



VORGESCHALTETE PHOSPHORFÄLLUNG BEI PFLANZENKLÄRANLAGEN

Diplomarbeit
zur Erlangung des akademischen Grades
Diplomingenieur

eingereicht von:
LAUSCHMANN, ROBERT ERNST

Betreuer: Ertl, Thomas
Mitbetreuer: Langergraber, Günter



Vorwort

Diese Arbeit wurde am Institut für Siedlungswasserbau, Industrierewasserwirtschaft und Gewässerschutz (SIG) der Universität für Bodenkultur Wien durchgeführt. Mein Dank gilt allen Mitarbeitern des Institutes, die mich bei meinen Arbeiten unterstützt haben, vor allem Herrn Univ. Prof. Dipl.-Ing. Dr. nat. techn. Raimund Haberl, dem Institutsleiter und Herrn Priv.-Doz. Dipl.-Ing. Dr. Thomas Ertl, dafür, dass mir die Möglichkeit gegeben wurde, meine Arbeit am Institut zu schreiben.

Mein besonderer Dank gilt Priv.-Doz. Dipl.-Ing. Dr. Günter Langergraber für die Betreuung der Diplomarbeit. Er hat mich über einen langen Zeitraum begleitet und mir immer seine kostbare Zeit gewidmet, sowie es ihm möglich war. Seine wissenschaftliche Kompetenz und seine ruhige Art waren mir Ansporn und Rückhalt.

Des Weiteren gilt mein besonderer Dank Herrn Ing. Wolfgang Stach, dem Leiter des Labors am SIG. Er war mir moralische Stütze und hatte für praktische wie theoretische Probleme die passenden Lösungen. Außerdem duldete er mich und meine übel riechenden Proben zur Auswertung in seinem Labor. Ebenfalls große Geduld brachte mir Herr Friedrich Kropitz entgegen, der immer bemüht war, meine akademischen Vorhaben in die Praxis umzusetzen.

Dank gilt natürlich auch Herrn Dipl.-Ing. Markus Lechner, der diese Arbeit möglich gemacht hat. Er gab nicht nur den Ausschlag für die Forschungsarbeit, sondern stellte auch die untersuchte Anlage in Oberwindhag sowie seinen Rat und sein Equipment zu Verfügung.

Ich möchte hiermit allen danken, die mich durch mein Studium begleitet haben. In erster Linie meiner Familie und meinen Eltern, die mir die Möglichkeit eines Studiums gegeben haben. Ich stehe tief in Eurer Schuld. Ich verdanke außerdem einen Teil meines Studienerfolges den Freunden und Kollegen, die mir beim Lernen geholfen haben und mich immer wieder ermutigt und unterstützt haben.

Inhaltsverzeichnis

1. Einleitung	1
2. Zielsetzung und Aufgabenstellung	2
3. Allgemeine Grundlagen	3
3.1 Pflanzenkläranlagen	3
3.1.1 Vertikal durchströmter Bodenfilter	6
3.1.1.1 Allgemein	6
3.1.1.2 Filtermaterialien	6
3.1.1.3 Vegetation	7
3.1.2 Pflanzenkläranlagen in Österreich	7
3.2 Phosphor	9
3.2.1 Der Phosphorkreislauf	9
3.2.2 Phosphor als Kunstdünger	12
3.2.3 Phosphor in aquatischen Ökosystemen	12
3.2.3.1 Phosphor in Fließgewässern	13
3.2.3.2 Phosphor in Seen	14
3.2.3.3 Phosphor in Meeren und Ozeanen	15
3.2.4 Phosphor im Abwasser	16
3.2.4.1 Herkunftsbereiche des Abwassers	16
3.2.4.2 Formen des Phosphor im Abwasser (BÖHLER & SIEGRIST, 2008)	19
3.2.5 Phosphorfällung	20
3.2.5.1 Fällmittel Natriumaluminat	21
3.3 Rechtliche Grundlagen	23
3.3.1 WRG 1959 – Wasserrechtsgesetz (WRG, 1959, i.d.g.F)	23
3.3.2 Allgemeine Abwasseremissionsverordnung (AAEV, 1996)	24
3.3.3 1. Abwasseremissionsverordnung für kommunales Abwasser (1.AEVkA, 1996)	25
3.3.4 Qualitätszielverordnung Chemie & Ökologie Oberflächengewässer (QZV Chemie OG, 2006), (QZV Ökologie OG, 2010)	26
4. Material und Methoden	28
4.1 ARA Oberwindhag	28
4.1.1 Technische Daten	28
4.1.2 Reinigungsleistung & Behördliche Vorgaben	31
4.2 Versuchsdurchführung	33
4.2.1 Messprogramm	33
4.2.2 Durchflussmessung	34
4.2.3 Probenahme	37
4.2.4 Phosphatmessung	42
4.3 Phosphorfällung	43
4.3.1 Bau des Siphons	43
4.3.2 Fällmittelmengenberechnung	47
4.3.3 Dosierpumpe	50
5. Ergebnisse	52
5.1 Durchflussmessung	52
5.2 Phosphatmessung	57
5.2.1 Messungen ohne P-Fällung	57
5.2.1.1 Zulaufkonzentration	57
5.2.1.2 Eliminationsleistung der Pflanzenkläranlage, Ablaufwert und Rücklösungen	60
5.2.2 Messungen bei P-Fällung	61
5.2.2.1 Mischrinne	61
5.2.2.2 Siphon	64
5.3 Rückbelastung aus dem Vererdungsbeet	67

6. Interpretation und Diskussion der Ergebnisse	69
6.1 Zulauf	69
6.2 Einflussgrößen der Messwerte	70
6.2.1 Schwankungen der ankommenden Fracht	70
6.2.2 Verdünnung durch Niederschlag / Konzentration durch Verdunstung	70
6.3 P-Elimination	72
6.3.1 Elimination und Rücklösung aus dem Pflanzenbeet	72
6.3.2 Wirksamkeit der Fällung, Fällmittelverbrauch	73
6.3.3 Rücklösung aus dem Fällprodukt im Vererdungsbeet	75
6.4 Bewertung der vorgeschalteten Fällung	76
6.4.1 Vor- und Nachteile der vorgeschalteten Fällung	76
6.4.2 Kosten	77
7. Zusammenfassung	82
8. Ausblick	84
9. Literaturverzeichnis	85
10. Anhang	88
10.1 Messprotokolle	88
11. Lebenslauf	122

Kurzfassung

Pflanzenkläranlagen mit vertikal durchflossenem Filterkörper erzielen ausgezeichnete Reinigungsleistungen bei Stickstoff- und Kohlenstoffverbindungen. Sie bedürfen kaum Wartung und Betreuung. Lediglich der Platzbedarf ist hoch. In ländlichen oder abgelegenen Gebieten mit geringer Besiedlungsdichte sind sie eine optimale Technik zur Abwasserreinigung. Phosphor, ein essentieller Pflanzennährstoff und in vielen Ökosystemen der limitierende Nährstoff, kann jedoch mit Pflanzenkläranlagen nicht dauerhaft entfernt werden. Momentan konzentriert sich die internationale Forschung auf die P-Entfernung in Pflanzenkläranlagen durch spezielle Filtermaterialien. In dieser Arbeit wurde der Einsatz einer konventionellen chemisch-physikalischen Phosphorfällung mit Natriumaluminat bei einer Pflanzenkläranlage untersucht. Durch eine vorgeschaltete Fällung sollte versucht werden, den geforderten Ablaufwert von 1,6 mg/l $\text{PO}_4\text{-P}$ bei einer bestehenden Anlage zu erreichen. Die ARA Oberwindhag im Waldviertel, eine 2-stufige, intermittierend beschickte, vertikal durchflossene Pflanzenkläranlage mit einer Ausbaugröße von 60 EW (Einwohnerwerten) wurde dafür mit einer vorgeschalteten Fällung ausgerüstet. Die Sedimentation der Flocken sollte in den 3 Absetzschächten der Vorklärung stattfinden. Da die Anlage bereits ca. 3 Jahre ohne Maßnahmen zur P-Entfernung in Betrieb war, wurden zu Beginn $\text{PO}_4\text{-P}$ -Werte im Verlauf der Anlage gemessen, um den Grundzustand zu beschreiben und die natürliche Elimination durch Adsorption nach 3 Jahren Betrieb zu erhalten. Im gesamten Verlauf der Arbeit wurde ausschließlich $\text{PO}_4\text{-P}$ gemessen. Die Phosphat-Werte in der Vorklärung zeigten relativ einheitliche Werte, ohne signifikante Hinweise auf Veränderungen der ankommenden Phosphat-Konzentration. Das erste und mit 240 m² größere Pflanzenbeet eliminierte immer noch ca. 36% der $\text{PO}_4\text{-P}$ Fracht. Das zweite und mit 60 m² deutlich kleinere Pflanzenbeet zeigte kaum mehr eine messbare Elimination. Das wurde damit erklärt, dass die Adsorptionskapazität im 2. Beet aufgrund seiner Größe bereits erschöpft war. Danach wurden 3 unterschiedliche Mengen an Fällmittel zudosiert und die Auswirkungen auf die Anlage und den Ablaufwert beobachtet. Erst bei relativ hohen Dosiermengen ($\beta = 3,5$) konnten zufriedenstellend niedrige Phosphatkonzentrationen in den Vorklärschächten erreicht werden. Die Ablaufwerte der Pflanzenbeete waren zeitweilig höher als deren Zulaufwerte. Dies kann durch eine Lösung von adsorbiertem Phosphat aus dem Pflanzenbeet erklärt werden. Erst nach Wochen gingen die Ablaufwerte zurück und lagen am Schluss um oder leicht unter den Zulaufwerten. Nach einigen Versuchen wurde außerdem die Art der Einmischung des Fällmittels in das Abwasser, durch den Einbau eines Siphons in die Zuleitung verändert. Dadurch wurden bessere Ergebnisse und eine Reduktion des Fällmitteleinsatzes erhofft. Teilweise konnte dies durch die Messungen bestätigt werden, es wird jedoch angenommen, dass große Schwankungen der Zulaufmenge und der $\text{PO}_4\text{-P}$ Konzentration eine Optimierung verhindern. Außerdem werden konkurrierende Reaktionen des Fällmittels mit anderen Anionen, organische Verschmutzungen und Trübstoffen im Abwasser für den hohen Fällmittelverbrauch bei der Methode der vorgeschalteten Fällung verantwortlich gemacht. Trotzdem konnte bewiesen werden, dass es möglich ist, den vorgegebenen Ablaufwert von 1,6 mg/l $\text{PO}_4\text{-P}$ einzuhalten.

Abstract

Constructed wetlands (CWs) with vertical flow systems offer satisfying purification results for organic matter and nitrogen removal. This technique requires only low efforts for operation and maintenance. Only the space requirements are high. In rural and isolated areas with low settlement density they can be the optimal solution for domestic wastewater treatment. Only the removal mechanism for phosphorus is limited and decreases with time. Phosphorus is essential for plant growth and the limiting nutrient in many ecosystems. At the moment international research is carried out to find specific filter materials for phosphorus adsorption. The object of this research was to determine the applicability of conventional physicochemical phosphorus removal due to precipitation with sodium aluminate at a constructed wetland. The experiment was carried out at a full-scale CW in Oberwindhag in Lower Austria, a two-stage vertical flow CW with intermittent loading with a size of 60 person equivalent. It was attempted to reach the required effluent concentration of 1.6 mg/l PO₄-P with pre-precipitation. The sedimentation of the flocs should take place in the chambers of the primary treatment. As the plant was already in operation for 3 years without measures for phosphorus removal, samples were taken at the beginning to describe the initial conditions for phosphorus adsorption. In this study only PO₄-P was measured. The results showed no significant changes of the phosphate concentrations in the primary treatment. The first bed (240 m²) had an abatement rate of almost 36 %, whereas the second bed (60 m²) did hardly remove any phosphorus. The second bed is 4 times smaller compared to the first bed which seems to be the reason why the adsorption capacity in the second bed was already exhausted. Afterwards the pre-precipitation with sodium aluminate was activated and 3 different dosages were investigated. Satisfying results in the preliminary treatment chambers were not obtained until a high dosage of $\beta = 3.5$ was applied. In addition the concentration at the outflow of the reed beds was sometimes higher than at the inflow. This was explained as the consequence of the salting out of adsorbed phosphorus in the filtering mass of the reed beds. It took weeks until the outflow concentrations went down and equaled the inflow concentrations. In addition it was attempted to optimize the conditions of the injection of the precipitation agent into the wastewater stream by building in a siphon like structure into the pipe. It was hypothesized to gain better results and decrease the amount of the aluminate. The measurements showed a slight improvement but it is assumed that the variability of the inflow and the phosphorus concentration inhibit better results. Furthermore, competing reactions of dissolved substances with the coagulant seem to cause the high consumption of the aluminate with the application of the preliminary injection. Nevertheless it was possible to demonstrate the possibility to maintain a low outflow concentration of 1.6 mg/l PO₄-P at a CW with chemical pre-precipitation.

1. Einleitung

Bepflanzte Bodenfilter oder Pflanzenkläranlagen (dieser Begriff wird im weiteren Verlauf der Arbeit verwendet) gelten heute als adäquate Technik, um kommunales Abwasser mit zufriedenstellenden Resultaten von organischen Verbindungen und Stickstoff zu klären. Allerdings besitzen sie von sich aus keine Mechanismen mit denen dauerhaft Phosphor aus Abwasser entfernt werden kann. Durch Adsorption kann zwar ein Teil des Phosphors an den Bodenpartikeln zurückgehalten werden, doch erschöpft sich diese Kapazität im Lauf der Zeit. Somit war diese Technik bisher auf kleine Anlagen beschränkt, die keinen Ablaufwert für Phosphor einzuhalten hatten. Durch neue Verordnungen besteht seit 2006 ein verschärftes Gebot zur Phosphor Elimination in Österreich. Das macht es notwendig, geeignete Methoden zur P-Entfernung zu finden, um Pflanzenkläranlagen weiterhin zur Reinigung von kommunalem Abwasser einsetzen zu können (STEINBACHER&STEINBACHER, 2010).

In Zusammenarbeit mit dem Technischen Büro Lechner wurde bei einer bestehenden Anlage in Oberwindhag bei Weitra der Einsatz einer konventionellen, vorgeschalteten, chemisch-physikalischen P-Fällung bei einer vertikal durchflossenen, intermittierend beschickten Pflanzenkläranlage untersucht. Als Fällmittel wurde aufgrund der sauren Bodenbedingungen des Waldviertels basisches Natriumaluminat eingesetzt. Diese Methode der P-Entfernung in Kombination mit einer Pflanzenkläranlage dieser Bauart wurde bisher noch nicht ver- und untersucht. Die Fragen nach der erreichbaren Eliminationsrate, den Einfluss auf die Pflanzenkläranlage, den Rücklösungen aus dem Fällprodukt standen im Mittelpunkt des Interesses.

Des Weiteren sollte versucht werden, generelle Daten über die Phosphorumsetzung und deren Ursachen bei Pflanzenkläranlagen zu erhalten.

Somit sollte beantwortet werden, ob die Vorfällung ein geeignetes Verfahren bei Pflanzenkläranlagen darstellt, um Phosphor aus dem Abwasser zu entfernen und somit den Einsatz dieser Technik auch in Zukunft zu ermöglichen.

2. Zielsetzung und Aufgabenstellung

Durch die wasserrechtliche Bewilligung der Pflanzenkläranlage ergab sich die konkrete Fragestellung der Arbeit:

„Ist es möglich durch eine vorgeschaltete, chemisch-physikalische Fällung den, von der Behörde geforderten Ablaufwert der Kläranlage von 1,6 mg/l PO₄-P (BEZIRKSHAUPTMANNSCHAFT GMÜND, 2005) einzuhalten?“

Natürlich ist dabei auch die benötigte Menge an Fällmittel und die Auswirkungen auf die gesamte Anlage von Interesse. Da diese Methode in Österreich bisher noch bei keiner Pflanzenkläranlage zum Einsatz gekommen ist, dient die ARA als Pilotanlage. Bei positiven Ergebnissen könnte auch eine Ausweitung auf andere Standorte in Betracht gezogen werden.

Für die Bewertung der Methode ist vor allem der Ablaufwert von Interesse, doch wird dieser von verschiedenen Faktoren im Verlauf der Anlage beeinflusst. Im Zuge der Arbeit wurden an 5 verschiedene Stellen die PO₄-P-Werte untersucht. So sollten mögliche Teilprozesse erkannt werden, die Auswirkungen auf den Ablaufwert haben können.

Zu Beginn wurde die Anlage ohne Fällung beprobt. So konnte einerseits der Grundzustand der Anlage ermittelt werden. Andererseits wurden nach der Aktivierung unmittelbar die Auswirkungen des Fällmittels auf die Anlage sichtbar. Es wurden, beginnend mit der niedrigsten, 3 verschiedene Dosierstufen ausprobiert und Proben genommen. Danach wurde die Methode der Einmischung des Fällmittels in das Abwasser durch den Einbau eines Siphons verändert. Der Siphon sollte durch die Turbulenz der Belüftung die Einmischung des Fällmittels verbessern und als Reservoir kleine Schwankungen des Zulaufs ausgleichen. Durch den Vergleich der Ergebnisse sollte der Einfluss der Einmischung sichtbar gemacht werden und eine Reduktion des Fällmittels erreicht werden.

Am Ende soll es möglich sein zu bestimmen,

- ob es möglich ist, den geforderten Ablaufwert von 1,6 mg/l PO₄-P einzuhalten,
- wie viel Fällmittel zugegeben werden muss,
- ob der Umbau der Mischstrecke die Fällung optimieren kann,
- ob die Fällung weitere negative oder positive Auswirkungen auf die Anlage hat und
- welche Probleme mit dieser Methode auftreten können.

3. Allgemeine Grundlagen

3.1 Pflanzenkläranlagen

Pflanzenkläranlagen sind Ingenieurbauwerke, die sich die Reinigungsprozesse natürlicher aquatischer Ökosysteme zu Nutzen machen. Die Hauptkomponenten sind die Vegetation, der Bodenkörper und die mikrobielle Population. Es werden dieselben Mechanismen genutzt, die auch in jedem natürlichen Feuchtgebiet vorkommen, jedoch in höheren Konzentrationen und mit besserer Regulier- und Steuerbarkeit. (VYMAZAL et al., 1998)

Feuchtgebiete und andere natürliche Gewässer wurden seit jeher für die Entsorgung von Abwässern genutzt. Die natürliche Selbstreinigung, d.h. der biologische Abbau von organischem Material in den Gewässern und den Böden bewahrte Menschen und Umwelt vor einer Akkumulierung der Schmutzstoffe und Schäden der Ökosysteme. Die Selbstreinigungskapazität ist jedoch nicht unerschöpflich. Das mussten die Menschen bereits feststellen, als die frühen Hochkulturen die ersten größeren Städte hervorbrachten. Eine der ersten Städte mit einem „modernen“ Abwassermanagement war Rom. Hier gab es nicht nur eine Reinwasserversorgung, sondern auch Großlatrinen und eine getrennte dezentrale Abwasserableitung der häuslichen Aborte (WISSING, 1995). Das Abwasser wurde so zwar aus dem Ballungszentrum abgeleitet, die Reinigung mussten aber nach Einleitung in die Gewässer weiterhin die Ökosysteme übernehmen. Das frühe Mittelalter kann man auch aus Sicht der Siedlungswasserwirtschaft das „dunkle“ Zeitalter nennen. Viel Wissen der römischen Kultur ging verloren, Abwasser und Abfälle wurden einfach auf die Straßen gekippt. Der Gestank in manchen Städten musste verheerend gewesen sein. Nicht nur der Gestank sondern auch Krankheiten und Epidemien erinnerten die Menschen bald wieder an die Notwendigkeit einer angemessenen Entsorgung des Abwassers. Mit steigender Technologisierung stieg der Wille, die Beseitigung unserer Abfälle nicht mehr nur der Natur zu überlassen. Mit der Industrialisierung wurde auch der Abwasseranfall gesteigert, der Zustand vieler Gewässer verschlechterte sich und machte den Bau von Kläranlagen notwendig. Die ersten mechanischen Reinigungsverfahren für Abwasser wurden um die Jahrhundertwende vom 19. ins 20. Jahrhundert entwickelt. Das Belebtschlammverfahren entwickelten Ingenieure 1912 in Boston (RUHRVERBAND, 2011).

1952 beschäftigte sich erstmals das Max Planck Institut in der BRD mit Pflanzenkläranlagen. Besonders hervorzuheben sind dabei die Arbeiten von Käthe Seidl (STENGEL, 1991; zit. bei WISSING, 1995). In den 70er Jahren begann sich die Idee in der westlichen Welt auszubreiten (KADLEC & WALLACE, 2009) Heute ist diese Technologie weit entwickelt und weltweit als Alternative zu konventionellen Systemen akzeptiert. In Österreich gelten bepflanzte Bodenfilter als dem Stand der Technik entsprechende biologische Reinigungsanlagen für häusliches oder gleichartiges Abwasser für eine Ausbaugröße bis 500 Einwohner als zulässig (ÖNORM B2505, 2009).

Im Grunde besteht eine Pflanzenkläranlage aus einem, zum Untergrund abgedichteten Kies-, Sand- oder Bodenkörper, der je nach Bauart eingestaut oder in Abfolgen beschickt wird und der Vegetation. Eine mechanische Vorklärung des Abwassers ist notwendig, um den Filterkörper nicht zu verstopfen.

Man unterscheidet 3 verschiedenen Typen von Pflanzenkläranlagen (KADLEC & WALLACE, 2009):

- Abwasserteiche mit schwimmenden oder untergetauchten Wasserpflanzen (*Free water surface (FWS) constructed wetlands*, Abbildung 3-1): FWS Systeme sind natürlichen Feuchtgebieten und Sümpfen am ähnlichsten.

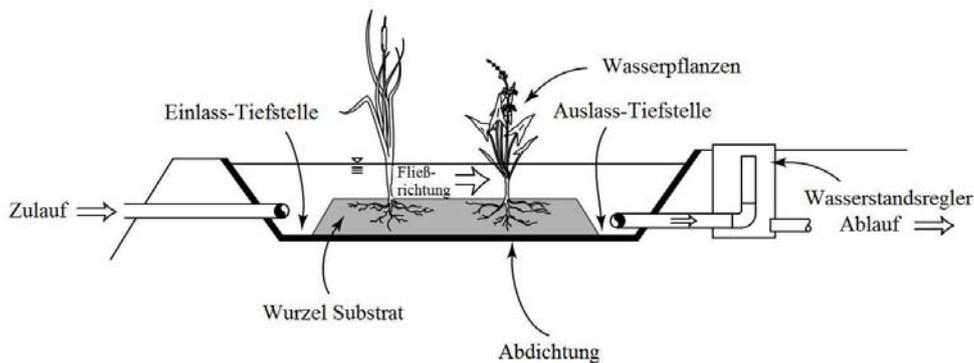


Abbildung 3-1: Abwasserteich (FWS) (KADLEC & WALLACE, 2009)

- Horizontal durchflossene bepflanzte Bodenkörper (*Horizontal flow (HF) constructed wetlands*, Abbildung 3-2): Bepflanzter Boden aus Schotter, Kies und Sand, der horizontal unter der Bodenoberfläche durchflossen wird. Die Strömungsrichtung und –geschwindigkeit wird durch ein Gefälle der Wasserspiegellagen an Ein- und Ablauf gesteuert.

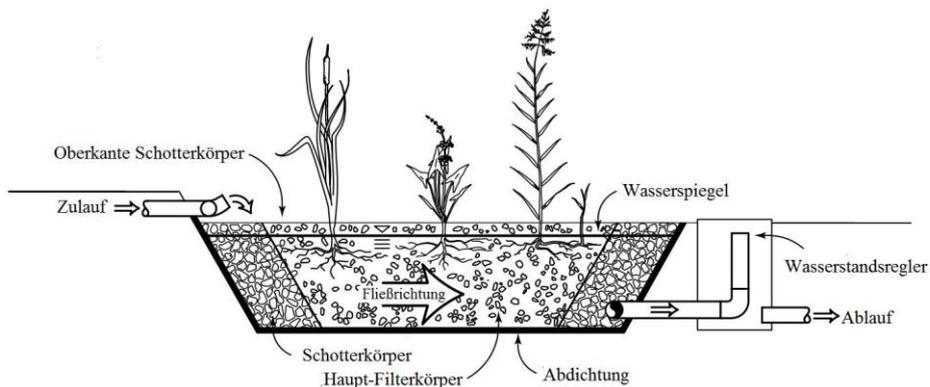


Abbildung 3-2: horizontal durchflossener Bodenkörper (HSSF) (WALLACE & KNIGHT, 2006
in KADLEC & WALLACE, 2009)

- Vertikal durchflossene bepflanzte Bodenkörper (*Vertical flow (VF) constructed wetlands*, Abbildung 3-3): Bepflanzter Bodenkörper, der vertikal beschickt und durchflossen wird. An der Filtersohle wird das gereinigte Wasser mit Drainageröhren gesammelt und abgeführt.

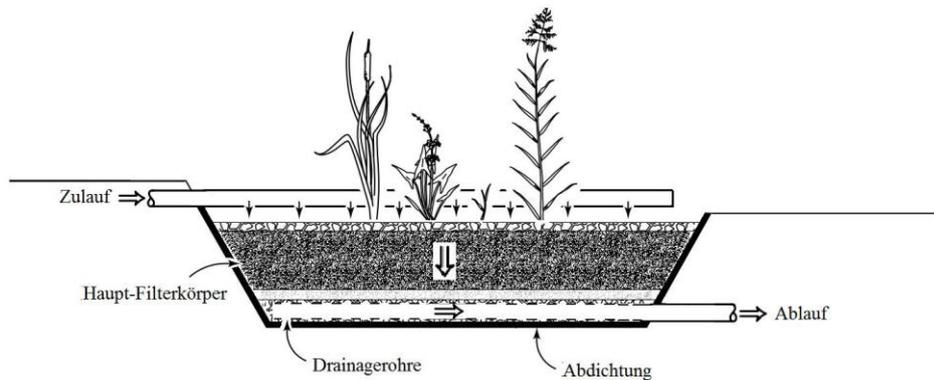


Abbildung 3-3: vertikal durchflossener Bodenkörper (VF)

Der Hauptanteil der Reinigungsleistung bei Pflanzenkläranlagen basiert auf der Abbautätigkeit von Mikroorganismen und Bakterien, ähnlich wie in konventionellen Systemen. Die Mikroorganismen finden sich hauptsächlich in der durchwurzeltten Zone im Bodenkörper. Die Vegetation sorgt somit für adäquate Lebensbedingungen und die Versorgung mit Sauerstoff.

Weitere Reinigungsmechanismen sind u.a. (KADLEC & WALLACE, 2009):

- Chemische Reaktionen
- Verdampfung, Verflüchtigung
- Sedimentation
- Sorption
- Photodegradation
- Pflanzenaufnahme

Vorteile und Probleme von Pflanzenkläranlagen

Pflanzenkläranlagen besitzen gegenüber konventionellen Systemen Vorteile genauso wie Nachteilen. Es gibt keine generelle Lösung. Bei der Auswahl des geeigneten Wasserreinigungssystems muss immer auf die örtlichen Gegebenheiten und Anforderungen geachtet werden. Der große Vorteil von Pflanzenkläranlagen ist, dass ein Großteil der Prozesse kein menschliches Eingreifen oder eine Steuerung notwendig macht. Eine künstliche Belüftung ist meistens nicht notwendig. Funktioniert der Durchfluss im freien Gefälle benötigt man prinzipiell keine elektrische Energie. Wurde die Pflanzenkläranlage korrekt errichtet und haben sich die Biozönosen angesiedelt, reinigt die Anlage das Abwasser ganz von alleine. Oft genügt es, wenn der Klärwärter in regelmäßigen Abständen die Funktionstüchtigkeit der Anlage kontrolliert.

Weitere Vorteile von Pflanzenkläranlagen sind das große Puffervermögen, geringe Schlammproduktion und geringe Betriebskosten (VYMAZAL et al., 1998).

Probleme beim Betrieb einer Pflanzenkläranlage lassen sich oftmals auf Fehler in der Errichtung zurückführen. Somit kann es zu einem Verstopfen des Filterkörpers und zu oberflächlichem Abfluss oder hydraulischen Kurzschlüssen kommen, bei denen der Filterkörper nicht ideal durchflossen wird. In der Folge kommt es zu einer Abnahme der Reinigungsleistung. In gemäßigten Klimaten besteht außerdem die Gefahr, dass die Oberfläche des Filters im Winter friert. Das kann ebenso die Zulauf- und Verteilerrohre betreffen und die Beschickung des Filters behindern. Abhilfe kann durch intermittierende Beschickung und durch den Einbau der Verteilerrohre unter der Geländeoberfläche geschaffen werden.

Der Platzbedarf von Pflanzenkläranlagen ist größer als von konventionellen Systemen. Auch können viele betriebliche Abwässer oder besonders toxische Schadstoffe nicht ausreichend entfernt werden. Es würde also keinen Sinn machen, die Abwässer einer Großstadt mit einer

Pflanzenkläranlage klären zu wollen. In ländlichen Gegenden aber sind sie oft die beste Lösung.

3.1.1 Vertikal durchströmter Bodenfilter

3.1.1.1 Allgemein

Grundsätzlich werden vertikal durchflossene Bodenfilter (VF) an der Bodenoberfläche kontinuierlich oder intermittierend beschickt, durchflossen und an der Bodenfiltersohle mit Drainagerohren entwässert.

Eine genauere Unterteilung ist möglich (KADLEC & WALLACE, 2009):

- Intermittierender Durchfluss: Der Bodenkörper wird in bestimmten Abständen für kurze Zeit mit Wasser beschickt. Bei diesem System werden die Poren des Bodens regelmäßig mit Wasser gesättigt und durch den gravitativen Abfluss wieder belüftet. Somit kann eine erhöhte Versorgung der Mikroorganismen und Bakterien mit Sauerstoff gewährleistet werden. Außerdem kann dadurch, in kalten Klimaten, durch das Unter-Druck-Setzen der Zuleitungsrohre ein Zufrieren verhindert werden.
- Ungesättigter Durchfluss: Im Unterschied zum intermittierenden Durchfluss wird hier der Boden kontinuierlich beschickt. Die Wassermengen sind klein um den Boden nicht zu sättigen und aerobe Verhältnisse zu gewährleisten. Um ein Zufrieren der Leitungen zu verhindern, können die Zuleitung unter der Bodenoberfläche verlegt werden. Dieses System wird oft zum mehrmaligen Durchfließen (*recycling*) des Abwassers genutzt.
- Gesättigter Durchfluss (ab- oder aufwärts): Der Boden ist wassergesättigt, die Fließrichtung kann nach unten oder nach oben gerichtet sein. In Gravitationsrichtung fließende Varianten werden auch als anaerobe Pflanzenkläranlagen oder alkaline Systeme bezeichnet, wobei nach oben fließende Systeme belüftet werden (YOUNGER et al., 2002; zit. bei KADLEC & WALLACE, 2009).
- Gezeitenfluss (Tidal flow): Diese Bauart erinnert an ein SBR-System. Der Bodenkörper wird zuerst bis an die Oberfläche gefüllt, eine Zeit belassen und danach wieder entleert. In dieser Zeit herrschen zuerst aerobe, dann anaerobe Verhältnisse und schließlich findet wieder eine Belüftung statt. So können oxidierende und reduzierende Phasen geschaffen werden (SUN et al., 1999; zit. bei KADLEC & WALLACE, 2009)

3.1.1.2 Filtermaterialien

Das Material, aus dem der Bodenfilter besteht muss mehreren Anforderungen entsprechen. Es soll Substrat sein auf dem die biologischen Komponenten einer Pflanzenkläranlage, also der Bakterien und Mikroorganismen und der Makrophyten, aufwachsen können. Des Weiteren soll die Bodendurchlässigkeit eine gleichmäßige Verteilung des Abwassers und eine ausreichende Sauerstoffversorgung der Biozönosen gewährleisten. Es soll eine möglichst hohe Oberfläche haben, um ausreichenden Kontakt des Abwassers mit dem Filtermaterial zu ermöglichen und gleichzeitig gleichmäßig durchströmt und ausreichend durchlässig sein (HÖNER & GELLER, 2003).

Der Korndurchmesser des Bodenkörpers entscheidet über die Größe der Oberfläche und in Folge über die Besiedelungsdichte der Mikroorganismen und Kapazität der Adsorption. Außerdem wirkt der Boden wie ein Filter für Abwasserpartikel. Bei zu kleinem Korndurchmesser besteht die Gefahr des „Clogging“, das Verstopfen der Poren und somit des Bodenfilters. Dies wird hervorgerufen durch die Filtration der Partikel, Biomasseproduktion in den Poren,

Chemischer Fällung durch Bestandteile des Bodens und der Durchwurzelung (KADLEC & WALLACE, 2009).

Für horizontal und vertikal durchströmte Bodenfilter werden in der Regel Sand- und Kiesfraktionen als Filtermaterial verwendet. Um die Durchströmbarkeit zu gewährleisten muss der Filter eine Durchlässigkeit von etwa $k = 10^{-4}$ m/s aufweisen (ÖNORM B2505, 2009).

Seit einiger Zeit wird an einer Optimierung des Bodenfilters für die Bedürfnisse der Phosphor Eliminierung gearbeitet. Pflanzen, Bakterien und Mikroorganismen nehmen zwar Phosphor für den Biomasseaufbau auf, geben diesen am Ende ihres Lebens aber auch wieder ab. Als relevante P-Senke können sie also nicht fungieren. Die Adsorption des Phosphors an den Bodenpartikeln ist bislang die einzige Möglichkeit in vertikal durchströmten Pflanzenkläranlagen Phosphor aus dem Abwasser zu entfernen. Diese Aufnahmefähigkeit ist jedoch begrenzt. Mit zunehmendem Alter der Anlage steigt die Beladung der Partikel mit Phosphor, bis die Aufnahmekapazität irgendwann erschöpft ist (FAULKNER&RICHARDSON, 1989; KADLEC&KNIGHT, 1996; SAKADEVAN&BAVOR, 1998; VYMAZAL et al., 2000; zit. bei VOHLA et al., 2009).

Aus diesem Grund wird derzeit großer Forschungsaufwand betrieben, um verschiedene Filtermaterialien auf ihre Eignung für die P-Entfernung zu untersuchen (ZHU et al., 1997; JOHANSSON, 1997; ROSETH, 2001; ANDERSON&ROSOLEN, 2000; BROOKS et al., 2000; BRIX et al., 2001; zit. bei VOHLA & MANDER, 2004), (DRIZO et al., 1999; ARIAS et al., 2001; zit. bei ADAM et al., 2004).

3.1.1.3 Vegetation

Der Einfluss der Vegetation bei vertikal durchströmten Bodenfiltern ist zwar geringer als bei permanent eingestauten Systemen (KADLEC & WALLACE, 2009), dennoch haben Pflanzen einen nachweislichen positiven Effekt auf die Reinigungsleistung (BRISSON et al., 2006). Die Auswahl der Pflanzenarten wurde bisher vor allem durch regionale Traditionen bedingt (VYMAZAL et al., 1998). Welche Art für einen bestimmten Standort am besten geeignet ist, hängt von vielen Faktoren ab und ist noch nicht vollständig geklärt. Studien darüber lieferten bisher keine konkreten und zum Teil widersprüchliche Ergebnisse (BRISSON et al., 2006).

Die oberirdischen Auswirkungen der Vegetation sind (BRISSON et al., 2006)

- Stabilisierung der Bodenoberfläche,
- Herabsetzung der Windgeschwindigkeit und Erosionsschutz
- Zudecken der Bodenoberfläche und Frostschutz im Winter
- Temperaturregulierung und Beschattung
- Nährstoffentzug und Einlagerung in die Pflanzenteile
- Nährstoffabgabe durch Dekompostierung

Effekte des Wurzelsystems beinhalten (KADLEC & WALLACE, 2009)

- Vergrößerung der Oberfläche für mikrobielles Wachstum
- Sauerstoffdiffusion
- Abgabe von desinfizierenden Pflanzenstoffen
- Zusätzliche Einbringung von Pilzen und symbiontischen Bakterien

3.1.2 Pflanzenkläranlagen in Österreich

Österreich als Land des sauberen Wassers – so sehen die meisten anderen Länder die Alpenrepublik. Aber auch den Österreichern selbst scheint dieses Bild zu gefallen. Die Land- und Almwirtschaft als Landschaftsgärtner werden stark subventioniert, die Auflagen an die Reinigungsleistung von Abwasserreinigungsanlagen sind meistens höher als in den

Europäischen Normen gefordert. Umwelt- und Landschaftsschutz haben einen hohen Stellenwert. Der Anschlussgrad von Wasserverbrauchern an eine kommunale Kläranlage betrug 1971 noch 48 %. 2008 konnte dieser Wert auf fast 93 % gesteigert werden (Abbildung 3-4).

Die verbleibenden 14 % oder 1,130.552 Einwohner fallen zum großen Teil auf Wasserverbraucher ab, bei denen ein Anschluss an zentrale Systeme entweder zu teuer und aufwendig oder gar nicht möglich ist. Das ist vor allem in sehr dünn besiedeltem Gebieten, Einzellagen oder Extremlagen (z.B. Almhütten in großer Höhe) der Fall. Hier eignet sich der Einsatz von dezentralen Lösungen, so genannten „*on-site solutions*“. Das können konventionelle Systeme wie Tropfkörperanlagen oder SBR-Reaktoren sein, aber auch alternative oder extensive Systeme wie Pflanzenkläranlagen (VYMAZAL et al., 1998).

Pflanzenkläranlagen sind in Österreich seit fast 30 Jahren ein Grund für emotionale Debatten. Den vielen Vorteilen wurden immer wieder die fehlende Erfahrung über einen langen Betriebszeitraum, Probleme im Winterbetrieb, hygienische Probleme und das Verstopfen des Filters vorgehalten (VYMAZAL et al., 1998). Doch gerade diese Kontroverse war Anlass für intensive Forschung und der Bau von Pilotanlagen. (HABERL und PERFLER, 1990; LABER et al., 1997; GRABHER, 1997; zit. bei VYMAZAL et al., 1998) Erstmals galt 1995 das alternative System des vertikal durchströmten Bodenfilters mit der ÖNORM B 2505 als Ergebnis des österreichischen Normenwerkes als Stand der Technik (*state of the art*). Durch das neueste Forschungsprojekt BEPFLANZTE BODENFILTER (ÖKOREAL und BOKU-SIG, 2009) wurden die Dimensionierungsansätze für vertikal durchströmte bepflanzte Bodenfilter aktualisiert (ÖNORM B 2505, 2009).

Entsorgung / Jahr	1971	1981	1991	2001	2006	2008
Einwohner ¹⁾	7.491.526	7.533.045	7.808.097	8.065.465	8.298.923	8.355.260
Öffentliches Kanalnetz mit Anschluss an kommunale Kläranlage > 50 EW ₆₀	47,9	57,9	71	86	91,7	92,8
Hauskläranlagen ²⁾	16,4	16,1	9,8	14	8,3	7,3
Senkgruben ²⁾	28,5	20,3	17,8			
Sonstige Entsorgung ²⁾	7,2	5,7	1,5			

¹⁾ Quelle: Statistik Austria

Abbildung 3-4: Abwasserentsorgung und -behandlung 1971 – 2008 (BMLFUW, 2010b)

Eine Schwäche von bepflanzten Bodenfiltern ist sicherlich die unzureichende Eliminierung von Phosphor (BRIX et al., 2001). Bis heute ist für Abwasserreinigungsanlagen kleiner 500 EW kein Grenzwert für Phosphor vorgeschrieben (1.AEVkA, 1996). Seit der Einführung der Qualitätszielverordnung müssen aber bei sensiblen Vorflutern bei jeder Einleitung von gereinigtem Abwasser Grenzwerte hinsichtlich des P-Gehaltes des Ablaufes vorgeschrieben werden (Kapitel 3.3). Deshalb ist es von großer Bedeutung, eine Lösung der Phosphor-Problematik bei Pflanzenkläranlagen zu finden, um einen weiteren Einsatz dieser Technologie unter Berücksichtigung der heutigen Anforderungen zu gewährleisten.

3.2 Phosphor

P ist das Symbol des Phosphors im Periodensystem. Phosphor ist ein nichtmetallisches Element der 5. Hauptgruppe des Periodensystems (Abbildung 3-5), die relative Atommasse beträgt 30,974 u. Die Dichte liegt, je nach Form, zwischen 1,8 – 2,7 g/cm³ (KÖLLE, 2010).

Es gibt 3 Formen des *elementaren* Phosphors, weißen, roten und schwarzen Phosphor. Sie unterscheiden sich in ihrer Struktur und Reaktionsfähigkeit. Elementarer Phosphor ist sehr reaktiv und kommt nicht in der Natur vor, er kann aber durch Erhitzen von Phosphat-Mineralien mit Sand und Koks bei etwa 1500 °C gewonnen werden. Der Anteil von Phosphor an der Erdkruste beträgt 0,12 % (MORTIMER, 2003).

	Stickstoff	Phosphor	Arsen	Antimon	Bismut
Farbe	farblos	weiß; rot; schwarz	metallisch grau; gelb	metallisch grau	metallisch rötlich
Molekülformel	N ₂	P ₄ (weiß) P _n (rot, schwarz)	As _n (metall.) As ₄ (gelb)	Sb _n	Bi _n
Schmelzpunkt /°C	-210	44 (weiß)	814 (36 bar)	630,5	271
Siedepunkt /°C	-196	280	633 (Subl.)	1325	1560
Kovalenzradius /pm	74	110	121	141	152
Ionenradius /pm	146 (N ³⁻)	185 (P ³⁻)		76 (Sb ³⁺)	103 (Bi ³⁺)
Erste Ionisierungsenergie / (kJ mol ⁻¹)	1399	1061	965	830	772
Elektronegativität	3,0	2,2	2,2	2,1	2,0

Abbildung 3-5: Einige Eigenschaften der Elemente der 5. Hauptgruppe (MORTIMER, 2003)

In der Natur findet sich Phosphor häufig in der Form von Phosphaten und des Orthophosphats (PO₄). Dieses Molekül besteht aus einem Phosphoratom und 4 Sauerstoffatomen, und ist 3-mal negativ geladen. Viele komplexe organische Phosphorverbindungen werden durch Hydrolyse und enzymatischen Abbau zu Orthophosphat abgebaut.

Phosphor kommt in unterschiedlichen Verbindungen in modernen Produkten vor. Manche Phosphide sind Halbleiter, Phosphorsäureester werden als Pestizide oder als Weichmacher in Kunststoffen verwendet. Phosphate finden Anwendung als Düngemittel, als Waschmittel oder als Lebensmittelzusatz und verhindern Korrosion bei der Trinkwasserversorgung. Neben vielen weiteren Anwendungen in der technischen Chemie sind immer noch Düngemittel die bedeutendste Produktklasse des Phosphors.

3.2.1 Der Phosphorkreislauf

Phosphor besitzt zwar eine gasförmige Form, das Phosphin, diese kommt aber in so geringen Mengen vor, dass sie keine Relevanz besitzt. Somit beschränkt sich der globale Umsatz auf die feste und die flüssige Phase.

Es gibt dabei 3 verschiedene Prozessformen:

- Die Freisetzung aus Mineralien und Gesteinen (+)
- Re-Zirkulation in der Biosphäre (+/-)
- und das Absetzen in Sedimenten und somit eine erneute Einlagerung in Mineralien (-).

Die Geschwindigkeit der Sedimentation und damit des Entzugs aus der Biosphäre ist durch den Menschen nicht beeinflussbar und folgt einem Milliarden Jahre alten Gesetz. Durch den bergmännischen Abbau von phosphorhaltigen Gesteinen und der Freisetzung in Form von Kunstdünger und Abwässern hat der Mensch in dieses System gravierend eingegriffen. Er hat den Anteil an verfügbarem Phosphor in der Biosphäre auf lange Zeit erhöht und tut dies immer noch (Abbildung 3-6: Vereinfachtes Schema des globalen P-Kreislaufes,). Es liegt auf der Hand, dass dadurch globale Folgen für alle Ökosysteme entstanden sind.

Phosphor ist ein wesentlicher Bestandteil der Nucleinsäuren. Das Energiemolekül ATP (Adenosintriphosphat) ist die universelle Form unmittelbar verfügbarer Energie und Regulator energieliefernder Prozesse aller Lebewesen. Es kommt in Tieren genauso vor wie in Pflanzen. Der Phosphatgehalt eines Lebewesens hängt dabei weniger von seiner Masse als von seiner biochemischen Aktivität ab (WISSING, 1995).

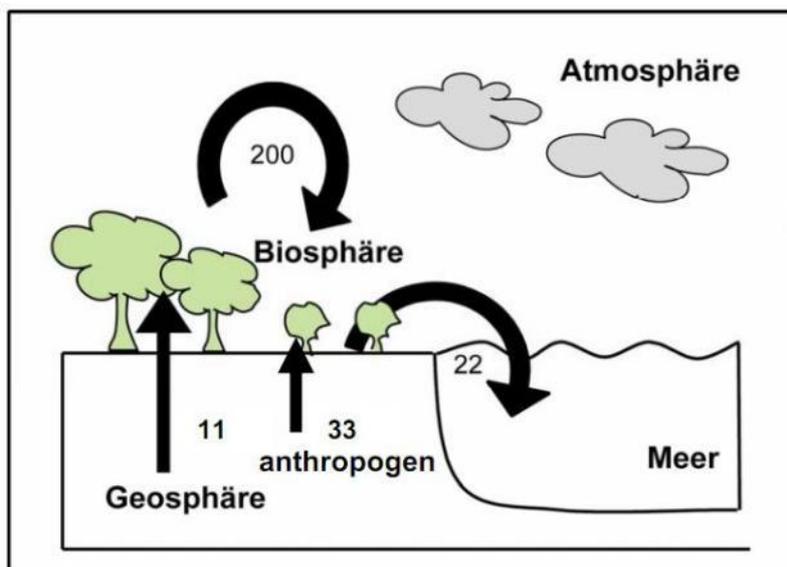


Abbildung 3-6: Vereinfachtes Schema des globalen P-Kreislaufes, Angabe in Tg P/Jahr (WEHRLI, 2002)

Phosphor wird durch Zellproduktion von Organismen in Biomasse eingelagert. Mensch und Tier nehmen Phosphor hauptsächlich durch die Nahrung auf. Pflanzen müssen ihre Nährstoffe in einer Lösung über die Wurzeln aufnehmen. Vor allem bei Pflanzen ist eine ausreichende Versorgung notwendig um ein optimales Wachstum zu ermöglichen. Bei natürlichen Verhältnissen ist dies selten und nur bei besonders begünstigten Gebieten der Fall. Heutzutage werden intensiv genutzte Agrarflächen mit zusätzlichem Phosphor gedüngt. Der Phosphor stammt hauptsächlich aus geogenen Quellen (Kunstdünger) und aus dem Kot von Vögeln (Guano) und Säugetieren (Jauche und Gülle). Obwohl eine geringe Menge an Phosphor ausreicht um den bestmöglichen Ertrag zu erhalten wird, aus Mangel an Kenntnis des genauen Bedarfes, oft mehr als nötig gedüngt. Für viele ist auch der Grundsatz „Mehr ist mehr“ leider immer noch gültig. Der überschüssige Nährstoff kann sogar eine Zeit lang im Boden gebunden werden und einen regelrechten P-Speicher aufbauen. Der Eintrag in Gewässer aus landwirtschaftlich genutzten Flächen geht somit hauptsächlich auf partikulären Eintrag durch

Erosion zurück (ISHERWOOD, 2000). Früher wurde Phosphor in geringerem Ausmaß durch natürliche Dünger, in Form von Ausscheidungen von Nutztieren auf die Felder aufgebracht. Mit Hilfe der Kunstdünger wurde der Düngemiteleinsatz intensiviert und die Erträge konnten weltweit um ein Vielfaches erhöht werden. Um einer Überproduktion von Agrarprodukten entgegen zu wirken, wurde in Folge vor allem weniger Ackerland genutzt, um dieselben Erträge zu erhalten (Abbildung 3-7). Man spricht auch von der „Grünen Revolution“.

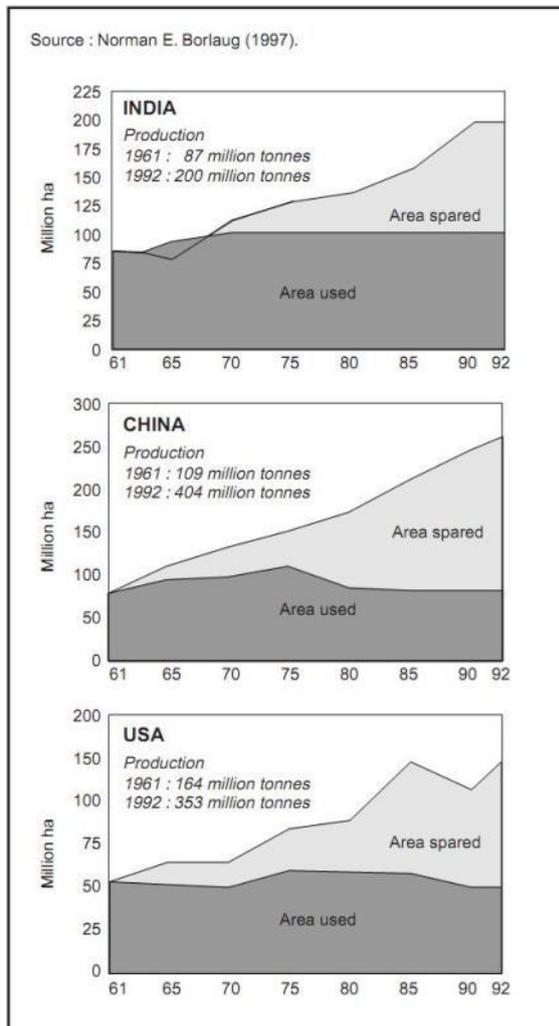


Abbildung 3-7: Entwicklung der Agrarflächen (ISHERWOOD, 2000)

Pflanzen wie Tiere enthalten in ihrer Biomasse also Phosphor. Beim Absterben aller Lebewesen wird durch diverse Abbautätigkeiten der in den Zellen enthaltene Phosphor wieder mineralisiert. Die Abbauf orm (ebenso wie die Aufnahmeform) ist die oxidierte Form, das Phosphat (PO_4). Das Phosphat dient in günstigen Fällen wieder dem Aufbau von Biomasse und verbleibt am selben Ort. Böden besitzen die Fähigkeit überschüssigen Phosphor durch adhäsive Kräfte und Ausfällung an Metallionen zu speichern. Der Rest, der weder in einen Organismus aufgenommen, noch in einer Senke gespeichert wird, tritt unweigerlich den Weg ins Meer an, wo Partikel als Sedimente abgesetzt werden, von weiteren Sedimenten bedeckt und irgendwann zu Sedimentgestein werden.

3.2.2 Phosphor als Kunstdünger

Aufgrund der globalen Rohstoffmärkte kann kaum ein Land auf den Einsatz von Kunstdünger verzichten, um konkurrenzfähige Erträge im Verhältnis zu den Produktionskosten zu erzielen. Durch den übermäßigen Einsatz von P-Dünger sind viele Böden in hoch entwickelten Ländern mit Phosphor gesättigt, d.h. es werden keine Ertragssteigerungen durch Düngung mehr erreicht. Dadurch ließ die Nachfrage in diesen Ländern nach. Doch in vielen unterentwickelten Ländern herrscht nach wie vor Bedarf nach zusätzlichem Phosphor. Heut beträgt die weltweite Nachfrage etwa 145 Mt. (LANGE, 2009). P-Dünger wird in Ländern produziert, die ausreichend Vorkommen von phosphorhaltigen Gesteinen besitzen. Das waren vor allem Nordafrika und die USA, seit einigen Jahren gilt China als das Land mit den größten Phosphor-Reserven (LANGE, 2009). Wie lange noch genug geogene Vorkommen den Bedarf stillen können, ist schwer vorherzusehen. Sollte der aktuelle Verbrauch in etwa gleich bleiben, könnten die leicht abbaubaren Vorkommen noch ca. 80 bis 200 Jahre ausreichen (ISHERWOOD, 2000 und LANGE, 2009).

3.2.3 Phosphor in aquatischen Ökosystemen

Die natürlichen Einträge in ein Gewässer bestehen zu einem großen Teil aus der Re-Zirkulation aus der Biosphäre (WEHRLI, 2002), also aus abgestorbenen Pflanzenteilen der Ufervegetation (MEYER&LIKENS, 1979; zit. bei WITHERS & JARVIE, 2008) und anderen Organismen. Da diese jedoch wieder für den Aufbau von Biomasse entzogen werden, kann diese Bilanz annähernd als ausgeglichen angesehen werden (Abbildung 3-6). Entzug und Akkumulierung aus der Biosphäre wirken sich jedoch auf Abschnitte eines Fließgewässers, vor allem auf die laterale Zonierung, aus und führen zu einer Konzentration von Nährstoffen in den Unterläufen und Flussmündungen. Die natürliche Anreicherung von Phosphor aus der Geosphäre geschieht durch den Eintrag von Sedimenten und der Sohlerosion des Fließgewässers (HOLTAN et al., 1988 und WALLINGET et al., 2008; zit. bei WITHERS & JARVIE, 2008). In magmatischen Gesteinen kommt Phosphor mit einer Konzentration von bis zu 600g/t vor. Sedimentgesteine, die abbauwürdige Mengen an Phosphaten enthalten werden mit dem Sammelbegriff „Phosphorit“ bezeichnet (KÖLLE, 2010). Durch die Ablagerungen in den Sedimenten der Meere und Ozeane schließt sich der natürliche Kreislauf.

Phosphorkonzentrationen in Niederschlägen sind sehr gering und betragen zwischen 0,01 und 0,04 mg P/l. Phosphor hat keine bedeutende atmosphärische Form (WEHRLI, 2002). Natürliche P-Einträge sind in der Regel klein (<0,1 kg P/ha/a) und spielen nur in Gewässern eine Rolle, die von menschlichen Einträgen nicht belastet werden (WITHERS & JARVIE, 2008).

Anthropogene Einträge von Phosphor in Gewässer werden in Punktquellen (Einleitungen von phosphorhaltigen Wässern und Abwässern) und in diffuse Quellen, aus Düngemitteln aus der Landwirtschaft und oberflächlichem Abfluss von Regenwasser, unterschieden und stellen die größten P-Quellen beim Eintrag in die Gewässer dar.

Bei den Punktquellen, also den Einleitungen von Abwässern in Oberflächengewässer stammt der Phosphor vor allem aus menschlichen Ausscheidungen und aus Wasch- und Reinigungsmitteln. Mittlerweile ging der Einsatz von Phosphaten in Waschmitteln, auch aus Gründen des Gewässerschutzes, stark zurück (KÖLLE, 2010).

Phosphor wird in gelöster Form, gebunden an Bodenpartikel und als Feststoff in Form von Biomasse in ein Gewässer eingetragen. Im Gewässer selbst finden wiederum Prozesse statt, die Phosphor umwandeln, aufnehmen oder abgeben können und die je nach Gewässerabschnitt unterschiedlich ausgeprägt sein können. Dieses Umschlagen (engl. *cycling*) des Phosphors kann biotische und abiotische Prozesse beinhalten (Abbildung 3-8).

Die wichtigsten sind (VANNOTE et al., 1980; BRYCE et al, 1999; ALLEN, 2004; zit. bei WITHERS & JARVIE, 2008):

- Aufnahme/Abgabe
- Adsorption/Desorption
- Ausfällung/Lösung
- Advection/Diffusion

Vor allem die Aufnahme und somit die Speicherung von P in den Sedimenten und in Biomasse hat entscheidende Auswirkungen auf Gewässer und Gewässerabschnitt.

Da Phosphor ein essentieller Pflanzennährstoff ist, ist ein Eintrag in ein Gewässer für das Überleben von Organismen zwingend notwendig. Das Entscheidende ist die Konzentration, für den Aufbau von Biomasse ist neben Phosphor (P) Kohlenstoff (C) und Stickstoff (N) notwendig, und zwar im Verhältnis von etwa

100(C) : 5(N) : 1(P).

Im Gegensatz zu Kohlenstoff und Stickstoff kommt Phosphor oftmals in so niedrigen Konzentrationen vor, dass es für das Wachstum von Organismen eine limitierende Bedeutung bekommt. Nach dem Gesetz von Justus von Liebig wird das Wachstum von Pflanzen durch den Pflanzennährstoff bestimmt, der in Relation zu seinem Bedarf, in der geringsten Menge zu Verfügung steht. (VON LIEBIG, 1855; zit. bei SMITH et al., 1999) Durch den zusätzlichen Eintrag von Pflanzennährstoffen durch den Menschen kann es zu einem erhöhten Wachstum von Wasserpflanzen und Algen kommen und je nach Art des Gewässers unter dem Begriff „Eutrophierung“ zu verschiedenen Problemen führen (WITHERS & JARVIE, 2008). Diese Probleme betreffen die menschliche Gesundheit durch Algentoxine, die Biodiversität und Abundanz von aquatischen Organismen, sowie ästhetische Aspekte und gesteigerte Kosten bei der Trinkwasseraufbereitung (WITHERS & JARVIE, 2008).

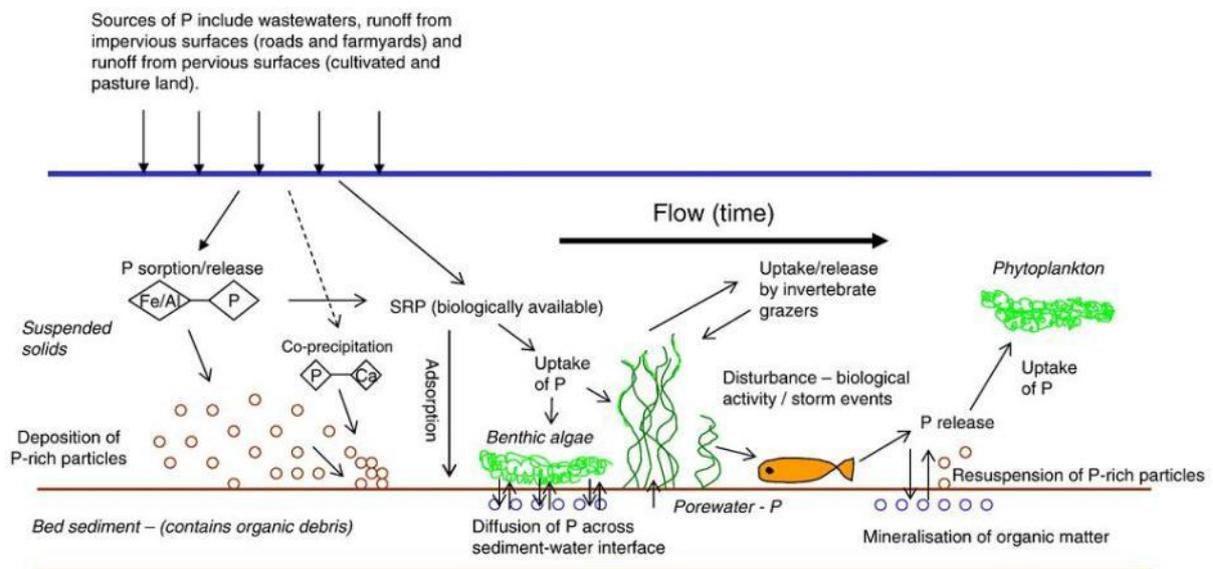


Abbildung 3-8: Prozesse der Aufnahme und Abgabe von P in Fließgewässern (WITHERS & JARVIE, 2008)

3.2.3.1 Phosphor in Fließgewässern

Eutrophierung kann in Fließgewässern unterschiedliche Auswirkungen haben. Das unterscheidet sich je nach Größe (Durchfluss), Fließgeschwindigkeit, Jahreszeit der niedrigsten Durchflüsse und natürlicher Hintergrundkonzentration des Flusses.

Kleine Flüsse und Bäche sind aufgrund ihrer geringen Wasserführung am sensibelsten gegenüber Einträgen und Einleitungen, die eine unterschiedliche stoffliche Zusammensetzung aufweisen. Leider sind sie oft die ersten Empfänger für Abwasser („Vorfluter“), aber auch für partikuläre Einträge aus landwirtschaftlich genutzten Flächen und dem Abfluss aus versiegelten Oberflächen. Andererseits ist das Verhältnis von Wasserkörper zu Flussbett und benthischem Lebensraum kleiner, die Lichtdurchlässigkeit höher und die Temperatur meist niedriger, was wiederum ein größeres Potential für physikochemische und biologische Austauschprozesse birgt. Somit ist die Selbstreinigungskapazität höher als in Gewässern höherer Ordnung. In größeren Flüssen spielen hingegen Prozesse im Wasserkörper, wie zum Beispiel Wechselwirkungen mit Schwebstoffen, die größere Rolle.

In schnell fließenden Bächen bewirkt eine „Düngung“ mit Phosphor ein verstärktes Auftreten von Periphyten wie Grünalgen und epiphytische Diatome, die wiederum submerse Pflanzen höherer Ordnung verdrängen können. Bei langsameren und stehenden Gewässern wird das Wachstum von Phytoplankton gefördert. Algentepiche und starke Trübung des Wassers verhindern den Lichteinfall und zehren gleichzeitig viel Sauerstoff (WITHERS & JARVIE, 2008).

Die Probleme im Zusammenhang mit der Eutrophierung durch Phosphoreintrag betreffen sehr häufig gefördertes Wachstum von Pflanzen, vor allem Algen und Mikroorganismen und Bakterien. In Klimaten, in denen in den Wintermonaten durch niedrige Temperaturen biologische Prozesse zum Erliegen kommen, kann ein hoher Phosphorgehalt im Winter fast ohne Auswirkungen bleiben. Im Gegenteil können besonders die warmen Sommermonate zu Problemen führen, besonders dann wenn zu dieser Zeit die niedrigsten Durchflüsse zu erwarten sind.

Ebenfalls klimatisch bedingt sind Einträge durch Starkregenereignisse. Bei hohen Niederschlägen werden oftmals Partikel durch den Oberflächenabfluss des Regens abgeführt, die sich über große Zeiträume angesammelt haben. Dies kann zu Spitzen bei der Phosphorbelastung führen. Entgegenwirkend verhindert die hohe Fließgeschwindigkeit lange Aufenthaltszeiten und somit langanhaltende Belastungen.

Der Eintrag von Phosphor in ein Fließgewässer und seine Auswirkungen auf das Ökosystem hängen also von einer Reihe von Faktoren ab. Bei der Beurteilung der Konsequenzen eines Eintrages muss vor allem auf

- das Verhältnis Menge der Einleitung zu Wasserführung des Gewässers
- den Zeitpunkt der Einträge im jahreszeitlichem Verlauf
- die Fließgeschwindigkeit des Gewässers
- die Form des eingebrachten Phosphors

geachtet werden.

3.2.3.2 Phosphor in Seen

Die meisten Seen besitzen zwar einen Zu- und einen Ablauf, die Aufenthaltszeit eines Wassertropfens im See kann aber viele Jahre betragen. Der Veränderung der Konzentration eines Stoffes in einem See ist träge und sehr schwer manipulierbar, eine Reduktion der Konzentration schwieriger als eine Erhöhung. Anders als in einem Fluss können Einzelereignisse langanhaltende Folgen haben und es gilt der Grundsatz, ist ein kritischer Zustand erst einmal erreicht, kann eine Sanierung des Gewässers nur noch durch unverhältnismäßig hohen Aufwand erreicht werden.

Ist eine kritische Eutrophierung in einem See bereits eingetreten, ist dies leicht zu erkennen. Das Wasser wird stark getrübt, verändert seine Farbe und beginnt unangenehm zu riechen (HILTON et al., 2006). Im Volksmund sagt man, das Gewässer „kippt“. Diese Symptome werden wiederum durch explosionsartiges Algenwachstum (Algenblüte), geringeren Lichteinfall und Sauerstoffzehrung hervorgerufen. Geht der Sauerstoff für den aeroben Abbau von Biomasse verloren, entstehen extrem sauerstoffarme Zonen, in denen durch anaeroben Abbau übel riechende Schwefelwasserstoffe und Toxine entstehen. Die Folgen sind nicht nur für die Wasserorganismen fatal, auch für den Menschen können Gefahren für Gesundheit und hohe ökonomische Verluste durch den Wertverfall von Grundstücken, das Ausbleiben von Touristen und die Kosten für Sanierung entstehen.

Wenn eine Einleitung in ein Fließgewässer geprüft wird, sollte also nicht nur auf den Vorfluter, sondern auch auf Seen im Einzugsgebiet geachtet werden. Vor allem, weil die Auswirkungen auf Seen gravierender und schwerer rückgängig gemacht werden können als bei Flüssen. Außerdem scheint es, als wäre Phosphor in den meisten Seen der gemäßigten Klimate der „limiting nutrient“, der Pflanzennährstoff also, der das Wachstum begrenzt und der bei einer Erhöhung der Konzentration unmittelbare Folgen für das gesamte Ökosystem hat (MAYBERLY et al., 2002; zit. bei HILTON et al., 2006; SCHINDLER, 1977, HECKY&KILHAM, 1988 zit. bei SMITH et al., 1999).

3.2.3.3 Phosphor in Meeren und Ozeanen

Die Weltmeere sind die Abfallsammelzentren der Menschheit. Aber nicht nur Abfall, auch das Abwasser landet in den meisten Fällen, durch ein Fließgewässer transportiert, irgendwann im Meer. Die Meinung, die enorme Größe der Wasserkörper der Ozeane könne unbegrenzt Schadstoffe ohne größere Auswirkungen aufnehmen, ist lange widerlegt. Komplizierte Strömungsmuster und sehr lange Umsatzraten der Meeresströmungen haben die Auswirkungen auf Tiefenwasser bisher noch nicht klar erkennen lassen. Bei flachgründigen Küstengewässern sind die Schäden unmittelbar und deutlich zu sehen (Abbildung 3-9).

Meere, die von den Weltmeeren nur durch schmale Verbindungen mit frischem Tiefenwasser versorgt werden sind besonders anfällig auf Eutrophierung. Beispiele sind das Mittelmeer, das Schwarze Meer und der Golf von Mexiko. Ein bekanntes Beispiel für den nachweisbaren negativen Einfluss der Eutrophierung auf ein Gewässer ist das *mare baltikum*, die Ostsee. Dieses Meer besitzt zwar eine Anbindung an die Nordsee und somit an die Weltmeere, die Verbindung ist jedoch so schmal, dass der Wasseraustausch gering ist und die Ostsee somit eher einem großen See ähnelt als einem Meer. Bleiben periodisch auftretende große Wassereinströmungen aus der Nordsee aus, nimmt die Anzahl an großflächigen sauerstofffreien Zonen zu, ausgelöst durch Algenwachstum und -abbau auf dem Meeresgrund (LEIBNITZ INSTITUT FÜR OSTSEEFORSCHUNG WARNEMÜNDE, 2011). Diese so genannten „Todeszonen“ gleichen leblosen Unterwasserwüsten

Die Folgen sind vielschichtig: Badeverbote aufgrund giftiger Algenblüten, Entstehung von anoxischen Zonen und dadurch ausgelöstes Artensterben, das massenhafte Auftreten von Quallen, Korallenbleiche, Fischsterben, etc.

Es sind also gerade viele (europäische) Küstengewässer, die besonders sensibel gegenüber erhöhtem Nährstoffeintrag sind. Es sind die Meere, in die unsere Kläranlagenabläufe letztendlich fließen.

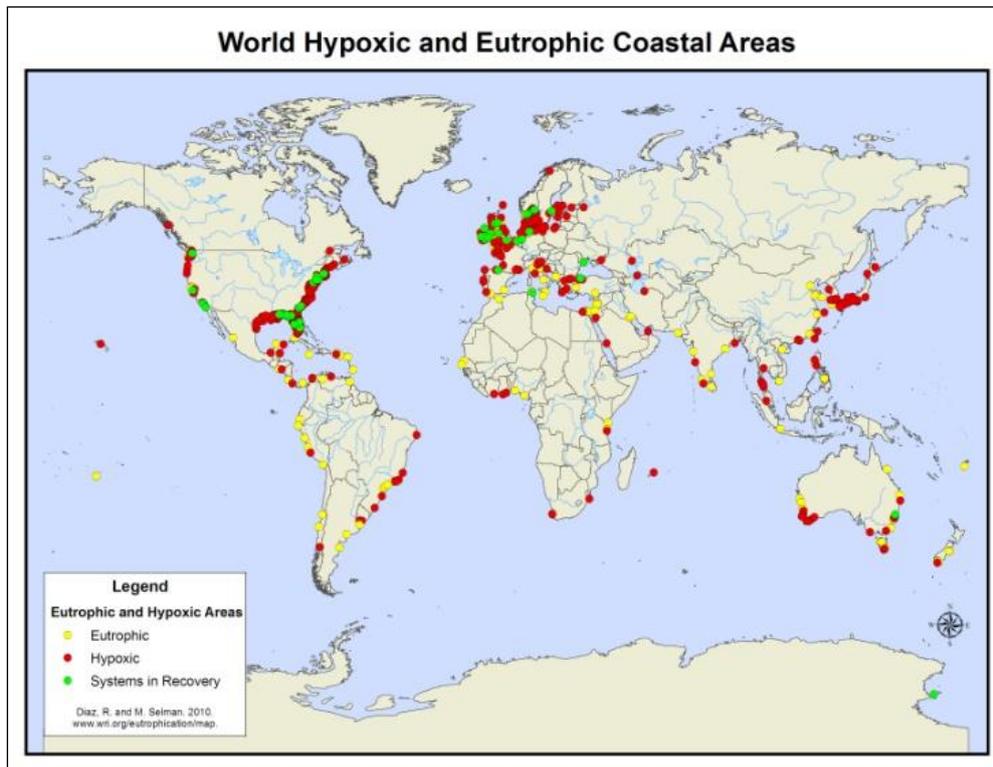


Abbildung 3-9: Hypoxische (rot), eutrophische (gelb) und sich erholende (grün) Küstengebiete (WORLD RESOURCES INSTITUTE, 2012)

3.2.4 Phosphor im Abwasser

3.2.4.1 Herkunftsbereiche des Abwassers

Laut Allgemeiner Abwasseremissionsverordnung (AAEV, 1996) ist Abwasser:

„Wasser, das infolge der Verwendung in Aufbereitungs-, Veredelungs-, Weiterverarbeitungs-, Produktions-, Verwertungs-, Konsumations- oder Dienstleistungs- sowie in Kühl-, Lösch-, Reinigungs-, Desinfektions- oder sonstigen nicht natürlichen Prozessen in seinen Eigenschaften derart verändert wird, dass es Gewässer in ihrer Beschaffenheit (§ 30 WRG 1959) zu beeinträchtigen oder zu schädigen vermag. ...“

und kommunales Abwasser:

„Abwasser aus Küchen, Waschküchen, Waschräumen, Sanitär- oder ähnlich genutzten Räumen in Haushalten oder mit diesem hinsichtlich seiner Beschaffenheit vergleichbares Abwasser aus öffentlichen Gebäuden oder Gewerbe-, Industrie-, landwirtschaftlichen oder sonstigen Betrieben.“

Im Rahmen dieser Arbeit soll ausschließlich auf kommunales Abwasser eingegangen werden.

Die Quellen des Abwassers in einem Haushalt sind also:

- Küchen (Speisereste, Geschirrspülwasser)
- Waschküchen (Waschmittel),
- Waschräume (Duschwasser, Hygieneprodukte)
- und Sanitär (Urin, Fäkalien)

Ein gängiger Bemessungswert für den Anfall an kommunalem Abwasser ist je nach Saison zwischen 100 und 150 l pro Person und Tag.

Eine Unterteilung der Abwasserteilströme nach deren Herkunftsbereichen findet sich in Tabelle 3-1.

Tabelle 3-1: Unterteilung der Abwasserteilströme

Grauwasser (Küchen, Waschküchen, Waschräume)	Schwarzwasser (Sanitär)	
	<i>Gelbwasser</i> (Urin)	<i>Braunwasser</i> (Fäkalien)

Grauwasser

Die Summe der Abwässer aus Küchen, Waschküchen und –räumen wird, aufgrund der Farbe, als Grauwasser bezeichnet und macht zwischen 65% und 85% des Gesamtabwasseranfalles eines Haushaltes ohne besondere Wassersparmaßnahmen aus.

Früher waren es hauptsächlich Waschmittel, die in großem Maße Phosphate in das Abwasser einbrachten. Die Phosphate dienten als Wasserenthärter. 1984 trat in Österreich das „300. Bundesgesetz vom 28. Juni 1984 über die Umweltverträglichkeit von Waschmitteln (Waschmittelgesetz)“ in Kraft, das den Einsatz von Phosphaten in Wasch- und Reinigungsmitteln stark reduzierte (Tabelle 3-3). Auch in anderen Ländern Europas wurde die Gefährdung der Gewässer durch den Eintrag von Phosphor erkannt und durch Verbote von phosphathaltigen Reinigungsmitteln limitiert. Abbildung 3-10 zeigt die Änderung der Phosphorfracht in kommunalem Abwasser in der Schweiz in den Jahren von 1980 bis 1994.

Rohabwasser	1980 g P E ⁻¹ d ⁻¹	1994 g P E ⁻¹ d ⁻¹
Urin	1.1	1.1
Fäkalien	0.5	0.5
Haushaltsabfälle	0.3	0.3
Textilwaschmittel	2.1	0.1
übrige Wasch-, Reinigungsmittel	0.5	0.3
Abschwemmung aus Siedlungsflächen	0.1	0.1
Total	4.6	2.4

Abbildung 3-10: Verteilung der einwohnerspezifischen Phosphorfracht im kommunalen Rohabwasser geordnet nach Herkunft des Phosphors (Verband der Schweizerischen Seifen- und Waschmittelindustrie, 1995; CIBA GEIGY, 1977; PÖPEL, 1993; KOPPE und STOZEK, 1990 zit. bei BÖHLER & SIEGRIST, 2008).

Damals und heute gelangten auch Speisereste in das Abwasser, die ebenso – je nach Speise – Phosphor enthalten können. Vor allem Milchprodukte, enthalten teilweise beträchtliche Mengen Phosphor. Aber auch in anderen Lebensmitteln und Getränken findet sich Phosphor. Der Softdrink „Coca-Cola“ beispielsweise enthält 17mg/l Phosphorsäure. Das entspricht 5,5 mg/l

Phosphor. Kläranlagen dürfen Wasser erst bei deutlich niedrigeren Konzentrationen in den Vorfluter abgeben.

Dank des Verzichts von Phosphaten in Waschmitteln gehen aber lediglich 10% der Phosphatmenge im kommunalem Abwasser auf Grauwasser zurück, bei Stickstoff gar nur 3% (Tabelle 3-2). Andere Quellen der Literatur gehen von nicht ganz so niedrigen Werten aus. PALMQUIST und JÖNSSON (2003; zit. bei STARKL et al., 2005) beziffern den Anteil von Grauwasser an der Phosphorfracht auf 30 %. Unbestritten ist jedenfalls, dass Grauwasser bei den Phosphorfrachten - im Unterschied zur Wassermenge - eine untergeordnete Rolle spielt. Die Grenzwerte für Waschmittel in Haushalten, die seit 1987 einzuhalten sind finden sich in Tabelle 3-3.

Tabelle 3-2: Mengen und Inhaltstoffe in Teilströmen aus häuslichem Abwasser (OTTERPOHL & OLDENBURG, 2000)

	Menge	Anteil am Gesamtabwasser [%]			
		CSB	N	P	K
Grauwasser	70 – 270 l/Ew/d	41%	3%	10%	34%
Schwarzwasser	ca. 40 l/Ew/d	59%	97%	90%	66%

Tabelle 3-3: Höchstmengen für Phosphate in Waschmitteln, die zur Reinigung von Textilien bestimmt sind (WASCHMITTELGESETZ, 1984)

Phosphatgehalt in der Waschlauge in g/l P bei Verwendung von				
Wasserhärtebereich	Waschmitteln für alle Waschttemperaturen	Waschmitteln für Waschttemperaturen bis 60°C	Spezial-/Feinwaschmitteln	Vorwaschmitteln
Im gesamten Waschvorgang				In der Vorwäsche
1	0,55	0,80	0,45	0,55
2	0,70	0,95	0,50	0,65
3	1,00	1,25	0,65	0,80

Schwarzwasser

Unter Schwarzwasser versteht man die Mischung aus menschlichen Ausscheidungen und Spülwasser.

Heutzutage ist Schwarzwasser die größte Quelle von Nährstoffen bei kommunalem Abwasser. Der Anfall und der Nährstoffgehalt von Schwarzwasser hängen zum großen Teil von den spezifischen Wohn- und Ernährungsgewohnheiten der Bevölkerung und der Siedlungsstruktur ab. Angaben in der Literatur sind selten und weichen, darüber hinaus, teilweise stark voneinander ab. Dennoch sind ungefähre Angaben möglich (Tabelle 3-4).

Tabelle 3-4: Mengen des täglichen Schwarzwasseranfalles pro Person (OTTERPOHL und OLDENBURG, 2000; zit. bei STARKL et al., 2005)

	Abwasseranfall
Urin	1,3 – 1,8 l/Ew/d
Fäkalien	ca. 0,15 l/Ew/d
Spülwasser f. WC	ca. 38 l/Ew/d
Summe	ca. 40 l/Ew/d

Die Angaben für den gesamten Phosphoranfall pro Person und Tag schwanken zwischen 1,5 und 2 g. In der ATV-DVWK-A 202 (Chemisch-physikalische Verfahren zur Elimination von Phosphor aus Abwasser) wird ein Bemessungswert von

1,8 g/EW/d

angegeben (ATV-DVWK-A 202, 2004).

3.2.4.2 Formen des Phosphor im Abwasser (BÖHLER & SIEGRIST, 2008)

Phosphor kommt also aus Wasch- und Reinigungsmitteln, aus Speiseresten und aus menschlichen Ausscheidungen in fester und flüssiger Form in kommunales Abwasser. Dabei kann Phosphor in vielen unterschiedlichen Verbindungen vorkommen.

Gelöste Fraktionen kommen zum wesentlichen Teil in 3 unterschiedlichen Kategorien vor:

- Orthophosphat (H_3PO_4 , H_2PO_4^- , HPO_4^{2-} und PO_4^{3-}): die Form des Phosphat-Anions wird vom pH-Wert der Lösung bestimmt, bei neutralem pH-Wert findet sich hauptsächlich H_2PO_4^- und HPO_4^{2-}
- Kondensierte Phosphate: Hauptsächlich pyro-Phosphate, meta-Phosphate und poly-Phosphate
- Organischer gebundener Phosphor: Kohlenhydratphosphate, Nukleinsäuren, Phosphorlipide u.a.

Phosphor kann auch Bestandteil der Feststofffracht und der Schwebstoffe sein, die in der Kläranlage ankommen und zwar als:

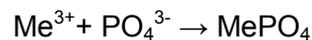
- Organischer Phosphor als Bestandteil der Feststoffmasse
- Adsorbierter Phosphor

Kondensierte Phosphate und organisch gebundener Phosphor als Teile der gelösten Fraktion werden bereits im Kanalnetz zu einem großen Teil in Orthophosphat umgewandelt (Phosphor-Hydrolyse). Auch partikuläres Material kann durch Hydrolyse und enzymatische Spaltprozesse gelösten Phosphor freigeben. Ebenso kann sich Phosphat an Oberflächen von Kolloiden anlagern und in die partikuläre Phase übergehen. Somit sind die Teilströme der Phosphorfracht einem ständigen Wandel unterlegen, der mit Änderung der Milieubedingungen einhergeht. Annähernd gleich bleibt allerdings die Gesamtmenge des elementaren Phosphors im System.

3.2.5 Phosphorfällung

Eine Möglichkeit gelöstes Phosphor aus dem Lösungsmittel, in dem Fall das Abwasser, zu entfernen, ist die Zugabe von reaktiven Fällmittelkationen, die sich mit den gelösten Phosphatanionen verbinden und wodurch sich schwer lösliche Salze und Hydroxide bilden. Dadurch entsteht eine Übersättigung der Lösung und es kommt zu einer Ausfällung (HARTINGER, 1976). Die Löslichkeit im Wasser wird vor allem durch den pH-Wert und die Temperatur beeinflusst und bestimmt, ab welcher Konzentration ein Stoff in Lösung ist oder als getrennte Phase vorliegt (Abbildung 3-11).

Vereinfacht gilt (ATV-DVWK-A 202, 2004):



Für Natriumaluminat als Fällmittel:

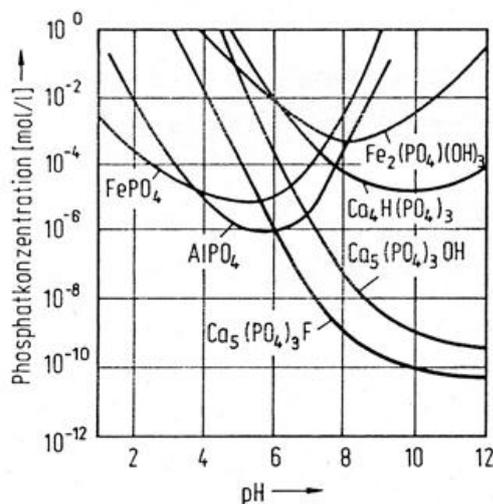
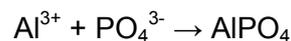


Abbildung 3-11: Löslichkeit verschiedener Phosphate in Abhängigkeit vom pH-Wert (ATV, 1997)

Als Fällmittel eignen sich viele positiv mehrwertige Metallionen, aus wirtschaftlichen Gründen wird zumeist Fe^{2+} , Fe^{3+} , Al^{3+} und Ca^{2+} verwendet. Mit der chemisch-physikalischen Fällung kann nur Orthophosphat entfernt werden (ATV-DVWK-A 202, 2004).

Die chemisch-physikalische Phosphatentfernung kann in 5 Abschnitte gegliedert werden (ATV-DVWK-A 202, 2004):

- Dosierung und vollständiges Einmischen eines Fällmittels in den Abwasserstrom,
- Bildung partikulärer Verbindungen von Fällmittelkationen (Fe^{3+} , Al^{3+} , Ca^{2+}) und Phosphatanionen (PO_4^{3-}) sowie anderen Anionen (Fällungsreaktion),
- Destabilisierung der im Abwasser enthaltenen Kolloide und Zusammenlagerung zu Mikrofloccen (Koagulation),
- Floccenbildung, d. h. Bildung von gut abtrennbaren Makrofloccen aus den Mikrofloccen. Dabei können Schwebestoffe und Kolloide, einschließlich des organisch gebundenen Phosphors in die Floccen mit eingeschlossen werden (Mitfällung und -floccung),
- Abscheidung der Makrofloccen aus dem Abwasser. Die Abtrennung kann durch Sedimentation, Flotation, Filtration oder Kombinationen dieser Verfahren bewirkt werden.

Es gibt mehrere Möglichkeiten der Platzierung der Fällung im System einer Kläranlage:

- Vorgeschaltete Fällung
- Simultanfällung
- Nachgeschaltete Fällung

Im Zuge dieser Arbeit soll auf den untersuchten Fall der vorgeschalteten Fällung eingegangen werden. Dabei wird das Fällmittel am Beginn der Anlage in das ankommende Abwasser zugegeben. In kommunalem Abwasser befinden sich außer Phosphaten noch weitere Anionen, die mit dem Fällmittel eine Reaktion eingehen können wie z.B Nitrat, Sulfat und Chlorid. Darüber hinaus gibt es weitere Reaktionen, die mit der Reaktion von Aluminium mit Phosphat in Konkurrenz stehen und einen Mehrverbrauch an Fällmittel erzeugen (ATV-DVWK-A 202, 2004):

- Hydroxidbildung: $\text{Me}^{3+} + 3\text{OH}^- \rightarrow \text{Me}(\text{OH})_3$
- Komplexierung mit organischen Stoffen
- Adsorptionsreaktionen

Bei der Flockenbildung können einerseits suspendierte Stoffe mit eingeschlossen werden, andererseits entstehen mit den Flocken große adsorptionsfähige Flächen, an denen sich wiederum Phosphat aber auch andere organische Verbindungen anlagern können.

Die optimalen physikalischen Randbedingungen für die chemisch-physikalische Fällung werden in der ATV-DVWK-A 202 folgendermaßen beschrieben:

- Bedeutend ist eine rasche und vollkommene Einmischung des Fällmittels in das Abwasser, damit die reaktiven Kationen in Kontakt mit dem Phosphat treten können und konkurrierende Reaktionen nicht im Vorteil sind. Die Dauer in der Mischzone sollte ca. 1 Minute, bei einer Leistungsdichte von 100 W/m³ bis 150 W/m³, betragen
- Optimale Bedingungen für die Flockenbildung nach der Mischphase herrschen bei einer Turbulenz, die das Wasser ausreichend bewegt, gebildete Flocken aber nicht wieder zerstört.

3.2.5.1 Fällmittel Natriumaluminat

Natriumaluminat entsteht bei der Einwirkung von Natronlauge auf Aluminiumsalze und entsteht als Zwischen- bzw. Abfallprodukt in der aluminiumverarbeitenden Industrie. Die chemische Formel lautet $\text{NaAl}(\text{OH})_4$. Natrium und Aluminium sind positiv geladen. Beide Kationen können Salze mit Phosphor bilden, Aluminiumphosphat (AlPO_4) und Natriumphosphat (Na_3PO_4). Die hohe Löslichkeit von Natriumphosphat (285 g/L bei 20°C), sowie konkurrierende Reaktionen wie Hydroxidbildung, führen dazu, dass vor allem Aluminium die Wirksamkeit der P-Entfernung bewirkt.

Die chemischen Eigenschaften des Produktes „Combiphos L“ der Firma VTA, laut Definition eine „stabilisierte alkalische Aluminiumlösung“ sind wie folgt: (VTA Austria GmbH, 2007a):

- Farbe: gelbliche Flüssigkeit
- Geruch: geruchlos
- Al-Gehalt: 10% oder 3,7 mol Al/kg
- pH-Wert: > 12
- Dichte [g/cm³]: ca. 1,45 (20° C)
- Dynamische Viskosität: 450 – 550 mPa.s

Das Sicherheitsdatenblatt weist folgende Stoffe als gefährliche Inhaltstoffe aus (VTA Austria GmbH, 2007b):

- Natriumhydroxid (2,5 – 10 %)
- Natriumaluminat (25 – 50 %)

Das Produkt ist stark basisch, daher sollten bei der Handhabung ausreichende Schutzmaßnahmen wie Schutzbrille und Handschuhe getragen werden. Über Fischtoxizität, chronische Toxizität, und Mutagenität liegen keine Daten vor.

Die Bestandteile Natrium und Aluminium gelten in ihren Verbindungen nicht als umweltschädlich.

Natrium ist ein sehr reaktives Element und kommt daher naturgemäß in Form von Verbindungen vor. Wir kennen es vor allem in der Form von NaCl, dem Kochsalz. Es zählt als das 10. häufigste Element der Erdhülle. Im Wasser reagiert Natrium zu Natriumhydroxyd, unter der Bildung von Wasserstoff.

Aluminium ist das häufigste Metall der Erdkruste. Man findet es vor allem in der Form von Aluminiumsilikaten. Säugetiere benötigen für ihren Organismus kein Aluminium, es bereitet aber auch in relativen hohen Dosen meist keine Probleme und wird über die Nieren ausgeschieden.

Problematisch kann das Fällmittel für Organismen nur in konzentrierter Form (ätzend) sein und durch Anhebung des pH-Wertes die Milieubedingungen der Kläranlage beeinflussen. Weitere Probleme könnten Verunreinigungen des Fällmittels mit Schwermetallen mit sich bringen. Die genaue Zusammensetzung des Produktes ist jedoch nicht bekannt.

3.3 Rechtliche Grundlagen

Bei Planung, Bau und Betrieb einer Kläranlage gilt es die rechtlichen Rahmenbedingungen und die Einhaltung von Normen und Anforderungen an Qualitätsziele zu beachten. Die Planung einer Kläranlage wird, abgesehen von den Parametern zur Dimensionierung wie z.B. dem Einwohnerwert EW_{60} , in der Regel auf die geforderte Reinigungsleistung ausgerichtet, die wiederum von den geltenden nationalen Bestimmungen und regionalen Anforderungen bestimmt wird. Die hohen Anforderungen, die das österreichische Recht an die Reinigung von Abwasser und die Einleitung von geklärtem Wasser in Fließgewässer stellt, werden von einer Vielzahl an Regelwerken begründet. Somit wird es notwendig, bereits in der Planungsphase Daten über den Standort der Kläranlage und dem vorgesehenem Vorfluter zu erheben um die Realisierbarkeit des Projektes beurteilen zu können.

In Österreich umfasst das gesetzliche Regelwerk, das den Schutz und der Reinhaltung der Grund- und Oberflächengewässer sicherstellt, das Wasserrechtsgesetz (WRG 1959) und die diesbezüglichen Verordnungen, sowie Raumordnungsgesetze der Bundesländer und diverse Schutz- und Sanierungsprogramme. Seit dem Beitritt Österreichs zur Europäischen Union wurden die geltenden europäischen Richtlinien, zum Beispiel die Richtlinie über die Behandlung von kommunalem Abwasser (91/271/EWG) oder die Wasserrahmenrichtlinie (WRRL), durch Novellen des WRG 1959 sowie Verordnungen des Bundes in österreichisches Recht übernommen.

In Österreich müssen die Emissionsbegrenzungen sowie die technischen Anlagen dem Stand der Technik entsprechend.

3.3.1 WRG 1959 – Wasserrechtsgesetz (WRG, 1959, i.d.g.F)

Das Wasserrechtsgesetz von 1959 (WRG 1959, i.d.g.F.) ist ein Bundesgesetz und somit in ganz Österreich gültig. Im Unterschied zum Bundesgesetz gibt es Gesetze, die von den Bundesländern erlassen werden und nur in diesen Bundesländern ihre Gültigkeit besitzen. Beispiele dafür sind die Raumordnungsgesetze, Verordnungen über die Ausbringung von Klärschlamm oder die Regelung der Gebühren für die Abwasserbeseitigung.

Österreichweit einheitlich geregelt sind u.a. die Themengebiete

- Benutzung der Gewässer,
- Schutz und Reinhaltung der Gewässer
- Schutz vor den Gefahren des Wassers

Durch zahlreiche Novellierungen wurde das WRG 1959 im Laufe der Zeit dem Stand der Technik sowie den Richtlinien des Europäischen Rates angepasst. Die heute gültige Fassung wurde mit der WRG-Novelle 2006, BGBl. I Nr. 123/2006 zuletzt aktualisiert

Das WRG definiert Gewässer nach ihrer rechtlichen Eigenschaft in private und öffentliche Gewässer (§ 2 und § 3). Die Einleitung von geklärten Abwässern aus Abwasserreinigungsanlagen (ARAs) ist in Österreich im Regelfall nur in Fließgewässer zu bewilligen. Ausnahmen sind nur in Einzelfällen zu bewilligen. Auf jeden Fall müssen diese begründet und auf die technische und wirtschaftliche Durchführbarkeit geprüft werden (KONHEISNER, 2010). Fließgewässer sind in der Regel, d h. falls kein "... *besonderer, vor dem Jahre 1870 entstandener Privatrechtstitel...*" (WRG 1959, i.d.g.F.)§ 2. (2) nachgewiesen wird, öffentliche Gewässer.

In diesem Gesetz finden sich auch die grundlegenden Regeln für die Benützung und den Schutz öffentlicher Gewässer. Hier wird die Bewilligungspflicht einer Einleitung von Wässern in ein Gewässer,

„*Einer Bewilligung der Wasserrechtsbehörde bedarf jede über den Gemeingebrauch (§ 8) hinausgehende Benutzung der öffentlichen Gewässer...*“ (WRG 1959, i.d.g.F.) § 9. (1)

ebenso die Begrenzung der Emissionen nach dem Stand der Technik (StdT),

„*Bei der Bewilligung von Abwassereinleitungen in Gewässer oder in eine bewilligte Kanalisation hat die Behörde jedenfalls die nach dem Stand der Technik möglichen Auflagen zur Begrenzung von Frachten und Konzentrationen schädlicher Abwasserinhaltsstoffe vorzuschreiben.*“ (WRG 1959, i.d.g.F.) § 33b. (1)

und der kombinierte Ansatz (KA)

„*Entsprechend dem kombinierten Ansatz sind*

1. *Emissionen aus Punktquellen, insbesondere aus Abwasserreinigungsanlagen, in Gewässer auf der Grundlage des Standes der Technik (§ 12a) zu begrenzen,*

2. *diffuse Auswirkungen so zu begrenzen, dass sie gegebenenfalls die beste verfügbare Umweltpaxis einschließen.*“ (WRG 1959, i.d.g.F.) § 33g. (1)

festgestellt.

In § 30a und § 30c werden Umweltziele für Grund- und Oberflächengewässer sowie erheblich veränderte und künstliche Gewässer so festgelegt, dass eine Verschlechterung des Zustandes verhindert wird und der Zielzustand bis spätestens 22.12.2015 erreicht wird.

Im Weiteren werden im Wasserrechtsgesetz, unter Anderem, der Terminus „Stand der Technik“ (§ 12a) definiert und die Einstufung eines Gewässers als künstliche oder erheblich veränderte Oberflächenwasserkörper geregelt (§ 30b)

Der Stand der Technik für Einleitungen in ein Fließgewässer aus kommunalen Anlagen größer 50 EW ist in der 1.AEvK und für Kläranlagen von Objekten in Extremlagen in der 3. AEvKA definiert. Für andere, hier nicht aufgeführte Anlagen, ist der Stand der Technik von der zuständigen Behörde festzulegen. (HABERL, 2010)

Sollte mit den Methoden des Standes der Technik die Umweltziele laut § 30 a und § 30 c nicht erreicht werden, müssen Methoden die darüber hinaus gehen angeordnet werden. Die Anforderungen werden anhand einer Immissionsabschätzung von der Behörde festgelegt (Kapitel 3.3.4)

Das Kapitel 11 des WRG (§ 98 – 128) gibt Aufschluss über die Zuständigkeit der Behörden und die Abwicklung bei wasserrechtlichen Verfahren und Bewilligungen. Generell, d.h. „*Sofern in diesem Bundesgesetz keine anderweitige Bestimmungen getroffen sind,...*“ (WRG 1959, i.d.g.F.) §98 (1) ist die Bezirksverwaltungsbehörde in erster Instanz die zuständige Verwaltungsbehörde. Das gilt auch für Einleitungen von Abwasserreinigungsanlagen die eine Größe von 20.000 Einwohnerwerten nicht übersteigen, da ansonsten, nach § 99 (e), der Landeshauptmann zuständig ist

Genauere Angaben über zulässige Konzentrationen von Stoffen und Schadstoffen bei Einleitungen in Gewässer finden sich in den Verordnungen.

3.3.2 Allgemeine Abwasseremissionsverordnung (AAEV, 1996)

Die Allgemeine Abwasseremissionsverordnung (AAEV) ist die Grundlage einer wasserrechtlichen Bewilligung der Einleitung von: (AAEV, 1996) (§1 (1))

- Abwasser,
- Mischwasser,
- durch menschliche Tätigkeiten verschmutztes Niederschlagswasser,
- belastetes Grundwasser,

- Sickerwasser aus Abfalldeponien und
- wässrigen Kondensaten

in Fließgewässer oder öffentliche Kanalisationen. Die zuständige Wasserrechtsbehörde hat, je nach Herkunft und maßgeblicher Inhaltstoffe des Abwassers, die einzuhaltenden Parameter auszuwählen (AAEV, 1996) (§4 (1)). Sofern keine andere Verordnung besteht, gelten die Parameter der Anlage A der AAEV. Es werden in §4 (2) die Herkunftsbereiche des Abwassers gelistet, für die eigene Verordnungen existieren und für die die Emissionsbegrenzungen der Anlage A der AAEV nicht gelten. Hier wird, neben diversen Industriebranchen, die Einleitung von Abwasser aus Abwasserreinigungsanlagen für Siedlungsgebiete sowie für Einzelobjekte mit Anschlussgrößen über 50 EW₆₀ gelistet.

Somit wird für die Einleitung von kommunalem Abwasser, bei Anlagen über 50 EW₆₀ die 1. AEVKA (Abwasseremissionsverordnung für kommunales Abwasser) maßgeblich.

3.3.3 1. Abwasseremissionsverordnung für kommunales Abwasser (1.AEVKA, 1996)

Die 1. AEVKA regelt die Einleitung von Abwasser oder Mischwasser aus Reinigungsanlagen von kommunalem Abwasser in Fließgewässer von Anlage ab 50 Einwohnerwerten, ausgenommen solchen in Extremlagen ab 1500m Seehöhe. Laut §1 (3) gilt als Grundlage die AAEV sofern diese Verordnung keine abweichenden Regelungen enthält. Außerdem sind, in Bezug auf §4 (1) AAEV, nach dem die Wasserrechtsbehörde die einzuhaltenden Parameter vorzuschreiben hat, abhängig von der Größenklasse einer Abwasserreinigungsanlage, die Emissionsbegrenzungen der Anlage A für die Parameter BSB₅, CSB, NH₄-N, Ges. geb. Stickstoff und Gesamt-Phosphor jedenfalls vorzuschreiben.

In der Anlage A werden Abwasserreinigungsanlagen in 4 Größenklassen eingeteilt (Abbildung 3-12) und die maximalen Ablaufkonzentrationen der Ablaufparameter genannt (Abbildung 3-13). Mindestwirkungsgrade in Prozent werden erst ab Größenklasse II gefordert.

I	größer als 50 EW ₆₀ , aber nicht größer als 500 EW ₆₀
II	größer als 500 EW ₆₀ , aber nicht größer als 5 000 EW ₆₀
III	größer als 5 000 EW ₆₀ , aber nicht größer als 50 000 EW ₆₀
IV	größer als 50 000 EW ₆₀ .

Abbildung 3-12: Größenklassen von Abwasserreinigungsanlagen ((1.AEVKA, 1996), Anlage A)

		I	II	III	IV
1. BSB ₅	b)	25	20	20	15
2. CSB	b)	90	75	75	75
3. TOC	b)	30	25	25	25
4. NH ₄ – N	c)	10	5	5	5
6. Gesamt – P		–	2	1	1
		d)	e)	f)	f)

Abbildung 3-13: max. Ablaufkonzentrationen in Abh. von der Größenklasse in mg/l ((1.AEVKA, 1996), Anlage A)

Die Emissionsgrenzwerte müssen durch Eigen- und Fremdüberwachung kontrolliert werden (§4 (1)). Die Häufigkeit der Kontrollen richtet sich auch hier wieder nach der Anlagengröße (Anlagen C und D). Die Anzahl der Probenahmen pro Untersuchungsjahr für die Eigenüberwachung sind in Abbildung 3-14 aufgelistet. Für die Größenklasse I ist eine jährliche Probenahme für die Fremdüberwachung vorgeschrieben.

Parameter	I
1. BSB ₅	6
2. CSB	12
3. TOC	–
4. NH ₄ – N	52
5. Ges. geb. N	–
6. Gesamt – P	–

Abbildung 3-14: Mindestanzahl der Probenahmen für die Eigenüberwachung für die Größenklasse I (1.AEVKA, 1996, Anlage C)

3.3.4 Qualitätszielverordnung Chemie & Ökologie Oberflächengewässer (QZV Chemie OG, 2006), (QZV Ökologie OG, 2010)

Die Qualitätszielverordnung Chemie Oberflächengewässer trat am 2. März 2006 in Kraft, die Qualitätszielverordnung Ökologie Oberflächengewässer erst am 29. März 2010. Obwohl 4 Jahre dazwischen liegen, werden die beiden Verordnungen heute in einem Zug genannt, denn sie definieren beide die Qualitätsziele als Umsetzung der Wasserrahmenrichtlinie nach dem neuesten Stand der Technik in Österreich. Beide Verordnungen führen im ersten Paragraphen als Ziel der Verordnung die Festlegung von Zielzuständen für den guten Zustand sowie für den im Hinblick auf das Verschlechterungsverbot maßgeblichen Zustand, an. Die Verordnungen beziehen sich auf Oberflächengewässer. Da bei einer Einleitung von gereinigtem Abwasser der Zustand eines Gewässers nicht verschlechtert werden darf, haben diese Verordnungen erheblichen Einfluss auf die Reinigungsanforderungen von Abwasserreinigungsanlagen.

QZV Chemie

Diese Verordnung besteht aus einem Hauptteil sowie 3 Anlagen (A, B und C). Im Grunde werden hier synthetische sowie nicht-synthetische Schadstoffe gelistet und die für die Erreichung des guten und sehr guten Zustandes einzuhaltenden Zusatzkonzentrationen sowie die geogenen Hintergrundkonzentrationen angegeben. Des Weiteren werden die Berechnungs- und Analysemethoden erörtert.

QZV Ökologie

Die QZV Ökologie beschreibt den ökologischen Zustand von Fließgewässern aufgrund der Kategorien: (QZV Ökologie OG, 2010) (§ 4)

- biologische Qualitätskomponenten (Flora und Fauna)
- hydromorphologische Qualitätskomponenten (Wasserhaushalt, Morphologie, Durchgängigkeit)
- allgemeine Bedingungen der physikalisch-chemischen Qualitätskomponenten

Maßgeblich für die Bewilligung von Kläranlagen sind die Bedingungen der physikalisch-chemischen Qualitätskomponenten, die für ein Fließgewässer folgende Parameter beinhalten:

- Temperatur
- Biologischer Sauerstoffbedarf
- Gelöster organischer Kohlenstoff
- Sauerstoffsättigung
- pH-Wert
- Orthophosphat
- Nitrat

Diese Qualitätskriterien werden außerdem je nach Gewässer unterschiedlich festgelegt. Gewässer werden auf der Grundlage der Bioregion (in Anlehnung an die Geologie), und in weiterer Folge je nach Seehöhe, Einzugsgebietsgröße und biotischer Faktoren unterschieden. So wird versucht, die geforderte Reinigungsleistung an die Sensibilität des Vorfluters anzupassen.

4. Material und Methoden

4.1 ARA Oberwindhag

Die Kläranlage des Abwasserverbandes Oberwindhag befindet sich in der Gemeinde Oberwindhag bei Weitra im nördlichen Waldviertel (Abbildung 4-1). Sie wurde im Jahre 2007 erbaut und ist seit Herbst 2007 in Betrieb.

Die Gemeinde besteht hauptsächlich aus privaten Wohngebäuden und bäuerlichen Betrieben der Kuh- und Schafsmilchwirtschaft mit 61 Einwohnern (STATISTIK AUSTRIA, 2009). Außerdem ist ein Tischlerbetrieb ansässig und zumindest eine Familie bietet Fremdenzimmer an. Das Abwasseraufkommen und die Zusammensetzung können also durchwegs als kommunal, mit einem geringen Einfluss von Gewerbe und Tourismus, eingestuft werden. Die geringe Anzahl an Zweitwohnsitzen erlaubt die Annahme eines über den Jahresverlauf annähernd gleichbleibenden Abwasseranfalles.

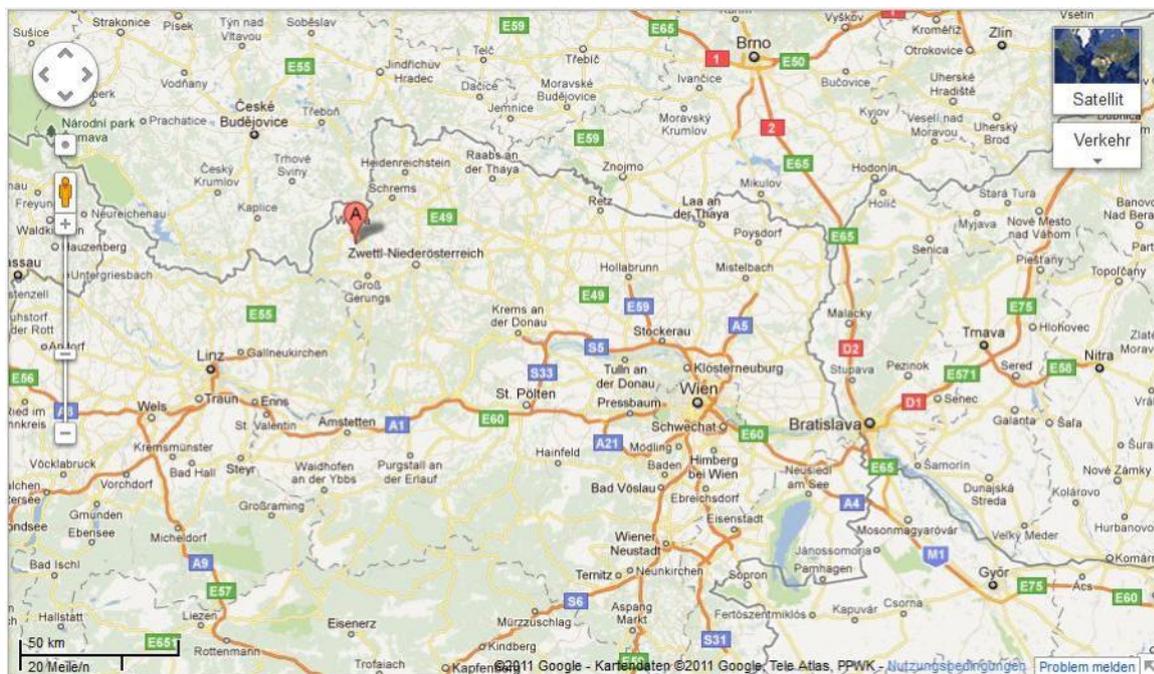


Abbildung 4-1: A: Oberwindhag im Waldviertel (©2011 www.googlemaps.com)

4.1.1 Technische Daten

ARA Oberwindhag, 2-stufiger bepflanzter Bodenfilter mit mechanischer Vorreinigung

Ausbaugröße: 60 EW

1. Pflanzenbeet: 240 m²
2. Pflanzenbeet 60 m²

Vererdungsbeet zur Schlammfestsorgung: 77 m²

Die Anlage besteht aus 2 Pflanzenbeeten und einer mechanischen Vorklärung in Form einer 3-stufigen Absetzanlage. Das Pflanzenbeet 1 als Hauptreinigungsstufe hat eine Größe von 240 m² (4m²/EW), das 2. Pflanzenbeet ist 60 m² (1m²/EW) groß. Abbildung 4-2 zeigt das Fließschema der Anlage

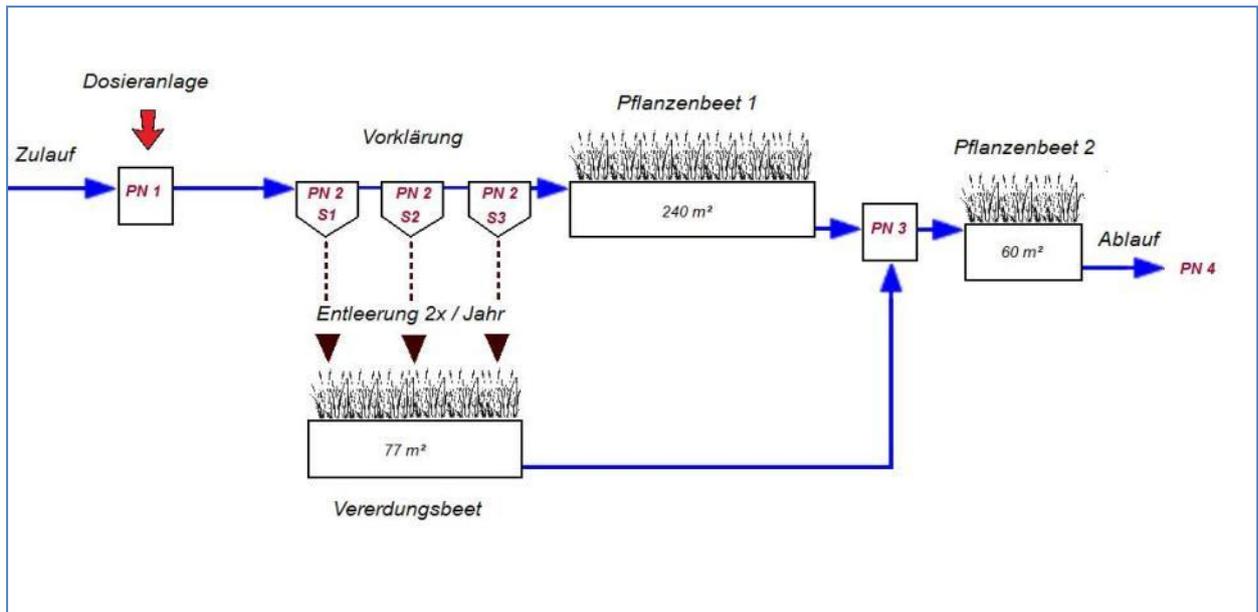


Abbildung 4-2: Fließschema

Die Vorklärung besteht aus 3 nacheinander durchflossenen Absetzschächten des Typs SW-KSG-6,6 der Firma SW-Umwelttechnik (Abbildung 4-3). Diese kreisrunden Schächte besitzen einen maximalen Nutzinhalt von 6,6 m³.

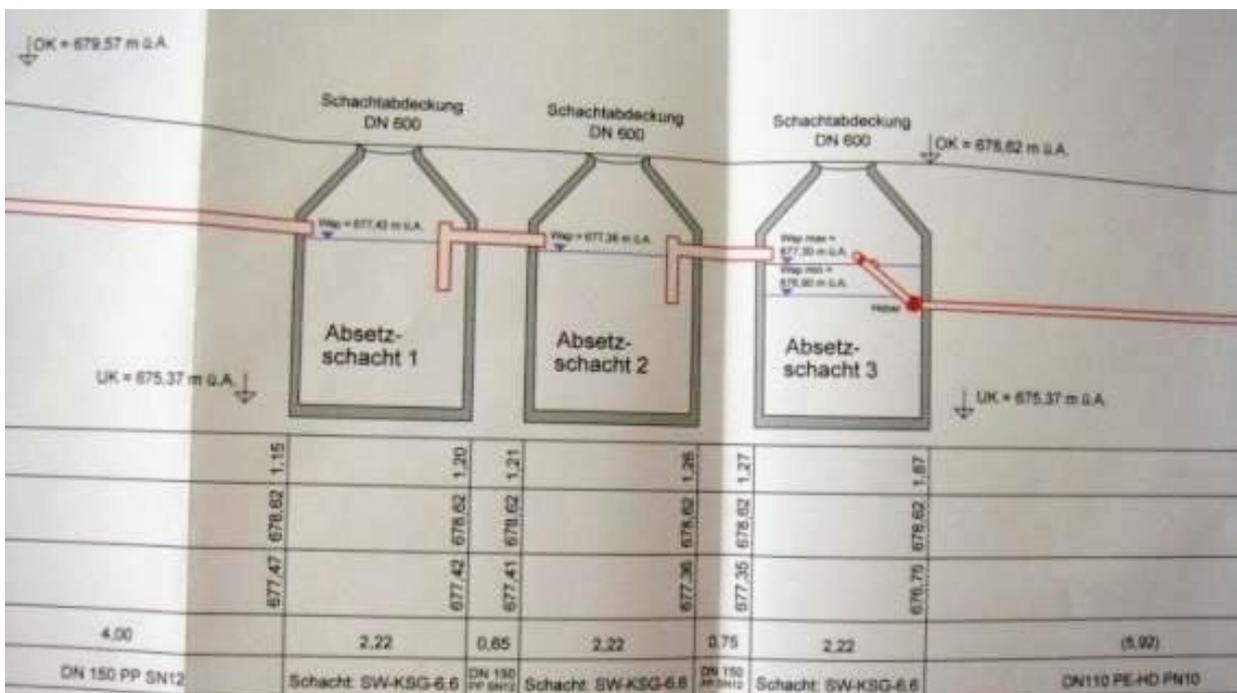


Abbildung 4-3: 3 Schächte der Vorklärung

Im 3. Schacht befindet sich ein Heberarm, der eine intermittierende Beschickung des ersten Pflanzenbeetes bewirkt. Das Abwasser wird durch Verteilerrohre auf der Beetoberfläche aufgebracht und sickert durch den Bodenfilter. Danach wird es in einem weiteren Schacht

gesammelt, in dem sich wieder ein Heberarm befindet, mit dem das zweite Beet intermittierend beschickt wird.

Der abgesetzte Schlamm der Vorklärung wird 2-mal jährlich mittels eines Tankwagens ausgepumpt und entleert und auf das Vererdungsbeet aufgebracht.

Der Aufbau der Pflanzenbeete besteht gemäß den Anforderungen der ÖNORM B 2505 (ÖNORM B2505, 2009) aus einer Deckschicht/Schutzschicht, einer Filterschicht/Hauptschicht, einer Filterübergangsschicht und einer Dränschicht. Darunter ist das Beet mit einer Folie abgedichtet und mit Vlies geschützt. Abbildung 4-5 und

Tabelle 4-1 zeigen den Aufbau der Beete mit den Flächen- und Volumsanteilen.

Die Pflanzenbeete und das Vererdungsbeet sind mit Schilf (*Phragmites australis*) bepflanzt. Der Bewuchs im ersten Beet ist gut angewachsen und in der Vegetationsperiode grün und gesund im Wuchs. Dagegen ist der Wuchs der Pflanzen im 2. Beet und im Vererdungsbeet äußerst schlecht, was im Fall des Vererdungsbeetes wahrscheinlich an mangelnder Feuchtigkeit liegt (Abbildung 4-4). Das Schilf wird im Frühjahr geerntet und der Schnitt auf das Vererdungsbeet aufgebracht.



Abbildung 4-4: 1. Pflanzenbeet (links) und 2. Pflanzenbeet (rechts)

Tabelle 4-1: Flächen- und Volumsanteile

	Pflanzenbeet1			Pflanzenbeet 2		
	15x16 m =	240	m ²	6x10 m =	60	m ²
Schotter 16/32 5 cm		12	m ³		3	m ³
Sand 0/4 50 cm		120	m ³		30	m ³
Sand 4/8 10 cm		24	m ³		6	m ³
Schotter 16/32 20 cm		48	m ³		12	m ³
Summe		204	m ³	Summe	51	m ³

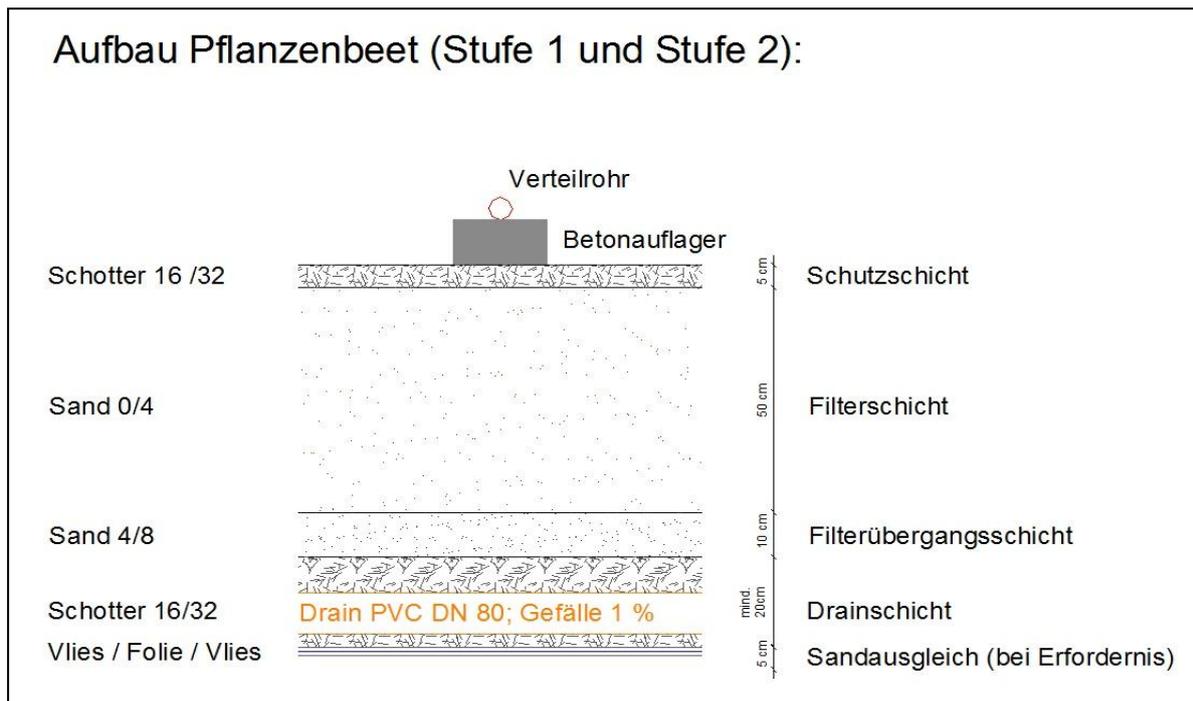


Abbildung 4-5: Aufbau der Pflanzenbeete

Vorfluter und hydrologische Daten

Der Ablauf der Kläranlage fließt in den Pfaffenbach, der nach kurzer Strecke in den Wolfgangbach mündet. Der Wolfgangbach schließlich mündet bei Weitra in die Lainsitz, die wiederum über die Moldau und die Elbe in die Nordsee fließt. Die Lainsitz ist ein Teil der Europäischen Hauptwasserscheide. Diese trennt die Einzugsbereiche des Schwarzen Meeres und des Mittelmeeres von den Zuflussgebieten des Atlantiks und der Nord- und Ostsee. Die Lainsitz hat im Bereich der Einmündung des Wolfgangbaches ein MQ von ungefähr $1 \text{ m}^3/\text{s}$. Die jährlichen Niederschläge sind in der Gegend des Waldviertels regional sehr unterschiedlich und variieren zwischen 550 und 800 mm pro Jahr (BMLFUW, 2010a).

4.1.2 Reinigungsleistung & Behördliche Vorgaben

Wie im 3. Kapitel beschrieben wurde, ist für die Festlegung von Ablaufgrenzwerten die 1. AEVKA maßgeblich. Zuständige Behörde war in dem Fall die Bezirkshauptmannschaft Gmünd.

Bei Abwasserreinigungsanlagen kleiner 500 Einwohnerwerten gilt laut 1. AEVKA kein Grenzwert für Orthophosphat (1. AEVKA, 1996). Mit Einführung der Qualitätszielverordnung (Kapitel 3.3.4) muss seit 2006 ebenfalls die Immissionsseite berücksichtigt werden. Bei so kleinen und sensiblen Vorflutern wie in diesem Fall kann die Immissionsseite deutlich geringere Schadstoffkonzentrationen fordern (Tabelle 4-2). Nach der Immissionsberechnung wurde von der Behörde ein Ablaufwert von **1,6 mg/l** für **Orthophosphat** festgelegt. Ohne zusätzliche Maßnahmen zur Phosphorelimination kann dieser Wert mit einer Pflanzenkläranlage nicht eingehalten werden.

Tabelle 4-2: geforderte Ablaufemissionen (BEZIRKSHAUPTMANNSCHAFT GMÜND, 2005)

Parameter	(1.AEVkA, 1996)	Immission
BSB ₅	25 mg/l	17 mg/l
CSB	90 mg/l	-
NH ₄ -N	10 mg/l	7 mg/l
PO ₄ -P	-	1,6 mg/l

Laut Angaben aus der Fremdüberwachung kann die Anlage die Anforderungen an die übrigen Kriterien leicht erfüllen. Alle 3 Parameter werden deutlich unterschritten. Ablaufwerte für PO₄-P sind in Kapitel 5 zu sehen.

Tabelle 4-3: Anlagenablauf für BSB, CSB, NH₄-N laut Fremdüberwachung

Parameter	aus Fremdüberwachung (2010/2011)
BSB ₅	5/8 mg/l
CSB	42/44 mg/l
NH ₄ -N	0,14/0,06 mg/l

4.2 Versuchsdurchführung

4.2.1 Messprogramm

Im Zeitraum von Oktober 2010 bis November 2011 wurden die Beprobungen durchgeführt. Um die Wirksamkeit der vorgeschalteten Phosphorfällung zu prüfen, musste zuerst die Funktionsweise und die Eliminationsleistung der Anlage generell und ohne Fällung eruiert werden. In den unterschiedlichen Stufen einer Pflanzenkläranlage kann Phosphor in verschiedenen Formen vorkommen (Kapitel 3.2). Mit den vorhandenen Messgeräten konnte ausschließlich Orthophosphat (PO_4) gemessen werden (Kapitel 4.2.3). Es musste somit berücksichtigt werden, dass es immer wieder zu hydrolysierenden Prozessen kommen kann, die den Phosphatgehalt erhöhen, nicht aber den Gesamtgehalt an Phosphor. Auf der anderen Seite gibt es bei Pflanzenkläranlagen mehrere Prozesse, die Phosphor binden und somit dem Wasser entziehen. Erst wenn alle Phänomene, die zu einer Abnahme oder Zunahme des Phosphatgehaltes führen, bekannt sind, kann geregelt in das System eingegriffen werden.

Das Messprogramm hatte zum Ziel, folgende Größen zu bestimmen:

- | | | |
|--|---|---------|
| <ul style="list-style-type: none"> • Abwassermenge pro Tag Q_d [m^3/d] • Ganglinie des Zulaufvolumenstroms • Stündlicher Abwasserzufluss [l/h] • einwohnerspezifische tägliche Phosphorfracht $B_{d,P}$ [$\text{g}/\text{E}\cdot\text{d}$] • Zulaufkonzentration C_P [mg/l] • Tagesganglinie C_P | } | 1. Teil |
| <ul style="list-style-type: none"> • Eliminationsleistung P ohne Fällung • Rücklösungen aus partikulärem P | } | 2. Teil |
| <ul style="list-style-type: none"> • Eliminationsleistung P mit Fällung bei <ul style="list-style-type: none"> - Fällmittelmenge 7,5 ml/h - Fällmittelmenge 15 ml/h - Fällmittelmenge 30 ml/h • Eliminationsleistung P mit Fällung nach dem Umbau der Mischstrecke bei <ul style="list-style-type: none"> - Fällmittelmenge 15 ml/h - Fällmittelmenge 30 ml/h • Rücklösungen aus dem Fällprodukt | } | 3. Teil |

Am Anfang mussten also charakteristische Messgrößen der Anlage gesammelt werden, die bis dahin nicht ausreichend bekannt waren (1. Teil). Die Literatur gibt zwar Kennwerte für manche Einflussgrößen, diese sollten jedoch zumindest überprüft werden, da gerade bei so kleinen Anlagen große Abweichungen von genormten Werten auftreten können. Tabelle 4-4 zeigt einwohnerspezifische Kennwerte aus der Literatur, die in weiterer Folge auf die Größe der Anlage umgerechnet wurden (*|aut
**|aut

Tabelle 4-5).

Tabelle 4-4: Allgemeine Kennwerte aus der Literatur

Einwohnerspezifischer täglicher Schmutzwasseranfall $w_{S,d}^*$	Einwohnerspezifische Phosphorfracht $B_{d,P}^{**}$	Stündlicher Abwasserzufluss
[l/(E·d)]	[g/(E·d)]	[l/h]
150	1,8	1/10 des Tagesanfalles

*laut (ÖNORM B2505, 2009)

**laut (ATV-DVWK-A 198, 2003)

Tabelle 4-5: Richtwerte für die Anlage aus Tabelle 4-4 berechnet

Abwassermenge pro Tag Q_d	Stündlicher Abwasserzufluss	Phosphorfracht	Zulaufkonzentration
[m ³ /d]	[l/h]/[l/s]	[g/d]	[mg/l PO ₄ -P]
9	900/15	108	12

Tagesganglinien für den Abwasservolumenstrom und die Phosphorkonzentration sollten Aufschluss darüber geben, welchen Schwankungen die Vorfällung unterliegt.

Da die Anlage bereits seit einigen Jahren ohne Fällung in Betrieb ist, wurden anfänglich Messungen bei deaktivierter Fällung vorgenommen (1. und 2. Teil des Messprogrammes). So konnten Informationen darüber gesammelt werden, wie die Anlage nach mehreren Jahren noch Phosphor eliminiert. Danach wurde die Fällung in Betrieb genommen und unterschiedliche Mengen an Fällmittel zudosiert.

4.2.2 Durchflussmessung

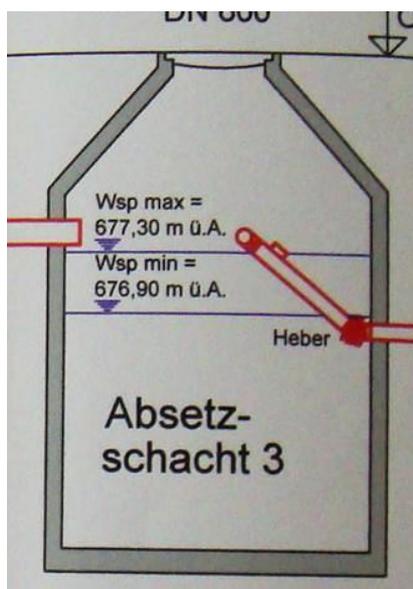


Abbildung 4-6: Absetzschacht 3 (S3) mit Heberarm

Für die Messung des Durchflusses bzw. des Zulaufs zur Kläranlage kam aufgrund der geringen Zulaufmengen nur eine indirekte Methode in Frage. Durch die hohen Schwankungsbreiten im Wasserbedarf, der relativ hohen Bedeutungen von Einzelereignissen (z.B. Duschen/Badewanne) und des Zufalls reichte das Spektrum von annähernd 0 bis zu mehreren Litern in der Minute. Die beiden ersten Absetzschächte der Vorklärung haben einen konstanten Wasserspiegel und eignen sich somit nicht für die Messung. Im 3. Absetzschacht bewirkt ein Heber eine intermittierende Beschickung des bepflanzten Bodenfilters (Abbildung 4-6). Dieser Heber besteht aus einem schwimmenden Rohreinlass, der gelenkig mit dem Abfluss des Schachtes verbunden ist. In diesem Schacht steigt der Wasserspiegel bis zu einem bestimmten Niveau, bei dem der Heberarm nicht weiter steigen kann. Danach füllt er sich mit Wasser und sinkt bis zu einer unteren Begrenzung ab. Der Wasserspiegel sinkt so lange, bis er den Rohreinlass erreicht

hat. Das Abflussrohr füllt sich wieder mit Luft und schwimmt auf.

In diesem 3. Absetzschacht wurde eine Sonde eingebaut, die in einem definierten Intervall den Wasserdruck misst. Zum Einsatz kam die Sonde MikroLog® P-Log 2002 von der Firma Driesen+Kern GmbH (Abbildung 4-7). Diese Sonde ist in der Lage Temperatur und Wasserdruck zu messen und zu speichern.

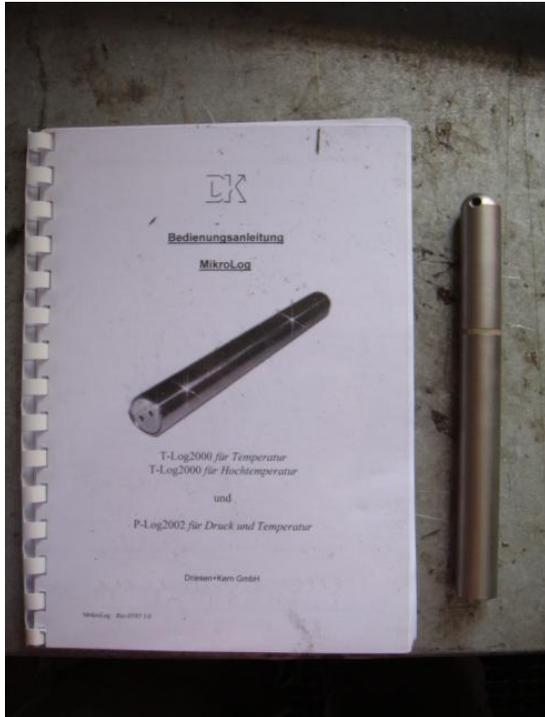


Abbildung 4-7: Druck- und Temperatursonde

Um Beeinflussungen der Sonde auszuschließen wurde diese an einem fest verkeilten und mit Draht gesichertem Rohr im Schacht befestigt.

Die Sonde misst den Druck unter Wasser, der von der Wasserspiegelhöhe und vom atmosphärischen Druck beeinflusst wird. Aus dem Wasserdruck kann die Wasserspiegelhöhe und mit der Kenntnis der Geometrie des Schachtes das Volumen des Wassers bestimmt werden. Aus der hydrostatischen Druckgleichung (1) lässt sich berechnen, welcher Wasserspiegeländerung eine Druckänderung von 1 hPa entspricht. Mit der Volumsgleichung für einen Zylinder (2) lässt sich diese Wasserspiegeländerung auf das Schachtvolumen umrechnen.

Hydrostatische Druckgleichung

$$p = \rho * g * h \quad (1)$$

$$p = 1000 * 9,81 * h$$

$$h(\Delta 1hPa) = \frac{1}{9810} [m]$$

$$h(\Delta 1hPa) = 0,0102 [m]$$

$$h(\Delta 1 \text{hPa}) = 1,02 \text{ [cm]}$$

Geometrie des Schachtes

$$d = 2,00 \text{ m ,}$$

$$V = r^2 * \pi * h \tag{1}$$

$$V(\Delta 1 \text{hPa}) = 32,02 \text{ [l]}$$

Die Sonde besitzt eine Sensibilität von ca. 0,4 hPa, das entspricht einer Wasserspiegelhöhenänderung von 10,2 mm. Umgerechnet auf das Wasservolumen im Schacht bedeutet das, dass eine Wassermengenänderung von ca. 12 Liter gerade noch messbar ist. Nimmt man Standardwerte für den Zufluss an (150 Liter pro Person und Tag), kommt man auf eine durchschnittliche Zuflussmenge von 6,25 Liter in der Minute. Messintervalle unter 1 min. machen somit kaum Sinn.

Es gibt 2 Möglichkeiten, mit den Messungen der Drucksonden den Durchfluss zu bestimmen.

Methode 1: Messung von Wasser- und atmosphärischem Druck

Wird der Druck unter Wasser gemessen, ist das Ergebnis der Absolutdruck, also die Summe von Druck der Wassersäule und atmosphärischem Luftdruck. Änderungen des Luftdruckes, die durch meteorologische Phänomene ausgelöst werden, fließen somit in den Absolutdruck mit ein. Um den Relativdruck der Wassersäule zu erhalten, muss mit einer zweiten Sonde der Luftdruck im Schacht gemessen, und vom Absolutdruck abgezogen werden (Tabelle 4-6). So kann der Anstieg des Wasserdruckes in der Zeiteinheit und in weiterer Folge der Zufluss pro Zeiteinheit errechnet werden (Tabelle 4-7). Diese Methode ist zwar genau, erfordert aber den zeitgleichen Einsatz von 2 Sonden. Mit ihr sollte die/der

- Abwassermenge pro Tag Q_d [m³/d]
- Ganglinie des Zulaufvolumenstroms
- Stündlicher Abwasserzufluss [l/h]

gemessen werden.

Tabelle 4-6: Messwerte

Datum	Zeit	Druck Sonde 1 Luft [hPa]	Druck Sonde 2 Wasser [hPa]	Relativdruck Wasser [hPa]
12.10.10	17:02	936,43	1059,13	122,7
12.10.10	17:05	936,48	1059,57	123,09
12.10.10	17:08	936,13	1059,58	123,45
12.10.10	17:11	936,15	1060	123,85

Tabelle 4-7: Auswertung der Daten

Datum	Zeit	Relativdruck Wasser [hPa]	Δp [hPa]	Q [l/s]
12.10.10	17:02	122,7		
12.10.10	17:05	123,09	0,39	0,07
12.10.10	17:08	123,45	0,36	0,06
16.11.10	17:11	123,85	0,40	0,07

Methode 2: Zählung der Beschickungen

Die zweite Möglichkeit die Durchflussmenge zu bestimmen besteht darin, für einen Hub des Hebers, also für eine Beschickung, ein durchschnittliches Wasservolumen zu bestimmen und lediglich die Anzahl der Hübe/Beschickungen pro Zeiteinheit zu zählen (Abbildung 4-8). Dadurch kann den Einsatz einer 2. Sonde eingespart werden. Diese Methode eignet sich nur, falls der Zufluss für relativ große Zeitabschnitte, z.B. pro Tag gesucht wird. Außerdem ist es notwendig, das Volumen einer Beschickung möglichst genau durch eine Messung in kleinem Messintervall zu bestimmen. Mit dieser Methode kann die Abwassermenge pro Tag Q_d gemessen werden.

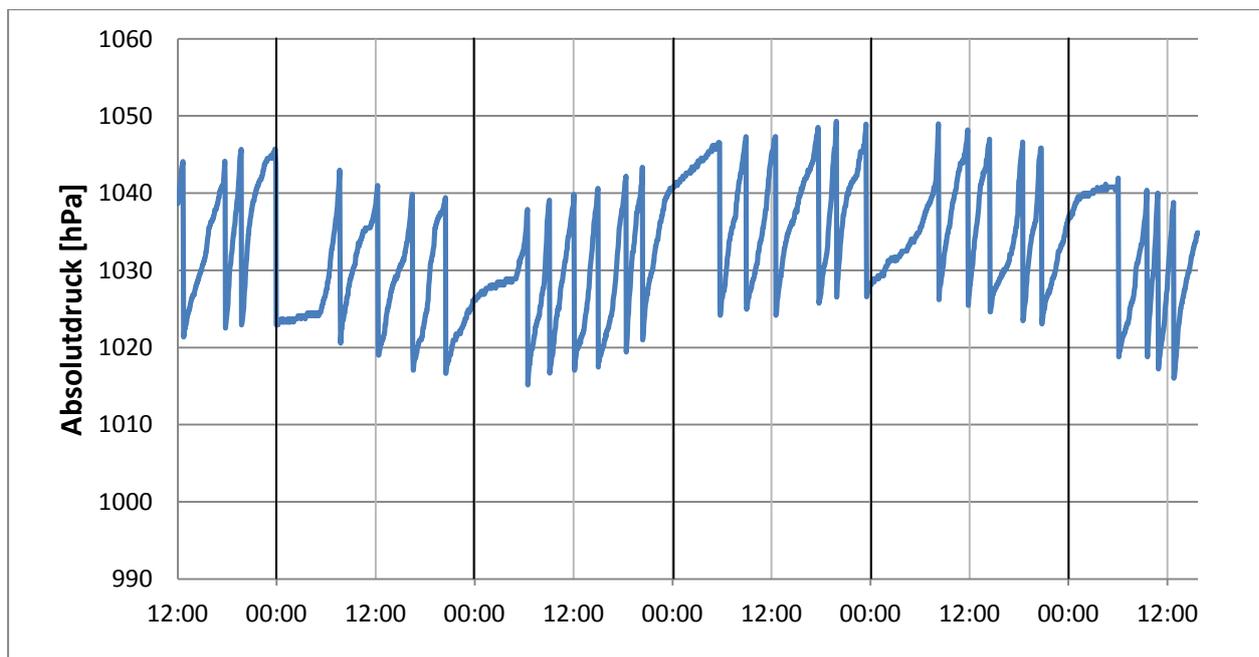


Abbildung 4-8: Druckmessung über einen Zeitraum von 5 Tagen

4.2.3 Probenahme

Die Probenahme in der Anlage, die Lagerung der Proben und der Zeitraum bis zur Auswertung sind Faktoren, die allesamt das Ergebnis der Untersuchung beeinflussen können. Umso wichtiger war es, Vorgaben einzuhalten und mit gebotener Genauigkeit zu arbeiten.

Wie schon erwähnt, kommen verschiedene Formen des Phosphors im Abwasser vor. Ziel der Probenahme ist es, den Gehalt an Orthophosphat an einem bestimmten Punkt zu einer bestimmten Zeit zu bestimmen. Um Aufnahmen der gesamten Anlage zu bekommen, wurde in der Regel an allen Probenahmestellen gleichzeitig, d.h. innerhalb von 30 min., Proben genommen. Prozesse, die den Orthophosphatgehalt beeinflussen, sind entweder biologischen (Biomasseaufbau bzw. -abbau) oder chemisch-physikalischen (Hydrolyse) Ursprungs. Um dies zu vermeiden, wurden die Proben innerhalb von 24 Stunden ausgewertet. War dies nicht möglich, wurden die Proben bei 4°C gekühlt und innerhalb von 3 Tagen ausgewertet. War auch dies nicht möglich, mussten die Proben tiefgefroren werden.

Probenahmestellen

Um die einzelnen Abschnitte der Anlage bestmöglich zu erfassen, wurde die Probenahme (PN) an folgenden 4 Stellen durchgeführt (Abbildung 4-9).

PN1 – Zulauf

PN2 – Vorklärung (3 Probenahmen)

PN3 – Ablauf Pflanzenbeet 1 / Zulauf Pflanzenbeet 2

PN4 – Ablauf ARA

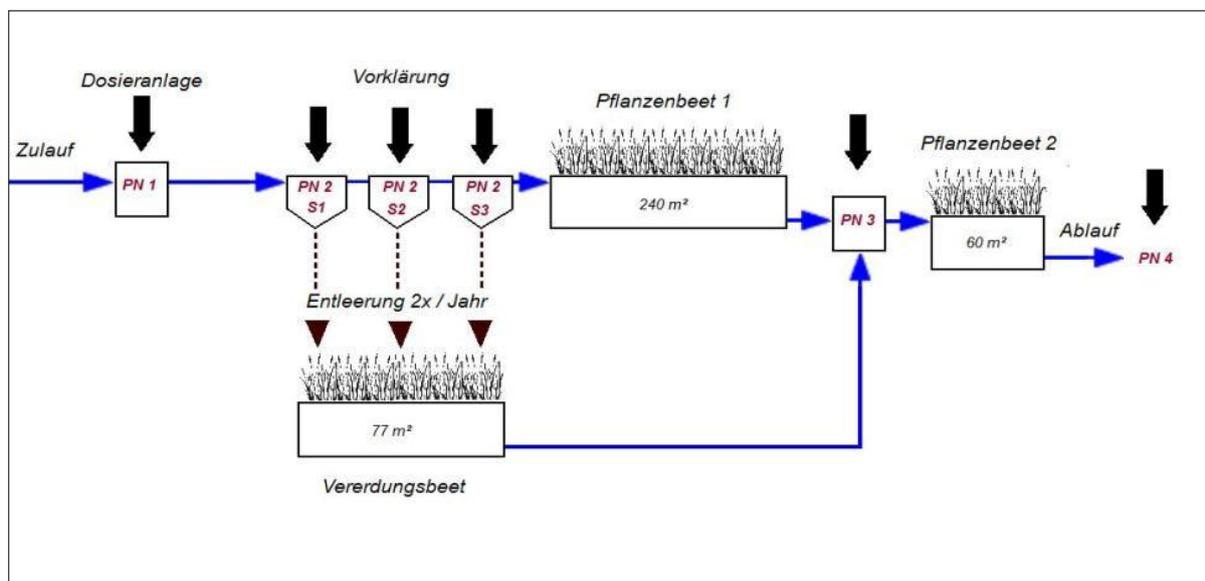


Abbildung 4-9: Fließschema mit Probenahmestellen (schwarze Pfeile)

PN1

Diese Probenahmestelle befindet sich in dem Schacht, der für die Zudosierung des Fällmittels vorgesehen ist. Hier fließt das Kanalrohr durch den Schacht, wobei durch 2 Putzstücke eine Entnahme des Abwassers möglich ist (Abbildung 4-10). Die Proben wurden als Stichproben und Sammelpuben entnommen und hatten zum Ziel, die **Zulaufkonzentration** zu messen.



Abbildung 4-10: Probenahmestelle 1

PN2

Die Vorklärung zur Kläranlage besteht aus 3 Absetzschächten. Da das Volumen eines Schachtes verglichen mit der Anlagengröße relativ groß ist ($\sim 6 \text{ m}^3$), fungieren die Schächte als Puffer und Ausgleichsspeicher und geben die Abwassermengen mit einer Verzögerung weiter. Um alle 3 Schächte zu durchfließen, braucht das Wasser zwischen 3 und 6 Tagen. Somit hat das Wasser eine lange Aufenthaltszeit, während der, durch chemische Prozesse (Hydrolyse, Rücklösungen, etc.) ausgelöste Veränderungen des Chemismus des Abwassers sichtbar werden können. Daher wurden Proben in jedem der Schächte genommen und mit S1 bis S3 bezeichnet. Der Vergleich der P-Konzentrationen der einzelnen Schächte gibt somit Aufschluss über etwaige **Rücklösungen** aus den Partikeln.

Ebenfalls an dieser Probenahmestelle wird die **Wirksamkeit der Fällung** beurteilt. Hier sammelt sich das Abwasser, unmittelbar nachdem das Fällmittel zudosiert wurde. Die dabei gebildeten Flocken des Fällproduktes sedimentieren und werden mit den übrigen Sedimenten entfernt.

Proben wurde aus den Ablaufrohren der ersten beiden sowie direkt aus dem dritten Schacht genommen (Abbildung 4-11).



Abbildung 4-11: Probenahmestelle 2

PN3

Diese Probenahmestelle ist ebenfalls ein Schacht und befindet sich zwischen den beiden Pflanzenbeeten (Abbildung 4-12). Hier befindet sich ein Heber, der auch für das zweite Beet eine intermittierende Beschickung bewirkt. Außerdem mündet hier der Abfluss des Vererdungsbeetes ein. Es wurden Proben direkt aus dem Abfluss des ersten Beetes und aus

dem Schacht selbst genommen. Das wurde gemacht, um etwaige Unterschiede aus dem Abfluss und dem Schachtwasservolumen, ausgelöst durch den Abfluss des Vererdungsbeetes zu untersuchen. Da der Abfluss aber lediglich als Stichprobe genommen wurde, findet sich in den Ergebnissen nur der Wert des Schachtwassers. Vergleicht man die Proben von PN3 und PN2 erhält man die **Eliminationsleistung des ersten Pflanzenbeetes**.



Abbildung 4-12: Probenahmestelle 3

PN4:

Die letzte Probenahmestelle ist der Ablauf der Kläranlage (Abbildung 4-13). Nach dem Durchfließen des 2. Pflanzenbeetes wird das Wasser in der Drainageleitung gesammelt und fließt nach ca. 20 Metern in den Vorfluter. Die Probenahme geschah hier in Form von Stichproben direkt aus dem Rohrauslass. Aus der Differenz zwischen PN3 und PN4 kann die **Elimination des zweiten Pflanzenbeetes** berechnet werden.



Abbildung 4-13: Probenahmestelle 4

Automatischer Probenehmer

Das gesammelte Abwasser der Kanalisation fließt direkt und ohne Zwischenspeicherung in die Anlage. Es wird vermutet, dass beträchtliche Schwankungen in der Zuflussmenge und in der P-Konzentration abhängig von der Tageszeit und einzelner zufälliger Ereignisse existieren. Relativ kleine Ereignisse wie das Spülen einer Toilette sind bereits in einem Peak der Zuflussmenge

erkennbar. Das Sammeln manueller Stichproben bei PN1 hat somit kaum Aussagekraft über Tagesfrachten oder mittlere Zulaufkonzentrationen. Aus diesen Gründen wurde versucht, mittels eines automatischen Probenehmers Stundenmischproben zu sammeln (Abbildung 4-14). Gleichzeitig wurde mit den Drucksonden der Zufluss gemessen, um auch die Tagesfracht zu bestimmen. Zum Einsatz kam ein automatischer Sampler der Firma ISCO, ausgerüstet mit einer Saugleitung, einem programmierbaren Computer und 24 Flaschen zu jeweils einem Liter. Als besonders problematisch entpuppte sich die Platzierung der Saugleitung. Der geringe Zufluss, der teilweise auf 0 zurückgehen kann, machte eine gesicherte Probenahme durch die Saugleitung schwierig. Dies konnte dadurch gelöst werden, dass mit einem halbrunden Formstück aus Kunststoff ein Aufstau von 1-2 cm geschaffen wurde, in das die Saugleitung eintaucht. Um ein Verstopfen des Zuflusses zu vermeiden, wurde das Formstück frei aufgelagert. Das ankerförmige Bauteil wurde lediglich mit ein wenig Draht gesichert und konnte bei zu großer Belastung kippen und die Grobstoffe freigeben (Abbildung 4-15). Der Sampler wurde ausschließlich bei PN1 eingesetzt.

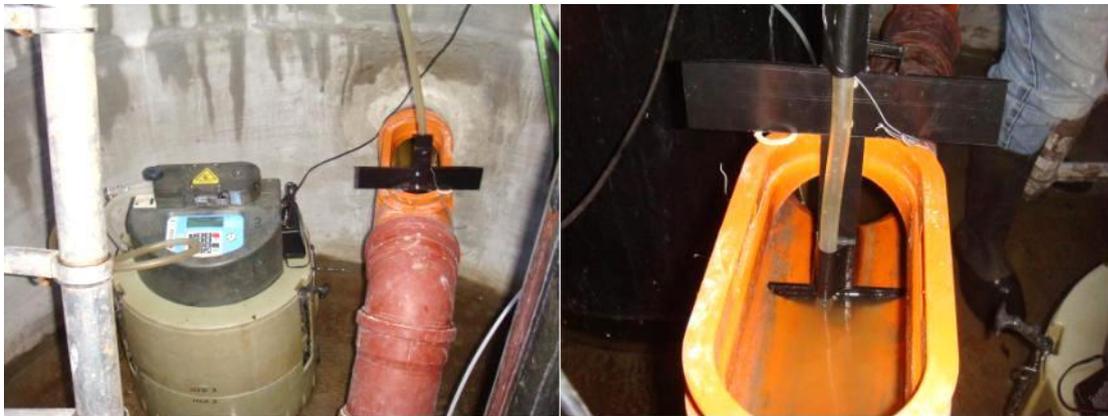


Abbildung 4-14: Probenehmer im Einsatz

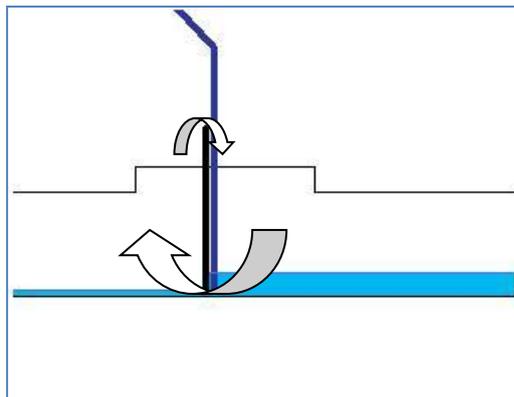


Abbildung 4-15: Aufstau

Manuelle Probenahme

Wurde kein Sampler benutzt, wurden alle Proben mithilfe einer Holzstange mit der Hand genommen (Abbildung 4-16) und in 1 Liter Probeflaschen aus Kunststoff gefüllt. Die Entnahme geschah entweder aus den Schächten (PN2, PN3) oder aus dem Abfluss des Kanalrohres (PN4).



Abbildung 4-16: händische Probenahme mit Stange

4.2.4 Phosphatmessung

Die Bestimmung der Konzentration von Phosphor in den Abwasserproben wurde mit Reflectoquant® plus Phosphat-Test von Merck durchgeführt. Bei diesem Produkt werden Abwasserproben in schwefelsaurer Lösung Molybdat-Ionen zugegeben. Die Phosphat-Ionen bilden mit den Molybdat-Ionen Molybdophosphorsäure, die zu Phosphormolybdänblau reduziert wird. Die Intensität der Blaufärbung der Probe bzw. des Teststreifens wird mit einem Photometer (Abbildung 4-17) bestimmt und gibt die Konzentration an Phosphor an.

2 Test-Kits standen zur Verfügung:

- Reflectoquant® Teststäbchen (Methode:reflektometrisch) 5 – 120 mg/l PO₄
- Reflectoquant® Phosphat-Test (Methode:reflektometrisch) 0,1 – 5 mg/l PO₄

Alle Proben wurden vor der Messung mit einem Faltenfilter filtriert. War danach noch eine Trübung erkennbar (hauptsächlich PN 1 und PN 2), wurde die Probe zusätzlich mit einem Spitzenvorsatzfilter (0,45µm) filtriert (Abbildung 4-18). Teilweise wurden Proben mit destilliertem Wasser verdünnt, wenn der Phosphatgehalt die messbare Konzentration überstieg. Der pH-Wert der Proben sollte zwischen 5 und 8 liegen, die Temperatur zwischen 20° und 30° C.

Fremdstoffe bis zu in Tabelle 4-8 angegebenen Konzentrationen haben keinen Einfluss auf die Bestimmung.

Tabelle 4-8: zulässige Fremdstoffkonzentrationen (MERCK KGaA, 2004)

Fremdstoffkonzentration in mg/l bzw. %							
Acetat	1000	CN ⁻	1000	Ni ²⁺	100	NaCl	5 %
Al ³⁺	1000	CO ₃ ²⁻	1000	NO ₂ ⁻	1000	Na ₂ SO ₄	10 %
Ascorbat	1000	Cu ²⁺	10	NO ₃ ⁻	1000		
BO ₃ ³⁻	1000	Fe ²⁺	1000	SO ₃ ²⁻	1000		
Br	1000	Fe ³⁺	1000	Tartrat	1000		
Ca ²⁺	1000	K ⁺	1000	Zn ²⁺	1000		
Citrat	1000	Mg ²⁺	1000				
Cl ⁻	1000	Mn ²⁺	1000				



Abbildung 4-18: Photometer



Abbildung 4-17: Probe unfiltriert (links), mit Faltenfilter (Mitte) und mit Spitzenvorsatzfilter (rechts)

4.3 Phosphorfällung

4.3.1 Bau des Siphons

Bei der Versuchsanlage handelt es sich um eine vorgeschaltete Fällung, die Zugabe des Fällmittels erfolgt am Beginn der Anlage, in einem dafür vorgesehenen Schacht. Durch diesen Schacht fließt das Abwasser durch eine Rohrleitung. Diese Rohrleitung hat in der Mitte einen Absturz von etwa 25 cm, in einem Winkel von 45° (Abbildung 4-19). Vor dem Absturz wird das Fällmittel zugegeben. Der Absturz soll für die notwendige Turbulenz sorgen und die Vermischung garantieren. Nach Messungen bei der bestehenden Mischstrecke sollte die Strecke umgebaut werden und die Absturzrinne durch einen Siphon ersetzt werden. Durch den Siphon entsteht ein Wasservolumen, das Wassermengen- und Konzentrationsschwankungen ausgleichen, die Durchmischung verbessern und so die Fällung optimieren und den Fällmittelverbrauch senken soll.



Abbildung 4-19: Dosierschacht mit Altbestand der Mischstrecke

Die Anforderungen an den Siphon waren:

- Ausreichende Größe bzw. Wasservolumen
- Gewährleistung der Funktionsfähigkeit (Verstopfen) und Dauerhaftigkeit
- Vorgegebene Anschlussstellen, beschränkte Raumverhältnisse
- Dichtheit

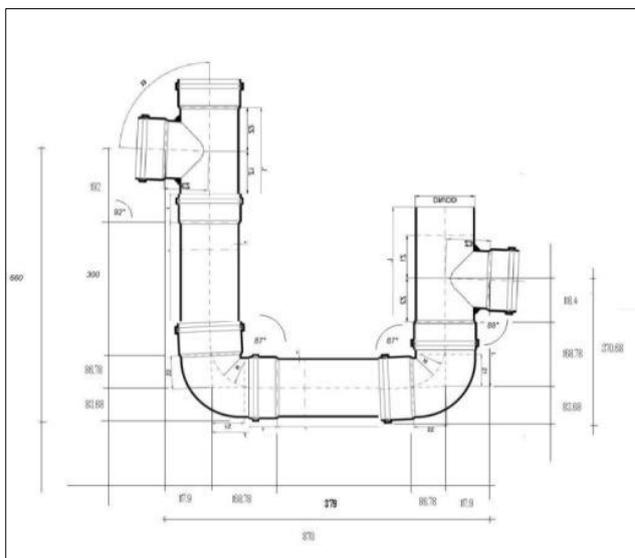


Abbildung 4-20: Skizze des Siphons

Zuerst wurde der Siphon geplant und Skizzen erstellt (Abbildung 4-20). Dabei stellte sich heraus, dass das Abflussrohr, durch das das Wasser weiter zur Vorklärung abfließt, so niedrig in der Schachtwand einbetoniert ist, dass die Abmessungen von Krümmer und T-Stück auf der rechten Seite das Platzangebot bereits übersteigen. Somit wurde es notwendig den Siphon seitlich ausweichen zu lassen und es ergab sich, dass bei der Bemaßung der Bauteile nun 3 Dimensionen zu berücksichtigen waren (Abbildung 4-21). Der Siphon sollte an insgesamt 4 Stellen einen Knick von 90° aufweisen, normale Rohre für Wasser und Abwasser sind mit einem maximalen Krümmungswinkel von 88° erhältlich. Dadurch entstand im eigentlich horizontalen Teilstück ein ansteigendes Gefälle. Dieser Umstand ist durchaus positiv zu betrachten. Um ein Verstopfen des Siphons durch Grobstoffe und Sedimentation zu verhindern, wurde der Einbau von Luftdüsen vorgesehen. Durch die Steigung im Rohr kann die eingeblasene Luft in Strömungsrichtung aufsteigen und so Partikel in Richtung Ausgang mitreißen. Trotzdem bleibt eine geringe Abweichung von der Horizontalen in den Anschlussstücken. Diese müssen durch Druck und Biegung ausgeglichen werden.

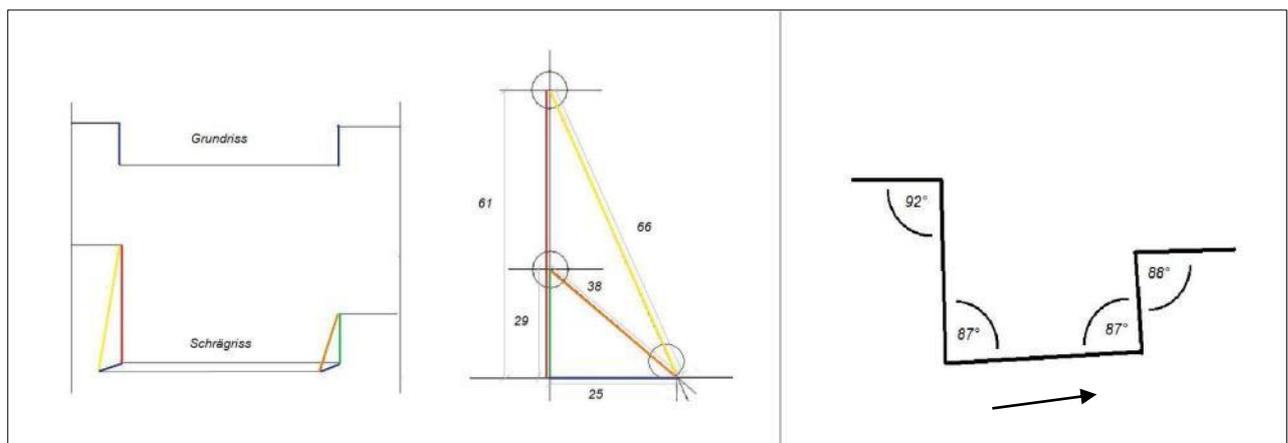


Abbildung 4-21: 3-Dimensionalität durch Ausweichen & Steigung des Siphons

Als Baumaterial wurden gewöhnliche Abwasserrohre aus PVC der Härteklasse PN4 verwendet, wie sie auch in häuslichen Abwasserleitungen Gebrauch finden. Folgende Bauteile wurden verwendet:

- 2x Rohr, PN4 150mm, 50 cm Länge
- 2x T-Stück, PN4 150mm
- 2x Krümmer 88° , PN4 150 mm
- Außerdem 2x Krümmer 45° welche auf die Oberseite der T-Stücke aufgesetzt werden um den Ausweichwinkel auszugleichen und die T-Stücke nach oben zu verlängern

Um ein Verstopfen des Siphons durch Sedimentation zu verhindern, wird durch 5 Luftdüsen am tiefsten Abschnitt des Siphons Luft durch einen Kompressor eingeblasen. Diese Düsen sind Luftdüsen, wie sie in einem Whirlpool eingesetzt werden und sind aus ABS-Kunststoff gefertigt (Abbildung 4-23). Sie bestehen aus einem hohlen Körper mit Gewinde, einer Kappe unter der die Luft ringförmig ausströmt und einer Mutter, mit der sie in ein Bauteil eingeschraubt werden können. Am unteren Ende wird die Düse mit einem Luftschlauch verbunden. Normalerweise werden solche Düsen an ebenen Flächen eingebaut, an denen durch planes Aufliegen eine ausreichende Dichtheit erreicht werden kann. In diesem Fall liegen die Düsen an gekrümmten Flächen an. Entsprechend bedeutend ist daher die Frage nach einer Einbaumethode, die ausreichen dicht ist und weder durch Alterung noch den chemischen Angriff des Abwassers zerstört wird. Gewählt wurde die Verwendung von Dichtungsringen aus speziellen Polymeren an der Innen- und Außenseite (Abbildung 4-23).

An der Innenseite wird ein O-Ring aus Silikonkautschuk (MVQ) mit einer Ummantelung aus FEP (Perfluorethylenpropylen-Copolymer) verwendet. Der Durchmesser beträgt 2 mm. Dieser spezielle O-Ring der Firma RALICKS Industrie- und Umwelttechnik kombiniert die chemische Beständigkeit der Ummantelung mit der Elastizität des Kernmaterials. FEP ist beständig gegen nahezu alle organischen und anorganischen Chemikalien, einsetzbar zwischen $-200\text{ }^{\circ}\text{C}$ und $+200\text{ }^{\circ}\text{C}$ und nimmt kein Wasser auf (RALICKS Industrie- und Umwelttechnik).

An der Außenseite wurde eine 3 mm starke Flachdichtung aus EPDM (Ethylen-Propylen-Dien-Kautschuk) angebracht. Das Material ist etwas weniger Beständig als FEP, hat aber ebenfalls gute Alterungsbeständigkeit. Es ist nicht beständig gegen Mineralölprodukte, was in der Kläranlage aber keine Rolle spielen sollte. Dafür ist es elastisch und sollte durch den Druck der Mutter gut am Rohr anliegen. Die hohe Beständigkeit der Dichtungsmaterialien ist notwendig, denn die Verbindung von Düse und Rohr stellt den schwächsten Punkt des Bauteils dar. Nur an diesen Punkten und an den Verbindungen zwischen den Rohrstücken kann Wasser austreten. Sollten hier irgendwann undichte Stellen aufgrund Materialversagens auftreten, ist eine Sanierung nicht ohne weiteres möglich. Im schlimmsten Fall muss das gesamte Bauwerk ausgetauscht werden. Abbildung 4-22 zeigt die beiden Dichtungen.



Abbildung 4-22: Flachdichtungen (links) und O-Ringe (rechts)

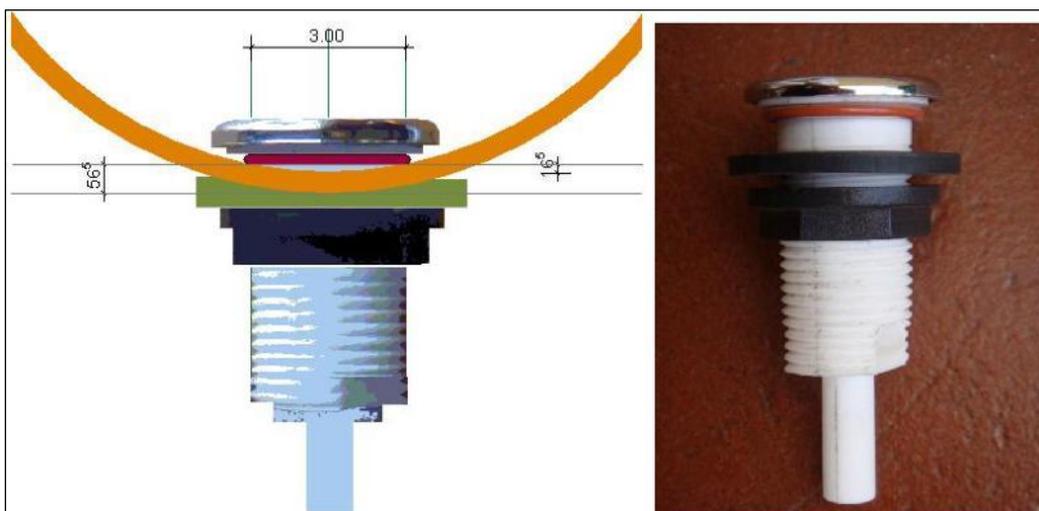


Abbildung 4-23: Luftdüse mit Dichtungen (Einbauschema und Photo)

Um alle Düsen mit Druckluft zu versorgen musste der Schlauch für die Luftzufuhr auf mehrere Schlauchstränge aufgeteilt werden. Dafür wurden T-Stücke aus Kunststoff benutzt, auf die die Schläuche aufgesetzt und mit Schlauchschellen fixiert werden können. Die T-Stücke sowie die Schläuche sind Produkte der Firma GARDENA. Abbildung 4-24 zeigt das Schema, nach der die Düsen mit dem Luftschlauch verbunden sind.

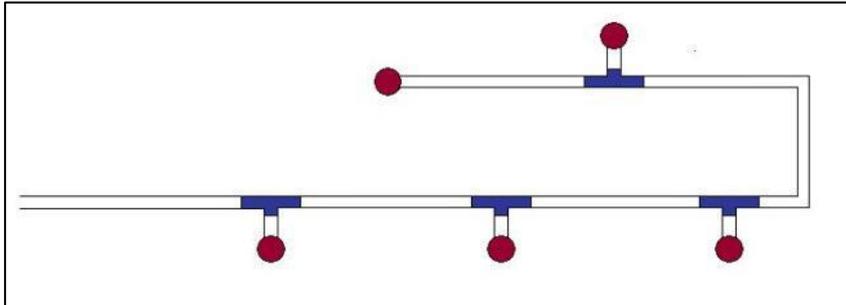


Abbildung 4-24: Schema der Belüftung



Abbildung 4-25: Alu-Winkel mit Bohrung

Damit die einzelnen Schlauchstränge nicht lose hängen, wurden Winkelstücke aus Aluminium am Rohr mit einer großen Rohrschelle montiert. In diese Winkel kamen kreisrunde Löcher, durch die die Enden der T-Stücke für die Einzelstränge geschoben werden konnten (Abbildung 4-25). An der anderen Seite wurde der Schlauch aufgesteckt und wiederum mit einer Schlauchschelle fixiert. So bleiben die Stränge geordnet und fest verbunden.

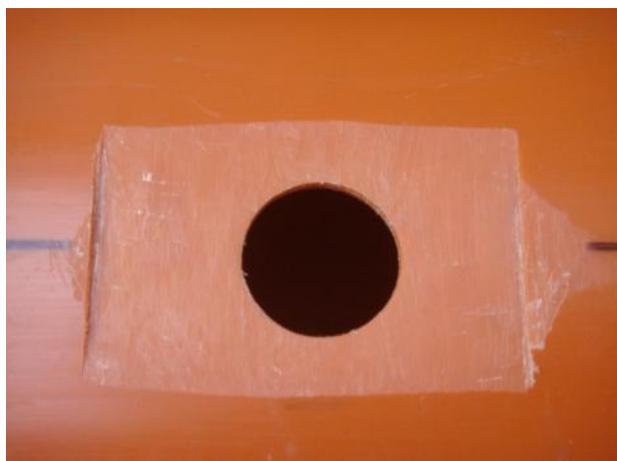


Abbildung 4-26: Loch für eine Düse

Für die Düsen mussten insgesamt 5 Löcher in das vertikale Rohr gebohrt werden. Bevor die Düsen eingesetzt werden konnten, mussten an den dafür vorgesehenen Stellen die Krümmung um einige Zentimeter abgeschliffen werden. Dadurch entstand eine ebene Fläche auf der die Flachdichtung aufsetzt und somit die Abdichtwirkung verbesserte (Abbildung 4-26).

Dann wurden alle Düsen eingesetzt, mit den Luftschläuchen verbunden und festgeschraubt (Abbildung 4-27). Um die Dichtheit der Konstruktion zu kontrollieren wurde der Siphon zusammengebaut und mit Wasser gefüllt. Anfangs mussten kleine Wasseraustritte hauptsächlich an den Stellen vermerkt werden, an denen die Luftschläuche mit den T-Stücken zusammengesteckt wurden. Durch Festziehen der Schellen konnte die Probleme behoben werden.

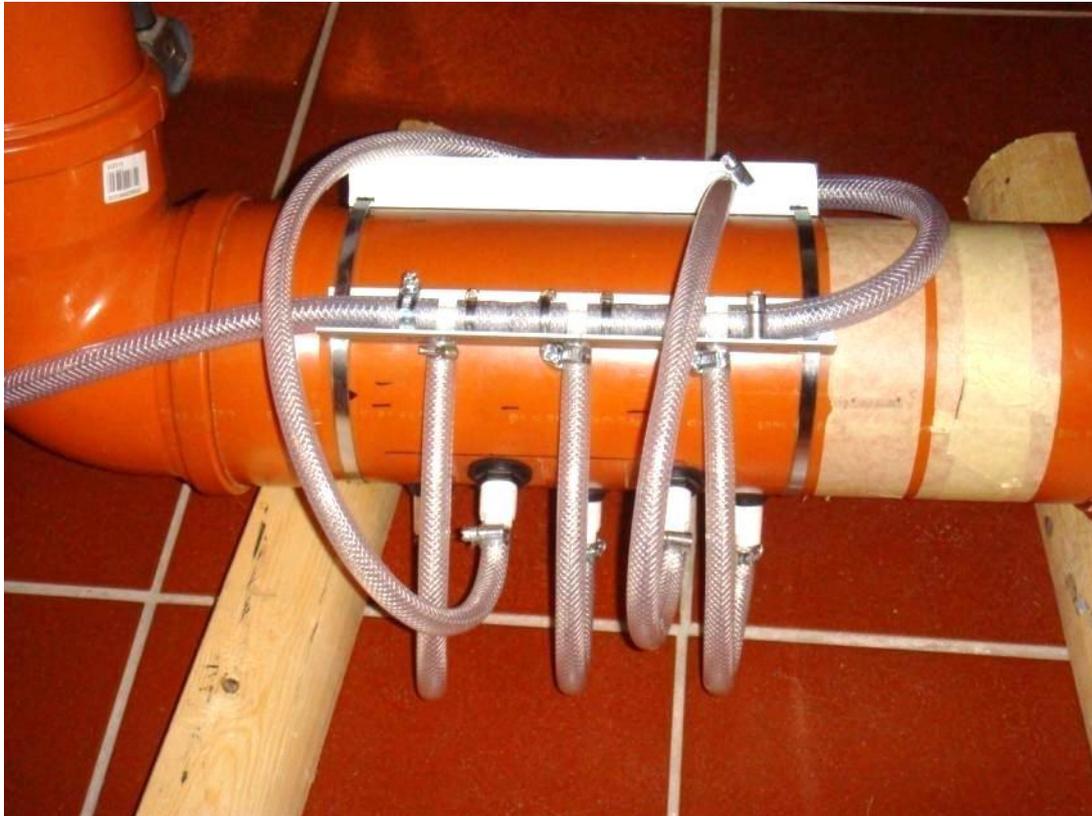


Abbildung 4-27: Düsen, Schläuche und Alu-Winkel am Siphon

Vorgegeben durch die Platzverhältnisse im Schacht erreicht der Siphon eine gestreckte wassergefüllte Länge von ca. 1 m. Das entspricht einem Volumen von ca. 20 Liter.

4.3.2 Fällmittelmengenberechnung

Die Berechnung der benötigten Fällmittelmenge wurde nach ATV-DVWK-A 202 „Chemisch-physikalische Verfahren zur Elimination von Phosphor aus Abwasser“ berechnet (ATV-DVWK-A 202, 2004). Die im Mittel zu dosierende Fällmittelmenge ($B_{d,FM}$) in g/d ergibt sich aus der Konzentration des zu eliminierenden Phosphors ($X_{P, Fäll}$) mal der täglichen Abwassermenge ($Q_{T,d}$), dividiert durch einen Wirkungsbeiwert (z), der den Gehalt des Metalls im Fällmittel wiedergibt (3). Der Faktor β (Beta-Wert) ist ein Maß für die Wirksamkeit der Fällung, bei optimalen Verhältnissen ist $\beta = 1$. Bei schlechteren Bedingungen ist β dementsprechend größer womit sich die notwendige Fällmittelmenge erhöht.

$$B(d, FM) = X(P, Fäll) * \beta(Fäll) * \frac{Q(T, d)}{z} \quad (3)$$

$B_{d,FM}$	im Mittel zu dosierende absolute Fällmittelmenge [g Fällmittel/d]
$Q_{T,d}$	Durchfluss der täglichen Abwassermenge bei Trockenwetter [m ³ /d]
$X_{P,Fäll}$	durch Fällung eliminiertes Phosphor [mg/l]
$\beta_{Fäll}$	relative Fällmittelmenge – Beta-Wert [mol Me/mol $X_{P,Fäll}$]
z	Wirkungsbeiwert für den Gehalt an Aluminium/Eisen

Der Gehalt des zu eliminierenden Phosphors im Abwasser ($X_{P,Fäll}$) wird bestimmt durch die Konzentration im Zulauf ($C_{P,ZB}$) - von der einige Komponenten abgezogen werden, die sich hauptsächlich bei konventionellen Belebungsanlagen finden - und der akzeptablen Restkonzentration im Ablauf (4). Da auf einer Pflanzenkläranlage in den Pflanzenbeeten, abgesehen von dem Schnittmaterial des Schilfs, keine Biomasse entnommen wird, kann $X_{P,BM}$ gleich 0 gesetzt werden. Aus demselben Grund kann auch kein Phosphor über erhöhte biologische P-Aufnahme entfernt werden ($X_{P,BioP}$). Somit bleibt lediglich der Ablaufwert ($C_{P,aM,AN}$) zu subtrahieren.

$$X(P, Fäll) = C(P, ZB) - C(P, aM, AN) - X(P, BM) - X(P, BioP) \quad (4)$$

$C_{P,ZB}$	Konzentration des Gesamtphosphors im Zulauf zur Belebungsanlage [mg/l]
$C_{P,aM,AN}$	Konzentration des Phosphors in der homogenisierten Probe im Ablauf des Nachklärbeckens, Jahresmittelwert (Betriebsmittelwert) [mg/l]
$X_{P,BM}$	inkorporierte Gesamtphosphormenge in der heterotrophen Biomasse [mg/l]
$X_{P,BioP}$	Anteil über erhöhte biologische Phosphorelimination bei Bio-P-Anlagen [mg/l]

$$X_{(P, Fäll)} = 11 - 1,6 - 0 - 0 = \mathbf{9,40 \text{ mg/l}}$$

Die relativen Atommassen von Elementen können in g/mol angegeben werden. Ein mol enthält immer $6,02214129 \times 10^{23}$ Teilchen, die Masse eines Mols hängt vom Element ab. Um zu wissen welche Masse Aluminium benötigt wird, um ein Mol Phosphor zu binden, werden die Atommassen dividiert. Um den Gehalt der Wirksubstanz im Fällmittel zu berücksichtigen, wird der Aluminiumgehalt anschließend multipliziert (5). Da das verwendete Fällmittel kein Eisen als Wirksubstanz enthält, kann der erste Term gleich 0 gesetzt werden.

$$z = \frac{Am(P) * Ws(Fe)}{Am(Fe)} + \frac{Am(P) * Ws(Al)}{Am(Al)} \quad (5)$$

Am_x	relativen Atommassen
Ws_{Me}	Gehalt an Wirksubstanz (kg Me je kg Fällmittel)

$$Am_P = 31 \text{ [g/mol P]}$$

$$Am_{AL} = 27 \text{ [g/mol Al]}$$

Combiphos L	
Al-Gehalt =	10 %
$WS_{AL} =$	0,1
$\rho =$	1,48 [g/ml]

$$z = 0 + 0,1148 = \mathbf{0,1148}$$

$$Q_{T,d} = \mathbf{3,7 \text{ m}^3/d}$$

Die tägliche Fällmittelmenge muss nun noch auf das Fällmittelvolumen und den zu dosierenden Volumenstrom umgerechnet werden (6). Die Ergebnisse wurden für verschiedene β -Werte berechnet.

$$Q(d, FM) = \frac{B(d, FM)}{\rho(FM)} \quad (6)$$

$Q_{d,FM}$	im Mittel zu dosierender absoluter Fällmittelvolumenstrom [ml/d]
$Q_{h,FM}$	stündlicher Fällmittelvolumenstrom [ml/h]

Für $\beta = 1$ ergibt sich:

$B_{d,FM} =$	302,96 [g/d]
$Q_{d,FM} =$	204,70 [ml/d]
$Q_{h,FM} =$	8,53 [ml/h]

Für $\beta = 1,8$ ergibt sich:

$B_{d,FM} =$	545,33 [g/d]
$Q_{d,FM} =$	368,47 [ml/d]
$Q_{h,FM} =$	15,35 [ml/h]

Für $\beta = 3,5$ ergibt sich:

$B_{d,FM} =$	1060,37 [g/d]
$Q_{d,FM} =$	716,46 [ml/d]
$Q_{h,FM} =$	29,85 [ml/h]

4.3.3 Dosierpumpe

Um die gewünschte Menge des Fällmittels in den Abwasserstrom zuzugeben, wurde eine beta/4 Dosierpumpe der Firma ProMinent verwendet (Abbildung 4-28). Sie besitzt eine Saugleitung, um das Fällmittel einem Behälter zu entnehmen, eine Spülleitung, einen Rücklauf und eine Druckleitung. Das Ende der Druckleitung wurde durch ein Loch im Verschluss des ersten Putzstückes im Dosierschacht (PN 1) gesteckt und dosierte das Fällmittel so direkt in das ankommende Abwasser.

Dosiermengen

Die Pumpe arbeitet durch das Verschieben einer Membran und zweier Ventile, die Druck nur in eine Richtung durchlassen. Dabei wird Druck entsprechend dem Hubvolumen der Membran aufgebaut. Die beta/4 besitzt zwei Drehregler. Ein Regler verstellt das Hubvolumen, der zweite die Frequenz der Membranbewegungen.

Da für das zur Verfügung stehende Modell bezüglich Dosierleistung keine Daten verfügbar waren, musste zuerst ein Leistungsdiagramm erstellt werden (Abbildung 4-29) Dafür wurde bei jeder Einstellung Zeit und Dosiermenge gemessen (Tabelle 4-9).

Tabelle 4-9: Dosiermengen nach Hub und Frequenz [ml/h]

	Frequenz										
Hub	100	90	80	70	60	50	40	30	20	10	
100	2647,1	2472,5	2271,8	2004,5	1689,1	1416,6	1111,1	822,9	545,5	293,5	
80	2144,6	2033,9	1833,0	1633,4	1374,7	1151,5	900,0	646,2	438,3	242,2	
60	1650,0	1567,9	1406,8	1250,9	1054,9	891,5	679,2	503,5	325,2	175,2	
40	1159,3	1094,9	977,2	862,5	733,9	612,2	458,6	341,8	210,0	113,7	
20	609,9	597,3	489,1	453,6	380,5	327,6	234,8	178,2	110,0	61,9	
10	313,7	298,5	248,5	230,0	202,9	169,7	122,4	91,4	55,6	30,0	



Abbildung 4-28: Dosierpumpe Prominent beta/4

Mit dieser Pumpe beträgt die geringste mögliche Dosiermenge 30 ml/h (Tabelle 4-9). Das entspricht einem β -Wert von ca. 3,5. Die Dosiermengen wurden im Laufe der Versuche variiert. Um mit einem niedrigen Wert zu beginnen, wurde am Anfang eine Zeitschaltuhr verwendet, die die Dosierpumpe im 30 Minuten Intervall ein- und ausschaltete. Somit konnte eine mittlere Dosiermenge von 15 ml/h erreicht werden ($\beta = 1,8$).

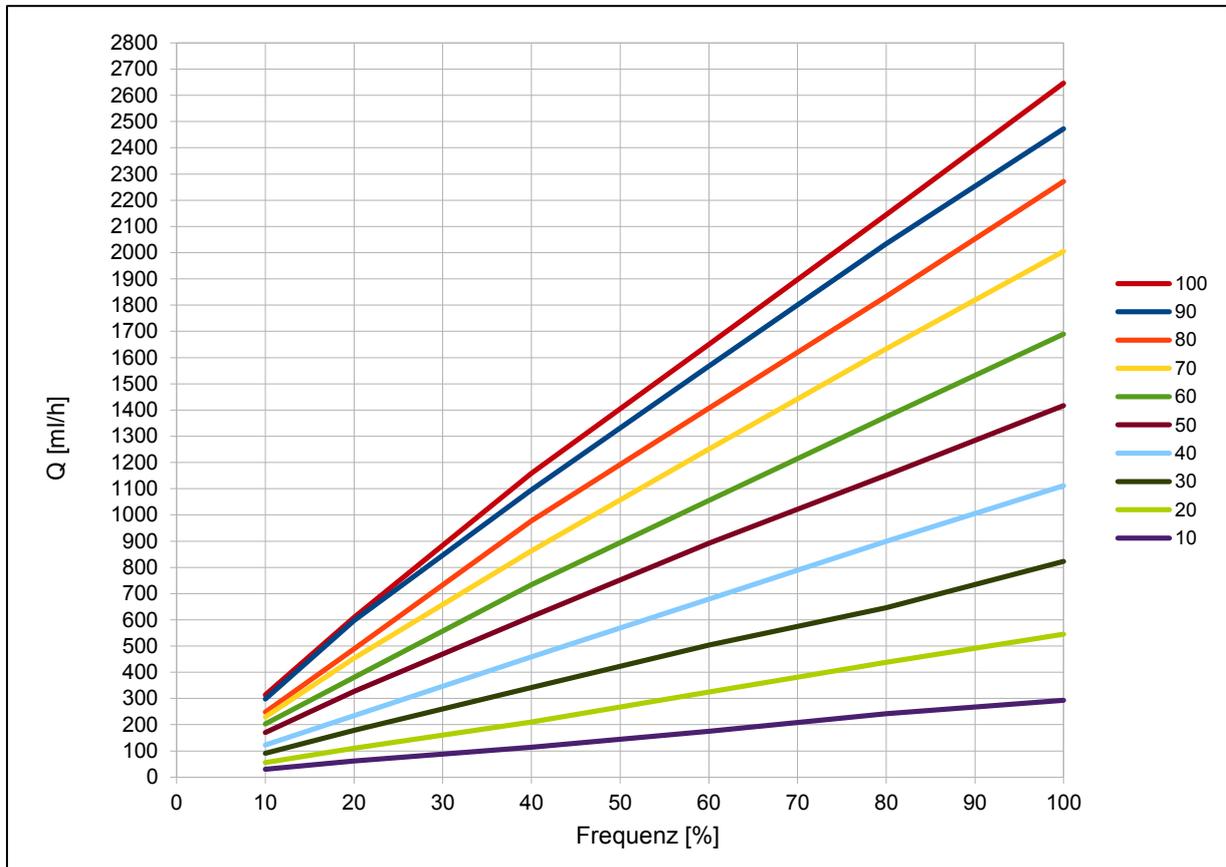


Abbildung 4-29: Leistungsdiagramm der verwendeten Dosierpumpe

5. Ergebnisse

5.1 Durchflussmessung

Um die Elimination von Phosphor in der Vorfällung und im bepflanzten Bodenfilter bestimmen zu können, ist es notwendig die Zulaufmenge und die Zulaufkonzentration und somit die ankommende Fracht zu jedem Zeitpunkt einer Messung bestimmen zu können. Da dieser Aufwand nicht betrieben werden konnte, wurden lediglich repräsentative Messungen gemacht, um eine Wassermenge zu definieren, die als durchschnittlicher Wert für alle Messungen als Zuflussmenge betrachtet wird. Ähnlich wurde mit der P-Konzentration verfahren (Kapitel 5.2). Die Entscheidung für diese Methode wurde durch die zur Verfügung stehenden Geräte beeinflusst (Kapitel 4.2.1). Die Funktionstüchtigkeit der Sonden und die Verfügbarkeit von Batterien waren leider nicht immer gegeben. Somit blieb nur die Möglichkeit, mit einer Sonde das Zählen der Heberbewegungen aufzuzeichnen und damit den Zufluss zu bestimmen. Ziel war es, eine Durchflussmenge zu bestimmen, die für jeden Tag als charakteristischer Wert betrachtet werden kann.

Für die Zulaufmengenmessung wurden eine Messreihe von 37 Stunden im Intervall 1 min., eine Messreihe von 125 Stunden im Intervall 3 min. und eine Messreihe von 51,5 Stunden im Intervall 15 min. herangezogen.

Messreihen im Intervall 1 min.

Im Oktober 2011 wurde mit einer Sonde der Wasserdruck in diesem kurzen Intervall gemessen. Ziel war es, die Druckdifferenz einer Beschickung und somit die Wassermenge so genau wie möglich zu bestimmen. Die Messung dauerte 37 Stunden. In diesem Zeitraum wurden 8 Beschickungen aufgezeichnet (Abbildung 5-1).

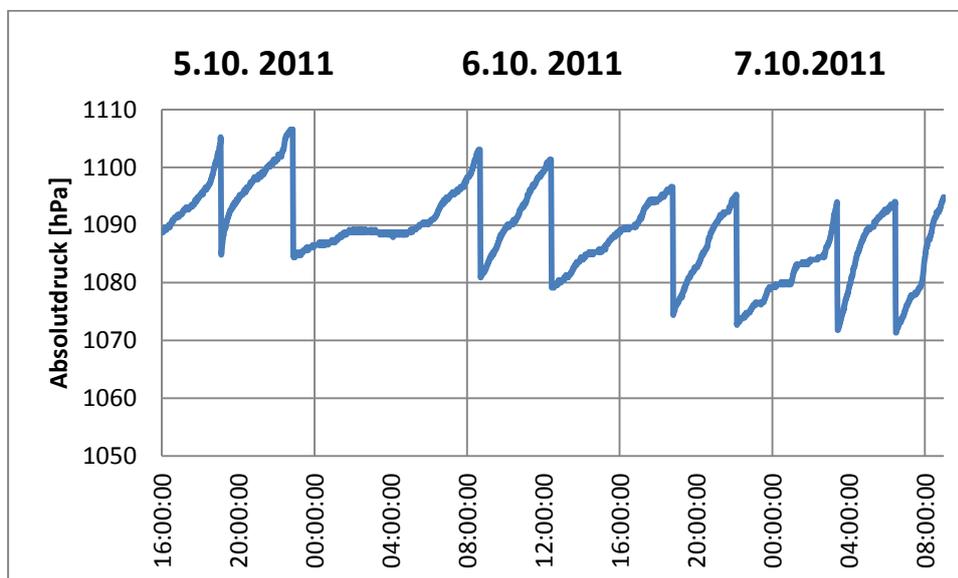


Abbildung 5-1: Daten der Drucksonde im Intervall 1 min.

Tabelle 5-1: Druckdifferenz, Wasserspiegeländerung und Volumen der Heberbewegungen

Δ Druck [hPa]	Δ h [mm]	V [l]
20,45	208,46	654,90
22,20	226,30	710,94
22,21	226,40	711,26
22,21	226,40	711,26
22,22	226,50	711,58
22,65	230,89	725,35
22,22	226,50	711,58
22,65	230,89	725,35
Mittelwerte	22,10	707,78

Tabelle 5-1 zeigt die Ergebnisse der Messung. In fetter Schrift am unteren Ende finden sich die Mittelwerte.

Durch diese Ergebnisse wird der durchschnittliche charakteristische Wert für eine Beschickung auf 700 Liter gerundet.

Messreihen im Intervall 3 min.

Im Herbst 2010 wurde noch versucht mit der Methode der Messung von Wasser- und Luftdruck den Durchfluss zu bestimmen. Obwohl mehrere Versuche unternommen wurden, fiel bei jedem Versuch eine der beiden Sonden nach kurzer Zeit aus. Meistens war es die Sonde, die den Wasserdruck messen sollte.

Verwertbar ist lediglich eine Messung im November 2010. Damals konnte eine Sonde den Wasserdruck über einen Zeitraum von 5 Tagen aufzeichnen, leider wieder ohne zeitgleicher Luftdruckmessung. Deshalb kann eine Aussage über die Wassermengen wieder nur über die Anzahl der Heberbewegungen gemacht werden. Des Weiteren wird bei dieser Messung der Tagesgang des Wasserverbrauches sichtbar.

In Abbildung 5-2 sieht man die Ergebnisse der Aufzeichnung. Klar zu sehen ist der Einfluss des Luftdrucks, der die wellenförmige Auf- und Abbewegungen des Graphen verursacht. Verknüpft man die Bemaßung einer Heberbewegung mit der täglichen Anzahl ergibt sich folgender Tagesdurchfluss:

17.11. (Mittwoch): 4 Hübe / 2,8 m³

18.11. (Donnerstag): 6 Hübe / 4,2 m³

19.11. (Freitag): 6 Hübe / 4,2 m³

20.11. (Samstag): 5 Hübe / 3,5 m³

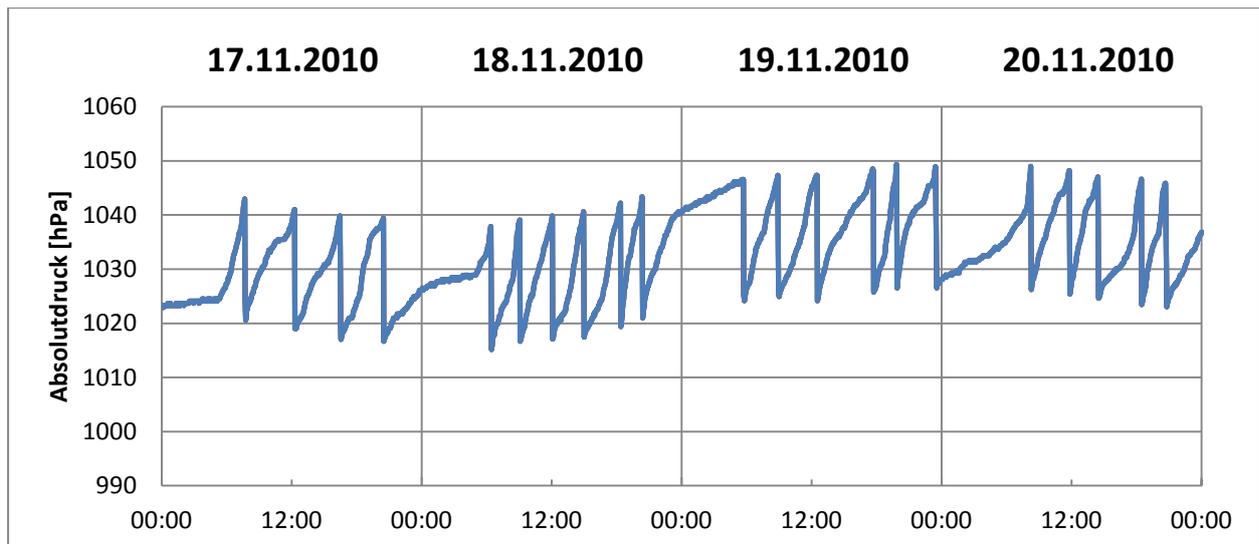


Abbildung 5-2: Daten der Sonde im Intervall 3 min.

Bildet man die Differenzen der einzelnen Messpunkte ergibt sich die Druckdifferenz in der Zeiteinheit. Mit der Kenntnis der Geometrie kann man die Volumsänderung in der Zeiteinheit errechnen. Es darf jedoch nicht vergessen werden, dass die Ergebnisse immer noch durch den Luftdruck verfälscht werden. Dennoch können die Ergebnisse für die Bemessung von Zuflussspitzen herangenommen werden, da in einem Zeitraum von 3 min. Luftdruckveränderungen keine großen Fehler auslösen. Die höchste gemessene Druckdifferenz beträgt $1,96 \text{ hPa}/3 \text{ min}$. Dieser Wert kommt jedoch in 2400 Messpunkten nur 1x vor und wird somit als Ausreißer betrachtet und verworfen. Als höchster Wert gilt eine Druckdifferenz von $1,56$ bzw. $1,57$. Dieser Wert wurde zumindest 11 Mal beobachtet. Das entspricht einem Q von $\sim 50 \text{ l}/3 \text{ min}$. oder **$0,28 \text{ l/s}$** (Abbildung 5-3).

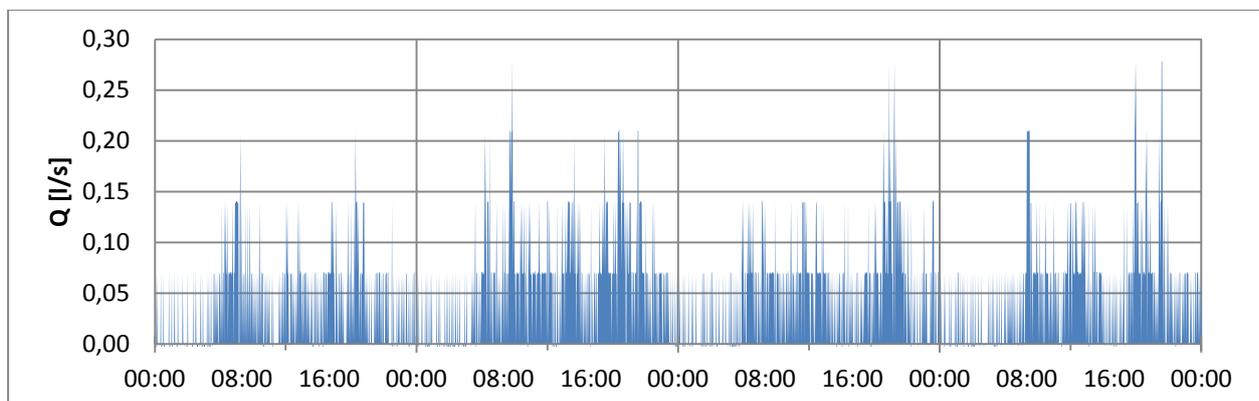


Abbildung 5-3: Sondendaten umgerechnet in l/s

Fasst man nun jeweils 10 Messwerte zusammen erhält man eine Zuflussmenge pro Sekunde für die halbe Stunde. In Abbildung 5-4: Tagesgang der Zuflussmenge wird dadurch der Tagesgang deutlich erkennbar, die Spitzen sind gedämpft. Der Einfluss des Luftdrucks ist hier ebenfalls noch erhalten. Dennoch kann festgestellt werden, dass in der Nacht, besonders zwischen 0 Uhr und 5 Uhr der Zufluss stark abnimmt und teilweise sogar kein Zufluss vorhanden ist.

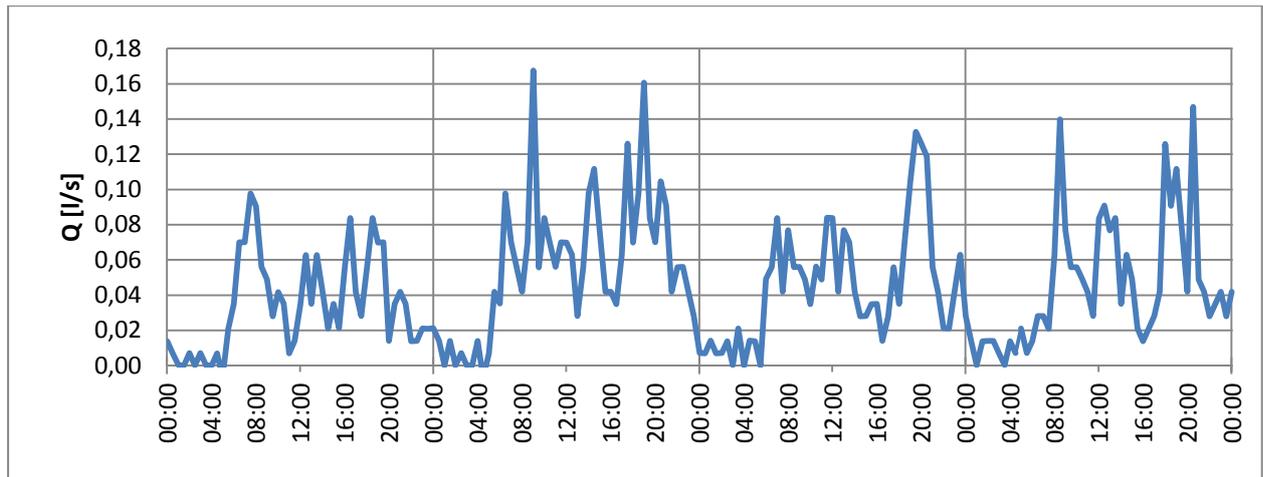


Abbildung 5-4: Tagesgang der Zuflussmenge

Messreihen im Intervall 15. min.

Im Oktober 2011 wurde nochmals eine Druckmessung durchgeführt. Dieses Mal mit einem Messintervall von 15 min. (Abbildung 5-5). Ziel war es, ausschließlich die Heberbewegungen zu zählen, um mehr Daten über die Zuflussmengen zu erhalten. Die Sonde funktionierte 75,5 Stunden. Es konnten 2 volle Tage von Mitternacht bis Mitternacht gemessen werden.

14.10. (Freitag): 5 Hübe / 3,5 m³

15.10. (Samstag): 5 Hübe / 3,5 m³

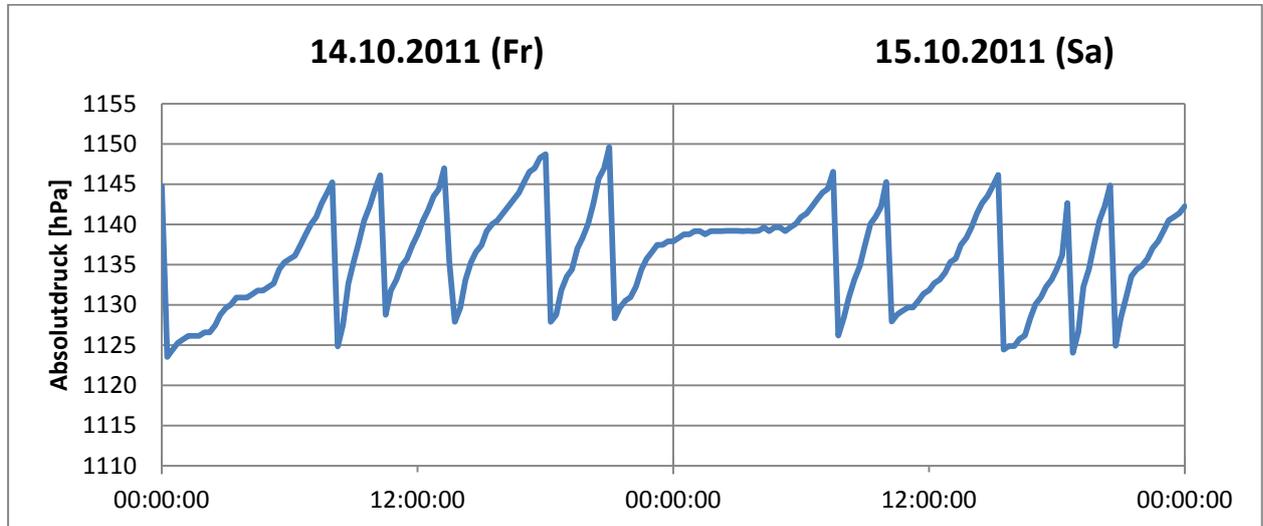


Abbildung 5-5: Daten der Sonde im Intervall 15 min.

Durch die Messungen mit den Drucksonden wurden einige Ergebnisse erzielt. Das Volumen einer Beschickung wird mit **700 Litern** angenähert. Der Durchschnittswert der längsten durchgehenden Messung für die Anzahl der Beschickungen pro Tag soll als maßgebend betrachtet werden. Somit wird zukünftig ein Durchfluss von **3,7 m³ pro Tag** vorausgesetzt. Daraus ergibt sich ein Durchschnittswert von **0,043 Liter in der Sekunde**. Als maßgebend für den Spitzenabfluss innerhalb von 3 Minuten wird eine Menge von 50 Liter beschrieben.

Tabelle 5-2: Ergebnisse der Durchflussmessungen

	<u>Mi - Fr</u>	<u>Di - So</u>	<u>Do - So</u>
<u>Zeitraum</u>	5. - 7. 10. 2011	16. - 21. 11. 2010	13. - 16. 10. 2011
<u>Anzahl Heberbewegungen</u>	8	29	16
<u>Messintervall</u>	1 min	3 min	15 min
<u>Durchschnittl. Druckdiff/Hub</u>	22,10 hPa	21,81 hPa	19,54 hPa
<u>Höhe/Hub</u>	22,53 cm	22,23 cm	19,90 cm
<u>Volumen/Hub</u>	0,71 m ³ 707,78 l	0,70 m ³ 698,37 l	0,63 m ³ 625,18 l
<u>Spitzenabfluss</u>	0,47 l/s	0,28 l/s	0,23 l/s
<u>Hübe/Tag</u>	4	5,25	5
<u>Q/d</u>	2,8 m ³	3,7 m ³	3,5 m ³

5.2 Phosphatmessung

5.2.1 Messungen ohne P-Fällung

Am Beginn der Arbeit lagen kaum Informationen über die Leistung der Anlage vor. Angaben aus der Literatur waren für solch kleine Systeme kaum verfügbar, die Übernahme von Kennwerten aus größeren Anlagen sind allenfalls Entscheidungshilfen und mit Vorsicht zu behandeln.

5.2.1.1 Zulaufkonzentration

1.Messung Oktober 2010

Wie schon beschrieben wurde zuerst versucht, die Zulaufkonzentration und die Zulaufmengen und somit die Phosphor-Fracht zu bestimmen (Kapitel 5.1). Für die Messung der P-Konzentration geschah dies durch Probenahme mit dem automatischen Probennehmer (Kapitel 4.2.3). Der erste Versuch wurde zwischen dem 12. und 14. Oktober 2010 unternommen. Der Sampler sollte 2-Stunden-Mischproben über einen Zeitraum von 2 Tagen nehmen. Der Sampler wurde wie folgt programmiert: Intervall 6 min á 50 ml – 20 Proben pro Flasche

Tabelle 5-3: Ergebnisse der 2-Stunden-Mischproben

Nr.	Uhrzeit	Füllgrad	PO ₄ -P [mg/l]
1	17:00 – 19:00	100	5,9
2	19:00 – 21:00	100	9,1
3	21:00 – 23:00	100	19,2
4	23:00 – 01:00	100	15,3
5	01:00 – 03:00	100	12,7
6	03:00 – 05:00	100	10,8
7	05:00 – 07:00	100	13,4
8	07:00 – 09:00	100	18,6
9	09:00 – 11:00	100	9,8
10	11:00 – 13:00	100	7,8
11	13:00 – 15:00	100	12,7
12	15:00 – 17:00	100	9,5
13	17:00 – 19:00	100	10,4
14	19:00 – 21:00	100	3,9
15	21:00 – 23:00	100	6,2
16	23:00 – 01:00	100	9,1
17	01:00 – 03:00	100	8,5
18	03:00 – 05:00	90	6,8
19	05:00 – 07:00	100	12,1
20	07:00 – 09:00	100	10,8
21	09:00 – 11:00	100	14,4
22	11:00 – 13:00	40	8,2
23	13:00 – 15:00	0	-
24	15:00 – 17:00	70	6,2

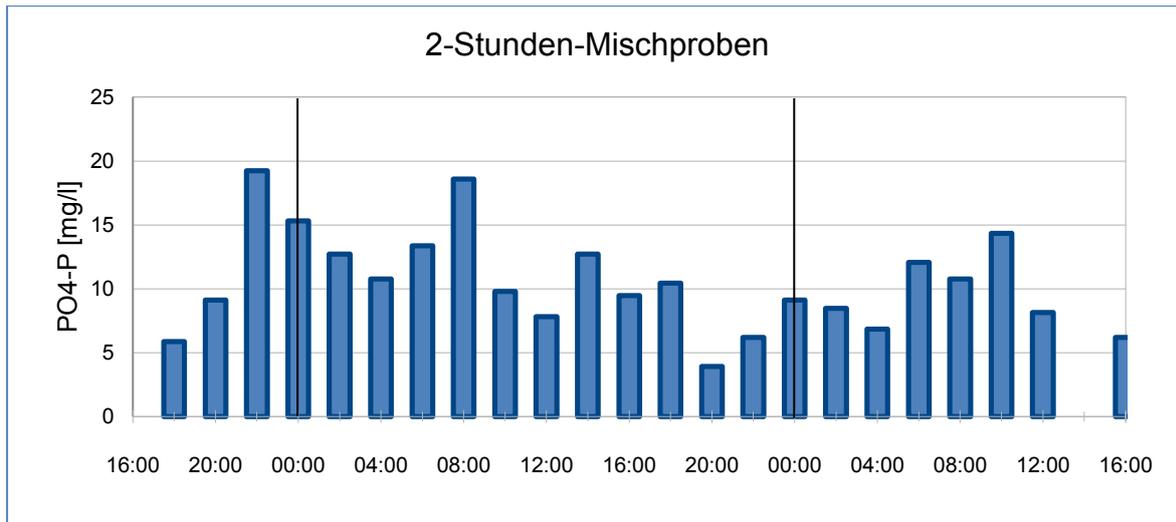


Abbildung 5-6: P-Konzentration im Zulauf innerhalb von 48 Stunden (2-Stunden-Mischproben)

Die Anordnung des Samplers funktionierte gut und lieferte Proben in 23 von 24 Flaschen, davon waren 20 Flaschen gänzlich gefüllt (Tabelle 5-4: Ergebnisse der 4-Stunden-Mischprobe und Abbildung 5-6: P-Konzentration im Zulauf innerhalb von 48 Stunden (2-Stunden-Mischproben)). Die Saugleitung war kaum verstopft und tauchte gut im Wasser ein. Leider lieferte die Drucksonde, die im Wasser versenkt worden war, nach 2 Stunden keine Ergebnisse mehr. Die zweite Sonde, die den Luftdruck maß, funktionierte über einen Zeitraum von über 5 Tagen. Damit waren die Ergebnisse der Zuflussmessung fehlgeschlagen und der gesamte Messaufwand nahezu unbrauchbar.

2. Messung März/April 2011

Aufgrund der oben angeführten Gründe wurde eine zweite Messung durchgeführt. Dabei wurde versucht, mit Sampler und Druckmessung die Zulauffracht zu bestimmen. Zwischen 28. März und 1. April 2011 sollte der Sampler 4 Tage lang 4-Stunden-Mischproben nehmen. Auch dieses Mal wurde mit 2 Drucksonden der Durchfluss gemessen.

Der Sampler wurde wie folgt programmiert: Intervall 12 min á 50 ml – 20 Proben pro Flasche

Leider funktionierte die Probenahme dieses Mal nicht so gut und nur 13 von 24 Flaschen hatte genügen Probematerial gesammelt, die eine Auswertung zuließen (Tabelle 5-4: Ergebnisse der 4-Stunden-Mischprobe und Abbildung 5-7). Zu diesem Zeitpunkt war die Fällung bereits aktiviert und um diese nicht zu beeinflussen wurde auf den Einbau des Aufstaus verzichtet. Vermutlich ergeben sich daher die geringen Füllgrade in den Flaschen.

Tabelle 5-4: Ergebnisse der 4-Stunden-Mischprobe

Nr.	Uhrzeit	Füllgrad	PO ₄ -P [mg/l]
1	20:30 - 00:30	75	11,1
2	00:30 - 04:30	0	-
3	04:30 - 08:30	100	12,1
4	08:30 - 12:30	50	31,3
5	12:30 - 16:30	0	-
6	16:30 - 20:30	30	11,4
7	20:30 - 00:30	70	1,6
8	00:30 - 04:30	0	-
9	04:30 - 08:30	40	24,1
10	08:30 - 12:30	5	25,8
11	12:30 - 16:30	0	-
12	16:30 - 20:30	100	3,6
13	20:30 - 00:30	0	-
14	00:30 - 04:30	0	-
15	04:30 - 08:30	10	13,0
16	08:30 - 12:30	0	-
17	12:30 - 16:30	95	6,8
18	16:30 - 20:30	20	4,9
19	20:30 - 00:30	20	5,2
20	00:30 - 04:30	0	-
21	04:30 - 08:30	10	6,2
22	08:30 - 12:30	0	-
23	12:30 - 16:30	0	-
24	16:30 - 20:30	0	-

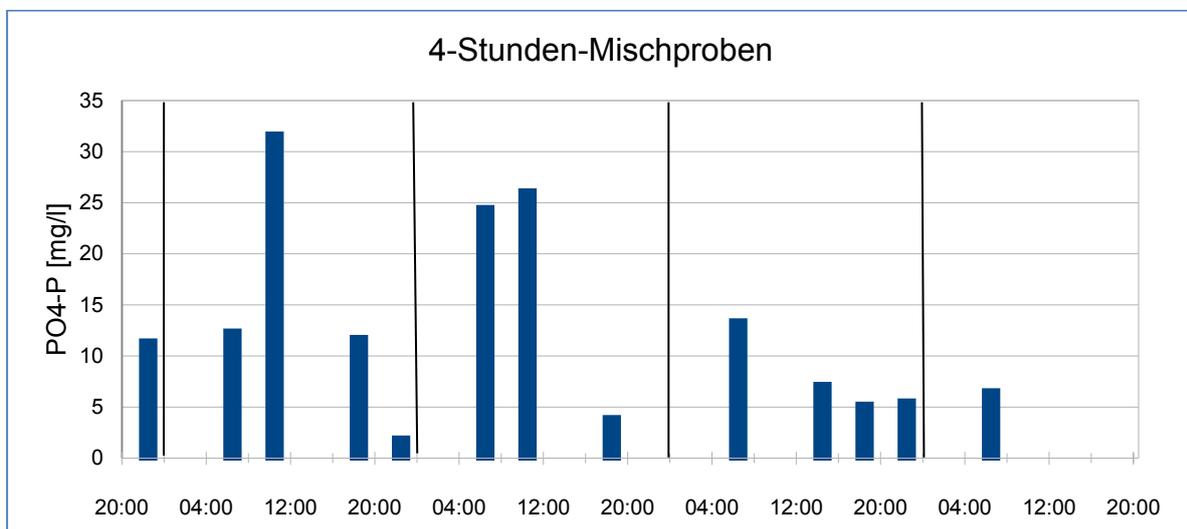


Abbildung 5-7: P-Konzentration im Zulauf innerhalb von 96 Stunden (4-Stunden-Mischproben)

Es kann lediglich festgehalten werden, dass die Schwankungen der P-Konzentration der Mischproben beträchtlich sind (zwischen 3,9 und 19,2 bei den 2-Stunden-Mischproben und zwischen 3,6 und 31,3 bei den 4-Stunden-Mischproben). Ein ausgeprägter Tagesgang kann nicht erkannt werden. Die Durchschnittswerte der P-Konzentrationen der Mischproben betragen **10,5 mg/l** und **12,1 mg/l**. Da die Berechnung nicht mengenproportional erfolgen kann, ist die Aussagekraft des Durchschnittswertes gering.

5.2.1.2 Eliminationsleistung der Pflanzenkläranlage, Ablaufwert und Rücklösungen

Zwischen dem 12. Oktober 2010 und dem 28. März 2011 wurde die Anlage im Ausgangsstadium, das heißt ohne Fällung beprobt. Bei den einzelnen Probenahmestellen wurden zwischen 7 und 9 Proben genommen, die Ergebnisse sind in Tabelle 5-5 dargestellt. Im Durchschnitt eliminierte die Anlage dabei 37,5% der PO₄-P Konzentration zwischen Zu- und Ablauf der Pflanzenbeete. Der Ablaufwert beträgt im Mittel 6,2 mg/l PO₄-P. Eine signifikante Veränderung in den Konzentrationen der 3 Vorklärschächte, die auf hydrolysierende Vorgänge und somit auf eine belegbare Erhöhung oder Abnahme des Phosphatgehaltes schließen ließe, ist nicht erkennbar (Abbildung 5-8:).

Tabelle 5-5: Ergebnisse der Probenahme ohne Fällung (werte in PO₄-P mg/l)

	Datum	PN 1	PN 2 s1	PN 2 s2	PN 2 s3	PN 3	PN 4
	12.10.2010			10,8	10,4	6,5	6,5
	12.10 - 14.10*	10,5					
	14.10.2010		10,4	11,4	12,1	4,6	3,6
	19.10.2010					5,9	5,5
			Räumung der Vorklämung				
	16.11.2010		12,7	11,7	8,2	7,5	7,2
	21.11.2010		11,4	13,0	13,7	7,2	6,5
	01.02.2011		11,7	10,4	10,1	6,2	6,5
	02.02.2011						7,2
	03.02.2011		10,4	10,1	10,4	6,8	5,9
	28.03.2011		9,9	10,4	11,1	7,0	6,8
	Mittelwerte	10,5	11,1	11,1	10,9	6,5	6,2
	Standardabw.	-	1,0	1,0	1,7	0,9	1,1
	min	-	9,9	10,1	8,2	4,6	3,6
	max	-	12,7	13,0	13,7	7,5	7,2
	Median	10,5	10,9	10,8	10,4	6,7	6,5
	95% Konf.int.	-	0,8	0,8	1,3	0,6	0,7
Elimination zwischen PN 2 S3 und PN 4:							37,5%
*Messung des automatischen Probenehmers (sh. Kap 5.2.1.1)							

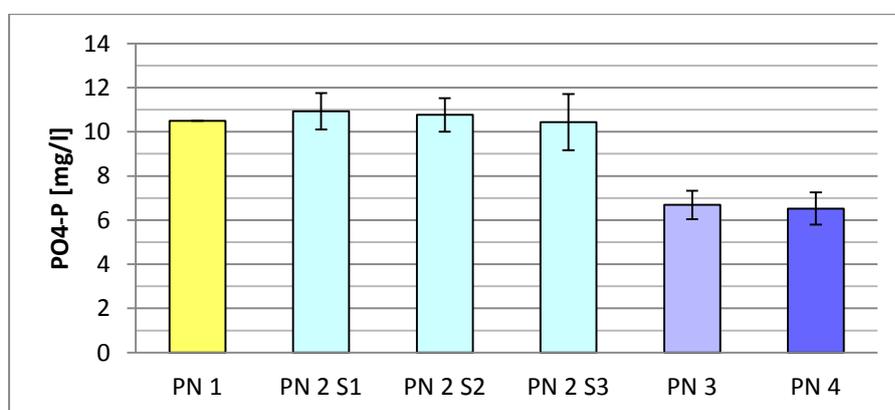


Abbildung 5-8: Gemessene PO₄-P Konzentration im Ausgangszustand ohne Fällung.

5.2.2 Messungen bei P-Fällung

5.2.2.1 Mischrinne

Am 28. März 2010 wurde erstmals die Fällung mit Natriumaluminat in Betrieb genommen. Damals wurde ausgehend von der Berechnung der Fällmittelmenge (Kap 4.3.2) und den Daten der Dosierpumpe eine Dosiermenge von 15 ml/h ($\beta=1,8$) eingestellt. Wie sich erst später im September herausstellen sollte, wiesen die von der Dosierpumpe tatsächlich abgegebenen Mengen von den erwarteten Werten beträchtliche Unterschiede auf. Da im Laufe der Messungen immer wieder Ablaufwerte eintraten, die nicht erklärbar waren, wurde daraufhin der Fällmittelkanister bei jeder Messung gewogen, um die Differenz der Masse zu vorhergehenden Messungen bestimmen zu können. Dabei stellte sich heraus, dass die tatsächlich abgegebenen Mengen ungefähr der Hälfte der Mengen entsprachen, die im Leistungsdiagramm der Pumpe berechnet wurden. Diese Information wurde auch auf alle anderen Dosiermengen angewendet und die Werte nachträglich halbiert.

Der erste Versuch entsprach somit einer Fällmittelmenge von 7,5 ml/h. Das entspricht einem β -Wert von ca. 0,9. Die Ergebnisse sind in Tabelle 5-6 aufgelistet.

Tabelle 5-6: Ergebnisse der Probenahmen bei $\beta = 0,9$ (Messwerte in mg/l $\text{PO}_4\text{-P}$)

	Datum	PN 1	PN 2 s1	PN 2 s2	PN 2 s3	PN 3	PN 4
$\beta = 0,9$	29.03.2011		6,8	10,3	11,3	7,3	7,5
	28.3. - 1.4.*	12,0					
	01.04.2011		8,2	9,1	10,1	8,2	7,2
	07.04.2011		7,8	8,8	8,8	8,2	8,3
	Mittelwerte	12,0	7,6	9,4	10,1	7,9	7,7
	Standardabw.	-	0,7	0,8	1,2	0,5	0,6
	min	-	6,8	8,8	8,8	7,3	7,2
	max	-	8,2	10,3	11,3	8,2	8,3
	Median	12,0	7,8	9,1	10,1	8,2	7,5
	95% Konf.int.	-	0,8	0,9	1,4	0,5	0,7
Elimination zwischen PN 2 S3 und PN 4:							25,8%
*Messung des automatischen Probenehmers (sh. Kap 5.2.1.1)							

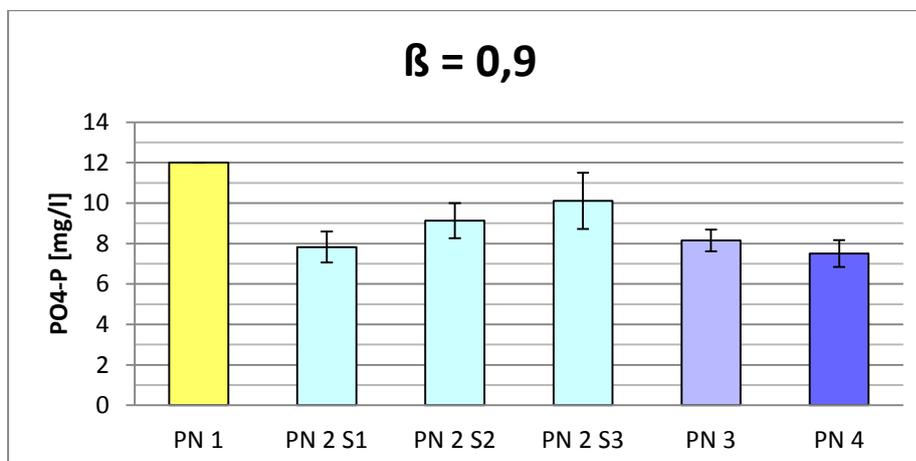


Abbildung 5-9: Gemessene $\text{PO}_4\text{-P}$ Konzentration bei $\beta = 0,9$

Die Phosphat-Werte in der Vorklärung zeigten zwar eine deutliche Reduktion, doch blieben die Werte unter den Erwartungen. Bald war klar, dass mit dieser Dosierung keine ausreichende P-Elimination erreicht werden kann. Daher wurde bereits nach 10 Tagen die Dosis erhöht. In dieser Zeitspanne hatten sich die Werte zwischen S1 und S3 bereits bei ca. 8,5 mg/l stabilisiert, in Abbildung 5-9 ist jedoch aufgrund der Mittelung aller Messwerte ein Ansteigen der Konzentration von S1 zu S3 erkennbar. Das erklärt sich durch die relativ kurze Zeitspanne zwischen Aktivieren der Fällung und Messung – die Wassermengen der Schächte hatten sich noch nicht ausreichend ausgetauscht.

Beim zweiten Versuch wurde die Fällmittelmenge verdoppelt. 15ml/h entsprechen einem β -Wert von 1,8. Die Ergebnisse sind in Tabelle 5-7 und Abbildung 5-10: Gemessene $\text{PO}_4\text{-P}$ Konzentration bei $\beta = 1,8$ ersichtlich.

Tabelle 5-7: Ergebnisse der Probenahmen bei $\beta = 1,8$ (Messwerte in mg/l $\text{PO}_4\text{-P}$)

	Datum	PN 1	PN 2 S1	PN 2 S2	PN 2 S3	PN 3	PN 4
$\beta = 1,8$	14.04.2011		8,2	9,0	9,1	8,3	7,7
	02.05.2011		5,5	5,9	6,2	6,0	6,5
	Mittelwerte	-	6,8	7,4	7,7	7,2	7,1
	Standardabw.	-	1,8	2,2	2,1	1,6	0,8
	Median	10,9*	6,8	7,4	7,7	7,2	7,1
	95% Konf.int.	-	2,6	3,0	2,9	2,2	1,1
	Elimination zwischen PN 2 S3 und PN 4:						
* Median der Messungen der Konzentration in PN 2 S1 ohne Fällung							

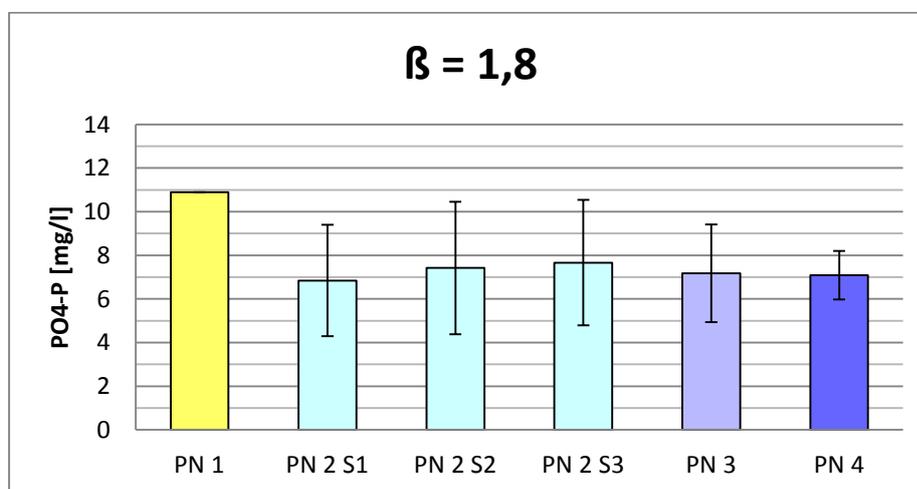


Abbildung 5-10: Gemessene $\text{PO}_4\text{-P}$ Konzentration bei $\beta = 1,8$

Die $\text{PO}_4\text{-P}$ Konzentration in der Vorklärung sank bei dieser Dosis zwar deutlich, der Wert lag nach 15 Tagen aber immer noch bei 5,5 bis 6 mg/l $\text{PO}_4\text{-P}$ und damit deutlich zu hoch um eine ausreichende Reduktion des Ablaufwertes zu erzielen. Somit wurde die Dosis neuerlich erhöht und zwar auf 30 ml/h. Das entspricht einem β -Wert von 3,5, die Ergebnisse sind in Tabelle 5-8 und Abbildung 5-11 ersichtlich

Tabelle 5-8: Ergebnisse der Probenahmen bei $\beta = 3,5$, verworfene Messwerte rot (Messwerte in mg/l PO₄-P)

	Datum	PN 1	PN 2 s1	PN 2 s2	PN 2 s3	PN 3	PN 4
$\beta = 3,5$	20.05.2011		4,2	5,1	5,5	9,0	8,3
	25.05.2011					5,4	5,7
	31.05.2011		3,6	3,0	2,1	4,9	4,2
	15.06.2011		2,5	2,1	3,2	4,9	4,1
	01.07.2011		2,3	2,4	2,6	3,3	2,4
	27.07.2011		10,6	9,1	10,4	2,9	2,6
	17.08.2011		1,8	2,0	2,0	2,0	2,3
	02.09.2011		4,2	2,1	2,1	2,0	2,0
	22.09.2011		9,5	7,2	6,5	1,6	1,6
	30.09.2011		3,6	3,9	2,8	1,3	1,4
	Mittelwerte	-	3,2	3,0	2,9	3,7	3,5
	Standardabw.	-	1,0	1,2	1,2	2,4	2,2
	min	-	1,8	2,0	2,0	1,3	1,4
	max	-	4,2	5,1	5,5	9,0	8,3
	Median	10,9*	3,6	2,4	2,6	3,1	2,5
	95% Konf.int.	-	0,7	0,9	0,9	1,5	1,3
Elimination zwischen PN 2 S3 und PN 4:							3,1%
* Median der Messungen der Konzentration in PN 2 S1 ohne Fällung							

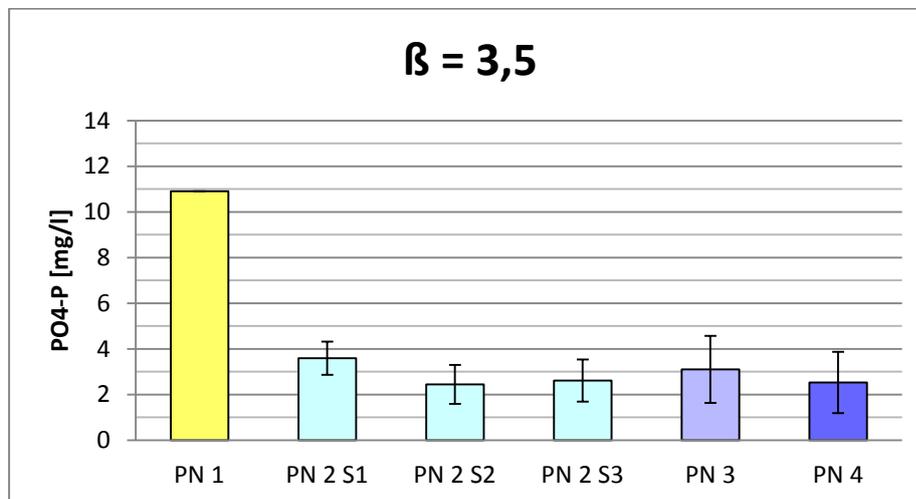


Abbildung 5-11: Gemessene PO₄-P Konzentration bei $\beta = 3,5$

Mit dieser Dosierung arbeitete die Anlage 133 Tage, in dieser Zeit wurden 10 Proben genommen. 2 Mal mussten die Messwerte verworfen werden, da Werte auftraten, die zweifelsfrei belegen, dass die Zudosierung des Fällmittels zu der Zeit ausgefallen war. Am 22.9.2011 wurde der Kanister zu spät getauscht und war bereits leer. Für die Messung am 22.7.2011 konnte die Ursache für die hohen Messwerte nicht eindeutig ausgemacht werden. Später sollte sich herausstellen, dass die Pumpe zeitweilig verstopfen kann, aber dass sich die Blockade mit etwas Glück von selbst wieder löst. Diese Messwerte wurden daher bei den Berechnungen nicht berücksichtigt.

Die Konzentration in den Vorklärschächten schwankte bei diesem Versuch um Werte zwischen 3,5 und 2,5 mg/l PO₄-P. Auffällig ist, dass - bei insgesamt 4 Messungen - die Ablaufwerte der Vorklärung niedriger waren, als die Ablaufwerte des ersten Pflanzenbeetes. Es musste also eine Anreicherung von Phosphat durch das Pflanzenbeet stattgefunden haben. Mit der Zeit sank aber auch die Konzentration des Anlagenablaufes. Am 22. September konnte erstmals der geforderte Ablaufwert von 1,6 mg/l PO₄-P eingehalten werden. Bei der darauffolgenden Messung wurde dieser Wert sogar unterschritten.

Die Fällung zeigte bei allen Dosiermengen Wirkung. Laut stöchiometrischer Berechnung sollte eine Dosiermenge von $\beta=1$ ausreichen, um die Konzentration in der Vorklärung auf 1,6 mg/l zu senken. Erst bei der höchsten versuchten Menge von 30 ml/h ($\beta=3,5$) konnte der Ablaufwert eingehalten werden. Der Ablauf des Pflanzenbeetes kann außerdem höherer Werte zeigen, als der Zulauf (Kap. 6.3.1).

5.2.2.2 Siphon

Da die Ergebnisse aus der vorgeschalteten Phosphorfällung noch nicht befriedigend waren, wurde versucht, durch einen Umbau der Mischstrecke die Eliminationsleistung der Fällung zu verbessern. Der Absturz der Rohrleitung wurde durch eine siphonartige Struktur der Abwasserrohre ersetzt (Kap. 4.3.1). Der Umbau wurde am 30. September 2011 durchgeführt. Die Dosis wurde nach dem Umbau auf 30 ml/h ($\beta = 3,5$) belassen, um direkte Veränderungen besser abschätzen zu können. Die Ergebnisse sind in Tabelle 5-9: Ergebnisse der Probenahmen bei $\beta = 3,5$ nach dem Umbau und

Abbildung 5-12 ersichtlich

Tabelle 5-9: Ergebnisse der Probenahmen bei $\beta = 3,5$ nach dem Umbau, verworfene Messwerte rot (Messwerte in mg/l PO₄-P)

$\beta = 3,5$ (S)	05.10.2011		1,4	1,8	2,6	1,5	1,6
	10.10.2011		6,0	4,7	1,6	1,6	1,8
	13.10.2011		1,8	1,8	2,0	1,4	1,5
	17.10.2011		11,4	9,8	7,2	1,3	1,4
	21.10.2011		7,8	7,8	8,5	1,7	1,5
	25.10.2011		3,5	4,0	6,8	1,5	1,5
	Mittelwerte	-	3,2	3,1	3,2	1,5	1,5
	Standardabw.	-	2,1	1,5	2,4	0,1	0,1
	min	-	1,4	1,8	1,6	1,3	1,4
	max	-	6,0	4,7	6,8	1,7	1,8
	Median	10,9*	2,7	2,9	2,3	1,5	1,5
95% Konf.int.	-	2,1	1,5	2,3	0,1	0,1	
Elimination zwischen PN 2 S3 und PN 4:							35,2%
* Median der Messungen der Konzentration in PN 2 S1 ohne Fällung							

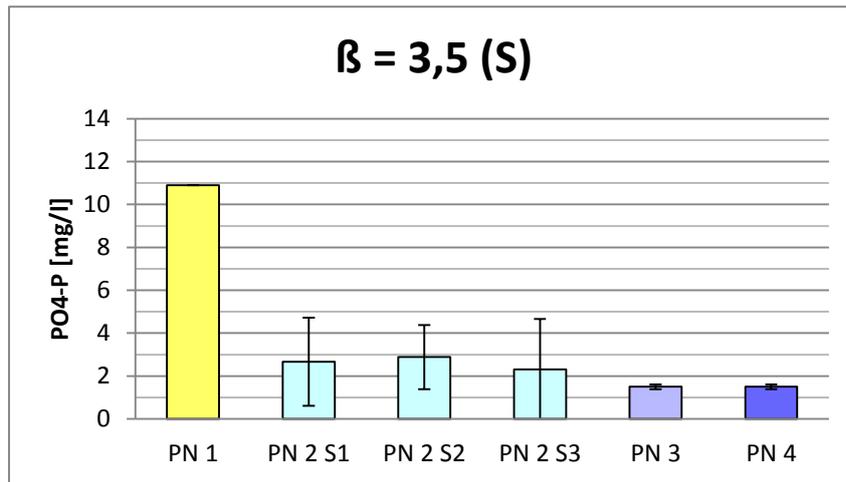


Abbildung 5-12: Gemessene PO₄-P Konzentration bei $\beta = 3,5$ nach dem Umbau

Es wurden in einem Zeitraum von 20 Tagen 6 Messungen gemacht. Auch dieses Mal traten 2 hohe Messwerte auf, die nachweislich durch einen Ausfall der Fällung verursacht wurden. Daraufhin wurde der Kanister, aus dem das Fällmittel gepumpt wird bei jeder Messung abgewogen. Es stellte sich heraus, dass

- zwischen 10. und 13.10. durchschnittlich 29,9 ml/h
- zwischen 13. und 17.10. durchschnittlich 7,7 ml/h
- zwischen 17. und 21.10. durchschnittlich 2,1 ml/h und
- zwischen 21. und 25.10. durchschnittlich 29 ml/h

zudosiert wurden. Deshalb wurde die Pumpe am 21. Oktober zerlegt und gereinigt bevor sie wieder eingesetzt wurde. Die Messwerte der Vorklärung für den 17. und den 21.10.2011 wurden verworfen und fließen nicht in die Mittelwert- und Medianberechnungen ein. Der geforderte Ablaufwert konnte bis auf einmal eingehalten werden, wobei die Abweichung noch im Bereich der Mess(un)genauigkeit der Methode liegt.

Nach diesem Versuch wurde noch eine letzte Serie mit einer Dosierung von 15 ml/h Stunde gemessen. Die Ergebnisse sind in Tabelle 5-8 und Abbildung 5-11 ersichtlich.

Tabelle 5-10: Ergebnisse der Probenahmen bei $\beta = 1,8$ nach dem Umbau (Messwerte in mg/l PO₄-P)

$\beta = 1,8$ (S)	04.11.2001		6,4	5,4	5,2	1,6	1,5
	08.11.2011		6,8	5,9	5,9	1,6	1,6
	11.11.2011		4,7	5,5	6,5	1,8	1,7
	Mittelwerte	-	6,0	5,6	5,9	1,7	1,6
	Standardabw.	-	1,1	0,2	0,7	0,1	0,1
	Median	10,9*	6,4	5,5	5,9	1,6	1,6
	95% Konf.int.	-	1,3	0,3	0,7	0,2	0,1
Elimination zwischen PN 2 S3 und PN 4:							72,2%
* Median der Messungen der Konzentration in PN 2 S1 ohne Fällung							

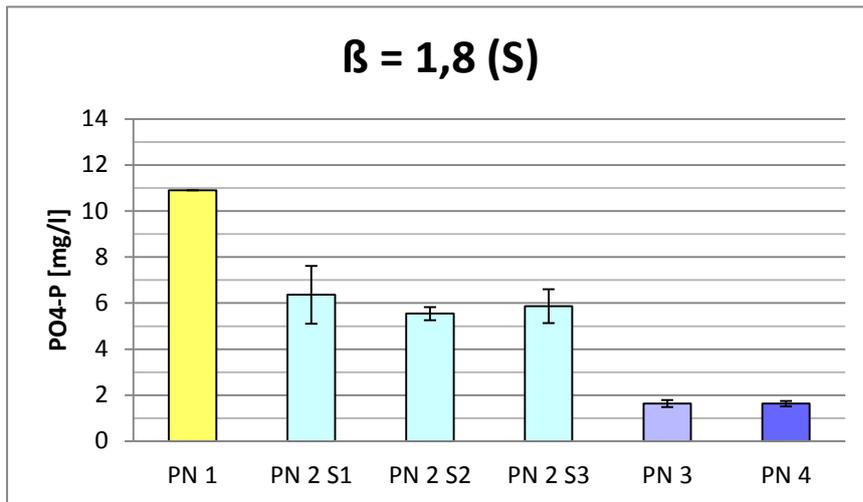


Abbildung 5-13: Gemessene PO₄-P Konzentration bei $\beta = 1,8$ nach dem Umbau

Die Werte der Vorklärung waren wieder deutlich höher und schwankten um 6 mg/l. Die Gewichtskontrolle des Kanisters ergab, dass für die 3 Messzeitpunkte folgende Dosiermengen seit der vorhergehenden Wiegung erreicht wurden (soll: 15 ml/h):

- 18,4 ml/h
- 12,8 ml/h
- 14,8 ml/h

Die Ablaufwerte blieben niedrig und immer noch knapp an der Vorgabe von 1,6 mg/l. Hier war die Elimination der Pflanzenbeete mit 72,2 % sehr hoch – der höchste Durchschnittswert der im Zuge dieser Arbeit gemessen werden konnte. Die Ursache dafür könnte eine erhöhte Adsorptionskapazität, ausgelöst durch die vorangegangenen Versuche sein (Kap. 6.3.1).

5.3 Rückbelastung aus dem Vererdungsbeet

Am 19.10.2010 konnte die Entleerung der Vorklärung beobachtet werden. Alle 3 Schächte (PN2 S1-S3) wurden ausgepumpt und mit einem Gülleanhänger zum Vererdungsbeet transportiert und dort aufgebracht. Der Ablauf des Vererdungsbeetes mündet bei PN3 in den Heberschacht.

Um die Auswirkungen des Vererdungsbeetablaufes zu untersuchen, wurden Proben aus dem Heberschacht (PN 3) und dem Ablauf der Kläranlage (PN 4) genommen. Zuerst jeweils eine Probe zu Beginn der Beschickung des Vererdungsbeetes mit dem Schlamm der Vorklärung um 10.00 Uhr. Dann jeweils eine Probe um 10.15 Uhr und danach noch 3 Mal nach jeweils einer Stunde. Die Ergebnisse sind in Abbildung 5-14 zu sehen.

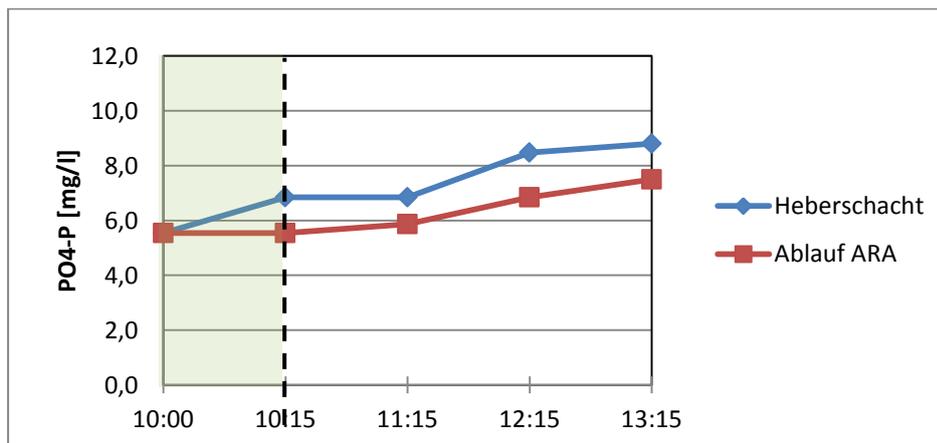


Abbildung 5-14: Anstieg der PO₄-P Werte durch die Beschickung des Vererdungsbeetes am 19.10.2010

Etwas überraschend sprang der Abfluss des Vererdungsbeetes rasch an. Wenige Minuten nach dem Aufbringen der ersten Tankwagenladung war der Wasserspiegel im Heberschacht bereits dermaßen angestiegen das der Heber in Betrieb ging. In den darauffolgenden 20 Minuten wurden 9 Heberbewegungen registriert. Daraufhin wurde beschlossen, spontan eine Druck- und Temperatursonde in den Schacht einzubauen. Ab 11:14 lieferte die Sonde Daten.

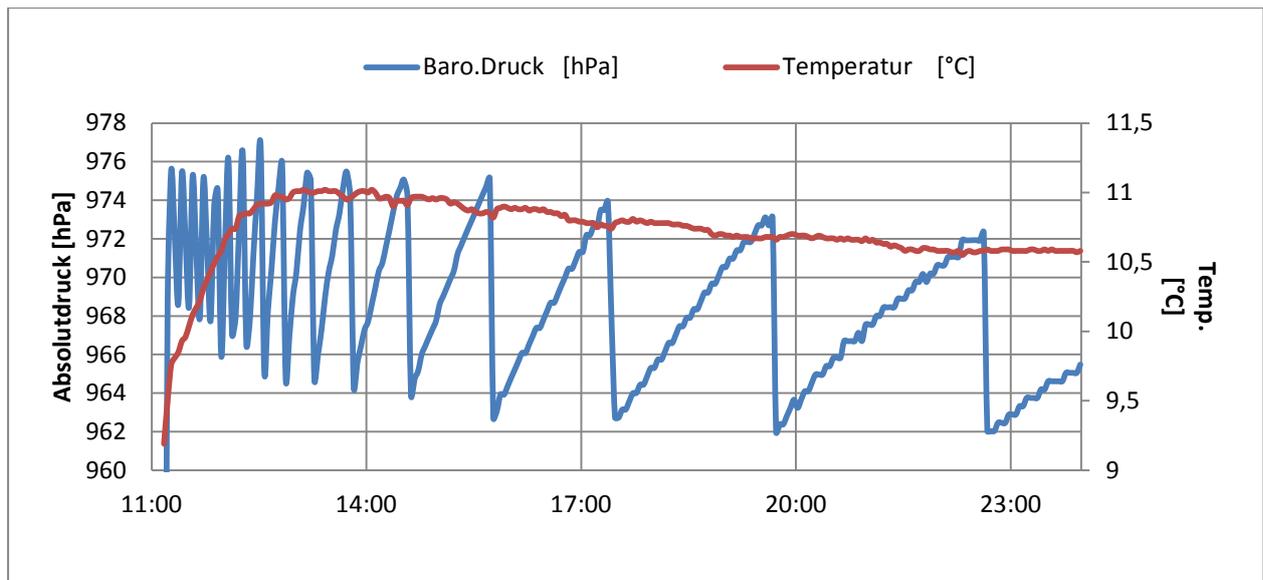


Abbildung 5-15: Druck und Temperatur bei PN 3 (19.10.2010)

Deutlich zu erkennen ist, dass der Einfluss des Vererdungsbeetablaufes für mindestens 12 Stunden einen Einfluss auf die Anlage gehabt hat. Da der Wert der $\text{PO}_4\text{-P}$ Konzentration in der Vorklärung zu diesem Zeitpunkt noch nicht durch die Fällung beeinflusst war, kann ein Wert von ca. 11 mg/l angenommen werden. Es ist daher wahrscheinlich, dass dieser Wert später auch im Heberschacht auftrat. Das zweite Pflanzenbeet scheint weder ein ausgeprägtes Retentionsvermögen für den Volumenstrom noch für die P-Konzentration zu haben. Somit muss damit gerechnet werden, dass eine signifikante Menge Abwasser mit Konzentrationen, die denen in der Vorklärung entsprechen, in den Vorfluter gelangen. Es ist nicht auszuschließen, dass auch bei aktiver Fällung, bei der Räumung der Vorklärung Ablaufwerte überschritten werden.

6. Interpretation und Diskussion der Ergebnisse

6.1 Zulauf

Die Methode der Durchflussmessung über die Wasserspiegeländerung ist für sich ein relativ exaktes Verfahren. Die Abwandlung der Methode über die Zählung der Heberbewegungen kann diese Genauigkeit nicht erreichen, da wahrscheinlich bei jeder Beschickung die Wassermenge variiert. Für die Zuflussmenge wurde ein durchschnittlicher Wert von 3,7 m³ pro Tag angenommen. Einerseits muss man sagen, dass dieser Wert nur auf wenigen brauchbaren Messungen beruht und damit natürlich weder den realen Durchschnittswert im Jahresverlauf entsprechen muss, noch als Durchschnittswert an vielen Tagen auch wirklich erreicht wird. Diese Wassermenge entspricht 61 Liter pro Tag und Einwohner und ist im Vergleich mit Richtwerten aus der Literatur wenig (100-150 l/d.EW (ÖNORM B2505, 2009) und (KOPPE & STOZEK, 1998)). Deshalb wurde auch der höchste Wert der Durchflussmessungen als repräsentativer Wert angenommen.

Die PO₄-P Konzentration im Zulauf wurde mit 11 mg/l angenommen. Dieser Wert beruht einerseits auf Messungen direkt aus dem Zulauf und außerdem lag die P-Konzentration im ersten Absetzschacht ohne Zugabe von Fällmittel bei diesem Wert. Der Absetzschacht am Anfang der Anlage fungiert dabei als Retentionsbecken und vereinheitlicht die ankommenden Konzentrationen. Somit scheint dieser Wert als durchaus realistisch. Bei einer angenommenen durchschnittlichen Wassermenge von 3,7 m³/d entsprechen 11 mg/l 40,7 g/d PO₄-P.

Geht man davon aus, dass die Wassermenge und die Zulaufkonzentration korrekt sind entspricht das bei

60 Einwohnern	61 l/EW.d	0,68 g/EW.d PO ₄ -P
---------------	-----------	--------------------------------

Wenn man aber die Möglichkeit in Betracht zieht, dass die Anlage zu groß dimensioniert ist, dann entspricht das bei

40 Einwohnern	93 l/EW.d	1,02 g/EW.d PO ₄ -P
25 Einwohnern	148 l/EW.d	1,63 g/EW.d PO ₄ -P

Da die ATV-DVWK-A 202 (ATV-DVWK-A 202, 2004) 1,8 g/EW.d PO₄-P als Richtwert für die Phosphoremission angibt, lässt dies auf Folgendes schließen: Entweder ist die Zuflussmenge höher als gemessen, oder es tragen weniger als 60 Einwohner/Einwohnerwerte zum Zufluss zur ARA bei.

Erhöht man die Zuflussmenge auf 5 m³ pro Tag, entspräche dies bei

60 Einwohnern	83 l/EW.d	0,92 g/EW.d PO ₄ -P
40 Einwohnern	125 l/EW.d	1,38 g/EW.d PO ₄ -P
25 Einwohnern	200 l/EW.d	2,20 g/EW.d PO ₄ -P

Erst bei einem Zufluss von **9 m³/d** entsprechen 60 EW einem Wasserverbrauch von 150 l/EW,d und 1,8 mg P/EW.d einer Zulaufkonzentration von 12 mg/l PO₄-P. Es wird somit angenommen, dass

- weniger als 60 EW zum Zufluss beitragen,
- der tatsächliche Wasserverbrauch geringer ist als Literaturwerte vorgeben
- die abgegebene Menge Phosphor pro Einwohner geringer ist als Literaturwerte vorgeben

6.2 Einflussgrößen der Messwerte

6.2.1 Schwankungen der ankommenden Fracht

Um die Wirksamkeit der Fällung beurteilen zu können, muss die ankommende P-Fracht bekannt sein. Die Größe der Anlage führte allerdings dazu, dass die Zulauffracht große Schwankungen in Konzentration und Menge zeigt. Einerseits ist dies auf einen **Tagesgang**, ausgelöst durch menschliche Aktivitäten zurückzuführen. Dies zeigt sich deutlich in der ankommenden Wassermenge (Kap. 5.1). Ebenso zeigt die P-Konzentration im Abwasser ein großes Spektrum (Kap. 5.2.1 Messungen ohne P-Fällung). Die Schwankungen des Tagesganges sollten sich aber im ersten Absetzschacht durch das große Volumen des Schachtes ausgleichen ($V_{\text{Schacht}} = 6 \text{ m}^3$, $Q_d = 3,7 \text{ m}^3$) und keinen weiteren Einfluss auf die Anlage haben.

Weiters wird vermutet, dass Schwankungen von Wassermenge und Schadstoffkonzentration durch **unterschiedliche Personenzahlen** zu Wochentagen/Wochenende oder Feiertagen in der Gemeinde ausgelöst werden. Dies kann einen erhöhten Wasserverbrauch und somit ein höheres Abwasseraufkommen für mehrere Tage bedeuten. Die Auswirkungen sind auf der gesamten Anlage bemerkbar.

Dazu können noch **zufällige Schwankungen** auftreten. In Summe ist das an der Anlage ankommende Abwasser nicht vorhersagbar oder steuerbar. Aussagen über Tagesmittelwerte sind mit hohem Messaufwand verbunden und nur mit Probenahmen in kurzem Intervall mit zeitgleicher Zuflussmessung möglich. Im weiteren Verlauf der Vorklärung sollten die Schwankungen der ankommenden Mengen und Konzentrationen soweit ausgeglichen sein, dass **Stichproben als Tageswerte angenähert** verwendet werden können.

Im weiteren Verlauf der Anlage können darüber hinaus weitere Schwankungen auftreten.

6.2.2 Verdünnung durch Niederschlag / Konzentration durch Verdunstung

Auffallend bei der Auswertung der Ergebnisse waren die niedrigen Ablaufwerte der Anlage im Herbst/Winter 2010 und die im Vergleich dazu hohen Werte im Frühjahr 2011, als die Fällung in Betrieb ging. Hier soll die fehlende Verdunstung der Pflanzen außerhalb der Vegetationsperiode als Erklärung dienen. Anhand folgender Rechnung soll dies belegt werden.

Tabelle 6-1: Niederschlag im Waldviertel (BMLFUW, 2010a):

Weikertschlag	780 m.ü.A.	741 mm/yr
Phyrabruck	550 m.ü.A.	681 mm/yr
Gmünd	485 m.ü.A.	578 mm/yr

Als Näherung werden 650 mm/a Niederschlag für den Standort der Anlage angenommen (Tabelle 6-1). Das entspricht einer Menge von 650 Liter/m².yr. Umgerechnet auf die Größe der Beete

$$377 \text{ m}^2 \times 650 \text{ l/m}^2.\text{yr.} = 245.050 \text{ l/yr}$$

ergibt das 245 m³ pro Jahr. Der jährliche Zufluss zur Kläranlage beträgt ca. 1350 m³. Somit erhöht der Niederschlag die Wassermenge um **18 %**. Im selben Ausmaß wird die Konzentration verdünnt und somit erniedrigt.

Wenn auch in der Realität der Bewuchs teilweise nicht flächendeckend ist, sollten alle 3 Beete mit Schilf (*Phragmites australis*) bewachsen sein. Phragmites besitzt ein Transpirationsvermögen von bis zu 1500 l/m².a (KOLB & FRANK, 2003).

Tabelle 6-2: Bilanz von Niederschlag (NA), Zufluss (Q) und der Verdunstung von Schilf

Einheiten	NA	Q	Transpiration
[l/m ² .yr]	650	3582	1500
[m ³ /yr]	245	1350	565
[m ³ /yr]	1596		565

Im Verlauf eines Jahres verdunstet der Bewuchs potentiell bis zu **42 % der Zuflussmenge und 35 % der Gesamtwassermenge** inkl. Niederschlag (Tabelle 6-2). Pflanzenverdunstung geschieht aber hauptsächlich in der Vegetationsperiode. In der Vegetationsruhe im Winter ist dieser Einfluss vernachlässigbar und so können geringere Schadstoffkonzentrationen durch höhere Gesamtwassermengen erklärt werden. Des Weiteren können kurzfristige Ereignisse wie Niederschlagsereignisse oder Schönwetterperioden im Jahresverlauf einen Einfluss auf die Konzentrationen nehmen. Die große Pufferkapazität von Pflanzenkläranlagen (EPC0 - siehe Kap. 6.3.1) dämpft diesen Einfluss aber weitgehend. Ansonsten würden wohl weitaus höhere Schwankungen des Ablaufwertes auftreten. Belegt werden kann diese Annahme durch eine konkrete Messung. Am 10.Oktober 2011 wurden Proben genommen. Die Schächte der Vorklärung waren kurz davor geräumt worden und waren teilweise noch nicht gefüllt. Da die Schächte ein Volumen von 1-2 Tagesmengen des Zuflusses besitzen, kann angenommen werden, dass seit einigen Tagen kein Abwasser auf die Beete gelangt war. Da das Wetter in dieser Zeit regnerisch war und es auch zum Zeitpunkt der Probenahme regnete, trat bei PN4 Abfluss aus der Anlage. Obwohl der Abfluss ausschließlich aus Niederschlagswasser bestand betrug der PO₄-P Wert an diesem Tag 1,76 mg/l PO₄-P und damit sogar ein wenig mehr als bei der vorhergehenden und der darauffolgenden Messung.

Generell muss festgehalten werden, dass **Niederschlag und Transpiration** einen **wesentlichen Einfluss** auf Schadstoffkonzentrationen bei Pflanzenkläranlagen haben.

6.3 P-Elimination

6.3.1 Elimination und Rücklösung aus dem Pflanzenbeet

Mit den Ergebnissen konnte gezeigt werden, dass die P-Konzentration im Ablauf einer Pflanzenkläranlage von vielen Faktoren beeinflusst wird. Vor allem die Sandfilterkörper der Pflanzenbeete wirken als Puffer und sorgen für konstante Konzentrationen auf kurzen Zeitskalen. Schwankungen im Zufluss zu den Beeten werden ebenso ausgeglichen wie Niederschlag oder Trockenheit. Durch die Adsorptionskapazität der Bodenpartikel im Sandfilter bewirken die Pflanzenbeete die P-Elimination bei Pflanzenkläranlagen ohne zusätzliche Maßnahmen zur P-Entfernung. Mit Adsorptionsisothermen (Abbildung 6-1) kann veranschaulicht werden: Das Sorbent, in dem Fall Sand, kann durch ein Sorbat, in dem Fall Phosphor, beladen werden (q). Das Sorbat wird aus der Lösung entfernt und an dem Sorbent adsorbiert. Die Beladung des Sorbent steigt. Wie viel adsorbiert wird, hängt von der Beladung des Sorbents und von der Konzentration des Sorbats in der Lösung ab. Ist die Beladung hoch und die Konzentration niedrig, wird das Sorbat wieder an die Lösung abgegeben. Die rote Linie (EPC0) in Abbildung 6-1 bildet den Gleichgewichtszustand zwischen Aufnahme/Adsorption und Abgabe/Desorption in Abhängigkeit von Beladung und Konzentration ab. Konkret heißt das: Gibt man Wasser mit einer Phosphorkonzentration (c) zu, die der EPC0, der „equilibrium phosphorus concentration“ entspricht, wird P weder adsorbiert noch abgegeben (1). Erst bei höheren Konzentrationen wird adsorbiert (2), bei niedriger Konzentration wird abgegeben. Die Adsorptionskapazität nimmt mit steigender Beladung des Sorbents ab, die Pflanzenkläranlage verliert mit der Zeit ihre Eliminationskapazität (3). Zum Zeitpunkt der Messungen ohne Fällung betrug die Adsorptionskapazität der gesamten Anlage 37,5 %.

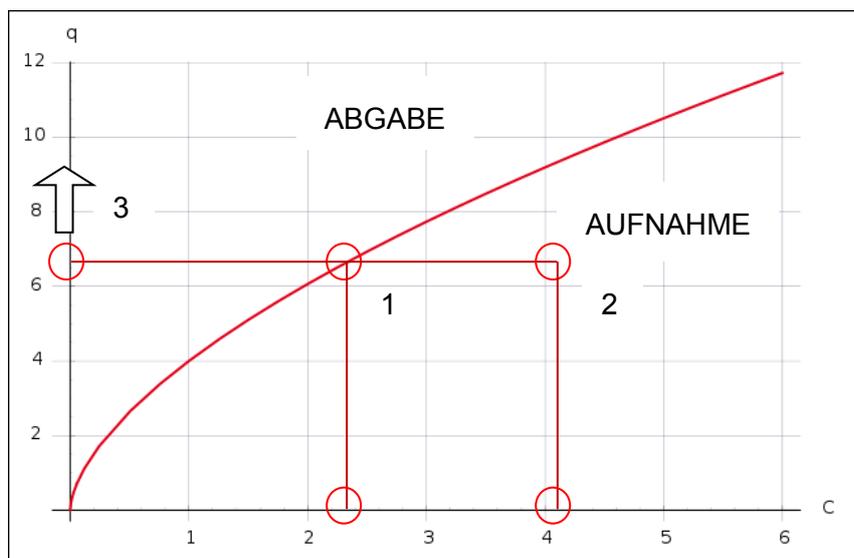


Abbildung 6-1: Adsorptionsisotherme nach Freundlich

Bedeutend ist, dass die Adsorptionskapazität mit der Zeit zwar abnimmt, durch anhaltend niedrige Zulaufkonzentration aber wieder regeneriert wird. Der Sandfilter wird dadurch „gespült“, die Beladung nimmt ab und die Adsorptionskapazität wird wieder erhöht. Zu erwarten ist dennoch ein Hysterisis bei der Regeneration, da bei der Inbetriebnahme der Anlage nicht nur Adsorption sondern auch Fällung durch Al-, Fe- und Ca-Oxide als Bestandteile des Filtermaterials erwartet wird (RUSTIGE et al. 2003, zit. bei (KADLEC & WALLACE, 2009)). Das heißt, dass eine Adsorptionskapazität wie zum Zeitpunkt der Inbetriebnahme nicht mehr vollständig erreicht werden kann.

Zu dem Zeitpunkt als die Messungen gemacht wurden, war die Anlage bereits mehrere Jahre in Betrieb. Die Beladung der Pflanzenbeete war bereits gestiegen. Als durch die Fällung die Konzentration im Zufluss zu den Pflanzenbeeten reduziert wurde, blieb die Ablaufkonzentration hoch. Es dauerte beinahe 3 Monate, bis sich die Werte angeglichen hatten. Danach konnte bei höheren Zulaufwerten wieder eine Reduktion durch die Pflanzenbeete beobachtet werden. Abbildung 6-2 zeigt den Zulauf zum Pflanzenbeet (PN 2 S3), den Ablauf des ersten Beetes (PN 3) und des zweiten Beetes (PN 4). Man erkennt deutlich, dass der Zulauf zeitweilig niedrigere $\text{PO}_4\text{-P}$ Werte zeigt als die Abläufe.

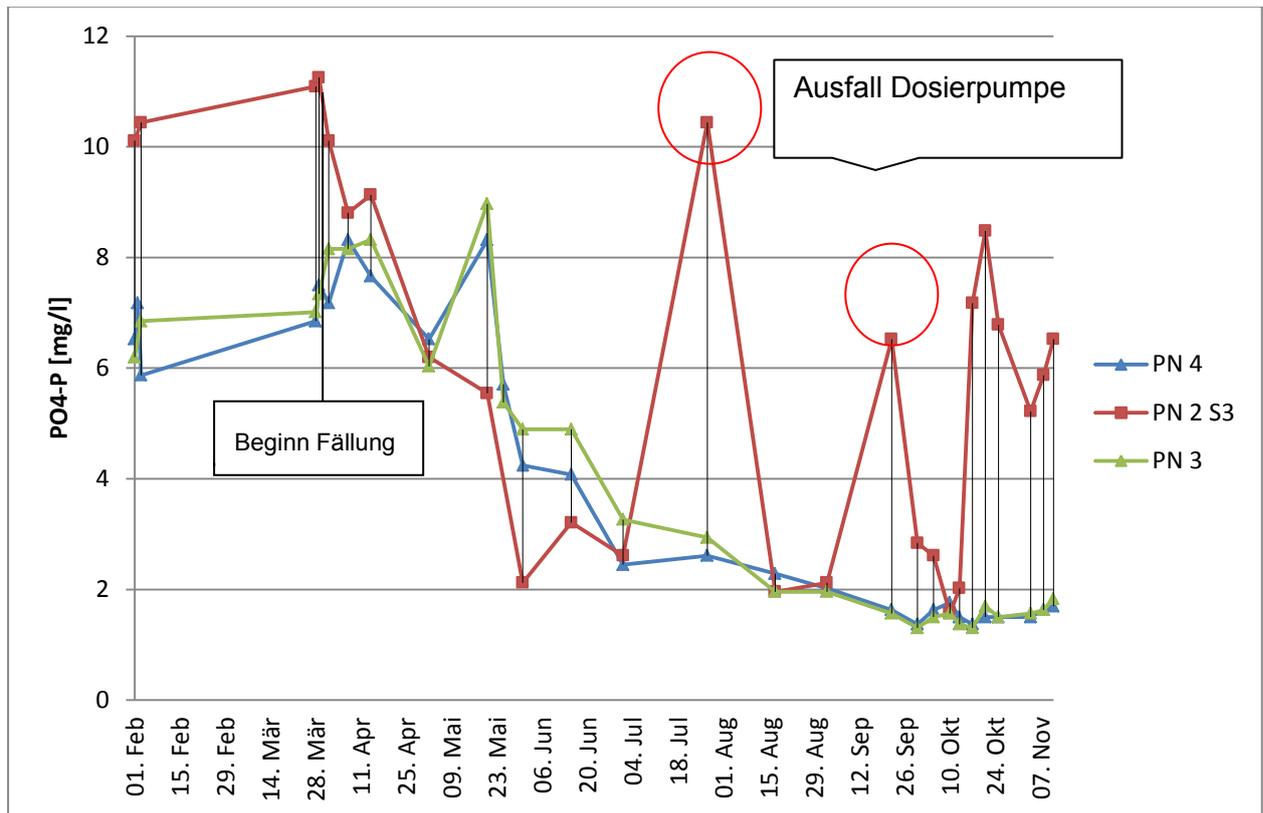


Abbildung 6-2: Messwerte von PN 2 S3, PN 3 und PN 4 im Jahr 2011

Ähnliche Ergebnisse beschreiben ESSER et al. (ESSER et al., 2004) bei den Versuchen an der Pflanzenkläranlage von Montromant, Frankreich. Hier wurde versucht mit einer vorgeschalteten P-Fällung durch Eisen (III) Phosphor aus dem Abwasser zu entfernen. Diese Anlage mit einer Größe von 200 Einwohnerwerten war ebenfalls mehrere Jahre ohne zusätzliche Maßnahmen zur P-Entfernung in Betrieb. Die dadurch akkumulierte P-Beladung zeigte sich durch negative Eliminationsraten der Pflanzenbeete bei Inbetriebnahme der Fällung.

Soll in Zukunft ein niedriger Ablaufwert dauerhaft eingehalten werden, kann nicht mehr mit einer dauerhaften Reduktion der P-Konzentration durch Adsorption gerechnet werden. Dazu müsste die Zulaufkonzentration zu den Pflanzenbeeten über einen ausreichend langen Zeitraum so niedrig gehalten werden, dass die EPC0 unter den Ablaufwert sinkt.

6.3.2 Wirksamkeit der Fällung, Fällmittelverbrauch

Die Wirksamkeit einer chemisch-physikalischen Fällung hängt einerseits davon ab, ob optimale Bedingungen während des Einmischens und der **Flockenbildung** und –sedimentation

vorliegen und andererseits ob **konkurrierende Reaktionen** des Fällmittels mit anderen Stoffen ablaufen.

Es scheint, als ob die hohen Schwankungen von Abwasserzufluss und P-Konzentration bei der Anlage äußerst schlechte Bedingungen für eine gezielte P-Fällung ergeben. Unvermeidbar wird ständig entweder unter- oder überdosiert. Eine stark konzentrierte Zugabe des Fällmittels fördert die Bildung von Hydroxydionen und die Verbindung des Fällmittels mit anderen Stoffen.

Durch den Einbau des Siphons als Mischstrecke wurden besser Ergebnisse erhofft. Das Reservoir sollte einerseits Schwankungen dämpfen und die Turbulenz der Belüftung sollte die Vermischung von Fällmittel und Abwasser fördern. Das Volumen des mit Wasser gefüllten Teils im Siphon wurde vom Bestand vorgegeben. Die gestreckte Länge beträgt in etwa 1 m, bei einem Rohrdurchmesser von 160 mm entspricht das knapp 20 Liter. In Kap. 5.1 wurden der durchschnittliche Zufluss mit $3,7 \text{ m}^3/\text{d}$ berechnet, das entspricht $0,043 \text{ l/s}$ und würde **7,8 min. Aufenthaltszeit** im Siphon bedeuten. Man kann davon ausgehen, dass der Zufluss in der Nacht geringer, am Tag jedoch höher liegt. Laut Regelwerk (ATV-DVWK-A 202, 2004) sollte „Die Dauer in der Mischzone ... ca. 1 Minute, bei einer Leistungsdichte von $100\text{W}/\text{m}^3$ bis $150\text{W}/\text{m}^3$, betragen“. Lediglich beim Auftreten von Spitzen ($0,28 \text{ l/s}$) beträgt die Aufenthaltszeit ca. 1 min. Es muss also davon ausgegangen werden, dass die meiste Zeit die Aufenthaltsdauer in der Mischzone zu lang ist und die gebildeten Mikrofloccen wieder zerstört werden können. Dennoch zeigen 5 von 6 gemittelten Messwerten nach dem Umbau niedrigere Phosphat Konzentrationen (Abbildung 6-3). Die unterschiedlichen Ergebnisse in den Absetzschächten deuten darauf hin, dass die Anzahl der Messungen zu gering war, um statistisch signifikante Aussagen treffen zu können.

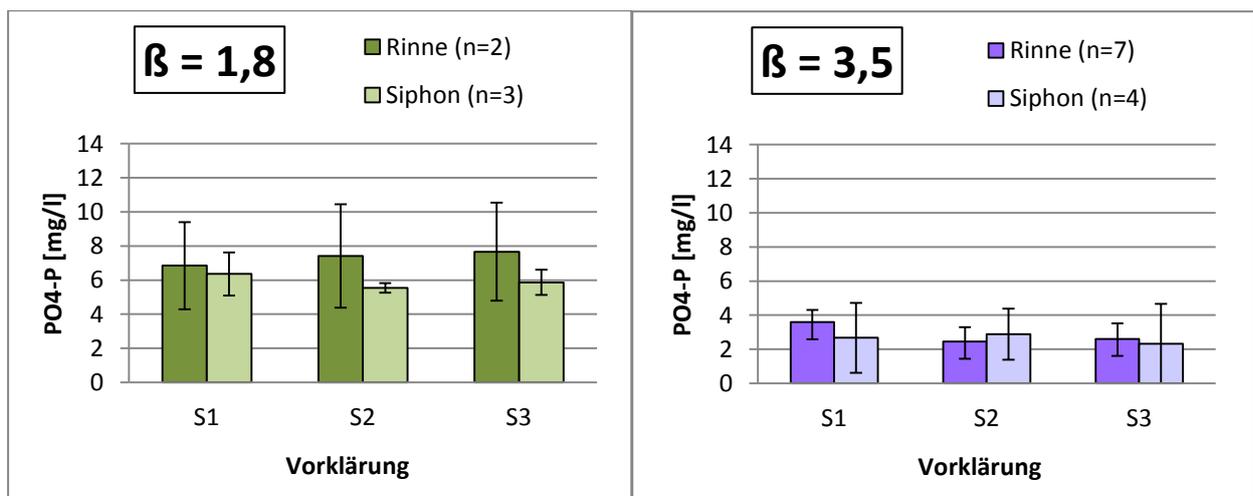


Abbildung 6-3: PO₄-P Werte der Vorklärschächte bei unterschiedlicher Einmischung und Dosierung (n = Anzahl der Messwerte)

Außerdem erhöht sich bei der vorgeschalteten Fällung der Fällmittelverbrauch im Vergleich zu klarem Wasser durch Trübung und durch den Gehalt an gelösten organischen Stoffen aufgrund parallel stattfindender Flockung und konkurrierender Komplexbildungsreaktionen (ATV-DVWK-A 202, 2004). Die stöchiometrisch berechnete Menge Fällmittel, die für die Fällung des Phosphors benötigt werden würde, wird also für andere Reaktionen verbraucht. Dadurch steigt der Fällmittelbedarf. Rücklösungen aus dem Fällprodukt in der Vorklärung konnten nicht signifikant nachgewiesen werden.

Ein Problem, das bei den Untersuchungen auftrat, war die unzureichende **Verlässlichkeit der Dosierpumpe**. Das Fällmittel neigt dazu bei Kontakt mit der Luft CO₂ unter Bildung von

unlöslichen Carbonaten zu binden und die Pumpe und die Schläuche zu verstopfen. Eine regelmäßige Kontrolle und Reinigung der Pumpeinrichtungen ist notwendig. Doch selbst ab dem Zeitpunkt, als die Unregelmäßigkeit der Pumpleistung als Problem erkannt wurde und der Zustand der Pumpe bei jeder Probenahme kontrolliert wurde, traten Abweichungen von den erwarteten Dosiermengen auf (Kap. 5.2.2.2). Eine mögliche Ursache könnte sein, dass die Viskosität des Fällmittels je nach Temperatur variiert.

Somit sollte bei einem Pumpsystem das von der Viskosität des Mediums beeinflusst wird, auf möglichst konstante Temperaturen bei der Standortwahl geachtet werden. Eine Einhausung ist unerlässlich, doch selbst dann sollte die Einstellung der Pumpe der Jahreszeit angepasst werden. Abhilfe schafft eine Pumpe, die unabhängig von der Viskosität des Mediums eine konstante Leistung liefert.

6.3.3 Rücklösung aus dem Fällprodukt im Vererdungsbeet

In Kapitel 5.3 wird die Beobachtung einer Entleerung der Vorklärung beschrieben. Da bei dieser Methode nicht nur Schlamm, sondern der gesamte Wasserinhalt eines Schachtes entleert wird, ergeben sich große Volumina. Im Vererdungsbeet sickert das Wasser schnell durch den Sandfilter und in den Heberschacht. Das Retentionsvermögen des zweiten Hebers ist zu klein, um eine ausreichende Verzögerung zu bewirken und somit strömt das Wasser weiter durch das zweite Pflanzenbeet und in weiterer Folge in den Vorfluter. Dadurch gelangt eine relativ große Wassermenge ungeklärt in die Vorflut. Die P-Konzentration entspricht der in der Vorklärung. Obwohl nur Orthophosphat gemessen wurde, wird angenommen, dass das gleiche für andere Schmutzstoffe gilt.

Nach diesem Ereignis verbleibt der partikuläre Anteil des Schlammes und somit das Fällprodukt im Vererdungsbeet. Ein Problem ergibt sich, wenn der Schlamm etwa durch Niederschlag immer wieder mit Wasser versetzt wird. Die Stabilität des Fällproduktes hängt von seinem Löslichkeitsprodukt ab, das pH-Wert abhängig ist. Es bestimmt, bis zu welcher Konzentration ein Stoff gelöst werden kann. Geht man von einem pH-Wert von 6,5 aus, bedeutet das im Fall von AlPO_4 eine Phosphatkonzentration von ungefähr $10^{-5,5}$ mol/l oder 0,003 mg/l (

Abbildung 3-11). Bei einem pH von 8 steigt dieser Wert auf 0,1 mg/l. Das heißt, dass mit jeder Zugabe von Wasser, ein Anteil des Fällproduktes kontinuierlich wieder in Lösung geht. Es muss davon ausgegangen werden, dass bei einer Anordnung des Vererdungsbeetes, wie es bei dieser Anlage der Fall ist, und bei steigendem Gehalt des Fällproduktes im Schlamm des Vererdungsbeetes, eine kontinuierliche Rückverfrachtung von Phosphor in die Anlage passiert. Um dies auszuschließen, müsste das Vererdungsbeet am Beginn der Anlage und somit vor der Fällmittelzugabe angeschlossen sein, oder das Fällprodukt wird einer anderen Verwertung/Entsorgung zugeführt.

6.4 Bewertung der vorgeschalteten Fällung

6.4.1 Vor- und Nachteile der vorgeschalteten Fällung

Die Zugabe des Fällmittels ist nicht per se an den Anfang der Pflanzenkläranlage gebunden. Einige Vorteile der vorgeschalteten Fällung stehen den Nachteilen gegenüber.

Ein wesentlicher Vorteil der vorgeschalteten Fällung ist, dass bestehende Anlagen mit mechanischer Vorklärung relativ einfach nachgerüstet werden können. Die Sedimentation des Fällproduktes geschieht dann in den Schächten der Vorklärung. Es wird lediglich ein Standort für die Pumpe und eine Möglichkeit der turbulenten Einmischung in den Zulauf benötigt. Ein Reservoir, wie es durch den Siphon bei dem der Versuchsanlage geschaffen wurde, sollte sich zwar positiv auf die Eliminationsleistung auswirken, ist aber nicht zwingend notwendig (Kap. 5.2.2.1). Die Gefahr des Clogging sollte bei ausreichender Sedimentation nicht erhöht werden, da auch der BSB und organische Stoffe vermehrt entfernt werden und somit der Abfluss der Vorklärung insgesamt klarer und „sauberer“ wird. Auswirkungen sind durch eine erhöhte Schlammproduktion in den Absetzschächten zu erwarten. Der wesentliche Nachteil der vorgeschalteten Fällung ist der hohe Fällmittelverbrauch. Eine Möglichkeit diesen zu verbessern, wäre eine Vereinheitlichung der P-Konzentration durch die Platzierung der Fällmittelzugabe nach zumindest einem Absetzschacht. Durch Drosselklappen mit Überlauf könnte auch die Zulaufmengenschwankungen gedämpft werden. Diese Möglichkeiten sind aber bei bestehenden Anlagen oft nicht gegeben und konkurrierende Reaktionen können somit auch kaum unterbunden werden. Bei einer P-Fällung vor den Pflanzenbeeten werden die Beete nur in geringen Konzentrationen mit Phosphor beschickt. Bei Neuanlagen sollte sich das durch ein hohes und langanhaltendes Adsorptionsvermögen von Phosphor positiv auswirken. Durch die geringe Beladung der Beete wird eine P-Entfernung auch bei temporärem Ausfall der Fällung auf lange Zeit sichergestellt. Es muss lediglich darauf geachtet werden, dass genügend Phosphor für die Biozönosen verbleibt.

Bei einer nachgeschalteten P-Fällung müssten eigene Absetzanlagen für die Flocken bereitgestellt werden. Vorteile wie die Elimination der Pflanzenbeete fallen auf lange Sicht weg. Es ist aber mit einem deutlich geringeren Fällmittelverbrauch zu rechnen. Ein weiterer Vorteil einer P-Fällung am Ende der Pflanzenkläranlage ist, dass nahezu ausschließlich das reine Fällprodukt aus Fällmittel und Phosphat sedimentiert. Eine stoffliche Verwertung des Fällproduktes und damit eine Kreislaufführung des Phosphors könnten dadurch möglich werden.

Tabelle 6-3: Vor- und Nachteile von vorgeschalteter und nachgeschalteter Fällung

<u>vorgeschaltete Fällung</u>	<u>nachgeschaltete Fällung</u>
(+) einfach nachzurüsten	(+) geringerer Fällmittelverbrauch
(+) Abfluss der Vorklärung wird insgesamt klarer und „sauberer“	(+) Kein Fällprodukt im Schlamm der Vorklärung
(+) hohes und langanhaltendes Adsorptionsvermögen in den Pflanzenbeeten	(+) Stoffliche Verwertung von P möglich
(+/-) erhöhte Schlammproduktion in den Absetzschächten	(-) Errichtung eigener Absetzanlagen notwendig
(-) hoher Fällmittelverbrauch.	(-) Keine dauerhafte Pufferung durch die Pflanzenbeete

6.4.2 Kosten

Die laufenden Kosten der Methode ergeben sich aus dem Fällmittelverbrauch und dem für Dosierpumpe und Belüftung des Siphons benötigten Stroms.

Für die Kostenrechnung des Fällmittels werden 2 Dosiermengen untersucht:

1. Eine Dosiermengen von 30 ml/h - entspricht $\beta = 3,5$: diese Menge entsprach der höchsten Dosiermenge die im Verlauf der Arbeit eingesetzte wurde. Damit konnte nachweislich der Ablaufwert eingehalten werden.
2. Eine Dosiermenge von 15 ml/h – entspricht $\beta = 1,8$: Diese Menge könnte im besten Fall ausreichen, um den Ablaufwert einzuhalten

Für diese Dosiermengen gelten Verbrauchsmengen laut Tabelle 6-4. Die Kosten für das Fällmittel hängen von der Gebindegröße ab (Tabelle 6-5). Die daraus resultierenden Kosten sind in Tabelle 6-6 ersichtlich.

Tabelle 6-4: Verbrauchsmengen nach Dosiermengen

β	3,5	1,8
ml/h	30	15
kg/yr	389	194

Tabelle 6-5: Kosten „Combiphos L“ nach Gebindegröße (HASLINGER, 2012)

Gebindegröße	Kosten pro kg
30 kg (Kanister)	2,35 €
250 kg (Fass)	1,55 €
1300 kg (IBC)	0,65 €

Tabelle 6-6: Jährliche Kosten Fällmittel für die ARA Oberwindhag

	30 kg (Kanister)	250 kg (Fass)
$\beta = 3,5$ (389 kg/yr)	914 €	603 €
$\beta = 1,8$ (194 kg/yr)	456 €	301 €

Es macht für kleine Anlage keinen Sinn, Fällmittel in zu großen Gebindegrößen anzuschaffen. Das Fällmittel neigt dazu, bei Sauerstoffkontakt auszukristallisieren. Dadurch würde im Lauf der Zeit eine große Menge Fällmittel unbrauchbar werden. Für die Kostenberechnung der Anlage in Oberwindhag werden daher nur angebotene Gebinde in sinnvollen Größen verwendet (Tabelle 6-6). Bei großen Anlagen kann mit dem IBC (Intermediate Bulk Container) viel Geld eingespart werden, für die Kosten-pro-Kopf Berechnung wird diese Gebindegröße daher berücksichtigt.

Um die generalisierten Kosten pro Person der Phosphorvorfällung zu bestimmen, muss man von folgenden 2 Fällen ausgehen (Tabelle 6-7):

1. Es sind tatsächlich **60 EW**, die die Anlage in Oberwindhag reinigen muss
2. Waren die Messungen der Konzentration und der Zulaufmenge korrekt, entspricht die P-Fracht lediglich ca. **25 EW** – für die Berechnung pro-Kopf wird nur durch 25 geteilt.

Tabelle 6-7: Fallmittelverbrauch/EW

β	3,5	1,8
ml/h	30	15
kg/yr.EW(60)	6,48	3,24
kg/yr. EW(25)	15,56	7,78

Tabelle 6-8: Kosten pro Einwohner und Jahr

EW		30 kg (Kanister)	250 kg (Fass)	1300 kg (IBC)
60	$\beta = 3,5$	15,23 €	10,05 €	4,21 €
60	$\beta = 1,8$	7,61 €	5,02 €	2,11 €
25	$\beta = 3,5$	36,57 €	24,12 €	10,11 €
25	$\beta = 1,8$	18,28 €	12,06 €	5,06 €

Pro Einwohner und Jahr muss somit je nach der P-Fracht des Einzugsgebietes der Anlage Oberwindhag und generell je nach der Wirksamkeit der Fällung, und der Gebindegröße zwischen 2,11 € und 36,57 € für das Fällmittel gerechnet werden (Tabelle 6-8).

Folgende elektrische Geräte sind bei dieser Methode permanent in Betrieb:

- Die Dosierpumpe (Kap. 4.3.3) und ein
- Kompressor für die Belüftung des Siphons (Kap. 4.3.1).

Der durchschnittliche Energieverbrauch der Dosierpumpe liegt bei 17 W, der des Kompressors bei 47 W (Abbildung 6-4).



Abbildung 6-4: Typenschild Kompressor (links) und Dosierpumpe (rechts)

Aktuell kann ein Strompreis von ca. 20 Cent/kWh kalkuliert werden (E-CONTROL, 2011). Damit ergeben sich Gesamtkosten von 112,13 € pro Jahr für die elektrischen Geräte (Tabelle 6-9).

Tabelle 6-9: Energieverbrauch und Kosten

	Dosierpumpe	Kompressor
W	17	47
kWh/yr.	148,92	411,72
€/yr.	29,78	82,34
Gesamtkosten	112,13	

Teilt man die Stromkosten auf die Einwohnerwerte auf, dann erhält man wiederum in Abhängigkeit der tatsächlichen Zulaufkraft in Oberwindhag 4,49 €/EW (25 EW) bzw. 1,87 €/EW (60 EW).

Summiert man die Kosten aus Fällmittel und Stromverbrauch ergeben sich Gesamtkosten der Fällung ohne Arbeitszeiten zwischen 3,98 €/EW und 41,06 €/EW.

Basisbetriebskosten einer Pflanzenkläranlage

Laufende Kosten entstehen bei Anlagen durch den Betrieb und die Wartung (*operation and maintenance, O&M*). Diese Kosten sind bei Pflanzenkläranlagen generell niedriger als bei konventionellen Anlagen. Pflanzenkläranlagen bedürfen im Prinzip keinem ständig anwesendem Personal, Betriebsmittel oder elektrischer Energie. Laufende Kosten entstehen hauptsächlich durch Wartung, Labor- und Personalkosten aus:

- Wartung, Schlammentsorgung, Instandhaltung (Pflanzenschnitt u.a.)
- Kontrolle: Fremd- und Eigenüberwachung

Durch die Personalkosten hängen die Kosten stark vom Lohnniveau des jeweiligen Landes ab. Abbildung 6-5 zeigt Ergebnisse von verschiedenen Pflanzenkläranlagen aus Spanien, von den Kanarischen Inseln und aus Portugal. Die laufenden Kosten liegen **zwischen 10 und 70 € pro EW und Jahr** (NOGUEIRA, R. et al., 2007). Mit zunehmender Größe einer Anlage sinken die laufenden Kosten pro Kopf.

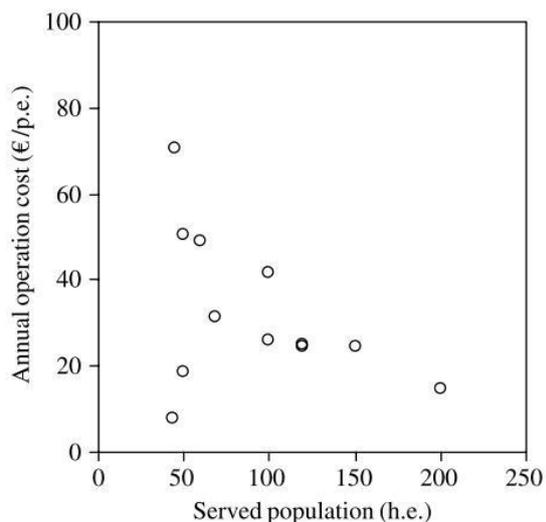


Abbildung 6-5: jährliche laufende Kosten pro EW nach Anlagengröße (NOGUEIRA, R. et al., 2007)

Tabelle 6-10 zeigt die Ergebnisse einer Studie der Niederösterreichischen Landesregierung (AMT DER NÖ LANDESREGIERUNG, 2005). Ab einer Ausbaugröße von 50 EW steigen die Kosten stark an, da zusätzliche Untersuchungen aus den Emissionsverordnungen notwendig werden. Für eine Anlagengröße von 60 EW werden die jährlichen Kosten mit 3.255 € angegeben. Das entspricht 54,25 € pro EW.

Tabelle 6-10: Pflanzenkläranlagen Basisbetriebskosten (AMT DER NÖ LANDESREGIERUNG, 2005)

Ausbaugröße	Wartungsaufwand	Wartungskosten pro Woche	Wartungskosten pro Jahr	Eigenanalysen	Schlamm-entsorgung	Fremduntersuchung	Eigenanalyse CSB+BSS5	Versicherung	Sonstiges (Wasserbezug,...)
EW	h/Woche	EUR/Woche	EUR/a	EUR/a	EUR/a	EUR/a	EUR/a	EUR/a	EUR/a
4	0,15	4,-	195,-	30,-	14,-	120,-			
7	0,25	6,-	325,-	30,-	25,-	120,-			
10	0,33	8,-	429,-	30,-	35,-	120,-			
15	0,45	11,-	585,-	30,-	58,-	120,-			
20	0,55	14,-	715,-	30,-	70,-	120,-			
25	0,63	16,-	813,-	30,-	88,-	120,-			
30	0,70	18,-	910,-	40,-	105,-	120,-			
35	0,75	19,-	975,-	50,-	123,-	120,-			
40	0,80	20,-	1.040,-	60,-	140,-	120,-			
45	0,85	21,-	1.092,-	70,-	158,-	120,-			
50	0,90	22,-	1.144,-	80,-	175,-	120,-			
51	1,20	30,-	1.563,-	100,-	179,-	600,-	300,-	50,-	50,-
60	1,44	36,-	1.875,-	150,-	210,-	600,-	300,-	60,-	60,-
70	1,68	42,-	2.188,-	150,-	245,-	600,-	300,-	70,-	70,-

In derselben Studie werden Angaben über zusätzliche Kosten gemacht, die aufgrund notwendiger weitergehender Reinigung wie ein zusätzlicher Bodenfilter oder eine P-Fällung entstehen können (Tabelle 6-11). Für 60 EW werden 156 € jährlich angeführt, das entspricht 2,60 € pro EW. Im Hinblick auf die Untersuchungen in Oberwindhag erscheinen diese Angaben optimistisch.

Tabelle 6-11: Zusätzliche Betriebskosten durch P-Fällung bei Pflanzenkläranlagen (AMT DER NÖ LANDESREGIERUNG, 2005)

Ausbaugröße	Zus. Betriebskosten P-Fällung
EW	EUR/Jahr
10	26,-
50	130,-
60	156,-
70	182,-

7. Zusammenfassung

In dieser Arbeit wurde der Einsatz einer konventionellen chemisch-physikalischen Phosphorfällung mit Natriumaluminat bei einer Pflanzenkläranlage untersucht. Durch eine vorgeschaltete Fällung sollte versucht werden, den geforderten Ablaufwert von 1,6 mg/l PO₄-P bei einer bestehenden Anlage zu erreichen. Die ARA Oberwindhag im Waldviertel, eine 2-stufige, intermittierend beschickte, vertikal durchflossene Pflanzenkläranlage mit einer Ausbaugröße von 60 EW (Einwohnerwerten) wurde dafür mit einer vorgeschalteten Fällung ausgerüstet.

Insgesamt wurde die Anlage über ein Jahr beobachtet. In diesem Zeitraum wurde bei insgesamt 192 Proben der PO₄-P-Wert bestimmt. Auffällig waren hohe Schwankungen in Zulaufmenge und P-Konzentration und die für die dimensionierten 60 EW geringe Zulaufmenge. Die Ergebnisse der Phosphatwerte in den Schächten der Vorklärung zeigt Abbildung 7-1.

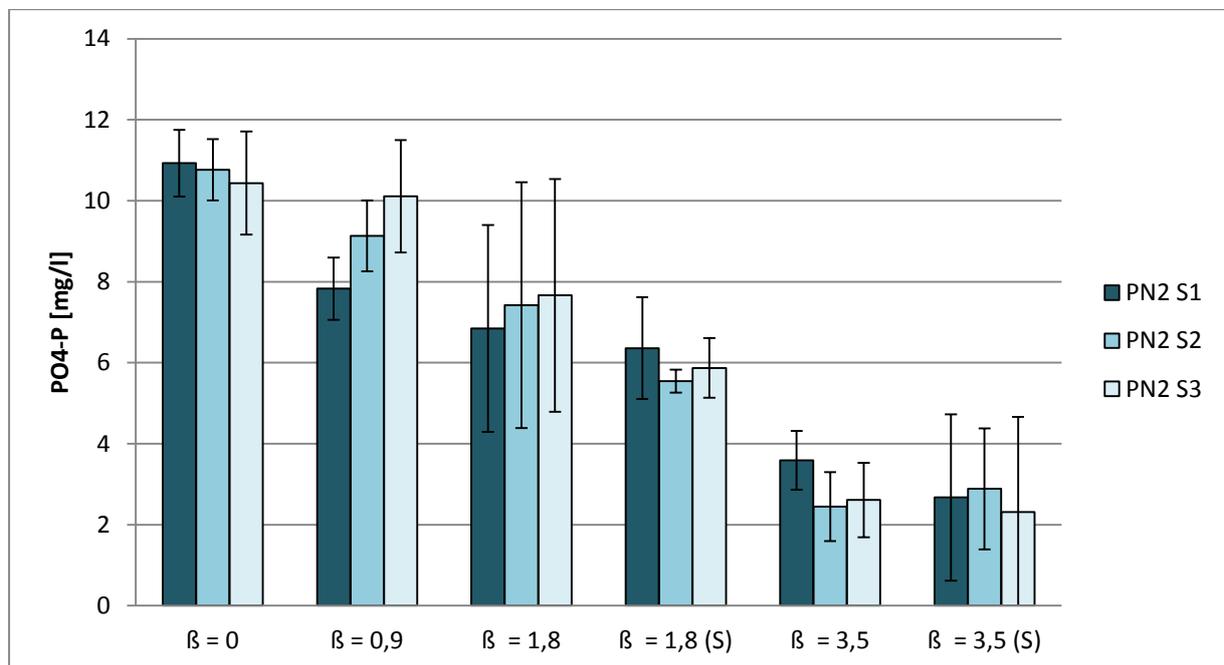


Abbildung 7-1: Gemittelte PO₄-P-Konzentrationen in den 3 Vorklärschächte bei verschiedenen Dosiermengen

Um die Wirksamkeit der Fällung zu erhöhen wurde die Mischstrecke, an der das Fällmittel zugegeben wird, durch einen Siphon ersetzt. Teilweise wurden dadurch bessere Ergebnisse erzielt, aufgrund der geringen Zahl an Messwerten konnten keine statistisch signifikanten Unterschiede festgestellt werden.

Der Anschluss des Vererdungsbeetes zwischen 1. und 2. Pflanzenbeet erscheint nicht ideal. Das zweite Pflanzenbeet hat eine sehr kurze Retentionszeit und dadurch nur eine geringe Reinigungskapazität. Die Adsorptionskapazität für PO₄ scheint bereits erschöpft zu sein. Bei der Räumung der Vorklärschächte, wenn der Schlamm auf das Vererdungsbeet aufgebracht wird fließen große Mengen Abwasser beinahe ungeklärt in den Vorfluter. Das Fällprodukt, das sich in dem Schlamm befindet gibt jedesmal, wenn es mit Wasser versetzt wird, einen Teil des gebundenen Phosphors wieder ab. Aus diesen Gründen ist ein Anschluss des Vererdungsbeetes am Anfang der Anlage vorzuziehen.

Mit dem Einsatz der vorgeschalteten P-Fällung konnte der vorgegebene Ablaufwert von 1,6 mg/l PO₄-P zu manchen Zeitpunkten eingehalten werden. Die dafür eingesetzte Menge an Fällmittel

war aber im Vergleich zur stöchiometrisch benötigten Menge hoch, wofür hauptsächlich konkurrierende Reaktionen und Konzentrationsschwankungen bei der Dosierstelle verantwortlich gemacht werden können. Probleme bereitete außerdem die Methode der Fällmittelzugabe durch das Verstopfen der Armaturen und temperaturbedingte Schwankungen der Viskosität des Fällmittels.

Aufgrund der durch die Fällung verursachten Kosten erhöhen sich die jährlichen Ausgaben für den Betrieb der Pflanzenkläranlage um 4 bis 40 € pro EW für Fällmittel und elektrische Energie. Laut einem Berechnungsprogramm der Niederösterreichischen Landesregierung sollten diese Kosten geringer ausfallen.

Aufgrund der aufgetretenen Probleme bei den Versuchen können viele Aussagen nur unter Vorbehalt und Vereinfachungen sowie Annahmen gemacht werden. Es wurde dennoch versucht, die Ergebnisse auf Sinnhaftigkeit zu überprüfen, um grobe Irrtümer zu vermeiden.

Der Versuch eine konventionelle Phosphorentfernung mit einer Pflanzenkläranlage zu kombinieren kann als erfolgreich betrachtet werden. Das Ziel, einen geforderten Ablaufgrenzwert von 1,6 mg/l $\text{PO}_4\text{-P}$ einzuhalten, wurde bei entsprechender Dosierung zeitweilig erreicht.

8. Ausblick

In dieser Arbeit war es leider nicht möglich, Ergebnisse mit ausreichender Sicherheit zu erhalten, die den Einsatz der vorgeschalteten Phosphorfällung bei Pflanzenkläranlagen im großen Rahmen bereits rechtfertigen. Dennoch sind die Ergebnisse vielversprechend. Sollte es gelingen, den Fällmittelverbrauch durch eine bessere Einmischung/Dosierstrecke zu senken, spricht kaum mehr etwas gegen die Verbreitung dieser Methode. Je nach Voraussetzungen der Anlagen könnten viele bestehende Pflanzenkläranlagen mit einer P-Fällung nachgerüstet werden. Dadurch könnte ein wichtiger Beitrag zum Gewässerschutz geleistet werden und der Technologie der Pflanzenkläranlagen eine weitere Verbreitung ermöglicht werden.

Weitere Forschungstätigkeiten müssen die Frage nach dem optimalen Standort der Fällung im System der Pflanzenkläranlage beantworten. Bei bestehenden Anlagen, die mit einer P-Fällung nachgerüstet werden sollen, ist diese Frage nicht relevant. Hier muss auf die Gegebenheiten eingegangen werden und meistens verbleibt hier kein Spielraum für alternative Möglichkeiten. Bei Planung und Errichtung von neuen Anlagen könnten durch bauliche Maßnahmen mit Rücksicht auf die Fällung wahrscheinlich weitere Optimierungen gemacht werden.

Das Fällmittel Natriumaluminat hatte bisher keine augenscheinlich negativen Einflüsse auf die Biozönosen der Pflanzenkläranlage. Da Natriumaluminat ein Abfallprodukt aus der technischen Industrie ist, besteht die Möglichkeit der Verunreinigungen mit Schwermetallen, worüber keine genauen Informationen vorlagen. Der Chemismus des Produktes sollte vor breiten Anwendungen noch genauer untersucht werden.

Ebenso ist die Schlammbehandlung weiter zu hinterfragen. Bei der Anwendung eines Vererdungsbeetes muss auf den Anschluss des Ablaufes geachtet werden. Wird die Fällung an den Anfang der Anlage gesetzt, wird das Fällprodukt mit den Sedimenten der Vorklärung vermischt. Dort wo es erlaubt ist, wird dieser Klärschlamm landwirtschaftlich verwertet und auf die Felder aufgebracht. Im besten Fall kann der Phosphor eine Düngewirkung erzeugen, bei Verunreinigungen mit Schwermetallen und Toxinen aber auch einen schädigenden Effekt auf die Umwelt und die landwirtschaftliche Produktion haben. Die Eignung zur landwirtschaftlichen Verwertung und der P-Gehalt des Schlammes könnten Gegenstand weiterer Untersuchungen sein.

Außerdem sollte die Frage geklärt werden, wie sehr sich das reine Fällprodukt, im Hinblick auf eine nachgeschaltete Fällung, für eine Extraktion des Phosphors eignet. So könnte im besten Fall eine Möglichkeit geschaffen werden, den Rohstoff Phosphor nicht zu entsorgen, sondern als Produkt zu verwerten und so im Kreislauf der Ökosysteme zu belassen.

9. Literaturverzeichnis

- 1.AEVkA (1996): 210.Verordnung: *Begrenzung von Abwasseremissionen aus Abwasserreinigungsanlagen für Siedlungsgebiete (1. AEV für kommunales Abwasser)*. Verlagspostamt 1030. Wien
- AAEV (1996): 186. Verordnung: *Allgemeine Begrenzung von Abwasseremissionen in Fließgewässer und öffentliche Kanalisationen BGBl. 186/1996*. Verlagspostamt 1030. Wien
- ADAM, K., KROGSTAD, T., JENSSEN, P.D. (2004): *P-Sorption of Filtralite PTM - Comparative study on small scale box experiment and full scale constructed wetland system*. Proceedings of the 9th International Conference on Wetland Systems for Water Pollution Control (Avignon, France).
- AMT DER NOE LANDESREGIERUNG (2005): *Abwasserentsorgungskonzepte m ländlichen Raum in Niederösterreich - Teil 2 Kostenermittlung und Kostenansätze*. Amt der NÖ Landesregierung, St. Pölten
- ATV (1997): *ATV Lehr- und Handbuch der Abwassertechnik - Biologisch-chemische und weitergehende Abwasserreinigung, Band IV*. Verlag Ernst & Sohn. Berlin
- ATV-DVWK-A 198 (2003): *Vereinheitlichung und Herleitung von Bemessungswerten für Abwasseranlagen*. Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e.V. ISBN:978-3-924063-48-1. Hennef
- ATV-DVWK-A 202 (2004): *Chemisch-physikalische Verfahren zur Elimination von Phosphor aus Abwasser*. Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e.V. ISBN 3-997758-04-6 . Hennef
- BEZIRKSHAUPTMANNSCHAFT GMÜND (2005): *Wasserrechtliche Bewilligung Wassergenossenschaft Oberwindhag - Bescheid GDW2-WA-0572/001*. Gmünd
- BMLFUW. (2002): *Gewässerschutzbericht 2002*. BMLFUW Abteilung VII. Wien
- BMLFUW. (2010a): *Hydrographisches Jahrbuch 2008*. BMLFUW - Abteilung VII 3. Wien
- BMLFUW. (2010b): *Kommunale Abwasserrichtlinie der EU – 91/271/EWG Österreichischer Bericht 2010 Gemäß Artikel 16 der Richtlinie 91/271/EWG über die Behandlung von kommunalem Abwasser für den Zeitraum 2007 - 2008*. Wien.
- BÖHLER, M, SIEGRIST,H. (2008): *Möglichkeiten zur Optimierung der chemischen Phosphorfällung an hessischen Kläranlagen*. Gutachten – EAWAG, Dübendorf
- BRISSON, J., CHAZARENC, F., BISAILLON, L.-A. (2006): *Maximizing pollutant removal in subsurface constructed wetlands: Should we pay more attention to macrophyte species selection?* Proceedings of the 10th Conference on Wetland Systems for Water Pollution Control Meeting (Lisbon, Portugal).
- BRIX, H., ARIAS, C.A., DEL BUBBA, M. (2001): *Media selection for sustainable phosphorus removal in subsurface flow constructed wetlands*. Water Science and Technology Vol 44 No 11-12, pp 47-54.
- E-CONTROL. (2011): *Vergleich der Haushaltspreise in der EU*. URL: <http://www.e-control.at/de/konsumenten/strom/strompreis/internationale-vergleiche>: [abgerufen am 26.01.2012].
- ESSER, D., RICARD, B., FERNANDES, N., MERLIN, G. (2004): *Physical-chemical phosphorus removal in vertical flow reed bed treatment plants*. Proceedings of the 9th International Conference on Wetland Systems for Water Pollution Control (Avignon, France).
- HABERL, R. (2010): *Überblick über das überarbeitete ÖWAV - Regelblatt 25 - Abwasserentsorgung in dünn besiedelten Gebieten*, Wiener Mitteilungen 222, Teil A. Wien

- HARTINGER, L. (1976). *Taschenbuch der Abwasserbehandlung*. Carl Hanser Verlag München Wien
- HASLINGER (2012): VTA Austria GmbH *mündliche Mitteilung vom 23.01.2012*.
- HILTON, J., O'HARE, M., BOWES, M. J., JONES, J. I. (2006): *How green is my river? A new paradigm of eutrophication in rivers*. Science of the Total Environment 365 (2006) 66–83.
- HÖNER, G., GELLER, G. (2003): *Anwenderhandbuch Pflanzenkläranlagen. 1. Auflage*. Springer Verlag. Berlin
- ISHERWOOD, K. (2000): *Mineral Fertilizer Use and the Environment*. International Fertilizer Industry Association. Paris
- KADLEC, R.H., WALLACE, S.D. (2009): *Treatment Wetlands - Second edition*. Taylor & Francis Group, LLC. Boca Raton
- KOLB, W., FRANK, R. (2003): *Natur als Vorbild - Abwasserreinigung im ländlichen Raum mit Hilfe von horizontal durchströmten Bodenfiltern, modifizierten Sandfiltergräben sowie integrierter Klärschlammvererdung*. Bayerische Landesanstalt für Weinbau und Gartenbau Abteilung Landespflege. Veitshöchheim
- KÖLLE, W. (2010): *Wasseranalysen - richtig beurteilt, 3. Auflage*. WILEY-VCH Verlag GmbH & C KGaA, Weinheim.
- KONHEISNER, G. (2010): *Gewässerrelevante Aspekte des ÖWAV-Regelblattes 25*, Wiener Mitteilungen Band 222, Teil B. Wien.
- KOPPE, P., STOZEK, A. (1998): *Kommunales Abwasser, 4. Auflage*. Vulkan Verlag. Essen
- LANGE, J. (2009): *Phosphorus - as important as air, as scarce as oil?* Report. GTZ Ecosan Programm, Freiburg.
- LEIBNITZ INSTITUT FÜR OSTSEEFORSCHUNG WARNEMÜNDE (2011): *Faktenblatt zur Sauerstoffsituation am Boden der Ostsee*. URL: <http://www.io-warnemuende.de/sauerstoff.html> [Abruf: 14.03.2011].
- MERCK KGaA (2004): *Phosphat-Test 1.16978.0001- Produktbeilage*. Darmstadt.
- MORTIMER, C. E. (2003): *Chemie. Das Basiswissen der Chemie, 8. Auflage*. Georg Thieme Verlag. Stuttgart
- NOGUEIRA, R., FERREIRA, I., JANKNECHT, P., RODRIGUEZ, J.J., OLIVEIRA, P., BRITO, A. G. (2007): *Energy-saving wastewater treatment systems: formulation of cost functions*. Water Science & Technologie Vol 56 No3 pp 85-92.
- ÖKOREAL und BOKU-SIG. (2009): *Bepflanzte Bodenfilter, Endbericht zur Projektstufe 3*. BMLFUW. Wien
- ÖNORM B2505. (2009): *Kläranlagen – Bepflanzte Bodenfilter (Pflanzenkläranlagen) - Anwendung, Bemessung, Bau, Betrieb, Wartung und Überprüfung*. Österreichisches Normungsinstitut, Wien.
- OTTERPOHL, R., OLDENBURG, M. (2000): *Neue Konzepte in der Siedlungswasserwirtschaft – Trennung, Verwertung und Behandlung der Stoffströme im ländlichen Raum*, Wiener Mitteilungen Band 163, Teil I. Wien.
- QZV Chemie OG (2006): 96. Verordnung: *Qualitätszielverordnung Chemie Oberflächengewässer*. Wien
- QZV Ökologie OG (2010): 99. Verordnung: *Qualitätszielverordnung Ökologie Oberflächengewässer*. Wien
- RALICKS INDUSTRIE- UND UMWELTTRECHNIK (2011): *Dichtungs-Werkstoff-Übersicht und Eigenschaften*. URL: <http://www.ralicks.de/deutsch/werkstoff.htm> : [Abruf:14.11.2011].

- RUHRVERBAND (2011): *Die Entwicklung der Abwasserreinigung*. URL: www.ruhrverband.de/abwasser/klaeranlagen/historischer-rueckblick/ [Abruf: 16.3.2011].
- SMITH, V.H., TILMAN, G.D., NEKOLA, J.C. (1999): *Eutrophication: impacts of excess nutrient inputs on freshwater, marine, and terrestrial ecosystems*. *Environmental Pollution* 100 (1999) 179-196
- STARKL, M., BINNER, E., FUERHACKER, M., HOLUBAR, P., KOECK, S., LENZ, K., MASCHER, F., ORNETZEDER, M., POLLAK, M., HABERL, R. (2005): *Nachhaltige Strategien der Abwasserentsorgung im ländlichen Raum – SUS-SAN, Forschungsprojekt Endbericht*. BMLFUW. Wien
- STATISTIK AUSTRIA (2009): *Volkszählung vom 15. Mai 2001 Einwohner nach Ortschaften*. URL: <http://www.statistik.at/blickgem/gemDetail.do?gemnr=30942> [Abruf: 23.3.2012].
- STEINBACHER, G., STEINBACHER, J. (2010): *Erhöhte Anforderungen an die Phosphorelimination bei Kleinkläranlagen - Probleme und Lösungsansätze*, Wiener Mitteilungen Band 222, Teil G. Wien
- VOHLA, C., MANDER, UE. (2004): *Enhanced phosphorus removal using ash sediment from oil-shale combustion*. Proceedings of the 9th International Conference on Wetland Systems for Water Pollution Control (Avignon, France).
- VOHLA, C., KOIV, M., BAVOR, H. J., CHAZARENC, F., MANDER, UE. (2009): *Filter materials for phosphorus removal from wastewater in treatment wetlands - a review*. *Ecological Engineering* 37 (2011) 70–89.
- VTA Austria GmbH. (2007a). *Produktinformation Combiphos L*.
- VTA Austria GmbH. (2007b). *EG - Sicherheitsdatenblatt 1907/2006/EG(DE-AT-CH)*.
- VYMAZAL, J., BRIX, H., COOPER, P.F., GREEN, M. B., HABERL, R (1998): *Constructed wetlands for wastewater treatment in europe*. Backhuys Publishers, Leiden, The Netherlands.
- WASCHMITTELGESETZ. (1984): *300. Bundesgesetz vom 28. Juni 1984 über die Umweltverträglichkeit von Waschmitteln*. Verlagspostamt 1030. Wien
- WEHRLI, B. (2002). *D-UWIS: Biogeochemische Prozesse in aquatischen Systemen*. ETH Zürich.
- WISSING, F. (1995). *Wasserreinigung mit Pflanzen*. Ulmer Eugen Verlag. Stuttgart
- WITHERS, P.J.A., JARVIE, H.P. (2008): *Delivery and cycling of phosphorus in rivers: A review*. *Science of the total environment* 400 (2008) 379 – 395.
- WORLD RESOURCES INSTITUTE. (2012). *Eutrophication and Hypoxia - Nutrient pollution in Coastal Waters*. URL: <http://www.wri.org/map/world-hypoxic-and-eutrophic-coastal-areas> [Abruf: 25.1.2012].
- WRG 1959. (i.d.g.F.). *BMLFUW - Wasserrechtsgesetz 1959, zuletzt geändert mit BGBl. I Nr. 123/2006*. BMLFUW Abteilung I/4. Wien.

10. Anhang

10.1 Messprotokolle

Anbei sind die Protokolle von 32 Messungen angegeben. Die Protokolle sind einheitlich aufgebaut und beinhalten

- Zeit und Datum der Probenahme
- Zeit, Datum und Ort der Auswertung
- Fällmitteldosierung zum Zeitpunkt der Probenahme
- Probenahmestelle, verwendete Filter, Messwerte in mg/l PO₄, eventuell berechnete Mittelwerte bei mehreren Auswertungen, Umrechnung auf mg/l PO₄-P, verwendetes Testkit
- Wetter zum Zeitpunkt der Probenahme
- ungefährer Niederschlag seit letzter Probenahme oder in den letzten 48 Stunden (falls vorhanden)
- Gewicht des Kanisters (falls vorhanden)
- pH-Werte, Temperatur und Leitfähigkeit der Proben (falls vorhanden)

Probenahme ARA Oberwindhag

am um

Auswertung SIG

am um

Fällmitteldosierung

Nr.	Probenahmestelle		PO ₄ (mg/l)			PO ₄ -P	TK 1	TK 2
			FF	SVF	Mittel			
1	PN2 S1	Fällschacht 1						
2	PN2 S2	Fällschacht 2	34	33	33,5	10,9	x	
3	PN2 S3	Fällschacht 3		32	32,0	10,4	x	
4	PN3	Abfluss aus Beet1	21		21,0	6,8	x	
5	PN3	Heberschacht	20		20,0	6,5	x	
6	PN4	Abfluss ARA	20		20,0	6,5	x	

Wetter:
ca. °C

Niederschlag seit mm

Gewicht Kanister kg um

Feldmessung		
pH (°dH)	T (°C)	Utf (mS)

FF *Faltenfilter*
 SVF *Spitzenvorsatzfilter*
 TK1 *Testkit 1 (5 - 120 mg/l)*
 TK2 *Testkit 2 (0,1 - 5 mg/l)*

Probenahme ARA Oberwindhagam um

Auswertung SIG

am um Fällmitteldosierung

Nr.	Probenahmestelle		PO4 (mg/l)			PO4-P	TK 1	TK 2
			FF	SVF	Mittel			
1	PN2 S1	Fällschacht 1	32	32	32,0	10,4	x	
2	PN2 S2	Fällschacht 2	35		35,0	11,4	x	
3	PN2 S3	Fällschacht 3	37		37,0	12,1	x	
4	PN3	Abfluss aus Beet1	-		-	-	-	
5	PN3	Heberschacht	14		14,0	4,6	x	
6	PN4	Abfluss ARA	*		11,0	3,6	x	

*Proben
tiefgefroren*Wetter:
ca. °CNiederschlag seit mmGewicht Kanister kg um

Feldmessung			
PN	pH (°dH)	T (°C)	Ltf (mS)
PN2 S1	6,88	13	1173
PN2 S2	6,79	13	1270
PN2 S3	6,88	12,5	1265
PN3	6,95	9,7	1105
PN4	7,45	9,9	1102

	*	
Stichprobe1		11
Stichprobe2		11
Stichprobe3		12
Stichprobe4		10

FF Faltenfilter
 SVF Spitzenvorsatzfilter
 TK1 Testkit 1 (5 - 120 mg/l)
 TK2 Testkit 2 (0,1 - 5 mg/l)

Probenahme ARA Oberwindhag

am um

Auswertung SIG

am um

Fällmitteldosierung

Nr.	Probenahmestelle		PO4 (mg/l)			PO4-P	TK 1	TK 2
			FF	SVF	Mittel			
1	PN2 S1	Fällschacht 1			-	-		
2	PN2 S2	Fällschacht 2			-	-		
3	PN2 S3	Fällschacht 3			-	-		
4	PN3	Abfluss aus Beet1			-	-		
5	PN3	Heberschacht	19	17	18,0	5,9		
6	PN4	Abfluss ARA	17		17,0	5,5		

Proben vor der Schachträumung genommen

Wetter:
ca. °C

Niederschlag seit mm

Gewicht Kanister kg um

Feldmessung			
PN	pH (°dH)	T (°C)	Ltf (mS)
PN2 S1			
PN2 S2			
PN2 S3			
PN3			
PN4			

FF *Faltenfilter*
SVF *Spitzenvorsatzfilter*
TK1 *Testkit 1 (5 - 120 mg/l)*
TK2 *Testkit 2 (0,1 - 5 mg/l)*

Probenahme ARA Oberwindhag

am um

Auswertung Oberwindhag

am um

Fällmitteldosierung

Nr.	Probenahmestelle		PO4 (mg/l)			PO4-P	TK 1	TK 2
			FF	SVF	Mittel			
1	PN2 S1	Fällschacht 1	39	39	39,0	12,7	x	
2	PN2 S2	Fällschacht 2	37	35	36,0	11,7	x	
3	PN2 S3	Fällschacht 3		25	25,0	8,2	x	
4	PN3	Abfluss aus Beet1	-	-	-	-	-	
5	PN3	Heberschacht	23		23,0	7,5	x	
6	PN4	Abfluss ARA	22		22,0	7,2	x	

Wetter:
ca. °C

Niederschlag seit mm

Gewicht Kanister kg um

Feldmessung			
PN	pH (°dH)	T (°C)	Ltf (mS)
PN2 S1			
PN2 S2			
PN2 S3			
PN3			
PN4			

FF *Faltenfilter*
 SVF *Spitzenvorsatzfilter*
 TK1 *Testkit 1 (5 - 120 mg/l)*
 TK2 *Testkit 2 (0,1 - 5 mg/l)*

Probenahme ARA Oberwindhagam um

Auswertung SIG

am um Fällmitteldosierung

Nr.	Probenahmestelle		PO4 (mg/l)			PO4-P	TK 1	TK 2
			FF	SVF	Mittel			
1	PN2 S1	Fällschacht 1		35	35,0	11,4	x	
2	PN2 S2	Fällschacht 2		40	40,0	13,0	x	
3	PN2 S3	Fällschacht 3		42	42,0	13,7	x	
4	PN3	Abfluss aus Beet1	-	-	-	-	-	
5	PN3	Heberschacht	22		22,0	7,2	x	
6	PN4	Abfluss ARA	20		20,0	6,5	x	

Wetter:
ca. °CNiederschlag seit mmGewicht Kanister kg um

Feldmessung			
PN	pH (°dH)	T (°C)	Ltf (mS)
PN2 S1			
PN2 S2			
PN2 S3			
PN3			
PN4			

FF *Faltenfilter*
 SVF *Spitzenvorsatzfilter*
 TK1 *Testkit 1 (5 - 120 mg/l)*
 TK2 *Testkit 2 (0,1 - 5 mg/l)*

Probenahme ARA Oberwindhagam um

Auswertung SIG

am um Fällmitteldosierung

Nr.	Probenahmestelle		PO4 (mg/l)			PO4-P	TK 1	TK 2
			FF	SVF	Mittel			
1	PN2 S1	Fällschacht 1		36	36,0	11,7	x	
2	PN2 S2	Fällschacht 2		32	32,0	10,4	x	
3	PN2 S3	Fällschacht 3		31	31,0	10,1	x	
4	PN3	Abfluss aus Beet1	-	-	-	-		
5	PN3	Heberschacht	19		19,0	6,2	x	
6	PN4	Abfluss ARA	20		20,0	6,5	x	

Wetter:
ca. °CNiederschlag seit mmGewicht Kanister kg um

Feldmessung			
PN	pH (°dH)	T (°C)	Ltf (mS)
PN2 S1			
PN2 S2			
PN2 S3			
PN3			
PN4			850

FF Faltenfilter
SVF Spitzenvorsatzfilter
TK1 Testkit 1 (5 - 120 mg/l)
TK2 Testkit 2 (0,1 - 5 mg/l)

Probenahme ARA Oberwindhag

am um

Auswertung SIG

am um

Fällmitteldosierung

Nr.	Probenahmestelle		PO4 (mg/l)			PO4-P	TK 1	TK 2
			FF	SVF	Mittel			
1	PN2 S1	Fällschacht 1	-	-	-	-		
2	PN2 S2	Fällschacht 2	-	-	-	-		
3	PN2 S3	Fällschacht 3	-	-	-	-		
4	PN3	Abfluss aus Beet1	-	-	-	-		
5	PN3	Heberschacht	-	-	-	-		
6	PN4	Abfluss ARA	22		22,0	7,2		

Wetter:
ca. °C

Niederschlag seit mm

Gewicht Kanister kg um

Feldmessung			
PN	pH (°dH)	T (°C)	Ltf (mS)
PN2 S1			
PN2 S2			
PN2 S3			
PN3			
PN4			

FF *Faltenfilter*
SVF *Spitzenvorsatzfilter*
TK1 *Testkit 1 (5 - 120 mg/l)*
TK2 *Testkit 2 (0,1 - 5 mg/l)*

Probenahme ARA Oberwindhagam um

Auswertung SIG

am um Fällmitteldosierung

Nr.	Probenahmestelle		PO4 (mg/l)			PO4-P	TK 1	TK 2
			FF	SVF	Mittel			
1	PN2 S1	Fällschacht 1		32	32,0	10,4	x	
2	PN2 S2	Fällschacht 2		31	31,0	10,1	x	
3	PN2 S3	Fällschacht 3		32	32,0	10,4	x	
4	PN3	Abfluss aus Beet1	-	-	-	-		
5	PN3	Heberschacht	21		21,0	6,8	x	
6	PN4	Abfluss ARA	18		18,0	5,9	x	

Wetter:
ca. °CNiederschlag seit mmGewicht Kanister kg um

Feldmessung			
PN	pH (°dH)	T (°C)	Ltf (mS)
PN2 S1			
PN2 S2	6,8	6,3	
PN2 S3	7,1	6,1	
PN3		3	
PN4		2,7	

FF *Faltenfilter*
 SVF *Spitzenvorsatzfilter*
 TK1 *Testkit 1 (5 - 120 mg/l)*
 TK2 *Testkit 2 (0,1 - 5 mg/l)*

Probenahme ARA Oberwindhag

am um

Auswertung SIG

am um

Fällmitteldosierung

Nr.	Probenahmestelle		PO4 (mg/l)			PO4-P	TK 1	TK 2
			FF	SVF	Mittel			
1	PN2 S1	Fällschacht 1		31	30,5	9,9	x	
2	PN2 S2	Fällschacht 2		32	32,0	10,4	x	
3	PN2 S3	Fällschacht 3		34	34,0	11,1	x	
4	PN3	Abfluss aus Beet1	-	-	-	-	-	
5	PN3	Heberschacht	22		21,5	7,0	x	
6	PN4	Abfluss ARA	21		21,0	6,8	x	

Wetter:
ca. °C

Niederschlag seit mm

Gewicht Kanister kg um

Feldmessung			
PN	pH (°dH)	T (°C)	Ltf (mS)
PN2 S1	7,07		
PN2 S2	7,15		
PN2 S3	7,15		
PN3	6,70		
PN4	6,80		

FF *Faltenfilter*
SVF *Spitzenvorsatzfilter*
TK1 *Testkit 1 (5 - 120 mg/l)*
TK2 *Testkit 2 (0,1 - 5 mg/l)*

Probenahme ARA Oberwindhag

am um

Auswertung SIG

am um

Fällmitteldosierung

Nr.	Probenahmestelle		PO4 (mg/l)			PO4-P	TK 1	TK 2
			FF	SVF	Mittel			
1	PN2 S1	Fällschacht 1		21	21,0	6,8		
2	PN2 S2	Fällschacht 2		31,5	31,5	10,3		
3	PN2 S3	Fällschacht 3		34,5	34,5	11,3		
4	PN3	Abfluss aus Beet1	-	-	-	-		
5	PN3	Heberschacht	22,5		22,5	7,3		
6	PN4	Abfluss ARA	23		23,0	7,5		

Wetter:
ca. °C

Niederschlag seit mm

Gewicht Kanister kg um

Feldmessung			
PN	pH (°dH)	T (°C)	Ltf (mS)
PN2 S1	7,18		
PN2 S2	6,96		
PN2 S3	7,07		
PN3	6,70		
PN4	6,75		

FF *Faltenfilter*
SVF *Spitzenvorsatzfilter*
TK1 *Testkit 1 (5 - 120 mg/l)*
TK2 *Testkit 2 (0,1 - 5 mg/l)*

Probenahme ARA Oberwindhagam um

Auswertung SIG

am um Fällmitteldosierung

Nr.	Probenahmestelle		PO4 (mg/l)			PO4-P	TK 1	TK 2
			FF	SVF	Mittel			
1	PN2 S1	Fällschacht 1		25	25,0	8,2	x	
2	PN2 S2	Fällschacht 2		28	28,0	9,1	x	
3	PN2 S3	Fällschacht 3		31	31,0	10,1	x	
4	PN3	Abfluss aus Beet1	-	-	-	-		
5	PN3	Heberschacht	25		25,0	8,2	x	
6	PN4	Abfluss ARA	22		22,0	7,2	x	

Wetter:
ca. °CNiederschlag seit mmGewicht Kanister kg um

Feldmessung			
PN	pH (°dH)	T (°C)	Ltf (mS)
PN2 S1	7,45		
PN2 S2	7,06		
PN2 S3	7,00		
PN3	6,70		
PN4	6,94		

FF *Faltenfilter*
SVF *Spitzenvorsatzfilter*
TK1 *Testkit 1 (5 - 120 mg/l)*
TK2 *Testkit 2 (0,1 - 5 mg/l)*

Probenahme ARA Oberwindhagam um

Auswertung Breitenbrunn

am um Fällmitteldosierung

Nr.	Probenahmestelle		PO4 (mg/l)			PO4-P	TK 1	TK 2
			FF	SVF	Mittel			
1	PN2 S1	Fällschacht 1	25	23	24,0	7,8	x	
2	PN2 S2	Fällschacht 2		27	27,0	8,8	x	
3	PN2 S3	Fällschacht 3		27	27,0	8,8	x	
4	PN3	Abfluss aus Beet1	-	-	-	-		
5	PN3	Heberschacht		25	25,0	8,2	x	
6	PN4	Abfluss ARA	25,5		25,5	8,3	x	

Wetter:
ca. °CNiederschlag seit mmGewicht Kanister kg um

Feldmessung			
PN	pH (°dH)	T (°C)	Ltf (mS)
PN2 S1			
PN2 S2			
PN2 S3			
PN3			
PN4			

FF *Faltenfilter*
 SVF *Spitzenvorsatzfilter*
 TK1 *Testkit 1 (5 - 120 mg/l)*
 TK2 *Testkit 2 (0,1 - 5 mg/l)*

Probenahme ARA Oberwindhagam um

Auswertung SIG

am um Fällmitteldosierung

Nr.	Probenahmestelle		PO4 (mg/l)			PO4-P	TK 1	TK 2
			FF	SVF	Mittel			
1	PN2 S1	Fällschacht 1	26	24	25,0	8,2	x	
2	PN2 S2	Fällschacht 2	26	29	27,5	9,0	x	
3	PN2 S3	Fällschacht 3	27	29	28,0	9,1	x	
4	PN3	Abfluss aus Beet1	27		27,0	8,8	x	
5	PN3	Heberschacht	25,5		25,5	8,3	x	
6	PN4	Abfluss ARA	23,5		23,5	7,7	x	

*Beide Beete Bewuchs geschnitten*Wetter:
ca. °CNiederschlag seit mmGewicht Kanister kg um

Feldmessung			
PN	pH (°dH)	T (°C)	Ltf (mS)
PN2 S1			
PN2 S2			
PN2 S3			
PN3			
PN4			

FF *Faltenfilter*
 SVF *Spitzenvorsatzfilter*
 TK1 *Testkit 1 (5 - 120 mg/l)*
 TK2 *Testkit 2 (0,1 - 5 mg/l)*

Probenahme ARA Oberwindhagam um

Auswertung SIG

am um Fällmitteldosierung

Nr.	Probenahmestelle		PO4 (mg/l)			PO4-P	TK 1	TK 2
			FF	SVF	Mittel			
1	PN2 S1	Fällschacht 1		17	17,0	5,5	x	
2	PN2 S2	Fällschacht 2		18	18,0	5,9	x	
3	PN2 S3	Fällschacht 3		19	19,0	6,2	x	
4	PN3	Abfluss aus Beet1	21		21,0	6,8	x	
5	PN3	Heberschacht	18,5		18,5	6,0	x	
6	PN4	Abfluss ARA	20		20,0	6,5	x	

*Testkits ausgegangen, Proben 4,5,6 tiefgefroren und am 10.5.2011 ausgewertet*Wetter:
ca. °CNiederschlag seit mmGewicht Kanister kg um

Feldmessung			
PN	pH (°dH)	T (°C)	Ltf (mS)
PN2 S1			
PN2 S2			
PN2 S3			
PN3			
PN4			

FF *Faltenfilter*
SVF *Spitzenvorsatzfilter*
TK1 *Testkit 1 (5 - 120 mg/l)*
TK2 *Testkit 2 (0,1 - 5 mg/l)*

Probenahme ARA Oberwindhag

am um

Auswertung Münzbach

am um

Fällmitteldosierung

Nr.	Probenahmestelle		PO4 (mg/l)			PO4-P	TK 1	TK 2
			FF	SVF	Mittel			
1	PN2 S1	Fällschacht 1		13	13,0	4,2		
2	PN2 S2	Fällschacht 2		16	15,5	5,1		
3	PN2 S3	Fällschacht 3		17	17,0	5,5		
4	PN3	Abfluss aus Beet1	26		26,0	8,5		
5	PN3	Heberschacht	28		27,5	9,0		
6	PN4	Abfluss ARA	26		25,5	8,3		

Wetter:
ca. °C

Niederschlag seit mm

Gewicht Kanister kg um

Feldmessung			
PN	pH (°dH)	T (°C)	Ltf (mS)
PN2 S1			
PN2 S2			
PN2 S3			
PN3			
PN4			

FF *Faltenfilter*
SVF *Spitzenvorsatzfilter*
TK1 *Testkit 1 (5 - 120 mg/l)*
TK2 *Testkit 2 (0,1 - 5 mg/l)*

Probenahme ARA Oberwindhagam

Proben genommen von DI Lechner

Auswertung SIG

am um Fällmitteldosierung

Nr.	Probenahmestelle		PO4 (mg/l)			PO4-P	TK 1	TK 2
			FF	SVF	Mittel			
1	PN2 S1	Fällschacht 1	-	-	-	-		
2	PN2 S2	Fällschacht 2	-	-	-	-		
3	PN2 S3	Fällschacht 3	-	-	-	-		
4	PN3	Abfluss aus Beet1	-	-	-	-		
5	PN3	Heberschacht		16,5	16,5	5,4		x
6	PN4	Abfluss ARA		17,5	17,5	5,7		x

Wetter:
ca. °CNiederschlag seit mmGewicht Kanister kg um

Feldmessung			
PN	pH (°dH)	T (°C)	Ltf (mS)
PN2 S1			
PN2 S2			
PN2 S3			
PN3	6,90		
PN4	7,50		

FF *Faltenfilter*
 SVF *Spitzenvorsatzfilter*
 TK1 *Testkit 1 (5 - 120 mg/l)*
 TK2 *Testkit 2 (0,1 - 5 mg/l)*

Probenahme ARA Oberwindhag

am um

Auswertung SIG

am um

Fällmitteldosierung

Nr.	Probenahmestelle		PO4 (mg/l)			PO4-P	TK 1	TK 2
			FF	SVF	Mittel			
1	PN2 S1	Fällschacht 1	12	10	11,0	3,6	x	x
2	PN2 S2	Fällschacht 2	10,5	7	8,8	2,9	x	x
3	PN2 S3	Fällschacht 3		6,5	6,5	2,1	x	
4	PN3	Abfluss aus Beet1	18		18,0	5,9	x	
5	PN3	Heberschacht	15		15,0	4,9	x	
6	PN4	Abfluss ARA	13		13,0	4,2	x	

Wetter:
ca. °C

Niederschlag seit mm

Gewicht Kanister kg um

Feldmessung			
PN	pH (°dH)	T (°C)	Ltf (mS)
PN2 S1			
PN2 S2			
PN2 S3			
PN3			
PN4			

FF *Faltenfilter*
SVF *Spitzenvorsatzfilter*
TK1 *Testkit 1 (5 - 120 mg/l)*
TK2 *Testkit 2 (0,1 - 5 mg/l)*

Probenahme ARA Oberwindhagam um

Auswertung SIG

am um Fällmitteldosierung

Nr.	Probenahmestelle		PO4 (mg/l)			PO4-P	TK 1	TK 2
			FF	SVF	Mittel			
1	PN2 S1	Fällschacht 1	8,5	7	7,8	2,5	x	x
2	PN2 S2	Fällschacht 2	6	7	6,5	2,1	x	x
3	PN2 S3	Fällschacht 3	8,5	10,5	9,5	3,1	x	x
4	PN3	Abfluss aus Beet1	14		14,0	4,6	x	
5	PN3	Heberschacht	15		15,0	4,9	x	
6	PN4	Abfluss ARA	12,5		12,5	4,1	x	

Wetter:
ca. °CNiederschlag seit mmGewicht Kanister kg um

Feldmessung			
PN	pH (°dH)	T (°C)	Ltf (mS)
PN2 S1			
PN2 S2			
PN2 S3			
PN3			
PN4			

FF *Faltenfilter*
 SVF *Spitzenvorsatzfilter*
 TK1 *Testkit 1 (5 - 120 mg/l)*
 TK2 *Testkit 2 (0,1 - 5 mg/l)*

Probenahme ARA Oberwindhag

am um

Auswertung SIG

am um

Fällmitteldosierung

Nr.	Probenahmestelle		PO4 (mg/l)			PO4-P	TK 1	TK 2
			FF	SVF	Mittel			
1	PN2 S1	Fällschacht 1		7	7,0	2,3		
2	PN2 S2	Fällschacht 2	8	7	7,5	2,4		
3	PN2 S3	Fällschacht 3		8	8,0	2,6		
4	PN3	Abfluss aus Beet1	10		10,0	3,3		
5	PN3	Heberschacht	10		10,0	3,3		
6	PN4	Abfluss ARA	8		7,5	2,4		

Wetter:
ca. °C

Niederschlag seit mm

Gewicht Kanister kg um

Feldmessung			
PN	pH (°dH)	T (°C)	Ltf (mS)
PN2 S1			
PN2 S2			
PN2 S3			
PN3			
PN4			

FF *Faltenfilter*
SVF *Spitzenvorsatzfilter*
TK1 *Testkit 1 (5 - 120 mg/l)*
TK2 *Testkit 2 (0,1 - 5 mg/l)*

Probenahme ARA Oberwindhagam um

Auswertung SIG

am um Fällmitteldosierung

Nr.	Probenahmestelle		PO4 (mg/l)			PO4-P	TK 1	TK 2
			FF	SVF	Mittel			
1	PN2 S1	Fällschacht 1	31	34	32,5	10,6	x	x
2	PN2 S2	Fällschacht 2	28		28,0	9,1		x
3	PN2 S3	Fällschacht 3	32		32,0	10,4		x
4	PN3	Abfluss aus Beet1	9		9,0	2,9		x
5	PN3	Heberschacht	9		9,0	2,9		x
6	PN4	Abfluss ARA	8		8,0	2,6		x

Wetter:
ca. °CNiederschlag seit mmGewicht Kanister kg um

Feldmessung			
PN	pH (°dH)	T (°C)	Ltf (mS)
PN2 S1			
PN2 S2			
PN2 S3			
PN3			
PN4			

FF *Faltenfilter*
SVF *Spitzenvorsatzfilter*
TK1 *Testkit 1 (5 - 120 mg/l)*
TK2 *Testkit 2 (0,1 - 5 mg/l)*

Probenahme ARA Oberwindhagam um

Auswertung SIG

am um Fällmitteldosierung

Nr.	Probenahmestelle		PO4 (mg/l)			PO4-P	TK 1	TK 2
			FF	SVF	Mittel			
1	PN2 S1	Fällschacht 1	5	6	5,5	1,8	x	x
2	PN2 S2	Fällschacht 2	6		6,0	2,0		x
3	PN2 S3	Fällschacht 3	6		6,0	2,0		x
4	PN3	Abfluss aus Beet1	7		7,0	2,3		x
5	PN3	Heberschacht	6		6,0	2,0		x
6	PN4	Abfluss ARA	7		7,0	2,3		x

Wetter:
ca. °CNiederschlag seit mmGewicht Kanister kg um

Feldmessung			
PN	pH (°dH)	T (°C)	Ltf (mS)
PN2 S1			
PN2 S2			
PN2 S3			
PN3			
PN4			

FF *Faltenfilter*
 SVF *Spitzenvorsatzfilter*
 TK1 *Testkit 1 (5 - 120 mg/l)*
 TK2 *Testkit 2 (0,1 - 5 mg/l)*

Probenahme ARA Oberwindhagam um

Auswertung Oberwindhag

am um Fällmitteldosierung

Nr.	Probenahmestelle		PO4 (mg/l)			PO4-P	TK 1	TK 2
			FF	SVF	Mittel			
1	PN2 S1	Fällschacht 1	14	12	13,0	4,2	x	x
2	PN2 S2	Fällschacht 2	7		6,5	2,1		x
3	PN2 S3	Fällschacht 3	7		6,5	2,1		x
4	PN3	Abfluss aus Beet1	6		6,0	2,0		x
5	PN3	Heberschacht	6		6,0	2,0		x
6	PN4	Abfluss ARA	6,2		6,2	2,0		x

Wetter:
ca. °CNiederschlag seit mmGewicht Kanister kg um

Feldmessung			
PN	pH (°dH)	T (°C)	Ltf (mS)
PN2 S1			
PN2 S2			
PN2 S3			
PN3			
PN4			

FF *Faltenfilter*
SVF *Spitzenvorsatzfilter*
TK1 *Testkit 1 (5 - 120 mg/l)*
TK2 *Testkit 2 (0,1 - 5 mg/l)*

Probenahme ARA Oberwindhag

am um

Auswertung Oberwindhag

am um

Fällmitteldosierung

Nr.	Probenahmestelle		PO4 (mg/l)			PO4-P	TK 1	TK 2
			FF	SVF	Mittel			
1	PN2 S1	Fällschacht 1		29	29,0	9,5	x	
2	PN2 S2	Fällschacht 2	22		22,0	7,2		x
3	PN2 S3	Fällschacht 3	20		20,0	6,5		x
4	PN3	Abfluss aus Beet1	5		5,0	1,6		x
5	PN3	Heberschacht	5		4,8	1,6		x
6	PN4	Abfluss ARA	5		5,0	1,6		x

Wetter:
ca. °C

Niederschlag seit mm

Gewicht Kanister kg um

Feldmessung			
PN	pH (°dH)	T (°C)	Ltf (mS)
PN2 S1			
PN2 S2			
PN2 S3			
PN3			
PN4			

FF *Faltenfilter*
SVF *Spitzenvorsatzfilter*
TK1 *Testkit 1 (5 - 120 mg/l)*
TK2 *Testkit 2 (0,1 - 5 mg/l)*

Probenahme ARA Oberwindhagam um

Auswertung Oberwindhag

am um Fällmitteldosierung

Nr.	Probenahmestelle		PO4 (mg/l)			PO4-P	TK 1	TK 2
			FF	SVF	Mittel			
1	PN2 S1	Fällschacht 1		11	11,0	3,6	x	
2	PN2 S2	Fällschacht 2	12		12,0	3,9		x
3	PN2 S3	Fällschacht 3	9		8,7	2,8		x
4	PN3	Abfluss aus Beet1	4		4,4	1,4		x
5	PN3	Heberschacht	4		4,0	1,3		x
6	PN4	Abfluss ARA	4		4,2	1,4		x

Wetter:
ca. °CNiederschlag seit mmGewicht Kanister kg um *Umbau der Mischstrecke*

Feldmessung			
PN	pH (°dH)	T (°C)	Ltf (mS)
PN2 S1			
PN2 S2			
PN2 S3			
PN3			
PN4			

FF *Faltenfilter*
 SVF *Spitzenvorsatzfilter*
 TK1 *Testkit 1 (5 - 120 mg/l)*
 TK2 *Testkit 2 (0,1 - 5 mg/l)*

Probenahme ARA Oberwindhagam um

Auswertung Oberwindhag

am um Fällmitteldosierung

Nr.	Probenahmestelle		PO4 (mg/l)			PO4-P	TK 1	TK 2
			FF	SVF	Mittel			
1	PN2 S1	Fällschacht 1	4,2		4,2	1,4		x
2	PN2 S2	Fällschacht 2	5,4		5,4	1,8		x
3	PN2 S3	Fällschacht 3	8,0		8,0	2,6		x
4	PN3	Abfluss aus Beet1	4,4		4,4	1,4		x
5	PN3	Heberschacht	4,6		4,6	1,5		x
6	PN4	Abfluss ARA	5,0		5,0	1,6		x

Wetter:
ca. °CNiederschlag seit mmGewicht Kanister kg um

Feldmessung			
PN	pH (°dH)	T (°C)	Ltf (mS)
PN2 S1			
PN2 S2			
PN2 S3			
PN3			
PN4			

FF *Faltenfilter*
SVF *Spitzenvorsatzfilter*
TK1 *Testkit 1 (5 - 120 mg/l)*
TK2 *Testkit 2 (0,1 - 5 mg/l)*

Probenahme ARA Oberwindhagam um

Auswertung SIG

am um Fällmitteldosierung

Nr.	Probenahmestelle		PO4 (mg/l)			PO4-P	TK 1	TK 2
			FF	SVF	Mittel			
1	PN2 S1	Fällschacht 1	18,4		18,4	6,0		x
2	PN2 S2	Fällschacht 2	14,4		14,4	4,7		x
3	PN2 S3	Fällschacht 3	4,8		4,8	1,6		x
4	PN3	Abfluss aus Beet1	4,4		4,4	1,4		x
5	PN3	Heberschacht	4,8		4,8	1,6		x
6	PN4	Abfluss ARA	5,4		5,4	1,8		x

Wetter:
ca. °CNiederschlag seit mmGewicht Kanister kg um *Entnahme der Drucksonden, Schächte geräumt*

Feldmessung			
PN	pH (°dH)	T (°C)	Ltf (mS)
PN2 S1	7,59		1660
PN2 S2	7,27		1761
PN2 S3	7,28		1859
PN3 Abfl.	7,14		1741
PN3 Sch.	7,15		1668
PN4	7,65		1674

FF Faltenfilter
 SVF Spitzenvorsatzfilter
 TK1 Testkit 1 (5 - 120 mg/l)
 TK2 Testkit 2 (0,1 - 5 mg/l)

Probenahme ARA Oberwindhag

am um

Auswertung Oberwindhag

am um

Fällmitteldosierung

Nr.	Probenahmestelle		PO4 (mg/l)			PO4-P	TK 1	TK 2
			FF	SVF	Mittel			
1	PN2 S1	Fällschacht 1	5,6		5,6	1,8		x
2	PN2 S2	Fällschacht 2	5,4		5,4	1,8		x
3	PN2 S3	Fällschacht 3	6,2		6,2	2,0		x
4	PN3	Abfluss aus Beet1	3,8		3,8	1,2		x
5	PN3	Heberschacht	4,2		4,2	1,4		x
6	PN4	Abfluss ARA	4,6		4,6	1,5		x

Wetter:
ca. °C

Niederschlag seit mm

Gewicht Kanister kg um

Drucksonde in S3 eingebaut

Feldmessung			
PN	pH (°dH)	T (°C)	Ltf (mS)
PN2 S1			
PN2 S2			
PN2 S3			
PN3			
PN4			

FF *Faltenfilter*
SVF *Spitzenvorsatzfilter*
TK1 *Testkit 1 (5 - 120 mg/l)*
TK2 *Testkit 2 (0,1 - 5 mg/l)*

Probenahme ARA Oberwindhagam um

Auswertung Oberwindhag

am um Fällmitteldosierung

Nr.	Probenahmestelle		PO4 (mg/l)			PO4-P	TK 1	TK 2
			FF	SVF	Mittel			
1	PN2 S1	Fällschacht 1	35		35,0	11,4		x
2	PN2 S2	Fällschacht 2	30		30,0	9,8		x
3	PN2 S3	Fällschacht 3	22		22,0	7,2		x
4	PN3	Abfluss aus Beet1	4		4,0	1,3		x
5	PN3	Heberschacht	4		4,0	1,3		x
6	PN4	Abfluss ARA	4,2		4,2	1,4		x

Wetter:
ca. °CNiederschlag seit mmGewicht Kanister kg um *Neuer Kanister mit 31 kg um 14:20 getauscht*

Feldmessung			
PN	pH (°dH)	T (°C)	Ltf (mS)
PN2 S1			
PN2 S2			
PN2 S3			
PN3			
PN4			

FF *Faltenfilter*
SVF *Spitzenvorsatzfilter*
TK1 *Testkit 1 (5 - 120 mg/l)*
TK2 *Testkit 2 (0,1 - 5 mg/l)*

Probenahme ARA Oberwindhagam um

Auswertung Oberwindhag

am um Fällmitteldosierung

Nr.	Probenahmestelle		PO4 (mg/l)			PO4-P	TK 1	TK 2
			FF	SVF	Mittel			
1	PN2 S1	Fällschacht 1	26	22	24,0	7,8	x	x
2	PN2 S2	Fällschacht 2	24		24,0	7,8		x
3	PN2 S3	Fällschacht 3	26		26,0	8,5		x
4	PN3	Abfluss aus Beet1	4,4		4,4	1,4		x
5	PN3	Heberschacht	5,2		5,2	1,7		x
6	PN4	Abfluss ARA	4,6		4,6	1,5		x

*Dosierpumpe gereinigt*Wetter:
ca. °CNiederschlag seit mmGewicht Kanister kg um

Feldmessung			
PN	pH (°dH)	T (°C)	Ltf (mS)
PN2 S1			
PN2 S2			
PN2 S3			
PN3			
PN4			

FF *Faltenfilter*
SVF *Spitzenvorsatzfilter*
TK1 *Testkit 1 (5 - 120 mg/l)*
TK2 *Testkit 2 (0,1 - 5 mg/l)*

Probenahme ARA Oberwindhagam um

Auswertung Oberwindhag

am um Fällmitteldosierung

Nr.	Probenahmestelle		PO4 (mg/l)			PO4-P	TK 1	TK 2
			FF	SVF	Mittel			
1	PN2 S1	Fällschacht 1		10,8	10,8	3,5		x
2	PN2 S2	Fällschacht 2		12,3	12,3	4,0		x
3	PN2 S3	Fällschacht 3	20,8		20,8	6,8		x
4	PN3	Abfluss aus Beet1	4,6		4,6	1,5		x
5	PN3	Heberschacht	4,6		4,6	1,5		x
6	PN4	Abfluss ARA	4,6		4,6	1,5		x

Wetter:
ca. °CNiederschlag seit mmGewicht Kanister kg um

Feldmessung			
PN	pH (°dH)	T (°C)	Ltf (mS)
PN2 S1			
PN2 S2			
PN2 S3			
PN3			
PN4			

FF *Faltenfilter*
 SVF *Spitzenvorsatzfilter*
 TK1 *Testkit 1 (5 - 120 mg/l)*
 TK2 *Testkit 2 (0,1 - 5 mg/l)*

Probenahme ARA Oberwindhagam um

Auswertung Oberwindhag

am um Fällmitteldosierung

Nr.	Probenahmestelle		PO4 (mg/l)			PO4-P	TK 1	TK 2
			FF	SVF	Mittel			
1	PN2 S1	Fällschacht 1		19,5	19,5	6,4		x
2	PN2 S2	Fällschacht 2		16,5	16,5	5,4		x
3	PN2 S3	Fällschacht 3		16,0	16,0	5,2		x
4	PN3	Abfluss aus Beet1	4,8		4,8	1,6		x
5	PN3	Heberschacht	4,8		4,8	1,6		x
6	PN4	Abfluss ARA	4,6		4,6	1,5		x

Wetter:
ca. °CNiederschlag seit mmGewicht Kanister kg um

Feldmessung			
PN	pH (°dH)	T (°C)	Ltf (mS)
PN2 S1			
PN2 S2			
PN2 S3			
PN3			
PN4			

FF *Faltenfilter*
SVF *Spitzenvorsatzfilter*
TK1 *Testkit 1 (5 - 120 mg/l)*
TK2 *Testkit 2 (0,1 - 5 mg/l)*

Probenahme ARA Oberwindhagam um

Auswertung SIG

am um Fällmitteldosierung

Nr.	Probenahmestelle		PO4 (mg/l)			PO4-P	TK 1	TK 2
			FF	SVF	Mittel			
1	PN2 S1	Fällschacht 1		21	21,0	6,8		x
2	PN2 S2	Fällschacht 2		18	18,0	5,9		x
3	PN2 S3	Fällschacht 3		18	18,0	5,9		x
4	PN3	Abfluss aus Beet1	5,4		5,4	1,8		x
5	PN3	Heberschacht	5		5,0	1,6		x
6	PN4	Abfluss ARA	5		5,0	1,6		x

Wetter:
ca. °CNiederschlag seit mmGewicht Kanister kg um

Feldmessung			
PN	pH (°dH)	T (°C)	Ltf (mS)
PN2 S1			
PN2 S2			
PN2 S3			
PN3			
PN4			

FF *Faltenfilter*
SVF *Spitzenvorsatzfilter*
TK1 *Testkit 1 (5 - 120 mg/l)*
TK2 *Testkit 2 (0,1 - 5 mg/l)*

Probenahme ARA Oberwindhagam um

Auswertung Oberwindhag

am um Fällmitteldosierung

Nr.	Probenahmestelle		PO4 (mg/l)			PO4-P	TK 1	TK 2
			FF	SVF	Mittel			
1	PN2 S1	Fällschacht 1		14,5	14,5	4,7		
2	PN2 S2	Fällschacht 2		17	17	5,5		
3	PN2 S3	Fällschacht 3		20	20	6,5		
4	PN3	Abfluss aus Beet1	6		6	2		
5	PN3	Heberschacht	5,6		5,6	1,8		
6	PN4	Abfluss ARA	5,2		5,2	1,7		

Wetter:
ca. °CNiederschlag seit mmGewicht Kanister kg um

Feldmessung			
PN	pH (°dH)	T (°C)	Ltf (mS)
PN2 S1			
PN2 S2			
PN2 S3			
PN3			
PN4			

FF *Faltenfilter*
SVF *Spitzenvorsatzfilter*
TK1 *Testkit 1 (5 - 120 mg/l)*
TK2 *Testkit 2 (0,1 - 5 mg/l)*

11. Lebenslauf

Angaben zur Person

Nachname/ Vorname **Lauschmann, Robert Ernst**
 Adresse(n) Zum Seeblick 9, 7091 Breitenbrunn
 Telefon Mobil: +43 (0)6764600646
 E-mail r_lauschmann@gmx.at
 Staatsangehörigkeit Österreich
 Geburtsdatum 22.06.1984
 Geschlecht Männlich



Berufserfahrung

Zeitraum	Februar – Juli 2009
Beruf oder Funktion	Wissenschaftlicher Mitarbeiter
Wichtigste Tätigkeiten und Zuständigkeiten	Datenerhebung und Auswertung für das EU-Projekt „TransWaste“ (Länderübergreifende Verbringung von Gebrauchsgütern und Sperrmüll, http://www.transwaste.eu/)
Name und Adresse des Arbeitgebers	Universität für Bodenkultur, Institut für Abfallwirtschaft (ABF BOKU), Muthgasse 107/3.Stock, 1190 Wien
Zeitraum	2007 – 2009
Beruf oder Funktion	Betrieb des Gewerbes für EDV- und Dienstleistungen
Wichtigste Tätigkeiten und Zuständigkeiten	Erstellung von Präsentationen, Graphiken, Tabellen und Illustrationen Berechnungen mittels MS Office, ArcGIS
Name und Adresse des Arbeitgebers	Selbständig
Tätigkeitsbereich oder Branche	Alle Arbeiten wurden für das Landeswasserbaubezirksamt Schützen/See (Bgl.) getätigt
Zeitraum	September 2007
Beruf oder Funktion	Praktikum beim Landeswasserbaubezirksamt Schützen/See
Wichtigste Tätigkeiten und Zuständigkeiten	Mitarbeit bei der Gründung eines Wasserverbandes, GIS-Anwendungen, Kalkulationen mit Excel, Erstellung eines Schauplanes, Kontrolle von Hochwasserschutzanlagen und Rückhaltebecken
Name und Adresse des Arbeitgebers	LWBBA Schützen (wurde 2009 aufgelöst und in mehrere Dienststellen der burgenländischen Landesregierung eingegliedert)

Zeitraum	2004 – 2007 (hauptsächlich Feriarbeit)
Beruf oder Funktion	Landschaftsgärtner
Wichtigste Tätigkeiten und Zuständigkeiten	Ausführung von Arbeiten im Haus- und Gartenbau
Name und Adresse des Arbeitgebers	Augsberger Gruppe, Enzersdorfer Straße 67 2401 Fischamend

Schul- und Berufsbildung

<u>Zeitraum</u>	Seit 2008 Masterstudium „Wasserwirtschaft und Umwelt“,
Name und Art der Bildungs- oder Ausbildungseinrichtung	Universität für Bodenkultur Wien
<u>Zeitraum</u>	2003 – 2008 Bachelorstudium „Kulturtechnik und Wasserwirtschaft“
Bezeichnung der erworbenen Qualifikation	Bacc. techn.
Name und Art der Bildungs- oder Ausbildungseinrichtung	Universität für Bodenkultur Wien
<u>Zeitraum</u>	1994 – 2002
Bezeichnung der erworbenen Qualifikation	Matura
Name und Art der Bildungs- oder Ausbildungseinrichtung	AHS, Gymnasium Neusiedl am See (Bgld.)

Praktika und Auslandsaufenthalte im Zuge des Studiums

<u>Zeitraum</u>	September 2009 – März 2010
	Erasmus-Auslandsemester
Name und Art der Bildungs- oder Ausbildungseinrichtung	Université des Antilles et de la Guyane (UAG) Guadeloupe (Fr.)
	Fischökologisches Spezialpraktikum (Lunz III)
	Biologische Gütebeurteilung von Fließgewässern (Lunz II)
	Angewandte Geologie Feldpraktikum (Hohlraumerkundung mit bodenphysikalischen Methoden)
	Hydrometrisches Feldmesspraktikum (Flussbauliches Gesamtprojekt Donau)

Ingenieurbiologisches Baupraktikum (Renaturierung
Mödlingbach)

Kulturtechnisches Feldpraktikum (Geodäsie, Flusskartierung, u.a.
in Hohenlehen, NÖ)

Muttersprache **Deutsch**

Sonstige Sprachen

Selbstbeurteilung

Englisch

Verstehen

Sprechen

Schreiben

Sehr gute Kenntnisse

Sehr gute Kenntnisse

Sehr gute Kenntnisse

Französisch

Gute Kenntnisse

Gute Kenntnisse

Gute Kenntnisse

Ungarisch

Sehr gute Kenntnisse

Gute Kenntnisse

-

Zur Person

Soziale Fähigkeiten Teamfähigkeit, Erfahrung im interkulturellen Umgang durch Teilnahme an europäischen Jugendaustauschen, Wohnen in einem „internationalen“ Studentenheim (base 19, Wien)

Organisatorische Fähigkeiten Erfahrung mit der Organisation von Vereinen (Jugend- und Musikvereine), Erfahrung in Interessensvertretung und Verhandlungen durch die Tätigkeit als Mitglied der Studierendenvertretung im Studentenheim

IT-Kenntnisse Sehr gute Kenntnisse von MS Office (Word, Excel, Power-Point) GIS, Auto-CAD und HEC-RAS Kenntnisse vorhanden

Künstlerische Fähigkeiten Musikalische Fähigkeiten, ehemalige Mitgliedschaften in diversen Ensembles und Bands, langjähriges Vorstandsmitglied eines Jugendmusikvereins

Sonstige Fähigkeiten/Kompetenzen Organisations- und Improvisationsfähigkeit durch selbständiges Reisen

Zusätzliche Angaben

- **Führerschein Fahrzeugklasse B**
- Ausbildung zum Sprengbefugten
- Ausbildung zum Rettungssanitäter
- Tauchschein (Niveau 1)

Hobbies Schwimmen, Tauchen, Segeln und Angeln
Gartenbau, Pflanzenzucht
Musizieren, Reisen

Wien, 23. Februar 2012