

Die Belastung des Greifensees

Autor(en): **Bührer, Heinrich / Szabò, Ernö / Ambühl, Heinz**

Objektyp: **Article**

Zeitschrift: **Wasser Energie Luft = Eau énergie air = Acqua energia aria**

Band (Jahr): **76 (1984)**

Heft 11-12

PDF erstellt am: **09.08.2024**

Persistenter Link: <https://doi.org/10.5169/seals-941236>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Inhalten der Zeitschriften. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern.

Die auf der Plattform e-periodica veröffentlichten Dokumente stehen für nicht-kommerzielle Zwecke in Lehre und Forschung sowie für die private Nutzung frei zur Verfügung. Einzelne Dateien oder Ausdrucke aus diesem Angebot können zusammen mit diesen Nutzungsbedingungen und den korrekten Herkunftsbezeichnungen weitergegeben werden.

Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Die systematische Speicherung von Teilen des elektronischen Angebots auf anderen Servern bedarf ebenfalls des schriftlichen Einverständnisses der Rechteinhaber.

Haftungsausschluss

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

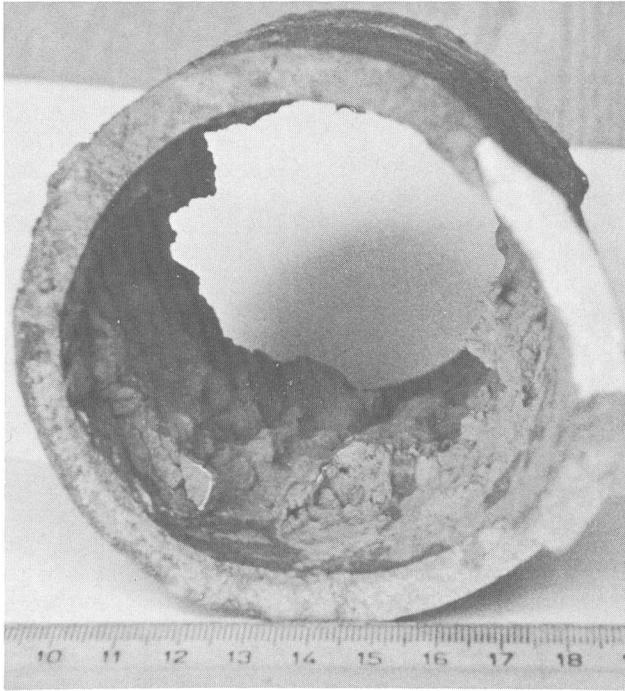


Bild 10. Graphitierung bei einem Rohr aus Grauguss.

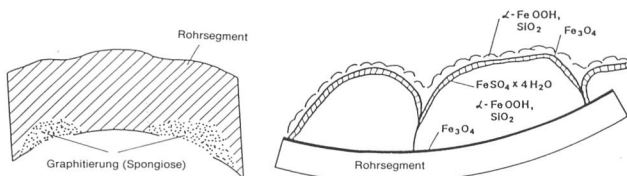


Bild 11. Schnittzeichnung der Rostablagerung.

des aufbereiteten Wassers mit den anderen Wasserarten im Verteilersystem keine Korrosion der Eisenrohre verursacht. f)

Die Verwendung von sauren anorganischen Salzen als Flockungsmittel (z.B. Aluminiumsulfat, Eisensulfat oder Chlorid) führt zu aggressivem Wasser, weil die Alkalinität verbraucht wird und dadurch der pH-Wert des aufbereiteten Wassers sinkt. Um die sauren Eigenschaften der Flockungsmittel auszugleichen, ist es erforderlich, alkalische Substanzen zuzufügen, und zwar normalerweise Ätznatron, Soda oder Kalziumhydroxid. Die meisten Schweizer Wasseraufbereitungsanlagen, welche die Zugabe einer alkalischen Substanz befürworten, verwenden Natronlauge.

Ein bemerkenswertes Beispiel von Korrosion bei Eisenrohren wurde in einem Dorf entdeckt, in dem die Flockungsfiltration nur ein paar Monate in jedem Jahr in Betrieb genommen wurde, das heisst, wenn das Rohwasser eine unerwünschte Menge Schwebstoffe enthält. Bild 10 zeigt eine Graphitierung bei einem Rohr aus Grauguss, die sogar schon bei einer Wandrohrtiefe von 3 mm entdeckt werden konnte. Die graphitierten Flächen enthalten bereits Ferrit (α -Eisen) und Perlit (ein eutektoides Gemenge von Ferrit und Zementit [Fe_3C]). Eine Röntgenanalyse des Rostes deutete auf das Vorhandensein von Magnetit (Fe_3O_4), Goethit (α - $\text{FeO}\cdot\text{OH}$) und Eisensulfat ($\text{FeSO}_4\cdot 4\text{H}_2\text{O}$, Rozenit) wie auch Quarz (SiO_2) hin. Es ist jedoch von Interesse zu beobachten, dass diese Substanzen in der Rostkruste nicht gemischt sind. Zwei Querschnitte durch die Kruste sind in Bild 11 skizziert. Darin wird angegeben, wo die oben erwähnten Korrosionserzeugnisse vorkommen.

Adresse des Verfassers: *Julio C. Ginocchio*, dipl. Ing., Gebrüder Sulzer Aktiengesellschaft, Winterthur, Abteilung Wasser- und Abwassertechnik, CH-8401 Winterthur.

Die Belastung des Greifensees

mit Phosphor, Stickstoff, Kohlenstoff, geochemischen Stoffen und Schwermetallen in den Jahren 1977/78: Methodik und Resultate

Heinrich Bührer, Ernő Szabó und Heinz Ambühl

1. Einleitung

Seit Jahrzehnten ist der Greifensee bekannt als «eutroph» bzw. überdüngt. Einzelne Untersuchungen über die Herkunft und Menge der dafür verantwortlichen düngenden Stoffe (*Märki* 1944, *Pleisch* 1970) lieferten Kenntnisse über die aktuelle Situation, welche aber als Folge der grossen Belastungsveränderungen im Einzugsgebiet jeweils nur für eine kurze Zeit gelten. Trotzdem sind diese Untersuchungen von grösstem Wert als sichere Fixpunkte für Rückwärtsberechnungen. Für das Studium von Methoden und Erfolgchancen einer technischen Sanierung des Sees sind möglichst rezente Kenntnisse erforderlich. Nachdem in den Jahren nach 1975 Behörden und Öffentlichkeit begannen, Notwendigkeit und Möglichkeiten einer Sanierung zu diskutieren, entschlossen wir uns, mit einer gründlichen Untersuchung der Seezuflüsse und weiterer Belastungsquellen, zusammen mit den Ergebnissen unserer seit 1971 regelmässig ausgeführten monatlichen Seeuntersuchungen, die Basis für eine umfassende Studie über die Möglichkeiten einer Seesanierung zu schaffen. Eine solche Zuflussuntersuchung ist ein sehr aufwendiges, einer Seeuntersuchung in keiner Weise nachstehendes Unternehmen (siehe «Methodik»).

Erfahrungen haben gezeigt, dass sich die analytische Untersuchung durch theoretische oder statistische Berechnungen (etwa aufgrund der Einwohner- und Tierdichte usw.) nicht ersetzen lässt. Die hier drohenden Fehler sind grösser, als eine prognostische Arbeit ertragen würde.

Folgende Fragen wurden bearbeitet:

- Welche Flüsse belasten den Greifensee besonders und in welchem Masse?
- Ist ein Einfluss der bisherigen Sanierungsmassnahmen auf die zeitliche Entwicklung der Stofffrachten und der Seequalität zu erkennen?
- Wie gross ist der Anteil der von der Wasserführung unabhängigen Fracht (Abwasser) an der Gesamtfracht, wie gross der Anteil der bodenbürtigen (Q -abhängigen) Fracht?
- Wie gross sind die Anteile, die mit technischen Massnahmen eliminiert werden können?
- Wie gross ist der Export von Stoffen aus dem See?

Diese Fragestellungen erfordern eine zum Teil automatisierte Probenahme- und Abfluss-Messtechnik sowie nicht voraussehbare Sondereinsätze während Hochwässern. Die Anzahl der Mitarbeiter war deshalb gross:

Leitung: Prof. H. Ambühl

Messstationen: Ing. H. Weber (EAWAG; Planung, Bau, Unterhalt), H. Lang, A. Armbruster (Amt für Gewässerschutz und Wasserbau, Zürich; Abflussmessungen, Limnigraphen-Eichung)

Probenahme (Technische Entwicklung und Probensammlung): Dipl. chem. E. Szabó, Prof. H. Ambühl, B. Ribi, R. Illi (EAWAG)

Chemische Analytik: E. Szabó, B. Ribi, R. Illi, R. Waldvogel, Dr. H. J. Hegi, Dr. J. Zobrist (EAWAG)

Datenverarbeitung: Dr. H. Bührer (EAWAG)

Berichterstattung: Dr. H. Bührer, Prof. H. Ambühl

ARA-Proben: W. Vetterli (ARA Uster), H. Kägi (ARA Mönchaldorf), E. Lehnerr (ARA Maur), E. Schwender (ARA Wetikon)

2. Methodik

Neben dem ersten Ziel, die Belastung des Sees mit gelösten und suspendierten Stoffen zu erfassen, wurden die Untersuchungen auch dazu benützt, methodische (probenahmetechnische) Vergleiche anzustellen, um die optimale Technik zu finden und die bisher verwendeten statistischen Berechnungsverfahren weiterzuentwickeln. Wir treten hier auf diese zum Teil recht speziellen Details nur summarisch ein und verweisen auf die Originalfassung der Studie (*Bührer, Szabó und Ambühl 1985*).

2.1 Zuflüsse

Die zur Verfügung stehenden Mittel wurden in der Weise optimiert, dass der Untersuchungsaufwand (aufgrund von Voruntersuchungen) der relativen Bedeutung der einzelnen Zuflüsse angepasst wurde. Nur Zuflüsse mit einem substantiellen Anteil an der Gesamtbelastung wurden direkt erfasst. Das mit Messungen nicht erfasste restliche Einzugsgebiet wurde rechnerisch behandelt. Die früheren Frachtuntersuchungen (*Pleisch 1967/68, Heierli 1977, Bundi und Roberts 1972*) sicherten die Wahl der Zuflüsse zusätzlich ab. Von insgesamt 15 voruntersuchten Bächen wurden schliesslich 6 ausgewählt sowie der Seeausfluss:

| Fluss | Sammeltechnik |
|---------------------|--|
| Glatt (Seeausfluss) | Sammelautomat, zeitproportional |
| Aschbach | Sammelautomat, Q-proportional, 2-Kanal-Steuerung |
| Mönchaltorferaa | Sammelautomat, Q-proportional |
| Usteraa | Sammelautomat, Q-proportional |
| Dorfbach Maur | Stichprobe und 24-h-Sammelprobe |
| Tüffenbach | Stichprobe und 24-h-Sammelprobe |
| Werrikerbach | Stichprobe und 24-h-Sammelprobe |

Die Wassermessung erfolgte an allen Flüssen mit Limnigraphen. Die Sammelautomaten (Bild 1; System Züllig, Rheineck) wurden von den Limnigraphen gesteuert (Ausnahme: Glatt).

Der Aschbach bringt nur einen unbedeutenden Teil der gesamten Stofffracht, entwässert aber ein rein landwirtschaftliches Einzugsgebiet und diente als Basis für die Berechnung der bodenbürtigen Frachten. Seine überaus grossen Abflussschwankungen zwischen <1 und > 500 l/s erforderten eine automatische Aufteilung des Regel- und Probenahmebereichs.

An den übrigen Stellen (Dorfbach Maur, Tüffenbach und Werrikerbach) wurde mit den einfachen selbstfüllenden Sammlern (Automatic Liquid Sampler QS 3000) und mit Einzelstichproben gearbeitet. Diese Proben wurden nach einem starren Zeitplan alle 6 Tage erhoben; bei Hochwasser wurden ad hoc zusätzliche Proben entnommen. Eine etwa bei Halbzeit durchgeführte Zwischenauswertung ergab, dass weitere Proben aus dem Niederwasserbereich das Endresultat nicht mehr wesentlich beeinflussen konnten. Die Sammelintervalle wurden deshalb von 6 auf 18 Tage ausgedehnt. Lediglich bei Überschreiten bestimmter Abflusswerte trat das 6-Tage-Intervall wieder in Kraft.

Tabelle 1. Im Flusswasser analysierte Parameter

| Stoff, Stoffgruppe | Abkürzung | Stoff, Stoffgruppe | Abkürzung | Stoff, Stoffgruppe | Abkürzung |
|-------------------------|--------------------|-----------------------------|-----------------|--------------------|-----------|
| o-Phosphat («SRP») | PO ₄ -P | Sulfat | SO ₄ | Natrium | Na |
| Gesamt-P im Filtrat | GPF | Gesamthärte | GH | Kalium | K |
| Gesamt-P im Rohwasser | GPR | Karbonathärte = SBV | KH | Magnesium | Mg |
| Ammonium-Stickstoff | NH ₄ -N | pH-Wert | | Eisen | Fe |
| Nitrit-Stickstoff | NO ₂ -N | Leitfähigkeit | Leitf. | Zink | Zn |
| Nitrat-Stickstoff | NO ₃ -N | Chemischer Sauerstoffbedarf | CSB | Kupfer | Cu |
| Partikulärer Stickstoff | PN | Organisches C im Rohwasser | TOC | Cadmium | Cd |
| Silikate | SiO ₂ | Organisches C im Filtrat | DOC | Blei | Pb |
| Chlorid | Cl ⁻ | Gesamte suspendierte Stoffe | ung. St. | | |

2.2 Kläranlagen

Die Kläranlagen von Uster, Mönchaltorf und Maur leiten direkt in den See oder unterhalb der Sammelstelle in den Fluss ein. Sie mussten deshalb gesondert erfasst werden. Um den Anteil der grossen Region Wetzikon ebenfalls abschätzen zu können, wurde auch die Kläranlage Wetzikon untersucht, obschon ihr Abwasser mit der Usteraa erfasst wurde. Die Jahresfrachten dieser Kläranlagen wurden aus Tagessammelproben ermittelt, welche während jeder ganzen fünften Woche gesammelt und gemäss den Abflussmessungen der Anlagen zu Wochensammelproben vereinigt wurden.

2.3 Niederschläge

Die Niederschläge wurden in der EAWAG Dübendorf gesammelt. Während die gebräuchlichen hydrologischen Sammelstationen keine Aufsicht erfordern, stellt die analytische Untersuchung von Regenproben hohe Anforderungen an die Probenahme. So müssen die Auffangtrichter und Sammelgefässe jederzeit absolut sauber sein, was in der Praxis nur so zu erreichen ist, dass die Geräte erst bei Beginn eines Regens exponiert oder automatisch geöffnet werden.

2.4 Restliche Belastungen

Die analytisch nicht erfassten Quellen, nämlich restliche nicht angeschlossene Einwohner (z.B. Riedikon, Camping Maur) und nicht berücksichtigte landwirtschaftliche und sonstige Flächen wurden mit Hilfe statistischer Erhebungen berücksichtigt.

3. Untersuchte Parameter

Es wurden folgende Parameter analysiert:

3.1 Flusswasser

Die untersuchten Parameter sind in der untenstehenden Tabelle 1 zusammengestellt.

3.2 Kläranlagen-Abläufe

Parameter der Tabelle 1, aber nur o-Phosphat bis Chlorid.

3.3 Regen

Parameter der Tabelle 1, aber nur o-Phosphat bis Silikate. Die Bestimmungen erfolgten mit den damals (1977/78) gängigen modernsten analytischen Methoden (Details in *Bührer, Szabó und Ambühl 1985*).

3.4 Erfahrungen bei Analyse und Probensammlung

Die ausgedehnte praktische Auseinandersetzung mit den Probenahmetechniken und Analysen an den Zuflüssen zum Greifensee, aber auch an schwach- und starkbelasteten Zuflüssen zum Bodensee (*Bührer und Wagner 1982*) hat folgende Erfahrungen geliefert:

Das kontinuierliche Aufsammeln von Teilproben zu mehrtägigen Mischproben ist trotz Aufbewahrung im Kühlschrank

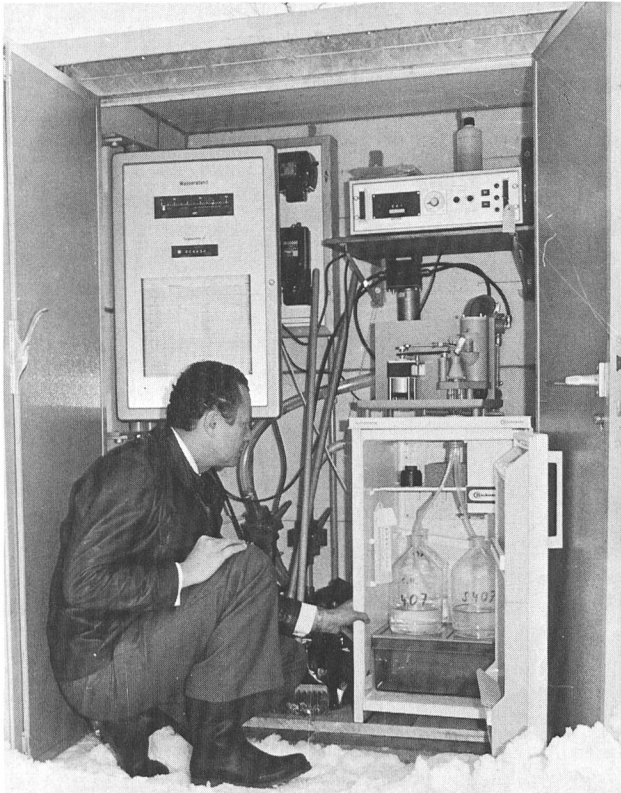


Bild 1. Sammelautomat für wassermengenproportionale Proben (System Züllig). Links oben: Limnigraph, rechts oben: Steuergerät (Umwertung der Pegeldaten in Zeitintervalle für die Entnahme der Teilproben), rechts Mitte: Probenahmegerät mit Verteilung auf 4 Kanäle, rechts unten: Kühlschrank.

Die im Bach stationierte Pumpe wird alle 12 Stunden über eine Schaltuhr kurz gestoppt. Durch die plötzliche Entleerung der Förderleitung werden Ansammlungen von Feststoffen (Sand, Tannennadeln, Laub, Gras) ausgeräumt.

bei 4°C nicht ohne Probleme. Das Vermischen der verschiedenen Qualitäten in einer Probe begünstigt Stoffumsätze vor allem bei den Stickstoffverbindungen (Reduktion von Nitrat oder Oxidation von Ammonium) und Sorptionserscheinungen, ferner (bei stark belasteten Flüssen) Abgabe von Phosphaten aus Niedrigwasserschwebstoffen (Wagner 1976). Eine Bestimmung der Gesamt-P-Fracht ist dann zwar noch möglich, lässt aber wegen des unterschiedlichen Verhaltens der partikulären und der gelösten Anteile keine limnologisch verwertbare Aussage mehr zu. Schwierigkeiten ergeben sich ausserdem beim Homogenisieren von mehrtägigen Proben, wenn die Sedimente bereits zu Flockenbildungen neigen. Es sind durchaus Seezuflüsse denkbar, bei denen infolge ihres grossen Anteils an der Gesamtzufuhr grösstmögliche Präzision zu fordern ist und die Wahl demzufolge auf die Dauerprobenahme fällt. Hier ist der Qualität des Wassers, vor allem der Schwebstoffführung, Rechnung zu tragen und die Dauerprobenahme allenfalls durch Stichprobenahmen zu ergänzen, um die Frachtbestimmung namentlich des o-Phosphates sicherzustellen.

4. Die Berechnung der Stofffrachten

Die Frachten gelöster und suspendierter Stoffe in Fliessgewässern können auf verschiedene Weise ermittelt werden; die Forderung, dass Stoffkonzentrationen und Wasserführung gleichermassen bekannt sind, bleibt aber stets dieselbe. Die heute gebräuchlichen Methoden unterscheiden sich nur durch die Technik der Probenentnahme und der nachfolgenden Auswertung.

4.1 Die Probenahmetechniken

Stichproben

Mit Stichproben bezeichnen wir hier momentane Einzelproben sowie kontinuierlich über 24 Stunden gesammelte Proben. Die Wasserführung (im folgenden mit Q bezeichnet) muss für alle Tageszeiten bekannt sein (limnigraphische Aufzeichnung). Aus der Gesamtheit der Datenpaare von Konzentration und Q lässt sich jene Funktion (bzw. Kurve) ermitteln, welche diese Werte am genauesten angleicht. Sie wird sodann zur Berechnung der wahrscheinlichsten Frachtwerte an sämtlichen Tagen des Jahres verwendet.

Q-proportionale Dauerprobenahme

Die Sammelprobe entspricht hier einem bekannten Teil des im Gewässer vorbeigeflossenen Wassers, die Konzentration in der Probe der damit gewichteten mittleren Konzentration. Die Stofffrachten werden durch Multiplikation dieser Konzentration mit der durchgeflossenen Wassermenge berechnet.

Wassermessung

An sämtlichen Messstellen waren Rechteck-Überfälle eingebaut (Eichung durch den Hydrographischen Dienst des Kantons Zürich). Für die Berechnung der Eichfunktionen wurde die allgemeine Form

$$Q = a h^b \quad (1)$$

verwendet, wobei a und b = Koeffizienten (für jede Messstelle zu ermitteln), h = Wasserstand; a und b wurden mit einer linearen Regression der logarithmierten Werte angenähert, sodann erfolgte Iteration der Koeffizienten mit den Wasserstandshöhen und Abflüssen, mit Minimierung der Fehlerquadrate. Eine Berechnung mit Hilfe von Polynomen zweiten Grades ergab eher schlechtere Werte.

4.2 Mathematische Behandlung der Analysenresultate; Stofffrachtberechnung

Allgemeines

Die Konzentration vieler Stoffe hängt von der Wasserführung ab. So wird zum Beispiel abwasserbürtiges Phosphat durch Regenwasser verdünnt. Zwischendeponien in Gewässern und in Abwasserleitungen können bei stärkerem Abfluss aufgewühlt und mobilisiert werden. Bei Regen wird offenes, das heisst nicht durch eine Pflanzendecke befestigtes Land erodiert. Dadurch kann zusätzliches Phosphat freigesetzt werden und nicht nur eine Frachtvergrösserung, sondern auch einen Konzentrationsanstieg verursachen. Steigende Wasserführung lässt aber die Phosphatkonzentration nicht unbegrenzt ansteigen, sondern diese nimmt bei höheren Wasserführungen wegen grösserer Verdünnung wieder ab. Auch bei den partikulären Komponenten überschreitet die Stoffmenge pro Volumen bestimmte Grenzen nicht. Die obere Grenze für partikuläre Komponenten bzw. Schwebstoffe ist denkbar bei einem Murgang, wenn hauptsächlich Bodenmaterial und wenig Wasser transportiert werden. Für einige Komponenten sind zudem jahreszeitliche Schwankungen bekannt.

Berechnung von Frachten aus Stichproben mit Hilfe von Polynomen

Jahresfrachten bestimmter Stoffe aufgrund einzelner Stichproben zu ermitteln ist nur mit einer mathematisch-statistischen Behandlung des Datenmaterials möglich. Eine heute eingeführte Methode ist das Aufstellen von «Eichkurven» für den Zusammenhang zwischen Wasserführung und Stoffkonzentration (oder Stofffracht). Diese «Eichung» muss für jeden Fluss und jede Stoffkomponente gesondert

vorgenommen werden. Der mathematische Ausdruck für eine solche Beziehung kann ein Polynom sein, evtl. kombiniert mit einer Fourier-Funktion, oder eine Funktion mit Modellcharakter (Bührer und Wagner 1982; Wagner, Bührer und Ambühl 1976). Es wird dabei vorausgesetzt, dass zwischen der Stoffkonzentration und der Wasserführung (und allenfalls der Jahreszeit) ein funktioneller Zusammenhang besteht. Dieser wird durch Computerprogramme direkt berechnet bzw. optimiert, wobei schliesslich für jeden Fluss und jede Komponente diejenige Funktion ausgewählt wird, welche die geringste Fehlersumme bzw. das wahrscheinlichste Resultat ergibt.

Polynome sind Gleichungen der Form

$$y = c_0 + c_1 x + c_2 x^2 + c_3 x^3 + \dots \quad (2)$$

Ausgleichspolynome sind direkt berechenbar.

Als Polynome wurden Funktionen des Typs

$$\text{Konzentration} = \sum_{i=-1}^{\leq 3} c_i Q^i \quad (3)$$

verwendet, wobei: Q = Wasserführung und c = Koeffizient. In Bild 2 ist ein Beispiel dargestellt.

Häufig unterliegen die Stoffkonzentrationen einem periodischen Jahresgang. Dieser lässt sich mit Hilfe eines Fourier-Ansatzes beschreiben:

$$\text{Konzentration} = \sum_{j=1}^{\leq 3} (c_{1j} \sin[jt] + c_{2j} \cos[jt]) \quad (4)$$

wobei: t = Zeit und c = Koeffizient

Da die Winkelfunktionen im Bogenmass angegeben sind, muss die Zeit umgerechnet werden:

$$t = 2\pi (\text{Tag im Jahr}) / 365 \quad (4a)$$

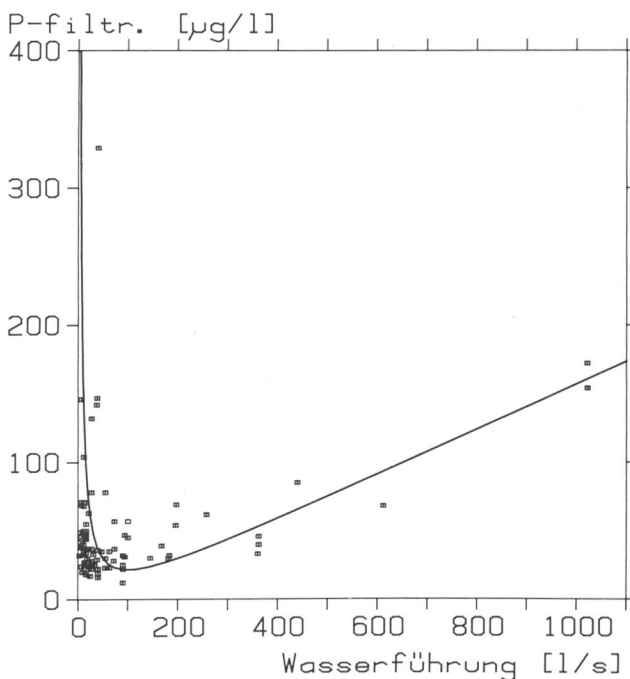


Bild 2. Dorf Bach Maur. Gesamtphosphor im Filtrat (GPF), aufgetragen gegen die jeweilige Wasserführung. Die Ausgleichskurve bezeichnet die wahrscheinlichste Abhängigkeit der Konzentration von der Wasserführung. Sie entspricht der Gleichung: $GPF = 1660/Q + 0,167 Q - 11,6$.

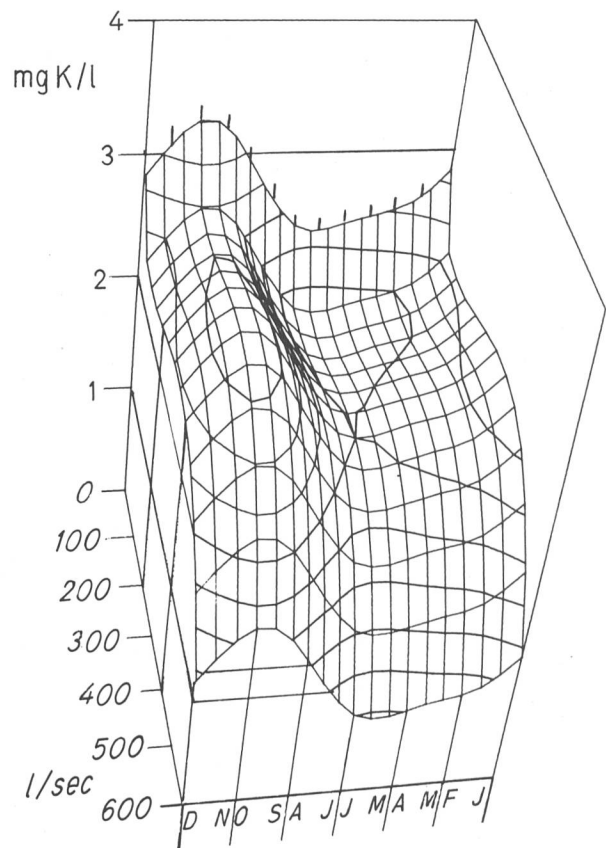


Bild 3. Ausgleichskurvenfläche der Kaliumkonzentrationen im Dorf Bach Maur (Funktionsbild des Ausgleichspolynoms Gleichung 5).

Der Einfachheit halber wurde angenommen, die Zeitfunktion sei von der Wasserführung unabhängig. Daraus folgt, dass die Fourier-Funktion mit dem Polynom addiert werden darf.

Als Beispiel ist in Bild 3 der zeitliche Verlauf der Kaliumkonzentration des Dorfbaches Maur dargestellt. Die der Graphik zugrundeliegende Formel

$$C = 2,297 + 0,4327/Q - 0,002809 Q + 1,890 \cdot 10^{-5} Q^2 - 2,925 \cdot 10^{-8} Q^3 - 0,3694 \sin(t) + 0,2161 \cos(t) - 0,06126 \sin(2t) - 0,1076 \cos(2t) \quad (5)$$

hat die unvermeidlichen Nachteile des Polynoms, das heisst, sie kann negative Werte liefern. Daneben ergab sich im Zuge der Frachtberechnungen, dass der Fourier-Teil der Formel, je nach Komponente und Bach, den Fehleranteil recht stark reduzieren hilft.

Die Frachten wurden schliesslich mit folgenden Funktionen berechnet:

$$\text{Konzentration} = \sum_{i=a}^b (c_i Q^i) + \sum_{j=1}^d (c_{1j} \sin[jt] + c_{2j} \cos[jt]) \quad (6)$$

Die Konstanten a , b und d waren für die verschiedenen Formeln verschieden. Von diesen Formeln wurde immer eine Auswahl von 8 berechnet. Davon wurde diejenige ausgewählt, welche die geringste Streuung ergab und bei den höchsten gemessenen Q -Werten keine negativen Werte lieferte. Der Seeabfluss konnte mit Hilfe dieser Formeln gleich behandelt werden wie die Seezuflüsse.

4.3 Kläranlagen

Die Frachtwerte der Kläranlagen-Abflüsse wurden aufgrund zahlreicher Tagessammelproben ermittelt, welche über die Untersuchungsperiode verteilt waren und unterschiedliche Wetter- bzw. Abflussverhältnisse erfassten. Von diesen Ergebnissen wurde auf ein Jahr extrapoliert.

4.4 Die Ermittlung des Abwasseranteils in den Zuflüssen

Soll das Resultat der vorliegenden Arbeit eine gute Grundlage für technische Sanierungsvarianten sein, so ist neben der Kenntnis der Gesamtmenge der Nährstoffe die Kenntnis ihrer Herkunft ebensowichtig. Leider ist eine direkte analytische Aufteilung der Flussfrachten auf ihre Quellen (Bodenerosion und -elution = «diffuse» Frachten, direkt eingeleitete Abwässer, Abfluss aus einem oberliegenden See) nicht möglich. Es muss mit indirekten Ansätzen gearbeitet werden. Im Prinzip ist die Abwasserfracht eines Baches unabhängig von seiner Wasserführung. Diese Annahme muss mit zum Teil rigorosen Vereinfachungen gestützt werden (der Abwasseranfall sei konstant; Regenfälle wirken sich auf die Fracht abwasserbürtiger Stoffe nicht aus; der Abfluss aus Kläranlagen sei frei von sedimentierenden partikulären Anteilen). In Einzelfällen können diese Vereinfachungen das Endresultat stark verfälschen. Es ist deshalb nötig, die gesamten Resultate auf ihre Plausibilität zu überprüfen. Die hier angestrebte Aufteilung, welche zwischen den Frachten aus den Siedlungen und den Frachten aus dem landwirtschaftlichen Kulturland zu unterscheiden hat, hat auch politische Bedeutung, soll sie doch mithelfen, die Grauzone, die hier bei den meisten Einzugsgebieten noch besteht, aufzuhellen.

Der Abwasseranteil in den Zuflüssen des Einzugsgebietes des Greifensees wurde mit folgenden Ansätzen ermittelt:

- Berechnung auf der Basis der Fracht während des geringsten Tagesabflusses
- Berechnung aufgrund des Polynomkoeffizienten a/Q
- Berechnung auf der Basis der kleinsten Monatsfracht (erwies sich als ungenauer als a)
- Auf die Berechnung mit einem Exponentialansatz (nach *Bührer, Wagner* und *Ambühl* 1982) wurde wegen des grossen Aufwandes der hier erforderlichen Iterationsrechnung verzichtet.

e) Eine Abschätzung aufgrund statistischer Unterlagen wurde wegen der grossen Fehlermöglichkeiten unterlassen.

Zu a): Es kann behauptet werden, die Bäche führten in den Zeiten mit dem geringsten Abfluss nur Abwasser. Ohne Zweifel stimmt diese Annahme nicht vollständig. Da andererseits die Regenentlastungen der Kanalisationsnetze erst bei Hochwasser anspringen, wird dieser Fehler dadurch kompensiert oder überkompensiert.

Zu b): Die Formeln zur Berechnung der Anteile enthalten üblicherweise ein Glied mit einer reziproken Q -Abhängigkeit (Formel 6, $a = -1$). Aus der Multiplikation dieses Koeffizienten mit der Wassermenge pro Sekunde ergibt sich die Q -unabhängige Fracht pro Sekunde. Allerdings funktioniert dieses Verfahren nur bei kleiner Datenstreuung.

Die Berechnung nach den erwähnten drei Ansätzen ergibt, dass die Resultate nach Ansatz b) (Polynomkoeffizient a/Q) kaum richtig sind, am plausibelsten sind sie nach Ansatz a) (Extrapolation aus dem Tag bzw. der Woche mit der niedrigsten Wasserführung). Der aus dem Pfäffikersee stammende Anteil der Usteraa wurde mit folgender Annahme geschätzt: Die Hälfte des Wassers der Usteraa ($10,24 \cdot 10^6$ m³ Niederwasser/Jahr) stamme aus dem Pfäffikersee und besitze im Sommer die gleiche Qualität wie der Greifensee.

Der Anteil des für die Algen unmittelbar verfügbaren Phosphors («algenverfügbarer Phosphor»):

Die verschiedenen analytischen Phosphorfraktionen spielen als Nährstoffe im See eine unterschiedliche Rolle. Je nachdem, ob sie vom Phytoplankton direkt, indirekt oder nicht aufgenommen werden können, müssen sie als Ursache der Eutrophie entsprechend gewertet werden:

Der partikuläre Phosphor aus Flüssen wird üblicherweise zusammen mit anderem partikulärem Material in den Flussdeltas sedimentiert und eingedeckt, so dass er später den Algen nicht mehr zur Verfügung steht. Partikulärer Phosphor aus direkt einleitenden Kläranlagen besteht hauptsächlich aus flockigen Eisenphosphaten, welche durch Algen aufgebrochen werden können (*Wagner* 1976). Dies bedeutet, dass die für Algen verfügbare Phosphorlast sich zusammensetzt aus: 7,63 t P aus ARA + 1,7 t aus Entlastungen + 0,72 t aus diffusen Quellen + 3,58 t aus dem Pfäffikersee + 0,23 t aus Regen + 9,11 t aus Erosion und Landwirtschaft = 22,97 t P/a.

Diese Wertung der einzelnen Fraktionen ist ein Versuch, der Wahrheit näherzukommen. Tatsächlich bestehen über die Herkunft und die Wirkung insbesondere der partikulären Phosphorfrachten noch grosse Kenntnislücken, welche weitere Untersuchungen rechtfertigen würden.

Um ein einheitliches Bild über die Herkunft der P-Belastung des Greifensees zu erhalten, muss der aus dem Pfäffikersee stammende Anteil in ähnlicher Weise aufgeteilt werden, und zwar, da Basisdaten hierüber fehlen, im gleichen Verhältnis, wie für das engere Greifenseegebiet ermittelt. Die abwasserbürtige Belastung des Greifensees mit algenverfügbarem P aus dem Pfäffikersee beträgt nach dieser Rechnung 1,9t/a, der Rest (Bodenerosion, Landwirtschaft) 1,7 t/a («t/a» = Tonnen pro Jahr).

4.5 Flächenausträge durch Erosion

Nach einer groben Schätzung betragen die Austräge von algenverfügbarem Phosphor durch Erosion beim Einzugsgebiet des Pfäffikersees $42 \text{ kg/km}^2 \cdot \text{a}$ und beim Greifensee $62 \text{ kg/km}^2 \cdot \text{a}$. Für das Einzugsgebiet des Aschbachs, welches einen Waldanteil von rund 50% besitzt, beträgt der gesamte Austrag $27 \text{ kg/km}^2 \cdot \text{a}$. Für das landwirtschaftliche Areal dieses Einzugsgebietes ist mit einem Austrag von rund $50 \text{ kg/km}^2 \cdot \text{a}$ zu rechnen. Verglichen mit den entsprechenden Werten aus 1967/68 (*Pleisch* 1970, zitiert nach *Gächter* und *Furrer* 1972) ist der Austrag aus den landwirtschaftlichen Arealen seither stark angestiegen.

Die Resultate erlauben schliesslich eine recht detaillierte Aufteilung der Frachten von $\text{PO}_4\text{-P}$, Gesamtphosphor im Filtrat (GPF) und Gesamtphosphor im Rohwasser (GPR) auf die möglichen Quellen. Stellvertretend für die übrigen Zuflüsse seien hier die Resultate der Usteraa aufgeführt:

| | Tonnen P/Jahr | | | Q |
|----------------------------|------------------------|-------|--------|--------------------------|
| | $\text{PO}_4\text{-P}$ | GPF | GPR | Mio m ³ /Jahr |
| Abwasseranteil: | | | | |
| – ARA Wetzikon | 0,673 | 1,056 | 1,575 | 3,066 |
| – Regenüberläufe | 0,223 | 0,350 | 0,521 | 0,271 |
| – Restliches Abwasser | 1,293 | 1,175 | 1,199 | 10,236 |
| Summe Abwasser | 2,189 | 2,581 | 3,295 | 13,573 |
| Pfäffikersee | 1,616 | 2,40 | 3,58 | 28,07 |
| Erosion und Landwirtschaft | 2,760 | 3,263 | 4,50 | 29,388 |
| Total Usteraa | 6,565 | 8,105 | 11,375 | 71,031 |

Die aufsummierten Werte aller untersuchten Zuflüsse usw. ergeben folgende Zusammenstellung:

| | Tonnen P/Jahr | | | | Q |
|----------------------------|------------------------|-------|-------|------|--------------------------|
| | $\text{PO}_4\text{-P}$ | GPF | GPR | PP | Mio m ³ /Jahr |
| Abwasseranteil: | | | | | |
| – ARA | 4,90 | 6,15 | 7,63 | 1,48 | 10,41 |
| – Überläufe | 1,4 | 1,7 | 2,02 | 0,32 | 0,92 |
| – Restliches Abwasser | 0,78 | 0,72 | 1,19 | 0,47 | 7,27 |
| Pfäffikersee | 1,62 | 2,40 | 3,58 | 1,18 | 28,07 |
| Regen | 0,05 | 0,23 | 0,28 | 0,05 | 8,5 |
| Erosion und Landwirtschaft | 7,82 | 9,11 | 12,92 | 3,81 | 88,71 |
| Total Import | 16,60 | 20,34 | 27,64 | 7,30 | 143,87 |

Zusammenfassend ergeben sich für die Zukunft des algenverfügbaren Phosphors:

| | |
|----------------------------|----------------|
| aus Abwasser | 11,9 t/a = 52% |
| Regen auf Seefläche | 0,23 t/a = 1% |
| Erosion und Landwirtschaft | 10,8 t/a = 47% |

Die aufsummierten Werte aller untersuchten Zuflüsse usw. ergeben folgende Zusammenstellung:

Zusammenfassend ergeben sich für die Herkunft des algenverfügbaren Phosphors:

| | |
|----------------------------|----------------|
| Aus Abwasser | 11,9 t/a = 52% |
| Regen auf Seefläche | 0,23 t/a = 1% |
| Erosion und Landwirtschaft | 10,8 t/a = 47% |

4.6 Erfahrungen bei Frachtberechnungen

Die gesammelten Erfahrungen führen zum Schluss, dass die Methodik von Fall zu Fall aufgrund der Anforderungen und der Randbedingungen auszuwählen ist. Unsere Untersuchungskampagne bot Gelegenheit, die in Kapitel 4.1 beschriebenen Techniken (24-Stunden-Sammelproben, Stichproben und Wochen-Sammelproben) bezüglich des Endresultates zu vergleichen. An einzelnen Messstellen wurden gleichzeitig Stichproben und 24-Stunden-Sammelproben erhoben (ein direkter Vergleich mit den Q -proportionalen 7-Tage-Proben war nicht vorgesehen). Die Verfahren haben systembedingte Vor- und Nachteile:

a) *Dauer-Sammeltechnik*: Diese Technik dürfte die sicherste Probe liefern, da sie dauernd arbeitet und auch kurzzeitige Spitzen proportional erfasst. Sie liefert keine Information über die Konzentration während dieser Spitzen; für längerfristige Frachtberechnungen ist dies auch nicht nötig. Durch Hochwasser bedingte Veränderung des Durchflussprofils beeinträchtigt die Präzision der Q/h -Funktion. Da diese den Sammelautomaten unmittelbar steuert, können allfällige Fehler später nicht mehr völlig korrigiert werden, nur die Abflusswerte. Bei festen Normüberfällen fällt diese Gefahr im Prinzip dahin. Trotzdem sollte auch hier eine individuelle Eichung bei möglichst vielen Wasserständen vorgenommen werden. Es empfiehlt sich deshalb, derartige Messstellen so lange vor Beginn der Untersuchung einzurichten, dass eine vollständige Eichfunktion (Q/h -Kurve) aufgenommen werden kann.

Weiter können in den Sammelflaschen (trotz Aufbewahrung im Kühlschrank) störende Reaktionen ablaufen (Abbau von organischem Material, Sorption und Desorption von PO_4 an Partikel, Veränderung der N-Komponenten). In schwebstoffreichen Wässern können diese Einflüsse die Proben bis zur Unbrauchbarkeit verändern.

b) *Die Momentan-Stichproben* stammen aus einem Streufeld und weisen von allen Probenahmeverfahren die grösste Konzentrationsstreuung auf. Sie haben den Vorteil der kürzesten Standzeit bis zur Untersuchung, können aber bei Entnahme nach einem festen Zeitplan unkorrigierbare Fehler erbringen, wenn das Gewässer eine tageszyklische Konzentrationsschwankung aufweist, zum Beispiel bei Einleitung von Siedlungsabwasser.

c) *Die 24-Stunden-Sammelproben* bedingen doppelte Feldarbeit, da die Probegeräte auszusetzen und nach 24 Stunden wieder einzuholen sind. Die Standzeit der Proben ist nach bisherigen Erfahrungen genügend kurz, um Veränderungen in der Probe zu vermeiden.

Eine umfangreiche Datenanalyse (Bührer, Szabó und Ambühl 1985) führte zu folgenden, hier kurz zusammengefassten Erfahrungen:

– Sofern das Abflussregime nicht durch Staubetrieb, Kraftwerke usw. bewirtschaftet ist, was eine automatische Probenahme erfordern würde, wird bei vergleichbarem Analysenaufwand der Modus der 24-Stunden-Sammelprobe das sicherere Resultat erbringen, indem hier die schwer kontrollierbaren Veränderungen in der Probe wegfallen. Die Berechnung der Fracht erfordert allerdings einigen Rechenaufwand und einen Computer.

– Stichproben aus abwasserbelasteten Flüssen ergeben nur dann ein zuverlässiges, für einen rechnerischen Tagesausgleich geeignetes Material, wenn sie über alle 24 Tagesstunden und alle Wochentage verteilt erhoben wurden. Das Einsammeln von Stichproben ausschliesslich tagsüber und nachträgliche Korrektur anhand eines einmalig erhobenen Tagesgangs ist eine Notlösung, von der bei der Planung einer Untersuchung abgesehen werden sollte.

– Die 24-Stunden-Sammelproben sind von der Tagesrhythmik nicht beeinflusst. Die Sicherheit des Gesamtergebnisses ist mit jener der Dauerprobenahme vergleichbar. Durch die jeweils zweimalige Feldarbeit und den zusätzlichen Rechenaufwand ist dieses Verfahren relativ aufwendig, aber doch noch kostengünstiger als die Dauerprobenahme.

5. Die Belastung des Greifensees

Die durch die Zuflüsse in den See geführten Stofffrachten wurden aufgrund der verwendeten Probenahmetechnik mit dem jeweils günstigsten Verfahren berechnet, das heisst für die Stichprobenserien aufgrund der Ausgleichsfunktion für jeden Tag, für die automatisch erhobenen Proben aufgrund der jeweiligen Durchfluss-Wassermenge für die einwöchigen Sammelzeiten und auf die Monate (Januar 1977 bis Dezember 1978) summiert. In der Tabelle 2 sind die mittleren Frachten pro Jahr für alle erfassten Quellen, die Abflussmengen und Flächen der Einzugsgebiete zusammengestellt.

Wie aus Bild 4 ersichtlich ist, wurden die grössten Phosphor- und Stickstofffrachten durch die wasserreichsten Zuflüsse in den See gebracht. Die grössten Flächenausträge stammten aus der Usteraa und der Mönchaltorferaa, beides Vorfluter von Kläranlagen. Die Flächenausträge des Aschbachs sind etwas unsicher, da die wahren (unterirdischen) Wasserscheiden nicht genau zu ermitteln sind. Die Austräge basieren auf 1 km², könnten aber auch auf 0,86 bis 1,2 km² bezogen werden.

Der Flächenaustrag von Gesamtphosphor im Filtrat (GPF) pro km² und Jahr (inklusive Abwasser) betrug für

| | | | |
|-----------------|-----------------------------|---------------|----------------------------|
| Aschbach | 27 kg P/km ² ·a | Dorfbach Maur | 37 kg P/km ² ·a |
| Mönchaltorferaa | 124 kg P/km ² ·a | Tüffenbach | 44 kg P/km ² ·a |
| Usteraa | 125 kg P/km ² ·a | Werrikerbach | 34 kg P/km ² ·a |

Die Stickstoffausträge bewegen sich recht einheitlich zwischen 2700 und 3500 kg anorganischem Gesamtstickstoff/km²·a.

Der Austrag von Chlorid pro km²·a ist am grössten bei der Usteraa; die übrigen Einzugsgebiete liefern Werte, die untereinander ungefähr gleich sind. Erstaunlich ist aber der Chloridaustrag des Aschbach-Einzugsgebietes: Trotz sehr wenigen Bewohnern und weitgehend fehlender Strassensalzung liegt der Wert gleich hoch wie in dicht besiedelten Gebieten. Eine Erklärung (zum Beispiel Hofdünger, Weidetrieb) konnte nicht gefunden werden.

Der grösste Austrag an Kieselsäure (SiO₂) findet sich beim Tüffenbach; den Ursachen konnte aber nicht nachgegangen werden. Wenig erstaunt, dass der See einen beträchtlichen SiO₂-Rückhalt aufweist, was auf den Konsum durch die planktischen Kieselalgen zurückgeht. Die Flächenausträge von Sulfat (SO₄) sind recht uniform.

Tabelle 2. Greifensee 1977/78. Mittlere Frachten pro Jahr für alle erfassten Quellen, die Abflussmengen und die Flächen der Einzugsgebiete.

| Gebiet | km ² | Q Mio m ³ | PO ₄ -P | GPF | GPR | Bilanz-P | NH ₄ -N | NO ₂ -N | NO ₃ -N | GIN | PN | SiO ₂ | Cl | SO ₄ |
|-----------------|-----------------|-------------------------|--------------------|--------|--------|----------|--------------------|--------------------|--------------------|---------|--------|------------------|---------|-----------------|
| | | | t P | t P | t P | t P | t N | t N | t N | t N | t N | t | t | t |
| Aschbach | 1.0 | 0.793 | 0.017 | 0.027 | 0.048 | 0.027 | 0.022 | 0.006 | 2.10 | 2.128 | 0.140 | 4.30 | 12.30 | 14.0 |
| Mönchaltorferaa | 45.7 | 34.392 | 4.813 | 5.677 | 7.991 | 6.304 | 6.339 | 1.452 | 134.70 | 142.491 | 8.217 | 199.00 | 831.90 | 874.9 |
| Usteraa | 64.7 | 71.031 | 6.565 | 8.105 | 11.375 | 9.002 | 13.958 | 2.795 | 177.04 | 193.793 | 15.368 | 238.50 | 1538.00 | 1314.2 |
| Dorfbach Maur | 2.3 | 1.633 | 0.058 | 0.085 | 0.138 | 0.101 | 0.052 | 0.007 | 6.16 | 6.219 | 0.288 | 8.94 | 41.90 | 27.3 |
| Tüffenbach | 8.1 | 6.667 | 0.275 | 0.357 | 0.623 | 0.440 | 0.636 | 0.101 | 27.56 | 28.297 | 0.639 | 46.52 | 103.21 | 119.4 |
| Werrikerbach | 8.4 | 4.345 | 0.222 | 0.288 | 0.370 | 0.260 | 0.253 | 0.110 | 24.52 | 24.883 | 0.552 | 29.95 | 84.87 | 92.3 |
| Statist. Gebiet | 16.0 | 8.918 | 0.368 | 0.481 | 0.767 | 0.558 | 0.654 | 0.120 | 41.79 | 42.567 | 1.027 | 60.30 | 162.00 | 169.2 |
| Summe Gebiet | 146.2 | 127.779 | 12.318 | 15.02 | 21.312 | 16.692 | 21.914 | 4.591 | 413.87 | 440.378 | 26.231 | 587.51 | 2774.18 | 2611.3 |
| ARA Uster | | 6.117 | 4.117 | 4.911 | 5.604 | 5.604 | 3.719 | 1.374 | 61.33 | 66.423 | 1.225 | - | 295.83 | - |
| ARA Maur | | 0.942 | 0.091 | 0.135 | 0.354 | 0.354 | 2.968 | 0.250 | 6.98 | 10.195 | 0.218 | - | 66.09 | - |
| ARA Mönchaltorf | | 0.282 | 0.022 | 0.046 | 0.087 | 0.087 | 1.340 | 0.076 | 2.26 | 3.677 | 0.066 | - | 19.42 | - |
| Summe ARA | | 7.341 | 4.230 | 5.092 | 6.045 | 6.045 | 8.027 | 1.700 | 70.57 | 80.295 | 1.509 | (27.80) | 381.34 | (150) |
| Regen | 8.5 | 8.500 | 0.049 | 0.233 | 0.282 | 0.233 | 7.630 | 1.306 | 6.22 | 15.156 | - | - | - | - |
| Summe Belastung | 154.7 | 143.620 | 16.597 | 20.345 | 27.639 | 22.97 | 37.571 | 7.597 | 490.66 | 5.829 | 27.740 | 615.31 | 3155.52 | 2761.3 |
| Glatt | 154.7 | 132.289 | 16.628 | 20.011 | 25.603 | 25.603 | 11.580 | 2.548 | 174.42 | 188.548 | 39.550 | 237.16 | 2707.00 | 2478.4 |

| | GH | KH | Mittel | CSB | TOC | DOC | ung.St. | Na | K | Mg | Fe | Zn | Cu | Cd | Pb | |
|-----------------|-------|-------|--------------------|-----|--------|-------|---------|------|--------|-------|--------|-------|--------|-------|-------|-------|
| | Mval | Mval | pH Leitf. µs/cm | | | | | | | | | | | | | t |
| Aschbach | 4.2 | 3.7 | 8.70 | 466 | 8.3 | 2.9 | 2.0 | 22 | 6.0 | 1.0 | 17.3 | 82 | 5.7 | 1.6 | 0.17 | 1.3 |
| Mönchaltorferaa | 208.8 | 186.7 | 8.40 | 544 | 625.2 | 316.2 | 132.2 | 1551 | 523.0 | 120.8 | 669.9 | 9662 | 816.1 | 294.9 | 3.95 | 149.8 |
| Usteraa | 329.5 | 297.2 | 8.51 | 441 | 1153.1 | 386.1 | 251.8 | 1193 | 971.5 | 207.9 | 1104.2 | 12683 | 1523.7 | 280.1 | 14.35 | 232.4 |
| Dorfbach Maur | 8.9 | 7.8 | 8.27 | 490 | 14.9 | 5.2 | 3.1 | 39 | 24.6 | 3.5 | 37.1 | 181 | 10.9 | 4.4 | 0.18 | 4.5 |
| Tüffenbach | 44.9 | 41.4 | 8.12 | 568 | 69.2 | 27.6 | 20.1 | 97 | 41.9 | 12.4 | 115.6 | 1396 | 48.0 | 13.7 | 0.61 | 6.9 |
| Werrikerbach | 29.2 | 25.3 | 7.92 | 573 | 48.0 | 17.4 | 12.0 | 42 | 40.9 | 8.2 | 71.7 | 279 | 72.8 | 9.0 | 0.29 | 15.0 |
| Statist. Gebiet | 57.4 | 35.0 | 8.07 | 560 | 91.4 | 34.7 | 24.3 | 123 | 74.3 | 16.6 | 155.0 | 1284 | 91.1 | 18.6 | 0.74 | 18.2 |
| Summe Gebiet | 682.9 | 597.1 | 8.41 | 491 | 2010.1 | 790.1 | 445.5 | 2667 | 1682.2 | 370.4 | 2170.8 | 25567 | 2568.3 | 622.3 | 20.29 | 428.1 |
| Summe ARA | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| Regen | - | - | - | - | - | 25.5 | 15.5 | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| Glatt | 559.9 | 507.1 | 8.40 | 409 | 2151.5 | 703.9 | 511.4 | 1016 | 1646.5 | 766.2 | 2132 | 3064 | 1312.0 | 273.5 | 14.23 | 124.6 |

6. Prognosen über die mutmassliche Weiterentwicklung der Belastung

Seit den hier rapportierten Arbeiten sind die Greifenseezuflüsse nicht mehr untersucht worden. Aus den laufend durchgeführten Untersuchungen des Sees sowie aus den massiven Verbesserungen der Abwasserreinigungs-Technologie des Glattales ist zu schliessen, dass sich die Belastung des Sees in der Zwischenzeit stark verändert hat. Die nachstehenden Berechnungen sollen aufgrund der wenigen vorhandenen Kenntnisse im Sinne einer Prognose wenigstens den Trend feststellen; eine genaue Aussage ist jedoch nicht möglich. Die Ergebnisse sind in Tabelle 3 zusammengestellt.

Langfristig zu erwarten ist auch eine Sanierung des Pfäffikersees (geschätzte Reduktion des P-Abflusses um etwa 2 t/a). Ferner könnte ein Totalersatz des Phosphates in den Wasch- und Reinigungsmitteln eine Verminderung von 1,3 t/a bringen (Regenentlastungen + restliches Abwasser). Die gesamte Belastung würde unter diesen Umständen

Tabelle 3. Die mutmasslichen P-Frachten und ihre Herkunft, berechnet für die Jahre 1981 und 1984.

| Quelle | Wasser- | Phosphor-Fracht | Form |
|------------------------------------|------------------------------|---------------------|------|
| | Fracht Mio m ³ | 1981 1984 t P | |
| Regen | 8,5 | 0,23 | GPF |
| ARA im Pfäffikersee-Einzugsgebiet | 2,91 | 1,5 | GPR |
| Pfäffikersee | 28,07 | 3,6 | GPR |
| Erosion und Landwirtschaft | 80,2 | 9,11 | GPF |
| Restliche Abwässer und Drainage | 7,27 | 0,72 | GPF |
| Regenentlastungen | 0,92 | 1,7 | GPF |
| ARA (nur Greifensee-Einzugsgebiet) | 20,17 | 15,92* | GPR |
| Summe | 148,04 | 32,78 | P |

*Die Werte der Kläranlagen für 1981 stammen aus 6 Kontrolluntersuchungen des Amtes für Gewässerschutz und Wasserbau Zürich (24-Stunden-Sammelproben).

auf 16,1 t/a sinken. Diese pauschalen Jahres-Summenwerte sind dann erreichbar, wenn die künftigen Schutzmassnahmen mit der gleichen Gründlichkeit wie bisher durchgesetzt werden.

7. Zusammenfassung

1. Die dem Greifensee zugeführten Nährstofffrachten wurden 1977 und 1978 gemessen. Die Untersuchungen umfassten:

- Abflussmessungen und chemische Untersuchungen der wichtigeren Greifenseezuflüsse und des Abflusses.
- Untersuchung eines Zuflusses mit praktisch rein landwirtschaftlich genutztem Einzugsgebiet (Aschbach).
- Chemische Untersuchungen von direkt in den See oder unterhalb der Messstellen einleitenden Kläranlagen.
- Erfassung der restlichen Quellen (Anlieger, restliche Flächen, Regen).

2. Für die chemischen Untersuchungen wurden Stichproben und Dauerproben erhoben. Dauerprobestellen waren: Usteraa, Mönchaltorferaa, Glatt und Aschbach. Am Werrikerbach, Tüffenbach und dem Dorfbach Maur wurden Stichproben erhoben. Diese Entnahmen erfolgten mit selbstfüllenden Sammlern als Tagessammelproben und/oder als Einzelschöpfproben.

3. Für die Beziehungen zwischen Abfluss und Konzentrationen in den einzelnen Flüssen wurden Kennlinien berechnet und mit deren Hilfe die täglichen Frachten ermittelt. Die Tagesfrachten wurden zu Monats- und mittleren Jahresfrachten zusammengefasst.

4. Die verschiedenen Probenahmetechniken mit den zugehörigen Rechenverfahren haben spezifische Vor- und Nachteile.

5. Ohne Berücksichtigung der Flussschwebstoffe gelangten 1977/78 rund 23 Tonnen algenverfügbarer Phosphor in

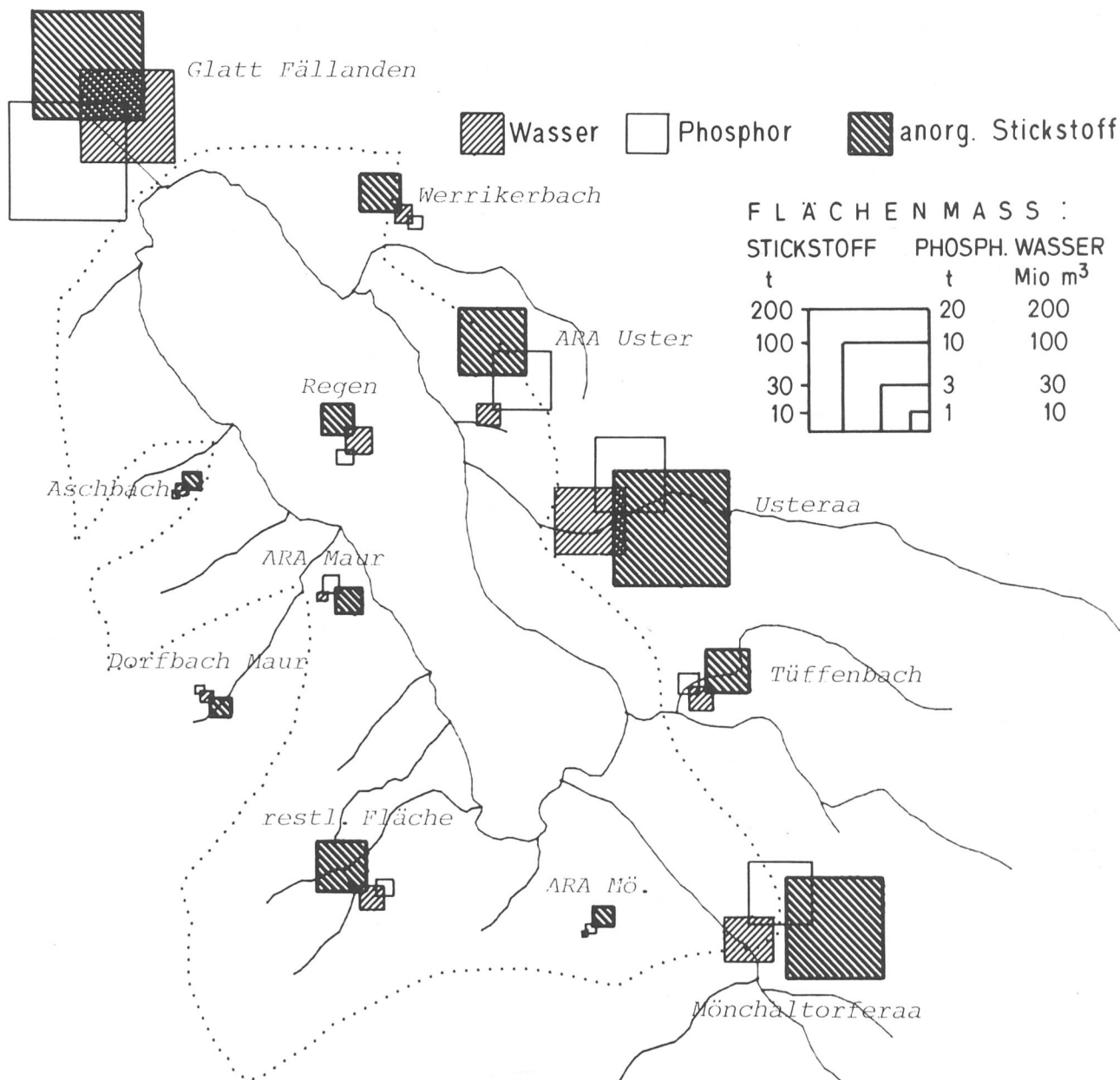


Bild 4. Die Phosphor- und Stickstofffrachten zum Greifensee im Mittel der Jahre 1977 und 1978. Die punktierte Linie umschliesst das von den Bachuntersuchungen nicht erfasste Areal. Es wurde durch statistische Vergleiche berücksichtigt.

den Greifensee. Davon stammten 52% aus Abwasser, 1,0% aus Regen auf die Seefläche und 47% aus der Bodenerosion bzw. -düngung.

6. Die 1967 gemessene Belastung von 50 bis 68 t algenverfügbarem P ist 1977/78 auf rund 22 t gesunken. Sie ist, soweit sich aus den Seedaten errechnen lässt, für 1981 wieder auf mehr als 30 t angestiegen, dürfte aber unter der Wirkung der neu eingeführten weitergehenden Abwasserreinigung wieder markant absinken auf 19 bis 20 t/a.

Literatur

Amt für Gewässerschutz und Wasserbau, Zürich: Daten der Kläranlagenuntersuchungen im Einzugsgebiet des Greifensees der Jahre 1969 bis 1981 (unpubl., 1982).

Bührer, H., Wagner, G.: Die Belastung des Bodensees mit Phosphor- und Stickstoffverbindungen und organischem Kohlenstoff im Abflussjahr 1978/79. Internat. Gewässerschutzkommission für den Bodensee, Bericht Nr. 28 (1982).

Bührer, H., Szabó, E. und Ambühl, H.: Die Belastung des Greifensees mit Phosphor, Stickstoff, Kohlenstoff, geochemischen Stoffen und Schwermetallen in den Jahren 1977/78: Methodik und Resultate. Schriftenreihe EAWAG, Nr. 1 (im Druck, 1985).

Bundi, U., Roberts, P.V.: Ursprung und Ausmass der Phosphorbelastung des Greifensees heute und im Jahr 2000. NZZ, 4. Februar 1974.

Gächter, R., Furrer, O.: Der Beitrag der Landwirtschaft zur Eutrophierung der Gewässer in der Schweiz. Schweiz. Z. Hydrol. 34, 41 bis 70 (1972).

Heierli, R.: Greifenseesanierung / Pfäffikerseesanierung. Bericht im Auftrag der Direktion der öffentlichen Bauten des Kantons Zürich (1976/77).

Märki, E.: Chemische, physikalische und bakteriologische Untersuchungen am Greifensee. Ber. Schweiz. Bot. Ges. 54, 75 bis 140 (1944).

Pleisch, P.: Die Herkunft eutrophierender Stoffe beim Pfäffiker- und Greifensee. Vierteljahresschrift der Naturf. Ges. in Zürich 115, 127 bis 229 (1970).

Wagner, G.: Die Untersuchung von Sinkstoffen aus Bodenseezuflüssen. Schweiz. Z. Hydrol. 38, 191 bis 205 (1976).

Wagner, G., Bührer, H. und Ambühl, H.: Die Belastung des Bodensees mit Phosphor-, Stickstoff- und organischen Verbindungen im Seejahr 1971/72. Internat. Gewässerschutzkommission für den Bodensee, Bericht Nr. 17 (1976).

Adresse der Verfasser: Dr. Heinrich Bührer, Ernő Szabó und Prof. Dr. Heinz Ambühl, Eidg. Anstalt für Wasserversorgung, Abwasserreinigung und Gewässerschutz, CH-8600 Dübendorf.