

Zeitschrift: Wasser Energie Luft = Eau énergie air = Acqua energia aria
Herausgeber: Schweizerischer Wasserwirtschaftsverband
Band: 68 (1976)
Heft: 10

Artikel: Fachtagung Krautwucherungen im Rhein : flutender Hahnenfuss
Autor: [s.n.]
DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-939306>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. 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. [Siehe Rechtliche Hinweise.](#)

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. [Voir Informations légales.](#)

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. [See Legal notice.](#)

Download PDF: 17.05.2025

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

Fachtagung Krautwucherungen im Rhein — Flutender Hahnenfuss

Diese Fachtagung wurde gemeinsam von den vier folgenden Vereinigungen durchgeführt: Schweizerische Vereinigung für Gewässerschutz und Lufthygiene, VGL; Schweizerischer Wasserwirtschaftsverband, SWV; und seine Verbandsgruppen, Aargauischer Wasserwirtschaftsverband sowie Verband Aare-Rheinwerke. Sie fand am 3. Juni 1976 in Neuhausen am Rheinfluss und in Ellikon am Rhein statt. Die Organisation besorgte der Schweizerische Wasserwirtschaftsverband,

der massgebend von den Belegschaften der beiden Kraftwerke Rheinau und Schaffhausen unterstützt wurde. Das Amt für Gewässerschutz und Wasserbau des Kantons Zürich und die Bodanwerft Kressbronn ermöglichten die anschliessende Demonstration ihrer Geräte im Rhein bei Ellikon. Nachfolgend sind alle fünf an der Tagung gehaltenen Vorträge vollständig zusammengestellt; sie wurden durch einen sechsten Beitrag ergänzt.

Begrüssung und Einleitung

Regierungspräsident Ernst Neukomm, Baudirektor des Kantons Schaffhausen

DK 627.133:675.1

Gerne erfülle ich heute die mir auferlegte Pflicht, Sie alle hier im Namen der Schaffhauser Regierung sehr herzlich zu begrüssen und Sie am Tagungsort in Neuhausen am Rheinfluss ebenso herzlich willkommen zu heissen. Ich freue mich nicht allein deswegen, den Kanton Schaffhausen in der Rolle des Gastgebers zu sehen, sondern auch deshalb, weil die Veranstalter dieser Tagung das uns alle sehr beschäftigende Problem an Ort und Stelle — gleichsam im Krisengebiet — aufgreifen. Und das Tagungsprogramm lässt vermuten, dass keine akademische Debatte stattfindet, sondern der ernsthafte Versuch unternommen wird, ein akutes Problem und dessen Lösung nunmehr exakt zu analysieren und energisch in Angriff zu nehmen. Wenn Sie den Vergleich erlauben — als Baudirektor habe ich da bereits meine Erfahrungen — haben wir es wieder einmal mehr mit einer «Feuerwehraktion» zu tun. Wir werden aus dem Problemnotstand zu einer Eindämmung der Schäden kommen müssen, dann stabilisieren und zuletzt vorsorgen müssen, dass die Verunkrautung des Rheins nicht auf Jahre und Jahrzehnte hinaus zur Dauerplage wird. Bevor ich zum eigentlichen Problem noch ein paar weitere Gedanken vortragen werde, möchte ich vor allem den vier Verbänden dafür danken, dass sie dieses aktuelle und dringliche Thema aufgegriffen und sich zu einer gemeinsamen Fachtagung zusammengefunden haben. Es sind dies die Schweizerische Vereinigung für Gewässerschutz und Lufthygiene, der Schweizerische Wasserwirtschaftsverband, der Aargauische Wasserwirtschaftsverband und der Verband Aare-Rheinwerke. Ich halte dieses Zusammengehen für sinnvoll und wünschenswert, weil wir uns ja offenkundig mit einem Problem konfrontiert sehen, das auf breiter Basis angegangen werden und irgendwie gelöst werden muss. Ich meine sogar, dass diese Basis weiter verbreitert werden muss, denn um die Mitverantwortung herumdrücken kann sich ja im Ernst kein Mensch (vom Säugling bis zum Greis), der zum Rhein gleichsam «in hydrologischer Beziehung» steht, also direkt oder indirekt den Rhein nutzt oder belastet. Sie alle haben Wissen und Vorstellungsvermögen genug, um über diese «Mittäterschaft» bestens im Bilde zu sein; ich kann Ihnen und mir die Aufzählung ersparen. Ausgehend von diesem Gedanken der Mitverantwortung und vom Mit-Engagiert-Sein begrüsse und schätze ich es ganz besonders, dass diese Tagung gleichsam ein interdisziplinäres Forum der Information und des Erfahrungsaustausches darstellt. Es ist deshalb gut und nützlich, dass gleich von Anfang an Behörden, Ingenieure (Bau-, Elektro- und Maschineningenieure) aus Betrieben, Planungs- oder Projektierungsbüros, Biologen, Fischer und weitere Benützer des Rheins hier zugegen sind. Nicht vergessen seien die Vertreter der Presse, deren Aufgabe es sein wird, das uns beschäftigende Problem ins öffentliche

Bewusstsein zu tragen und, wie schon erwähnt, weiteste Bevölkerungskreise in die Mitverantwortung und langfristig in Pflicht zu nehmen, zur Lösung der uns gestellten Aufgabe beizutragen. In Wirtschaft und Politik spricht man seit Jahren von «Interdependenz», also von gegenseitiger Abhängigkeit und Aufeinander-Angewiesensein. Dasselbe lässt sich wohl auf dem Gebiete des Gewässerschutzes und des Umweltschutzes ganz allgemein auch sagen. (Wenngleich es im Zeichen der Wirtschaftsrezession und der nur sehr langsamen Erholung nicht mehr so populär ist, für diese Aufgabe auf die Barrikaden zu steigen.) Das ändert aber nichts daran, dass wir das Notwendige und, im Rahmen des politisch und finanziell Vertretbaren, das Menschenmögliche versuchen und machen müssen, um Fehlentwicklungen und Störungen in unseren Gewässern zu korrigieren, die wohl ganz eindeutig vom Menschen verursacht worden sind und deshalb auch in bezug auf die Auswirkungen kurz-, mittel- und langfristig verantwortet werden müssen. Es gibt da, wie ich meine, keinen Dispens, auch keine Absolution (damit man um so unbeschwerter weitersündigen kann). Und wir werden von der Symptombekämpfung zur vorsorglichen Verhütung kommen müssen. Es geht mir nicht um Dramatik am falschen Ort, zur falschen Zeit oder am falschen Objekt. Aber ich meine doch, dass es uns allen gelingen muss, mit der Zeit und im Blick auf Zukunft und spätere Generationen aus der Situation des Zauberschlammes herauszukommen, das heisst, mit unserem Zauber fertig zu werden, den wir uns mit unserer Zivilisation geschaffen haben und deren angenehme Seiten wir freilich auch nicht missen möchten. Unsere wichtigste Aufgabe wird deshalb wohl sein, für die Wiederherstellung der Gleichgewichte zu sorgen, das heisst, diese Gleichgewichte nicht mehr (zumindest nicht in derart krasser Form wie bisher) ausser Kontrolle geraten zu lassen. Im Kanton Schaffhausen versuchen wir durch Massnahmen des Gewässerschutzes zur Milderung der Rheinverunkrautung beizutragen. Noch in diesem Sommer nehmen die Gemeinschaftskläranlage Bibertal/Hegau (die zusammen mit dem deutschen Partner der stark industrialisierten und bevölkerten Agglomeration Singen gebaut wurde und die von daher eine sehr grosse Abwasserfracht zu bewältigen hat) und die Gemeinschaftskläranlage Unterklettgau den Betrieb auf. Beide Anlagen haben ja den Rhein unmittelbar oder aber mittelbar als Vorfluter. In Nachachtung der gesetzlichen Bestimmungen wurde nicht nur darauf gedrängt, dass bei der grossen deutsch/schweizerischen Gemeinschaftskläranlage Bibertal/Hegau die 3. Reinigungsstufe, also die chemische, eingebaut wurde. Sie soll auch betrieben werden — in voller Kenntnis des Umstandes, dass «eine Schwalbe noch keinen Sommer macht» und dass es noch grösster Anstrengungen bedarf, um die grosse Belastung

unserer Vorfluter, die ja darauf reagieren, wie offenkundig zutage liegt, weiter einzudämmen. Wir haben im Kanton Schaffhausen aber auch — schon seit 1972 — an der Symptombekämpfung teilgenommen. Konkret: Dem Flutenden Hahnenfuss wurde der Kampf angesagt und mit verschiedenen Massnahmen und Versuchen Rheinsäuberungen auf Schaffhauser Hoheitsgebiet durchgeführt. Ueber die Einsätze und Aufwendungen in den Jahren 1972 und 1974 liegen dazu Berichte vor. Da uns Personal und Mittel fehlen, beziehungsweise beim momentan herrschenden politischen Klima nicht bewilligt werden, müssen wir uns im Kanton Schaffhausen derzeit darauf beschränken, mit den grössten Härtefällen der Rheinverkrautung fertig zu

werden. Kritisch sind auf unserem Hoheitsgebiet speziell die Bootsanlegepfähle und Bootslichegeplätze. An diesen Uferpartien ist das Problem der Rheinverkrautung besonders gravierend. Wirksame Gegenmassnahmen drängen sich hier gebieterisch auf.

Ich glaube, mit meinen einführenden Bemerkungen nun dieses oder jenes Stichwort gegeben zu haben, und ich möchte hoffen und wünschen, dass die Bilanz dieser Tagung positiv sein wird und Wege aufzeigt, die uns alle weiterführen können in unserem Kampf gegen die Flussverkrautung. In diesem Sinne wünsche ich Ihrer Tagung einen guten und zugleich ermutigenden Verlauf!

Die Verkrautung des Hoch- und Oberrheins

Feststellungen der Entwicklung und des heutigen Zustandes — Zusammenhänge und Massnahmen

Egon Kunz¹⁾

DK 627.15:582.675.1

I. Bisherige Verkrautungs-Feststellungen und Beschwerden

Die erste Verkrautungs-Erscheinung wurde vor rund 20 Jahren im Zusammenhang mit dem Konzessionsverfahren für den Neubau des Kraftwerkes Schaffhausen von den deutschen und schweizerischen Behörden registriert, und zwar im Bereich der Gemeinden Büsingen und Geilingen oberhalb von Schaffhausen.

Um die Ursachen dieses damaligen neuen Phänomens zu ergründen, wurde im September 1958 eine deutsch-schweizerische Kommission zur Beurteilung der Verkrautungserscheinungen in der Stauhaltung Schaffhausen gebildet, deren Mitglieder waren: Baudirektor Kunz als Vorsitzender, Dr. Klotter von der Staatl. Lebensmitteluntersuchungsanstalt Karlsruhe, Dr. Schmassmann als chemisch-biologischer Experte und Vertreter der Schweiz, dipl. Ing. Langhard als techn. Vertreter der Konzessionsbewerber des Kraftwerks, und Bürgermeister Waibel als Vertreter der Gemeinde Büsingen.

Rückblickend auf die Verkrautung der letzten 20 Jahre scheint es sicherlich interessant, die damaligen Feststellungen und Beurteilungen auszugsweise wiederzugeben:

Als Gesamtbeurteilung der Einzelbefunde wurde vermerkt: Weder die Sichttiefe (Durchlichtung) allein noch die Geschwindigkeit sind eindeutige Kriterien für das Vorhandensein der Laichkräuter. Die Fliessgeschwindigkeit ist als e i n e r der ökologischen Faktoren zur Besiedlung eines gewissen Stromstriches zu betrachten. Weitere ökologische Faktoren dürften Nahrungszufuhr und Besonnung sein. Als Schlussfolgerung kommt die Kommission zur Auffassung, dass die Verkrautung im Ortsteil Büsingen ursächlich im Zusammenhang steht mit:

- einer vermehrten Nährstoffzufuhr des Rheins, als Folge gesteigerter Abwässerzufuhr,
- der Verminderung der Fliessgeschwindigkeit infolge Staus,
- den Wasserstandsänderungen infolge des Staus.

Welcher Anteil diesen Faktoren einzeln zuzuschreiben ist, könne ohne weitergehende chemisch-biologische und hydrologische Untersuchungen, die sich auf mehrere Jahre ausdehnen müssten, nicht entschieden werden.

Aufgrund dieser Schlussfolgerung wurden die beiden letzten Ursachen zu Lasten der Kraftwerke ausgelegt.

Die Auffassung, dass die Verminderung der Fliessgeschwindigkeit und die Veränderung des Wasserstandes (infolge Staus) hauptsächlich für die zunehmende Verkrautung an-

zusehen sind, wurde in den folgenden Jahren beinahe zu einem ehernen Gesetz und damit wurden die Kraftwerke mehr oder weniger als Hauptschuldige betrachtet.

Auch die zweite Erscheinung nach Inbetriebnahme des Kraftwerkes Rheinau im Jahre 1956 sollte diese These noch erhärten. Nach dem Rheinschauprotokoll des Wasser- und Schifffahrtsamtes Freiburg vom 23. September 1959 wurde festgestellt, dass bereits im Jahre 1958 auch in den Hilfsstauhaltungen des Kraftwerkes Rheinau eine Verkrautung des Rheines eintrat.

Protokollauszug

Als allgemeiner Eindruck der Befahrung ist festzustellen, dass beide Hilfsstauhaltungen sehr stark mit Algenlaichkräutern und sonstigen Wasserpflanzen bevölkert sind.

Das Rheinkraftwerk Rheinau hat deshalb eine Spezialunterwasser-schneidemaschine entworfen und bauen lassen, um die Stauhaltung soweit als möglich von diesen Laichkräutern jährlich freihalten zu können. Es darf erhofft werden, dass es dem Werk gelingt, durch rechtzeitigen Einsatz im Frühjahr die Stauhaltung im Interesse der Fischerei, der Bootsfahrer und des allgemeinen Eindrucks sauber zu halten.

Die dritte Phase der Verkrautung zeigte erstmals neue Aspekte: Anlässlich der Rheinwasseruntersuchungen und Rheinschauen in den Jahren 1960 bis 1965 wurde nicht nur eine zunehmende Verkrautung in den Stauhaltungen Schaffhausen und Rheinau festgestellt, sondern erstmals auch oberhalb der Stauhaltung Eglisau im Bereich der Thur-

Bild 1. Längs dem Rhein treten im Unterwasser des Kraftwerks Rekingen in Ufernähe die Spitzen des wuchernden Flutenden Hahnenfusses an die Wasseroberfläche.



¹⁾ Einführungsreferat, gehalten an der Fachtagung «Krautwucherungen im Rhein — Flutender Hahnenfuss» vom 3. Juni 1976 in Neuhausen am Rheinfluss.

mündung, das heisst in der nichteingestauten Rheinstrecke. Bereits im Jahr 1965 musste erstmals eine Schneise für die Fähre Ellikon buchstäblich aus dem verkrauteten Rhein herausgeschnitten werden.

Die vierte Verkrautungserscheinung machte uns fassungslos! Im Jahre 1967, das heisst ein Jahr nach Inbetriebnahme des Rheinkraftwerkes Säckingen, gingen Beschwerden der Gemeinde Murg über eine zunehmende Verkrautung des Rheinufer bei uns ein. Damit stellte sich erstmals die Verkrautung auch unterhalb der Aaremündung ein, und die These von dem schuldigen Kraftwerk schien sich zu bestätigen.

Erst die fünfte Verkrautungsphase zwang uns endlich zum Handeln und auch zum Umdenken. Anlässlich der Rheinschau 1968 wurde erstmals im Rheinabschnitt unterhalb Reckingen, das heisst im freien Rheinstrom, ein Massenauftritt von Hahnenfuss zum Alarmsignal. In einem Schreiben des Wasser- und Schiffsamtes Freiburg vom 9. August 1968 an sämtliche Betriebsleitungen der Kraftwerke von Birsfelden bis Rheinau wurde diesen mitgeteilt, dass die Veralgung der Rheinuferzonen in den einzelnen Kraftwerkstauhaltungen trotz der geringen Sommertemperaturen wieder ein erschreckendes Ausmass angenommen habe. Klagen der Fischerei, der Gemeinden und einzelner Anlieger veranlassten uns, diese Angelegenheit nunmehr mit aller Dringlichkeit zu behandeln, um entsprechende Gegenmassnahmen ergreifen zu können. Zur Erörterung dieses Problems wurde eine gemeinsame Aussprache auf den 10. Oktober 1968 festgelegt.

Ueber jene Aussprache ist auszugsweise von Interesse wiederzugeben:

Kraftwerk Rheinau

Eine aussergewöhnlich starke Veralgung verzeichnete das Kraftwerk Rheinau unmittelbar nach Inbetriebnahme seines Werkes... Dabei war besonders die zweite Hilfsstauhaltung völlig mit Algen und Laichkräutern überwuchert... Nach den gewonnenen Erfahrungen würde die Sonneneinstrahlung einen wesentlichen Förderungsfaktor darstellen. Algen und Laichkräuter würden in einer Tiefe von 1,5 m, je nach Klarsicht auch bis zu 3 m, anzutreffen sein.

Kraftwerk Eglisau

Im Gegensatz zum Kraftwerk Rheinau hat das unterliegende Werk Eglisau praktisch keine Algenprobleme.

Kraftwerk Reckingen

Beim Kraftwerk Reckingen wurden erstmals um die Jahre 1950 in zwei bis drei Flachwasserbuchten Veralgungen festgestellt... Bis zum Jahre 1960 konnten diese kleineren Algenzonen von Land aus beseitigt werden. Erst ab 1961/62 haben die Algen in ihrer Ausdehnung, sowohl der Fläche als auch der Tiefe nach, zugenommen... Heute ist der Stauraum mit etwa 60 bis 70 a von Algen bewachsen.

Kraftwerk Albruck-Dogern

Das Kraftwerk Albruck-Dogern verzeichnete Algenteppiche vorwiegend auf der Schweizer Rheinseite, etwa in der Höhe der Gemeinde Full.

Kraftwerk Laufenburg

Das Kraftwerk Laufenburg kennt keine Algenprobleme.

Kraftwerk Säckingen

Dieses Stromgebiet ist unterhalb der Aare augenscheinlich am stärksten von der Algen- und Laichkräuterentwicklung betroffen. Sowohl die Fischerei als auch die Gemeinden Murg und Säckingen haben sich mehrfach beim Kraftwerk und bei den zuständigen Behörden über diese Algenteppiche beschwert... Die Algenteppiche beginnen bereits schon im Unterwasser des Kraftwerks und ziehen sich als breiter Gürtel entlang der beiden Rheinuferzonen, auch am Steilufer auf Schweizer Seite mit relativ geringer Sonneneinstrahlung und grossem Baumbewuchs.

Kraftwerk Schwörstadt und Unterlieger

Nur unbedeutende einzelne Verkrautungen festzustellen.

Zusammenfassend wurde allseits festgehalten: Die Veralgung der einzelnen Stauhaltungen ist sehr unterschiedlich. Eindeutige Prognosen über die Ursachen und die Zusammenhänge können nicht gestellt werden. Im zeitlichen Ablauf stellten jedoch alle Werke eine laufende Zunahme der Veralgung fest, die eindeutig aus der zunehmenden Eutrophierung des Rheins infolge erhöhter Abwasserabgabe, auch von mechanisch-biologisch geklärten Abwässern, stammt.

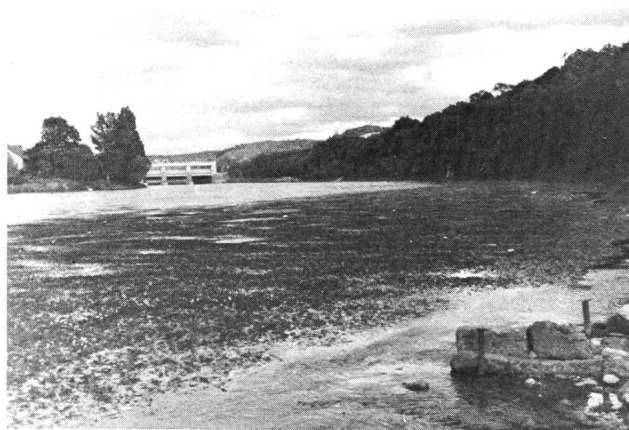


Bild 2. Ein breiter Ufersaum des Unterwassers Kraftwerk Reckingen ist mit flutendem Hahnenfuss überwachsen, er treibt bis an die Oberfläche. Aufnahme Juni 1974.

Weitere Beschwerden gingen im August 1971 von der Gemeinde Lotstetten und dem Landratsamt Waldshut ein, im Jahr 1974 von der Gemeinde Kadelburg-Küssaberg und seitens der Stadt Säckingen. Bei diesen Beschwerden machte der Verfasser den Bürgermeistern gegenüber geltend, dass die zunehmende Verkrautung des Hochrheins eindeutig eine Folge der überhöhten Phosphatableitung durch die vorwiegend häuslichen Abwässer der Anlieger sei. Die Kraftwerke wären nur sekundär durch Begünstigung der Standortbedingungen verantwortlich! Eine grundlegende Verbesserung der Lage könne nur durch Vermindern der Phosphatfracht, das heisst durch Ausfällung der Phosphate innerhalb der Klärwerke erreicht werden. Das hierauf eingegangene Antwortschreiben des Bürgermeisters von Säckingen verdient Beachtung:

Ihre Ausführungen vom 9. September 1974 habe ich mit Interesse zur Kenntnis genommen. Vor allem danke ich Ihnen für die Uebersendung der Abhandlung über die Phosphatfällung, die uns bei unseren weiteren Untersuchungen über die Abwasserreinigung in Säckingen von grossem Nutzen ist.

In der Zwischenzeit fand am 9. Oktober 1974 eine Besprechung statt, bei der mit Vertretern des Landratsamtes und des Wasserwirtschaftsamtes Waldshut die hiesigen Abwasserprobleme ausführlich diskutiert wurden. Als Ergebnis wird die Stadt Säckingen nunmehr einen Vorentwurf für die Erweiterung und den Ausbau der vorhandenen Kläranlage in Auftrag geben. Neben dem noch fehlenden biologischen Teil wird auch eine chemische Reinigungsstufe in die Planung einbezogen.

Sie ersehen aus meinen Ausführungen, dass ich bestrebt bin, dem Hochrhein aus dem Stadtgebiet Säckingen in absehbarer Zeit nur noch voll vorgereinigtes Abwasser zuzuleiten.

Aus einem eindrücklichen Verkrautungsbericht der Kraftwerke Rheinau und Reckingen von 1974 ist zu entnehmen, dass die Verkrautung im Jahre 1974 bei beiden Werken ein bisheriges Höchstmass erreicht haben muss. Im einzelnen wurde berichtet:

Die Verkrautung des Staubereichs Rheinau hat sich derart ausgewirkt, dass das Kraftwerk im Hinblick auf die Staukotenregelung unterhalb des Rheinfalltes Schaffhausen infolge totaler Verkrautung des Rheinabschnittes unterhalb des Falles den Stau am Wehr Rheinau um rund 10 cm zusätzlich abstaun musste, um die Wasserspiegelerhöhung infolge Verkrautung auszugleichen.

Als Folge der Verkrautung habe das Werk enorme Aufwendungen für die Beseitigung der abschwimmenden Laichkräuter, die sich im Hinblick auf die besonderen Anschwemmungsverhältnisse auf das Kraftwerk zu bewegen. Etwa 70 % würden durch die Rechenanlagen durchgezogen, so dass praktisch nur 30 % abgefahren werden konnten. Auch die Verkrautung des Rheinabschnittes unterhalb des Stollenauslaufs habe wiederum ein Höchstmass erreicht. Interessant sei die Feststellung, dass im Bereich der Fähre Ellikon-Nack, wo der Kanton Zürich vor 1 1/2 Jahren im Winter 1972/73 die seinerzeit vollständig verkrauteten unteren Flusszonen mit einem Raupenfahrzeug um 20 cm abschieben liess, um auch das Wurzelwerk der Unterwasserkräuter zu beseitigen, in diesem Jahr wieder eine totale Verkrautung eingetreten sei. Die Fähre Ellikon-Nack musste wieder buchstäblich freigegeben werden.

Auch beim Kraftwerk Reckingen wurden ähnliche Verkrautungen festgestellt. Das Werk sei mit seiner Verkrautungsabseitsungseinrichtung nicht mehr Herr der Lage.

Beide Werke klagen über erhebliche Leistungsverluste an ihren Maschinen.

Aufgrund dieser Alarmmeldungen sah sich das Wasser- und Schiffsamt Freiburg als zuständige Verwaltungsbehörde veranlasst, nunmehr mit gezielten Kartierungen und Untersuchungen diesem Phänomen nachzugehen. Auftakt hierzu war unter anderem eine Besprechung, zu der der Verband Aare-Rheinkraftwerke auf den 30. Januar 1975 nach Baden in der Schweiz eingeladen hatte. Hier sollte vor allem über die vom Aare-Rheinverband einem Konstruktionsbüro in Auftrag gegebene Entwicklung einer speziellen Wasserentkrautungsmaschine diskutiert werden. Bei dieser Besprechung zeigte sich, dass das Problem und die Auswirkungen der Verkräutung am Hochrhein nicht allen Beteiligten genügend bekannt waren und entsprechend bewertet wurden. Einig war man sich darüber, dass eine mechanische Entfernung der Wasserkräuter nur einen bedingten Erfolg haben dürfte. Ueber die Ursachen und Auswirkungen sowie deren Handhabung gingen die Meinungen auseinander.

Deshalb entschloss sich das Wasser- und Schiffsamt Freiburg, in Übereinstimmung mit dem Regierungspräsidium Freiburg, ein Untersuchungsprogramm aufzustellen, um die Ursachen besser ergründen und die Auswirkungen entsprechend belegen zu können. Da die Folgen der Verkräutung primär und vorwiegend den Flussbau belasten, war nach unserer Ansicht die Behandlung dieses Problems eine massgebende Angelegenheit unserer Verwaltung, soweit die deutsche Rheinseite davon betroffen wurde.

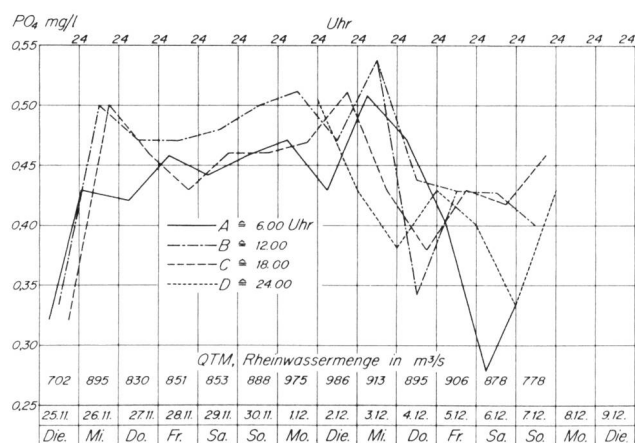


Bild 3. Ergebnisse der Phosphatmessungen im Rhein vom 25. November bis 7. Dezember 1975. Messstelle beim Kraftwerk Rheinfelden. Die Linien verbinden Messwerte je zur gleichen Tageszeit und lassen dadurch die Schwankungen über die Tageszeit, wie auch über den Wochenablauf besser erkennen.

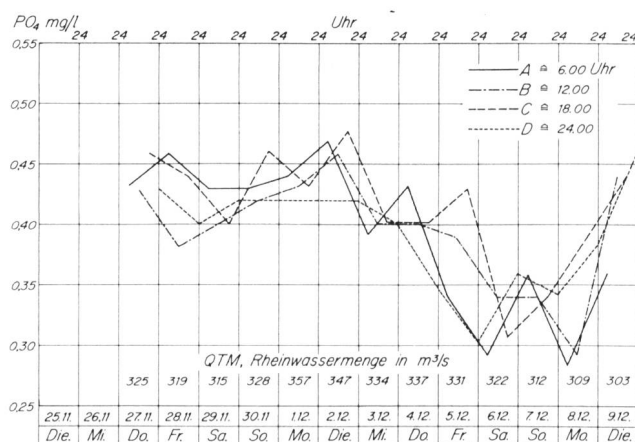


Bild 4. Ergebnisse der Phosphatmessungen im Rhein vom 25. November bis 7. Dezember 1975. Messstelle beim Kraftwerk Reckingen. Die Linien verbinden Messwerte je zur gleichen Tageszeit und lassen dadurch die Schwankungen über die Tageszeit, wie auch über den Wochenablauf besser erkennen.

II. Gezielte Kartierungen und Untersuchungen

Unter Mitwirkung der Bundesanstalt für Gewässerkunde in Koblenz wurde beschlossen, im Jahre 1975 erstmals eine umfassende Phosphatuntersuchung vom Frühjahr bis Sommer und im Herbst — bei verschiedenen Wasserständen — durchzuführen.

An 24 Messstellen am Hochrhein zwischen Stein am Rhein und Birsfelden sowie an 14 Messstellen am Oberrhein zwischen Weil und Kappel wurden die Wasser- und Lufttemperatur, die Sichttiefe, der PH-Wert, der Sauerstoffgehalt, die Ammonium-, Nitrat-Ionen sowie der Orthophosphatgehalt bestimmt. Die Ermittlung des Orthophosphatgehaltes erfolgte durch einen dem Amt freundlicherweise von der Firma Hellige zur Verfügung gestellten «Hellige-Komparator». Dieses Gerät ermöglicht eine fotometrische Bestimmung der Phosphatkonzentration durch Vergleich mit einer Eichscheibe. Durch Vergleichsanalysen konnte die Genauigkeit dieser fotometrischen Untersuchung nachgewiesen und bestätigt werden.

Die erste durchgehende Untersuchung erfolgte vom 20. bis 22. März 1975 bei einer Wasserführung des Rheins oberhalb der Aare von 270 m³/s, unterhalb der Aare von 670 m³/s. Hier wurde der Fluss bei Niederwasser im frühen Frühjahr untersucht, ohne oder nur mit geringer Verkräutung.

Die zweite Messung erfolgte am 29. und 31. Mai 1975 mit einer Rheinwasserführung von 660 m³/s oberhalb der Aare und 1450 m³/s unterhalb der Aare, das heisst im Frühsommer bei etwas mehr als Mittelwasserführung und mit grösstem Krautbestand.

Die dritte Messung erfolgte schliesslich am 6. bis 8. Oktober 1975 bei einer Wasserführung von 450 m³/s oberhalb und 965 m³/s unterhalb der Aare, das heisst im Spätherbst bei abklingender Wasserführung und abklingender Verkräutung.

Aus den zahlreichen Messungen werden auszugsweise die interessantesten Werte für ausgewählte Messorte wiedergegeben (siehe Tabelle 1).

Zur zukünftigen Beweissicherung wurde neben den Rheinwasseruntersuchungen zusätzlich eine Flusskartierung durch einen Vertreter der Bundesanstalt für Gewässerkunde Koblenz durchgeführt, und zwar:

Die erste durchgehende Flusskartierung erfolgte im März/April 1975, die zweite vom 13. bis 16. Oktober 1975. Beide Ergebnisse wurden in Stromkarten im Massstab 1:5000 dargestellt.

Eine erste deutsch-schweizerische Behördenaussprache über die Verkräutungsprobleme erfolgte am 22. Mai 1975. Dabei lagen die beiden Phosphat-Rheinwasseruntersuchungen bereits vor und konnten mit den Vertretern des Strasseninspektorates Basel, des Wasserwirtschaftsamtes Basel-Land, Liestal, der Abt. Gewässerschutz und Abt. Wasserwirtschaft des Baudepartements des Kantons Aargau sowie des Kantonalen Wasserbauamtes Zürich — unter Mitwirkung von Prof. E. A. Thomas — behandelt werden. In dieser Aussprache gingen die Meinungen über Verursachung, Abhilfemassnahmen und Veranlassungen zum weiteren Herausreissen oder Herausräumen des Hahnenfusses, auseinander:

Die Vertreter des Kantons Basel-Land bemerkten, dass die bisherigen Massnahmen der Beseitigung mit maschinellen Einrichtungen unbefriedigend seien. Es müsse nach dem Ursprung der Eutrophierung gefahndet und Gegenmassnahmen angesetzt werden.

Der Vertreter des Gewässerschutzamtes des Kantons Aargau meinte, nach seiner Ansicht seien die Phosphate nicht alleinige Verursacher dieser Eutrophierungserscheinungen und -entwicklungen.

Es müssten noch andere mitbestimmende Faktoren vorliegen, da auch durch die bisherigen Untersuchungen des Wasser- und Schiff-

fahrtsamtes Freiburg festgestellt werden müsse, dass die Eutrophierung trotz zunehmender Phosphatbelastung im unteren Rheinabschnitt nicht adäquat sei. Nur durch eine gründliche Beobachtung könne man an den Kern des Problems herankommen.

Vom Vertreter des Kantons Zürich wurde darauf erwidert, dass die Phosphatfällung u. a. nur die erste Stufe einer weiteren Abbauleistung der Abwässer sein müsse, bei dem dann zwangsläufig auch die Phosphatbelastung zurückgeschraubt werden könne. Alle Gewässerschützer sollten sich einig sein, dass Zug um Zug oder Stufe um Stufe mit einer weitergehenden Gewässersanierung begonnen werden müsste.

Vom Vertreter der Abteilung Wasserwirtschaft des Kantons Aargau wurde schliesslich vorgeschlagen, das Phänomen durch einen Forschungsauftrag mit umfangreichen Untersuchungen von einem geeigneten Institut mitbeurteilen zu lassen.

Messung der Phosphatbelastung des Rheins

Um die bisherigen Phosphatmessungen und deren Werte zu untermauern, wurde in der Zeit vom 25. November bis 7. Dezember 1975 mit dankenswerter Unterstützung der Kraftwerke Reckingen und Rheinfelden ein 8-Tage-Untersuchungsprogramm mit 6stündiger Ablesung durchgeführt, um dabei den Tages- und Wochenzyklus der Phosphatbelastung des Rheins oberhalb und unterhalb der Aare zu ermitteln. Die Messergebnisse zeigen erhebliche Tages- und Wochenschwankungen mit adäquatem Verlauf der Phosphatwerte sowohl oberhalb als auch unterhalb der Aare (Bilder 3 und 4).

Phosphatmessung aus den Rheinwasseruntersuchungen 1950 bis 1971

Zur Beurteilung einer Phosphatzunahme können die Untersuchungsergebnisse der früher von Freiburg jährlich ein- bis zweimal durchgeführten, durchgehenden Rheinwasseruntersuchungen zwischen Konstanz und Karlsruhe herangezogen werden. In den seit 1950 durchgeführten Messungen wurden bis zum Jahre 1957 an den Messstellen oberhalb Basel keine Phosphatgehalte ermittelt bzw. laut Messdaten konnten nur Spuren festgestellt werden. Erstmals in der Messung vom 27. November 1957 wurde in Konstanz ein Orthophosphatgehalt von 0,05 mg/l, an der Messstelle bei Laufenburg von 0,13 mg/l, ermittelt. Diese Werte wurden im Jahre 1963 mit 0,08 mg/l und 0,14 mg/l erneut bestätigt. In Abhängigkeit der Wasserführung des Rheins nahm dann der Phosphatgehalt in den darauffolgenden Jahren zu. Er erreichte 1970 bereits Werte von 0,62 mg/l.



Bild 5. Der Flutende Hahnenfuss bildet — hier oberhalb Schaffhausen — Inseln, die von Enten in Besitz genommen werden.

III. Feststellung von Zusammenhängen

Nach einer vorläufigen Auswertung aller Untersuchungen sind m. E. folgende Fakten eindeutig.

1. Die Phosphatbelastung des Rheins hat seit 1960 — etwa mit Beginn der Waschmittelexpansion — ebenso expansiv zugenommen.
2. Die Phosphatbelastung des Bodensee-Rheins mit 0,10 bis 0,16 und 0,07 mg/l zeigt einerseits eine ziemlich kontinuierliche Grundbelastung, jedoch eine jahreszeitlich abhängige Schwankung, die nun auch von Prof. Elster anlässlich eines vor kurzem geführten Gesprächs bestätigt wurde.
3. Die dichte Besiedlungsgebiete entwässernden Flüsse Thur und Aare weisen eine enorm hohe Phosphatbelastung auf und belasten entsprechend dem Anteil der Wasserführung den Rhein mit erheblichen Zuwachsraten. Dass die Thur mit ihrer hohen Phosphatbelastung von 0,60 bzw. 0,54 und 0,94 mg/l keinen Krautbewuchs im Unterlauf zeigt, ist nach Ansicht mehrerer Fachexperten darauf zurückzuführen, dass die Thur mit ihren hohen Wasserspiegelschwankungen eine bewegliche Sohle besitzt, auf der sich der

Orthophosphatgehalte von Rhein, Aare und Thur

Messergebnisse von Untersuchungen des Wasser- und Schiffsamtes Freiburg i. Br.

Tabelle 1

Messstellen	20./23. 3. 1975		Untersuchungen am: 29./31. 5. 1975		6./8. 10. 1975	
	Wasserführung m³/s	PO ₄ ³⁻ mg/l	Wasserführung m³/s	PO ₄ ³⁻ mg/l	Wasserführung m³/s	PO ₄ ³⁻ mg/l
Rhein: Stein a. Rh.	270	0,10 0,24	600	0,16	410	0,07
Rhein oberhalb Thur	230	0,27 0,30	610	0,16	420	0,07
Thur-Mündung	13	0,60 0,67	32	0,54	6	0,94 0,74
Rhein oberhalb Aare	270	0,40 0,43	640	0,21 0,27	430	0,17 0,10
Aare-Mündung	400	0,54 0,60	810	0,27	515	0,31 0,29
Rhein oberhalb Basel	670	0,45 0,50	1450	0,28 0,29	965	0,31 0,29
Rhein unterhalb Basel	790	0,50 1,00	1500	0,28 0,40	1000	0,34 0,31
Rhein unterhalb Breisach	700	0,60 1,10	1500	0,40 0,42	1000	0,28 0,27

Hahnenfuss nicht ansiedeln kann. Die Belastung der Aare mit ebenfalls hohen Werten von 0,27 bis 0,54 mg/l wirkt sich auf die Verkräutung deshalb nicht aus, weil die Trübung der Aare noch so gross ist, dass eine wesentliche Voraussetzung zur Assimilation der Wasserkräuter entfällt.

4. Die offensichtliche Veränderung des Phosphatgehaltes in Abhängigkeit der Wasserführung lässt eindeutig eine ziemlich konstante Grundlastzufuhr durch Abwässer vermuten. Diese Vermutung wird auch bestätigt durch den Wochen- und Tagesschwankungszyklus.

5. Die enorme Verkräutung des Hochrheinbereiches bis zur Aaremündung bestätigt die Annahme, dass die Durchlichtung des Gewässers einen entscheidenden standortbildenden Faktor darstellen muss. Ähnliches trifft auch für die Besonnung wie auch für die Temperaturen zu.

6. Auch die Sohlenverhältnisse, ob beweglich, verlandet, verschlammt, versandet usw. müssen einen wesentlichen Beitrag zur Ansiedlung leisten. Hierüber fehlen noch genügend Erfahrungswerte. Bei den Kartierungsfahrten standen wir oft ratlos da mit der Feststellung: warum dort und hier nicht, bei augenscheinlich nahezu adäquaten Standortverhältnissen!

7. Lokale Stossbelastungen, wie sie beispielsweise durch die Abwässer von Schaffhausen, durch die Thur- und Aaremündung und durch die Abwässer von Basel auftreten, müssen ebenfalls noch näher untersucht werden. Interessant erscheint, dass beispielsweise die Abwasserableitung des Raumes Schaffhausen — allerdings mit nur etwa 30 000 bis 50 000 EGW — sich kaum bemerkbar macht, ganz im Gegensatz zu Basel!

8. Eine m. E. entscheidende Feststellung muss die Erkenntnis sein, dass die Kraftwerke — entgegen früherer Annahmen — an der Verkräutung nicht mehr hauptverantwortlich beteiligt sein können! Die vollständige Verkräutung der freien Rheinstrecken im Bereich der Thurmündung und zwischen Reckingen und Koblenz wie auch die enorme Verkräutung der Donau zwischen Donaueschingen und Ulm — ohne Kraftwerke — beweisen diese Tatsache. Gegenüber diesen ziemlich eindeutig erkennbaren Faktoren hat jedoch die Flusskartierung Verhältnisse aufgezeigt, die derart indifferent sind, dass es weiterer, jahrelanger Kartierungsarbeiten bedarf, um diesem Geheimnis auf den Grund zu kommen. Dabei wird man sicherlich niemals eindeutig diese Naturerscheinungen ergründen können.

IV. Auswirkungen der Verkräutung

1. Wasserabfluss

Es treten Veränderungen in den Abflussverhältnissen im Querschnitt durch Verlagerung der Geschwindigkeit mit Vergrösserung im nichtbewachsenen Bereich und Verminderung im Verkräutungsabschnitt ein. Dadurch ergibt sich stellenweise eine Vergrösserung der Erosion und Auflandung.

Die Wasserspiegellagen erhöhen sich, insbesondere bei Hochwasser, durch Verringerung des Abflussquerschnittes.

2. Klein- und Grossschiffahrt

In den Rheinabschnitten Reckingen, Kadelburg musste bereits schon zeitweise die Kleinschiffahrt eingestellt werden, da ein Befahren der verkräuteten Zonen mit Motorbooten nicht mehr möglich war bzw. nur unter grössten Gefährdungen. Bei einem weiteren Ausdehnen der Verkräutungszone auf den Bereich der Grossschiffahrt müsste auch für diese eine Gefährdung befürchtet werden.

3. Minderung der Energiegewinnung

Bei den Flusskraftwerken tritt sowohl durch Erhöhung des Wasserspiegels im Unterwasser als auch durch eine Verkräutung der Rechen im Oberwasser eine Wasserspiegeländerung ein; das nutzbare Gefälle nimmt ab. Die Verluste bei Reckingen wurden nach Angaben des Werkes in den Jahren 1973 und 1974 (starke Verkräutung) auf mehrere Mio kWh berechnet. Ähnliche Werte gab auch das Kraftwerk Rheinau an. Darüber hinaus bringt die Beseitigung des angeschwemmten Krautes eine erhebliche Belastung des Betriebes der Werke mit sich.

4. Fischerei

Primär wird die Sportfischerei stark behindert. Das Auslegen von Netzen ist kaum mehr möglich. Sekundäre Folgen ergeben sich aus der Sauerstoffüber- und -unterproduktion der Algen und Wasserkräuter mit Sauerstoffschwankungen von bis zu 18 mg/l am Tage (bei voller Assimilation) und 4 mg/l bei Nacht. Durch Entzug des erforderlichen Sauerstoffs der Wasserpflanzen aus dem Wasser bei Nacht müssen die Fische bei etwa 4 mg/l Sauerstoffgehalt ersticken. Derartiges Fischsterben musste am Oberrhein in den letzten Jahren wiederholt registriert werden.

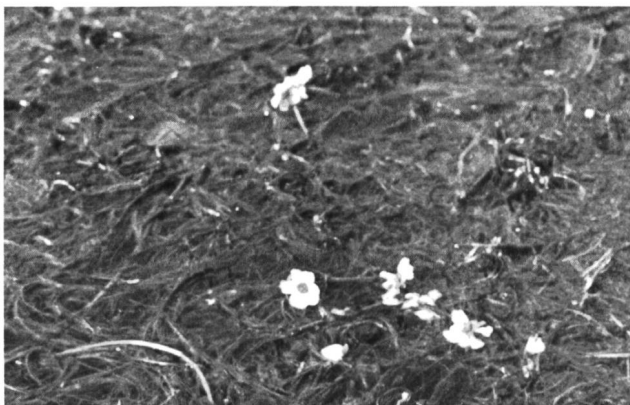
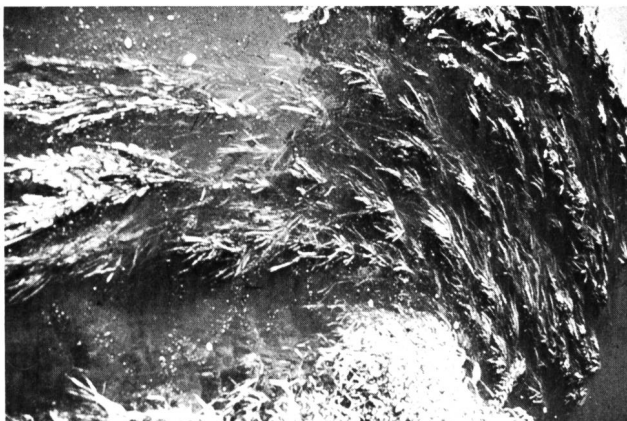


Bild 6. Der Flutende Hahnenfuss lässt seine kleinen weissen Blüten über die Wasseroberfläche wachsen.



Bild 7. In den Krauteteppichen sammelt sich Unrat an.



Bilder 8 und 9. Die Wasserpflanzen ergeben in der Flussströmung schöne und interessante Bilder.

5. Landschaft und Erholung

Die bereits erwähnten Beschwerden der Gemeinden zeigen, auf welche Art und Weise die Verkräutung der Uferzonen zu einer Belästigung, zu einer Belastung der Landschaft und zu einer Minderung des Erholungswertes beiträgt.

In diesem Schlingengewächs, das sich in breiten Bändern entlang der Ufer zieht, sammelt sich der gesamte Unrat; er fault dort aus und stinkt. Aber auch das spätere Ausfaulen der Wasserkräuter im Winter und deren Aufschwimmen im Frühjahr — bei höherer Wassertemperatur — führte bereits im Bereich des Oberrheins zu unerträglichen Geruchsbelästigungen entlang des Rheinuferes. Unter diesen Voraussetzungen leidet insbesondere der Wassersportbetrieb.

6. Unterhalt der Gewässer

Die Verkräutung der Uferzonen erschwert auch den Unterhalt der Gewässer wesentlich.

Beim bisher insbesondere durch die Kraftwerke erfolgten Einsatz zur Räumung und Beseitigung der Verkräutung steht der Erfolg in keinem Verhältnis zu den Kosten. Nur ein Teil des Krautes kann herausgenommen werden, der überwiegende Teil schwimmt ab und besiedelt durch Rhizombildungen neue Standorte. Deshalb stellt sich die Frage, inwieweit es nach dem heutigen Stand der Erkenntnisse überhaupt noch vertretbar ist, weiter auszumähen.

7. Wassergüte

Die primäre Beeinträchtigung der fliessenden Gewässer durch die Wasserkräuter liegt m. E.

- a) in der Störung des Sauerstoffgehalts — wie oben bereits erwähnt und wie durch ein umfangreiches Untersuchungsprogramm am Oberrhein durch mein Amt nachgewiesen werden kann;
- b) durch Vergrösserung der Sedimentationsprozesse;
- c) durch enorme Zunahme der Verschlämmung und damit Verdichtung der Uferzonen mit der Folge, dass die Kommunikation zwischen Grundwasser und Vorfluter erheblich gestört, wenn nicht sogar unterbunden wird;
- d) durch Vergrösserung der organischen Belastung, die im Widerspruch zu den Bemühungen steht, die organischen Stoffe von Gewässern zurückzuhalten.

V. Weitere Massnahmen

Das bisherige Beweis- und Sicherungsmaterial reicht sicherlich noch nicht aus, um einen leider notwendigen grossen Feldzug gegen die weitere Belastung unserer Gewässer

mit Phosphaten aus den Zuleitungen aller Arten führen zu können. Deshalb erscheint mir dringend geboten:

- die weitere Fortsetzung der bisherigen Untersuchungen,
- die Koordinierung der auch schweizerseits seit Jahren an verschiedenen Messstellen vorgenommenen Phosphatbestimmungen,
- eine intensive weitere Kartierung der Verkräutungszone,
- die Feststellung der jährlichen Schäden aller Arten und der Aufwendungen zur mechanischen Beseitigung der Verkräutung.

Die Bilder mögen zeigen, dass die Behandlung dieses Problems nicht mehr lange vor sich hergeschoben werden kann, wenn man nicht Gefahr laufen möchte, etwa die gleichen Zustände zu schaffen, wie sie an den Seen entstanden waren.

Die — leider auch bei verschiedenen Ämtern bestehenden — Meinung, dass die Eutrophierung der fliessenden Gewässer in ihren Folgen und Auswirkungen mit denen der Seen nicht vergleichbar sei, ist m. E. ein grosser Irrtum! Die Müllhalden als «Auswurf» unserer Wohlstandsgesellschaft kann der Mensch noch «verschämt» zudecken! Die Gewässer aber dokumentieren schonungslos unseren Raubzug in der Natur, aber auch unser Unvermögen, mit den gebotenen technischen und den notwendigen finanziellen Mitteln Abhilfe zu schaffen bzw. schaffen zu wollen! Durch die von Prof. Thomas entwickelte Simultanfällung konnte er nachweisen, dass die Phosphatzufuhr in den Seen des Kantons Zürich derart nachliess, dass die Seen wieder zu gesunden beginnen!

Mit einem Aufwand von nur fünf Rappen oder fünf Pfennigen je m³ Abwasser kann zumindest eine wesentliche Verminderung des Phosphatgehaltes in den Vorflutern bzw. Gewässern erreicht und gleichzeitig auch noch weitere Abwasserreinigungseffekte erzielt werden. Bei einem Monatsverbrauch von 10 m³ Abwasser je Einwohner entspricht der zusätzliche Aufwand für diese Reinigungsleistung etwa Fr. —.50 oder DM —.50 bzw. dem Verzicht auf eine halbe Flasche Bier, Sprudel oder zwei km Autofahren!

Man müsste den Glauben an den Menschen unserer Zeit verlieren, wenn er nicht bereit wäre, zur Rettung unserer Gewässer diesen Beitrag aufzubringen. Es liegt nun an allen «Verantwortlichen», dies dem Volk offen und ehrlich klar zu machen.

Adresse des Verfassers: Egon Kunz, Baudirektor, Wasser- und Schiffsamt Freiburg i. Br., Stadtstrasse 5, D - 78 Freiburg i. Br.

Der Flutende Hahnenfuss (*Ranunculus fluitans* Lam.), ein neues limnologisches Problem am Rhein

Eugen A. Thomas

DK 627.15:582.675.1

Im Jahre 1970 begann im Rhein unterhalb von Schaffhausen und an manchen anderen Stellen eine dort seit langem bekannte Wasserpflanze in ungeahnter Weise zu wuchern. Schaffhauser Fischer machten mich auf diese eindrückliche Erscheinung aufmerksam. Im Anschluss an eine Besichtigung bestimmte ich die Pflanze als Flutenden Hahnenfuss. Es zeigte sich bald, dass die Pflanze nicht bloss andere Wasserpflanzen von ihren Standorten verdrängte; sie erwies sich als fähig, weite Flächen des Rheinbettes neu zu besiedeln. Sogar gut durchströmte Strecken, die bisher mit blankem Kies bedeckt waren, wurden vom Flutenden Hahnenfuss in Besitz genommen; Wurzeln und unterirdische Stengel durchsetzten das Strombett, und in massloser Zahl streben seither seine Stengel vom Grund gegen die Wasseroberfläche, dort oft verankerte Inseln bildend.

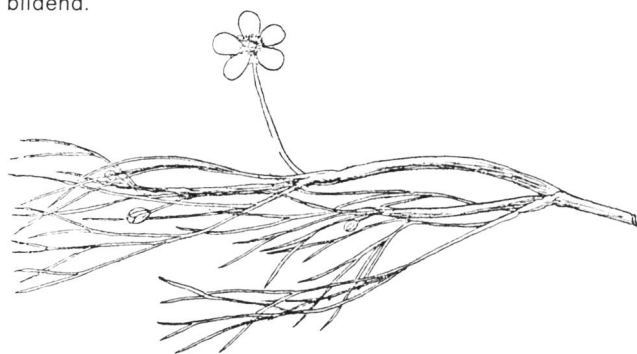


Bild 1. *Ranunculus fluitans* Lam., der Flutende Hahnenfuss aus S. Jávorka und V. Csapody: Iconographia Florae Hungaricae. Budapest 1934, Tafel 167 (rund 1,7mal verkleinert).

Diese für den Rhein neue und einschneidende Erscheinung ist ein typisch hydrobiologisch-limnologisches Problem, das an unserem grössten Fliessgewässer die Ziele des Gewässerschutzes blockiert hat; ich reihte deshalb dieses Problem in mein Forschungsprogramm ein. Auf meinen Vorschlag hin übernahm ein Biologie-Diplomand der Universität Zürich die Aufgabe, ökologische und limnologische Wachstumsbedingungen von *Ranunculus fluitans* zu bearbeiten. In Literaturstudien stellte er fest, dass die Pflanze bereits vor 130 Jahren im Rhein vorhanden war, aber niemals in Massen, wie das heute der Fall ist.

Der Flutende Hahnenfuss kann in einem nährstoffreichen Wasser bis 10 m lang werden, treibt kleine weisse Blüten über die Wasseroberfläche, die aber sehr selten Samen bilden. Er vermehrt sich durch Ausläufer, die ihn rasch nach allen Richtungen Boden gewinnen lassen. Auch abgerissene Stengelstücke, die irgendwo hängen bleiben, fassen Wurzeln und bilden neue Kolonien. Bei reichlicher Düngstoffzufuhr kann sich die Pflanze in einem wenige Dezimeter- bis metertiefen fliessenden Gewässer rasch stark vermehren.

1. Schädwirkungen der Wucherungen des Flutenden Hahnenfusses

Kleine Mengen von untergetauchten Wasserpflanzen sind in fliessenden Gewässern durchaus erwünscht; nach dem

Absterben liefern sie Material, das vor allem durch Bakterien zersetzt wird und das zum Aufbau von komplizierten Nahrungsketten von tierischen Organismen verwendet wird, zum Beispiel über Schnecken, Würmer oder Insektenlarven, Fische bis zum Menschen. Lichte Bestände von untergetauchten Wasserpflanzen können dem Wasser nicht nur mit den Wurzeln, sondern auch mit ihren fein gefiederten Blättern zahlreiche Stoffe entziehen, die im Gewässer unerwünscht sind; sie tragen deshalb zu einer Feinreinigung des Flusswassers oder des ufernahen Seewassers bei. Bescheiden ausgebildete Gesellschaften von Wasserpflanzen liefern ferner den Fischen und anderen Wassertieren verschiedenartigste Biotope, die eine Ausbildung wertvoller und andauernder Organismengemeinschaften erlauben.

Wo aber einem fliessenden Gewässer übermässige Mengen von Abwässern zugeführt werden, treten unvermeidlich grosse Schädwirkungen auf. Wir nehmen im folgenden an, dass die eingeleiteten Abwässer wenigstens mineralisiert seien und deshalb nicht zu sichtbaren Entwicklungen von Abwasser-Bakterien und -Protozoen führen. Die mineralisierten Düngstoffe stimulieren indessen das Wachstum von Algen und höheren Wasserpflanzen mächtig. Vor allem die Phosphate der Abwässer müssen als eigentliche Motoren zur Förderung der Stoffkreisläufe im Gewässer bezeichnet werden. Die Phosphate werden nicht nur von den grünen Pflanzen des Wassers gierig aufgenommen und zur Vermehrung der Biomasse verwendet, sondern auch von den Wasserbakterien, die im Wasser immer auch Spuren von abbaubaren organischen Stoffen finden (Bossert 1965; Thomas 1968).

Ueber die Schädwirkungen der Fluss- und Bacheutrophierung, speziell auch der Wucherungen des Flutenden Hahnenfusses, habe ich an anderer Stelle berichtet (Thomas 1975 b, S. 281 ff., und 1975 a).

Andererseits darf hier beigefügt werden, dass beispielsweise am Zürichsee durch die mechanisch-biologische und mit Phosphatelimination versehene Abwasserreinigung die angestrebten Sanierungsziele bereits weitgehend erreicht wurden (Thomas und Wildi 1975).

2. Heutige Kenntnisse über die Toxizität des Flutenden Hahnenfusses

In letzter Zeit ist öfters darauf hingewiesen worden, dass im Meerwasser und auch in Süsswasserseen Algen leben, die Giftstoffe produzieren können; grössere Mengen von gelösten Phosphaten förderten das Wuchern von giftbildenden Algen, was vereinzelt zu Fischsterben führte. Bei Algen des fliessenden Wassers ist die Giftproduktion bisher von geringerer Bedeutung als bei stehenden Gewässern. Anders verhalten sich phanerogame Wasserpflanzen. Bisher hat man auf die Giftproduktion solcher Pflanzen wenig geachtet, weil sie eher selten waren. Dies gilt besonders für den Flutenden Hahnenfuss. Heute ist er aber im Rhein zwischen Bodensee und Basel mit Abstand die häufigste Pflanze; weite Flächen des Strombettes, die früher von reinem Geröll überdeckt waren, sind nun über die ganze Breite vom Flutenden Hahnenfuss überwachsen.

Aus zahlreichen alten und neuen Literaturangaben geht hervor, dass Vertreter der Gattung *Ranunculus* Gifte produzieren; einige derartige Angaben wurden bereits zusammengestellt (Thomas 1975 b, S. 283). Es darf als sicher angenommen werden, dass einerseits die verschiedenen Hahnenfussarten verschieden stark giftig sind, dass aber andererseits die Giftproduktion einer bestimmten Hahnenfussrasse von äusseren Faktoren abhängig ist, wie das für zahlreiche andere wirkstoffhaltige Pflanzen sichergestellt ist.

In einer umfangreichen Studie über die Gattung *Ranunculus* hatte Maria Bergmann (1944, S. 512 ff.) unter anderem über die Hautwirkung des frischen Krautes verschiedener Hahnenfussarten berichtet. Der damals noch seltene Flutende Hahnenfuss wurde jedoch nicht in jene Versuche einbezogen. Es schien mir deshalb notwendig, mit dem Kraut von *Ranunculus fluitans* eine Anzahl von Toxizitätsprüfungen vorzunehmen, über die hier kurz berichtet sei (nähere Angaben bei Thomas, 1975 c). Für die Versuche mit Wasserflöhen und Elritzen wurde das Hahnenfussmaterial mit Mixer fein verteilt und hierauf durch Filtration durch entfettete Watte von gröberen Feststoffen befreit.

2.1 Toxische Wirkung des Flutenden Hahnenfusses auf den Grossen Wasserfloh

Der Grosse Wasserfloh, *Daphnia magna*, lebt zwar in Teichen und Tümpeln, während sich der Flutende Hahnenfuss im stark strömenden Wasser entwickelt. Die Versuche wurden mit *Daphnia magna* durchgeführt, weil diese Tiere im Laboratorium leicht zu halten sind. Vorerst interessierten die Fragen nach der Giftigkeit des Frischmaterials sowie der Trockensubstanz. Dabei erhielten wir aus 100 g Frischmaterial 5,7 g Trockensubstanz.

Trotz feinblasiger Belüftung starben die Versuchstiere in einer Aufschlammung von 100 g Frischmaterial pro Liter nach Filtration innerhalb von 15 bis 45 Minuten, bei 40 g Frischmaterial pro Liter innerhalb von zwei Stunden und bei 10 g Frischmaterial waren die Tiere nach drei Stunden geschädigt oder tot.

In Aufschlämmungen von luftgetrocknetem Material, das bei 20 °C getrocknet worden war, war die Toxizität etwas geringer, bewegte sich aber in der gleichen Grössenordnung.

2.2 Toxische Wirkung des Flutenden Hahnenfusses auf Elritzen

Auch bei diesen Versuchen musste auf einen guten Sauerstoffeintrag durch feinblasige Belüftung Wert gelegt werden. Bei Verwendung von 100 g Frischmaterial waren die Versuchsfische schon nach fünf Minuten tot, ebenso mit 5,7 g getrocknetem Material pro Liter. Bei Verwendung von 10 g Frischmaterial bzw. 0,57 g Trockensubstanz, waren die Versuchsfische nach 30 Minuten stark geschädigt bzw. nach zwei bis 18 Stunden tot. Tiefgefrorenes Frischmaterial von *Ranunculus fluitans* behielt seine Giftigkeit nahezu unverändert bei, während bei über 40 °C getrocknete Substanz auf Elritzen an Giftwirkung verloren hatte.

Im besonderen interessierte die Frage, ob beim aeroben oder anaeroben Verrotten des Flutenden Hahnenfusses die toxische Wirkung abnehme. Versuche mit acht Wochen lang aerob bei 20 °C verrottetem Material liessen bei Konzentrationen von 10 bis 40 g pro Liter für Elritzen während eines Tages keine Schädigung erkennen. War das Material aber bei 20 °C anaerob gelagert, so führten 40 g pro Liter nach 30 Minuten (oder 10 g pro Liter nach vier Stunden) zum Tod der Versuchstiere.

2.3 Toxische Wirkung des Flutenden Hahnenfusses auf die menschliche Haut

Wie andere Hahnenfussarten hat sich nun auch diese Art als hauttoxisch erwiesen (Thomas, 1975 b). Die im ersten Versuch entstandene starke Blasenbildung ist in Bild 2 wiedergegeben. Bei seitherigen Versuchen bringe ich die Pflanzensubstanz in einen Plastikdeckel eines Tablettengläschens von 18 mm Durchmesser, den ich luftdicht auf der Haut befestige; so treten auch kaum Feuchtigkeitsverluste auf. In diesen Versuchen interessierten vor allem die Wirkung von getrocknetem sowie von aerob oder anaerob verrottetem Material unserer Wasserpflanze. Ein weiterer Versuch prüfte, ob Säure oder Lauge die Giftwirkung des *Ranunculus fluitans* verändere.

Wirkung von getrocknetem Material

Für den Hautversuch wurde dem fein zerriebenen Trockenmaterial soviel Wasser zugegeben, bis das Frischgewicht wieder erreicht war. Für das gefriergetrocknete und das bei 20 °C getrocknete Material steht eindeutig fest, dass die toxische Eigenschaft nicht verloren ging, jedoch anscheinend etwas abgeschwächt wurde; Abschwächung gilt besonders für das bei 40 °C getrocknete Material.

Wirkung von aerob verrottetem Material

Pro Gramm Frischmaterial gab ich 1 ml Wasser bei. Die verwendete Glasflasche blieb bei 20 °C offen; trotzdem durchlief der Zersetzungsprozess nach vier Wochen offensichtlich eine Phase mit sehr geringem Sauerstoffgehalt. Bei diesem Vorgehen entwickelte sich ein übler, «chemischer» Geruch, der im weiteren Verlaufe des Prozesses einem eher angenehmen Geruch nach trockenem Kraut oder Heu Platz machte. Vor dem Hautversuch erfolgte eine Egalisierung des Materials im Mörser. Die so gewonnene Substanz wirkte auf die Haut nicht toxisch, im Gegensatz zum parallel geführten Frischmaterial, das tiefgefroren war.

Wirkung von anaerob gelagertem Material

Das auch hier nur in zentimeterlange Stücke zerschnittene Material hatte zwar nach acht Wochen die Farbe leicht nach Braun verändert, doch sahen die Stengel- und Blattteile noch nahezu unzersetzt aus; ein Geruch wie bei trockenem Kraut oder Heu trat auf. Das im Mörser egalisierte Material wirkte im Hautversuch schwach, aber deutlich positiv.

Wirkung von mit Säure oder Lauge behandeltem Material

Bei Behandlung mit Salzsäure schlug die grüne Farbe des zermörserten Krautes zu Olivbraun um, nicht aber bei Behandlung mit Natronlauge. Das in beiden Fällen vor dem Hautversuch neutralisierte Material gab keine Hautreaktion.

Bild 2. Wirkung von 2 g fein zerriebenem Flutendem Hahnenfuss nach drei Tagen. Einwirkungsdauer neun Stunden; zuerst Rötung, dann Blasenbildung (Mai 1975).



2.4 Schaumbildende Stoffe des Flutenden Hahnenfusses

Bei den Versuchen, ob aerob verrottetes Material von *Ranunculus* noch Hautreizungen verursache, stellte ich fest, dass solche acht und mehr Wochen verrottete Reste dieser Pflanze beim Schütteln stark zur Schaumbildung neigen. Die Schaumblasen bleiben während längerer Zeit bestehen. Für diese Schaumbildung könnten die im *Ranunculus* enthaltenen Saponine oder Stoffe verantwortlich sein, die bei der Zersetzung der Pflanze frei werden (Huminstoffe usw.).

Im Rhein treten, besonders unterhalb vom Rheinfall, in den letzten Jahren lästige Schaumbildungen auf. Da *Ranunculus fluitans* schon bei Stein vorkommt, scheint es möglich, dass aus diesen Pflanzen (entweder direkt oder beim Schneiden und Mähen oder bei der Zersetzung) Saponine ins Wasser gelangen und neben anderen Faktoren (Abwässern) bei der Schaumbildung im Rheinfall mitwirken. Nicht bloss aerob verrottetes Material von *Ranunculus fluitans* gibt nach Durchschütteln eine nur langsam abklingende Schaumbildung; auch bei zermörsertem frischem oder mit Wasser aufgeschlämmtem trockenem Material tritt sie auf. Saponine sind deshalb als Reinigungsmittel verwendet worden; sie wirken giftig, da sie die roten Blutkörperchen auflösen und die Durchlässigkeit von Zellmembranen erhöhen.

Ferner können Saponine als Netzmittel wirken und die Oberflächenspannung des Wassers herabsetzen; sie sind in der Lage, Fette und Öle zu emulgieren. Limnologisch stellt sich die Frage, ob so grosse Massen von *Ranunculus fluitans*, wie sie im Rhein vorkommen, auch durch ihren Saponingehalt einen wesentlichen Einfluss auf die Biologie des Gewässers ausüben.

3. Die limnologische Bedeutung biochemischer Probleme des Flutenden Hahnenfusses

Die heutigen Kenntnisse über die Toxizität des Flutenden Hahnenfusses, wie wir sie im vorangehenden Abschnitt schilderten, sind direkt bei Verwendung des Krautes erarbeitet worden. Aus chemischen Untersuchungen an verschiedenen Hahnenfussarten ist in den letzten Jahrzehnten bekannt geworden, dass mindestens einige Vertreter dieser Gattung in der Lage sind, bestimmte toxische und schaumbildende Stoffe aufzubauen, so Protoanemonin und Saponin. Jeder dieser beiden Stoffe kann toxische Wirkungen ausüben; möglicherweise addieren sich deren Wirkungen. Darüber hinaus stellt sich die Frage, ob *Ranunculus fluitans* ausser diesen beiden noch weitere Giftstoffe enthält. Neue Untersuchungen in dieser Richtung sind unerlässlich.

Erwünscht wären Untersuchungen darüber, in welcher Weise *Ranunculus* die toxischen Stoffe aufbaut, und in welcher Form sie in der Pflanze gespeichert sind. Von besonderer limnologischer Bedeutung ist jedoch die Frage, wie solche Stoffe beim Absterben der Pflanze abgebaut werden. Hierzu kann man *Ranunculus*stoffe mit Einfügung von ^{14}C synthetisieren und beim Abbau der Stoffe die markierten Abbauprodukte identifizieren. Auf diese Weise dürfte eine Darstellung der chemischen Vorgänge beim Abbau der toxischen Stoffe möglich sein. Nachdem ich für das *Ranunculus*kraut das Verschwinden der toxischen Hautreaktion durch Säure bzw. Lauge nachwies, ist der dabei stattfindende chemische Vorgang an reinen Substanzen zu formulieren. Ferner ist die Veränderung der toxischen Substanzen beim Trocknen sowie bei aerober bzw. anaerober Zer-

setzung chemisch zu ermitteln. Die chemische Untersuchung kann erklären, weshalb der Abbau der toxischen Stoffe im anaeroben Milieu nur zögernd vor sich geht.

Die genaue chemische Kenntnis der *Ranunculus*gifte, seien sie schonend aus dem Kraut isoliert oder synthetisiert, erlaubt exakte Versuche über ihre Giftwirkung auf Kleintiere des Wassers, Fische, Haut, Algengemische, Bakterien und allgemein Organismengesellschaften des Wassers. Gleichzeitig dürfte die Frage gelöst werden, ob *Ranunculus fluitans* siliert und verfüttert werden kann.

Wichtige limnologische Gesichtspunkte betreffend den Wirkstoffgehalt des Flutenden Hahnenfusses können erst aufgrund der genannten chemischen Untersuchungen abgeklärt werden, so die jahreszeitlichen Schwankungen im Wirkstoffgehalt der Pflanze; dies ist von Interesse, weil wesentliche Teile der Pflanze den Winter überdauern und sogar bei niedrigen Temperaturen das Wachstum fortsetzen. Auch der Einfluss der Wassertiefe auf die Wirkstoffproduktion ist zu prüfen, wobei die Probenahme des Krautes aus definierten Tiefen durch Taucher erfolgt. Die modernen chemischen Methoden erlauben ferner Angaben, ob das lebende Kraut Wirkstoffe ans Wasser abgibt und ob ein Einfluss auf die Epiphyten zu erwarten ist. Ebenso lässt sich das Vorhandensein von *Ranunculus* in Flusssedimenten abklären. Sodann wollen wir wissen, ob die Kompostierung von ausgemähtem *Ranunculus* allenfalls zu einer Grundwasserbeeinflussung führen kann.

Die genaue chemische Kenntnis der schaumbildenden Stoffe des *Ranunculus fluitans* wird experimentelle Untersuchungen erlauben zur Abklärung der Frage, ob dieser Pflanze bei der Schaumbildung im Rhein eine Bedeutung zukommt. Schliesslich könnten die Untersuchungen auch auf andere aquatische *Ranunculus*arten ausgedehnt werden, die in unseren Gewässern eine erhebliche Verbreitung haben.

4. Botanisch-limnologische Probleme des Flutenden Hahnenfusses

Historische Angaben über das erstmalige Auftreten von *Ranunculus fluitans* im Rhein bei Schaffhausen werden von Markus Huber in seiner Diplomarbeit zusammengestellt. Aus diesen Angaben lassen sich Veränderungen gegenüber der neuesten Zeit herauslesen. Aber nicht nur im Rhein, sondern auch in anderen Fließgewässern hat sich der Flutende Hahnenfuss in den letzten Jahren als Folge einer veränderten Wasserqualität weit üppiger entwickelt als je zuvor (gewisse Gebiete in der Tschechoslowakei, Oesterreich, Deutschland, Schweiz). Untersuchungen über den Chemismus solcher Gewässer und Korrelationen zwischen dem Wasserchemismus und der Ueppigkeit des Hahnenfusses würden wertvolle empirische Ergebnisse liefern.

Aufschlussreiche empirische Erkenntnisse lassen sich auch gewinnen durch exakte Studien über die Umweltbedingungen von *Ranunculus fluitans* an alten, natürlichen Standorten, vor allem hinsichtlich der Morphologie des Flussbettes, der benötigten Wassertiefe, der Strömungsverhältnisse und des Licht- und Wärmebedarfes. Der Einfluss des *Ranunculus fluitans* auf Begleitorganismen und Epiphyten dürfte in dieser Hinsicht ebenfalls aufschlussreich sein.

Experimentelle Untersuchungen über die Lebensansprüche unserer Hahnenfussart lassen sich nicht umgehen. Bereits Studien über das Wachstum in geschlossenen Becken mit verschiedener Wasserqualität lassen erste Er-

kenntnisse erwarten, wobei in solchen Kulturen ein maximales Wachstum anzustreben ist. Aber besonders in Gerinnesystemen mit verschiedenen Bodenarten und weiteren wechselnden Umweltfaktoren lassen sich die Auswirkungen von Düngstofffaktoren auf das Wachstum des Flutenden Hahnenfusses herausarbeiten. Ein Gerinnesystem, an dem solche Versuche vorgesehen sind, steht zur Verfügung.

Die Bedeutung von Spurenelementen, Schwermetallen, Mikroaktivatoren auf das Wachstum von *Ranunculus fluitans* ist im Auge zu behalten, obschon diese Stoffe kaum in erster Linie für die Wucherungen des Hahnenfusses im Rhein verantwortlich sind.

Indessen wissen wir, dass der Flutende Hahnenfuss bei der Photosynthesetätigkeit reichlich Sauerstoff freisetzt und entsprechend viel organische Substanz aufbaut. Ein grosser Teil des freigesetzten Sauerstoffes wird wegen Uebersättigung des Wassers aus dem Wasser ausgestossen; zurück bleibt die aus der Kohlensäure aufgebaute organische Substanz, die nach dem Absterben wieder abgebaut werden muss. Es ist leicht verständlich, dass der aus dem Wasser ausgestossene Sauerstoff später bei den Abbauvorgängen im Wasser fehlt, sofern er nicht erneut aus der Luft aufgenommen werden kann. Das so entstehende Sauerstoffdefizit wirkt sich im Fluss vor allem in strömungsarmen Mikrobiotopen aus, so in toten Winkeln hinter Steinen und allgemein auf der Flusssohle; an diesen Stellen lagert sich sulfidhaltiger Faulschlamm ab. Das Problem sekundärer und tertiärer Gewässerverschmutzung verlangt eine aufmerksame Bearbeitung.

5. Verwertung, Beseitigung, Düngewert des Flutenden Hahnenfusses

Das Kantonale Amt für Gewässerschutz und Wasserbau, Zürich, legte der Eidgenössischen Forschungsanstalt für Agrikulturchemie, Liebefeld-Bern, eine Anzahl von Fragen betreffend die Verwertung oder Beseitigung des aus dem Rhein ausgemähten Flutenden Hahnenfusses vor. Der Bericht dieser Anstalt vom 11. Februar 1975 erweiterte die Kenntnisse in dieser Hinsicht beträchtlich; dabei blieben Fragen offen, von denen einige durch meine Untersuchungen der Abklärung näher gebracht wurden.

Welche toxische Stoffe und wieviel davon im trockenen Kraut noch enthalten ist, scheint von den Bedingungen abzuhängen, unter denen getrocknet wurde; genaue Abklärungen sind erwünscht.

Mit Lauge oder Säure behandeltes Hahnenfusskraut, das vor dem Hautversuch neutralisiert wurde, ergab keine Hautreaktion mehr. Es bestehen somit gute Aussichten, dass das Kraut siliert und dem Vieh verfüttert werden kann. Auch hier sind noch theoretische und praktische Abklärungen nötig.

Während acht Wochen aerob in einem Glas verrotteter Hahnenfuss wirkte im Hautversuch negativ; anaerob zersetztes Material ergab eine schwache, aber deutlich positive Hautreaktion. Biochemische Abklärungen der entsprechenden Abbauvorgänge sind erwünscht.

Der erwähnte Bericht der Forschungsanstalt Liebefeld gibt Hinweise über den Düngstoffgehalt des Hahnenfusskrau-

tes, besonders über den Stickstoff-, Phosphor- und Kaliumgehalt. Hierzu kann ich eine algologisch interessante Beobachtung beifügen. Eine Flasche mit Hahnenfusskraut blieb während acht Wochen anaerob im Dunkeln bei Zimmertemperatur stehen und wurde hierauf ans Tageslicht gestellt. Nach weiteren Monaten löste sich das Hahnenfusskraut fast vollständig zu einer braunen Flüssigkeit auf, und es entwickelten sich massenhaft einzellige Grünalgen, anscheinend eine *Chlorococcum*-Art mit Pyrenoid; dabei beobachtete ich Zoosporen oder Gameten sowie einige Arten von holotrichen Ciliaten. Sie alle hatten die anaerobe Phase in Dauerstadien überstanden, und der günstige Düngstoffgehalt des Hahnenfusswassers regte die Algen unter dem Lichteinfluss zur üppigen Vermehrung an.

6. Schlusswort

Es ist unbefriedigend, wenn für die Sanierung unserer fliessenden Gewässer bei der mechanisch-biologischen Abwasserreinigung grosse Summen ausgegeben werden, die mineralisierten Abwässer aber durch ihren Düngstoffgehalt im Gewässer zu einem sekundären Aufbau von Massener organischer Stoffe führen. Je genauer die Ermittlungen der Ursachen von *Ranunculus*-Wucherungen sind, um so genauer lassen sich die Abwehrmassnahmen umschreiben. Als Sofortmassnahmen gegen die Schädwirkungen der Wucherungen submerser Wasserpflanzen stehen das Ausmähen und die Verkleinerung der Phosphatzufuhr im Vordergrund.

Wir möchten mit weiteren Untersuchungen dazu beitragen, limnologische Probleme zu lösen, die für die Förderung des Gewässerschutzes in dieser Richtung von unerlässlicher Bedeutung sind.

Literaturhinweise

- [1] Bosset, E. (1965): Incidences hygiéniques de la vaccination des eaux de boisson au moyen de polyphosphates. «Mull. schweiz. Ver. Gas- u. Wass-Fachm.» 45, S. 146–148.
- [2] Bergmann, Maria (1944): Vergleichende Untersuchungen über die Anatomie schweizerischer *Ranunculus*-Arten und deren Gehalt an Anemol und Saponin. «Ber. Schweiz. Bot. Ges.» 54, S. 399 bis 522.
- [3] Huber, Markus: Die Verkrautung des Hochrheins, unter besonderer Berücksichtigung von *Ranunculus fluitans* Lam. (Diplomarbeit am Pflanzenbiologischen Institut der Universität Zürich; vor dem Abschluss).
- [4] Thomas, E. A. (1968): Der Eutrophierungsvorgang bei Seen Zentraleuropas. «Wasser- und Energiewirtschaft» 60, Nr. 4/5, S. 115 bis 125.
- [5] Thomas, E. A. (1975 a): Krautwucherungen als schwerwiegendes Gewässerschutzproblem in Fliesswässern. «Wasser- und Energiewirtschaft» 67, Nr. 1/2, 8 S., Baden (Schweiz).
- [6] Thomas, E. A. (1975 b): Gewässerfeindliche Wirkungen von Phosphaten in Flüssen und Bächen. «Schweiz. Z. f. Hydrol.» 37, S. 273 bis 288.
- [7] Thomas, E. A. (1975 c): Zur Kenntnis der Toxizität des Flutenden Hahnenfusses (*Ranunculus fluitans* Lam.). «Vierteljahrsschr. Natf. Ges. Zürich» 120, S. 275–281.
- [8] Thomas, E. A. and Wildi, P. (1975): The effectiveness of point-source nutrient removal; the lake of Zurich as an example. The effects of storage on water quality. Symposium University of Reading, G. B., 1975.

Adresse des Verfassers: Prof. Dr. Eugen A. Thomas, Kantonales Laboratorium Zürich, Kilchbergstrasse 113, 8038 Zürich.

Biologische und ernährungsphysiologische Gesichtspunkte zur Ausbreitung des Flutenden Hahnenfusses im Oberrhein

Elie Eichenberger¹⁾

DK 627.15:582.675.1

1. Einleitung

Die Verkräutung von Fliessgewässern ist ein weltweites Problem. Die Ursachen sind vielfältig. Abwehrmassnahmen erfordern ein gründliches Verständnis der lokalen Situation und Kenntnis der Biologie der beteiligten Organismen (Mitchell, 1974 [6]).

2. Die Standortansprüche der höheren Wasserpflanzen

Generelle Anforderungen an die Umwelt

Unter höheren Wasserpflanzen oder Makrophyten (das heisst grosse Gewächse) verstehen wir hier Pflanzen, die im Gegensatz zu den Algen (auch Mikrophyten, das heisst kleine Gewächse, genannt), in Wurzeln, Stengel und Blätter gegliedert sind und zwei innere Transportsysteme für Salz- und für Zuckerlösungen besitzen.

Im langsam fliessenden Gewässer ist die Vegetation vielschichtig und besteht aus freischwimmenden Wasserpflanzen und verwurzelten Gewächsen mit untergetauchten oder mit schwimmenden Blättern, oder auch mit Sprossstelen, die über das Wasser hinauswachsen.

Im schnellströmenden Wasser, dem wir uns hier ausschliesslich zuwenden wollen, schaffen vor allem die Wasserbewegung und die oft geringe Lichtdurchlässigkeit Bedingungen, an die sich bei uns nur wenige Arten angepasst haben, so verschiedene Laichkräuter (Potamogeton), einige Hahnenfüsse (Ranunculus) und ein paar wenige andere Arten. Einige der wichtigsten Anpassungen an das Fliesswasser sind aus der Tabelle 1 ersichtlich.

Zum Ueberleben braucht eine höhere Wasserpflanze unter anderen folgende Gegebenheiten:

- Wohnraum: fester Untergrund, der sich als Wurzelraum eignet; Freiheit von Schädigung durch Hitze, Frost und Austrocknung als Folge von Niveauschwankungen
- Licht
- Nährstoffe

Anpassungen der Makrophyten an das fliessende Gewässer
Tabelle 1

Faktor	Funktionelle Anpassung	Morphologische Anpassung
Licht	— Vorstossen zur Gewässeroberfläche	(Schwimmpflanze) (Schwimmblätter) — Flutende Blätter
Nährstoffe	— Aufnahme durch Blätter — Gleichmässige Durchdringung des durchfluteten Raumes	— Fein zerteilte Sprosse — Riemenblätter
Strömung	— Verankerung im Boden — Stabilisation des Bodens — Zugfestigkeit der Sprosse	— Dichtes «Wurzelwerk» — Stützfunktion fällt weg, dafür Konstruktion auf Zug
Vermehrung	— Verfrachtung, aber keine Abschwemmung der Vermehrungseinheiten	— Samen selten — Unterirdische Stengel (Rhizome) und Ausläufer als Vermehrungseinheiten

¹⁾ Vortrag gehalten an der Fachtagung «Krautwucherungen im Rhein — Flutender Hahnenfuss» vom 3. Juni 1976 in Neuhausen am Rheinfall.

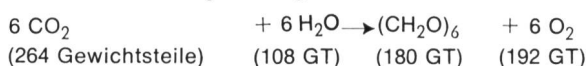
- Entsorgung, das heisst Abtransport von Ausscheidungen und von Abbauprodukten
- Bewahrung vor extremer Beweidung und vor Parasiten
- Möglichkeit durch Vermehrungseinheiten neue Standorte zu kolonisieren.

Das Licht

Die Pflanzen stellen den Ausgangsstoff für all ihre Bau- und Betriebsstoffe in der photosynthetischen Reaktion her. Diese Reaktion braucht Energie und zwar in Form von Licht, das vom Blattgrün aufgenommen und durch komplexe biochemische Prozesse an die Verbrauchsorte kanalisiert wird. Der Vorgang wird im allgemeinen folgendermassen formuliert:



oder als Molekulargleichung



Wenn wir einen Gewichtsteil (GT) einem Gramm gleichsetzen, so werden für die angegebene Reaktion etwa 700 kcal Lichtenergie gebraucht, d. h. eine Energiemenge, die theoretisch erlauben würde, eine Wassermenge von 700 l von 14 auf 15 °C zu erwärmen.

In einem Fluss mit genügender Nährstoffversorgung nimmt die Herstellung von Pflanzensubstanz ungefähr proportional zur Belichtung des Bestandes zu. Unter günstigen Verhältnissen werden von der Vegetation etwa 1 % des einfallenden Lichtes genutzt. An einem sonnigen Sommertag mit einer Strahlung von etwa 4000 kcal/m² Tag werden 5 bis 10 g Trockensubstanz pro m² und Tag produziert, was etwa 50 bis 100 g Frischsubstanz entspricht (d. h. rund 0,5 bis 1 t Frischsubstanz pro Hektar und Tag). Eine Zusammenstellung der Grössenordnung der mittleren Jahresproduktion von verschiedenen Pflanzengesellschaften gibt die Tabelle 2. Sie zeigt uns, wie produktiv natürliche Wasserstandorte auch im Vergleich mit normalen landwirtschaftlichen Böden sind und welch gewaltige Pflanzenmassen bei einer tropischen Verkräutung, z. B. durch die gefürchtete Wasserhyazinthe Eichhornia, zu erwarten sind.

Schon eine schwache Trübung des Wassers verringert den Lichtgenuss ganz beträchtlich; die Produktion ist daher sehr wetterabhängig. An einem trüben Regentag und erst recht bei Hochwasser werden die Pflanzen schon in geringer Tiefe keine Substanz mehr aufbauen können, und mangels Licht von ihren Reserven zehren.

Lange bevor der Mensch den Gewässerchemismus durch Einleitungen tiefgreifend zu beeinflussen begann, hat er drastisch auf das Lichtklima eingewirkt. Waldrodungen längs der Ufer, Massnahmen gegen Erosion und Hochwasser, Einfügen von Staustrecken mit verbesserten Absetzbedingungen und in neuester Zeit die Elimination der Schwebstoffe aus den Abwassereinleitungen haben zu einer verbesserten Durchlichtung der Gewässer geführt.

Klima	Vegetationstyp	Hauptarten	Stehende Biomasse g/m ²	Mittlere jährliche Produktion Trockensubstanz g/m ² Tag ¹⁾
gemäßigt	untergetaucht im See	Ceratophyllum	710	2,5
	untergetaucht im Fluss	Sium erectum	500	2,3
tropisch	schwimmend	Ranunculus penicillatus Eichhornia	1500	4 bis 12

zum Vergleich

arid	Wüste und Grasländer		weniger als 0,5
gemäßigt	Wälder, Grasland, Landwirtschaft		0,5 bis 5
tropisch	Immergrüne Wälder, intensive Landwirtschaft		5 bis 20
	kurzfristige Höchstproduktionen		bis zu 60

1) Zur Umrechnung in t/ha Jahr mit 3,65 zu multiplizieren.

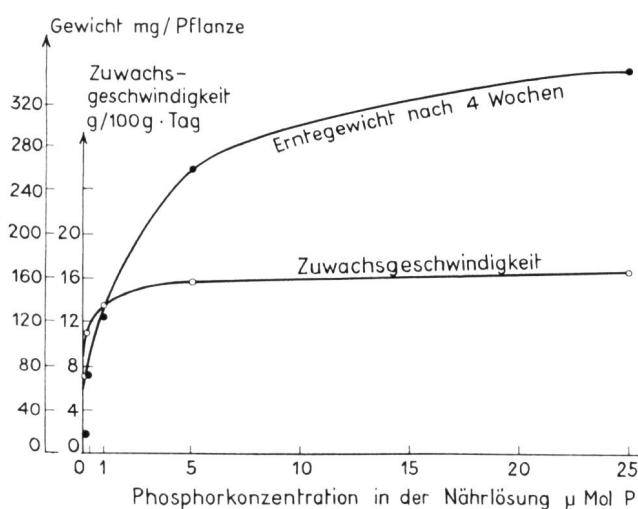
Daten aus verschiedenen Quellen

Viele zivilisatorische Massnahmen haben die Durchlichtung auch verschlechtert, so z. B. die Erhöhung der Schwefelstofffracht durch erosionsfördernde Rodungen oder unsachgemässe landwirtschaftliche Bodennutzung und Abwasserleitung. Einstau der Flussläufe und Tieferlegen der Sohle haben in vielen Fällen den Lichtpfad von der Wasserfläche zu den Pflanzen am Flussgrund verlängert. In der Seenforschung ist eine der ältesten Messungen die Bestimmung der Durchsichtigkeit des Wassers mit der weissen Secchi-Scheibe. Leider fehlen für unsere Flüsse derartige Messungen über längere Zeiträume, so dass wir über die Geschichte des Lichtklimas, dieses besonders wichtigen Wachstumsfaktors, wenig Präzises wissen.

Phosphor-Konzentrationen in Nährlösungen von Landpflanzen und in Böden
Tabelle 3

	Konzentration in PO ₄ -P	
	in mg/l	in Mol/l
Nährlösungen, die optimales Wachstum ergeben		
— in statischen Versuchen, kleine Gefässe	30 bis 150	1 bis 5 milli
— in Fliesskulturen, grosse Gefässe	0,03 bis 0,15	1 bis 10 micro
Mittlerer Wert für 135 repräsentative amerikanische Bodenlösungen (Mediane)	0,045	1,5 micro

Nach Bielecki 1973 [2]

Bild 1. Das Wachstum der Landpflanze *Hypochaeris glabra* in Funktion des Phosphatangebotes (Daten [1], Asher und Loneragan 1967). 1 Mol P entspricht 31 g PO₄-P/l.

Das Nährstoffbedürfnis

Wie jeder Gartenliebhaber weiss, brauchen die Pflanzen zum Gedeihen eine Anzahl Elemente, die in der Regel in Form von einfachen Verbindungen und Salzen zugeführt werden. Zu den «klassischen Zehn der Pflanzenphysiologie» (Kohlenstoff C, Wasserstoff H, Sauerstoff O, Stickstoff N, Phosphor P, Schwefel S, Kalium K, Kalzium Ca, Magnesium Mg und Eisen Fe) kommen noch eine Anzahl von Spurenelementen, verschiedene Metalle wie Kobalt, Mangan, Zink und Kupfer, die in sehr geringen Mengen ($\mu\text{g/l}$) unerlässlich sind, in grösseren Quantitäten (mg/l) aber schädlich wirken²⁾.

Eines dieser für das Wachstum notwendigen Elemente ist der Phosphor, der im Stoffwechsel eine sehr wichtige Rolle übernimmt. Die wichtigsten Verbindungen des Phosphors im Wasser sind die Phosphate (das PO₄³⁻-Ion) und von diesen abgeleitete Kondensationsprodukte. Da die Verbindungen des Phosphors im allgemeinen in der natürlichen Umwelt in eher geringen Konzentrationen vorkommen, sind diese sowohl für die Landpflanzen wie für die Wasserpflanzen vielfach knapp und ein Mangelstoff.

Wir können den Bedarf einer Pflanze für ein bestimmtes Element dadurch untersuchen, dass wir eine Situation schaffen, wo der betreffende Stoff zur Mangelware wird, z. B. durch die Verwendung von Nährlösungen bekannter Zusammensetzung. Dank ihrer wirtschaftlichen Bedeutung ist die Ernährungsphysiologie der Landpflanzen besser untersucht worden als jene der Wasserpflanzen. Die Untersuchung der Bodenlösungen von landwirtschaftlich ertragreichen Böden hat ergeben, dass ihre Phosphatkonzentrationen im allgemeinen recht tief liegen (Tabelle 3), und in der Folge ist auch gezeigt worden, dass Landpflanzen in stark verdünnten Nährlösungen gut wachsen, sofern für ihre regelmässige Erneuerung gesorgt wird. Da das Wachstum kein «Alles oder Nichts»-Prozess ist, bietet die Quantifizierung der wachstumsfördernden Eigenschaften einer Lösung einige Schwierigkeiten, was auch in der Diskussion um die Verkräutung der Gewässer zu Missverständnissen führen kann.

Zur Beschreibung der Beziehung zwischen Nährstoffangebot und Wachstum wird vielfach der Zuwachs pro Zeiteinheit und Gewichtseinheit der Pflanze, die sog. Zuwachsgeschwindigkeit oder Zuwachsrate, gemessen. Die Abhän-

²⁾ μg oder Mikrogramm — mikro steht für den Faktor 10^{-6} vor einer Einheit; mg oder Milligramm — milli steht für 10^{-3} . Ein Mikrogramm, auch als Gamma bezeichnet, ist also ein Millionstel-Gramm.

gigkeit der Zuwachsgeschwindigkeit von der Konzentration lässt sich durch zwei Bereiche charakterisieren (Bild 1): — durch einen Bereich geringer Konzentrationen, in dem die Zuwachsgeschwindigkeit angenähert proportional zur Konzentration des wachstumsbegrenzten Stoffes zunimmt; — durch einen Bereich höherer Konzentrationen, wo eine Erhöhung der Konzentration keine wesentliche zusätzliche Steigerung der Zuwachsgeschwindigkeit auslöst. Dabei wird auch dann, wenn der Bedarf gedeckt ist, weiterhin Phosphor aufgenommen und in der Pflanze gespeichert; diese Reserve erlaubt, Mangelzeiten zu überbrücken.

Der Uebergang vom ersten zum zweiten Bereich wird in der Fachsprache als kritische Konzentration bezeichnet; d. h. Konzentration, bei der am betreffenden Element der Bedarf für die Wachstumsprozesse vollständig gedeckt ist. Oft wird auch die Halbwertskonzentration angegeben, jene Konzentration, bei der die Zuwachsgeschwindigkeit die Hälfte ihres Höchstwertes erreicht (als K_s bezeichnet).

Wie aus verschiedenen Experimenten mit Landpflanzen hervorgeht, liegen die kritischen Konzentrationen für Phosphate bei etwa 30 bis 60 $\mu\text{g PO}_4\text{-P/l}$, die Halbwertskonzentrationen meist unter 20 oder unter 10 $\mu\text{g PO}_4\text{-P/l}$. Entscheidend ist nun, dass die Beziehung nur bei beständiger Erneuerung der Nährlösung im Bereich der Wurzeln gilt. Wird der Nachschub gestört, etwa durch verringerte Turbulenz oder durch irgendwelche austauschhemmende Ueberzüge, so wird die Kurve in Bild 1 flacher und steigt stetiger an; die kritische Konzentration wird schwer definierbar.

Wie sich aus Bild 1 ableiten lässt, kann auch bei einer kleinen Zuwachsgeschwindigkeit (einem Zinsmass vergleichbar) die Pflanzenmasse beträchtlich zunehmen, so z. B. bei einer längeren Dauer der Wachstumsperiode oder wenn von vorneherein ein gut entwickelter Bestand vorliegt. Die Darstellung sollte uns vor Augen führen, wie schwierig eine mengenmässige Aussage über die Wirkung eines Nährelementes ist, und dass Präzision in der Aussage die Umschreibung der Randbedingungen erfordert.

Die wenigen Ernährungsversuche, die mit höheren Wasserpflanzen durchgeführt worden sind, zeigen, dass zwischen Land- und Wasserpflanzen keine grundsätzlichen Unterschiede bestehen und dass auch die Wasserpflanzen ähnlich tiefe Anforderungen an die Phosphat-Konzentration des turbulenten Mediums stellen (Tabelle 4).

Aus den vorliegenden Daten darf wohl der Schluss gezogen werden, dass die kritischen Konzentrationen, d. h. jene P-Konzentrationen, wo die Zuwachsgeschwindigkeit nicht

mehr durch das P-Angebot begrenzt wird, bei etwa 20 $\mu\text{g PO}_4\text{-P/l}$ oder allenfalls auch tiefer liegt, vorausgesetzt, dass die Nährlösung regelmässig erneuert wird.

Es ist anzunehmen, dass in dichten Pflanzenbeständen die Bedürfnisse wegen verringerter Turbulenz höher liegen, dass aber in solchen Situationen das Licht und nicht das Nährstoffangebot begrenzender Faktor wird. Die Beantwortung der Frage, welches nun für einen natürlichen Bestand die kritische Konzentration sei und wie dicht der Bestand werden könne, ist daher nicht ohne Schwierigkeit. Dabei ist zu beachten, dass wir die Austauschbedingungen und die Konzentration im Pflanzenbestand nicht kennen, da wir die Wasserproben aus einleuchtenden Gründen in der freien Wasserwelle erheben. Zur Abklärung der aufgeworfenen Fragen sind wir auf Beobachtungen am Gewässer selbst angewiesen.

Sofern die Pflanzen mit einem funktionstüchtigen Wurzelsystem versehen sind, kann sowohl der Gewässergrund wie auch die freie Welle zur Versorgung beitragen. In Flüssen, die aus Seen gespiesen werden, liegt meist eine deutliche Periodizität des Phosphor-Gehaltes des Wassers vor (Bild 3), mit einem Maximum im Winter und einem Minimum im Spätsommer. Wir müssen mit der Möglichkeit rechnen, dass Makrophyten wie *Ranunculus fluitans* dann, wenn wenig aus dem Wasser zu holen ist, aus Phosphatreserven im eigenen Gewebe und aus Ablagerungen im Gewässergrund beträchtliche Nährstoffmengen zur Verfügung stehen. Die Grössenordnung der Mengen, die mobilisiert werden und ihre Bedeutung für das Ueberdauern schlechter Zeiten sind nicht bekannt.

3. Die Ausbreitung von *Ranunculus fluitans* am Oberrhein

Die Fragestellung

Im Vordergrund stehen die beiden Fragen:

— welcher Faktor oder welche Faktorenkombination veranlasste *Ranunculus fluitans*, einen normalen Bestandteil der Pflanzenvegetation des Rheins, sich schlagartig auszubreiten;

— welche Massnahmen bieten sich zur Eindämmung dieser Massenvermehrung an.

Im folgenden sind diese Fragen vor allem hinsichtlich des Phosphorhaushaltes des Rheins zu behandeln.

Die Ausbreitung von *Ranunculus fluitans* und die Veränderung des Phosphor-Gehaltes im Rhein

Ranunculus fluitans kommt nach Koch (1925) [5] in zwei verschiedenen Pflanzengesellschaften vor, der Gesellschaft des «durchwachsenen Laichkrautes und des flutenden Hahnenfusses» in schnellfliessenden Gewässern, und in einer Gesellschaft langsamfliessender Gewässer mit schlammigem Boden, die durch den flutenden Hahnenfuss und den Igelkolben gekennzeichnet ist. Koch berichtet, dass die Laichkraut-Hahnenfuss-Gesellschaft oft als breiter Streifen dem Rheinufer folgt, und dass landeinwärts eine Gesellschaft mit dem schwimmenden Laichkraut sie ablöst, was auf eine gute Besiedlung der Ufer zwischen Stein und Neuhausen in den zwanziger Jahren hinweist.

Ueber die langfristige Verbreitung von *Ranunculus fluitans* im Rhein wissen wir wenig; es ist noch nicht lange her, dass über den Zustand der Fliessgewässer Buch geführt wird. Wir wissen daher auch nicht, ob die Art periodischen Häufigkeitsschwankungen unterliegt, ob sie nicht schon in einem früheren Zeitpunkt weiter verbreitet war als in den

Phosphor-Bedarf einiger Wasserpflanzen Tabelle 4

Art	Mit Boden	Bereich mit grösster Produktion mg P/l	Kritische Konzentration ¹⁾ mg P/l	Autor
<i>Elodea canadensis</i>	+	0,020 bis 0,065	ca. 0,020	²⁾
<i>Myriophyllum spicatum</i>			kleiner als 0,02	
Var. <i>exalbescens</i>	+	0,020 bis 0,065		²⁾
<i>Myriophyllum exalbescens</i>	—	0,003 bis 0,031	kleiner als 0,003	³⁾

¹⁾ Siehe Definition im Text.

²⁾ Mulligan und Baranowski, 1968 [7]. Wenn die Erde durch Sand ersetzt wird, ist das Wachstum weniger gut. Erhöhung der Nährstoffkonzentration hat aber wenig Effekt.

³⁾ Wilson, 1972 [8].

vierziger Jahren, ohne allerdings die heutige extreme Ausbreitung erreicht zu haben.

Für die jüngste Ausbreitungsgeschichte und ihre Beurteilung durch die Behörden sei auf den Beitrag von E. Kunz in diesem Heft hingewiesen. Die mengenmässige Verbreitung der Makrophytenvegetation im Rhein zwischen Eschenz und Schaffhausen wird durch die limnologische Abteilung der EAWAG untersucht. Aus einer Studie stellte uns Dr. J. Bühler, der diese in den letzten Jahren betreute, die folgenden Daten freundlicherweise zur Verfügung.

Zwischen 1967 und 1971 nahmen die mit *Ranunculus fluitans* bewachsenen Flächen stark zu; in den darauffolgenden Jahren liessen sich wohl Schwankungen in der Dichte feststellen, aber keine wesentlichen Veränderungen seiner

Ausbreitung (Bild 2). Die einzelnen Flussabschnitte wurden unterschiedlich von Ausbreitung dieser Art betroffen. Auf der Strecke von Stiegen bis Hemishofen nahm das gesamte von Pflanzen besiedelte Areal von 1967 bis 1974 um etwa 8 ha zu (1974 waren 41 % der Flussfläche besiedelt), zwischen Hemishofen und Schaffhausen um 21 ha (1974 waren 22 % der Flussfläche besiedelt). Im oberen Abschnitt dehnte sich die Hahnenfussfläche von 0,1 auf 5,5 ha aus, im unteren von 2,2 auf 31,1 ha. Oberhalb Hemishofen erhöhte sich der Anteil von *Ranunculus fluitans* von 0,3 % der Vegetationsfläche im Jahre 1967 auf 10,5 % im Jahre 1974. Unterhalb Hemishofen stieg sein Anteil von 8 auf 64 %. Im allgemeinen dehnte sich der Hahnenfuss vorwiegend durch die Kolonisation von bisher makrophytenfreiem Areal aus, wenn auch stellenweise sein Vordringen auf Kosten schon bestehender Bestände anderer Arten erfolgte.

Die ökologische Interpretation der recht komplexen, dynamischen Artenverteilung wird auf die Bearbeitung der Daten durch Dr. Bühler warten müssen.

Die geringe Veränderung der Siedlungsfläche von 1971 bis 1974 deutet darauf hin, dass im wesentlichen ein wohlumrissener Standort, eine sog. Nische, sprunghaft erobert wurde. In ähnlicher Richtung weisen auch die Beobachtungen der Zürcherischen Jagd- und Fischereiverwaltung, die in den letzten Jahren wenigstens lokal eine Stagnierung oder einen Rückgang der Bestände im Zürcher Rhein unterhalb Schaffhausen feststellt [4].

Unter Beiziehung von langjährigen Untersuchungen des Chemismus des Untersees und einer sorgfältigen statistischen Verifikation der Korrelation dieser Daten zum P-Gehalt des Rheinwassers bei Stein, hat Bühler die Beziehung zwischen *Ranunculus*-Areal und P-Gehalt des Rheinwassers untersucht. Wie aus der Darstellung (Bild 2) ersichtlich ist, war bei einem $\text{PO}_4\text{-P}$ -Gehalt des Rheinwassers von $20 \mu\text{g/l}$ im Jahre 1971 die Hauptausbreitungsphase von *Ranunculus* schon abgeschlossen.

Wenn vor 1967 tatsächlich der Phosphormangel der wachstumsbegrenzende Faktor war, so ergibt sich aufgrund dieser Beobachtungen eine kritische Konzentration, bei welcher der Bedarf der Pflanzen gesättigt ist, für diesen Rheinabschnitt von etwa $20 \mu\text{g PO}_4\text{-P/l}$, ein Wert, der recht gut mit den spärlichen Daten von Wachstumsversuchen an Wasserpflanzen übereinstimmt.

Die Eindämmung der *Ranunculus*-Verkrautung durch P-Elimination

Unabhängig davon, welche Faktoren letztlich für die Ausbreitung von *Ranunculus* im Rhein entscheidend waren und welche zur Aufrechterhaltung der einmal gebildeten Bestände massgebend sind, kann man die These aufstellen, dass zur Bekämpfung der Wucherungen eines der lebensnotwendigen Elemente ins Minimum zu versetzen sei, damit durch die Verknappung der Versorgung mit diesem Element der Bestand zurückgeht. Es liegt auf der Hand, dass dem Phosphor bei solchen Diskussionen Priorität eingeräumt wird.

Es kann hier nicht darum gehen, die Frage der Phosphor-Bilanz erschöpfend zu behandeln. Doch können einfache Überlegungen zeigen, welche Anstrengungen mit der Auflage verbunden sind, den Phosphor zum wachstumsbegrenzenden Faktor werden zu lassen.

Die Tabelle 5 gibt die mutmasslichen Auswirkungen von verschiedenen Phosphorzufuhren aus den Siedlungen zwischen Stein und Ellikon und von verschiedenen Zuständen des Ausflusses aus dem Untersee auf die Fracht und die Konzentration von Phosphaten im Rhein. Bei dieser Betrachtung sind drei Prozesse nicht berücksichtigt wor-

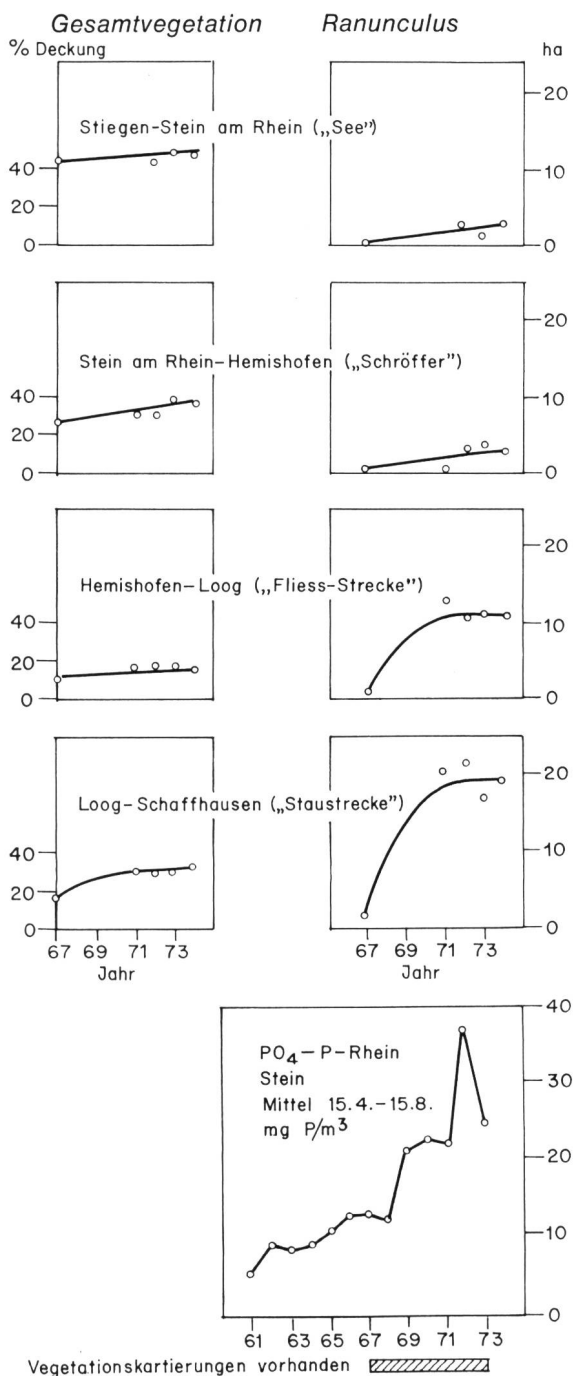


Bild 2. Die Makrophyten-Vegetation im Oberrhein. Nach Zahlen aus [3], J. Bühler, 1976. Links die Gesamtvegetation als prozentuale Dekung der Flusssohle; rechts die Bedeckung der Flusssohle durch *Ranunculus fluitans* in ha. Als Vergleich dazu wird unten die Zunahme der $\text{PO}_4\text{-P}$ -Fracht im Rhein in mg P/m^3 gegeben. Die unterschiedliche Ausbreitung des *Ranunculus* zeigt seit 1971 wenig Veränderungen.

den: die Fällungsreaktion im Fluss, die P dem Gewässergrund zuführt, die Fixierung von P durch die Pflanzen und die Einwaschung von P aus den Böden.

Für jede analytische Diskussion entscheidend ist die Frage, ob all die Einleitungen von P in den Rhein tatsächlich additiv sind und die Fracht in vorgesehener Weise erhöhen, so dass aufgrund eines Modells, das von der Summierung der Beiträge ausgeht, eine Strategie der Elimination konzipiert werden kann. Auch dann, wenn uns die Logik zwingen sollte, die Frage zum vorneherein zu bejahen, bedarf sie der Ueberprüfung für den Fall, dass wir später einmal aufgrund von Flussdaten den Erfolg von Massnahmen auf die Phosphor-Bilanz beurteilen wollen. Im Prinzip sind dazu die P-Konzentrationen längs des Rheins mit den P-Zufuhren zu vergleichen.

Die Daten des kantonalen Laboratoriums Schaffhausen, die mir von H. U. Hardmeier freundlicherweise mitgeteilt worden sind, ergeben ein Bild gleichförmiger Phosphatkonzentration längs des Rheins zwischen Stein und Ellikon und bestätigen die aufgrund der Abwassereinleitungen erwartete Zunahme der Konzentration nicht (Tabelle 6). Was auch immer die korrekte Interpretation der Zahlen ist, sie zeigen uns, wie wenig wir die Phosphor-Bilanz im Rhein mengenmässig verstehen.

Die Werte des Kantonalen Laboratoriums Schaffhausen (Bild 3) heben deutlich hervor, dass in der ersten Hälfte der Vegetationszeit die Phosphor-Konzentrationen bis Ellikon den Bedarf der Pflanzen hinreichend decken, auch ohne Mobilisation von P aus dem Boden oder allfälliger Reserven in den Pflanzen.

Wenn wir dem Schluss beipflichten, dass die kritische Konzentration für das Wachstum von *Ranunculus fluitans* bei 20 µg PO₄-P/l liegt, d. h. dass diese Konzentration den «normalen» Bedarf hinreichend deckt und damit nicht

mehr wachstumsbegrenzend ist, so zeichnen sich Grenzwerte ab, die anzustreben sind, wenn wir den Phosphor zum wachstumsbegrenzenden Faktor erheben wollen. Ge-

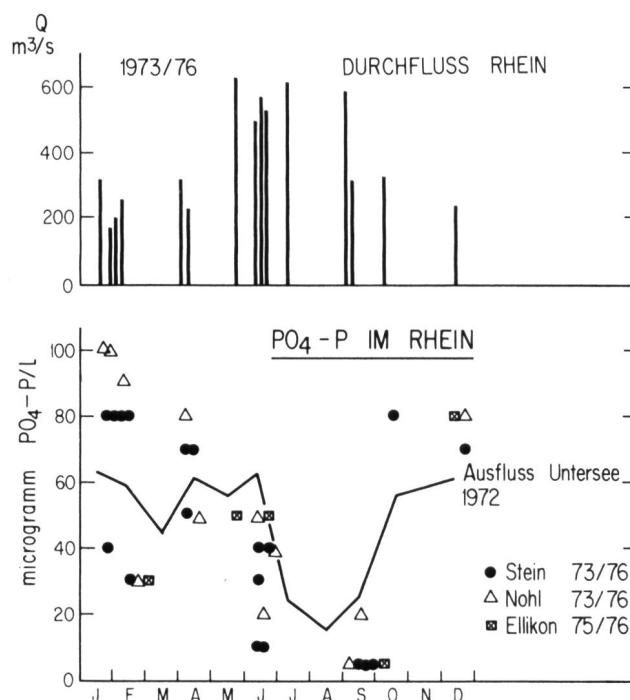


Bild 3. Die jahreszeitliche Verteilung der Phosphat-Konzentration zwischen Stein und Ellikon. Im obern Diagramm sind als Vergleich die Abflussmengen entsprechend den Tagen der Probeentnahme angegeben (in m³/s für Rheinklingen bis Mai 1975, dann für Schaffhausen). Die ausgezogene Kurve im unteren Diagramm zeigt den Tendenzverlauf aus den Messungen und Analysen des Kantonalen Laboratoriums Schaffhausen. Im Frühsommer sind die Konzentrationen sehr hoch, sie sinken gegen Ende der Wachstumsperiode stark ab und begrenzen vielleicht das Wachstum zeitweise.

Schätzung des Phosphor-Eintrages in den Oberrhein unter verschiedenen, angenommenen Bedingungen Tabelle 5

Es werden 3 Phosphat-Niveaus im Ausfluss der Kläranlagen berücksichtigt: keine Massnahmen (7 mg PO₄-P/l), halbe Elimination (3,5 mg/l) und vollständige Elimination (1 mg/l).

Angenommener Beitrag aus Kläranlagen				Angenommener Beitrag aus dem Untersee bei einem Abfluss von 400 m³/s				
Region	m³/Tag	PO₄-P mg/l	kg/Tag	Konzentration PO₄-P mg/m³	5	10	20	40
				Fracht PO₄-P kg/Tag	173	346	691	1382
Summe der Frachten im Rhein bei verschiedenen Annahmen								
oberhalb Röti	66 680	1	67	PO₄-P kg/Tag vor Schaffhausen:	240	413	758	1449
		3,5	233		406	579	924	1615
		7	467		640	813	1158	1849
Röti	33 400	1	33	nach Schaffhausen:	273	446	791	1482
		3,5	117		523	696	1041	1732
		7	234		874	1047	1392	2083
Phosphatkonzentration der Anlagenabflüsse				Mutmassliche Konzentration des Rheinwassers PO₄-P mg/m³				
				Ausfluss Untersee	5	10	20	40
		1		unterhalb Schaffhausen:	7,9	12,9	22,9	42,9
		3,5			15,1	20,1	30,1	50,1
		7			25,3	30,3	40,3	60,3

Veränderungen der Phosphat-P-Konzentrationen im Rhein zwischen Stein und Ellikon Tabelle 6

Datum	Stein mg PO ₄ -P/l	Schaffhausen Salzstadel mg PO ₄ -P/l	Nohlbrücke-Mitte mg PO ₄ -P/l	Ellikon-Fähre mg PO ₄ -P/l
9. 2. 1976	0,09	0,09	0,10	0,09
26. 4. 1976	0,065	0,065	0,055	0,060

Nach Unterlagen des Kantonalen Laboratoriums Schaffhausen, die wir der Freundlichkeit von H. U. Hardmeier verdanken.

Untersees, erfordert die Bekämpfung der Verkrautung durch mäss Bild 3 liegt der Ausfluss von P aus dem Untersee während der entscheidenden Vegetationszeit genügend lange über dem kritischen Wert, um gutes Wachstum der Pflanzen sicherzustellen.

Der Schluss scheint unausweichlich, dass eine Senkung des P-Gehaltes im Rhein auf einen Betrag, der das Pflanzenwachstum entscheidend bremst, Massnahmen in einem weiten Einzugsgebiet erfordert und dass die Rheinsanierung und die Bodenseesanieierung zwei eng miteinander verbundene Projekte sein müssen.

4. Ausblick

Bei der Diskussion über die Verkrautung von Gewässern müssen wir davon ausgehen, dass der wässrige Lebensraum in verschiedener Hinsicht ein lebensfreundlicher Raum ist, und dass jene Gewächse, die seine spezifischen Tücken überwinden, hier bestes Auskommen finden können. Ganz generell wird in Fliessgewässern (und an See-ufern) durch die Turbulenz des Wassers das vorhandene Angebot an Nährstoffen besser zur Geltung gebracht als in irgendeinem andern Lebensraum. Eine Strategie der Wachstumsbegrenzung durch Nährstoffentzug erfordert daher eine besonders weitgehende Verknappung der lebensnotwendigen Stoffe.

Bezüglich der Phosphatversorgung der Pflanzen folgt aus verschiedenen Beobachtungen, dass die seit 1969 festgestellten Konzentrationen während der Vegetationszeit von $20 \mu\text{g PO}_4\text{-P/l}$ und mehr den Bedarf der Pflanzen hinlänglich decken. Damit können die Gewächse die günstigen Standorte ohne Wachstumsbegrenzung seitens der Ernährung besiedeln und das Flussbett über weite Strecken verkrauten. Bei welchen Phosphatkonzentrationen die Pflanzenbestände auf ein «annehmbares» Mass zurückgehen, hängt von verschiedenen Randbedingungen ab und lässt sich daher nicht in allgemein verbindlichen Zahlen ausdrücken, dürfte aber an günstigen Standorten in der Gegend von $10 \mu\text{g/l}$ liegen, d. h. bei Werten, die für die frühen sechziger Jahre üblich waren.

In Anbetracht der hohen Phosphat-Werte im Abfluss des

die Phosphat-Elimination in den Kläranlagen und bei den Konsumenten bedeutende überregionale Anstrengungen. Es wird sich daher lohnen, auch nach alternativen Bekämpfungsstrategien Ausschau zu halten.

Verschiedene Beobachtungen belegen die grosse Bedeutung der Bodenstabilität als Voraussetzung für die Verkrautung. Entscheidend sind die Bedingungen, die die erste Kolonisation ermöglichen, ein Stadium, das wir im allgemeinen nicht beobachten. Ist einmal ein Bestand etabliert, so verbessert Ranunculus seine Ueberlebenschancen. Destabilisierung dieser Bestände durch eine geeignete Kombination von Schwächung durch Mähen und mechanischem Stress durch Hochwasser ist allenfalls lokal durchführbar. Inwiefern auch die natürliche Sukzession, d. h. das Eindringen der Arten, die natürlicherweise zur Gesellschaft gehören, zu einer weniger beanstandenswerten Form der Vegetation führt, ist noch offen und wäre in kontrollierten Parzellen zu studieren.

Literaturhinweise

- [1] Asher C. J. und J. F. Loneragan: Response of plants to phosphate concentration in solution culture: I. Growth and phosphorus content. «Soil Science» 103 (4), p. 225—233.
- [2] Bielecki R. L.: Phosphate pools, phosphate transport and phosphate availability. «Ann. Rev. Plant Phys.» 24, p. 225—252, 1973.
- [3] Bühner J.: Zusammenhänge zwischen den P-Komponenten und der Makrophytenvegetation im Hochrhein zwischen Eschenz und Schaffhausen. Interner Bericht EAWAG, Frühjahr 1976.
- [4] Jahresbericht der Fischerei- und Jagdverwaltung des Kantons Zürich (erweiterter Bericht). Jahrgänge 1972, 1973 und 1974.
- [5] Koch W.: Die Vegetationseinheiten der Linthebene unter Berücksichtigung der Verhältnisse in der Nordostschweiz. «Jb. Naturwiss. Ges. St. Gallen» 61. 144 S., 1925.
- [6] Mitchell D. S., ed.: Aquatic vegetation and its use and control. Unesco Paris, 1974, 135 S.
- [7] Mulligan H. F. und Baranowski: Growth of phytoplankton and vascular aquatic plants at different nutrient levels. «Int. Ver. Theor. Angew. Limnol. Verh.» 17, p. 802—810, 1968.
- [8] Wilson D. O.: Phosphate nutrition of the aquatic angiosperm, *Myriophyllum exalbesens* Fern. «Limnology and Oceanography», 17 (4), p. 612—616, 1972.

Adresse des Verfassers: Elie Eichenberger, Dr. sc. nat., EAWAG, Eidg. Anstalt für Wasserversorgung, Abwasserreinigung und Gewässerschutz, Versuchsstation, Tüffenwies 36, 8064 Zürich.

Die Bekämpfung des Flutenden Hahnenfusses

Lothar Kranich¹⁾

DK 627.15:582.675.1

Einleitung

Die Probleme des Wasserpflanzenbewuchses haben schon seit vielen Jahren zu Entwicklungen von Maschinen und Geräten geführt, um damit die Wasserpflanzen zu entfernen. Diese wurden teilweise von den Kraftwerken selbst, von der Industrie und vom Verband Aare-Rheinwerke in Auftrag gegeben.

Im folgenden werden die einzelnen Einrichtungen kurz vorgestellt, wobei nur auf das Prinzip, nicht auf konstruktive Details eingegangen werden kann, Einzelheiten der von der Industrie angebotenen Geräte können dort direkt angefragt werden.

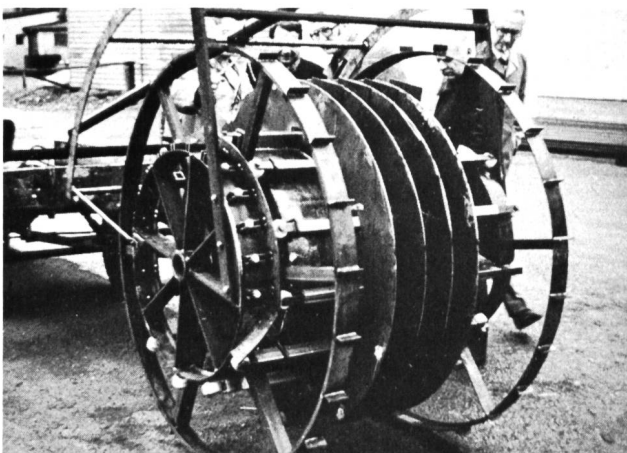
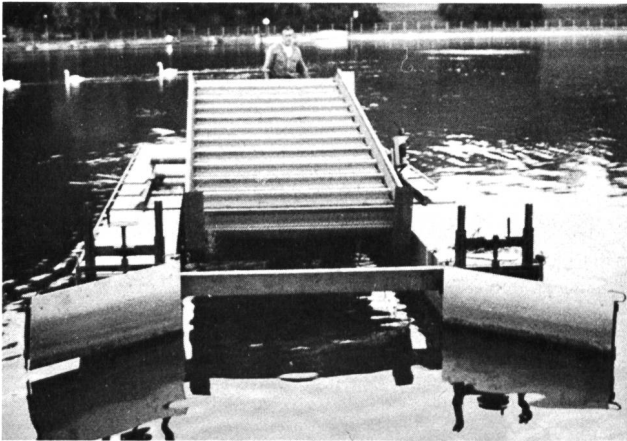
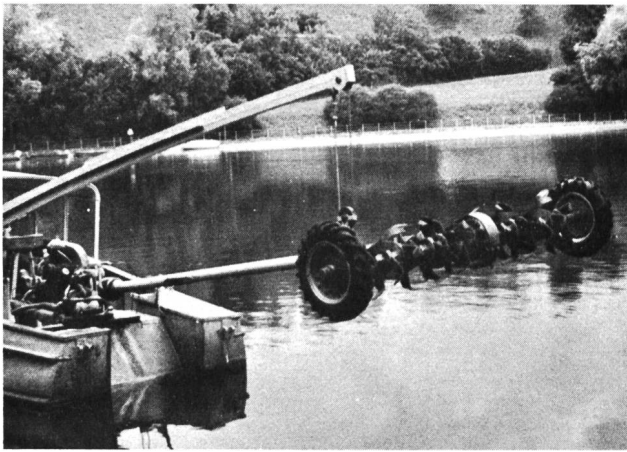
¹⁾ Vortrag gehalten anlässlich der Fachtagung «Krautwucherungen im Rhein — Flutender Hahnenfuss» vom 3. Juni 1976, in Neuhausen am Rheinflall.

1. Zu den Geräten der Kraftwerke insbesondere des Kraftwerks Schaffhausen

Die Konstruktionen der Kraftwerke wurden für die spezifischen Bedürfnisse der einzelnen Stufen entwickelt und haben sich dort meist bewährt; sie können aber nicht ohne weiteres generell eingesetzt werden. Vielfach waren die Lösungen der Kraftwerke wie auch diejenigen der Kantone von bestehenden Einrichtungen (von vorhandenen Booten und Maschinen) ausgegangen.

2. Zu den von der Industrie entwickelten Geräten

Von der Firma OBAG, Zürich, wird die «Mud-cat» angeboten, von der lange schwimmende Schlauchleitungen zu einem Absatzbecken führen, durch die — zusammen mit viel Wasser — das ganze Wasserpflanzengut weggepumpt



werden muss. In fließenden Gewässern mit Schifffahrt bringen diese Schlauchleitungen beträchtliche Erschwernisse. Die Angebote der Firmen Müller, Roggwil, und Jonneret, Genf, beschränken sich zunächst auf Mähboote (ohne Möglichkeit, die Wurzeln der Wasserpflanzen mit zu entfernen). Beim Gerät der Firma Müller bringt ein Elevator die abgeschnittenen Pflanzen auf das Schiffsdeck, von wo diese mit einer hydraulischen Greiferzange am Ufer in Mulden oder bereitstehende Transportfahrzeuge ausgeladen werden können.

Ein weiteres Gerät, basierend auf einer Egge, die aus kleinen Suchankern besteht, wird von der Rheinwerft Walsum angeboten (Wasserstrecker zur Unkrautbekämpfung). Dieses Gerät funktioniert ähnlich wie die Spatenegge des Kraftwerks Rheinau.

3. Zu den vom Verband Aare-Rheinwerke oder auf dessen Anregung hin entwickelten Maschinen

Wasserpflanzenentfernungsmaschine¹⁾

Der Wunsch nach einer Maschine, die sowohl die Pflanzen mit den Wurzeln entnimmt, als auch in allen im Rhein auftretenden Strömungs- und Untergrundverhältnissen eingesetzt werden kann, hat den Verband Aare-Rheinwerke veranlasst, einen Konstruktionsauftrag für eine solche Maschine an das Ingenieurbüro Bywater, Reinach, zu erteilen.

Die Wasserpflanzenentfernungsmaschine — WEM genannt — besteht im wesentlichen aus dem Hauptboot, zwei Pontons an den Längsseiten, Siebförderer, Pumpenkasten, vier im Pumpenkasten angeordneten Propellerpumpen, den Führungen für den Siebförderer und vier Steuerrudern. Der Pumpenkasten mit den vier Pumpen ist das Kernstück der Maschine. Mit den Pumpen soll einmal die Vortriebskraft für das Boot und zum anderen die Ansaugkraft für die Wasserpflanzen auf den Siebförderer sowie die Anpresskraft, die ein Herausnehmen der Pflanzen mit den Wurzeln bewirkt, geliefert werden. Die vielen Forderungen an diese Konstruktion führten dazu, dass die Maschine kompliziert und störanfällig bzw. von den Investitions- und Betriebskosten her gesehen zu teuer ist.

Das Schlepprad Bodan-Werft

Einfacher in der Konstruktion und der Betriebsweise und in den Investitions- und Betriebskosten günstiger verspricht die Neuentwicklung des Schlepprades der Bodan-Werft in Kressbronn zu werden. Im Prinzip besteht das Gerät aus einem Schlepprad, das von einem Katamaranboot über den Flussgrund gezogen wird.

An einer drehbaren Trommel, die auf seitlich angebrachten Ablaßrädern läuft, stehen radial kranzartige Lamellen ab, wobei je zwei Lamellenkränze zusammenwirken.

Die Lamellen eines Kranzes sind jeweils mit der Trommel fest verbunden und die Lamellen des anderen Kranzes in Achsrichtung der Trommel derart verschiebbar, dass das zu entfernende Gras im Bereich des Grundes zwischen den paarweise zusammenwirkenden Lamellenkränzen festgeklemmt und im oberen Bereich selbsttätig freigegeben wird.

¹⁾ Vergleiche auch Lothar Kranich: Das Problem des Wasserpflanzenbewuchses im Bereich der Kraftwerke des Verbandes Aare-Rheinkraftwerke und Bemühungen zu dessen Lösung. «Wasser- und Energiewirtschaft» 67, Nr. 1/2 1975, S. 19—23.

Bild 1. Die Spatenegge des Kraftwerkes Rheinau.

Bild 2. Das Aufnehmerboot des Kraftwerkes Rheinau.

Bild 3. «Mud-cat» der Firma OBAG, Zürich.

Bild 4. Modell im Massstab 1:1 eines Schlepprades der Bodan-Werft, Kressbronn.

Zusammenfassung

Keines der bisherigen Geräte befriedigt vollständig. Der Einsatz guter Geräte erfordert grössere Investitions- und Betriebskosten ebenso wie eine geeignete Organisationsform für Anschaffung und Betrieb.

Dabei sollte das Deponieproblem, das eine grössere Rolle spielt, gelöst werden; d.h., die zuständigen Amtsstellen müssten genügenden und geeigneten Deponieraum anweisen.

Die grossen finanziellen Verluste der Kraftwerke — insbesondere durch Fallhöhenverlust, Aufwand am Rechen der Kraftwerke, personal- und wartungsmässig, eventueller Abtransport und Deponie — gefährden oft das in den vergangenen Jahren durch Rationalisierung und Automatisierung angestrebte Ziel eines besseren und wirtschaftlicheren Unternehmensergebnisses.

Die öffentliche Hand wird aufgerufen, ihren Teil an dieser zum Teil öffentlichen Aufgabe beizutragen; ein Beitrag, wie er sich auch in dem vom Verband Aare-Rheinwerke den Behörden vorgelegten und vorgeschlagenen Etappenplan niederschlägt.

Die Bemühungen der Industrie, der Behörden und der Kraftwerke bzw. des Verbandes Aare-Rheinwerke werden weitergehen müssen, um dem Problem Herr zu werden. Dabei wird die Finanzierung der notwendigen Massnahmen eine wichtige und schwierige Aufgabe sein. Heute kann das Problem noch nicht als gelöst angesehen werden.

In diesem Jahr hat erstmals der Phosphatgehalt, der sonst jährlich um 15 % anstieg, um ca. 5 % abgenommen. Ob dies die Auswirkungen der Klärmassnahmen um den Bodensee bereits bewirkt haben, oder ob die Niederschlagsmengen bzw. die Wassermengen eine ausschlaggebende Rolle spielten, ist nicht mit Sicherheit festzulegen.

Ein Rückgang des Bewuchses ist auf alle Fälle anzustreben und könnte die Lage entschärfen. Alle sind zur Mitarbeit aufgerufen.

Adresse des Verfassers: Lothar Kranich, dipl.-Ing., Vorsitzender der Kommission für Gewässerschutz und Wasserpflanzen des Verbandes Aare-Rheinwerke, Rheinkraftwerk Albbuck-Dogern AG, D-7892 Albbuck/Hochrhein.

Der Einsatz des Mähbootes des Kantons Zürich

Christoph Maag¹⁾

DK 627.15:582.675.1

1. Ausgangslage

Die Bemühungen des Kantons Zürich, den Folgen der Verkrautung im Rhein beizukommen, gehen auf das Jahr 1972 zurück. Im Frühjahr 1972, als der Wasserstand saisonbedingt sehr tief war, baggerte eine Sappeureinheit bei Ellikon das Flussbett aus, soweit dasselbe zugänglich war und entfernte eine etwa 10 cm starke Schicht Kies samt den darin enthaltenen Wurzeln des Flutenden Hahnenfusses. Leider entsprach der Erfolg nicht den Erwartungen; schon 1973 war das Flussbett wieder durchgehend verkrautet und zwar sowohl im Staubereich der Kraftwerke wie in den freifliessenden Abschnitten.

Es ist selbstverständlich, dass kurative Massnahmen wie das Mähen des Hahnenfusses das Uebel nicht an der Wurzel zu bekämpfen vermögen. Immerhin bildet das Ausmähen und anschliessende Entfernen von Wasserpflanzen — letzteres eine Forderung der Kraftwerke — die momentan einzige Lösungsmöglichkeit, um der wild wuchernden Krautinseln Herr zu werden, welche über Wasserspiegel wachsen und einen penetranten Gestank verbreiten. Es waren deshalb vor allem Belange des Natur- und Landschaftsschutzes, der Fischerei und der Schifffahrt (Fährbootbetrieb der Gemeinde Marthalen bei Ellikon), welche den Kanton veranlassten, nach neuen Entfernungsmöglichkeiten zu suchen. Das neue Boot sollte auch im Uferunterhalt, z. B. für den Transport von Steinen und Blöcken für Pflasterungen, Verwendung finden.

2. Einsatz von Mähbooten

Seit mehreren Jahren sind auf dem Zürichsee Boote (sie werden Seekühe genannt) für das Entfernen von Fadenalgen eingesetzt.

Diese seinerzeit durch den Kanton angeschafften Schiffe stehen den Gemeinden für die Pflege der ufernahen Seepartien zur Verfügung. Der Gedanke lag daher nahe, ein solches Boot auf dem Rhein versuchsshalber auszuprobieren. Der Einsatz während des Sommers verlief im Prinzip erfolgreich, hingegen waren verschiedene Teile, insbesondere die Antriebsorgane, zu schwach für den Betrieb im strömenden Wasser. Die Spezialfirma Jakob Müller in Roggwil TG konstruierte aufgrund der gemachten Erfahrungen ein stärkeres Boot, das im Sommer 1975 abgeliefert wurde und sich seither gut bewährt hat.

Das Boot ist in der Lage, unter Wasser eine Gasse von 3 m Breite 2,25 m tief auszumähen, wobei das Mähgut durch die Wasserströmung an einen Elevator geschwemmt und von diesem auf Deck in eine Mulde befördert wird. Ein Abtreiben gemähter Pflanzen ist von der Konstruktion her praktisch unmöglich.

Der Schiffskörper besteht aus einer Art Ponton, der aus 3 mm dicken Stahlblechen geschweisst ist und in mehrere wasserdichte Abteilungen unterteilt ist. In der hintersten befinden sich die beiden Jet-Motoren von je 225 PS Antriebsleistung, die mit Benzin betrieben werden (Verbrauch 10 l pro Stunde). Der austretende Turbinenstrahl dient auch zur Steuerung des Fahrzeuges. Eine Ruderanlage wie bei herkömmlichen Schiffen ist nicht erforderlich.

Zur maschinellen Ausrüstung des Schiffes gehören der Elevator und die Mäheinrichtung. Letztere ist eine Rahmenkonstruktion aus verwindungsfreien Rechteckstahlrohren, auf der ein in horizontaler und zwei in vertikaler Ebene arbeitende Messerbalken angebracht sind. Ueber Ketten und Exzenter werden die Messerbalken durch einen Hydraulikmotor angetrieben, dessen Drehzahl vom Steuerstand aus reguliert werden kann.

Hinter dem Mähwerk befindet sich der Elevator. Er befördert das geschnittene Gras, Kraut und Algengeflecht

¹⁾ Vortrag gehalten an der Fachtagung «Krautwucherungen im Rhein — Flutender Hahnenfuss» vom 3. Juni 1976 in Neuhausen am Rheinfall.

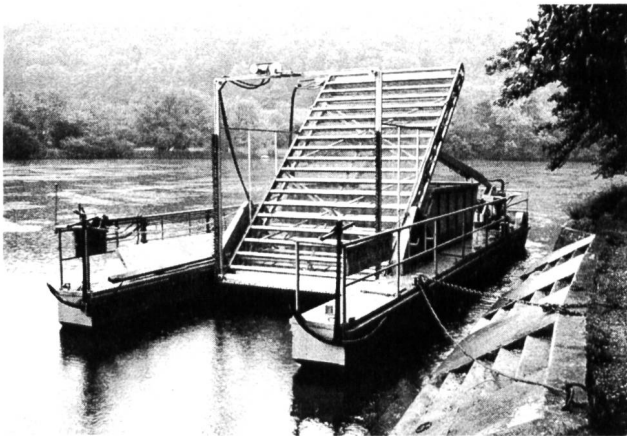


Bild 1. Das Mähboot «Müro III» des Kantons Zürich steht seit dem Sommer 1975 auf dem Rhein im Einsatz. Es ist mit zwei Jet-Motoren von je 225 PS ausgerüstet.

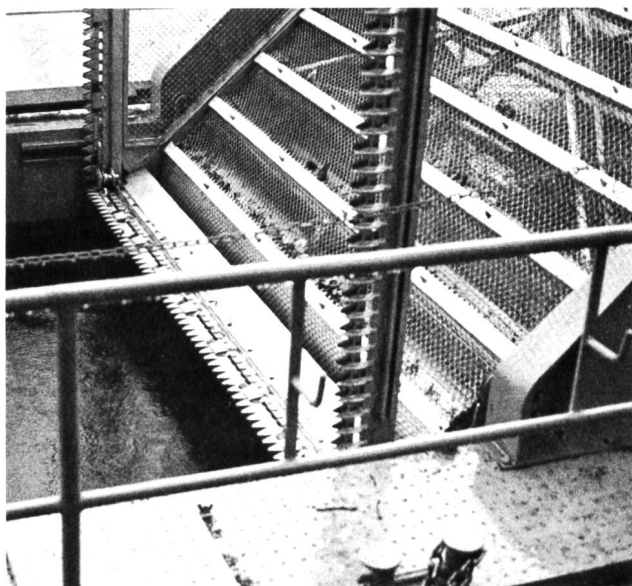


Bild 2. Mähboot «Müro III» des Kantons Zürich. Zwei vertikal angeordnete und ein horizontaler Mähbalken dienen dazu, eine Schneise von 3 m Breite und bis 2,25 m Tiefe auszumähen. Ein Elevator bringt das abgeschnittene Flussgras an Deck des Bootes.

Technische Daten des Schiffes	Tabelle 1
Länge des Schiffskörpers	11 300 mm
Breite des Schiffskörpers	4 590 mm
Seitenhöhe des Schiffskörpers	850 mm
Tiefgang	300 mm
Verdrängung = Schiffsgewicht leer	7,5 t
mit voller Ausrüstung	rd. 12 t
Motorleistung	2 x 225 PS
Arbeitsbreite des Mähapparates und des Elevators	3 000 mm
Maximale Schnittiefe der Mähmaschine	2 250 mm

auf das Schiffsdeck. Der Elevator wird ebenfalls durch einen Hydraulikmotor in Bewegung gesetzt. Auch der Antrieb für das stufenlose Heben und Senken auf die gewünschte Schnittiefe erfolgt über einen Hydraulikmotor, der mit Hilfe von Steuerventilen umgesteuert werden kann. Für die Stapelung des geschnittenen Krautes steht eine Mulde von rund 7 t Kapazität zur Verfügung.

Für den Umschlag des nassen Mähgutes vom Schiff auf das Transportgerät steht ein spezieller Hydrauliklader mit langem Arm zur Verfügung; ferner ist ein Rapid-Ladewagen mit starker Fahrleistung und geringer spezifischer Bodenbelastung vorhanden. Schiff und Zusatzgeräte haben zusammen rund 300 000 Franken gekostet.

3. Beseitigung des Mähgutes

Es ist damit zu rechnen, dass im zürcherischen Rheinabschnitt zwischen dem unteren Hilfswehr des Kraftwerkes Rheinau und der Rüdlinger Brücke in zwei rund 20tägigen Mähperioden im Frühsommer und Herbst insgesamt etwa 3200 t Hahnenfuss pro Jahr mit einem Trockensubstanzgehalt von 7,5 bis 12 % entnommen werden müssen. Dabei treten Spitzen bis zu 120 t/Tag auf. Die Verwertung so grosser Mengen, vermehrt um den Abfall, der an den Rechen der Kraftwerke Rheinau und Eglisau angeschwemmt wird (rd. 800 t/Jahr), stellt im Kanton Zürich bedeutende Probleme. Bis anhin wurde das Material entweder frisch als Dünger auf Ackerland gebracht oder vorerst deponiert und später in verrottetem Zustand auf die Aecker verteilt. Gemäss Beurteilung durch die Eidgenössische Forschungsanstalt für Agrikulturchemie in Liebefeld-Bern ergibt sich folgender Düngerwert je Tonne Frischmaterial:

N	: 3,55 kg = 2 kg N-wirksam	à Fr. 1.65 = Fr. 3.30
P ₂ O ₅	: 1,5 kg	à Fr. 1.20 = Fr. 1.80
K ₂ O	: 7,7 kg	à Fr. .64 = Fr. 4.90
Zusammen		Fr. 10.—

Der Düngerversuch, der 1975 auf drei Parzellen mit Kartoffeln durchgeführt wurde, zeigte, dass der Ertrag auf dem Acker mit frischgemähtem Hahnenfuss besser ist als auf jenem, wo konventionell mit Stallmist gedüngt wurde. Der höchste Ertrag an vollständig schorffreien Kartoffeln wurde aber auf dem dritten Feld festgestellt, wo gefaulter Wasserhahnenfuss, der etwa ein halbes Jahr auf Deponie gelegen ist, ausgebracht wurde.

Der Verbesserung der landwirtschaftlichen Verwertung wird in einer gegenwärtig laufenden Studie die nötige Beachtung geschenkt.

Adresse des Verfassers: Christoph Maag, dipl. Ing. ETH, Chef des Amtes für Gewässerschutz und Wasserbau des Kantons Zürich, Walchetur, 8093 Zürich.

1. Einleitung

Die Kenntnis der Abflüsse an Oberflächengewässern bildet die Grundlage sämtlicher wasserwirtschaftlicher, wasserbaulicher und gewässerschützerischer Planung. Der fortlaufenden Bestimmung der Abflussmengen in bestimmten Abschnitten von Fließgewässern kommt demnach fundamentale Bedeutung zu.

Um zu diesen Ergebnissen zu gelangen, wird am häufigsten der Weg über die herrschende Beziehung zwischen dem Wasserstand P und der entsprechenden Abflussmenge Q eingeschlagen. Die Wasserstände können mittels Schreibpegeln (Limnigraphen) kontinuierlich gemessen und registriert werden. Eine Anzahl von Messungen momentaner Abflüsse, verteilt über den ganzen Bereich zwischen Nieder- und Hochwasser, ermöglicht die Aufstellung der sogenannten P/Q -Beziehungskurve. Aus dieser kann für jeden beliebigen Wasserstand die entsprechende Abflussmenge herausgelesen werden.

Der Idealfall bestünde dann, wenn diese P/Q -Beziehung über längere Zeiträume, beispielsweise über Jahre stabil bliebe. Wichtigste Voraussetzungen hierfür wären u.a. ein

absolut unveränderliches Pegelprofil (massgebendes Flussquerprofil im Bereiche des Pegels) und eine längere, hindernisfreie Fließstrecke mit unveränderlichem Sohlengefälle ober- und unterhalb des Pegels. Diese erforderlichen Gegebenheiten sind an natürlichen und selbst an korrigierten Gewässern höchst selten anzutreffen. Das bedeutet, dass die P/Q -Beziehung an einer Messstation periodisch durch weitere Abflussmengen-Eichmessungen überprüft und die P/Q -Beziehungskurve gegebenenfalls korrigiert werden muss. Der angestrebte Genauigkeitsgrad der Abflussmengenbestimmung diktiert somit weitgehend die Häufigkeit solcher Eichmessungen.

2. Messstationen am Hochrhein und angewandte Eichmessmethode

Das Eidg. Amt für Wasserwirtschaft betreibt am Hochrhein die vier mit Schreibpegeln ausgerüsteten Abflussmengen-Messstationen Rheinklingen, Neuhausen, Rekingen und Rheinfelden. Sie stehen an Flussstrecken ausserhalb jeglichem Rückstau-Einfluss von Kraftwerken und besitzen mit Ausnahme jener von Rheinklingen gute Pegelprofile. Wäh-

Bild 1. Messstation Rhein-Neuhausen. Durch 6 Abflussmengen-Eichmessungen innert 12 Monaten eindeutig belegte P/Q -Beziehungskurve, gültig in früheren Jahren vor Beginn der Verkrautung.

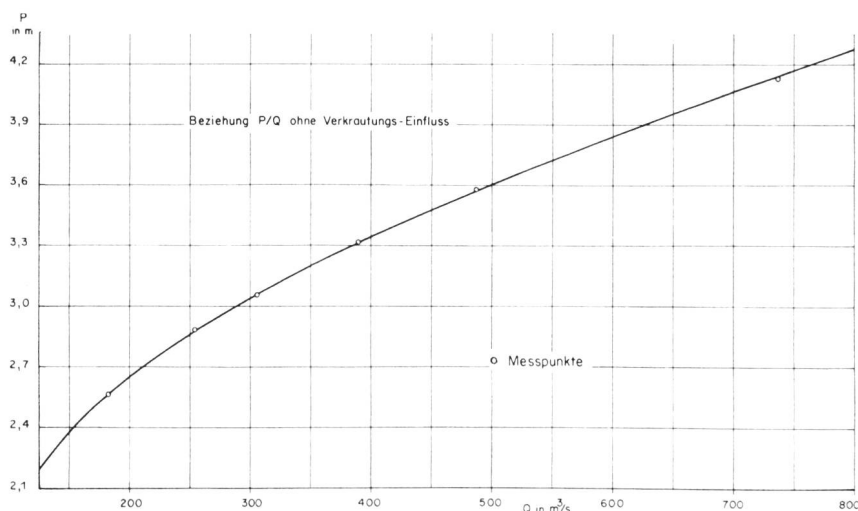


Bild 2. Messstation Rhein-Neuhausen. Abweichung (Streuung) der 9 bzw. 7 Eichmesswerte in den Jahren 1974 und 1975 von der früher gültigen P/Q -Beziehung zufolge Verkrautung. Das Ausmass der Abweichung kann als Pegelstand-Überhöhung (in cm) abgelesen werden.

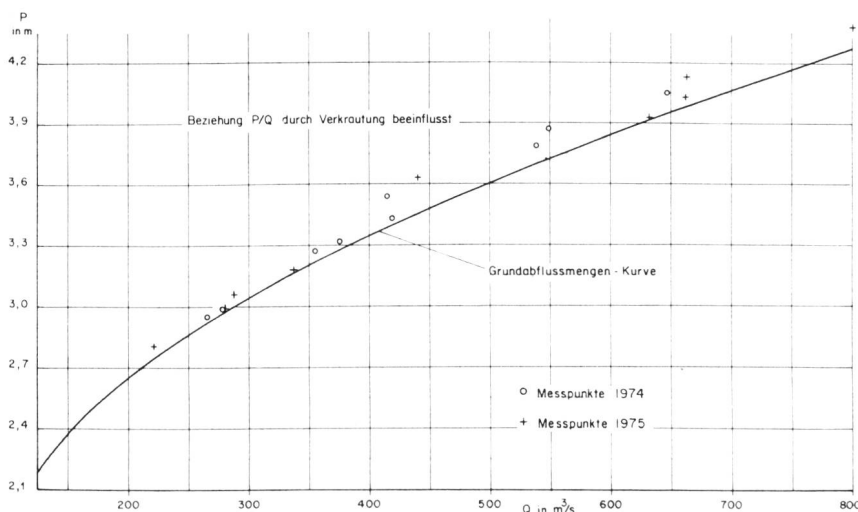
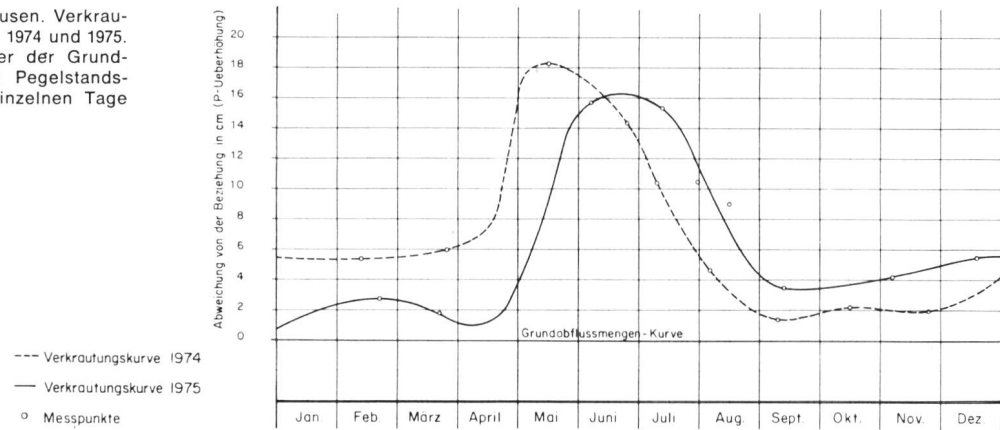


Bild 3. Messstation Rhein-Neuhausen. Verkrautungs-Korrekturkurven der Jahre 1974 und 1975. Die P-Ueberhöhungen gegenüber der Grundabflussmengenkurve können als Pegelstands-Korrekturwerte in cm für die einzelnen Tage herausgelesen werden.



rend vieler Jahre liessen sich denn auch eindeutige P/Q-Beziehungskurven aufstellen, die innerhalb eines Kalenderjahres verhältnismässig wenig oder ausnahmsweise gar nicht änderten und mit 5 bis 7 Abflussmengen-Eichmessungen innert 12 Monaten jeweils gut belegt waren (Bild 1). Die Anwendung der Fliessgeschwindigkeits-Messmethode mit hydrometrischen Flügeln bot auch keinerlei übermässige technische Schwierigkeiten. An den Stationen Neuhausen, Rekingen und Rheinfelden traten Ende des letzten und anfangs dieses Jahrzehnts permanente Hilfsmesseinrichtungen, sogenannte Seiflügelanlagen an Stelle der personal- und kostenaufwendigen Schiffsmessungen, was die Eichmesstätigkeit beträchtlich erleichterte und verbilligte.

3. Flussbett-Verkrautung im Hochrhein und ihre Folgen für die Hydrometrie

Der Wuchs von nicht flutenden und flutenden Wasserpflanzen und Algenbüscheln wird in der Hydrometrie vereinfacht mit dem Sammelbegriff «Verkrautung» bezeichnet. Ihr Auftreten im Bereiche der Abflussmengenmessstationen Rheinklingen, Neuhausen und Rekingen im heutigen Ausmasse hat zur Folge, dass es an diesen selbst kurzfristig keine stabile P/Q-Beziehungen mehr gibt, weil die hydraulischen Verhältnisse sich in Abhängigkeit des Verkrautungsgrades nun laufend ändern. Diese Aenderungen sind recht komplexer Art. Vereinfacht können sie wie folgt umschrieben werden: Bremsen der Fliessgeschwindigkeit und Wasserverdrängung durch die Pflanzenkörper. Letztere ist gleichbedeutend mit Auflandung, d.h. mit Flussquerschnitt- und Gefällsänderung. Sie wird durch eine schlammige wirkliche Auflandung im Krautgewirr noch verstärkt. Die Verkrautung im Bereiche eines Pegel-Messprofils zwingt deshalb zur Vermehrung der Eichmessungen. Vorgängig eines jeden Messeinsatzes während der Wachstumsperiode vom Frühjahr bis im Spätsommer muss zudem eine mehrere Meter breite Messschneise sohlennahe aus dem Krautteppich ausgemäht werden, damit der hydrometrische Flügel störungsfrei funktionieren kann. Die zielgerichtete Messtätigkeit verlangt seitens des Feldbeamten ausserdem eine gewisse prognostische Beurteilung der Verkrautung. Diese ist nur möglich durch zusätzliche eigene Beobachtungen über herrschende Wasserstands- und Wassertrübungsverhältnisse (Wachstumsfaktor Licht) und Hochwassergeschehen (Erosion und Erdünnerung). Die Information über Ort und Zeit von Ausmäh-Grossaktionen, wie sie neuerdings

auch ausserhalb der Stauzonen von Kraftwerken durchgeführt werden, sind für die Beurteilung der Entwicklung ebenfalls äusserst wichtig.

4. Abflussmengenbestimmung unter Verwendung der Verkrautungs-Korrekturkurve

Die P/Q-Beziehungsänderung infolge beginnender Verkrautung tritt auf einer bisher gültigen Beziehungs- oder Abflussmengenkurve augenfällig in Erscheinung, indem die Messwertpunkte laufender Eichmessergebnisse einseitig oberhalb der Kurve fallen (Bild 2), d.h. die Pegelstände beginnen sich ab Frühjahr stetig zunehmend zu überhöhen und zwar bis zum höchsten Verkrautungsgrad im Sommer. Dann folgt eine kurze Periode der Tendenz-Umkehr und anschliessend die Degressionsphase in der Pegelstandsüberhöhung bis zur Annäherung an die P/Q-«Grundkurve» im Herbst und Winter. Für die Abflussmengenbestimmung müsste also alle paar Tage oder Wochen eine neue P/Q-Beziehungskurve aufgestellt werden, die aber, abgesehen von der unverhältnismässigen Komplizierung des Q-Berechnungsablaufes, die nicht lineare Stetigkeit der Aenderung zu wenig berücksichtigen würde. Deshalb wird der Weg über die sogenannte Verkrautungs-Korrekturkurve beschritten (Bild 3). Dabei überträgt man die aus jeder Eichmessung hervorgehende P-Ueberhöhung in ein Koordinatensystem. Eine Horizontale (Abszisse) mit Tagesunterteilung für ein ganzes Kalenderjahr stellt die Ausgangsbasis, die Grundbeziehungskurve dar. Die aus den Eichmessungen sich ergebenden P-Ueberhöhungen werden sodann an den entsprechenden Tagen auf der Ordinate massstäblich auf Zentimeter genau eingetragen. Die Verbindung der Punktereihe mittels einer stetigen Linie ergibt die gesuchte Korrekturkurve. Dem teils geschätzten Verlauf dieser Kurve liegen die früher erwähnten Beobachtungen im Felde sowie ergänzende Auskünfte seitens der nächstgelegenen Kraftwerke als unentbehrliche Hilfen zugrunde. Die an den einzelnen Kalendertagen registrierten Pegelstände reduziert man nun um die entsprechenden, aus der Korrekturkurve herausgelesenen P-Ueberhöhungswerte. Die so korrigierten Pegelstände erlauben die Q-Bestimmung mittels der Grund-P/Q-Beziehungskurve.

Ueber die Fehlergrössen bei den Abflussmengen-Tagesmitteln zwischen «P korrigiert» und «P nicht korrigiert» sei hier lediglich vermerkt, dass sie am Beispiel der Station Neuhausen im Jahre 1974 von wenigen % bis gut 15 %

schwankten. Die prozentualen Abweichungen wechseln innerhalb eines Jahres und von Jahr zu Jahr sehr stark in Abhängigkeit des Verkrautungsgrades einerseits und der Abflussmenge andererseits. Selbst eine grobe Faustregel gibt es deshalb nicht.

5. Schlussbemerkung

Obwohl diese Schilderung der Verkrautungsprobleme, denen sich der Hydrometrie-Praktiker gegenübergestellt sieht, eher summarischen Charakter besitzt, dürfte sie dennoch die enormen Erschwernisse bei der Abflussmengenbestimmung am Hochrhein und auch an anderen Orten deutlich machen.

Abgesehen vom grossen Arbeitsmehraufwand im Felde und bei der Auswertung zeitigt das Phänomen «Verkrautung» die höchst unerfreuliche Nebenerscheinung des Ausfalles einer genügend zuverlässigen, aktuellen Abflussmengen-Information im Zeitpunkt des Geschehens, was ganz besonders von den Kraftwerken als Nachteil empfunden wird. In enger Zusammenarbeit dürfte es jedoch gelingen, die schlimmsten Lücken nach wie vor zu überbrücken.

Adresse des Verfassers: Adolf Hagmann, dipl. Ing. ETH, Sektionschef, Eidg. Amt für Wasserwirtschaft, Postfach 2743, 3001 Bern.

Fachtagung Krautwucherungen im Rhein — Flutender Hahnenfuss

Inhaltsübersicht

Ernst Neukomm: Begrüssung und Einleitung Seite 223

Egon Kunz: Die Verkrautung des Hoch- und Oberrheins. Feststellung der Entwicklung und des heutigen Zustandes — Zusammenhänge und weitere Massnahmen Seite 224

Eugen A. Thomas: Der Flutende Hahnenfuss (*Ranunculus fluitans* Lam.), ein neues limnologisches Problem am Rhein. Seite 230

Elie Eichenberger: Biologische und ernährungsphysiologische Gesichtspunkte zur Ausbreitung des Flutenden Hahnenfusses im Oberrhein. Seite 234

Lothar Kranich: Die Bekämpfung des Flutenden Hahnenfusses. Seite 239

Christoph Maag: Der Einsatz des Mähbootes des Kantons Zürich. Seite 241

Adolf Hagmann: Erschwerte Bestimmung der Abflussmengen am Hochrhein zufolge Verkrautung. Seite 243

Genauere Ermittlung des spezifischen Filtrationswiderstandes

K. A. Wuhrmann

DK 66.067:628.16.067

Die zunehmende Verwendung des spezifischen Filtrationswiderstandes als Hilfsmittel bei der Prozessführung von Filteraufgaben, vor allem bei Klärschlämmen, hat die methodenhäufige, verhältnismässig grosse Streuung der Messresultate unangenehm in Erscheinung treten lassen. Da

auch bei sorgfältiger Probenahme und -aufbereitung [1] die Streubreite einem Faktor 2 bis 3 entsprechen kann, bleibt als naheliegende Verbesserung des Messverfahrens die Parallelbestimmung mit Mittelwertbildung.

Die vollständige, wenn auch nicht restlos befriedigende Darstellung des spezifischen Filtrationswiderstandes r erfolgt heute [2] nach der Formel

$$r = b^2 \Delta p A^2 / TR \eta \quad [\text{m/kg}]$$

worin $b = \frac{d\left(\frac{t}{V}\right)}{dV}$ als Abflussgradient bezeichnet werden kann

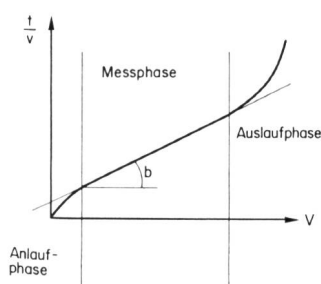
V Filtratvolumen in der Zeit t

Δp Filtrationsdruck

A aktive Filterfläche

TR Trockenrückstand

η dynamische Zähigkeit der Flüssigkeit



Meist genügt jedoch die Bestimmung von b , das aufgrund der Carman'schen Theorie während des ungestörten Filtrationsvorganges konstant bleibt, entsprechend der quadratischen Abhängigkeit von Filtratvolumen und Zeit (Bild 1). In der Praxis werden innerhalb des Messbereiches mehrere Punkte aufgenommen, deren Lage im t/v zu V -Diagramm einerseits die Bestimmung des Gradienten b ermöglicht, und andererseits durch ihre mehr oder weniger genaue Lage auf der Regressionsgeraden eine Aussage über die Genauigkeit der Messung gestatten.

Es leuchtet ein, dass Fehler bezüglich der Grösse von b um so kleiner werden, je weiter die Funktion verfolgt wird, was in der Praxis bedeutet, dass Beobachtungszeiten bis zu 30 Minuten in Kauf genommen werden müssen.

Diese mühsame und zeitraubende Messung steht nicht in Einklang mit der eingangs erhobenen Forderung nach Mehrfachbestimmung zur Ermittlung des Mittelwertes, erfordert doch die Festlegung einer einzigen Parameterkombination mindestens 2 Stunden Arbeit sowie einen gewissen die Fehlermöglichkeiten erhöhenden Rechenaufwand.

Es liegt daher im Sinne einer Verbesserung der Messgenauigkeit, durch Automatisierung des Messverfahrens die Arbeitszeit herabzusetzen und damit die Anzahl der Parallelbestimmungen zu erhöhen. Ausserdem gestattet die Automatisierung, den Abstand zwischen dem ersten und dem letzten Punkt einer Messreihe ohne unzulässigen Arbeitszeitverlust soweit auseinanderzusetzen, dass Fehler aus ungleichmässigem Ablauf des Filtrates (Tropfenbildung, Niveauschwankungen, Miniskus) nur noch geringfügig in die Bestimmung des mittleren Gradienten eingehen. (In Bild 1 Distanz zwischen den Abszissen V_1 und V_2 .) Das aufgrund der vorstehenden Überlegungen konzipierte Gerät gestattet, die Filtratmenge, die aus einer standardmässigen Filtration (22 cm² aktive Filterfläche, 49 kPa Vakuum) anfällt, in zwei Zeitpunkten durch Kontakte zu erfassen, die so angeordnet sind, dass die erste Kontaktgabe nach Verlauf einer angemessenen Anlaufzeit von einigen Sekunden, die zweite nach einigen Minuten, jedoch vor Eintritt eines merklichen Verdunstungsverlustes durch die Vakuumleitung, erfolgt (Bild 2).

Durch die Kontakte werden bei gegebenen Gefässdimensionen konstante Volumina V_1 und V_2 erfasst, deren Quotient $V_2/V_1 = k$ zur Apparatekonstanten wird. Der Abflussgra-

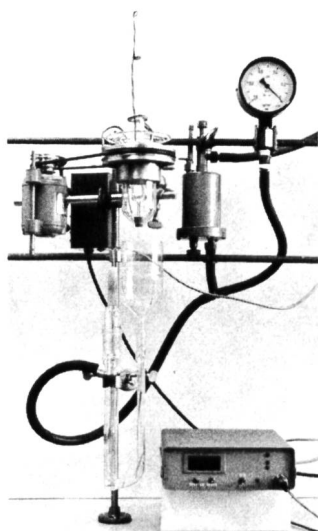
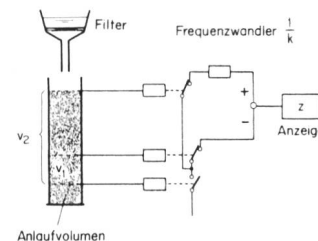


Bild 2
Oben Mischgefäss für 150 cm³ Schlamm mit Pipette zur Dosierung von Flockungsmittel. Geschwindigkeit des Rührarms 1 m/s, Mischzeit 40 s. Rechts daneben Druckregler und Manometer. Unten Filternutsche 22 cm², Filtrateinlauf, Messglas mit Sonde. Rechts Kleinrechner mit Digitalanzeige bis 9000 s.

Bild 3
Schaltung zur Bestimmung von b .



dient b ergibt sich, da wir während des der quadratischen Funktion nach Carman entsprechenden Teils der Filtration arbeiten, gleich

$$b = \frac{1}{V_2 - V_1} \left(\frac{t_2}{V_2} - \frac{t_1}{V_1} \right) \quad V_2/V_1 = k$$

$$b = \frac{1}{(V_1)^2} \frac{t_2/k - t_1}{k - 1}$$

Die Schaltung kann nach Bild 3 erfolgen mit digitalem Ausgange in Sekunden.

Ist z. B. $V_1 = 1,5 \text{ cm}^3$ und $k = 11$, so wird die Apparatekonstante

$$C = \frac{1}{1,5^2 (11 - 1)} = \frac{1}{22,5}$$

und das Messresultat aufgrund der Anzeige z in Sekunden (Filterfläche 22 cm², Druck 49 kPa):

$$b = z/22,5 \text{ [s cm}^{-6}\text{]}$$

Erfahrungen

Durch eine Reihe von Vergleichsmessungen, einerseits mit konventioneller Apparatur und Auswertung, andererseits mittels des beschriebenen Automaten, liessen sich Messwertübereinstimmung und Standardabweichung bestimmen.

Aus 8 Messreihen zu je 5 Messungen konventioneller Art und 5 Messungen mittels Automaten ergeben sich folgenden Standardabweichungen:

	konventionell δ	Automat δ	$\Delta \delta$
	17,9	12,0	5,9
	17,9	13,5	4,4
	37,9	34,8	3,1
	12,5	6,0	6,5
	33,4	24,2	9,2
	15,0	11,1	3,9
	128,1	39,1	89,0
	17,9	9,9	8,0
Mittel	35,0	18,8	16,2

Die Mittelwerte von b aus 46 Messpaaren mit konditionierten Schlämmen weichen bei gleichem Druck und gleicher Filterfläche um 3,7 % von einander ab. Zur Erhöhung der Messgenauigkeit verwendet man im automatischen Betrieb mit Vorteil zwei verschiedene Standgläser, eines mit $V_1 = 1,5 \text{ cm}^3$ für $b > 0,1 \text{ scm}^{-6}$, das andere mit $V_1 = 10 \text{ cm}^3$ für $b < 0,5 \text{ scm}^{-6}$.

Literatur:

- [1] EURO-COP-COST Bericht Klärschlammbehandlung, Seiten 11—13, Schlussbericht COST 68, Juli 1975, Brüssel.
- [2] R. S. Gale: Filtration Theory with Special Reference to Sewage Sludges. «Journal of the Institute of Water Pollution Control» 6/1967.

Adresse des Verfassers: Karl Albert Wuhrmann, dipl. Ing. ETH, Eidg. Anstalt für Wasserversorgung, Abwasserreinigung und Gewässerschutz, EAWAG, Abt. Feste Abfallstoffe, 8600 Dübendorf.