

Charakterisierung des chemischen Zustandes des Flusses Glatt

J. ZOBRIST, JOAN S. DAVIS, H. R. HEGI

Eidg. Anstalt für Wasserversorgung, Abwasserreinigung und Gewässerschutz (EAWAG), Eidg. Technische Hochschulen, 8600 Dübendorf

ZUSAMMENFASSUNG

Aufgrund einer umfassenden zweijährigen Untersuchung wurde der Fluss Glatt vom Greifenseeausfluss bis zur Mündung in den Rhein bezüglich der organischen Kollektivparameter, der Nährstoffe (N und P), einiger Metalle und der geochemischen Parameter charakterisiert.

Die zivilisatorische Belastung der Glatt äussert sich in einem drei- bis zehnfachen Anstieg der Nährstoffkonzentrationen längs der Flussstrecke. Die mittleren Stickstoff- und Phosphorkonzentrationen erreichen für ein fliessgewässer somit recht hohe Werte. Der durch den eutrophen Zustand des Greifensees bedingte hohe Gehalt an organischen Wasserinhaltsstoffen nimmt flussabwärts noch um ein Drittel zu.

Das Resultat der Korrelationsrechnung und der Faktorenanalyse zeigt, dass sich der Gewässercharakter des Greifenseeausflusses einerseits und eines Zuflusses der Glatt andererseits deutlich von jenem der andern Messstellen unterscheidet.

In den letzten vierzig Jahren erhöhten sich im Vergleich zur Bevölkerungszunahme (Faktor 3,4) die Sauerstoffzehrung in fünf Tagen und die Nitratkonzentrationen weniger stark, jene des Ammoniums, Phosphats und Nitrits hingegen viel stärker. Die guten Sauerstoffverhältnisse in der Glatt änderten sich in der gleichen Zeitperiode nur wenig.

1. EINLEITUNG UND ALLGEMEINE PROBLEMSTELLUNG

Die heutigen zivilisatorischen Tätigkeiten üben auf das Ökosystem der Gewässer eine grosse Belastung aus. Für eine Beschreibung und Quantifizierung von Verunreinigungsphänomenen, für eine Vorhersage allfälliger Schädwirkungen und Entwicklungstendenzen, sowie als Grundlage für sinnvolle Gewässerschutzmassnahmen bedarf es auf breiter Basis beruhender Untersuchungen. Das primäre Ziel solcher umfassenden Untersuchungen ist die Charakterisierung des physikalischen, chemischen und biologischen Zustandes des Gewässers und seine zeitliche Änderung. Der messbare Zustand resultiert einerseits aus den vielfältigen Belastungen des Gewässers durch die Einleitungen von geklärtem und ungeklärtem Abwasser, Abschwemmung bei Niederschlägen, Erosion, Drainage usw. und wird andererseits durch die im Gewässer stattfindenden Umwandlungsprozesse wie Sedimentation, biologische Vorgänge usw. wesentlich beeinflusst.

Die Zusammenhänge, d. h. die Beziehungen zwischen Gewässerbelastung und Zustand, können als Transferfunktionen im allgemeinen Sinne verstanden werden. Die Kenntnis dieser Transferfunktionen bildet die Basis für die Quantifizierung der Gewässerschutzmassnahmen [1, 2]. Ihre Herleitung stellt eine recht komplexe Aufgabe dar.

In den letzten zwanzig Jahren wurden einige stehende Gewässer in der Schweiz sehr eingehend untersucht.

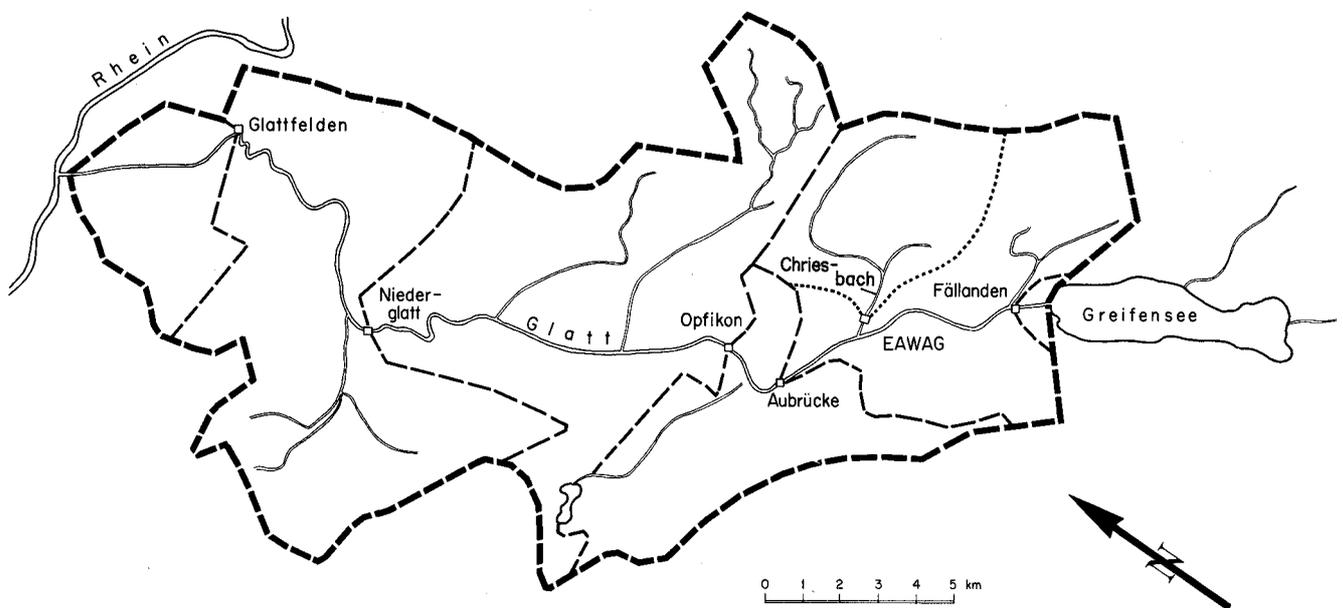


Fig. 1 Das Einzugsgebiet der Glatt unterhalb des Greifensees mit den Messstationen.

Aufgrund dieser Resultate kennt man heute wichtige Zusammenhänge zwischen Gewässerbelastung und Zustand [3]. Von den schweizerischen Fliessgewässern hingegen fehlen diese Kenntnisse weitgehend. Umfassende Untersuchungen an Flüssen sind deshalb notwendig.

Als Untersuchungsobjekt für ein Fliessgewässer wurde der Fluss Glatt wegen seiner Lage und seiner starken zivilisatorischen Belastung ausgewählt. Bereits 1933 untersuchte der damalige Kantonschemiker *Waser* [4] den Fluss nach einem ausgedehnten Programm. Rückblickend darf diese Arbeit als wegweisend für seitherige Flussuntersuchungen angesehen werden.

Mit dem vorliegenden Bericht soll vorab der chemische Zustand der Glatt bezüglich einer grossen Anzahl von Messgrössen charakterisiert werden. Daraus können erste Schlussfolgerungen gezogen werden. In weiteren Arbeiten sollen die Themenkreise «Stoff-Frachten» und «Schwermetalle» behandelt werden.

Zur Untersuchung gelangten ausschliesslich Wasserproben. Die Fluss-Sedimente, die Abflüsse von Kläranlagen und weitere Einleitungen wurden nicht analysiert.

2. EINZUGSGEBIET DER GLATT

Die Glatt ist der am nordwestlichen Ende des Greifensees ausfliessende Fluss, der bei Glattfelden in den Rhein mündet (siehe Fig. 1). Bis zu den im 19. Jahrhundert durchgeführten Meliorationen war das Tal ver-

sumpft. Durch die Expansion der Stadt Zürich und ihrer östlichen Vororte ist das mittlere Glattal besonders stark überbaut sowie zum Teil industrialisiert. Da sich im Einzugsgebiet vor allem kleine und mittlere Industriebetriebe aus verschiedenen Branchen angesiedelt haben, fallen deren Abwässer verteilt an und ihre Zusammensetzung ist daher heterogen.

Die mittlere Wasserführung der Glatt beträgt beim Ausfluss aus dem Greifensee ungefähr 3 bis 4 m³/s, bei der Einmündung in den Rhein 8 bis 10 m³/s, davon sind ungefähr 2 m³/s in Kläranlagen behandeltes Abwasser. Das Abflussregime der Glatt ist relativ ausgeglichen. Das Verhältnis der maximalen zu den minimalen Tagesmittelwerten beträgt im unteren Glattal ungefähr 10:1.

Die Untersuchungen beschränken sich auf fünf Stellen am Hauptfluss des Tales und auf eine Stelle am Chriesbach, einem Zufluss der Glatt (siehe Fig. 1). Der Chriesbach stellt ein mässig belastetes Fliessgewässer dar, das vor allem aus Grundwasser gespeisen wird. Die mittlere Wasserführung beträgt ungefähr 1 m³/s.

3. ZUR METHODIK

3.1 Probenahme

In Tabelle 1 sind die Untersuchungsstellen aufgeführt. Die Wahl der Probenahmeorte erfolgte nach folgenden Kriterien:

Tab. 1 Charakteristika des Einzugsgebietes der Glatt unterhalb des Greifensees.

Einzugsgebiet Probenahmestellen	Fluss km	Mittleres Gefälle in ‰	km ²	Einzugsgebiet Einwohner (Schätzung 1973)	Prozentualer Anteil der an Kläranlagen ange- schlossenen Einwohner [8] Stand 1973 (Schätzung)		
					total	normal- belastete ARA	über- belastete ARA
<i>Greifensee</i>			201	72 000			
<i>Glatt (Greifensee)</i>	0	0,25	4,5	0	—	—	—
Fällanden	1,0	1-2	70,5	57 000	88	57	31
Aubrücke	8,3	1	35,4	96 000	95	95	0
Opfikon	10,5	0,6-0,8	64,9	43 000	83	69	14
Niederglatt	21,7	2-4	66,9	35 000	76	26	50
Glattfelden	30,8	7	20,3	4 000	52	52	0
(Rheinmündung) Total	35,8		262,5	235 000			
<i>Chriesbach</i> EAWAG	Einmündung in die Glatt oberhalb Aubrücke						

- Charakteristische Teilgebiete bezüglich Bevölkerung bzw. Kläranlagen im Einzugsgebiet, Zuflüsse und Gefälle bzw. Fließgeschwindigkeit;
- Gleichmässige Durchmischung des Wassers im Längs- und Querprofil des kanalisierten Flussbetts;
- Möglichkeit der Probenahme vom Ufer aus; Zufahrt zur Probenahmestelle.

In der Regel wurde pro Woche bei jeder Stelle eine Stichprobe (als Schöpfprobe) erhoben. Aus arbeitstechnischen Gründen fielen die Probenahmen auf die Vor- und Nachmittage, vor allem zu Beginn der Woche.

Am Probenahmeort wurde die Wassertemperatur gemessen und die Trübung und Farbe des Wassers beurteilt. Für die Metalluntersuchungen mussten die Proben sofort mit Salpetersäure konserviert werden, die übrigen Proben wurden bis zur Analyse bei 1–4° C aufbewahrt.

3.2 Untersuchungsmethoden

Die Analysenmethoden für die untersuchten Komponenten entsprechen jenen, die im Schweizerischen Lebensmittelbuch [5] bzw. in den Richtlinien für die Untersuchung von Abwasser [6] aufgeführt sind. Die Metallbestimmungen erfolgten mittels Atomabsorption. Der organische Kohlenstoff wurde in den angesäuerten Proben mit Hilfe des Beckman TOC-Analyzers bestimmt. Die Analyse des chemischen Sauerstoffbedarfs erfolgte nach einer Modifikation für Oberflächenwässer der amerikanischen Standard Methods [7]. Die Sauerstoffzehrung in fünf Tagen wurde in 1:1 verdünnten Proben ohne zusätzliche Impfung gemessen. Diejenigen Anteile von Wasserinhaltsstoffen, welche ein Filter von 0,45 µm passieren, werden im folgenden als gelöst bezeichnet.

3.3 Statistische Auswertung der Daten

Das vorliegende Datenmaterial der Glattuntersuchung ist so umfangreich, dass es nur in einer zusammengefassten Form, d. h. als Resultat von statistischen Auswertungen wiedergegeben werden kann.

Mittelwert und Streuung

(mathematische Formeln siehe Anhang II)

Der Mittelwert stellt die einfachste Form der Datenkonzentration dar. Damit ein statistisch sinnvoller Mittelwert berechnet werden kann, muss die Verteilung des ihm zugrundeliegenden Datenmaterials bekannt sein.

Konzentrationsverteilungen vom Typus normal treten in der Regel nur vereinzelt auf. Bei den meisten Parametern zeichnen sich die gemessenen Konzentrationen dadurch

aus, dass kein Messwert unter einem Grenzwert (grösser oder gleich Null) liegt, und dass niedere Messwerte häufiger auftreten als hohe Werte. Zur Beschreibung dieses Phänomens eignet sich unter anderem die Häufigkeitsverteilung vom Typus log-normal. Die log-normale Verteilung geht durch logarithmische Transformation der Variablen in die Normalverteilung über. Während die Normalverteilung durch das arithmetische Mittel und die Standardabweichung charakterisiert wird, ist der mathematisch sinnvolle Mittelwert der log-normalen Verteilung das geometrische Mittel der Messwerte. Die Standardabweichung wird hier als Streuungsfaktor angegeben. Im folgenden wird jeweils vom Typus einer Verteilung gesprochen, weil die vorliegenden empirischen Verteilungen selten mit einer der beiden theoretischen Funktionen genau übereinstimmen. Es handelt sich immer nur um möglichst genaue Annäherungen. Andere Verteilungsfunktionen wurden nicht in Betracht gezogen.

Verteilungen vom Typus normal weisen auf additive Zusammenhänge hin. Verteilungen vom Typus log-normal deuten auf multiplikative Einflüsse hin; sie ergeben sich auch daraus, dass kleine Immissionen viel häufiger auftreten als grössere und ganz grosse Immissionen sehr selten sind.

Die Darstellung der Konzentrationsverteilungen kann graphisch durch die Häufigkeitsverteilungen (Einzel- oder Summen-) erfolgen (siehe Figur 2). In Tabellenform erweist sich die Angabe des 5%--, 50%- und 95%-Wertes als zweckmässig, siehe Anhang I.

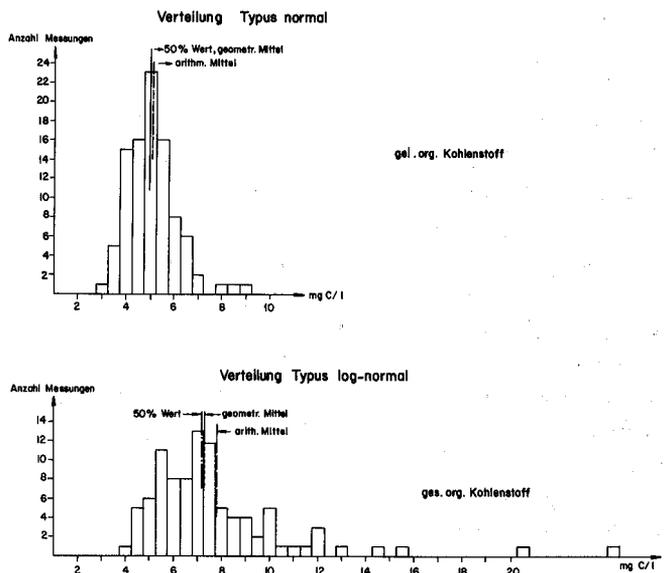


Fig. 2 Häufigkeitsverteilungen, dargestellt als Balkendiagramme. Beim gelösten organischen Kohlenstoff (DOC) liegt eine Verteilung vom Typus normal vor. Der 50%-Wert und das arithmetische Mittel fallen zusammen. Beim gesamt organischen Kohlenstoff (TOC) liegt eine Verteilung vom Typus log-normal vor. Der 50%-Wert und das geometrische Mittel fallen praktisch zusammen. Probenahmestelle Opfikon.

Gleitender Mittelwert

Der gleitende Mittelwert veranschaulicht den saisonalen Konzentrationsverlauf der Parameter; absolut für jede Messstelle, relativ für den gesamten Flusslauf.

Ziele und Problematik der weiteren Datenanalyse

Das Ziel der weiteren Datenanalyse ist es, Wechselwirkungen und Zusammenhänge aufzuzeigen. Dabei wird von der Annahme ausgegangen, dass die Messgrößen als Variable den Zustand des Flusses an jeder Messstelle charakterisieren. Bei der Festsetzung der Arbeitshypothesen müssen unter Umständen wesentliche Einschränkungen gemacht werden. Eine erste Vereinfachung stellt die globale Auswertung der zweijährigen Datenreihe dar, d. h. saisonale oder besondere Einflüsse werden nicht berücksichtigt.

Aufgrund der Resultate der Seenforschung muss bei einigen Parametern, vor allem den Stickstoff- und Phosphorkomponenten im Seeausfluss ein jahreszeitlich bedingter Rhythmus auftreten. Auch die biologischen Vorgänge im Fluss selber bewirken saisonale, d. h. durch die Wassertemperatur bedingte Konzentrationsänderungen. Hingegen darf angenommen werden, dass sich die Folgen der zivilisatorischen Belastung (auf die sich diese Arbeit konzentriert) praktisch von der Jahreszeit unabhängig äussern; im Einzugsgebiet existieren keine bedeutenden Industrien mit stark saisonalem Abwasseranfall.

Einfachkorrelationen

(mathematische Formeln siehe Anhang II)

Mit Hilfe der Einfachkorrelationen, ausgedrückt in Korrelationskoeffizienten, lassen sich die Zusammenhänge (als lineare Abhängigkeit) zwischen je zwei Parametern aus mehreren Beobachtungen aufzeigen; ein Beispiel dafür ist in Figur 3 dargestellt. Die statistische Signifikanz der Korrelationskoeffizienten geht aus deren Vergleich mit den Korrelationskoeffizienten einer Zufallsverteilung hervor. Man sagt, dass in 1 oder 0,1% der Fälle (sogenannte Irrtumswahrscheinlichkeit) trotz Überschreiten des entsprechenden, theoretisch berechneten Korrelationskoeffizienten keine lineare Korrelation vorliegen kann. Für eine gegebene Korrelation nimmt dieser Wert mit zunehmender Anzahl Messungen pro Variable ab.

Ein zusätzliches Beurteilungskriterium des Korrelationskoeffizienten bildet sein Varianzanteil, d. h. welcher Anteil der Varianz durch ihn erklärt wird.

Bei der Interpretation von Korrelationen ist zu beachten, dass nicht jede signifikante Korrelation einen kausalen Zusammenhang repräsentiert.

Eine fundierte Behandlung des Themas Mittelwerte und Verteilungen, Korrelationen sowie Tabellen zur Überprüfung der Signifikanz findet man in den Lehrbüchern der Statistik [9].

Korrelationen

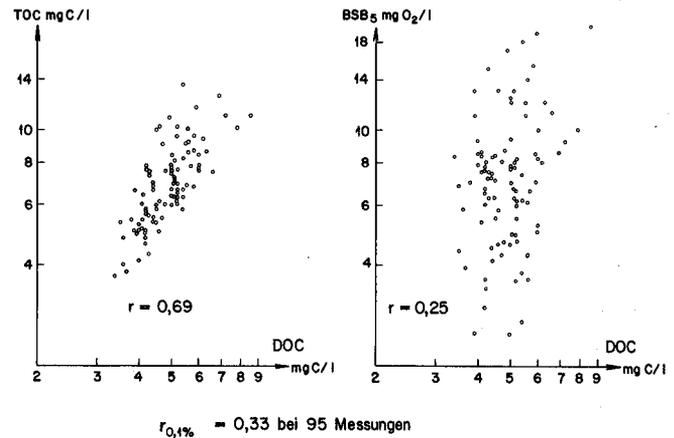


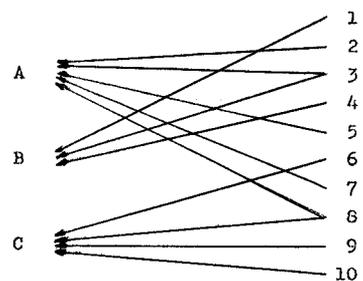
Fig. 3 Korrelationsdiagramme. Zwischen den Messgrößen gelöster organischer Kohlenstoff (DOC) und gesamter organischer Kohlenstoff (TOC) besteht eine signifikante Korrelation $r = 0,69$, 48% der Gesamtvarianz werden durch die lineare Abhängigkeit erklärt. Zwischen dem gelösten organischen Kohlenstoff und der Sauerstoffzehrung in 5 Tagen (BSB_5) besteht keine signifikante lineare Beziehung $r = 0,25$, $r_{0,1\%} = 0,33$. Probenahmestelle Niederglatt.

Faktorenanalyse

Die Faktorenanalyse ist eine statistische Methode, die versucht, eine Vielzahl von Messergebnissen zu ordnen und daraus Hypothesen für deren Ursache hervorzubringen. Die faktorenanalytische Hypothesenbildung geht von der Annahme aus, dass die messbaren chemischen und physikalischen Variablen nur Erscheinungsformen von einer meist kleineren Anzahl nicht messbarer Größen sind. Das Ziel der Faktorenanalyse besteht in der Herleitung dieser hypothetischen Größen aus den Messwerten.

Faktor
übergeordnete Einflussgrösse
hypothetischer Größen
nicht messbar
steht im Hintergrund

Variable
reelle Grösse
messbar
steht im Vordergrund



- Hypothese -

Die Beziehungen zwischen Faktoren und Variablen. Beispiel: Der Faktor C äussert sich dominant in den Variablen 6, 9 und 10 und partiell in der Variablen 8.

Ausgangspunkt für die Berechnung der Faktoren bildet die Korrelationsmatrix zwischen den Messgrößen. Eine gründliche Einführung in die Faktorenanalyse gibt das Buch von Ueberla [10].

4. RESULTATE UND DISKUSSION

Im Rahmen dieser Arbeit werden die Ergebnisse einer zweijährigen Messreihe als Ganzes dargestellt. Wie bereits in Abschnitt 3.3 erläutert wurde, kann die zivilisatorische Belastung der Glatt in guter Näherung unabhängig von der Jahreszeit angenommen werden. Da die definitiven Abflussmengenmessungen noch nicht vorliegen, können vorläufig keine ausführlichen Frachtberechnungen gemacht werden.

4.1 Mittelwerte und Streuung im Längsprofil

Im Anhang I sind die Messdaten für 26 Parameter zusammenfassend tabelliert, und zwar durch das Aufführen

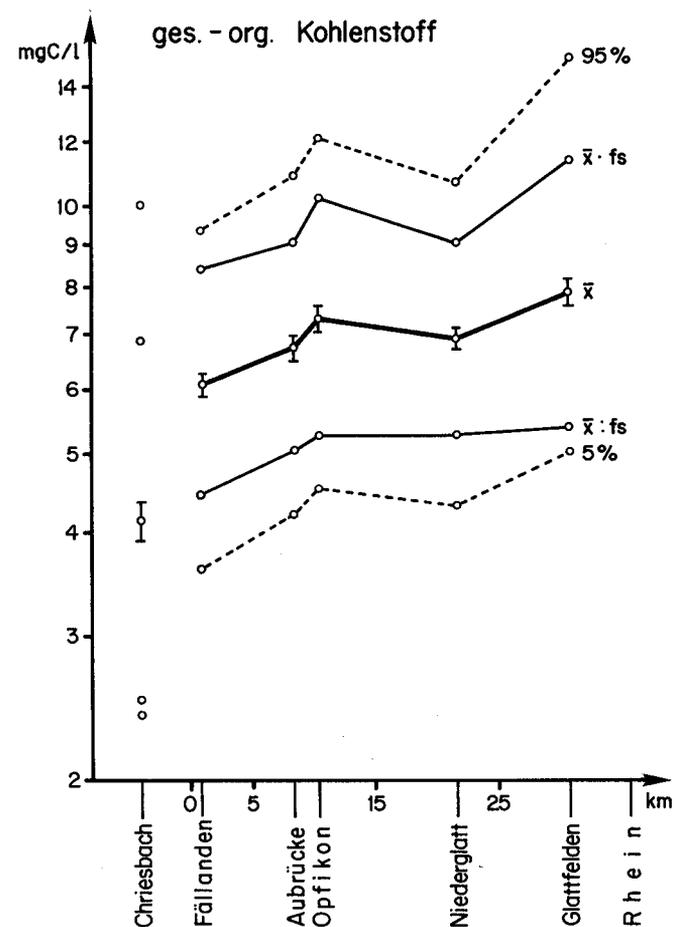


Fig. 4 Längsprofil der Konzentrationen des gesamtorganischen Kohlenstoffs in der Glatt. Geometrischer Zweijahresmittelwert, Streuungsfaktoren der Einzelmessung (fs) und des Mittelwertes (\bar{x}), 5%- und 95%-Wert der Summenhäufigkeitsverteilung vom Typus log-normal. 95 Messungen pro Station.

der 5%-, 50%- und 95%-Werte der Summenhäufigkeitsverteilungen, der Mittelwerte und der Streuung der Einzelmessung (Standardabweichung und Streuungsfaktor). Zusätzlich wird angegeben, welchem Typus der Verteilung die gemessenen Werte am besten entsprechen, und welcher Mittelwert (arithmetische oder geometrische) daher die Messreihe charakterisiert. Im Längsprofil der Glatt (siehe Figuren 4 bis 8) sind für einige Parameter die Resultate dieser statistischen Auswertungen graphisch dargestellt.

Organischer Kohlenstoff

Die Konzentration des gesamten organischen Kohlenstoffs (Figur 4) nimmt flussabwärts deutlich zu. Der Anstieg des geometrischen Mittels von 6,1 mg C/l in Fällanden auf 7,9 mg C/l in Glattfelden ist bei einer Streubreite des Mittelwertes von 0,2 bis 0,3 mg C/l signifikant. Die Abbildung zeigt auch die Streubreite der Einzelmessung, ausgedrückt im Streuungsfaktor.

Beispielsweise liegen in Niederglatt 90% der Messwerte in einem Bereich von 4,3 bis 10,7 mg C/l, d. h. 2,6 mg C/l unter und 3,8 mg C/l über dem geometrischen Mittel von 6,8 mg C/l. Diese Asymmetrie bezüglich des Mittels ist eine charakteristische Eigenschaft der Verteilung vom Typus log-normal, sie wird in einer logarithmischen Darstellung symmetrisch.

Der 95%-Wert sagt auch aus, dass in der zweijährigen Messreihe von den 95 Messungen 5 Werte im Seeausfluss über 9,3 mg C/l und in Glattfelden über 15,2 mg C/l liegen.

Beim gelösten organischen Kohlenstoff findet man ähnliche Verhältnisse (siehe Figur 5). Die Zunahme des Mittelwertes erweist sich von Fällanden (4,7 mg C/l) nach Opfikon (5,1 mg C/l) als signifikant. Die Verteilung wird am besten durch eine solche vom Typus normal wiedergegeben; ein Beispiel dafür ist in Figur 2 dargestellt.

Der Chriesbach, ein mässig belasteter Zufluss der Glatt, weist im Mittel einen niedrigeren Kohlenstoffgehalt auf als die Glatt beim Ausfluss aus dem Greifensee. Es darf angenommen werden, dass diese Tatsache auch für die meisten andern Zuflüsse der Glatt zutrifft, da die Abwassereinleitungen vorwiegend in den Hauptfluss erfolgen.

Der extrem eutrophe Zustand des Greifensees, d. h. seine hohe Nettoproduktion von biologischem Material, verursacht den relativ hohen Kohlenstoffgehalt* im Seeausfluss. Im Vergleich dazu betragen im Rhein bei Schaffhausen (entspricht dem Auslauf aus dem Untersee) die Jahresmittel des gelösten organischen Kohlenstoffs 1,7 bis 1,9 mg C/l [11]. Das Ergebnis einer einfachen Mischungsrechnung (Annahmen über Abflüsse, siehe

* Erste Versuche haben ergeben, dass vom gelösten organischen Kohlenstoff im Seeausfluss nur ein kleiner Anteil biologisch leicht abbaubar ist.

gel.-org. Kohlenstoff

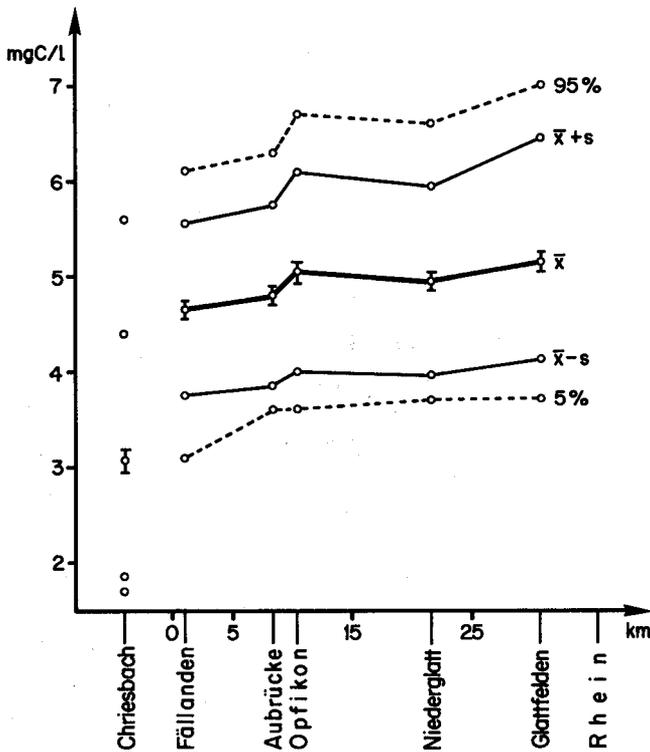


Fig. 5 Längsprofil der Konzentrationen des gelösten organischen Kohlenstoffs in der Glatt. Arithmetischer Zweijahresmittelwert, Standardabweichungen der Einzelmessung (s) und des Mittelwertes (\bar{x}), 5%- und 95%-Wert der Summenhäufigkeitsverteilung vom Typus normal. 95 Messungen pro Station.

Kapitel 2) zeigt ferner, dass durch die Einleitung von biologisch gereinigtem Abwasser die Konzentration des organischen Kohlenstoffs in der Glatt nur in der Gröszenordnung von 10 bis 50% zunehmen kann.

Aus den beiden erwähnten Gründen äussert sich die zivilisatorische Belastung der Glatt in der Konzentration der Summenparameter organischer Kohlenstoff nur in einer mittleren Zunahme von 28% beim gesamten und von 13% beim gelösten organischen Kohlenstoff. Die Frachtzunahme flussabwärts ist daher hauptsächlich durch die Zunahme der Wassermenge bedingt (im Mittel zirka 150%).

Phosphor

Das Längsprofil des Gesamtphosphors zeigt ein anderes Bild (siehe Figur 6). Die geometrischen Mittel der Phosphor-Konzentrationen verdoppeln sich nahezu von Fällanden (0,33 mg P/l) bis Aubrücke (0,63 mg P/l) und von Aubrücke bis Opfikon (1,07 mg P/l). Die weitere Zunahme flussabwärts bis Glattfelden (1,42 mg P/l) ist nicht mehr so augenfällig (siehe Anhang I). Dabei erhöht sich

der mittlere Anteil des Orthophosphats von 32% bei Fällanden auf 65 bis 75% unterhalb von Aubrücke. Die saisonal bedingten Konzentrationsschwankungen des Phosphors im Ausfluss des Greifensees äussern sich in einem, im Vergleich zu den andern Probenahmeorten, grösseren Streuungsfaktor.

Die starke zivilisatorische Phosphorbelastung der Glatt äussert sich sehr eindrücklich im 4,3fachen Anstieg der Phosphorkonzentration vom Ausfluss des Greifensees bis nach Glattfelden. Aufgrund einer Mischungsrechnung, analog wie für den organischen Kohlenstoff durchgeführt, erscheint der gemessene Konzentrationsanstieg als plausibel.

Aus der Abwasserreinigungstechnik ist bekannt, dass die Ablaufkonzentration einer biologischen Kläranlage mit zusätzlicher Phosphatentfernung ungefähr 1 mg P/l beträgt. Die gemessenen mittleren Phosphorkonzentrationen in der Glatt unterhalb Opfikon müssen deshalb als sehr hoch bezeichnet werden.

Zink

Das Längsprofil der säurelöslichen Anteile von Zink (siehe Figur 7) zeigt einen dem Profil des Gesamtphosphors ähnlichen Verlauf.

ges. Phosphor

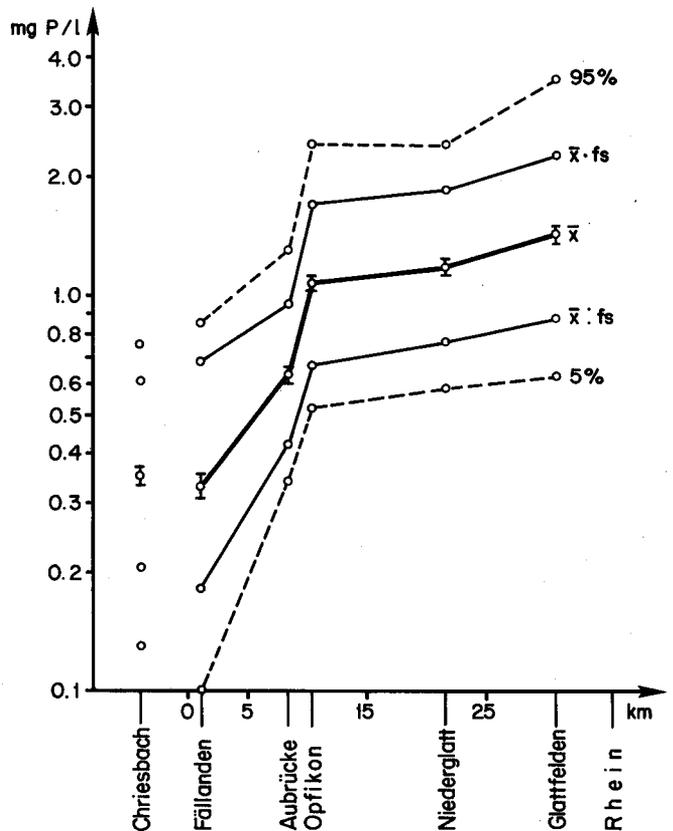


Fig. 6 Längsprofil der Konzentrationen des Gesamtphosphors in der Glatt. Weitere Erläuterungen siehe Figur 4.

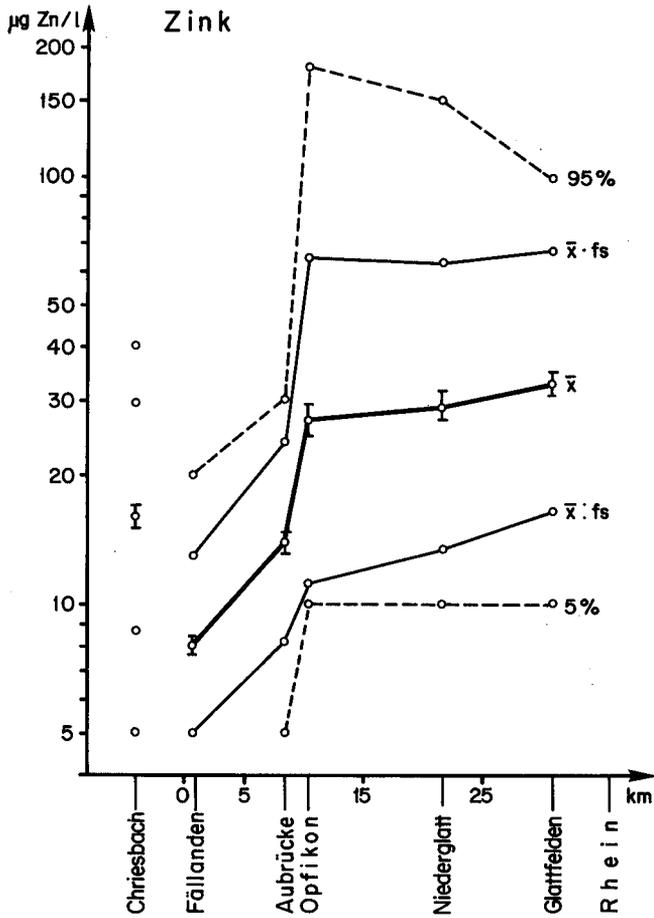


Fig. 7 Längsprofil der Zink-Konzentrationen (säurelösliche Anteile) in der Glatt. Weitere Erläuterungen siehe Figur 4.

Leitfähigkeit

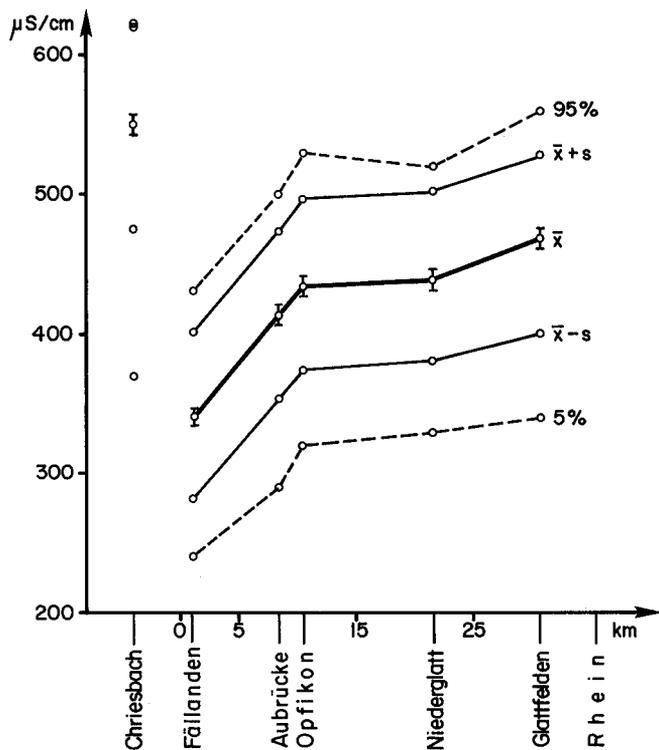


Fig. 8 Längsprofil der elektrischen Leitfähigkeit des Wassers in der Glatt. Weitere Erläuterungen siehe Figur 5.

Um eine Berechnung der geometrischen Mittelwerte zu ermöglichen, wurden die unter der analytischen Erfassungsgrenze von $10 \mu\text{g Zn/l}$ liegenden Werte als die Hälfte dieser Grenze angenommen.

Die Häufigkeitsverteilung von Zink exemplifiziert deutlich jene vom Typus log-normal. Die Spannweite zwischen dem 5%- und 95%-Wert beträgt bei Opfikon $170 \mu\text{g Zn/l}$, d. h. 17mal die Konzentration des 5%-Wertes; die Streuung der Einzelmessung (ausgedrückt durch den Streuungsfaktor) um das geometrische Mittel von $27 \mu\text{g Zn/l}$ variiert von 11 bis $65 \mu\text{g Zn/l}$. Hohe Zinkkonzentrationen (über $0,1 \text{ mg Zn/l}$) treten am häufigsten bei Opfikon und Niederglatt auf. Daraus kann geschlossen werden, dass der Anstieg der mittleren Zinkkonzentration in der Glatt durch die zivilisatorische Belastung bedingt ist. Die hohen Werte für Zink dürfen im Vergleich zu denjenigen, die in ausländischen Gewässern [11] gefunden werden, als niedrig bezeichnet werden.

Geochemische Parameter

Die geochemisch beeinflussten Grössen, die Karbonathärte und der Calcium- und Magnesiumgehalt, unterscheiden sich in ihrem Verhalten deutlich von den bisher diskutierten Komponenten. Als Summenparameter für die ersteren ist in Figur 8 die elektrische Leitfähigkeit aufgezeichnet. Der Chriesbach, der vor allem aus dem Grundwasser gespeist wird, weist einen sehr hohen Gehalt an Calcium und Bikarbonat auf, wogegen sich die mittlere Magnesiumkonzentration nur unwesentlich von den Konzentrationen anderer Messstellen unterscheidet. Unterhalb des Einflusses des Chriesbaches nehmen die Gesamt- und Karbonathärte des Glattwassers nur noch wenig zu. Die Häufigkeitsverteilungen der geochemischen Parameter, einschliesslich der Leitfähigkeit, heben sich bezüglich ihrer Asymmetrie von allen andern Grössen ab. Niedere Konzentrationen treten häufiger auf als hohe Werte. Dieses Phänomen beruht auf der Verdünnung des Flusswassers durch Niederschläge. Im Ausfluss des Greifensees wie im Chriesbach ist das Wasser an Calciumcarbonat übersättigt [12]. Weiter findet man, dass Kaolinit als feste Phase die Löslichkeit von Natrium, Kalium und Kieselsäure dominierend bestimmt [12].

Zusammenfassung

Die Längsprofile der Konzentrationen in den Figuren 4 bis 8 exemplifizieren die auftretenden Konzentrationsverhältnisse der Wasserinhaltsstoffe in der Glatt. Die meisten der nicht besprochenen, aber in Anhang I aufgeführten Parameter, lassen sich in die diskutierten Schemata einordnen.

Aus der Zusammenstellung der Erhöhungen der Konzentrationsmittelwerte jener Parameter, die in irgendeiner

Tab. 2 Die zivilisatorische Belastung der Glatt, ausgedrückt in der Zunahme der mittleren Konzentrationen.

Parameter	Einheit	Zweijahresmittelwerte		Relative Zunahme % - %	Absolute Zunahme
		Fällanden	Glattfelden		
gesamt org. C	mg C/l	6,1	7,9	30	1,8
gel. org. C	mg C/l	4,7	5,3	13	0,6
CSB gesamt	mg O ₂ /l	20,5	27,0	32	6,5
CSB gelöst	mg O ₂ /l	14,5	18,0	24	3,5
Sauerstoffzehrung in 5 Tagen	mg O ₂ /l	3,9	8,9	128*	5,0*
KMnO ₄	mg KMnO ₄ /l	19,5	24,0	23	4,5
Gesamt-Phosphor	mg P/l	0,33	1,42	330	1,09
o-Phosphat	mg P/l	0,11	1,07	870	0,96
Nitrit	mg N/l	0,03	0,14	370	0,11
Nitrat	mg N/l	0,75	3,4	350	2,65
Ammonium	mg N/l	0,42	1,4	230	1,0
Schwebstoffe	mg/l	4,8	15	220	10,2
Eisen	µg Fe/l	33	115	250	82
Zink	µg Zn/l	8	33	310	25
Chlorid	mg Cl/l	19,3	27,6	43	8,3
Natrium	mg Na/l	12,0**	18,8**	57	6,8
Kalium	mg K/l	3,5**	5,7**	63	2,2
Temperatur	°C	11,9	12,1		0,2
Wassermenge	m ³ /s	3-4	8-10	~150	~5-6

* Ab Aubrücke beträgt die Erhöhung noch 24% bzw. 1,7 mg O₂/l.

** Einjahresmittelwert.

Form die zivilisatorische Belastung der Glatt widerspiegeln (siehe Tabelle 2), lassen sich einige interessante Tatsachen ableiten:

1. Die Konzentrationen der organischen Kollektivparameter erhöhen sich von Fällanden (für die Sauerstoffzehrung in fünf Tagen ab Aubrücke) bis Glattfelden um 13 bis 32%. Demgegenüber vergrössern sich die Gehalte an Stickstoff-, Phosphor- und der Schwermetallverbindungen um einen Faktor 3,3 bis 4,7, an Orthophosphat sogar um einen Faktor 10. Aufgrund von Mischungsrechnungen mit einfachen Annahmen scheinen diese unterschiedlichen Konzentrationszunahmen plausibel.

2. Der Frachtzuwachs flussabwärts, d. h. die Belastung des Flusses bezüglich der organischen Inhaltsstoffe, ist vor allem durch die Zunahme der Abflussmenge bedingt (Faktor 2 bis 3). Bei den Phosphor-, Stickstoff- und Schwermetallverbindungen hingegen resultiert aus dem Produkt von Konzentration und Abflussmenge eine Frachtvergrösserung um einen Faktor 8 bis 12, beim Orthophosphat nimmt die Phosphor-Fracht sogar 24mal zu.

3. Die Wirkungsgrade der Kläranlagen (mechanische und biologische Reinigungsstufen im Einzugsgebiet der Glatt unterhalb des Greifensees) bezüglich der Elimination einzelner Stoffgruppen widerspiegeln sich direkt in den relativen Konzentrationszunahmen. Die organischen Wasserinhaltsstoffe werden im allgemeinen gut eliminiert (60 bis 90%), während die Stickstoff- und Phosphorverbindungen

nur zu einem geringen Teil (20-35%) in den Kläranlagen entfernt werden. Hingegen erhöhen sich die Konzentrationen der praktisch nicht eliminierbaren Kalium-, Natrium- und Chloridionen flussabwärts relativ nicht so stark wie jene der Nährstoffe. Diese Tatsache erklärt sich dadurch, dass die Frachten dieser Ionen im Rohabwasser absolut gesehen beträchtlich sind, relativ betrachtet hingegen in der gleichen Grössenordnung liegen wie jene im Seeausfluss.

4. Diese Untersuchungen weisen einmal mehr auf die grosse zivilisatorische Belastung bezüglich der Nährstoffe, insbesondere des Phosphors, hin.

Gleitender Mittelwert

Für die Berechnung des gleitenden Mittelwertes an jedem Messtag wurden je die zwei zeitlich vorausgehenden und die zwei nachfolgenden Messwerte mit jenem des Stichtages verwendet. Damit resultiert gewissermassen ein gleitender Monatsmittelwert.

Figur 9, gleitender Monatsmittelwert für die Nitritkonzentration, stellt ein typisches Beispiel für solche Graphiken dar. Einmal heben sich die saisonalen Schwankungen deutlich ab, hohe Nitritkonzentrationen werden im Sommer für alle Stationen ausser Fällanden gefunden. Im Seeausfluss treten je Ende Mai/anfangs Juni und Ende Oktober/anfangs November, d. h. ungefähr 6 Wochen nach Beginn der Sommerstagnation und am Ende

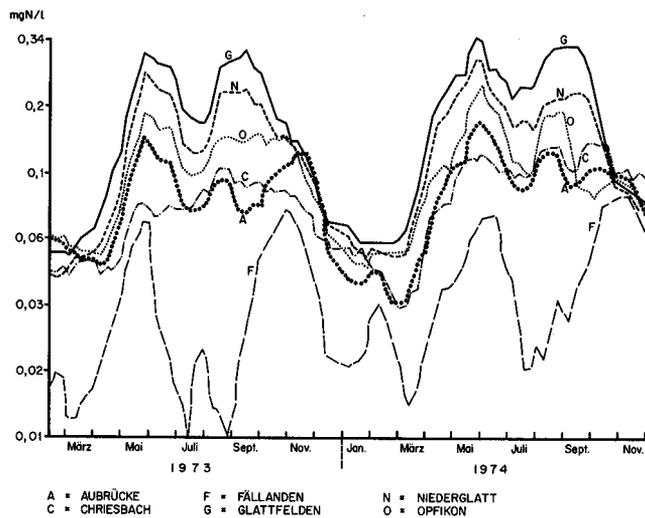


Fig. 9 Gleitender Mittelwert (Monatsmittelwert) der Nitritkonzentrationen in der Glatt. Unterschiede der saisonalen Schwankungen im Seeausfluss und bei den anderen Messstationen. Ähnlichkeit der Längsprofile.

dieser Periode, die Maxima auf. Weiter bleibt die Rangfolge der Konzentrationen im Längsprofil der Glatt über die zwei Jahre hinweg praktisch gleich. Somit darf den Jahresmittelwerten trotz der grossen Streuung der Einzelmessungen eine sinnvolle Bedeutung zugesprochen werden.

4.2 Einfachkorrelationen

Das primäre Resultat der Korrelationsrechnung der zwei-jährigen Messreihen besteht aus einer Vielzahl von linearen Korrelationskoeffizienten, welche die Beziehungen zwischen allen möglichen Paaren von Parametern für jede Messstation getrennt nachweisen; zwei Beispiele sind in Figur 3 dargestellt. Bei 95 Messwerten pro Parameter darf bereits ein Korrelationskoeffizient von 0,33 als signifikant (mit einer Irrtumswahrscheinlichkeit von 0,1%) bezeichnet werden, obwohl dieser nur 11% der Gesamtvarianz erklären kann.

Wie in Kapitel 3.3 dargelegt wurde, sollen sich die weiteren Datenanalysen auf die dominierenden Wechselwirkungen beschränken. Deshalb interessieren uns nur jene signifikanten Korrelationen, die bei den meisten Messstellen vorkommen. Sie sind in Tabelle 3 zusammengestellt.

Bei der Interpretation der Einfachkorrelationen muss die Einschränkung beachtet werden, dass eine signifikante Korrelation nicht immer auf einen kausalen Zusammenhang hinweist. Falls sich zwei Parameter in bezug auf ihren Tages- oder Wochenzyklus ähnlich verhalten, weisen sie automatisch auch untereinander eine enge Beziehung auf.

Tab. 3 Zusammenfassung der signifikanten linearen Korrelationen für die zweijährige Messreihe von 20 Parametern.

Parameter (Abkürzung)	signifikante lineare Korrelation			
	bei allen 6 Messstellen	bei 5 Messstellen nur Glatt	bei 4 Messstellen Chriesbach + Glatt ab Aubrücke	bei 4 Messstellen Glatt ab Aubrücke
Wassertemperatur (T)	—	TOC, DOC, CSB-ges, KMnO ₄ , - Leitf, - NH ₄	NO ₂	-O ₂
ges. org. Kohlenstoff (TOC)	DOC, CSB-ges, KMnO ₄ , SS, BSB ₅ , CSB-gel	T	—	NO ₂
gel. org. Kohlenstoff (DOC)	TOC, CSB-ges, CSB-gel	T	—	NO ₂
Chem. Sauerstoffbedarf gesamt (CSB-ges)	TOC, CSB-gel, KMnO ₄ , BSB ₅ , SS, DOC	T	—	—
Chem. Sauerstoffbedarf gelöst (CSB-gel)	TOC, CSB-ges, BSB ₅ , SS	—	—	—
KMnO ₄ -Verbrauch (KMnO ₄)	TOC, CSB-ges, BSB ₅ , SS	T	Fe	—
Sauerstoffzehrung in 5 Tagen (BSB ₅)	CSB, TOC, KMnO ₄	—	—	—
Ortho-phosphat (o-PO ₄)	ges-P	NH ₄ , Leitf	—	Cl
gesamt-Phosphor (ges-P)	o-PO ₄	NH ₄ , Leitf	—	Cl
Ammonium (NH ₄)	—	o-PO ₄ , ges-P, - T, Leitf	—	Cl
Nitrit (NO ₂)	—	—	T, - O ₂	TOC, DOC
Nitrat (NO ₃)	Leitf	—	—	—
Chlorid (Cl)	—	—	Leitf	o-PO ₄ , ges-P, NH ₄
Kieselsäure (Si)	—	—	—	—
Schwebstoffe (SS)	TOC, CSB-ges, KMnO ₄	—	Fe	—
Eisen (Fe)	—	—	SS, KMnO ₄	—
Zink (Zn)	—	—	—	—
Sauerstoff (O ₂)	—	—	- NO ₂	- T, Leitf
Leitfähigkeit (Leitf)	NO ₃	- T, ges-P, o-PO ₄ , NH ₄	Cl	O ₂
pH-Wert (pH)	—	—	—	—

Da sich das vorliegende Datenmaterial nicht für die Charakterisierung dieser Art von Fluktuationen eignet, kann deren Einfluss auf die Korrelationskoeffizienten nicht ermittelt werden. Erste Resultate von kontinuierlichen Messungen zeigen jedoch, dass die Tagesschwankungen bei den meisten Parametern im Vergleich zu den Streubreiten der Mittelwerte gering sind.

Die Gruppeneinteilung der Messstellen in Tabelle 3 drückt bereits einen wichtigen Befund aus, nämlich den, dass bei allen Probenahmeorten einige signifikante Korrelationen zwischen den gleichen Grössen auftreten, hingegen andere Korrelationskoeffizienten im Chriesbach oder/und in der Glatt bei Fällanden nicht als signifikant erscheinen. Die meisten Parameter verhalten sich ab Aubrücke sehr ähnlich zueinander, d. h. der Charakter des Flusses ändert sich noch quantitativ jedoch nicht mehr qualitativ.

Im Unterschied zu den andern Messstellen sind im Seeausfluss mehr als die Hälfte der Korrelationskoeffizienten signifikant bezüglich der 1% Irrtumswahrscheinlichkeit und ein Viertel weisen einen Wert von mehr als 0,5 auf. Von den zwanzig Parametern korrelieren Zink, Eisen, Nitrit und Sauerstoff praktisch nicht, Kieselsäure und Chlorid nur vereinzelt mit den andern Komponenten. Die Konzentrationen der übrigen Parameter weisen somit enge lineare Beziehungen auf, die zum Teil bei den andern Messstellen nicht mehr existieren.

Wie zu erwarten ist, korrelieren die organischen Kollektivparameter einerseits und die Phosphorkomponenten andererseits bei allen Messstationen je unter sich gut. Die negative Korrelation der Sauerstoffkonzentration zur Wassertemperatur ab Aubrücke beruht auf dem Löslichkeitsgesetz für Sauerstoff in Wasser.

Die Phosphorkomponenten weisen bei fünf Messstellen eine enge Beziehung mit Ammonium und ab Aubrücke auch mit Chlorid auf. Dieser Befund deutet auf die gleiche Quelle der Belastung hin. Die Korrelation dieser Grössen zur Leitfähigkeit beruht jedoch auf einer anderen Ursache, die ohne Einbezug der Abflussmenge vorläufig nicht erklärt werden kann.

Die Nitritkonzentrationen verlaufen nach den Einleitungen von Abwasser parallel zu den organischen Wasserinhaltsstoffen, womit auch die Ursache für die Erhöhung von Nitrit in der Glatt erklärt werden könnte. Die gleichzeitige Korrelation mit der Temperatur weist auf biologische Einflüsse hin.

Die linearen Beziehungen des totalen organischen Kohlenstoffs und des Eisens zu den Schwebstoffen zeigt, dass die suspendierten Stoffe organische und mineralische Anteile enthalten. Zink hingegen tritt in der Glatt nicht mit diesen Stoffen auf und korreliert auch nicht mit andern Parametern. Einzig im Chriesbach findet man die in andern Flüssen oft festgestellte enge Beziehung zwischen Zink und den Schwebstoffen.

Die pH-Werte und die Kieselsäurekonzentrationen verhalten sich unabhängig von den andern Parametern.

Tab. 4 Zusammenfassung von Parameter in Faktoren (Einflussgrössen).

Messstelle	Faktor enthält die Parameter = Einflussgrösse
Chriesbach	<ul style="list-style-type: none"> - TOC, DOC, CSB-ges, KMnO₄, SS, CSB-gel, Fe, BSB₅ - o-PO₄, ges-P, NO₂ - T, - Cl, pH - Leitf, NO₃ - - O₂, NH₄, Si, Zn
Fällanden	<ul style="list-style-type: none"> - CSB-ges, O₂, TOC, pH, DOC, BSB₅, SS, - NH₄, T, KMnO₄, CSB-gel - Leitf, NO₃, o-PO₄, ges-P, - T - NO₂, - Si - Fe, Zn
Aubrücke	<ul style="list-style-type: none"> - CSB-ges, TOC, DOC, T, NO₂, CSB-gel, KMnO₄ - NH₄, o-PO₄, Cl, Leitf, ges-P - Fe, SS, Zn, KMnO₄ - Leitf, O₂, NO₃
Opfikon	<ul style="list-style-type: none"> - SS, Fe, CSB-ges, KMnO₄, TOC, BSB₅ - o-PO₄, ges-P, NH₄, Cl, BSB₅ - T, pH, NO₂, DOC, TOC - NO₃, O₂, Leitf
Niederglatt	<ul style="list-style-type: none"> - CSB-ges, TOC, BSB₅, KMnO₄, DOC, CSB-gel, SS, Fe - o-PO₄, ges-P, Cl, NH₄, - Fe - T, NO₂, pH - O₂, NO₃, Leitf
Glattfelden	<ul style="list-style-type: none"> - SS, TOC, KMnO₄, Fe, CSB-ges - o-PO₄, ges-P, Cl, NH₄, CSB-gel, DOC, NO₂ - T, NO₂, pH, - NH₄, - Zn - NO₃, Leitf, O₂

4.3 Faktorenanalyse

Wie die Zusammenstellung in Tabelle 3 zeigt, korrelieren einige Parameter mit einer Vielzahl von andern Komponenten, wogegen sich andere linear unabhängig verhalten. Mit Hilfe der Faktorenanalyse kann nun gewissermassen eine Gruppeneinteilung vorgenommen werden. Leider gibt es keine eindeutigen mathematischen Kriterien, sondern nur verschiedene Hinweise darauf, wie diese Zuordnung vorgenommen werden soll [10]. Die Faktorenanalyse strebt zudem eine Vereinfachung der Korrelationsmatrix an und nimmt dabei einen gewissen Informationsverlust in Kauf.

In Tabelle 4 sind die Faktorenmuster für die einzelnen Messstellen zusammengefasst. In Übereinstimmung mit Tabelle 3 resultieren für die Probenahmestellen Fällanden und Chriesbach im Vergleich zu den übrigen Stellen andere Faktorenmuster. Einige dieser Faktoren können recht gut interpretiert werden.

Bei allen Messstellen tritt eine Einflussgrösse auf, welche

die Parameter organische Inhaltsstoffe, Schwebstoffe und Eisen enthält. Diese Messwerte sind demnach miteinander verknüpft und können somit die gleiche Ursache (Quelle) haben. In Fällanden enthält dieser Faktor noch die Größen Sauerstoff, Temperatur, pH-Wert und Ammonium mit umgekehrten Vorzeichen. Die Vorgänge im Greifensee, einschliesslich die saisonal bedingten Vorgänge, verbinden alle diese Komponenten.

Ab Aubrücke treten zwei typische Faktoren in Erscheinung: Der erste umfasst die Phosphor-Komponenten, Ammonium und Chlorid. Diese Einflussgrösse repräsentiert eine zivilisatorische Belastung der Glatt durch mechanisch und biologisch geklärtes und nährstoffhaltiges Abwasser. Die Auswirkungen dieser Einleitungen von Abwasser auf die gemessenen Konzentrationen in der Glatt verlaufen nur innerhalb von Gruppen, nicht aber für alle Wasserinhaltsstoffe, parallel. Von Bedeutung und als Bestätigung der Ausführungen in Kapitel 4.1 erscheint der Befund, dass die organischen Inhaltsstoffe einerseits und die Nährstoffe andererseits nicht miteinander gekoppelt sind.

Im zweiten Faktor treten die Parameter Nitrat, Sauerstoff und Leitfähigkeit auf. Niedere Leitfähigkeiten werden im Sommer und vereinzelt bei hoher Wasserführung der Glatt registriert. Aufgrund der Einfachkorrelationen und der relativen Sauerstoffsättigung ist bekannt, dass einerseits die gemessenen Sauerstoffkonzentrationen ab Aubrücke negativ mit der Temperatur und positiv mit der Leitfähigkeit korrelieren, und dass andererseits das Glattwasser ungefähr mit Sauerstoff gesättigt ist. Der zweite Faktor zeigt somit die saisonal bedingten Änderungen der drei miteinander gekoppelten Parameter.

Ein weiterer Faktor, welcher Nitrit, die Wassertemperatur oder den pH-Wert und vereinzelt weitere Parameter enthält, tritt ab Opfikon in Erscheinung. Bei dieser Einflussgrösse erweist sich vor allem die Kopplung der Temperatur mit Nitrit als sehr eng. Da Temperaturabhängigkeiten vielfach auf biologische Vorgänge hinweisen, könnte dieser Faktor dadurch erklärt werden. Allerdings ist vorläufig nicht klar, welche mikrobiologischen Prozesse sich hier dominant auswirken, bzw. welche Vorgänge sich überlappen könnten. Obwohl Nitrit und Wassertemperatur paarweise gut mit den organischen Kollektivparametern korrelieren, tritt diese Kopplung bei der Faktorenanalyse ab Opfikon nur noch schwach auf. Bei der Messstelle Aubrücke hingegen ist sie vorhanden.

Bei den Stationen Fällanden und Chriesbach treten Faktoren auf, die teilweise mit den weiter flussabwärts auftretenden Faktoren vergleichbar sind und somit ähnlich interpretiert werden können. Die Bedeutung von einigen wenigen Faktoren ist unklar, z. B. jene die den Parameter Kieselsäure enthalten.

Das Resultat der Faktorenanalyse illustriert nochmals deutlich die Änderung des Charakters der Glatt vom Seeausfluss bis zur Mündung in den Rhein und zeigt zudem die Eigenheiten des Chriesbachs.

4.4 Die Zustandsänderung der Glatt in den letzten 40 Jahren

Die ausführliche Untersuchung der Glatt vom Jahre 1933 [4] liefert eine gute Grundlage für vergleichende Betrachtungen. Zusätzlich liegen bisher unveröffentlichte Messdaten aus den Jahren 1950/51 vor, die uns vom Laboratorium des Kantons Zürich [13] freundlicherweise überlassen wurden.

Bei der Interpretation der Zustandsänderung des Flusses müssen auch die Bevölkerungszunahme, die Art des Abwassers, der Stand der Abwasserreinigung und die industrielle Entwicklung im Einzugsgebiet in die Betrachtungen einbezogen werden.

1933 existierten noch keine kommunalen Kläranlagen im Einzugsgebiet, und nur einige der grösseren Gemeinden besaßen ein Teilkanalisationssystem, durch das die Abwässer direkt in die Glatt eingeleitet wurden [4]. Die dem Fluss zugeführten Schmutzstoffe waren damals überwiegend häuslicher und landwirtschaftlicher Herkunft. Die industriellen Betriebe konzentrierten sich damals auf den mittleren Teil des Glattals.

Die Veränderung der Einwohnerzahlen [14] in den vier Teileinzugsgebieten sind in Tabelle 5 zusammengestellt. Über den Stand der Abwasserreinigung im Jahre 1973 gibt Tabelle 1 Auskunft. Die der Glatt zugeführten Verunreinigungen aus der Industrie (über Kläranlagen) und der Oberflächenabschwemmung aus den Siedlungen sind nun frachtmässig gleich gross oder zum Teil grösser als die entsprechenden Anteile des rein häuslichen Abwassers. Die Figuren 10, 11 und 12 zeigen eindrücklich, wie bereits 1933 eine erhebliche zivilisatorische Belastung der Glatt durch das Ballungszentrum im mittleren Talteil resultierte. Als Folge des Selbstreinigungsvermögens des Flusses, der Verdünnung durch Zuflüsse und der schwachen Belastung durch das untere Glattal sanken die mittleren Ammoniumkonzentrationen (siehe Figur 10) und die Sauerstoffzehrung in 5 Tagen (siehe Figur 11) flussabwärts

Tab. 5 Die Entwicklung der Bevölkerung im Einzugsgebiet der Glatt unterhalb des Greifensees.

Probenahmestellen	Fluss km	Einwohner in den entsprechenden Einzugsgebieten (geschätzt)		
		1933	1950/51	1973/74
Fällanden	1,0	13 500	17 500	57 000
Aubrücke	8,3	35 000	59 500	96 000
Opfikon	10,5	9 400	18 300	43 000
Niederglatt	21,7	9 000	10 500	35 000
Glattfelden	30,8	3 100	3 200	4 000
(Rheinmündung) Total	35,8	70 000	109 000	235 000

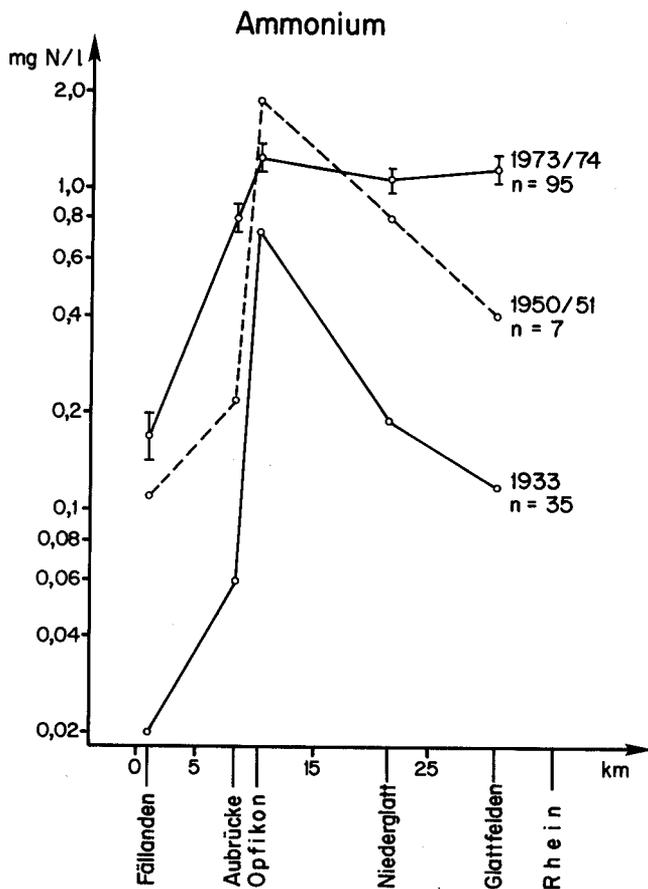


Fig. 10 Längsprofile der Ammoniumkonzentrationen in der Glatt. Änderungen der mittleren Gehalte in den letzten 40 Jahren. 1973/74 geometrischer Mittelwert mit Streuungsfaktor des Mittelwertes. 1950/51 geom. Mittelwert. 1933 Mittelwert nach [4].

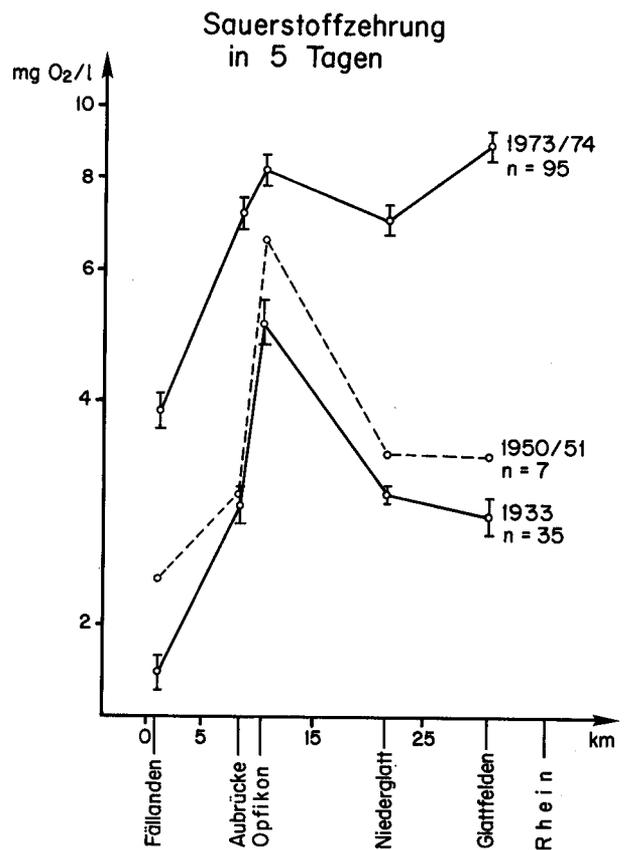


Fig. 11 Längsprofile der Sauerstoffzehrung in 5 Tagen in der Glatt. Änderungen der mittleren Gehalte in den letzten 40 Jahren. Weitere Erläuterungen siehe Figur 10.

wieder auf jene Werte wie vor der Einleitung grosser Abwassermengen. Durch den Verdünnungseffekt der Zuflüsse fiel der Chloridwert in Niederglatt wieder auf jenen von Aubrücke zurück (siehe Figur 12).

Die vereinzelt Messungen in den Jahren 1950 und 1951 ergeben für die Sauerstoffzehrung ein ähnliches Bild wie 1933, die Werte für Ammonium entsprechen eher jenen von 1973/74. 1973/74 beobachtete man unterhalb von Opfikon nur bei einigen Parametern eine geringe Konzentrationsabnahme (siehe Anhang I).

In den letzten 40 Jahren nahm die Bevölkerung in den vier Teileinzugsgebieten und die Konzentrationen der Wasserinhaltsstoffe an den entsprechenden Messstellen verschieden stark zu. Dieser Befund weist indirekt auf eine Änderung der Abwasserinhaltsstoffe und der Abwasserreinigung hin. Im Vergleich zur Bevölkerungszunahme in den vier Teileinzugsgebieten erhöhten sich in der Glatt (siehe Tabelle 6) die Sauerstoffzehrung in 5 Tagen und die Nitratkonzentrationen weniger stark, die Chloridwerte etwa gleich stark und die Werte für Ammonium, Phosphat und Nitrit bedeutend stärker. Diese Feststellung trifft (mit Ausnahme des Chlorids) auch dann zu, wenn gewissermassen die «natürliche» Konzentration (entspricht

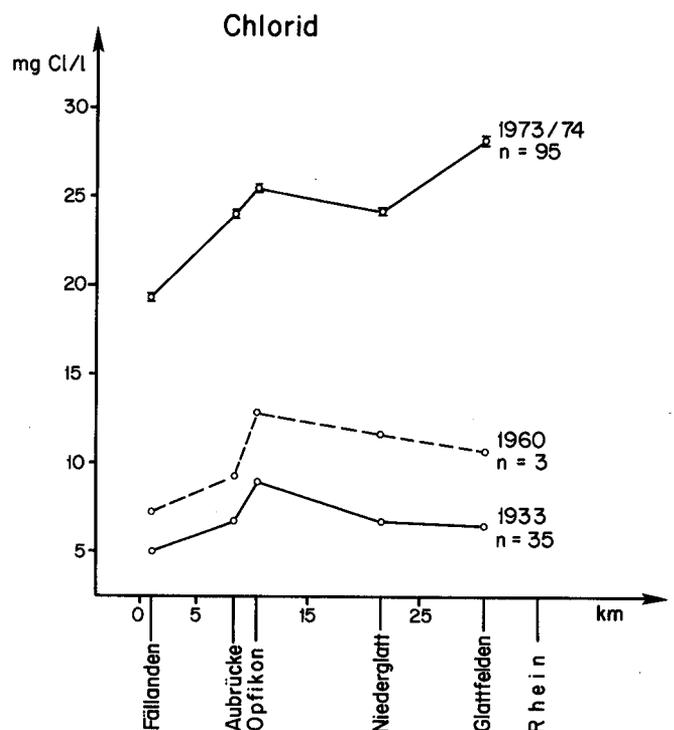


Fig. 12 Längsprofile der Chlorid-Konzentrationen in der Glatt. Änderungen der Gehalte in den letzten 40 Jahren. 1973/74 arithm. Mittelwert mit Standardabweichung des Mittelwertes. 1960 und 1933 arithm. Mittelwert.

Tab. 6 Vergleich zwischen der Bevölkerungszunahme und dem Konzentrationsanstieg* einiger Wasserinhaltsstoffe in der Periode 1933 bzw. 1950 bis 1973/74.

Teileinzugsgebiet	Bevölkerungszunahme		BSB ₅ 1933-1973	Ammonium Chlorid o-Phosphat Nitrit Nitrat				
	1933-1973	1950-1973		1933-1973	1933-1973	1933-1973	1950-1973	1933-1973
	Faktor		Faktor der Konzentrationszunahmen					
Fällanden	4,2	3,3	2,5	12	3,6	9	77	1,3
Aubrücke	2,7	1,6	1,6	1,7	2,9	3,2	13	1,6
Opfikon	4,6	2,3	2,3	5,6	3,6	5,1	7	1,9
Niederglatt	3,9	3,4	3,2	9,6	4,4	4,3	13	2,1
Glattfelden ganzes Gebiet	3,4	2,2						

* Entspricht ungefähr der Frachtzunahme, da sich die Abflussverhältnisse in der Betrachtungsperiode in erster Näherung kaum änderten.

ungefähr den gemessenen Konzentrationen bei Fällanden von 1933) bei den Messdaten abgezogen wird. Beim Chlorid resultiert bei der letzten Art von Betrachtung ebenfalls ein im Vergleich zur Bevölkerungszunahme überdurchschnittlicher Anstieg. Die wenigen Messdaten aus dem Jahre 1960 lassen sich auf diese Weise interpretieren. Die in den letzten 25 Jahren eingeführte Abwasserreinigung wirkt sich heute bezüglich der Belastung der Glatt

mit biologisch abbaubaren organischen Stoffen günstig aus. Hingegen vermochten die Abwasserreinigungsanlagen den starken Anstieg der Nährstoffe wie Ammonium und Phosphat in der Glatt nicht zu verhindern. Seit 1950 verdoppelten sich die Phosphatkonzentrationen in der Glatt alle sieben bis vierzehn Jahre (10 Jahre im Durchschnitt) (siehe Figur 13).

Die Sauerstoffverhältnisse in der Glatt änderten sich in den letzten 40 Jahren trotz der starken Zunahme der Belastung nur sehr wenig. Im Jahresdurchschnitt ist das Wasser leicht über- oder untersättigt mit Sauerstoff. Einzig im Seeausfluss werden während der Vollzirkulation des Greifensees im Winter tiefe Werte registriert. Durch die gute natürliche Belüftung des Wassers wird jedes Sauerstoffdefizit schnell wieder abgetragen.

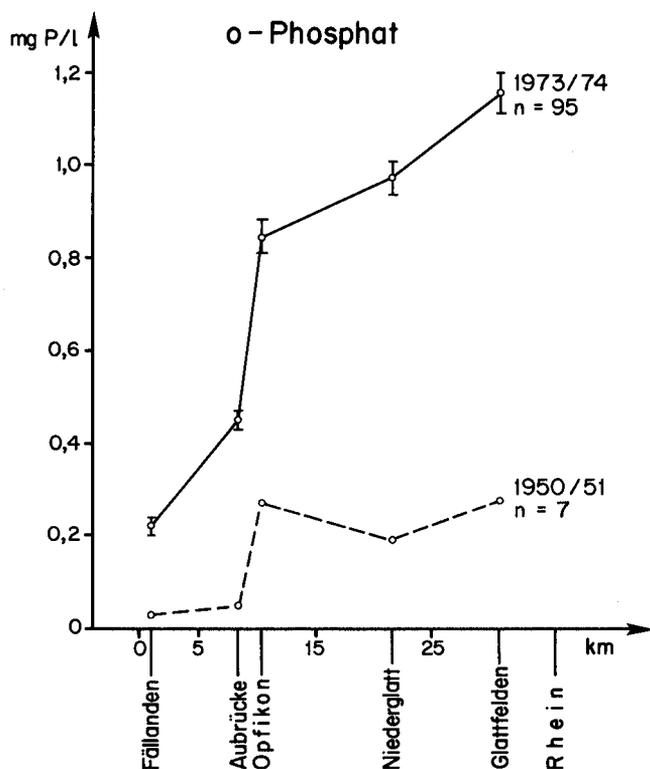


Fig. 13 Längsprofil der Ortho-Phosphat-Konzentration in der Glatt. Änderungen der Gehalte in den letzten 23 Jahren. 1973/74 arithm. Mittelwert mit Standardabweichung des Mittelwertes. 1950/1951 arithm. Mittelwert.

5. FOLGERUNGEN IM HINBLICK AUF ZUKÜNFTIGE CHEMISCHE UNTERSUCHUNGEN VON FLIESSGEWÄSSERN

Neben den zivilisationsbedingten Einflüssen wirken sich die hydrologischen Eigenheiten jedes Fließgewässers auf die zeitlichen Änderungen im chemischen Zustand erheblich aus.

Selbst in einem Fluss wie der Glatt, wo sowohl die Abwasserzuflüsse als auch das Wasserregime einigermaßen ausgeglichen sind, variieren die in Stichproben an denselben Probenahmestellen gemessenen Konzentrationen bei einigen Komponenten bis zu einem Faktor 10. Um Unterschiede in der Wasserqualität bzw. um den Stoffeintrag durch Einleitungen von Fremdwasser zwischen zwei Messstationen ermitteln zu können, müssen die Konzentrationsunterschiede an den Messstellen genügend gross und statistisch gesichert sein, bzw. muss die eingeleitete Stofffracht einen deutlichen Beitrag zur Gesamtfracht liefern. Bei einem Messprogramm mit dem Ziel,

die Änderungen des chemischen Zustandes längs eines Flusses mittels Stichproben festzustellen, erhält man nur dann eine gesicherte Antwort, wenn in der Untersuchungsperiode eine genügend grosse Anzahl von Messungen durchgeführt werden. Indessen können für die Feststellung der Wasserqualität bei Niederwasser bereits sechs bis zehn Messungen genügen. Der Arbeitsaufwand ist eher dadurch zu beschränken, dass innerhalb eines Flusssystemes möglichst nur wenige Probenahmestellen unterhalten werden.

Die von uns zwischen den Messgrössen ermittelten Korrelationen lassen sich nicht unbesehen auf andere Flusssysteme übertragen. Weitere Erfahrungen anhand von Untersuchungen an anderen Flusssystemen sollten indessen zur Erkenntnis darüber führen, inwieweit solchen Korrelationen eine gewisse Allgemeingültigkeit zuzusprechen ist. Es ist deshalb vorderhand nicht möglich, die Bestimmung von einigen analytisch aufwendigen Grössen fallenzulassen. Vielmehr wird es unumgänglich sein, aufgrund der jeweiligen Fragestellung die aussagekräftigsten Parameter während der ganzen Untersuchungsperiode zu messen.

Über die Ergebnisse der chemischen Untersuchungen eines Fliessgewässers lassen sich weitergehende Aussagen machen, wenn die Abflussmengen an den Probenahmestellen laufend registriert werden, wie dies auch in den Empfehlungen über die regelmässige Untersuchung der schweizerischen Oberflächengewässer [15] steht.

Die von uns geplanten Untersuchungen an der Glatt sollen unter anderem dazu führen, dass die Aussagemöglichkeiten von Untersuchungen an Stichproben einerseits (wie sie auch in [15] vorgesehen sind) mit solchen an längerfristigen Sammelpunkten (1 bis 7 Tage) andererseits verglichen werden können. Weiter werden die Abflussmengen an einigen Probenahmestellen laufend registriert, um damit genauere Frachtberechnungen anstellen zu können und die Abhängigkeit des Stofftransportes von den jeweiligen Abflussverhältnissen (Hoch- und Niederwasser miteinbezogen) ermitteln zu können.

RÉSUMÉ

Des analyses approfondies, qui se sont étendues sur deux ans, ont permis d'établir l'état de la Glatt entre l'endroit où elle sort du Greifensee et celui où elle se jette dans le Rhin; les analyses ont porté sur les points suivants: concentration des matières organiques et nutritives (azote et phosphore) et de certains métaux, géochimie du cours d'eau.

L'influence de la civilisation sur l'état de la Glatt se manifeste par le fait que la teneur en matières nutritives augmente tout au long du cours de la rivière; à l'embouchure, elle atteint entre le triple et le décuple des valeurs mesurées à la sortie du Greifensee. Les concentrations moyennes en matières azotées et phosphorées sont donc

élevées en regard de celles qu'on rencontre en général dans les eaux courantes. Quant aux matières organiques en suspension, elles abondent dans le Greifensee – lac eutrophe – et augmentent encore d'un tiers jusqu'à l'embouchure.

L'étude des corrélations et l'analyse factorielle ont montré que l'état de l'eau à la sortie du Greifensee et dans un des affluents de la Glatt diffère notablement de celui qu'on a constaté aux autres points de mesure.

Depuis quarante ans, la population de la vallée de la Glatt s'est multipliée par 3,4; la diminution d'oxygène en cinq jours et la teneur de l'eau en nitrates se sont accentuées dans des proportions moindres, tandis que les taux d'ammonium, de phosphates et de nitrites ont subi une croissance très supérieure à celle de la population. L'oxygénation de la Glatt, très satisfaisante, n'a presque pas varié pendant ces quatre décennies.

Verdankungen

Dem Initiator dieses Projekts, Herrn Prof. Dr. *Werner Stumm*, danken wir für seine Unterstützung.

Den Mitarbeitern der analytischen Laboratorien in der chemischen Abteilung sei für ihren tatkräftigen Einsatz bei der Untersuchung der zahlreichen Wasserproben bestens gedankt.

Literatur

- [1] *Stumm Werner*, Die Veränderung in Art und Menge der Gewässerbelastung verlangt ein Neuüberdenken der Gewässerschutzmassnahmen, Jahrbuch für Umweltschutz 1973.
- [2] *Wuhrmann K.*, Some Problems and Perspectives in applied Limnology, Mitt. Internat. Verein. Limnol., **20**, 324–402 (1974).
- [3] *Ambühl H.*, Die Krankheitsgeschichte schweizerischer Seen, Beilage Forschung und Technik, Neue Zürcher Zeitung, 5. 3. 75, Nr. 53.
- [4] *Waser E., Husmann W., Blöchliger G.*, Die Glatt. Eine systematische, praktischen Zwecken dienende Flussuntersuchung in chemischer, bakteriologischer und biologischer Richtung, Berichte Schweiz. Bot. Gesellschaft **43**, 253–388 (1934).
- [5] Schweiz. Lebensmittelbuch, Kapitel 27, Trinkwasser, 1972.
- [6] Richtlinien für die Untersuchung von Abwasser, Eidg. Departement des Innern, 1974.
- [7] Standard Methods, 13th Edition 1971.
- [8] *Bundi U.*, EAWAG, persönliche Mitteilung.
- [9] *Weber E.*, Grundriss der biologischen Statistik, 7. Auflage, VEB Fischer Verlag Jena, 1972.
Linder A., Statistische Methoden, 4. Auflage, Birkhäuser Verlag Basel, 1964.
- [10] *Ueberla K.*, Einführung in die Faktorenanalyse, Springer Verlag 1971.
- [11] Jahresberichte 1970–1972 der Internationalen Arbeitsgemeinschaft der Wasserwerke im Rheineinzugsgebiet (IAWR).
- [12] *Li Y. H., Erni P.*, Erosionsgeschwindigkeit im Einzugsgebiet des Rheins, Jahrbuch vom Wasser, **43**, 15–42 (1974).
- [13] *Thomas E. A., Schneebeli W.*, persönliche Mitteilung.
- [14] Wohnbevölkerung der Gemeinden 1850–1970, Eidg. Statistisches Amt Bern 1971.
- [15] Vorläufige Empfehlungen über die regelmässige Untersuchung der schweiz. Oberflächengewässer, Eidg. Departement des Innern 1974.

Anhang I

Tabelle 1 Charakteristika der Verteilungen von organischem Kohlenstoff und chemischem Sauerstoffbedarf für 1973/74, ermittelt in 95 Messungen.

Probenahmestelle / Parameter	Summenhäufigkeit			Mittelwert*		Streuung		Typus der Verteilung*
	5%-Wert	50%-Wert	95%-Wert	arithm. Mittel	geom. Mittel	relative Standard- abw. %	Streuungs- faktor	
<i>gesamt org. C</i>		mg C/l			mg C/l			
Chriesbach	2,4	4,0	10,0	4,8	4,1		1,7	} log-normal
Fällanden	3,6	5,9	9,3	6,5	6,1		1,4	
Aubrücke	4,2	6,7	10,8	7,0	6,7		1,3	
Opfikon	4,5	7,2	12,1	7,8	7,3		1,4	
Niederglatt	4,3	6,8	10,7	7,1	6,9		1,3	
Glattfelden	5,0	7,7	15,2	8,1	7,9		1,5	
<i>gel. org. C</i>		mg C/l			mg C/l			
Chriesbach	1,7	3,0	5,6	3,1	2,9		1,5	} log-normal
Fällanden	3,1	4,6	6,1	4,7	4,6	19		
Aubrücke	3,6	4,8	6,3	4,8	4,7	20		
Opfikon	3,6	5,0	6,7	5,1	5,0	21		
Niederglatt	3,7	4,9	6,6	4,9	4,9	20		
Glattfelden	3,7	5,1	7,0	5,3	5,2	22		
<i>CSB gesamt</i>		mg O ₂ /l			mg O ₂ /l			
Chriesbach	8	13	29	15,5	14,5		1,5	} log-normal
Fällanden	13	20	33	22,0	20,5		1,4	
Aubrücke	15	22	34	23,5	22,5		1,3	
Opfikon	17	24	38	26,0	24,5		1,4	
Niederglatt	16	22	36	24,5	23,5		1,3	
Glattfelden	18	26	43	28,5	27,0		1,3	
<i>CSB gelöst</i>		mg O ₂ /l			mg O ₂ /l			
Chriesbach	6	10	20	11,5	10,5		1,5	} log-normal
Fällanden	10	14	21	15,0	14,5		1,2	
Aubrücke	10	15	23	16,0	15,5		1,3	
Opfikon	12	17	16	17,0	16,5		1,3	
Niederglatt	12	16	19	16,5	16,5		1,2	
Glattfelden	11	19	29	19,0	18,0		1,3	

Tabelle 2 Charakteristika der Verteilungen von Nitrit, Nitrat, Ammonium und pH-Wert für 1973/74, ermittelt in 95 Messungen.

Probenahmestelle / Parameter	Summenhäufigkeit			Mittelwert*		Streuung		Typus der Verteilung*
	5%-Wert	50%-Wert	95%-Wert	arithm. Mittel	geom. Mittel	relative Standard- abw. %	Streuungs- faktor	
<i>Nitrit</i>		mg N/l			mg N/l			
Chriesbach	0,03	0,08	0,14	0,085	0,074		1,7	} log-normal
Fällanden	0,007	0,04	0,08	0,039	0,029	64		
Aubrücke	0,03	0,08	0,17	0,087	0,077		1,6	
Opfikon	0,04	0,10	0,25	0,12	0,10		1,8	
Niederglatt	0,04	0,12	0,30	0,14	0,11		2,0	
Glattfelden	0,05	0,14	0,37	0,18	0,14		2,1	
<i>Nitrat</i>		mg N/l			mg N/l			
Chriesbach	3,3	6,3	7,8	6,1	5,9	20		} normal
Fällanden	<0,1	0,7	1,6	0,75	0,68	71		
Aubrücke	1,1	1,8	2,6	1,8	1,7	30		
Opfikon	1,4	2,4	3,9	2,5	2,3	37		
Niederglatt	1,8	2,9	4,5	3,0	2,9	29		
Glattfelden	2,0	3,4	4,7	3,4	3,3	26		
<i>Ammonium</i>		mg N/l			mg N/l			
Chriesbach	0,02	0,20	0,60	0,24	0,17	74		} normal
Fällanden	<0,02	0,23	0,84	0,42	0,17		5,0	
Aubrücke	0,24	0,85	1,8	0,96	0,81		1,9	
Opfikon	0,27	1,3	3,9	1,58	1,26		2,1	
Niederglatt	0,32	1,2	2,6	1,27	1,07		1,9	
Glattfelden	0,37	1,3	2,8	1,39	1,15		1,9	
<i>pH-Wert</i>								
Chriesbach	7,6	8,1	8,7	8,1	8,1	3		} normal
Fällanden	7,6	8,3	9,0	8,4	8,4	6		
Aubrücke	7,8	8,2	8,6	8,2	8,2	3		
Opfikon	7,7	8,2	8,5	8,2	8,1	3		
Niederglatt	7,7	8,2	8,5	8,1	8,1	3		
Glattfelden	7,7	8,2	8,5	8,2	8,1	3		

* Der charakteristische Mittelwert wird durch den Typus der Verteilung bestimmt.

Tabelle 3 Charakteristika der Verteilungen von ortho-Phosphat, gesamt-Phosphor, Chlorid und Leitfähigkeit für 1973/74, ermittelt in 95 Messungen.

Probenahmestelle / Parameter	Summenhäufigkeit			Mittelwert*		Streuung		Typus der Verteilung*
	5%-Wert	50%-Wert	95%-Wert	arithm. Mittel	geom. Mittel	relative Standard- abw. %	Streuungs- faktor	
<i>o-Phosphat</i>								
		mg P/l			mg P/l			
Chriesbach	0,09	0,18	0,51	0,20	0,17		1,68	log-normal
Fällanden	<0,01	0,22	0,47	0,22	0,11	77		} normal
Aubrücke	0,18	0,45	0,73	0,45	0,41	38		
Opfikon	0,36	0,84	1,50	0,85	0,78	41		
Niederglatt	0,43	0,96	1,50	0,97	0,90	40		} log-normal
Glattfelden	0,50	1,10	1,90	1,16	1,07		1,51	
<i>gesamt-Phosphor</i>								
		mg P/l			mg P/l			
Chriesbach	0,13	0,38	0,75	0,40	0,35		1,72	log-normal
Fällanden	0,10	0,40	0,85	0,41	0,33	59		} normal
Aubrücke	0,34	0,60	1,30	0,69	0,63		1,51	
Opfikon	0,52	1,10	2,40	1,19	1,07		1,59	} log-normal
Niederglatt	0,58	1,30	2,40	1,31	1,19		1,57	
Glattfelden	0,63	1,40	3,50	1,59	1,42		1,59	
<i>Chlorid</i>								
		mg Cl/l			mg Cl/l			
Chriesbach	12	17	33	18	18	31		} normal
Fällanden	18	19	20	19	19	5		
Aubrücke	19	23	32	24	24		1,21	
Opfikon	19	25	35	25	25		1,21	} log-normal
Niederglatt	19	24	31	24	24		1,18	
Glattfelden	21	27	37	28	28		1,23	
<i>Leitfähigkeit</i>								
		µs/cm			µs/cm			
Chriesbach	370	560	620	549	544	13		} normal
Fällanden	240	350	430	341	335	18		
Aubrücke	290	420	500	414	410	15		
Opfikon	320	440	530	435	431	14		
Niederglatt	330	450	520	440	436	14		
Glattfelden	340	480	560	468	464	14		

Tabelle 4 Charakteristika der Verteilungen von Kieselsäure, Schwebstoffen, Eisen und Zink für 1973/74, ermittelt in 95 Messungen.

Probenahmestelle / Parameter	Summenhäufigkeit			Mittelwert*		Streuung		Typus der Verteilung*
	5%-Wert	50%-Wert	95%-Wert	arithm. Mittel	geom. Mittel	relative Standard- abw. %	Streuungs- faktor	
<i>Kieselsäure</i>								
		mg H ₄ SiO ₄ /l			mg H ₄ SiO ₄ /l			
Chriesbach	10	16	20	16	15	22		} normal
Fällanden	<1	3	7	3,6	3,0	53		
Aubrücke	3	6	8	5,8	5,8	26		
Opfikon	4	6	9	6,5	6,3	24		
Niederglatt	5	7	8	7,1	6,9	22		
Glattfelden	4	8	10	7,6	7,3	26		
<i>Schwebstoffe</i>								
		mg/l			mg/l			
Chriesbach	4	10	71	20	12		2,9	} log-normal
Fällanden	1	5	20	7	5		2,7	
Aubrücke	6	18	98	28	19		2,4	
Opfikon	5	16	69	25	17		2,3	
Niederglatt	5	15	49	19	15		2,1	
Glattfelden	6	15	49	20	15		2,0	
<i>Eisen</i>								
		µg Fe/l			µg Fe/l			
Chriesbach	40	110	590	190	140		2,6	} log-normal
Fällanden	<20	50	100	45	35		2,3	
Aubrücke	40	100	400	135	100		2,2	
Opfikon	40	100	300	120	95		2,0	
Niederglatt	40	100	300	125	95		2,0	
Glattfelden	50	100	300	145	115		1,9	
<i>Zink</i>								
		µg Zn/l			µg Zn/l			
Chriesbach	<10	20	40	20	16		1,9	} log-normal
Fällanden	<10	10	20	10	8		1,6	
Aubrücke	<10	10	30	16	14		1,7	
Opfikon	10	20	180	44	27		2,4	
Niederglatt	10	25	150	41	29		2,2	
Glattfelden	10	30	100	44	33		2,0	

* Der charakteristische Mittelwert wird durch den Typus der Verteilung bestimmt.

Tabelle 5 Charakteristika der Verteilungen von Kaliumpermanganatverbrauch, BSB₅, Sauerstoff und Wassertemperatur für 1973/74, ermittelt in 95 Messungen.

Probenahmestelle / Parameter	Summenhäufigkeit			Mittelwert*		Streuung		Typus der Verteilung*
	5%-Wert	50%-Wert	95%-Wert	arithm. Mittel	geom. Mittel	relative Standard- abw. %	Streuungs- faktor	
<i>KMnO₄-Verbrauch</i>	mg KMnO ₄ /l			mg KMnO ₄ /l				
Chriesbach	9	14	33	18	16		1,6	} log-normal
Fällanden	12	19	32	21	20		1,4	
Aubrücke	13	20	39	22	21		1,4	
Opfikon	14	22	40	24	22		1,4	
Niederglatt	14	21	35	23	21		1,4	
Glattfelden	14	24	44	26	24		1,5	
<i>BSB₅</i>	mg O ₂ /l			mg O ₂ /l				
Chriesbach	1,6	3,3	8	3,9	3,4		1,7	} log-normal
Fällanden	1,6	3,9	10	4,6	3,9		1,8	
Aubrücke	3,2	7,2	15	7,9	7,2		1,6	
Opfikon	4,0	7,8	18	9,0	8,2		1,6	
Niederglatt	3,4	7,1	15	7,7	7,0		1,6	
Glattfelden	4,1	8,9	19	9,9	8,9		1,6	
<i>Sauerstoff</i>	mg O ₂ /l			mg O ₂ /l				
Chriesbach	6,6	10,4	17,4	10,9	10,4		1,4	} log-normal
Fällanden	4,2	9,0	19,2	10,3	9,1	49		
Aubrücke	7,7	9,9	12,8	10,1	9,9	16		
Opfikon	8,2	9,9	12,8	10,2	10,1	15		
Niederglatt	4,9	9,6	12,4	9,2	8,9	24		
Glattfelden	6,3	10,2	12,4	9,9	9,6	21		
<i>Wassertemperatur</i>	° C			° C				
Chriesbach	5,6	10,8	17,2	11,3	10,6	34	1,5	} 2gipflig
Fällanden	3,0	11,8	22,0	11,9	9,7	58	2,0	
Aubrücke	3,8	10,6	21,2	11,6	9,8	53	1,8	
Opfikon	4,5	10,8	21,0	11,9	10,3	50	1,8	
Niederglatt	4,4	11,4	20,4	11,9	10,8	49	1,9	
Glattfelden	4,2	11,6	19,8	12,1	10,6	48	1,7	

Tabelle 6 Charakteristika der Verteilungen von Gesamthärte, Karbonhärte, Calcium und Magnesium für 1974, ermittelt in 50 Messungen.

Probenahmestelle / Parameter	Summenhäufigkeit			Mittelwert*		Streuung		Typus der Verteilung*
	5%-Wert	50%-Wert	95%-Wert	arithm. Mittel	geom. Mittel	relative Standard- abw. %	Streuungs- faktor	
<i>Gesamthärte</i>	mval/l			mval/l				
Chriesbach	5,6	7,2	7,6	7,0	6,9	10		} normal
Fällanden	2,6	4,4	5,0	4,1	4,0	19		
Aubrücke	3,5	5,0	5,4	4,8	4,7	12		
Opfikon	3,4	5,0	5,4	4,8	4,7	14		
Niederglatt	3,5	5,2	5,8	4,9	4,9	13		
Glattfelden	3,6	5,2	5,6	5,0	5,0	13		
<i>Karbonhärte</i>	mval/l			mval/l				
Chriesbach	4,4	6,0	6,6	5,8	5,8	11		} normal
Fällanden	2,2	3,8	4,2	3,5	3,5	18		
Aubrücke	3,9	4,4	4,6	4,1	4,1	13		
Opfikon	2,7	4,2	4,6	4,1	4,0	14		
Niederglatt	3,0	4,4	4,8	4,2	4,2	13		
Glattfelden	3,1	4,6	5,0	4,3	4,3	14		
<i>Calcium</i>	mval/l			mval/l				
Chriesbach	4,4	5,8	6,2	5,6	5,6	11		} normal
Fällanden	1,4	3,1	3,6	2,8	2,7	25		
Aubrücke	2,2	3,6	3,9	3,4	3,4	15		
Opfikon	2,0	3,7	4,2	3,5	3,4	18		
Niederglatt	2,3	4,0	4,4	3,7	3,7	17		
Glattfelden	2,7	3,9	4,6	3,8	3,7	16		
<i>Magnesium</i>	mval/l			mval/l				
Chriesbach	1,0	1,4	1,6	1,4	1,3	13		} normal
Fällanden	1,0	1,2	1,5	1,2	1,2	15		
Aubrücke	0,8	1,3	1,6	1,3	1,3	17		
Opfikon	1,0	1,3	1,6	1,3	1,3	15		
Niederglatt	0,8	1,2	1,6	1,2	1,2	22		
Glattfelden	0,8	1,2	1,6	1,2	1,2	18		

* Der charakteristische Mittelwert wird durch den Typus der Verteilung bestimmt.

Tabelle 7 Charakteristika der Verteilungen von Natrium und Kalium für 1974, ermittelt in 50 Messungen.

Probenahmestelle / Parameter	Summenhäufigkeit			Mittelwert*		Streuung		Typus der Verteilung*
	5%-Wert	50%-Wert	95%-Wert	arithm. Mittel	geom. Mittel	relative Standard- abw. %	Streuungs- faktor	
<i>Natrium</i>								
		mg Na/l		mg Na/l				
Chriesbach	6,0	7,8	12,2	8,6	8,3		1,29	} log-normal
Fällanden	11,0	12,0	12,9	12,0	12,0		1,05	
Aubrücke	11,7	15,1	23,3	15,8	15,4		1,24	
Opfikon	12,0	16,4	26,1	17,0	16,5		1,27	
Niederglatt	11,0	16,0	22,5	16,5	16,0		1,29	
Glattfelden	12,4	18,3	31,2	19,8	18,8		1,38	
<i>Kalium</i>								
		mg K/l		mg K/l				
Chriesbach	2,3	3,3	5,4	3,4	3,3		1,32	} log-normal
Fällanden	3,2	3,5	4,0	3,5	3,5		1,07	
Aubrücke	3,3	4,0	5,1	4,1	4,0		1,17	
Opfikon	3,7	4,7	7,0	4,9	4,8		1,21	
Niederglatt	3,8	4,8	6,5	4,8	4,8		1,17	
Glattfelden	4,1	5,6	8,2	5,9	5,7		1,23	

* Der charakteristische Mittelwert wird durch den Typus der Verteilung bestimmt.

Anhang II

Mathematische Formeln

Die im Text vorkommenden Begriffe sind hier mathematisch formuliert (genaue Definition siehe [9]).

Mittelwerte und Streuung

Die Normalverteilung wird charakterisiert durch:
arithmetische Mittel: \bar{x}_a

$$\bar{x}_a = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i$$

x_i = Einzelmessung

n = Anzahl der Messungen

Standardabweichung oder Streuung der Einzelmessung: s

$$s = \left(\frac{\sum_{i=1}^n (\bar{x}_a - x_i)^2}{n-1} \right)^{\frac{1}{2}}$$

Streuung des arithm. Mittels: z_a

$$z_a = \frac{s}{\sqrt{n}}$$

Die log-normal-Verteilung wird charakterisiert durch:

geometrische Mittel: \bar{x}_g

$$\bar{x}_g = \left(\prod_{i=1}^n x_i \right)^{\frac{1}{n}} \text{ bzw. } \log \bar{x}_g = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \log x_i$$

Streuungsfaktor der Einzelmessung: f_s

$$\log f_s = \left(\frac{\sum_{i=1}^n (\log \bar{x}_g - \log x_i)^2}{n-1} \right)^{\frac{1}{2}}$$

Streuungsfaktor des geom. Mittels: z_g

$$\log z_g = \frac{1}{\sqrt{n}} \log f_s$$

Korrelationen

Korrelationskoeffizient: r_{xy} der Variablen x und y

$$r_{xy} = \frac{s_{xy}}{s_x \cdot s_y}$$

s_x, s_y = Standardabweichungen von x bzw. y

s_{xy} = Kovarianz

$$s_{xy} = \sum_{i=1}^n x_i y_i - \frac{\sum_{i=1}^n x_i \cdot \sum_{i=1}^n y_i}{n}$$

Bestimmtheitsmass: r_{xy}^2

$$r_{xy}^2 = \frac{\text{erklärte Varianz}}{\text{Gesamtvarianz}} = \frac{(s_{xy})^2}{s_x^2 \cdot s_y^2}$$