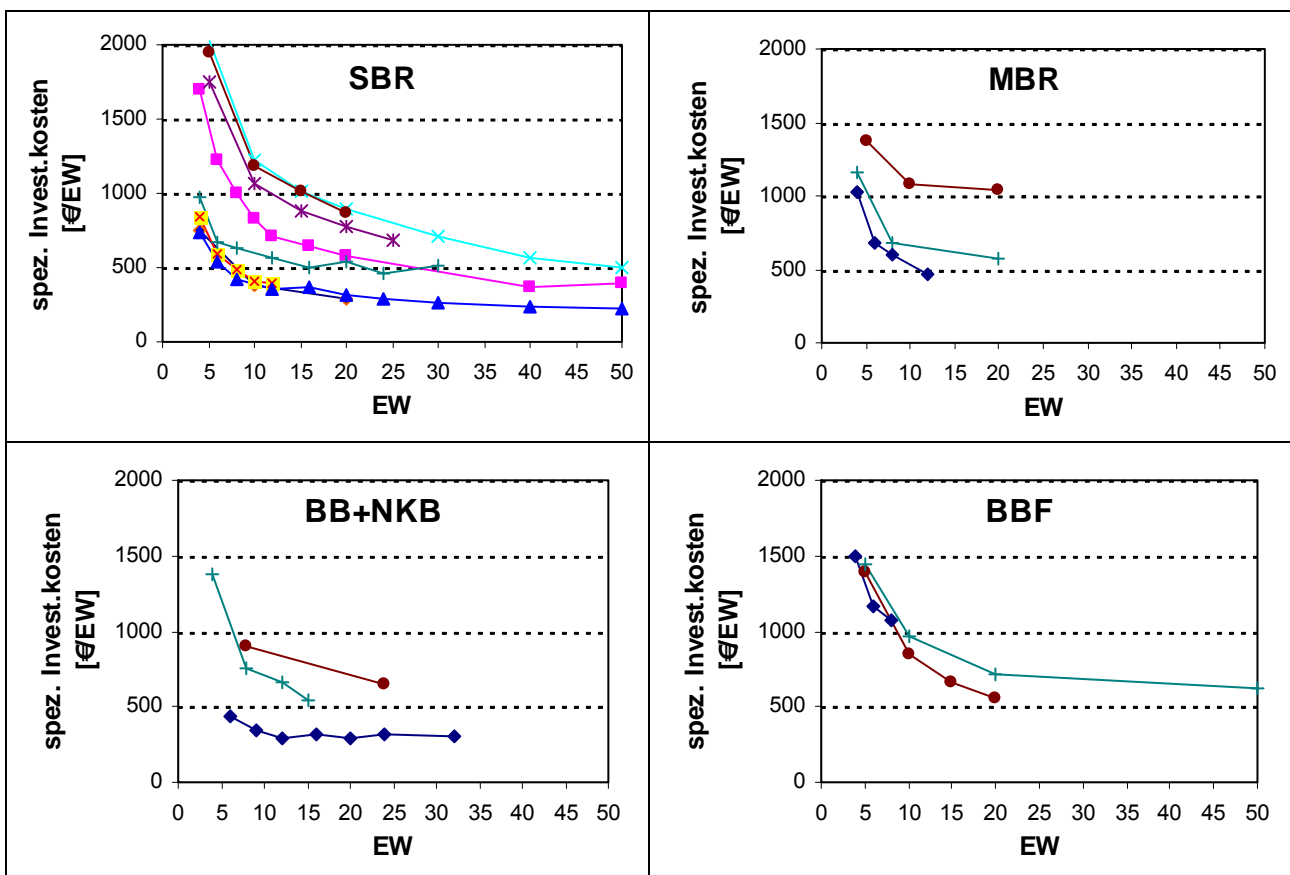


Abbildung 71 Spezifische Investitionskosten (unverzinst) verschiedener Anlagentypen für Kleinkläranlagen bis 50 EW.

Die spezifischen Betriebskosten wurden aus Mangel an Daten > 20 EW nur bis zu einer Ausbaugröße von 20 EW betrachtet. Wie in Tabelle 34 erkennbar, ist dasselbe degressive Verhalten wie bei den spezifischen Investitionskosten feststellbar. Die spezifischen Betriebskosten pro Jahr belaufen sich z.B. bei einer MBR von 78 €/(EW.a) bei einer 20 EW-Anlage und bis zu 130 €/(EW.a) bei einer 5 EW-Anlage. Das System Bepflanzter Bodenfilter hat die geringsten Betriebskosten.

Tabelle 34 Zusammenstellung der Kostenanteile verschiedener KKA-Systeme bei einer 25-jährigen Nutzung (alle Kosten sind Nettokosten).

EW-Wert	Investkosten	spez. Investkosten	spez. Betriebskosten pro Jahr	Reinvestitionskosten bei 25 Jahren Nutzung	Investitionskosten pro Jahr	Betriebskosten pro Jahr	Reinvestitionskosten pro Jahr	Jahreskosten	spez. Jahreskosten	KKA-System
EW	€	€/EW	€/(EW.a)	€	€/a	€/a	€/a	€/a	€/(EW.a)	
Zahlen sind Durchschnittswerte					verzinst	--	verzinst	--	--	
4 bis 6	3964	912	74	2600	258	297	169	728	145	SBR
8 bis 12	6024	602	38	2950	392	379	192	972	96	
20	10674	534	24	3600	694	480	234	1422	70	
4 bis 6	4660	1165	130	2000	303	518	130	964	190	MBR
8 bis 12	5100	680	93	1860	332	691	121	1162	114	
20	11460	573	78	3000	745	934	195	1907	94	
4 bis 6	4050	904	75	2000	263	301	130	700	139	BB+NKB
8 bis 12	4053	405	38	3000	263	329	195	796	79	
20	5913	296	27	3750	384	477	244	1125	55	
4 bis 6	6950	1440	49	1000	452	247	65	764	153	BBF
8 bis 12	8600	965	33	1000	559	327	65	951	95	
20	12775	639	23	2000	830	452	130	1413	71	

Bei Vergleich der spezifischen Jahreskosten zeigt sich deutlich, dass das System Membranbioreaktor (MBR) die höchsten Kosten aufweist; von 94 €/EW.a bei einer 20 EW-Anlage bis zu 190 €/EW.a bei einer 5 EW-Anlage. Ein großer Kostenfaktor ist, wie zu erwarten war, der Stromverbrauch durch die Verdichter für die Crossflow-Belüfter und die Permeatabzugspumpen. Alle drei weiteren betrachteten Systeme wie Bepflanzter Bodenfilter (BBF), Belebungsanlage im Durchlaufprinzip (BB+NKB) und Belebungsanlage mit Aufstauprinzip (SBR) haben spezifische Jahreskosten in ähnlicher Höhe.

Hinweis zum Betrieb einer MBR-Anlage: Wird die Crossflow-Belüftung der Membranen bemessungsseitig zur Deckung des Sauerstoffbedarfes mit berücksichtigt, so ist dies durch den Planer unter Berücksichtigung der Einbausituation sowie der Lastfälle gesondert nachzuweisen (DWA, 2005).

Falls die Anordnung der Membranen im System intern (wie bei der hier verwendeten und beschriebenen SBMBR-Versuchsanlage) erfolgt, kann dieser Sauerstoffeintrag zur Reduzierung der Betriebskosten angesetzt werden. Im anderen Fall, durch eine Bypassführung des Schlamm/Abwassergemisches in einen extra Tank, fallen höhere Betriebskosten durch die Belüftung an. Für die Installation der Membranen in den Nitrifikationsbecken wird von Krause und Cornel (2003) eine mittlere Energieeinsparung in Höhe von 15% genannt.

9 Zusammenfassung

Trotz mehrfach beschriebener guter mikrobiologischer Reinigungsleistung von Membranbelebungsanlagen besteht noch eine Reihe von offenen Fragen, die sich im Wesentlichen auf das Ausmaß und die Beständigkeit der Reinigungsleistung derartiger Anlagen beziehen. Die Zielsetzungen des gegenständlichen Projektes waren:

1. Zu überprüfen ob und inwieweit mit Membranverfahren eine befriedigende Reinigung von Abwasser längerfristig möglich ist. Dabei sollen zwei Gesichtspunkte untersucht werden, einerseits die Verbesserung der mikrobiologisch-hygienischen Qualität, andererseits die Entfernung gentoxischer/akut toxischer Substanzen.
2. Die Leistungsfähigkeit von Membranbelebungsanlagen in Hinblick auf die Entfernung von wasserhygienisch relevanten Mikroorganismen (Indikatorbakterien und Testorganismen) zu ermitteln.
3. Untersuchungen zur Entfernung gentoxischer und akut toxischer Effekte von Substanzen durch Belebtschlamm, der ein hohes Schlammalter aufweist.
4. Die Untersuchung verschiedener Membranverfahren und zwar Mikrofiltration und Ultrafiltration.
5. Den zeitlichen Verlauf der Reinigungsleistung in Hinblick auf den Membranzklus zu untersuchen.
6. Die Ermittlung der Kosten für Membranverfahren sowie einen Vergleich mit konventionellen Abwasserreinigungssystemen durchzuführen.

Betrieb der Versuchsanlage

Das Belebungsbecken wurde als batchweise beschickter MBR-Reaktor - kurz SBMBR - betrieben. Die Anlage ging Ende Oktober 2008 in Betrieb.

Am Anfang des Betriebs waren eine Ultrafiltrationsmembran (Ultra L1 mit 40 nm nominaler Porenweite) und eine Mikrofiltrationsmembran (Mikro L2 mit 200 nm nominaler Porenweite) eingesetzt. Der Beginn der Einfahrphase war geprägt durch eine intensive Belüftung und kurzen Intervallen zwischen den Beschickungen. Durch die zu diesem Zeitpunkt gewählte Betriebsweise kam es zu Problemen. Nach Umstellung der Intervallzeiten Anfang bis Mitte Februar 2009 wurden stabile Verhältnisse erreicht. Der anschließende Vollbetrieb lief ohne weitere Probleme bis Mitte Februar 2010. Die Anlage war somit 3 Monate in der Einfahrphase und 12 Monate im Vollbetrieb.

Nachdem im Permeat des Ultrafiltrationsmoduls Fäkalbakterien feststellbar waren, wurde dieses durch ein Modul gleicher Bauart ersetzt. Als die Untersuchungen kurze Zeit später ähnliche Ergebnisse zeigten wie beim ausgetauschten Modul, wurde dieser Modultyp entfernt. An dessen Stelle wurde Anfang Oktober 2009 eine zweite Mikrofiltrationsmembran (Mikro L1) in den Reaktor eingebracht. Die mangelnde Filtrationsleistung der Ultra L1 kann damit begründet werden, dass ein händisch hergestelltes Versuchsmodul zum Einsatz kam, bei dem die Permeatabdichtung nicht optimal ausgeführt wurde, wodurch im Laufe des Betriebs eine Undichtheit auftrat.

Die Versuchsanlage wurde über den gesamten Zeitraum mit steigender hydraulischer Belastung betrieben. Dadurch ergeben sich, auch über die Zeit ansteigende EW-Belastungen bzgl. BSB₅ (EW₆₀) und CSB (EW₁₂₀).

Die nach ÖNORM B 2502-1 (2007) geforderten chemischen Reinigungsziele für Kleinkläranlagen bis 50 Einwohnerwerte wurden während des Vollbetriebs zu jeder Zeit problemlos eingehalten. Während der Einfahrphase waren nur bei 2 Probenahmen die NH₄-N-Ablaufkonzentrationen über dem erlaubten Grenzwert.

Üblicherweise wird von den meisten Membranherstellern empfohlen, kleinere Reinigungen mit automatisierten Abläufen in kurzen Intervallen in-situ durchzuführen, anstatt große Intensivreinigungen z.B. alle 6 Monate ex-situ vorzunehmen. Im gegenständlichen Forschungsprojekt wurde bewusst auf eine in-situ-Reinigung verzichtet, da verhindert werden sollte, dass es zu einer Beeinflussung der Mikroorganismen im Reaktor durch die eingebrachten Chemikalien kommt. Aus diesem Grund wurde bei Bedarf immer eine ex-situ-Reinigung durchgeführt.

Die Gesamtkosten der betriebsfertigen Versuchsanlage betrugen EUR 74.621,- (Brutto), wobei sich diese in EUR 42.652,- für Material- und Gerätekosten sowie EUR 31.969,- für Personalkosten (Konzepterstellung+Aufbau+Programmierung) aufteilen.

Durchführung der Versuche

Der gesamte Betrachtungszeitraum für alle Untersuchungen war von Ende Oktober 2008 bis Mitte Februar 2010.

Die Proben für die chemischen Untersuchungen wurden als Schöpfproben aus dem Vorlagetank und dem Reaktor gezogen. Die Probenahme im Vorlagetank (= Zulauf) wurde während der Befüllung des Belebungsbeckens mit frischem Abwasser durchgeführt. Die Probenahme für die Schlammuntersuchungen wurden während einer Belüftungsphase des Reaktors zirka in der Mitte der zu erwartenden Dauer für die Filtrationsphase gezogen. Die gemessene Trockensubstanz wurde für die nachfolgenden Interpretationen immer auf einen vollgefüllten Reaktor bezogen.

Bei der mikrobiologischen Standardbeprobung (Monitoringprogramm) wurden Proben von „BB mittig“ (seitlicher Probenahmeahn auf halber Höhe des Reaktors) sowie „Linie 1“ und „Linie 2“ (Filtratablauf nach der jeweiligen Permeatpumpe) gezogen.

Während der mikrobiologischen Intensivbeprobung mit Zudosierung der Testorganismen wurden Proben an fünf Probenahmestellen gezogen. Diese waren: „BB oben“ (Reaktor von oben mittels Schöpfprobe), „BB mittig“ (seitlicher Probenahmeahn auf halber Höhe des Reaktors) und „BB unten“ (unterer Probenahmeahn, Bodenablauf des Reaktors) sowie „Linie 1“ und „Linie 2“ (Filtratablauf nach der jeweiligen Permeatpumpe).

Es wurde angestrebt, die Proben für das Modul „Akut toxische und gentoxische Effekte“ zu ähnlichen Zeiten die für das mikrobiologische Untersuchungsprogramm zu entnehmen. Aufgrund der Komplexität der Untersuchungen konnte jedoch nicht an allen Termine gleichzeitig beprobt werden.

Mikrobiologisches Versuchsprogramm

Ein Vergleich der Zulauf- (Belebungsbecken) mit den Ablaufwerten (Permeat) der jeweiligen Membranmodule zeigt, dass diese in der Lage sind die im Belebungsbecken vorhandenen, natürlich vorkommenden Fäkalbakterien durch den Filtrationsprozess in unterschiedlichem Ausmaß zurückzuhalten. Um eine möglichst umfassende Aussage treffen zu können wurden bis zu 5.000 ml des Permeats untersucht.

Die geforderte Ablaufqualität von 0 *E. coli* pro 250 ml in 95 % der untersuchten Fälle, wurde nur von den beiden Mikrofiltrationsmodulen eingehalten bzw. mit 100 % negativen Befunden sogar überboten. Bei Mikro L1 war auch in einem Untersuchungsvolumen von 1.000 ml in keinem Fall *E. coli* nachweisbar.

Wird die Untersuchung auf den Fäkalparameter Enterokokken ausgedehnt, zeigt sich ein ähnliches Bild: eine unzureichende Ablaufqualität bei Ultra L1 sowie kein Enterokokken-Nachweis in 250 ml im Permeat beider Mikrofiltrationsmodule. Darüber hinaus ergaben auch Untersuchungen von 1.000 ml und 5.000 ml Permeat der Mikro L1 stets einen negativen Enterokokken-Befund.

Die zumeist bessere Ablaufqualität von Mikro L1 dürfte nicht zu sehr in der höheren Reinigungsleistung des entsprechenden Membranmoduls zu suchen sein, sondern mit der besonderen Art der Betriebsweise (keine Rückspülung) in Zusammenhang stehen.

Beim Indikatorparameter Coliforme wies der Ablauf von Mikro L1 eine höhere Belastung auf als der Ablauf von Mikro L2. Der Grund dürfte weniger auf eine mangelnde Reinigungsleistung dieses Membranmoduls zurückzuführen sein, als auf eine Verunreinigung der Permeatlinie mit dieser Gruppe von Bakterien. Wäre die Reinigungsleistung des Membranmoduls nicht ausreichend, müssten auch *E. coli* und Enterokokken, die im Abwasser stets in hoher Zahl vorhanden sind, im Permeat in höherer Konzentration nachweisbar sein. Da im gegenständlichen Fall eine Reinigung/Desinfektion oder ein Austausch der Permeatlinie zu einer unerwünschten Unterbrechung im Beprobungsverlauf geführt hätte, muss eine Ursachenabklärung offen bleiben. Es sei in diesem Zusammenhang jedoch darauf hingewiesen, dass es sich bei den Coliformen um einen Indikatorparameter handelt, der geringere hygienische Relevanz besitzt als die stets ausreichend aus dem Abwasser entfernten *E. coli* und Enterokokken. Durchgeführte Bestimmungen des Indikatorparameters Koloniezahl pro Milliliter fügen sich in dieses Bild ein.

Dass entgegen aller Erwartung (PINNEKAMP, 2006) das Ultrafiltrationsmodul (Ultra L1) schlechtere Rückhalteraten für Mikroorganismen aufwies als die beiden Mikrofiltrationsmodule (Mikro L1, Mikro L2) steht aller Wahrscheinlichkeit nach in ursächlichem Zusammenhang mit der unzulänglich durchgeführten Permeatabdichtung, die ihrerseits mit der Art der Membranherstellung (händische Ausfertigung) in Verbindung zu bringen ist. Auf Grund der erwähnten mangelhaften Permeatabdichtung kam es im Verlauf des Betriebs zu Undichtheiten, die zu den schlechten mikrobiologischen Ablaufwerten führten. Ergänzend sei darauf hingewiesen, dass es sich im gegenständlichen Fall um einen Störeffekt gehandelt hat, dessen Ursache mit den spezifischen Gegebenheiten bei der Herstellung eines Versuchsmoduls zu begründen ist. Bei einer qualitätsgesicherten, vollautomatischen Fertigung, wie bei Serienmodulen üblich, ist dieser Effekt weitgehend auszuschließen.

Als Problempunkt bleibt die Wartung des Membranmoduls und der Permeatleitung nach dem Einbau im laufenden Betrieb. Ein nicht zu unterschätzender qualitätsmindernder Effekt kann von den ableitenden Systemen ausgehen. Sind diese kontaminiert, ist durch entsprechende Untersuchungen zu überprüfen, ob eine Reinigung/Desinfektion ausreicht, oder ob ein Austausch zu erfolgen hat.

Ergänzende Untersuchungen zur Bestimmung des Wachstumspotentials für Koloniebildende Einheiten ergaben, dass im Permeat der beiden Membranmodule ein hohes Potential zur Aufkeimung vorhanden war. Dies weist darauf hin, dass eine für Mikroorganismen ausreichende Menge von bioverfügbaren Wasserinhaltsstoffen vorliegt. Während davon ausgegangen werden kann, dass Mikro- und Ultrafiltrationsmodule in der Lage sind Partikel und Mikroorganismen in hohem Maße zurückzuhalten wird im Gegensatz dazu die Tendenz zur Wiederverkeimung durch den Filtrationsprozess nicht verringert. Bei einer geplanten Versickerung des Permeats ist dieser Umstand zu berücksichtigen, da es zu Verkeimungen in den ableitenden Systemen kommen kann. Technische oder naturnahe Systeme können dazu eingesetzt werden, um diesen Effekt zu kontrollieren.

Die Eliminationsleistung von Membranbelebungsanlagen im Hinblick auf wasserhygienisch relevante Mikroorganismen weist große Unterschiede auf. Bakteriensporen mit einer Länge von 1500 nm und einer Breite von 500 nm wurden erwartungsgemäß in höherem Ausmaß als das Testvirus (Durchmesser 27 nm) zurückgehalten. Überraschenderweise lag die Retention für die Bakteriensporen bei der Mikrofiltration (Mikro L2 nominale Porenweite 200 nm) höher als jene bei der Ultrafiltration (nominale Porenweite 40 nm).

Die Prüfung der Effizienz von Mikrofiltrations- und Ultrafiltrationsmembranen im Hinblick auf die Rückhaltung von Mikroorganismen lässt sich nur durch Zudosierungsversuche mit geeigneten Testorganismen unter kontrollierten Bedingungen über einen längeren Zeitraum bewerkstelligen.

Die Konzentrationen an natürlich im Abwasser vorkommenden Mikroorganismen sind dafür nur eingeschränkt einsetzbar, da die Konzentrationen stark schwanken können und die Mikroorganismen nicht immer in ausreichend hohen Konzentrationen vorhanden sind.

Die großen Schwankungen in den Retentionen von Mikroorganismen und die nach wie vor fehlenden technischen Parameter zur Kontrolle und Überwachung der Betriebssicherheit von Membranfiltrationsanlagen ermöglichen es derzeit nicht, diese Verfahren als allein stehende Barriere gegen pathogene Mikroorganismen einzusetzen. Zur Erreichung entsprechender mikrobiologisch-hygienischer Anforderungen des gereinigten Abwassers, ist - je nach geplanter Verwendungsart des gereinigten Abwassers - die Kombination mit einem Desinfektionsverfahren (z.B. UV-Bestrahlung) erforderlich.

Unter Bedachtnahme der oben genannten Punkte ist eine Versickerung von gereinigtem Abwasser möglich, vor allem dann, wenn als zusätzlicher Aspekt die Vulnerabilität der in Betracht kommenden Bodenfläche (ZWAHLEN, 2004) miteinbezogen wird.

Akut toxische und gentoxische Effekte

Die vorliegenden Ergebnisse beinhalten eine Reihe von relevanten Erkenntnissen im Hinblick auf die Bewertung der Effizienz der Membranmodule auf die Entfernung von DNA-schädigenden Giftstoffen aus Abwässern.

Die Resultate der Experimente mit den verschiedenen Membranmodulen zeigen, dass sowohl in den Experimenten mit den Bakterien als auch mit den Hepatozyten eine Abnahme der gentoxischen Effekte feststellbar ist.

Die Ergebnisse aller Versuchsserien zeigen, dass die Zulaufproben (vom Belebungsbecken) mutagene Effekte aufweisen und diese, unabhängig vom Trockensubstanzgehalt im Belebungsbecken, nach der Filtration (Ultra- und Mikro-), abnehmen. Es ist allerdings bemerkenswert, dass zwischen Ultrafiltration und Mikrofiltration kein signifikanter Unterschied in der Effizienz der Reduktion der Mutagenität feststellbar war.

Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass die untersuchten Membranmodule in der Lage sind Substanzen mit erbschädigenden Eigenschaften zu entfernen.

Kostenvergleich

Es wurden aktuelle Preise aus dem Jahr 2009 von Herstellern, Vertriebspartnern und Technischen Büros für mehrere Typen von Kleinkläranlagen erhoben.

Bei Vergleich der spezifischen Jahreskosten zeigt sich deutlich, dass das System Membranbioreaktor die höchsten Kosten aufweist. Ein großer Kostenfaktor ist der Stromverbrauch durch die Verdichter für die Crossflow-Belüfter und die Permeatabzugspumpen. Alle drei weiteren betrachteten Systeme wie Bepflanzter Bodenfilter, Belebungsanlage im Durchlaufprinzip und Belebungsanlage mit Aufstauprinzip (SBR) haben spezifische Jahreskosten in ähnlicher Höhe. Diese sind rund 25% niedriger als diejenigen für das System Membranbioreaktor.

10 Projektkoordination

Dr. Franziska Zibuschka - Universität für Bodenkultur Wien, Institut für Siedlungswasserbau, Industriewasserwirtschaft und Gewässerschutz

11 Verzeichnis der Autorinnen und Autoren

In alphabetischer Reihenfolge:

Allabashi, Roza, Dipl.-Ing. Dr. - Universität für Bodenkultur Wien, Institut für Siedlungswasserbau, Industriewasserwirtschaft und Gewässerschutz

Ferk, Franziska Mag. - MedUni Wien, Institut für Krebsforschung

Knasmüller, Siegfried, ao. Univ. Prof. Mag. Dr. - MedUni Wien, Institut für Krebsforschung

Kropitz, Friedrich - Universität für Bodenkultur Wien, Institut für Siedlungswasserbau, Industriewasserwirtschaft und Gewässerschutz

Lindner, Gerhard, Dipl.-Ing. - Universität für Bodenkultur Wien, Institut für Siedlungswasserbau, Industriewasserwirtschaft und Gewässerschutz

Misik, Miroslav, Dr. - MedUni Wien, Institut für Krebsforschung

Pressl, Alexander, Dipl.-Ing. - Universität für Bodenkultur Wien, Institut für Siedlungswasserbau, Industriewasserwirtschaft und Gewässerschutz

Schürhagl, Roland - MedUni Wien, Institut für Hygiene und angewandte Immunologie, Wasserhygiene

Sommer, Regina, ao. Univ. Prof. Dipl.-Ing. Dr. - MedUni Wien, Institut für Hygiene und angewandte Immunologie, Wasserhygiene

Zibuschka, Franziska, Dr. - Universität für Bodenkultur Wien, Institut für Siedlungswasserbau, Industriewasserwirtschaft und Gewässerschutz

12 Danksagung

Unser Dank gilt Herrn ZT Dipl.-Ing. Dr. Gerhard Cordt und Frau ao. Univ. Prof. Dipl.-Ing. Dr. Maria Fürhacker für die Idee zum und die Unterstützung beim Zustandekommen des Projektes.

Dank gebührt auch den MitarbeiterInnen des Chemielabors am Institut für Siedlungswasserbau für die sorgfältig durchgeführten Analysen, sowie den Mitarbeitern der Werkstätte der BOKU Wien und den Mitarbeitern der Firma TGB für die Mithilfe bei der Errichtung der Versuchsanlage.

13 Literatur

- ARROJO, B., MOSQUERA-CORRA, A., GARRIDO, J.M., MEDNDEZ, R., FICARA, E., MALPEI, F. (2005) A membrane coupled to a sequencing batch reactor for water reuse and removal of coliform bacteria, *Desalination* 179, 109-116.
- ATV AG 2.6.6 (1989) Biologische Phosphorentfernung, Arbeitsbericht der ATV-Arbeitsgruppe 2.6.6 „Biologische Phosphorentfernung“, KA – Abwasser Abfall Gewässer 36 (3), 337-348.
- ATV-DVWK-A 131 (2000) Bemessung von einstufigen Belebungsanlagen, DWA-Regelwerk, Hennef.
- BMLFUW (2006) Auswirkung von Versickerung und Verrieselung von durch Kleinkläranlagen mechanisch-biologisch gereinigtem Abwasser in dezentralen Lagen, Studie im Auftrag des BMLFUW.
- BURLINSON, B, TICE, RR, SPEIT, G, AGURELL, E, BRENDLER-SCHWAAB, SY, COLLINS, AR, ESCOBAR, P, HONMA, M, KUMARAVEL, TS, NAKAJIMA, M, SASAKI, YF, THYBAUD, V, UNO, Y, VASQUEZ, M, HARTMANN A (2007) Fourth International Workshop on genotoxicity testing: Results of the in vivo comet assay workgroup. *Mutat Res* 3;627(1), 31-35.
- CHOO, K. H., STENSEL, K. (2000) Sequencing Batch Membrane Reactor Treatment: Nitrogen Removal and Membrane Fouling Evaluation. *Water Environ. Res.*, 72 (4), 490-498.
- COLLINS, K. E., CRONIN A. A., RUEEDI J., PEDLEY S., JOYCE E., HUMBLE P. J., TELLAM J. H. (2006) Fate and transport of bacteriophages in UK aquifers as surrogates for pathogenic viruses. *Eng. Geol.* 85, 33-38.
- CORNEL, P., KRAUSE, S. (2006) Membrane bioreactors in industrial wastewater treatment – European experiences, examples and trends. *Wat. Sci. Tech.* 53(3), 37-44.
- CÔTÉ, P, BUISOON, H., POUND, C., ARAKAKI, G. (1997) Immersed membrane activated sludge for the reuse of municipal wastewater. *Desal.* 113, 189-196.
- DE KOK, T. AND VAN MAANEN, J.M.S. (2000) Evaluation of fecal mutagenicity and colorectal cancer risk. *Mutation Research-Reviews in Mutation Research* 463, 53-101.
- DWA (2005) Membranbelebungsverfahren 2. Arbeitsbericht - Fassung vom 19.01.2005, DWA-Fachausschuss KA-7, Hennef.
- DWA-M 210 (2009) Belebungsanlagen mit Aufstaubetrieb (SBR), DWA-Regelwerk, Hennef.
- FERK, F., MISIK, M., HOELZL, C., UHL, M., FUERHACKER, M., GRILLITSCH, B., PARZEFALL, W., NERSESYAN, A., MICIETA, K., GRUMMT, T., EHRLICH, V., KNASMULLER, S. (2007) Benzalkonium chloride (BAC) and dimethyldioctadecyl-ammonium bromide (DDAB), two common quaternary ammonium compounds, cause genotoxic effects in mammalian and plant cells at environmentally relevant concentrations. *Mutagenesis* 22, 363-70.
- GRUMMT, T., WUNDERLICH, H.G., CHAKRABORTY, A., KUNDI, M., MAJER, B., FERK, F., NERSESYAN, A.K., PARZEFALL, W., KNASMULLER, S. (2006) Genotoxicity of nitrosulfonic acids, nitrobenzoic acids, and nitrobenzylalcohols, pollutants commonly found in ground water near ammunition facilities. *Environ Mol Mutagen* 47, 95-106.
- GÜNDER, B. (1999) Das Membranbelebungsverfahren in der kommunalen Abwasserreinigung, Stuttgarter Berichte zur Siedlungswasserwirtschaft 153, Oldenbourg-Verlag, München.
- GUO, H., WYART, Y., PEROT, J., NAULEAU, F., MOULIN, P. (2010) Low pressure membrane integrity tests for drinking water treatment: A review. *Wat. Res.* 44, 41-57.
- HEISTAD, A., SCOTT, T., SKAARER, A.M., SEIDU, R., HANSEN, J.F., STENSTRÖM, T.A. (2009) Virus removal by unsaturated wastewater filtration: effects of biofilm accumulation and hydrophobicity. *Wat. Sci. Tech.* 60 (2), 399-407.
- International Standards Institute (1995) Water quality – detection and enumeration of bacteriophages. Part 1: Enumeration of F-specific RNA bacteriophages. ISO 10705:1995.
- IRANPOUR R. (1998) Virus removal by advanced membrane filtration for wastewater reclamation. *Wat. Env. Res.* 70 (6), 1198-1204.

- KANG, I.-J., LEE, C.-H., KIM, K.-J. (2003) Characteristics of microfiltration membranes in a membrane coupled sequencing batch reactor system, *Water Research* 37, 1192–1197.
- KATAOKA, H., HAYATSU, T., HIETSCH, G., STEINKELLNER, H., NISHIOKA, S., NARIMATSU, S., KNASMULLER, S., HAYATSU, H. (2000) Identification of mutagenic heterocyclic amines (IQ, Trp-P-1 and AαC) in the water of the Danube river, *Mutat Res* 466, 27-35.
- KIRKLAND, D.J. (ed.) (1990) *Basic Mutagenicity Tests: UKEMS Recommended Procedures*. Cambridge University Press, Cambridge, New York, Melbourne, Sydney.
- KNASMULLER, S., MERSCH-SUNDERMANN, V., KEVEKORDES, S., DARROUDI, F., HUBER, W.W., HOELZL, C., BICHLER, J., MAJER, B.J. (2004) Use of human-derived liver cell lines for the detection of environmental and dietary genotoxicants; current state of knowledge. *Toxicology* 198, 315-328.
- KNASMULLER, S., STEINKELLNER, H., HIRSCHL, A.M., RABOT, S., NOBIS, E.C., KASSIE, F. (2001) Impact of bacteria in dairy products and of the intestinal microflora on the genotoxic and carcinogenic effects of heterocyclic aromatic amines. *Mutation Research-Fundamental and Molecular Mechanisms of Mutagenesis* 480, 129-138.
- KRAMPE, J., KRAUTH, KH. (2000) Brauchwasserrecycling durch den Einsatz membrangestützter SBR-Anlagen, *ATV-DVWK*, Hennef.
- KRAUSE, S., CORNEL, P. (2003) Untersuchungen zum Energiebedarf von Membranbelebungsreaktoren unter besonderer Berücksichtigung der Belüftungssysteme, 6 Aachener Tagung Siedlungswasserwirtschaft und Verfahrenstechnik, Aachen, A18-1 – A18-16.
- KRAUSE, S., EDER, B., GÜNTHER, F.W. (2001): Einsatz der Ultrafiltration bei der Trinkwasseraufbereitung von trübstoffhaltigen und mikrobiologisch belasteten Karst-, Kluft- und Quellwässern. Pilotversuche in Bayern. Bayerisches Landesamt für Wasserwirtschaft, München.
- LINDL, T., BAUER, J. (1994) *Zell- und Gewebekultur*. Gustave Fischer, Stuttgart, Jena, New York, 94-96.
- MAJER, B.J., MERSCH-SUNDERMANN, V., DARROUDI, F., LAKY, B., DE WIT, K., KNASMULLER, S. (2004) Genotoxic effects of dietary and lifestyle related carcinogens in human derived hepatoma (HepG2, Hep3B) cells. *Mutation Research-Fundamental and Molecular Mechanisms of Mutagenesis* 551, 153-166.
- MARON, D.M. AND AMES, B.N. (1984) Revised methods for the Salmonella mutagenicity test. In KILBEY, B.J., LEGATOR, M., NOCOLS, W. AND RAMEL, C. (eds.), *Handbook of Mutagenicity Test Procedures*. Elsevier Science Publishers BV, New York, 93-140.
- MORITA, K., ISHIGAKI, M., ABE, T. (1981) Mutagenicity of materials related with cosmetics. *J Soc Cosmet Chem* 15, 243.
- NG, W.J., ONG, S.L., GOMEZ, M.J., HU, J.Y., FAN, X.J. (2000) Study on a sequencing batch membrane bioreactor for wastewater treatment, *Water Science and Technology*, 41(10–11), 227–234
- OHE, T., WATANABE, T., WAKABAYASHI, K. (2004) Mutagens in surface waters: a review. *Mutat Res* 567, 109-49.
- OLSEN, R.H., SIAK, J.-S., GRAY, R. H. (1974) Characteristics of PRD1, a Plasmid-Dependent Broad Host Range DNA Bacteriophage, *J. Virol.* 14(3), 689-699.
- ÖNORM B 2502-1 (2007) Kleinkläranlagen (Hauskläranlagen) für Anlagen bis 50 Einwohnerwerte (EW) - Vor Ort hergestellte Anlagen - Anwendung, Bemessung, Bau und Betrieb.
- ÖNORM B 2505 (2009) Kläranlagen - Intermittierend beschickte Bodenfilter ("Pflanzenkläranlagen") - Anwendung, Bemessung, Bau, Betrieb, Wartung und Überprüfung.
- ÖNORM EN 12566-3 (2009) Kleinkläranlagen für bis zu 50 EW - Teil 3: Vorgefertigte und/oder vor Ort montierte Anlagen zur Behandlung von häuslichem Schmutzwasser.
- OTTOSON, J., HANSEN, A., BJÖRLENIUS, B., NORDER, H., STENSTRÖM, T.A. (2006) Removal of viruses, parasitic protozoa and microbial indicators in conventional and membrane processes in a wastewater pilot plant. *Wat. Res.* 40, 1449-1457.
- PETALA, M., SAMARAS, P., ZOUBOULIS, A., KUNGOLOS, A., SAKELLAROPOULOS, G.P. (2008) Influence of ozonation on the in vitro mutagenic and toxic potential of secondary effluents. *Water Res.* 42(20), 4929-40.

- PINNEKAMP, J. (Herausgeber) (2006) Membrantechnik für die Abwasserreinigung: Siedlungswasser- und Siedlungsabfallwirtschaft Nordrhein-Westfalen. Band 1, FiW Verlag; 2., aktualis. Aufl., ISBN-10: 3939377007, ISBN-13: 978-3939377009
- REASONER, D.J., GELDREICH, E.E. (1985) A new medium for the enumeration and sub-culture of bacteria from potable water. *Appl. Environ. Microbiol.* 49, pp. 1-7
- SAKAGAMI, Y., YAMAZAKI, H., OGASAWARA, N., YOKOYAMA, H., OSE, Y., SATO, T. (1988) The evaluation of genotoxic activities of disinfectants and their metabolites by UMU test. *Mutat Res* 209, 155-160.
- SAKAMOTO, H., HAYATSU, H. (1990) A simple method for monitoring mutagenicity of river water. Mutagens in Yodo river system, Kyoto-Osaka, *Bull Environ Contam Toxicol* 44, 521-528.
- SCHRADER, G.A. (2006) Direct Nanofiltration of Wastewater Treatment Plant Effluent, Ph.D. Thesis, University of Twente, The Netherlands, ISBN 90-365-2332-X.
- SEGELN, O.P. (1976) Preparation of isolated rat liver cells. In Prescott, D.M. (ed.), *Methods in Cell Biology*. Academic Press, New York, NY, vol. 13, pp. 29-81.
- SHANG, C., HIU MAN, W., GUANGHAO, C. (2005) Bacteriophage MS-2 removal by submerged membrane bioreactor. *Wat. Res.* 39, 4211-4219.
- SINGH, N.P., MCCOY, M.T., TICE, R.R., SCHNEIDER, E.L. (1988) A simple technique for quantitation of low levels of DNA damage in individual cells. *Exp Cell Res* 184-191.
- SKOG, K., ALEXANDER, J. (2006) Acrylamide and other hazardous compounds in heat-treated foods. CRC Press, Woodhead Publishing, Cambridge, England, 247-264.
- SOMMER, R., CABAJ, A. (1993) Evaluation of the efficiency of a UV plant for drinking water disinfection. *Wat. Sci. Tech.* 27(3-4), 357-362.
- THRUMAN, R., KAUFFMAN, F. (1980) Factors regulating drug metabolism in intact hepatocytes, *Pharmacological reviews* 31 229-251.
- TICE, R.R., AGURELL, E., ANDERSON, D., BURLINSON, B., HARTMANN, A., KOBAYASHI, H., MIYAMAE, Y., ROJAS, E., RYU, J.C., SASAKI, Y.F. (2000) Single cell gel/comet assay: guidelines for in vitro and in vivo genetic toxicology testing. *Environ Mol Mutagen* 35, 206-21.
- UEDA, T., HORAN, N.J. (1999) Fate of indigenous bacteriophage in a membrane bioreactor. *Wat. Res.* 34(7), 2151-2159.
- US-EPA (1994), Determination of Organic Compounds in Drinking Water by Liquid-Solid Extraction and Capillary Column Gas Chromatography/Mass Spectrometry. Method 525.2, US Environmental Protection Agency, National Exposure Research Laboratory Office of Research and Development, Cincinnati, OH.
- WHITE, P.A., RASMUSSEN, J.B., BLAISE, C. (1998) Genotoxic substances in the St. Lawrence system I: Industrial genotoxins sorbed to particulate matter in the St. Lawrence, St. Maurice, and Saguenay Rivers, Canada. *Environmental Toxicology and Chemistry* 17, 286-303.
- Wichern, M., ROSENWINKEL, K.-H. (2002) KA-Wasserwirtschaft, Abwasser, Abfall 49(5), 640-647
- WINTGENS T., MELIN T., SCHÄFER A., KHAN S., MUSTON M., BIXIO D., THOEYE C. (2004) The role of membrane processes in municipal wastewater reclamation and reuse. *Desal.* 178, 1-11.
- WRICKE, B., PETZOLD, H., KORTH, A., KRÜGER, M., ANDRUSCH, T., BÖHM, U., HÄUSLER, H. (2002): Minimierung der Desinfektionsmittelnebenproduktbildung und der Wiederverkeimung im Verteilungsnetz von Fernwasserversorgungssystemen - Abschlussbericht zum BMBF-Vorhaben, Schriftenreihe des TZW, Heft 17, Deutschland.
- WU, J., LI, H., XIA, H. (2010) Indigenous somatic coliphage removal from a real municipal wastewater by a submerged membrane bioreactor. *Wat. Res.* 44, 1853-1862.
- ZHANG, H.-M., XIAO, J.-N., CHENG, Y.-J., LIU, L.-F., ZHANG, X.-W., YANG, F.-L. (2006) Comparison between a sequencing batch membrane bioreactor and a conventional membrane bioreactor, *Process Biochemistry* 41, 87-95.
- ZHANG, K., FARAHBAKHS, K. (2007) Removal of native coliphages and coliform bacteria from municipal wastewater by various wastewater treatment processes: implications to water reuse. *Wat. Res.* 41, 2816-2824.

ZWAHLEN, F. (2004) Vulnerability and risk mapping for the protection of carbonate (Karst) aquifers. COST Action 620, Final Report. European Commission, Directorate-General for research, ISBN 92-984-6416-X

14 Anhang

14.1 Betrieb: Stickstoffparameter

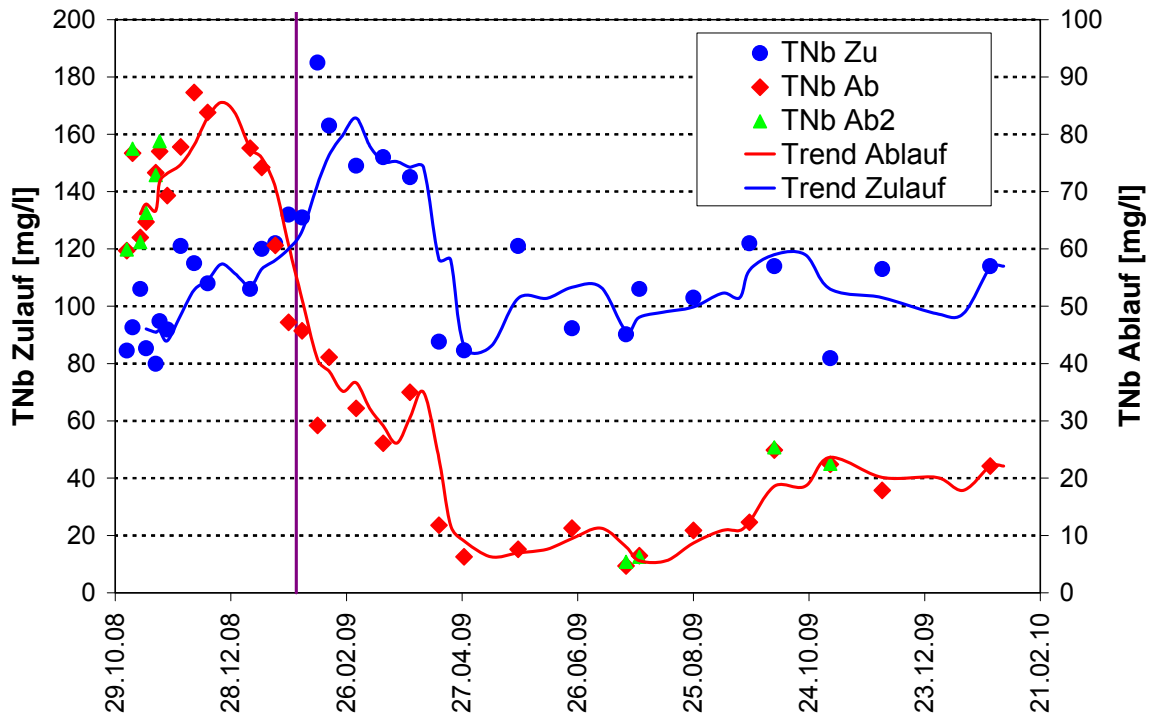


Abbildung 72 Analysenwerte für TNb über die gesamte Versuchsdauer (Zu = Zulauf, Ab = Permeatlinie 1, Ab2 = Permeatlinie 2, vertikale Linie = Grenze zwischen Einfahrphase und Vollbetrieb).

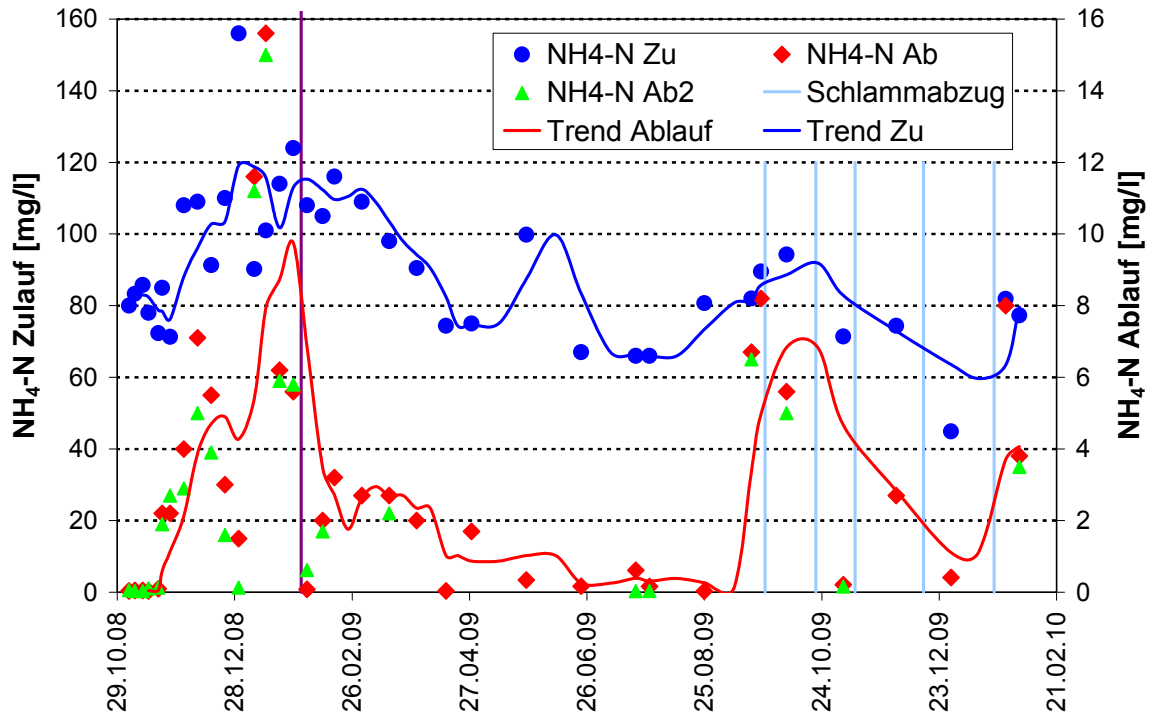


Abbildung 73 Analysenwerte für $\text{NH}_4\text{-N}$ über die gesamte Versuchsdauer (Zu = Zulauf, Ab = Permeatlinie 1, Ab2 = Permeatlinie 2, vertikale Linie = Grenze zwischen Einfahrphase und Vollbetrieb).

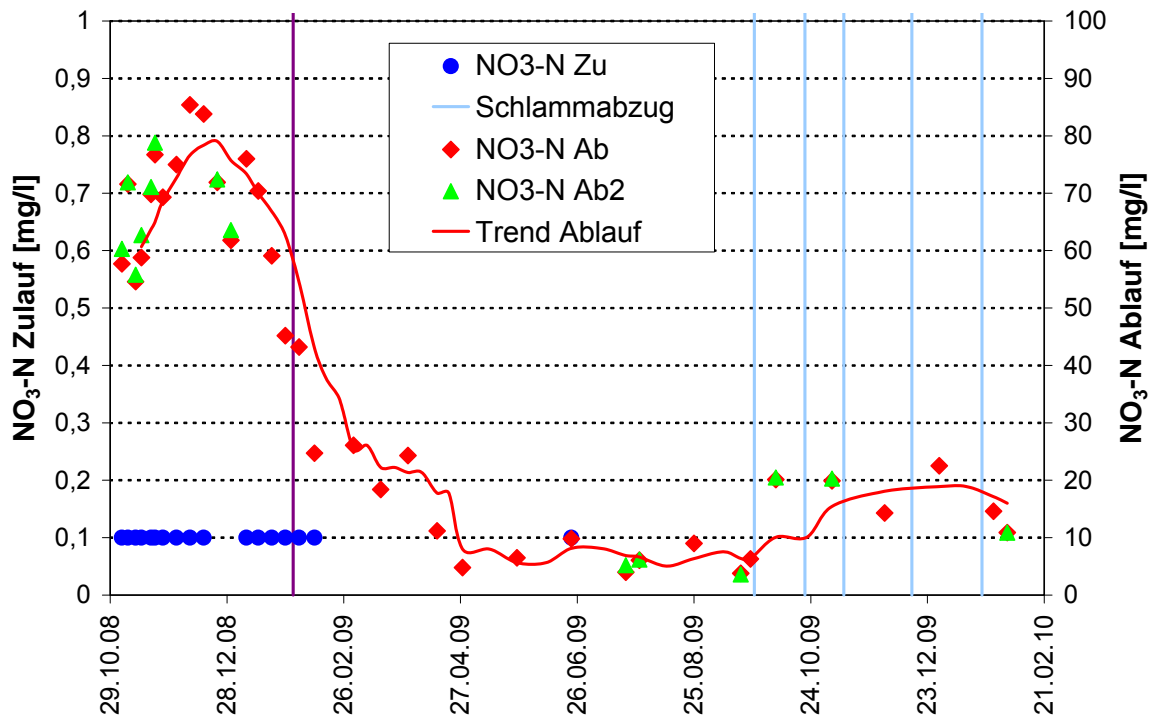


Abbildung 74 Analysenwerte für $\text{NO}_3\text{-N}$ über die gesamte Versuchsdauer (Zu = Zulauf, Ab = Permeatlinie 1, Ab2 = Permeatlinie 2, vertikale Linie = Grenze zwischen Einfahrphase und Vollbetrieb).

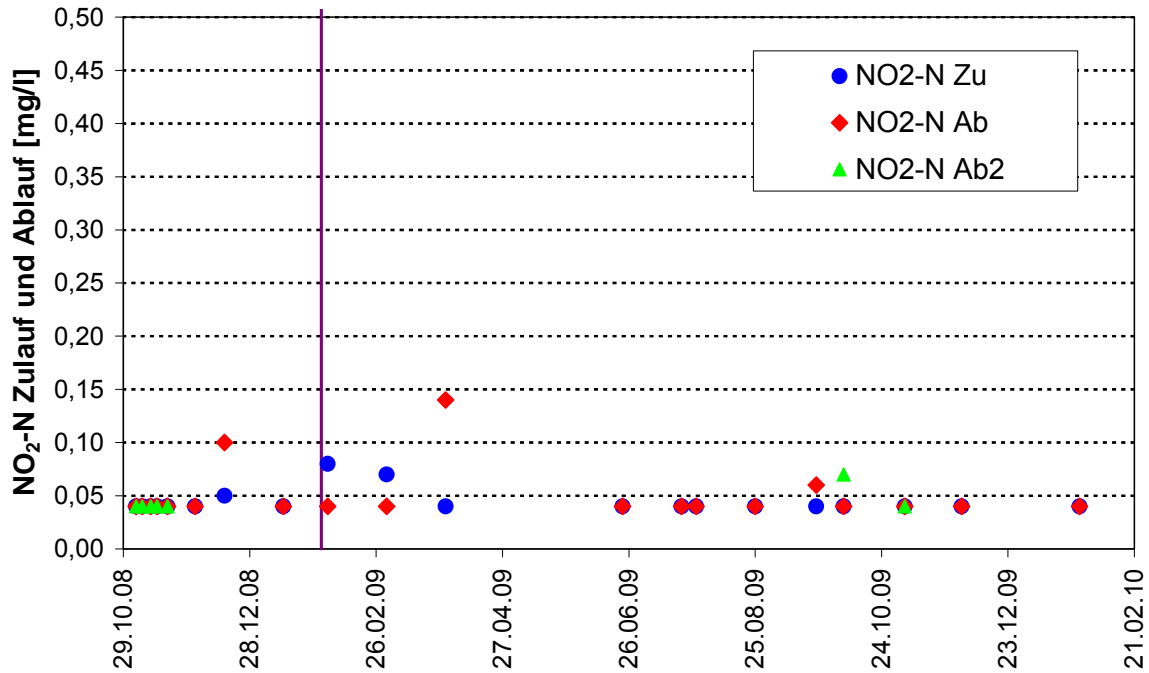


Abbildung 75 Analysenwerte für NO₂-N über die gesamte Versuchsdauer (Zu = Zulauf, Ab = Permeatlinie 1, Ab2 = Permeatlinie 2, vertikale Linie = Grenze zwischen Einfahrphase und Vollbetrieb).

14.2 Betrieb: Organische Parameter

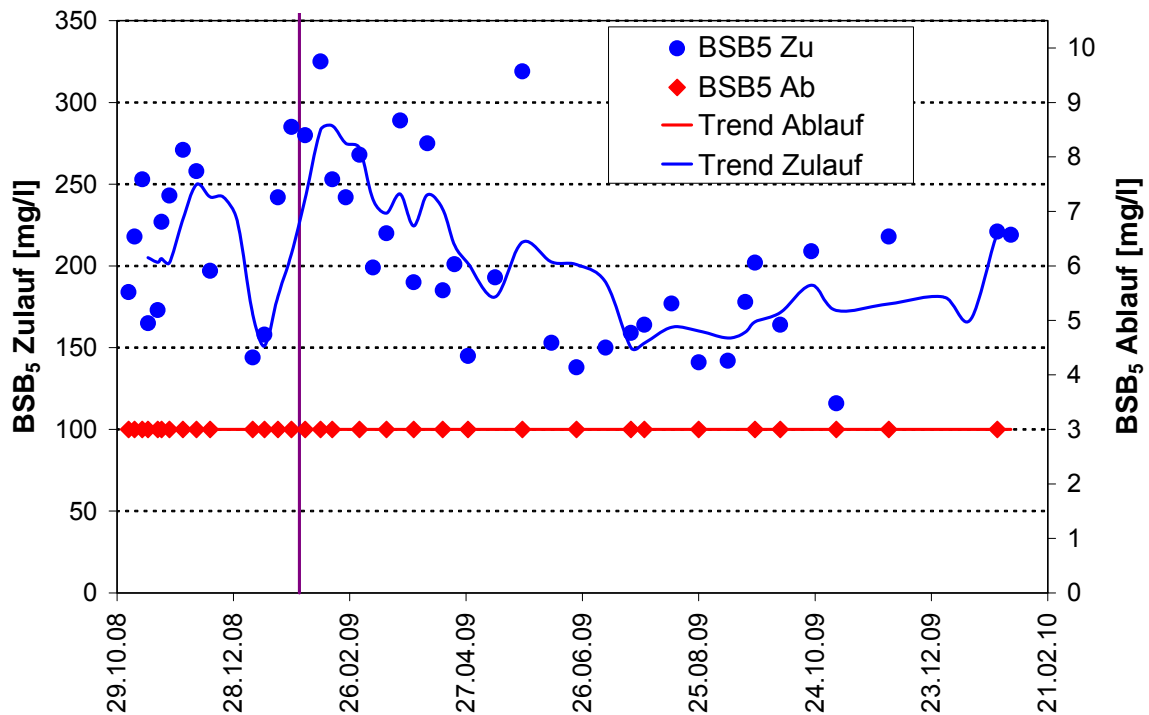


Abbildung 76 Analysenwerte für BSB₅ über die gesamte Versuchsdauer (Zu = Zulauf, Ab = Permeatlinie 1, Ab2 = Permeatlinie 2, vertikale Linie = Grenze zwischen Einfahrphase und Vollbetrieb).

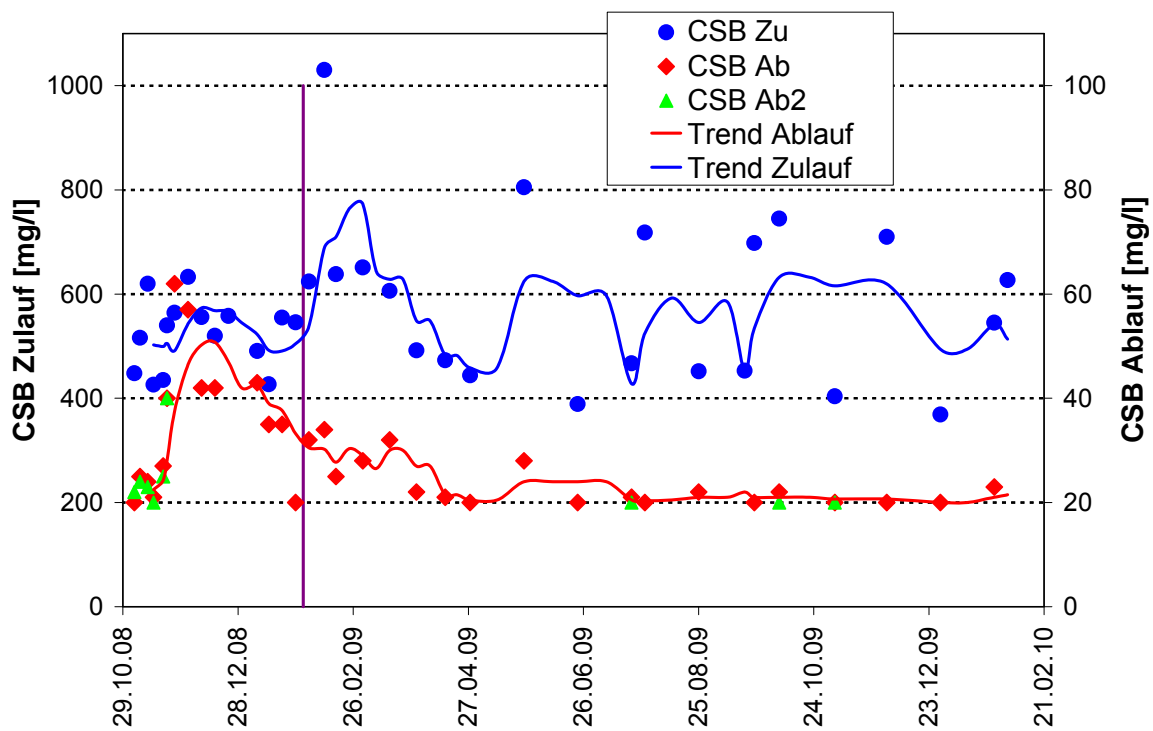


Abbildung 77 Analysenwerte für CSB über die gesamte Versuchsdauer (Zu = Zulauf, Ab = Permeatlinie 1, Ab2 = Permeatlinie 2, vertikale Linie = Grenze zwischen Einfahrphase und Vollbetrieb).

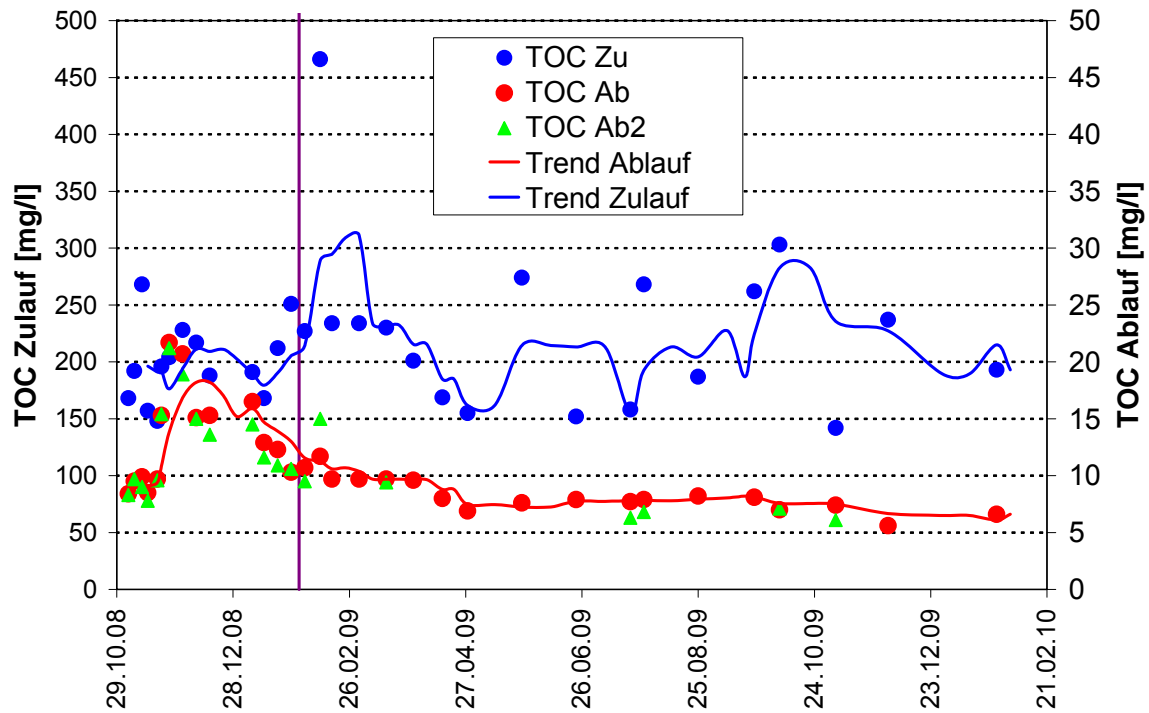


Abbildung 78 Analysenwerte für TOC über die gesamte Versuchsdauer (Zu = Zulauf, Ab = Permeatlinie 1, Ab2 = Permeatlinie 2, vertikale Linie = Grenze zwischen Einfahrphase und Vollbetrieb).

14.3 Betrieb: Phosphorparameter

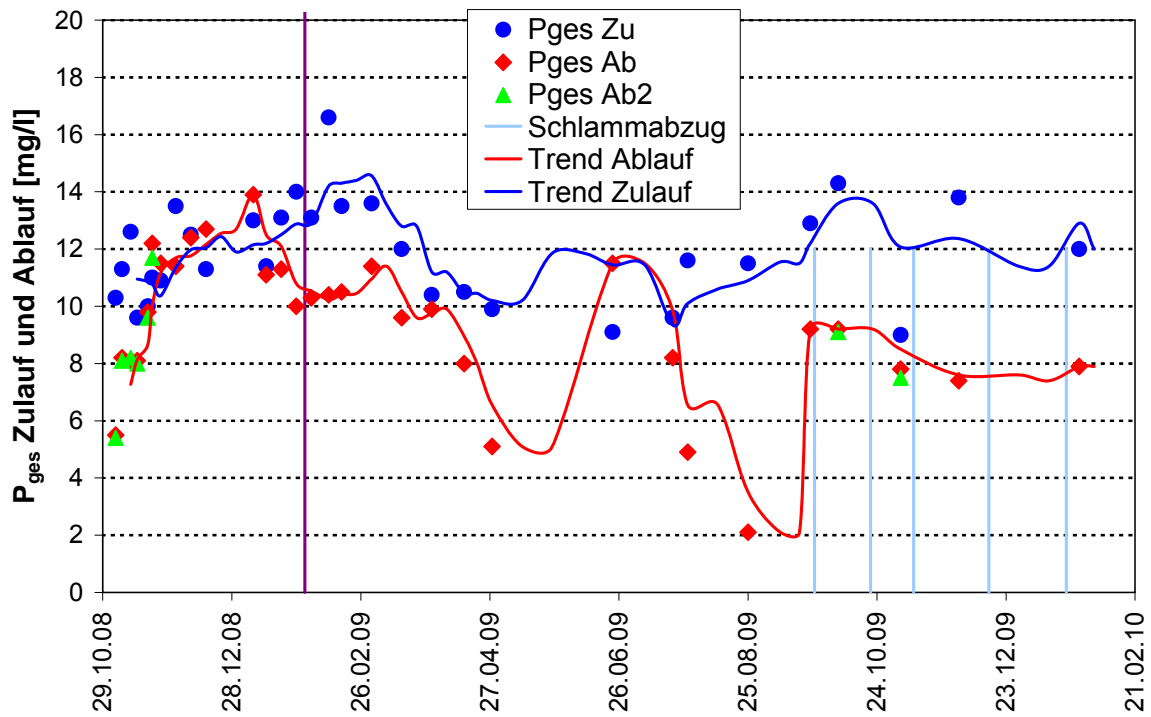


Abbildung 79 Analysenwerte für P_{ges} über die gesamte Versuchsdauer (Zu = Zulauf, Ab = Permeatlinie 1, Ab2 = Permeatlinie 2, vertikale Linie = Grenze zwischen Einfahrphase und Vollbetrieb).

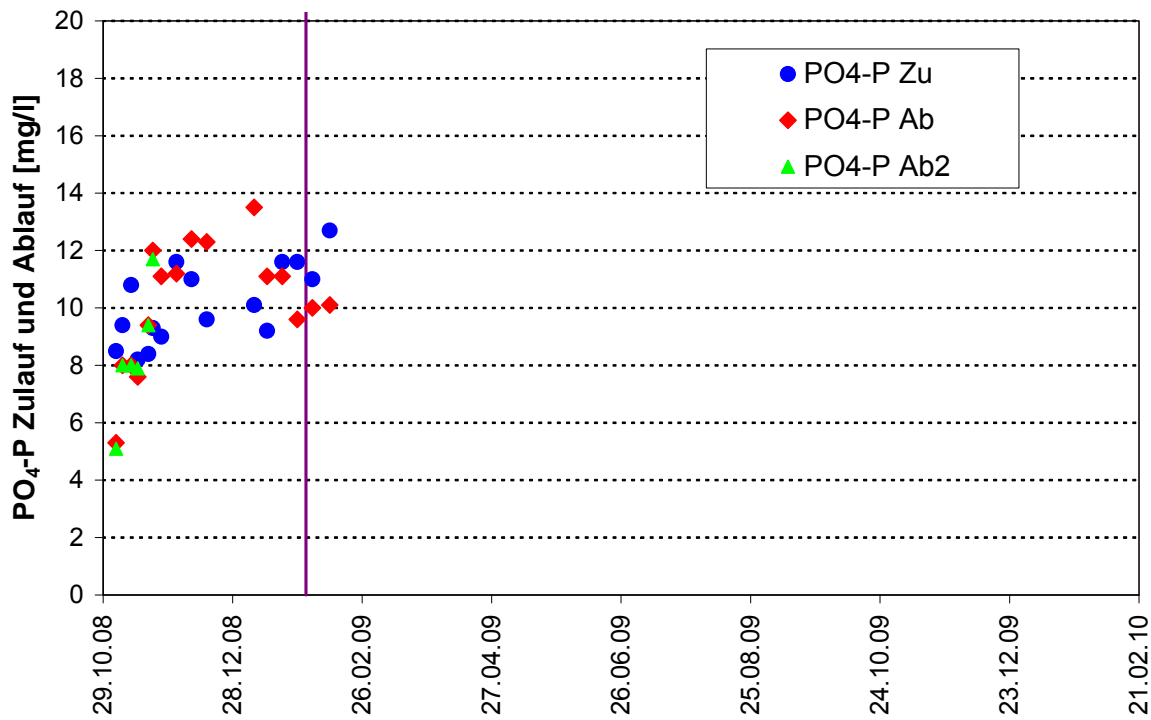


Abbildung 80 Analysenwerte für $PO_4\text{-P}$ über die gesamte Versuchsdauer (Zu = Zulauf, Ab = Permeatlinie 1, Ab2 = Permeatlinie 2, vertikale Linie = Grenze zwischen Einfahrphase und Vollbetrieb).

14.4 Betrieb: Abfiltrierbare Stoffe

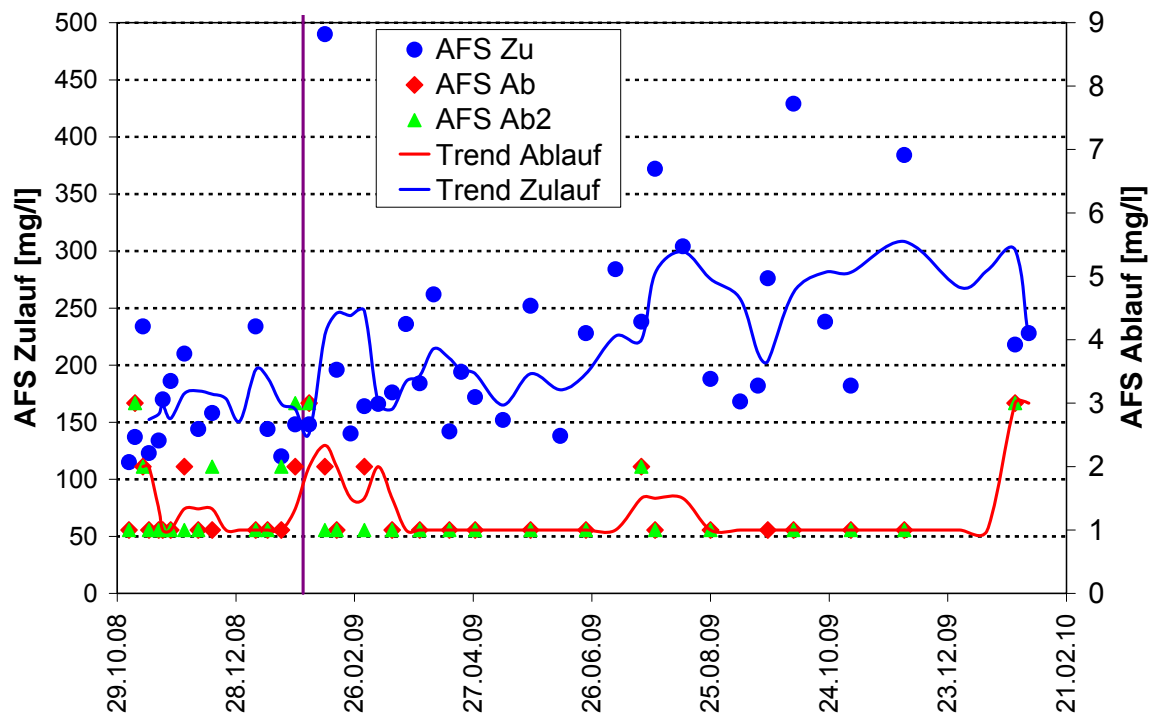


Abbildung 81 Analysenwerte für abfiltrierbare Stoffe über die gesamte Versuchsdauer (Zu = Zulauf, Ab = Permeatlinie 1, Ab2 = Permeatlinie 2, vertikale Linie = Grenze zwischen Einfahrphase und Vollbetrieb).

14.5 Betrieb: Belebtschlamm

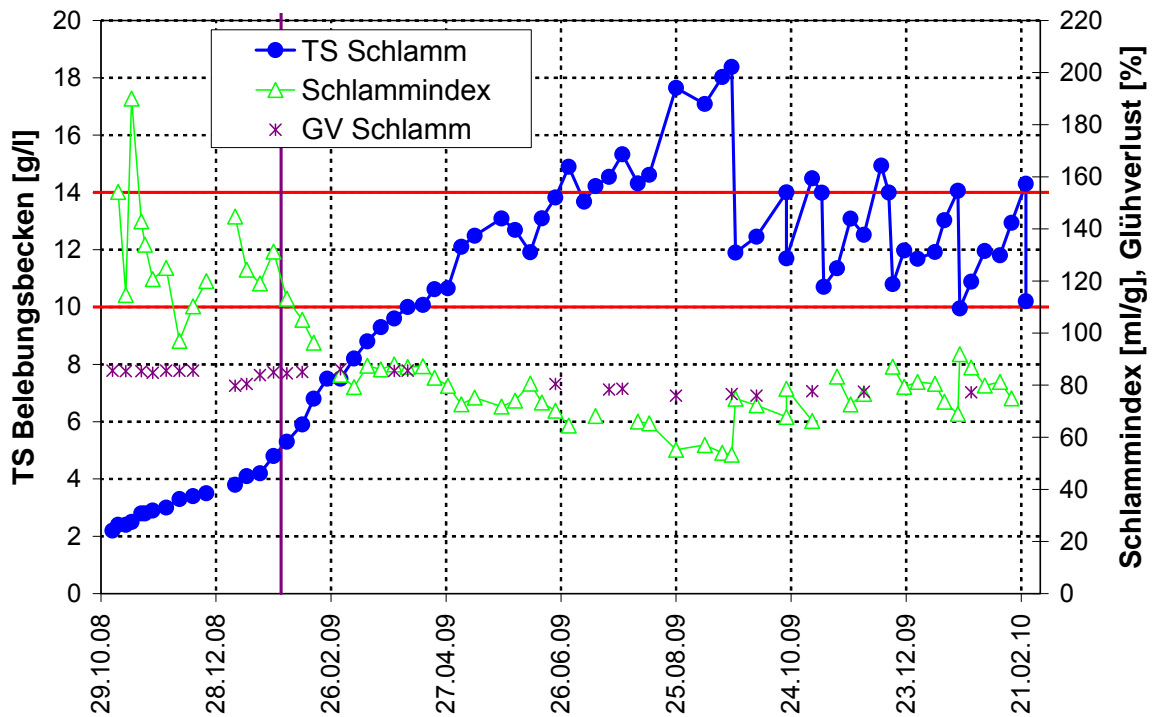


Abbildung 82 Entwicklung des Schlammes im Reaktor über die gesamte Versuchsdauer (vertikale Linie = Grenze zwischen Einfahrphase und Vollbetrieb).

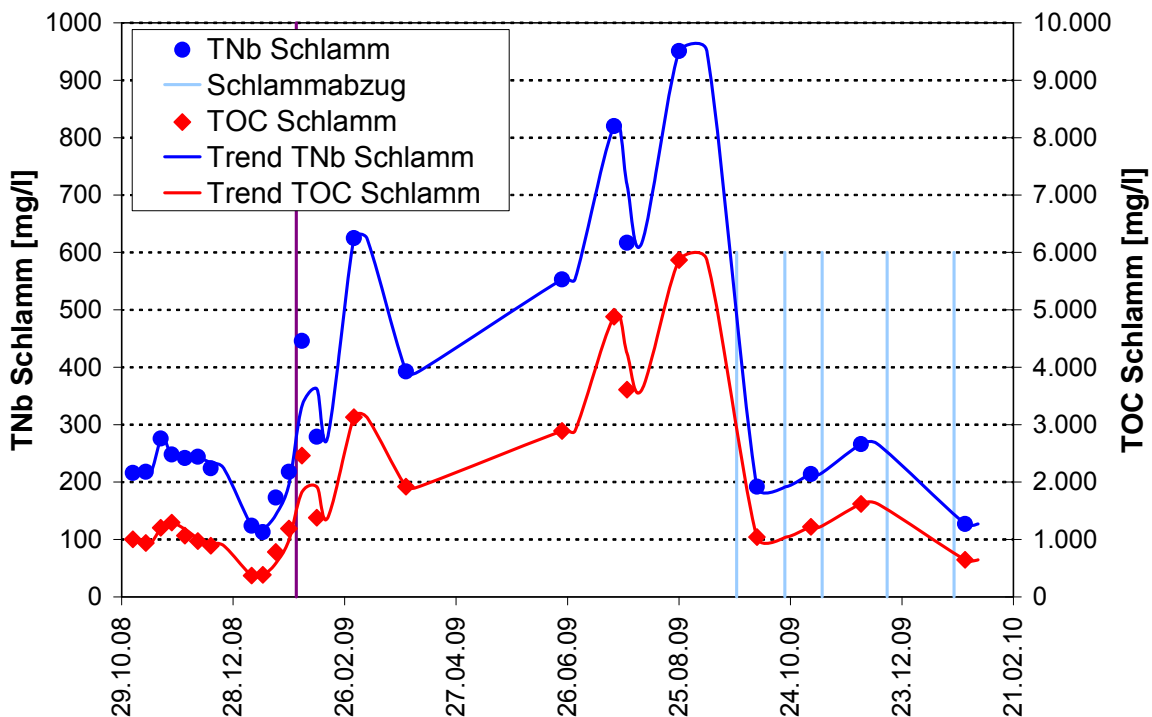


Abbildung 83 Analysenwerte für TNb und TOC des Belebtschlammes im Reaktor über die gesamte Versuchsdauer (vertikale Linie = Grenze zwischen Einfahrphase und Vollbetrieb).

14.6 Betrieb: Membranen

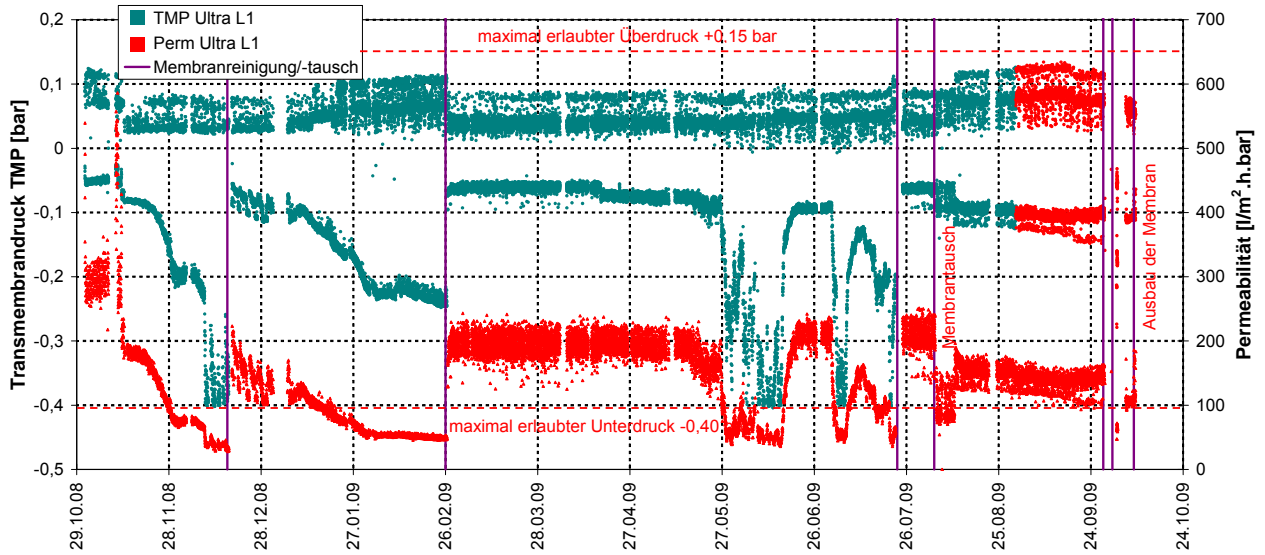


Abbildung 84 Ultrafiltration Linie1: Gegenüberstellung des Transmembrandrucks und der Permeabilität über die gesamte Versuchsdauer.

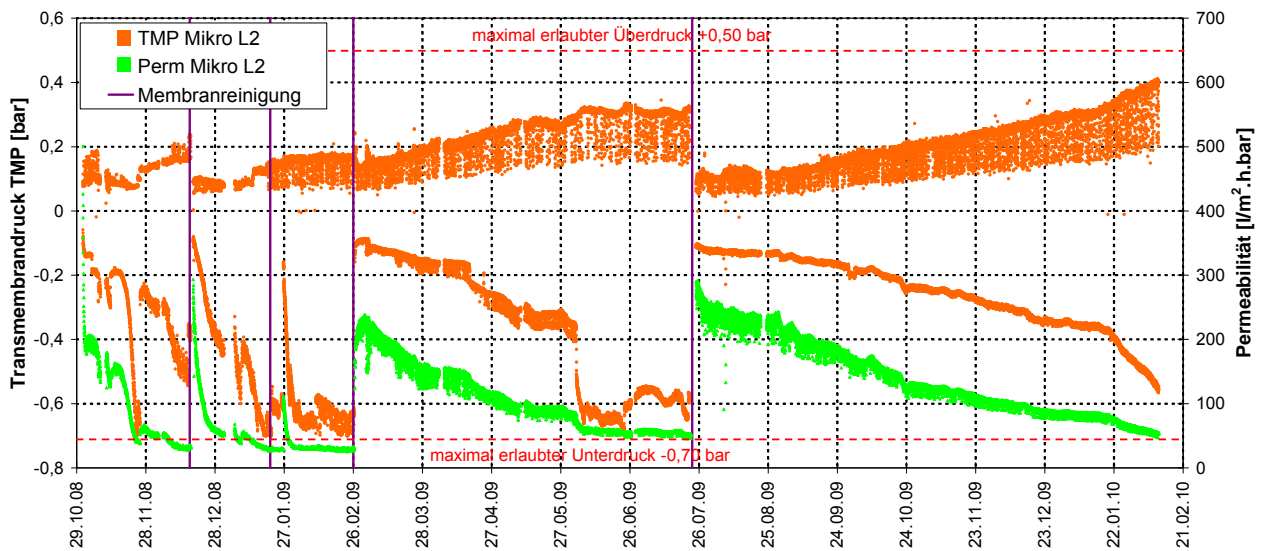


Abbildung 85 Mikrofiltration Linie2: Gegenüberstellung des Transmembrandrucks und der Permeabilität über die gesamte Versuchsdauer.

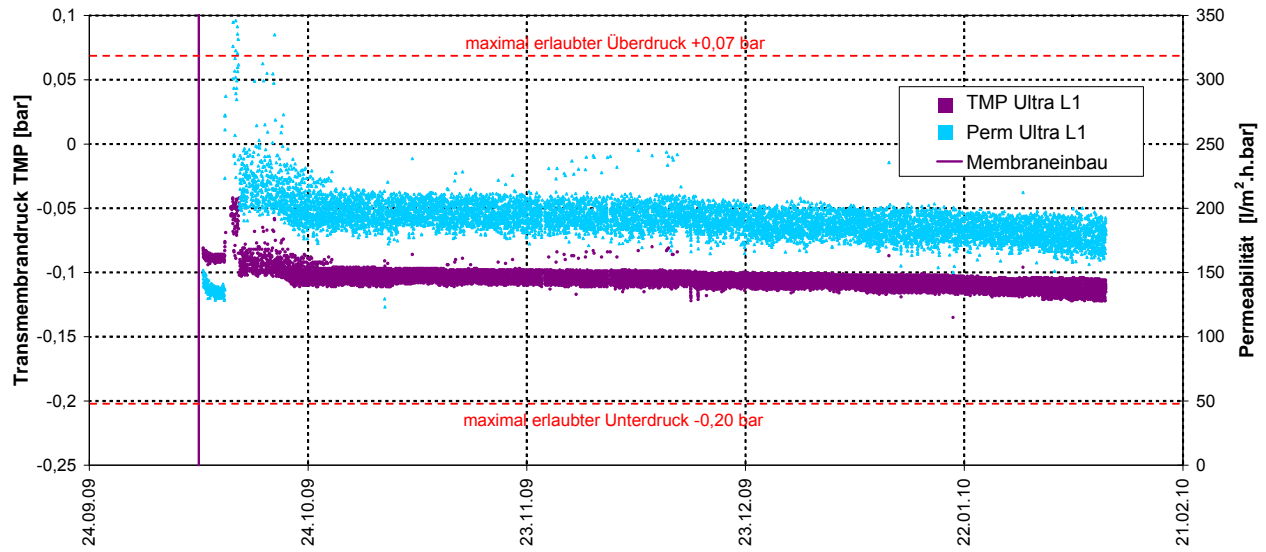


Abbildung 86 Mikrofiltration Linie1: Gegenüberstellung des Transmembrandrucks und der Permeabilität über die entsprechende Versuchsdauer.

14.7 Betrieb: Physikalisch-chemische Onlinemessungen

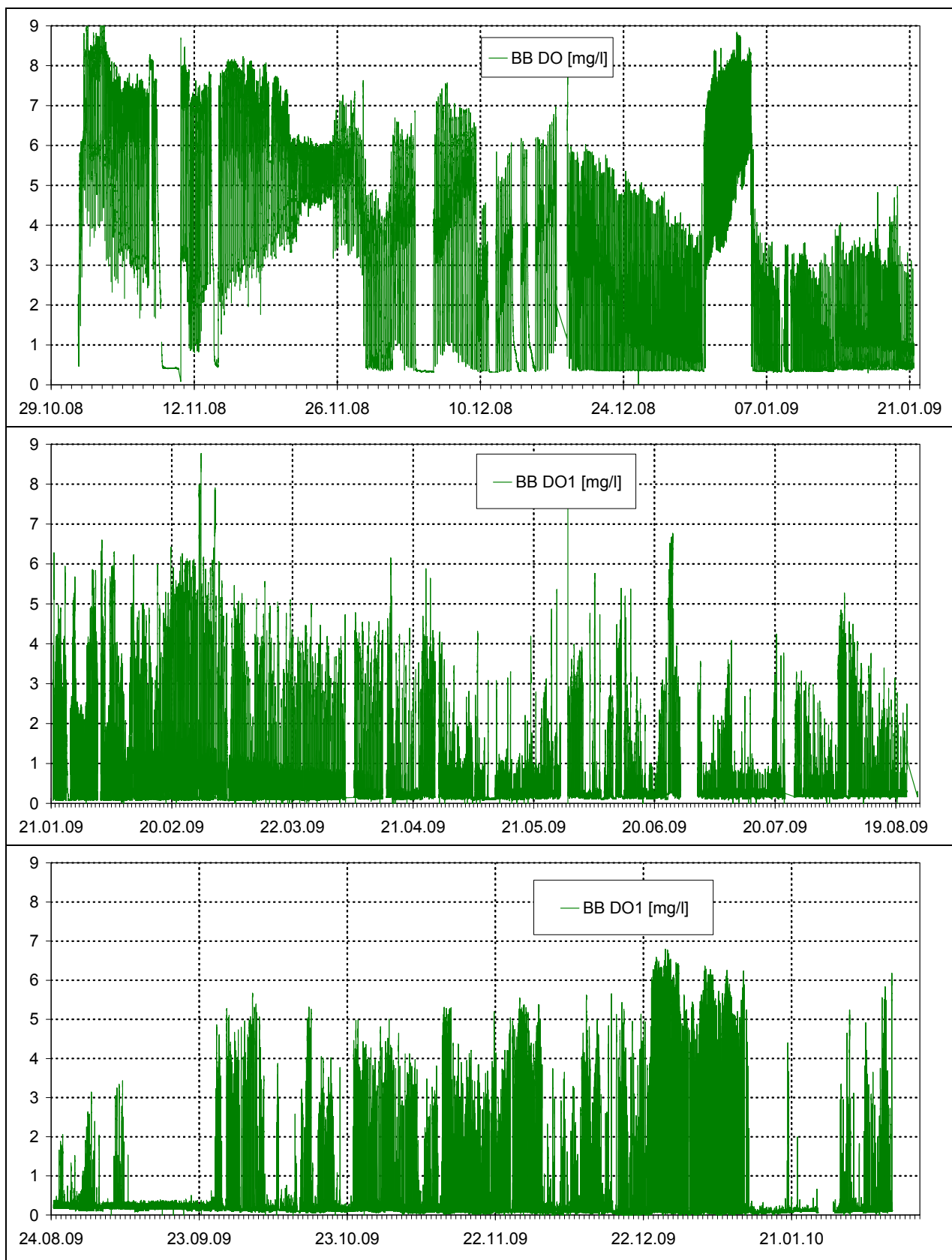


Abbildung 87 Ganglinie der gelösten Sauerstoffkonzentration im Belebungsbecken (BB DO1) während der Einfahrphase bis Ende Jänner 2009 (Diagramm Oben) und während des Vollbetriebs (Diagramm Mitte und Unten).

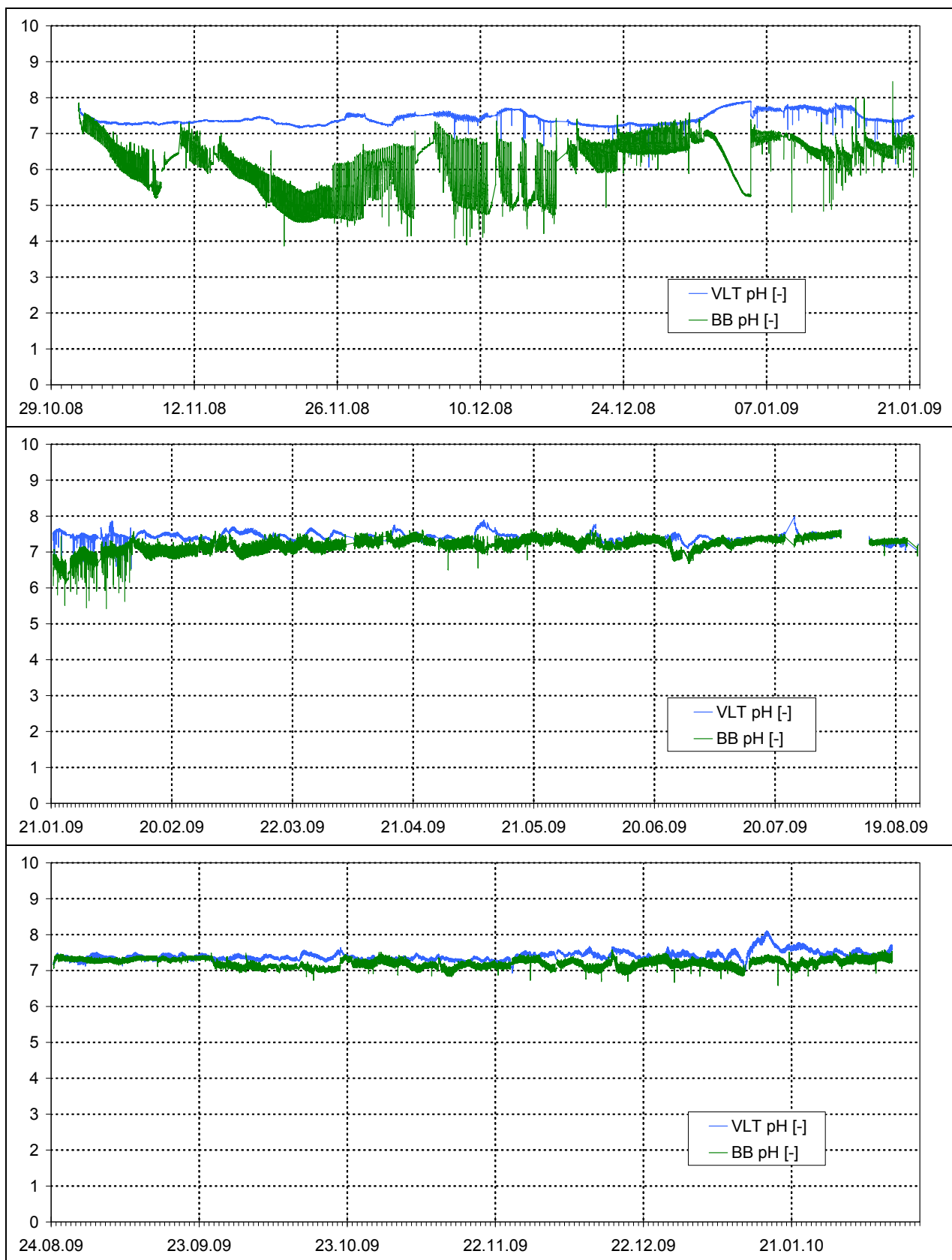


Abbildung 88 Ganglinie des pH-Werts im Vorlagetank (VLT, obere Linie) und Belebungsbecken (BB, untere Linie) während der Einfahrphase bis Ende Jänner 2009 (Diagramm Oben) und während des Vollbetriebs (Diagramm Mitte und Unten).

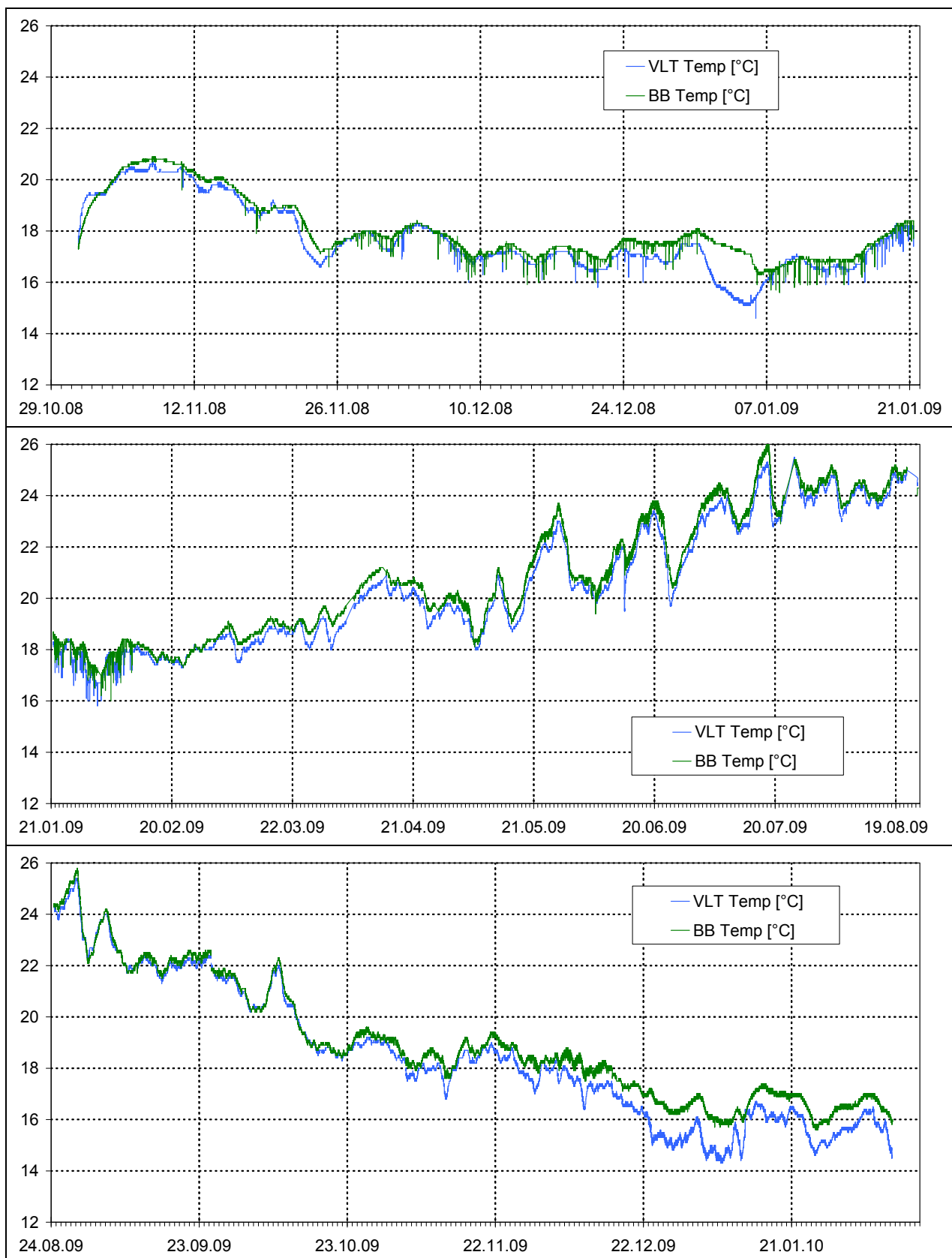


Abbildung 89 Ganglinie der Temperatur im Vorlagetank (VLT, untere Linie) und Belebungsbecken (BB, obere Linie) während der Einfahrphase bis Ende Jänner 2009 (Diagramm Oben) und während des Vollbetriebs (Diagramm Mitte und Unten).

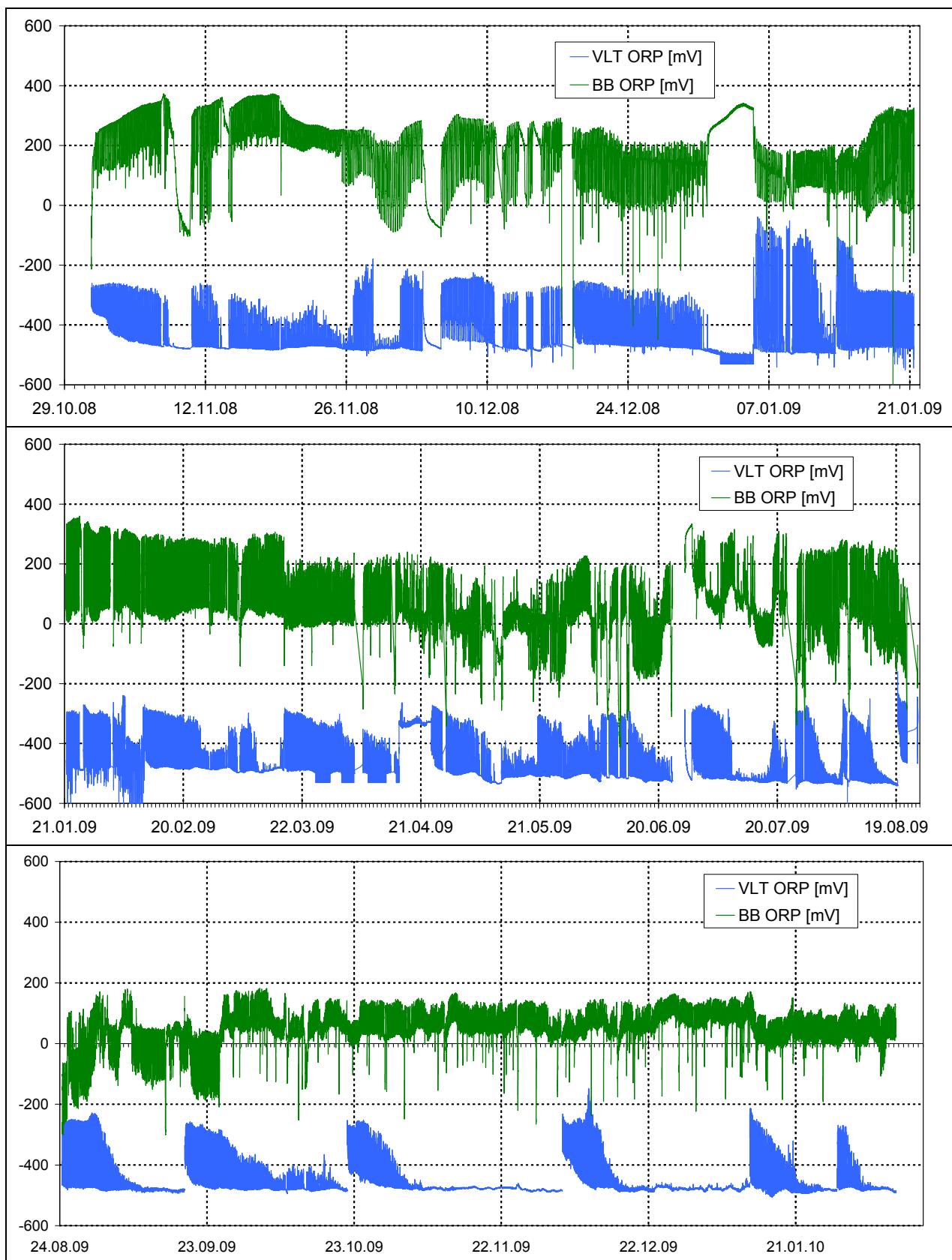


Abbildung 90 Ganglinie des Redox-Potentials im Vorlagetank (VLT, untere Linie) und Belebungsbecken (BB, obere Linie) während der Einfahrphase bis Ende Jänner 2009 (Diagramm Oben) und während des Vollbetriebs (Diagramm Mitte und Unten).

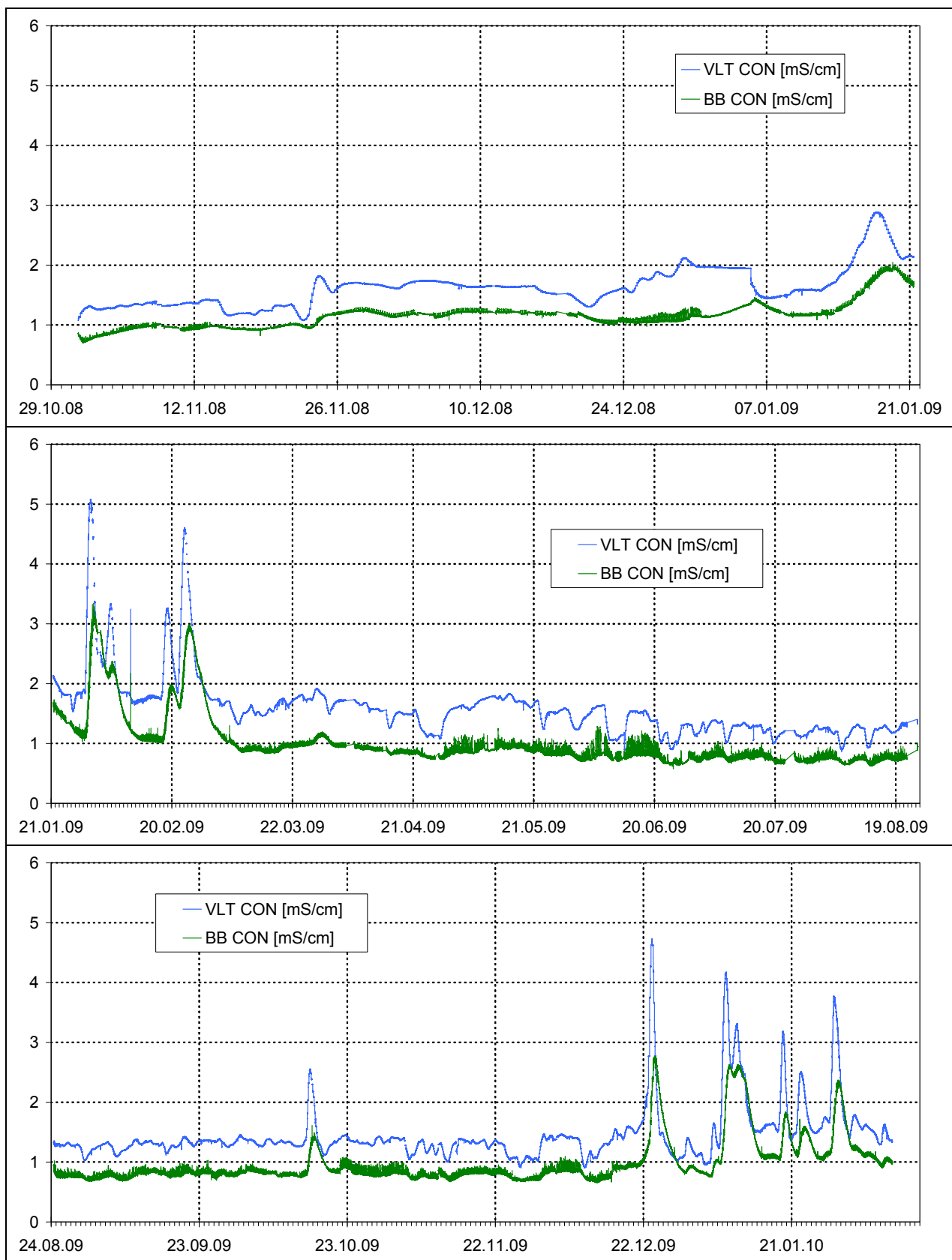


Abbildung 91 Ganglinie der elektrischen Leitfähigkeit im Vorlagetank (VLT, obere Linie) und Belebungsbecken (BB, untere Linie) während der Einfahrphase bis Ende Jänner 2009 (Diagramm Oben) und während des Vollbetriebs (Diagramm Mitte und Unten).

14.8 Mikrobiologisches Monitoringprogramm

Belebungsbecken

Tabelle 35 *Escherichia coli*, Coliforme und Enterokokken pro 100 ml, Belebungsbecken.

Datum	<i>E. coli</i>	Coliforme	Datum	Enterokokken
19.11.2008	58.000	284.000	19.11.2008	230.000
03.02.2009	410.000	470.000	03.02.2009	700.000
17.02.2009	75.000	186.000	17.02.2009	1.500.000
03.03.2009	40.000	220.000	03.03.2009	900.000
18.03.2009	90.000	560.000	16.03.2009	1.900.000
24.03.2009	70.000	320.000	23.03.2009	2.100.000
16.04.2009	3.450.000	1.750.000	15.04.2009	1.700.000
28.04.2009	300.000	700.000	27.04.2009	2.600.000
07.05.2009	700.000	2.900.000	04.05.2009	3.900.000
14.05.2009	73.000	527.000	12.05.2009	4.900.000
25.06.2009	300.000	800.000	24.06.2009	870.000
30.06.2009	500.000	1.000.000	29.06.2009	2.800.000
21.07.2009	80.000	420.000	21.07.2009	1.300.000
28.07.2009	60.000	340.000	28.07.2009	720.000
17.09.2009	750.000	2.950.000	16.09.2009	3.100.000
07.10.2009	754.000	1.746.000	06.10.2009	1.900.000
22.10.2009	1.000.000	1.900.000	21.10.2009	1.500.000
28.10.2009	180.000	490.000	27.10.2009	4.800.000
05.11.2009	120.000	880.000	04.11.2009	6.200.000
10.11.2009	480.000	1.620.000	09.11.2009	7.000.000
19.11.2009	200.000	1.400.000	18.11.2009	9.400.000
26.11.2009	430.000	1.570.000	25.11.2009	5.400.000
02.12.2009	460.000	1.440.000	01.12.2009	3.900.000
09.12.2009	240.000	580.000	08.12.2009	10.500.000
15.12.2009 10:50 Uhr	148.000	832.000	-	-
15.12.2009 15:30 Uhr	320.000	1.930.000	-	-
16.12.2009 10:05 Uhr	630.000	1.770.000	-	-
16.12.2009 14:50 Uhr	570.000	2.230.000	-	-
02.02.2010	930.000	1.570.000	01.02.2010	13.500.000

Ultrafiltration Linie 1

Tabelle 36 *Escherichia coli* pro 100 ml, 1.000 ml, 3.000 ml und 5.000 ml, nach Ultra L1.

Datum	100 ml	250 ml*	1.000 ml	3.000 ml	5.000 ml
19.11.2008	0	-	-	-	-
03.02.2009	0	-	-	-	-
17.02.2009	0	0	0	-	-
03.03.2009	0	0	1	1	2*
18.03.2009	0	0	1	6	10*
24.03.2009	0	0	0	2	3*
28.04.2009	0	2	8	15	25*
14.05.2009	0	0	2	-	5
25.06.2009	2	0	3	-	15
21.07.2009	3	6	25	-	125*
28.07.2009	17	40	170*	-	850*
17.09.2009	1	2	8	-	40
07.10.2009	7	9	35	-	175*

* berechnete Werte

Tabelle 37 Coliforme Bakterien pro 100 ml, 1.000 ml, 3.000 ml und 5.000 ml, nach Ultra L1.

Datum	100 ml	250 ml*	1.000 ml	3.000 ml	5.000 ml
19.11.2008	0	-	-	-	-
03.02.2009	0	-	-	-	-
17.02.2009	0	0	1	-	-
03.03.2009	0	0	0	3	5*
18.03.2009	0	0	1	1	2*
24.03.2009	0	0	0	2	3*
28.04.2009	0	3	10	19	32*
14.05.2009	1	0	2	-	3
25.06.2009	1	1	4	-	12
21.07.2009	6	8	30	-	150*
28.07.2009	250	600	2.500*	-	12.500*
17.09.2009	85	200	850*	-	4.250*
07.10.2009	n.a.	n.a.	n.a.	-	n.a.

n.a. = nicht auswertbar, * berechnete Werte

Tabelle 38 Enterokokken pro 100 ml, 1.000 ml, 3.000 ml und 5.000 ml, nach Ultra L1.

Datum	100 ml	250 ml*	1.000 ml	3.000 ml	5.000 ml
19.11.2008	0	-	-	-	-
03.02.2009	0	-	-	-	-
17.02.2009	0	0	0	-	-
03.03.2009	0	0	0	-	-
16.03.2009	0	0	0	2	3*
23.03.2009	0	0	0	3	5*
27.04.2009	0	1	5	12	20*
12.05.2009	33	95	330*	-	1.650*
24.06.2009	1	1	5	-	23
21.07.2009	2	6	26	82	130*
28.07.2009	1	1	4	15	25*
16.09.2009	0	0	2	-	6
06.10.2009	0	0	0	-	0

* berechnete Werte

Mikrofiltration Linie 1

Tabelle 39 Escherichia coli pro 100 ml, 1.000 ml, 3.000 ml und 5.000 ml, nach Mikro L1.

Datum	100 ml	250 ml*	1.000 ml	3.000 ml	5.000 ml
22.10.2009	0	0	0	-	1
28.10.2009	0	0	0	-	0
05.11.2009	0	0	0	-	0
10.11.2009	0	0	0	-	0
19.11.2009	0	0	0	-	0
26.11.2009	0	0	0	-	0
02.12.2009	0	0	0	-	0
09.12.2009	0	0	0	-	0
15.12.2009	0	0	0	-	0
15.12.2009	0	0	0	-	0
16.12.2009	0	0	0	-	1
16.12.2009	0	0	0	-	0
02.02.2010	0	0	0	-	0

* berechnete Werte

Tabelle 40 Coliforme Bakterien pro 100 ml, 1.000 ml, 3.000 ml und 5.000 ml, nach Mikro L1.

Datum	100 ml	250 ml*	1.000 ml	3.000 ml	5.000 ml
22.10.2009	0	0	1	-	5
28.10.2009	0	0	2	-	9
05.11.2009	0	1	4	-	25
10.11.2009	8	20	77	-	385*
19.11.2009	5	12	66	-	220
26.11.2009	1	0	1	-	4
02.12.2009	6	8	30	-	140
09.12.2009	1	7	27	-	103
15.12.2009 10:50 Uhr	1	9	35	-	124
15.12.2009 15:30 Uhr	4	5	20	-	105
16.12.2009 10:05 Uhr	1	7	29	-	146
16.12.2009 14:50 Uhr	4	9	38	-	175
02.02.2010	0	0	1	-	10

* n.a. = nicht auswertbar, * berechnete Werte

Tabelle 41 Enterokokken pro 100 ml, 1.000 ml, 3.000 ml und 5.000 ml, nach Mikro L1.

Datum	100 ml	250 ml	1.000 ml	3.000 ml	5.000 ml
21.10.2009	0	0	0	-	0
27.10.2009	0	0	0	-	0
04.11.2009	0	0	0	-	0
09.11.2009	0	0	0	-	0
18.11.2009	0	0	0	-	0
25.11.2009	0	0	0	-	0
01.12.2009	0	0	0	-	0
08.12.2009	0	0	0	-	0
01.02.2010	0	0	0	-	0

Mikrofiltration Linie 2

Tabelle 42 *Escherichia coli* pro 100 ml, 1.000 ml, 3.000 ml und 5.000 ml, nach Mikro L2.

Datum	100 ml	250 ml*	1.000 ml	3.000 ml	5.000 ml
19.11.2008	0	-	-	-	-
03.02.2009	0	-	-	-	-
17.02.2009	0	0	0	-	-
03.03.2009	0	0	2	4	7*
18.03.2009	0	0	0	3	5*
24.03.2009	0	0	0	0	-
16.04.2009	0	0	2	16	27*
07.05.2009	0	0	3	-	18
30.06.2009	0	0	0	-	8
21.07.2009	0	0	0	-	23
28.07.2009	0	0	3	-	6
17.09.2009	0	0	1	-	2
07.10.2009	0	0	1	-	3
22.10.2009	0	0	0	-	3
28.10.2009	0	0	0	-	0
05.11.2009	0	0	0	-	0
10.11.2009	0	0	0	-	2
19.11.2009	0	0	0	-	0
26.11.2009	0	0	0	-	0
02.12.2009	0	0	0	-	1
09.12.2009	0	0	0	-	0
15.12.2009 10:50 Uhr	0	0	0	-	1
15.12.2009 15:30 Uhr	0	0	0	-	0
16.12.2009 10:05 Uhr	0	0	0	-	0
16.12.2009 14:50 Uhr	0	0	0	-	1
02.02.2010	0	0	0	-	3

Tabelle 43 Coliforme Bakterien pro 100 ml, 1.000 ml, 3.000 ml und 5.000 ml, nach Mikro L2.

Datum	100 ml	250 ml*	1.000 ml	3.000 ml	5.000 ml
19.11.2008	0	-	-	-	-
03.02.2009	0	-	-	-	-
17.02.2009	0	0	1	-	-
03.03.2009	0	0	0	2	3*
18.03.2009	0	0	0	2	3*
24.03.2009	2	0	3	7	12*
16.04.2009	0	0	2	4	7*
07.05.2009	0	0	2	-	10
30.06.2009	0	0	2	-	8
21.07.2009	0	0	1	-	16
28.07.2009	0	0	2	-	8
17.09.2009	0	0	1	-	5
07.10.2009	0	0	0	-	4
22.10.2009	0	0	0	-	2
28.10.2009	0	0	0	-	1
05.11.2009	0	0	0	-	2
10.11.2009	0	0	0	-	2
19.11.2009	0	0	1	-	1
26.11.2009	0	0	1	-	1
02.12.2009	0	0	0	-	0
09.12.2009	0	0	0	-	0
15.12.2009 10:50 Uhr	0	0	0	-	0
15.12.2009 15:30 Uhr	0	0	0	-	1
16.12.2009 10:05 Uhr	0	0	0	-	1
16.12.2009 14:50 Uhr	0	0	0	-	1
02.02.2010	0	0	0	-	1

* berechnete Werte

Tabelle 44 Enterokokken pro 100 ml, 1.000 ml, 3.000 ml und 5.000 ml, nach Mikro L2.

Datum	100 ml	250 ml	1.000 ml	3.000 ml	5.000 ml
19.11.2008	0	-	-	-	-
03.02.2009	0	-	-	-	-
17.02.2009	0	0	0	-	-
03.03.2009	0	0	0	-	-
16.03.2009	0	0	0	1	2
23.03.2009	0	0	0	0	-
15.04.2009	0	0	0	0	-
04.05.2009	0	0	1	-	4
29.06.2009	0	0	1	-	2
21.07.2009	0	0	0	0	-
28.07.2009	0	0	0	2	3
16.09.2009	0	0	0	-	2
06.10.2009	0	0	0	-	0
21.10.2009	0	0	0	-	0
27.10.2009	0	0	0	-	1
04.11.2009	0	0	0	-	0
09.11.2009	0	0	0	-	0
18.11.2009	0	0	0	-	0
25.11.2009	0	0	0	-	1
01.12.2009	0	0	0	-	0
08.12.2009	0	0	0	-	1
01.02.2010	0	0	1	-	2

* berechnete Werte

Tabelle 45 Minimum-, Maximum-, Mittel- und Medianwerte, Permeat Ultra L1.

Parameter KBE/250 ml	Minimum	Maximum	Mittelwert	Median
<i>E. coli</i>	0	40	5	0
Coliforme	0	600	81	1
Enterokokken	0	95	9	0
Parameter KBE/1.000 ml	Minimum	Maximum	Mittelwert	Median
<i>E. coli</i>	0	170	23	3
Coliforme	0	2.500	283	2
Enterokokken	2	82	23	12
Parameter KBE/5.000 ml	Minimum	Maximum	Mittelwert	Median
<i>E. coli</i>	2	850	125	20
Coliforme	2	12.500	1.884	12
Enterokokken	0	1.650	207	20

Tabelle 46 Minimum-, Maximum-, Mittel- und Medianwerte, Permeat Mikro L1.

Parameter KBE/250 ml	Minimum	Maximum	Mittelwert	Median
<i>E. coli</i>	0	0	0	0
Coliforme	0	20	6	7
Enterokokken	0	0	0	0
Parameter KBE/1.000 ml	Minimum	Maximum	Mittelwert	Median
<i>E. coli</i>	0	3	1	1
Coliforme	1	77	25	27
Enterokokken	0	0	0	0
Parameter KBE/5.000 ml	Minimum	Maximum	Mittelwert	Median
<i>E. coli</i>	0	1	0	0
Coliforme	4	385	112	105
Enterokokken	0	0	0	0

Tabelle 47 Minimum-, Maximum-, Mittel- und Medianwerte, Permeat Mikro L2.

Parameter KBE/250 ml	Minimum	Maximum	Mittelwert	Median
<i>E. coli</i>	0	0	0	0
Coliforme	0	0	0	0
Enterokokken	0	0	0	0
Parameter KBE/1.000 ml	Minimum	Maximum	Mittelwert	Median
<i>E. coli</i>	0	3	1	0
Coliforme	0	3	1	0
Enterokokken	0	1	0	0
Parameter KBE/5.000 ml	Minimum	Maximum	Mittelwert	Median
<i>E. coli</i>	0	27	5	2
Coliforme	0	16	4	2
Enterokokken	0	4	1	1

Tabelle 48 Retentionen (log N/No) für Fäkalbakterien, Ultra L1.

Datum	Ultra L1 - Retention (log N/No)		
	<i>E. coli</i>	Coliforme	Enterokokken
03.03.2009	-6,08	-6,34	≥ -5,95
18.03.2009	-5,65	-7,23	-7,45
24.03.2009	-6,02	-6,68	-7,32
16.04.2009	-5,78	-6,04	-6,81
07.05.2009	-5,86	-6,94	-5,17
30.06.2009	-6,00	-6,52	-6,28
21.07.2009	-4,51	-5,15	-5,70
28.07.2009	-3,55	-3,13	-6,16
17.09.2009	-5,97	-4,54	-7,41
07.10.2009	-5,33	n.a.	≥ -7,98

Tabelle 49 Retentionen (log N/No) für Fäkalbakterien, Mikro L1.

Datum	Mikro L1 - Retention (log N/No)		
	<i>E. coli</i>	Coliforme	Enterokokken
22.10.2009	-7,70	-7,28	≥ -7,88
28.10.2009	≥ -6,95	-6,43	≥ -8,38
05.11.2009	≥ -6,78	-6,25	≥ -8,49
10.11.2009	≥ -7,38	-5,32	≥ -8,54
19.11.2009	≥ -7,00	-5,50	≥ -8,67
26.11.2009	≥ -7,33	-7,29	≥ -8,43
02.12.2009	≥ -7,36	-5,71	≥ -8,29
09.12.2009	≥ -7,08	-5,45	≥ -8,72
15.12.2009 (10 ⁵⁰ Uhr)	≥ -6,87	-5,53	-
15.12.2009 (15 ³⁰ Uhr)	≥ -7,20	-5,96	-
16.12.2009 (10 ⁰⁵ Uhr)	-7,50	-5,78	-
16.12.2009 (14 ⁵⁰ Uhr)	≥ -7,45	-5,80	-
02.02.2010	≥ -7,67	-6,89	≥ -8,53

Tabelle 50 Wachstumspotential für Koloniebildende Einheiten, Permeat Mikro L1 und Mikro L2.

Parameter	Mikro L1	Mikro L2
WP _{KBE-22°C}	28.000	51.000
WP _{KBE-37°C}	11.000	33.000
WP _{KBE-R2A}	75.000	140.000

Tabelle 51 Retentionen (log N/No) für Fäkalbakterien, Mikro L2.

Datum	Mikro L2 - Retention (log N/No)		
	<i>E. coli</i>	Coliforme	Enterokokken
03.03.2009	-5,48	-6,52	-5,95
18.03.2009	-5,95	-6,92	-7,76
24.03.2009	≥ -6,54	-6,14	≥ -8,02
16.04.2009	-6,52	-7,41	≥ -7,93
07.05.2009	-6,29	-7,16	-7,69
30.06.2009	-6,49	-6,80	-7,85
21.07.2009	-5,24	-6,12	≥ -7,81
28.07.2009	-5,70	-6,33	-7,03
17.09.2009	-7,27	-7,47	-7,89
07.10.2009	-7,10	-7,34	≥ -7,98
22.10.2009	-7,22	-7,68	≥ -7,88
28.10.2009	≥ -6,95	-7,39	-8,38
05.11.2009	≥ -6,78	-7,34	≥ -8,49
10.11.2009	-7,08	-7,61	≥ -8,54
19.11.2009	≥ -7,00	-7,85	≥ -8,67
26.11.2009	≥ -7,33	-7,89	-8,43
02.12.2009	-7,36	≥ -7,86	≥ -8,29
09.12.2009	≥ -7,08	≥ -7,46	-8,72
15.12.2009 (10 ⁵⁰ Uhr)	-6,87	≥ -7,62	-
15.12.2009 (15 ³⁰ Uhr)	≥ -7,20	-7,98	-
16.12.2009 (10 ⁰⁵ Uhr)	≥ -7,50	-7,95	-
16.12.2009 (14 ⁵⁰ Uhr)	-7,45	-8,05	-
02.02.2010	-7,19	-7,89	-8,53

14.9 Intensivbeprobungen mit Zudosierungsversuchen

Tabelle 52 log Konzentrationen und Retentionen (log N/No) von zudosierten Testviren und Bakteriensporen vor und nach der Ultra L1 und Mikro L2 in Leitungswasser. Die Proben wurden in drei unabhängigen Serien entnommen (B, C, D). Die Werte stellen Mittelwerte (mean) und Standardabweichungen (SD) aus Dreifachanalysen dar. Die Probenserie A erfolgte zu Kontrollzwecken vor Zudosierung der Testorganismen (Daten nicht angeführt).

Untersuchung vom 20.10.2008

Nach Zudosierung der Testorganismen													
log Konzentration Mittelwert (Standard Abweichung)										Probenahmestelle	log Konz / ml		Retention (log N/No)
Testvirus (PFU/ml)	B	mean	SD	C	mean	SD	D	mean	SD		mean B-D	SD	
	B1	5,85	0,02	C1	5,62	0,08	D1	5,64	0,03	Tank oben	5,70	0,13	-
	B2	5,83	0,03	C2	5,63	0,06	D2	5,85	0,04	Tank mittig	5,77	0,12	-
	B3	5,82	0,01	C3	5,73	0,19	D3	5,80	0,01	Tank unten	5,78	0,05	-
	B4	5,78	0,06	C4	5,61	0,06	D4	5,82	0,03	Mikrofiltration L2	5,74	0,11	-0,02
	B5	2,52	0,05	C5	2,22	0,04	D5	2,22	0,07	Ultrafiltration L1	2,32	0,17	-3,43
										Probenahmestelle	log Konz /100 ml		Retention (log N/No)
Bakteriensporen (KBE/100 ml)	B	mean	SD	C	mean	SD	D	mean	SD		mean B-D	SD	
	B1	7,03	0,01	C1	6,98	0,07	D1	7,02	0,08	Tank oben	7,01	0,03	-
	B2	6,97	0,05	C2	7,01	0,04	D2	7,01	0,00	Tank mittig	7,00	0,02	-
	B3	7,10	0,02	C3	7,01	0,01	D3	6,97	0,02	Tank unten	7,03	0,07	-
	B4	1,64	0,03	C4	1,51	0,01	D4	1,43	0,04	Mikrofiltration L2	1,53	0,11	-5,49
	B5	1,78	0,02	C5	1,69	0,03	D5	1,69	0,02	Ultrafiltration L1	1,72	0,05	-5,29

Tabelle 53 log Konzentrationen und Retentionen (log N/No) von zudosierten Testviren und Bakteriensporen vor und nach der Ultra L1 und Mikro L2 in Abwasser (TS 2,8 g/l). Die Proben wurden in drei unabhängigen Serien entnommen (B, C, D). Die Werte stellen Mittelwerte (mean) und Standardabweichungen (SD) aus Dreifachanalysen dar. Die Probenserie A erfolgte zu Kontrollzwecken vor Zudosierung der Testorganismen (Daten nicht angeführt).

Untersuchung vom 19.11.2008

Nach Zudosierung der Testorganismen													
log Konzentration Mittelwert (Standard Abweichung)										Probenahmestelle	log Konz / ml		Retention (log N/No)
Testvirus	B	mean	SD	C	mean	SD	D	mean	SD		mean B-D	SD	
(PFU/ml)	B1	5,85	0,05	C1	5,73	0,02	D1	5,66	0,13	Tank oben	5,74	0,09	-
	B2	5,87	0,03	C2	5,76	0,04	D2	5,77	0,04	Tank mittig	5,80	0,06	-
	B3	5,85	0,01	C3	5,78	0,04	D3	5,80	0,04	Tank unten	5,81	0,04	-
	B4	4,37	0,04	C4	4,28	0,04	D4	4,29	0,02	Mikrofiltration L2	4,31	0,05	-1,47
	B5	2,14	0,02	C5	2,11	0,04	D5	2,01	0,01	Ultrafiltration L1	2,09	0,07	-3,70
										Probenahmestelle	log Konz /100 ml		Retention (log N/No)
Bakteriensporen	B	mean	SD	C	mean	SD	D	mean	SD		mean B-D	SD	
(KBE/100 ml)	B1	7,09	0,02	C1	7,05	0,05	D1	7,07	0,02	Tank oben	7,07	0,02	-
	B2	7,09	0,06	C2	7,09	0,01	D2	7,13	0,02	Tank mittig	7,10	0,03	-
	B3	7,10	0,03	C3	7,10	0,03	D3	7,11	0,03	Tank unten	7,10	0,01	-
	B4	0,76	0,14	C4	0,57	0,23	D4	0,30	0,30	Mikrofiltration L2	0,54	0,23	-6,55
	B5	0,95	0,05	C5	0,87	0,15	D5	0,92	0,08	Ultrafiltration L1	0,91	0,04	-6,18

Tabelle 54 log Konzentrationen und Retentionen (log N/No) von zudosierten Testviren und Bakteriensporen vor und nach der Ultra L1 und Mikro L2 in Abwasser (TS 5,3 g/l). Die Proben wurden in drei unabhängigen Serien entnommen (B, C, D). Die Werte stellen Mittelwerte (mean) und Standardabweichungen (SD) aus Dreifachanalysen dar. Die Probenserie A erfolgte zu Kontrollzwecken vor Zudosierung der Testorganismen (Daten nicht angeführt).

Untersuchung vom 03.02.2009

Nach Zudosierung der Testorganismen													
log Konzentration Mittelwert (Standard Abweichung)										Probenahmestelle	log Konz / ml		Retention (log N/No)
Testvirus	B	mean	SD	C	mean	SD	D	mean	SD		mean B-D	SD	
(PFU/ml)	B1	5,36	0,02	C1	5,27	0,05	D1	5,18	0,02	Tank oben	5,27	0,09	-
	B2	5,37	0,03	C2	5,21	0,03	D2	5,11	0,04	Tank mittig	5,23	0,13	-
	B3	5,29	0,04	C3	5,17	0,04	D3	5,08	0,04	Tank unten	5,18	0,10	-
	B4	1,68	0,06	C4	1,50	0,04	D4	1,43	0,10	Mikrofiltration L2	1,54	0,13	-3,69
	B5	1,54	0,08	C5	1,69	0,08	D5	1,64	0,11	Ultrafiltration L1	1,62	0,08	-3,60
										Probenahmestelle	log Konz /100 ml		Retention (log N/No)
Bakteriensporen	B	mean	SD	C	mean	SD	D	mean	SD		mean B-D	SD	
(KBE/100 ml)	B1	7,19	0,01	C1	7,25	0,02	D1	7,23	0,01	Tank oben	7,23	0,03	-
	B2	7,16	0,03	C2	7,23	0,07	D2	7,22	0,02	Tank mittig	7,20	0,03	-
	B3	7,21	0,05	C3	7,25	0,02	D3	7,31	0,03	Tank unten	7,25	0,05	-
	B4	0,54	0,09	C4	0,10	0,17	D4	0,20	0,17	Mikrofiltration L2	0,28	0,23	-6,95
	B5	0,70	0,17	C5	0,73	0,15	D5	0,32	0,28	Ultrafiltration L1	0,59	0,23	-6,64

Tabelle 55 log Konzentrationen und Retentionen (log N/No) von zudosierten Testviren und Bakteriensporen vor und nach der Ultra L1 und Mikro L2 in Abwasser (TS 10,1 g/l). Die Proben wurden in drei unabhängigen Serien entnommen (B, C, D). Die Werte stellen Mittelwerte (mean) und Standardabweichungen (SD) aus Dreifachanalysen dar. Die Probenserie A erfolgte zu Kontrollzwecken vor Zudosierung der Testorganismen (Daten nicht angeführt).

Untersuchung vom 15.04.2009

Nach Zudosierung der Testorganismen													
log Konzentration Mittelwert (Standard Abweichung)										Probenahmestelle	log Konz / ml		Retention (log N/No)
Testvirus	B	mean	SD	C	mean	SD	D	mean	SD		mean B-D	SD	
(PFU/ml)	B1	5,64	0,03	C1	5,55	0,04	D1	5,59	0,09	Tank oben	5,59	0,04	-
	B2	5,73	0,03	C2	5,47	0,09	D2	5,63	0,07	Tank mittig	5,61	0,13	-
	B3	5,64	0,05	C3	5,50	0,06	D3	5,52	0,00	Tank unten	5,55	0,08	-
	B4	2,31	0,04	C4	2,37	0,05	D4	2,57	0,09	Mikrofiltration L2	2,42	0,14	-3,17
	B5	1,25	0,11	C5	1,18	0,16	D5	0,26	0,24	Ultrafiltration L1	1,22	0,55	-4,37
Bakteriensporen	B	mean	SD	C	mean	SD	D	mean	SD		mean B-D	SD	Retention (log N/No)
(KBE/100 ml)	B1	7,16	0,04	C1	7,21	0,03	D1	7,23	0,03	Tank oben	7,20	0,04	-
	B2	7,20	0,01	C2	7,25	0,02	D2	7,21	0,03	Tank mittig	7,22	0,02	-
	B3	7,23	0,01	C3	7,22	0,02	D3	7,27	0,00	Tank unten	7,24	0,03	-
	B4	0,62	0,28	C4	0,82	0,07	D4	1,47	0,24	Mikrofiltration L2	0,97	0,45	-6,25
	B5	0,69	0,36	C5	0,86	0,24	D5	0,84	0,50	Ultrafiltration L1	0,80	0,09	-6,42

Tabelle 56 log Konzentrationen und Retentionen (log N/No) von zudosierten Testviren und Bakteriensporen vor und nach der Ultra L1 und Mikro L2 in Abwasser (TS 14,5 g/l). Die Proben wurden in drei unabhängigen Serien entnommen (B, C, D). Die Werte stellen Mittelwerte (mean) und Standardabweichungen (SD) aus Dreifachanalysen dar. Die Probenserie A erfolgte zu Kontrollzwecken vor Zudosierung der Testorganismen (Daten nicht angeführt).

Untersuchung vom 21.07.2009

Nach Zudosierung der Testorganismen													
log Konzentration Mittelwert (Standard Abweichung)										Probenahmestelle	log Konz / ml		Retention (log N/No)
Testvirus	B	mean	SD	C	mean	SD	D	mean	SD		mean B-D	SD	
(PFU/ml)	B1	5,39	0,08	C1	5,16	0,04	D1	5,15	0,04	Tank oben	5,23	0,01	-
	B2	5,53	0,02	C2	5,14	0,04	D2	5,17	0,02	Tank mittig	5,28	0,21	-
	B3	5,58	0,08	C3	5,20	0,03	D3	5,12	0,03	Tank unten	5,30	0,25	-
	B4	3,41	0,01	C4	5,38	0,04	D4	3,59	0,07	Mikrofiltration L2	4,13	1,09	-1,14
	B5	3,00	0,07	C5	5,11	0,06	D5	3,34	0,08	Ultrafiltration L1	3,82	1,14	-1,45
Bakteriensporen	B	mean	SD	C	mean	SD	D	mean	SD		mean B-D	SD	Retention (log N/No)
(KBE/100 ml)	B1	7,28	0,06	C1	7,34	0,08	D1	7,39	0,07	Tank oben	7,34	0,06	-
	B2	7,37	0,13	C2	7,26	0,01	D2	7,45	0,11	Tank mittig	7,36	0,09	-
	B3	7,34	0,07	C3	7,36	0,06	D3	7,44	0,01	Tank unten	7,38	0,05	-
	B4	1,00	0,14	C4	0,52	0,48	D4	0,00	0,00	Mikrofiltration L2	0,51	0,50	-6,85
	B5	2,47	0,04	C5	2,52	0,06	D5	2,15	0,22	Ultrafiltration L1	2,38	0,20	-4,98

Tabelle 57 log Konzentrationen und Retentionen (log N/No) von zudosierten Testviren und Bakteriensporen vor und nach der Ultra L1 und Mikro L2 in Abwasser (TS 15,3 g/l). Die Proben wurden in drei unabhängigen Serien entnommen (B, C, D). Die Werte stellen Mittelwerte (mean) und Standardabweichungen (SD) aus Dreifachanalysen dar. Die Probenserie A erfolgte zu Kontrollzwecken vor Zudosierung der Testorganismen (Daten nicht angeführt).

Untersuchung vom 28.07.2009

Nach Zudosierung der Testorganismen														
log Konzentration Mittelwert (Standard Abweichung)										Probenahmestelle		log Konz / ml		Retention (log N/No)
Testvirus	B	mean	SD	C	mean	SD	D	mean	SD			mean B-D	SD	
(PFU/ml)	B1	5,74	0,02	C1	5,64	0,08	D1	5,66	0,08	Tank oben		5,68	0,06	-
	B2	5,85	0,04	C2	5,66	0,05	D2	5,75	0,09	Tank mittig		5,75	0,09	-
	B3	5,81	0,09	C3	5,54	0,13	D3	5,65	0,06	Tank unten		5,67	0,14	-
	B4	3,84	0,07	C4	3,72	0,00	D4	3,41	0,09	Mikrofiltration L2		3,66	0,22	-2,04
	B5	2,34	0,04	C5	2,17	0,10	D5	1,95	0,03	Ultrafiltration L1		2,15	0,20	-3,54
Bakteriensporen	B	mean	SD	C	mean	SD	D	mean	SD			mean B-D	SD	Retention (log N/No)
(KBE/100 ml)	B1	7,54	0,07	C1	7,51	0,09	D1	7,54	0,01	Tank oben		7,53	0,01	-
	B2	7,54	0,07	C2	7,57	0,05	D2	7,49	0,09	Tank mittig		7,53	0,04	-
	B3	7,54	0,10	C3	7,62	0,06	D3	7,54	0,01	Tank unten		7,57	0,05	-
	B4	2,08	0,02	C4	1,34	0,20	D4	1,22	0,14	Mikrofiltration L2		1,55	0,47	-6,00
	B5	2,76	0,07	C5	2,82	0,01	D5	2,47	0,05	Ultrafiltration L1		2,68	0,19	-4,86

Tabelle 58 log Konzentrationen und Retentionen (log N/No) von zudosierten Testviren und Bakteriensporen vor und nach der Mikro L1 und Mikro L2 in Abwasser (TS 12,0 g/l). Die Proben wurden in drei unabhängigen Serien entnommen (B, C, D). Die Werte stellen Mittelwerte (mean) und Standardabweichungen (SD) aus Dreifachanalysen dar. Die Probenserie A erfolgte zu Kontrollzwecken vor Zudosierung der Testorganismen (Daten nicht angeführt).

Untersuchung vom 02.02.2010

Nach Zudosierung der Testorganismen														
log Konzentration Mittelwert (Standard Abweichung)										Probenahmestelle		log Konz / ml		Retention (log N/No)
Testvirus	B	mean	SD	C	mean	SD	D	mean	SD			mean B-D	SD	
(PFU/ml)	B1	4,81	0,10	C1	4,85	0,06	D1	4,73	0,02	Tank oben		4,80	0,06	-
	B2	4,79	0,04	C2	4,69	0,06	D2	4,79	0,04	Tank mittig		4,76	0,06	-
	B3	4,78	0,04	C3	4,72	0,06	D3	4,84	0,04	Tank unten		4,78	0,06	-
	B4	0,60	0,52	C4	0,10	0,17	D4	0,00	0,00	Mikrofiltration L2		0,23	0,32	-4,54
	B5	3,07	0,03	C5	2,23	0,13	D5	1,78	0,00	Mikrofiltration L1		2,36	0,66	-2,42
Bakteriensporen	B	mean	SD	C	mean	SD	D	mean	SD			mean B-D	SD	Retention (log N/No)
(KBE/100 ml)	B1	7,24	0,05	C1	7,22	0,02	D1	7,54	0,03	Tank oben		7,33	0,18	-
	B2	7,30	0,03	C2	7,20	0,01	D2	7,53	0,05	Tank mittig		7,34	0,17	-
	B3	7,32	0,01	C3	7,36	0,04	D3	7,59	0,08	Tank unten		7,43	0,15	-
	B4	0,00	0,00	C4	0,00	0,00	D4	0,10	0,17	Mikrofiltration L2		0,03	0,06	-7,33
	B5	0,00	0,00	C5	0,16	0,28	D5	0,00	0,00	Mikrofiltration L1		0,05	0,09	-7,31

14.10 Modul „Akut toxische und gentoxische Effekte“

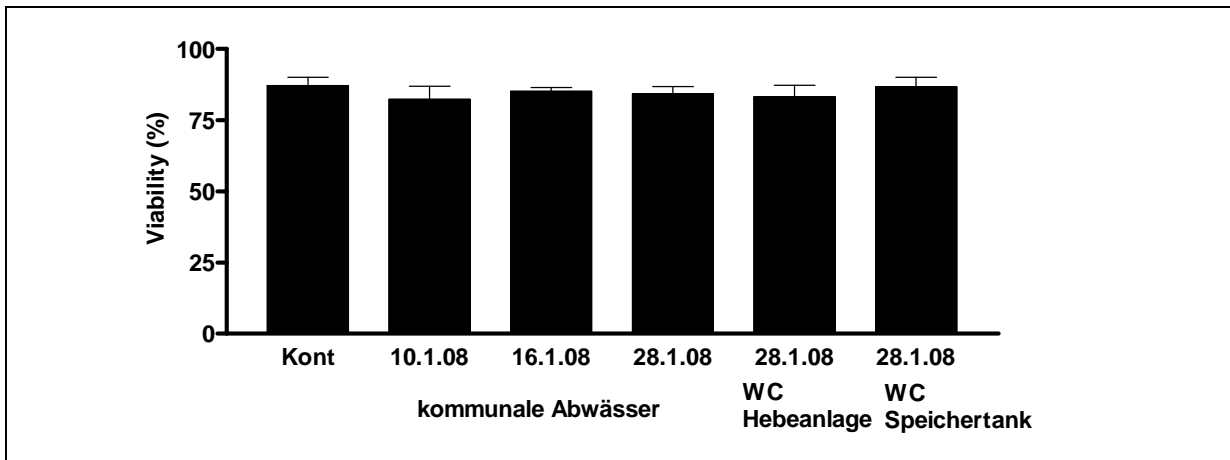


Abbildung 92 Vitalitätsbestimmung von primären Hepatozyten. Zellen wurden mit Wasserproben für 60 min bei 37°C intubiert. Nachfolgend wurden Zellen zweimal mit PBS gewaschen. Die Vitalität der primären Hepatozyten wurde mittels Trypanblaufärbung bestimmt (Lindl und Bauer, 1994). Die Balken zeigen die Mittelwerte und Standardabweichungen der 3 Einzelmessungen.

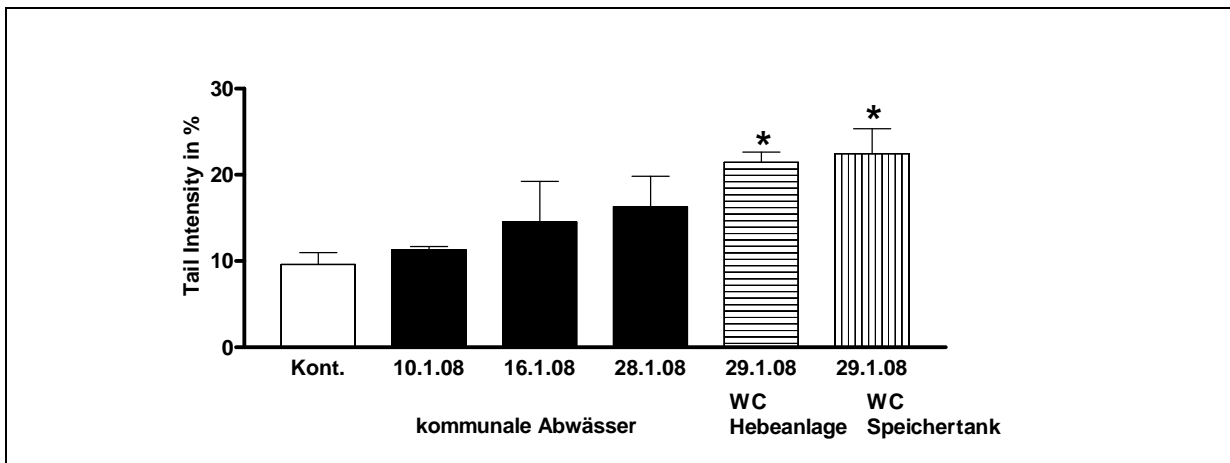


Abbildung 93 DNA Schäden in primären Rattenhepatozyten. Zellen wurden mit den Wasserproben für 60 min bei 37°C inkubiert. Die DNA-Migration wurde unter Standardbedingungen (20 min Elektrophorese, 300mA, 25V) bestimmt. Pro Messpunkt wurden drei Objektträger hergestellt, und jeweils in 50 Zellen pro Objektträger die DNA-Migration gemessen. Als positive Kontrolle wurde H₂O₂ verwendet. Die Balken zeigen die Mittelwerte und Standardabweichungen der Einzelmessungen. * statistische Signifikanz, p < 0,05, t-Test.

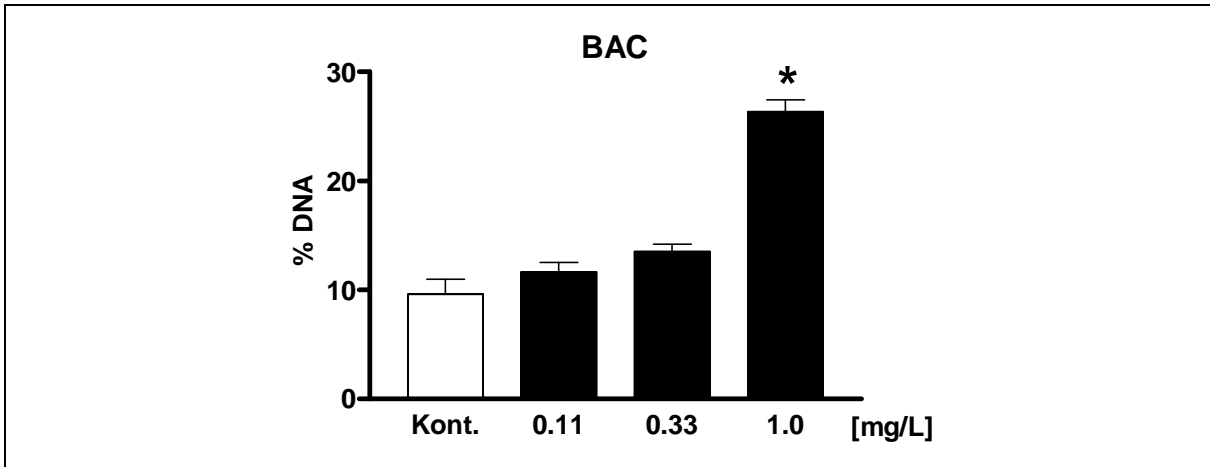


Abbildung 94 Induktion von DNA-Migration in primate Hepatozyten durch BAC. Proben (destilliertes Wasser) wurden mit BAC (0,11, 0,33 und 1,0 mg/l) für 60 min bei 37°C intubiert. Nachfolgend wurden Zellen 2mal mit PBS gewaschen. Die Vitalität der primären Hepatozyten wurde mittels Trypanblaufärbung bestimmt (Lindl und Bauer, 1994). Die Balken zeigen die Mittelwerte und Standardabweichungen der 3 Einzelmessungen. * statistische Signifikanz, $p < 0,05$, t-Test.

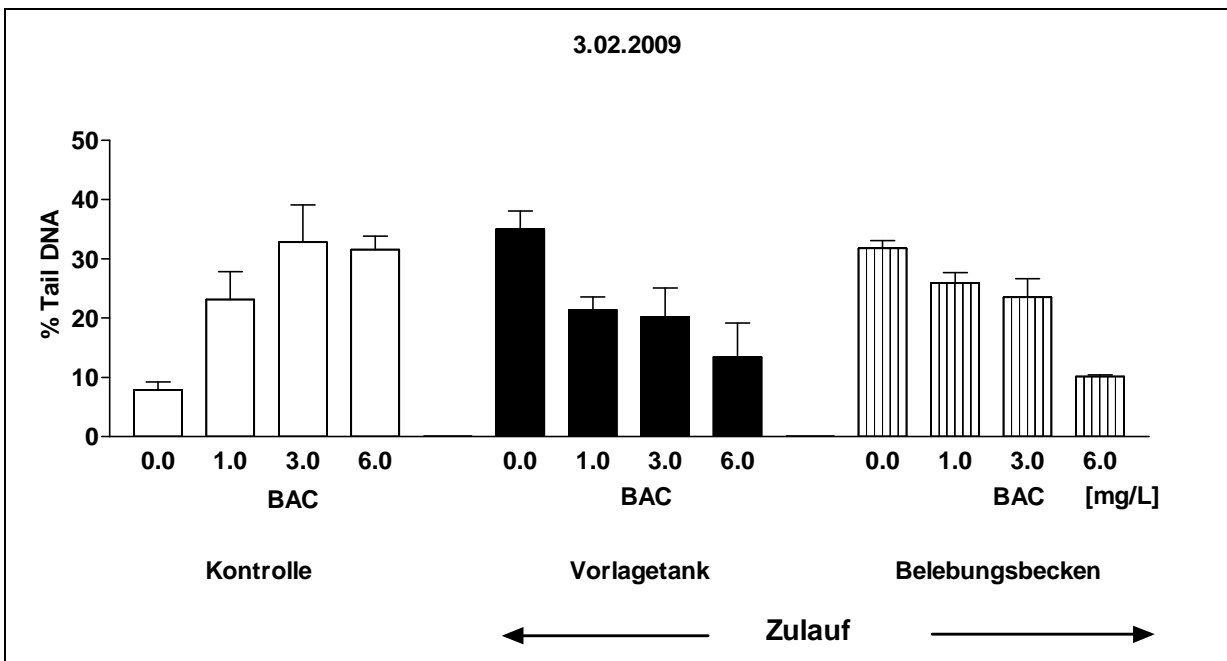


Abbildung 95 Induktion von DNA-Migration in primären Hepatozyten durch BAC (Wasserproben von 03.02.2009). Zellen wurden mit BAC (0,0 - 6,0 mg/l) für 60 min bei 37°C inkubiert. Nachfolgend wurden Zellen 2mal mit PBS gewaschen. Die Balken zeigen die Mittelwerte und Standardabweichungen.

Tabelle 59 Induktion von His⁺-Revertanten durch die getesteten Wasserproben in verschiedenen Salmonella Stämme^a.

Proben	Dose level per plate (µl)	TA 98		TA 100		YG1024	
		Mean±SD (-S9)	Mean±SD (+S9)	Mean±SD (-S9)	Mean±SD (+S9)	Mean±SD (-S9)	Mean±SD (+S9)
Negativkontrolle	0,00	26,3±1,5	33,5±0,7	220,0±10,6	152,5±10,6	21,6±7,6	51,7±2
Kommunales Abwasser 10.01.2008	100	-	40,5±0,7	158,5±23,3	168,5±19,1	-	-
	250	-	36,0±4,2	197,0±7,1	148,0±21,2	-	-
	500	21,0±1,7	49,3±20,3	180,0±12,7	166,3±23,3	19,3±2,9	48±3,5
Kommunales Abwasser 16.01.2008	100	-	40,5±0,7	226,5±50,2	148,5±14,8	-	-
	250	-	36,0±4,2	237,5±23,3	191,5±12,0	-	-
	500	20,0±4,0	50,0±20,1	150,0±1,4	174,5±18,5	24,5±3,5	50±2,5
Kommunales Abwasser 28.01.2008	100	-	30,5±3,5	227,5±21,9	169,5±13,4	-	-
	250	-	41,0±11,3	224,5±23,3	177,0±7,1	-	-
	500	22,3±11,1	45,6±7,5	227,5±21,9	174,0±5,6	24,3±0,5	52±8,2
WC Abwasser Hebeanlage 29.01.2008	100	-	41,0±8,6	208,0±11,3	170,5±14,8	-	-
	250	-	40,0±8,5	221,5±29,0	161,5±10,6	-	-
	500	24,0±6,0	39,0±1,4	215,0±10,6	161,5±17,55	19,3±2,9	51,0±5,3
WC Abwasser Speichertank 29.01.2008	100	-	40,0±8,5	208,0±10,0	189,0±9,9	-	-
	250	-	36,5±3,5	197,0±11,3	174,0±2,1	-	-
	500	21,7±9,2	41,5±4,9	233,5±3,5	161,5±15,3	22,3±6,7	45,0±5,1
Positivkontrolle^a		873,3±154,5	418,3±12,3	507,0±96,2	580,0±90,0	2500±908	3200±50

^a ... Positivkontrolle: TNF (2,4,7-Trinitro-9-Fluorenon) 0,1 µg/Platte für TA98 (-S9), NaN₃ (Natriumazid) 1,5 µg/Platte für TA100 (-S9), TNF 0,1 µg/Platte für YG1024 (-S9); 2AA (2-Aminoantracene) 0,5 µg/Platte für TA98 (+S9), 2AA 2,0 µg/Platte für TA100 (+S9), 2AA 0,5 µg/Platte für YG1024 (+S9).

Tabelle 60 Induktion von His⁺-Revertanten durch 4-fach-konzentrierte Wasserproben in verschiedenen Salmonella Stämme^a.

Proben	Dose level per plate (µl)	TA 98		TA 100		YG1024	
		Mean±SD (-S9)	Mean±SD (+S9)	Mean±SD (-S9)	Mean±SD (+S9)	Mean±SD (-S9)	Mean±SD (+S9)
WC-Hebeanlage 26.06.2008	0,00	26,0±2,1	38,7±3,1	-	-	42,3±5,5	48,7±9,1
	100	-	-	-	-	-	-
	250	-	-	-	-	-	-
	500	27,7±3,5	34,3±3,2	-	-	42,3±3,5	85,7±4,5
Positivkontrolle^a		873,3±154,5	418,3±12,3	507,0±96,2	580,0±90,0	2500,0±90,8	3200,0±50,0

^a ... Positivkontrolle: TNF (2,4,7-Trinitro-9-Fluorenon) 0,1 µg/Platte für TA98 (-S9), NaN₃ (Natriumazid) 1,5 µg/Platte für TA100 (-S9), TNF 0,1 µg/Platte für YG1024 (-S9); 2AA (2-Aminoantracene) 0,5 µg/Platte für TA98 (+S9), 2AA 2 µg/Platte für TA100 (+S9), 2AA 0,5 µg/Platte für YG1024 (+S9).

15 Verzeichnis der Abbildungen

Abbildung 1	Ansicht der Versuchsanlage mit Benennung aller Einrichtungen.....	3
Abbildung 2	Draufsicht auf die untere Ebene der Versuchsanlage (Einzige Ausnahme: der Zulauftank steht auf der oberen Ebene) mit Benennung aller Einrichtungen.	4
Abbildung 3	Die Membranmodule im eingebauten Zustand im Belebungsbecken vor Inbetriebnahme der Anlage (Links: Membranmodul der Linie 1; Rechts: Membranmodul der Linie 2).	5
Abbildung 4	Die untere Ebene der Versuchsanlage (schwarzer runder Vorlagetank; viereckige Ablauftanks; in Hintergrund das weiße Belebungsbecken).	5
Abbildung 5	linkes Bild: Permeatlinie 1; rechtes Bild: beide Permeatlinien über den Ablauftanks.	6
Abbildung 6	Beispielhafte Darstellung der PC-Visualisierung der Versuchsanlage.	9
Abbildung 7	Datenblatt des Moduls Bio-Cel®-BC-10-10 der Fa. Microdyn Nadir.	10
Abbildung 8	Aufbau und Kennwerte des Membranmoduls Typ M-Box der Fa. Kubota	11
Abbildung 9	Datenblatt des Membranmoduls A-HP 4.0 der Fa. ItN Nanovation.	12
Abbildung 10	Datenblatt der gesamten Membraneinheit A-HP 4.0 der Fa. ItN Nanovation.	13
Abbildung 11	Vergleich der Zyklen eines konventionellen und eines membrangestützten SBR-Verfahren (Krampe und Krauth, 2000).	14
Abbildung 12	Starkes Schäumen im Belebungsbecken während der Einfahrphase Anfang Jänner 2009.	20
Abbildung 13	Durchflussleistung und Summe des Lufteintrags in das Belebungsbecken in 24 Stunden bei einem Arbeitsdruck von 0,5 bar (Datum: 18.06.2009).	22
Abbildung 14	Durchflussleistung und Summe des Lufteintrags für die Crossflow-Belüftung des Membranmoduls der Linie 1 (Mikro L1) in 24 Stunden bei einem Arbeitsdruck von 0,5 bar (Datum: 12.01.2010).	23
Abbildung 15	Ablöseerscheinungen an den Rändern der Membranplatten der Ultra L1 bei der zweiten Reinigung am 26.02.2009.	25
Abbildung 16	Verblockungen an den Membranen bei der dritten Reinigung am 23.07.2009.	26
Abbildung 17	COLIGUARD® EC.hs Messgerät und Laptop mit Software; Komponenten im Gerät: der Reaktor mit Filterplatte und Verstelleinrichtung (liegt schräg von links unten nach rechts oben), rechter Hand die fluoreszenzoptische Messeinheit, darunter die Reagenzien und die Reinigungslösung.	30
Abbildung 18	Elektronenmikroskopische Aufnahme der verwendeten Bakteriensporen (<i>Bacillus subtilis</i> ATCC 6644).	32
Abbildung 19	Koloniebildende Einheiten der Bakteriensporen nach Kultivierung auf Plate-Count-Agar.	32
Abbildung 20	Elektronenmikroskopische Aufnahme des verwendeten Testvirus (Bakteriophage MS2). Der Balken stellt 100 nm dar.	33
Abbildung 21	Plaque bildende Einheiten (PFU) des Testvirus (Bakteriophage MS2) auf einem Layer der Wirtszelle <i>Escherichia coli</i> NCTC 12486	33
Abbildung 22	Entwicklung der Trockensubstanz im Belebungsbecken bei Vollfüllung über die Versuchsdauer (vertikale Linie = Grenze zwischen Einfahrphase und Vollbetrieb).	44
Abbildung 23	Anteil des gelösten Sauerstoffs im Vorlagetank (VLT DO, untere Linie) und im Belebungsbecken (BB DO, obere Linie) am 22.01.2009 während der Einfahrphase.	46
Abbildung 24	Anteil des gelösten Sauerstoffs im Belebungsbecken (BB DO1 und BB DO2) am 15.08.2009 während des Vollbetriebs.	47
Abbildung 25	Flux-Leistungen aller drei untersuchten Membranen während des gesamten Untersuchungszeitraums.	48
Abbildung 26	Resultierende Transmembrandrücke (TMP) bei vorgegebenen Flux-Leistungen aller drei untersuchten Membranen während des Untersuchungszeitraums.	49
Abbildung 27	Veränderung des Transmembrandrucks der Ultra L1 (linkes Diagramm) und der Mikro L2 (rechtes Diagramm) über die einzelnen Subzyklen während der gesamten Filtrationsphase (Datum: März 2009).	50
Abbildung 28	Ultrafiltration Linie1: Gegenüberstellung des Transmembrandrucks und des Flux.	50
Abbildung 29	Mikrofiltration Linie2: Gegenüberstellung des Transmembrandrucks und des Flux.	51

Abbildung 30 Mikrofiltration Linie1: Gegenüberstellung des Transmembrandrucks und des Flux.	51
Abbildung 31 KBE-Werte pro 100 ml, <i>E. coli</i> und Coliforme im Belebungsbecken.	53
Abbildung 32 KBE-Werte pro 100 ml, Enterokokken im Belebungsbecken.	53
Abbildung 33 Ablaufqualität bezüglich <i>E. coli</i> pro 100, 250 und 5.000 ml, Ultrafiltration L1 (Diagramm oben), Mikrofiltration L2 (Diagramm unten).....	54
Abbildung 34 Ablaufqualität bezüglich Coliforme pro 100, 250 und 5.000 ml, Ultrafiltration L1 (Diagramm oben), Mikrofiltration L2 (Diagramm unten).....	55
Abbildung 35 Ablaufqualität bezüglich Enterokokken pro 100, 250 und 5.000 ml, Ultrafiltration L1 (Diagramm oben), Mikrofiltration L2 (Diagramm unten).	56
Abbildung 36 Ablaufqualität bezüglich <i>E. coli</i> pro 100, 250 und 5.000 ml, Mikrofiltration L1 (Diagramm oben), Mikrofiltration L2 (Diagramm unten).....	57
Abbildung 37 Ablaufqualität bezüglich Coliforme pro 100, 250 und 5.000 ml, Mikrofiltration L1 (Diagramm oben), Mikrofiltration L2 (Diagramm unten).....	58
Abbildung 38 Ablaufqualität bezüglich Enterokokken pro 100, 250 und 5.000 ml, Mikrofiltration L1 (Diagramm oben), Mikrofiltration L2 (Diagramm unten).	59
Abbildung 39 Ergebnis der online-Messung mittels COLIGUARD EC.hs - <i>E. coli</i> Analyzer.	61
Abbildung 40 Konzentrationen des Testvirus (oberes Diagramm) und Bakteriensporen (unteres Diagramm) vor und nach Ultrafiltration L1 und Mikrofiltration L2 in Leitungswasser. Die Probenserie A erfolgte zu Kontrollzwecken vor Zudosierung der Testorganismen (Daten nicht dargestellt).	62
Abbildung 41 Konzentrationen des Testvirus (oberes Diagramm) und Bakteriensporen (unteres Diagramm) vor und nach Ultrafiltration L1 und Mikrofiltration L2 in Abwasser. Die Probenserie A erfolgte zu Kontrollzwecken vor Zudosierung der Testorganismen (Daten nicht dargestellt).	63
Abbildung 42 Konzentrationen des Testvirus (oberes Diagramm) und Bakteriensporen (unteres Diagramm) vor und nach Ultrafiltration L1 und Mikrofiltration L2 in Abwasser. Die Probenserie A erfolgte zu Kontrollzwecken vor Zudosierung der Testorganismen (Daten nicht dargestellt).	64
Abbildung 43 Konzentrationen des Testvirus (oberes Diagramm) und Bakteriensporen (unteres Diagramm) vor und nach Ultrafiltration L1 und Mikrofiltration L2 in Abwasser. Die Probenserie A erfolgte zu Kontrollzwecken vor Zudosierung der Testorganismen (Daten nicht dargestellt).	65
Abbildung 44 Konzentrationen des Testvirus (oberes Diagramm) und Bakteriensporen (unteres Diagramm) vor und nach Ultrafiltration L1 und Mikrofiltration L2 in Abwasser. Die Probenserie A erfolgte zu Kontrollzwecken vor Zudosierung der Testorganismen (Daten nicht dargestellt).	67
Abbildung 45 Konzentrationen des Testvirus (linkes Diagramm) und Bakteriensporen (rechtes Diagramm) vor und nach Ultrafiltration L1 und Mikrofiltration L2 in Abwasser. Die Probenserie A erfolgte zu Kontrollzwecken vor Zudosierung der Testorganismen (Daten nicht dargestellt).	68
Abbildung 46 Konzentrationen des Testvirus (linkes Diagramm) und Bakteriensporen (rechtes Diagramm) vor und nach Mikrofiltration L1 und Mikrofiltration L2 in Abwasser. Die Probenserie A erfolgte zu Kontrollzwecken vor Zudosierung der Testorganismen (Daten nicht dargestellt).	69
Abbildung 47 Vitalitätsbestimmung der primären Hepatozyten. Zellen wurden mit Wasserproben (verdünnt und unverdünnt) für 60 min bei 37°C inkubiert. Nachfolgend wurden Zellen zweimal mit PBS gewaschen. Die Vitalität der primären Hepatozyten wurde mittels Trypanblaufärbung bestimmt (LINDL und BAUER, 1994). Pro Probe wurden 150-200 Zellen ausgezählt. Die Balken zeigen die Mittelwerte und Standardabweichungen.	71
Abbildung 48 DNA Schäden in primären Rattenhepatozyten. Zellen wurden mit den Wasserproben für 60 min bei 37°C inkubiert. Die DNA-Migration wurde unter Standardbedingungen (20 min Elektrophorese, 300mA, 25V) bestimmt. Pro Messpunkt wurden drei Objektträger hergestellt, und jeweils in 50 Zellen pro Objektträger die DNA-Migration bestimmt. Die Balken zeigen die Mittelwerte und Standardabweichungen.	72
Abbildung 49 Vitalitätsbestimmung von primären Hepatozyten mit den konzentrierten Wasserproben. Die Proben wurden mittels Vakuumdestillation 8-fach konzentriert, nachfolgend wurde wie in Abbildung 47 beschrieben, die Vitalität der primären Hepatozyten mittels Trypanblaufärbung bestimmt. Die Balken zeigen die Mittelwerte und Standardabweichungen.....	72
Abbildung 50 DNA Schäden in primären Rattenhepatozyten. Die Proben (03.02.2009) wurden mittels Vakuum- destillation 8-fach konzentriert, nachfolgend wurde wie bereits in Abbildung 48 beschrieben Comet Assay durchgeführt. Die Balken zeigen die Mittelwerte und Standardabweichungen.	73

Abbildung 51 Vitalitätsbestimmung von primären Hepatozyten mit Zulauf- und Ablaufproben. Die Vitalitätsbestimmung folgte wie bereits in Abbildung 47 beschrieben. Die Balken zeigen die Mittelwerte und Standardabweichungen.	73
Abbildung 52 DNA Schäden in primären Rattenhepatozyten. Zellen wurden mit den Wasserproben (21.07.2009) für 60 min bei 37°C inkubiert, nachfolgend wurde wie bereits in Abbildung 48 beschrieben Comet Assay durchgeführt. Die Balken zeigen die Mittelwerte und Standardabweichungen.	74
Abbildung 53 Vitalitätsbestimmung von primären Hepatozyten mit Zulauf- und Ablaufproben. Die Vitalitätsbestimmung folgte wie bereits in Abbildung 47 beschrieben. Die Balken zeigen die Mittelwerte und Standardabweichungen.	74
Abbildung 54 DNA Schäden in primären Rattenhepatozyten. Zellen wurden mit den Wasserproben (28.07.2009) für 60 min bei 37°C inkubiert, nachfolgend wurde wie bereits in Abbildung 48 beschrieben Comet Assay durchgeführt. Die Balken zeigen die Mittelwerte und Standardabweichungen.	74
Abbildung 55 Vitalitätsbestimmung von primären Hepatozyten mit Zulauf- und Ablaufproben. Die Vitalitätsbestimmung folgte wie bereits in Abbildung 47 beschrieben. Die Balken zeigen die Mittelwerte und Standardabweichungen.	75
Abbildung 56 DNA Schäden in primären Rattenhepatozyten. Zellen wurden mit den Wasserproben (19.01.2010) für 60 min bei 37°C inkubiert, nachfolgend wurde wie bereits in Abbildung 48 beschrieben Comet Assay durchgeführt. Die Balken zeigen die Mittelwerte und Standardabweichungen.	75
Abbildung 57 Entwicklung der EW-Belastung über die gesamte Versuchsdauer (vertikale Linie = Grenze zwischen Einfahrphase und Vollbetrieb).	81
Abbildung 58 Verlauf ausgewählter chemischer und physikalisch-chemischer Parameter während eines gesamten Reinigungszyklus am 11.02.2009.	82
Abbildung 59 Verlauf ausgewählter chemischer und physikalisch-chemischer Parameter während eines gesamten Reinigungszyklus am 16.02.2010.	83
Abbildung 60 Zustand der Anlage während der Beprobung am 21. und 28. Juli 2009.	84
Abbildung 61 Ultrafiltration Linie1: Gegenüberstellung des Flux und der Permeabilität über die gesamte Versuchsdauer.	86
Abbildung 62 Mikrofiltration Linie2: Gegenüberstellung des Flux und der Permeabilität über die gesamte Versuchsdauer.	87
Abbildung 63 Mikrofiltration Linie1: Gegenüberstellung des Flux und der Permeabilität über die entsprechende Versuchsdauer.	87
Abbildung 64 Prozentanteil positiver und negativer <i>E. coli</i> -Befunde im Permeat von Ultra L1, Mikro L1 und Mikro L2.	90
Abbildung 65 Prozentanteil positiver und negativer Coliformen-Befunde im Permeat von Ultra L1, Mikro L1 und Mikro L2.	92
Abbildung 66 Prozentanteil positiver und negativer Enterokokken-Befunde im Permeat von Ultra L1, Mikro L1 und Mikro L2.	93
Abbildung 67 Retention (log N/No) der Bakteriensporen bei der Ultra L1 über die gesamte Versuchsdauer. Am 02.02.2010 war anstelle der Ultra L1 die Mikro L1 in Betrieb. Die Werte der Retention sind als absolute Beträge dargestellt.	96
Abbildung 68 Retention (log N/No) der Bakteriensporen bei der Mikro L2 über die gesamte Versuchsdauer. Die Werte der Retention sind als absolute Beträge dargestellt.	96
Abbildung 69 Retention (log N/No) des Testvirus bei der Ultra L1 über die gesamte Versuchsdauer. Am 02.02.2010 war anstelle der Ultra L1 die Mikro L1 in Betrieb. Die Werte der Retention sind als absolute Beträge dargestellt.	97
Abbildung 70 Retention (log N/No) des Testvirus bei der Mikro L2 über die gesamte Versuchsdauer. Die Werte der Retention sind als absolute Beträge dargestellt.	97
Abbildung 71 Spezifische Investitionskosten (unverzinst) verschiedener Anlagentypen für Kleinkläranlagen bis 50 EW.	102
Abbildung 72 Analysenwerte für TNb über die gesamte Versuchsdauer (Zu = Zulauf, Ab = Permeatlinie 1, Ab2 = Permeatlinie 2, vertikale Linie = Grenze zwischen Einfahrphase und Vollbetrieb).	113
Abbildung 73 Analysenwerte für NH ₄ -N über die gesamte Versuchsdauer (Zu = Zulauf, Ab = Permeatlinie 1, Ab2 = Permeatlinie 2, vertikale Linie = Grenze zwischen Einfahrphase und Vollbetrieb).	114
Abbildung 74 Analysenwerte für NO ₃ -N über die gesamte Versuchsdauer (Zu = Zulauf, Ab = Permeatlinie 1, Ab2 = Permeatlinie 2, vertikale Linie = Grenze zwischen Einfahrphase und Vollbetrieb).	114

Abbildung 75 Analysenwerte für NO ₂ -N über die gesamte Versuchsdauer (Zu = Zulauf, Ab = Permeatlinie 1, Ab2 = Permeatlinie 2, vertikale Linie = Grenze zwischen Einfahrphase und Vollbetrieb).....	115
Abbildung 76 Analysenwerte für BSB ₅ über die gesamte Versuchsdauer (Zu = Zulauf, Ab = Permeatlinie 1, Ab2 = Permeatlinie 2, vertikale Linie = Grenze zwischen Einfahrphase und Vollbetrieb).....	115
Abbildung 77 Analysenwerte für CSB über die gesamte Versuchsdauer (Zu = Zulauf, Ab = Permeatlinie 1, Ab2 = Permeatlinie 2, vertikale Linie = Grenze zwischen Einfahrphase und Vollbetrieb).....	116
Abbildung 78 Analysenwerte für TOC über die gesamte Versuchsdauer (Zu = Zulauf, Ab = Permeatlinie 1, Ab2 = Permeatlinie 2, vertikale Linie = Grenze zwischen Einfahrphase und Vollbetrieb).....	116
Abbildung 79 Analysenwerte für P _{ges} über die gesamte Versuchsdauer (Zu = Zulauf, Ab = Permeatlinie 1, Ab2 = Permeatlinie 2, vertikale Linie = Grenze zwischen Einfahrphase und Vollbetrieb).....	117
Abbildung 80 Analysenwerte für PO ₄ -P über die gesamte Versuchsdauer (Zu = Zulauf, Ab = Permeatlinie 1, Ab2 = Permeatlinie 2, vertikale Linie = Grenze zwischen Einfahrphase und Vollbetrieb).....	117
Abbildung 81 Analysenwerte für abfiltrierbare Stoffe über die gesamte Versuchsdauer (Zu = Zulauf, Ab = Permeatlinie 1, Ab2 = Permeatlinie 2, vertikale Linie = Grenze zwischen Einfahrphase und Vollbetrieb).....	118
Abbildung 82 Entwicklung des Schlammes im Reaktor über die gesamte Versuchsdauer (vertikale Linie = Grenze zwischen Einfahrphase und Vollbetrieb).....	119
Abbildung 83 Analysenwerte für TNb und TOC des Belebtschlammes im Reaktor über die gesamte Versuchsdauer (vertikale Linie = Grenze zwischen Einfahrphase und Vollbetrieb).....	119
Abbildung 84 Ultrafiltration Linie1: Gegenüberstellung des Transmembrandrucks und der Permeabilität über die gesamte Versuchsdauer.....	120
Abbildung 85 Mikrofiltration Linie2: Gegenüberstellung des Transmembrandrucks und der Permeabilität über die gesamte Versuchsdauer.....	120
Abbildung 86 Mikrofiltration Linie1: Gegenüberstellung des Transmembrandrucks und der Permeabilität über die entsprechende Versuchsdauer.....	121
Abbildung 87 Ganglinie der gelösten Sauerstoffkonzentration im Belebungsbecken (BB DO1) während der Einfahrphase bis Ende Jänner 2009 (Diagramm Oben) und während des Vollbetriebs (Diagramm Mitte und Unten).....	122
Abbildung 88 Ganglinie des pH-Werts im Vorlagetank (VLT, obere Linie) und Belebungsbecken (BB, untere Linie) während der Einfahrphase bis Ende Jänner 2009 (Diagramm Oben) und während des Vollbetriebs (Diagramm Mitte und Unten).....	123
Abbildung 89 Ganglinie der Temperatur im Vorlagetank (VLT, untere Linie) und Belebungsbecken (BB, obere Linie) während der Einfahrphase bis Ende Jänner 2009 (Diagramm Oben) und während des Vollbetriebs (Diagramm Mitte und Unten).....	124
Abbildung 90 Ganglinie des Redox-Potentials im Vorlagetank (VLT, untere Linie) und Belebungsbecken (BB, obere Linie) während der Einfahrphase bis Ende Jänner 2009 (Diagramm Oben) und während des Vollbetriebs (Diagramm Mitte und Unten).....	125
Abbildung 91 Ganglinie der elektrischen Leitfähigkeit im Vorlagetank (VLT, obere Linie) und Belebungsbecken (BB, untere Linie) während der Einfahrphase bis Ende Jänner 2009 (Diagramm Oben) und während des Vollbetriebs (Diagramm Mitte und Unten).....	126
Abbildung 92 Vitalitätsbestimmung von primären Hepatozyten. Zellen wurden mit Wasserproben für 60 min bei 37°C intubiert. Nachfolgend wurden Zellen zweimal mit PBS gewaschen. Die Vitalität der primären Hepatozyten wurde mittels Trypanblaufärbung bestimmt (Lindl und Bauer, 1994). Die Balken zeigen die Mittelwerte und Standardabweichungen der 3 Einzelmessungen.....	138
Abbildung 93 DNA Schäden in primären Rattenhepatozyten. Zellen wurden mit den Wasserproben für 60 min bei 37°C inkubiert. Die DNA-Migration wurde unter Standardbedingungen (20 min Elektrophorese, 300mA, 25V) bestimmt. Pro Messpunkt wurden drei Objektträger hergestellt, und jeweils in 50 Zellen pro Objektträger die DNA-Migration gemessen. Als positive Kontrolle wurde H ₂ O ₂ verwendet. Die Balken zeigen die Mittelwerte und Standardabweichungen der Einzelmessungen. * statistische Signifikanz, p< 0,05, t-Test.....	138
Abbildung 94 Induktion von DNA-Migration in primate Hepatozyten durch BAC. Proben (destilliertes Wasser) wurden mit BAC (0,11, 0,33 und 1,0 mg/l) für 60 min bei 37°C intubiert. Nachfolgend wurden Zellen 2mal mit PBS gewaschen. Die Vitalität der primären Hepatozyten wurde mittels Trypanblaufärbung bestimmt (Lindl und Bauer, 1994). Die Balken zeigen die Mittelwerte und Standardabweichungen der 3 Einzelmessungen. * statistische Signifikanz, p< 0,05, t-Test.....	139

Abbildung 95 Induktion von DNA-Migration in primären Hepatozyten durch BAC (Wasserproben von 03.02.2009). Zellen wurden mit BAC (0,0 - 6,0 mg/l) für 60 min bei 37°C inkubiert. Nachfolgend wurden Zellen 2mal mit PBS gewaschen. Die Balken zeigen die Mittelwerte und Standardabweichungen. 139

16 Verzeichnis der Tabellen

Tabelle 1	Kenndaten der SBMBR über die gesamte Versuchsdauer.	16
Tabelle 2	Mischungsverhältnis des Zulaufs zur Versuchsanlage.	17
Tabelle 3	EW-Belastungen der Versuchsanlage über die Versuchsdauer (nach Vorreinigung).	17
Tabelle 4	Aufteilung des Subzyklen über den Versuchszeitraum.	19
Tabelle 5	Membranreinigungen/-tausch (siehe dazu auch Kapitel 6.3; Ultra L1 = Ultrafiltrationsmembran der Linie 1, Mikro L1 = Mikrofiltrationsmembran der Linie 1; Mikro L2 = Mikrofiltrationsmembran der Linie 2).	24
Tabelle 6	Probenahmeterminen, Probenahmestellen und untersuchte Parameter des mikrobiologischen Monitoringprogramms.	29
Tabelle 7	Herkunft der Chemikalien und Medien für Comet Assay.	36
Tabelle 8	Herkunft der Chemikalien und Medien für Ames Test.	38
Tabelle 9	Positivkontrollen für Ames Test ^{a, 1}	38
Tabelle 10	Kennzahlen des Zulaufs für die Stickstoffparameter.	41
Tabelle 11	Kennzahlen des Ablaufs für die Stickstoffparameter.	41
Tabelle 12	Kennzahlen des Zulaufs für die organischen Parameter.	41
Tabelle 13	Kennzahlen des Ablaufs für die organischen Parameter.	42
Tabelle 14	Kennzahlen des Zulaufs für die Phosphorparameter.	43
Tabelle 15	Kennzahlen des Ablaufs für die Phosphorparameter.	43
Tabelle 16	Kennzahlen des Zu- und Ablaufs für die abfiltrierbaren Stoffe.	43
Tabelle 17	Kennzahlen für die Schlamm Trockensubstanz sowie die Raum- und Schlammbelastung der Versuchsanlage.	45
Tabelle 18	Kennzahlen für Glühverlust (GV) sowie die Stickstoff- und Kohlenstoffkonzentration des Belebtschlamm.	45
Tabelle 19	<i>E. coli</i> , Coliforme und Enterokokken pro 100 Milliliter, Belebungsbecken, Permeat Ultra L1, Permeat Mikro L2.	52
Tabelle 20	Koloniezahl pro Milliliter, 22°C, Belebungsbecken, Permeat Ultra L1, Permeat Mikro L2.	52
Tabelle 21	Koloniezahlwerte der Fäkalbakterien im Ablauf der Ultra L1, vor und nach Reinigung des Moduls am 23.07.2010.	56
Tabelle 22	Koloniezahlwerte der Fäkalbakterien im Ablauf der Ultra L1 „neu“, vor und nach Reinigung am 28.09.2009.	57
Tabelle 23	<i>E. coli</i> -Werte im Ablauf der Mikro L1 und der Mikro L2 bei unterschiedlicher Beschickungsmenge und unterschiedlicher Trockensubstanz im Belebungsbecken.	60
Tabelle 24	Mutagene Aktivitäten der 8-fach konzentrierten Wasserproben im Salmonella/Mikrosomen Test.	76
Tabelle 25	Mutagene Aktivitäten der hochkonzentrierten Wasserproben im Salmonella/Mikrosomen Test.	77
Tabelle 26	Induktion von His ⁺ -Revertanten durch Blue-Cotton Extrakt in verschiedene <i>Salmonella</i> Stämme ohne metabolischen Aktivierung (S9-Mix).	78
Tabelle 27	Induktion von His ⁺ -Revertanten durch Blue-Cotton Extrakt in verschiedene <i>Salmonella</i> Stämme mit metabolischen Aktivierung (S9-Mix).	79
Tabelle 28	Eliminationsleistungen chemischer Parameter während des Versuchsbetriebs.	81
Tabelle 29	Minimum-, Maximum-, Mittel- und Medianwerte, Belebungsbecken.	89

Tabelle 30	Koloniezahlwerte der Permeate, Mikro L1 und Mikro L2.....	94
Tabelle 31	Wachstumspotential für Koloniebildende Einheiten, Permeat von Mikro L1 und Mikro L2.....	94
Tabelle 32	Retentionen (log N/No) der Ultra L1 und Mikro L2 von Bakteriensporen und dem Testvirus über die Versuchsdauer.....	95
Tabelle 33	Retentionen (log N/No) der Mikro L1 und Mikro L2 von Bakteriensporen und dem Testvirus am 02.02.2010. Die Werte stellen Mittelwerte aus jeweils 3 Untersuchungsserien (B, C, D) verteilt über einen Filtrationssubzyklus dar, die im 3-fach Ansatz analysiert wurden.....	98
Tabelle 34	Zusammenstellung der Kostenanteile verschiedener KKA-Systeme bei einer 25-jährigen Nutzung (alle Kosten sind Nettokosten).....	103
Tabelle 35	<i>Escherichia coli</i> , Coliforme und Enterokokken pro 100 ml, Belebungsbecken.....	127
Tabelle 36	<i>Escherichia coli</i> pro 100 ml, 1.000 ml, 3.000 ml und 5.000 ml, nach Ultra L1.....	128
Tabelle 37	Coliforme Bakterien pro 100 ml, 1.000 ml, 3.000 ml und 5.000 ml, nach Ultra L1.....	128
Tabelle 38	Enterokokken pro 100 ml, 1.000 ml, 3.000 ml und 5.000 ml, nach Ultra L1.....	128
Tabelle 39	<i>Escherichia coli</i> pro 100 ml, 1.000 ml, 3.000 ml und 5.000 ml, nach Mikro L1.....	129
Tabelle 40	Coliforme Bakterien pro 100 ml, 1.000 ml, 3.000 ml und 5.000 ml, nach Mikro L1.....	129
Tabelle 41	Enterokokken pro 100 ml, 1.000 ml, 3.000 ml und 5.000 ml, nach Mikro L1.....	129
Tabelle 42	<i>Escherichia coli</i> pro 100 ml, 1.000 ml, 3.000 ml und 5.000 ml, nach Mikro L2.....	130
Tabelle 43	Coliforme Bakterien pro 100 ml, 1.000 ml, 3.000 ml und 5.000 ml, nach Mikro L2.....	131
Tabelle 44	Enterokokken pro 100 ml, 1.000 ml, 3.000 ml und 5.000 ml, nach Mikro L2.....	131
Tabelle 45	Minimum-, Maximum-, Mittel- und Medianwerte, Permeat Ultra L1.....	132
Tabelle 46	Minimum-, Maximum-, Mittel- und Medianwerte, Permeat Mikro L1.....	132
Tabelle 47	Minimum-, Maximum-, Mittel- und Medianwerte, Permeat Mikro L2.....	132
Tabelle 48	Retentionen (log N/No) für Fäkalbakterien, Ultra L1.....	133
Tabelle 49	Retentionen (log N/No) für Fäkalbakterien, Mikro L1.....	133
Tabelle 50	Wachstumspotential für Koloniebildende Einheiten, Permeat Mikro L1 und Mikro L2.....	133
Tabelle 51	Retentionen (log N/No) für Fäkalbakterien, Mikro L2.....	134
Tabelle 52	log Konzentrationen und Retentionen (log N/No) von zudosierten Testviren und Bakteriensporen vor und nach der Ultra L1 und Mikro L2 in Leitungswasser. Die Proben wurden in drei unabhängigen Serien entnommen (B, C, D). Die Werte stellen Mittelwerte (mean) und Standardabweichungen (SD) aus Dreifachanalysen dar. Die Probenserie A erfolgte zu Kontrollzwecken vor Zudosierung der Testorganismen (Daten nicht angeführt).....	134
Tabelle 53	log Konzentrationen und Retentionen (log N/No) von zudosierten Testviren und Bakteriensporen vor und nach der Ultra L1 und Mikro L2 in Abwasser (TS 2,8 g/l). Die Proben wurden in drei unabhängigen Serien entnommen (B, C, D). Die Werte stellen Mittelwerte (mean) und Standardabweichungen (SD) aus Dreifachanalysen dar. Die Probenserie A erfolgte zu Kontrollzwecken vor Zudosierung der Testorganismen (Daten nicht angeführt).....	135
Tabelle 54	log Konzentrationen und Retentionen (log N/No) von zudosierten Testviren und Bakteriensporen vor und nach der Ultra L1 und Mikro L2 in Abwasser (TS 5,3 g/l). Die Proben wurden in drei unabhängigen Serien entnommen (B, C, D). Die Werte stellen Mittelwerte (mean) und Standardabweichungen (SD) aus Dreifachanalysen dar. Die Probenserie A erfolgte zu Kontrollzwecken vor Zudosierung der Testorganismen (Daten nicht angeführt).....	135
Tabelle 55	log Konzentrationen und Retentionen (log N/No) von zudosierten Testviren und Bakteriensporen vor und nach der Ultra L1 und Mikro L2 in Abwasser (TS 10,1 g/l). Die Proben wurden in drei unabhängigen Serien entnommen (B, C, D). Die Werte stellen Mittelwerte (mean) und Standardabweichungen (SD) aus Dreifachanalysen dar. Die Probenserie A erfolgte zu Kontrollzwecken vor Zudosierung der Testorganismen (Daten nicht angeführt).....	136
Tabelle 56	log Konzentrationen und Retentionen (log N/No) von zudosierten Testviren und Bakteriensporen vor und nach der Ultra L1 und Mikro L2 in Abwasser (TS 14,5 g/l). Die Proben wurden in drei unabhängigen Serien entnommen (B, C, D). Die Werte stellen Mittelwerte (mean) und Standardabweichungen (SD) aus Dreifachanalysen dar. Die Probenserie A erfolgte zu Kontrollzwecken vor Zudosierung der Testorganismen (Daten nicht angeführt).....	136
Tabelle 57	log Konzentrationen und Retentionen (log N/No) von zudosierten Testviren und Bakteriensporen vor und nach der Ultra L1 und Mikro L2 in Abwasser (TS 15,3 g/l). Die Proben wurden in drei unabhängigen	

Serien entnommen (B, C, D). Die Werte stellen Mittelwerte (mean) und Standardabweichungen (SD) aus Dreifachanalysen dar. Die Probenserie A erfolgte zu Kontrollzwecken vor Zudosierung der Testorganismen (Daten nicht angeführt). 137

Tabelle 58 log Konzentrationen und Retentionen (log N/No) von zudosierten Testviren und Bakteriensporen vor und nach der Mikro L1 und Mikro L2 in Abwasser (TS 12,0 g/l). Die Proben wurden in drei unabhängigen Serien entnommen (B, C, D). Die Werte stellen Mittelwerte (mean) und Standardabweichungen (SD) aus Dreifachanalysen dar. Die Probenserie A erfolgte zu Kontrollzwecken vor Zudosierung der Testorganismen (Daten nicht angeführt). 137

Tabelle 59 Induktion von His⁺-Revertanten durch die getesteten Wasserproben in verschiedenen Salmonella Stämme^a 140

Tabelle 60 Induktion von His⁺-Revertanten durch 4-fach-konzentrierte Wasserproben in verschiedenen Salmonella Stämme^a 140