Ber. Int. Gewässerschutzkomm. Bodensee: 19,1977

Internationale Gewässerschutzkommission für den Bodensee

Bericht Nr. 19

STAND DER TECHNISCHEN MOEGLICHKEITEN DER PHOSPHORELIMINATION AUS KOMMUNALEN ABWAESSERN

(ABGESCHLOSSEN 1974)

Bearbeiter: K. WUHRMANN & H. LEIDNER
mit Beitrag von M. BOLLER

- 1977 -

V O R W O R T

Die Internationale Gewässerschutzkommission für den Bodensee (IGKB) erbat sich im Jahre 1963 von Prof. Dr. K. Wuhrmann eine zusammenfassende Orientierung über die Technologie der Phosphorelimination in kommunalen Kläranlagen. Das Bedürfnis nach vertieften, praktischen Erfahrungen über die rationellste Technologie der Phosphorelimination hatte schon früher zu ausgedehnten, verfahrenstechnischen Arbeiten der Eidg. Anstalt für Wasserversorgung, Abwasserreinigung und Gewässerschutz (EAWAG) in grossen Versuchsanlagen geführt. Die Prüfung dieser experimentellen Ergebnisse im praktischen Betrieb einer grossen kommunalen Kläranlage wurde dann mit Versuchen im technischen Massstab im Jahre 1967 auf der Kläranlage Reutlingen (Baden-Württemberg) ermöglicht. Die Kosten für die Einrichtung und Durchführung der Experimente wurden vom Lande Baden-Württemberg getragen. Seiner Regierung und der Stadt Reutlingen sei an dieser Stelle für ihre grosse Hilfe bei diesen Versuchen gedankt. Ziel aller dieser Untersuchungen war die Erarbeitung einer umfassenden, technologischen Uebersicht, welche den Anliegerstaaten des Bodensees als Orientierung für Empfehlungen beim Bau und Betrieb von Kläranlagen mit P-Eliminationsstufen dienen sollte. Nach Abschluss der Versuche in Reutlingen erfolgten seitens der Bearbeiter noch weitere Untersuchungen über die systematische P-Elimination im praktischen Betrieb bei den Kläranlagen Jona (Kt. St. Gallen), Münsterlingen (Kt. Thurgau) und Männedorf (Kt. Zürich). Den genannten Gemeinden sei für die bereitwillige Mitarbeit an diesem Untersuchungsprogramm ebenfalls der Dank ausgesprochen.

Im Jahre 1974 wurden die früheren Untersuchungen über die Technologie der P-Elimination von der technischen Abteilung der EAWAG mit der Prüfung weiterer Verfahrenskombinationen wieder aufgenommen. Die Ergebnisse dieser Arbeiten konnten nachträglich noch in den vorliegenden Bericht eingearbeitet werden. In diesem Zusammenhang gebührt Herrn dipl. Ing. M. Boller für seinen Beitrag Dank.

Die Untersuchungen zu diesem Bericht erfolgten weitgehend durch Mitarbeiter der EAWAG. Den Direktoren der Anstalt (Prof. Dr. O. Jaag bis 1970, Prof. Dr. W. Stumm seit 1970) ist für das grosse Verständnis für diese Arbeiten zu danken. Den Mitarbeitern der Abteilungen für Chemie, Biologie und Ingenieurwissenschaften der EAWAG gebührt besondere Erwähnung für die zuverlässigen und oft unter schwierigen Umständen vorgenommenen experimentellen Untersuchungen.

INHALT

	Seite
VORWORT	2
1. EINLEITUNG	5
2. ZUR ZIELSETZUNG DER EFFEKTIVITAET DER P-ELIMINATION	6
3. ALLGEMEINES ZUR TECHNOLOGIE DER P-ELIMINATION	7
3.1 VORFAELLUNG	7
3.1.1 Vorteile des Verfahrens	7
3.1.2 Nachteile des Verfahrens	8
3.2 SIMULTANFAELLUNG	8
3.2.1 Vorteile des Verfahrens	8
3.2.2 Nachteile des Verfahrens	8
3.3 NACHFAELLUNG	
3.3.1 Vorteile des Verfahrens	9
3.3.2 Nachteile des Verfahrens	9
4. CHEMISCHE GRUNDLAGEN DER P-ELIMINATION	10
4.1 PHOSPHATSPEZIES IM ABWASSER	10
4.2 SIMULTANFAELLUNG	13
4.2.1 Fällmittelbedarf	13
4.2.2 pH-Verschiebung	13
4.2.3 pH-Einfluss auf die P-Fällung	13
4.2.4 Verhalten des Eisenphosphatschlammes im Faulraum	14
4.3 NACHFAELLUNG	14
4.3.1 Fällungsmechanismus	14
5. BEOBACHTUNGEN DER EAWAG BEI KOMMUNALEN ANLAGEN	15
5.1 VERSUCHSDURCHFUEHRUNG	15
5.2 P-ELIMINATION MITTELS SIMULTANFAELLUNG	16
5.2.1 Kläranlage Reutlingen	16
5.2.2 Kläranlage Jona	17
5.2.3 Kläranlage Münsterlingen	18
5.2.4 Kläranlage Männedorf	18
5.2.5 Volloxidationsanlage	19

Seite

5.3 P-ELIMINATION MITTELS NACHFAELLUNG 20

5.3.1 Kläranlage Reutlingen 20
5.3.2 Kläranlage Jona 21
5.3.3 Nebeneffekte 22
5.3.4 Schlammproduktion 22

6. I N F O R M A T I O N E N V O N W E I T E R E N P - E L I M I N A T I O N S A N L A G E N 23

6.1 SIMULTANFAELLUNG 24

6.2 NACHFAELLUNG 25

6.3 VORFAELLUNG (DIREKTFAELLUNG) 26

7. H I N W E I S E A U F N E U E K O M B I N A T I O N S - T E C H N O L O G I E N Z U R P - E L I M I N A T I O N 26

7.1 P-ELIMINATION MITTELS FLOCKUNGSFILTRATION 27

7.2 BEURTEILUNG DER RESULTATE 31

8. S C H L U S S F O L G E R U N G E N 31

9. L I T E R A T U R 35

10. A N H A N G 38

1. EINLEITUNG

Im Rahmen der Vorbereitung der Richtlinien für die Reinhaltung des Bodensees wurde auf Wunsch der Internationalen Gewässerschutzkommission für den Bodensee (IGKB) schon 1963 ein Kurzbericht über den damaligen Stand der technischen Möglichkeiten zur P-Elimination in Kläranlagen abgegeben [1]. Die damals notwendigerweise sehr dürftigen Unterlagen über praktische Erfahrungen an Gemeindeanlagen, insbesondere auch bezüglich der bei Fällungsverfahren auftretenden Probleme der Beseitigung der Fällungsschlämme, ergab ein zwingendes Bedürfnis nach weiteren Informationen. Die 1964 veröffentlichten Untersuchungen der Eidgenössischen Anstalt für Wasserversorgung, Abwasserreinigung und Gewässerschutz (EAWAG) [2] sowie die wenigen praktischen Erfahrungen an bestehenden Anlagen deuteten zwar darauf hin, dass bezüglich der Verfahrenstechnik bei der P-Elimination wahrscheinlich nur die Nachfällung oder neue, äquivalente Verfahren in Frage kommen. Die IGKB hatte aber im Hinblick auf die zu erlassenden Richtlinien für die Reinhaltung des Bodensees das Bedürfnis, sich in dieser Frage besser zu dokumentieren. Der vorliegende Bericht fasst die bis 1974 gewonnenen Erkenntnisse zur Verfahrenstechnik, die praktischen Resultate und die Randprobleme (Schlammfragen) kurz zusammen. Das gesichtete und sehr umfangreiche Material wurde mit voller Absicht nicht in aller Ausführlichkeit dargelegt. Die Informationen wurden auf jenes Material beschränkt, welches wirklich für eine Urteilsbildung und Entschlussfassung von Wert ist. Die lange Entstehungszeit der vorliegenden Unterlage ergab sich aus dem Umstand, dass - wenn möglich - Erfahrungen aus dem mitteleuropäischen Raum benützt werden sollten, um eine ausreichende Glaubwürdigkeit bei den Praktikern zu erreichen. Die "Uebertragung" der Betriebsergebnisse von Kläranlagen in andere geographische Räume stösst häufig auf grosses Misstrauen, obschon bei rein chemischen Prozessen, wie der P-Elimination, deren Ablauf zwingend vorgegeben ist, dazu keine Veranlassung besteht. Nun war aber gerade die P-Elimination in Mitteleuropa sehr wenig verbreitet, resp. wurde - wenn überhaupt - nach einseitigem Konzept vorgenommen. Bis 1970 beschränkte sie sich auf die Simultanfällung in wenigen Anlagen. Glücklicherweise konnte seither in Schweden eine grosse Zahl von P-Eliminationsstufen in Betrieb genommen werden. Damit hat sich der Erfahrungskreis, zwar nicht in Mitteleuropa, aber immerhin noch auf diesem Kontinent erweitert.

Die Beurteilungsschwierigkeiten wurden dadurch akzentuiert, dass von den wenigen Simultanfällungsanlagen ungenügende analytische Ergebnisse vorlagen und zwar sowohl bezüglich der Zahl der Untersuchungen als auch der Relevanz aus der Sicht sauberer statistischer Information. In dieser unerfreulichen Situation kamen den Berichterstattern zwei Ereignisse zu Hilfe, nämlich zum ersten die grosszügige Bereitschaft des Landes Baden-Württemberg, einen Modellversuch (1967) im grosstechnischen Massstab auf der Kläranlage Reutlingen zu finanzieren und zum zweiten die Inbetriebnahme und systematische Untersuchung der Kläranlage Jona (1969-1971), welche eine einwandfreie Abklärung der wesentlichen Fragen bei der P-Elimination mittels Nachfällung gestatteten. Es blieben dann allerdings noch die objektiven und statistisch brauchbaren Unterlagen zur

Beurteilung der Simultanfällung zu ergänzen. Mangels ausreichender Unterlagen mussten noch Erhebungen vorgenommen werden, welche an zwei schweizerischen Anlagen im Jahre 1972 erfolgten.

Der vorliegende Bericht fasst auf Grund von Beobachtungen an in Betrieb stehenden Anlagen den Erfahrungsstand bezüglich P-Elimination zusammen. Er kommt zu einer ebenso eindeutigen Schlussfolgerung wie bereits vor zehn Jahren. Der Fortschritt besteht eigentlich nur in einer Erweiterung der theoretischen Kenntnisse über die Mechanismen und die Kinetik der Reaktionen von PO_4^{3-} im Milieu von Kläranlagen und Schlammstabilisierungssystemen sowie in Beobachtungsreihen, welche den Praktiker heute vielleicht besser überzeugen als damals, obschon sie nur frühere Feststellungen bestätigen.

2. ZUR ZIELSETZUNG DER EFFEKTIVITAET DER P-ELIMINATION

Obschon sich dieser Bericht nur mit den praktischen Erfahrungen und entsprechenden Empfehlungen auseinandersetzen soll, muss einleitend auf den absoluten Wirkungsgrad der verlangten P-Elimination hingewiesen werden, da sich Verfahrenstechnik und Erfolgsforderung nicht trennen lassen. In den Richtlinien der IGKB ist bezüglich P-Elimination gefordert: "Gesamt-P: 85 % Eliminationseffekt und weniger als 1 mg P/l im 24-h-Mittel". Da es für den See aber nicht auf die Konzentrationswerte in den Zuflüssen ankommt, sondern nur auf die Jahresfrachten, die - soweit sie anthropogener Herkunft sind - auch aus einer grossen Zahl von Quellen stammen, welche mit der P-Elimination in Kläranlagen nicht beseitigt werden, ist es offensichtlich, dass die in den Richtlinien für die Reinhaltung des Bodensees festgelegten Konzentrationswerte das absolute Minimum der Forderungen an die anzustrebenden Konzentrationen in Endabflüssen darstellen. Mit anderen Worten heisst dies, dass nur Verfahren ernsthaft diskutiert werden können, welche sowohl von der Theorie her als auch auf Grund praktischer Erfahrungen Gewähr bieten, dass die heute geltenden Forderungen unter keinen Umständen und zu keiner Zeit überschritten werden, wenn sich der ganze Aufwand überhaupt lohnen soll. In dieser Hinsicht ist die Modellrechnung von IMBODEN [3] - trotz aller Vorbehalte die anzubringen sind - aufschlussreich: für einen Beharrungszustand des Sees im Grenzbereich Oligotrophie/Eutrophie (Grundlage: Sauerstoffbilanz des Hypolimnions) müsste eine Verminderung der Gesamtfracht von P um rd. 90 % vorgenommen werden. Nachdem die in grösseren Kläranlagen erfassbare P-Menge bestenfalls ca. 50 % der Gesamtfracht ausmacht, dürfte es klar sein, dass an dieser potentiell möglichen Frachtverminderung nicht noch Abstriche unter dem Vorwand "technisch schwierig", "zu teuer", "zu kompliziert", "noch nicht abgeklärt" usw. vorgenommen werden dürfen. Durch die Tatsache, dass nur Jahresfrachtverminderungen eine Bedeutung besitzen, stellt sich die Frage nach der rationellsten Methode zu einer für das gesamte Einzugsgebiet optimalen Realisierung dieser Forderung. Neben der Wahl des Verfahrens, das die geringsten absoluten Konzentrationen im Endabfluss einer Kläranlage zu erreichen gestattet, kommt angesichts der finanziellen Grenzen auch der Prioritätssetzung hohe Be-

deutung zu. Schon eine einfache Schätzung ergibt, dass für den See am meisten erreicht wird, wenn bei grossen Kanalisationsnetzen und Kläranlagen nach der maximal erreichbaren Elimination gestrebt wird. Einzelanlagen für kleine und kleinste Abwassermengen (z.B. bis zu < 100 - 500 Einwohner) können dagegen zunächst ganz geschont oder mit geringeren Auflagen belastet werden. Verfahrenstechnisch ergibt sich damit für das pragmatische Vorgehen durchaus die Möglichkeit zu einer anpassungsfähigen Politik bei der Durchsetzung des Prinzips einer maximalen und gleichzeitig auch rationellen Entlastung des Sees.

3. ALLGEMEINES ZUR TECHNOLOGIE DER P-ELIMINATION

Da die P-Inkorporation in Biomasse in der biologischen Stufe von Kläranlagen für kommunales Abwasser (Gesamt P-Elimination in Vorklärung und biologischer Stufe maximal 20-30%) völlig unzureichend ist, kommen für hoch wirksame P-Eliminationen nur chemische Verfahren in Frage, die auf der Bildung schwer-löslicher Verbindungen des Phosphats mit den dreiwertigen Kationen des Eisens[1] oder Aluminiums[2] bzw. dem zweiwertigen Calcium[3] beruhen.

Je nach Zugabestelle des Fällmittels im Abwasserreinigungssystem ergeben sich verschiedene Verfahren:

3.1 VORFAELLUNG

Von Vorfällung spricht man, wenn vor der biologischen Abwasseraufbereitung eine chemisch-mechanische Behandlung des Abwassers durchgeführt wird. Die Fällungsmittel werden dem Zufluss zur Vorklärung in einem Mischbehälter zugegeben; nach erfolgter Flockung werden im anschliessenden Vorklärbecken die Fällungsschlämme sedimentiert. Bei bestehenden Anlagen ist Zumischung und Flockung auch behelfsmässig unter Verwendung der Installationen von Vorreinigungsstufen möglich (belüftete Fettabscheider, Vorbelüftungsbecken und dergleichen).

Als Fällungsmittel können alle oben erwähnten Chemikalien eingesetzt werden. Bei Anwendung von Kalk, mit dem die Fällung bei pH ∿11 durchgeführt wird, ist vor dem Eintritt des Abwassers in die biologische Stufe eventuell eine Korrektur des hohen pH-Wertes notwendig (je nach Konzentration des Abwassers, d.h. der CO_2-Produktion in der biologischen Stufe).

3.1.1 Vorteile des Verfahrens

Die wesentlichen Vorteile der P-Elimination mittels Vorfällung liegen darin, dass nur ein Mischungs-Flockungsbehälter als zusätzliches Bauwerk erforderlich ist, sofern nicht sogar die direkte Zugabe des Fällmittels

---

1) Reagenz: saure wässrige Lösung von $FeSO_4Cl$ oder $FeCl_3$
2) Reagenz: wässrige Lösung von $Al_2(SO_4)_3 \cdot 18H_2O$
3) Reagenz: Aufschlämmung von $Ca(OH)_2$

zum Zufluss zur Vorklärung gewählt wird, allerdings unter Inkaufnahme eines geringeren Wirkungsgrades. Ferner wird ein erhöhter Vorkläreffekt durch den Einfluss des Fällmittels sowie eine verbesserte Schlammkonzentrierung (Flockung) erreicht; Adsorption gelöster organischer Abwasserinhaltsstoffe an die Fällungsmittel sind ebenfalls nicht auszuschliessen. Insgesamt ergibt sich eine erhebliche Entlastung der anschliessenden biologischen Stufe (Anwendung des Verfahrens als Uebergangslösung bei überlasteten Kläranlagen). Nach ULMGREN [4] werden in der Vorfällung allein Eliminationsleistungen von 50 - 80 % des Phosphors und 40 - 60 % des organischen Materials erreicht.

3.1.2 Nachteile des Verfahrens

Die P-Elimination muss so gesteuert werden, dass das Verhältnis von verbleibendem Phosphor zu metabolisierbarer organischer Substanz ausreicht, um im anschliessenden Belüftungsbecken die aerobe Fermentation des organischen Materials sicherzustellen. Der Wirkungsgrad des Fällmittels zur P-Elimination ist aufgrund der hohen Konzentration der übrigen Abwasserinhaltsstoffe (Schwebestoffe, gelöste organische Stoffe) ungünstig, d.h. es werden viel höhere Fällmittelmengen als stöchiometrisch notwendig verbraucht.

3.2 SIMULTANFAELLUNG

Das Simultanverfahren - benannt nach der Zugabe des Fällmittels in den Zulauf zum Belüftungsbecken (andere Varianten: direkt ins Belüftungsbecken, zum Rücklaufschlamm, in den Ablauf des Belüftungsbeckens) - wurde von THOMAS [5], [6] vorgeschlagen. Die Phosphatfällung und der Abbau des organischen Materials werden im gleichen Reaktionsraum (Belüftungsbecken) durchgeführt; bei der Zugabe des Fällmittels in den Ablauf des Belüftungsbeckens ist vermutlich das Einlaufbauwerk des Nachklärbeckens sowie der vom Schlamm beanspruchte Raum desselben die wesentliche Reaktionszone. Die von THOMAS veröffentlichten Angaben über die erreichten P-Konzentrationen im Endabfluss biologischer Anlagen mit Simultanfällung schwanken in den Grenzen von 0.6 - 1.8 mg Gesamt-P/l, wobei die niedrigen Werte wegen des P-Transports mit abfliessenden Schwebestoffen nicht leicht erreicht werden.

3.2.1 Vorteile des Verfahrens

Es sind keinerlei Zusatzbauwerke notwendig, und die erforderlichen Einrichtungen (Reservoir zur Aufnahme der Fällmittellösung, Dosierpumpe) lassen sich leicht und kurzfristig installieren.

3.2.2 Nachteile des Verfahrens

Die Verwendbarkeit der Fällmittel ist auf solche beschränkt, die keinen nachteiligen Einfluss auf den Belebtschlamm ausüben. Es kommen daher nur

Fe^{3+} [7] (in Form des gelösten Eisensulfat-Chlorids, $FeSO_4Cl$ oder von $FeCl_3$) und Al^{3+} [8], [9], [10] (in Form des gelösten Aluminiumsulfats $Al_2(SO_4)_3 \cdot 18H_2O$) in Frage. (In einigen Fällen wird auch über die Anwendung des Fe^{2+} (als gelöstes Chlorid, Sulfat) berichtet [11], [12], das aber bei der Abwasserbelüftung zum Fe^{3+} oxydiert wird und als solches wirkt). Der Einfluss des Fällmittels auf die Elimination organischer Restverunreinigungen durch Adsorption ist unbedeutend. Durch das Fällmittel wird die Schlammenge im Belüftungsbecken erhöht, was beim Bau der Nachklärbecken berücksichtigt werden muss, da die Masse des biologischen Schlammes nicht vermindert werden kann, wenn der Reinigungseffekt beibehalten werden soll.

3.3 NACHFAELLUNG

Diese beruht auf einer eigenständigen chemischen Nachbehandlung des mechanisch-biologisch gereinigten Abwassers. Als Fällmittel sind alle für die Phosphatfällung geeigneten Chemikalien anwendbar Eisen(III)-Sulfatchlorid, Eisen(III)-Chlorid, Aluminiumsulfat, Kalk (gelöscht) bzw. Eisen/Kalk-Gemisch [2]. Bezüglich P-Konzentration im Endabfluss lassen sich langfristig leicht Werte um 0.6 mg Gesamt-P/l erreichen.

3.3.1 Vorteile des Verfahrens

Es ist allen Systemen von Reinigungsanlagen nachschaltbar. Verminderungen der Abflussqualität durch Störungen in der biologischen Reinigungsstufe werden in der nachgeschalteten chemischen Behandlungsstufe sehr gut ausgeglichen. Ebenso lässt sich das Abwasser bei vollständigem Ausfall der biologischen Stufe (Revisionsarbeiten) mit der chemischen Nachbehandlung in seiner Qualität erheblich verbessern. Die anorganischen Fällungsschlämme fallen gesondert an und lassen sich als solche weiterverarbeiten (im allgemeinen gute Entwässerbarkeit). Je nach Aufbereitungssystem der organischen Schlämme (Stabilisierung, Pressung) können sie sogar als Konditionierungsmittel für die Nassschlämme verwendet werden.

Bei der Nachfällung mit Kalk (pH $\sim$11) oder mit Kalk/Eisen (pH $\sim$8,8) [2] werden organische Restverunreinigungen und Schwebestoffe im Ablauf der biologischen Stufe zu einem erheblichen Teil durch Adsorption und Flockung zusätzlich eliminiert. Ebenso lässt sich eine starke Verminderung der Bakterienzahlen in den Endabflüssen dank der Flockungsreaktionen feststellen.

3.3.2 Nachteile des Verfahrens

Es ist ein zusätzliches Bauwerk mit Reaktionsraum (Fällung/Flockung) und Nachklärbecken notwendig, das selbstverständlich auch einen entsprechenden Platzbedarf bedingt. Der Schlammanfall bei Einsatz von Kalk ist ziemlich hoch, da die erforderliche Kalkmenge durch die Karbonathärte des Wassers bestimmt wird. Als Faustregel für die P-Fällung mit Kalk bei pH $\sim$11 gilt, dass die $Ca(OH)_2$-Menge ungefähr dem 1,5-fachen Wert der Karbonathärte (als mg $CaCO_3$ gerechnet) entsprechen sollte. Nachteilige Be-

gleiterscheinungen der reinen Kalkfällung sind der hohe pH-Wert und die nachträgliche Bildung von $CaCO_3$ in der Vorflut durch Recarbonisierung mit dem CO_2 der Luft.

4. CHEMISCHE GRUNDLAGEN DER P-ELIMINATION

4.1 PHOSPHATSPEZIES IM ABWASSER

Die Gesamtphosphorkonzentration eines mechanisch vorgeklärten häuslichen Abwassers liegt in der Grössenordnung von 5-10 mg P/l und setzt sich laut Tabelle 1 aus folgenden Spezies zusammen [13]:

Tabelle 1: P-Verbindungen im vorgeklärten häuslichen Abwasser

Phosphat Form	Konzentration	
	mg P/l	Molarität (gmol /l)
Total	10	3.2×10^{-4}
Ortho -	5	1.6×10^{-4}
Tripoly -	3	3.2×10^{-5}
Pyro -	3	1.6×10^{-5}
Organisch	$\lesssim$ 1	$\lesssim 3.2 \times 10^{-5}$

Unter den pH-Bedingungen, wie sie in einem normalen häuslichen Abwasser üblich sind, dürften die verschiedenen Phosphatspezies gemäss dem pH/Konzentrationsdiagramm (Abb. 1) [13] und den Gleichgewichtskonstanten in Tabelle 2 [14] in Form ihrer sauren Anionen bzw. der gelösten (Ca^{2+}) Metallkomplexe vorliegen.

Abbildung 1: pH/Konzentrationsdiagramm typischer Phosphatspezies im Rohwasser

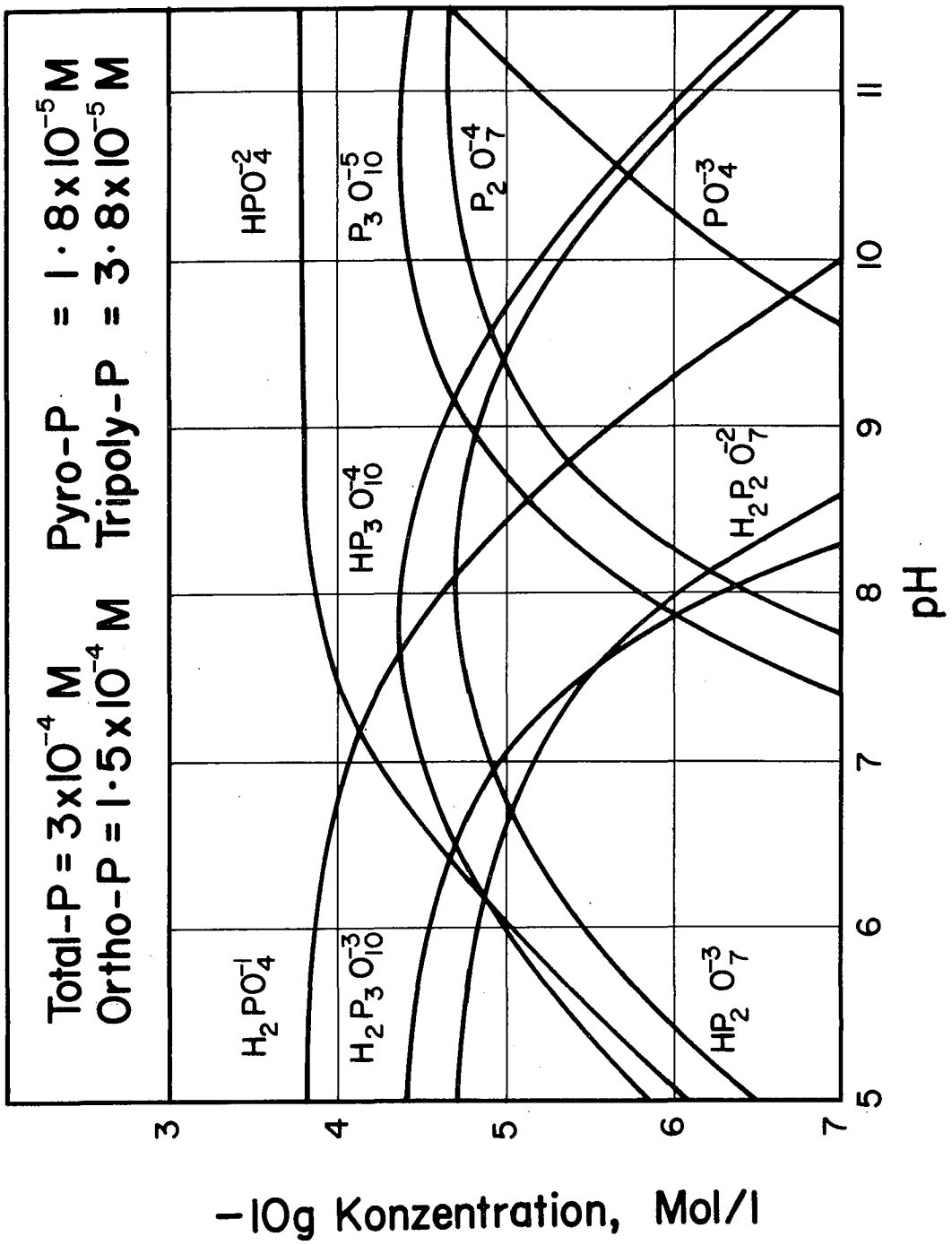


Tabelle 2: Phosphatgleichgewichtskonstanten nach SILLEN u. MARTELL (1964) [14]

Gleichgewicht	log Gleichgewichtskonstante 298° K
$H_3PO_4 \rightleftarrows H^+ + H_2PO_4^-$	- 2,1
$H_2PO_4^- \rightleftarrows H^+ + HPO_4^{2-}$	- 7,2
$HPO_4^{2-} \rightleftarrows H^+ + PO_4^{3-}$	- 12,3
$H_3P_2O_7^- \rightleftarrows H^+ + H_2P_2O_7^{2-}$	- 2,5
$H_2P_2O_7^{2-} \rightleftarrows H^+ + HP_2O_7^{3-}$	- 6,7
$HP_2O_7^{3-} \rightleftarrows H^+ + P_2O_7^{4-}$	- 9,4
$H_3P_3O_{10}^{2-} \rightleftarrows H^+ + H_2P_3O_{10}^{3-}$	- 2,3
$H_2P_3O_{10}^{3-} \rightleftarrows H^+ + HP_3O_{10}^{4-}$	- 6,5
$HP_3O_{10}^{4-} \rightleftarrows H^+ + P_3O_{10}^{5-}$	- 9,2
$Ca^{2+} + PO_4^{3} \rightleftarrows CaPO_4^-$	6,5
$Ca^{2+} + HPO_4^{2} \rightleftarrows CaHPO_4(aq)$	2,7
$Ca^{2+} + H_2PO_4^- \rightleftarrows CaH_2PO_4^+$	1,4
$Ca^{2+} + P_2O_7^{4-} \rightleftarrows CaP_2O_7^{2-}$	5,6
$Ca^{2+} + HP_2O_7^{3-} \rightleftarrows CaHP_2O_7^-$	3,6
$Ca^{2+} + P_3O_{10}^{5-} \rightleftarrows CaP_3O_{10}^{3-}$	8,1
$Ca^{2+} + HP_3O_{10}^{4-} \rightleftarrows CaHP_3O_{10}^{2-}$	3,9
$Ca^{2+} + H_2P_3O_{10}^{3-} \rightleftarrows CaH_2P_3O_{10}^-$	3,9

Im biologischen Teilprozess der Abwasserreinigung werden die Polyphosphate weitgehend in Orthophosphat übergeführt, so dass für die Eliminationsverfahren (Simultan- und Nachfällung) im wesentlichen die Reaktionen dieses Anions mit dem Fällmittel massgebend sind [15].

4.2 SIMULTANFAELLUNG

4.2.1 Fällmittelbedarf

Ueber die erforderlichen Fällmittelmengen bei den in häuslichem Abwasser vorkommenden Konzentrationen von Gesamt-P werden unterschiedliche Angaben gemacht [7], [16], [2]. Leider existieren über die bei der Phosphatfällung im Abwasser ablaufenden Reaktionen keine exakten Untersuchungen. Die Angaben hierzu sind durchwegs hypothetischer Natur. Exakt stöchiometrische Reaktionen zwischen Fällmittel und Phosphat, wie sie für reine Lösungen unter kontrollierten Bedingungen gelten, können mit Sicherheit ausgeschlossen werden [13], [17], [18]. Schwebestoff-Konzentrationen sowie Fremdionen haben einen Einfluss auf den Fällmittelverbrauch, da zwischen diesen und dem Fällmittel ebenfalls Reaktionen (Koagulation, Flockung, Komplexbildung) stattfinden. Die stöchiometrische Berechnung auf Grund der Gesamt-P-Konzentration liefert daher nur eine Angabe für die minimal notwendige Fällmittelmenge. Es ist unwahrscheinlich, dass man mit der stöchiometrisch berechneten oder gar unterstöchiometrischen Fällmittelmenge eine befriedigende P-Elimination erzielen kann [7],[16].

Gemäss den Erfahrungen [2], [19] wird ein auf Gesamt-P berechneter 1,5- bis 2,5-facher Fällmittelüberschuss bei Simultanfällung benötigt.

4.2.2 pH-Verschiebung

Der pH im Belüftungsbecken wird durch die Alkalinität des zufliessenden Abwassers, die biologische Aktivität (Nitrifikation und CO_2-Produktion) und - bei Simultanfällung - durch das Fällmittel bestimmt. Nach den Angaben von MINTON [20] kann man bei Simultanfällung mit Fe^{3+} mit einem Karbonat-Härteverlust von 0,2 frz.H^o/mg Fe^{3+} rechen (bei Anwendung von Al^{3+} entspricht der Karbonat-Härteverlust nach MINTON [20] 0,42 frz.H^o/mg Al^{3+}). Nach den Erfahrungen [19] wird eine Verminderung der Alkalinität (als $CaCO_3$) im wesentlichen durch die biologische Aktivität im Belüftungsbecken verursacht, und zwar in erster Linie durch die beim Abbau gebildete Kohlensäure und im Falle nitrifizierender Anlagen durch die freigesetzten Protonen. In stark gepufferten (20-25 frz.H^o) Abwässern besteht keine Gefahr einer Uebersäuerung. In Abwässern niedriger Härte ($\leq$ 10-15 frz. H^o) können jedoch pH-Werte erreicht werden, die zu einer Störung der biologischen Aktivität führen.

4.2.3 pH-Einfluss auf die P-Fällung

Eine kurzfristige pH-Erniedrigung an der Zugabestelle des Fällmittels, wie sie MINTON [20] beschreibt, wirkt sich eher positiv auf die Fällung

kolloidalen (Fe,Al) PO_4 aus (Löslichkeitsminima $AlPO_4$ bei pH ∿6, $FePO_4$ bei pH ∿5) [18]. Unter den pH-Bedingungen, wie sie normalerweise in Belüftungsbecken herrschen, konkurrieren Hydroxyl- und Phosphation in ihrer Reaktion mit dem Fällmittel. Es sind daher neben verschiedenen Formen (α-,δ -) des Eisenoxidhydroxyds (FeOOH), das flockend wirkt, Eisenhydroxophosphate unterschiedlicher Zusammensetzung $\left[Fe_m(OH)_n(PO_4)_{m-n/3}PO_4^{3-}\right]$ zu erwarten [21].

Beim Einsatz von Al^{3+} dürfte ein ähnlicher Chemismus anzunehmen sein.

4.2.4 Verhalten des Eisenphosphatschlammes im Faulraum

Das Fe^{3+} wird unter den Bedingungen des anaeroben Schlammfaulungsprozesses in die zweiwertige Form (Fe^{2+}) reduziert. Aus der Analogie mit dem von EINSELE [22] postulierten Prozess der Freisetzung von PO_4^{3-} in Seesedimenten bei der Reduktion von Fe^{3+} wurde ein ähnlicher Prozess im Faulraum vermutet. Versuche unter möglichst naturnahen Bedingungen mit einwandfreier P-Bilanzierung haben jedoch gezeigt, dass eine PO_4^{3-} - Freisetzung in Faulräumen nicht erfolgt, welche konventionell zusammengesetzte Schlämme aus kommunalem Abwasser und den in der Simultanfällung gebildeten $FePO_4$-Schlämmen verarbeiten. Völlige Klarheit bezüglich der chemischen Zusammenhänge herrscht nicht, da es sich um ein äusserst komplexes System handelt. Wesentliche Faktoren sind jedoch die Bildung des schwerlöslichen $Fe_3(PO_4)_2$ [Vivianit, Blaueisenerz, Löslichkeitsprodukt nach SINGER [23] 10^{-32}] sowie (dank des immer in ausreichender Konzentration vorhandenen Ammoniums) von $FeNH_4PO_4$, dessen Löslichkeitsprodukt in derselben Grössenordnung wie das des Mg NH_4PO_4 liegt, d.h. um 10^{-13} beträgt.

4.3 NACHFAELLUNG

4.3.1 Fällungsmechanismus

- mit Kalk Ca(OH) bei pH ∿11 und
  1 - 2 mg Fe^{3+} als Flockmittel:

  Die Phosphatfällung mit $Ca(OH)_2$ bei pH um 11 liefert sehr gute Eliminationseffekte, hat jedoch den Nachteil eines hohen Abfluss-pH-Wertes sowie der Recarbonisierung (Ausfällung von $CaCO_3$) durch das CO_2 in der Luft.

  Nach LECKIE und STUMM [17] verläuft die Fällung des Phosphats durch Ca^{2+} als Hydroxylapatit $[Ca_{10}(OH)_2(PO_4)_6]$ in zwei Schritten. Zunächst bilden sich Kristallkeime auf der Oberfläche von Fremdpartikeln (z.B. primär gebildete Calcit-Kristalle). Der zweite Schritt ist das zweidimensionale Kristallwachstum von Apatit an der Oberfläche des Fremdkörpers, das schliesslich in das dreidimensionale Wachstum übergeht. Der geschwindigkeitsbestimmende Schritt (das zweidimensionale Kristallwachstum) ist abhängig von der Art und der Oberflächenkonzentration

heterogener Nukleierungsstellen und wird vernachlässigbar, sobald Hydroxylapatitkerne und damit aktive Wachstumsstellen vorhanden sind. Die Schlammrezirkulation innerhalb eines solchen Fällungssystems (Schlammrückführung aus Sedimentationsraum in Flockungsraum) ist daher ein notwendiger Mechanismus zur Förderung der Apatitbildung.

Spuren von Fluorid (<1 mg/l) katalysieren die Fällung durch Bildung von Fluorapatit, der schwerer löslich ist als Hydroxylapatit. Störungen bei "tieferen" pH-Werten (unter 9) werden durch HCO_3^- und Mg^{2+} [13], [17] verursacht. Während Bikarbonat verzögernd auf das Kristallwachstum des Hydroxylapatits wirkt, verursacht Mg^{2+} die Fällung von leichter löslichem β-Tricalciumphosphat [$Ca_3(PO_4)_2$] und Magnesium-Calciumkarbonat [13].

- mit $Ca(OH)_2$ bei pH 8.8 und 10 mg Fe^{3+}/l:

Mit dieser Methode werden ebenfalls sehr gute P-Eliminationswirkungen erzielt, ohne dass dabei die Nachteile der Fällung mit reinem Kalk auftreten würden. Vom chemischen Standpunkt aus gesehen dürften sich die Reaktionen, wie sie für die Simultanfällung (mit Fe^{3+}) und die Fällung mit Kalk beschrieben wurden, überlagern.

5. BEOBACHTUNGEN DER EAWAG BEI KOMMUNALEN ANLAGEN

Wie einleitend bemerkt wurde, gelangen in diesem Abschnitt die unter Führung der EAWAG im Rahmen des Auftrages der IGKB vorgenommenen Untersuchungen zur Darstellung. Es wird darauf verzichtet, alle experimentellen Einzelheiten zu erwähnen, nur die für die Schlussfolgerungen unentbehrlichen Informationen sind berücksichtigt worden. Ferner wurde Wert auf eine Auswertung nach einheitlichen Gesichtspunkten gelegt, um eine vergleichende Beurteilung zu erleichtern.

5.1 VERSUCHSDURCHFUEHRUNG

In den Jahren 1967-1972 erfolgten Beobachtungen an mehreren Kläranlagen zur P-Elimination sowohl mit dem Simultanverfahren als auch mit den Nachfällungsverfahren. Auf den Klärwerken Reutlingen und Jona wurden die Arbeiten nach einem an der EAWAG aufgestellten Programm auf Grund systematisch aufgebauter Versuchsvorgehen vorgenommen. Die anderen in die Beobachtungen einbezogenen Anlagen wurden ohne jeden Einfluss seitens der Berichterstatter entsprechend den eingefahrenen Bedingungen betrieben. Die einzige Forderung bestand darin, dass die festgelegte Dosierung des Fällmittels möglichst genau kontrolliert und für die Versuchsdauer eingehalten wurde. Das wichtigste Anliegen war eine nicht zu knapp bemessene Beobachtungsdauer sowie eine repräsentative und gut verteilte Zahl von Probenahmen. Die Proben setzten sich grundsätzlich aus Einzelinkrementen zusammen, die über 24 Stunden in Funktion vom Anlagendurchfluss erhoben wurden (Steuerung durch Limnigraphenstation im Anlagenzufluss). Alle Proben wurden mittels Kühlung auf 1-2° C oder Tief-Gefriertechnik konserviert.

5.2 P-ELIMINATION MITTELS SIMULTANFAELLUNG

Versuche mit Simultanfällung (in allen Fällen Fe^{3+} als Fällmittel) wurden an den Kläranlagen Reutlingen, Jona, Münsterlingen, Männedorf und - als Spezialfall - an der Pilot-Volloxidationsanlage in der Versuchsstation Tüffenwies der EAWAG durchgeführt. Im folgenden werden die wichtigsten Versuchsergebnisse tabellarisch zusammengefasst.

5.2.1 Kläranlage Reutlingen

Die Bauwerke dieser Anlage eigneten sich ausgezeichnet dazu, beide Fällungsverfahren (Simultan- und Nachfällung) in Parallelversuchen unter identischen Bedingungen (hydraulische Belastung, Abwasser-Zusammensetzung, Versuchszeit) zu testen.

In Tabelle 5.1 sind die massgebenden Analysenergebnisse von drei mit unterschiedlichen Fällmittelkonzentrationen durchgeführten Versuchsserien mit der Simultanfällung enthalten. Jeder Versuchsperiode (bestimmt durch die geänderte Fällmittelkonzentration) ging eine Einfahrzeit von mindestens 14 Tagen voraus. Leider zeigte sich bei der Auswertung des Datenmaterials, dass die zuflussproportional gesteuerte Fällmittelzugabe nicht einwandfrei funktioniert hatte und die Dosierungen unter den im Programm vorgesehenen Werten lagen. Es kann jedoch an den tatsächlich erreichten Fällmittelkonzentrationen von 4.6, 6.4 und 12.5 mg Fe^{3+} /l Abwasser bzw. den mittleren molaren Fe^{3+} /P-Verhältnissen von 0.5, 0.6 und 1.2 die enge Beziehung zwischen Fällmittelkonzentration und P-Elimination klar erkannt werden. Wie aus Tabelle 5.1 ersichtlich, wurde nur im Versuch Nr. 2 ein befriedigendes Ergebnis bezüglich P-Elimination erreicht, bei dem ein Fe/P-Verhältnis von 1.2, d.h. stöchiometrisch ein Fällmittelüberschuss vorhanden war.

Nebeneffekte:

Der gemischte "biologisch"-anorganische Schlamm der Simultananlage zeigte etwas bessere Absetzeigenschaften als der reine biologische Schlamm der konventionell betriebenen zweiten Stufe. Ein signifikanter Unterschied in der Elimination organischer Verunreinigungskomponenten zwischen dem Simultanfällungssystem und der konventionellen Belebtschlammanlage konnte jedoch nicht festgestellt werden (vgl. Tab. 5.10).

Schlammproduktion:

Tabelle 5.2 enthält eine Zusammenstellung der gemessenen Schlammengen, die aus den einzelnen Verfahrensstufen abgezogen wurden. Obwohl an die Werte wegen messtechnischer Schwierigkeiten nicht allzu grosse Genauigkeitsanforderungen gestellt werden können, zeigen sie doch eindeutig eine erhöhte Produktion durch die Fällung. Bezogen auf den m^3 Abwasser, wird durch die Fällung sowohl bei den Ueberschussschlämmen aus der biologischen Stufe als auch bei den vereinigten primären und sekundären Schlämmen aus der Vorklärung eine starke Erhöhung des spezifischen Schlammvolumens und der spezifischen Trockensubstanzmenge bewirkt.

5.2.2 Kläranlage Jona

Die Gemeinde Jona erstellte mit ihrer Abwasserreinigungsanlage erstmals in der Schweiz das dreistufige System mit separater dritter (chemischer) Behandlungsstufe. Die 2. und 3. Stufe sind kombinierte Becken mit zentralem Reaktionsraum und von diesem durch Tauchwände abgetrennten Nachklärbecken. Nach Verlegen einer provisorischen Dosierleitung zur 2. Stufe konnten in Jona jedoch auch Versuche mit Simultanfällung durchgeführt werden.

In zwei Versuchsperioden wurde der Einfluss von verschiedenen Fällmittel-Konzentrationen (Fe^{3+}) auf die P-Elimination geprüft. Um eine innige Durchmischung des Fällmittels mit dem Abwasser zu erreichen, wurde das Fällmittel direkt dem über eine Dückerleitung dem Belüftungsbecken zufliessenden vorgeklärten Abwasser zugegeben.

Obwohl mit 15 und 20 mg Fe^{3+}/l Abwasser, was einem mittleren molaren Fe^{3+}/P-Verhältnis von 1.6 bzw. 1.7 entsprach, das Fällmittel in ausreichender Konzentration vorhanden war, wurden nur äusserst ungenügende Eliminationsleistungen (Tab. 5.4) erzielt. Eine mögliche Erklärung für diesen geringen Wirkungsgrad ist im Abwasser selbst zu finden. Die Anlage war zur Zeit der Versuchsdurchführung bezüglich organischer Verunreinigungskomponenten sehr schwach belastet. Durch die niedrigen C/P-Verhältnisse von 8.5 bzw. 7.2 war die natürliche P-Elimination durch Inkorporation in Biomasse stark beschränkt und die Anforderungen an die Wirksamkeit der Fällung entsprechend grösser. Höhere Fällmittelkonzentrationen hätten eventuell noch zu einem besseren Resultat geführt, dies wurde jedoch nicht geprüft.

Nebeneffekte:

Eine exakte Beurteilung des Einflusses des Fällmittels auf die zusätzliche Elimination organischer Verunreinigungskomponenten war in Jona nicht möglich. Vergleicht man jedoch die mittleren Abflusskonzentrationen für organischen Kohlenstoff und organischen Stickstoff der konventionell betriebenen 2. Stufe aus den Untersuchungsperioden zur Nachfällung (org. C = 14 mg/l, org. N = 3.4 mg/l, Tab. 5.12, 5.14, 5.16), mit den erhaltenen Werten der beiden Versuche mit Simultanfällung (Tab. 5.4), dann muss eine zusätzliche Reinigungsleistung des Fällmittels ausgeschlossen werden.

Schlammproduktion:

Der Einfluss des Fällmittels auf die Ueberschussschlammproduktion in den beiden Simultanfällungsversuchen lässt sich nur ungefähr durch Vergleich mit der mittleren Ueberschussschlammenge der konventionell betriebenen 2. Stufe ermitteln. Gemäss Tabelle 5.5 wurden durch den Fällmittelzusatz das spezifische Ueberschussschlammvolumen der biologischen Stufe um 6-12 % und ihre spezifische Trockensubstanzproduktion um 26-66 % erhöht.

5.2.3 Kläranlage Münsterlingen

Die Untersuchungsperiode von 31 Tagen mit 21 Probenahmen auf der Kläranlage Münsterlingen wurde mit einer Fällmittelkonzentration von 16 mg Fe^{3+}/l Abwasser durchgeführt. Dies entsprach einem mittleren molaren Fe^{3+}/P-Verhältnis von 1.4. Zugabeort für das Fällmittel war der Abfluss des Belüftungsbeckens, der über eine Dückerleitung dem Nachklärbecken zugeleitet wird.

Die äusserst mangelhafte P-Eliminationsleistung (Tab. 5.4) ist im wesentlichen im hohen Schwebestoffgehalt (im Mittel 28.1 mg SS/l) des Endabflusses begründet. Da an die Kläranlage Münsterlingen eine Mosterei angeschlossen ist und die Untersuchungsperiode in die Zeit der Obstverwertung fiel, ist die Ursache dafür eindeutig auf das bekannte Auftreten von Fadenorganismen (*Sphaerotilus*) im Belebtschlamm zurückzuführen.

Nebeneffekte:

Die Kläranlage Münsterlingen ist ebenfalls eine "einbahnige" Anlage wie Jona. Ein direkter Vergleich der Abflussqualität mit und ohne Simultanfällung war deshalb nicht möglich. Eine anschliessend an den Simultanfällungsversuch durchgeführte Untersuchungsperiode ohne Fällmittel (18 Tage/11 Probenahmen) ergab trotz höheren Zuflusskonzentrationen z.T. beachtlich bessere Abflusswerte und Eliminationsleistungen für org. C und org. N (siehe Tab. 3) als in der Fällungsperiode.

Tabelle 3: Chem. Analysen (Kontrollversuch) ohne Fällmittel, Kläranlage Münsterlingen

Komponente	Zufluss	Abfluss	Elimination (%)
SS mg/l		19.0	
org. C mg/l	104	20.1	85.6
org. N mg/l	10.7	2.2	84.7

5.2.4 Kläranlage Männedorf

Die in doppelter Ausführung vorhandenen Bauwerke der Kläranlage Männedorf ermöglichten in idealer Weise die parallele Versuchsdurchführung mit und ohne Fällmittel.

Die Untersuchungsperiode erstreckte sich über vierzehn Tage mit zehn Probenahmen. Zugabeort für das Fällmittel war der Zufluss (Abfluss Vorklärbecken) zum Belüftungsbecken. Aufgrund der Untersuchungen von AREGGER [9] über die im Tages- und Wochenverlauf auftretenden P-Konzentrationen wird auf der Kläranlage Männedorf mit variablen, den momentan zufliessenden P-Mengen angepassten Fällmitteldosierungen gearbeitet. Dabei werden je nach Tageszeit und Wochentag (vgl. Tab. 5.7) starke Abweichungen vom

Mittelwert erreicht, der für unseren Versuch bei ∿15 mg Fe^{3+} /l Abwasser lag, bzw. einem mittleren molaren Fe^{3+}/ /P-Verhältnis von 1.1 entsprach. Die erreichte mittlere Endabflusskonzentration von 1 mg Ges. P/l war trotz der angestrebten Optimierung der Eisendosierung unbefriedigend hoch (s. Tab. 5.4).

Nebeneffekte:

Ein bedeutender Einfluss des Fällmittels auf die Elimination org. Verunreinigungen kann aufgrund des Vergleichs der Abflusswerte für organischen Kohlenstoff und org. Stickstoff der beiden Linien mit und ohne Fällmittel ausgeschlossen werden.

5.2.5 Volloxidationsanlage

Pilotanlage, Versuchsstation der EAWAG:

Die Versuche mit Simultanfällung unter den Bedingungen des Totaloxidationsverfahrens umfassten drei, jeweils mehrere Wochen dauernde Untersuchungsperioden, in denen drei unterschiedliche Fällmittelkonzentrationen geprüft wurden. Die Versuchsanlage bestand aus zwei gleichen Strassen und gestattete deshalb einen strengen Vergleich von Verfahren mit und ohne Fällmittel. Die Anlagen wurden mit nicht vorgeklärtem Abwasser der Stadt Zürich beschickt. Die Ergebnisse in Tabelle 5.8 zeigen einwandfrei die Abhängigkeit der P-Elimination von der Fällmittelmenge. Während im ersten Versuch mit 7.5 mg Fe^{3+} /l Abwasser bzw. einem Fe^{3+} / P-Verhältnis von 0.41 - bezogen auf die mittlere P-Konzentration - erwartungsgemäss nur ein ungenügender Wirkungsgrad erzielt wurde, ergaben sich mit 15 und 25 mg Fe^{3+} /l Abwasser (Versuch 2 und 3) bzw. mittleren molaren Fe^{3+} /P-Verhältnissen von 0.88 und 1.98 gute bis sehr gute Ergebnisse bezüglich P-Elimination. Die Eisenkonzentration im Abfluss betrug im Mittel für die drei Versuche 0.2,·0.6 und 0.8 mg/l.

Nebeneffekte:

Die Ergebnisse der Parallelanlagen ohne Fällmittel in den drei Untersuchungeperioden lassen einen Einfluss des Fällmittels auf die Elimination von organischem Kohlenstoff bzw. organischem Stickstoff (Tab. 5.8 und 4) ausschliessen.

Die bemerkenswert hohe natürliche P-Elimination ohne Fällmittel (∿44 %) ist wohl in dem grossen molaren C/P-Verhältnis im Anlagen-Zufluss (ca. 81 resp. 136 resp. 137) begründet. Die biologische P-Elimination spielt natürlich auch in den Versuchen mit Fällmitteln eine bedeutende Rolle. Sie erklärt die im Vergleich zu den vorher beschriebenen Anlagen viel bessere Wirkung der Fällmittel.

Tabelle 4: Kontrollversuch ohne Fällmittel, Totaloxidationsanlage EAWAG

Versuch	1			2			3		
Datum	25.8.-14.11.69			20.11.69-24.1.70			26.2.-5.5.70		
Tage/Proben	81 / 24			65 / 28			67 / 20		
	Zufl.	Abfl.	Elim.%	Zufl.	Abfl.	Elim.%	Zufl.	Abfl.	Elim.%
Ges.-P mg/l	10.0	5.0	44.8	9.4	4.2	44.6	7.0	3.7	38 (?)
org.C mg/l	315	9.0	95.5	495	10.5	95.5	371	9.9	94.4
org.N mg/l	20.7	1.0	94.4	22.9	1.5	91	18.4	1.4	90.2

5.3 P-ELIMINATION MITTELS NACHFAELLUNG

Systematische Daten über die P-Elimination mittels Nachfällung liegen nur aus den Experimenten auf der Kläranlage Reutlingen und aus dem streng kontrollierten Betrieb der Kläranlage Jona vor. Beide Anlagen besitzen die gleichen technischen Einrichtungen für die dreistufige Abwasserreinigung, nämlich anschliessend an die konventionellen mechanischen und biologischen Stufen ein separates drittes Bauwerk (Typ Cyclator, Lurgi) für die chemische Nachfällung des Phosphats (in Reutlingen allerdings nur für eine Nachflockung ohne spezielle Zielsetzung der P-Elimination konzipiert).

5.3.1 Kläranlage Reutlingen

Im Laufe von drei Untersuchungsperioden wurden folgende Verfahrenstechniken geprüft:

1) gemischte Fällung mit Kalk + Eisen bei pH = 8.8-9 und den in Tab. 5.10 angegebenen effektiven Fällmittelkonzentrationen (2 Versuche).

2) Fällung mit Kalk allein bei pH ∿11 und Flockung des Schlammes mit 1-2 mg Fe^{3+} /l Abwasser.

Wie aus Tabelle 5.10 ersichtlich, wurde mit mittleren Gesamt-P-Konzentrationen von 1.6 bzw. 1.2 mg P/l im Endabfluss der beiden Experimente nach dem Kalk-Eisen-Verfahren (Versuche 1 und 3) nur ein ungenügender Eliminationseffekt erreicht; dagegen entsprach das Ergebnis des Verfahrens mit reiner Kalkfällung (Versuch 2) bei pH ∿11 (0.6 mg P/l E.Abfl.) durchaus den Erwartungen.

Während die Zugabe der Kalksuspension über eine pH-Messung im Abfluss des Cyclators gesteuert wurde und trotz erheblicher technischer Schwierigkei-

ten bedingungsgerecht vorgenommen werden konnte, ergab die Auswertung der Betriebsprotokolle (analog wie bei den Simultanfällungsversuchen), dass die zuflussproportional gesteuerte Dosierung für die Fe^{3+}-Lösung nicht einwandfrei gearbeitet hatte. Die Ursache für die unbefriedigenden Ergebnisse der Versuche 1 und 3 lässt sich daher mit den wesentlich unter dem Soll-Wert (10 mg Fe^{3+} /l) liegenden, effektiv erreichten Fe^{3+}-Konzentrationen (Tab. 5.10) erklären.

5.3.2 Kläranlage Jona

Die umfangreichen systematischen Versuche auf der Kläranlage Jona umfassten die folgenden Verfahrenstechniken:

a) Fällung mit Eisen und Kalk bei pH 8.8-9
(drei Untersuchungsperioden, N° 1, 6,7);

b) Fällung mit Kalk bei pH um 11 und 1-2 mg Fe^{3+} /l
zur Flockung des Schlammes (drei Untersuchungsperioden, N° 2, 4, 8);

c) Fällung mit Kalk bei pH um 11 und Flockung des Schlammes mit Polyelektrolyt (eine Untersuchungsperiode, N° 3);

d) Fällung mit Eisen allein (drei Untersuchungsperioden, N° 5, 9a, 9b).

Die automatische Kalkdosiereinrichtung erwies sich anfänglich als äusserst störanfällig und führte wegen der erforderlichen manuellen Nachdosierungen zu einer erheblichen Mehrbelastung des Anlagenpersonals. Die Störung wirkte sich besonders auf die Versuche 2 und 4 (vergl. Tab. 5.14) mit reiner Kalkfällung negativ aus. Der Versuch 4 musste schliesslich wegen Feuchtigkeit im Kalksilo und vollständiger Blockierung der Kalkzufuhr vorzeitig abgebrochen werden. Nach der Behebung der festgestellten technischen Mängel und der Installation einer provisorischen Ueberdachung des Kalksilos zum Schutz gegen Feuchtigkeit, traten keinerlei Schwierigkeiten an der Kalkdosierungseinrichtung mehr auf, und die folgenden Versuche 6, 7 und 8 zeichneten sich durch einen ruhigen Verlauf aus.

Bei vergleichbaren Gesamt-P-Konzentrationen im Abfluss der biologischen Stufe der Anlagen in Reutlingen und Jona wurden in Jona mit dem kombinierten Kalk-Eisen-Verfahren wesentlich bessere und durchaus zufriedenstellende Resultate erzielt (s. Tab. 5.12). Der Grund muss darin gesehen werden, dass in Jona die gewählten Fällmittel-Konzentrationen mit grösserer Genauigkeit eingehalten werden konnten als in den entsprechenden Versuchen auf der Kläranlage Reutlingen.

Die besten Abflusswerte wurden jedoch sowohl in Reutlingen (Versuch 2) wie bei dem in Jona ohne Störungen verlaufenen Versuch 8 (Tab. 5.14) mit der reinen Kalkfällung bei pH ∿11 erhalten.

Ueberrascht hat zunächst das schlechte Ergebnis des Versuchs 3 (Tab. 5.14) mit reiner Kalkfällung und Flockung des Schlammes mit Polyelektrolyt (TF5, BASF). Durch den Einsatz dieses Flockmittels entstand jedoch ein

derart kompakter Schlamm, dass eine Verminderung an freier Oberfläche eintrat und das Aufwachsen des Ca-Apatits auf Primärkeimen stark störte. Vermutlich wurde dieser Effekt durch die Adsorption des Polyelektrolyten an freien Oberflächen noch verstärkt.

In den Nachfällungsversuchen 5, 9a und 9b (Tab. 5.16) mit Eisen (Fe^{3+}) wurde nur eine ungenügende P-Elimination erreicht. Ein Vergleich der P-Eliminationsleistungen und der mittleren molaren Fe^{3+} /P-Verhältnisse (Tab. 5.16 bzw. 5.17) dieser Versuche mit den P-Eliminationsleistungen und den mittleren molaren Fe^{3+} /P-Verhältnissen der Versuche 10a und 10b (Tab. 5.4 bzw. 5.6), zeigen jedoch eindeutig die bessere Ausnützung des Fällmittels im Nachfällungssystem, wo störende Einflüsse weitgehend ausgeschaltet sind.

5.3.3 Nebeneffekte

Bei allen Versuchen zur Nachfällung konnten zum Teil erhebliche Verbesserungen des Endabflusses festgestellt werden, was auf die Mitfällung und Adsorption partikulärer und gelöster Abwasserinhaltsstoffe durch den Fällungsschlamm zurückzuführen ist.

Bezogen auf den Abfluss der biologischen Reinigungsstufe ergaben die beiden hinsichtlich P-Elimination erfolgreichen Nachfällungsverfahren eine zusätzliche Elimination an organischem Kohlenstoff resp. Stickstoff von (bezogen auf den Abfluss der biologischen Stufe):

a) - Nachfällung mit Kalk + Eisen:	15-28 % org. C
	29-48 % org. N
b) - Nachfällung mit Kalk:	42-48 % org. C
	43-48 % org. N

Diese ergänzende Reinigungsleistung der III. Stufe führte zu sehr gleichmässigen Abflusskonzentrationen der einzelnen Komponenten. Störungen in der biologischen Reinigungsstufe (z.B. Schlammauftrieb) konnten ohne Schwierigkeiten mit der Nachfällung abgefangen werden.

Beim Verfahren mit reiner Kalkfällung wird meist eine erhöhte Schwebestoffkonzentration im Abfluss festgestellt. Die Ursache für diese Erscheinung ist die Bildung von $CaCO_3$ in feinkristalliner Form an der Grenzfläche Wasser-Luft, da bei dem hohen pH-Wert Calciumionen im Abwasser mit der Luft-Kohlensäure Calciumcarbonat bilden. Es handelt sich im wesentlichen um reine Kalkkristalle, was schon von den sehr niedrigen Abflusskonzentrationen von organischen Restverunreinigungen (org. C und org. N) bestätigt wird.

5.3.4 Schlammproduktion

Tabelle 5.18 enthält eine Zusammenstellung der volumetrischen und gewichtsmässigen Ueberschussschlamm-Produktion der in Frage kommenden

Nachfällungsverfahren, wie sie in den einzelnen Versuchen gemessen wurden. Zum Vergleich sind ebenfalls die Ueberschussschlammproduktionen der biologischen Stufe aufgeführt. Es sei hier wieder darauf hingewiesen, dass an die Genauigkeit dieser Information wegen messtechnischer Schwierigkeiten nicht allzu grosse Anforderungen gestellt werden können.

Die ausserordentlich hohe Schlammproduktion in der biologischen Stufe der Kläranlage Reutlingen im Versuch No. 2 ist auf eine vermehrte Zufuhr von Faulwasser aus der Schlammfaulung zurückzuführen.

Erwartungsgemäss lieferte das Verfahren mit reiner Kalkfällung gewichtsmässig den grössten Schlammanfall. Bei einwandfrei arbeitender zweiter Stufe, d.h. bei nur geringem Schwebestoffgehalt des biologisch gereinigten Abwassers, muss er etwas mehr als dem Aequivalent der Karbonathärte entsprechen, was mit unseren Messungen in Jona übereinstimmt (Karbonathärte des Abflusses der biologischen Stufe in Jona ca. 20 frz.H^{o} entsprechend 200 g $CaCO_3/m^3$, Schlammanfall in Kalkfällung ca. 270 g/m^3; von der Kläranlage Reutlingen liegt keine Härtebestimmung des Abflusses der biologischen Stufe vor).

Die Ueberschussschlämme beider Nachfällungsverfahren (Kalk + Eisen und Kalk allein) zeigen sehr gute Absetzeigenschaften und lassen sich nach Eindickung ohne Schwierigkeiten durch Pressung zu festen Schlammkuchen entwässern. Im Schlammverarbeitungssystem mit aerober Stabilisierung der "organischen" Schlämme (Primärschlamm + Ueberschussschlamm der biologischen Stufe), wie es in Jona praktiziert wird, erwiesen sich die Nachfällungsschlämme als ausgezeichnete Konditionierungsmittel für die stabilisierten organischen Schlämme. Die Absetzeigenschaften und die Pressbarkeit des organischen Schlammes konnten durch Mischen mit dem Schlamm der dritten Stufe erheblich verbessert werden. Aerobe Schlammstabilisierung und Nachfällung bilden daher eine sehr zweckmässige Verfahrenskombination in einem Reinigungssystem für kommunales Abwasser.

6. INFORMATIONEN VON WEITEREN P-ELIMINATIONSANLAGEN

In diesem Abschnitt sind einige brauchbar scheinende Informationen über P-Eliminationen im praktischen Betrieb aus dem kontinentalen Europa vereinigt. Leider sind unter den zahlreichen Veröffentlichungen zu diesem Thema nur wenige vorhanden, aus denen zweifelsfrei hervorgeht, wie die Daten gewonnen wurden und welcher Wert ihnen aus methodischen und statistischen Gründen überhaupt zukommt. Die nachstehende Uebersicht berücksichtigt in erster Linie Angaben von Anlagen, die aus eigener Kenntnis der Berichterstatter ungefähr vergleichbare Voraussetzungen bezüglich Abwassercharakter aufweisen. Die Ergebnisse einiger Autoren zur P-Elimination, nach Verfahrenstechniken geordnet, sind in tabellarischer Form in Tabelle 6.1 - 6.3 dargestellt.

6.1 SIMULTANFAELLUNG

- mit Fe^{3+} als Fällmittel:

THOMAS [24] erreichte mit dem Einsatz von Eisen(III) als Fällmittel sehr gute P-Eliminationsleistungen an der kommunalen Kläranlage Uster (Kt. Zürich), obwohl während der ersten Untersuchungsperiode nur ein molares Fe^{3+} /P-Verhältnis von 0.6 vorhanden war. Die Probenahmen erstreckten sich über zwei Beobachtungsperioden von einem Jahr bzw. 5 Monaten. Leider geht aus der Arbeit nicht hervor, aus wieviel Einzeluntersuchungen sich der angegebene Mittelwert ergibt. Der gleiche Autor [7] prüfte ebenfalls auf der Kläranlage Männedorf (Kt. Zürich) die Abhängigkeit der P-Elimination von der Fällmittel-(Fe^{3+})-Konzentration. Mit molaren Fe^{3+} /P-Verhältnissen von 1.17 bzw. 1.53 wurden Eliminationsleistungen von 87.9 bzw. 89.0 % erzielt, bezogen auf das mechanisch vorgeklärte Abwasser. Es wird in dieser Arbeit besonders auf die vorfällende Wirkung des Fe-haltigen Ueberschussschlammes aus der biologischen Stufe der Anlage im Vorklärbecken hingewiesen. Die Beobachtungsperiode umfasste nur 7 bzw. 4 Tage. Die Probenahme erfolgte während des Tages in unregelmässigen Abständen, offenbar als Einzelschöpfproben. Die Angabe des Gesamt-P-Wertes in Tabelle 6.1 beruht auf 4 bzw. 5 Einzelangaben. Auf Grund der Art der Probenahme, der Beobachtungsdauer und der Anzahl Einzelwerte für Gesamt-P erscheinen die Angaben dieser Arbeit wenig repräsentativ für die Beurteilung des Verfahrens. In einer neueren Arbeit berichtet THOMAS [25] über die Kontrolle der P-Elimination durch Simultananfällung mit Fe^{3+} an einer ganzen Anzahl weiterer Kläranlagen im Kanton Zürich. Zum Teil wurde eine grössere Zahl von Proben untersucht, jedoch geht aus der Arbeit leider nicht hervor, auf welche Art die Proben erhoben wurden und über welche Beobachtungsdauer die Probenahmen verteilt waren.

Interessant sind in diesem Zusammenhang die Ergebnisse der Untersuchungen von LEUMANN [16] z.T. an den gleichen Abwasserreinigungsanlagen, die von THOMAS beobachtet worden waren. Die von diesem Autor gemessenen (Gesamt-P)-Abflusswerte weichen in drei von vier vergleichbaren Fällen nicht unerheblich von den durch THOMAS [25] gemachten Beobachtungen ab. Die Arbeit von LEUMANN fasst zwar Zahlen von Beobachtungen aus 5 Simultanfällungsanlagen zusammen, deren Wert aber mangels entscheidender Kriterien (Art der Probenahme, Streuungen etc.) nicht leicht beurteilt werden kann. In Tabelle 6.1 wird auf die Angaben dieses Autors zurückgekommen. Unklar bleibt in der Arbeit von LEUMANN [16], auf Grund welcher Unterlagen er in der Zusammenfassung behauptet, dass die erzielten Eliminationsraten den Anforderungen der Eidgen. Richtlinien von 1967 zu genügen vermöchten. Die veröffentlichten Zahlen (Ortho-P, Gesamt-P) liegen, bis auf einen Einzelwert, wesentlich über den Forderungen.

- mit Al^{3+} als Fällmittel:

AREGGER [9] (Tab. 6.1) führte auf der Kläranlage Männedorf (Kt. Zürich) Vergleichsuntersuchungen mit Al^{3+} und Fe^{3+} als Fällmittel durch und fand

die vollkommene Gleichwertigkeit beider Metallionen bezüglich ihrer Fällwirkung auf Phosphat bei gleicher molarer Dosierung.

AREGGER konnte mittels Anpassung der Fällmittelmengen an die Phosphatfracht die bereits von ACHRAN und HOGUE [8] gemachte Beobachtung bestätigen, dass sich dabei verbesserte Abflussqualitäten bezüglich P-Gehalt erreichen lassen.

Die Angaben AREGGERS über die Relation Fällmittelmenge/P-Elimination beruhen leider auf Werten von jeweils nur einer einzigen 24-Stdn.-Mischprobe und haben den Nachteil, dass nur der gelöste Gesamtphosphor im Ablauf analysiert wurde, während die Zulaufwerte den gelösten und ungelösten Gesamtphosphor berücksichtigen. Dadurch werden die Eliminationsleistungen natürlich zu günstigen Werten verschoben. Immerhin lässt sich aus den Angaben entnehmen, dass durch übermässige Fällmittelkonzentrationen die Eliminationsleistungen nicht weiter erhöht werden können.

6.2 NACHFAELLUNG

- mit $Ca(OH)_2$

ULMGREN [26] erzielte durch Nachfällung mit Kalk $Ca(OH)_2$ in einer Anlage mit direkter biologischer Reinigung des Rohabwassers einen P-Eliminationseffekt von 95 % (Tab. 6.2). Leider stützen sich diese Angaben jedoch auf die Analysenwerte von nur 2 (!) 24-Std.-Sammelproben.

In einem, durch die Umstände gegebenen, einschränkenden Rahmen sind an dieser Stelle auch die Erfahrungen mit der Anlage South Tahoe (Californien) zu erwähnen, da sie einen guten Einblick in die Variabilität eines (sehr weit getriebenen) Eliminationsprozesses geben. Prozess: Nachfällung mit Kalk (pH 11, Flockung mit org. Polymer) und anschliessende Schnellfiltration und Vor-Koagulation (mit Al^{3+}). Innerhalb eines Monats (tägliche Kontrolle) ergaben sich [27]:

% Tage	mg P/l im Endabfluss unterschritten
100	0,27
80	0,12
50	0,06

Langfristig wird für diese Anlage folgende Wirkung bezüglich Konzentrationsabnahme des Ges.-P angegeben:

Abfluss Vorklärung	mg Ges.-P/l	9
Abfluss biologische Stufe	mg Ges.-P/l	6
Abfluss Nachfällung	mg Ges.-P/l	2
Abfluss nach Filtration	mg Ges.-P/l	0,1

- mit Al^{3+}

Von ULMGREN [26] werden auch Angaben über den Einsatz von Al^{3+} im Nachfällungsprozess gemacht und von sehr guten Ergebnissen berichtet. Hier beruht der Mittelwert in Tabelle 6.2 in einem Fall auf einer sicheren Grundlage von 40 Einzeldaten.

6.3 VORFAELLUNG (DIREKTFAELLUNG)

- mit Al^{3+} (als $Al_2(SO_4)_3 \cdot 18\ H_2O$) (Tab. 6.3)

Versuche von HÖKERVALL [28] zur P-Elimination an zwei Kläranlagen der Stadt Stockholm ergaben bei Behandlung des Rohwassers mit Al^{3+} erstaunlich hohe Eliminationsleistungen von ∿92 %, mit Abflusswerten von 0.5 mg P/L. Aehnliche Angaben werden auch von ULMGREN [26] gemacht, der das gleiche Fällmittel in einem zweistufigen (mechanisch-chemischen) Abwasserreinigungssystem einsetzte, was dann als Direktfällung bezeichnet wird. Etwas weniger gute Ergebnisse erhielt ZERRES [29] bei seinen Versuchen zur Vorfällung des Phosphors mit Al^{3+}. Zwar waren die erzielten Mittelwerte der Ges.-P-Konzentration im Endabfluss der biologischen Stufe (0.6 mg P/l) sehr befriedigend. Die grosse Variationsbreite innerhalb nur 15 Messtagen von rd. 0.2 mg P/l bis 2.7 mg P/l, welche auf die in Anlagenzuflüssen immer stark schwankenden P-Konzentrationen zurückgeführt werden, ist für die Praxis jedoch nicht annehmbar. Bezogen auf nicht vorgeklärtes Abwasser betrug in der kurzen Beobachtungszeit die P-Frachtabnahme denn auch nur 88 %.

- mit $CaO(FeCl_3$

BISHOP [30] beschreibt ein chemisches und physikalisches Abwasserreinigungsverfahren (ohne biol. Stufe), bei dem anschliessend an die Fällungs/Flockungsstufe das Wasser noch filtriert und über Ionenaustausch und Kohlefilter weiter gereinigt wird. Bei Versuchen an einer Pilotanlage wurden in der chemischen Stufe durch Fällung mit CaO und Flockung mit Fe^{3+} P-Eliminationsraten von ∿97 % erreicht.

7. HINWEISE AUF NEUE KOMBINATIONSTECHNOLOGIEN ZUR P-ELIMINATION

Zur Zeit liegen keine Hinweise für grundsätzlich neue P-Eliminationsverfahren vor, und es ist von der Sache her auch nicht zu erwarten, dass technisch und oekonomisch brauchbare neue Reaktionen in absehbarer Zeit zu nutzbaren Verfahren ausgearbeitet werden. Hingegen ist der Weg zur Ausnutzung von an sich bekannten Verfahrensschritten in neuen Kombinationen noch für viele Vorschläge offen. Es scheint wichtig, am Schluss dieses Berichtes einen solchen Alternativvorschlag anzufügen, da er experimentell und technisch durchgeprüft ist und in vieler Hinsicht attraktiv erscheint. Insbesondere zeigen die Ergebnisse, dass die im 2. Kapitel gesetzten Ziele der P-Elimination auch auf anderem Wege als mit der Nach-

fällung zu erreichen sind. Es braucht nicht betont zu werden, dass alternative Technologien in jedem Fall erwünscht sind.

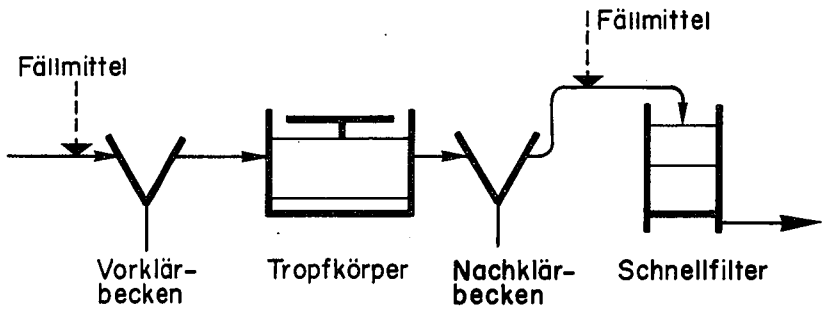
Nachstehend wird hierzu ein Beitrag von M. BOLLER, Abt. für Ingenieurwissenschaften der EAWAG angefügt.

7.1 P-ELIMINATION MITTELS FLOCKUNGSFILTRATION

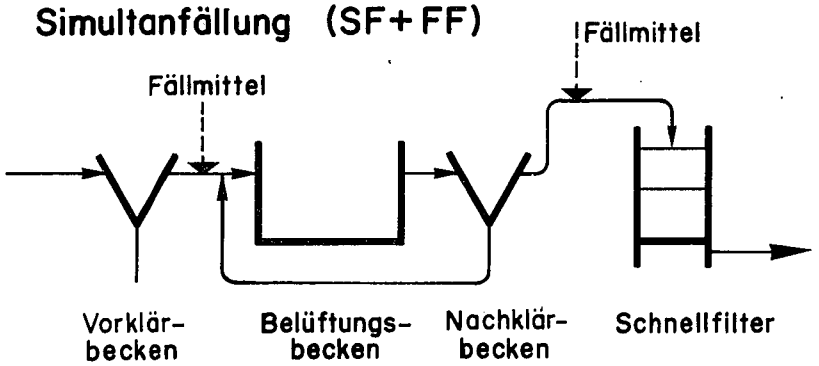
Die EAWAG hat in den Jahren 1974 und 1975 umfangreiche Untersuchungen über die P-Elimination im häuslichen Abwasser mittels Flockungsfiltration (Zugabe von Fällungs- und Flockungschemikalien vor der Filterpassage) im Pilotmassstab durchgeführt. Es wurden dazu zwei verschiedene Verfahrenskombinationen (Abb. 2) geprüft, die alle sehr gute Ablaufqualitäten bezüglich Gesamt-P zu liefern vermochten.

Abbildung 2

a) Flockungsfiltration in Kombination mit Vorfällung und biologischer Reinigung in Tropfkörpern (VF+FF)



b) Flockungsfiltration in Kombination mit Simultanfällung (SF+FF)



Die Betriebsbedingungen für die Flockungsfiltration sind für die zwei untersuchten Fälle in Tabelle 7.1 zusammengestellt.

Tabelle 7.1

Verfahrens-kombination	Biologische Reinigung	Durchfluss l/h	Filtergeschwindigkeit m/h	Filteraufbau						
				Kolonnen-Durchmesser cm	Bims		Anthrazit		Sand	
					Ø mm	L m	Ø mm	L m	Ø mm	L m
VF + FF	Tropfkörper-anlage	4.600	11.5	71	-	-	1.6-2.5	0.90	0.7-1.2	0.25
SF + FF	Nitrifizierende Belebtschlammanlage	470	15	20	2.5-3.5	0.75	1.6-2.5	0.60	0.7-1.2	0.20
					-	-	1.6-2.5	1.10	0.7-1.2	0.30

Als Fällungs- und Flockungsmittel wurde Fe^{3+} in Form einer Eisenchlorid- oder Eisensulfatlösung eingesetzt. Das Vermeiden frühzeitiger Durchbrüche von Feststoffen (meist Eisenhydroxyde) konnte mit dem Einsatz eines nichtionogenen Polyelektrolyten (PE) in geringen Konzentrationen verhindert werden. Die Dosierungskonzentrationen wie sie bei den einzelnen Verfahrenskombinationen angewandt wurden, sind aus Tabelle 7.2 ersichtlich.

Tabelle 7.2

Verfahrens-kombination	Vorklärung		Biologie	Filtration	
	$mgFe^{3+}/l$	mg PE/l	$mgFe^{3+}$ /l	$mgFe^{3+}$ /l	mgPE/l
VF + FF	20	1.2	-	4.0	0.2
SF + FF	-	-	13.5	2.5	0.1

Die Kombination "Vorfällung-Biologie-Flockungsfiltration" wird am ehesten zur Anwendung kommen, wo überlastete Belebtschlammanlagen durch Vorfällung entlastet werden oder in Tropfkörperanlagen, in denen die Simultanfällung nicht möglich ist.

Im Vergleich zu den konventionellen einstufigen P-Eliminationsverfahren bringt die Flockungsfiltration den Vorteil sehr stabiler Ablaufqualität und geringer Empfindlichkeit auf hydraulische Stossbelastungen. Die Fäl-

lungsverfahren in Kombination mit Flockungsfiltration vermögen Schmutzstoffkonzentrationen zu erzielen, die mit einstufigen Fällungsverfahren nicht oder nur mit höherem Chemikalieneinsatz erreicht werden.

Tabelle 7.3 zeigt die mit den zwei untersuchten Verfahrenskombinationen erreichten Ablaufqualitäten.

Tabelle 7.3

Verfahrens-kombination	Anzahl Versuche	V_F m/h	Zulauf Filter mg/l						Ablauf Filter mg/l				
			TSS	TSS*	TOC	DOC	P_{tot}	P_{gel}	TSS	TOC	DOC	P_{tot}	P_{gel}
VF + FF	6	11.5	22	33	17	9	1.10	0.60	5	10	8	0.32	0.24
SF + FF	23	15	13	20	12	9	1.43	0.74	3	9	8	0.38	0.27

TSS* = Ungelöste Stoffe im Ablauf Biologie
+ Fällungs- und Flockungsprodukte

Parallel zu den Flockungsfiltrationsversuchen in Kombination mit Simultanfällung wurde die Abwasserfiltration auch ohne Chemikalieneinsatz geprüft. Die partikulären Substanzen, besonders der partikuläre Phosphor, wurden bei beiden Systemen in gleichem Masse entfernt. Der gelöste Anteil des Phosphors hingegen passiert den Filter ohne grosse Veränderung. Je nach Leistung des vorgängigen P-Eliminationsverfahrens und des resultierenden Verhältnisses von P partikulär zu P gelöst wird es Schwierigkeiten bereiten, ohne Fällmitteleinsatz bei der Filtration den Grenzwert von 1 mg Gesamt-P/l in 80 % aller Fälle einzuhalten.

Die Ergebnisse der Parallelversuche mit und ohne Chemikaliendosierung zum Filtereinlauf sind in Tabelle 7.4 zusammengefasst. Zusätzlich wird als Mass der Streuung der Einzelwerte die Standardabweichung angegeben.

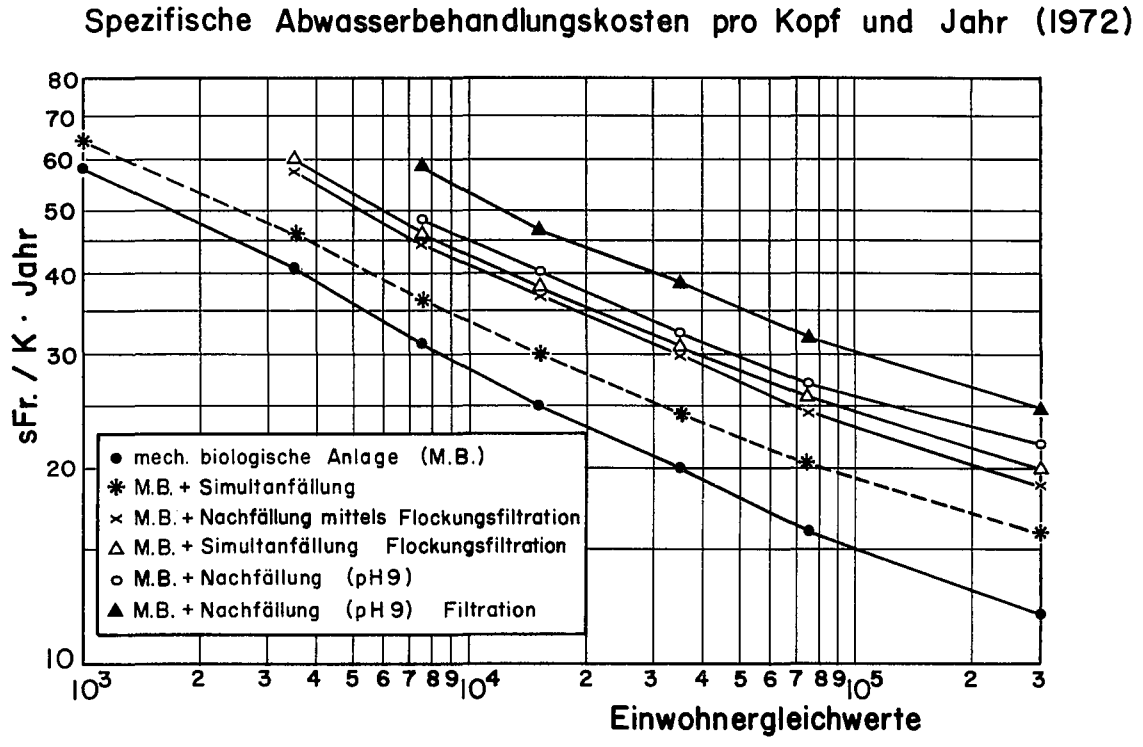
Tabelle 7.4 Ablaufqualität nach Filtration

	mit Fe^{3+} und PE		ohne Fe^{3+}	
	mg/l	% *	mg/l	% *
Pges	0.36 ± 0.25	78	0.80 ± 0.45	45
Pgel	0.27 ± 0.22	66	0.62 ± 0.41	19
TOC	10.4 ± 1.0	29	10.6 ± 1.6	24
DOC	8.4 ± 1.0	10	8.6 ± 1.1	5
TSS	2.4 ± 1.7	80	2.4 ± 1.1	80
Filter-laufzeit in Stunden	16		71	

* bezogen auf Zulauf Filteranlage

Eine Schätzung der Jahreskosten (Amortisation und Betrieb) zeigt, dass die Flockungsfiltration im Anschluss an Vor- oder Simultanfällung im Vergleich zur Nachfällung bestehend aus Misch-, Flockungs- und Sedimentationseinheiten gleiche bis geringere Kosten verursacht (Abb. 3).

Abbildung 3



7.2 BEURTEILUNG DER RESULTATE

Die Flockungsfiltration als Nachbehandlungsstufe in Kombination mit Simultanfällung bzw. Vorfällung vermag die Restbelastung an Phosphor je nach Chemikaliendosierung bis 80 % herabzusetzen. Unter schweizerischen Verhältnissen wird eine mittlere Abflusskonzentration von weniger als 0.4 mg Ges.-P pro Liter erreicht. Neben der weitgehenden Phosphorelimination bieten die Verfahrenssysteme mit Flockungsfiltration den Vorteil stabiler Abflussqualität in bezug auf die partikulären Inhaltsstoffe. Die zusätzlichen Jahreskosten der Flockungsfiltration betragen in der Grössenordnung 25 % der Kosten der mechanisch-biologischen Reinigung samt Simultanfällung und Schlammbehandlung. Die Erfahrung der EAWAG beschränkt sich auf Versuche im halbtechnischen Massstab und soll durch Demonstration im technischen Massstab erhärtet werden, bevor die vorgeschlagene Verfahrenskombination zur allgemeinen Anwendung gelangt. Die langjährige Erfahrung in England mit Abwasserfiltration zum Zwecke der Suspensatentfernung lässt allerdings keine unüberwindbare Betriebsprobleme erwarten.

8. S C H L U S S F O L G E R U N G E N

Wenn man die vorstehend geschilderten, praktischen Erfahrungen mit den verschiedenen Techniken der P-Elimination den, aus limnologischen Gründen zu fordernden, Wirkungsgraden der P-Elimination aus Abwässern gegenüberstellt, ergeben sich folgende Feststellungen:

I.

Die heute möglichen, theoretischen Berechnungen über die Phosphorbilanz des Bodensees, und die effektiven Beobachtungen über die bis zum Abschluss dieses Berichtes noch andauernden Zunahmen seines P-Inhaltes decken sich mit der These, dass die anthropogene Belastung mit Phosphor auf Grössenordnungen zurückgeführt werden muss, welche vor rund 40 Jahren herrschten, wenn eine Rückentwicklung in Richtung der Oligotrophie erreicht werden soll. Die Tatsache, dass nur ein Teil der im See physiologisch mobilisierbaren P-Last von Kläranlagen erfasst und eliminiert werden kann, führt zur

Schlussfolgerung Nr. 1:

Da der Sinn der P-Elimination nur erfüllt wird, wenn dadurch eine weitere Verschlechterung verhindert und die von der Bevölkerung erwartete Zustandsverbesserung des Sees mit guter Wahrscheinlichkeit verwirklicht werden kann, ist der benötigte Aufwand nur vertretbar für Verfahrenstechniken, welche den limnologischen Forderungen an die P-Elimination voll entsprechen.

II.

Nach heutigen Kenntnissen ist bei optimaler Verfahrenstechnik der P-Elimination aus Abwässern die erreichte Frachtverminderung in den Seezuflüssen gerade an der Grenze dessen, was zu einer ins Gewicht fallenden Verkleinerung des gesamten P-Inputs in den See erwartet werden kann. Die derzeitigen Richtlinienwerte der IGKB stellen mit grösster Wahrscheinlichkeit die Minimalforderungen dar, welche sinnvollerweise gemäss Schlussfolgerung Nr. 1 akzeptiert werden können. Dabei ist nochmals zu betonen, dass es fraglich ist, ob mit den heute festgelegten Werten der Richtlinien ($\leq$ 1 mg Ges.-P/l im 24 h-Mittel und $\eta \geq 85$ %, bezogen auf vorgeklärtes Abwasser) der gewünschte Erfolg der See-Sanierung mittels einer Verminderung des derzeitigen P-Angebotes zu gewährleisten ist. Hieraus ergibt sich:

Schlussfolgerung Nr. 2:

Eine Investition für die P-Elimination aus Abwässern muss die Gewähr bieten, dass die Richtlinienwerte nicht überschritten werden. Ausserdem ist zu überlegen, ob nicht die Richtlinienwerte selbst überprüft werden müssen.

III.

Die heutigen Erfahrungen im europäischen Raum zeigen klar, dass, entgegen den theoretisch aus der Löslichkeit von P-Präzipitaten mit Fe^{3+}, Al^{3+} und Ca^{2+} zu erwartenden Wirkungsgraden von P-Eliminationen, in der Praxis erheblich kleinere Leistungen in Kauf genommen werden müssen. Wesentliche Gründe sind:

- Mangelhafte Regulierbarkeit der Verfahren. Die Dosierung der Fällungsmittel und ihre Reaktionszeiten müssten für optimale Effekte laufend der Phosphorzufuhr in das System und den momentanen hydraulischen Verhältnissen in einer Kläranlage angepasst werden, was heute nicht ohne weiteres durchführbar ist;

- unkontrollierbare Nebenreaktionen zwischen P-Fällungsionen und Abwasserinhaltsstoffen. Die Folge ist, dass, je nach angewendetem Verfahren, eine mehr oder weniger grosse Variationsbreite der P-Konzentration in den Endabflüssen und - auch bei eingehaltenen Konzentrationsmittelwerten - nicht tolerierbare Ueberschreitungen der P-Frachten am Ausgang von Anlagen möglich sind. Man findet als

Schlussfolgerung Nr. 3:

Es können nur P-Eliminationsverfahren im Hinblick auf die Schlussfolgerungen Nr. 1 und Nr. 2 ernsthaft diskutiert werden, welche eine minimale Variationsbreite der Eliminationsleistung unter Berücksichtigung der heute gegebenen technischen und chemischen Möglichkeiten der Regulierbarkeit des Eliminationsprozesses und der kanalisationstechnisch bedingten Schwankungen der Abwassermengen und -Zusammensetzung garantieren.

IV.

Die beschriebenen europäischen Erfahrungen bei der praktischen Durchführung der Vorfällung, Simultanfällung und Nachfällung für die P-Elimination zeigten:

a) Vorfällungen sind wenig verbreitet; relevante Beobachtungen beschränken sich auf einzelne grosse Anlagen in Schweden und auf Versuche in technischem Massstab. Diese Verfahrenstechnik unterliegt erwartungsgemäss in hohem Masse der Variabilität der Abwasserzusammensetzung, da sie am Anfang der Prozesskette steht und jegliche Ausgleichswirkungen des Reinigungssystems wegfallen. Die notwendigen Fällungsmittel sind deshalb in grossen Ueberschüssen zu dosieren. Die anschliessende biologische Stufe vermag nur einen Teil der Wirkungsgrad-Schwankungen der Vorfällung auszugleichen. Trotz der für die biologische Stufe ins Gewicht fallenden Entlastung bezüglich Zufuhr von organischen Schmutzstoffen (in partikulärer Form), bietet die Vorfällung beim heutigen Stand der Regulierungsmöglichkeiten kaum Gewähr für die Einhaltung der Richtlinien für die Reinhaltung des Bodensees.

b) Die zahlreichen Simultanfällungsanlagen und die Versuche mit diesem Verfahren in technischem Massstab haben klar erwiesen, dass sich die Richtlinienwerte mit dieser Technologie auch unter der Voraussetzung ausreichender Fällungsmitteldosierung nicht in allen Fällen erreichen lassen. Die Gründe liegen in erster Linie bei den nicht beherrschbaren Nebenreaktionen im komplexen Kombinationsprozess von biologischer Durchlauf-Fermentation und rein chemischem Prozess der P-Elimination. Kaum ins Gewicht fallende Einsparungen bei den Jahreskosten rechtfertigen keine Kompromisse bei der Einhaltung der zu fordernden Eliminationsraten.

c) Die praktischen Erfahrungen bestätigen, dass eine saubere verfahrenstechnische Trennung des chemischen Reaktionssystems zur P-Elimination von allen anderen Funktionen einer Reinigungsanlage, wie dies bei der Nachfällung möglich ist, den besten Erfolg gewährleistet. Die Gründe sind einleuchtend:

   - Die Nachfällung, als letzte Stufe einer langen Prozesskette, die dank ihrer Kubatur und ihrer Reinigungsfunktionen zu einem weitgehenden Ausgleich der P-Konzentrations-Schwankungen und zu einem weitgehenden Verschwinden von störenden Abwasserinhaltsstoffen führt, ist den hydraulischen und Konzentrations-Zufälligkeiten eines Kanalisationsausflusses viel weniger ausgesetzt als jedes andere Verfahren.

   - Die Unabhängigkeit von der biologischen Stufe lässt alle Freiheiten offen bezüglich der Wahl der Fällungschemikalien und der technischen Einzelheiten zur Optimierung des Prozesses.

   - Die nach heutigen Kenntnissen sowohl verfahrenstechnisch als auch preislich günstigen Verfahren sind die reine Kalkfällung (bei pH ca. 11), wenn direkte Einleitungen in Seen möglich sind, und die kombinierte Kalk-Eisen(III)-Fällung (pH 8.8 - 9) bei Fliessgewässern

als direkten Vorflutern. Die schwedischen Erfahrungen mit Aluminiumfällung sind ebenfalls berücksichtigenswert.

- Die vorwiegend mineralischen Fällungsschlämme können - aber müssen nicht - mit den organischen Schlämmen der anderen Reinigungsstufen beseitigt werden. Da sie viel bessere Entwässerungseigenschaften besitzen als die organischen Schlämme, kann für sie eine unabhängige Beseitigungsmethode vorteilhaft sein.

- Die Nachfällung ergibt einen zusätzlichen Gewinn bezüglich der Elimination von organischen Restverunreinigungen.

d) Ergebnisse von neueren verfahrenstechnischen Versuchen der EAWAG haben gezeigt, dass die Kombination von bekannten Fällungsverfahren (Vorfällung oder Simultanfällung) mit einer der biologischen Reinigungsstufe nachgeschalteten Flockungsfiltration bezüglich P-Elimination eine dem Nachfällungsverfahren äquivalente Alternativlösung darstellt, sofern sich die Resultate der bisherigen Experimente mit Pilotanlagen unter Bedingungen der Praxis in Anlagen technischen Massstabes bestätigen.

Zusammenfassend ergibt sich aus den Erfahrungen an dutzenden von Anlagen in Schweden, aus den vorstehenden Beobachtungen, aus den Informationen im Dokument NR/ENV 72/24 der OECD vom November 1972 sowie aus den Verfahrensentwicklungen an der EAWAG, dass die Einhaltung der gegenwärtig gültigen Richtlinien für die Reinhaltung des Bodensees am besten mittels:

- Nachfällungsverfahren oder

- Kombinationssystemen von Vor- oder Simultanfällungen mit anschliessender Flockungsfiltration des Endabflusses

möglich ist. Diese Technologien gewährleisten die dauernd genügende und alle Leistungs-Schwankungen konventioneller, mechanisch-biologischer Reinigungsanlagen ausgleichende P-Elimination. Man gelangt deshalb zur

Schlussfolgerung Nr. 4:

Wenn auf Grund der durchgeführten Untersuchungen verfahrenstechnische Empfehlungen in die technischen Richtlinien der IGKB aufgenommen werden sollten, so könnten nach dem derzeitigen Stand des Wissens und der Entwicklung die Nachfällung einerseits oder eine Kombination von Vor- oder Simultanfällung mit anschliessender Flockungsfiltration genannt werden. Da jedoch immer Ausnahmesituationen bei Entwässerungssystemen möglich sind, ist es zweckmässig, die Wahl der Verfahrenstechnik für die P-Elimination nicht zwingend vorzuschreiben. Entscheidend ist schliesslich die kompromisslose Einhaltung der Eliminationsforderungen.

9. L I T E R A T U R

[1] WUHRMANN, K. (1963):

Kurzbericht über die heutigen Möglichkeiten zur Phosphor-Elimination bei der Abwasserreinigung.
24.2.1963 an die IGKB.

[2] WUHRMANN, K. (1964):

Schweiz. Zeitschrift f. Hydrologie
XXVI, 520-558.

[3] IMBODEN, D.M. (1973):

Limnologische Transport- und Nährstoffmodelle.
Schweiz. Zeitschrift f. Hydrologie
35, 29-68.

[4] ULMGREN, L. (1971):

Experiences from chemical treatment processes för municipal sewage water in Sweden.
Used technics, costs and purification results. The National Environmental Protection Board. The Water Protection Division, Sweden.

[5] THOMAS, E.A. (1962):

Verfahren zur Entfernung von Phosphaten aus Abwässern.
Schweiz. Patent 361543, vom 30.5.1962.

[6] THOMAS, E.A. (1965):

Vierteljahresschrift Naturf. Gesellsch. Zürich
110, 419-434.

[7] THOMAS, E.A. (1972):

JWPCF. 44, 176-182.

[8] ACHRAN, G.A. und R.D. HOGUE (1971):

Water Sewage Works 118/2, 36

[9] AREGGER, A. (1972):

GWA, 3-8

[10] MALHOTRA, S.K., F.G. LEE und G.A. ROHLICH (1964):

Int. J. Air and Water Poll. 8, 487-500.

[11] SVANKS, K. (1970):

"Precipitation of Phosphates from Water with Ferrous Salts".
Office of Water Resources Research, U.S. Dept. of the Int., Proj. No. A-011-OHIO.

[12] GREEN, O. et al. (1967):

Studies on Removal of Phosphates and Related Removal of Suspended Matter and Biochemical Oxygen Demand at Greyling, Michigan. Div. of Engineering, Michigan Dept. of Health, and Dow Chemical Co.

[13] JENKINS, D., J.F. FERGUSON, A.B. MENAR (1971):

Water Res. Pergamon Press 5, 369-389.

[14] SILLEN, L.G., A.E. MARTELL (1964):

Stability Constants of Metal Ion Complexes. The Chemical Society.

[15] WUHRMANN, K. (1967):

Föderation Europ. Gewässerschutz (FEG), 14 67-74.

[16] LEUMANN, P. (1973):

GWF - Wasser / Abwasser 114, 272-283.

[17] LECKIE, J., W. STUMM (1970):

Water Quality Improvement by physical and chemical Processes III. eds. E. Gloyna W. Eckenfelder, 237-248.

[18] STUMM, W., J.J. MORGAN (1970):

Aquatic Chemistry.
Wiley Interscience 1970, Kap. 10, 514-563.

[19] WUHRMANN, K. (1968-70):

Diese Arbeit, Versuche Tüffenwies (EAWAG).

[20] MINTON, G.R., D.A. CARLSON (1972):

JWPCF 44, 1736-1755.

[21] STUMM, W. (1964):

Diskussion in: Advances in Water Pollution Research.
Proced. 1st Int. Conf. Water Poll.
Res. Pergamon Press, London, 216.

[22] EINSELE, W. (1936):

Ueber die Beziehung des Eisenkreislaufs zum Phosphorkreislauf im eutrophen See.
Arch. Hydrobiol. 29, 661-686.

[23] SINGER, P.C. (1970):

Anaerobic Control of Phosphate by Fe^{2+}-ion.
43rd Annual Conf. Water Poll. Contr. Fed. 1-18.

[24] THOMAS, E.A. (1966):

Viertel.-Schrift der Naturf. Gesellsch. Zürich 111, 309-318.

[25] THOMAS, E.A. H. RAI (1970):

Gas - Wasser - Abwasser 50, 179-190.

[26] ULMGREN, L. (1969):

Experience of Chemical Purification.
The National Swedish Environment Protection Board 1969:10E.

[27] CULP, R.L., G.L. Culp (1971):

Advanced waste water treatment.
Van Nostrand Reinhold Comp., New York (1971), S. 289 und 291.

[28] HÖKERVALL, E. (1970):

Experiences from precipitation trials at the sewage works of Loudden and Eolshäll in Stockholm.
Boliden AVR-Information.

[29] ZERRES, H., R. WAGNER (1973):

Untersuchungen über Phosphorelimination durch Vorfällung mit technischem Aluminiumsulfat.
Inst. für Siedlungswasserbau u. Wassergütewirtschaft der Universität Stuttgart.

[30] BISHOP, D.F. et al. (1972):

Physical-chemical treatment of municipal wastewater. JWPCF 44, 361-371.

10. A N H A N G

Tabelle		Seite
5.1 :	Simultanfällung mit Eisen (Fe^{3+}), Kläranlage Reutlingen	39
5.2 :	Ueberschussschlammproduktion aus Simultanfällung, Kläranlage Reutlingen	40
5.3 :	Betriebsdaten, Kläranlage Reutlingen	41
5.4 :	Simultanfällung mit Eisen, Kläranlagen Jona, Münsterlingen, Männedorf	42
5.5 :	Ueberschussschlammproduktion aus Simultanfällung, Kläranlage Jona	43
5.6 :	Betriebsdaten, Kläranlagen Jona, Münsterlingen, Männedorf	44
5.7 :	Fällmitteldosierung, Kläranlage Männedorf	45
5.8 :	Simultanfällung mit Eisen (Fe^{3+}), Kläranlagen Jona, Münsterlingen, Männedorf	46
5.9 :	Betriebsdaten, Totaloxidationsanlage Tüffenwies	47
5.10:	Nachfällung mit Kalk und Eisen (Fe^{3+}), Kläranlage Reutlingen	48
5.11:	Betriebsdaten, Kläranlage Reutlingen	49
5.12:	Nachfällung mit Kalk und Eisen (Fe^{3+}), Kläranlage Jona	50
5.13:	Betriebsdaten, Kläranlage Jona	51
5.14:	Nachfällung mit Kalk (Fe^{3+} bzw. Polyelektrolyt), Kläranlage Jona	52
5.15:	Betriebsdaten, Kläranlage Jona	53
5.16:	Nachfällung mit Eisen (Fe^{3+}), Kläranlage Jona	54
5.17:	Betriebsdaten, Kläranlage Jona	55
5.18:	Schlammproduktion, Kläranlagen Jona, Reutlingen	56
6.1 :	Simultanfällung, Informationen einiger Autoren	57 - 59
6.2 :	Nachfällung	60
6.3 :	Vorfällung	61

Tabelle 5.1: Simultanfällung mit Eisen (Fe^{3+}),
Ergebnisse der Versuche auf der Kläranlage Reutlingen

ANLAGE		Kläranlage Reutlingen								
Versuch		1			2			3		
Fällmittelkonz.		4.6 mg Fe^{3+} /l			12.5 mg Fe^{3+} /l			6.4 mg Fe^{3+} /l		
Datum		18.7.-11.8.67			28.8.-13.9.67			26.9.-15.10.67		
Tage		24			16			19		
Probenahmen *		10			10			10		
		Zufl.**	Abfl.	Elim.*** %	Zufl.**	Abfl.	Elim.*** %	Zufl.**	Abfl.	Elim.*** %
O-P	mg/l									
Ges.-P	mg/l	5.1	2.0	72.5	5.9	0.7	88.6	6.0	1.2	81.6
org.C	mg/l	81.4	21.1	74	116	38.9	66.5	112	31.3	72.1
org.N	mg/l	-	2.1	-	9.2	4.7	45	7.3	3.3	55

* 24-Stunden-Sammelproben, durchflussproportional

** vorgeklärtes Abwasser,

*** bezogen auf vorgekl. Abwasser

Tabelle 5.2: Ueberschussschlammproduktion aus Simultanfällung Kläranlage Reutlingen

Kläranlage Reutlingen	Versuch	1		2		3	
		ohne Fällg.	mit Sim.Fällg.	ohne Fällg.	mit Sim.Fällg.	ohne Fällg.	mit Sim.Fällg.
Biolog. Stufe	l/m^3 Abwasser	13.3	14.9	21.0	29.4	8.2	11.8
	g/m^3 "	51.3	73.6	98.4(?)	181	56.5	62
Vorklg. + Biol.St.*)	l/m^3 "	4.3	5.0	4.7	6.2	3.8	5.3
	g/m^3 "	229	287	350	390	171	356
Mehranf. Biol.St.	l/m^3 "resp.%		1.6 12 %		+8.4 40 %		3.6 44 %
	g/m^3 "resp.%		22.3 43 %		82.6 84 %		5.5 9.7%
Mehranf.Vorkl.+Biol.St.*)	l/m^3 "resp.%		0.7 16.3%		1.5 32 %		1.5 39.5%
	g/m^3 "resp.%		58 25.3%		40 11.5%		185 109 %

*) gemessen als Schlamm-Abzug aus Vorklärbecken

Tabelle 5.3: Betriebsdaten

ANLAGE	Kläranlage Reutlingen		
FAELLUNGSVERFAHREN	Simultanfällung, Fällmittel Fe^{3+}		
Versuch	1	2	3
Zufluss [m^3]	394'896	155'344	142'042
Zufluss [m^3/h]	686	405	312
Belüftungszeit/ Reaktionszeit [h]	3.36	5.69	7.38
Fällmittelmenge pro Versuch [kg] (Fe^{3+})	1'831.8	1'933.9	905.5
Fällmittelmenge [g/m^3] Fe^{3+}	4.63	12.47	6.4
Kation / P [molares Verhältnis]	0.5	1.2	o.55
Ueberschussschlamm [m3]	-	-	-
Ueberschussschlamm [l/m^3 Abwasser]	14.9	29.4	11.8
Trockensubstanz [kg]	-	-	-
Trockensubstanz [g/m^3 Abwasser]	73.6	181	62

Tabelle 5.4: Simultanfällung mit Eisen, Ergebnisse der Versuche in den Kläranlagen Jona, Münsterlingen, Männedorf

Anlage	Jona						Münsterlingen			Männedorf		
Versuch	10 a			10 b			1			1		
Fällmittelkonz.	15 mg Fe^{3+} /l			20 mg Fe^{3+} /l			15 mg Fe^{3+} /l			15 mg Fe^{3+} /l		
Datum	1.2.-19.2.71			20.2.-30.4.71			12.9.-13.10.72			4.12.-17.12.72		
Tage	19			69			33			14		
Probenahmen *	6			17			21			10		
	Zufl.**	Abfl.	Elim.*** %	Zufl.**	Abfl.	Elim.*** %	Zufl.**	Abfl.	Elim.*** %	Zufl.**	Abfl.	Elim.*** %
O-P mg/l	3.1	0.7	75.2	3.3	0.9	70.7	2.6	0.4	81.6	2.2	0.4	81.3
Ges.-P mg/l	5.2	1.6	69.3	6.6	1.9	68.8	6.3	1.8	70.9	7.8	1.0	86.5
org.C mg/l	44.1	13.9	65.3	47.7	13.1	69.9	74.3	23.9	66.5	61.6	18.7	69
org.N mg/l	5.0	1.7	52.4	7.3	2.2	68.2	7.5	5.5	25.3	8.8	2.6	70.3

* 24-Stunden-Sammelproben, durchflussproportional ** vorgeklärtes Abwasser, *** bezogen auf vorgekl. Abwasser

Tabelle 5.5: Ueberschussschlammproduktion aus Simultanfällung
Kläranlage Jona

			ohne Fällg	mit Simultanfällung	
				15 mg Fe^{3+} /l	20 mg Fe^{3+} /l
Sekundärschl.	l/m^3	Abwasser	17	19	18
ohne Fällm.	g TS/m^3	"	53	67	88
Mehranfall) Sek.schl.	l/m^3	" resp. %		+ 2 11.8 %	+ 1 5.9 %
drch Fällg)	g TS/m^3	" resp. %		+ 14 26.4 %	+ 35 66 %

Tabelle 5.6: Betriebsdaten

KLAERANLAGEN	Jona		Münsterlingen	Männedorf
FAELLUNGSVERFAHREN	Simultanfällung, Fällmittel Fe^{3+}			
Versuch	10 a	10 b	1	1
Zufluss [m^3]	42'520	163'910	39'006*	15'902*
Zufluss [m^3/h]	93	98	79	66.3
Belüftungszeit/ Reaktionszeit [h]	7.53	7.14	3.5	2.6
Fällmittelmenge pro Versuch [kg] Fe^{3+}	638	3'325	623.3*	230.5
Fällmittelmenge [g/m^3] Fe^{3+}	15	20.3	16	14.5
Kation / P [molares Verhältnis]	1.6	1.7	1.4	1.03
Ueberschussschlamm [m^3]	792	2'934	-	-
Ueberschussschlamm [l/m^3 Abwasser]	18.6	17.9	-	-
Trockensubstanz [kg]	2'827	14'406	-	-
Trockensubstanz [g/m^3 Abwasser]	66.5	87.9	-	-

* nur Probenahmetage berücksichtigt

Tabelle 5.7: Fällmitteldosierung, Kläranlage Männedorf

Datum 1972	Wochentag	Zufluss m^3/Tag	Fällmitteldosierung 8.00-17.30 ml/Min	Fällmitteldosierung 17.30-8.00 ml/Min	Fällmittelmenge gesamt l/Tag	mittlere $[Fe^{3+}]$ mg/l
4.12.72	Mo	1469	350	135	316.95	33.7
5.12.	Di	1606	220	80	195.0	19.0
6.12.	Mi	1591	180	80	172.2	16.9
7.12.	Do	1393	180	80	172.2	19.3
8.12.	Fr	1456	180	60	154.8	16.6
9.12.	Sa	1734	60	60	86.4	7.8
10.12.	So	2061	60	60	86.4	6.5
11.12.	Mo	1733	350	135	316.95	28.6
12.12.	Di	1784	220	80	195.0	17.1
13.12.	Mi	1607	180	80	172.2	16.7
14.12.	Do	1584	180	80	172.2	17.0
15.12.	Fr	1528	180	60	154.8	15.8
16.12.	Sa	1779	60	60	86.4	7.6
17.12.	So	1424	60	60	86.4	9.5

Tabelle 5.8: Simultanfällung, P-Elimination mit Eisen (Fe^{3+})
unter den Bedingungen des Totaloxidationsverfahrens

Totaloxidationsanlage (EAWAG, Tüffenwies)									
Versuch	1			2			3		
Fällmittelkonz.	7.5 mg Fe^{3+} /l			15 mg Fe^{3+} /l			25 mg Fe^{3+} /l		
Datum	25.8.-18.11.69			20.11.69-26.2.70			27.2.-6.5.70		
Tage	5			98			69		
Probenahmen *	24			28			20		
	Zufl.**	Abfl.	Elim.*** %	Zufl.**	Abfl.	Elim.*** %	Zufl.**	Abfl.	Elim.*** %
O-P mg/l****	2.4	2.5	-	2.1	0.42	-	2.0	0.1	-
Ges.-P mg/l	10.0	2.8	69.6	9.4	0.8	89.9	7.0	0.4	93.4
org.C mg/l	315	10.8	94	495	9.1	95.7	371	7.8	96
org.N mg/l	20.7	1.2	92.9	22.9	1.1	93.2	18.4	1.0	93

* 24-Stunden-Sammelproben, ** nicht vorgeklärtes Abwasser,

*** bezogen auf nicht vorgekl. Abwasser, **** Einzelanalysen

Tabelle 5.9: Betriebsdaten

ANLAGE	Totaloxidationsanlage (Tüffenwies, EAWAG)		
FAELLUNGSVERFAHREN	Simultanfällung Fällmittel Fe^{3+}		
Versuch	1	2	3
Zufluss [m^3]	1'275	1'470	1'035
Zufluss [m^3/h]	0.625	0.625	0.625
Belüftungszeit/ Reaktionszeit [h]	24	24	24
Fällmittelmenge pro Versuch [kg]	-	-	-
Fällmittelmenge [g/m^3]	7,5	15	25
Kation / P [molares Verhältnis]	0.41	0.88	1.98
Ueberschussschlamm [m^3]	-	-	-
Ueberschussschlamm [l/m^3 Abwasser]	-	-	-
Trockensubstanz [kg]	-	-	-
Trockensubstanz [g/m^3 Abwasser]	-	-	-

Tabelle 5.10: Nachfällung mit Kalk und Eisen [Fe^{3+}] (Versuche 1, 3), mit Kalk, Fe^{3+} als Flockmittel (Versuch 2)
Ergebnisse der Versuche auf der Kläranlage Reutlingen

ANLAGE	Kläranlage Reutlingen											
Versuch	1				2				3			
Fällmittelkonz.	4,6 mg Fe^{3+} /l AW $Ca(OH)_2$ bis pH = 8.8				4.2 mg Fe^{3+} /l AW $Ca(OH)_2$ bis pH = 8.8				1.3 mg Fe^{3+} /l AW $Ca(OH)_2$ bis pH = 11			
Datum	18.7.-11.8.1967				26.9.-15.10.1967				28.8.-13.9.1967			
Tage	24				19				16			
Probenahmen *	10				10				10			
	Zufl.**	Abfl. Biol.	Abfl. NF	Elim.*** %	Zufl.**	Abfl. Biol.	Abfl. NF	Elim.*** %	Zufl.**	Abfl. Biol.	Abfl. NF	Elim.*** %
O-P mg/l												
Ges.-P mg/l	7.1	5.2	1.6	77	6.4	5.0	1.2	82.2	5.8	4.0	0.6	90.5
org.C mg/l	81.5	25.8	12.6	86	104	31.6	15.9	84.8	109	29.2	22.9	79
org.N mg/l	-	3.5	1.6	-	9.6	3.7	0.8	88.6	8.8	2.6	0.3	96.7

* 24-Stunden-Sammelproben, durchflussproportional ** vorgeklärtes Abwasser, *** bezogen auf vorgeklärtes Abwasser

Tabelle 5.11: Betriebsdaten

ANLAGE	Kläranlage Reutlingen		
FAELLUNGSVERFAHREN	Nachfällung		
Versuch	1	3	2
Zufluss [m^3]	436'320	204'060	201'104
Zufluss [m^3/h]	757	447	534
Belüftungszeit/ Reaktionszeit [h]	1.1	1.5	1.5
Fällmittelmenge $Ca(OH)_2$ pro Versuch[kg] Fe^{3+}	58'000 2'023.56	17'000 865.9	55'600 254.25
Fällmittelmenge $Ca(OH)_2$ [g/m^3] Fe^{3+}	133 4.6	83.4 4.2	270 1.3
Kation / P [molares Verhältnis]			
Ueberschussschlamm [m^3]	-	-	-
Ueberschussschlamm [l/m^3 Abwasser]	3.2	3.8	3.8
Trockensubstanz [kg]	-	-	-
Trockensubstanz [g/m^3 Abwasser]	234*	453*	171*

* inkl. Schwebestoffe im Cyclatorabfluss! Werte berechnet aus Dosierungen und mitgefällter Wasserhärte.

Tabelle 5.12: Nachfällung mit Kalk und Eisen (Fe^{3+})
Ergebnisse der Versuche auf der Kläranlage Jona

ANLAGE	Kläranlage Jona											
Versuch	1				6				7			
Fällmittelkonz.	7.6 mg Fe^{3+} /l Abwasser $Ca(OH)_2$ bis pH = 8.8				11.1 mg Fe^{3+} /l Abwasser $Ca(OH)_2$ bis pH = 8.8				9.5 mg Fe^{3+} /l Abwasser $Ca(OH)_2$ bis pH = 8.8			
Datum	1.7.-4.9.1969				27.2.-30.4.1970				1.7.-30.9.1970			
Tage	66				63				92			
Probenahmen *	16				14				20			
	Zufl.**	Abfl. Biol.	Abfl. NF	Elim.*** %	Zufl.**	Abfl. Biol.	Abfl. NF	Elim.*** %	Zufl.**	Abfl. Biol.	Abfl. NF	Elim.*** %
O-P mg/l	3.4	3.8	0.6	71.8	2.5	3.3	0.7	66	3.5	4.4	0.6	79.6
Ges.-P mg/l	5.3	4.6	0.8	81.8	4.1	3.9	0.9	74	5.4	5.0	0.8	83.3
org.C mg/l	28.1	11.6	8.8	66.7	22.2	8.7	7.4	65.2	32.4	11.6	8.2	72.1
org. N mg/l	5.4	1.5	0.8	83.6	4.9	3.0	2.3	48.6	5.4	2.0	1.4	69.3

* 24-Stunden-Sammelproben, durchflussproportional ** vorgeklärtes Abwasser, *** bezogen auf vorgeklärtes Abwasser

Tabelle 5.13: Betriebsdaten

ANLAGE	Kläranlage Jona		
FAELLUNGSVERFAHREN	Nachfällung mit Kalk und Eisen (Fe^{3+})		
Versuch	1	6	7
Zufluss [m^3]	180'270	202'780	263'130
Zufluss [m^3/h]	114	134	119
Belüftungszeit/ Reaktionszeit [min]	54	46	52
Fällmittelmenge pro Versuch [kg] $Ca(OH)_2$ Fe^{3+}	14'322 1367.9	19'409 2265.3	25'848 2498.7
Fällmittelmenge [g/m^3] $Ca(OH)_2$ Fe^{3+}	79.5 7.6	95.7 11.2	98.2 9.5
Kation / P [molares Verhält.]			
Ueberschussschlamm [m^3]	307	441	794
Ueberschussschlamm [l/m^3 Abwasser]	1.7	2.2	3.0
Trockensubstanz [kg]	14'856	26'045	26'240
Trockensubstanz [g/m^3 Abwasser]	82.4	128.4	99.7

Tabelle 5.14: Nachfällung mit Kalk (Fe^{3+} bzw. Polyelektrolyt als Flockmittel)
Ergebnisse der Versuche auf der Kläranlage Jona

ANLAGE	Kläranlage Jona															
Versuch	2				4				8				3			
Fällmittelk.	1.4 mg Fe^{3+} /l Abwasser $Ca(OH)_2$ bis pH = 11				0.9 mg Fe^{3+} /l Abwasser $Ca(OH)_2$ bis pH = 11				0.9 mg Fe^{3+} /l Abwasser $Ca(OH)_2$ bis pH = 11				Polyelektrolyt 0.6 mg TF5/l ($Ca(OH)_2$ bis pH = 11			
Datum	5.9.-6.11.69				26.12.69-27.1.70				1.10.-30.11.70				7.11.-25.11.69			
Tage	62				33				61				49			
Probenahmen*	15				7				16				10			
	Zufl.**	Abfl. Biol.	Abfl. NF	Elim. *** %	Zufl.**	Abfl. Biol.	Abfl. NF	Elim. *** %	Zufl.**	Abfl. Biol.	Abfl. NF	Elim. *** %	Zufl.**	Abfl. Biol.	Abfl. NF	Elim. *** %
O-P mg/l	6.4	6.9	0.4	93.1	4.0	5.4	0.7	80.3	4.7	5.7	0.2	94.4	3.8	4.0	1.3	64.2
Ges.-P mg/l	9.6	8.5	0.9	90.8	6.0	6.4	1.0	78.3	7.9	7.1	0.6	92.2	5.6	5.1	1.8	66.9
org.C mg/l	52.8	17.5	9.0	81.1	40.9	19.9	10.5	70.3	39.6	12.3	6.2	83.4	34.5	15.9	9.4	71.2
org.N mg/l	9.5	3.8	1.9	77.5	5.1	3.5	2.5	47.4	5.5	2.6	1.5	68.8	23.2	9.6	8.7	64.6

* 24-Stunden-Sammelproben, ** vorgeklärtes Abwasser, *** bezogen auf vorgeklärtes Abwasser
durchflussproportional

Tabelle 5.15: Betriebsdaten

ANLAGE	Kläranlage Jona			
FAELLUNGSVERFAHREN	Nachfällung mit Kalk, Flockung mit Fe^{3+} bzw. Polyelektrolyt TF_5			
Versuch	2	4	8	3
Zufluss [m^3]	115'710	81'150	139'070	125'230
Zufluss [m^3/h]	77	103	95	107
Belüftungszeit / Reaktionszeit [min]	81	60	65	58
Fällmittelmenge pro Versuch [kg] $Ca(OH)_2$	20'044	11'283	31'797	22'917
Fällmittelmenge pro Versuch [kg] Fe^{3+}	161.6	73.7	132.3	69.3
Fällmittelmenge [g/m^3] $Ca(OH)_2$	173.2	139.0	228.6	183.0
Fällmittelmenge [g/m^3] Fe^{3+}	1.4	0.9	0.9	0.55*
Ueberschussschlamm [m^3]	264	173	547	299
Ueberschussschlamm [l/m^3 Abwasser]	2.2	2.1	3.9	2.4
Trockensubstanz [kg]	27'741	23'151	43'086	40'601
Trockensubstanz [g/m^3 Abwasser]	240	285	310	324

*Polyelektrolyt Sedipur TF_5
(Fa. BASF)

Tabelle 5.16: Nachfällung mit Eisen (Fe^{3+})
Ergebnisse der Versuche auf der Kläranlage Jona

ANLAGE	Kläranlage Jona											
Versuch	5				9a				9b			
Fällmittelkonz.	8.2 mg Fe^{3+} /l Abwasser				8.7 mg Fe^{3+} /l Abwasser				13.7 mg Fe^{3+} /l Abwasser			
Datum	28.1. - 26.2.1970				1.12.70 - 3.1.71				4.1. - 31.1.1971			
Tage	29				34				28			
Probenahmen *	7				7				7			
	Zufl.**	Abfl. Biol.	Abfl. NF	Elim.*** %	Zufl.**	Abfl. Biol.	Abfl. NF	Elim.*** %	Zufl.**	Abfl. Biol.	Abfl. NF	Elim.*** %
O-P mg/l	2.6	2.8	1.2	50.3	4.4	4.9	1.8	57.9	4.6	4.9	0.9	80.5
Ges.-P mg/l	4.3	3.8	1.5	53.1	6.7	7.1	2.6	61.1	7.3	6.6	1.3	81.9
org.C mg/l	18.6	8.6	6.1	66.1	33.9	19.0	10.2	64.4	37.5	14.9	10.8	70.2
org.N mg/l	4.1	2.7	1.7	47.9	7.6	3.3	2.4	65.8	7.4	2.3	2.4	63.2

* 24-Stunden-Sammelproben, durchflussproportional ** vorgeklärtes Abwasser, *** bezogen auf vorgeklärtes Abwasser

Tabelle 5.17: Betriebsdaten

ANLAGE	Kläranlage Jona		
FAELLUNGSVERFAHREN	Nachfällung mit Fe^{3+}		
Versuch	5	9 a	9 b
Zufluss [m^3]	143'010	76'070	58'480
Zufluss [m^3/h]	199	93	87
Belüftungszeit/ Reaktionszeit [min]	31	66	71
Fällmittelmenge pro Versuch [kg] Fe^{3+}	1'176	663	799
Fällmittelmenge [g/m^3] Fe^{3+}	8.2	8.7	13.7
Kation / P [molares Verhältnis]	1.06	0.72	1.04
Ueberschussschlamm [m^3]	194	288	245
Ueberschussschlamm [l/m^3 Abwasser]	1.4	3.8	4.2
Trockensubstanz [kg]	3'662	3'164	1'849
Trockensubstanz [g/m3 Abwasser]	26	42	32

Tabelle 5.18: Schlammproduktion (Nachfällung), Kläranlagen Jona, Reutlingen

Versuchs-variable	Klär-anlage	Versuch	Biol. Stufe	Biol. + Vorklg.	Nach-fällung	Biol. Stufe	Biol. + Vorklg.	Nach-fällung
xmg Fe^{3+}/l Abwasser + $Ca(OH)_2$ bis pH ∿ 8.8	Jona		l/m^3 Abwasser			gr/m^3 Abwasser		
		1	13.8	2.8 *	1.7	68.4	171.6 *	82.4
		6	13.1	5.7 *	2.2	61.1	153.4 *	128.4
		7	15.6	9.0 *	3.0	61.8	189.1 *	99.7
		D	14.2	5.8	2.3	63.8	171.4	103.5
	Reut-lingen	1	13.3	4.3 **	3.2	51.3	229 **	234
		3	8.2	3.8 **	8.5	56.5	171 **	171
		D	10.8	4.1	5.9	53.9	200	203
$Ca(OH)_2$ bis pH ∿ 11 + 1-2 mg Fe^{3+} als Flockmittel	Jona	2	24	6.4 *	2.2	65	377 **	240
		4	17.2	4.8 *	2.1	34	90.5 *	285
		8	18.4	12.7 *	3.9	49	123.3 *	310
		D	19.9	8.0	2.9	49.3	196.9	278
	Reut-lingen	2	21.0	4.7 **	3.8	98.4	350 **	453
$Ca(OH)_2$ bis pH ∿ 11, 0.6 mg TF_5/l als Flockmittel	Jona	3	11	5.2 *	2.4	24	109.8 *	324

* nach aerober Stabilisierung ** Ablass aus Vorklärung zu Faulräumen

Tabelle 6.1: Simultanfällung: Informationen einiger Autoren

Fäll-mittel	Klär-anlage	Anlagen-Durchfl. m^3/Tag	Fäll-mittel-Zugabe-ort	Fäll-mittel Kation mg/l	P (total) mg/l		Elim. [%]	Molar Kat/P	Lit. Ref.	Bemerkungen
					Zufl.	Abfl.				
Fe^{3+}	Uster	12738	Zufl. Biol.	5.6	5.25	1.01	80.8	0.59	(24)	Beobachtungsperiode: 1 Jahr Werte sind Jahresmittel, Anzahl der Einzeluntersuchungen unbekannt
"	Uster	16400	Zufl. Biol.	10	4.21	0.62	85.3	1.3	(24)	**Beobachtungsperiode: 5 Monate** **Art der Probenahme: 24-Stdn.-Sammelproben.** **Anzahl der Einzeluntersuchungen unbekannt**
"	Männe-dorf	-	Abfl. Biol.	10.5	4.97	0.60	87.9	1.17)	(7)	Beobachtungsperiode: 4 bzw. 7 Tage Unregelmässige Probenahme: offenbar manuell erhobene Einzelschöpfprobe. Ges.-P-Mittelwerte: aus 5 bzw. 4 (!) Einzelmessungen
		-	"	14.8	5.38	0.59	89.0	1.53)		
"	Hin-wil	3399	Abfl. 2. Bel. becken	10.5	9.91	0.76	92.3	0.59	(25)	Anzahl Proben: 29 Art der Probenahme: unbekannt Dauer der Untersuchungsperiode: unbekannt
"	Maur	1251	Zufl. Bel. becken	9.0	5.32	0.82	84.6	0.94	"	Anzahl Proben: 6 Art der Probenahme und Dauer der Unt.-periode: unbekannt
"	Meilen	8963	Zufl. Bel. becken	5.1	4.4	0.78	82.3	0.64	"	Anzahl Proben: 6 Art der Probenahme und Dauer der Unters.-periode: unbekannt
"	Pfäf-fikon	4150	Zufl. Bel. becken	8.1	7.53	1.11	85.3	0.6	"	Anzahl Proben: 10 Art der Probenahme und Dauer der Unters.-periode: unbekannt

* ohne mech. Vorklärung, zweistufige Belüftung

Tabelle 6.1: (Fortsetzung 1)

Fällmittel	Kläranlage	Anlagen-Durchfl. m^3/Tag	Fällmittel-Zugabeort	Fällmittel Kation mg/l	P (total) mg/l		Elim. [%]	Molar Kat/P	Lit. Ref.	Bemerkungen
					Zufl.	Abfl.				
Fe^{3+}	Stäfa	3753	Zufl. Bel. becken	5.9	7.86	0.62	92.1	0.42	(25)	Anzahl Proben: 29 Art der Probenahme und Dauer der Unters.-periode: unbekannt
"	Thalwil	13432	Zufl. Bel. becken	11.4	6.82	1.27	81.4	0.93	"	Anzahl Proben 12 Art der Probenahme und Dauer der Unters.-periode: unbekannt
"	Uster	15187	Zufl. Bel. becken	6.7	5.67	1.27	77.6	0.66	"	Anzahl Proben: 7 Art der Probenahme und Dauer der Unters.-periode: unbekannt
"	Wädenswil	4698	Zufl. Bel. becken	10.5	7.70	1.08	86	0.76	"	Anzahl Proben: 26 Art der Probenahme und Dauer der Unters.-periode: unbekannt
"	Stäfa	-	Zufl. Bel. becken	7.7	10.4	0.65	93.7	0.41	(16)	Anzahl Proben: 30 24-Stdn.-Mischproben, Probenahme: in der Regel alle zwei Wochen
"	Wädenswil	-	Zufl. Bel. becken	6.6	9.23	1.73	81.3	0.4	"	Anzahl Proben: 24 24-Stdn.-Mischproben, Probenahme in der Regel alle zwei Wochen
"	Hinwil *	-	Zufl. Bel. becken	8.6	11.1	1.4	87.4	0.43	"	Anzahl Proben: 29 24-Stdn.-Mischproben, Probenahme in der Regel alle zwei Wochen
"	Rotzwinkel	-	Zufl. Bel. becken	7.6	9.1	2.4	73.6	0.46	"	Anzahl Proben: 25 24-Stdn.-Mischproben, Probenahme in der Regel alle zwei Wochen

Tabelle 6.1: (Fortsetzung 2)

Fällmittel	Kläranlage	Anlagen-Durchfl. m^3/Tag	Fällmittel-Zugabeort	Fällmittel Kation mg/l	P (total) mg/l		Elim. [%]	Molar Kat/P	Lit. Ref.	Bemerkungen
					Zufl.	Abfl.				
Fe^{3+}	Thalwil	-	Zufl. Bel. becken	11.4	6.8	1.6	76.5	0.93	(16)	Anzahl Proben: 25 24-Stdn.-Mischproben, Probenahme in der Regel alle zwei Wochen
Al^{3+}	Männedorf	5000	Zufl. VKB	171*	4.6**	0.7***	86	0.6	(9)	Einzelwert, 24-Stdn.-Mischprobe
		2900	"	234*	8.5**	0.3***	95	0.82	"	" "
		3400	"	252*	7.0**	1.3***	82	0.89	"	" "
		3100	"	270*	8.9**	0.8***	92	0.95	"	" "
		3100	"	333*	7.8**	0.5***	94	1.17	"	" "
		3300	"	423*	4.6**	0.4***	92	1.49	"	" "
		2200	"	540*	6.2**	0.9***	86	1.90	"	" "
		2200	"	558*	6.8**	0.5***	93	1.97	"	" "
		2200	"	648*	5.6**	0.3***	95	2.28	"	" "

*gr. Al^{3+} /326,2 gr P, ** unfiltrierte Probe Zufl. VKB, *** filtrierte Probe

Tabelle 6.2: Nachfällung

Fäll-mittel	Klär-anlage	Anlagen-Durchfl. m^3/Tag	Fäll-mittel-Zugabe-ort	Fäll-mittel Kation mg/l	P (total) mg/l		Elim. [%]	Molar Kat/P	Lit. Ref.	Bemerkungen
					Zufl.	Abfl.				
$Ca(OH)_2$	Orsa	88	Abfl.NKB Biol. Stufe	475	8	0.4	95		(26)	Mittelwert aus Analysedaten von zwei 24-Stdn.-Mischproben Kläranlagensystem: biol.+chem. Reinigung
Al^{3+}	Kungsör	145	Abfl. Tropf-körper	22.9	6.7	0.2	97	3.9	(26)	Mittelwert aus Analysedaten von zwei 24-Stdn.-Mischproben Kläranlagensystem: mech.-biol.chem. Sep. chem. Fälleinheit
Al^{3+}	Rön-ningen	60	Abfl.NKB Biol. Stufe	22.1	11	1.0	91	2.3	(26)	Mittelwert aus Analysedaten von 40 24-Stdn.-Mischproben Kläranlagensystem: biol.+chem. NF

Tabelle 6.3: Vorfällung

Fäll-mittel	Klär-anlage	Anlagen-Durchfl. m^3/Tag	Fäll-mittel-Zugabe-ort	Fällmittel-Kation mg/l	P (total) mg/l		Elim.	Molar Kat/P	Lit. Ref.	Bemerkungen
					Zufl.	Abfl.	[%]			
Al^{3+}	Loudden	19'000	Zufl.VKB	8.0	4.8	0.3	94	1.9	(28)	Proben: 24-Stdn.-Mischproben
		21'000	"	7.8	4.8	0.35	93	1.9	"	Anzahl: unbekannt
		19'000	"	8.1	5.9	0.3	95	1.6	"	Dauer der Beobachtungsperioden:
		19'000	"	11.2	4.3	0.5	88	3.0	"	70, 70, 7, 38 und 28 Tage
	Eolshäll	37'000	"	9.9	6.4	0.5	92	1.8	"	
Al^{3+}	Aker	78**	Abfl.VKB Zufl. chem.St.	15.77	4.2	0.1	98	4.3	(26)	Proben: 9 Art der Probenahme: unbekannt
	Klagerup	18**	"	25.07	6.1	1.5	75	4.7	"	Proben: 2-5 Art der Probenahme: unbekannt
	Salem-staden	95**	"	27.6	9	1	90	3.5	"	
Al^{3+}	Univ. Stuttg.	65.5**	Zufl.VKB	105 mg/l à 8% Al^{3+} → 8.5 Al^{3+} ∿ 2% Fe^{3+} → 2.1 Fe^{3+}	5.2	1.6	69.2	∿2.1	(29)	Anzahl der Proben: unbekannt Art der Probenahme: alle 2 1/2 Stdn. von 8-18 h, von 18-8 h eine Sammelprobe. Dauer der Beobachtungsperiode: 16 Tage

*mit Flockungsmittel Purifloc "C 31", ** m^3/h