Zeitschrift: Wasser- und Energiewirtschaft = Cours d'eau et énergie

Herausgeber: Schweizerischer Wasserwirtschaftsverband

Band: 53 (1961)

Heft: 4

Artikel: Untersuchungen über die Einwirkung von Stauhaltungen auf die natürliche Selbstreinigung

Autor: Liebmann, H.

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-920745

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Mehr erfahren

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. En savoir plus

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. Find out more

Download PDF: 23.08.2025

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, https://www.e-periodica.ch

Untersuchungen über die Einwirkung von Stauhaltungen auf die natürliche Selbstreinigung

DK 628.3

Professor Dr. *H. Liebmann*,
Universität München und Bayerische Biologische Versuchsanstalt München und Wielenbach
(nach zwei Vorträgen, durchgeführt am 24. Februar 1959 vom Schweizerischen Wasserwirtschaftsverband gemeinsam mit dem Linth-Limmat-Verband in Zürich und vom 16. Oktober 1959 anläßlich der Jahreshauptversammlung des Südwestdeutschen Wasserwirtschaftsverbandes in Baden-Baden)

Mit der größer werdenden Zusammenballung von Menschen in Städten und mit der steigenden Industrialisierung, Erscheinungen, wie sie in allen hochzivilisierten Ländern der Welt zu beobachten sind, steigt der Bedarf an Reinwasser sprunghaft an. Hygienische Maßnahmen und das Vorhandensein entsprechender Wasserreserven sind wichtige Voraussetzungen für die Siedlungswasserwirtschaft. Für die Volkswirtschaft eines hochzivilisierten Landes muß deshalb die Wasserwirtschaft in steigendem Maße eine Schlüsselposition einnehmen. Die Wasserwirtschaft kann den hohen Anforderungen, die in wachsendem Maße an sie gestellt werden, nur entsprechen, wenn sowohl die Quantität als auch die Qualität des Wassers allen Ansprüchen gerecht werden, die eine intensive landwirtschaftliche Bodennutzung und eine wachsende Industrialisierung mit sich bringen. Diese Entwicklung führt zwangsläufig dazu, daß der Reinwasserbedarf aus natürlichem Grund- und Quellenwasser nur noch teilweise gedeckt werden kann und daß die fehlende Wassermenge durch Oberflächenwasser gedeckt werden muß. Oberflächenwasser steht aber in der Regel nicht in dem gewünschten Reinheitsgrad zur Verfügung. Es muß deshalb vorher aufgearbeitet, gereinigt werden. Reinigung aber kostet viel Geld. Die moderne Wasserwirtschaft ist deshalb in erheblichem Maße eine Wassergütewirtschaft und muß für entsprechenden Wasserschutz sorgen. Die weitgehende Reinigung städtischer und industrieller Abwässer in modernen, mechanisch-biologischen Kläranlagen verhütet die Verunreinigung des Oberflächenwassers. Es hängt von der Art der Abwässer und Vorfluter ab, wieweit die Reinigung des Abwassers erfolgen muß, denn es gibt eine Reihe von Wechselbeziehungen zwischen der Wassermenge und der Wassergüte.

Zwangsläufig führt eintretender Wassermangel zur Wasserzurückhaltung in Stauen.

«Das Wasser ist bestmöglich zu konservieren, d. h. es ist alles zu tun, um den Wassertropfen möglichst lange im Land zu behalten, statt ihn zum Meer hinabströmen zu lassen» (Demoll R. «Bändigt den Menschen», Bruckmann-Verlag, München, 1954).

Es erhebt sich die Frage, ob durch die Herabsetzung der Fließgeschwindigkeit eines Flusses, durch den Aufstau, durch die längere Verweildauer des Wassers in einem Flußstau oder durch die mit dem Stau bedingten größeren Wassertiefen nachteilige Veränderungen der natürlichen Selbstreinigung auftreten. Jeder Praktiker stößt dann auf dieses Problem, wenn es darum geht, den Kostenträger für die biologische Nachreinigung einer bereits bestehenden mechanischen Kläranlage zu ermitteln, die ihr Abwasser in einen ursprünglich schnellfließenden, jetzt aber gestauten und deshalb langsam fließenden Vorfluter leitet.

Zunächst müssen bei Untersuchungen über die Einwirkung von Stauhaltungen auf die Gewässerverschmutzung die einzelnen Faktoren bekannt sein, welche für die natürliche Selbstreinigung von Bedeutung sind. Man muß hier physikalische, chemische und biologische Faktoren unterscheiden, die gleichermaßen zum Abbau der organisch fäulnisfähigen Substanz im Vorfluter beitragen. Einige dieser Faktoren spielen beim Aufstau des Wassers eine besondere Rolle. Von den physikalischen Faktoren sind dies: Sedimentation, spezifisches Gewicht, Viskosität, Sonnenlicht und Wärme sowie Wellenbewegung und Strömung. Die Vorausberechnung der Sedimentation ist deshalb oft schwierig, weil Konglomerate der verschiedenartigsten Stoffe zum Absetzen gelangen, und weil das Verhältnis der aufgeschwemmten Stoffe untereinander durch das verschiedene spezifische Gewicht stärkeren Veränderungen unterworfen ist. Die verfügbare Absetzzeit wechselt mit der Wasserführung. Es ist ferner zu berücksichtigen, daß Dichte und Viskosität des Wassers mit seinem Gehalt an gelösten und kolloidalen Stoffen wechseln und daß darüber hinaus eine Beeinflussung durch die Temperatur erfolgt. Die Temperatur ist auch im Hinblick auf die Verdunstung des Wassers von Bedeutung, denn durch die Verdunstung reichert sich die Schicht unmittelbar unter der Oberfläche des Wassers mit gelösten Substanzen an, wird dadurch spezifisch schwerer und sinkt nach unten, während spezifisch leichtes Wasser nach oben kommt. Es entsteht auf diese Weise eine vertikale Strömung, welche die Sedimentation beeinflußt.

Von den physikalischen Faktoren der natürlichen Selbstreinigung spielen Sonnenlicht und Wärme eine besondere Rolle. In Wasser eindringendes Licht wird bekanntlich teils zerstreut, teils absorbiert und dabei in eine andere Energieform, in Wärme, umgewandelt. Übersieht man die spektrale Durchlässigkeit einer Wasserschicht von 1 m Höhe, so ist im kurzwelligen Bereich eine große und ziemlich gleichmäßige Durchsichtigkeit vorhanden, die jedoch etwa von der Wellenlänge 570 mμ aufwärts sehr rasch abnimmt. Von der Gesamtstrahlung des Wassers werden auf dem kurzen Wege von 1 m Wassertiefe rund 53 % absorbiert und in Wärme umgesetzt. So herrscht z. B. in klaren Alpenseen ein grünes Dämmerlicht, das bei 30 m Tiefe in seiner Intensität ungefähr der Vollmondbeleuchtung entspricht. Im Gegensatz zum Wasser vieler Seen ist Flußwasser durch anorganische und organische Sedimente mehr oder weniger getrübt, so daß hier eine Ausnützung des sogenannten «Strahlungsklimas» bzw. des «Lichtklimas» nur bis zu einer Wassertiefe von maximal 2,5 m möglich ist.

Neben Sonnenlicht und Wärme sind Wellenbewegung und besonders die Strömung für die natürliche Selbst-

reinigung von Bedeutung. Man muß zwischen einer geordneten oder laminaren und einer ungeordneten oder turbulenten Strömung unterscheiden. Während die laminare Strömung nur unterhalb einer bestimmten Strömungsgeschwindigkeit entstehen kann, überwiegen im ungestauten Fluß die turbulenten Strömungen. Diese entstehen meist an kleinen Unebenheiten des Flußbettes, lösen sich, von der Strömung mitgerissen, als Walzen mit horizontaler Achse ab, vergrößern sich beim Aufsteigen und enden schließlich an der Wasseroberfläche in flachen, aufquellenden Erhebungen.

Von den chemischen Faktoren der natürlichen Selbstreinigung spielen besonders die Sauerstoff-Aufnahme und die Sauerstoff-Zehrung im aufgestauten Wasser eine Rolle. Dabei kann der Luftsauerstoff ins Wasser eindringen:

1. durch natürliche Diffusion, indem aus der über dem Wasserspiegel stehenden Luftsäule Luft in das Wasser eindringt,
2. durch Umwälzen des Wassers oder durch Verteilung des Wassers in der Luft, wie es beim Fließen des Wassers in flacher Schicht über ein steiniges Flußbett mit Wehrabsätzen erfolgt und
3. durch die Assimilationstätigkeit von chlorophyllhaltigen Wasserorganismen, eine Möglichkeit des Sauerstoff-Eintrages ins Wasser, die allerdings an das Sonnenlicht gebunden ist und deshalb nur tagsüber erfolgen kann, während nachts durch den umgekehrten Vorgang der Dissimilation dem Wasser Sauerstoff entzogen wird.

Bei den biologischen Faktoren der natürlichen Selbstreinigung muß man die anaerobe und aerobe Phase unterscheiden. Die eine gestattet nur solchen Organismen eine Existenz, die ohne freien Sauerstoff im Wasser und Schlamm auskommen, die andere umfaßt den Lebensbezirk all derjenigen Organismen, die an das Vorkommen von freiem Sauerstoff im Wasser gebunden sind. Der Abbau der organisch fäulnisfähigen Substanz verläuft in der anaeroben Zone langsamer als in der aeroben und ist im Gegensatz zur aeroben Phase mit Geruchsbelästigungen, z. B. durch Schwefelwasserstoff, verbunden.

Um den aerob lebenden Organismen günstige Existenzbedingungen zu bieten, müssen folgende Voraussetzungen erfüllt sein:

1. die Schaffung großer Oberflächen zum Ansetzen der Organismen,
2. die Zuführung von genügend freiem Sauerstoff,
3. die intensive Heranführung des Sauerstoffes an die Zelloberfläche der einzelnen Organismen, verbunden mit dem notwendigen Abtransport der Stoffwechselprodukte.

Nachdem die wichtigsten physikalischen, chemischen und biologischen Faktoren der natürlichen Selbstreinigung bekannt sind, sollen im folgenden am Beispiel des schnellfließenden sowie des gestauten und langsam fließenden Flusses die Bedingungen der natürlichen Selbstreinigung miteinander verglichen werden. Dabei machen wir uns die Erfahrungen und Untersuchungsergebnisse zunutze, die wir im Verlaufe der letzten 20 Jahre an ungestauten und gestauten Flüssen im süddeutschen Raum gesammelt haben und wie diese u. a. im Band 2 unserer Buchreihe «Münchner Beitrag zur Abwasser-, Fischerei- und Flußbiologie» unter dem Titel «Biologie und Chemie des ungestauten und gestauten Stromes, beschrieben am Beispiel der Donau und des Mains» (Oldenbourg-Verlag, München 1954) niedergelegt worden sind.

Für das Verständnis der folgenden Ausführungen muß ferner auf die Münchner Methode zur Kartierung der Wassergüte hingewiesen werden, wie sie neuerdings unter dem Titel «Über die Darstellung der Wassergüte von Flüssen und Seen» in der Zeitschrift der Schweizer Gas- und Wasserfachleute veröffentlicht worden ist. Auch die Untersuchungsergebnisse, welche im Rahmen des in Ausarbeitung begriffenen bayerischen Wassergüteatlasses in den letzten 12 Jahren gesammelt worden sind, haben viele Einzelergebnisse über die Einwirkung von Stauhaltungen auf die Gewässerverschmutzung geliefert. An dieser Stelle sei lediglich erwähnt, daß nach dem revidierten Saprobiensystem von Liebmann (Handbuch der Frischwasser- und Abwasserbiologie, Band I, Oldenbourg-Verlag, München 1951) vierverschiedene Phasen beim Abbau der fäulnisfähigen organischen Substanz unterschieden und als Wassergüteklassen I bis IV bezeichnet werden. Die vier Wassergüteklassen sind wie folgt gekennzeichnet:

Die *Wassergüteklasse I* (Zone der Oligosaprobier = kaum verunreinigt), durch *blaue Farbe* gekennzeichnet, weist vollendete Oxydation bzw. Mineralisation der fäulnisfähigen organischen Substanz auf. Der Sauerstoffgehalt ist hoch, und es ist entweder keine oder nur eine ganz geringe Sauerstoffzehrung vorhanden. Der Schlamm ist praktisch vollkommen oxydiert.

Biologisch ist die Reinwasserzone durch das Absinken der Keimzahl unter 100 Keime je cm^3 gekennzeichnet. Bakterienfresser treten deshalb in dieser Zone zurück. Besonders charakterisiert wird die Wassergüteklasse I durch das Vorkommen einer größeren Zahl von Insektenlarven, welche insbesondere Forellen als Nahrung dienen.

Die *Wasergüteklasse II* (Zone der Betamesosaprobier = mäßigt verunreinigt), durch *grüne Farbe* gekennzeichnet, ist die Zone der fortschreitenden Oxydation bzw. Mineralisation. Die Sauerstoffzehrung ist gering und beträgt weit unter 50 %.

Biologische Kennzeichen sind: Ein Absinken der Keimzahl unter 100 000 je cm^3 und eine große Mannigfaltigkeit an Pflanzen und Tieren. Es treten zwar sehr viele Arten, diese aber nur noch selten in Massenentwicklung auf. Typisch ist die Mannigfaltigkeit an Kiesel-, Grün- und Jochalgen. Süßwasserschwämme, Moostierchen und die meisten Arten der Schnecken, Muscheln, Kleinkrebse und Insektenlarven haben in den reichen Krautbeständen günstige Lebensmöglichkeiten. Viele Frösche und Fische leben in dieser Zone.

Die *Wassergüteklasse III* (Zone der Alphamesosaprobier = stark verunreinigt) durch *gelbe Farbe* gekennzeichnet, weist folgende Merkmale auf: stürmisch einsetzende Oxydationsprozesse, reichlich vorhandene Aminosäuren, die durch den Abbau der hochmolekularen Verbindungen entstehen. Der Gehalt des Wassers an freiem Sauerstoff kann erheblich sein, die Sauerstoffzehrung beträgt in der Regel noch über 50 %.

Biologisch gekennzeichnet wird die Wassergüteklasse III durch die noch immer sehr hohe Zahl an Bakterien; die Zahl der auf Nährgelatine entwickelten Wasserkeime beträgt normalerweise weniger als 100 000 je cm^3. Es sind bereits viele Pflanzen und Tiere vorhanden, von

denen viele infolge der günstigen Ernährungsbedingungen Massenentwicklung zeigen (Wasserblüten durch Algen). Von den Pflanzen kommen bereits eine Reihe von Kiesel-, Grün- und Jochalgen sowie auch einige höhere Pflanzen vor. Die Mehrzahl der Pflanzen und Tiere sind aber noch Mikroorganismen. Die vielen Pflanzen und Tiere sind für Fische eine reiche Nahrungsquelle, so daß eine Reihe von Arten hier gut gedeiht. Durch die Massenentwicklung von Mikroorganismen (Wasserblüten) sind allerdings nachts durch die umfangreichen Dissimilationsprozesse chlorophyllhaltiger Organismen Sauerstoffkalamitäten und damit Fischsterben möglich. Von den Tieren fehlen die Schwämme und Moostierchen. Von höher organisierten Formen kommen bereits einige Schnecken, Muscheln, Krebse und Insektenlarven vor. Von den Fischen gedeihen Karpfen, Schleien, Karauschen und Aale gut.

Die *Wassergüteklasse IV* (Zone der Polysaprobier = außergewöhnlich stark verunreinigt) wird durch *rote Farbe* markiert und ist chemisch durch das vorwiegende Auftreten von Fäulnisprozessen durch Reduktions- und Spaltprozesse definiert. Freier Sauerstoff ist entweder gar nicht, oder nur in Spuren vorhanden. Die Sauerstoffzehrung ist stets außerordentlich hoch, Schwefelwasserstoffbildung ist meist nachzuweisen. Die Oxydation von Ammoniak zu Nitrat ist nicht möglich. Es sind Kohlensäure und hochmolekulare stickstoffhaltige Substanzen, besonders Eiweißstoffe und ihre Abbauprodukte, vorhanden; Schwefeleisen ist im Schlamm oft reichlich anzutreffen.

Biologisch gekennzeichnet ist die Wassergüte IV durch Massenentwicklung von Bakterien. Unter Umständen sind in Nährgelatine mehr als 1 Million Keime je cm^3 Wasser vorhanden. Bakterium coli ist dann zahlreich vorhanden, wenn die Verunreinigung durch städtische Abwässer bedingt ist. Die einzelligen Organismen überwiegen. Es handelt sich fast ausnahmslos um reine Bakterienfresser. Den extremen Lebensbedingungen der polysaproben Zone hat sich nur eine geringe Zahl von Organismen angepaßt, es treten deshalb nur wenige Arten, diese aber meist in hoher Zahl, auf. Charakteristisch sind die Massenentwicklung des sogenannten Abwasserpilzes Sphaerotilus natans und die Schwefelbakterien.

Es fehlen in der Region der Wassergüteklasse IV von den Pflanzen die Kiesel-, Grün- und Jochalgen sowie alle höheren Pflanzen. Von den Tieren fehlen Schwämme, Moostierchen, Kleinkrebse, Schnecken, Muscheln und Fische.

Bild 1 Flutende Sphaerotilus-Zotten als Uferbesatz am unteren Main. Nach Liebmann, 1954.

Wenn aus didaktischen Gründen die für die natürliche Selbstreinigung besonders wichtigen physikalischen, chemischen und biologischen Faktoren oben nacheinander beschrieben worden sind, so darf dabei nicht übersehen werden, daß die einzelnen Prozesse ineinander greifen, so daß es sich bei der Schilderung der einzelnen Vorgänge im ungestauten und gestauten Fluß nicht vermeiden läßt, daß gewisse Überschneidungen auftreten.

Von den physikalischen Faktoren seien die Bedingungen für Sedimentation, spezifisches Gewicht und Viskosität im ungestauten und gestauten Fluß verglichen. Der Aufstau des Flußwassers bewirkt eine Verlängerung der Laufzeit des Wassers. Damit kommt es, im Gegensatz zum schnellfließenden Wasser, im gestauten zur unerwünschten stärkeren Sedimentation an anorganischer und organischer Substanz. An der Stauwurzel mit noch relativ großer Geschwindigkeit lagern sich die anorganischen, später die gröber organischen und schließlich vor der Staumauer die feinen organischen Bestandteile ab. Bei entsprechender Abwasserbelastung kann es in der fließenden Welle zur starken Entwicklung der Abwasserbakterie Sphaerotilus natans kommen. Sogenannte Abwasserpilztreiben (Bild 1) erstrecken sich im ungestauten Fluß u. U. über sehr viele Flußkilometer, ohne aber zu wesentlicher Sedimentierung und damit zur Faulschlammbildung beizutragen. Im gestauten Wasser jedoch sinken die im Fluß treibenden Sphaerotilusflocken zu Boden und können zu erheblichen Faulschlammbänken führen (Bild 2). Die besse-

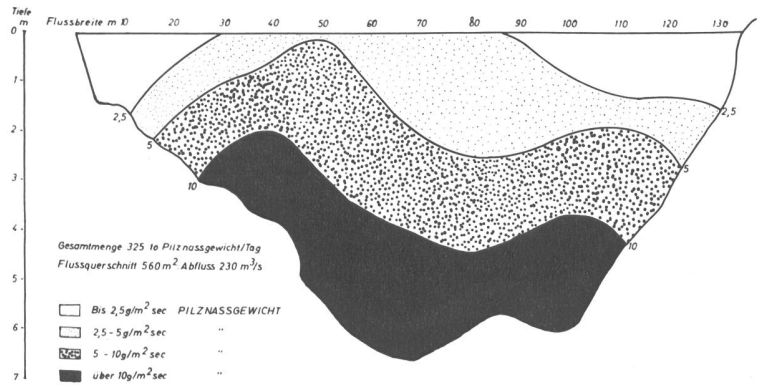

Bild 2
Zonen gleicher Sphaerotilus-Mengen im Flußquerschnitt des gestauten Mains bei Fluß-km 16,2 im März 1952 nach Messungen und Berechnungen von v. Ammon, Liebmann und Stammer. Nach Liebmann, 1954.

ren Bedingungen für die Sedimentation, wie sie im gestauten Wasser gegeben sind, müssen demnach bei Betrachtungen über die natürliche Selbstreinigung als Nachteile des gestauten gegenüber dem ungestauten Wasser angeführt werden.

Sogenannte «Abwasserbänder» oder «Abwasserfahnen», die im Fluß durch Abwassereinleitungen in Ufernähe entstehen und die, durch das spezifische Gewicht und die Viskosität des Abwassers bedingt, über lange Strecken hin im schnellfließenden Wasser nachweisbar sein können (Bild 3), werden im gestauten Fluß verkürzt und erstrecken sich selten über mehr als eine Stauhaltung hin, zumal durch den Wellenschlag bzw. durch die Turbinen, Schiffahrtsschleusen usw. eine Zerstörung der Abwasserbänder erfolgt. Den einzelnen Abwasserteilchen steht in der ungestauten Flußstrecke eine längere, im Staubereich dagegen eine kürzere Abbauzeit zur Verfügung. Es ist demnach im gestauten Fluß von Vorteil, daß der Abwassertransport nur über relativ kurze Fließstrecken hin erfolgt und daß im Vergleich zum ungestauten Wasser eine längere Abbauzeit zur Verfügung steht.

Als weitere für die Selbstreinigung wichtige physikalische Faktoren wurden Sonnenlicht und Wärme angeführt. In diesem Zusammenhang sind im ungestauten und schnellfließenden Fluß die oft relativ niedrigen Temperaturen als Nachteil anzusehen, da durch niedrige Temperaturen die Abbauleistung herabgesetzt wird. Demgegenüber erwärmt sich gestautes und noch dazu oft trübes Wasser rasch, so daß die fäulnisfähigen organischen Substanzen schneller abgebaut werden können.

Während die u. U. erfolgende Temperaturerhöhung im gestauten Wasser ein Vorteil für die Selbstreinigung ist, müssen die für das «Lichtklima» im tiefen Stau sehr ungünstigen Bedingungen als Nachteil für die Selbstreinigung angesehen werden. Es wurde oben ausgeführt, daß im meist trüben Flußwasser, das für das Gedeihen vieler Organismen lebenswichtige Lichtklima nur bis zur Tiefe von maximal 2,5 m wirksam ist. Stauhaltungen, besonders solche von schiffbaren Flüssen, weisen nicht selten Wassertiefen von 5 bis 6 m und darüber auf. Während sich im ungestauten Fluß die Lichtverhältnisse im gesamten Flußbett ähneln und deshalb sowohl das Ufer als auch der Boden bis zur Flußmitte von den gleichen Tier- und Pflanzenarten besiedelt werden können, kann das Licht in den Staustufen nur in die obere Wasserschicht eindringen. Die Ansiedlung des

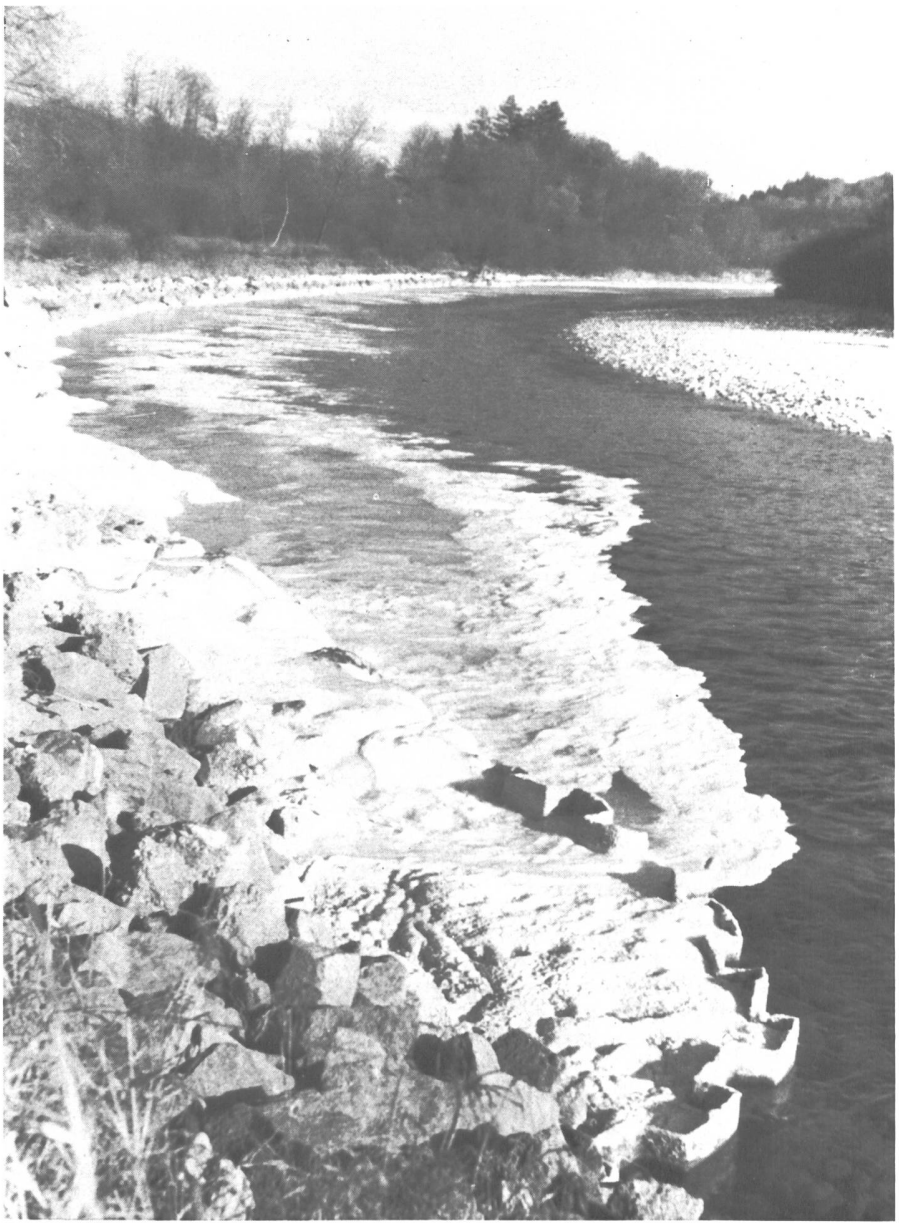

Bild 3
Bildung von Abwasserfahnen bzw. Abwasserbändern im Fluß durch ufernahe Einleitung von Abwässern.
Aufnahme v. Ammon.

Bewuchses ist deshalb in gestauten, tiefen Strömen an den Uferbänken und in den flachen Buhnenfeldern, wie sie z. B. am Main und an der Mosel vorhanden sind, eine andere als in der Flußmitte. Vor allen Dingen fehlen in der Flußmitte eines tiefen Staues die am Boden wurzelnden Wasserpflanzen, und damit wiederum fehlt das Heer derjenigen Organismen, welche die Wasserpflanzen als Ansatzflächen benutzen.

Bei der völligen Staulegung der Stauhaltung Erlabrunn unterhalb von Würzburg im Juni 1952 bot sich eine günstige Gelegenheit, die Besiedlung des Strombodens in den verschiedenen Wassertiefen studieren zu können. Bis zu 2 bzw. 2,5 m Wassertiefe war die Besiedlung des Uferbanketts und der überstauten Buhnenfelder sehr intensiv (Bild 4), während etwa von 2,5 m Tiefe bis zur Strommitte (Schiffahrtsrinne) eine deutliche Verarmung an Organismen zu beobachten war. Dabei ist zu berücksichtigen, daß der Uferstreifen mit den alten Buhnenfeldern den Organismen viel bessere Ansatzmöglichkeiten bietet, als dies am Boden der Strommitte der Fall ist. Hentschel (1923) hat bereits darauf hingewiesen, welch ungeheure Mengen an Tieren den Boden der Ströme bevölkern können. Er fand z. B. in der Elbe bei Hamburg auf 100 cm² Bodenfläche bis 3076 Stück rote Schlammröhrenwürmer (Tubifiziden) und bis zu 764 Stück Kugelmuscheln (Sphaerien). Bei den vorliegenden eigenen Untersuchungen wurden in den Uferstreifen bis zu 2 m Tiefe in der rund 9 km langen Stauhaltung Erlabrunn des Mains im Mai 1952 rund 400 t Makroorganismen gefunden. Unter diesen überwogen Muscheln, Schnecken, Bachflohkrebse, Wasserasseln, Strudelwürmer, Egel und Süßwasserschwämme.

Während Blütenpflanzen in nicht schiffbaren Flüssen bis zur Strommitte auftreten können, halten sich solche Pflanzen in Flüssen mit starkem Schiffsverkehr nur in der Uferzone und in den Buhnenfeldern. Für die fischereiliche Nutzung eines Stromes ist es von großer Bedeutung, daß sich die sogenannte weiche Unterwasserflora — das sind besonders Tausendblatt (Myriophyllum), Hornkraut (Ceratophyllum), Hahnenfuß (Ranunculus) und Laichkräuter (Potamogetonarten) — in schiffbaren Flüssen nur in der Uferzone halten kann, breitet sich in den Stauhaltungen von Strömen, wie die Erfahrungen am Main zeigen, die sogenannte harte Wasserflora, besonders das Schilf, unerwünscht stark aus. Die starke Entwicklung der «Schilfwälder» ist auf den Uferbanketts gestauter Flüsse deshalb nachteilig, weil die immer weiter zur Flußmitte hineinwachsenden Schilfgürtel mit ihren zunehmenden Stillwasserzonen die Wellen brechen und dadurch zu erheblichen Ablagerungen von im Fluß treibenden Sedimenten führen, die z. B. im Untermain zu einem nicht geringen Prozentsatz aus fäulnisfähigem organischen Material bestehen. Es kommt auf diese Weise in zu breiten Schilfgürteln gestauter Flüsse zu Faulschlammbildungen. Die damit zusammenhängende Schwefelwasserstoffentwicklung ist für die weiche Unterwasserflora besonders schädlich, während die Vertreter der harten Wasserflora gegenüber Schwefelwasserstoff widerstandsfähig sind. Damit hängt wohl zusammen, daß man selten größere Bestände harter und weicher Wasserflora nebeneinander in einem Buhnenfeld findet, sondern entweder nur die eine oder die andere.

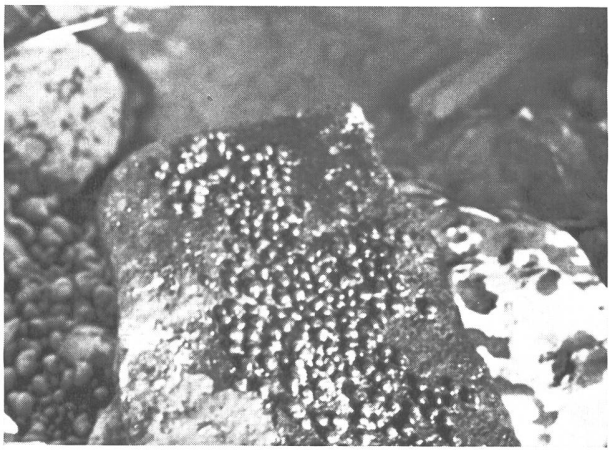

Bild 4 Beispiel einer starken Besiedlung in der Uferzone der Stauhaltung Erlabrunn des Mains unterhalb von Würzburg, Mai 1952. (Schleienschnecke Bythinia). Nach Liebmann, 1954.

So günstig vom Standpunkt der Selbstreinigung aus eine Lebendverbauung der Flußufer ist, so sehr muß vor Monokultur, vor Schilfwäldern gewarnt werden. Genau so, wie sich eine Monokultur von Fichten- und Föhrenbeständen auf den Waldboden sehr nachteilig bemerkbar macht, wirkt auch eine Monokultur von Schilf des Uferbanketts für die Selbstreinigung und für die Fischerei nachteilig. Es ist deshalb eine Lebendverbauung nicht gleichzusetzen mit der künstlichen Anpflanzung von Schilfwäldern, da sich Schilf von allein ansiedelt und fortpflanzt. Aus den Erfahrungen am Main ist bekannt, daß es nicht darum geht, frühzeitig Schilf künstlich anzusiedeln, sondern vielmehr darum, wie das viele wild angesiedelte Schilf durch entsprechende motorisierte Schilfmähmaschinen kurzgehalten werden kann. Die flachen Uferbänke des gestauten Flusses mit dem hier voll wirksamen Lichtklima und ihren entsprechend großen Mengen von Organismen sind für die Selbstreinigung entscheidend wichtig, so daß hier eine Vielzahl von Arten verschiedener Wasserpflanzen bzw. Land-Wasserpflanzen erwünscht ist. Die in Fließgewässern vorkommenden Vertreter der weichen Wasserflora sind nicht nur die für die Flußfische geeigneten Laichplätze, sondern diese Wasserpflanzen tragen auch wesentlich zur Erhöhung der Selbstreinigung bei, worüber Schenk (1893), Schorler (1895) und Liebmann (1939/40) berichtet haben. Die in Fließgewässern flutenden Wasserpflanzen wirken, wie Liebmann (1939/40) am Beispiel der Saale gezeigt hat, wie ein Filter, das die festen im Fluß treibenden Bestandteile zurückhält, bzw. zerreibt und diesem durch die Assimilationstätigkeit der Pflanzen dauernd Sauerstoff zuführt. Es handelt sich gleichsam um eine Art «natürliches Belebungsverfahren», bei dem die Oberfläche viel größer als bei der «künstlichen Schlammbelebung» ist. Die Wasserpflanzen bieten einmal durch ihre größere Oberfläche vielen Organismen Ansatzmöglichkeiten, zum anderen durch den dauernd molekular zugeführten Sauerstoff auch günstige Lebensbedingungen, so daß sich alle für die natürliche Selbstreinigung wichtigen Organismen in den Zonen der weichen Unterwasserflora günstig entwickeln können. Den zerriebenen Schlammflocken wird, wenn sie durch die Verkrautungszone treiben, dauernd Sauerstoff zugeführt, und sie werden durch die vielen an den Pflanzen haftenden

Organismen mit diesen gleichsam «geimpft». Für den Abbau der fäulnisfähigen organischen Substanz sind damit besonders günstige Voraussetzungen gegeben.

Zusammenfassend kann gesagt werden, daß hinsichtlich des Sonnenlichtes bzw. Lichtklimas ungestautes gegenüber gestautem Wasser bessere Voraussetzungen für die Selbstreinigung liefert.

Als weitere physikalische Faktoren waren Wellenbewegung und Strömung genannt worden, wobei betont wurde, daß turbulente Strömungen vorwiegend im ungestauten Fluß vorkommen. Bei starker Turbulenz im Wasser, wie sie beim Fließen in flacher Schicht über ein kiesiges Flußbett und beim kaskadenartigen Herabstürzen des Wassers eintritt, sind die günstigsten Bedingungen für die Stauerstoffanreicherungen des Wassers gegeben, ein besonders gutes Beispiel der oben erwähnten wechselseitigen Beziehungen zwischen den physikalischen, chemischen und biologischen Faktoren der Selbstreinigung. Die mit dem Ziel einer Leistungssteigerung sogenannter kleinräumiger biologischer Kläranlagen (Spültropfkörper und hochbelastete Belebungsbecken) in den letzten Jahren durchgeführten Versuche haben ergeben, daß die größten Leistungen, d. h. die besten Bedingungen für die Selbstreinigung, dann erzielt werden, wenn es gelingt, eine Sauerstoffsättigung an den Grenzen Wasser/Organismus zu erreichen. Das wird um so eher möglich sein, je schneller und besser der Sauerstoff z. B. in einer Detritusflocke an die einzelnen Mikroorganismen, besonders Bakterien, im Zentrum der Flocke vordringen kann. Je kleiner die Detritusflocke ist, je mehr sie durch die Turbulenz im fließenden Wasser zerschlagen worden ist, um so eher wird es dem Sauerstoff gelingen, an die einzelne Bakterienzelle im Zentrum der Detritusflocke vorzudringen. Durch die Turbulenz wird aber nicht nur eine laufende Heranführung von Sauerstoff erreicht, es wird auch gleichzeitig der sich um die Organismenzelle bildende filmartige Überzug von Stoffwechselprodukten gleichsam abgewaschen. Es können sich zwar bei sehr starker Strömung im ungestauten Fluß an den Steinen nur wenige Arten besonders angepaßter höherer Organismen halten, dafür überziehen sich aber die in der turbulenten Region befindlichen Steine mit einem Film von Mikroorganismen. Diese lagern auf den Ansatzflächen praktisch kaum übereinander, sondern bei der Dünne der Filme nebeneinander, so daß ihnen in dieser dünnen Schicht, bedingt durch die Turbulenz des Wassers, maximal Sauerstoff bzw. Luft zugeführt wird und die bei den Oxydationsprozessen der Organismen entstehenden Stoffwechselprodukte ebenso schnell abgeführt werden können. Von den Mikroorganismen sind es besonders Bakterien, Blaualgen, Grünalgen, Kieselalgen und Pilze, die sich bei turbulenten Wasserbewegungen halten können. So wie die physikalischen Bedingungen für das Lichtklima sind auch die der Turbulenz in ungestautem Wasser günstiger als in gestautem.

Für die Lebensmöglichkeiten der Organismen wurden als wichtige Voraussetzungen Ansiedlungsmöglichkeiten und die Heranführung von Sauerstoff an die Zelloberfläche genannt. Diese Voraussetzungen sind ebenfalls im flachen, schnellfließenden Flußwasser besser als im tiefen, gestauten.

In diesem Zusammenhang muß auf die Änderungen der Lebensbedingungen eingegangen werden, wie sie eine Reihe von Wasserorganismen durch den Aufstau

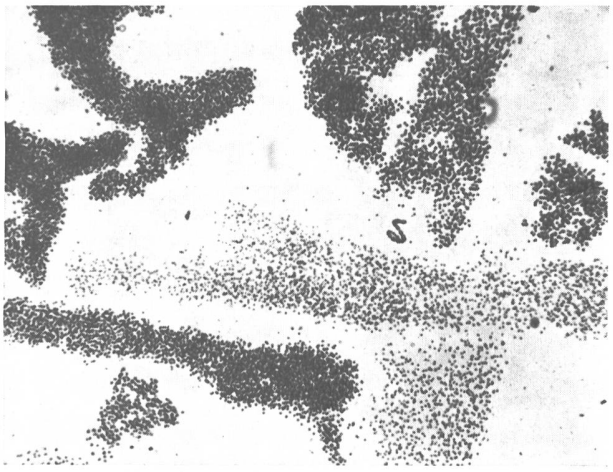

Bild 5 Wasserblüte der Blaualge Microcystis aeruginosa in der Bregenzer Bucht des Bodensees, August 1953. Original.

erfahren. Für die praktische Wasserwirtschaft ist das verstärkte Auftreten von Algen im stehenden bzw. langsam fließenden Wasser von Bedeutung. Man bezeichnet die Massenentwicklung dieser Organismen als «Wasserblüten». Es sind nicht selten über 10 000 Exemplare in 1 m³ Wasser vorhanden. Auftreten einer Wasserverfärbung sowie eines je nach der Algenart bestimmten Geruches und Geschmackes sind äußere, wahrnehmbare Zeichen einer solchen Verschiebung des biologischen Gleichgewichtes.

Wasserblüten liegen in Stauhaltungen häufig eine Strecke unterhalb von Städten und bestimmten Industrieanlagen, die ihre Abwässer in den Fluß leiten (Bild 5). Dabei ist es für die Entstehung einer Wasserblüte nicht von entscheidender Bedeutung, ob die Abwasser ungeklärt oder geklärt eingeleitet werden, denn für das Entstehen einer Wasserblüte sind bestimmte Minimumstoffe erforderlich. Besonders das Verhältnis von Stickstoff zu Phosphor ist entscheidend, zwei Stoffe, die zu einem erheblichen Prozentsatz auch bei der Reinigung des Abwassers in der Kläranlage ins Wasser und mit dem Ablauf in den Vorfluter gelangen. Durch die Massenentwicklung niederer Organismen im gestauten Wasser kommt es zu einem völlig abnormen Sauerstoff-Gehalt. Während nachts durch die Dissimilation der Algen hohe Sauerstoff-Fehlbeträge entstehen, wird tagsüber der Sauerstoffgehalt durch die Assimilationsprozesse der Algen so stark erhöht, daß das Wasser mit Sauerstoff übersättigt wird. Da die Algen laufend absterben und zu Boden sinken, entziehen sie dadurch dem gestauten Wasser den Sauerstoff unter gleichzeitiger Bildung von Faulschlamm und Entstehung von Schwefelwasserstoff am Gewässergrund. Da durch Kläranlagen nur ein Teil der Stickstoff- und Phosphorverbindungen aus dem Wasser entfernt werden, die Änderung ursprünglicher Flußläufe zu einer perlschnurartigen Kette von Stauhaltungen aus wirtschaftlichen Gründen aber fortschreitet, muß es ein Hauptanliegen der naturwissenschaftlichen Arbeitsrichtung in der Wasserwirtschaft sein, wirtschaftlich tragbare Methoden zur Entfernung der Nitrate und Phosphate aus dem Wasser zu finden. Die in diesem Zusammenhang vorgeschlagenen Wasserpflanzen-Reaktionsbecken sind für die Praxis ungeeignet, denn es läßt sich schnell errechnen, daß sehr große Becken notwendig sein würden, die durch den

erheblichen Platzbedarf, durch die maschinellen Einrichtungen zur laufenden Entfernung der mit Nitraten und Phosphaten angereicherten Wasserpflanzen und durch die damit zusammenhängenden Bau- und Betriebskosten keine Aussicht auf Verwirklichung haben. Aus diesem Grunde muß sich die Entwicklungsarbeit auf diesem Sektor darauf konzentrieren, geeignete chemisch-physikalische Verfahren zur Eliminierung der Nitrate und Phosphate zu entwickeln.

Zusammenfassend muß zu dem Problem der Verschiebung des biologischen Gleichgewichts durch Wasserblütenbildung gesagt werden, daß durch Stauhaltungen die Gefahr der Entstehung von Wasserblüten vergrößert wird.

In diesem Zusammenhang sei auf das Verhalten der Fische im ungestauten und im gestauten Fluß eingegangen, denn der Fisch ist als Endglied der Kette von Organismen, die am Kreislauf der organischen Substanz im Wasser beteiligt sind, ein sehr brauchbarer biologischer Indikator. Während im schnellfließenden Wasser die sog. Kieslaicher unter den Flußfischen überwiegen, wie z. B. Forellen, Seiblinge, Äschen und Barben, dominieren im gestauten Wasser die sog. Krautlaicher wie Karpfen, Hechte und Weißfische. Kieslaicher sind meist Edel- oder Gutfische Krautlaicher Gut- und Minderfische. Produktionsbiologisch wirkt sich demnach ein Flußstau dann in einer Wertminderung aus, wenn diese nicht durch künstlichen Fischeinsatz, z. B. von Aalen, Hechten und Zandern, ausgeglichen wird. Die durch den Stau entstehende große Wasserfläche stellt fischereibiologisch nicht unbedingt eine Wertminderung dar, denn der Fisch findet, wie die Ausführungen über das Lichtklima gezeigt haben, reichliche Nahrung nur bis zu Tiefen von maximal 2,5 m. Auch die Laichmöglichkeiten sind auf diese Zone beschränkt, denn die weiche Unterwasserflora, welche die Krautlaicher zur Eiablage bevorzugen, kommt in Flußstauen nur bis zu diesen Tiefen vor. Fische laichen, wenn sie keine andere Gelegenheit haben, auch an Schilfstengeln ab. Die meist direkt unter der Wasseroberfläche angeklebten Eier fallen jedoch besonders leicht Stauschwankungen zum Opfer. Bei den an den Kräutern der weichen Unterwasserflora (z. B. Tausendblatt — Myriophyllum, Hornkraut — Ceratophyllum, Wasserhahnenfuß — Ranunculus fluvatilis, Laichkräuter — Potamogetonarten) angeklebten Eiern ist dies deshalb nicht der Fall, weil sich die im Wasser flutenden Pflanzen dem jeweiligen Wasserstand besser anpassen können.

Produktionsbiologisch ergibt sich eine Wertminderung des gestauten gegenüber dem ungestauten Wasser auch dadurch, daß es wohl möglich ist, ein flaches Flußbett abschnittweise mit entsprechenden Netzen weitgehend abzufischen, daß aber ein tiefer Flußstau eine derartige weitgehende Abfischung überhaupt nicht zuläßt. Damit verringert sich für den Fischer die Fangchance im Flußstau. Er muß nach entsprechender Umstellung in den Fanggeräten mehr Arbeit aufwenden, um die Fische im Stau zu fangen, als dies vor dem Aufstau der Fall war. Deshalb ist der Gedanke naheliegend, wie er neuerdings von Fischereirat Butschek, Würzburg, entwickelt worden ist, das Schwergewicht der fischereilichen Nutzung des gestauten Flußwassers aus dem Flußbett hinaus in sog. «Buhnenteiche» zu verlegen, die parallel dem alten Flußbett unter weitgehender Benutzung früherer Buhnenfelder angelegt werden und eine teichartige fischereiliche Bewirtschaftung gestatten.

Flußstaue machen aus fischereilichen Gründen u. U. die Anlage von Fischpässen erforderlich (Bild 6). Dabei ist die Frage zu prüfen, ob an dem betreffenden Fluß voraussichtlich nur wenige oder viele Stauhaltungen angelegt werden sollen. Der Einbau eines Fischpasses hat nur dann einen Zweck, wenn in dem betreffenden Flußabschnitt nur wenige Staue vorhanden sind, da dann der ursprüngliche Charakter des Flusses im wesentlichen erhalten bleibt. Handelt es sich jedoch, wie z. B. am Main oder zukünftig an der Mosel, um eine Kette hintereinanderliegender Stauhaltungen, so wird der ursprüngliche Fluß zu einer Seekette mit starkem Durchfluß, die eine Zwischendichte zwischen Fluß und See darstellt. In solchen Fällen ist es besser, auf die Einrichtung von Fischpässen zu verzichten, das für den Bau des Fischpasses notwendige Geld und den Wert des ständigen Energieverlustes zu kapitalisieren und die Zinsen hieraus für die fischereiliche Bewirtschaftung (laufenden Absatz, Verbesserung der Fanggeräte) der betreffenden Stau-Stufen zu verwenden.

Den oben geschilderten biologischen Nachteilen, die gestautes gegenüber ungestautem Wasser aufzuweisen hat, steht der biologische Vorteil gegenüber, der durch die bei Stauhaltungen gewährleistete gleichmäßige Wasserführung gegeben ist. Wie Untersuchungen unseres Instituts ergeben haben, bildet sich im ungestauten und im gestauten Fluß sowohl an den unter Wasser liegenden Uferböschungen als auch im Flußbett zwischen den Kies- und Schlammteilchen ein biologischer Film, der überwiegend aus schleimbildenden Bakterien besteht. Wenn die Wasserhaltung eine möglichst gleichmäßige ist, verpichen gleichsam Ufer und Flußbett. Schmutzteilchen, die im Fluß treiben, schlagen sich auf diese Filme nieder und werden hier von Mikroorganismen vernichtet, so daß das Flußwasser gefiltert, d. h. keimarm, durch den Film hindurchtritt. Wenn dagegen der Wasserspiegel des Flusses stark schwankt oder gar das Flußbett vorübergehend ganz trocken fällt, so zerbröckelt der biologische Film und ist unwirksam, wenn etwa nach langer Trockenheit mit einer Hochwasserwelle große, inzwischen abgelagerte Schlammengen in Bewegung geraten. Mit den organisch-fäulnisfähigen Stoffen schlagen dann Colikeime sehr schnell ins Grundwasser durch und beeinträchtigen dessen Qualität. Bei der Gewinnung von Trinkwasser aus uferfiltriertem

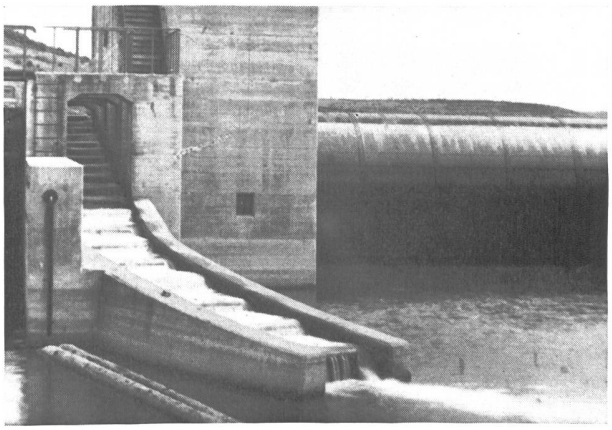

Bild 6 Fischpaß (Beckenpaß) am Kachletstau der Donau. Original.

Flußwasser kann zwar durch zunehmende Stärke des biologischen Filmes und damit steigender Verpichung die Quantität des zu gewinnenden Wassers sinken, die Qualität aber wird steigen. Bei der zunehmenden Gewinnung von uferfiltriertem Flußwasser als Trink- und Brauchwasser scheint es mir ein sehr wichtiger Vorteil der Flußstaue zu sein, daß sie eine relative Gleichmäßigkeit in der Wasserführung und damit eine Instandhaltung der biologischen Filme bewirken, welche Flußufer und Flußbett ausgleiten.

Die meisten oben geschilderten wasserwirtschaftlichen Nachteile, welche mit dem Aufstau von Flußwasser verbunden sind, lassen sich größtenteils vermeiden, wenn nur dann ein Flußwasser gestaut wird, dessen Wassergüteklasse nicht unter II, maximal II—III liegt. Da aber viele unserer Flüsse eine solche Wasserqualität vorläufig nicht mehr besitzen, führt das zu der zwingenden Schlußfolgerung, daß in der Wassergütewirtschaft die Sanierung der Abwasserverhältnisse in unseren Vorflutern soweit vorwärts getrieben werden muß, daß auch im Hinblick auf die zunehmende Umwandlung der ursprünglichen Fließgewässer zu Stauhaltungen die Wassergüteklasse II nicht unterschritten wird. Wenn der betreffende Fluß vor dem Aufstau bereits eine Wassergüteklasse besitzt, die unter II—III liegt, ist mit an Sicherheit grenzender Wahrscheinlichkeit damit zu rechnen, daß nach Stauerrichtung erhebliche Kalamitäten in Form von Faulschlammablagerungen, Schwefelwasserstoffentwicklung und Fischsterben durch Sauerstoffmangel auftreten.

Zusammenfassung der Vor- und Nachteile von Stauhaltungen auf die natürliche Selbstreinigung

Ungestauter Fluß	Gestauter Fluß
Vorteil: «Lichtklima» bis zum Boden wirksam.	Nachteil: «Lichtklima» nur bis zu 2,5 m Tiefe wirksam.
Vorteil: Viele turbulente Strömungen.	Nachteil: Kaum turbulente Strömungen.
Vorteil: Keine oder nur geringe Sedimentation	Nachteil: Erhebliche Sedimentation.
Vorteil: Kaum Auftreten von «Wasserblüten».	Nachteil: Gefahr starker Wasserblütenbildung.
Vorteil: Keine oder nur geringe Verschilfung.	Nachteil: Möglichkeit starker Verschilfung.
Vorteil: Vorkommen hochwertiger Kieslaicher und natürlicher Fischzuwachs, leichte Fangmöglichkeit.	Nachteil: Überhandnehmen minderwertiger Krautlaicher, Zuwachs hochwertiger Fische durch laufenden künstlichen Einsatz, erschwerte Fangmöglichkeit.
Nachteil: Kurze Abbauzeit der Schmutzstoffe.	Vorteil: Längere Abbauzeit durch größere Verweildauer des Wassers im Stauabschnitt.
Nachteil: Abwassertransport über große Strecken, u. U. lange «Abwasserbänder».	Vorteil: Abwassertransport über kurze Strecken, u. U. Zerstörung der «Abwasserbänder» an Stauwerken, deshalb nur kurze Bandbildung.
Nachteil: Große Wasserstandsschwankungen, durch Trokkenfallen schlechte Filterwirkung.	Vorteil: Geringe Wasserstandsschwankungen, kein Trokkenfallen, gute Filterwirkung.

Festschrift Otto Jaag

DK 628.3:92

nennt sich die 1960 erschienene Ausgabe (vol. XXII) der *Schweizerischen Zeitschrift für Hydrologie* (Verlag Birkhäuser, Basel). Anlaß zu dieser Festausgabe war der 60. Geburtstag Prof. Dr. Otto Jaags, Direktor der Eidg. Anstalt für Wasserversorgung, Abwasserreinigung und Gewässerschutz an der ETH.

Mehr als 50 Wissenschafter, Freunde und Schüler von nah und fern haben spontan Beiträge zu dieser Festschrift zur Verfügung gestellt und damit der hohen Wertschätzung Ausdruck verliehen, die Prof. Jaag weit über die Landesgrenzen hinaus genießt. Es geschah aber auch aus Dankbarkeit für all das, was der Jubilar der Wissenschaft und der Öffentlichkeit bislang geleistet hat.

Aus dem Geleitwort des Nestors der Schweizer Limnologen, Dr. h. c. *Gottfried Huber-Pestalozzi*, Zürich, entnehmen wir folgendes über das Leben und Wirken des Gefeierten. Mit dem Fähigkeitsausweis der Kantonsschule Schaffhausen für das Lehramt an Primarschulen und für die Immatrikulation an schweizerischen Universitäten in der Tasche, widmete sich Otto Jaag anfangs der zwanziger Jahre mit Eifer der Aufgabe, Kinder seiner schaffhausischen Heimatgemeinde zu erziehen und zu belehren. Nach dreieinhalbjähriger Lehrtätigkeit brach der längst gehegte Wunsch, sich dem akademischen Studium hinzugeben, machtvoll durch. Der besonderen Zuneigung seit der Kantonsschule folgend, immatrikulierte er sich 1924 an der «Faculté des sciences» der Universität Genf mit dem Hauptfach beim berühmten Botaniker Robert Chodat. Dem Vorbild des Lehrers folgend, oblag Jaag mit großem Eifer dem Studium der Naturwissenschaften im allgemeinen und der Botanik im besonderen, vor allem aber demjenigen der niederen blütenlosen Pflanzen — Algen, Pilze und Flechten. Diesem Spezialgebiet war auch die Promotionsarbeit bei Prof. Chodat gewidmet. Der Aufenthalt in Genf war nicht nur für die weitere Tätigkeit des jungen Naturwissenschafters, sondern auch für die weltoffene Aufgeschlossenheit des Menschen bestimmend.