# Abwasserreinigungsversuche der EAWAG

Autor(en): **Gujer, Willi / Boller, Markus**

Objekttyp: **Article**

Zeitschrift: **Schweizer Ingenieur und Architekt**

Band (Jahr): **100 (1982)**

Heft 13

PDF erstellt am: **29.03.2024**

Persistenter Link: https://doi.org/10.5169/seals-74778

**Nutzungsbedingungen**

Die ETH-Bibliothek ist Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Inhalten der Zeitschriften. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern.
Die auf der Plattform e-periodica veröffentlichten Dokumente stehen für nicht-kommerzielle Zwecke in Lehre und Forschung sowie für die private Nutzung frei zur Verfügung. Einzelne Dateien oder Ausdrucke aus diesem Angebot können zusammen mit diesen Nutzungsbedingungen und den korrekten Herkunftsbezeichnungen weitergegeben werden.
Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Die systematische Speicherung von Teilen des elektronischen Angebots auf anderen Servern bedarf ebenfalls des schriftlichen Einverständnisses der Rechteinhaber.

**Haftungsausschluss**

Alle Angaben erfolgen ohne Gewähr für Vollständigkeit oder Richtigkeit. Es wird keine Haftung übernommen für Schäden durch die Verwendung von Informationen aus diesem Online-Angebot oder durch das Fehlen von Informationen. Dies gilt auch für Inhalte Dritter, die über dieses Angebot zugänglich sind.

Ein Dienst der *ETH-Bibliothek*
ETH Zürich, Rämistrasse 101, 8092 Zürich, Schweiz, www.library.ethz.ch

**http://www.e-periodica.ch**

## Weiteres Vorgehen nach dem Ideenwettbewerb

Auf Grund des Wettbewerbsergebnisses war es angezeigt, mit dem Start zu einem Projektwettbewerb, aber auch mit einer Auftragserteilung für die weitere Projektierung einstweilen zuzuwarten. Zunächst mussten die notwendigen Grundlagen für eine weitere Projektierung bereitgestellt und die einzelnen in Betracht kommenden *Verfahrensschritte* genauer untersucht werden.

Um die deshalb notwendige praktische Leistungsüberprüfung möglichst neutral durchzuführen, wurden *umfangreiche Versuche* in der Versuchsanlage Tüffenwies der EAWAG im Winter 1974/75 vorgenommen [2]. Gleichzeitig konnten die weiteren Projektierungsgrundlagen gründlich und umfassend vorbereitet werden. Vor allem sind die Zu- und Abflusswerte unter Berücksichtigung der im Ideenwettbewerb gewonnenen Erkenntnisse für den bevorstehenden Ausbau nochmals unter die Lupe genommen worden [3]. Es ging dabei nicht um eine Änderung der Zielvorstellung für den zukünftigen Zustand der Limmat, sondern es stellte sich heraus, dass *mit dem heutigen Abwasser die Nutzungsziele der Limmat* mit einem massiven Ausbau der biologischen Belebtschlammanlage inklusive Simultananfällung und einer anschliessenden Flockungsfiltration *vorerst erreicht* werden können.

In der Zukunft muss jedoch versucht werden, die *Qualität des heutigen Anlagezuflusses mindestens zu erhalten,* wenn möglich aber zu verbessern, so dass auf Verfahrensstufen, wie die teure Aktivkohlebehandlung, noch viele Jahre verzichtet werden kann. Um diese Zielsetzung zu erreichen, ist es aber notwendig, ein *besonderes Gewicht auf die Reduktion* der in der Kläranlage nur ungenügend oder gar nicht abbaubaren Stoffe *aus Industrie und Gewerbe* zu legen.

**Literaturverzeichnis**

[1] *Wiesmann, J., Roberts P.:* «Ergebnisse eines internationalen Wettbewerbes für die weitergehende Abwasserreinigung aus der Kläranlage Zürich-Werdhölzli». 3. Europäisches Abwasser- und Abfallsymposium, München 1975, Berichte der Abwassertechnischen Vereinigung, Bonn, Nr. 28.

[2] EAWAG (Eidg. Anstalt für Wasserversorgung, Abwasserreinigung und Gewässerschutz). Abwasserreinigungsversuche für den Ausbau der ARA Werdhölzli, Schlussbericht an das Tiefbauamt der Stadt Zürich. 1974 (unveröffentlicht)

[3] *Wiesmann J., Meier H.:* «Trendprognose der hydraulischen Bemessungsgrössen und der massgebenden Schmutzfracht für den Ausbau der Kläranlage Werdhölzli in Zürich». Gas-Wasser-Abwasser Nr. 8, 1977

Adresse des Verfassers: *J. Wiesmann,* dipl. Bauing. ETH/SIA, Leiter der Stadtentwässerung, Tiefbauamt der Stadt Zürich, Werdmühleplatz 3, 8023 Zürich.

# Abwasserreinigungsversuche der EAWAG

Von Willi Gujer und Markus Boller, Zürich

## Einleitung

In Anbetracht der Bedeutung der Kläranlage Werdhölzli als grösste Abwasserquelle der Schweiz, wurden an die neue Anlage Anforderungen gestellt, die *nur mit weitergehender Abwasserreinigung* erfüllt werden können. Erstmals in der Schweiz musste damit eine Kläranlage dimensioniert werden, die in der Lage ist, das Abwasser während des ganzen Jahres zu nitrifizieren. Zusätzlich sollten die Schwebstoffe im Ablauf der Anlage durch Filtration zurückgehalten werden.

Wohl waren in der Fachliteratur Hinweise für die Dimensionierung einer solchen Anlage vorhanden. In der Schweiz bestanden aber kaum konkrete Erfahrungen über die Bemessung und die Betriebsstabilität dieser Verfahren.

Die Eidg. Anstalt für Wasserversorgung, Abwasserreinigung und Gewässerschutz (EAWAG) unterhält in der *Tüffenwies* (Zürich) eine Versuchsstation, die in idealer Weise erlaubte, Versuche mit den in Erwägung gezogenen Abwasserreinigungsverfahren zu betreiben. Im September 1974 wurde die EAWAG durch die Baukommission für den Ausbau der Kläranlage Werdhölzli beauftragt, *Pilotversuche* durchzuführen, um Bemessungsunterlagen für die Erweiterung zu beschaffen. Mit der Ablieferung des Schlussberichts zu den Versuchen im September 1975 und einer späteren Ergänzung der Untersuchungen zur Abklärung des Effekts von Prozessrückläufen (Faulwasser) auf die biologische Abwasserreinigung (Nitrifikation) standen dann *zuverlässige Unterlagen für die Bemessung* der neuen Anlage zur Verfügung.

## Versuchsprogramm

Bild 1 zeigt das *Betriebsschema* der Pilotanlagen. Die Belastungen der halbtechnischen Belebunganlagen ($Q$ = 65–120 m³/Tag) liessen ein breites Spektrum der Nitrifikationsergebnisse erwarten. Die Anlage 2 wurde bei gleicher mittlerer Belastung betrieben wie die Anlage 1, jedoch mit Simultanfällung. Die intensive Überwachung der Belebungsanlagen dauerte 19 Wochen (Winter 1974/75). Die Laboranlagen mit einem Durchfluss von 130–400 l/Tag konnten mit Thermostaten im Temperaturbereich von 6–14 °C gehalten werden. Ihr Betrieb erlaubte, den *Grenzbereich der Nitrifikation als Funktion der Temperatur* zuverlässig zu bestimmen. In einer Ergänzungsstudie wurde in den Laboranlagen zusätzlich der Einfluss des Faulwassers aus der bestehenden Kläranlage auf die Nitrifikation untersucht.

Kolonnen mit einem Durchsatz von 4,3 bis 37 m³/Tag dienten zur *Untersuchung der Flockungsfiltration.* Der maximale Druckverlust dieser Filter war auf 3 m WS beschränkt. Die Filtergehäuse mit einem Durchmesser von 20 cm wurden mit Mehrschichtfiltern in der Höhe von 1,40 m bis 1,55 m ausgerüstet.

Gesamthaft konnten für alle Grössen, die von Interesse sind, genügend Einzelwerte bestimmt werden, um die Resultate in statistischer Form darzustellen.

## Resultate aus den Nitrifikationsversuchen

Die *Nitrifikation* dient der Oxidation von Ammonium ($NH_4^+$) über Nitrit ($NO_2^-$) zu Nitrat ($NO_3^-$). Nitrifizierende Mikroorganismen unterscheiden sich

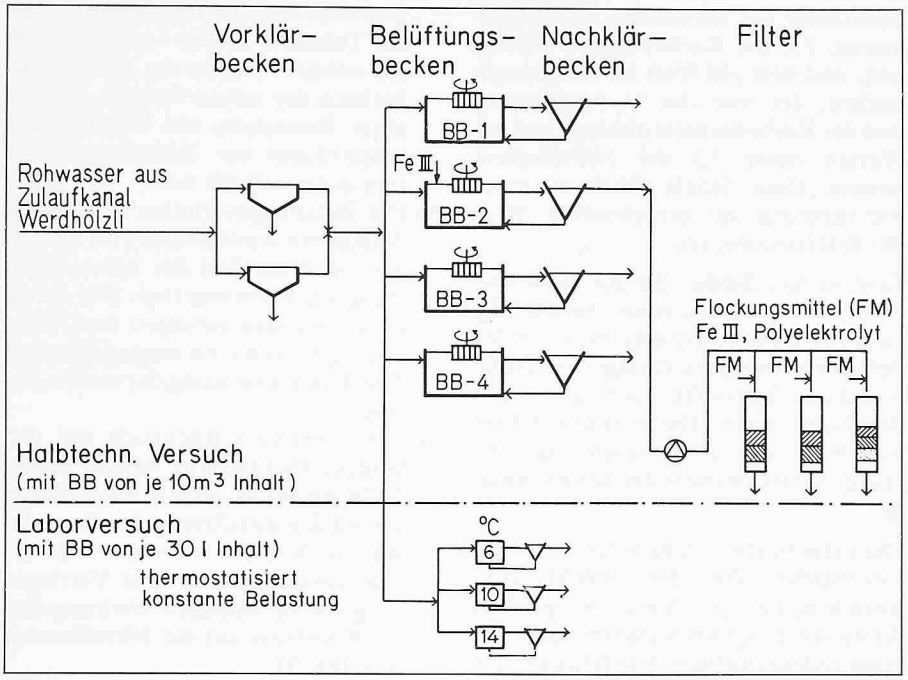



*Bild 1. Fliessschema der Pilotanlagen in der Versuchsstation Tüffenwies der EAWAG während der Pilotversuche für die Erweiterung der Kläranlage Werdhölzli*

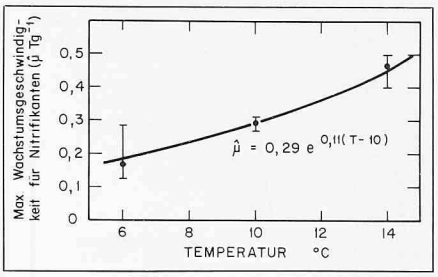



*Bild 2. Zusammenhang zwischen der maximalen Wachstumsgeschwindigkeit der Nitrifikanten und der Temperatur im Belüftungsbecken einer Belebungsanlage. Resultate aus Laborversuchen*

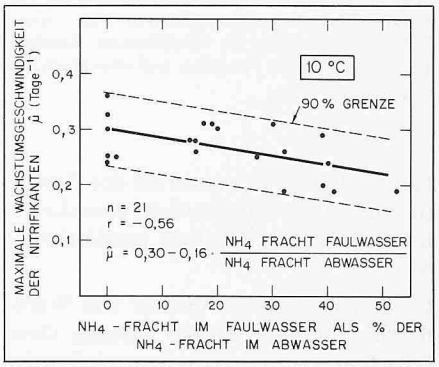



*Bild 3. Zusammenhang zwischen der maximalen Wachstumsgeschwindigkeit der Nitrifikanten bei 10 °C und der Rezirkulation von Faulwasser aus der Schlammbehandlung der bestehenden Anlage Werdhölzli. Resultate aus Laborversuchen*

deutlich von denjenigen Organismen, die organische Stoffe ($BSB_5$, TOC, DOC) mineralisieren, indem jene sehr langsam wachsen und daher nur in Belebungsanlagen mit geringer Belastung angesiedelt werden können. Nitrifizierende Belebunganlagen ergeben daher immer auch einen sehr weitgehenden Abbau von organischen Stoffen.

Über die Resultate der sehr umfangreichen Versuche mit den Belebungsanlagen wurde an anderer Stelle im Detail berichtet [1, 2, 3]. Hier werden nur zusammenfassend die *wichtigsten Erkenntnisse* dargestellt.

Zentrale Fragestellung der Nitrifikationsversuche war die Festlegung von Bemessungsgrössen für die Nitrifikation unter den kritischen Temperaturbedingungen während einer Winterperiode, also im Bereich um 10 °C. Bild 2 fasst die Resultate der Laborversuche zusammen. Die maximale Wachstumsgeschwindigkeit der Nitrifikanten, $\hat{\mu}$, ist ein Mass für die Belastbarkeit dieser Organismen mit Ammonium. Bild 2 zeigt die *starke Abhängigkeit* dieser Belastbarkeit von der Abwassertemperatur im Belüftungsbecken. Pro Grad Celsius tiefere Abwassertemperatur muss das Belüftungsbecken um 11% vergrössert werden. Die absolute Grösse von $\hat{\mu}$, bei der Dimensionierungstemperatur, erlaubt die Wahl eines nötigen Schlammalters (Prozessbelastung mit organischen Stoffen) in der neuen Anlage.

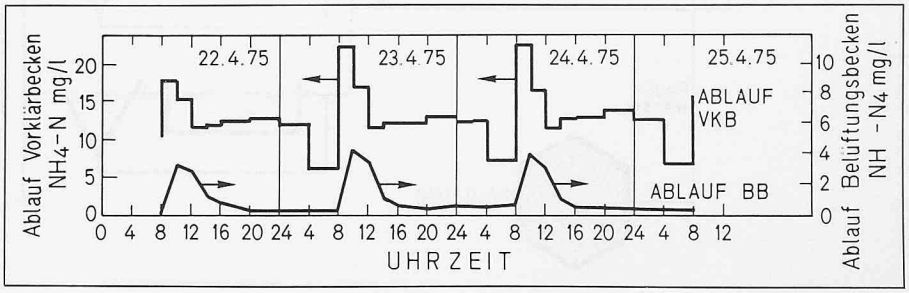
Rückläufe aus anaeroben Schlammbehandlungsstufen (Faulwasser, Filtrat aus der Entwässerung von Faulschlamm) *hemmen das Wachstum* von nitrifizierenden Organismen. Bild 3 zeigt den Zusammenhang zwischen der Faulwasserrezirkulation und der Belastbarkeit der Nitrifikanten ($\hat{\mu}$) bei 10 °C. Die in der neuen Anlage erwartete Rezirkulation von Faulwasser im Umfang von etwa 20% der Ammoniumfracht im Zulauf bedingt eine Vergrösserung der Belebungsbecken um 10–15%.

Die Belastung einer kommunalen Kläranlage mit Ammonium unterliegt im Tagesgang *ausgeprägten Variationen*. Bild 4 stellt die Variation der Ammonium ($NH_4$)-Konzentration im Ablauf der Vorklärbecken während 3 Tagen des Pilotbetriebes dar. Teilweise nitrifizierende Belebungsanlagen können während den Stunden mit konstanter Belastung (etwa 12.00-08.00 Uhr) das Ammonium weitgehend oxidieren. Während der Spitzenbelastung am Morgen (08.00–12.00 Uhr) bricht aber ein Teil des zufliessenden Ammoniums durch die Belüftungsbecken und damit auch durch die Nachklärbecken durch und belastet die Vorflut. Diesem Phänomen kann begegnet werden, indem

a) die Belastung der nitrifizierenden Anlage erniedrigt wird und
b) die Ammoniumbelastung im Zulauf zur Anlage ausgeglichen wird.

Bild 5 fasst die Resultate der halbtechnischen Pilotversuche zusammen. Der *Wirkungsgrad der Nitrifikation* (Elimination von $NH_4$) ist eine Funktion des sogenannten Sicherheitsfaktors für die Nitrifikation: $\hat{\mu}$ · Schlammalter. In diesem Faktor berücksichtigt $\hat{\mu}$ die Umweltbedingungen, die während der kritischen Dimensionierungssituation im Belebungsbecken vorherrschen: Temperatur, Rücklauf von Faulwasser, pH, gelöster Sauerstoff etc. Das Schlammalter steht für die Belastung der neu ge-

*Bild 4. Variation der Ammoniumkonzentration ($NH_4$) im Ablauf des Vorklärbeckens (VKB) und des vollduchmischten Belüftungsbeckens (BB) einer teilweise nitrifizierenden Belebungsanlage. Resultate aus halbtechnischen Versuchen*



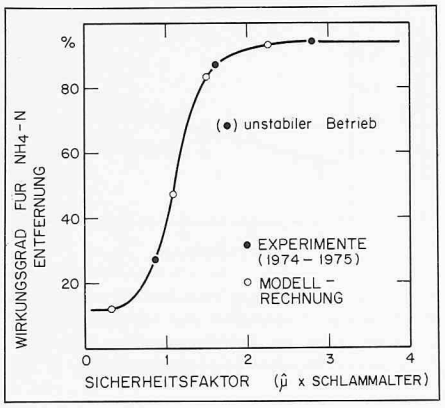



*Bild 5. Abhängigkeit des Wirkungsgrades der Ammoniumelimination (Nitrifikation) von einem Sicherheitsfaktor für die Nitrifikation. Resultate aus halbtechnischen Versuchen und einer mathematischen Simulation*

bauten Anlage – es muss bei der Projektierung so gewählt werden, dass die erforderliche Nitrifikation gewährleistet ist.

Da eine Anlage der Grösse von Werdhölzli sehr nahe an der Grenze ihrer Belastbarkeit dimensioniert wird (mindestens in bezug auf die Nitrifikation), mussten aus den Pilotversuchen *zusätzliche Bemessungsgrössen* abgeleitet werden. Abzuschätzen war insbesondere die *Belebtschlammproduktion,* die ja bei einer Bemessung auf ein bestimmtes Schlammalter direkt proportional zur Grösse der Belüftungsbecken ist. Zusätzlich ergaben sich Unterlagen für die Abschätzung des $O_2$-Bedarfes und die Charakterisierung der Schmutzstofffrachten im Zulauf zur neuen Anlage.

Eine besondere Studie betraf den Zusammenhang zwischen dem Belüftungssystem (insbesondere der $O_2$-Ausnützung) in der neuen Anlage, der Karbonathärte des Abwassers, der Nitrifikation, die die Karbonathärte verringert, und dem pH-Wert im Belüftungsbecken, der von der $O_2$-Ausnützung und der Karbonathärte abhängt und bei Werten unter 7,2 die Nitrifikation hemmt. Diese Studie führte zu einer Verringerung der projektierten *Tiefe der Belüftungsbecken.*

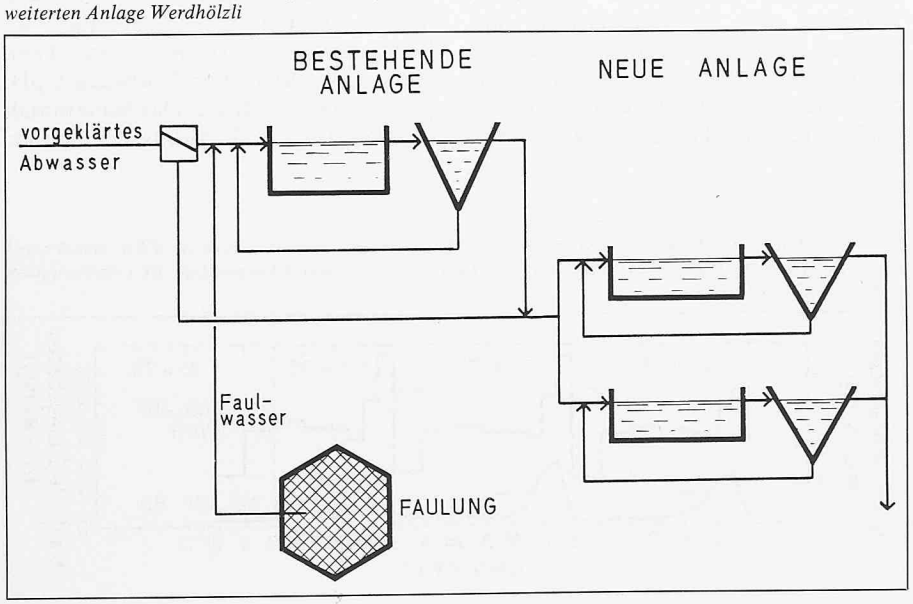
Eine weitere Studie, die auf einer mathematischen Simulation beruht [2], zeigt den Zusammenhang zwischen der Belastung der neuen Anlage Werdhölzli und den Stickstoffkonzentrationen in der Limmat auf. Diese Studie führte zur Wahl der *Dimensionierungsbelastung* (Schlammalter) der neuen Anlage.

Die Erfahrungen im Rahmen dieser Pilotversuche haben die EAWAG zum Vorschlag des gewählten biologischen Abwasserreinigungsverfahrens geführt, einer *teilzweistufigen Nitrifikation,* wie es in Bild 6 dargestellt ist. Der Ablauf der Vorklärung wird aufgeteilt, so dass in der bestehenden alten Belebungsanlage eine konstante Wassermenge bei hoher Prozessbelastung biologisch gereinigt und simultan gefällt wird. Gleichzeitig werden Rückläufe aus der anaeroben Schlammbehandlung während den Nachtstunden aerob vorbehandelt. Diese Anlage soll so betrieben werden, dass sie nicht nitrifiziert. In einer zweiten, neuen Belebungsanlage wird dann das ganze Abwasser bei geringer Prozessbelastung biologisch gereinigt, nitrifiziert und der Rest-Phosphor simultan gefällt.

Dieses teilzweistufige Verfahren vereinigt die folgenden Vorteile:

a) Die Schlammproduktion in der zweiten Stufe wird verringert um die Überschussschlammentnahme aus der Teilstufe. Damit verringert sich das nötige Volumen des Belüftungsbeckens der neuen Anlage, das bei einer Bemessung auf Nitrifikation proportional zur Schlammproduktion in dieser Stufe wird.
b) Die Belastungsvariation der neuen Anlage mit Ammonium wird verringert, weil ein Teil der Spitzenbelastung am Vormittag (vgl. Bild 4) um etwa 4 Stunden verzögert wird. Daraus ergibt sich eine ausgeglichenere Nitrifikationsleistung der neuen Anlage.
c) Die anaeroben Rückläufe aus der Schlammbehandlung werden in der Teilstufe aerob vorbehandelt, bevor sie mit den nitrifizierenden Organismen in Kontakt kommen. Das ergibt voraussichtlich eine Verringerung der hemmenden Wirkung dieser Rückläufe auf die Nitrifikanten (vgl. Bild 3).
d) Dieses Verfahrensschema erlaubt eine einfache Integration der bestehenden Anlage, die während der Bauzeit immer im Betrieb steht, ins neue Verfahrenskonzept.

*Bild 6. Schematische Darstellung des Nitrifikationsverfahrens (teilzweistufige Belebungsanlage) in der erweiterten Anlage Werdhölzli*




## Resultate der Filtrationsversuche

Die *Flockungsfiltration* dient dazu, mit Hilfe von Flockungsmitteln den gelösten Phosphor und feinkolloidale Teilchen im Abwasser in grössere Partikelagglomerate überzuführen, die in einer prorösen Filtermasse vom Abwasser abgetrennt werden. Auf diese Weise gelingt es, geringe Restkonzentrationen an Phosphor und suspendierten Stoffen mit hoher Ablaufstabilität zu erzielen, wie dies mit den bisherigen technischen Mitteln nicht oder nur mit höherem Aufwand erreicht werden konnte. Die Ergebnisse von Flockungsfiltrationsversuchen, insbesondere auch diejenigen aus den Jahren 1974/75 für die Stadt Zürich sind in früheren Publikationen beschrieben [4, 5, 6]. Die Resultate zur weitergehenden Reinigung des Zürcher Abwassers bildeten die Basis für weitere Studien, die schliesslich zur technischen Reife des Verfahrens führten. Die Flockungsfiltration gelangt heute in mehreren schweizerischen Gemeinden zum Einsatz.

Wie Bild 1 entnommen werden kann, wurden die Filtrationsversuche mit biologisch gereinigtem und simultangefälltem Abwasser der Tüffenwies-Anlage 2 durchgeführt. Dies ermöglichte die Prüfung der *wirtschaftlichsten Verfahrenskette* mit einer zweimaligen Dosierung von Flockungsmittel (Belüftungsbecken, Filterzulauf). Sowohl zur Simultanfällung des Phosphors wie zur

Flockungsfiltration wurde Eisenchlorid [Fe (III)] in Dosierungskonzentrationen von 12,5 mg Fe (III)/l respektive 2,5 mg Fe (III)/l angewandt. Zur besseren Anlagerung der Feststoffe erfolgte zusätzlich vor dem Filtereinlauf die Dosierung von 0,1 mg/l eines künstlichen Polymers. Im wesentlichen wurden zwei unterschiedlich aufgebaute *Raumfilter* geprüft, wovon der eine drei Schichten (Quarz, Anthrazit, Bims) und der andere zwei Schichten (Quarz, Anthrazit) besass. Bims hat sich dann allerdings im längerzeitigen Betrieb als zu wenig abriebfest erwiesen. In drei Versuchsserien konnten unterschiedliche Fragen in Zusammenhang mit Verfahrensstudien zum Ausbau der Kläranlage Werdhölzli beantwortet werden.

In einer ersten Serie wurde die Auswirkung *unterschiedlicher hydraulischer Belastungen* auf Filtratqualität und Druckverlustverhalten der Filter geprüft. Durch eine Reihe von Versuchen mit Filtergeschwindigkeiten bis zu 60 m/h konnte gezeigt werden, dass das Konzept einer sogenannten «Ultra-High-Rate»-Filtration sich zur Flokkungsfiltration von Abwasser nicht eignet. Obwohl auch bei hohen Belastungen bis zu einem Druckverlust von 3,0 m Wassersäule keine Schmutzstoffdurchbrüche erfolgten, musste aus Gründen übermässig hoher Druckverluste die hochbelastete und kostengrünstigere Verfahrensführung als im Betrieb unwirtschaftlich beurteilt werden. Das Zusammenspiel von Anfangsdruckverlust und Filterwiderstand infolge Anlagerung von Feststoffen bei unterschiedlichen Filtergeschwindigkeiten führte zu der in Bild 7 dargestellten Abhängigkeit der Filterlaufzeit von der hydraulischen Belastung. Wirtschaftliche und betriebstechnische Überlegungen beschränken die Laufzeiten einer automatischen Anlage in den Bereich von 15–30 Stunden. Die hydraulische Belastung der Flockungsfilter war deshalb mit Vorteil im Bereich von 10 m/h für Trockenwetter und 20 m/h bei Regenwetter anzusetzen.

In einer zweiten Versuchsserie wurde in mehrfach wiederholten Versuchen unter gleichen Bedingungen *die Leistung und die Stabilität des Flockungsfiltrationsverfahrens* getestet. Aus diesen Versuchen konnten Erkenntnisse über die Wirkung der zweistufigen Zugabe von Fe (III) auf die Filtration gewonnen werden. Tabelle 1 zeigt Ablaufqualitäten, Eliminationsgrade, Laufzeiten und Feststoffbeladungen bei Filtration mit und ohne Zugabe von Fe (III) zum Filtereinlauf. Unterschiede sind vor allem bei der Elimination des Phosphors signifikant. Die unterschiedlichen Eigenschaften der Feststoffe aus der zusätzlichen Phosphorfällung bewirkten eine wesentliche Zunahme des Druckverlustes und damit kürzere Laufzeiten.

*Tabelle 1. Filtratqualität, Filterlaufzeit und Beladung des Filtermaterials (bei 3 m WS Druckverlust) für Flockungsfiltration mit und Filtration ohne Chemikalienzugabe nach Simultanfällung. Mittelwert und Streuung aus mehreren Versuchen*

| | *mit Fe (III) und Polyelektrolyt (PE) (22 Versuche)* | | *ohne FE (III) (16 Versuche)* | |
|---|---|---|---|---|
| | Konzentration [mg/l] | Elimination [%] | Konzentration [mg/l] | Elimination [%] |
| P ges. | 0,36±0,25 | 78 | 0,80±0,45 | 45 |
| P gel. | 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 |
| Laufzeit [Std.] | 16 ±2 | | 71 ±8 | |
| Endbeladung [g TSS/l] | 2,4 ±0,5 | | 5,5 ±1,0 | |

Ein Vergleich des Zwei- und Dreischichtfilters zeigte deutlich den Vorteil des *dreischichtigen Aufbaus,* indem dieser zu einer besseren Verteilung der Filterbeladung und damit zu wesentlich geringeren Druckverlusten führte.

Untersuchungen des Rückspülwassers hinsichtlich Zusammensetzung und Absetzverhalten liessen erkennen, dass die zusätzliche Belastung der Grossanlage mit Spülschlamm gering sein dürfte.

Eine Verfahrensstudie, die eine *zeitweise Filtration eines Gemisches von vor- und nachgeklärtem Abwasser* vorsah (Regenwetterperioden), gab Anlass zur dritten Versuchsserie. Im Parallelbetrieb wurde ein Dreischichtfilter mit vorgeklärtem und ein anderer mit nachgeklärtem Abwasser unter gleichen Betriebsbedingungen beschickt. Starke Flächenfiltration verursacht durch die Grobstoffe im vorgeklärten Abwasser führten zu übermässig hohen Druckverlusten in den obersten Schichten. Es resultierten sehr kurze Laufzeiten im Bereich von 2–3 Stunden, so dass die Idee einer derartigen Regenwasserbehandlung *nicht weiter verfolgt* werden musste.

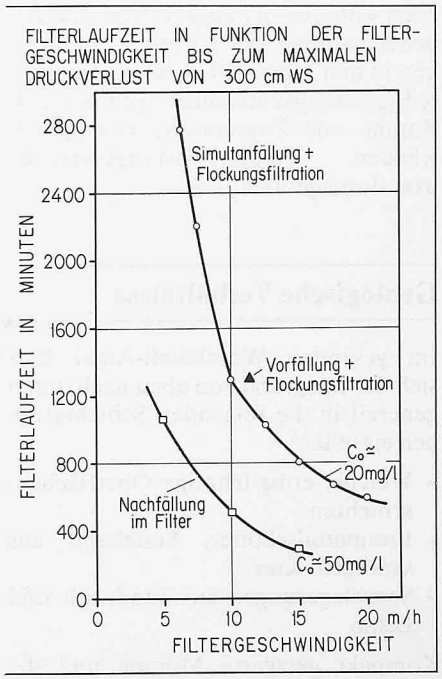
## Bedeutung der Resultate

In diesen Versuchen konnten erstmals in der Schweiz systematische *Erfahrungen mit nitrifizierenden Belebungsanlagen* gesammelt werden. Dabei ergaben sich Aspekte, die damals in der Fachliteratur noch nicht beschrieben waren: z. B. Absolutwerte der maximalen Wachstumsgeschwindigkeit der Nitrifikanten in Funktion der Temperatur unter den Bedingungen in Belebungsanlagen, Einfluss von Prozessrückläufen auf die Nitrifikation, Einfluss der Belastungsvariation auf die Nitrifikation. Diese Erfahrungen erlaubten, die Dimensionierung der neuen Anlage auf eine Basis zu stellen, die in ihrer Art bisher nicht verfügbar war.

Neben der spezifischen Bedeutung der Versuche für die Erweiterung der Kläranlage Werdhölzli, legten diese Versuche auch das Fundament für die *Dimensionierung von mehreren Belebungsanlagen in der Schweiz.* Das ganze Versuchsprogramm wurde so durch Spezialstudien auf Kosten der EAWAG ergänzt, dass heute Unterlagen zur Verfügung stehen, um eine grosse Zahl von nitrifizierenden Belebungsanlagen *auf wissenschaftlicher Basis* zu entwerfen.

Die Erfahrungen in den Pilotversuchen zur Filtration/Flockungsfiltration haben einerseits zur Wahl und *Dimensionierung der Flockungsfiltration* als End-

*Bild 7. Abhängigkeit der Filterlaufzeit bis zum Erreichen eines Druckverlustes von 3 m WS von der Filtergeschwindigkeit (hydraulische Belastung der Filter)*



**Literaturverzeichnis**

[1] *Gujer, W.:* «Verfahrenstechnische Grundlagen der Nitrifikation in Belebtschlammanlagen». Gas-Wasser-Abwasser, Seite 609, 1976

[2] *Gujer, W.:* «Design of Nitrifying Activated Sludge Process with the Aid of Dynamic Simulation». Prog. Wat. Tech., 9, 323, 1977

[3] EAWAG. Abwasserreinigungsversuche für den Ausbau der ARA Werdhölzli, Schlussbericht z. Hd. des Tiefbauamtes der Stadt Zürich

[4] *Boller, M., Kavanaugh, M.:* «Contact Filtration for Additional Phosphorus Removal». Prog. Wat. Techn., Vol. 8, No. 6, 203, 1977

[5] *Boller, M.:* «Flockungsfiltration zur Elimination von Phosphor aus kommunalem Abwasser». Gas-Wasser-Abwasser, Seite 615, 1976

[6] *Kavanaugh, M., Eugster, J., Weber, A., Boller, M.:* «Contact Filtration for Phosphorus Removal». Journal Water Pollution Control Federation, 49, 2157, 1977

[7] *Boller, M., Eugster, J., Weber, A.:* «Erfahrungen mit der ersten schweizerischen Flockungsfiltrationsanlage auf der Kläranlage Hochdorf». Gas-Wasser-Abwasser, Seite 349, 1981

stufe der Reinigung in der Kläranlage Werdhölzli geführt. Andererseits waren diese Versuche auch die Basis für weitere Versuche und die Auslegung der ersten grosstechnischen Flockungsfiltrationsanlage der Schweiz zur weitergehenden Phosphorelimination in Hochdorf [7].

Adresse der Verfasser: Dr. *W. Gujer* und Dr. *M. Boller*, Eidg. Anstalt für Wasserversorgung, Abwasserreinigung und Gewässerschutz (EAWAG), 8600 Dübendorf.

# Hydrogeologische und geotechnische Verhältnisse

Von Ernst Walter, Zürich

## Einleitung

In den Jahren 1974–1977 wurden im Hinblick auf den Ausbau der Kläranlage Werdhölzli mit Kernbohrungen, Rammsondierungen und Klein- und Grosspumpversuchen aus Filterbrunnen die hydrogeologischen und geotechnischen Verhältnisse abgeklärt [1, 2]. Dabei standen vor allem die Fundationsprobleme der einzelnen Bauwerke, Probleme der Wasserhaltung in den Baugruben, Auftriebs- und Isolationsprobleme sowie Fragen des Gewässerschutzes im Vordergrund.

Kurz vor Beginn und zum Teil auch noch während der angelaufenen Bauarbeiten wurden bei einzelnen Bauwerken in den Jahren 1979/80 noch gezielte Ergänzungsuntersuchungen, wie z.B. Ramm- und Zugversuche von Spundwänden, Plattenbelastungsversuche usw. durchgeführt [3, 4].

## Geologische Verhältnisse

Im gesamten Werdhölzli-Areal lässt sich der Baugrund von oben nach unten generell in die folgenden Schichtgruppen einteilen:

- Weiche, erdig-lehmige Oberflächenschichten
- Limmattalschotter, bestehend aus sandigem Kies
- Seeablagerungen aus Sand, Silt und Lehm

Kompakt gelagerte Moräne und die darunter folgende Felsunterlage aus Molasse wurde mit keiner der maximal 35 m tiefen Kernbohrungen angetroffen.

### Weiche, erdig-lehmige Oberflächenschichten

Die über dem Limmattalschotter liegenden Oberflächenschichten erreichen Mächtigkeiten von 0,5–3,5 m. Sie bestehen aus Humus, erdigem Lehm, Lehm mit wechselndem Sandgehalt und vereinzelt auch aus lehmfreiem Feinsand.

Bei diesen vorwiegend lehmigen Schichten handelt es sich um *junge Überschwemmungsablagerungen.* Sie enthalten häufig auch noch organische Bestandteile. Eigentliche Torfschichten wurden jedoch nicht angetroffen. Mit grösserer Entfernung zur Limmat scheint ihre Mächtigkeit zuzunehmen. Diese Oberflächenschichten sind äusserst setzungsempfindlich, die Zusammendrückungsmoduli $M_E$ liegen durchwegs unter 40 kg/cm². Sie eignen sich deshalb auch für sehr kleine Bauwerkslasten nicht als Fundationsunterlage.

### Limmattalschotter

Unter den Oberflächenschichten folgt der in seiner Zusammensetzung und Mächtigkeit sehr variable, sandige Kies des Limmattalschotters. Dieser weist einen in horizontaler und vertikaler Richtung *heterogenen Aufbau* auf. Es tritt sowohl Feinkies, Mittelkies als auch Grobkies auf. Zudem sind Sand- und Siltzwischenschichten und auch vereinzelt Blöcke eingestreut. Je nach Grösse des Feinanteils ist der Kies mehr oder weniger durchlässig.

Die Untergrenze zu den darunterfolgenden Sanden ist meist unscharf, indem der Kiesanteil sukzessive abnimmt und der Sandgehalt grösser wird. Die Untergrenze der Kiesschichten verläuft zum Teil sehr unruhig in 6–24 m Tiefe, was Kiesmächtigkeiten von etwa 4–22 m bedeutet.

Die *Lagerungsdichte* dieses Kieskomplexes ist *sehr uneinheitlich,* was für eine Flussablagerung, die nie von einem Gletscher überlagert worden ist und deshalb nicht im eigentlichen Sinne vorbelastet ist, kennzeichnend ist. Auch ist keine gesetzmässige Zunahme der Lagerungsdichte mit der Tiefe zu erkennen. Die Zusammendrückungsmoduli $M_E$ schwanken zwischen etwa 300 und 800 kg/cm².

### Seeablagerungen

Die Kiesschichten gehen nach unten meist ohne deutliche Grenze in sandige Schichten über, die untergeordnet noch einzelne Kieskomponenten enthalten. Die Korngrösse des Sandes nimmt meistens von oben nach unten ab. In den obersten Schichten treten zum Teil noch kiesige Grobsande auf, während die tieferen Schichten eher Mittel- bis Feinsande aufweisen.

Unter den Sanden folgen eiszeitliche, feinkörnige Seebodenablagerungen. Es handelt sich dabei vorwiegend um feingeschichtete Silte und steife Lehme, in welche örtlich auch verschwemmtes, lehmiges Moränenmaterial eingeschaltet sein kann. In den Seebodenlehmen ist bei deren Belastung auf Grund der kleinen Durchlässigkeitskoeffizienten mit *langen Konsolidationszeiten* zu rechnen.

Die Sande und Silte sind mehrheitlich vollständig inkohärent und in hohem Masse auf *hydraulischen Grundbruch* gefährdet.