



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
WIEN

Vienna University of Technology

DIPLOMARBEIT – DIPLOMA THESIS

Einfluss der Belüftung von Faulschlamm auf dessen chemisch-physikalische Eigenschaften

Aeration of digested sludge – alterations of physical and chemical parameters

ausgeführt zum Zwecke der Erlangung des akademischen Grades eines Diplom-
Ingenieurs unter der Leitung von

Ass. Prof. Dipl.-Ing. Dr. Karl Svardal

am

E226 Institut für Wassergüte, Ressourcenmanagement und Abfallwirtschaft

eingereicht an der

Technischen Universität Wien

Fakultät für Maschinenwesen und Betriebswissenschaften

durch

Nora Fricko

0925938

1130 Wien, Auhofstrasse 24/2/3

1. Kurzfassung

Der bei der biologischen Abwasserreinigung anfallende Überschussschlamm wird in größeren kommunalen Kläranlagen vermehrt anaerob stabilisiert. Bei erhöhter Temperatur im anaeroben Milieu erfolgt die Zersetzung und Autolyse der Biomasse, wodurch Faulgas - ein Gasgemisch aus CO_2 und CH_4 - gebildet wird; zuvor in der aeroben Stufe der Belebungsanlage in den Zellen gebundenes Ammonium und Phosphat werden als gelöste Ionen freigesetzt. Das gewonnene Faulgas wird zur Energiegewinnung von thermische und elektrische Energie zur Deckung des Eigenenergiebedarfs („energieautarke Kläranlage“) herangezogen. Aufgrund des Gleichgewichts zwischen dem Partialdruck eines Gases und dessen Konzentration in der Flüssigkeit wird CO_2 im Faulschlamm gelöst. Bei Austritt des Faulschlammes gegen Atmosphäre entweicht das CO_2 teilweise und der pH -Wert des Faulschlammes beginnt zu steigen. Die durch Autolyse freigesetzten Phosphat- und Ammoniumionen fallen mit zweiwertigen Gegenionen - vorrangig Magnesium - als schwerlösliches, kristallines Magnesiumammoniumphosphat (MAP, Struvit) aus und verursachen dadurch in vielen Fällen Inkrustationen, welche durch herkömmliche Reinigungsschritte kaum beseitigt werden können. Zudem gewinnt die Rückgewinnung von Phosphat aus phosphatreichen Abfallprodukten wie etwa Klärschlamm als Konsequenz der Verknappung an mineralischem Phosphat und der sinkenden Qualität der Lagerstätten an wirtschaftlicher Attraktivität und ist bereits Gegenstand zahlreicher Publikationen und Forschungsprojekte. MAP als mineralischer, schwermetallfreier Langzeitdünger spielt hier eine wesentliche Rolle.

Im Zuge dieser Diplomarbeit wurde die Fällung von Magnesiumammoniumphosphat aus Faulschlamm durch Belüftung sowie der Einfluss dieser Behandlung auf die Eigenschaften des Schlammes insbesondere hinsichtlich Entwässerbarkeit untersucht. Zu diesem Zweck wurden Batchbelüftungsversuche bei variabler Belüftungsintensität und Fällmittelmenge - als Fällmittel wurde Magnesiumchloridhexahydrat eingesetzt - durchgeführt und bei vorab festgelegten pH -Grenzen die Konzentrationen der für die Fällung relevanten Ionen, die Entwässerbarkeit des Schlammes und der Trockensubstanzgehalt des Rückstandes bestimmt. Um die Messdaten der Entwässerbarkeit zu verifizieren, wurden bei einigen Belüftungsversuchen zusätzlich rheologische Messungen vorgenommen. Zur Festlegung und Optimierung der Rahmenbedingungen einer großtechnischen Erprobung der Faulschlamm-belüftung wurde einerseits durch Belüftung über 24 Stunden die optimale Belüftungsdauer und andererseits eine Messung des die Belüftung charakterisierenden $k_L a$ -Werts der Apparatur durchgeführt. Um längere Stehzeiten zwischen Belüftung und Entwässerung des Faulschlammes zu simulieren, wurden Proben des belüfteten Faulschlammes über 24 Stunden temperiert gelagert und anschließend die Konzentrationsdifferenz an Gelöstionen und der Trockensubstanzgehalt untersucht.

Aufgrund der oben beschriebenen Messungen können folgende zusammenfassende Aussagen getroffen werden:

Eine Fällung von Struvit aus Faulschlamm durch Belüftung erscheint technisch möglich; die erzielbare Endkonzentration an Phosphat im Schlamm ist ausschließlich von der eingesetzten Menge an Magnesiumchloridhexahydrat und dem End pH -Wert abhängig; ein Einfluss der Belüftungsintensität konnte nicht nachgewiesen werden. Auch bei äquimolarem Fällmitteleinsatz bleibt aufgrund des pH -abhängigen Löslichkeitsprodukts von MAP Phosphat im Schlamm gelöst. Eine Bilanzierung der Ionen wurde exemplarisch für einen Versuch durchgeführt - diese weist auf die Beteiligung eines weiteren,

im Faulschlamm in relevanter Konzentration vorkommenden Reaktionspartners - höchstwahrscheinlich Fe^{3+} - hin, da nur so die systematisch auftretende Differenz zwischen Erdalkalitionen und Phosphat erklärt werden kann. Der bezogen auf Phosphat erhöhte Verbrauch an Ammonium kann auf das pH - und temperaturabhängige Gleichgewicht zwischen Ammoniak und Ammonium zurückgeführt werden - ein Teil des flüchtigen Ammoniaks wird durch die Belüftung ausgetrieben. Die erforderliche Belüftungsdauer zur Erreichung des gewünschten pH -Werts sank mit steigender Belüftungsintensität, jedoch stieg auch die verbrauchte Luftmenge an. Es konnten bei steigendem Fällmitteleinsatz sinkende Belüftungszeiten beobachtet werden, welche auf eine Verbesserung des $k_L a$ -Werts der Belüftung durch die erhöhte Salzkonzentration im Faulschlamm und die dadurch verringerte Blasenkoaleszenzneigung zurückgeführt werden.

Der für die Wirtschaftlichkeit der Faulschlammbelüftung entscheidende Faktor ist zweifellos die deutliche Verbesserung der Entwässerbarkeit des Schlammes. Eine Tendenz hinsichtlich des Fällmitteleinsatzes oder der Belüftungsintensität konnte nicht beobachtet werden - im Mittel verringerte sich der Massenanteil des Rückstandes um $4\%_m$ absolut. Durch die Belüftung scheint es zum Abbau von extrazellulären, polymeren Substanzen (EPS) - ein die Bakterien zu Schutz- und Speicherzwecken umgebendes Hydrogel - zu kommen, welche ansonsten die Entwässerbarkeit des Schlammes begrenzt. Da unabhängig vom sinkenden Massenanteil eine Steigerung des Trockensubstanzgehalts des Rückstandes festgestellt wurde, konnte die Möglichkeit der erhöhten Verfrachtung von Feststoff in den Überstand verworfen werden. Der Trockensubstanzgehalt des Rückstandes steigt mit der eingesetzten Menge an Fällmittel überproportional an; dies wird einerseits auf die erhöhte Masse an kristallisierten Fällungsprodukten im Schlamm und andererseits auf denaturierende und osmotische Effekte der durch das Fällmittel in den Schlamm eingebrachten Chlorid- und Magnesiumionen zurückgeführt.

Bei längerer Belüftung konnte zwar ein weiterer, signifikanter Anstieg des pH -Werts und sinkende Phosphatkonzentrationen festgestellt werden, jedoch wurde auch biologische Aktivität der autotrophen Bakterien - erkennbar am sinkenden Ammoniumgehalt - beobachtet, welche nach Erreichen eines pH -Maximums und etwa 6 Stunden Belüftungsdauer - abhängig von der Belüftungsintensität - einsetzte. Die Entwässerbarkeit eines länger belüfteten Schlammes verschlechterte sich deutlich, da aufgrund des Bakterienwachstums erneut EPS gebildet wurde. Die optimale Belüftungszeit ist daher vor dem Einsetzen biologischer Aktivität anzusetzen und korreliert mit dem Erreichen eines schwach ausgeprägten pH -Maximums. Zu diesem Zeitpunkt ist auch die Verbesserung der Entwässerbarkeit am stärksten ausgeprägt.

Die Daten der rheologischen Messungen untermauern die getroffenen Annahmen hinsichtlich der Entwässerbarkeit des Faulschlammes; die Viskosität des Schlammes sinkt mit steigendem pH -Wert ab. Die dynamische Viskosität einer Flüssigkeit ist maßgeblich für die Dimensionierung von Rohrleitungen und Pumpen; da es sich bei Faulschlamm um ein strukturviskoses, thixotropes Fluid mit ausgeprägter Fließgrenze handelt, kann die dynamische Viskosität nicht einfach als Zahlenwert ermittelt werden - vielmehr ist sie von der Scherrate $\dot{\gamma}$ abhängig. Für die mathematische Beschreibung der gemessenen Fließkurven wurden Approximationsfunktionen nach Ostwald-de Waele und Herschel-Bulkley verwendet. Anhand der ermittelten Parameter wurde die dynamische Viskosität bei einer Scherrate $\dot{\gamma} = 500 \frac{1}{s}$ errechnet. Im Schnitt ergab sich eine Verringerung der dynamischen Viskosität des Faulschlammes pro 0,2 pH -Einheiten um 0,47-0,54 mPas, abhängig vom Approximationsmodell.

Es konnte eine ausgeprägte Rücklösung von Phosphat bei temperierter Lagerung über 24 Stunden beobachtet werden. Steigender Fällmitteleinsatz führt zu einer Reduktion der Rücklösung - relativ und absolut. Während sich bei keinem oder geringem Einsatz von Magnesiumchloridhexahydrat etwa $50 \frac{mg}{l}$ Phosphat rücklösten, waren es bei äquimolarer Fällmittelmenge nur noch $20 \frac{mg}{l}$. Der beobachtete Anstieg der Erdalkalitionen deckt in keiner Weise die Rücklösung von Phosphat während der Lagerung ab; das Ansteigen der Phosphatkonzentration bei Lagerung muss folglich auf die Rücklösung der Fällungsprodukte des unbekanntem, mit Eisen angenommenen Reaktionspartners beruhen. Die höhere chemische Affinität der Fällung von Phosphat mit Magnesium gegenüber jener mit Eisen macht den sinkenden Anteil an rückgelöstem Phosphat bei steigendem Einsatz von Magnesiumchloridhexahydrat erklärbar. Bei Lagerung reduziert sich die durch vorhergehende Belüftung erzielte Verbesserung der Entwässerbarkeit wieder um etwa 2%_m absolut; folglich sind Stehzeiten zwischen Schlammbelüftung und maschineller Entwässerung möglichst zu vermeiden. Bei über 24 Stunden hinausgehender Lagerung konnte keine darüberhinausgehende signifikante Verschlechterung der Eigenschaften festgestellt werden. Eine exakte Vorausberechnung der Eigenschaften des belüfteten und gelagerten Schlammes aufgrund des *pH*-Werts ist nicht möglich, eine näherungsweise Abschätzung hingegen sehr wohl.

Die Einsparung an Entsorgungskosten aufgrund der besseren Entwässerbarkeit macht eine Faulschlammbelüftung für Kläranlagenbetreiber wirtschaftlich attraktiv. Unter Berücksichtigung der Kosten für äquimolare Mengen an Fällmittel, Belüftung und Erwärmung des Schlammes kann von einem Einsparungspotential von einigen hundert Euro pro Tag für eine kommunale Kläranlage mittlerer Größe (etwa $1000 m^3$ Faulschlamm pro Tag) ausgegangen werden; die Abschätzung berücksichtigt jedoch nicht die Reduktion der Wartungskosten aufgrund reduzierter Inkrustationsbildung auf Apparaten und sonstiger Ausrüstung noch die Abschreibung der Betriebsanlagen.

1. Abstract

The importance of anaerobic digestion of excess sludge in municipal sewage plants for the purpose of energy efficiency is steadily increasing. The formation of bio gas - a mixture of methane and carbon dioxide - results from decay and autolysis of biomass under anaerobic conditions and slightly raised temperature. Bio gas is utilized for generating thermal and electric energy. Ammonium and phosphate, which have been fixed as parts of cells in the aerobic stage, are discharged into the liquid phase as ions during anaerobic digestion. Due to Henry's Law the solution of gas in liquids depends only on the partial pressure of the gas and a constant. The digested sludge is subject to a carbon dioxide enriched atmosphere and therefore contains dissolved carbon dioxide. Changing atmosphere or high flow rates result in the release of carbon dioxide: the pH increases. Phosphate, ammonium and divalent cations - especially magnesium - form hardly soluble, crystalline struvite or similar compounds, which accumulate in pipes and other mechanical equipment and cannot be removed easily. Struvite deposit is a serious issue for maintenance of anaerobic and de-watering stages of wastewater treatment plants. As the quantity and quality of phosphor from natural mineral deposits decreases permanently, the recycling and reuse from other sources such as activated or digested sludge tends to be economically reasonable. The use of biologically inactivated struvite as a long-term fertilizer for agriculture is subject to intense research.

Within the scope of this thesis, the possibility of struvite deposit as a consequence of aeration of digested sludge was to be investigated. Moreover, the influence of aeration regarding de-watering performance was examined. Batch experiments were carried out, varying the amount of precipitant (magnesiumchloridhexahydrate) and the intensity of aeration. Reaching predefined pH -values, the concentration of diluted ions such as phosphate, ammonium, calcium and magnesium were measured and remaining dry matter after centrifugation analyzed. For the purpose of verifying the results in regard de-watering also rheological behavior of aerated, digested sludge was tested. Long-term aeration experiments were performed to obtain indicative data for industrial application. Mass transfer is necessarily part of any aeration system; for this purpose, the characteristics of the experimental set-up, such as $k_L a$, were measured. A large-scale test has to be designed accordingly. During wastewater treatment in a plant, idle times between sludge aeration and de-watering are possible, therefore experiments concerning the impact of interruptions on characteristics of aerated sludge were carried out. Samples were stored and tempered for a period of 24 hours and afterwards the changes in concentration of ions and remaining dry matter were reviewed.

The data collected suggests the following conclusions:

Struvite deposit due to aeration seems to be technically achievable. The concentration of remaining phosphate in the liquid phase depends only on the quantity of precipitant and the pH after aeration; any influence of aeration intensity may be neglected. Solubility product of struvite is a function of pH - therefore phosphate cannot be removed completely in spite of equimolar use of precipitant. Ion balance showed the influence of another, up to now unknown component - most likely Iron - on precipitation and the increased consumption of ammonium. The explanation is the ammonia-ammonium-equilibrium, which depends on pH and temperature - stripping of volatile ammonia occurs as aeration continues. Increased aeration intensity correlates with reduction of aeration time, although the necessary amount of air rises. Increasing use of precipitant tends to result in reduced aeration time. This effect can be traced back to the influence of salt on bubble coalescence and therefore increased $k_L a$ -characteristics of the aeration system.

The feasibility of sludge aeration is mainly linked to the improvement of de-watering and the resulting reduction in disposal costs for remaining solids - the enhancement of sludge de-watering due to aeration added up to 4%_m absolute. Neither aeration intensity nor quantity of precipitant is related to the improvement achieved. The advantage can be explained by the decomposition of extracellular polymeric substance (EPS) - a hydrogel built from proteins and polysaccharides which contains huge amount of structural water - and it's usually limiting impact on de-watering. Regardless of the drop in residual dry matter ratio an increase in dry matter content was observed, therefore the possibility of enhanced content of dry substances in the liquid phase could be rejected. A correlation between increasing quantity of precipitant and a disproportionally high gain in dry matter content could be traced back to precipitates in the remaining dry matter on the one hand. On the other hand, magnesium and chloride affect the osmotic pressure, thus the loss in structural water rises.

Long-term aeration results in a significantly higher *pH* and reduced phosphate concentration though growth of autotrophic bacteria restarts after approximately 6 hours of aeration - recognizable as a considerable loss in ammonium and a slight *pH*-maximum. Due to microbiological activity and therefore resumed production of extracellular polymeric substance the remaining dry matter declines remarkably. Operation time for an industrial set-up of sludge aeration should be chosen accordingly.

Rheological data confirm the assumptions concerning the influence of aeration on digested sludge; dynamic viscosity decreases with growing *pH*. Excess and digested sludge can be characterized as a shear thinning, thixotropic fluid with liquid limit, thus viscosity is a function of the shear rate applied. Rheological behavior of such fluids is usually described by application of two different types of approximations - the Ostwald-de Waele and Herschel-Bulkley functions. Using each, the average reduction of dynamic viscosity at a shear rate of $\dot{\gamma} = 500 \frac{1}{s}$ remains within the limits of 0.47-0.54 mPas as *pH* increases by 0.2 units.

Idle times between aeration and de-watering - simulated as tempered storage of aerated sludge - result in significant degradation of all positive alteration which arises from aeration and therefore should be avoided in operation. The amount of re-dissolved phosphate tends to decline with increasing quantity of precipitant, e.g. $20 \frac{mg}{l}$ with and $50 \frac{mg}{l}$ without magnesiumchloridhexahydrate. The concentration of divalent cations increases far less than expected, therefore only a small share is caused by re-dissolved struvite; the major part has to be suspected from the unknown reactant, as presumed above, Iron. The performance of de-watering is reduced by 2%_m absolute after 24 hours of tempered storage; no remarkable decline was observed after a longer storage period. Sludge parameters after storage cannot be predicted exactly, an estimation of these based on *pH*-value is however definitely possible.

As mentioned above, the main reason for establishing sludge aeration as a part of waste water treatment results from reduced disposal costs. Assuming a medium-sized plant (about 1000 m³ of digested sludge per day), cost savings - including costs for equimolar quantity precipitant, aeration and heating - sum up to several hundred euros a day. This however does not take into account the savings in maintenance and repair due to reduced scaling of struvite precipitation.

2. Inhaltsverzeichnis

1.	Kurzfassung	3
1.	Abstract	6
3.	Einleitung.....	10
4.	Magnesiumammoniumphosphatfällung (MAP) durch Faulschlammbelüftung.....	11
4.1.	Durchführung der Belüftungsversuche	12
4.2.	Konzentration der für die Fällung relevanten, gelösten Ionen	14
4.2.1.	Belüftung ohne Fällmittel.....	15
4.2.2.	Belüftung mit unterstöchiometrischer Menge Fällmittel - $0,6 \frac{g}{l} MgCl_2 \cdot 6H_2O$	16
4.2.3.	Belüftung mit unterstöchiometrischer Menge Fällmittel - $0,9 \frac{g}{l} MgCl_2 \cdot 6H_2O$	18
4.2.4.	Belüftung mit stöchiometrischer Menge Fällmittel - $1,67 \frac{g}{l} MgCl_2 \cdot 6H_2O$	19
4.2.5.	Interpretation der Gelöstionenkonzentration	20
4.3.	Einfluss der Belüftungsintensität und -dauer.....	23
4.3.1.	Belüftungsdauer	23
4.3.2.	Verbrauchte Luftmengen	23
4.3.3.	Interpretation - Einfluss der Belüftungsintensität.....	24
4.4.	24-Stunden Versuche	24
5.	Entwässerbarkeit und rheologische Eigenschaften des belüfteten Faulschlamms	26
5.1.	Trockensubstanzgehalt und Entwässerbarkeit des belüfteten Faulschlamms	27
5.1.1.	Trockensubstanzgehalt bei Belüftung ohne Fällmittel.....	27
5.1.2.	Trockensubstanzgehalt bei $0,6 \frac{g}{l} MgCl_2 \cdot 6H_2O$	28
5.1.3.	Trockensubstanzgehalt bei $0,9 \frac{g}{l} MgCl_2 \cdot 6H_2O$	28
5.1.4.	Trockensubstanzgehalt bei $1,67 \frac{g}{l} MgCl_2 \cdot 6H_2O$	29
5.1.5.	24h-Versuche.....	30
5.1.6.	Interpretation der Trockensubstanzgehalte	30
5.2.	Rheologische Eigenschaften von Faulschlamm.....	33
5.2.1.	Einführung Rheologie - Grundlagen rheologischer Messungen.....	33
5.2.2.	Durchführung der rheologischen Messungen.....	35
5.2.3.	Daten der rheologischen Messungen.....	36
5.2.4.	Approximationsfunktionen	39
5.2.5.	Interpretation der Messdaten.....	43
6.	Rücklöseverhalten von Magnesiumammoniumphosphat	44
6.1.	Konzentration der Ionen nach Fällung und anschließender Lagerung	44

6.1.1.	Rücklösung bei Belüftung ohne Fällmittel.....	45
6.1.2.	Rücklösung $0,6 \frac{g}{l} MgCl_2 \cdot 6H_2O$	46
6.1.3.	Rücklösung $0,9 \frac{g}{l} MgCl_2 \cdot 6H_2O$	47
6.1.4.	Rücklösung $1,67 \frac{g}{l} MgCl_2 \cdot 6H_2O$	48
6.1.5.	Rücklösung bei Belüftung ohne Fällmittel, 24 Stunden	49
6.2.	Entwässerbarkeit und Trockensubstanzgehalt nach Fällung und anschließender Lagerung	50
6.3.	Interpretation des Rücklöseverhaltens	52
7.	Erforderlicher Sauerstofftransfer der Schlammbelüftung	54
7.1.	Physikalische Grundlagen - Begasung von Flüssigkeiten	54
7.2.	Messung des k_{La} -Werts - Einführung	56
7.3.	k_{La} -Messung der Versuchsapparatur	57
7.4.	Abschätzung des k_{La} -Werts für Schlammbelüftung.....	58
8.	Schlussfolgerungen für den Einsatz in kommunalen Kläranlagen mit Schlammfäulung - Regionalkläranlage Linz	59
9.	Danksagung	62
10.	Anhang	63
10.1.	Abbildungsverzeichnis.....	63
10.2.	Tabellenverzeichnis	63
10.3.	Literaturverzeichnis.....	65
10.4.	Messprotokolle.....	66
10.4.1.	Belüftung ohne Fällmittel.....	67
10.4.2.	Belüftung ohne Fällmittel - 24 Stunden	78
10.4.3.	Belüftung mit unterstöchiometrischer Menge Fällmittel - $0,6 \frac{g}{l} MgCl_2 \cdot 6H_2O$	84
10.4.4.	Belüftung mit unterstöchiometrischer Menge Fällmittel - $0,9 \frac{g}{l} MgCl_2 \cdot 6H_2O$	95
10.4.5.	Belüftung mit stöchiometrischer Menge Fällmittel - $1,67 \frac{g}{l} MgCl_2 \cdot 6H_2O$	109

3. Einleitung

In größeren kommunalen Kläranlagen (> 50.000 EW) wird vermehrt im Anschluss an die biologische Reinigung eine anaerobe Schlammstabilisierung des anfallenden Primär- und Überschussschlammes durchgeführt. Hierbei steht die Gewinnung von Methan in Form von Faulgas - eine Mischung aus CH_4 , CO_2 und anderen gasförmigen, anaeroben Abbauprodukten wie etwa H_2S - im Vordergrund. Aufgrund der geringen Wachstumsrate der methanproduzierenden Biozönose sind hohe Verweilzeiten des Schlammes - 15 bis 25 Tage - und erhöhte Temperatur - etwa $35^\circ C$ - erforderlich. Durch Autolyse während dieser langen, anaeroben Phase wird Ammonium und Phosphat, welches zuvor in der aeroben Reinigungsstufe in den Zellen als Biomasse gebunden wurde, wieder im Schlammwasser als gelöste Ionen frei. Der hohe CO_2 -Gehalt im Faulgas - üblicherweise 25-35% - führt zu einer Übersättigung des Faulschlammes proportional zum CO_2 -Partialdruck; der pH -Wert eines solchen Schlammes liegt bei 7,1-7,3. Bei Austritt des Schlammes gegen Atmosphäre entweicht das CO_2 teilweise und der pH -Wert steigt, wobei die Löslichkeit der Ammonium- und Phosphationen sinkt. Es kommt - bei Anwesenheit eines entsprechenden Gegenions - zu Ausfällungen von kristallinem Magnesiumammoniumphosphat (MAP, Struvit) oder Calciumphosphatverbindungen. Diese bilden äußerst problematische, mechanisch stabile Inkrustationen in Rohrleitungen oder direkt an den zur mechanischen Überschussschlammwässerung eingesetzten Maschinen, welche durch klassische Reinigungsschritte kaum entfernt werden können.



Abbildung 3-1 MAP-Inkrustationen an Rohrleitungselementen

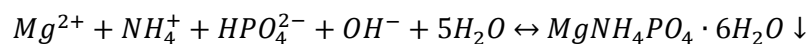
Betreffend die Vermeidung von MAP-Inkrustationen wurden bereits einige Publikationen und Verfahren, welche auf der Strippung von CO_2 durch Belüftung und der Zugabe von Fällmitteln wie etwa Magnesiumchlorid basieren, veröffentlicht. Insbesondere soll hier auf die „Berliner Pflanze“ verwiesen werden, wo neben der Verhinderung von Ablagerungen auch mit dem gefällten Magnesiumammoniumphosphat ein verkaufsfähiger mineralischer Langzeitdünger gewonnen wird [1]. Eine weitere Neuerung ist das auf der IFAT 2016 vorgestellte Verfahren „ePhos“, welches durch Elektrolyse von Stickstoff und Phosphat mit einer Magnesiumelektrode direkt Struvit oder Kaliumstruvit, welcher - nach Angaben der Verfahrensentwickler - frei von biogenen Resten ist, gewonnen werden kann [2].

Im Zuge dieser Arbeit sollten die Einflussfaktoren auf die Fällung von MAP aus Faulschlamm untersucht und Dimensionierungskriterien einer großtechnischen Schlammbelüftung erarbeitet

werden, insbesondere hinsichtlich $k_L a$ -Wert und erforderlicher Belüftungsdauer. Zudem wurde in Vorversuchen eine verbesserte Entwässerbarkeit des belüfteten Schlammes festgestellt. Da die Kosten der Entsorgung des Faulschlammes einen nicht unerheblichen Faktor für kommunale Kläranlagen darstellen, sollte diese Beobachtung bestätigt und durch entsprechende rheologische Untersuchungen des Schlammes verifiziert werden. Um den Einfluss einer zeitlichen Verzögerung zwischen Belüftung und mechanischer Entwässerung des Schlammes abschätzen zu können, wurde auch die Thematik der Rücklösung von zuvor gefällttem Magnesiumammoniumphosphat bei Lagerung von belüftetem Schlamm untersucht.

4. Magnesiumammoniumphosphatfällung (MAP) durch Faulschlamm-belüftung

Für die Fällung von Magnesiumammoniumphosphat aus Faulschlamm gilt folgende Reaktionsgleichung:



Die Reaktionsgleichung zeigt bereits die Möglichkeit, das Gleichgewicht zugunsten der Ausfällung von Magnesiumammoniumphosphat zu beeinflussen; steigender pH -Wert verschiebt das Gleichgewicht auf die Produktseite. Da Wasser immer in großem Überschuss vorliegt, kann der Einfluss auf das Gleichgewicht vernachlässigt werden. Das pH -abhängige Löslichkeitsprodukt von Magnesiumammoniumphosphat bei Vorliegen stöchiometrischer Konzentrationen der Kristallisationspartner ist in Abbildung 4-1 dargestellt. Folgende Beziehungen gelten für das Löslichkeitsprodukt P_{MAP} :

$$P_{MAP} = c_{Mg^{2+}} \cdot c_{NH_4^+} \cdot c_{PO_4^{3-}}$$

$$pP_{MAP} = -\log P_{MAP}$$

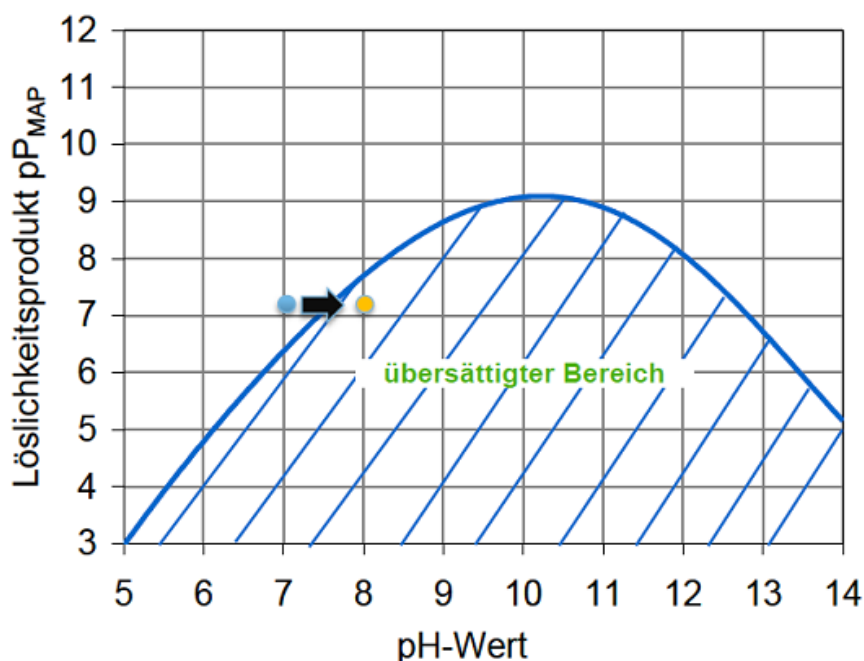


Abbildung 4-1 Löslichkeitsprodukt von MAP in Abhängigkeit des pH -Werts übernommen von [3]

Eine übersättigte Lösung liegt vor, wenn das Ionenprodukt der Lösung das Löslichkeitsprodukt überschreitet. Das Minimum des Löslichkeitsprodukts von MAP - äquivalent dem Maximum von pP_{MAP} - liegt etwa bei pH 10. Derart hohe pH -Werte sind realistischerweise ausschließlich durch Austreiben des übersättigten CO_2 durch Belüftung nicht erzielbar, jedoch sinkt das Löslichkeitsprodukt von Magnesiumammoniumphosphat im pH -Bereich 7-8,5 bereits um zwei Zehnerpotenzen; diese Tatsache lässt die Faulschlammbelüftung zur MAP-Fällung sinnvoll erscheinen. Auch andere zweiwertige Kationen - insbesondere Calcium - können anstelle des Magnesiums zur Kristallisation verwendet werden; häufig sind solche Calciumeinschlüsse in MAP-Inkrustationen zu beobachten.

4.1. Durchführung der Belüftungsversuche

Die Belüftungsversuche waren als Batchversuche mit variabler, meist unterstöchiometrischer Menge Fällmittel und unterschiedlichen Belüftungsintensitäten angelegt. Folgende Luftvolumenströme wurden eingesetzt:

Belüftungsintensitäten		b4	b6	b8
Anemometer	in l/min	4	6	8
Effektive Luftmenge	in l/min	2	3	4

Tabelle 4-1 Belüftungsintensitäten

Da die Anzeige des Anemometers auf 5 bar kalibriert war, jedoch über das Druckluftsystem nur bei 1 bar belüftet wurde, wurde der tatsächliche Luftvolumenstrom durch Auslitern kontrolliert.

3 Liter des zuvor homogenisierten Faulschlammes wurden in einen Versuchszylinder überführt und mittels Wasserbad auf etwa 30°C temperiert - durch die Erhöhung der Temperatur sank der pH -Wert im Allgemeinen um 0,1 Einheiten. Zeitgleich wurde 1 Liter des unbelüfteten Schlammes als Probe entnommen; die Aufteilung erfolgte in drei Proben zu je 250g und einer Probe zu 200g. Eine der drei Proben wurde für den temperierten Rücklöseversuch aufbewahrt; eine wurde während des laufenden Versuchs auf 30° im Wasserbad temperiert und anschließend ausschließlich der Trockensubstanzgehalt bestimmt, während die dritte als Startprobe bei Raumtemperatur vollständig (Gelöstionen und Trockensubstanzgehalt) untersucht wurde. Der pH -Wert des Schlammes wurde bei Raumtemperatur, im erwärmten Zustand und während des laufenden Versuchs gemessen. Falls Fällmittel im Versuch eingesetzt wurde, wurde nach möglichst vollständiger Einmischung - erkennbar am deutlichen Absinken des pH -Werts im Reaktor um erneut etwa 0,1 Einheiten - eine Probe von 30ml entnommen. Die Luftzufuhr erfolgte durch ein am Boden des Versuchszylinders positioniertes Belüfterelement aus Sinterkeramik; die Luftmenge wurde zuvor am Anemometer entsprechend dem Versuchsziel eingestellt und durch Auslitern überprüft. Nach Temperieren und eventueller Fällmittellgabe wurde die Belüftung eingeschaltet und der Anstieg des pH -Werts manuell aufgezeichnet. Bei Erreichen definierter pH -Werte - 7,8 und 8,0 - wurde die Belüftung unterbrochen und eine Probe von etwa 0,3 Litern entnommen. Bei Erreichen von pH 8,2 wurde die Belüftung im Allgemeinen beendet und eine abschließende Probe genommen; einzige Ausnahmen sind hier die beiden Versuche mit 24-stündiger Belüftung, wo die Belüftung des Schlammes - unabhängig vom pH -Wert - darüber hinaus fortgesetzt wurde. Nach Belüftungsende wurden 250g des belüfteten Schlammes gemeinsam mit der zurückgestellten Leerprobe für 24 Stunden bei 30°C im Wasserbad temperiert, um die Rücklösung zu untersuchen. Für rheologische Messungen mussten zusätzlich 200g aller Proben - also der Leerprobe und jedes pH -Werts - entnommen und unbehandelt zurückgestellt werden.

Die im Folgenden beschriebenen Schritte der Probenaufbereitung und Messungen wurden standardmäßig für alle Proben - auch Rücklöseproben, allerdings mit Ausnahme der im Wasserbad temperierten Leerprobe und jener Probe nach Fällmittelzugabe - durchgeführt. Bei der Leerprobe wurde auf eine Bestimmung der gelösten Ionen verzichtet, da durch die Temperaturerhöhung keine Veränderung zu erwarten war, während im Gegenteil dazu die Probe nach Fällmittelzugabe hauptsächlich eine Änderung der Konzentration der gelösten Ionen aufweist und folglich keine Bestimmung des Trockensubstanzgehalts erforderlich war.

- Bestimmung des Trockensubstanzgehalts

250g der Probe wurden eingewogen und anschließend 5 Minuten bei $4200 \frac{U}{min}$ zentrifugiert. 30ml des Überstandes wurden entnommen und zur Bestimmung der gelösten Ionen herangezogen, der Rest verworfen. Das Sediment wurde erneut gewogen und zur Bestimmung des Trockensubstanzgehalts in ein verschließbares Behältnis überführt. Die Bestimmung wurde gemäß DIN EN 12880 durchgeführt; anstelle der in der Norm beschriebenen Tiegel wurden Aluminiumschälchen eingesetzt.

- Bestimmung der Gelöstionen

Das Überstand wurde erneut zentrifugiert, allerdings 2 Minuten bei $12000 \frac{U}{min}$. Die Probe wurde mit einer Porenweite von $0,45 \mu m$ membranfiltriert und anschließend mit 1-2 Tropfen konzentrierter Schwefelsäure stabilisiert. Für Ammonium und Phosphat wurde auf die in der Abwassertechnik übliche Bestimmung und Angabe als Ammoniumstickstoff und Phosphatphosphor zurückgegriffen - die Konzentrationen beziehen sich also auf das jeweilige bestimmende Element, in diesem Fall Stickstoff oder Phosphor. Die Bestimmung der Orthophosphatkonzentration erfolgte nach DIN EN ISO 6878; das genormte Verfahren beruht auf der Bildung eines Antimon-Phosphormolybdätkomplexes und anschließender Reduktion desselben mit Ascorbinsäure zu einem stark gefärbten Molybdänblaukomplex. Die photometrisch gemessene Extinktion des Komplexes ist proportional der Orthophosphatkonzentration. Ammoniumstickstoff wurde gemäß DIN EN ISO 11732 bestimmt. Hierbei wird die Probe in einen kontinuierlichen Trägerstrom aufgegeben und mit alkalischer Lösung vermischt. Der entstehende Ammoniak wird über eine Diffusionsmembran abgetrennt und in einen mit *pH*-Indikator versetzten Akzeptorstrom aufgenommen. Beide Messungen wurden mit einem Continuous Flow Analyser der Firma Skalar durchgeführt. Die der Ammoniumkonzentration proportionale Farbänderung des *pH*-Indikators wird photometrisch detektiert. Die Konzentrationen von Mg^{2+} und Ca^{2+} wurden chromatographisch nach DIN EN ISO 14911 bestimmt; es wurde eine HPLC der Firma Merck Hitachi mit einem Leitfähigkeitsdetektor eingesetzt. Mobile Phase war 4-millimolare Weinsäure im Gemisch mit 1-millimolarer 2-6 Pyridincarbonsäure mit einem Durchsatz von $1 \frac{ml}{min}$; die verwendete Säule war eine ReproSil CAT-Säule mit einer Korngröße von $5 \mu m$, Länge 125mm, Durchmesser 4,6mm. Die Messungen erfolgten isokratisch bei Raumtemperatur.



Abbildung 4-2 Versuchsausrüstung

Versuchswiederholungen sind anhand des in der Versuchsbezeichnung enthaltenen Hinweis „W1“ kenntlich. Wurden Versuche aufgrund wenig plausibler Daten wiederholt, so wurden nur die Daten der Wiederholung zur Auswertung herangezogen und die ursprünglichen Daten blau gekennzeichnet. Bei den zu wiederholenden Versuchen waren insbesondere die ermittelten Belüftungszeiten und Trockensubstanzgehalte zweifelhaft; es wird davon ausgegangen, dass dies auf mangelhafte Homogenisierung des gelagerten Faulschlammes vor Versuchsbeginn zurückzuführen ist. Wurde die Wiederholung jedoch aufgrund der rheologischen Untersuchung des Schlammes notwendig, so wurde - aufgrund der Alterung des Schlammes bei Lagerung und dem damit verbundenen Anstieg des pH -Werts - der ursprüngliche Versuch ausgewertet und die Daten der Versuchswiederholung grau markiert. Hier sind hauptsächlich die Daten der Belüftungszeiten und der Gelöstionen als problematisch einzustufen, da bereits von Beginn an ein vergleichsweise hoher pH gemessen wurde.

4.2. Konzentration der für die Fällung relevanten, gelösten Ionen

Die über die Versuchslaufzeit ermittelten Konzentrationen an Ammoniumstickstoff ($NH_4 - N$); Phosphatphosphor ($PO_4 - P$), Magnesium (Mg) und Calcium (Ca) wurden der Übersichtlichkeit halber anhand der eingesetzten Fällmittelmenge zu Gruppen zusammengefasst; innerhalb der

Versuchsgruppe variiert die Belüftungsintensität. Als *pH*-Wert zu Belüftungsbeginn bzw. nach Fällmittelgabe wurde der Mittelwert aller in die Auswertung einbezogenen Versuche dieser Gruppe festgelegt.

Anhand der Ausgangskonzentration an Phosphat der ersten, ohne Fällmittel durchgeführten Versuche - im Mittel $m_{PO_4-P} = m_P = 254 \frac{mg}{l}$ - konnte die zur stöchiometrischen Fällung erforderliche Menge an Fällmittel (Magnesiumchloridhexahydrat $MgCl_2 \cdot 6H_2O$) folgendermaßen bestimmt werden:

Die Molmassen von Phosphor beträgt $M_P = 30,97 \frac{g}{mol}$, jene von Magnesiumchloridhexahydrat $M_{MgCl_2 \cdot 6H_2O} = 203,30 \frac{g}{mol}$. Daraus kann die Stoffmenge an Phosphatphosphor zu $n_P = \frac{m_P}{M_P} = \frac{254 \frac{mg}{l}}{30,97 \frac{mg}{mmol}} = 8,2 \frac{mmol}{l}$ errechnet werden. Bei stöchiometrischer Zugabe wird die gleiche Stoffmenge an Magnesium benötigt, um das vorhandene Phosphat zu fällen - also $n_P = n_{Mg} = n_{MgCl_2 \cdot 6H_2O}$. Damit kann die erforderliche äquimolare Menge an Fällmittel pro Liter Faulschlamm zu

$$m_{MgCl_2 \cdot 6H_2O} = M_{MgCl_2 \cdot 6H_2O} \cdot n_{MgCl_2 \cdot 6H_2O} = 203,30 \frac{mg}{mmol} \cdot 8,2 \frac{mmol}{l} = 1665,7 \frac{mg}{l}$$

berechnet werden. Da 3 Liter Faulschlamm eingesetzt wurden ergibt sich der Fällmittelbedarf zu $4997 mg \sim 5g$ Magnesiumchloridhexahydrat. Hierbei werden die bereits im Faulschlamm enthaltenen, zweiwertigen Kationen (*Mg* und *Ca*) nicht berücksichtigt.

Anhand der gleichen Überlegungen kann für die anderen Dosierungen ein Stöchiometriefaktor zur Beschreibung des molaren Verhältnisses zwischen Fällmittel und Phosphatphosphor bestimmt werden. Für den Zusatz von 1,8g Magnesiumchloridhexahydrat ($0,6 \frac{g}{l}$) liegt dieser Faktor bei etwa 0,32; bei 2,7g Magnesiumchloridhexahydrat ($0,9 \frac{g}{l}$) etwa 0,48 - also deutlich unterstöchiometrisch.

4.2.1. Belüftung ohne Fällmittel

PO ₄ -P in mg/l					
Versuchsbezeichnung	FS_L_0_b4	FS_L_0_b6	FS_L_0_b6_W1	FS_L_0_b8	Mittelwert
Anfangs-pH	7,15	7,14	7,33	7,15	7,15
7,15	255	254,4	252,3	254,4	254,6
7,8	230	232,2	249,9	231,9	231,4
8,0	217,4	205,5	240	208,2	210,4
8,2	194	182,4	220,2	181,2	185,9

Tabelle 4-2 PO₄-P; Belüftung ohne Fällmittel

NH ₄ -N in mg/l					
Versuchsbezeichnung	FS_L_0_b4	FS_L_0_b6	FS_L_0_b6_W1	FS_L_0_b8	Mittelwert
Anfangs-pH	7,15	7,14	7,33	7,15	7,15
7,15	1303,6	1335	1407,9	1374	1337,5
7,8	1246	1341	1487,7	1367,4	1318,1
8,0	1264,8	1290	1470,6	1350	1301,6
8,2	1247,2	1313,1	1459,5	1287,6	1282,6

Tabelle 4-3 NH₄-N; Belüftung ohne Fällmittel

Mg in mg/l					
Versuchsbezeichnung	FS_L_0_b4	FS_L_0_b6	FS_L_0_b6_W1	FS_L_0_b8	Mittelwert
Anfangs-pH	7,15	7,14	7,33	7,15	7,15
7,15	17	11,5	7,6	10,3	12,9
7,8	9,8	5,6	1,6	7,2	7,5
8,0	8,7	2,2	1,1	4,4	5,1
8,2	5	1,4	1,4	1,7	2,7

Tabelle 4-4 Mg; Belüftung ohne Fällmittel

Ca in mg/l					
Versuchsbezeichnung	FS_L_0_b4	FS_L_0_b6	FS_L_0_b6_W1	FS_L_0_b8	Mittelwert
Anfangs-pH	7,15	7,14	7,33	7,15	7,15
7,15	51,5	52,1	24,8	43,8	49,1
7,8	43	26,6	13,8	34,3	34,6
8,0	20,8	17,2	10	19,6	19,2
8,2	17	14,1	5	25,5	18,9

Tabelle 4-5 Ca; Belüftung ohne Fällmittel

4.2.2. Belüftung mit unterstöchiometrischer Menge Fällmittel - $0,6 \frac{g}{l} MgCl_2 \cdot 6H_2O$

PO ₄ -P in mg/l					
Versuchsbezeichnung	FS_L_1,8_b4	FS_L_1,8_b6	FS_L_1,8_b6_W1	FS_L_1,8_b8	Mittelwert
Anfangs-pH	7,15	7,14	7,33	7,15	7,15
Fällmittelzugabe	7,11	7,07	7,22	7,09	7,09
7,15	255	254,4	252,3	254,4	254,6
7,09	196,2	150	227,7	203,7	183,3
7,8	144,6	142,5	165	138,9	142,0
8,0	124,8	120,9	142,2	118,2	121,3
8,2	110	98,7	121,5	98,1	102,3

Tabelle 4-6 PO₄-P; $0,6 \frac{g}{l} MgCl_2 \cdot 6H_2O$

NH ₄ -N in mg/l					
Versuchsbezeichnung	FS_L_1,8_b4	FS_L_1,8_b6	FS_L_1,8_b6_W1	FS_L_1,8_b8	Mittelwert
Anfangs-pH	7,15	7,14	7,33	7,15	7,15
Fällmittelzugabe	7,11	7,07	7,22	7,09	7,09
7,15	1303,6	1335	1407,9	1374	1337,5
7,09	1279,6	1313,1	1477,2	1296,3	1296,3
7,8	1257,6	1313,4	1516,5	1305	1292,0
8,0	1249,2	1254,6	1412,7	1248,3	1250,7
8,2	1253,2	1242,6	1383,9	1250,1	1248,6

Tabelle 4-7 NH₄-N; 0,6 $\frac{g}{l}$ MgCl₂ · 6H₂O

Mg in mg/l					
Versuchsbezeichnung	FS_L_1,8_b4	FS_L_1,8_b6	FS_L_1,8_b6_W1	FS_L_1,8_b8	Mittelwert
Anfangs-pH	7,15	7,14	7,33	7,15	7,15
Fällmittelzugabe	7,11	7,07	7,22	7,09	7,09
7,15	17	11,5	7,6	10,3	12,9
7,09	11,6	45,5	3,8	32,9	30,0
7,8	12,6	4,2	3,1	5,8	7,5
8,0	9,6	1,5	1,3	7	6,0
8,2	5	0,6	0,5	3,2	2,9

Tabelle 4-8 Mg; 0,6 $\frac{g}{l}$ MgCl₂ · 6H₂O

Ca in mg/l					
Versuchsbezeichnung	FS_L_1,8_b4	FS_L_1,8_b6	FS_L_1,8_b6_W1	FS_L_1,8_b8	Mittelwert
Anfangs-pH	7,15	7,14	7,33	7,15	7,15
Fällmittelzugabe	7,11	7,07	7,22	7,09	7,09
7,15	51,5	52,1	24,8	43,8	49,1
7,09	47,7	58,9	17,9	48,9	51,8
7,8	28,5	26,7	14,5	23,1	26,1
8,0	20,5	2,4	7,8	19,2	14,0
8,2	18,3	1,1	8,6	12,6	10,7

Tabelle 4-9 Ca; 0,6 $\frac{g}{l}$ MgCl₂ · 6H₂O

4.2.3. Belüftung mit unterstöchiometrischer Menge Fällmittel - $0,9 \frac{g}{l} MgCl_2 \cdot 6H_2O$

PO ₄ -P in mg/l						
Versuchsbezeichnung	FS_L_2,7_b4	FS_L_2,7_b4_W1	FS_L_2,7_b6	FS_L_2,7_b6_W1	FS_L_2,7_b8	Mittelwert
Anfangs-pH	7,16	7,15	7,16	7,19	7,17	7,17
Fällmittelzugabe	7,07	7,03	7,02	7,12	7,08	7,08
7,17	258	257,1	258	241,8	245,7	248,2
7,08	192,9	135	151,8	240,9	193,8	189,9
7,8	112,5	112,8	110,7	98,1	114,6	108,5
8,0	86,4	97,8	90,3	89,4	91,8	93,0
8,2	65,7	76,2	77,1	68,7	73,8	72,9

Tabelle 4-10 PO₄-P; $0,9 \frac{g}{l} MgCl_2 \cdot 6H_2O$

NH ₄ -N in mg/l						
Versuchsbezeichnung	FS_L_2,7_b4	FS_L_2,7_b4_W1	FS_L_2,7_b6	FS_L_2,7_b6_W1	FS_L_2,7_b8	Mittelwert
Anfangs-pH	7,16	7,15	7,16	7,19	7,17	7,17
Fällmittelzugabe	7,07	7,03	7,02	7,12	7,08	7,08
7,17	1381,1	1419,3	1381,8	1381,2	1336,8	1379,1
7,08	1381,1	1443,3	1350,3	1400,4	1334,7	1392,8
7,8	1337,4	1410,6	1312,8	1269,3	1350,9	1343,6
8,0	1350,3	1426,5	1285,8	1355,4	1316,1	1366,0
8,2	1237,8	1371,3	1290,3	1286,2	1335,9	1331,1

Tabelle 4-11 NH₄-N; $0,9 \frac{g}{l} MgCl_2 \cdot 6H_2O$

Mg in mg/l						
Versuchsbezeichnung	FS_L_2,7_b4	FS_L_2,7_b4_W1	FS_L_2,7_b6	FS_L_2,7_b6_W1	FS_L_2,7_b8	Mittelwert
Anfangs-pH	7,16	7,15	7,16	7,19	7,17	7,17
Fällmittelzugabe	7,07	7,03	7,02	7,12	7,08	7,08
7,17	11	8,4	11	3,5	10,1	7,3
7,08	39,5	22,5	65,5	0,8	18,9	14,1
7,8	9,1	1,5	8,5	2,7	12,9	5,7
8,0	5,1	2,1	3,9	8,1	2,7	4,3
8,2	3,4	0,6	1,1	0,5	4,3	1,8

Tabelle 4-12 Mg; $0,9 \frac{g}{l} MgCl_2 \cdot 6H_2O$

Ca in mg/l						
Versuchs- bezeichnung	FS_L_2,7_b4	FS_L_2,7_b4_ W1	FS_L_2,7_b6	FS_L_2,7_b6_ W1	FS_L_2,7_b8	Mittelwert
Anfangs-pH	7,16	7,15	7,16	7,19	7,17	7,17
Fällmittelzugabe	7,07	7,03	7,02	7,12	7,08	7,08
7,17	45,9	38,8	45,9	33,7	45,3	39,3
7,08	45,9	31,2	50,2	27,4	48,4	35,7
7,8	29,2	12,8	23,9	23,4	28,2	21,5
8,0	20,6	14,8	20,6	24,2	20,4	19,8
8,2	13,5	2,1	14,4	15,5	11,3	9,6

Tabelle 4-13 Ca; $0,9 \frac{g}{l} MgCl_2 \cdot 6H_2O$

4.2.4. Belüftung mit stöchiometrischer Menge Fällmittel - $1,67 \frac{g}{l} MgCl_2 \cdot 6H_2O$

PO ₄ -P in mg/l				
Versuchs- bezeichnung	FS_L_5,0_b4	FS_L_5,0_b6	FS_L_5,0_b8	Mittelwert
Anfangs-pH	7,15	7,28	7,15	7,19
Fällmittelzugabe	6,96	7,11	6,98	7,02
7,19	257,1	252,9	257,1	255,7
7,02	148,8	124,8	114	129,2
7,8	37,2	41	45	41,1
8,0	24,6	31,1	31,2	29,0
8,2	12,9	21,55	18,9	17,8

Tabelle 4-14 PO₄-P; $1,67 \frac{g}{l} MgCl_2 \cdot 6H_2O$

NH ₄ -N in mg/l				
Versuchs- bezeichnung	FS_L_5,0_b4	FS_L_5,0_b6	FS_L_5,0_b8	Mittelwert
Anfangs-pH	7,15	7,28	7,15	7,19
Fällmittelzugabe	6,96	7,11	6,98	7,02
7,19	1419,3	1453,8	1419,3	1430,8
7,02	1419,3	1410,6	1388,1	1406,0
7,8	1389,6	1366,5	1382,4	1379,5
8,0	1357,5	1389,9	1344,9	1364,1
8,2	1315,2	1356,9	1372,8	1348,3

Tabelle 4-15 NH₄-N; $1,67 \frac{g}{l} MgCl_2 \cdot 6H_2O$

Mg in mg/l				
Versuchsbezeichnung	FS_L_5,0_b4	FS_L_5,0_b6	FS_L_5,0_b8	Mittelwert
Anfangs-pH	7,15	7,28	7,15	7,19
Fällmittelzugabe	6,96	7,11	6,98	7,02
7,19	8,4	4,8	8,4	7,2
7,02	21,6	3,2	24,1	16,3
7,8	5,6	9,8	9	8,1
8,0	5,2	2,1	2,3	3,2
8,2	1,5	1,5	3	2,0

Tabelle 4-16 Mg; $1,67 \frac{g}{l} MgCl_2 \cdot 6H_2O$

Ca in mg/l				
Versuchsbezeichnung	FS_L_5,0_b4	FS_L_5,0_b6	FS_L_5,0_b8	Mittelwert
Anfangs-pH	7,15	7,28	7,15	7,19
Fällmittelzugabe	6,96	7,11	6,98	7,02
7,19	38,8	29,2	38,8	35,6
7,02	27,8	11,4	30,2	23,1
7,8	15,8	22	24,1	20,6
8,0	15,5	4,4	4	8,0
8,2	3	3,6	6,8	4,5

Tabelle 4-17 Ca; $1,67 \frac{g}{l} MgCl_2 \cdot 6H_2O$

Es zeigt sich, dass auch bei stöchiometrischem Einsatz von Magnesiumchloridhexahydrat die Restkonzentration an Phosphatphosphor noch im Bereich von $20 \frac{mg}{l}$ liegt. Um eine weitergehendere Fällung zu erreichen müsste eine (5-10%ige) Überdosierung des Fällmittels eingesetzt werden.

4.2.5. Interpretation der Gelöstionenkonzentration

Insbesondere die Messdaten der Konzentration an Phosphatphosphor zeigt ein sehr einheitliches, deutliches Bild - es besteht vorrangig eine Abhängigkeit der Restkonzentration an $PO_4 - P$ von der eingesetzten Menge Fällmittel und dem pH -Wert; ein Zusammenhang mit der Belüftungsintensität scheint nicht gegeben. Daher wurden die Mittelwerte der Phosphatphosphorkonzentration in Abhängigkeit der Fällmittelmenge und des pH -Werts des Faulschlammes zu Tabelle 4-18 auf Seite 20 zusammengefasst. Auf die Darstellung der Phosphatkonzentration nach Fällmittelzugabe wurde verzichtet, da diese aufgrund der Zugabe des Fällmittels als Feststoff und den damit verbundenen Schwierigkeiten beim Einmischen in den Schlamm als nicht repräsentativ angesehen wird.

Mittelwerte PO_4 -P nach Belüftung				
pH-Wert	0 g/l	0,6 g/l	0,9 g/l	1,67 g/l
7,17	254,6	254,6	248,2	255,7
7,80	231,4	142,0	108,5	41,1
8,00	210,4	121,3	93,0	29,0
8,20	185,9	102,3	72,9	17,8

Tabelle 4-18 Erzielbare PO_4 -P-Konzentration bei variabler Fällmittelmenge in Abhängigkeit des pH-Werts

Da die Anfangskonzentration an Phosphatphosphor für alle Versuche in etwa bei $254 \frac{mg}{l}$ lag und aufgrund des (durch den Einsatz eines sauren Fällsalzes) sinkenden pH -Werts jene Konzentrationen, die nach Fällmittelzugabe gemessen wurden, nicht einbezogen werden konnte, wurden die Korrelationen der $PO_4 - P$ -Konzentration mit dem pH -Wert im Bereich zwischen 7,8 und 8,2 in Abbildung 4-3 auf Seite 21 dargestellt und durch Geraden approximiert; Scharparameter ist die Fällmittelmenge.

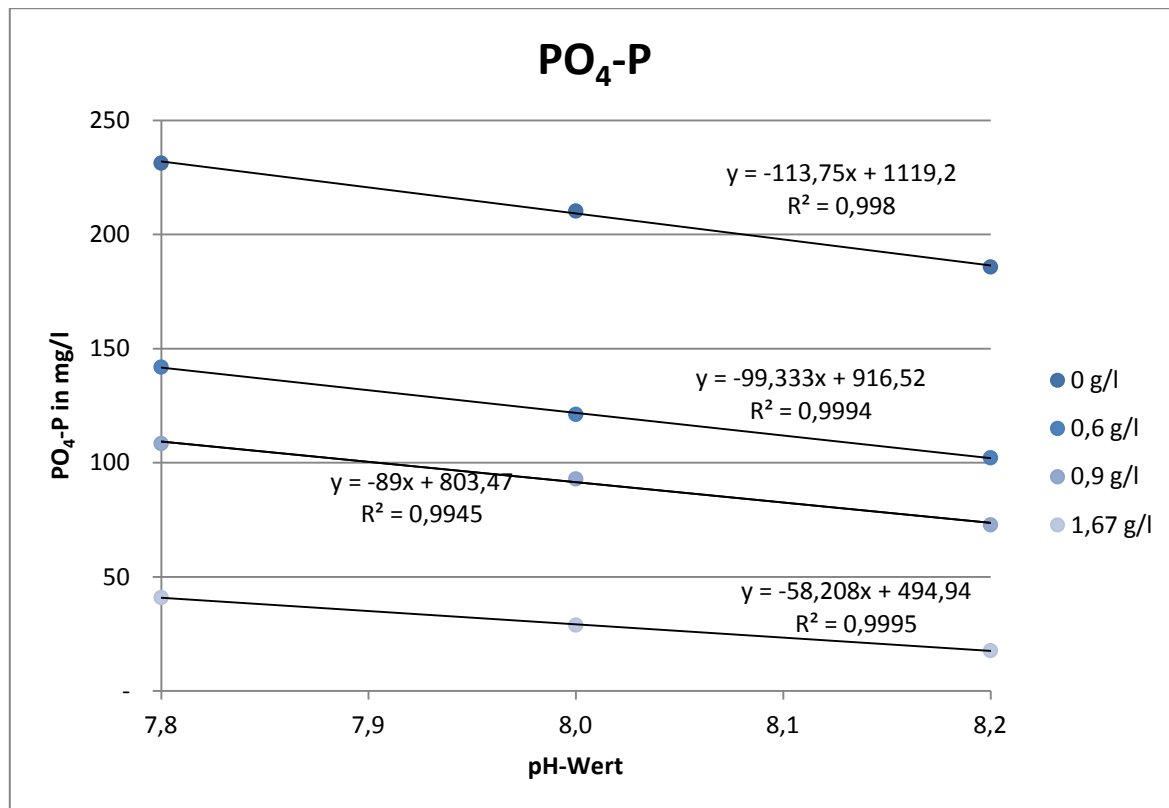


Abbildung 4-3 Linearer Bereich PO_4-P in Abhängigkeit von pH -Wert und Fällmittelmenge

Die Konzentrationen der anderen an der Fällung beteiligten Ionen weisen stärkere Schwankungen auf; die Tendenz der Mittelwerte jeder Fällmittelgruppe ist aber fast immer fallend. In allen Fällen lag Ammonium in starkem Überschuss vor, während das im Faulschlamm vorhandene Magnesium nahezu vollständig aufgebraucht wurde.

Um die erhaltenen Daten hinsichtlich Plausibilität zu prüfen, wurde exemplarisch für einen repräsentativen Versuch (1,8_b8) die Differenzen der Stoffmengen von $PO_4 - P$, $NH_4 - N$ und der Summe aus Mg und Ca vor und nach erfolgter Belüftung bilanziert. Die Massendifferenzen und das eingesetzte Fällmittel wurden anhand der Molmassen in Stoffmengen umgerechnet:

$$M_P = 30,97 \frac{mg}{mmol}; M_N = 14,01 \frac{mg}{mmol}; M_{Mg} = 24,31 \frac{mg}{mmol}; M_{Ca} = 40,08 \frac{mg}{mmol}; M_{MgCl_2 \cdot 6H_2O} = M_F = 203,30 \frac{mg}{mmol}$$

$$\Delta n = \frac{\Delta m}{M}$$

Bilanz 1,8_b8 - Fällung					
Massendifferenz in mg/l					
Δm_{PO_4-P}	Δm_{NH_4-N}	m_F	Δm_{Mg}	Δm_{Ca}	
156,3	123,9	600,0	7,1	33,1	
Stoffmengendifferenz in mmol/l					
Δn_{PO_4-P}	Δn_{NH_4-N}	n_F	Δn_{Mg}	Δn_{Ca}	$\Delta n_{Me^{2+}}$
5,05	8,84	2,95	0,29	0,83	4,07

Tabelle 4-19 Stöchiometrische Bilanz für Versuch 1,8_b8 - Fällung

Unter der Annahme, dass die sowohl die Magnesiumionen aus dem Fällmittel als auch jene, die bereits im Schlamm vorhanden sind, vollständig gefällt werden und die Fällung des Phosphats mit Calcium derselben Stöchiometrie unterliegt (eine nur bedingt zutreffende Annahme), müsste aufgrund der Ionenbilanz gelten:

$$\Delta n_{PO_4-P} = \Delta n_{NH_4-N} = \Delta n_{Me^{2+}} = n_F + \Delta n_{Mg} + \Delta n_{Ca}$$

Die Bilanz ist offensichtlich in dieser Form nicht vollständig, da die entfernte Stoffmenge an Ammoniumstickstoff deutlich höher als erwartet ist, während die Abnahme der Stoffmengen der zweiwertigen Metallionen *Mg* und *Ca* geringer ist, als dem stöchiometrischen Zusammenhang entspräche. Die beschriebenen Abweichungen von der erwarteten Stöchiometrie sind für nahezu alle anderen Versuche ebenso zutreffend; Ausnahmen sind auf nicht repräsentative Proben oder unbekannte Nebenreaktionen zurückzuführen.

Die Abweichung in der Mengbilanz für $NH_4 - N$ kann über das Gleichgewicht $NH_4^+ - NH_3$ erklärt werden, welches in Abbildung 4-4 auf Seite 22 dargestellt ist. Da der *pH*-Wert im Zuge der Belüftung deutlich ansteigt, und das Versuchsgefäß zudem auf 30°C temperiert wurde, liegt ein Teil des Stickstoffs - entsprechend dem Gleichgewicht etwa 5-15% - als Ammoniak vor und wird über die Belüftung ausgetrieben.

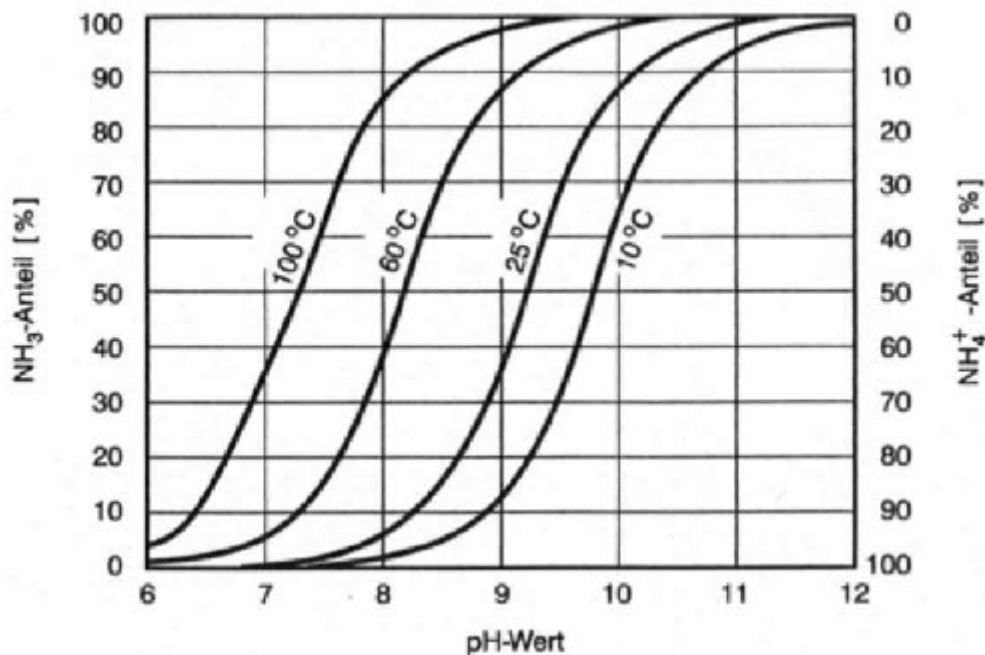


Abbildung 4-4 Ammonium-Ammoniak-Gleichgewicht übernommen von [3]

Die geringere Massenabnahme der Erdalkalitionen weist daraufhin, dass außerdem noch ein weiterer Reaktionspartner für die Phosphatfällung zur Verfügung stand - höchstwahrscheinlich Eisen, welches aus der chemischen Fällung als $Fe(OH)_3$ in den Überschussschlamm gelangte. Unter den reduzierenden Bedingungen im Anaerobreaktor muss von einer zumindest teilweisen Umwandlung in FeS ausgegangen werden. Eisensulfid wird durch die Belüftung zu Fe^{3+} oxidiert und steht als solches für die Phosphatfällung zur Verfügung.

4.3. Einfluss der Belüftungsintensität und -dauer

Da in diesem Fall eine Anordnung der Daten in Abhängigkeit der Fällmittelmenge wenig zielführend erscheint, wurden die erhaltenen Daten entsprechend der Belüftungsintensität - also dem Luftvolumenstrom - gruppiert.

4.3.1. Belüftungsdauer

Als Kriterium für das Erreichen eines bestimmten pH -Werts wurde dessen stabile Anzeige über 10 Sekunden festgelegt und anschließend die Versuchslaufzeit abgelesen.

Belüftungsdauer in mm:ss					
Versuchsbezeichnung	FS_L_0_b4	FS_L_1,8_b4	FS_L_2,7_b4	FS_L_2,7_b4_W1	FS_L_5,0_b4
7,8	51:35	58:00	22:35	44:43	49:55
8,0	90:21	106:53	41:42	71:51	78:20
8,2	179:07	171:22	71:52	119:17	134:52

Tabelle 4-20 Belüftungsdauer b4

Belüftungsdauer in mm:ss							
Versuchsbezeichnung	FS_L_0_b6	FS_L_0_b6_W1	FS_L_1,8_b6	FS_L_1,8_b6_W1	FS_L_2,7_b6	FS_L_2,7_b6_W1	FS_L_5,0_b6
7,8	37:17	19:20	39:54	21:45	23:46	34:51	33:48
8,0	67:00	33:22	68:40	36:34	37:21	55:42	55:43
8,2	130:32	56:02	128:40	57:18	60:14	95:48	90:15

Tabelle 4-21 Belüftungsdauer b6

Belüftungsdauer in mm:ss				
Versuchsbezeichnung	FS_L_0_b8	FS_L_1,8_b8	FS_L_2,7_b8	FS_L_5,0_b8
7,8	31:56	35:55	32:02	31:51
8,0	57:32	59:34	50:11	51:19
8,2	108:23	104:23	91:23	85:28

Tabelle 4-22 Belüftungsdauer b8

4.3.2. Verbraachte Luftmengen

Die eingesetzten Luftmengen wurden anhand der Belüftungszeit und dem tatsächlichen Luftvolumenstrom errechnet.

Verbrauchte Luftmenge in l					
Versuchsbezeichnung	FS_L_0_b4	FS_L_1,8_b4	FS_L_2,7_b4	FS_L_2,7_b4_W1	FS_L_5,0_b4
7,8	98,25	110,48	45,17	87,97	98,20
8,0	172,10	203,59	83,40	141,34	154,10
8,2	341,17	326,41	143,73	234,66	265,31

Tabelle 4-23 Verbrauchte Luftmengen b4

Verbrauchte Luftmenge in l							
Versuchsbezeichnung	FS_L_0_b6	FS_L_0_b6_W1	FS_L_1,8_b6	FS_L_1,8_b6_W1	FS_L_2,7_b6	FS_L_2,7_b6_W1	FS_L_5,0_b6
7,8	124,28	58,00	76,00	65,25	69,61	104,55	101,40
8,0	223,33	100,10	228,89	109,70	109,32	167,10	167,15
8,2	435,11	168,10	428,89	171,90	176,29	287,40	270,75

Tabelle 4-24 Verbrauchte Luftmengen b6

Verbrauchte Luftmenge in l				
Versuchsbezeichnung	FS_L_0_b8	FS_L_1,8_b8	FS_L_2,7_b8	FS_L_5,0_b8
7,8	127,73	143,67	128,13	127,40
8,0	230,13	238,27	200,73	205,27
8,2	433,53	417,53	365,53	341,87

Tabelle 4-25 Verbrauchte Luftmengen b8

4.3.3. Interpretation - Einfluss der Belüftungsintensität

Der Einfluss der Belüftungsintensität beschränkt sich auf die Dauer der Belüftung; die Fällung bleibt - wie schon in 4.2.5 Interpretation der Gelöstionenkonzentration auf Seite 20 beschrieben - davon unbeeinflusst. Bei höherer Belüftungsintensität sinkt folglich die erforderliche Zeitdauer zum Erreichen des gewünschten pH -Werts - und damit der Endkonzentration an $PO_4 - P$ - deutlich ab, die verbrauchten Luftmengen steigen jedoch. Es zeigt sich ein von der Belüftungsintensität unabhängiger Trend hin zu niedrigeren Belüftungszeiten bei höherem Einsatz von Fällmittel - trotz des durch die Verwendung eines sauren Fällsalzes niedrigeren pH -Werts zu Belüftungsbeginn. Ein Ansatz zur Erklärung dieses Phänomens ist der Einfluss von Salzen auf den $k_L a$ -Wert der Belüftung: durch Zugabe von Salzen sinkt die Blasenkoaleszenzneigung, was zu verbessertem Gasaustausch CO_2 gegen Luft führt, damit zu einem schnelleren Anstieg des pH -Werts und folglich zu verkürzter Belüftungszeit.

4.4. 24-Stunden Versuche

Zur Festlegung eines realistisch erreichbaren Ziel- pH -Werts beziehungsweise zur Optimierung der Fällung wurden zwei ausschließlich belüftete Versuche mit variabler Belüftungsintensität (2 und $4 \frac{l}{min}$) ohne Fällmitteleinsatz über 24 Stunden durchgeführt. Bedauerlicherweise konnte aufgrund des geringen Batchvolumens nicht zu allen Zeitpunkten Proben entnommen werden. Aufgrund der großen zeitlichen Differenz zwischen beiden Versuchen und entsprechender Alterung des Schlammes (Anfangs- pH -Wert) wurde darauf verzichtet, die Daten zu mitteln.

PO ₄ -P in mg/l				
Versuchs- bezeichnung	Versuchslaufzeit	FS_L_0_b4_24	Versuchslaufzeit	FS_L_0_b8_24
Anfangs-pH		7,17		7,26
Anfangs-pH	0,00	245,7	0,00	243,9
7,80	0,69	237	0,31	242,9
8,00	1,14	223,5	0,54	225,9
8,20	2,03	204	0,87	211,2
8,39	3,83	177	-	-
8,76	20	139,8	-	-
8,72	24	138,9	-	-
8,79	-	-	5,67	147,3
8,82	-	-	24	155,4

Tabelle 4-26 PO₄-P, Belüftung ohne Fällmittel, 24h

NH ₄ -N in mg/l				
Versuchs- bezeichnung	Versuchslaufzeit	FS_L_0_b4_24	Versuchslaufzeit	FS_L_0_b8_24
Anfangs-pH		7,17		7,26
Anfangs-pH	0,00	1336,8	0,00	1465,5
7,80	0,69	1392,3	0,31	1487,1
8,00	1,14	1392	0,54	1458
8,20	2,03	1358,4	0,87	1453,2
8,39	3,83	1327,2	-	-
8,76	20	1098	-	-
8,72	24	1035,9	-	-
8,79	-	-	5,67	1255,2
8,82	-	-	24	540,6

Tabelle 4-27 NH₄-N, Belüftung ohne Fällmittel, 24h

Mg in mg/l				
Versuchs- bezeichnung	Versuchslaufzeit	FS_L_0_b4_24	Versuchslaufzeit	FS_L_0_b8_24
Anfangs-pH		7,17		7,26
Anfangs-pH	0,00	10,1	0,00	0,6
7,80	0,69	5,5	0,31	1,7
8,00	1,14	1,4	0,54	0,5
8,20	2,03	3,2	0,87	0,5
8,39	3,83	0,4	-	-
8,76	20	0,5	-	-
8,72	24	1,7	-	-
8,79	-	-	5,67	0,2
8,82	-	-	24	0,7

Tabelle 4-28 Mg, Belüftung ohne Fällmittel, 24h

Ca in mg/l				
Versuchsbezeichnung	Versuchslaufzeit	FS_L_0_b4_24	Versuchslaufzeit	FS_L_0_b8_24
Anfangs-pH		7,17		7,26
Anfangs-pH	0,00	45,3	0,00	4,2
7,80	0,69	27,8	0,31	11,3
8,00	1,14	23,9	0,54	0,8
8,20	2,03	14,2	0,87	2,2
8,39	3,83	12	-	-
8,76	20	2,7	-	-
8,72	24	7,2	-	-
8,79	-	-	5,67	1,9
8,82	-	-	24	1,5

Tabelle 4-29 Ca, Belüftung ohne Fällmittel 24h

Es konnte auch über pH 8,2 hinaus noch ein deutlicher Anstieg des pH -Werts und ein weiteres Absinken der Phosphatkonzentration verzeichnet werden. Es wurden jedoch auch einige Nachteile einer solch langen Belüftungszeit offenkundig. Insbesondere deutet das starke Absinken der Ammoniumstickstoffkonzentration bei beiden Versuchen auf erneute biologische Aktivität autotropher Bakterien (Nitrifikanten) hin. Diese beginnt - abhängig von der Belüftungsintensität bereits nach 5-6 Stunden einzusetzen. Da autotrophe Bakterien für die Ammoniumoxidation Sauerstoff benötigen und dieser gegenüber der hohen Substratkonzentration sicherlich wachstumslimitierend ist, korreliert stärkere Belüftung mit stärkerem Rückgang der Ammoniumstickstoffkonzentration. Es konnte in dem Zeitraum der einsetzenden Nitrifikation auch ein schwach ausgeprägtes pH -Maximum beobachtet werden; im weiteren Versuchsverlauf sank der pH -Wert des Schlammes um etwa 0,1 Einheiten ab. Auch eine Aufhellung des Schlammes konnte beobachtet werden; diese wird auf eine Oxidation von tiefschwarzem Eisensulfid zu gelöstem Eisensulfat zurückgeführt.

5. Entwässerbarkeit und rheologische Eigenschaften des belüfteten Faulschlammes

Kommunaler Faulschlamm weist nach der maschinellen Eindickung im Allgemeinen einen Trockensubstanzgehalt von 25-30% auf - der Rest ist Wasser. Ein Großteil dieses Wassers ist in Hydrogelen gebunden, deren Grundsubstanzen aus Polysacchariden und Proteinen bestehen. Das sind die sogenannten extrazellulären polymeren Substanzen, mit welchen sich Bakterien zu Schutz- und Speicherzwecken umgeben. Eine einfache mechanische Abtrennung dieser Substanzen und des gebundenen Wassers ist nicht möglich; die Entwässerbarkeit eines Schlammes ist daher mit seinem Gehalt an extrazellulären polymeren Substanzen korreliert. Entwässerter Faulschlamm kann als organischer Abfall gemäß Deponieverordnung nicht mehr direkt ohne Vorbehandlung deponiert werden, sodass ein Großteil des ausgefaulten Schlammes daher thermisch verwertet oder der Kompostierung zugeführt wird. Unabhängig vom Verfahren sind die Kosten der Verwertung hoch und werden nur aufgrund der Masse an Material bestimmt. Es ist daher von Seiten der Kläranlagenbetreiber aus Kostengründen ein primäres Anliegen, die Entwässerbarkeit des Faulschlammes - also den Trockensubstanzgehalt des zu verwertenden Materials - zu erhöhen. Hierfür kommen derzeit insbesondere dem Faulschlamm zugesetzte Polymersubstanzen (etwa

modifizierte Stärken und Polyacrylate) zum Einsatz; die erforderliche Dosierung muss in den meisten Fällen empirisch ermittelt werden. Sollte im Rahmen einer Faulschlammbelüftung zur MAP-Fällung auch eine gesteigerte Entwässerbarkeit des Faulschlamm festgestellt werden, so könnte dies deutlich zur Kostendeckung des Belüftungsverfahrens beitragen.

5.1. Trockensubstanzgehalt und Entwässerbarkeit des belüfteten Faulschlamm

5.1.1. Trockensubstanzgehalt bei Belüftung ohne Fällmittel

Masseanteil Rückstand in % _m					
Versuchsbezeichnung	FS_L_0_b4	FS_L_0_b6	FS_L_0_b6_W1	FS_L_0_b8	Mittelwert
Anfangs-pH	7,15	7,14	7,33	7,15	7,15
20°C	34,94	33,42	30,67	32,61	33,7
30°C	34,86	32,63	30,39	31,42	33,0
7,8	32,51	30,16	29,41	30,39	31,0
8,0	32,19	29,47	29,17	29,90	30,5
8,2	31,72	29,10	28,46	29,13	30,0
TS im Rückstand in g/kg					
Versuchsbezeichnung	FS_L_0_b4	FS_L_0_b6	FS_L_0_b6_W1	FS_L_0_b8	Mittelwert
Anfangs-pH	7,15	7,14	7,33	7,15	7,15
20°C	92,32	95,25	94,52	94,9	94,2
30°C	95,15	96,32	96,88	99,7	97,1
7,8	99,04	99,79	100,35	104,05	101,0
8,0	100,30	103,03	100,13	104,65	102,7
8,2	100,86	105,69	104,23	104,08	103,5

Tabelle 5-1 Rückstand und TS, Belüftung ohne Fällmittel

5.1.2. Trockensubstanzgehalt bei $0,6 \frac{g}{l} MgCl_2 \cdot 6H_2O$

Masseanteil Rückstand in % _m					
Versuchsbezeichnung	FS_L_1,8_b4	FS_L_1,8_b6	FS_L_1,8_b6_W1	FS_L_1,8_b8	Mittelwert
Anfangs-pH	7,15	7,14	7,33	7,15	7,15
20°C	34,94	32,70	30,67	32,61	33,4
30°C	34,86	31,63	30,39	31,42	32,6
7,8	30,22	30,35	29,18	29,90	30,2
8,0	29,44	29,57	28,76	29,40	29,5
8,2	29,20	29,21	28,17	28,89	29,1
TS im Rückstand in g/kg					
Versuchsbezeichnung	FS_L_1,8_b4	FS_L_1,8_b6	FS_L_1,8_b6_W1	FS_L_1,8_b8	Mittelwert
Anfangs-pH	7,15	7,14	7,33	7,15	7,15
20°C	92,32	95,25	94,52	94,9	94,2
30°C	95,15	96,32	96,88	99,7	97,1
7,8	102,34	102,24	103,55	107,4	104,0
8,0	104,88	103,15	104,63	105,1	104,4
8,2	105,97	108,3	109,48	106,2	106,8

Tabelle 5-2 Rückstand und TS, $0,6 \frac{g}{l} MgCl_2 \cdot 6H_2O$

5.1.3. Trockensubstanzgehalt bei $0,9 \frac{g}{l} MgCl_2 \cdot 6H_2O$

Masseanteil Rückstand in % _m						
Versuchsbezeichnung	FS_L_2,7_b4	FS_L_2,7_b4_W1	FS_L_2,7_b6	FS_L_2,7_b6_W1	FS_L_2,7_b8	Mittelwert
Anfangs-pH	7,16	7,15	7,16	7,19	7,17	7,17
20°C	24,79	31,62	24,79	34,21	34,84	33,6
30°C	24,13	30,71	24,13	33,20	33,61	32,5
7,8	23,09	29,02	22,66	31,57	32,12	30,9
8,0	22,51	28,40	22,38	31,08	31,24	30,2
8,2	22,30	27,92	21,82	30,49	31,01	29,8
TS im Rückstand in g/kg						
Versuchsbezeichnung	FS_L_2,7_b4	FS_L_2,7_b4_W1	FS_L_2,7_b6	FS_L_2,7_b6_W1	FS_L_2,7_b8	Mittelwert
Anfangs-pH	7,16	7,15	7,16	7,19	7,17	7,17
20°C	93,1	95,97	93,1	93,74	93,61	94,4
30°C	96,9	97	96,9	99,70	95,81	97,5
7,8	98,4	105,81	105,8	103,85	101,52	103,7
8,0	103,9	109,58	103,9	105,73	103,93	106,4
8,2	107,5	108,85	104,7	108,09	105,11	107,4

Tabelle 5-3 Rückstand und TS, $0,9 \frac{g}{l} MgCl_2 \cdot 6H_2O$

5.1.4. Trockensubstanzgehalt bei $1,67 \frac{g}{l} MgCl_2 \cdot 6H_2O$

Masseanteil Rückstand in % _m				
Versuchsbezeichnung	FS_L_5,0_b4	FS_L_5,0_b6	FS_L_5,0_b8	Mittelwert
Anfangs-pH	7,15	7,28	7,15	7,19
20°C	31,62	33,08	31,62	32,10
30°C	30,71	31,94	30,71	31,12
7,8	28,55	30,22	28,69	29,15
8,0	27,98	29,70	27,94	28,54
8,2	27,17	29,41	27,32	27,97
TS im Rückstand in g/kg				
Versuchsbezeichnung	FS_L_5,0_b4	FS_L_5,0_b6	FS_L_5,0_b8	Mittelwert
Anfangs-pH	7,15	7,28	7,15	7,19
20°C	95,97	96,28	95,97	96,07
30°C	97	99,24	97	97,75
7,8	106,57	107,66	106,64	106,96
8,0	107,43	111,32	108,58	109,11
8,2	109,35	112,59	111,32	111,09

Tabelle 5-4 Rückstand und TS, $1,67 \frac{g}{l} MgCl_2 \cdot 6H_2O$

5.1.5. 24h-Versuche

Masseanteil Rückstand in % _m				
Versuchsbezeichnung	Versuchslaufzeit	FS_L_0_b4_24	Versuchslaufzeit	FS_L_0_b8_24
Anfangs-pH		7,17		7,26
20°C	0,00	34,84	0,00	31,63
30°C	0,00	33,61	0,00	30,40
7,80	0,69	32,43	0,31	29,63
8,00	1,14	32,12	0,54	29,09
8,20	2,03	31,21	0,87	28,31
8,39	3,83	31,07	-	-
8,76	20	30,80	-	-
8,72	24	30,41	-	-
8,79	-	-	5,67	27,06
8,82	-	-	24	29,36
TS im Rückstand in g/kg				
Versuchsbezeichnung	Versuchslaufzeit	FS_L_0_b4_24	Versuchslaufzeit	FS_L_0_b8_24
Anfangs-pH		7,17		7,26
20°C	0,00	93,61	0,00	95,31
30°C	0,00	95,81	0,00	98,1
7,80	0,69	100,32	0,31	102,67
8,00	1,14	99,87	0,54	103,94
8,20	2,03	102,56	0,87	106,76
8,39	3,83	106,22	-	-
8,76	20	107,24	-	-
8,72	24	105,27	-	-
8,79	-	-	5,67	109,86
8,82	-	-	24	102,16

Tabelle 5-5 Rückstand und TS, reine Belüftung 24h

5.1.6. Interpretation der Trockensubstanzgehalte

Der Mittelwert der Trockensubstanzgehalte des Zentrifugenrückstandes lag relativ gleichmäßig bei etwa $94 \frac{g}{kg}$ was auf eine gute Homogenisierung des Faulschlammes vor Versuchsbeginn hindeutet. Die Trockensubstanzgehalte des Schlammes konnten als Produkt des Massenanteils an Rückstand mit dem Trockensubstanzgehalt desselben im Mittel zu $31,4 \frac{g}{kg}$ bestimmt werden; maximal betrug der Trockensubstanzgehalt des Schlammes $32,2 \frac{g}{kg}$, minimal $30,4 \frac{g}{kg}$. Da auch hier keine systematischen Veränderungen durch Variation der Belüftungsintensität festgestellt werden konnten, wurden die Mittelwerte der Fällmittelgruppen zu Tabelle 5-6 und Tabelle 5-7 auf Seite 31 zusammengefasst.

Mittelwerte Massenanteil Rückstand in % _m					
pH-Wert	0 g/l	0,6 g/l	0,9 g/l	1,67 g/l	Mittelwert
20°C	33,7	33,4	33,6	32,1	33,2
30°C	33,0	32,6	32,5	31,1	32,3
7,8	31,0	30,2	30,9	29,2	30,3
8,0	30,5	29,5	30,2	28,5	29,7
8,2	30,0	29,1	29,8	28,0	29,2
Δ in %_m	3,7	4,3	3,7	4,1	4,0

Tabelle 5-6 Mittelwerte Massenanteil Rückstand

Durch die Belüftung kann eine deutliche Reduktion der zu entsorgenden Masse an Faulschlamm von 3,7-4,3% - im Mittel 4% - erzielt werden. Alleine die Erwärmung des Faulschlammes vor dem Entwässerungsschritt zeigt bereits eine leichte Verbesserung der Entwässerungsleistung. Ein Zusammenhang zwischen steigender Entwässerbarkeit von Klärschlämmen und Temperaturerhöhung konnte bereits nachgewiesen werden [4], hier wurde eine solche Korrelation auch für Faulschlamm festgestellt. Da anhand der Daten keine systematischen Tendenzen festgestellt werden konnten, wurde eine Mittelung sämtlicher Messwerte vorgenommen und in Abbildung 5-1 auf Seite 31 dargestellt.

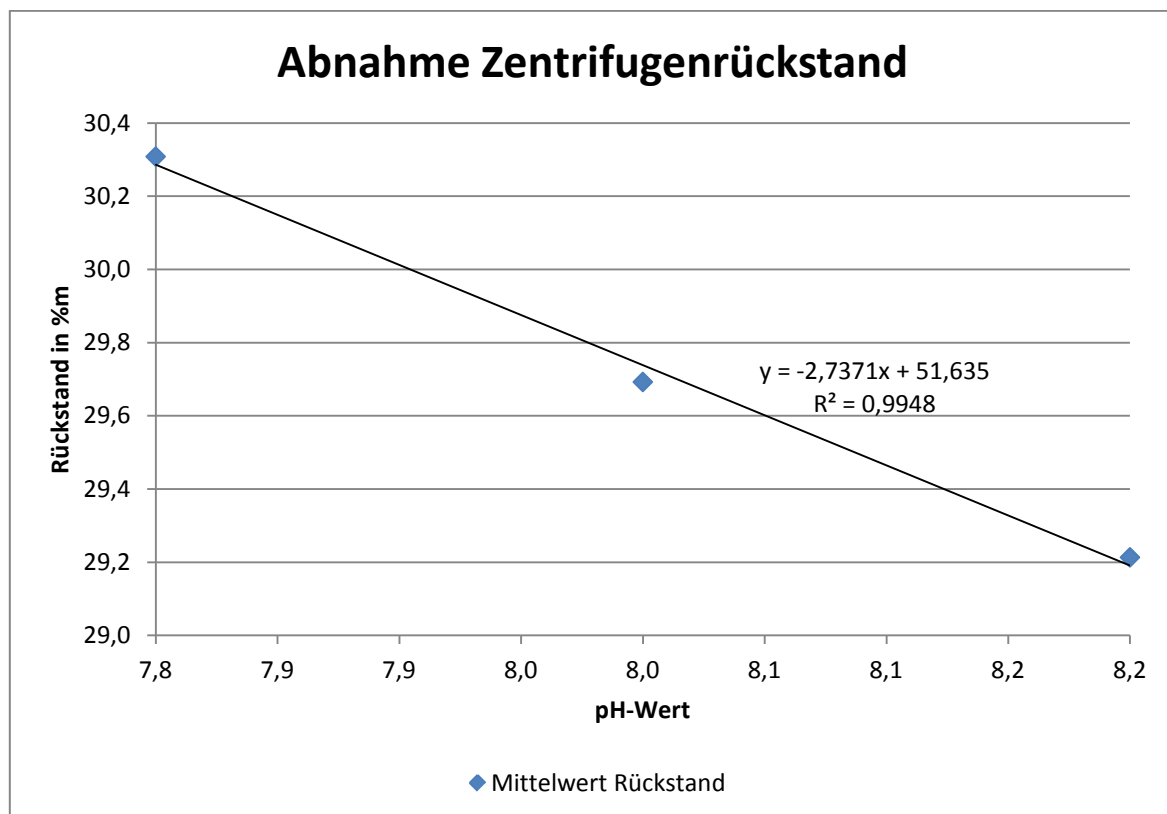


Abbildung 5-1 Abnahme Massenanteil Zentrifugenrückstand über pH-Wert nach Belüftung

Mittelwerte TS im Rückstand in g/kg				
pH-Wert	0 g/l	0,6 g/l	0,9 g/l	1,67 g/l
20°C	94,2	94,2	94,4	96,1
30°C	97,1	97,1	97,5	97,7
7,8	101,0	104,0	103,7	107,0
8,0	102,7	104,4	106,4	109,1
8,2	103,5	106,8	107,4	111,1
Δ in g/l	9,4	12,7	12,9	15,0

Tabelle 5-7 Mittelwerte Trockensubstanzgehalt im Rückstand nach Belüftung

Die Abhängigkeit des Trockensubstanzgehalts im Rückstand vom pH -Wert wurde im Bereich zwischen 7,8 und 8,2 in Abbildung 5-2 auf Seite 32 dargestellt und durch Geraden approximiert; Scharparameter ist erneut die Fällmittelmenge.

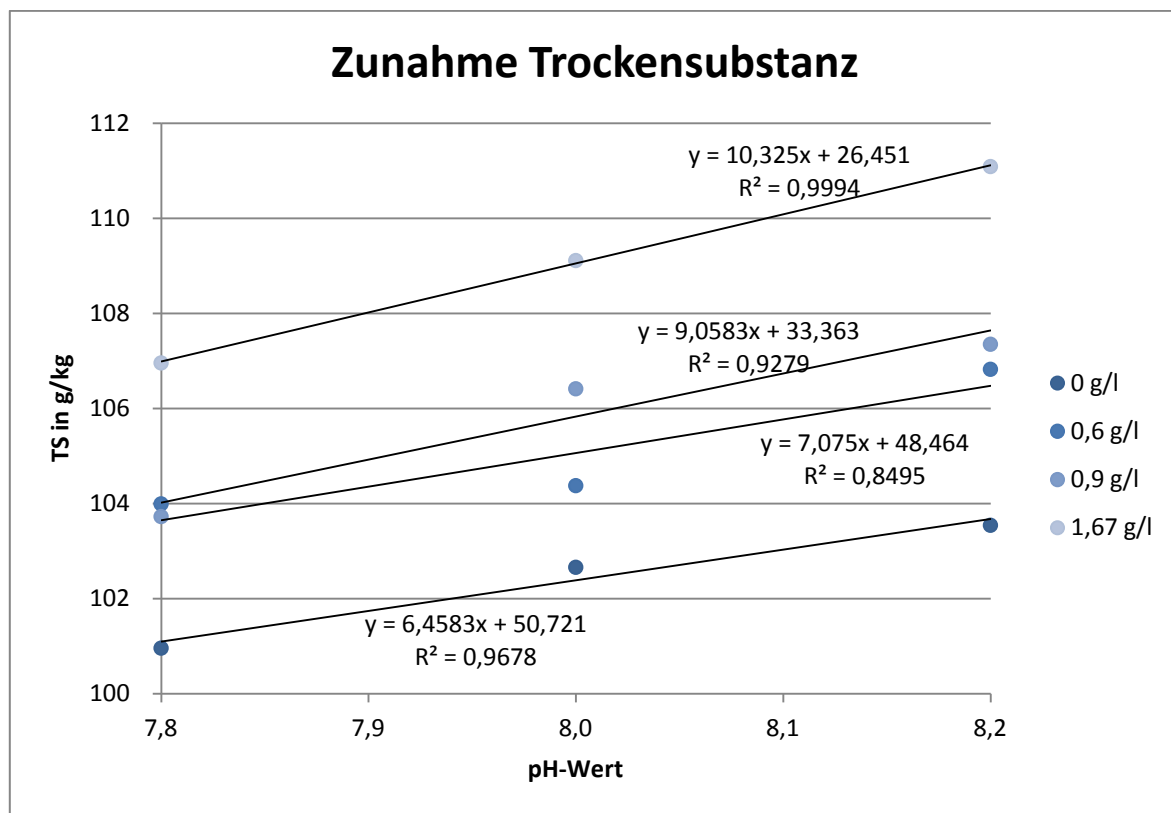


Abbildung 5-2 Zunahme Trockensubstanzgehalt im Rückstand über pH -Wert

Die Möglichkeit einer erhöhten Abfrachtung von Feststoff im Trübwasser konnte ausgeschlossen werden, da unabhängig vom Fällmittelzusatz der Trockensubstanzgehalt des Rückstands anstieg und folglich eine bessere Entwässerbarkeit des Schlammes gegeben war.

Auffällig ist die Steigerung des Trockensubstanzgehalts bei steigender Menge Fällmittel. Als Erklärungsansatz könnte die Zunahme der Fällungsprodukte dienen, welche im Rückstand der Zentrifuge sedimentieren. Exemplarisch wurde die Zunahme des Trockensubstanzgehalts im Zentrifugenrückstand aufgrund der MAP-Fällung für eine Fällmittelmenge von $0,9 \frac{g}{l} MgCl_2 \cdot 6H_2O$ gegenüber reiner Belüftung abschätzt und mit den tatsächlichen Werten verglichen:

$$\Delta n_{PO_4-P} = \frac{\Delta m_{PO_4-P}}{M_P} = \frac{185,9 - 72,9 \frac{mg}{l}}{30,97 \frac{mg}{mmol}} = 3,65 \frac{mmol}{l}$$

$$\Delta m_{MAP} = \Delta n_{PO_4-P} \cdot M_{MAP} = 3,66 \frac{mmol}{l} \cdot 245,44 \frac{mg}{mmol} = 0,895 \frac{g}{l}$$

$$\Delta m_{TS} = 3,5 \frac{g}{l}$$

Die Rechnung zeigt deutlich, dass die Steigerung des Trockensubstanzgehalts nicht alleine auf die Zunahme der kristallisierten Fällungsprodukte zurückgeführt werden kann. Des Weiteren könnte auch die Denaturierung von Proteinen und der damit verbundene Verlust an Strukturwasser oder osmotische Effekte aufgrund der über das Fällmittel eingebrachten Chlorid- oder Magnesiumionen eine Rolle spielen, welche jedoch nicht belegt werden können.

Aufgrund des erneuten Bakterienwachstums sanken Entwässerbarkeit und Trockensubstanzgehalt des Schlamms bei Belüftungszeiten von mehr als 6 Stunden wieder deutlich ab, da ein Aufbau von extrazellulären polymeren Substanzen erfolgt. Das Maximum der Entwässerbarkeit bei längerer Belüftung steht tendenziell mit dem maximalen *pH*-Wert in Zusammenhang - siehe Kapitel 4.4 Seite 24.

5.2. Rheologische Eigenschaften von Faulschlamm

5.2.1. Einführung Rheologie - Grundlagen rheologischer Messungen

Die Rheologie beschäftigt sich mit der Charakterisierung des Fließverhaltens von Flüssigkeiten; hierfür sind Schubspannung τ , die Scherrate $\dot{\gamma}$ und die dynamische Viskosität η ausschlaggebende Größen. Diese können anhand des Parallelplattenmodells veranschaulicht werden:

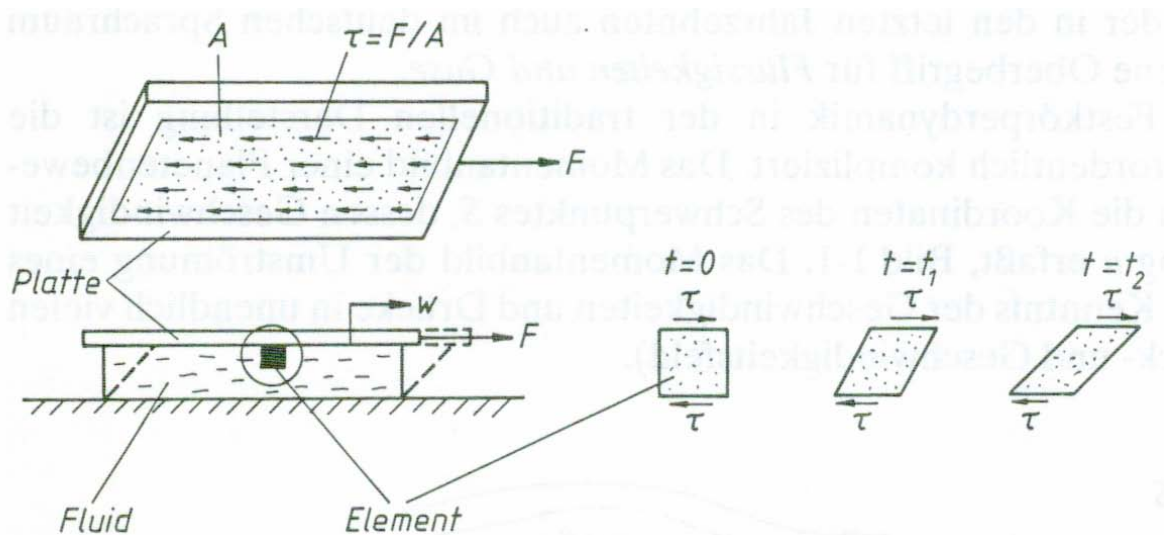


Abbildung 5-3 Parallelplattenmodell übernommen von [5]

Das zwischen einer ruhenden und einer weiteren, aufgrund einer Kräfteinwirkung F mit der Geschwindigkeit v , bewegten Platte im Abstand y eingeschlossene Fluid unterliegt aufgrund des Geschwindigkeitsgradienten einer Scherbeanspruchung.

Für eine laminare Strömung zwischen den Platten und unter der Bedingung der Wandhaftung kann die Schubspannung τ folgendermaßen bestimmt werden:

$$\tau = \frac{F}{A}$$

Mit dem Plattenabstand und der Geschwindigkeit der bewegten Platte kann die Scherrate als Kenngröße des Geschwindigkeitsgradienten errechnet werden:

$$\dot{\gamma} = \frac{v}{y}$$

Die innere Reibung des Fluids - die dynamische Viskosität η - ist als Proportionalitätsfaktor zwischen Scherrate und Schubspannung definiert:

$$\eta = \frac{\tau}{\dot{\gamma}}$$

Werden die Schubspannung τ oder die dynamische Viskosität η über der Scherrate $\dot{\gamma}$ aufgetragen, so spricht man von Fließ- und Viskositätskurven. Da für hydraulische Berechnungen Fließkurven ausschlaggebend sind, werden ausschließlich diese im Rahmen dieser Arbeit behandelt. Das grundlegende Verhalten von Flüssigkeiten kann anhand ihrer Fließkurven eingeteilt werden.

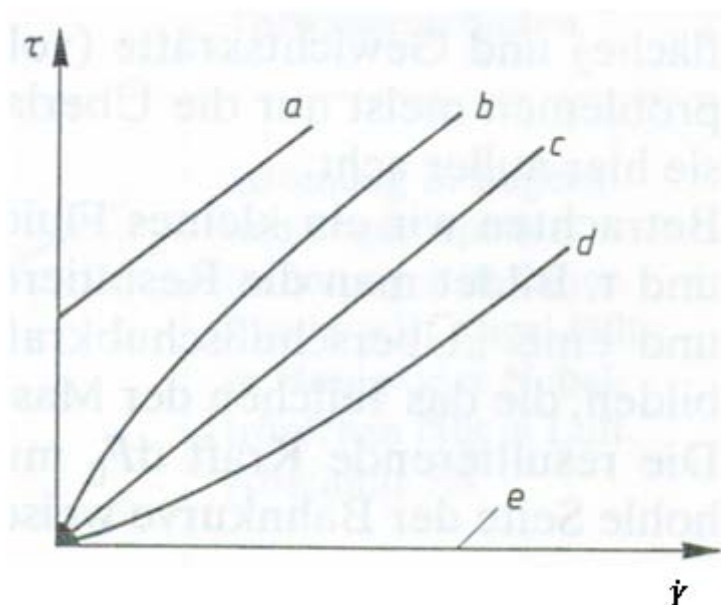


Abbildung 5-4 Fließkurven einiger Fluidtypen übernommen von [5]

Die idealisierte Modellvorstellung eines Fluids - das ideale Fluid - ist reibungslos und somit nicht viskos, in Abbildung 5-4 auf Seite 34 dargestellt durch die Abszisse (e). Bei newtonschen Fluiden (c) wie etwa Wasser besteht ein linearer Zusammenhang zwischen Schubspannung τ und Scherrate $\dot{\gamma}$; die dynamische Viskosität η ist in diesem Fall ein rein von der Temperatur abhängiger Proportionalitätsfaktor. Als dilatantes oder scherverfestigendes Verhalten (d) wird die Steigerung der Viskosität aufgrund stärkerer Wechselwirkung der Fluidteilchen bei zunehmender Scherrate bezeichnet, die Schubspannung sinkt degressiv ab. Das Gegenteil von Dilatanz - strukturviskoses oder pseudoplastisches Verhalten - ist in (b) dargestellt. Kurve (a) zeigt ein Bingham-Fluid; dieses beginnt

erst ab Erreichen einer Mindestschubspannung (Fließgrenze) zu fließen, darunter verhält es sich wie ein starrer Festkörper.

Faulschlämme sind pseudoplastische (strukturviskose), thixotrope Flüssigkeiten mit Fließgrenze; Fließen setzt also erst nach Erreichen einer Mindestschubspannung ein. Anschließend sinkt die Viskosität mit steigender Scherrate ab - das Fluid wird dünnflüssiger, während die Schubspannung degressiv zunimmt. Als Thixotropie wird das zeitabhängige Absinken der Schubspannung bei konstanter Scherrate bezeichnet; es ergeben sich Hystereseschleifen in den Fließkurven.

5.2.2. Durchführung der rheologischen Messungen

Aufgrund der Problematik der zeitlichen Veränderung der Proben bei Lagerung wurde die Durchführung der rheologischen Messungen innerhalb von 1-3 Stunden nach Probenahme angestrebt und eingehalten. Es wurde bei allen Messungen ein luftgelagertes Rheometer Physica MCR 301 der Firma Anton Paar mit koaxialem Messsystem CC39 mit einer Spaltweite von 1,638mm nach DIN 53019-1 verwendet. Der grundlegende Aufbau eines solchen Messsystems ist in Abbildung 5-5 auf Seite 35 schematisch dargestellt - der Außenzylinder (2) wird mit etwa 60g der Probe des Fluids bis zum Erreichen der Füllhöhe (4) gefüllt. (1) stellt den Boden des Messgefäßes dar, (3) ist der rotierenden Innenzylinder. Während der Messung wurde die Probe mit einem Temperierzylinder C-LTD180/XL und direkt angeschlossenem Umlaufkühler Haake D8 auf 30°C temperiert.

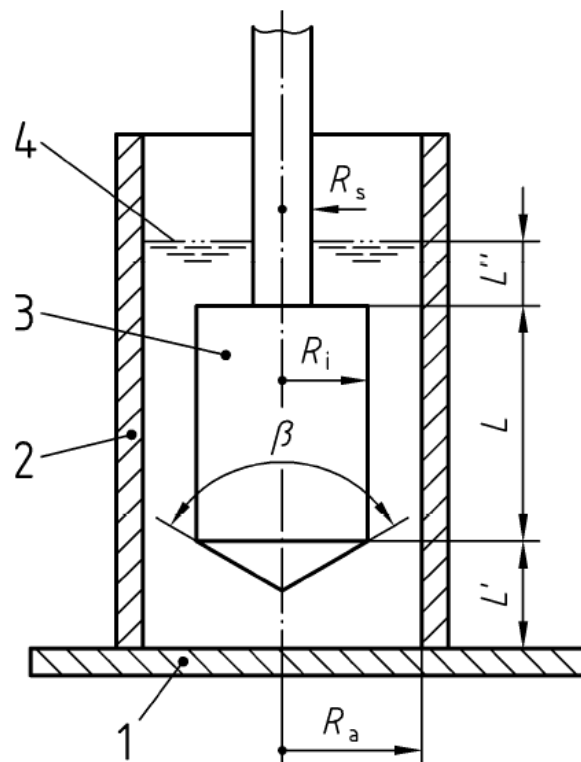


Abbildung 5-5 Koaxiales Zylindersystem übernommen von DIN 53019-1

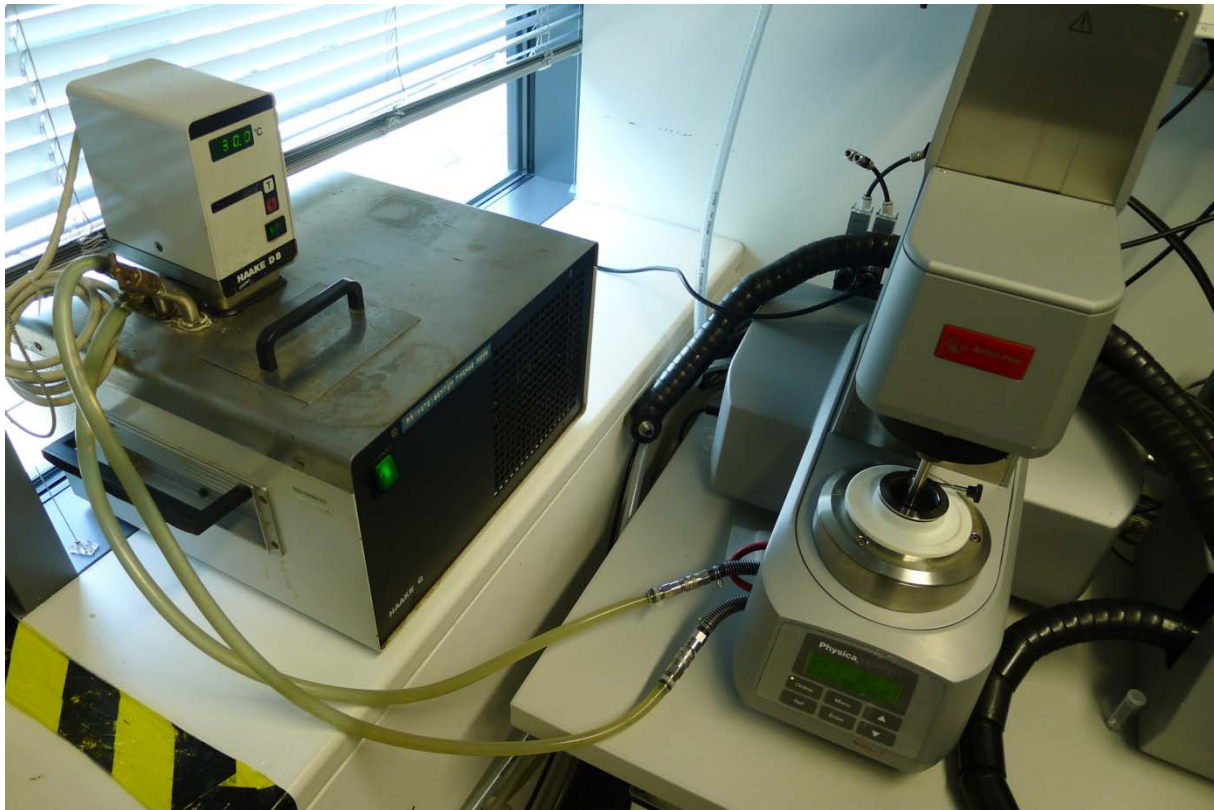


Abbildung 5-6 Rheometer mit Umlaufkühler

Zwecks Vergleichbarkeit wurde für jede Probe ein Messprogramm mit vier Abschnitten durchfahren; die Datenerfassung und -auswertung erfolgte mit der implementierten Software RheoPlus, welche auch zur Gerätesteuerung verwendet wurde. Zunächst wurde bei konstanter, kleiner Scherrate $\dot{\gamma} = 0,1 \frac{1}{s}$ 60 Sekunden lang die Fließgrenze aufgenommen. Die Aufwärtsrampe wurde mit linear von $0,1 \dots 500 \frac{1}{s}$ ansteigender Scherrate aufgezeichnet, anschließend wurde die Probe aufgrund der Thixotropie bei maximaler Scherrate gehalten. Die Abwärtsrampe wurde analog zur Aufwärtsrampe mit linear von $500 \dots 0 \frac{1}{s}$ abnehmender Scherrate bestimmt. Die Dauer der Auf- und Abwärtsrampen und der Phase konstanter, maximaler Scherrate betrug jeweils 180 Sekunden. Aufgrund der sehr guten Reproduzierbarkeit der Messungen [6] wurde nur eine Doppelbestimmung durchgeführt. Waren Teile einer Messkurve wegen größerer Teilchen im Fluid unstetig, wurden diese Bereiche bei der Mittelung der Doppelbestimmungen und zur Bestimmung der Parameter der Approximationsfunktionen nicht berücksichtigt.

5.2.3. Daten der rheologischen Messungen

Rheologische Messungen wurden für alle Fällmittelkonzentrationen bei konstanter Belüftungsintensität (b6, entspricht $3 \frac{l}{min}$) sowie den stärker mit Luft beaufschlagten 24h-Versuch (b8) durchgeführt. Die aufgezeichneten Daten wurden ausgelesen und die für jeweils einen pH -Wert durchgeführte Doppelbestimmung gemittelt. Die so erhaltenen Daten wurden als Fließkurven - Schubspannung τ über Scherrate $\dot{\gamma}$ - für jeweils einen Belüftungsversuch aufgetragen.

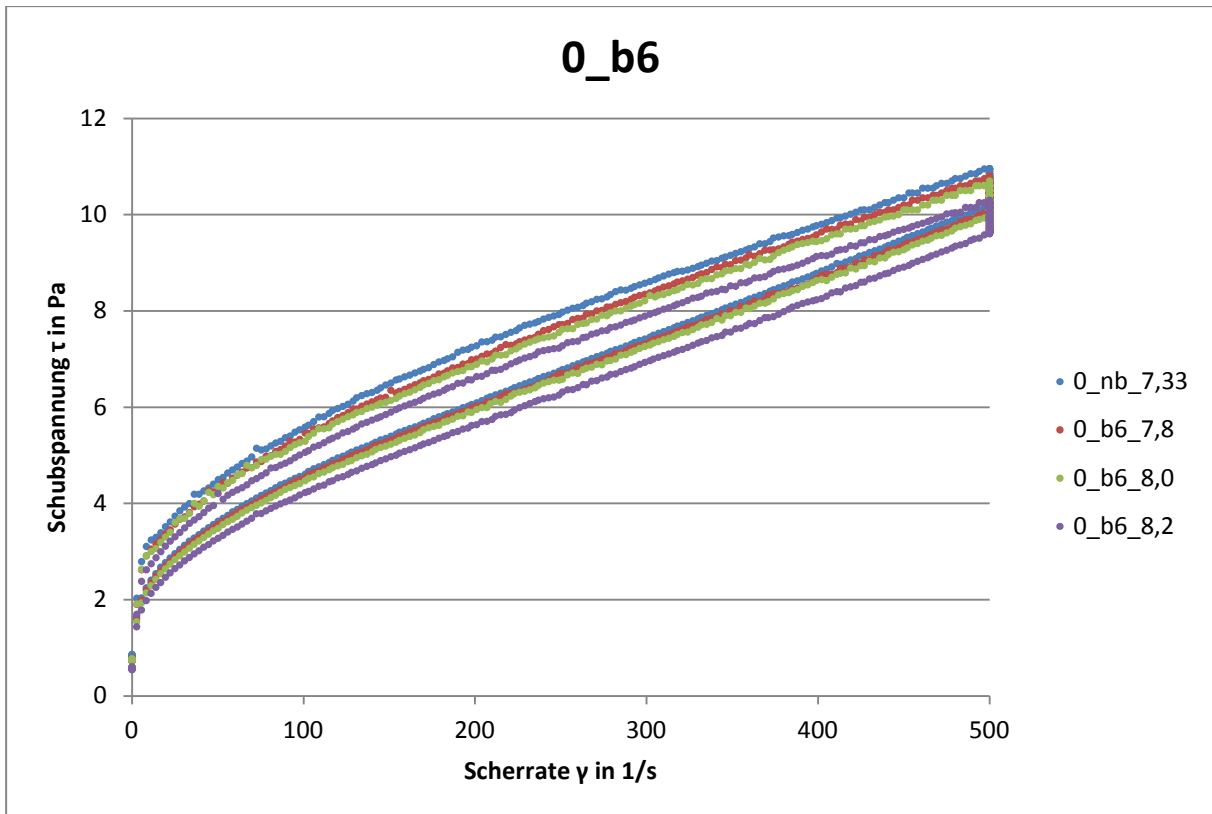


Abbildung 5-7 Fließkurven bei variablem *pH*-Wert, Belüftung ohne Fällmittel

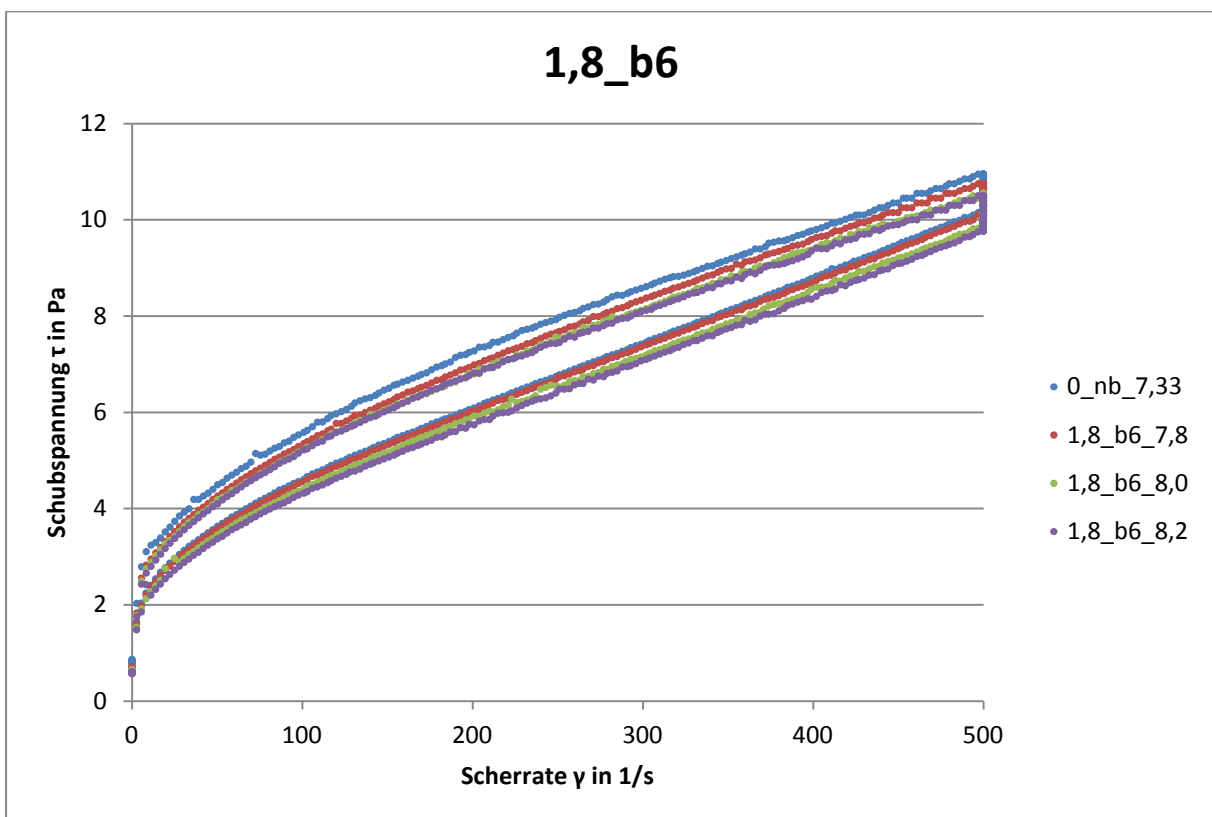


Abbildung 5-8 Fließkurven bei variablem *pH*-Wert, $0,6 \frac{g}{l} MgCl_2 \cdot 6H_2O$

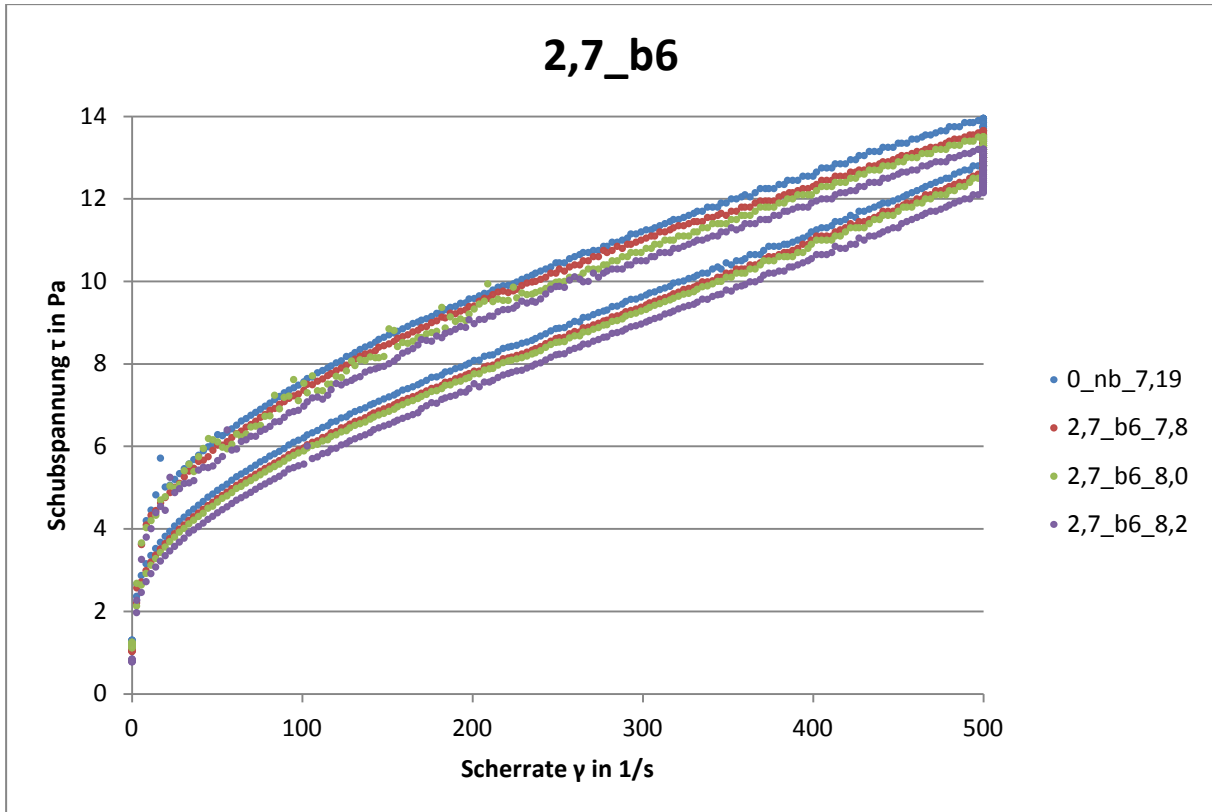


Abbildung 5-9 Fließkurven bei variablem pH -Wert, $0,9 \frac{g}{l} MgCl_2 \cdot 6H_2O$

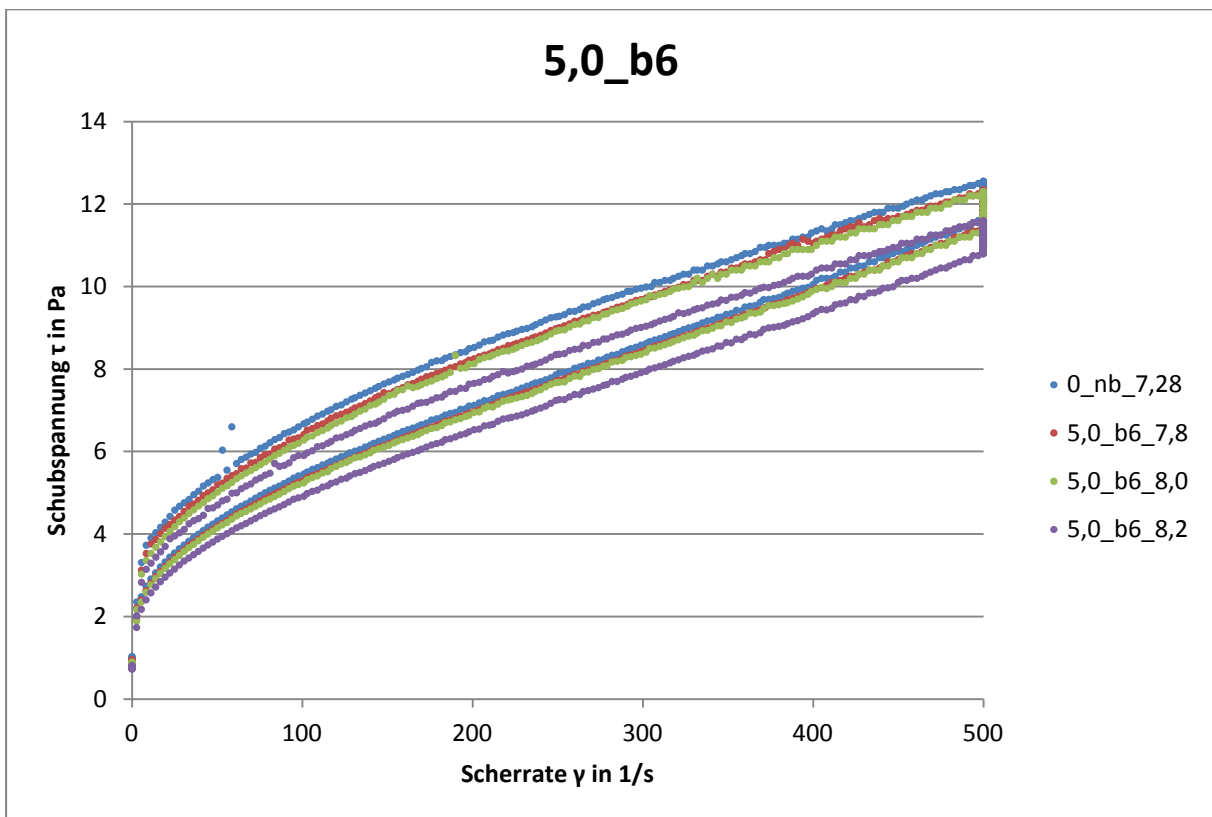


Abbildung 5-10 Fließkurven bei variablem pH -Wert, $1,67 \frac{g}{l} MgCl_2 \cdot 6H_2O$

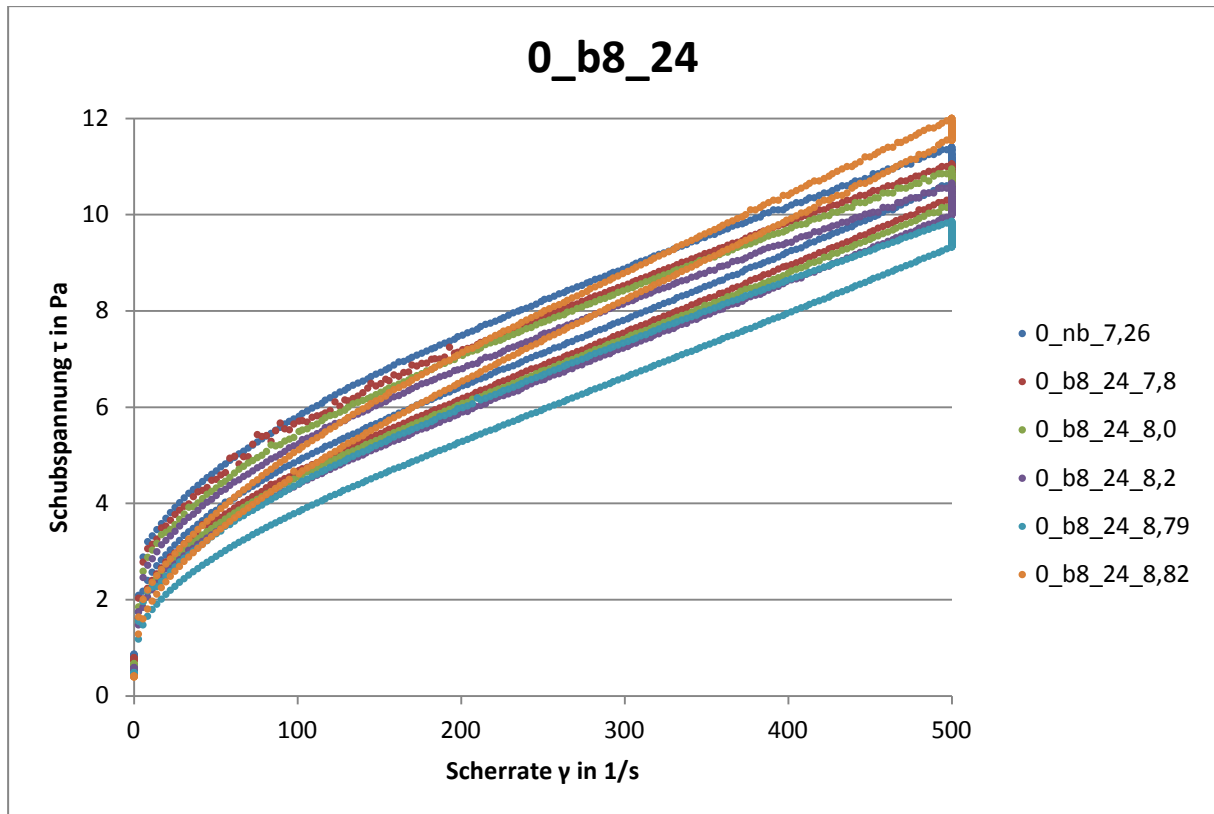


Abbildung 5-11 Fließkurven bei variablem pH -Wert, Belüftung ohne Fällmittel, 24h

5.2.4. Approximationsfunktionen

Zur Dimensionierung von Rohrleitungen, Pumpen und Belüftern sind Approximationsfunktionen der Fließkurven unerlässlich, da anhand dieser die Viskosität des Fluids abgeschätzt werden kann. Im Folgenden werden die zwei für Klär- und Faulschlämme gebräuchlichen Regressionsfunktionen [6] beschrieben und anschließend die jeweils ermittelten Regressionsparameter der Einzelmessungen sowie deren Mittelwerte - soweit sinnvoll möglich - tabellarisch für Aufwärts- und Abwärtsrampe dargestellt. Aus den Mittelwerten der Parameter wurde die Viskosität η bei einer Scherrate $\dot{\gamma} = 500 \frac{1}{s}$ errechnet.

5.2.4.1. Ostwald-de Waele

Die Approximationsfunktion nach Ostwald-de Waele ist eine Potenzfunktion mit dem Konsistenzfaktor K und dem Fließindex n als freien Parametern.

$$\tau = K \cdot \dot{\gamma}^n$$

Ist der Fließindex $n < 1$, so liegt strukturviskoses Fluidverhalten vor; bei $n = 1$ besteht ein linearer Zusammenhang zwischen der Schubspannung τ und der Scherrate $\dot{\gamma}$ - es wird also in diesem Fall ein newtonsches Fluid beschrieben. Da für $\dot{\gamma} = 0$ rein mathematisch auch $\tau = 0$ gelten muss, kann mit der Approximationsfunktion nach Ostwald-de Waele keine Fließgrenze abgebildet werden, wodurch es bei strukturviskosen Fluiden mit Fließgrenzen wie Faulschlamm zu einer Unterschätzung der Schubspannung bei niedrigen und hohen Scherraten kommt; die Residuen der Approximation lagen zwischen $0,96 \leq R^2 \leq 1$.

Ostwald - Aufwärtsrampe								
Versuchs- und Probenbezeichnung		Messung 1		Messung 2		Mittelwert		$\eta(500)$
		K	n	K	n	K	n	in mPas
FS_L_0_b6	0_nb_W1_7,33_30	0,99002	0,38243	0,91106	0,39427	0,95054	0,38835	22,03
	0_b6_W1_7,8	0,89417	0,39546	0,81636	0,40979	0,85527	0,40263	21,70
	0_b6_W1_8,0	0,84723	0,40155	0,82660	0,40530	0,83692	0,40343	21,35
	0_b6_W1_8,2	0,77385	0,41153	0,75149	0,41432	0,76267	0,41293	20,68
FS_L_1,8_b6	0_nb_W1_7,33_30	0,99002	0,38243	0,91106	0,39427	0,95054	0,38835	22,03
	1,8_b6_W1_7,8	0,82773	0,40864	0,81543	0,40936	0,82158	0,40900	21,69
	1,8_b6_W1_8,0	0,7872	0,41418	0,80442	0,40729	0,79581	0,41074	21,25
	1,8_b6_W1_8,2	0,78717	0,41159	0,74014	0,41802	0,76366	0,41481	20,95
FS_L_2,7_b6	0_nb_W1_7,19_30	1,4835	0,35719	1,5551	0,34747	1,5193	0,35233	27,83
	2,7_b6_W1_7,8	1,3873	0,3653	1,513	0,3482	1,45015	0,35675	27,32
	2,7_b6_W1_8,0	1,4619	0,35269	1,3962	0,3631	1,42905	0,35790	27,15
	2,7_b6_W1_8,2	1,2334	0,37748	1,1045	0,39719	1,16895	0,38734	26,75
FS_L_5,0_b6	0_nb_7,28_30	1,2727	0,36302	1,2816	0,36236	1,27715	0,36269	25,06
	5,0_b6_7,8	1,1552	0,37679	1,1197	0,38055	1,13745	0,37867	24,69
	5,0_b6_8,0	1,0583	0,38968	1,1333	0,37532	1,09580	0,38250	24,36
	5,0_b6_8,2	0,9775	0,39176	0,99349	0,3907	0,9855	0,39123	23,20
FS_L_0_b8_24	0_nb_7,26_30	0,98232	0,38978	0,97163	0,38998	0,97698	0,38988	22,82
	0_b8_24_7,8	0,94865	0,38904	1,0653	0,36883	0,94865	0,38904	22,03
	0_b8_24_8,0	0,84291	0,40699	1,0219	0,37288	0,84291	0,40699	21,89
	0_b8_24_8,2	0,80845	0,40989	0,75754	0,41846	0,783	0,41418	21,38
	0_b8_24_8,79	0,49438	0,47738	0,47577	0,48177	0,48508	0,47958	20,07
	0_b8_24_8,82	0,47778	0,51424	0,48838	0,50973	0,48308	0,51199	24,29

Tabelle 5-8 Approximationsparameter Aufwärtsrampe nach Ostwald-de Waele

Ostwald - Abwärtsrampe								
Versuchs- und Probenbezeichnung		Messung 1		Messung 2		Mittelwert		$\eta(500)$
		K	n	K	n	K	n	in mPas
FS_L_0_b6	0_nb_W1_7,33_30	0,54697	0,46317	0,53664	0,46512	0,54181	0,46415	20,32
	0_b6_W1_7,8	0,52779	0,46692	0,52814	0,46556	0,52797	0,46624	20,07
	0_b6_W1_8,0	0,50372	0,47269	0,50754	0,46993	0,50563	0,47131	19,86
	0_b6_W1_8,2	0,44882	0,48548	0,44641	0,48566	0,44762	0,48557	19,27
FS_L_1,8_b6	0_nb_W1_7,33_30	0,54697	0,46317	0,53664	0,46512	0,54181	0,46415	20,32
	1,8_b6_W1_7,8	0,53017	0,46671	0,52464	0,46755	0,52741	0,46713	20,16
	1,8_b6_W1_8,0	0,51113	0,47029	0,49882	0,47071	0,50506	0,47050	19,74
	1,8_b6_W1_8,2	0,47092	0,47993	0,45425	0,48309	0,46259	0,48151	19,41
FS_L_2,7_b6	0_nb_W1_7,19_30	0,93874	0,41434	0,84964	0,42825	0,89419	0,4213	25,38
	2,7_b6_W1_7,8	0,82338	0,43306	0,78983	0,4368	0,80661	0,43493	24,95
	2,7_b6_W1_8,0	0,77775	0,43944	0,72283	0,44796	0,75029	0,44370	24,54
	2,7_b6_W1_8,2	0,69985	0,45153	0,682	0,45691	0,69093	0,45422	24,16
FS_L_5,0_b6	0_nb_7,28_30	0,72559	0,43766	0,71396	0,44122	0,71978	0,43944	22,98
	5,0_b6_7,8	0,68163	0,44604	0,67561	0,44688	0,67862	0,44646	22,65
	5,0_b6_8,0	0,66048	0,45036	0,63793	0,45479	0,64921	0,45258	22,53
	5,0_b6_8,2	0,58659	0,46048	0,59864	0,45819	0,59262	0,45934	21,50
FS_L_0_b8_24	0_nb_7,26_30	0,60205	0,45469	0,59576	0,45566	0,59891	0,45518	21,18
	0_b8_24_7,8	0,54814	0,46444	0,52762	0,47167	0,53788	0,46806	20,67
	0_b8_24_8,0	0,51767	0,47284	0,49755	0,47737	0,50761	0,47511	20,40
	0_b8_24_8,2	0,4706	0,48473	0,46432	0,48551	0,46746	0,48512	20,03
	0_b8_24_8,79	0,32757	0,53214	0,32319	0,53354	0,32538	0,53284	18,91
	0_b8_24_8,82	0,34997	0,5567	0,35694	0,55455	0,35346	0,55563	23,44

Tabelle 5-9 Approximationsparameter Abwärtsrampe nach Ostwald-de Waele

5.2.4.2. Herschel-Bulkley

Die Approximationsfunktion nach Herschel-Bulkley entspricht jener von Ostwald-de Waele erweitert um eine Fließgrenze τ_y , wodurch das reale Fluidverhalten von Faulschlämmen deutlich besser beschrieben werden kann; dies konnte auch anhand des höheren Bestimmtheitsmaßes der Approximation ($0,98 \leq R^2 \leq 1$) nachvollzogen werden.

Herschel-Bulkley - Aufwärtsrampe											
Versuchs- und Probenbezeichnung		Messung 1			Messung 2			Mittelwert			$\eta(500)$
		τ_y	K	n	τ_y	K	n	τ_y	K	n	in mPas
FS_L_0_b6	0_nb_W1_7,33_30	1,802	0,336	0,530	1,776	0,299	0,548	1,789	0,318	0,539	21,66
	0_b6_W1_7,8	1,828	0,275	0,558	1,752	0,254	0,572	1,790	0,264	0,565	21,31
	0_b6_W1_8,0	1,861	0,240	0,577	1,734	0,259	0,566	1,798	0,250	0,571	20,99
	0_b6_W1_8,2	1,599	0,258	0,564	1,592	0,245	0,570	1,595	0,252	0,567	20,25
FS_L_1,8_b6	0_nb_W1_7,33_30	1,802	0,336	0,530	1,776	0,299	0,548	1,789	0,318	0,539	21,66
	1,8_b6_W1_7,8	1,720	0,269	0,564	1,723	0,259	0,568	1,721	0,264	0,566	21,29
	1,8_b6_W1_8,0	1,695	0,251	0,573	1,653	0,264	0,562	1,674	0,257	0,568	20,85
	1,8_b6_W1_8,2	1,567	0,277	0,556	1,630	0,233	0,579	1,598	0,255	0,568	20,56
FS_L_2,7_b6	0_nb_W1_7,19_30	2,170	0,591	0,480	2,658	0,471	0,508	2,414	0,531	0,494	27,76
	2,7_b6_W1_7,8	2,000	0,582	0,482	1,946	0,670	0,456	1,973	0,626	0,469	27,04
	2,7_b6_W1_8,0	2,300	0,518	0,492	1,782	0,917	0,408	2,300	0,518	0,492	26,63
	2,7_b6_W1_8,2	1,817	0,531	0,491	2,996	0,292	0,571	1,817	0,531	0,491	26,13
FS_L_5,0_b6	0_nb_7,28_30	2,048	0,461	0,500	2,046	0,468	0,498	2,047	0,465	0,499	24,75
	5,0_b6_7,8	2,088	0,383	0,527	1,989	0,389	0,525	2,038	0,386	0,526	24,38
	5,0_b6_8,0	1,871	0,389	0,527	2,366	0,292	0,562	2,118	0,340	0,544	24,28
	5,0_b6_8,2	1,859	0,328	0,542	1,821	0,349	0,534	1,840	0,338	0,538	22,85
FS_L_0_b8_24	0_nb_7,26_30	1,929	0,310	0,548	1,988	0,287	0,558	1,958	0,299	0,553	22,51
	0_b8_24_7,8	1,925	0,282	0,556	2,399	0,218	0,588	2,162	0,250	0,572	21,85
	0_b8_24_8,0	1,784	0,263	0,568	2,651	0,148	0,643	1,784	0,263	0,568	21,59
	0_b8_24_8,2	1,693	0,261	0,567	1,704	0,231	0,584	1,699	0,246	0,575	20,99
	0_b8_24_8,79	1,488	0,141	0,657	1,322	0,157	0,640	1,405	0,149	0,648	19,54
	0_b8_24_8,82	1,358	0,184	0,651	1,430	0,177	0,656	1,394	0,180	0,653	23,69

Tabelle 5-10 Approximationsparameter Aufwärtsrampe nach Herschel-Bulkley

Herschel-Bulkley - Abwärtsrampe											
Versuchs- und Probenbezeichnung		Messung 1			Messung 2			Mittelwert			$\eta(500)$
		τ_y	K	n	τ_y	K	n	τ_y	K	n	in mPas
FS_L_0_b6	0_nb_W1_7,33_30	2,069	0,084	0,734	2,079	0,078	0,743	2,074	0,081	0,738	20,06
	0_b6_W1_7,8	1,728	0,117	0,683	1,748	0,113	0,687	1,738	0,115	0,685	19,68
	0_b6_W1_8,0	1,673	0,114	0,686	1,859	0,089	0,721	1,766	0,101	0,704	19,60
	0_b6_W1_8,2	1,583	0,100	0,709	1,571	0,100	0,701	1,577	0,100	0,705	19,15
FS_L_1,8_b6	0_nb_W1_7,33_30	2,069	0,084	0,734	2,079	0,078	0,743	2,074	0,081	0,738	20,06
	1,8_b6_W1_7,8	1,728	0,118	0,682	1,744	0,113	0,688	1,736	0,116	0,685	19,78
	1,8_b6_W1_8,0	1,705	0,112	0,688	1,757	0,097	0,706	1,731	0,105	0,697	19,39
	1,8_b6_W1_8,2	1,671	0,099	0,705	1,584	0,102	0,699	1,628	0,100	0,702	18,97
FS_L_2,7_b6	0_nb_W1_7,19_30	2,300	0,241	0,605	2,726	0,136	0,689	2,513	0,189	0,647	26,00
	2,7_b6_W1_7,8	2,252	0,197	0,635	2,580	0,133	0,691	2,416	0,165	0,663	25,14
	2,7_b6_W1_8,0	2,537	0,135	0,689	2,436	0,126	0,695	2,487	0,131	0,692	24,23
	2,7_b6_W1_8,2	2,434	0,118	0,707	2,280	0,134	0,689	2,357	0,126	0,698	23,99
FS_L_5,0_b6	0_nb_7,28_30	2,435	0,114	0,701	2,433	0,113	0,705	2,434	0,113	0,703	22,81
	5,0_b6_7,8	2,353	0,110	0,707	2,318	0,112	0,704	2,336	0,111	0,706	22,46
	5,0_b6_8,0	2,292	0,110	0,707	2,277	0,104	0,715	2,284	0,107	0,711	22,32
	5,0_b6_8,2	1,856	0,132	0,674	1,849	0,139	0,667	1,852	0,135	0,671	21,15
FS_L_0_b8_24	0_nb_7,26_30	2,196	0,092	0,725	2,162	0,093	0,722	2,179	0,093	0,723	20,95
	0_b8_24_7,8	1,801	0,117	0,685	1,724	0,122	0,681	1,762	0,120	0,683	20,27
	0_b8_24_8,0	1,664	0,125	0,676	1,675	0,114	0,689	1,670	0,120	0,683	19,98
	0_b8_24_8,2	1,614	0,111	0,693	1,608	0,108	0,696	1,611	0,109	0,694	19,57
	0_b8_24_8,79	1,310	0,085	0,728	1,312	0,083	0,732	1,311	0,084	0,730	18,30
	0_b8_24_8,82	1,276	0,124	0,708	1,294	0,126	0,706	1,285	0,125	0,707	22,76

Tabelle 5-11 Approximationsparameter Abwärtsrampe nach Herschel-Bulkley

5.2.5. Interpretation der Messdaten

Es konnte ein deutliches Absinken der Fließkurven aller Versuche bei steigendem pH -Wert des Schlammes festgestellt werden. Aus der Korrelation der Entwässerbarkeit bei steigendem pH -Wert und der nun nachgewiesenen sinkenden Viskosität des Schlammes bei höheren pH -Werten, kann die Entwässerbarkeit des Schlammes mit abnehmender Viskosität in Zusammenhang gebracht werden.

Es wurde der Mittelwert der Viskositätsabnahme zwischen den einzelnen Proben - also meistens in einem Abstand von 0,2 pH -Einheiten - bei einer Scherrate von $\dot{\gamma} = 500 \frac{1}{s}$ abhängig vom Approximationsmodell errechnet. Für die Approximation nach Ostwald-de Waele ergibt sich eine mittlere Abnahme von $0,47 \text{ mPa} \cdot \text{s}$; für das Modell nach Herschel-Bulkley beträgt sie $0,54 \text{ mPa} \cdot \text{s}$. Da das Modell nach Ostwald aufgrund der fehlenden Fließgrenze die Schubspannungen bei hohen Scherraten unterschätzt, ist davon auszugehen, dass die mittlere Abnahme eher durch die Approximation durch Herschel-Bulkley zutreffend angenähert werden kann.

Die Viskositätsabnahme scheint von der Menge an eingesetztem Fällmittel unbeeinflusst zu sein - dies kann anhand der Messungen für reine Belüftung (0_b6) und jener mit $0,6 \frac{g}{l}$ Magnesiumchloridhexahydrat (1,8_b6) nachvollzogen werden. Beide Versuche wurden am selben

Tag mit der gleichen Schlammprobe durchgeführt. Es zeigen sich weder in den Fließkurven noch in den durch die beiden Approximationsfunktionen ermittelten Viskositäten signifikante Abweichungen.

Die wichtigste Aussage der rheologischen Messungen beinhalten jedoch die Fließkurven des 24h-Versuchs. Wie auch bei den anderen Versuchen sanken die Fließkurven bis zu einer Belüftungsdauer von etwa 6 Stunden zum Teil deutlich ab; nach 24 Stunden Belüftung konnte jedoch eine gänzlich andere Fließkurve aufgenommen werden. Die Fließgrenze war signifikant niedriger, während bei hohen Scherraten die Schubspannung - und damit die Viskosität - größer wurde als selbst die der unbelüfteten Referenzprobe. Dieses gänzlich veränderte Fluidverhalten erklärt einerseits die schlechte Entwässerbarkeit und kann andererseits als weiterer Beleg der erneuten biologischen Aktivität des Schlammes angeführt werden.

6. Rücklöseverhalten von Magnesiumammoniumphosphat

Da es im Betrieb zwischen der Belüftung des Schlammes und der Entwässerung desselben zu längeren Stehzeiten - insbesondere in Rohrleitungen - kommen kann, wurde der Einfluss dieser Lagerung auf den belüfteten Schlamm in Rücklöseversuchen untersucht. Als maximale Verweilzeit wurde ein Tag - 24 Stunden - angenommen.

Die Aufarbeitung der in Probeflaschen im Wasserbad gelagerten Proben erfolgte mit zwei Ausnahmen innerhalb von 23-25 Stunden. Bei den zuvor genannten Ausnahmen handelt es sich um die Versuche 0_b4 und 1,8_b4 - diese wurden über 60 Stunden temperiert; die entsprechenden Daten wurden grün markiert. Auf die Mittelwertbildung der über 24 Stunden belüfteten Proben wurde erneut verzichtet.

Die ermittelten Approximationsgeraden für die Phosphatphosphorkonzentration (Abbildung 4-3, Seite 21), den Zentrifugenrückstand (Abbildung 5-1, Seite 31) und die Trockensubstanzgehalt des Rückstandes (Abbildung 5-2, Seite 32) wurden zur Vorausberechnung der Parameter anhand des gemessenen pH -Werts herangezogen.

6.1. Konzentration der Ionen nach Fällung und anschließender Lagerung

In manchen Fällen wurde ein weiteres Absinken der Konzentrationen an Ammoniumstickstoff, Magnesium oder Calcium im Rücklöseversuch festgestellt; solche Messergebnisse wurden rot markiert und nicht zur Beurteilung des Rücklöseverhaltens herangezogen. Aufgrund der starken Schwankungen der Messdaten wurde auf eine Mittelwertbildung für $NH_4 - N$, Mg und Ca verzichtet. Da durch 24-stündige Lagerung der unbelüfteten Proben im Mittel keine Veränderung der Konzentration der relevanten Ionen festgestellt werden konnte, wurden die Leerproben zur Bewertung des Rücklöseverhaltens nicht herangezogen.

6.1.1. Rücklösung bei Belüftung ohne Fällmittel

PO ₄ -P in mg/l					
Versuchsbezeichnung	FS_L_0_b4	FS_L_0_b6	FS_L_0_b6_W1	FS_L_0_b8	Mittelwert
7,15	255	254,4	252,3	254,4	254,6
8,20	194,0	182,4	220,2	181,2	185,9
24h - pH	7,80	7,95	7,93	7,82	7,86
24h - PO ₄ -P	243	232,8	239,1	234,3	236,7
Δ in mg/l	49,0	50,4	18,9	53,1	50,8
Δ %	80,33	70,00	58,88	72,54	74,3
Approximation	232,0	214,9	217,2	229,7	225,5

Tabelle 6-1 Rücklösung PO₄-P; Belüftung ohne Fällmittel

NH ₄ -N in mg/l				
Versuchsbezeichnung	FS_L_0_b4	FS_L_0_b6	FS_L_0_b6_W1	FS_L_0_b8
7,15	1303,60	1335,00	1407,90	1374,00
8,20	1247,20	1313,10	1459,50	1287,60
24h - pH	7,80	7,95	7,93	7,82
24h - NH ₄ -N	1308	1287,6	1464,6	1333,8
Δ in mg/l	60,8	-25,5	5,1	46,2
Δ %	107,80	-116,44	-9,88	53,47

Tabelle 6-2 Rücklösung NH₄-N; Belüftung ohne Fällmittel

Mg in mg/l				
Versuchsbezeichnung	FS_L_0_b4	FS_L_0_b6	FS_L_0_b6_W1	FS_L_0_b8
7,15	17,00	11,50	7,60	10,30
8,20	5,00	1,40	1,40	1,70
24h - pH	7,80	7,95	7,93	7,82
24h - Mg	17,8	2,5	0,5	5,3
Δ in mg/l	12,8	1,1	-0,9	3,6
Δ %	106,67	10,89	-14,52	41,86

Tabelle 6-3 Rücklösung Mg; Belüftung ohne Fällmittel

Ca in mg/l				
Versuchsbezeichnung	FS_L_0_b4	FS_L_0_b6	FS_L_0_b6_W1	FS_L_0_b8
7,15	51,50	52,10	24,80	43,80
8,20	17,00	14,10	5,00	25,50
24h - pH	7,80	7,95	7,93	7,82
24h - Ca	30,7	21,8	6,4	21,6
Δ in mg/l	13,7	7,7	1,4	-3,9
Δ %	39,71	20,26	7,07	-21,31

Tabelle 6-4 Rücklösung Ca; Belüftung ohne Fällmittel

6.1.2. Rücklösung $0,6 \frac{g}{l} MgCl_2 \cdot 6H_2O$

PO ₄ -P in mg/l					
Versuchsbezeichnung	FS_L_1,8_b4	FS_L_1,8_b6	FS_L_1,8_b6_W1	FS_L_1,8_b8	Mittelwert
7,15	255,0	254,4	252,3	254,4	254,6
8,20	110,0	98,7	121,5	98,1	102,3
24h - pH	7,76	7,95	7,94	7,77	7,83
24h - PO ₄ -P	164,8	151,2	142,2	147,6	154,5
Δ in mg/l	54,8	52,5	20,7	49,5	52,3
Δ %	37,79	33,72	15,83	31,67	34,4
Approximation	145,7	126,8	127,8	144,7	139,07

Tabelle 6-5 Rücklösung PO₄-P; $0,6 \frac{g}{l} MgCl_2 \cdot 6H_2O$

NH ₄ -N in mg/l				
Versuchsbezeichnung	FS_L_1,8_b4	FS_L_1,8_b6	FS_L_1,8_b6_W1	FS_L_1,8_b8
7,15	1303,60	1335,00	1407,90	1374,00
8,20	1253,20	1242,60	1383,90	1250,10
24h - pH	7,76	7,95	7,94	7,77
24h - NH ₄ -N	1298	1290	1394,1	1290
Δ in mg/l	44,8	47,4	10,2	39,9
Δ %	88,89	51,30	42,50	32,20

Tabelle 6-6 Rücklösung NH₄-N; $0,6 \frac{g}{l} MgCl_2 \cdot 6H_2O$

Mg in mg/l				
Versuchsbezeichnung	FS_L_1,8_b4	FS_L_1,8_b6	FS_L_1,8_b6_W1	FS_L_1,8_b8
7,15	17,00	11,50	7,60	10,30
8,20	5,00	0,60	0,50	3,20
24h - pH	7,76	7,95	7,94	7,77
24h - Mg	1	4,5	0,5	4,4
Δ in mg/l	-4,0	3,9	0,0	1,2
Δ %	-33,33	35,78	0,00	16,90

Tabelle 6-7 Rücklösung Mg; $0,6 \frac{g}{l} MgCl_2 \cdot 6H_2O$

Ca in mg/l				
Versuchsbezeichnung	FS_L_1,8_b4	FS_L_1,8_b6	FS_L_1,8_b6_W1	FS_L_1,8_b8
7,15	51,50	52,10	24,80	43,80
8,20	18,30	1,10	8,60	12,60
24h - pH	7,76	7,95	7,94	7,77
24h - Ca	34,2	14,1	2,2	19,7
Δ in mg/l	15,9	13,0	-6,4	7,1
Δ %	47,89	25,49	-39,51	22,76

Tabelle 6-8 Rücklösung Ca; $0,6 \frac{g}{l} MgCl_2 \cdot 6H_2O$

6.1.3. Rücklösung $0,9 \frac{g}{l} MgCl_2 \cdot 6H_2O$

PO ₄ -P in mg/l						
Versuchsbezeichnung	FS_L_2,7_b4	FS_L_2,7_b4_W1	FS_L_2,7_b6	FS_L_2,7_b6_W1	FS_L_2,7_b8	Mittelwert
7,17	258,0	257,1	258,0	241,8	245,7	248,2
8,20	65,7	76,2	77,1	68,7	73,8	72,9
24h - pH	8,10	7,94	8,07	8,07	7,98	8,00
24h - PO ₄ -P	103,2	113,4	108	103,5	111,6	109,5
Δ in mg/l	37,5	37,2	30,9	34,8	37,8	36,6
Δ %	19,50	20,56	17,08	20,10	21,99	20,9
Approximation	82,6	96,8	85,2	85,2	93,3	91,8

Tabelle 6-9 Rücklösung PO₄-P; $0,9 \frac{g}{l} MgCl_2 \cdot 6H_2O$

NH ₄ -N in mg/l					
Versuchsbezeichnung	FS_L_2,7_b4	FS_L_2,7_b4_W1	FS_L_2,7_b6	FS_L_2,7_b6_W1	FS_L_2,7_b8
7,17	1381,1	1419,30	1381,80	1381,20	1336,80
8,20	1237,8	1371,30	1290,30	1286,20	1335,90
24h - pH	8,10	7,94	8,07	8,07	7,98
24h - NH ₄ -N	1278,9	1374,9	1342,5	1290,6	1333,8
Δ in mg/l	41,1	3,6	52,2	4,4	-2,1
Δ %	28,68	7,50	57,05	4,63	-233,33

Tabelle 6-10 Rücklösung NH₄-N; $0,9 \frac{g}{l} MgCl_2 \cdot 6H_2O$

Mg in mg/l					
Versuchsbezeichnung	FS_L_2,7_b4	FS_L_2,7_b4_W1	FS_L_2,7_b6	FS_L_2,7_b6_W1	FS_L_2,7_b8
7,17	11,0	8,40	11,00	3,50	10,10
8,20	3,4	0,60	1,10	0,50	4,30
24h - pH	8,10	7,94	8,07	8,07	7,98
24h - Mg	2,9	0,6	1,5	0,1	2,3
Δ in mg/l	-0,5	0,0	0,4	-0,4	-2,0
Δ %	-6,58	0,00	4,04	-13,33	-34,48

Tabelle 6-11 Rücklösung Mg; $0,9 \frac{g}{l} MgCl_2 \cdot 6H_2O$

Ca in mg/l					
Versuchsbezeichnung	FS_L_2,7_b4	FS_L_2,7_b4_W1	FS_L_2,7_b6	FS_L_2,7_b6_W1	FS_L_2,7_b8
7,17	45,9	38,80	45,90	33,70	45,30
8,20	13,5	2,10	14,40	15,50	11,30
24h - pH	8,10	7,94	8,07	8,07	7,98
24h - Ca	28,3	13,8	25,9	9,7	22,2
Δ in mg/l	14,8	11,7	11,5	-5,8	10,9
Δ %	45,68	31,88	36,51	-31,87	32,06

Tabelle 6-12 Rücklösung Ca; $0,9 \frac{g}{l} MgCl_2 \cdot 6H_2O$

6.1.4. Rücklösung 1, 67 $\frac{g}{l}$ $MgCl_2 \cdot 6H_2O$

PO ₄ -P in mg/l				
Versuchsbezeichnung	FS_L_5,0_b4	FS_L_5,0_b6	FS_L_5,0_b8	Mittelwert
7,19	257,1	252,9	257,1	255,7
8,20	12,9	21,6	18,9	17,8
24h - pH	7,95	8,00	7,94	7,96
24h - PO ₄ -P	34,65	39,05	45,55	39,8
Δ in mg/l	21,8	17,5	26,7	22,0
Δ %	8,91	7,56	11,19	9,2
Approximation	32,2	29,3	32,8	31,4

Tabelle 6-13 Rücklösung PO₄-P; 1, 67 $\frac{g}{l}$ $MgCl_2 \cdot 6H_2O$

NH ₄ -N in mg/l			
Versuchsbezeichnung	FS_L_5,0_b4	FS_L_5,0_b6	FS_L_5,0_b8
7,19	1419,3	1453,8	1419,3
8,20	1315,2	1356,9	1372,8
24h - pH	7,95	8,00	7,94
24h - NH ₄ -N	1317,9	1374,9	1323,3
Δ in mg/l	2,7	18,0	-49,5
Δ %	2,59	18,58	-106,45

Tabelle 6-14 Rücklösung NH₄-N; 1, 67 $\frac{g}{l}$ $MgCl_2 \cdot 6H_2O$

Mg in mg/l			
Versuchsbezeichnung	FS_L_5,0_b4	FS_L_5,0_b6	FS_L_5,0_b8
7,19	8,4	4,8	8,4
8,20	1,5	1,5	3,0
24h - pH	7,95	8,00	7,94
24h - Mg	4,7	1,4	2,3
Δ in mg/l	3,2	-0,1	-0,7
Δ %	46,38	-3,03	-12,96

Tabelle 6-15 Rücklösung Mg; 1, 67 $\frac{g}{l}$ $MgCl_2 \cdot 6H_2O$

Ca in mg/l			
Versuchsbezeichnung	FS_L_5,0_b4	FS_L_5,0_b6	FS_L_5,0_b8
7,19	38,8	29,2	38,8
8,20	3,0	3,6	6,8
24h - pH	7,95	8,00	7,94
24h - Ca	17,2	8,6	3,9
Δ in mg/l	14,2	5,0	-2,9
Δ %	39,66	19,53	-9,06

Tabelle 6-16 Rücklösung Ca; 1, 67 $\frac{g}{l}$ $MgCl_2 \cdot 6H_2O$

6.1.5. Rücklösung bei Belüftung ohne Fällmittel, 24 Stunden

PO ₄ -P in mg/l		
Versuchs- bezeichnung	FS_L_0_b4_24	FS_L_0_b8_24
7,22	245,7	243,9
8,77	138,9	155,4
24h - pH	8,44	8,56
24h - PO ₄ -P	170,7	187,8
Δ in mg/l	31,8	32,4
Δ %	29,78	36,61
Approximation	159,2	145,5

Tabelle 6-17 Rücklösung PO₄-P; Belüftung ohne Fällmittel, 24h

NH ₄ -N in mg/l		
Versuchs- bezeichnung	FS_L_0_b4_24	FS_L_0_b8_24
7,22	1336,8	1465,5
8,77	1035,9	540,6
24h - pH	8,44	8,56
24h - NH ₄ -N	1129,2	568,2
Δ in mg/l	93,3	27,6
Δ %	31,01	2,98

Tabelle 6-18 Rücklösung NH₄-N; Belüftung ohne Fällmittel, 24h

Mg in mg/l		
Versuchs- bezeichnung	FS_L_0_b4_24	FS_L_0_b8_24
7,22	10,1	0,6
8,77	1,7	0,7
24h - pH	8,44	8,56
24h - Mg	0,4	0
Δ in mg/l	-1,3	-0,7
Δ %	-15,48	700,00

Tabelle 6-19 Rücklösung Mg, Belüftung ohne Fällmittel, 24h

Ca in mg/l		
Versuchs- bezeichnung	FS_L_0_b4_24	FS_L_0_b8_24
7,22	45,3	4,2
8,77	7,2	1,5
24h - pH	8,44	8,56
24h - Ca	8,9	1,5
Δ in mg/l	1,7	0,0
Δ %	4,46	0,00

Tabelle 6-20 Rücklösung Ca; Belüftung ohne Fällmittel, 24h

6.2. Entwässerbarkeit und Trockensubstanzgehalt nach Fällung und anschließender Lagerung

Masseanteil Rückstand in % _m					
Versuchsbezeichnung	FS_L_0_b4	FS_L_0_b6	FS_L_0_b6_W1	FS_L_0_b8	Mittelwert
7,15	34,9	32,6	30,4	31,4	33,0
8,20	31,72	29,10	28,46	29,13	29,98
24h - pH	7,80	7,95	7,93	7,82	7,86
24h - Rückstand	33,84	31,08	29,53	31,18	32,0
Δ %	2,12	1,98	1,07	2,05	2,1
Approximation	30,3	29,9	29,9	30,2	30,13
Trockensubstanzgehalt im Rückstand in g/kg					
Versuchsbezeichnung	FS_L_0_b4	FS_L_0_b6	FS_L_0_b6_W1	FS_L_0_b8	Mittelwert
7,15	95,2	96,3	96,9	99,7	97,1
8,20	100,86	105,69	104,23	104,08	103,54
24h - pH	7,80	7,95	7,93	7,82	7,86
24h - TS	97,66	-	102,32	98,16	97,9
Δ in g/kg	3,20	-	1,91	5,92	4,6
Δ %	56,04	-	25,99	135,16	95,6
Approximation	101,1	102,1	101,9	101,2	101,46

Tabelle 6-21 Rücklösung Masseanteil Rückstand, Trockensubstanzgehalt, Belüftung ohne Fällmittel

Masseanteil Rückstand in % _m					
Versuchsbezeichnung	FS_L_1,8_b4	FS_L_1,8_b6	FS_L_1,8_b6_W1	FS_L_1,8_b8	Mittelwert
7,15	34,9	31,6	30,4	31,4	32,6
8,20	29,20	29,21	28,17	28,89	29,10
24h - pH	7,76	7,95	7,94	7,77	7,83
24h - Rückstand	31,35	30,52	29,5	30,61	30,8
Δ %	2,15	1,31	1,33	1,72	1,7
Approximation	30,4	29,9	29,9	30,4	30,21
Trockensubstanzgehalt im Rückstand in g/kg					
Versuchsbezeichnung	FS_L_1,8_b4	FS_L_1,8_b6	FS_L_1,8_b6_W1	FS_L_1,8_b8	Mittelwert
7,15	95,2	96,3	96,9	99,7	97,1
8,20	105,97	108,30	109,48	106,20	106,82
24h - pH	7,76	7,95	7,94	7,77	7,83
24h - TS	100,46	-	104,26	100,05	100,3
Δ in g/kg	5,51	-	5,22	6,15	5,8
Δ %	50,92	-	41,43	94,62	72,8
Approximation	103,4	104,7	104,6	103,4	103,84

Tabelle 6-22 Rücklösung Masseanteil Rückstand, Trockensubstanzgehalt, 0,6 $\frac{g}{l}$ $MgCl_2 \cdot 6H_2O$

Masseanteil Rückstand in % _m						
Versuchsbezeichnung	FS_L_2,7_b4	FS_L_2,7_b4_W 1	FS_L_2,7_b6	FS_L_2,7_b6_W 1	FS_L_2,7_b8	Mittelwert
7,17	24,1	30,7	24,1	33,2	33,6	32,5
8,20	22,30	27,92	21,82	30,49	31,01	29,81
24h - pH	8,10	7,94	8,07	8,07	7,98	8,00
24h - Rückstand	23,44	28,74	22,75	32,48	-	30,6
Δ %	1,14	0,82	0,93	1,99	-	1,4
Approximation	29,5	29,9	29,5	29,5	29,8	29,75
Trockensubstanzgehalt im Rückstand in g/kg						
Versuchsbezeichnung	FS_L_2,7_b4	FS_L_2,7_b4_W 1	FS_L_2,7_b6	FS_L_2,7_b6_W 1	FS_L_2,7_b8	Mittelwert
7,17	96,9	97,0	96,9	99,7	95,8	97,5
8,20	107,50	108,85	104,70	108,09	105,11	107,35
24h - pH	8,10	7,94	8,07	8,07	7,98	8,00
24h - TS	99,74	103,9	102,31	99,71	103,78	102,5
Δ in g/kg	7,76	4,95	2,39	8,38	1,33	4,9
Δ %	73,21	41,77	30,64	99,88	14,30	52,0
Approximation	106,7	105,3	106,5	106,5	105,6	105,80

Tabelle 6-23 Rücklösung Masseanteil Rückstand, Trockensubstanzgehalt, $0,9 \frac{g}{l} MgCl_2 \cdot 6H_2O$

Masseanteil Rückstand in % _m				
Versuchsbezeichnung	FS_L_5,0_b4	FS_L_5,0_b6	FS_L_5,0_b8	Mittelwert
7,19	30,7	31,9	30,7	31,1
8,20	27,17	29,41	27,32	27,97
24h - pH	7,95	8,00	7,94	7,96
24h - Rückstand	28,72	30,21	28,9	29,3
Δ %	1,55	0,80	1,58	1,3
Approximation	29,9	29,7	29,9	29,84
Trockensubstanzgehalt im Rückstand in g/kg				
Versuchsbezeichnung	FS_L_5,0_b4	FS_L_5,0_b6	FS_L_5,0_b8	Mittelwert
7,19	97,0	99,2	97,0	97,7
8,20	109,35	112,59	111,32	111,09
24h - pH	7,80	7,95	7,82	7,86
24h - TS	108,33	107,28	105,82	107,1
Δ in g/kg	1,02	5,31	5,50	3,9
Δ %	8,26	39,78	38,41	28,8
Approximation	107,0	108,5	107,2	107,57

Tabelle 6-24 Rücklösung Masseanteil Rückstand, Trockensubstanzgehalt, $1,67 \frac{g}{l} MgCl_2 \cdot 6H_2O$

Masseanteil Rückstand in % _m		
Versuchsbezeichnung	FS_L_0_b4_24	FS_L_0_b8_24
7,22	33,6	30,4
8,77	30,4	29,4
24h - pH	8,44	8,56
24h - Rückstand	32,1	30,8
Δ %	1,6	1,4
Approximation	28,5	28,2
Trockensubstanzgehalt im Rückstand in g/kg		
Versuchsbezeichnung	FS_L_0_b4_24	FS_L_0_b8_24
7,22	95,8	98,1
8,77	105,3	102,2
24h - pH	8,44	8,56
24h - TS	101,1	95,9
Δ in g/kg	4,2	6,2
Δ %	44,3	153,7
Approximation	105,2	106,0

Tabelle 6-25 Rücklösung Masseanteil Rückstand, Trockensubstanzgehalt, Belüftung ohne Fällmittel, 24h

6.3. Interpretation des Rücklöseverhaltens

Auch für die Untersuchung des Rücklöseverhaltens erwies sich die Phosphatphosphorkonzentration als aussagekräftigster und bei weitem stabilster Parameter. Eine Bilanzierung - wie für die Fällungsreaktion in Tabelle 4-19 durchgeführt - wurde verworfen, da die Konzentrationen an $NH_4 - N$, Mg und Ca zu großen Schwankungen unterworfen waren; in manchen Fällen wurde eine weitere Abnahme der Konzentrationen im Rücklöseversuch gemessen.

Mittelwerte PO_4 -P nach Lagerung				
	0 g/l	0,6 g/l	0,9 g/l	1,67 g/l
7,17	254,6	254,6	248,2	255,7
8,20	185,9	102,3	72,9	17,8
24h - pH	7,86	7,83	8,00	7,96
24h - PO_4 -P	236,7	154,5	109,5	39,8
Δ in mg/l	50,8	52,3	36,6	22,0
Δ %	74,3	34,4	20,9	9,2
Approximation	225,5	139,1	91,8	31,4

Tabelle 6-26 Rücklösung PO_4 -P bei variabler Fällmittelmenge

Generell konnte ein Absinken der Masse an rückgelöstem Phosphat mit steigender Fällmittelmenge beobachtet werden. Dies zeigt, dass der Anstieg der Phosphatphosphorkonzentration während der Lagerung nur zu einem kleinen Teil auf die Rücklösung des schwerlöslichen Magnesiumammoniumphosphats zurückzuführen ist. Unter der Annahme, dass die Phosphatfällung mit Magnesium die höchste Affinität aufweist, kann bei äquimolarem Fällmitteleinsatz davon ausgegangen werden, dass das entfernte Phosphat tatsächlich im überwiegenden Anteil als MAP ausgefallen ist. Daher beruht in diesem Fall auch die Rücklösung ausschließlich auf

Magnesiumammoniumphosphat; in den anderen Versuchen setzt sich die Masse an rückgelöstem Phosphat aus dem konstanten Anteil aus rückgelöstem MAP und anderen, besser löslichen, zwischenzeitlich ausgefallenen Produkten zusammen. Als Beleg kann hier die molare Differenz zwischen entferntem Phosphatphosphor und den zweiwertigen Kationen in der Bilanzierung der Fällungsreaktion (Tabelle 4-19, Seite 22), welche auf Fällung mit Fe^{3+} zurückgeführt wurde, angeführt werden. Diese Differenz entspricht auch jener Stoffmenge an Phosphat, welche durch Rücklösung wieder in den Schlamm gelangte. Die rückgelöste Menge an Phosphatphosphor der über 24 Stunden belüfteten und anschließend gelagerten Proben war entsprechend dem höheren pH -Wert nach Lagerung (im Schnitt 8,5 statt 8,0) deutlich geringer als bei den anderen ausschließlich belüfteten Versuchen.

Nicht nur der Anteil an gefälltem Phosphat sondern auch die Entwässerbarkeit des Schlammes und der Trockensubstanzgehalt des Rückstandes sinken bei längeren Stehzeiten wieder deutlich ab. Die entsprechenden Daten sind in Tabelle 6-27 und Tabelle 6-28 dargestellt.

Mittelwerte Massenanteil Rückstand in %_m nach Lagerung					
	0 g/l	0,6 g/l	0,9 g/l	1,67 g/l	Mittelwert
7,17	33,0	32,6	32,5	31,1	32,3
8,20	30,0	29,1	29,8	28,0	29,2
24h - pH	7,86	7,83	8,00	7,96	7,9
24h	32,0	30,8	30,6	29,3	30,7
Δ %	2,1	1,7	1,4	1,3	1,6
Approximation	30,1	30,2	29,7	29,8	30,7

Tabelle 6-27 Mittelwerte Masseanteil Rückstand nach Lagerung

Mittelwerte TS in g/kg nach Lagerung				
	0 g/l	0,6 g/l	0,9 g/l	1,67 g/l
7,17	97,1	97,1	97,5	97,7
8,20	103,5	106,8	107,4	111,1
24h - pH	7,86	7,83	8,00	7,9
24h	97,9	100,3	102,5	107,1
Δ in g/kg	4,6	5,8	4,9	3,9
Δ %	95,6	72,8	52,0	28,8
Approximation	101,5	103,8	105,8	107,6

Tabelle 6-28 Mittelwerte Trockensubstanzgehalt Rückstand nach Lagerung

Von der ursprünglich durch Belüftung erzielten Verbesserung der Entwässerbarkeit von 3,5-4% bleiben nach einer Verweilzeit von 24 nur noch 2-2,5% bestehen; die Trockensubstanzgehalt des Rückstandes sinkt dementsprechend ab. Die Abnahme der Trockensubstanzgehalt des Rückstandes beträgt im Schnitt $4,8 \frac{g}{kg}$; die Unterschiede zwischen den einzelnen Fällmittelgruppen bleiben erhalten - so weist die Versuchsgruppe mit der höchsten Fällmittelmenge auch nach Lagerung den höchsten Trockensubstanzgehalt auf. Bei Belüftungszeiten über 6 Stunden und anschließender Lagerung ist der positive Einfluss der Belüftung auf die Entwässerbarkeit und Trockensubstanzgehalt nicht mehr feststellbar.

Der Rückgang der positiven Effekte der Faulschlammbelüftung wird durch die auf dem pH -Wert basierenden Approximationsgeraden in allen Bereichen deutlich unterschätzt; eine exakte

Vorausberechnung aufgrund des pH -Werts ist nicht möglich, eine annähernde Abschätzung kann jedoch durchaus erfolgen.

Bei über 24 Stunden hinausgehender Lagerung scheint es zu keiner weiteren signifikanten Verschlechterung der Eigenschaften des belüfteten Schlammes mehr zu kommen; als Beleg können hier die Daten der Versuche 0_b4 und 1,8_b4 genannt werden, welche trotz deutlich längerer Lagerzeit nicht erheblich von den anderen Messergebnissen ihrer Gruppe abweichen.

7. Erforderlicher Sauerstofftransfer der Schlammbelüftung

Die Erhöhung des pH -Werts und damit die Fällung von Magnesiumammoniumphosphat im Zuge der Schlammbelüftung basiert auf dem Austausch von im Faulschlamm gelöstem CO_2 gegen Sauerstoff; welcher grundsätzlich durch die volumenbezogene Sauerstofftransfertrate OTR beschrieben werden kann.

$$OTR = k_L a \cdot (c_S - c)$$

Der $k_L a$ -Wert berücksichtigt die anlagen- und mediumsspezifischen Parameter der Belüftung und wird Kapitel 7.1 auf Seite 54 hergeleitet und näher erläutert. Die Sättigungsdifferenz $c_S - c$ ist die zweite bestimmende Größe der volumenbezogene Sauerstofftransfertrate. Zur Charakterisierung eines Belüftungssystems wird die Sauerstofftransfertrate unter Standardbedingungen ($c = 0 \frac{mg O_2}{l}$, $T = 20^\circ C$) ermittelt; der so bestimmte Wert wird dann als $SOTR$ - Standard Oxygen Transfer Rate oder Sauerstoffzufuhr - bezeichnet. In Verbindung mit dem Sauerstofftrag SAE - Standard Aeration Efficiency - kann auch die Energieeffizienz eines Belüftungssystems angegeben werden. Es wurde bewusst auf die Normierung auf $20^\circ C$ verzichtet, da von einem Betrieb der Faulschlammbelüftung bei $30^\circ C$ ausgegangen wird.

Üblicherweise wird in mikrobiologischen Prozessen die volumenbezogene Sauerstofftransfertrate mit der Sauerstoffzehrung der Mikroorganismen gleichgesetzt und darüber bilanziert. Im Fall der Faulschlammbelüftung ist mikrobiologische Aktivität unerwünscht und die Kinetik der Reaktion unbekannt - es kann also nur aufgrund der willkürlich gewählten pH -Grenzen ein erforderlicher Sauerstofftransfer ermittelt werden.

7.1. Physikalische Grundlagen - Begasung von Flüssigkeiten

Das Begasen von Flüssigkeiten ist eine verfahrenstechnische Operation mit dem Ziel, einen möglichst guten Stoffübergang im System Gas-Flüssigkeit zu gewährleisten. Da der Stoffübergang sowohl der Phasengrenzfläche als auch dem Konzentrationsgradienten des zu absorbierenden Gases - welcher kaum beeinflusst werden kann - direkt proportional ist, wird eine möglichst feinblasige Dispergierung des Gases in der Flüssigphase durch mechanischen Energieeintrag zur Vergrößerung der Phasengrenzfläche angestrebt. Der limitierende Faktor des Stofftausches ist der flüssigkeitsseitige Stofftransportwiderstand, da das gelöste Gas die Grenzschicht nur durch Diffusion passieren kann.

Gemäß Zweifilmtheorie ist die Triebkraft des Stofftausches eine Störung des thermodynamischen Gleichgewichts; die herrschende Gleichgewichtsstörung kann durch das chemische Potential beschrieben werden - für Gase als Fugazität ausgedrückt. Unter der Annahme eines Idealgasgemisches sind die Fugazitäten dem Partialdruck gleich und die Stoffstromdichte $j_{m,i}$ durch die Phasengrenzfläche dem Partialdruckgefälle proportional.

$$j_{m,i} = k_p \cdot \Delta p_i$$

Als Bedingungen für die zuvor genannten Überlegungen werden die Ausbildung zweier laminarer, stationärer Strömungsgrenzschichten der Dicken δ_G und δ_L (dargestellt in Abbildung 7-1 auf Seite 55), welche für das Gas nur durch Diffusion passierbar sind und die augenblickliche Einstellung des thermodynamischen Gleichgewichts an der Phasengrenzfläche - also die Einstellung der Sättigungskonzentration $c^* = c_s$ - angeführt.

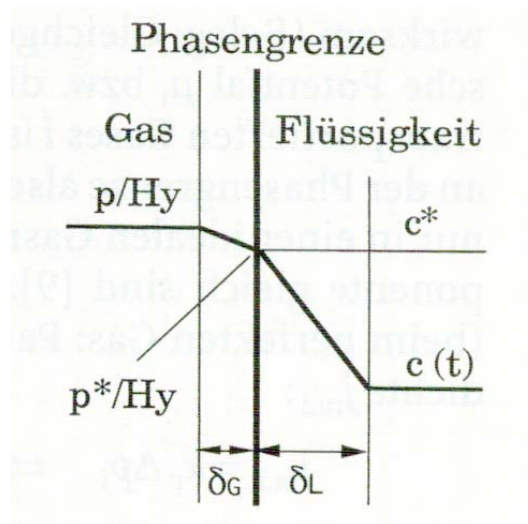


Abbildung 7-1 Stofftransport durch Phasengrenzfläche übernommen von [7]

Mithilfe des Henryschen Gesetzes kann der Partialdruck eines Gases p mit dessen Konzentration c in der flüssigen Phase in Beziehung gesetzt werden; Proportionalitätsfaktor ist die Henrysche Konstante H_y , welche von stofflichen Gegebenheiten und der Temperatur abhängig ist.

$$p = H_y \cdot c$$

Für den Stoffdurchgang durch die beiden Grenzschichten kann somit formuliert werden:

$$j_m = \frac{G}{A} = k_G \cdot (p - p^*) = k_L \cdot (c^* - c)$$

G ... Stoffstrom an Gas

A ... Phasengrenzfläche

k_G ... Stoffübergangskoeffizient des Gases

k_L ... Stoffübergangskoeffizient der Flüssigkeit

Die beiden Stoffübergangskoeffizienten k_i werden über die Grenzschichtdicken δ_i und die entsprechenden Diffusionskoeffizienten D_i definiert - $k_i = \frac{D_i}{\delta_i}$. Anhand des Henryschen Gesetzes kann c^* eliminiert werden; die Gleichung ergibt sich dann zu:

$$j_m = \frac{1}{\frac{1}{H_y \cdot k_G} + \frac{1}{k_L}} \cdot \left(\frac{p}{H_y} - c \right)$$

Da übliche Diffusionskoeffizienten von Gasen um den Faktor 10^4 - 10^5 größer sind als jene von Flüssigkeiten - $D_G \gg D_L$ - gilt selbiges auch für die Stoffübergangskoeffizienten $k_G \gg k_L$. Damit kann der gasseitige Stofftransportwiderstand $\frac{1}{k_G}$ gegenüber $\frac{1}{k_L}$ vernachlässigt und folgende Vereinfachung durchgeführt werden:

$$j_m = \frac{G}{A} = k_L \cdot (c^* - c)$$

Da sowohl die Phasengrenzfläche A als auch der flüssigkeitsseitige Stoffübergangskoeffizient k_L von stofflichen und prozessspezifischen Parametern abhängen und daher unbekannt sind, bildet das Produkt der beiden die zu bestimmende, charakteristische Größe eines Belüftungssystems.

$$k_L \cdot A = \frac{G}{\Delta c}$$

Für Volumenbegasung - wie sie in Rührkesseln oder Blasensäulen vorkommt, wird der Stoffstrom G auf eine Volumeneinheit der unbegasteten Flüssigkeit V bezogen. Damit ergibt sich:

$$\frac{G}{V \cdot \Delta c} = k_L \cdot \frac{A}{V} = k_L \cdot a$$

$a = \frac{A}{V}$... *volumenbezogene Phasengrenzfläche*

Weder der Stoffübergangskoeffizient der Flüssigkeit k_L noch die volumsbezogene Phasengrenzfläche a können getrennt voneinander bestimmt werden, sondern werden daher zu einer für das Belüftungssystem charakteristischen Größe, dem $k_L a$ -Wert zusammengefasst. Zur Berücksichtigung des Temperatureinflusses auf den $k_L a$ -Wert kann folgende Korrelation verwendet werden.

$$k_L a_{20^\circ C} = k_L a_v \cdot 1,024^{(20-v)}$$

Ein weiterer Einflussfaktor auf den $k_L a$ -Wert ist die Konzentration an Salzen in der Flüssigkeit, da Salze die Blasenkoaleszenz neigung verringern. Unter Blasenkoaleszenz wird die Vereinigung von primär gebildeten, feinen zu größeren, stabileren Gasblasen verstanden. Diese wird durch Salze unterdrückt, da die Differenz der Ionenkonzentration an der Phasengrenze zu elektrischen Potentialdifferenzen und abstoßenden Kräften führt.

7.2. Messung des $k_L a$ -Werts - Einführung

Die heute gebräuchlichste Methode der Bestimmung des $k_L a$ -Werts beruht auf dem zeitlichen Verlauf der Absorption bzw. der Desorption des in der Flüssigkeit gelösten Gases; der Verlauf der Gelöstsauerstoffkonzentration wird mit optischen O_2 -Sonden aufgezeichnet. Dieser folgt einer Differentialgleichung 1. Ordnung, wobei $k_L a$ die Zeitkonstante darstellt.

$$\frac{dc}{dt} = k_L \cdot a \cdot (c_S - c); \frac{dc}{c_S - c} = k_L \cdot a \cdot dt$$

Die Lösung der Differentialgleichung ergibt sich zu:

$$c = c_S - (c_S - c_0) \cdot e^{-k_L a \cdot t}$$

c_0 ... *Sauerstoffkonzentration zum Zeitpunkt $t = 0$*

Wird die Sättigungsdifferenz $c_s - c$ in ordinatenlogarithmischer Skalierung aufgetragen, so kann aus der entstehenden Geraden $k_L a$ als Steigung abgelesen werden.

Für die Absorptionsmessung muss künstlich eine Sauerstoffsinke erzeugt werden - etwa durch das Einblasen von Stickstoff oder durch Zugabe von Natriumsulfit Na_2SO_3 , welches mit einem Kobaltkatalysator zu Natriumsulfat Na_2SO_4 oxidiert - und anschließend der Verlauf der Sättigungskurve nach Einschalten der Belüftungsanlage aufgenommen. Die heute gebräuchlichere Desorptionsmessung beruht auf der Abnahme der Sauerstoffkonzentration im Wasser nach zuvor erfolgter Belüftung mit O_2 -angereicherter Luft. Die gemessenen Daten sind unter gleichen Bedingungen spiegelbildlich zur jeweils anderen Methode; einzig durch die Salzzugabe bei der Sulfitoxidation wird die Blasenkoaleszenzneigung wie zuvor beschrieben verändert, daher weist die Absorptionsmethode im Allgemeinen tendenziell etwas bessere Werte aus.

7.3. $k_L a$ -Messung der Versuchsanlage

Es wurde eine Absorptionsmessung des $k_L a$ -Werts der Versuchsanlage bei variabler Belüftungsintensität durchgeführt. Hierfür wurde der Versuchszylinder mit Reinwasser befüllt und im Wasserbad auf $30^\circ C \pm 0,3^\circ C$ thermostatisiert, um die Fehlerquelle der Temperaturkompensation zu vermeiden, da von einem Betrieb der Belüftungsanlage bei dieser Temperatur ausgegangen wird. Als Reinwasser wird in diesem Zusammenhang Wasser mit einem geringen Gehalt an Stoffen, welche den Sauerstoffeintrag beeinflussen, verstanden. Die Gelöstsauerstoffkonzentration wurde mit einer optischen O_2 -Sonde gemessen, die Daten der Sonde aufgezeichnet und anschließend ausgewertet. Um die Sauerstoffkonzentration auf nahe Null abzusenken wurde der Zylinder zwischenzeitlich mit Stickstoff begast und anschließend manuell auf Luftzufuhr umgestellt; die voreingestellte Belüftungsintensität wurde durch Auslitern kontrolliert.

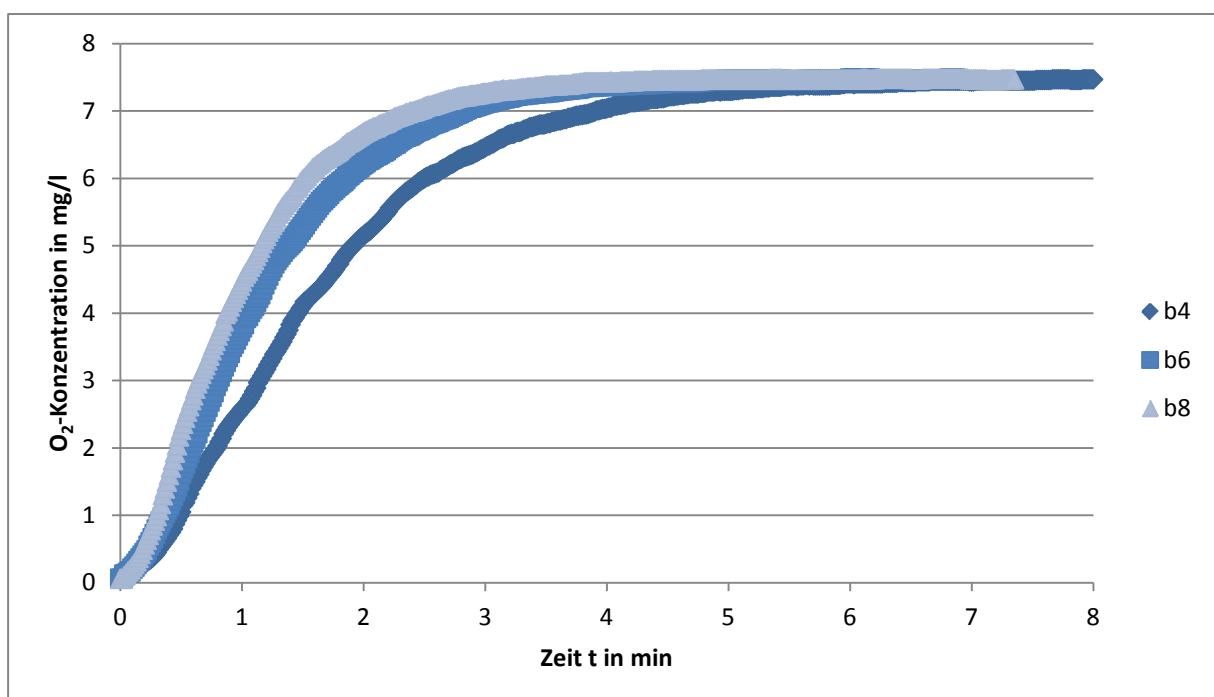


Abbildung 7-2 Verlauf der Gelöstsauerstoffkonzentration bei variabler Belüftungsintensität

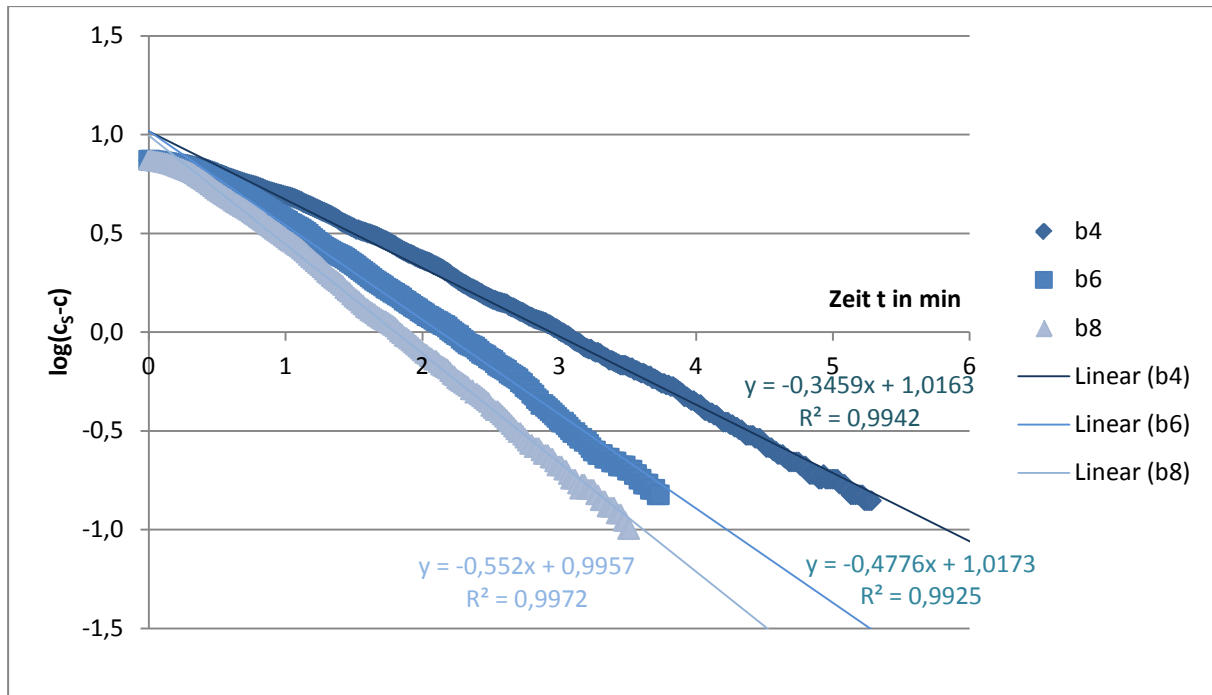


Abbildung 7-3 Ordinatenlogarithmische Darstellung der Sättigungsdifferenz bei variabler Belüftungsintensität

Anhand der Approximationsgeraden konnte t_{90} - die Zeit, bei der 90% der Sättigungskonzentration erreicht sind - und der $k_L a$ -Wert in Wasser als Steigung der verschiedenen Belüftungsintensitäten errechnet werden. Die Bedingung der Versuchslaufzeit $t_v > 1,5 \cdot t_{90}$ konnte bei allen Messungen eingehalten werden.

		b4	b6	b8
t₉₀	in min	2,89	2,09	1,81
k_La₃₀	in 1/h	47,80	65,99	76,28

Tabelle 7-1 $k_L a_{30}$ -Werte der unterschiedlichen Belüftungsintensitäten

7.4. Abschätzung des $k_L a$ -Werts für Schlammbelüftung

Um das Ausmaß der Änderung der Sauerstoffzufuhr der Belüftung zwischen Reinwasser und Betriebsmedium zu beschreiben, wird der Grenzflächenfaktor α herangezogen.

$$\alpha = \frac{k_L a_{20} \text{ im Betriebsmedium}}{k_L a_{20} \text{ im Reinwasser}}$$

Da im konkreten Fall die Temperaturabhängigkeit des $k_L a$ -Werts eine äußerst untergeordnete Rolle spielt, wurde in weiterer Folge die oben angeführte Beziehung analog für eine Temperatur von 30°C verwendet. In der Regel wird für Belüftungseinrichtungen in Belebungsanlagen zwischen Druck- und Oberflächenbelüftung unterschieden. Während für Oberflächenbelüftungssysteme α -Werte zwischen 0,9-0,95 im Allgemeinen zutreffend sind, ist für Druckbelüftungssysteme mit 0,6-0,7 zu rechnen.

Im Fall der Faulschlammbelüftung kann α wegen des hohen Trockensubstanzgehalts im Vergleich zu Überschussschlamm nicht einfach anhand des Belüftungssystems abgeschätzt werden. Detaillierte Untersuchungen zum Einfluss des Trockensubstanzgehaltes auf den Grenzflächenfaktor α wurden von GÜNDER 1999 durchgeführt.

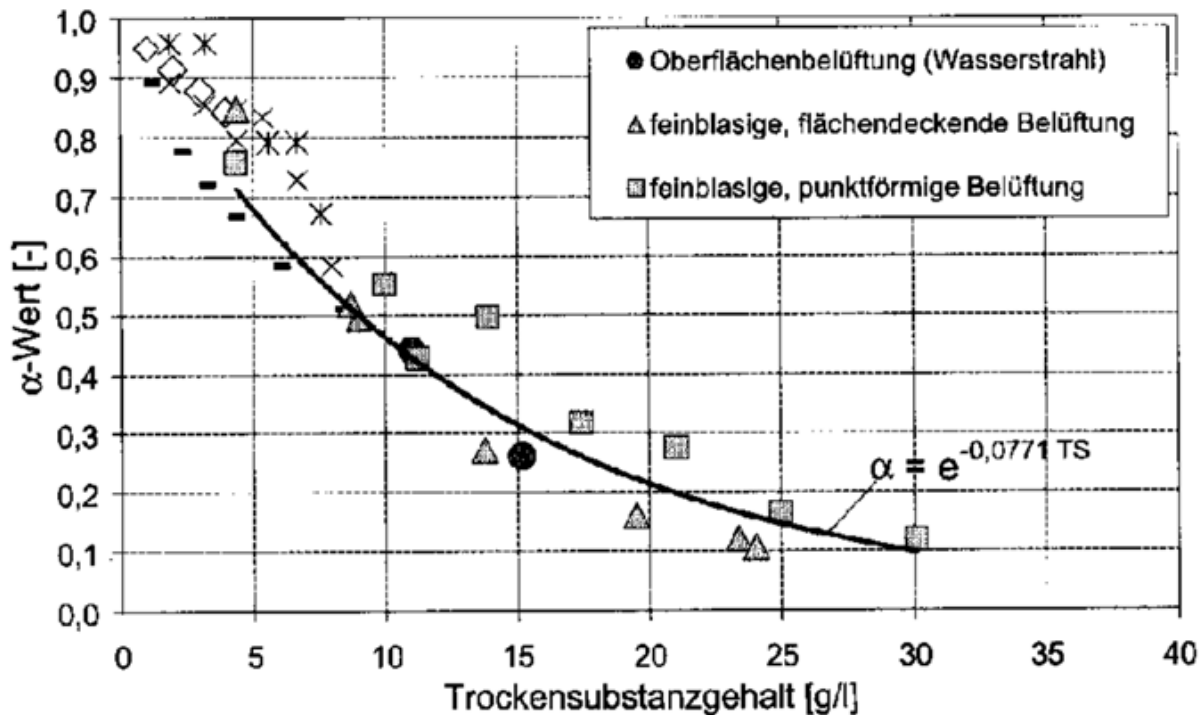


Abbildung 7-4 α -Wert für Schlämme mit hohen Trockensubstanzgehalten übernommen von [9]

Unabhängig von der Belüftungsart zeigt sich eine starke Abnahme des α -Werts bei hohen Trockensubstanzgehalten - für den errechneten Trockensubstanzgehalt des Faulschlammes von $31,4 \frac{g}{kg}$ (5.1.6, Seite 30) kann mit $\alpha = 0,1$ gerechnet werden. Die volumenbezogene Sauerstofftransferrate bei Betriebsmedium kann daher folgendermaßen bestimmt werden:

$$OTR_{FS} = k_L a_{FS} \cdot (c_S - c) = k_L a \cdot \alpha \cdot (c_S - c)$$

Da eine Aussage über die tatsächliche Sättigungsdifferenz in Faulschlamm nicht möglich war, wurde die maximale Sättigungsdifferenz in Reinwasser - $\Delta c = 7,48 \frac{mg}{l}$ - als Referenzgröße gewählt; eine Überschreitung dieses Werts bei Faulschlamm erscheint unwahrscheinlich.

		b4	b6	b8
$k_{La_{30FS}}$	in 1/h	4,78	6,60	7,63
OTR	in $g O_2/h \cdot m^3$	35,75	49,36	57,05

Tabelle 7-2 OTR der unterschiedlichen Belüftungsintensitäten

8. Schlussfolgerungen für den Einsatz in kommunalen Kläranlagen mit Schlammfäulung - Regionalkläranlage Linz

Die Fällung von Magnesiumammoniumphosphat aus Faulschlamm durch Belüftung ist technisch möglich; die erzielbare Endkonzentration an Phosphatphosphor hängt insbesondere von der Menge an Fällmittel, sowie vom pH -Wert des Schlammes und der Belüftungsdauer ab. Diese definiert schließlich den End pH -Wert. Die Belüftungsintensität hat keinerlei Einfluss auf die erzielbare Endkonzentration, sehr wohl aber auf die erforderliche Belüftungsdauer zum Erreichen des End pH -Werts. Durch die Belüftung steigt die Entwässerbarkeit des Schlammes deutlich an; 3,5-4%_m Wasser

können dem Schlamm noch zusätzlich entzogen werden. Diese korreliert auch mit einer Reduktion der dynamischen Viskosität des Schlammes. Bei über 6 Stunden hinausgehender, intensiver Belüftung ist im Schlamm erneute biologische Aktivität der autotrophen Bakterien (Nitrifikation) feststellbar; dies wäre ein unerwünschter Betriebszustand, der auch die erzielten Verbesserungen hinsichtlich Entwässerbarkeit - zumindest teilweise - wieder zunichtemacht. Aufenthaltszeiten zwischen Faulschlammbelüftung und anschließender mechanischer Entwässerung sind möglichst zu vermeiden, da es bei Lagerung sowohl zu einer Rücklösung von Phosphat als auch zu einer Verschlechterung der Entwässerbarkeit kommt. Ein brauchbarer Indikator ist der pH -Wert, der unter diesen Bedingungen wieder sinkt.

Aufgrund der oben genannten Tatsachen, dem Faulschlammanfall von etwa $1000 \frac{m^3}{Tag}$ und den vorhandenen Betriebsmitteln der Regionalkläranlage Linz können folgende Vorschläge zur Umsetzung einer Faulschlammbelüftung unterbreitet werden:

- Einbau von Belüftungseinrichtungen in die bestehenden Vorlagebehälter ($V = 300 m^3$) welche kontinuierlicher betrieben werden,
- Diskontinuierlicher, wechselweiser Betrieb zweier abgetrennter Kaskaden der bereits bestehenden Faulschlammbelüftung. Eine Teilbefüllung der Kaskaden bei kontinuierlicher Beschickung kommt aufgrund des eingebauten, nicht absenkbaaren Belüftungskreisels nicht in Frage.

Um den Einsatz einer Schlammbelüftung zu rechtfertigen, müssen die betriebswirtschaftlichen Vorteile zumindest die Kosten des Verfahrens decken. Als Vorteile können in dem Zusammenhang die geringeren Kosten für die Entsorgung aufgrund des erhöhten Trockensubstanzgehalts des Zentrifugenrückstands sowie die zu erwartende Reduktion der Wartungskosten der maschinellen Schlammmentwässerung aufgrund der Verhinderung von MAP-Ablagerungen gewertet werden. Während sich Erstere leicht monetär quantifizieren lassen, ist dies für die Wartungskosten nur schwer möglich. Die Kosten des Verfahrens können in Investitionskosten und Abschreibung der Anlage, sowie Kosten für Fällmittel, Erwärmung und Belüftung im laufenden Betrieb unterteilt werden. Da bereits die entsprechenden Betriebsmittel zur Faulschlammbelüftung vorhanden sind, werden im Folgenden nur die Kosten des laufenden Betriebs abgeschätzt und der Einsparung der Entsorgungskosten gegenübergestellt.

- Kostenersparnis Entsorgung

Es wird von Entsorgungskosten von $60 \frac{€}{t}$ entwässerten Schlammes ausgegangen. Die alleine durch Belüftung erzielbare Steigerung der Entwässerbarkeit ohne Berücksichtigung des Effekts der Erwärmung des Schlammes beträgt etwa 9,6%; direkt proportional zur zu entsorgenden Masse an Schlamm sinken auch die Entsorgungskosten. Von den ursprünglichen $1000 \frac{m^3}{Tag} \sim 1000 \frac{t}{Tag}$ Schlammanfall sind unbelüftet etwa $332 \frac{t}{Tag}$ Rückstand der maschinellen Schlammeindickung, welcher entsorgt werden muss. Die Differenz zwischen unbelüftetem und belüftetem Schlamm beträgt $31 \frac{t}{Tag}$ - äquivalent einer Kostenreduktion um $1856 \frac{€}{Tag}$. Sollte es zu einer Stehzeit des Schlammes zwischen Belüftung und Entwässerung des Schlammes kommen, so bleibt - wie unter 6.3 auf Seite 52

beschrieben - nur etwa nur die Hälfte der Verbesserung der Entwässerbarkeit bestehen - folglich halbiert sich auch die Kostenersparnis.

- Kosten für Magnesiumchloridhexahydrat

Bei stöchiometrischem Einsatz von Fällmittel $1,67 \frac{g}{l} = 1,67 \frac{kg}{m^3}$ und einem Preis von $280 \frac{€}{t}$ Magnesiumchloridhexahydrat ergeben sich mit dem angenommenen Schlammanfall die Fällmittelkosten zu $476 \frac{€}{Tag}$.

- Energiekosten der Belüftung

Anhand der abgeschätzten volumenbezogene Sauerstofftransferate in Abhängigkeit der Belüftungsintensität, einer Äquivalenz von $1kg O_2 \cong 1kWh$ und einem angenommenen Energiepreis von $0,09 \frac{€}{kWh}$ können die Kosten für die 6-stündige Belüftung eines Volumenstroms an Faulschlamm von $1000 \frac{m^3}{Tag}$ ermittelt werden. Die Ergebnisse sind zu Tabelle 8-1 zusammengefasst:

	b4	b6	b8
Energiebedarf in kWh/Tag	214,51	296,18	342,32
Kosten in €/Tag	19,31	26,66	30,81

Tabelle 8-1 Energiebedarf der unterschiedlichen Belüftungsintensitäten

- Energiekosten der Erwärmung des Faulschlamm

Da der Anaerobreaktor aufgrund der Biozönose stets auf über $30^\circ C$ temperiert wird und aufgrund der großen Menge an Faulschlamm von keiner signifikanten Abkühlung ausgegangen wird, wird mit einer maximalen Temperaturdifferenz von $\Delta\vartheta = 5^\circ C$ gerechnet. Unter Berücksichtigung der geringeren Wärmekapazität des organischen Anteils im Schlamm ergibt sich der erforderliche Wärmestrom zu:

$$\dot{Q} = \dot{m} \cdot \Delta\vartheta \cdot [c_{P_{H_2O}} \cdot (1 - x) + c_{P_{org}} \cdot x]$$

$$c_{P_{H_2O}} = 4184 \frac{kJ}{t \cdot K} \dots \text{spezifische Wärmekapazität Wasser}$$

$$c_{P_{org}} = 0,4 \cdot c_{P_{H_2O}} \dots \text{spezifische Wärmekapazität Trockenrückstand}$$

$$x = 0,0314 \dots \text{Trockenrückstand Faulschlamm}$$

Mit den oben genannten Werten resultiert $\dot{Q} = 20525 \frac{MJ}{Tag}$ - dieser Wärmemenge ist bei Prozessdampfkosten von $35 \frac{€}{t \text{ Dampf}}$ und einer Verdampfungsenthalpie des Wassers von

$$h = 2257 \frac{kJ}{kg} \text{ äquivalent } 318 \frac{€}{Tag}.$$

Der grobe Kosten-Nutzen Überblick der Faulschlammbelüftung ist in Tabelle 8-2 dargestellt.

	Kosten in €/Tag			Einsparung in €/Tag	Δ in €/Tag
	Fällmittel	Erwärmung	Belüftung		
belüftet, direkt entwässert	476	0	31	1856	1349
belüftet, gelagert	476	318	31	972	147

Tabelle 8-2 Kostenabschätzung Faulschlammbelüftung

Anhand der errechneten Werte kann nochmals verdeutlicht werden, dass eine zwischenzeitliche Lagerung des Schlammes nach Belüftung möglichst vermieden werden sollte. Während bei direkter Entwässerung des Schlammes die Belüftung als gut wirtschaftlich eingeschätzt werden kann, ist dies bei Lagerung des Schlammes nicht gesichert. Als zusätzlicher, nicht konkret bewertbarer Vorteil resultiert eine längere Standzeit der Aggregate und Ausrüstung sowie ein reduzierter Aufwand für Erhaltung. Eine Bewertung könnte nur auf Basis von detaillierten Betriebszahlen der konkreten Anlage vorgenommen werden.

9. Danksagung

An dieser Stelle möchte ich allen, die zum Entstehen und Gelingen dieser Arbeit beigetragen haben, danken. An erster Stelle ist hier das Institut für Wassergütewirtschaft, Ressourcenmanagement und Abfallwirtschaft der Technischen Universität Wien mit seinen engagierten MitarbeiterInnen zu nennen - insbesondere Ass. Prof. Dipl.-Ing. Dr. Karl Svardal, der mit konstruktiven Ratschlägen und freundlicher Unterstützung stets zur Verfügung stand. Bei Dipl.-Ing. Dr. Ernis Saracevic und Dipl.-Ing. Zdravka Saracevic möchte ich mich sehr herzlich für ihre kompetente Betreuung im Institutslabor bedanken - nur selten kann wissenschaftliche Arbeit in so angenehmer Atmosphäre erfolgen. Univ. Prof. Dipl.-Ing. Dr.-Ing. Jörg Krampe danke ich für das Ermöglichen dieser Arbeit und die Durchführung der abschließenden Prüfung.

Auch die Unterstützer dieser Arbeit außerhalb der Technischen Universität Wien sollen hier Anerkennung erfahren - daher möchte ich meinem Vater, Dipl.-Ing. Dr. Paul Fricko für seine stete, ruhige Unterstützung zu allen Zeitpunkten meines Studiums, sein umfangreiches Fachwissen und seine Bereitschaft, mich an diesem teilhaben zu lassen, meinen Dank aussprechen. Meiner Mutter, Dr. Gertraud Latty, möchte ich für ihr Interesse und Verständnis danken. Zuletzt möchte ich mich bei meinem Lebenspartner Dipl.-Ing. Wolfgang Stoiber, der mir stets geduldig, hilfsbereit und motivierend zur Seite stand, bedanken.

10. Anhang

10.1. Abbildungsverzeichnis

Abbildung 3-1 MAP-Inkrustationen an Rohrleitungselementen.....	10
Abbildung 4-1 Löslichkeitsprodukt von MAP in Abhängigkeit des pH -Werts übernommen von [3] ...	11
Abbildung 4-2 Versuchsanordnung.....	14
Abbildung 4-3 Linearer Bereich PO ₄ -P in Abhängigkeit von pH-Wert und Fällmittelmenge	21
Abbildung 4-4 Ammonium-Ammoniak-Gleichgewicht übernommen von [3]	22
Abbildung 5-1 Abnahme Massenanteil Zentrifugenrückstand über pH -Wert nach Belüftung.....	31
Abbildung 5-2 Zunahme Trockensubstanzgehalt im Rückstand über pH -Wert.....	32
Abbildung 5-3 Parallelplattenmodell übernommen von [5]	33
Abbildung 5-4 Fließkurven einiger Fluidtypen übernommen von [5]	34
Abbildung 5-5 Koaxiales Zylindermesssystem übernommen von DIN 53019-1	35
Abbildung 5-6 Rheometer mit Umlaufkühler.....	36
Abbildung 5-7 Fließkurven bei variablem pH -Wert, Belüftung ohne Fällmittel.....	37
Abbildung 5-8 Fließkurven bei variablem pH -Wert, $0,6 \frac{g}{l} MgCl_2 \cdot 6H_2O$	37
Abbildung 5-9 Fließkurven bei variablem pH -Wert, $0,9 \frac{g}{l} MgCl_2 \cdot 6H_2O$	38
Abbildung 5-10 Fließkurven bei variablem pH -Wert, $1,67 \frac{g}{l} MgCl_2 \cdot 6H_2O$	38
Abbildung 5-11 Fließkurven bei variablem pH -Wert, Belüftung ohne Fällmittel, 24h	39
Abbildung 7-1 Stofftransport durch Phasengrenze übernommen von [7]	55
Abbildung 7-2 Verlauf der Gelöstsauerstoffkonzentration bei variabler Belüftungsintensität	57
Abbildung 7-3 Ordinatenlogarithmische Darstellung der Sättigungsdifferenz bei variabler Belüftungsintensität	58
Abbildung 7-4 α -Wert für Schlämme mit hohen Trockensubstanzgehalten übernommen von [9]	59

10.2. Tabellenverzeichnis

Tabelle 4-1 Belüftungsintensitäten	12
Tabelle 4-2 PO ₄ -P; Belüftung ohne Fällmittel.....	15
Tabelle 4-3 NH ₄ -N; Belüftung ohne Fällmittel.....	16
Tabelle 4-4 Mg; Belüftung ohne Fällmittel.....	16
Tabelle 4-5 Ca; Belüftung ohne Fällmittel.....	16
Tabelle 4-6 PO ₄ -P; $0,6 \frac{g}{l} MgCl_2 \cdot 6H_2O$	16
Tabelle 4-7 NH ₄ -N; $0,6 \frac{g}{l} MgCl_2 \cdot 6H_2O$	17
Tabelle 4-8 Mg; $0,6 \frac{g}{l} MgCl_2 \cdot 6H_2O$	17
Tabelle 4-9 Ca; $0,6 \frac{g}{l} MgCl_2 \cdot 6H_2O$	17
Tabelle 4-10 PO ₄ -P; $0,9 \frac{g}{l} MgCl_2 \cdot 6H_2O$	18
Tabelle 4-11 NH ₄ -N; $0,9 \frac{g}{l} MgCl_2 \cdot 6H_2O$	18
Tabelle 4-12 Mg; $0,9 \frac{g}{l} MgCl_2 \cdot 6H_2O$	18
Tabelle 4-13 Ca; $0,9 \frac{g}{l} MgCl_2 \cdot 6H_2O$	19
Tabelle 4-14 PO ₄ -P; $1,67 \frac{g}{l} MgCl_2 \cdot 6H_2O$	19
Tabelle 4-15 NH ₄ -N; $1,67 \frac{g}{l} MgCl_2 \cdot 6H_2O$	19

Tabelle 4-16 Mg; $1,67 \frac{g}{l} MgCl_2 \cdot 6H_2O$	20
Tabelle 4-17 Ca; $1,67 \frac{g}{l} MgCl_2 \cdot 6H_2O$	20
Tabelle 4-18 Erzielbare PO_4 -P-Konzentration bei variabler Fällmittelmenge in Abhängigkeit des pH-Werts.....	20
Tabelle 4-19 Stöchiometrische Bilanz für Versuch 1,8_b8 - Fällung.....	22
Tabelle 4-20 Belüftungsdauer b4.....	23
Tabelle 4-21 Belüftungsdauer b6.....	23
Tabelle 4-22 Belüftungsdauer b8.....	23
Tabelle 4-23 Verbrauchte Luftmengen b4.....	24
Tabelle 4-24 Verbrauchte Luftmengen b6.....	24
Tabelle 4-25 Verbrauchte Luftmengen b8.....	24
Tabelle 4-26 PO_4 -P, Belüftung ohne Fällmittel, 24h.....	25
Tabelle 4-27 NH_4 -N, Belüftung ohne Fällmittel, 24h.....	25
Tabelle 4-28 Mg, Belüftung ohne Fällmittel, 24h.....	25
Tabelle 4-29 Ca, Belüftung ohne Fällmittel 24h.....	26
Tabelle 5-1 Rückstand und TS, Belüftung ohne Fällmittel.....	27
Tabelle 5-2 Rückstand und TS, $0,6 \frac{g}{l} MgCl_2 \cdot 6H_2O$	28
Tabelle 5-3 Rückstand und TS, $0,9 \frac{g}{l} MgCl_2 \cdot 6H_2O$	28
Tabelle 5-4 Rückstand und TS, $1,67 \frac{g}{l} MgCl_2 \cdot 6H_2O$	29
Tabelle 5-5 Rückstand und TS, reine Belüftung 24h.....	30
Tabelle 5-6 Mittelwerte Massenanteil Rückstand.....	31
Tabelle 5-7 Mittelwerte Trockensubstanzgehalt im Rückstand nach Belüftung.....	32
Tabelle 5-8 Approximationsparameter Aufwärtsrampe nach Ostwald-de Waele.....	40
Tabelle 5-9 Approximationsparameter Abwärtsrampe nach Ostwald-de Waele.....	41
Tabelle 5-10 Approximationsparameter Aufwärtsrampe nach Herschel-Bulkley.....	42
Tabelle 5-11 Approximationsparameter Abwärtsrampe nach Herschel-Bulkley.....	43
Tabelle 6-1 Rücklösung PO_4 -P; Belüftung ohne Fällmittel.....	45
Tabelle 6-2 Rücklösung NH_4 -N; Belüftung ohne Fällmittel.....	45
Tabelle 6-3 Rücklösung Mg; Belüftung ohne Fällmittel.....	45
Tabelle 6-4 Rücklösung Ca; Belüftung ohne Fällmittel.....	45
Tabelle 6-5 Rücklösung PO_4 -P; $0,6 \frac{g}{l} MgCl_2 \cdot 6H_2O$	46
Tabelle 6-6 Rücklösung NH_4 -N; $0,6 \frac{g}{l} MgCl_2 \cdot 6H_2O$	46
Tabelle 6-7 Rücklösung Mg; $0,6 \frac{g}{l} MgCl_2 \cdot 6H_2O$	46
Tabelle 6-8 Rücklösung Ca; $0,6 \frac{g}{l} MgCl_2 \cdot 6H_2O$	46
Tabelle 6-9 Rücklösung PO_4 -P; $0,9 \frac{g}{l} MgCl_2 \cdot 6H_2O$	47
Tabelle 6-10 Rücklösung NH_4 -N; $0,9 \frac{g}{l} MgCl_2 \cdot 6H_2O$	47
Tabelle 6-11 Rücklösung Mg; $0,9 \frac{g}{l} MgCl_2 \cdot 6H_2O$	47
Tabelle 6-12 Rücklösung Ca; $0,9 \frac{g}{l} MgCl_2 \cdot 6H_2O$	47
Tabelle 6-13 Rücklösung PO_4 -P; $1,67 \frac{g}{l} MgCl_2 \cdot 6H_2O$	48
Tabelle 6-14 Rücklösung NH_4 -N; $1,67 \frac{g}{l} MgCl_2 \cdot 6H_2O$	48
Tabelle 6-15 Rücklösung Mg; $1,67 \frac{g}{l} MgCl_2 \cdot 6H_2O$	48

Tabelle 6-16 Rücklösung Ca; $1,67 \frac{g}{l} MgCl_2 \cdot 6H_2O$	48
Tabelle 6-17 Rücklösung PO ₄ -P; Belüftung ohne Fällmittel, 24h	49
Tabelle 6-18 Rücklösung NH ₄ -N; Belüftung ohne Fällmittel, 24h	49
Tabelle 6-19 Rücklösung Mg, Belüftung ohne Fällmittel, 24h	49
Tabelle 6-20 Rücklösung Ca; Belüftung ohne Fällmittel, 24h.....	49
Tabelle 6-21 Rücklösung Masseanteil Rückstand, Trockensubstanzgehalt, Belüftung ohne Fällmittel	50
Tabelle 6-22 Rücklösung Masseanteil Rückstand, Trockensubstanzgehalt, $0,6 \frac{g}{l} MgCl_2 \cdot 6H_2O$	50
Tabelle 6-23 Rücklösung Masseanteil Rückstand, Trockensubstanzgehalt, $0,9 \frac{g}{l} MgCl_2 \cdot 6H_2O$	51
Tabelle 6-24 Rücklösung Masseanteil Rückstand, Trockensubstanzgehalt, $1,67 \frac{g}{l} MgCl_2 \cdot 6H_2O$...	51
Tabelle 6-25 Rücklösung Masseanteil Rückstand, Trockensubstanzgehalt, Belüftung ohne Fällmittel, 24h.....	52
Tabelle 6-26 Rücklösung PO ₄ -P bei variabler Fällmittelmenge	52
Tabelle 6-27 Mittelwerte Masseanteil Rückstand nach Lagerung	53
Tabelle 6-28 Mittelwerte Trockensubstanzgehalt Rückstand nach Lagerung	53
Tabelle 7-1 <i>kLa</i> ₃₀ -Werte der unterschiedlichen Belüftungsintensitäten.....	58
Tabelle 7-2 <i>OTR</i> der unterschiedlichen Belüftungsintensitäten.....	59
Tabelle 8-1 Energiebedarf der unterschiedlichen Belüftungsintensitäten	61
Tabelle 8-2 Kostenabschätzung Faulschlammbelüftung.....	61

10.3. Literaturverzeichnis

- [1] B. Heinzmann und A. Lengemann, 30. Oktober 2013. [Online]. Available: https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/378/dokumente/die_berliner_pflanze-map.pdf. [Zugriff am 24. Februar 2016].
- [2] B. Widmann, Fraunhofer-Gesellschaft, 1. Juni 2016. [Online]. Available: <http://www.fraunhofer.de/de/presse/presseinformationen/2016/Juni/ifat2016-duenger-aus-abwasser.html>. [Zugriff am 2. Juni 2016].
- [3] B. Heinzmann und A. Lengemann, 19. Mai 2016. [Online]. Available: http://www.kompetenz-wasser.de/fileadmin/user_upload/pdf/veranstaltungen/Wasserwerkstatt/WW31_Heinzmann.pdf. [Zugriff am 28. Mai 2016].
- [4] W. Trösch und M. Mohr, „Klärschlammvergärung mit Mikrofiltration und Ammoniumgewinnung,“ Fraunhofer-Institut für Grenzflächen- und Bioverfahrenstechnik, Stuttgart, 2005.
- [5] J. B. Kopp, „Beurteilung der Entwässerbarkeit von Klärschlämmen,“ *F&S Filtrieren und Separieren*, pp. 168-173, 2010.

- [6] L. Böswirth, Technische Strömungslehre Lehr- und Übungsbuch, Braunschweig; Wiesbaden: Vieweg, 1993.
- [7] K. Füreder, „Fließverhalten von Schlämmen mit hohen Trockensubstanzgehalten,“ in *Wiener Mitteilungen*, Bd. 230, Wien, Institut für Wassergütwirtschaft, Ressourcenmanagement und Abfallwirtschaft, 2014, pp. 279-304.
- [8] M. Zlokarnik, Rührtechnik Theorie und Praxis, Berlin: Springer-Verlag, 1999.
- [9] B. Günder, „Rheologische Eigenschaften von belebten Schlämmen und deren Einfluß auf die Sauerstoffzufuhr,“ *Korrespondenz Abwasser Heft 12*, 1999.
- [10] K. Klinksieg, Charakterisierung des Absetzverhaltens von kommunalen Klärschlämmen mit Hilfe rheologischer Messungen, Braunschweig: Institut für Siedlungswasserwirtschaft der Technischen Universität Braunschweig, 2010.
- [11] U. Moshage, Rheologie kommunaler Klärschlämme - Messmethoden und Praxisrelevanz, Braunschweig: Institut für Siedlungswasserwirtschaft der Technischen Universität Braunschweig, 2004.
- [12] D. Stumpf, „Phosphorrecycling durch MAP-Fällung im kommunalen Faulschlamm,“ Umweltbundesamt, Dessau-Roßlau, 2007.
- [13] C. Moldt, „Bestimmung des Grenzflächenfaktors α bei Belebtschlämmen unterschiedlichen Trockensubstanzgehaltes in einer Versuchsanlage,“ Wolfenbüttel, 2001.
- [14] K.-H. Rosenwinkel, H. Kroiss, N. Dichtl, C.-F. Seyfried und P. Weiland, Hrsg., Anaerobtechnik Abwasser-, Schlamm-, und Reststoffbehandlung, Biogasgewinnung, 3. Auflage Hrsg., Berlin: Springer-Verlag, 2015.
- [15] W. Gujer, Siedlungswasserwirtschaft, Berlin: Springer-Verlag, 1999.

10.4. Messprotokolle

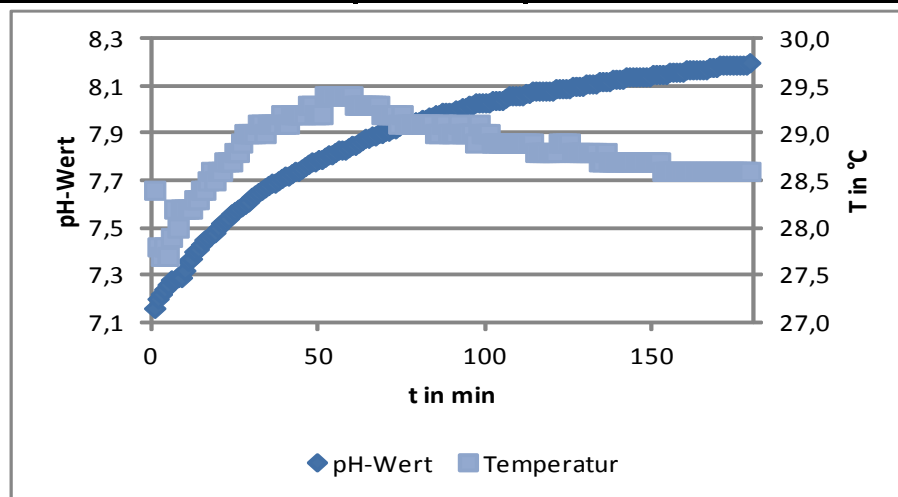
Die Versuchsprotokolle wurden innerhalb der Fällmittelgruppen nach steigender Belüftungsintensität angeordnet; Wiederholungsversuche finden sich direkt im Anschluss an den ursprünglichen Versuch.

10.4.1. Belüftung ohne Fällmittel

Versuchsprotokoll Belüftungsversuch Faulschlamm						
Datum		Uhrzeit Versuchsbeginn		Uhrzeit Versuchsende		
11.03.2016		11:00		14:41		
Versuchsbezeichnung				FS_L_0_b4		
Verwendeter Faulschlamm				Linz		
Fällmittel				-		
Belüftung bei 1bar						
Anemometer		in l/min		4		
Steighöhe		1l in s		31		2l in s
Steighöhe		in l/min		1,905		
Verbrauchte Luftmenge		in l		341,17		
Versuchsdurchführung						
pH-Wert	20°C		30°C		nach Fällmittelzugabe	
	7,26		7,15		-	
Zeit in min	pH-Wert	T in °C		Zeit in min	pH-Wert	T in °C
1	7,16	28,4		46	7,76	29,2
2	7,20	27,8		47	7,77	29,3
3	7,22	27,7		48	7,78	29,3
4	7,24	27,8		49	7,78	29,2
5	7,26	27,7		50	7,79	29,2
6	7,28	27,9	*7,8; 51:35	51	7,79	29,2
7	7,28	28,2		52	7,80	29,4
8	7,29	28,0		53	7,81	29,4
9	7,29	28,2		54	7,81	29,4
10	7,32	28,2		55	7,82	29,4
11	7,36	28,2		56	7,83	29,4
12	7,37	28,2		57	7,83	29,4
13	7,40	28,3		58	7,83	29,4
14	7,41	28,3		59	7,84	29,4
15	7,43	28,4		60	7,85	29,4
16	7,45	28,4	61	7,85	29,3	
17	7,46	28,5	62	7,86	29,3	
18	7,47	28,6	63	7,87	29,3	
19	7,48	28,5	64	7,88	29,3	
20	7,50	28,6	65	7,88	29,3	
21	7,52	28,6	66	7,89	29,3	
22	7,53	28,7	67	7,89	29,3	
23	7,54	28,7	68	7,90	29,3	
24	7,56	28,7	69	7,90	29,2	
25	7,57	28,8	70	7,91	29,2	
26	7,58	28,8	71	7,91	29,2	
27	7,59	28,9	72	7,92	29,2	
28	7,60	29,0	73	7,92	29,2	
29	7,61	29,0	74	7,93	29,1	
30	7,63	29,0	75	7,94	29,2	
31	7,64	29,0	76	7,94	29,1	
32	7,65	29,1	77	7,94	29,1	
33	7,66	29,1	78	7,94	29,1	
34	7,67	29,0	79	7,95	29,1	
35	7,68	29,1	80	7,95	29,1	
36	7,69	29,1	81	7,96	29,1	
37	7,69	29,1	82	7,96	29,1	
38	7,70	29,1	83	7,97	29,1	
39	7,71	29,2	84	7,97	29,1	
40	7,72	29,1	85	7,98	29,0	
41	7,72	29,1	86	7,98	29,0	
42	7,73	29,2	87	7,99	29,1	
43	7,74	29,2	88	7,99	29,1	
44	7,74	29,2	89	7,99	29,0	
45	7,75	29,2	*8,0; 90:21	90	7,99	29,0

Zeit in min	pH-Wert	T in °C		Zeit in min	pH-Wert	T in °C
91	8,00	29,0		136	8,12	28,8
92	8,00	29,1		137	8,12	28,7
93	8,01	29,0		138	8,13	28,7
94	8,01	29,0		139	8,13	28,7
95	8,02	29,0		140	8,13	28,7
96	8,02	29,0		141	8,13	28,7
97	8,03	28,9		142	8,14	28,7
98	8,03	29,1		143	8,14	28,7
99	8,03	29,0		144	8,14	28,7
100	8,03	29,0		145	8,14	28,7
101	8,03	29,0		146	8,14	28,7
102	8,04	28,9		147	8,14	28,7
103	8,04	28,9		148	8,14	28,7
104	8,04	28,9		149	8,14	28,7
105	8,04	28,9		150	8,15	28,7
106	8,05	28,9		151	8,15	28,7
107	8,06	28,9		152	8,15	28,7
108	8,06	28,9		153	8,15	28,6
109	8,06	28,9		154	8,15	28,6
110	8,06	28,9		155	8,16	28,6
111	8,06	28,9		156	8,16	28,6
112	8,07	28,9		157	8,16	28,6
113	8,07	28,9		158	8,16	28,6
114	8,08	28,9		159	8,16	28,6
115	8,08	28,8		160	8,17	28,6
116	8,08	28,8		161	8,17	28,6
117	8,08	28,8		162	8,17	28,6
118	8,08	28,8		163	8,17	28,6
119	8,08	28,8		164	8,17	28,6
120	8,08	28,8		165	8,17	28,6
121	8,09	28,8		166	8,17	28,6
122	8,09	28,9		167	8,18	28,6
123	8,09	28,9		168	8,18	28,6
124	8,09	28,9		169	8,18	28,6
125	8,09	28,9		170	8,19	28,6
126	8,10	28,8		171	8,19	28,6
127	8,10	28,8		172	8,19	28,6
128	8,10	28,8		173	8,19	28,6
129	8,10	28,8		174	8,19	28,6
130	8,11	28,8		175	8,19	28,6
131	8,11	28,8		176	8,19	28,6
132	8,11	28,8		177	8,19	28,6
133	8,11	28,8		178	8,19	28,6
134	8,12	28,7		179	8,20	28,6
135	8,12	28,7		180		

Belüftungsende: 8,2; 179:07



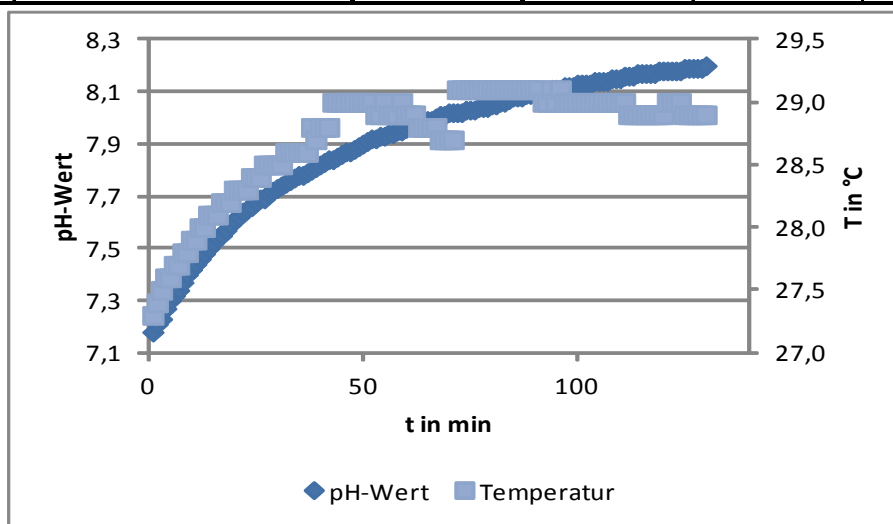
Auswertung Belüftungsversuch					
Trockensubstanz					
Probenbezeichnung	pH; T in °C	Einwaage	Trübwasser	Rückstand	TS
		in g	in g	in % _m	in g/kg
FS_L_0_nb_7,26_20°C	7,26; 20°C	251,0	163,3	34,94	92,32
FS_L_0_nb_7,15_30°C	7,15; 30°C	249,6	162,6	34,86	95,15
FS_L_0_b4_7,8	7,8; 30°C	250,1	168,8	32,51	99,04
FS_L_0_b4_8,0	8,0; 30°C	250,7	170,0	32,19	100,3
FS_L_0_b4_8,2	8,2; 30°C	249,7	170,5	31,72	100,86
Gelöstionen					
Probenbezeichnung	pH	PO ₄ -P	NH ₄ -N	Mg	Ca
		in mg/l			
FS_L_0_nb_7,26_20°C	7,26	255	1303,6	17	51,5
FS_L_0_b4_7,8	7,80	230	1246	9,8	43
FS_L_0_b4_8,0	8,00	217,4	1264,8	8,7	20,8
FS_L_0_b4_8,2	8,20	194	1247,2	5	17

Auswertung Rücklöseversuch					
Datum		Uhrzeit Versuchsbeginn	Uhrzeit Versuchsende		
11.-14.03.2016		18:17	08:35		
Probenbezeichnung	pH	PO ₄ -P	NH ₄ -N	Mg	Ca
		in mg/l			
FS_L_0_nb_24	7,17	270,6	1390	17,8	47,5
FS_L_0_b4_24	7,80	243	1308	5,4	30,7

Bemerkungen
Es war eine schlechte Phasentrennung beim Zentrifugieren feststellbar. Zudem konnte aufgrund der Füllhöhe keine gleichmäßige Thermostatisierung erzielt werden; erst durch Einschalten der Belüftung wurde die Temperaturverteilung gleichmäßiger. Durch den Ausfall des Thermostaten kann die Zeitdauer des beheizten Rücklöseversuchs nicht genau angegeben werden. Der Rückstand wurde im Rücklöseversuch für den belüfteten Schlamm zu 33,84% und im nicht belüfteten Schlamm zu 34,6% bestimmt; die TS betrug jeweils 97,66 und 93,35g/kg.

Versuchsprotokoll Belüftungsversuch Faulschlamm						
Datum		Uhrzeit Versuchsbeginn		Uhrzeit Versuchsende		
15.03.2016		09:47		12:36		
Versuchsbezeichnung				FS_L_0_b6		
Verwendeter Faulschlamm				Linz		
Fällmittel						
-						
Belüftung bei 1bar						
Anemometer		in l/min		6		
Steighöhe		1l in s		18		2l in s
Steighöhe		in l/min		3,33		
Verbrauchte Luftmenge		in l		435,11		
Versuchsdurchführung						
pH-Wert	20°C		30°C		nach Fällmittelzugabe	
	7,23		7,14		-	
Zeit in min	pH-Wert	T in °C		Zeit in min	pH-Wert	T in °C
1	7,18	27,3		46	7,87	29,0
2	7,21	27,4		47	7,87	29,0
3	7,23	27,5		48	7,88	29,0
4	7,27	27,6		49	7,89	29,0
5	7,30	27,6		50	7,90	29,0
6	7,32	27,7		51	7,91	29,0
7	7,34	27,7		52	7,92	29,0
8	7,37	27,8		53	7,92	28,9
9	7,40	27,8		54	7,93	28,9
10	7,42	27,9		55	7,93	29,0
11	7,44	27,9		56	7,94	28,9
12	7,46	28,0		57	7,94	28,9
13	7,48	28,0		58	7,95	28,9
14	7,50	28,1		59	7,95	29,0
15	7,52	28,1		60	7,96	28,9
16	7,54	28,1		61	7,97	28,9
17	7,55	28,2		62	7,98	28,9
18	7,57	28,2		63	7,98	28,8
19	7,59	28,2		64	7,99	28,8
20	7,61	28,3		65	7,99	28,8
21	7,62	28,3		66	7,99	28,8
22	7,64	28,3	*8,0; 67:00	67	8,00	28,8
23	7,65	28,3		68	8,01	28,7
24	7,66	28,4		69	8,01	28,7
25	7,68	28,4		70	8,02	28,7
26	7,69	28,4		71	8,02	28,7
27	7,69	28,5		72	8,02	29,1
28	7,71	28,5		73	8,02	29,1
29	7,72	28,5		74	8,03	29,1
30	7,73	28,5		75	8,03	29,1
31	7,74	28,5		76	8,03	29,1
32	7,75	28,6		77	8,04	29,1
33	7,76	28,6		78	8,04	29,1
34	7,77	28,6		79	8,04	29,1
35	7,78	28,6		80	8,05	29,1
36	7,78	28,6		81	8,05	29,1
37	7,79	28,6	*7,8; 37:17	82	8,06	29,1
38	7,80	28,8		83	8,06	29,1
39	7,81	28,7		84	8,07	29,1
40	7,82	28,8		85	8,08	29,1
41	7,83	28,8		86	8,08	29,1
42	7,84	28,8		87	8,08	29,1
43	7,84	29,0		88	8,09	29,1
44	7,85	29,0		89	8,09	29,1
45	7,86	29,0		90	8,10	29,1

Zeit in min	pH-Wert	T in °C		Zeit in min	pH-Wert	T in °C
91	8,10	29,1		136		
92	8,10	29,0		137		
93	8,10	29,0		138		
94	8,11	29,1		139		
95	8,11	29,0		140		
96	8,11	29,1		141		
97	8,12	29,0		142		
98	8,12	29,0		143		
99	8,12	29,0		144		
100	8,13	29,0		145		
101	8,13	29,0		146		
102	8,13	29,0		147		
103	8,13	29,0		148		
104	8,14	29,0		149		
105	8,14	29,0		150		
106	8,14	29,0		151		
107	8,14	29,0		152		
108	8,15	29,0		153		
109	8,15	29,0		154		
110	8,15	29,0		155		
111	8,16	29,0		156		
112	8,16	28,9		157		
113	8,16	28,9		158		
114	8,17	28,9		159		
115	8,17	28,9		160		
116	8,17	28,9		161		
117	8,17	28,9		162		
118	8,17	28,9		163		
119	8,18	28,9		164		
120	8,18	28,9		165		
121	8,18	29,0		166		
122	8,18	29,0		167		
123	8,18	29,0		168		
124	8,18	29,0		169		
125	8,19	28,9		170		
126	8,19	28,9		171		
127	8,19	28,9		172		
128	8,19	28,9		173		
129	8,19	28,9		174		
130	8,20	28,9		175		
131	Belüftungsende: 8,2; 130:32			176		
132				177		
133				178		
134				179		
135				180		



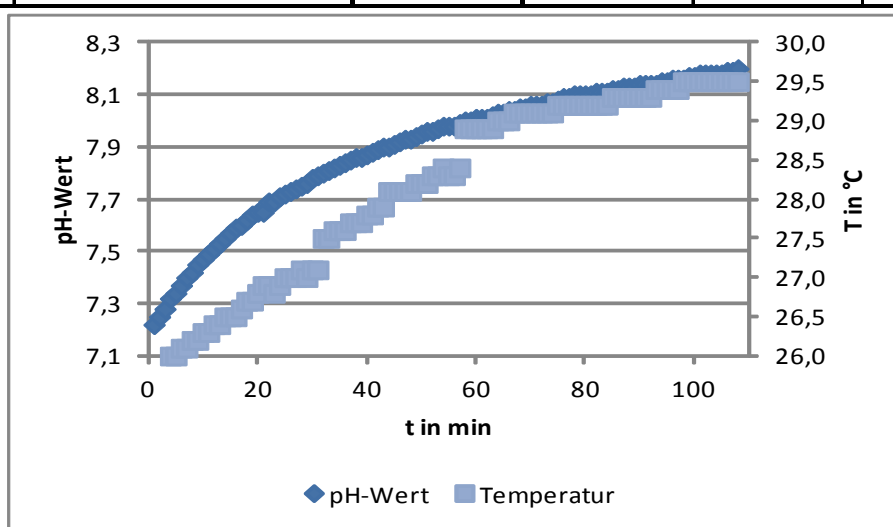
Auswertung Belüftungsversuch					
Trockensubstanz					
Probenbezeichnung	pH; T in °C	Einwaage	Trübwasser	Rückstand	TS
		in g	in g	in % _m	in g/kg
FS_L_0_nb_7,23_20°C	7,23; 20°C	250,8	168,8	32,70	95,25
FS_L_0_nb_7,14_30°C	7,14; 30°C	250,4	171,2	31,63	96,32
FS_L_0_b6_7,8	7,8; 30°C	249,9	174,3	30,25	99,79
FS_L_0_b6_8,0	8,0; 30°C	250,6	175,9	29,81	103,03
FS_L_0_b6_8,2	8,2; 30°C	249,4	176,5	29,23	105,69
Gelöstionen					
Probenbezeichnung	pH	PO ₄ -P	NH ₄ -N	Mg	Ca
		in mg/l			
FS_L_0_nb_7,23_20°C	7,23	254,4	1335	11,5	52,1
FS_L_0_b6_7,8	7,80	232,2	1341	5,6	26,6
FS_L_0_b6_8,0	8,00	205,5	1290	2,2	17,2
FS_L_0_b6_8,2	8,20	182,4	1313,1	1,4	14,1
Auswertung Rücklöseversuch					
Datum 15.-16.3.2016		Uhrzeit Versuchsbeginn 16:00		Uhrzeit Versuchsende 16:05	
Probenbezeichnung	pH	PO ₄ -P	NH ₄ -N	Mg	Ca
		in mg/l			
FS_L_0_nb_24_2	7,28	252,3	1327,8	2,5	12
FS_L_0_b6_24	7,95	232,8	1287,6	1,3	21,8
Bemerkungen					
Der Rückstand wurde im Rücklöseversuch für den belüfteten Schlamm zu 31,08% und im nicht belüfteten Schlamm zu 32,28% bestimmt; die TS wurde nicht bestimmt.					

Versuchsprotokoll Belüftungsversuch Faulschlamm						
Datum		Uhrzeit Versuchsbeginn		Uhrzeit Versuchsende		
29.04.2016		09:17		10:40		
Versuchsbezeichnung				FS_L_0_b6_W1		
Verwendeter Faulschlamm				Linz		
Fällmittel				-		
Belüftung bei 1bar						
Anemometer		in l/min		6		
Steighöhe		1l in s		20		2l in s
Steighöhe		in l/min		3,000		
Verbrauchte Luftmenge		in l		168,10		
Versuchsdurchführung						
pH-Wert	20°C		30°C		nach Fällmittelzugabe	
	7,52		7,33		-	
Zeit in min	pH-Wert	T in °C		Zeit in min	pH-Wert	T in °C
1	7,35	26,6		31	7,97	28,2
2	7,38	26,4		32	7,98	28,2
3	7,41	26,5	*33:22; 8,0	33	7,99	28,2
4	7,45	26,4		34	8,00	28,9
5	7,47	26,5		35	8,01	28,9
6	7,50	26,6		36	8,02	28,9
7	7,53	26,6		37	8,04	28,9
8	7,56	26,7		38	8,05	28,9
9	7,59	26,7		39	8,06	28,9
10	7,62	26,8		40	8,07	29,0
11	7,63	26,8		41	8,08	29,0
12	7,65	26,9		42	8,09	29,1
13	7,67	27,0		43	8,10	29,1
14	7,69	27,0		44	8,11	29,1
15	7,71	27,0		45	8,12	29,1
16	7,73	27,1		46	8,13	29,2
17	7,75	27,0		47	8,13	29,1
18	7,77	27,1		48	8,14	29,2
19	7,79	27,1	*19:20; 7,8	49	8,15	29,2
20	7,81	27,6		50	8,15	29,2
21	7,83	27,6		51	8,16	29,3
22	7,84	27,6		52	8,17	29,2
23	7,85	27,7		53	8,18	29,3
24	7,87	27,7		54	8,19	29,3
25	7,89	27,8		55	8,19	29,3
26	7,91	27,8		56	8,20	29,3
27	7,92	27,9		57		
28	7,93	27,9		58	Belüftungsende: 56:02; 8,2	
29	7,94	28,0		59		
30	7,95	28,1		60		

Auswertung Belüftungsversuch																														
Trockensubstanz																														
Probenbezeichnung	pH; T in °C	Einwaage	Trübwasser	Rückstand	TS																									
		in g	in g	in % _m	in g/kg																									
FS_L_0_nb_7,52_20°C	7,52; 20°C	250,1	173,4	30,67	94,52																									
FS_L_0_nb_7,33_30°C	7,33; 30°C	250,7	174,5	30,39	96,88																									
FS_L_0_b6_W1_7,8	7,8; 30°C	250,6	176,9	29,41	100,35																									
FS_L_0_b6_W1_8,0	8,0; 30°C	250,3	177,3	29,17	100,13																									
FS_L_0_b6_W1_8,2	8,2; 30°C	250,2	179	28,46	104,23																									
Gelöstionen																														
Probenbezeichnung	pH	PO ₄ -P	NH ₄ -N	Mg	Ca																									
		in mg/l																												
FS_L_0_nb_7,52_20°C	7,52	252,3	1407,9	7,6	24,8																									
FS_L_0_b6_W1_7,8	7,80	249,9	1487,7	1,6	13,8																									
FS_L_0_b6_W1_8,0	8,00	240,0	1470,6	1,1	10																									
FS_L_0_b6_W1_8,2	8,20	220,2	1459,5	1,4	5																									
<table border="1"> <caption>Data for Gelöstionen Graph</caption> <thead> <tr> <th>pH-Wert</th> <th>PO₄-P (mg/l)</th> <th>NH₄-N (mg/l)</th> <th>Mg (mg/l)</th> <th>Ca (mg/l)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>7,52</td> <td>252,3</td> <td>1407,9</td> <td>7,6</td> <td>24,8</td> </tr> <tr> <td>7,80</td> <td>249,9</td> <td>1487,7</td> <td>1,6</td> <td>13,8</td> </tr> <tr> <td>8,00</td> <td>240,0</td> <td>1470,6</td> <td>1,1</td> <td>10</td> </tr> <tr> <td>8,20</td> <td>220,2</td> <td>1459,5</td> <td>1,4</td> <td>5</td> </tr> </tbody> </table>						pH-Wert	PO ₄ -P (mg/l)	NH ₄ -N (mg/l)	Mg (mg/l)	Ca (mg/l)	7,52	252,3	1407,9	7,6	24,8	7,80	249,9	1487,7	1,6	13,8	8,00	240,0	1470,6	1,1	10	8,20	220,2	1459,5	1,4	5
pH-Wert	PO ₄ -P (mg/l)	NH ₄ -N (mg/l)	Mg (mg/l)	Ca (mg/l)																										
7,52	252,3	1407,9	7,6	24,8																										
7,80	249,9	1487,7	1,6	13,8																										
8,00	240,0	1470,6	1,1	10																										
8,20	220,2	1459,5	1,4	5																										
Auswertung Rücklöseversuch																														
Datum 29.-30.04.2016		Uhrzeit Versuchsbeginn 12:37		Uhrzeit Versuchsende 13:24																										
Probenbezeichnung	pH	PO ₄ -P	NH ₄ -N	Mg	Ca																									
		in mg/l																												
FS_L_0_nb_24_9	7,27	245,7	1454,7	0,5	12,9																									
FS_L_0_b6_W1_24	7,93	239,1	1464,6	0,7	6,4																									
Bemerkungen																														
<p>Der Rückstand wurde im Rücklöseversuch für den belüfteten Schlamm zu 29,53% und im nicht belüfteten Schlamm zu 30,41% bestimmt; die TS betrug jeweils 102,32 und 98,66g/kg.</p>																														

Versuchsprotokoll Belüftungsversuch Faulschlamm						
Datum		Uhrzeit Versuchsbeginn		Uhrzeit Versuchsende		
16.03.2016		09:22		11:28		
Versuchsbezeichnung				FS_L_0_b8		
Verwendeter Faulschlamm				Linz		
Fällmittel						
Belüftung bei 1bar						
Anemometer		in l/min		8		
Steighöhe		1l in s		15		2l in s
Steighöhe		in l/min		4,00		
Verbrauchte Luftmenge		in l		433,53		
Versuchsdurchführung						
pH-Wert	20°C		30°C		nach Fällmittelzugabe	
	7,25		7,15		-	
Zeit in min	pH-Wert	T in °C		Zeit in min	pH-Wert	T in °C
1	7,22	25,9		46	7,92	28,1
2	7,25	25,9		47	7,93	28,1
3	7,28	25,9		48	7,93	28,1
4	7,32	26,0		49	7,94	28,2
5	7,34	26,0		50	7,95	28,2
6	7,37	26,1		51	7,96	28,2
7	7,40	26,1		52	7,96	28,3
8	7,42	26,2		53	7,97	28,3
9	7,45	26,2		54	7,98	28,4
10	7,47	26,3		55	7,98	28,3
11	7,49	26,3		56	7,98	28,3
12	7,51	26,4	*8,0; 57:32	57	7,99	28,4
13	7,53	26,4		58	8,00	28,9
14	7,55	26,5		59	8,00	28,9
15	7,57	26,5		60	8,01	28,9
16	7,59	26,5		61	8,01	28,9
17	7,60	26,6		62	8,01	28,9
18	7,62	26,7		63	8,02	28,9
19	7,64	26,7		64	8,03	29,0
20	7,65	26,8		65	8,03	29,0
21	7,65	26,9		66	8,04	29,0
22	7,69	26,9		67	8,04	29,1
23	7,69	26,8		68	8,05	29,1
24	7,71	26,9		69	8,05	29,1
25	7,72	27,0		70	8,06	29,1
26	7,73	27,0		71	8,06	29,1
27	7,74	27,0		72	8,06	29,1
28	7,75	27,1		73	8,07	29,1
29	7,76	27,0		74	8,07	29,1
30	7,78	27,1		75	8,08	29,2
31	7,79	27,1	*7,8; 31:56	76	8,09	29,2
32	7,80	27,5		77	8,09	29,2
33	7,81	27,5		78	8,10	29,2
34	7,82	27,6		79	8,10	29,2
35	7,83	27,6		80	8,10	29,2
36	7,84	27,6		81	8,10	29,2
37	7,85	27,7		82	8,11	29,2
38	7,86	27,7		83	8,11	29,2
39	7,86	27,7		84	8,11	29,2
40	7,87	27,8		85	8,12	29,3
41	7,88	27,8		86	8,12	29,3
42	7,89	27,9		87	8,13	29,3
43	7,90	27,9		88	8,13	29,3
44	7,90	28,1		89	8,13	29,3
45	7,91	28,1		90	8,14	29,3

Zeit in min	pH-Wert	T in °C		Zeit in min	pH-Wert	T in °C
91	8,14	29,3		136		
92	8,14	29,3		137		
93	8,14	29,4		138		
94	8,15	29,4		139		
95	8,15	29,4		140		
96	8,16	29,4		141		
97	8,16	29,4		142		
98	8,16	29,5		143		
99	8,17	29,5		144		
100	8,17	29,5		145		
101	8,18	29,5		146		
102	8,18	29,5		147		
103	8,18	29,5		148		
104	8,18	29,5		149		
105	8,18	29,5		150		
106	8,19	29,5		151		
107	8,19	29,5		152		
108	8,20	29,5		153		
109	Belüftungsende: 8,2 108:23			154		
110				155		
111				156		
112				157		
113				158		
114				159		
115				160		
116				161		
117				162		
118				163		
119				164		
120				165		
121				166		
122				167		
123				168		
124				169		
125				170		
126				171		
127				172		
128				173		
129				174		
130				175		
131				176		
132				177		
133				178		
134				179		
135				180		

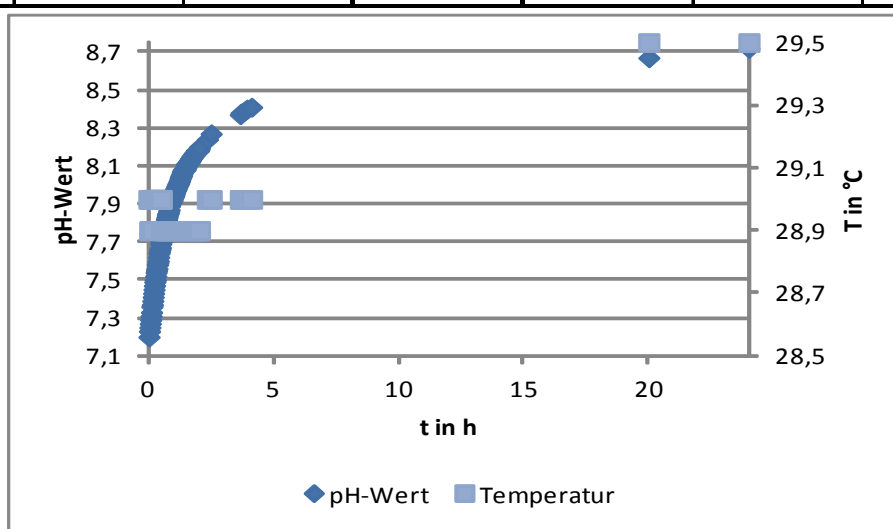


Auswertung Belüftungsversuch					
Trockensubstanz					
Probenbezeichnung	pH; T in °C	Einwaage	Trübwasser	Rückstand	TS
		in g	in g	in % _m	in g/kg
FS_L_0_nb_7,25_20°C	7,25; 20°C	250,2	168,6	32,61	94,9
FS_L_0_nb_7,15_30°C	7,15; 30°C	250,8	172	31,42	99,7
FS_L_0_b8_7,8	7,8; 30°C	250,7	174,5	30,39	104,05
FS_L_0_b8_8,0	8,0; 30°C	249,8	175,1	29,90	104,65
FS_L_0_b8_8,2	8,2; 30°C	249,2	176,6	29,13	104,08
Gelöstionen					
Probenbezeichnung	pH	PO ₄ -P	NH ₄ -N	Mg	Ca
		in mg/l			
FS_L_0_nb_7,25_20°C	7,25	254,4	1374	10,3	43,8
FS_L_0_b8_7,8	7,80	231,9	1367,4	7,2	34,3
FS_L_0_b8_8,0	8,00	208,2	1350	4,4	19,6
FS_L_0_b8_8,2	8,20	181,2	1287,6	1,7	25,5
Auswertung Rücklöseversuch					
Datum 16.-17.3.2016		Uhrzeit Versuchsbeginn 14:15		Uhrzeit Versuchsende 14:40	
Probenbezeichnung	pH	PO ₄ -P	NH ₄ -N	Mg	Ca
		in mg/l			
FS_L_0_nb_24_3	7,08	259,8	1449,6	5,3	36,3
FS_L_0_b8_24	7,82	234,3	1333,8	1	21,6
Bemerkungen					
Der Rückstand wurde im Rücklöseversuch für den belüfteten Schlamm zu 31,18% und im nicht belüfteten Schlamm zu 32% bestimmt; die TS betrug jeweils 98,16 und 93,75 g/kg.					

10.4.2. Belüftung ohne Fällmittel - 24 Stunden

Versuchsprotokoll Belüftungsversuch Faulschlamm						
Datum		Uhrzeit Versuchsbeginn		Uhrzeit Versuchsende		
04.-05.04.2016		13:17		13:20		
Versuchsbezeichnung				FS_L_0_b4_24		
Verwendeter Faulschlamm				Linz		
Fällmittel						
Belüftung bei 1bar						
Anemometer		in l/min	4			
Steighöhe			1l in s	30	2l in s	60
Steighöhe		in l/min	2,000			
Verbrauchte Luftmenge		in l	2880,00			
Versuchsdurchführung						
pH-Wert	20°C		30°C		nach Fällmittelzugabe	
	7,24		7,17		-	
Zeit in h	pH-Wert	T in °C		Zeit in h	pH-Wert	T in °C
0,02	7,20	29,0		0,77	7,85	28,9
0,03	7,23	29,0		0,78	7,85	28,9
0,05	7,25	28,9		0,80	7,86	28,9
0,07	7,27	28,9		0,82	7,87	28,9
0,08	7,29	28,9		0,83	7,89	28,9
0,10	7,31	28,9		0,85	7,90	28,9
0,12	7,33	28,9		0,87	7,91	28,9
0,13	7,36	28,9		0,88	7,91	28,9
0,15	7,37	28,9		0,90	7,91	28,9
0,17	7,39	29,0		0,92	7,92	28,9
0,18	7,41	29,0		0,93	7,92	28,9
0,20	7,43	29,0		0,95	7,93	28,9
0,22	7,45	29,0		0,97	7,94	28,9
0,23	7,47	29,0		0,98	7,94	28,9
0,25	7,49	29,0		1,00	7,94	28,9
0,27	7,50	29,0		1,02	7,95	28,9
0,28	7,52	29,0		1,03	7,96	28,9
0,30	7,54	29,0		1,05	7,97	28,9
0,32	7,55	29,0		1,07	7,97	28,9
0,33	7,56	29,0		1,08	7,98	28,9
0,35	7,58	29,0		1,10	7,98	28,9
0,37	7,59	29,0		1,12	7,99	28,9
0,38	7,60	29,0	* 68:35; 8,0	1,13	7,99	28,9
0,40	7,62	29,0		1,15	8,00	28,9
0,42	7,64	29,0		1,17	8,00	28,9
0,43	7,65	29,0		1,18	8,01	28,9
0,45	7,66	29,0		1,20	8,01	28,9
0,47	7,67	29,0		1,22	8,02	28,9
0,48	7,69	29,0		1,23	8,02	28,9
0,50	7,70	29,0		1,25	8,03	28,9
0,52	7,71	28,9		1,27	8,04	28,9
0,53	7,72	28,9		1,28	8,04	28,9
0,55	7,73	28,9		1,30	8,05	28,9
0,57	7,74	28,9		1,32	8,05	28,9
0,58	7,75	28,9		1,33	8,06	28,9
0,60	7,76	28,9		1,35	8,07	28,9
0,62	7,77	28,9		1,37	8,07	28,9
0,63	7,78	28,9		1,38	8,08	28,9
0,65	7,79	28,9		1,40	8,08	28,9
0,67	7,79	28,9		1,42	8,08	28,9
0,68	7,80	28,9	* 41:15; 7,8	1,43	8,08	28,9
0,70	7,81	28,9		1,45	8,08	28,9
0,72	7,82	28,9		1,47	8,09	28,9
0,73	7,83	28,9		1,48	8,09	28,9
0,75	7,84	28,9		1,50	8,10	28,9

Zeit in h	pH-Wert	T in °C		Zeit in h	pH-Wert	T in °C
1,52	8,11	28,9				
1,53	8,11	28,9				
1,55	8,11	28,9				
1,57	8,11	28,9				
1,58	8,12	28,9				
1,60	8,12	28,9				
1,62	8,12	28,9				
1,63	8,13	28,9				
1,65	8,13	28,9				
1,67	8,13	28,9				
1,68	8,14	28,9				
1,70	8,14	28,9				
1,72	8,14	28,9				
1,73	8,15	28,9				
1,75	8,15	28,9				
1,77	8,15	28,9				
1,78	8,16	28,9				
1,80	8,16	28,9				
1,82	8,16	28,9				
1,83	8,16	28,9				
1,85	8,17	28,9				
1,87	8,17	28,9				
1,88	8,17	28,9				
1,90	8,18	28,9				
1,92	8,18	28,9				
1,93	8,18	28,9				
1,95	8,18	28,9				
1,97	8,18	28,9				
1,98	8,18	28,9				
2,00	8,19	28,9				
2,02	8,19	28,9	*121:43; 8,2			
2,03	8,20	28,9				
2,35	8,24	29,0				
2,50	8,27	29,0				
3,67	8,37	29,0				
3,70	8,38	29,0				
3,83	8,39	29,0				
3,93	8,40	29,0				
4,12	8,41	29,0				
20	8,67	29,5				
24	8,72	29,5				



Auswertung Belüftungsversuch					
Trockensubstanz					
Probenbezeichnung	pH; T in °C	Einwaage	Trübwasser	Rückstand	TS
		in g	in g	in % _m	in g/kg
FS_L_0_nb_7,24_20°C	7,24; 20°C	250,0	162,9	34,84	93,61
FS_L_0_nb_7,17_30°C	7,17; 30°C	250,5	166,3	33,61	95,81
FS_L_0_b4_24_7,8	7,8; 30°C	250,4	169,2	32,43	100,32
FS_L_0_b4_24_8,0	8,0; 30°C	250,3	169,9	32,12	99,87
FS_L_0_b4_24_8,2	8,2; 30°C	249,6	171,7	31,21	102,56
FS_L_0_b4_24_8,39_4h	8,39; 30°C	250,4	172,6	31,07	106,22
FS_L_0_b4_24_8,67_20h	8,67; 30°C	250,3	173,2	30,80	107,24
FS_L_0_b4_24_8,72_24h	8,72 ; 30°C	249,9	173,9	30,41	105,27
Gelöstionen					
Probenbezeichnung	pH	PO ₄ -P	NH ₄ -N	Mg	Ca
		in mg/l			
FS_L_0_nb_7,24_20°C	7,24	245,7	1336,8	10,1	45,3
FS_L_0_b4_24_7,8	7,80	237	1392,3	5,5	27,8
FS_L_0_b4_24_8,0	8,00	223,5	1392	1,4	23,9
FS_L_0_b4_24_8,2	8,20	204	1358,4	3,2	14,2
FS_L_0_b4_24_8,39_4h	8,39	177	1327,2	0,4	12
FS_L_0_b4_24_8,67_20h	8,67	139,8	1098	0,5	2,7
FS_L_0_b4_24_8,72_24h	8,72	138,9	1035,9	1,7	7,2
Auswertung Rücklöseversuch					
Datum 5.-6.04.2016		Uhrzeit Versuchsbeginn 13:20		Uhrzeit Versuchsende 15:30	
Probenbezeichnung	pH	PO ₄ -P	NH ₄ -N	Mg	Ca
		in mg/l			
FS_L_0_nb_24_5	7,24	252,3	1411,8	11,9	43,9
FS_L_0_b4_24_24	8,44	170,7	1129,2	0,4	8,9
Bemerkungen					
Gegen Belüftungsende konnte Schaumbildung und eine deutliche Farbaufhellung des Schlammes beobachtet werden. Der Rückstand wurde im Rücklöseversuch für den belüfteten Schlamm zu 32,05% bestimmt; die TS betrug 101,08 g/kg. Im Rücklöseversuch wurde Geruchsentwicklung bemerkt.					

Versuchsprotokoll Belüftungsversuch Faulschlamm						
Datum			Uhrzeit Versuchsbeginn		Uhrzeit Versuchsende	
09.-10.05.2016			09:50		10:25	
Versuchsbezeichnung			FS_L_0_b8_24			
Verwendeter Faulschlamm			Linz			
Fällmittel						
-						
Belüftung bei 1bar						
Anemometer		in l/min	8			
Steighöhe			1l in s	15	2l in s	30
Steighöhe		in l/min	4,000			
Verbrauchte Luftmenge		in l	5760,00			
Versuchsdurchführung						
pH-Wert	20°C		30°C		nach Fällmittelzugabe	
	7,32		7,26		-	
Zeit in h	pH-Wert	T in °C		Zeit in h	pH-Wert	T in °C
0,02	7,30	26,7		0,77	8,14	29,3
0,03	7,34	26,6		0,78	8,15	29,3
0,05	7,38	26,6		0,80	8,16	29,3
0,07	7,43	26,7		0,82	8,17	29,4
0,08	7,47	26,8		0,83	8,18	29,4
0,10	7,51	26,8		0,85	8,18	29,5
0,12	7,54	26,8		0,87	8,19	29,4
0,13	7,58	26,8	*52:26; 8,2	1,00	8,25	29,5
0,15	7,61	26,9		1,25	8,35	29,6
0,17	7,63	27,0		1,27	8,35	29,6
0,18	7,66	27,0		1,28	8,36	29,5
0,20	7,68	27,1		1,30	8,36	29,5
0,22	7,70	27,1		1,32	8,36	29,6
0,23	7,72	27,1		1,33	8,36	29,6
0,25	7,75	27,1		1,35	8,37	29,6
0,27	7,77	27,2		1,50	8,42	29,3
0,28	7,79	27,2	*18:43; 7,8	1,67	8,46	29,3
0,30	7,81	27,5		1,83	8,50	29,1
0,32	7,83	27,5		2,17	8,55	29,1
0,33	7,85	27,6		5,50	8,79	29,0
0,35	7,87	27,7		5,67	8,79	28,9
0,37	7,89	27,6		5,95	8,81	28,9
0,38	7,91	27,7		5,97	8,82	28,9
0,40	7,92	27,0		6,00	8,82	28,9
0,42	7,93	27,8		6,33	8,83	28,8
0,43	7,93	28,2		7,33	8,88	28,8
0,45	7,94	28,2		7,70	8,91	28,9
0,47	7,95	28,3		8,08	8,92	28,9
0,48	7,95	28,3		11,83	8,90	28,8
0,50	7,96	28,3		20,00	8,85	28,7
0,52	7,97	28,4		22,00	8,84	28,8
0,53	7,98	28,3		22,33	8,84	28,7
0,55	7,99	28,3	*32:06; 8,0	24,00	8,82	28,7
0,57	8,00	29,1				
0,58	8,01	29,2				
0,60	8,03	29,3				
0,62	8,04	29,3				
0,63	8,05	29,2				
0,65	8,06	29,3				
0,67	8,07	29,3				
0,68	8,09	29,3				
0,70	8,10	29,3				
0,72	8,11	29,2				
0,73	8,12	29,3				
0,75	8,13	29,3				

Auswertung Belüftungsversuch					
Trockensubstanz					
Probenbezeichnung	pH; T in °C	Einwaage	Trübwasser	Rückstand	TS
		in g	in g	in % _m	in g/kg
FS_L_0_nb_7,32_20°C	7,32; 20°C	250,1	171	31,63	95,31
FS_L_0_nb_7,26_30°C	7,26; 30°C	249,7	173,8	30,40	98,1
FS_L_0_b8_24_7,8	7,8; 30°C	250,1	176	29,63	102,67
FS_L_0_b8_24_8,0	8,0; 30°C	249,6	177,0	29,09	103,94
FS_L_0_b8_24_8,2	8,2; 30°C	250,4	179,5	28,31	106,76
FS_L_0_b8_24_8,79_5,67h	8,79; 30°C	249,8	182,2	27,06	109,86
FS_L_0_b8_24_8,82_24h	8,82; 30°C	249,7	176,4	29,36	102,16

Gelöstionen					
Probenbezeichnung	pH	PO ₄ -P	NH ₄ -N	Mg	Ca
		in mg/l			
FS_L_0_nb_7,26_20°C	7,26	243,9	1465,5	0,6	4,2
FS_L_0_b8_24_7,8	7,80	242,9	1487,1	1,7	11,3
FS_L_0_b8_24_8,0	8,00	225,9	1458	0,5	0,8
FS_L_0_b8_24_8,2	8,20	211,2	1453,2	0,5	2,2
FS_L_0_b8_24_8,79_5,67h	8,79	147,3	1255,2	0,2	1,9
FS_L_0_b8_24_8,82_24h	8,82	155,4	540,6	0,7	1,5

pH-Wert	PO ₄ -P (mg/l)	NH ₄ -N (mg/l)	Mg (mg/l)	Ca (mg/l)
7,2	243,9	1465,5	0,6	4,2
7,8	242,9	1487,1	1,7	11,3
8,0	225,9	1458	0,5	0,8
8,2	211,2	1453,2	0,5	2,2
8,79	147,3	1255,2	0,2	1,9
8,82	155,4	540,6	0,7	1,5

Auswertung Rücklöseversuch					
Datum		Uhrzeit Versuchsbeginn		Uhrzeit Versuchsende	
10.-11.05.2016		10:30		10:35	
Probenbezeichnung	pH	PO ₄ -P	NH ₄ -N	Mg	Ca
		in mg/l			
FS_L_0_nb_24_10	7,35	242,4	1451,4	1,5	12,6
FS_L_0_b8_24_24	8,56	187,8	568,2	0	1,5

Bemerkungen
Bereits nach 5h konnte eine deutliche Farbaufhellung des Schlammes beobachtet werden und gegen Belüftungsende starke Schaumbildung. Der Rückstand wurde im Rücklöseversuch für den belüfteten Schlamm zu 30,8% bestimmt; die TS betrug 95,92g/kg. Im Rücklöseversuch wurde Geruchsentwicklung bemerkt.

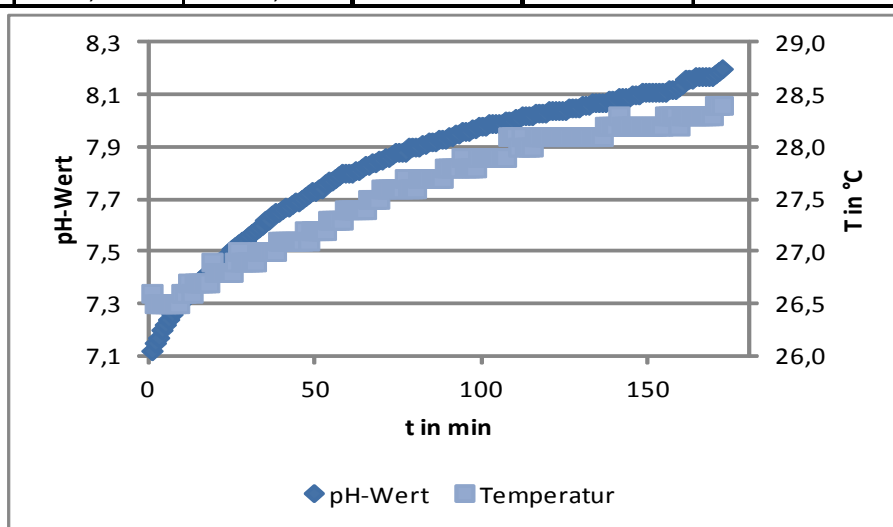
10.4.3. Belüftung mit unterstöchiometrischer Menge Fällmittel - $0,6 \frac{g}{l} MgCl_2 \cdot 6H_2O$



Versuchsprotokoll Belüftungsversuch Faulschlamm						
Datum		Uhrzeit Versuchsbeginn		Uhrzeit Versuchsende		
11.03.2016		15:15		18:12		
Versuchsbezeichnung				FS_L_1,8_b4		
Verwendeter Faulschlamm				Linz		
Fällmittel				1,8g $MgCl_2 \cdot 6H_2O$		
Belüftung bei 1bar						
Anemometer		in l/min		4		
Steighöhe		1l in s		31		2l in s
Steighöhe		in l/min		1,905		
Verbrauchte Luftmenge		in l		326,41		
Versuchsdurchführung						
pH-Wert	20°C		30°C		nach Fällmittelzugabe	
	7,26		7,15		7,11	
Zeit in min	pH-Wert	T in °C		Zeit in min	pH-Wert	T in °C
1	7,12	26,6		46	7,70	27,1
2	7,15	26,5		47	7,71	27,2
3	7,17	26,5		48	7,72	27,1
4	7,20	26,5		49	7,73	27,2
5	7,22	26,5		50	7,73	27,2
6	7,24	26,5		51	7,74	27,2
7	7,26	26,5		52	7,74	27,2
8	7,28	26,5		53	7,76	27,2
9	7,30	26,5		54	7,77	27,3
10	7,31	26,6		55	7,77	27,3
11	7,32	26,6		56	7,78	27,3
12	7,34	26,7		57	7,79	27,3
13	7,35	26,6	*7,8; 58:00	58	7,80	27,3
14	7,37	26,7		59	7,80	27,4
15	7,38	26,7		60	7,80	27,4
16	7,40	26,7		61	7,80	27,4
17	7,41	26,7		62	7,81	27,4
18	7,42	26,7		63	7,81	27,4
19	7,43	26,9		64	7,82	27,4
20	7,44	26,8		65	7,83	27,4
21	7,46	26,8		66	7,83	27,5
22	7,47	26,8		67	7,84	27,5
23	7,47	26,8		68	7,84	27,5
24	7,49	26,8		69	7,85	27,5
25	7,51	26,8		70	7,85	27,6
26	7,52	26,9		71	7,86	27,6
27	7,53	27,0		72	7,86	27,6
28	7,54	26,9		73	7,87	27,6
29	7,54	26,9		74	7,88	27,6
30	7,56	26,9		75	7,88	27,6
31	7,57	26,9		76	7,88	27,6
32	7,58	26,9		77	7,88	27,7
33	7,59	27,0		78	7,90	27,6
34	7,60	27,0		79	7,90	27,6
35	7,62	27,0		80	7,90	27,6
36	7,62	27,0		81	7,90	27,7
37	7,64	27,0		82	7,91	27,7
38	7,65	27,0		83	7,91	27,7
39	7,65	27,1		84	7,92	27,7
40	7,66	27,1		85	7,92	27,7
41	7,67	27,1		86	7,92	27,7
42	7,67	27,1		87	7,93	27,7
43	7,68	27,1		88	7,93	27,7
44	7,69	27,1		89	7,93	27,8
45	7,69	27,1		90	7,94	27,8

Zeit in min	pH-Wert	T in °C		Zeit in min	pH-Wert	T in °C
91	7,94	27,8		136	8,07	28,1
92	7,95	27,8		137	8,07	28,2
93	7,95	27,8		138	8,08	28,2
94	7,96	27,9		139	8,08	28,2
95	7,96	27,8		140	8,08	28,2
96	7,96	27,8		141	8,09	28,3
97	7,97	27,8		142	8,09	28,2
98	7,97	27,8		143	8,09	28,2
99	7,98	27,9		144	8,09	28,2
100	7,98	27,9		145	8,10	28,2
101	7,98	27,9		146	8,10	28,2
102	7,99	27,9		147	8,10	28,2
103	7,99	27,9		148	8,11	28,2
104	7,99	27,9		149	8,11	28,2
105	7,99	27,9		150	8,11	28,2
106	7,99	27,9	*8,0; 106:53	151	8,11	28,2
107	8,00	27,9		152	8,11	28,2
108	8,00	28,1		153	8,11	28,2
109	8,00	28,1		154	8,11	28,2
110	8,01	28,1		155	8,11	28,3
111	8,01	28,0		156	8,12	28,3
112	8,02	28,1		157	8,12	28,3
113	8,02	28,0		158	8,12	28,3
114	8,02	28,0		159	8,13	28,2
115	8,02	28,0		160	8,14	28,3
116	8,03	28,1		161	8,16	28,3
117	8,03	28,1		162	8,16	28,3
118	8,03	28,1		163	8,16	28,3
119	8,03	28,1		164	8,17	28,3
120	8,04	28,1		165	8,17	28,3
121	8,04	28,1		166	8,17	28,3
122	8,04	28,1		167	8,17	28,3
123	8,04	28,1		168	8,17	28,3
124	8,04	28,1		169	8,17	28,3
125	8,04	28,1		170	8,18	28,4
126	8,05	28,1		171	8,19	28,4
127	8,05	28,1		172	8,20	28,4
128	8,05	28,1		173		
129	8,05	28,1		174		
130	8,06	28,1		175		
131	8,06	28,1		176		
132	8,06	28,1		177		
133	8,07	28,1		178		
134	8,07	28,1		179		
135	8,07	28,1		180		

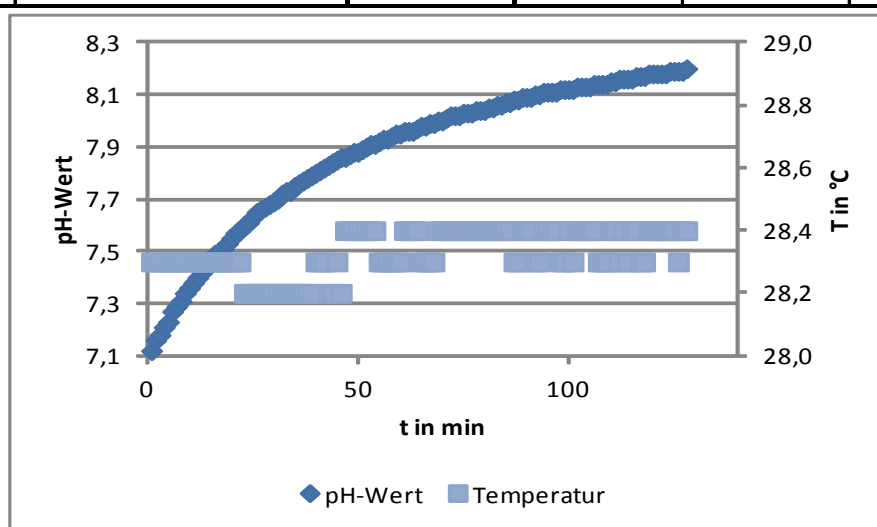
Belüftungsende: 8,2; 171:22



Auswertung Belüftungsversuch																																			
Trockensubstanz																																			
Probenbezeichnung	pH; T in °C	Einwaage	Trübwasser	Rückstand	TS																														
		in g	in g	in % _m	in g/kg																														
FS_L_0_nb_7,26_20°C	7,26; 20°C	251,0	163,3	34,94	92,32																														
FS_L_0_nb_7,15_30°C	7,15; 30°C	249,6	162,6	34,86	95,15																														
FS_L_1,8_b4_7,8	7,8; 30°C	249,2	173,9	30,22	102,34																														
FS_L_1,8_b4_8,0	8,0; 30°C	249,3	175,9	29,44	104,88																														
FS_L_1,8_b4_8,2	8,2; 30°C	250,7	177,5	29,20	105,97																														
Gelöstionen																																			
Probenbezeichnung	pH	PO ₄ -P	NH ₄ -N	Mg	Ca																														
		in mg/l																																	
FS_L_0_nb_7,26_20°C	7,26	255	1303,6	17	51,5																														
FS_L_1,8_nb_7,11	7,11	196,2	1279,6	11,6	47,7																														
FS_L_1,8_b4_7,8	7,80	144,6	1257,6	12,6	28,5																														
FS_L_1,8_b4_8,0	8,00	124,8	1249,2	9,6	20,5																														
FS_L_1,8_b4_8,2	8,20	110	1253,2	5	18,3																														
<table border="1"> <caption>Data for Scatter Plot</caption> <thead> <tr> <th>pH-Wert</th> <th>PO₄-P (mg/l)</th> <th>NH₄-N (mg/l)</th> <th>Mg (mg/l)</th> <th>Ca (mg/l)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>7,26</td> <td>255</td> <td>1303,6</td> <td>17</td> <td>51,5</td> </tr> <tr> <td>7,11</td> <td>196,2</td> <td>1279,6</td> <td>11,6</td> <td>47,7</td> </tr> <tr> <td>7,80</td> <td>144,6</td> <td>1257,6</td> <td>12,6</td> <td>28,5</td> </tr> <tr> <td>8,00</td> <td>124,8</td> <td>1249,2</td> <td>9,6</td> <td>20,5</td> </tr> <tr> <td>8,20</td> <td>110</td> <td>1253,2</td> <td>5</td> <td>18,3</td> </tr> </tbody> </table>						pH-Wert	PO ₄ -P (mg/l)	NH ₄ -N (mg/l)	Mg (mg/l)	Ca (mg/l)	7,26	255	1303,6	17	51,5	7,11	196,2	1279,6	11,6	47,7	7,80	144,6	1257,6	12,6	28,5	8,00	124,8	1249,2	9,6	20,5	8,20	110	1253,2	5	18,3
pH-Wert	PO ₄ -P (mg/l)	NH ₄ -N (mg/l)	Mg (mg/l)	Ca (mg/l)																															
7,26	255	1303,6	17	51,5																															
7,11	196,2	1279,6	11,6	47,7																															
7,80	144,6	1257,6	12,6	28,5																															
8,00	124,8	1249,2	9,6	20,5																															
8,20	110	1253,2	5	18,3																															
Auswertung Rücklöseversuch																																			
Datum		Uhrzeit Versuchsbeginn		Uhrzeit Versuchsende																															
11.-14.03.2016		18:17		08:35																															
Probenbezeichnung	pH	PO ₄ -P	NH ₄ -N	Mg	Ca																														
		in mg/l																																	
FS_L_0_nb_24	7,17	270,6	1390	17,8	47,5																														
FS_L_1,8_b4_24	7,76	164,8	1298	1	34,2																														
Bemerkungen																																			
<p>Ab pH 8,1 unerwartet schneller Anstieg auf 8,2. Durch den Ausfall des Thermostaten kann die Zeitdauer des beheizten Rücklöseversuchs nicht genau angegeben werden. Der Rückstand wurde im Rücklöseversuch für den belüfteten, mit Fällmittel versetzten Schlamm zu 31,35% und im nicht belüfteten Schlamm zu 34,6% bestimmt; die TS betrug jeweils 100,46 und 93,35g/kg.</p>																																			

Versuchsprotokoll Belüftungsversuch Faulschlamm						
Datum		Uhrzeit Versuchsbeginn		Uhrzeit Versuchsende		
15.03.2016		13:28		15:55		
Versuchsbezeichnung				FS_L_1,8_b6		
Verwendeter Faulschlamm				Linz		
Fällmittel				1,8g MgCl ₂ *6H ₂ O		
Belüftung bei 1bar						
Anemometer		in l/min		6		
Steighöhe		1l in s		18		2l in s
Steighöhe		in l/min		3,33		
Verbrauchte Luftmenge		in l		428,89		
Versuchsdurchführung						
pH-Wert	20°C		30°C		nach Fällmittelzugabe	
	7,23		7,14		7,07	
Zeit in min	pH-Wert	T in °C		Zeit in min	pH-Wert	T in °C
1	7,12	28,3		46	7,86	28,2
2	7,16	28,3		47	7,86	28,4
3	7,18	28,3		48	7,87	28,4
4	7,21	28,3		49	7,88	28,4
5	7,23	28,3		50	7,88	28,4
6	7,27	28,3		51	7,89	28,4
7	7,29	28,3		52	7,90	28,4
8	7,31	28,3		53	7,91	28,4
9	7,34	28,3		54	7,91	28,4
10	7,36	28,3		55	7,92	28,3
11	7,38	28,3		56	7,93	28,3
12	7,40	28,3		57	7,93	28,3
13	7,42	28,3		58	7,94	28,3
14	7,45	28,3		59	7,95	28,3
15	7,46	28,3		60	7,95	28,3
16	7,49	28,3		61	7,96	28,4
17	7,50	28,3		62	7,96	28,4
18	7,51	28,3		63	7,96	28,4
19	7,53	28,3		64	7,97	28,4
20	7,55	28,3		65	7,98	28,3
21	7,57	28,3		66	7,98	28,3
22	7,58	28,3		67	7,99	28,3
23	7,60	28,2	*8,0; 68:40	68	7,99	28,3
24	7,61	28,2		69	8,00	28,4
25	7,63	28,2		70	8,00	28,4
26	7,65	28,2		71	8,01	28,4
27	7,66	28,2		72	8,02	28,4
28	7,67	28,2		73	8,02	28,4
29	7,68	28,2		74	8,02	28,4
30	7,69	28,2		75	8,03	28,4
31	7,70	28,2		76	8,03	28,4
32	7,72	28,2		77	8,03	28,4
33	7,73	28,2		78	8,04	28,4
34	7,73	28,2		79	8,04	28,4
35	7,75	28,2		80	8,04	28,4
36	7,76	28,2		81	8,05	28,4
37	7,77	28,2		82	8,05	28,4
38	7,78	28,2		83	8,06	28,4
39	7,79	28,2	* 7,8; 39:54	84	8,06	28,4
40	7,80	28,3		85	8,07	28,4
41	7,81	28,3		86	8,07	28,4
42	7,82	28,3		87	8,08	28,3
43	7,83	28,2		88	8,08	28,3
44	7,84	28,2		89	8,09	28,4
45	7,85	28,3		90	8,09	28,4

Zeit in min	pH-Wert	T in °C		Zeit in min	pH-Wert	T in °C
91	8,09	28,4		136		
92	8,10	28,3		137		
93	8,10	28,3		138		
94	8,11	28,4		139		
95	8,11	28,4		140		
96	8,11	28,4		141		
97	8,11	28,4		142		
98	8,12	28,3		143		
99	8,12	28,3		144		
100	8,12	28,4		145		
101	8,12	28,3		146		
102	8,13	28,4		147		
103	8,13	28,4		148		
104	8,13	28,4		149		
105	8,13	28,4		150		
106	8,14	28,4		151		
107	8,14	28,3		152		
108	8,14	28,3		153		
109	8,14	28,3		154		
110	8,15	28,4		155		
111	8,15	28,4		156		
112	8,16	28,3		157		
113	8,16	28,4		158		
114	8,16	28,3		159		
115	8,16	28,4		160		
116	8,17	28,4		161		
117	8,17	28,3		162		
118	8,17	28,3		163		
119	8,18	28,4		164		
120	8,18	28,4		165		
121	8,18	28,4		166		
122	8,18	28,4		167		
123	8,18	28,4		168		
124	8,19	28,4		169		
125	8,19	28,4		170		
126	8,19	28,3		171		
127	8,19	28,4		172		
128	8,20	28,4		173		
129	Belüftungsende: 8,2; 128:04			174		
130				175		
131				176		
132				177		
133				178		
134				179		
135				180		



Auswertung Belüftungsversuch																																			
Trockensubstanz																																			
Probenbezeichnung	pH; T in °C	Einwaage	Trübwasser	Rückstand	TS																														
		in g	in g	in % _m	in g/kg																														
FS_L_0_nb_7,23_20°C	7,23; 20°C	250,8	168,8	32,70	95,25																														
FS_L_0_nb_7,14_30°C	7,14; 30°C	250,4	171,2	31,63	96,32																														
FS_L_1,8_b6_7,8	7,8; 30°C	250,1	174,2	30,35	102,24																														
FS_L_1,8_b6_8,0	8,0; 30°C	250,6	176,5	29,57	103,15																														
FS_L_1,8_b6_8,2	8,2; 30°C	249,6	176,7	29,21	108,3																														
Gelöstionen																																			
Probenbezeichnung	pH	PO ₄ -P	NH ₄ -N	Mg	Ca																														
		in mg/l																																	
FS_L_0_nb_7,23_20°C	7,23	254,4	1335	11,5	52,1																														
FS_L_1,8_nb_7,07	7,07	150	1313,1	45,5	58,9																														
FS_L_1,8_b6_7,8	7,80	142,5	1313,4	4,2	26,7																														
FS_L_1,8_b6_8,0	8,00	120,9	1254,6	1,5	2,4																														
FS_L_1,8_b6_8,2	8,20	98,7	1242,6	0,6	1,1																														
<table border="1"> <caption>Data for Scatter Plot</caption> <thead> <tr> <th>pH-Wert</th> <th>PO₄-P (mg/l)</th> <th>NH₄-N (mg/l)</th> <th>Mg (mg/l)</th> <th>Ca (mg/l)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>7,07</td> <td>150</td> <td>1313,1</td> <td>45,5</td> <td>58,9</td> </tr> <tr> <td>7,23</td> <td>254,4</td> <td>1335</td> <td>11,5</td> <td>52,1</td> </tr> <tr> <td>7,80</td> <td>142,5</td> <td>1313,4</td> <td>4,2</td> <td>26,7</td> </tr> <tr> <td>8,00</td> <td>120,9</td> <td>1254,6</td> <td>1,5</td> <td>2,4</td> </tr> <tr> <td>8,20</td> <td>98,7</td> <td>1242,6</td> <td>0,6</td> <td>1,1</td> </tr> </tbody> </table>						pH-Wert	PO ₄ -P (mg/l)	NH ₄ -N (mg/l)	Mg (mg/l)	Ca (mg/l)	7,07	150	1313,1	45,5	58,9	7,23	254,4	1335	11,5	52,1	7,80	142,5	1313,4	4,2	26,7	8,00	120,9	1254,6	1,5	2,4	8,20	98,7	1242,6	0,6	1,1
pH-Wert	PO ₄ -P (mg/l)	NH ₄ -N (mg/l)	Mg (mg/l)	Ca (mg/l)																															
7,07	150	1313,1	45,5	58,9																															
7,23	254,4	1335	11,5	52,1																															
7,80	142,5	1313,4	4,2	26,7																															
8,00	120,9	1254,6	1,5	2,4																															
8,20	98,7	1242,6	0,6	1,1																															
Auswertung Rücklöseversuch																																			
Datum 15.-16.3.2016		Uhrzeit Versuchsbeginn 16:00		Uhrzeit Versuchsende 16:05																															
Probenbezeichnung	pH	PO ₄ -P	NH ₄ -N	Mg	Ca																														
		in mg/l																																	
FS_L_0_nb_24_2	7,28	252,3	1327,8	2,5	12																														
FS_L_1,8_b6_24	7,95	151,2	1290	4,5	14,1																														
Bemerkungen																																			
Der Rückstand wurde im Rücklöseversuch für den belüfteten Schlamm zu 30,52% und im nicht belüfteten Schlamm zu 32,28% bestimmt; die TS wurde nicht bestimmt.																																			

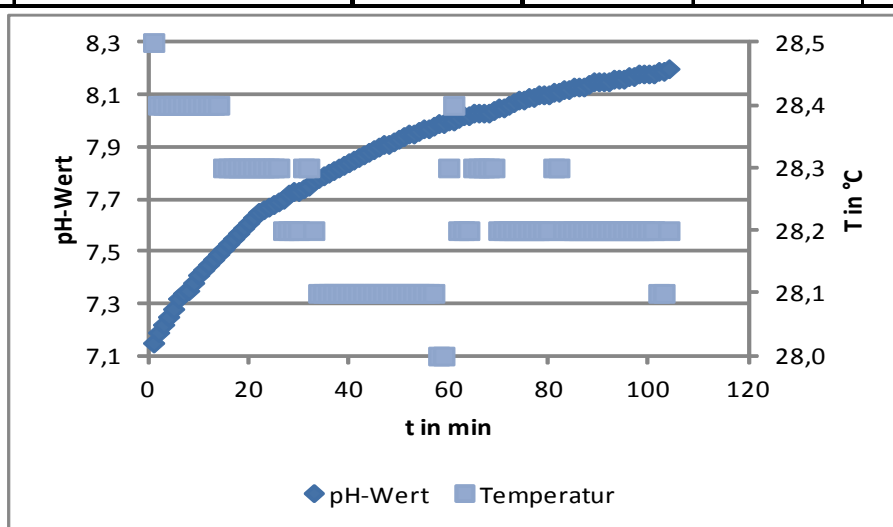
Versuchsprotokoll Belüftungsversuch Faulschlamm						
Datum		Uhrzeit Versuchsbeginn		Uhrzeit Versuchsende		
29.04.2016		11:20		12:35		
Versuchsbezeichnung				FS_L_1,8_b6_W1		
Verwendeter Faulschlamm				Linz		
Fällmittel				-		
Belüftung bei 1bar						
Anemometer		in l/min		6		
Steighöhe		1l in s		20		2l in s
Steighöhe		in l/min		3,000		
Verbrauchte Luftmenge		in l		171,90		
Versuchsdurchführung						
pH-Wert	20°C		30°C		nach Fällmittelzugabe	
	7,52		7,33		7,22	
Zeit in min	pH-Wert	T in °C		Zeit in min	pH-Wert	T in °C
1	7,35	28,8		31	7,94	29,2
2	7,37	28,8		32	7,95	29,3
3	7,39	28,8		33	7,96	29,3
4	7,41	28,8		34	7,97	29,3
5	7,44	28,8		35	7,98	29,4
6	7,46	28,8	*36.34; 8,0	36	7,99	29,4
7	7,49	28,8		37	8,00	29,7
8	7,51	28,9		38	8,01	29,7
9	7,54	28,9		39	8,02	29,8
10	7,57	28,9		40	8,04	29,7
11	7,59	28,9		41	8,05	29,7
12	7,61	28,9		42	8,06	29,8
13	7,63	29,0		43	8,07	29,8
14	7,65	29,0		44	8,08	29,8
15	7,67	29,0		45	8,10	29,9
16	7,69	29,0		46	8,11	29,9
17	7,72	29,0		47	8,12	29,9
18	7,73	29,0		48	8,13	29,9
19	7,75	29,0		49	8,14	29,9
20	7,76	29,0		50	8,14	29,9
21	7,79	29,1	*21.45; 7,8	51	8,15	29,9
22	7,80	29,1		52	8,15	29,9
23	7,82	29,1		53	8,16	29,9
24	7,84	29,1		54	8,17	29,9
25	7,86	29,1		55	8,18	29,9
26	7,87	29,1		56	8,19	29,9
27	7,88	29,1		57	8,19	29,9
28	7,90	29,2		58		
29	7,91	29,2		59		
30	7,92	29,2		60		

Belüftungsende: 57:18; 8,2

Auswertung Belüftungsversuch					
Trockensubstanz					
Probenbezeichnung	pH; T in °C	Einwaage	Trübwasser	Rückstand	TS
		in g	in g	in % _m	in g/kg
FS_L_0_nb_7,52_20°C	7,52; 20°C	250,1	173,4	30,67	94,52
FS_L_0_nb_7,33_30°C	7,33; 30°C	250,7	174,5	30,39	96,88
FS_L_1,8_b6_W1_7,8	7,8; 30°C	250,5	177,4	29,18	103,55
FS_L_1,8_b6_W1_8,0	8,0; 30°C	250,0	178,1	28,76	104,63
FS_L_1,8_b6_W1_8,2	8,2; 30°C	250,3	179,8	28,17	109,48
Gelöstionen					
Probenbezeichnung	pH	PO ₄ -P	NH ₄ -N	Mg	Ca
		in mg/l			
FS_L_0_nb_7,52_20°C	7,52	252,3	1407,9	7,6	24,8
FS_L_1,8_nb_7,22	7,22	227,7	1477,2	3,8	17,9
FS_L_1,8_b6_W1_7,8	7,80	165,0	1516,5	3,1	14,5
FS_L_1,8_b6_W1_8,0	8,00	142,2	1412,7	1,3	7,8
FS_L_1,8_b6_W1_8,2	8,20	121,5	1383,9	0,5	8,6
Auswertung Rücklöseversuch					
Datum 29.-30.04.2016		Uhrzeit Versuchsbeginn 12:37		Uhrzeit Versuchsende 13:24	
Probenbezeichnung	pH	PO ₄ -P	NH ₄ -N	Mg	Ca
		in mg/l			
FS_L_0_nb_24_9	7,27	245,7	1454,7	0,5	12,9
FS_L_1,8_b6_W1_24	7,94	142,2	1394,1	0,5	2,2
Bemerkungen					
Der Rückstand wurde im Rücklöseversuch für den belüfteten, mit Fällmittel versetzten Schlamm zu 29,5 % und im nicht belüfteten Schlamm zu 30,41% bestimmt; die TS betrug jeweils 104,26g/kg und 98,66g/kg.					

Versuchsprotokoll Belüftungsversuch Faulschlamm						
Datum		Uhrzeit Versuchsbeginn		Uhrzeit Versuchsende		
16.03.2016		12:15		14:10		
Versuchsbezeichnung				FS_L_1,8_b8		
Verwendeter Faulschlamm				Linz		
Fällmittel				1,8g MgCl ₂ *6H ₂ O		
Belüftung bei 1bar						
Anemometer		in l/min		8		
Steighöhe		1l in s		15		2l in s
Steighöhe		in l/min		4,00		
Verbrauchte Luftmenge		in l		417,53		
Versuchsdurchführung						
pH-Wert	20°C		30°C		nach Fällmittelzugabe	
	7,25		7,15		7,09	
Zeit in min	pH-Wert	T in °C		Zeit in min	pH-Wert	T in °C
1	7,15	28,5		46	7,90	28,1
2	7,19	28,4		47	7,91	28,1
3	7,22	28,4		48	7,91	28,1
4	7,25	28,4		49	7,92	28,1
5	7,28	28,4		50	7,93	28,1
6	7,32	28,4		51	7,94	28,1
7	7,34	28,4		52	7,95	28,1
8	7,35	28,4		53	7,95	28,1
9	7,38	28,4		54	7,96	28,1
10	7,41	28,4		55	7,97	28,1
11	7,43	28,4		56	7,97	28,1
12	7,45	28,4		57	7,98	28,1
13	7,47	28,4		58	7,99	28,0
14	7,49	28,4	*8,0; 59:34	59	7,99	28,0
15	7,51	28,3		60	8,00	28,3
16	7,53	28,3		61	8,00	28,4
17	7,55	28,3		62	8,01	28,2
18	7,57	28,3		63	8,02	28,2
19	7,59	28,3		64	8,02	28,2
20	7,61	28,3		65	8,03	28,3
21	7,63	28,3		66	8,03	28,3
22	7,65	28,3		67	8,03	28,3
23	7,66	28,3		68	8,03	28,3
24	7,67	28,3		69	8,04	28,3
25	7,68	28,3		70	8,05	28,2
26	7,69	28,3		71	8,05	28,2
27	7,70	28,2		72	8,06	28,2
28	7,72	28,2		73	8,07	28,2
29	7,73	28,2		74	8,08	28,2
30	7,73	28,2		75	8,08	28,2
31	7,74	28,3		76	8,09	28,2
32	7,75	28,3		77	8,09	28,2
33	7,77	28,2		78	8,10	28,2
34	7,78	28,1		79	8,10	28,2
35	7,79	28,1	* 7,8; 35:55	80	8,10	28,2
36	7,80	28,1		81	8,11	28,3
37	7,81	28,1		82	8,11	28,3
38	7,82	28,1		83	8,12	28,2
39	7,83	28,1		84	8,12	28,2
40	7,84	28,1		85	8,13	28,2
41	7,85	28,1		86	8,13	28,2
42	7,86	28,1		87	8,13	28,2
43	7,87	28,1		88	8,14	28,2
44	7,88	28,1		89	8,15	28,2
45	7,89	28,1		90	8,15	28,2

Zeit in min	pH-Wert	T in °C		Zeit in min	pH-Wert	T in °C
91	8,15	28,2		136		
92	8,15	28,2		137		
93	8,16	28,2		138		
94	8,16	28,2		139		
95	8,16	28,2		140		
96	8,17	28,2		141		
97	8,17	28,2		142		
98	8,18	28,2		143		
99	8,18	28,2		144		
100	8,18	28,2		145		
101	8,18	28,2		146		
102	8,19	28,1		147		
103	8,19	28,1		148		
104	8,20	28,2		149		
105	Belüftungsende: 8,2; 104:23			150		
106				151		
107				152		
108				153		
109				154		
110				155		
111				156		
112				157		
113				158		
114				159		
115				160		
116				161		
117				162		
118				163		
119				164		
120				165		
121				166		
122				167		
123				168		
124				169		
125				170		
126				171		
127				172		
128				173		
129				174		
130				175		
131				176		
132				177		
133				178		
134				179		
135				180		

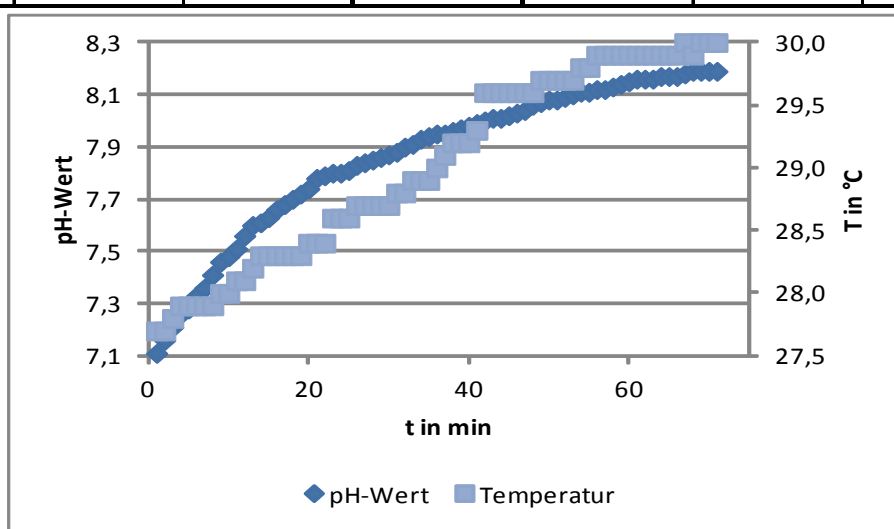


Auswertung Belüftungsversuch																																			
Trockensubstanz																																			
Probenbezeichnung	pH; T in °C	Einwaage	Trübwasser	Rückstand	TS																														
		in g	in g	in % _m	in g/kg																														
FS_L_0_nb_7,25_20°C	7,25; 20°C	250,2	168,6	32,61	94,9																														
FS_L_0_nb_7,15_30°C	7,15; 30°C	250,8	172	31,42	99,7																														
FS_L_1,8_b8_7,8	7,8; 30°C	250,8	175,8	29,90	107,4																														
FS_L_1,8_b8_8,0	8,0; 30°C	250,3	176,7	29,40	105,1																														
FS_L_1,8_b8_8,2	8,2; 30°C	250,3	178	28,89	106,2																														
Gelöstionen																																			
Probenbezeichnung	pH	PO ₄ -P	NH ₄ -N	Mg	Ca																														
		in mg/l																																	
FS_L_0_nb_7,25_20°C	7,25	254,4	1374	10,3	43,8																														
FS_L_1,8_nb_7,09	7,09	203,7	1296,3	32,9	48,9																														
FS_L_1,8_b8_7,8	7,80	138,9	1305	5,8	23,1																														
FS_L_1,8_b8_8,0	8,00	118,2	1248,3	7	19,2																														
FS_L_1,8_b8_8,2	8,20	98,1	1250,1	3,2	12,6																														
<table border="1"> <caption>Data for Scatter Plot</caption> <thead> <tr> <th>pH-Wert</th> <th>PO₄-P (mg/l)</th> <th>NH₄-N (mg/l)</th> <th>Mg (mg/l)</th> <th>Ca (mg/l)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>7,09</td> <td>203,7</td> <td>1296,3</td> <td>32,9</td> <td>48,9</td> </tr> <tr> <td>7,25</td> <td>254,4</td> <td>1374</td> <td>10,3</td> <td>43,8</td> </tr> <tr> <td>7,80</td> <td>138,9</td> <td>1305</td> <td>5,8</td> <td>23,1</td> </tr> <tr> <td>8,00</td> <td>118,2</td> <td>1248,3</td> <td>7</td> <td>19,2</td> </tr> <tr> <td>8,20</td> <td>98,1</td> <td>1250,1</td> <td>3,2</td> <td>12,6</td> </tr> </tbody> </table>						pH-Wert	PO ₄ -P (mg/l)	NH ₄ -N (mg/l)	Mg (mg/l)	Ca (mg/l)	7,09	203,7	1296,3	32,9	48,9	7,25	254,4	1374	10,3	43,8	7,80	138,9	1305	5,8	23,1	8,00	118,2	1248,3	7	19,2	8,20	98,1	1250,1	3,2	12,6
pH-Wert	PO ₄ -P (mg/l)	NH ₄ -N (mg/l)	Mg (mg/l)	Ca (mg/l)																															
7,09	203,7	1296,3	32,9	48,9																															
7,25	254,4	1374	10,3	43,8																															
7,80	138,9	1305	5,8	23,1																															
8,00	118,2	1248,3	7	19,2																															
8,20	98,1	1250,1	3,2	12,6																															
Auswertung Rücklöseversuch																																			
Datum 16.-17.3.2016		Uhrzeit Versuchsbeginn 14:15		Uhrzeit Versuchsende 14:40																															
Probenbezeichnung	pH	PO ₄ -P	NH ₄ -N	Mg	Ca																														
		in mg/l																																	
FS_L_0_nb_24_3	7,08	259,8	1449,6	5,3	36,3																														
FS_L_1,8_b8_24	7,77	147,6	1290	4,4	19,7																														
Bemerkungen																																			
Der Rückstand wurde im Rücklöseversuch für den belüfteten Schlamm zu 30,61% und im nicht belüfteten Schlamm zu 32% bestimmt; die TS betrug jeweils 100,05 und 93,75 g/kg.																																			

10.4.4. Belüftung mit unterstöchiometrischer Menge Fällmittel - $0,9 \frac{g}{l} MgCl_2 \cdot 6H_2O$

Versuchsprotokoll Belüftungsversuch Faulschlamm						
Datum		Uhrzeit Versuchsbeginn		Uhrzeit Versuchsende		
31.03.2016		10:00		11:42		
Versuchsbezeichnung				FS_L_2,7_b4		
Verwendeter Faulschlamm				Linz		
Fällmittel				2,7g $MgCl_2 \cdot 6H_2O$		
Belüftung bei 1bar						
Anemometer		in l/min		4		
Steighöhe		1l in s		30		2l in s 60
Steighöhe		in l/min		2,000		
Verbrauchte Luftmenge		in l		143,73		
Versuchsdurchführung						
pH-Wert	20°C		30°C		nach Fällmittelzugabe	
	7,23		7,16		7,07	
Zeit in min	pH-Wert	T in °C		Zeit in min	pH-Wert	T in °C
1	7,11	27,7		46	8,03	29,6
2	7,16	27,7		47	8,04	29,6
3	7,21	27,8		48	8,06	29,6
4	7,26	27,9		49	8,07	29,7
5	7,28	27,9		50	8,08	29,7
6	7,33	27,9		51	8,08	29,7
7	7,36	27,9		52	8,09	29,7
8	7,41	27,9		53	8,10	29,7
9	7,46	28,0		54	8,11	29,8
10	7,48	28,0		55	8,11	29,8
11	7,51	28,1		56	8,12	29,9
12	7,56	28,1		57	8,12	29,9
13	7,60	28,2		58	8,13	29,9
14	7,61	28,3		59	8,14	29,9
15	7,63	28,3		60	8,15	29,9
16	7,66	28,3		61	8,16	29,9
17	7,68	28,3		62	8,16	29,9
18	7,70	28,3		63	8,16	29,9
19	7,72	28,3		64	8,17	29,9
20	7,74	28,4		65	8,17	29,9
21	7,78	28,4		66	8,17	29,9
22	7,79	28,4	*22:35; 7,8	67	8,18	30,0
23	7,80	28,6		68	8,19	29,9
24	7,80	28,6		69	8,19	30,0
25	7,81	28,6		70	8,19	30,0
26	7,83	28,7		71	8,19	30,0
27	7,84	28,7		72		
28	7,85	28,7		73	Belüftungsende: 71:52; 8,2	
29	7,86	28,7		74		
30	7,87	28,7		75		
31	7,88	28,8		76		
32	7,90	28,8		77		
33	7,91	28,9		78		
34	7,93	28,9		79		
35	7,94	28,9		80		
36	7,95	29,0		81		
37	7,95	29,1		82		
38	7,96	29,2		83		
39	7,97	29,2		84		
40	7,98	29,2		85		
41	7,99	29,3	*41:42; 8,0	86		
42	8,00	29,6		87		
43	8,01	29,6		88		
44	8,01	29,6		89		
45	8,02	29,6		90		

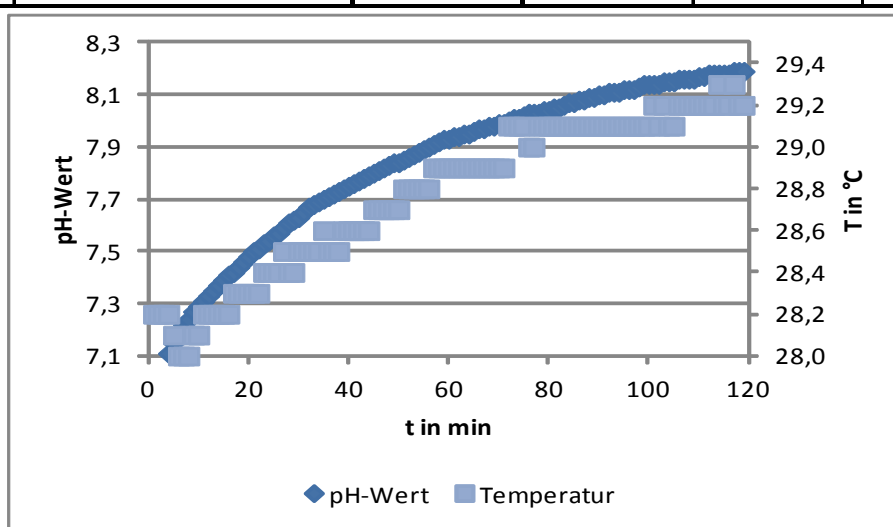
Zeit in min	pH-Wert	T in °C		Zeit in min	pH-Wert	T in °C
91						
92						
93						
94						
95						
96						
97						
98						
99						
100						
101						
102						
103						
104						
105						
106						
107						
108						
109						
110						
111						
112						
113						
114						
115						
116						
117						
118						
119						
120						
121						
122						
123						
124						
125						
126						
127						
128						
129						
130						
131						
132						
133						
134						
135						



Auswertung Belüftungsversuch					
Trockensubstanz					
Probenbezeichnung	pH; T in °C	Einwaage	Trübwasser	Rückstand	TS
		in g	in g	in % _m	in g/kg
FS_L_0_nb_7,23_20°C	7,23; 20°C	250,9	188,7	24,79	93,1
FS_L_0_nb_7,16_30°C	7,16; 30°C	249,5	189,3	24,13	96,9
FS_L_2,7_b4_7,8	7,8; 30°C	250,3	192,5	23,09	98,4
FS_L_2,7_b4_8,0	8,0; 30°C	249,7	193,5	22,51	103,9
FS_L_2,7_b4_8,2	8,2; 30°C	249,8	194,1	22,30	107,5
Gelöstionen					
Probenbezeichnung	pH	PO ₄ -P	NH ₄ -N	Mg	Ca
		in mg/l			
FS_L_0_nb_7,23_20°C	7,23	258	1381,1	11	45,9
FS_L_2,7_nb_7,07	7,07	192,9	1381,1	39,5	45,9
FS_L_2,7_b4_7,8	7,80	112,5	1337,4	9,1	29,2
FS_L_2,7_b4_8,0	8,00	86,4	1350,3	5,1	20,6
FS_L_2,7_b4_8,2	8,20	65,7	1237,8	3,4	13,5
Auswertung Rücklöseversuch					
Datum		Uhrzeit Versuchsbeginn		Uhrzeit Versuchsende	
31.3.-1.04.2016		13:45		14:40	
Probenbezeichnung	pH	PO ₄ -P	NH ₄ -N	Mg	Ca
		in mg/l			
FS_L_0_nb_24_4	7,31	261	1425,3	11,4	45,2
FS_L_2,7_b4_24	8,1	103,2	1278,9	2,9	28,3
Bemerkungen					
Der Rückstand wurde im Rücklöseversuch für den belüfteten, mit Fällmittel versetzten Schlamm zu 23,44% und im nicht belüfteten Schlamm zu 24,43% bestimmt; die TS betrug jeweils 99,74 und 94,48 g/kg.					

Versuchsprotokoll Belüftungsversuch Faulschlamm						
Datum		Uhrzeit Versuchsbeginn		Uhrzeit Versuchsende		
21.04.2016		09:48		11:58		
Versuchsbezeichnung				FS_L_2,7_b4_W1		
Verwendeter Faulschlamm				Linz		
Fällmittel				2,7g MgCl ₂ *6H ₂ O		
Belüftung bei 1bar						
Anemometer		in l/min		4		
Steighöhe		1l in s		30		2l in s
Steighöhe		in l/min		1,967		
Verbrauchte Luftmenge		in l		234,66		
Versuchsdurchführung						
pH-Wert	20°C		30°C		nach Fällmittelzugabe	
	7,27		7,15		7,03	
Zeit in min	pH-Wert	T in °C		Zeit in min	pH-Wert	T in °C
1	7,01	28,2		46	7,81	28,7
2	7,04	28,2		47	7,82	28,7
3	7,07	28,2		48	7,83	28,7
4	7,11	28,2		49	7,84	28,7
5	7,15	28,1		50	7,84	28,7
6	7,18	28,0		51	7,85	28,8
7	7,22	28,0		52	7,86	28,8
8	7,24	28,0		53	7,87	28,8
9	7,27	28,1		54	7,88	28,8
10	7,29	28,1		55	7,89	28,8
11	7,31	28,2		56	7,90	28,8
12	7,33	28,2		57	7,91	28,9
13	7,35	28,2		58	7,92	28,9
14	7,37	28,2		59	7,93	28,9
15	7,39	28,2		60	7,93	28,9
16	7,41	28,2		61	7,94	28,9
17	7,42	28,3		62	7,94	28,9
18	7,44	28,3		63	7,95	28,9
19	7,46	28,3		64	7,95	28,9
20	7,48	28,3		65	7,96	28,9
21	7,50	28,3		66	7,97	28,9
22	7,51	28,3		67	7,97	28,9
23	7,53	28,4		68	7,98	28,9
24	7,54	28,4		69	7,98	28,9
25	7,56	28,4		70	7,99	28,9
26	7,57	28,4	*71:51; 8,0	71	7,99	28,9
27	7,59	28,5		72	8,00	29,1
28	7,61	28,4		73	8,01	29,1
29	7,62	28,4		74	8,01	29,1
30	7,63	28,5		75	8,02	29,1
31	7,65	28,5		76	8,03	29,0
32	7,67	28,5		77	8,03	29,0
33	7,68	28,5		78	8,03	29,1
34	7,69	28,5		79	8,04	29,1
35	7,70	28,6		80	8,04	29,1
36	7,71	28,5		81	8,05	29,1
37	7,72	28,5		82	8,05	29,1
38	7,73	28,5		83	8,06	29,1
39	7,74	28,6		84	8,07	29,1
40	7,75	28,6		85	8,07	29,1
41	7,76	28,6		86	8,08	29,1
42	7,77	28,6		87	8,08	29,1
43	7,78	28,6		88	8,09	29,1
44	7,79	28,6		89	8,09	29,1
45	7,80	28,7	*44:43; 7,8	90	8,10	29,1

Zeit in min	pH-Wert	T in °C		Zeit in min	pH-Wert	T in °C
91	8,10	29,1		136		
92	8,11	29,1		137		
93	8,11	29,1		138		
94	8,11	29,1		139		
95	8,12	29,1		140		
96	8,12	29,1		141		
97	8,12	29,1		142		
98	8,13	29,1		143		
99	8,14	29,1		144		
100	8,14	29,1		145		
101	8,14	29,2		146		
102	8,14	29,1		147		
103	8,15	29,2		148		
104	8,15	29,1		149		
105	8,15	29,1		150		
106	8,16	29,2		151		
107	8,16	29,2		152		
108	8,16	29,2		153		
109	8,16	29,2		154		
110	8,17	29,2		155		
111	8,17	29,2		156		
112	8,18	29,2		157		
113	8,18	29,2		158		
114	8,18	29,3		159		
115	8,18	29,2		160		
116	8,18	29,2		161		
117	8,19	29,3		162		
118	8,19	29,2		163		
119	8,19	29,2		164		
120	Belüftungsende: 119:17; 8,2			165		
121				166		
122				167		
123				168		
124				169		
125				170		
126				171		
127				172		
128				173		
129				174		
130				175		
131				176		
132				177		
133				178		
134				179		
135				180		



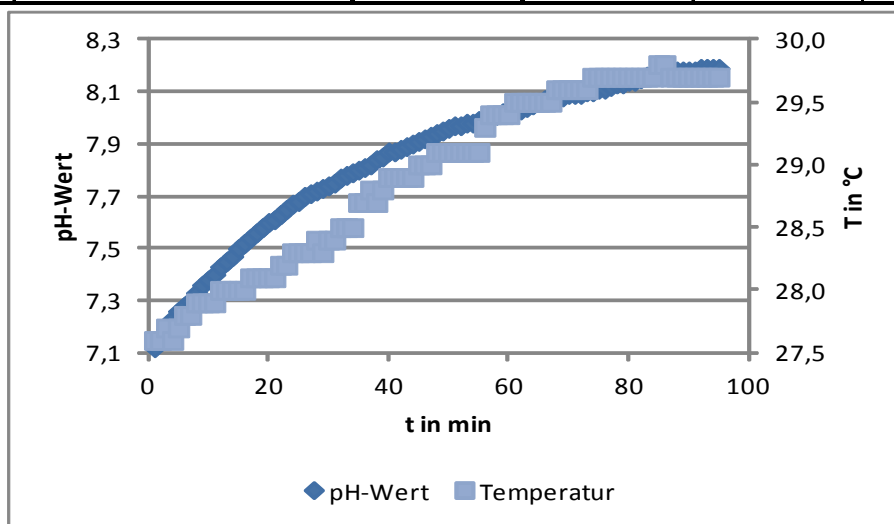
Auswertung Belüftungsversuch																																								
Trockensubstanz																																								
Probenbezeichnung	pH; T in °C	Einwaage	Trübwasser	Rückstand	TS																																			
		in g	in g	in % _m	in g/kg																																			
FS_L_0_nb_7,27_20°C	7,27; 20°C	250,5	171,3	31,62	95,97																																			
FS_L_0_nb_7,15_30°C	7,15; 30°C	250,1	173,3	30,71	97																																			
FS_L_2,7_b4_W1_7,8	7,8; 30°C	250,2	177,6	29,02	105,81																																			
FS_L_2,7_b4_W1_8,0	8,0; 30°C	250,0	179,0	28,40	109,58																																			
FS_L_2,7_b4_W1_8,2	8,2; 30°C	250,0	180,2	27,92	108,85																																			
Gelöstionen																																								
Probenbezeichnung	pH	PO ₄ -P	NH ₄ -N	Mg	Ca																																			
		in mg/l																																						
FS_L_0_nb_7,27_20°C	7,27	257,1	1419,3	8,4	38,8																																			
FS_L_2,7_nb_7,03	7,03	135	1443,3	22,5	31,2																																			
FS_L_2,7_b4_W1_7,8	7,80	112,8	1410,6	1,5	12,8																																			
FS_L_2,7_b4_W1_8,0	8,00	97,8	1426,5	2,1	14,8																																			
FS_L_2,7_b4_W1_8,2	8,20	76,2	1371,3	0,6	2,1																																			
<table border="1"> <caption>Data for Scatter Plot</caption> <thead> <tr> <th>pH-Wert</th> <th>PO₄-P (mg/l)</th> <th>NH₄-N (mg/l)</th> <th>Mg (mg/l)</th> <th>Ca (mg/l)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>7,0</td> <td>150</td> <td>1450</td> <td>20</td> <td>30</td> </tr> <tr> <td>7,27</td> <td>257,1</td> <td>1419,3</td> <td>8,4</td> <td>38,8</td> </tr> <tr> <td>7,03</td> <td>135</td> <td>1443,3</td> <td>22,5</td> <td>31,2</td> </tr> <tr> <td>7,80</td> <td>112,8</td> <td>1410,6</td> <td>1,5</td> <td>12,8</td> </tr> <tr> <td>8,00</td> <td>97,8</td> <td>1426,5</td> <td>2,1</td> <td>14,8</td> </tr> <tr> <td>8,20</td> <td>76,2</td> <td>1371,3</td> <td>0,6</td> <td>2,1</td> </tr> </tbody> </table>						pH-Wert	PO ₄ -P (mg/l)	NH ₄ -N (mg/l)	Mg (mg/l)	Ca (mg/l)	7,0	150	1450	20	30	7,27	257,1	1419,3	8,4	38,8	7,03	135	1443,3	22,5	31,2	7,80	112,8	1410,6	1,5	12,8	8,00	97,8	1426,5	2,1	14,8	8,20	76,2	1371,3	0,6	2,1
pH-Wert	PO ₄ -P (mg/l)	NH ₄ -N (mg/l)	Mg (mg/l)	Ca (mg/l)																																				
7,0	150	1450	20	30																																				
7,27	257,1	1419,3	8,4	38,8																																				
7,03	135	1443,3	22,5	31,2																																				
7,80	112,8	1410,6	1,5	12,8																																				
8,00	97,8	1426,5	2,1	14,8																																				
8,20	76,2	1371,3	0,6	2,1																																				
Auswertung Rücklöseversuch																																								
Datum 21.-22.04.2016		Uhrzeit Versuchsbeginn 17:35		Uhrzeit Versuchsende 15:15																																				
Probenbezeichnung	pH	PO ₄ -P	NH ₄ -N	Mg	Ca																																			
		in mg/l																																						
FS_L_0_nb_24_7	7,18	245,1	1422	1,9	20,2																																			
FS_L_2,7_b4_W1_24	7,94	113,4	1374,9	0,6	13,8																																			
Bemerkungen																																								
Der Rückstand wurde im Rücklöseversuch für den belüfteten, mit Fällmittel versetzten Schlamm zu 28,74% und im nicht belüfteten Schlamm zu 30,54% bestimmt; die TS betrug jeweils 103,90g/kg und 100,06g/kg.																																								

Versuchsprotokoll Belüftungsversuch Faulschlamm						
Datum		Uhrzeit Versuchsbeginn		Uhrzeit Versuchsende		
31.03.2016		12:24		13:43		
Versuchsbezeichnung				FS_L_2,7_b6		
Verwendeter Faulschlamm				Linz		
Fällmittel				2,7g MgCl ₂ *6H ₂ O		
Belüftung bei 1bar						
Anemometer		in l/min	6			
Steighöhe		1l in s	20	2l in s		41
Steighöhe		in l/min	2,927			
Verbrauchte Luftmenge		in l	176,293			
Versuchsdurchführung						
pH-Wert	20°C		30°C		nach Fällmittelzugabe	
	7,23		7,16		7,02	
Zeit in min	pH-Wert	T in °C		Zeit in min	pH-Wert	T in °C
1	7,20	28,9		31	7,93	28,9
2	7,24	28,9		32	7,94	28,9
3	7,26	28,9		33	7,95	28,9
4	7,28	28,9		34	7,96	29,1
5	7,32	28,9		35	7,97	29,1
6	7,36	28,9		36	7,98	29,1
7	7,39	28,9	*37:21; 8,0	37	7,99	29,1
8	7,42	29,0		38	8,01	29,1
9	7,45	29,0		39	8,02	29,0
10	7,47	29,0		40	8,04	29,0
11	7,51	29,0		41	8,05	29,1
12	7,55	29,0		42	8,06	29,1
13	7,58	28,9		43	8,07	29,0
14	7,60	28,9		44	8,08	29,0
15	7,62	28,9		45	8,09	29,0
16	7,64	28,9		46	8,09	29,0
17	7,67	28,9		47	8,10	29,0
18	7,69	28,9		48	8,11	29,0
19	7,72	28,9		49	8,12	29,0
20	7,74	28,9		50	8,13	29,0
21	7,76	28,9		51	8,14	29,0
22	7,78	28,9		52	8,14	29,0
23	7,79	28,9	*23:46; 7,8	53	8,15	29,0
24	7,81	28,9		54	8,16	29,0
25	7,83	28,9		55	8,16	29,0
26	7,85	28,9		56	8,17	29,0
27	7,87	28,9		57	8,18	28,9
28	7,88	28,9		58	8,19	28,9
29	7,90	28,9	Belüftungsende	59	8,19	28,9
30	7,91	28,9	60:14: 8,2	60	8,20	28,9

Auswertung Belüftungsversuch																																			
Trockensubstanz																																			
Probenbezeichnung	pH; T in °C	Einwaage	Trübwasser	Rückstand	TS																														
		in g	in g	in % _m	in g/kg																														
FS_L_0_nb_7,23_20°C	7,23; 20°C	250,9	188,7	24,79	93,1																														
FS_L_0_nb_7,16_30°C	7,16; 30°C	249,5	189,3	24,13	96,9																														
FS_L_2,7_b6_7,8	7,8; 30°C	250,2	193,5	22,66	105,8																														
FS_L_2,7_b6_8,0	8,0; 30°C	249,8	193,9	22,38	103,9																														
FS_L_2,7_b6_8,2	8,2; 30°C	249,8	195,3	21,82	104,7																														
Gelöstionen																																			
Probenbezeichnung	pH	PO ₄ -P	NH ₄ -N	Mg	Ca																														
		in mg/l																																	
FS_L_0_nb_7,23_20°C	7,23	258	1381,8	11	45,9																														
FS_L_2,7_nb_7,02	7,02	151,8	1350,3	65,5	50,2																														
FS_L_2,7_b6_7,8	7,80	110,7	1312,8	8,5	23,9																														
FS_L_2,7_b6_8,0	8,00	90,3	1285,8	3,9	20,6																														
FS_L_2,7_b6_8,2	8,20	77,1	1290,3	1,1	14,4																														
<table border="1"> <caption>Data for Scatter Plot</caption> <thead> <tr> <th>pH-Wert</th> <th>PO₄-P (mg/l)</th> <th>NH₄-N (mg/l)</th> <th>Mg (mg/l)</th> <th>Ca (mg/l)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>7,02</td> <td>151,8</td> <td>1350,3</td> <td>65,5</td> <td>50,2</td> </tr> <tr> <td>7,23</td> <td>258</td> <td>1381,8</td> <td>11</td> <td>45,9</td> </tr> <tr> <td>7,80</td> <td>110,7</td> <td>1312,8</td> <td>8,5</td> <td>23,9</td> </tr> <tr> <td>8,00</td> <td>90,3</td> <td>1285,8</td> <td>3,9</td> <td>20,6</td> </tr> <tr> <td>8,20</td> <td>77,1</td> <td>1290,3</td> <td>1,1</td> <td>14,4</td> </tr> </tbody> </table>						pH-Wert	PO ₄ -P (mg/l)	NH ₄ -N (mg/l)	Mg (mg/l)	Ca (mg/l)	7,02	151,8	1350,3	65,5	50,2	7,23	258	1381,8	11	45,9	7,80	110,7	1312,8	8,5	23,9	8,00	90,3	1285,8	3,9	20,6	8,20	77,1	1290,3	1,1	14,4
pH-Wert	PO ₄ -P (mg/l)	NH ₄ -N (mg/l)	Mg (mg/l)	Ca (mg/l)																															
7,02	151,8	1350,3	65,5	50,2																															
7,23	258	1381,8	11	45,9																															
7,80	110,7	1312,8	8,5	23,9																															
8,00	90,3	1285,8	3,9	20,6																															
8,20	77,1	1290,3	1,1	14,4																															
Auswertung Rücklöseversuch																																			
Datum 31.03.-01.04.2016		Uhrzeit Versuchsbeginn 13:45		Uhrzeit Versuchsende 14:40																															
Probenbezeichnung	pH	PO ₄ -P	NH ₄ -N	Mg	Ca																														
		in mg/l																																	
FS_L_0_nb_24_4	7,31	261	1425,3	11,4	45,2																														
FS_L_2,7_b6_24	8,07	108	1342,5	1,5	25,9																														
Bemerkungen																																			
Der Rückstand wurde im Rücklöseversuch für den belüfteten, mit Fällmittel versetzten Schlamm zu 22,75% und im nicht belüfteten Schlamm zu 24,43% bestimmt; die TS betrug jeweils 102,31 und 94,48 g/kg.																																			

Versuchsprotokoll Belüftungsversuch Faulschlamm						
Datum		Uhrzeit Versuchsbeginn		Uhrzeit Versuchsende		
18.04.2016		09:45		11:35		
Versuchsbezeichnung				FS_L_2,7_b6_W1		
Verwendeter Faulschlamm				Linz		
Fällmittel				2,7g MgCl ₂ *6H ₂ O		
Belüftung bei 1bar						
Anemometer		in l/min		6		
Steighöhe		1l in s		20		2l in s
Steighöhe		in l/min		3,000		
Verbrauchte Luftmenge		in l		287,40		
Versuchsdurchführung						
pH-Wert	20°C		30°C		nach Fällmittelzugabe	
	7,29		7,19		7,12	
Zeit in min	pH-Wert	T in °C		Zeit in min	pH-Wert	T in °C
1	7,12	27,6		46	7,92	29,0
2	7,16	27,6		47	7,93	29,0
3	7,19	27,7		48	7,94	29,1
4	7,23	27,6		49	7,95	29,1
5	7,26	27,7		50	7,96	29,1
6	7,28	27,8		51	7,97	29,1
7	7,30	27,8		52	7,97	29,1
8	7,33	27,9		53	7,98	29,1
9	7,36	27,9		54	7,98	29,1
10	7,38	27,9		55	7,99	29,1
11	7,40	27,9	*55:42, 8,0	56	8,00	29,3
12	7,43	28,0		57	8,01	29,4
13	7,45	28,0		58	8,01	29,4
14	7,47	28,0		59	8,02	29,4
15	7,50	28,0		60	8,02	29,4
16	7,52	28,0		61	8,03	29,5
17	7,54	28,1		62	8,03	29,5
18	7,56	28,1		63	8,04	29,5
19	7,58	28,1		64	8,05	29,5
20	7,60	28,1		65	8,06	29,5
21	7,61	28,1		66	8,07	29,5
22	7,63	28,2		67	8,07	29,5
23	7,65	28,2		68	8,08	29,6
24	7,67	28,3		69	8,08	29,6
25	7,68	28,3		70	8,09	29,6
26	7,70	28,3		71	8,09	29,6
27	7,71	28,3		72	8,09	29,6
28	7,72	28,4		73	8,10	29,6
29	7,73	28,3		74	8,10	29,7
30	7,74	28,4		75	8,11	29,7
31	7,75	28,4		76	8,11	29,7
32	7,77	28,5		77	8,12	29,7
33	7,78	28,5		78	8,13	29,7
34	7,79	28,5		79	8,13	29,7
35	7,80	28,7	* 34:51; 7,8	80	8,14	29,7
36	7,81	28,7		81	8,14	29,7
37	7,82	28,8		82	8,15	29,7
38	7,84	28,7		83	8,16	29,7
39	7,85	28,8		84	8,16	29,7
40	7,87	28,9		85	8,16	29,8
41	7,87	28,9		86	8,16	29,8
42	7,88	28,9		87	8,17	29,7
43	7,89	28,9		88	8,18	29,7
44	7,90	28,9		89	8,18	29,7
45	7,91	29,0		90	8,18	29,7

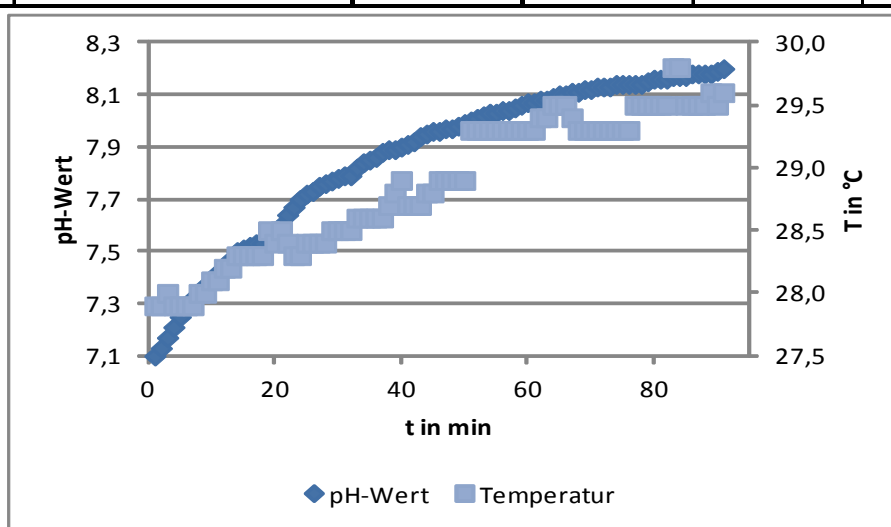
Zeit in min	pH-Wert	T in °C		Zeit in min	pH-Wert	T in °C
91	8,18	29,7		136		
92	8,19	29,7		137		
93	8,19	29,7		138		
94	8,19	29,7		139		
95	8,19	29,7		140		
96	Belüftungsende: 95:48; 8,2			141		
97				142		
98				143		
99				144		
100				145		
101				146		
102				147		
103				148		
104				149		
105				150		
106				151		
107				152		
108				153		
109				154		
110				155		
111				156		
112				157		
113				158		
114				159		
115				160		
116				161		
117				162		
118				163		
119				164		
120				165		
121				166		
122				167		
123				168		
124				169		
125				170		
126				171		
127				172		
128				173		
129				174		
130				175		
131				176		
132				177		
133				178		
134				179		
135				180		



Auswertung Belüftungsversuch																																			
Trockensubstanz																																			
Probenbezeichnung	pH; T in °C	Einwaage	Trübwasser	Rückstand	TS																														
		in g	in g	in % _m	in g/kg																														
FS_L_0_nb_7,29_20°C	7,29; 20°C	249,9	164,4	34,21	93,74																														
FS_L_0_nb_7,19_30°C	7,19; 30°C	250,3	167,2	33,20	99,70																														
FS_L_2,7_b6_W1_7,8	7,8; 30°C	250,2	171,2	31,57	103,85																														
FS_L_2,7_b6_W1_8,0	8,0; 30°C	249,7	172,1	31,08	105,73																														
FS_L_2,7_b6_W1_8,2	8,2; 30°C	249,9	173,7	30,49	108,09																														
Gelöstionen																																			
Probenbezeichnung	pH	PO ₄ -P	NH ₄ -N	Mg	Ca																														
		in mg/l																																	
FS_L_0_nb_7,29_20°C	7,29	241,8	1381,2	3,5	33,7																														
FS_L_2,7_nb_7,12	7,12	240,9	1400,4	0,8	27,4																														
FS_L_2,7_b6_W1_7,8	7,80	98,1	1269,3	2,7	23,4																														
FS_L_2,7_b6_W1_8,0	8,00	89,4	1355,4	8,1	24,2																														
FS_L_2,7_b6_W1_8,2	8,20	68,7	1286,2	0,5	15,5																														
<table border="1"> <caption>Data for Scatter Plot</caption> <thead> <tr> <th>pH-Wert</th> <th>PO₄-P (mg/l)</th> <th>NH₄-N (mg/l)</th> <th>Mg (mg/l)</th> <th>Ca (mg/l)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>7,29</td> <td>241,8</td> <td>1381,2</td> <td>3,5</td> <td>33,7</td> </tr> <tr> <td>7,12</td> <td>240,9</td> <td>1400,4</td> <td>0,8</td> <td>27,4</td> </tr> <tr> <td>7,80</td> <td>98,1</td> <td>1269,3</td> <td>2,7</td> <td>23,4</td> </tr> <tr> <td>8,00</td> <td>89,4</td> <td>1355,4</td> <td>8,1</td> <td>24,2</td> </tr> <tr> <td>8,20</td> <td>68,7</td> <td>1286,2</td> <td>0,5</td> <td>15,5</td> </tr> </tbody> </table>						pH-Wert	PO ₄ -P (mg/l)	NH ₄ -N (mg/l)	Mg (mg/l)	Ca (mg/l)	7,29	241,8	1381,2	3,5	33,7	7,12	240,9	1400,4	0,8	27,4	7,80	98,1	1269,3	2,7	23,4	8,00	89,4	1355,4	8,1	24,2	8,20	68,7	1286,2	0,5	15,5
pH-Wert	PO ₄ -P (mg/l)	NH ₄ -N (mg/l)	Mg (mg/l)	Ca (mg/l)																															
7,29	241,8	1381,2	3,5	33,7																															
7,12	240,9	1400,4	0,8	27,4																															
7,80	98,1	1269,3	2,7	23,4																															
8,00	89,4	1355,4	8,1	24,2																															
8,20	68,7	1286,2	0,5	15,5																															
Auswertung Rücklöseversuch																																			
Datum		Uhrzeit Versuchsbeginn		Uhrzeit Versuchsende																															
18.-19.04.2016		11:40		14:25																															
Probenbezeichnung	pH	PO ₄ -P	NH ₄ -N	Mg	Ca																														
		in mg/l																																	
FS_L_0_nb_24_6	7,36	250,8	1472,7	0,2	2,7																														
FS_L_2,7_b6_W1_24	8,07	103,5	1290,6	0,1	9,7																														
Bemerkungen																																			
<p>Der Rückstand wurde im Rücklöseversuch für den belüfteten, mit Fällmittel versetzten Schlamm zu 32,48% und im nicht belüfteten Schlamm zu 33,35% bestimmt; die TS betrug jeweils 99,71g/kg und 94,49g/kg.</p>																																			

Versuchsprotokoll Belüftungsversuch Faulschlamm						
Datum		Uhrzeit Versuchsbeginn		Uhrzeit Versuchsende		
04.04.2016		10:58		12:46		
Versuchsbezeichnung				FS_L_2,7_b8		
Verwendeter Faulschlamm				Linz		
Fällmittel				2,7g MgCl ₂ *6H ₂ O		
Belüftung bei 1bar						
Anemometer		in l/min		8		
Steighöhe		1l in s		15		2l in s
Steighöhe		in l/min		4,000		
Verbrauchte Luftmenge		in l		365,53		
Versuchsdurchführung						
pH-Wert	20°C		30°C		nach Fällmittelzugabe	
	7,24		7,17		7,08	
Zeit in min	pH-Wert	T in °C		Zeit in min	pH-Wert	T in °C
1	7,10	27,9		46	7,96	28,9
2	7,13	27,9		47	7,97	28,9
3	7,17	28,0		48	7,97	28,9
4	7,21	27,9		49	7,98	28,9
5	7,25	27,9	*50:11; 8,0	50	7,99	28,9
6	7,29	27,9		51	8,00	29,3
7	7,32	27,9		52	8,01	29,3
8	7,34	28,0		53	8,02	29,3
9	7,37	28,0		54	8,03	29,3
10	7,39	28,1		55	8,03	29,3
11	7,42	28,1		56	8,04	29,3
12	7,44	28,2		57	8,04	29,3
13	7,47	28,2		58	8,05	29,3
14	7,50	28,3		59	8,06	29,3
15	7,51	28,3		60	8,07	29,3
16	7,52	28,3		61	8,07	29,3
17	7,53	28,3		62	8,08	29,4
18	7,53	28,3		63	8,08	29,4
19	7,55	28,5		64	8,09	29,5
20	7,58	28,4		65	8,10	29,5
21	7,60	28,5		66	8,10	29,5
22	7,64	28,4		67	8,11	29,4
23	7,67	28,3		68	8,11	29,3
24	7,70	28,3		69	8,12	29,3
25	7,72	28,4		70	8,12	29,3
26	7,73	28,4		71	8,13	29,3
27	7,75	28,4		72	8,13	29,3
28	7,76	28,4		73	8,13	29,3
29	7,77	28,5		74	8,14	29,3
30	7,78	28,5		75	8,14	29,3
31	7,79	28,5		76	8,14	29,3
32	7,79	28,5	*32:02; 7,8	77	8,14	29,5
33	7,82	28,6		78	8,14	29,5
34	7,84	28,6		79	8,15	29,5
35	7,85	28,6		80	8,16	29,5
36	7,86	28,6		81	8,16	29,5
37	7,88	28,6		82	8,16	29,5
38	7,89	28,7		83	8,17	29,8
39	7,89	28,8		84	8,17	29,8
40	7,90	28,9		85	8,17	29,5
41	7,91	28,7		86	8,18	29,5
42	7,92	28,7		87	8,18	29,5
43	7,94	28,7		88	8,18	29,5
44	7,95	28,8		89	8,18	29,6
45	7,96	28,8		90	8,19	29,5

Zeit in min	pH-Wert	T in °C		Zeit in min	pH-Wert	T in °C
91	8,20	29,6		136		
92	Belüftungsende: 91:23; 8,2			137		
93				138		
94				139		
95				140		
96				141		
97				142		
98				143		
99				144		
100				145		
101				146		
102				147		
103				148		
104				149		
105				150		
106				151		
107				152		
108				153		
109				154		
110				155		
111				156		
112				157		
113				158		
114				159		
115				160		
116				161		
117				162		
118				163		
119				164		
120				165		
121				166		
122				167		
123				168		
124				169		
125				170		
126				171		
127				172		
128				173		
129				174		
130				175		
131				176		
132				177		
133				178		
134				179		
135				180		

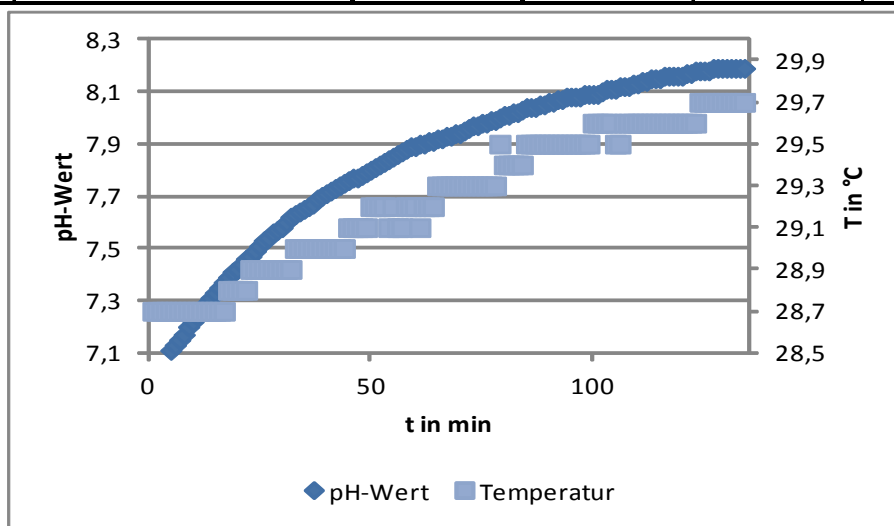


Auswertung Belüftungsversuch																																			
Trockensubstanz																																			
Probenbezeichnung	pH; T in °C	Einwaage	Trübwasser	Rückstand	TS																														
		in g	in g	in % _m	in g/kg																														
FS_L_0_nb_7,24_20°C	7,24; 20°C	250,0	162,9	34,84	93,61																														
FS_L_0_nb_7,17_30°C	7,17; 30°C	250,5	166,3	33,61	95,81																														
FS_L_2,7_b8_7,8	7,8; 30°C	250,6	170,1	32,12	101,52																														
FS_L_2,7_b8_8,0	8,0; 30°C	250,3	172,1	31,24	103,93																														
FS_L_2,7_b8_8,2	8,2; 30°C	249,6	172,2	31,01	105,11																														
Gelöstionen																																			
Probenbezeichnung	pH	PO ₄ -P	NH ₄ -N	Mg	Ca																														
		in mg/l																																	
FS_L_0_nb_7,24_20°C	7,24	245,7	1336,8	10,1	45,3																														
FS_L_2,7_nb_7,08	7,08	193,8	1334,7	18,9	48,4																														
FS_L_2,7_b8_7,8	7,80	114,6	1350,9	12,9	28,2																														
FS_L_2,7_b8_8,0	8,00	91,8	1316,1	2,7	20,4																														
FS_L_2,7_b8_8,2	8,20	73,8	1335,9	4,3	11,3																														
<table border="1"> <caption>Data for Scatter Plot</caption> <thead> <tr> <th>pH-Wert</th> <th>PO₄-P (mg/l)</th> <th>NH₄-N (mg/l)</th> <th>Mg (mg/l)</th> <th>Ca (mg/l)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>7,08</td> <td>200</td> <td>1300</td> <td>50</td> <td>45</td> </tr> <tr> <td>7,24</td> <td>250</td> <td>1337</td> <td>10</td> <td>45</td> </tr> <tr> <td>7,80</td> <td>115</td> <td>1351</td> <td>13</td> <td>28</td> </tr> <tr> <td>8,00</td> <td>92</td> <td>1316</td> <td>3</td> <td>20</td> </tr> <tr> <td>8,20</td> <td>74</td> <td>1336</td> <td>4</td> <td>11</td> </tr> </tbody> </table>						pH-Wert	PO ₄ -P (mg/l)	NH ₄ -N (mg/l)	Mg (mg/l)	Ca (mg/l)	7,08	200	1300	50	45	7,24	250	1337	10	45	7,80	115	1351	13	28	8,00	92	1316	3	20	8,20	74	1336	4	11
pH-Wert	PO ₄ -P (mg/l)	NH ₄ -N (mg/l)	Mg (mg/l)	Ca (mg/l)																															
7,08	200	1300	50	45																															
7,24	250	1337	10	45																															
7,80	115	1351	13	28																															
8,00	92	1316	3	20																															
8,20	74	1336	4	11																															
Auswertung Rücklöseversuch																																			
Datum 4.-5.04.2016		Uhrzeit Versuchsbeginn 12:50		Uhrzeit Versuchsende 13:20																															
Probenbezeichnung	pH	PO ₄ -P	NH ₄ -N	Mg	Ca																														
		in mg/l																																	
FS_L_0_nb_24_5	7,24	252,3	1411,8	11,9	43,9																														
FS_L_2,7_b8_24	7,98	111,6	1333,8	2,3	22,2																														
Bemerkungen																																			
Die TS wurde im Rücklöseversuch für den belüfteten, mit Fällmittel versetzten Schlamm zu 103,78 g/kg und im nicht belüfteten Schlamm zu 96,59 g/kg bestimmt.																																			

10.4.5. Belüftung mit stöchiometrischer Menge Fällmittel - $1,67 \frac{g}{l} MgCl_2 \cdot 6H_2O$

Versuchsprotokoll Belüftungsversuch Faulschlamm						
Datum		Uhrzeit Versuchsbeginn		Uhrzeit Versuchsende		
21.04.2016		12:42		15:10		
Versuchsbezeichnung				FS_L_5,0_b4		
Verwendeter Faulschlamm				Linz		
Fällmittel				5,0g $MgCl_2 \cdot 6H_2O$		
Belüftung bei 1bar						
Anemometer		in l/min		4		
Steighöhe		1l in s		30		2l in s
Steighöhe		in l/min		1,967		
Verbrauchte Luftmenge		in l		265,31		
Versuchsdurchführung						
pH-Wert	20°C		30°C		nach Fällmittelzugabe	
	7,27		7,15		6,96	
Zeit in min	pH-Wert	T in °C		Zeit in min	pH-Wert	T in °C
1	7,00	28,7		46	7,77	29,1
2	7,03	28,7		47	7,77	29,1
3	7,06	28,7		48	7,78	29,1
4	7,08	28,7		49	7,79	29,1
5	7,11	28,7	*49:55; 7,8	50	7,80	29,2
6	7,13	28,7		51	7,81	29,2
7	7,15	28,7		52	7,82	29,2
8	7,17	28,7		53	7,83	29,2
9	7,20	28,7		54	7,84	29,1
10	7,22	28,7		55	7,85	29,2
11	7,24	28,7		56	7,86	29,1
12	7,27	28,7		57	7,87	29,1
13	7,29	28,7		58	7,88	29,2
14	7,31	28,7		59	7,89	29,2
15	7,33	28,7		60	7,89	29,2
16	7,35	28,7		61	7,90	29,1
17	7,37	28,7		62	7,90	29,2
18	7,39	28,8		63	7,91	29,2
19	7,41	28,8		64	7,91	29,2
20	7,42	28,8		65	7,92	29,3
21	7,44	28,8		66	7,92	29,3
22	7,46	28,8		67	7,93	29,3
23	7,47	28,9		68	7,93	29,3
24	7,49	28,9		69	7,94	29,3
25	7,51	28,9		70	7,94	29,3
26	7,53	28,9		71	7,95	29,3
27	7,54	28,9		72	7,96	29,3
28	7,56	28,9		73	7,97	29,3
29	7,57	28,9		74	7,97	29,3
30	7,58	28,9		75	7,98	29,3
31	7,60	28,9		76	7,98	29,3
32	7,62	28,9		77	7,99	29,3
33	7,63	29,0		78	7,99	29,3
34	7,64	29,0	*78:20; 8,2	79	8,00	29,5
35	7,65	29,0		80	8,01	29,4
36	7,66	29,0		81	8,01	29,4
37	7,67	29,0		82	8,02	29,4
38	7,69	29,0		83	8,02	29,4
39	7,70	29,0		84	8,03	29,4
40	7,71	29,0		85	8,04	29,5
41	7,72	29,0		86	8,04	29,5
42	7,73	29,0		87	8,04	29,5
43	7,74	29,0		88	8,05	29,5
44	7,75	29,0		89	8,05	29,5
45	7,76	29,1		90	8,06	29,5

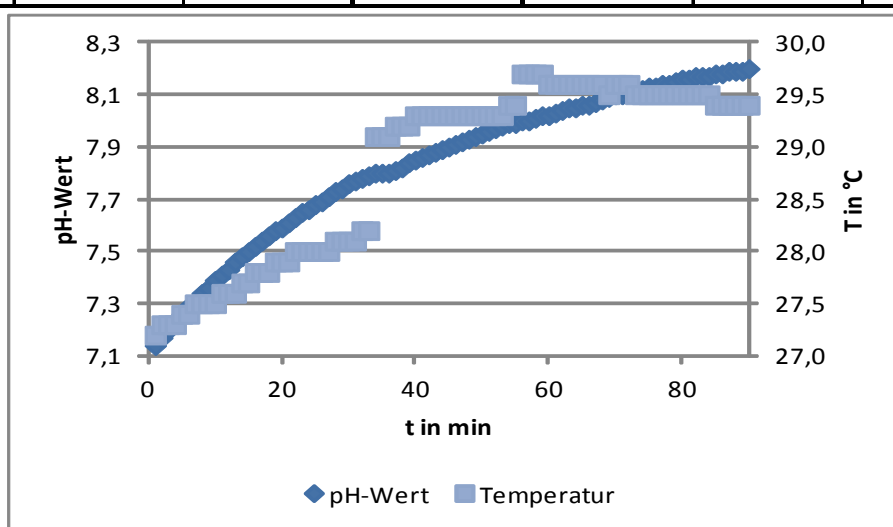
Zeit in min	pH-Wert	T in °C		Zeit in min	pH-Wert	T in °C
91	8,06	29,5		136		
92	8,07	29,5		137		
93	8,07	29,5		138		
94	8,08	29,5		139		
95	8,08	29,5		140		
96	8,08	29,5		141		
97	8,08	29,5		142		
98	8,09	29,5		143		
99	8,09	29,5		144		
100	8,09	29,6		145		
101	8,09	29,6		146		
102	8,10	29,6		147		
103	8,11	29,6		148		
104	8,11	29,6		149		
105	8,11	29,5		150		
106	8,12	29,5		151		
107	8,12	29,6		152		
108	8,12	29,6		153		
109	8,13	29,6		154		
110	8,13	29,6		155		
111	8,14	29,6		156		
112	8,14	29,6		157		
113	8,15	29,6		158		
114	8,15	29,6		159		
115	8,15	29,6		160		
116	8,16	29,6		161		
117	8,16	29,6		162		
118	8,16	29,6		163		
119	8,16	29,6		164		
120	8,16	29,6		165		
121	8,17	29,6		166		
122	8,17	29,6		167		
123	8,18	29,6		168		
124	8,18	29,7		169		
125	8,18	29,7		170		
126	8,18	29,7		171		
127	8,19	29,7		172		
128	8,19	29,7		173		
129	8,19	29,7		174		
130	8,19	29,7		175		
131	8,19	29,7		176		
132	8,19	29,7		177		
133	8,19	29,7		178		
134	8,19	29,7		179		
135	Belüftungsende: 134:52; 8,2			180		



Auswertung Belüftungsversuch																																			
Trockensubstanz																																			
Probenbezeichnung	pH; T in °C	Einwaage	Trübwasser	Rückstand	TS																														
		in g	in g	in % _m	in g/kg																														
FS_L_0_nb_7,27_20°C	7,27; 20°C	250,5	171,3	31,62	95,97																														
FS_L_0_nb_7,15_30°C	7,15; 30°C	250,1	173,3	30,71	97																														
FS_L_5,0_b4_7,8	7,8; 30°C	249,7	178,4	28,55	106,57																														
FS_L_5,0_b4_8,0	8,0; 30°C	250,2	180,2	27,98	107,43																														
FS_L_5,0_b4_8,2	8,2; 30°C	249,9	182	27,17	109,35																														
Gelöstionen																																			
Probenbezeichnung	pH	PO ₄ -P	NH ₄ -N	Mg	Ca																														
		in mg/l																																	
FS_L_0_nb_7,27_20°C	7,27	257,1	1419,3	8,4	38,8																														
FS_L_2,7_nb_6,96	6,96	148,8	1419,3	21,6	27,8																														
FS_L_5,0_b4_7,8	7,80	37,2	1389,6	5,6	15,8																														
FS_L_5,0_b4_8,0	8,00	24,6	1357,5	5,2	15,5																														
FS_L_5,0_b4_8,2	8,20	12,9	1315,2	1,5	3																														
<table border="1"> <caption>Data for Scatter Plot</caption> <thead> <tr> <th>pH-Wert</th> <th>PO₄-P (mg/l)</th> <th>NH₄-N (mg/l)</th> <th>Mg (mg/l)</th> <th>Ca (mg/l)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>6,9</td> <td>150</td> <td>1400</td> <td>20</td> <td>30</td> </tr> <tr> <td>7,27</td> <td>250</td> <td>1400</td> <td>10</td> <td>40</td> </tr> <tr> <td>7,8</td> <td>30</td> <td>1350</td> <td>5</td> <td>15</td> </tr> <tr> <td>8,0</td> <td>20</td> <td>1300</td> <td>5</td> <td>15</td> </tr> <tr> <td>8,2</td> <td>10</td> <td>1250</td> <td>2</td> <td>3</td> </tr> </tbody> </table>						pH-Wert	PO ₄ -P (mg/l)	NH ₄ -N (mg/l)	Mg (mg/l)	Ca (mg/l)	6,9	150	1400	20	30	7,27	250	1400	10	40	7,8	30	1350	5	15	8,0	20	1300	5	15	8,2	10	1250	2	3
pH-Wert	PO ₄ -P (mg/l)	NH ₄ -N (mg/l)	Mg (mg/l)	Ca (mg/l)																															
6,9	150	1400	20	30																															
7,27	250	1400	10	40																															
7,8	30	1350	5	15																															
8,0	20	1300	5	15																															
8,2	10	1250	2	3																															
Auswertung Rücklöseversuch																																			
Datum 21.-22.04.2016		Uhrzeit Versuchsbeginn 17:35		Uhrzeit Versuchsende 15:15																															
Probenbezeichnung	pH	PO ₄ -P	NH ₄ -N	Mg	Ca																														
		in mg/l																																	
FS_L_0_nb_24_7	7,18	245,1	1422	1,9	20,2																														
FS_L_5,0_b4_24	7,95	34,65	1317,9	4,7	17,2																														
Bemerkungen																																			
Der Rückstand wurde im Rücklöseversuch für den belüfteten, mit Fällmittel versetzten Schlamm zu 28,72% und im nicht belüfteten Schlamm zu 30,54% bestimmt; die TS betrug jeweils 108,33g/kg und 100,06g/kg.																																			

Versuchsprotokoll Belüftungsversuch Faulschlamm						
Datum		Uhrzeit Versuchsbeginn		Uhrzeit Versuchsende		
27.04.2016		09:45		12:10		
Versuchsbezeichnung				FS_L_5,0_b6		
Verwendeter Faulschlamm				Linz		
Fällmittel				5,0g MgCl ₂ *6H ₂ O		
Belüftung bei 1bar						
Anemometer		in l/min		6		
Steighöhe		1l in s		20		2l in s
Steighöhe		in l/min		3,000		
Verbrauchte Luftmenge		in l		270,75		
Versuchsdurchführung						
pH-Wert	20°C		30°C		nach Fällmittelzugabe	
	7,54		7,28		7,11	
Zeit in min	pH-Wert	T in °C		Zeit in min	pH-Wert	T in °C
1	7,14	27,2		46	7,91	29,3
2	7,17	27,3		47	7,92	29,3
3	7,20	27,3		48	7,93	29,3
4	7,23	27,3		49	7,94	29,3
5	7,26	27,4		50	7,95	29,3
6	7,29	27,4		51	7,96	29,3
7	7,31	27,5		52	7,97	29,3
8	7,34	27,5		53	7,98	29,3
9	7,36	27,5		54	7,99	29,4
10	7,39	27,5	*55:43; 8,0	55	7,99	29,4
11	7,41	27,6		56	8,00	29,7
12	7,43	27,6		57	8,00	29,7
13	7,46	27,6		58	8,01	29,7
14	7,48	27,7		59	8,02	29,7
15	7,50	27,7		60	8,02	29,6
16	7,52	27,8		61	8,03	29,6
17	7,54	27,8		62	8,04	29,6
18	7,56	27,8		63	8,05	29,6
19	7,58	27,9		64	8,05	29,6
20	7,59	27,9		65	8,06	29,6
21	7,61	27,9		66	8,06	29,6
22	7,63	28,0		67	8,07	29,6
23	7,65	28,0		68	8,08	29,6
24	7,66	28,0		69	8,09	29,5
25	7,68	28,0		70	8,10	29,6
26	7,69	28,0		71	8,10	29,6
27	7,71	28,0		72	8,11	29,6
28	7,73	28,1		73	8,11	29,5
29	7,74	28,1		74	8,12	29,5
30	7,76	28,1		75	8,13	29,5
31	7,77	28,1		76	8,13	29,5
32	7,78	28,2		77	8,14	29,5
33	7,79	28,2	*33:48; 7,8	78	8,14	29,5
34	7,80	29,1		79	8,15	29,5
35	7,80	29,1		80	8,16	29,5
36	7,80	29,1		81	8,16	29,5
37	7,81	29,2		82	8,17	29,5
38	7,82	29,2		83	8,17	29,5
39	7,84	29,2		84	8,17	29,5
40	7,85	29,3		85	8,18	29,4
41	7,86	29,3		86	8,18	29,4
42	7,87	29,3		87	8,19	29,4
43	7,88	29,3		88	8,19	29,4
44	7,89	29,3		89	8,19	29,4
45	7,90	29,3	*90:15; 8,2	90	8,20	29,4

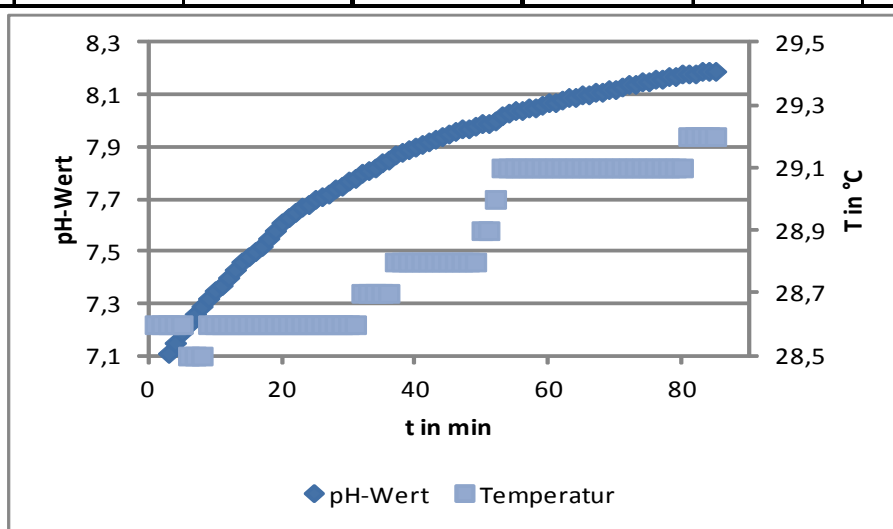
Zeit in min	pH-Wert	T in °C		Zeit in min	pH-Wert	T in °C
91				136		
92				137		
93				138		
94				139		
95				140		
96				141		
97				142		
98				143		
99				144		
100				145		
101				146		
102				147		
103				148		
104				149		
105				150		
106				151		
107				152		
108				153		
109				154		
110				155		
111				156		
112				157		
113				158		
114				159		
115				160		
116				161		
117				162		
118				163		
119				164		
120				165		
121				166		
122				167		
123				168		
124				169		
125				170		
126				171		
127				172		
128				173		
129				174		
130				175		
131				176		
132				177		
133				178		
134				179		
135				180		



Auswertung Belüftungsversuch					
Trockensubstanz					
Probenbezeichnung	pH; T in °C	Einwaage	Trübwasser	Rückstand	TS
		in g	in g	in % _m	in g/kg
FS_L_0_nb_7,54_20°C	7,54; 20°C	250,0	167,3	33,08	96,28
FS_L_0_nb_7,28_30°C	7,28; 30°C	250,5	170,5	31,94	99,24
FS_L_5,0_b6_7,8	7,8; 30°C	250,5	174,8	30,22	107,66
FS_L_5,0_b6_8,0	8,0; 30°C	249,2	175,2	29,70	111,32
FS_L_5,0_b6_8,2	8,2; 30°C	249,9	176,4	29,41	112,59
Gelöstionen					
Probenbezeichnung	pH	PO ₄ -P	NH ₄ -N	Mg	Ca
		in mg/l			
FS_L_0_nb_7,54_20°C	7,54	252,9	1453,8	4,8	29,2
FS_L_5,0_nb_7,11	7,11	124,8	1410,6	3,2	11,4
FS_L_5,0_b6_7,8	7,80	41	1366,5	9,8	22
FS_L_5,0_b6_8,0	8,00	31,1	1389,9	2,1	4,4
FS_L_5,0_b6_8,2	8,20	21,55	1356,9	1,5	3,6
Auswertung Rücklöseversuch					
Datum		Uhrzeit Versuchsbeginn		Uhrzeit Versuchsende	
27.-28.04.2016		12:20		13:50	
Probenbezeichnung	pH	PO ₄ -P	NH ₄ -N	Mg	Ca
		in mg/l			
FS_L_0_nb_24_8	7,42	245,7	1460,1	0,5	9,8
FS_L_5,0_b6_24	8,00	39,05	1374,9	1,4	8,6
Bemerkungen					
Der Rückstand wurde im Rücklöseversuch für den belüfteten, mit Fällmittel versetzten Schlamm zu 30,21% und im nicht belüfteten Schlamm zu 32,32% bestimmt; die TS betrug jeweils 107,28g/kg und 99,35g/kg.					

Versuchsprotokoll Belüftungsversuch Faulschlamm						
Datum		Uhrzeit Versuchsbeginn		Uhrzeit Versuchsende		
21.04.2016		15:54		17:30		
Versuchsbezeichnung				FS_L_5,0_b8		
Verwendeter Faulschlamm				Linz		
Fällmittel				5,0g MgCl ₂ *6H ₂ O		
Belüftung bei 1bar						
Anemometer		in l/min		8		
Steighöhe		1l in s		15		2l in s
Steighöhe		in l/min		4,000		
Verbrauchte Luftmenge		in l		341,87		
Versuchsdurchführung						
pH-Wert	20°C		30°C		nach Fällmittelzugabe	
	7,27		7,15		6,98	
Zeit in min	pH-Wert	T in °C		Zeit in min	pH-Wert	T in °C
1	7,02	28,6		46	7,96	28,8
2	7,07	28,6		47	7,97	28,8
3	7,11	28,6		48	7,97	28,8
4	7,15	28,6		49	7,98	28,8
5	7,19	28,6		50	7,99	28,9
6	7,22	28,5		51	7,99	28,9
7	7,26	28,5	*51:19; 8,0	52	8,00	29,0
8	7,29	28,5		53	8,02	29,1
9	7,32	28,6		54	8,03	29,1
10	7,35	28,6		55	8,04	29,1
11	7,37	28,6		56	8,04	29,1
12	7,40	28,6		57	8,05	29,1
13	7,43	28,6		58	8,05	29,1
14	7,46	28,6		59	8,06	29,1
15	7,48	28,6		60	8,07	29,1
16	7,50	28,6		61	8,07	29,1
17	7,52	28,6		62	8,08	29,1
18	7,55	28,6		63	8,09	29,1
19	7,58	28,6		64	8,09	29,1
20	7,61	28,6		65	8,10	29,1
21	7,63	28,6		66	8,10	29,1
22	7,65	28,6		67	8,11	29,1
23	7,67	28,6		68	8,11	29,1
24	7,68	28,6		69	8,12	29,1
25	7,70	28,6		70	8,12	29,1
26	7,71	28,6		71	8,13	29,1
27	7,72	28,6		72	8,14	29,1
28	7,74	28,6		73	8,14	29,1
29	7,75	28,6		74	8,15	29,1
30	7,77	28,6		75	8,15	29,1
31	7,78	28,6	*31:51; 7,8	76	8,16	29,1
32	7,80	28,7		77	8,16	29,1
33	7,81	28,7		78	8,17	29,1
34	7,82	28,7		79	8,17	29,1
35	7,84	28,7		80	8,18	29,1
36	7,85	28,7		81	8,18	29,2
37	7,87	28,8		82	8,18	29,2
38	7,88	28,8		83	8,19	29,2
39	7,89	28,8		84	8,19	29,2
40	7,90	28,8		85	8,19	29,2
41	7,91	28,8		86	Belüftungende: 85:28; 8,2	
42	7,92	28,8		87		
43	7,93	28,8		88		
44	7,94	28,8		89		
45	7,95	28,8		90		

Zeit in min	pH-Wert	T in °C		Zeit in min	pH-Wert	T in °C
91				136		
92				137		
93				138		
94				139		
95				140		
96				141		
97				142		
98				143		
99				144		
100				145		
101				146		
102				147		
103				148		
104				149		
105				150		
106				151		
107				152		
108				153		
109				154		
110				155		
111				156		
112				157		
113				158		
114				159		
115				160		
116				161		
117				162		
118				163		
119				164		
120				165		
121				166		
122				167		
123				168		
124				169		
125				170		
126				171		
127				172		
128				173		
129				174		
130				175		
131				176		
132				177		
133				178		
134				179		
135				180		



Auswertung Belüftungsversuch					
Trockensubstanz					
Probenbezeichnung	pH; T in °C	Einwaage	Trübwasser	Rückstand	TS
		in g	in g	in % _m	in g/kg
FS_L_0_nb_7,27_20°C	7,27; 20°C	250,5	171,3	31,62	95,97
FS_L_0_nb_7,15_30°C	7,15; 30°C	250,1	173,3	30,71	97
FS_L_5,0_b8_7,8	7,8; 30°C	250,3	178,5	28,69	106,64
FS_L_5,0_b8_8,0	8,0; 30°C	250,2	180,3	27,94	108,58
FS_L_5,0_b8_8,2	8,2; 30°C	250,0	181,7	27,32	111,32
Gelöstionen					
Probenbezeichnung	pH	PO ₄ -P	NH ₄ -N	Mg	Ca
		in mg/l			
FS_L_0_nb_7,27_20°C	7,27	257,1	1419,3	8,4	38,8
FS_L_2,7_nb_6,98	6,98	114	1388,1	24,1	30,2
FS_L_5,0_b8_7,8	7,80	45	1382,4	9	24,1
FS_L_5,0_b8_8,0	8,00	31,2	1344,9	2,3	4
FS_L_5,0_b8_8,2	8,20	18,9	1372,8	3	6,8

pH-Wert	PO ₄ -P (mg/l)	NH ₄ -N (mg/l)	Mg (mg/l)	Ca (mg/l)
6,9	100	1400	75	30
7,27	250	1450	10	40
7,8	100	1350	30	25
8,0	50	1350	2	4
8,2	20	1350	3	7

Auswertung Rücklöseversuch					
Datum		Uhrzeit Versuchsbeginn		Uhrzeit Versuchsende	
21.-22.04.2016		17:35		15:15	
Probenbezeichnung	pH	PO ₄ -P	NH ₄ -N	Mg	Ca
		in mg/l			
FS_L_0_nb_24_7	7,18	245,1	1422	1,9	20,2
FS_L_5,0_b8_24	7,94	45,55	1323,3	2,3	3,9
Bemerkungen					
Der Rückstand wurde im Rücklöseversuch für den belüfteten, mit Fällmittel versetzten Schlamm zu 28,9% und im nicht belüfteten Schlamm zu 30,54% bestimmt; die TS betrug jeweils 105,82g/kg und 100,06g/kg.					