

Der Beitrag der Landwirtschaft zur Eutrophierung der Gewässer in der Schweiz

I. Ergebnisse von direkten Messungen im Einzugsgebiet verschiedener Vorfluter

Von RENÉ GÄCHTER

Eidg. Anstalt für Wasserversorgung, Abwasserreinigung und Gewässerschutz (EAWAG)
an der Eidg. Technischen Hochschule Zürich

und

OTTO J. FURRER

Eidg. Forschungsanstalt für Agrikulturchemie Liebefeld-Bern

INHALTSVERZEICHNIS

1. Einleitung	41
2. Kurze Beschreibung der berücksichtigten Originalarbeiten	42
2.1 <i>Untersuchungen im Alptal (SZ)</i>	42
2.2 <i>Untersuchungen im Einzugsgebiet des Alpnersees</i>	44
2.3 <i>Untersuchungen im Einzugsgebiet des Sarnersees</i>	44
2.4 <i>Untersuchungen von Linth und Limmat</i>	47
2.5 <i>Untersuchungen im Einzugsgebiet des Hallwilersees</i>	48
2.6 <i>Untersuchungen im Einzugsgebiet des Murtensees</i>	50
2.7 <i>Untersuchungen im Einzugsgebiet des Pfäffikersees und Greifensees</i>	52
3. Diskussion der Resultate	53
3.1 <i>Art der Nutzung des Einzugsgebietes und Nährstoffgehalt der Gewässer</i>	56
3.2 <i>Der relative Anteil der Landwirtschaft an der Gesamtnährstoffbelastung einiger Schweizer Seen</i>	60
4. Zusammenfassung, Résumé, Summary	66
5. Literaturverzeichnis	69

1. Einleitung

Zweifellos ist die rasch zunehmende Eutrophierung vieler Gewässer auf eine unnatürlich stark erhöhte Nährstoffzufuhr zurückzuführen. Unter den Makronährstoffen wurde in Seen meist Phosphor, manchmal aber auch Stickstoff als wachstumsbegrenzender Faktor erkannt [9,10,17,18,19]. Da diese beiden Nährelemente neben Kalium die Hauptbestandteile der anorganischen Düngemittel darstellen, liegt die Vermutung nahe, dass neben den kommunalen und landwirtschaftlichen Abwässern

auch Eluation und Erosion des intensiv genutzten Kulturlandes zur unerwünschten Überdüngung der Gewässer beitragen.

Die Nährstoffzufuhr zu einem Gewässer setzt sich aus folgenden Komponenten zusammen:

- der Nährstoffzufuhr aus der Atmosphäre,
- der Nährstoffzufuhr aus vom Menschen unbeeinflussten Böden (natürliche Basisfracht),
- der Nährstoffzufuhr aus land- und forstwirtschaftlich genutzten Böden,
- der Nährstoffzufuhr aus den Abwässern.

Niederschläge gelangen entweder direkt oder indirekt via ober- oder unterirdischen Abfluss in die Gewässer. Fallen sie auf städtisches (Strassen, Plätze, Hausdächer) oder felsiges Gebiet, in Seen oder Flüsse, so tragen sie dank ihrem Gehalt an Phosphor- und Stickstoffverbindungen direkt zur Anreicherung der Gewässer mit diesen Pflanzennährstoffen bei. Diese Gebiete nehmen in der Schweiz eine Fläche von rund 10000 km² ein. Die restlichen 31.000 km² oder 76% der Fläche [11] sind produktives Land. Nährstoffe, die in Niederschlägen gelöst auf land- und forstwirtschaftlich genutzten Boden fallen, sind analog der bakteriellen Fixierung von elementarem Stickstoff primär als Düngung des Bodens und nicht als Düngung der Gewässer in Rechnung zu stellen. Leider sind uns über die Stickstoff- und Phosphorkonzentrationen von Regenwasser unter schweizerischen Verhältnissen keine Untersuchungsergebnisse bekannt, die es erlauben würden, die Bedeutung dieser Nährstoffquelle gesamtschweizerisch zu beurteilen. Eine dadurch zwangsläufig bedingte Vernachlässigung dieser Nährstoffquelle führt bei der Abschätzung der relativen Anteile der Zufuhr von Nährstoffen aus Landwirtschaft und Abwasser zu einer leichten Überbewertung des landwirtschaftlich bedingten Anteils.

Abgesehen von Gebieten mit anstehendem Fels und einigen hochgelegenen Alpweiden gibt es in der Schweiz fast keinen vom Menschen unbeeinflussten Boden mehr, so dass sich die natürliche Basisnährstoffbelastung vieler Gewässer nicht mehr bestimmen lässt.

Die Eluation und Abschwemmung von Nährstoffen ist von vielen Faktoren abhängig: Der Topographie, dem Bodentyp, dem Klima sowie von der Art der Bewirtschaftung.

Um wenigstens einen Teil dieser Faktoren möglichst genau erfassen zu können, beschränkten wir uns darauf, Resultate zu analysieren, die an relativ kleinen, überschaubaren Einzugsgebieten gewonnen wurden.

Die Abschätzung der Nährstoffzufuhr, herrührend aus Abwasser, basiert auf folgenden Werten: 12 g N/Kopf·Tag und 3 g P/Kopf·Tag, wovon etwa die Hälfte des Phosphors aus Waschmitteln stammt.

2. Kurze Beschreibung der berücksichtigten Originalarbeiten

2.1 Untersuchungen im Alptal (SZ)

KELLER [12] hat an vier Bächen während zweier Jahre in der Regel wöchentlich Proben erhoben und gleichzeitig den momentanen Abfluss der Bäche zur Zeit der Probenahme bestimmt.

Zwischen der Nitratkonzentration c (mg N/l) und der spezifischen Abflussmenge Q (l/sec \times km²) ergaben sich für die einzelnen Einzugsgebiete die folgenden Beziehungen:

$$\begin{aligned} \text{I} \quad c &= 0,256 - 0,032 \ln Q & (1) \\ \text{III} \quad c &= 0,217 - 0,018 \ln Q & (2) \\ \text{V} \quad c &= 0,309 - 0,025 \ln Q & (3) \\ \text{VII} \quad c &= 0,280 - 0,025 \ln Q & (4) \\ \text{VIII} \quad c &= 0,217 - 0,024 \ln Q & (5) \end{aligned}$$

Da über Wasserbilanz und Wasserregime der untersuchten Gebiete keine Daten verfügbar waren, wurde angenommen, dass sich die untersuchten Bäche diesbezüglich analog dem benachbarten Grossbach verhielten, an dem die Abflussmenge kontinuierlich gemessen wurde. Unter dieser Voraussetzung und unter Zuhilfenahme der obigen Gleichungen liessen sich die jährlichen Nitratfrachten unter Berücksichtigung der Häufigkeit von Hoch- und Niederwassern bestimmen.

Sie betragen für Nitrat, Ammonium und total anorganischen Stickstoff:

Tab.1. Jährliche Stickstofffrachten im Alptal (kg N/km² · Jahr).

Einzugsgebiet	Nitrat-N	Ammonium-N	total anorg. N
I	112	37	149
III	119	30	149
V	171	22	193
VII	148	15	163
VIII	104	37	141

Die mittleren gewogenen Stoffkonzentrationen betragen:

Tab.2. Mittlere jährliche gewogene Stoffkonzentrationen (mg/l).

	I	III	V	VII	VIII
Nitrat	0,15	0,16	0,23	0,20	0,14
Ammonium	0,05	0,04	0,03	0,02	0,05
Phosphat-P ¹)		0,001	0,001	0,001	0,001
Gel. Ges.-P ¹)		0,003	0,003	0,002	0,003

1) Nur 3 Bestimmungen.

Über die Art der Nutzung der Einzugsgebiete gibt Tab.3 Auskunft.

Tab.3. Nutzungsart der untersuchten Einzugsgebiete im Alptal.

Einzugsgebiet	Fläche	Wald	Sumpfwiesen, Hangmoore	Weiden
	km ²	%	%	%
I	0,72	56	37,1	6,9
III	1,55	63	25,0	12,0
V	1,08	37,7	20,3	42,0
VII	0,52	92,6	3,8	3,6
VIII	0,93	93,5	6,5	—

Die mittlere Abflussmenge betrug $1,305 \cdot 10^6 \text{ m}^3/\text{km}^2 \cdot \text{Jahr}$.

2.2 Untersuchungen im Einzugsgebiet des Alpnachersees

Seit dem Frühjahr 1971 sind Untersuchungen über die Nährstoffzufuhren zum Alpnachersee im Gange [13]. Es werden an acht Bächen in der Regel alle zwei Wochen Proben erhoben. Bei Hochwasser werden zusätzliche Probenahmen eingeschoben. Gleichzeitig wird der Pegel in jedem Bach kontinuierlich gemessen. Da die Pegel noch nicht über den ganzen Abflussbereich gegen den Abfluss geeicht sind, lassen sich heute leider noch keine Frachten abschätzen.

Sechs der untersuchten Bäche sind von Abwasser nicht oder nur unbedeutend beeinflusst.

Es wurden die folgenden mittleren Konzentrationen gefunden:

Tab. 4. Mittlere Nährstoffkonzentrationen von Bächen im Einzugsgebiet des Alpnachersees ($\mu\text{g/l}$).

	$\text{PO}_4\text{-P}$	Ges.-P gelöst	$\text{NO}_3\text{-N}$	$\text{NH}_4\text{-N}$	Ges.-N anorg.
Widibach	0,5	2,3	479	8	487
Chli Schliere	3,0	3,7	337	15	352
Grosse Schliere	1,5	4,2	237	16	253
Melbach	28	43,6	1233	49	1282
Meliorationskanal	41,3	50,4	1947	68	2015
Autobahnkanal	16,0	25,6	1189	46	1235

Über die Art der Bodennutzung der einzelnen Einzugsgebiete gibt Tab. 5 Auskunft.

Tab. 5. Art der Bodennutzung im Einzugsgebiet des Alpnachersees.

Einzugsgebiet	Fläche km^2	Wald %	Wiesen, Weiden %	Fels %
Widibach	2,2	50	23	27
Chli Schliere	25,0	61	30	9
Grosse Schliere	28,4	66	33	1
Melbach	19,4	48	50	2
Meliorationskanal	2,2	14	82	4
Autobahnkanal	7,1	34	66	—

2.3 Untersuchungen im Einzugsgebiet des Sarnersees

Im Einzugsgebiet des Sarnersees wurden während eines Jahres alle zwei Wochen die Nährstoffkonzentrationen in 14 Bächen bestimmt. Die Abflussmenge der einzelnen Bäche wurde aus dem Zufluss vom Lungernsee, dem Abfluss der Sarneraa und den Pegelschwankungen des Sarnersees indirekt ermittelt [6].

Seit dieser Untersuchung wurde vor allem die Methode zur Bestimmung kleinster Mengen von gelösten Phosphorverbindungen wesentlich verbessert. Gemäss einer mündlichen Mitteilung von AMBÜHL ist es daher möglich, dass die angegebenen Phosphorkonzentrationen und Frachten zu niedrig, sicher aber nicht zu hoch sind.

Die bestimmten Mittelwerte (arithmetische Mittel) sind in Tab. 6 zusammengestellt. In Abb. 1 sind für vier Bäche die mittleren Phosphor- und Stickstoffkonzentrationen gegen den mittleren spezifischen Abfluss der Quartale aufgetragen. Es zeigt sich dabei deutlich, dass hohe Phosphorkonzentrationen mit hohem spezifischem

Tab.6. Abflussmengen, Konzentrationen und Frachten von gelösten Nährstoffen in Bächen im Einzugsgebiet des Sarnersees.

Quartal	Einzugsgebiete	Blatti-	Schwand-	Geris-	Steini-	Rüti-	Leimer-	Siget-	Maien-	Edis-	Dorf-	Wissi-	Dorni-	Melchaa
		bach u. Rädis- halden- bach	bach	bach	bach	bach	graben	schwand- graben	bach	riedbach	bach	Sach- seln	bach	bach
		2,05 km ²	4,08 km ²	10,2 km ²	13,0 km ²	6,81 km ²	0,49 km ²	0,44 km ²	5,06 km ²	4,65 km ²	4,38 km ²	1,95 km ²	0,88 km ²	21,76 km ²
Frühjahr	Q/km ² 10 ⁶ m ³	2,94	3,0	3,18	4,0	2,5	2,23	2,23	3,6	3,86	3,42	2,35	2,23	3,18
	Q 10 ⁶ m ³	6,073	12,220	32,421	52,168	17,067	1,093	0,981	18,112	17,907	14,993	4,586	1,963	69,177
	Ges.-N mg/l	1,45	1,10	0,90	0,79	0,97	1,01	0,87	0,91	0,99	1,07	1,56	1,94	1,07
	Ges.-P µg/l	67	40	37	37	39	36	27	27	49	43	50	76	31
	Ges.-N 10 ³ kg	0,880	1,344	2,917	4,121	1,655	0,110	0,085	1,648	1,773	1,604	0,762	0,381	7,401
Ges.-P kg	41	49	120	193	66	4	26	49	88	64	24	15	214	
Sommer	Q/km ² 10 ⁶ m ³	3,76	3,82	4,05	5,11	3,19	2,84	2,84	4,71	4,91	4,36	3,19	2,84	4,05
	Q 10 ⁶ m ³	7,744	15,581	41,339	66,519	21,761	1,393	1,251	23,860	22,832	19,117	6,231	2,503	88,208
	Ges.-N mg/l	1,39	1,03	0,86	0,71	0,84	0,83	0,74	0,86	0,84	0,83	1,24	1,87	0,77
	Ges.-P µg/l	102	39	39	37	33	43	43	47	46	60	49	80	40
	Ges.-N 10 ³ kg	1,076	1,604	3,555	4,723	1,828	0,115	0,092	2,052	1,918	1,587	0,772	0,468	6,792
Ges.-P kg	79	61	161	246	72	6	5	112	105	115	30	20	353	
Herbst	Q/km ² 10 ⁶ m ³	1,46	1,47	1,56	1,97	1,23	1,10	1,10	1,82	1,89	1,68	1,23	1,13	1,56
	Q 10 ⁶ m ³	2,988	6,013	15,953	25,671	8,398	0,538	0,483	9,208	8,811	7,377	2,405	0,966	34,043
	Ges.-N mg/l	1,51	1,20	1,13	0,89	1,34	1,01	0,97	0,93	1,07	1,07	1,51	1,91	0,94
	Ges.-P µg/l	77	27	34	24	26	21	31	16	40	11	46	57	27
	Ges.-N 10 ³ kg	0,451	0,721	1,802	2,284	1,125	0,054	0,047	0,856	0,943	0,789	0,363	0,184	3,200
Ges.-P kg	23	16	54	61	22	1	1	15	35	8	11	5	91	
Winter	Q/km ² 10 ⁶ m ³	1,57	1,59	1,69	2,13	1,33	1,19	1,19	1,96	2,04	1,82	1,33	1,18	1,69
	Q 10 ⁶ m ³	3,225	6,489	17,214	27,689	9,062	0,581	0,522	9,935	9,508	7,960	2,595	1,043	36,705
	Ges.-N mg/l	1,66	1,30	1,17	0,86	1,04	0,91	0,84	0,93	1,09	1,06	1,37	1,71	0,99
	Ges.-P µg/l	71	31	27	27	40	29	31	20	49	41	27	64	24
	Ges.-N 10 ³ kg	0,535	0,843	2,014	2,382	0,942	0,053	0,044	0,924	1,036	0,844	0,355	0,178	3,633
Ges.-P kg	23	20	46	75	36	1	1	20	46	32	7	6	88	
Jahr	Q/km ² 10 ⁶ m ³	9,77	9,88	10,48	13,23	8,26	7,36	7,36	12,20	12,70	11,29	8,26	7,36	10,48
	Q 10 ⁶ m ³	20,030	40,303	106,927	172,056	56,288	3,605	3,237	61,715	59,058	49,447	16,117	6,475	228,133
	Ges.-N mg/l	1,50	1,15	1,14	1,14	1,05	0,95	0,86	0,91	1,0	1,01	1,42	1,86	0,94
	Ges.-P µg/l	80	37	34	31	34	32	33	27	46	41	43	69	31
	Ges.-N 10 ³ kg	2,942	4,512	10,288	13,510	5,550	0,332	0,268	5,480	5,670	4,824	2,252	1,211	21,026
Ges.-P kg	166	146	381	575	196	12	10	196	274	219	72	46	746	

Abfluss zusammenfallen, dass aber die Stickstoffkonzentrationen von der Abflussmenge kaum beeinflusst werden. Das bedeutet, dass die Phosphorfrachten mit zunehmendem Abfluss progressiv, die Stickstofffrachten aber nur proportional zunehmen.

Aus den angegebenen Werten (Tab.6) lassen sich die folgenden Phosphor- und Stickstofffrachten/Jahr abschätzen:

Tab. 7.

	kg P/km ² · Jahr	kg N/km ² · Jahr
Blattibach und Rädishaldenbach	78	1425
Schwandbach	36	1106
Gerisbach	35	1180
Steinibach	41	1060
Rütibach	30	860
Leimergraben	23	690
Sigetschwandgraben	24	636
Maienbach	33	1080
Edisriedbach	59	1270
Dorfbach Sachseln	46	1130
Wissibach	35	1175
Dornibach	51	1380
Melchaa, unteres Gebiet	33	1010

Über die Art der Bodennutzung in den verschiedenen Einzugsgebieten gibt Tab. 8 Auskunft.

Tab. 8. Art der Bodennutzung in den Einzugsgebieten (Angaben in km²).

	Düngegebiet	Weide	Wald	Ungentütztes Gebiet
Blattibach und Rädishaldenbach	1,23	0,16	0,66	
Schwandbach	1,62	0,78	1,68	
Gerisbach	3,50	2,27	4,43	
Steinibach	0,32	5,59	7,09	
Rütibach	4,32	0,16	2,33	
Leimergraben	0,25		0,24	
Sigetschwandgraben	0,12	0,11	0,21	
Maienbach	0,70	2,69	1,67	
Edisriedbach	0,89	1,69	2,07	
Dorfbach Sachseln	1,09	1,35	1,94	
Wissibach	1,51		0,44	
Dornibach	0,71		0,17	
Melchaa, unteres Gebiet	4,37	7,40	9,68	0,31

Durch Korrelationsanalyse wurden für die einzelnen Nutzungsarten die folgenden Nährstoffverluste des Bodens durch Aus- und Abschwemmung ermittelt:

Tab. 9.

	N, total gelöst		P, total gelöst	
	mg/l	kg/km ² · Jahr	µg/l	kg/km ² · Jahr
Wald	0,6	840	3	4
Weiden, ungedüngt	1,2	1650	54	74
Grasland, gedüngt	1,4	1940	74	102

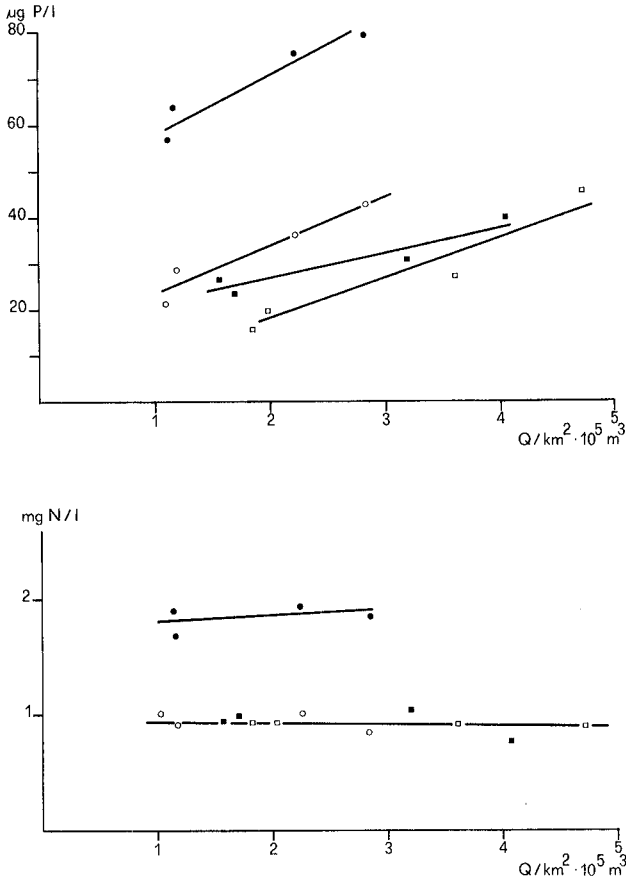


Abb.1. Phosphor- und Stickstoffkonzentrationen von vier Bächen im Einzugsgebiet des Sarnersees, in Abhängigkeit vom spezifischen Abfluss.

Fig.1. Concentration of phosphorus and nitrogen compounds versus the specific flow rate in four streams in the drainage area of Lake Sarnen.

2.4 Untersuchung von Linth und Limmat

Am 11./12. März 1959 wurde dieses Flußsystem an verschiedenen Stellen während 24 Stunden untersucht [7].

Da die Linth oberhalb Tierfeld sicher nicht mit Abwasser belastet war, ergibt sich hier ein weiterer Anhaltspunkt über die natürlichen Nährstoffverluste von Böden in voralpinen Gebieten. Das Einzugsgebiet umfasst 75,7 km², wovon etwa 2,25 km² (3%) mit Wald bestanden sind und etwa 4,2 km² (5,5%) als Alpweiden genutzt werden. Die restlichen Gebiete (91,5%) sind unproduktiv (Fels und Gletscher).

Am Tag der Untersuchung wurden bei einem spezifischen Abfluss von $0,337 \cdot 10^6$ m³/km² · Jahr Konzentrationen und Frachten an Phosphat und Stickstoff (Nitrat und Nitrit) ermittelt:

	$\mu\text{g/l}$	$\text{kg}/\text{km}^2 \cdot \text{Tag}$
Phosphat-P	10	0,0092
Stickstoff-N	300	0,3038

2.5 Untersuchungen im Einzugsgebiet des Hallwilersees

In dieser Arbeit ging es darum, die Gesamtnährstoffzufuhr zum Hallwilersee zu messen und die Frage zu beantworten, ob die durch natürliche Vorgänge und durch die landwirtschaftliche Düngung bedingte Nährstoffbelastung gering genug sei, um bei vollständiger Unterbindung der Abwasserzufuhr eine weitere Eutrophierung zu verhindern [1].

Zu diesem Zweck wurden aus sechs als Nährstoffhauptzubringer erkannten Bächen während eines Jahrs nach einem fixierten Zeitplan zu verschiedenen Tages- und Jahreszeiten 60 statistisch verteilte Proben erhoben und gleichzeitig die Wasserführung bestimmt.

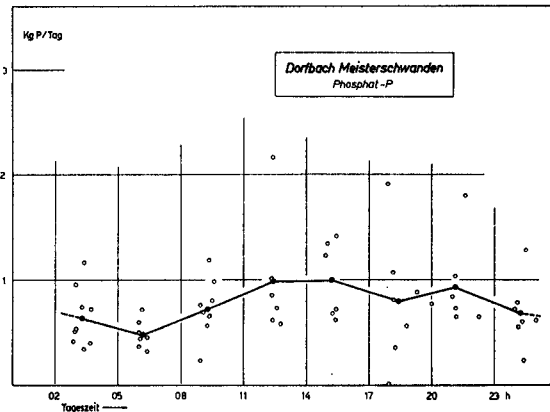


Abb.2. Phosphatfracht im Dorfbach Meisterschwanden in Abhängigkeit von der Tageszeit [1].
Fig.2. Diurnal variation of phosphorus loads in the slightly polluted stream of Meisterschwanden.

Zur Bestimmung der natürlicherweise zu erwartenden Nährstofffracht eignete sich nur der Meisterschwander Dorfbach, der bei einem relativ grossen Einzugsgebiet ($8,1 \text{ km}^2$) nur schwach mit Abwasser belastet war. $0,9 \text{ km}^2$ des Einzugsgebietes wurden forstwirtschaftlich genutzt und etwa $0,5 \text{ km}^2$ waren überbaut.

Minimale Konzentrationen wurden jeweils morgens um 6 Uhr gemessen (s. Abb.2). AMBÜHL schloss daraus, dass zu dieser Tageszeit die Gesamtfracht gleich der «natürlichen» Nährstofffracht gesetzt werden dürfe. Aufgrund dieser Annahme liess sich die forst- und landwirtschaftlich bedingte Phosphatbelastung berechnen.

$$\begin{aligned}
 \frac{\text{Landw. bedingte } \text{PO}_4\text{-P-Belastung}}{\text{km}^2 \cdot \text{Jahr}} &= \frac{365 \times 0,5 \text{ kg P/Tag}}{7,6 \text{ km}^2} \\
 &= \underline{\underline{24,0 \text{ kg P}/\text{km}^2 \cdot \text{Jahr}}}
 \end{aligned}$$

Diese Berechnung beruht auf dem Mittel von 7 Einzelmessungen, die $\pm 60\%$ um den Mittelwert schwankten und zudem alle bei Niedrigwasser erhoben wurden ($Q \leq 0,07 \text{ m}^3/\text{sec}$). Die mittlere Abflussmenge/Jahr betrug $0,098 \text{ m}^3/\text{sec}$. Nach AMBÜHL (s. Abb.3) stieg mit zunehmender Abflussmenge nicht nur die Gesamtposphorfracht, sondern auch die Fracht an gelöstem Orthophosphat an; allerdings nicht progressiv, wie dies im Einzugsgebiet des Sarnersees beobachtet wurde. Vielmehr wurde im Bereich von $0,2$ bis $0,3 \text{ m}^3/\text{sec}$ ein Sättigungsplateau erreicht, innerhalb dessen die Fracht vom Abfluss unabhängig war. Aus Abb.3 ist ferner ersichtlich, dass in etwa

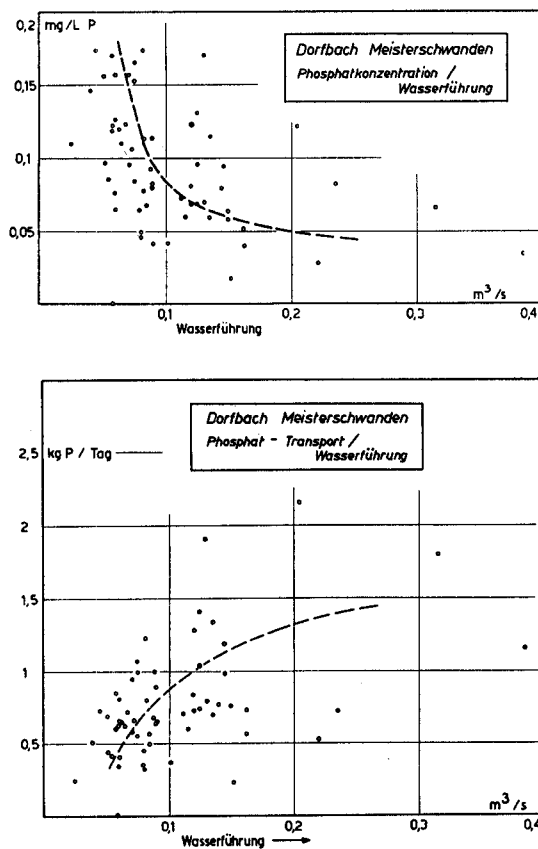


Abb. 3. Phosphatkonzentration und Phosphatfracht im Dorfbach Meisterschwanden in Abhängigkeit von der Wasserführung [1].

Fig. 3. Phosphorus concentration and phosphorus loading in the stream of Meisterschwanden versus flow rate.

76% der Beobachtungen der Abfluss grösser als $0,07 \text{ m}^3/\text{sec}$ und damit die Fracht grösser als $0,5 \text{ kg PO}_4\text{-P/Tag}$ war. Der oben berechnete Wert von $24,0 \text{ kg}$ ist daher als Minimalwert zu betrachten. Da auf der andern Seite die beobachtete Wasserführung in etwas weniger als 50% der Fälle höher als $0,098 \text{ m}^3/\text{sec}$ und zudem die Fracht nicht proportional der Abflussmenge war, musste der wirkliche Wert der Fracht kleiner als

$$\frac{365 \times 0,85 \text{ kg P/Tag}}{7,6 \text{ km}^2} = 42,0 \text{ kg PO}_4\text{-P/km}^2 \cdot \text{Jahr}$$

sein.

Der Phosphatverlust des Bodens im untersuchten Einzugsgebiet dürfte daher zwischen 24,0 und 42,0 kg PO₄-P/km²·Jahr liegen.

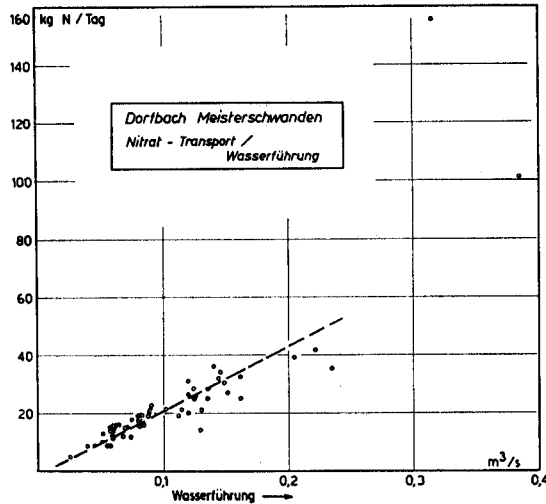


Abb. 4. Nitratfracht im Dorfbach Meisterschwanden in Abhängigkeit von der Wasserführung [1].
Fig. 4. Nitrate loading in the stream of Meisterschwanden versus flow rate.

Die Nitratkonzentrationen zeigten kaum eine Abhängigkeit von der Tageszeit und waren zudem von der Abflussmenge praktisch unabhängig. Daraus ergibt sich in Übereinstimmung zum Einzugsgebiet des Sarnersees eine lineare Abhängigkeit der Nitratfrachten von der Wasserführung (s. Abb. 4). Bei einer mittleren Abflussmenge von 0,098 m³/sec beträgt die Nitratfracht

$$20 \text{ kg N/Tag oder } \frac{365 \times 20 \text{ kg N}}{8,1 \text{ km}^2} = 900 \text{ kg NO}_3\text{-N/km}^2 \cdot \text{Jahr.}$$

Diese Untersuchungen wurden im Jahr 1956/57 durchgeführt.

2.6 Untersuchungen im Einzugsgebiet des Murtensees

Im Einzugsgebiet des Murtensees wurden zwischen dem 1. Dezember 1954 und dem 28. November 1955 11 Zuflüsse in etwa zweiwöchigen Intervallen untersucht. Insgesamt ergaben sich so 28 Untersuchungen, die unter anderem die Konzentration an Nährstoffen sowie eine Abschätzung der momentanen Wasserführung umfassten [5].

Der mittlere Jahresabfluss betrug in diesem Gebiet 0,655 · 10⁶ m³/km² · Jahr. Der Ursprung der gemessenen Nährstofffrachten liess sich leider nicht exakt erkennen, da keine Angaben darüber vorlagen, wie viele Einwohner direkt in die Vorfluter entwässer-

ten. Unter der Annahme, dass etwa $\frac{1}{3}$ der Bevölkerung an Kanalisationen angeschlossen waren, das Abwasser der restlichen $\frac{2}{3}$ die Vorfluter nicht oder nur via landwirtschaftliche Düngung beeinflussten, liessen sich die folgenden Beiträge der Landwirtschaft zur Belastung der Vorfluter abschätzen (Abwasserbeitrag: 3 gP/Kopf · Tag; 12 gN/Kopf · Tag):

Tab. 10.

Einzugsgebiet	Fläche km ²	Einwohner	Ges.-P-Fracht, herrührend vom Abw. kg/Jahr	Ges.-P-Fracht gemessene kg/Jahr	P-Verluste des Bodens kg/km ² · Jahr
La Broye	612,38	50655 $\frac{1}{3}$	18550	36130	28,7
Le Chandon	40,67	2898 $\frac{1}{3}$ $\frac{1}{10}$	1060 320	1450 1450	9,6 28,7

Während im Einzugsgebiet der Broye mehrere grössere Ortschaften wie Moudon, Lucens, Granges und Payerne liegen, hat die Besiedelung des Chandon mehr landwirtschaftlichen Charakter, so dass die Annahme, $\frac{1}{3}$ der Bevölkerung entwässere via Kanalisation, im ersten Fall zu niedrig, im zweiten Fall wahrscheinlich zu hoch getroffen ist. Der Phosphorverlust des Bodens dürfte daher etwa in der Grössenordnung von 25 bis 30 kg P/km² · Jahr liegen. Der landwirtschaftlich bedingte Anteil der Stickstofffracht lässt sich dagegen mit grösserer Genauigkeit angeben, da der Abwasserstickstoff im Einzugsgebiet der Broye, selbst wenn alle Einwohner direkt in den Fluss entwässerten, nur etwa 17% der Gesamtjahresfracht ausmacht.

Tab. 11.

Einzugsgebiet	Einwohner	Ges.-N Abwasser kg/Jahr	Ges.-N gemessen kg/Jahr	N-Verlust des Bodens kg/km ² · Jahr
La Broye	50655 $\frac{1}{3}$	222500 74167	1300810	1750 2000
Le Chandon	2898 $\frac{1}{3}$	12710 4233	58270	1120 1430

Für zwei kleine, von Abwasser sicher nicht beeinflusste Bäche ergaben sich die folgenden landwirtschaftlich bedingten Nährstofffrachten:

Einzugsgebiet	Fläche km ²	PO ₄ -P-Fracht kg/km ² · Jahr	NO ₃ -N-Fracht kg N/km ² · Jahr	Ges.-N-Fracht kg N/km ² · Jahr
Rivière de Forel	2,0	40	2380	2590
Löwenbergbach	4,3	31	2040	2490

Über die Nutzung der einzelnen Einzugsgebiete gibt Tab. 12 Auskunft.

Tab.12. Nutzung der Einzugsgebiete.

Einzugsgebiet	Fläche	Wald	Landwirtschaftlich genützte Gebiete
	km ²	%	%
Le Chandon	40,7	25,8	74,2
Rivière de Forel	2,0	4,3	95,7
Löwenbergbach	4,3	11,2	88,8

2.7 Untersuchungen im Einzugsgebiet des Pfäffikersees und Greifensees

PLEISCH [16] hat im Jahre 1967/68 an 32 Zuflüssen zum Pfäffikersee und Greifensee durch monatliche Probenahme bei gleichzeitiger Abschätzung der Wasserführung die Zufuhr an Nährstoffen zu den beiden Seen bestimmt.

Sieben der insgesamt 32 Einzugsgebiete waren nicht oder nur sehr dünn besiedelt, so dass die Nährstoffbelastung der Bäche praktisch vollständig forst- und landwirtschaftlich bedingt war. Leider wurden auch hier die Abflussmengen nicht kontinuierlich gemessen. Immerhin wurden die Stichproben so erhoben, dass die Wasserführung an den Probenahmetagen ungefähr dem mittleren jährlichen Abflusscharakter der Bäche entsprach. Dies erlaubte es uns, durch Multiplikation der pro Jahr abgeflossenen Wassermenge mit der gemessenen mittleren Nährstoffkonzentration (arithmetisches Mittel aus 12 Messungen) die Jahresfrachten abzuschätzen (s. Tab.14).

Tab.13. Art der Nutzung der untersuchten Einzugsgebiete.

Einzugsgebiet	Fläche km ²	Wald %	Landwirtschaftlich genutzt %	Abfluss spez. 10 ⁶ m ³ /km ² ·Jahr
1. Torfrietabfluss	1,4	47	53	0,58
2. Unterwiesbach	0,27	41	49	0,71
3. Murholzbach	0,16	71	29	0,62
4. Seewiesenabfluss	0,4	0	100	0,75
5. Aawiesenabfluss	0,7	15	85	0,57
6. Jungholzbach	0,2	95	5	0,50
7. Schulhausbach	0,42	33	67	0,71

Tab.14. Mittlere Konzentrationen und Jahresfrachten der einzelnen Einzugsgebiete.

	PO ₄ -P-Konz. µg/l	PO ₄ -P-Fracht kg/km ² ·Jahr	NO ₃ -N-Konz. mg/l	NO ₃ -N-Fracht kg/km ² ·Jahr	NH ₄ -N-Konz. mg/l	NH ₄ -N-Fracht kg/km ² ·Jahr	Anorg. N, Fracht kg/km ² ·Jahr
1.	17	10	4,7	2750	0,04	23	2773
2.	20	15	3,2	2380	0,04	28	2408
3.	7	4,4	1,4	880	0,03	19	899
4.	30	22,5	2,5	1880	0,13	98	1978
5.	17	9,7	2,5	1430	0,07	40	1470
6.	7	3,5	2,1	1050	0,07	35	1085
7.	23	16,3	2,6	1860	0,06	43	1903

3. Diskussion

Um die Resultate der verschiedenen Autoren miteinander vergleichen zu können, mussten die Konzentrationen (Frachten) an gelösten Phosphorverbindungen zum Teil aufgrund von angegebenen Orthophosphat- und Gesamtphosphorwerten abgeschätzt werden. Dabei wurde folgendermassen verfahren:

$$(\text{gelöster P}) = \frac{(\text{PO}_4\text{-P}) + (\text{Gesamt-P im Rohwasser})}{2}$$

wodurch sich die Orthophosphatwerte im Mittel etwa um 30% erhöhten.

Die so berechneten Werte stehen in den Tab. 15 und 16 in Klammern. Beim Stickstoff wurden keine derartigen Korrekturen eingeführt, da alle aufgeführten Werte den Nitratstickstoff einschliessen und diese Komponente in der Regel den Hauptanteil des gelösten Stickstoffs ausmacht.

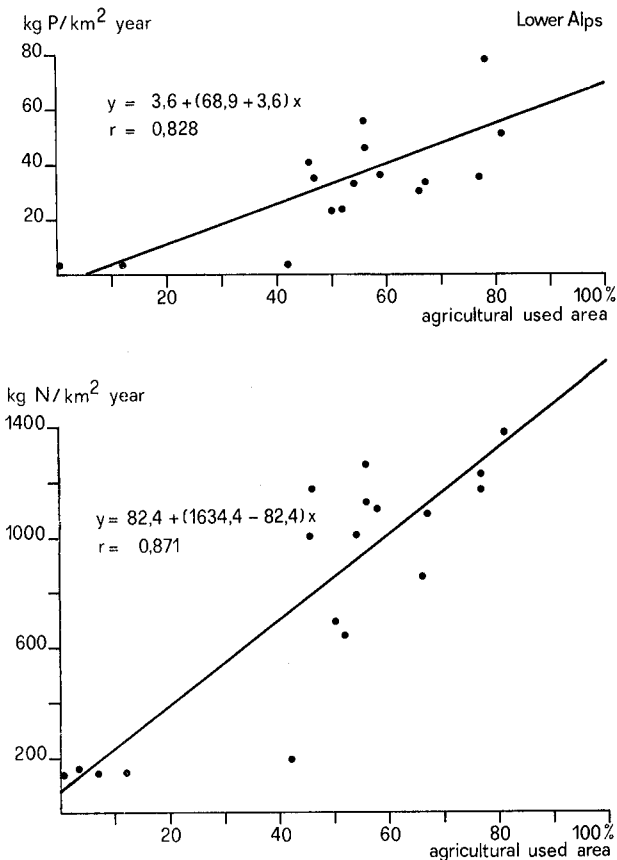


Abb. 5. Frachten von gelösten Phosphor- und Stickstoffverbindungen in Abhängigkeit vom relativen Anteil der landwirtschaftlich genutzten Fläche an der Gesamtfläche des Einzugsgebietes in den Voralpen.

Fig. 5. Annual loadings of dissolved phosphorus and nitrogen compounds versus the relative amount of land used for agricultural purposes in the Lower Alps.

Tab.15. Art der Nutzung und Nährstoffverluste von verschiedenen schweizerischen Voralpengebieten (Lower Alps).

Einzugsgebiet	Abfluss 10 ⁶ m ³ / km ² · Jahr	Landwirt- schaftlich genutzt %	Forstwirt- schaftlich genutzt %	Nicht genutzt %	Phosphor, gelöst		Stickstoff, gelöst	
					µgP/l	kgP/km ² · Jahr	mgN/l	kgN/km ² · Jahr
<i>Alptal</i>								
I	1,30	6,9	56	37,1	–	–	0,20	149
III		12	63	25	3 ¹⁾	3,9 ¹⁾	0,20	149
V		42	37,7	20,3	3 ¹⁾	3,9 ¹⁾	0,26	193
VII		3,6	92,6	3,8	2 ¹⁾	2,6 ¹⁾	0,22	163
VIII		–	93,5	6,5	3 ¹⁾	3,9 ¹⁾	0,19	141
<i>Alpnachersee</i>								
Widibach		23	50	27	2,3		0,487	
Chli Schliere		30	61	9	3,7		0,352	
Grosse Schliere		33	66	1	4,2		0,253	
Melbach		50	48	2	43,6		1,282	
Meliorationskanal		82	14	4	50,4		2,015	
Autobahnkanal		66	34	–	25,6		1,235	
1) Nur drei Bestimmungen.								
<i>Sarnersee</i>								
Blattibach	0,98	77,8	32,2	–	80	78	1,50	1425
Schwandbach	0,99	58,8	41,2	–	37	36	1,15	1106
Gerisbach	1,04	46,5	43,5	–	34	35	1,14	1180
Steinibach	1,32	45,5	54,5	–	31	41	0,81	1060
Rütibach	0,88	66,0	34,2	–	34	30	1,05	860
Leimergraben	0,73	50,0	50,0	–	32	23	0,95	690
Sigetschwandgraben	0,74	52,0	48,0	–	33	24	0,86	636
Maienbach	1,22	67,0	33,0	–	27	33	0,91	1080
Edisriedbach	1,27	56,0	44,0	–	46	59	1,00	1270
Dorfbach Sachseln	1,12	56,0	44,0	–	41	46	1,01	1130
Wissibach	0,82	77,0	23,0	–	43	35	1,42	1175
Dornibach	0,74	81,0	19,0	–	69	51	1,86	1380
Melchaa	1,05	54,0	44,6	1,4	31	33	0,94	1010
<i>Lindt</i>								
Tierfeld	0,34 ¹⁾	5,5	3,0	91,5	10		0,30	
1) Am Tag der Untersuchung.								

Tab.16. Art der Nutzung und Nährstoffverluste von verschiedenen Gebieten des Schweizer Mittellandes (Swiss lowland).

Einzugsgebiet	Abfluss 10 ⁶ m ³ /km ² · Jahr	Landwirtschaft- lich, genutzt %	Forstwirtschaft- lich, genutzt %	Phosphor, gelöst		Stickstoff, gelöst	
				µgP/l	kgP/km ² · Jahr	mgN/l	kgN/km ² · Jahr
<i>Hallwilersee</i>							
Meisterschwander Dorfbach	0,38	83	11	59–103	24,0–42,0	2,37	900
<i>Murtensee</i>							
Le Chandon	0,655	74,2	25,8	37,6–46	25–30	1,7–2,2	1120–1430
Rivière de Forel		95,7	4,3	60	39,5	3,95	2590
Löwenbergbach		88,8	11,2	47	31	3,80	2490
<i>Greifensee–Pfäffikersee</i>							
Torfrietabfluss	0,58	53	47	(24)	(14)	4,7	2733
Unterwiesbach	0,71	59	41	(28)	(21)	3,2	2408
Murholzbach	0,62	29	71	(7)	(4,4)	1,4	1899
Seewiesenabfluss	0,75	100	0	(35)	(26,5)	2,6	1978
Aawiesenabfluss	0,57	85	15	(22)	(12,6)	2,6	1470
Jungholzbach	0,50	5	95	(14)	(7)	2,2	1085
Schulhausbach	0,71	67	33	(28)	(19,7)	2,7	1903

3.1 Art der Nutzung des Einzugsgebietes und Nährstoffgehalt der Gewässer

In den Abb. 5 und 6 sind die flächenspezifischen Stickstoff- und Phosphorfrachten in Abhängigkeit vom landwirtschaftlich genutzten Flächenanteil des Einzugsgebietes aufgetragen.

Wenn a den flächenspezifischen Nährstoffverlust des nicht landwirtschaftlich genutzten Gebietes und b jenen des landwirtschaftlich genutzten Areals bedeutet, so ergibt sich der durch Aus- und Abschwemmung bedingte Nährstoffverlust Y eines gemischt genutzten Gebietes aus

$$Y = (1-X) a + Xb$$

oder

$$Y = a + (b-a)X,$$

wobei X den relativen Flächenanteil des landwirtschaftlich genutzten Gebietes bedeutet ($X \leq 1$).

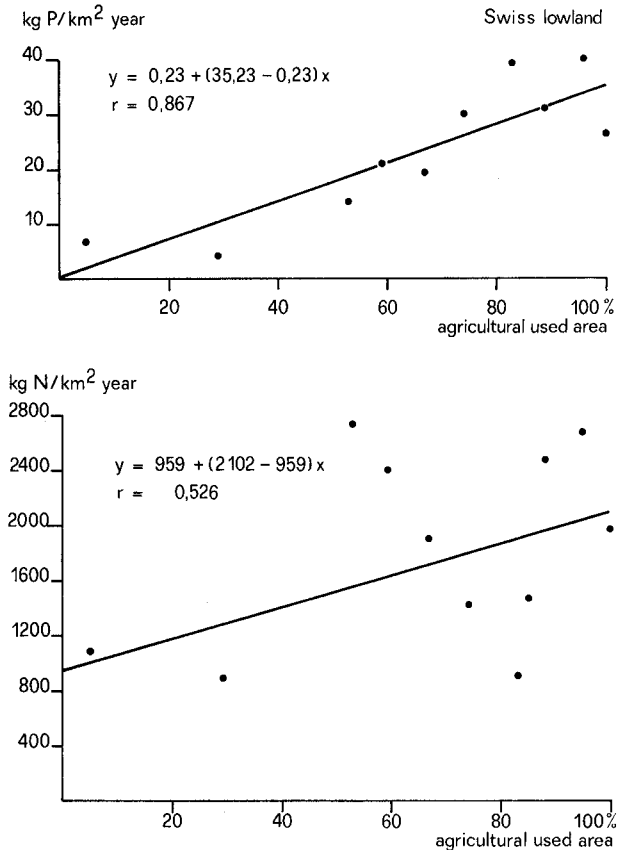


Abb. 6. Frachten an gelösten Phosphor- und Stickstoffverbindungen in Abhängigkeit vom relativen Anteil der landwirtschaftlich genutzten Fläche an der Gesamtfläche des Einzugsgebietes im Mittelland.

Fig. 6. Annual loadings of dissolved phosphorus and nitrogen compounds versus the relative amount of land used for agricultural purposes in Swiss lowland.

Eine solche Unterteilung in nur zwei Nutzungsarten, ohne Berücksichtigung der angewandten Düngerpraxis, Bewirtschaftungsart (Weiden, Wiesen, Äcker) und der lokalen klimatischen und topographischen Bedingungen, ist natürlich sehr grob und dürfte mit den natürlichen Gegebenheiten nur entfernt übereinstimmen.

Trotzdem ergibt sich zumindest für den Phosphor eine überraschend gute Übereinstimmung mit dem obigen Ansatz. Die Phosphorverluste von bewaldeten Gebieten sind sowohl in den Voralpen als auch im Mittelland praktisch gleich «null». Wird das Einzugsgebiet aber zu 100% landwirtschaftlich genutzt, so ist im Mittelland ein Phosphorverlust des Einzugsgebietes von etwa 35 kg P/km²·Jahr und in den Voralpen ein solcher von etwa 70 kg P/km²·Jahr zu erwarten. Die erhöhten Phosphorverluste von präalpinen Böden erklären sich zur Hauptsache aus den höheren Abflussmengen verbunden mit verstärkter Erosion.

Für voralpine Gebiete beträgt der Stickstoffverlust von forstwirtschaftlich genutzten Böden etwa 82 kg N/km²·Jahr und derjenige von rein landwirtschaftlich genutzten Arealen 1634 kg N/km²·Jahr. Nach Abb. 6 nehmen die Stickstofffrachten mit zunehmendem Anteil der landwirtschaftlich genutzten Fläche stärker zu als im Mittelland (Abb. 5). Es muss dabei jedoch berücksichtigt werden, dass die Erhebungen in Einzugsgebieten von verschiedener Höhenlage durchgeführt wurden. Betrachtet man die beiden Gebiete Alptal (Höhe des Einzugsgebietes etwa 1100–1500 m ü. M.) und Sarnerseegebiet (500–1700 m ü. M.) getrennt, so ergeben sich für rein forstwirtschaftlich genutzte Gebiete im Alptal Stickstoffverluste von 145 kg N/km²·Jahr, im Sarnerseegebiet dagegen 300 kg N/km²·Jahr. Die Gleichung für die Regressionsgerade des Sarnerseegebietes allein wäre

$$Y = 301,5 + (1547,4 - 301,5) X.$$

Die Einzelwerte der gemessenen Stickstoffverluste von Mittellandböden streuen sehr stark um die berechnete Regressionsgerade. Immerhin fällt auf, dass bei «gleicher» Nutzungsart die Stickstoffverluste im Mittelland grösser sind als im Voralpengebiet. Die starke Streuung der Einzelwerte um die berechnete Regressionsgerade ist damit zu erklären, dass sich das «landwirtschaftlich genutzte Gebiet» im Mittelland wesentlich heterogener zusammensetzt (verschiedene Arten von Ackerbau, Kunstwiesen, Naturwiesen, Weiden) als in den Voralpen (Naturwiesen und Weiden) [8].

Für Mittellandgebiete beträgt der Stickstoffverlust von rein forstwirtschaftlich genutzten Gebieten etwa 960 kg N/km²·Jahr, derjenige von rein landwirtschaftlich genutzten Arealen dagegen 2100 kg N/km²·Jahr. Die erhöhten Stickstoffverluste der Waldböden in niederen Lagen sind auf einen intensiveren biologischen Stickstoffumsatz zurückzuführen.

Zusammenfassend ist im Mittel in rein landwirtschaftlich genutzten Gebieten mit folgenden Verlusten an gelösten Stickstoff- und Phosphorverbindungen zu rechnen:

	kg N/km ² ·Jahr	kg P/km ² ·Jahr
Voralpengebiete	1634	69
Mittelland	2100	35

Die Nährstofffrachten von Fliessgewässern sind nicht nur von den im Boden des Einzugsgebietes vorhandenen gelösten oder löslichen Nährstoffen abhängig, sondern gleichzeitig auch vom spezifischen Abfluss:

$$\text{Fracht} = \text{Konzentration} \times \text{Abfluss}$$

Die Konzentration ihrerseits kann vom Abfluss abhängig (Phosphor, Abb.1, 3) oder unabhängig (Stickstoff, Abb.1, 4) sein Sicher ist sie immer abhängig von der im Boden gelösten oder löslichen Nährstoffmenge.

Um den Einfluss der unterschiedlichen Abflussmengen in den untersuchten Einzugsgebieten zu eliminieren, wurden in den Abb.7 und 8 die Konzentrationen in Abhängigkeit von der Art der Nutzung des Einzugsgebietes aufgetragen. Es zeigt sich, dass mit zunehmendem Anteil des landwirtschaftlich genutzten Gebietes an der Gesamtfläche des Einzugsgebietes die mittleren Nährstoffkonzentrationen ansteigen, dass die Konzentrationen an gelösten Phosphorverbindungen bei «gleicher» Nutzungsart im Mittelland und Voralpengebiet beinahe übereinstimmen, die Stickstoffkonzentrationen im Mittelland aber wesentlich höher sind als in den Voralpen.

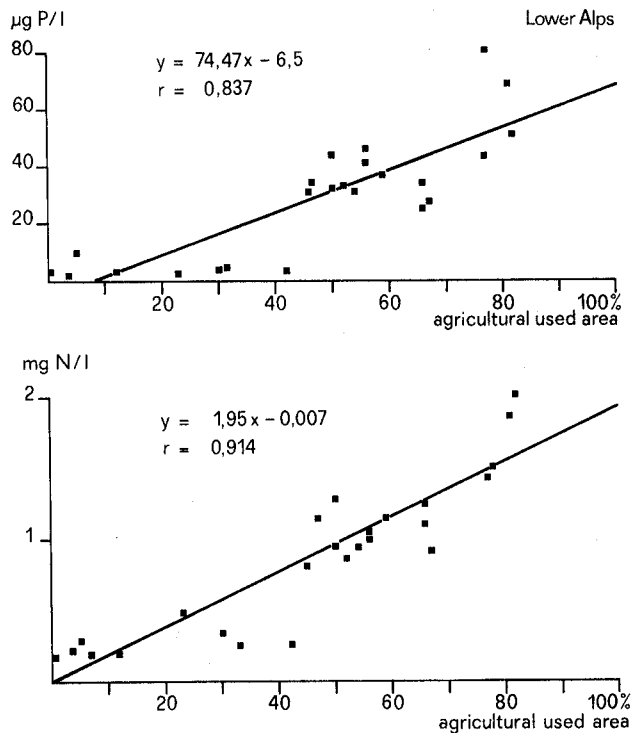


Abb.7. Konzentrationen an gelösten Phosphor- und Stickstoffverbindungen in Bächen des Voralpengebietes in Abhängigkeit vom relativen Anteil der landwirtschaftlich genutzten Fläche an der Gesamtfläche des Einzugsgebietes.

Fig.7. Concentration of dissolved phosphorus and nitrogen compounds in streams of the Lower Alpine region versus the relative amount of land used for agricultural purposes.

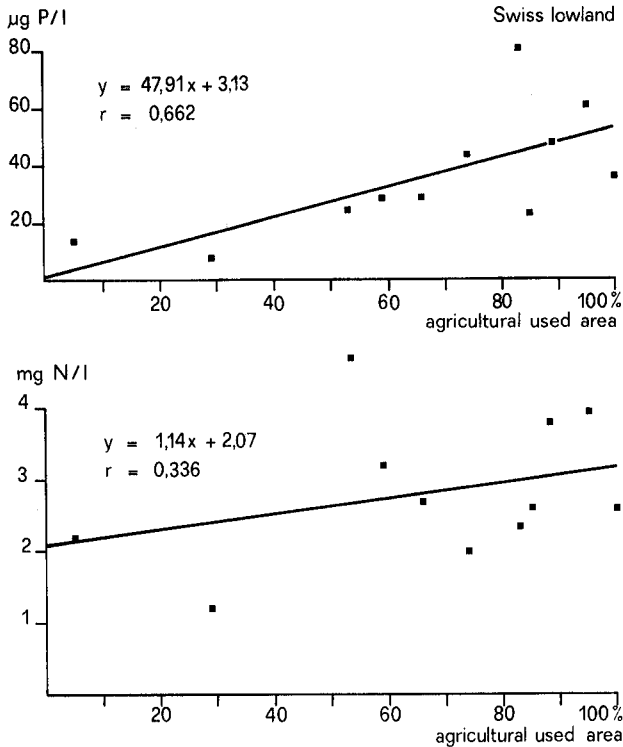


Abb. 8. Konzentrationen an gelösten Phosphor- und Stickstoffverbindungen in Bächen des Mittellandes in Abhängigkeit vom relativen Anteil der landwirtschaftlich genutzten Fläche an der Gesamtfläche des Einzugsgebietes.

Fig. 8. Concentration of dissolved phosphorus and nitrogen compounds in streams of Swiss lowland versus the relative amount of land used for agricultural purposes.

Macht man auch hier einen linearen Ansatz für die Abhängigkeit der Stoffkonzentrationen vom Anteil des landwirtschaftlich genutzten Gebietes an der Gesamtfläche des Einzugsgebietes, so können die Phosphorkonzentrationen der Gewässer in rein forstwirtschaftlich genutzten Gebieten gegenüber denjenigen von rein landwirtschaftlich genutzten Gebieten vernachlässigt werden.

Dass trotz geringerer Phosphordüngung in den Voralpen bei «gleicher» Nutzungsart sogar leicht höhere Phosphorkonzentrationen in den Vorflutern erreicht werden als im Mittelland, hat 2 Ursachen:

- Der Phosphorgehalt des Bodens wird durch die Düngung nur unwesentlich beeinflusst;
- In den voralpinen Gebieten werden die Phosphorverbindungen nicht nur durch Perkolation ausgewaschen, sondern zu einem erhöhten Teil durch Erosion abgewaschen. Diese Hypothese wird dadurch bestätigt, dass im Mittelland mit steigendem Abfluss die Phosphatkonzentrationen niedriger werden (Verdünnung, s. Abb. 3), im voralpinen Gebiet aber eher noch ansteigen (Erosion, s. Abb. 1).

Da die Nitratkonzentrationen von der Abflussmenge weitgehend unabhängig sind (s. Abb. 1,4), können die höheren Konzentrationen der Mittellandbäche nur mit einer höheren Menge an gelösten oder löslichen Stickstoffverbindungen im Boden, bedingt durch die intensivere mikrobielle Mobilisierung und (oder) die vermehrte Stickstoffdüngung, erklärt werden.

3.2 Der relative Anteil der Landwirtschaft an der Gesamtnährstoffbelastung einiger Schweizer Seen

Der prozentuale Anteil der Landwirtschaft an der Gesamtbelastung von Seen mit Pflanzennährstoffen hängt neben den klimatischen und topographischen Verhältnissen in erster Linie von der Bevölkerungsdichte und der Art der landwirtschaftlichen Nutzung des Einzugsgebietes ab.

Aus Tab. 17 und Abb. 9 ist ersichtlich, dass bei mittleren Bevölkerungsdichten von 50 bis 150 Einwohnern/km² der Anteil des Abwasserstickstoffs unter 35%, der Anteil

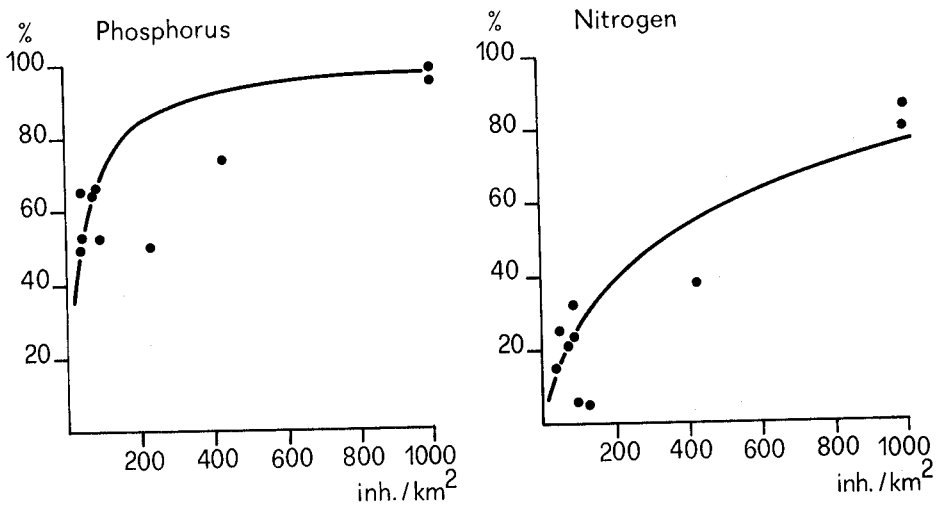


Abb. 9. Prozentualer Anteil des Abwassers an der Phosphor- und Stickstoffbelastung von einigen Schweizer Seen in Abhängigkeit von der Bevölkerungsdichte des Einzugsgebietes. Die Kurven wurden auf folgender Basis berechnet:

	Abwasser	Nährstoffverluste des Bodens
Phosphor	3 g P/Kopf·Tag	40 kg P/km ² ·Jahr
Stickstoff	12 g N/Kopf·Tag	1400 kg N/km ² ·Jahr

Fig. 9. Percentage of phosphorus and nitrogen load caused by sewage in some Swiss lakes versus population density in the drainage area. The curves were calculated on the following assumption:

	Sewage	Losses of nutrients in soil
phosphorus	3 g P/capita·day	40 kg P/km ² ·year
nitrogen	12 g N/capita·day	1400 kg N/km ² ·year

Tab. 17. Abwasseranteil an der Gesamtnährstoffbelastung einiger Seen.

Einzugsgebiet	Bevölkerungs-	Phosphor		Stickstoff	
	dichte Ew./km ²	%	%		
Zürichsee	86	53	24	THOMAS zit.	[19]
Zürichsee		67	33	EAWAG zit.	[19]
Murtensee	89	52	6	EAWAG	[5]
Hallwilersee	125	50	5	AMBÜHL	[1]
Alpenrhein (Bodensee)	39	53-66	26	VOLLENWEIDER	[19]
Lago di Muzzano	1000	95	80	VOLLENWEIDER	[19]
		98	87	EAWAG	[2]
Mauensee	35	50	15	EAWAG	[3]
Inkwilersee	70	65	22	EAWAG	[4]
Greifensee	430	74	38	PLEISCH	[16]

des Abwasserphosphors dagegen im Bereich von 50 bis 75% der Gesamtbelastung liegt. Die restlichen 25-50% des Phosphors und 65-75% des Stickstoffs werden zur Hauptsache aus kultivierten und natürlichen Böden aus- und abgeschwemmt.

Die Stickstoffverluste des landwirtschaftlich genutzten Bodens liegen im Voralpengebiet bei 1630 kg N/km²·Jahr und im Mittelland im Bereich von 2500 kg N/km²·Jahr. Die entsprechenden Phosphorverluste betragen etwa 70 kg P/km²·Jahr im Voralpengebiet und etwa 35 kg P/km²·Jahr im Mittelland. Gemessen am jährlich ausgebrachten Handelsdünger sind das Verluste, die in der Grössenordnung von 16 bis 25% für den Stickstoff und etwa 0,7-1,4% für den Phosphor liegen.

Diese Feststellung und die Tatsache, dass ein relativ bescheidener Teil des den Seen zugeführten Phosphors, aber ein beachtlicher Teil des Stickstoffs aus dem Boden des Einzugsgebietes stammt, sollte nicht dazu verleiten, im Zusammenhang mit dem Eutrophierungsproblem den landwirtschaftlich bedingten Stickstofffrachten grössere Bedeutung zuzumessen als den Phosphorfrachten gleichen Ursprungs.

Algen bauen bei ausgeglichenem Wachstum die beiden Nährelemente Stickstoff und Phosphor im Gewichtsverhältnis von 7:1 ein. Das N:P-Verhältnis der Fliessgewässer variiert regional: Es liegt im voralpinen Gebiet im Bereich von 30, im Mittelland dagegen im Bereich von 80. In beiden «Gewässertypen» ist es aber wesentlich grösser als 7:1. Das bedeutet, dass das Wachstum der Algen in diesen Bächen und Flüssen durch das Phosphorangebot limitiert wird.

Abwasser hat dank dem relativ hohen Phosphorgehalt (50% der Phosphorverbindungen stammen aus Waschmitteln) ein niedriges N:P-Verhältnis von etwa 4:1. Entsprechend den obigen Ausführungen würde hier das Wachstum der Wasserpflanzen durch das Stickstoffangebot kontrolliert.

In Abb. 10 wurde das zu erwartende N:P-Verhältnis der Vorfluter in Abhängigkeit von der Bevölkerungsdichte und der Art der Bewirtschaftung des Einzugsgebietes für Regionen in den Voralpen und im Mittelland abgeschätzt. Dabei gingen wir von der Annahme aus, dass das Abwasser dem Vorfluter ungeklärt zugeleitet werde. Bei einer Behandlung der Abwässer in einer mechanisch-biologischen Kläranlage mit etwa gleichem Eliminationseffekt für Phosphor und Stickstoffverbindungen würden die Kurven die 7:1-Grenze bei noch höheren Bevölkerungsdichten schneiden. Da das

Wachstum der Algen in Seen vor allem durch das Phosphorangebot kontrolliert wird, gehen die Bestrebungen in der Schweiz dahin, dem Abwasser in einer dritten Reinigungsstufe zusätzlich noch Phosphorverbindungen zu entziehen. Bei einem Eliminationseffekt einer solchen Kläranlage von 50% für die Stickstoff- und 90% für die

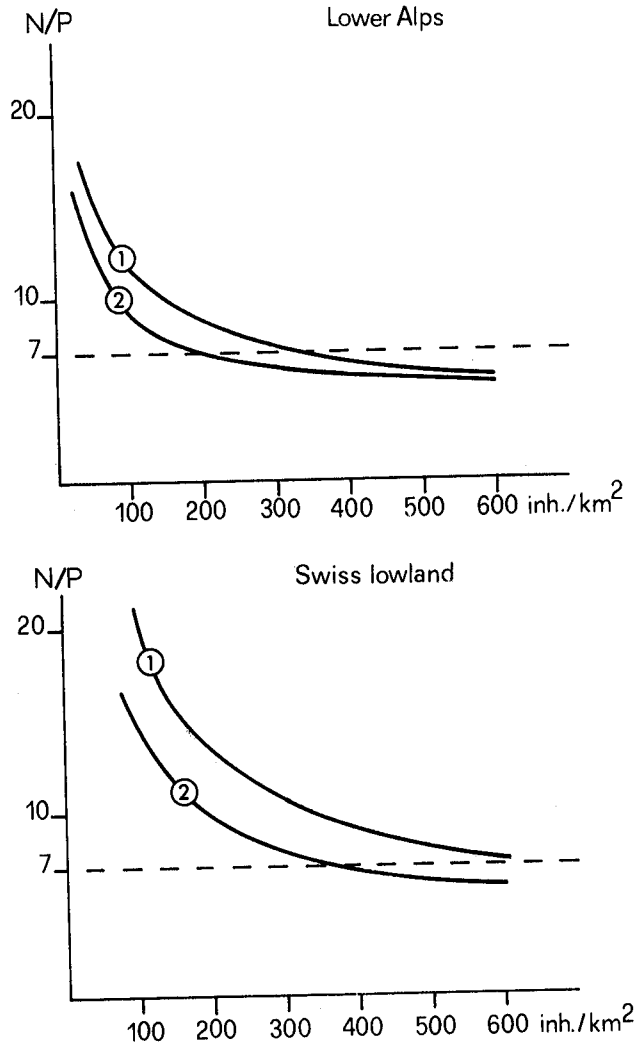


Abb. 10. Zu erwartendes N:P-Verhältnis in Fließgewässern, in Abhängigkeit von der Art der Bewirtschaftung und der Bevölkerungsdichte des Einzugsgebietes.

1 90% der Fläche landwirtschaftlich genutzt.

2 50% der Fläche landwirtschaftlich genutzt.

Fig. 10. The expected N/P ratio in rivers dependent on population density in the drainage area and the method of cultivation.

1 when 90% of the drainage area is used for agricultural purposes (tillage land and grass land)
2 when 50% of the drainage area is used for agricultural purposes.

Phosphorverbindungen erhöht sich das N:P-Verhältnis im Abfluss der Anlage auf etwa 20:1. Im Vorfluter würde dementsprechend das N:P-Verhältnis nie mehr unter 20:1 fallen. Zudem gilt es zu berücksichtigen, dass Phosphorverbindungen in Seesedimenten vor allem unter aeroben Bedingungen stärker zurückgehalten werden als Stickstoffverbindungen, so dass sich das N:P-Verhältnis im See nochmals zugunsten des Stickstoffs verschiebt. Wir kommen daher auf anderem Weg zur gleichen Schlussfolgerung wie VOLLENWEIDER [19], dass für schweizerische Verhältnisse, bei einer mittleren Bevölkerungsdichte von etwa 150 Einwohnern/km² (die sich zur Hauptsache aufs Mittelland konzentriert), in der Regel Phosphor und nicht Stickstoff das wachstumsbegrenzende Nährelement in Seen sei. Dies wurde durch Untersuchungen im Vierwaldstättersee experimentell direkt bestätigt [9,17]. Das bedeutet, dass die Stickstoffverluste des Bodens, ökonomisch gesehen, zwar bedeutungsvoll sein mögen, dass aber die in dieser Hinsicht bedeutungslosen Phosphorverluste des Bodens entscheidend zur Eutrophierung der Gewässer beitragen können. Im Zusammenhang mit dem Eutrophierungsproblem ist daher den Phosphorverlusten grössere Bedeutung zuzumessen.

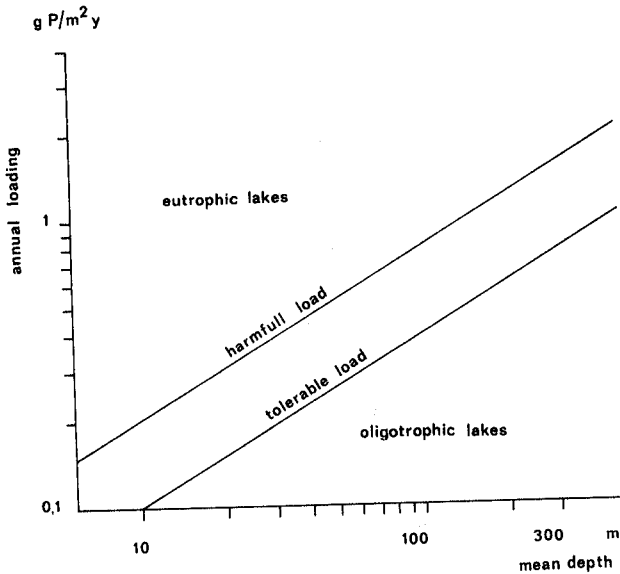


Abb. 11. Belastungsgrenzen für biologisch aktive Phosphorverbindungen in Abhängigkeit von der mittleren Seetiefe. Nach VOLLENWEIDER [19].

Fig. 11. Tolerable and harmful loading of phosphorus compounds as a function of the mean depth of a lake (VOLLENWEIDER [19]).

VOLLENWEIDER [19] hat versucht, unter Berücksichtigung der mittleren Tiefe (Seevolumen/Seeoberfläche) und der spezifischen Belastung von Seen mit biologisch aktiven Phosphorverbindungen (Zufuhr/Seeoberfläche) Grenzen zwischen oligotrophe, mesotrophe und eutrophe Seen zu legen. Daraus ergaben sich die in Abb. 11 wiedergegebenen Belastungsgrenzen.

Die Phosphorzufuhr zu einem See (P_Z) ist proportional der Fläche des Einzugsgebietes (F_E) und dem flächenspezifischen Phosphorexport (P_E) aus dem Einzugsgebiet.

$$P_Z = F_E \cdot P_E \quad (1)$$

Der von OHLE [15] in der Limnologie eingeführte Begriff des «Umgebungsfaktors» gibt an, wievielmals die Seeoberfläche F_S in der Fläche des Einzugsgebietes F_E enthalten ist.

$$f_U = \frac{F_E}{F_S} \quad (2)$$

Dividiert man die Gleichung (1) durch die Seeoberfläche, so erhält man die spezifische Phosphorbelastung des Sees (P_Z/F_S) in Abhängigkeit von f_U und P_E

$$\frac{P_Z}{F_S} = f_U \cdot P_E \quad (3)$$

In Abb. 12 wurde unter Berücksichtigung der von VOLLENWEIDER [1] angegebenen Belastungsgrenzen der tolerierbare flächenspezifische Phosphorexport aus dem Ein-

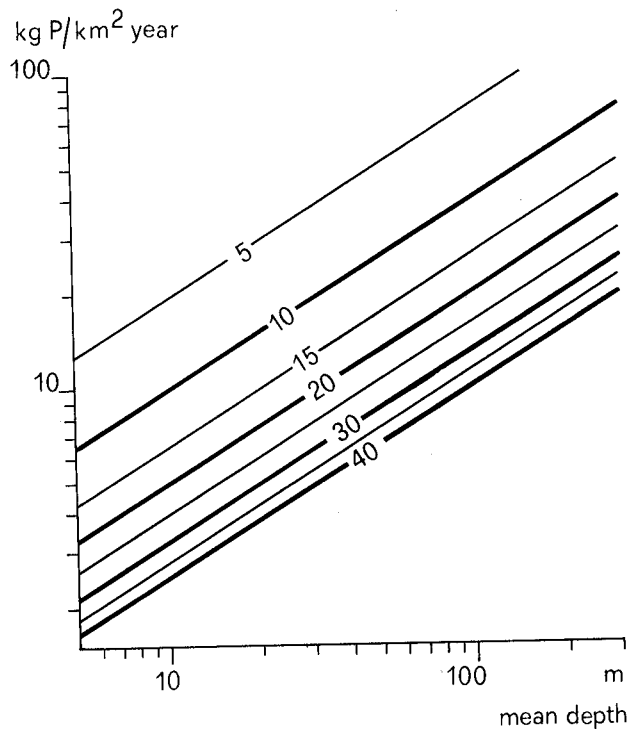


Abb. 12. Tolerierbarer flächenspezifischer Phosphorexport aus dem Einzugsgebiet von Seen in Abhängigkeit von der mittleren Seetiefe und dem Umgebungsfaktor.

Fig. 12. Tolerable phosphorus supply from the drainage area of lakes as a function of the mean depth of the lake and surrounding factor f_U . $\left(f_U = \frac{\text{drainage area}}{\text{lake surface}} \right)$.

zugsgebiet von Seen in Abhängigkeit von der mittleren Seetiefe für verschiedene f_v aufgetragen. Der für einen See gefährliche Phosphorexport aus dem Einzugsgebiet ist nach VOLLENWEIDER [19] doppelt so gross wie der tolerierbare.

In der unten wiedergegebenen Tabelle wurden für Schweizer Seen von mehr als 1 km² Oberfläche die Umgebungsfaktoren, die mittleren Tiefen und die tolerierbaren und gefährlichen Phosphorexporte aus den Einzugsgebieten zusammengestellt. Es wurde angenommen, dass der Phosphorrückhalt der Seen generell 80% betrage. Dadurch reduzierte sich das «wirksame» Einzugsgebiet jener Seen, die einen Teil ihres Wassers aus einem andern See erhalten, um 80% des Einzugsgebietes der obliegenden Staustufe.

Name des Sees	f_v	Mittlere Tiefe m	Phosphorexport aus dem Einzugsgebiet tolerierbar bis kg P/km ² ·Jahr	gefährlich über kg P/km ² ·Jahr
Genfersee	13,7	154	38	76
Bodensee	21,5	90	20	40
Neuenburgersee	10,0	64	30	60
Langensee	31,0	175	18	36
Vierwaldstättersee	19,8	104	20	40
Zürichsee	11,0	44	24	48
Luganersee	12,5	134	36	72
Thunersee	33,0	135	15	30
Bielensee	124,0	28	2	4
Zugersee	6,8	84	56	112
Brienzersee	40,0	176	15	30
Walensee	44,0	103	9	18
Murtensee	30,0	22	6	12
Sempachersee	5,4	46	46	92
Hallwilersee	8,9	21	17	34
Lac de Joux	22,0	18	6,5	13
Greifensee	19,0	19	7	14
Sarnersee	34,5	32	8	16
Ägerisee	6,6	49	37	74
Baldeggersee	14,1	34	15	30
Silsensee	11,0	34	20	40
Pfäffikersee	8,9	18	12	24
Klöntalersee	25,0	13	5	10
Silvaplannersee	37,0	48	7	14
Lowerzersee	22,0	7	4	8
Lungernsee	48,0	17	3	6
Poschiavosee	98,0	56	3	6
Lago Bianco	7,6	18	20	40

Aus dieser Tabelle ist ersichtlich, dass bei einem Phosphorexport von 35 bis 70 kg P/km² · Jahr (Phosphorexport von landwirtschaftlich genutzten Gebieten) die meisten Seen gefährdet wären. Bei einem angenommenen Phosphorexport von 35 kg P/km² · Jahr wären nur noch etwa 10% der Seen oligotroph, 30% mesotroph und etwa 60% eutroph. Meist wird jedoch nur ein Teil des Einzugsgebietes landwirtschaftlich genutzt. In der Schweiz ist etwa ein Viertel der Fläche unproduktiv und ein weiterer Viertel ist mit Wald bestanden, so dass der mittlere Export aus dem Boden der Einzugsgebiete etwa 14–35 kg P/km² · Jahr betragen dürfte. Bei einem Phosphorexport von 14 kg P/km² · Jahr wären etwa 50% der Seen oligotroph und nur etwa 30% eutroph.

Die Phosphorverluste des Bodens machen jedoch nur einen Teil der Gesamtphosphorbelastung der Seen aus. Rechnet man mit 3 g P/Kopf · Tag, so ergeben sich in Abhängigkeit von der Bevölkerungsdichte zusätzlich noch die folgenden abwasserbedingten Phosphorlasten (kg P/km² · Jahr):

Bevölkerungsdichte Einwohner/km ²	mech.-biol. Reinigung 30%	P-Eliminations- effekt 85%	mech.-biol.-chem. Reinigung 95%
10	7,7	1,65	0,55
50	38,5	8,25	2,75
100	77,0	16,5	5,5
200	154,0	33,0	11,0

Werden die Abwässer nur mechanisch-biologisch gereinigt, so ist selbst bei kleinen Bevölkerungsdichten von nur 50 Einwohnern/km² mit einer Phosphorbelastung zu rechnen, die für die meisten Seen die gefährliche Grenze überschreitet.

Bei Bevölkerungsdichten von etwa 100 Einwohnern/km² dürfte in den meisten Fällen selbst eine 85prozentige Phosphorelimination aus dem Abwasser nicht ausreichen, um die Seen im oligotrophen Zustand halten zu können.

4. Zusammenfassung

In den schweizerischen Seen wird das Algenwachstum meist durch das Phosphor-, manchmal aber auch durch das Stickstoffangebot kontrolliert. Die allochthone Zufuhr dieser Nährelemente zu einem Gewässer setzt sich zusammen aus der Zufuhr aus der Luft (Niederschläge, Stickstoffixierung), aus den Böden des Einzugsgebietes (Eluation und Erosion) und aus dem Abwasser.

Anhand von Angaben aus sieben, zum Teil nicht publizierten Originalarbeiten wurde versucht, die Phosphor- und Stickstoffverluste von Böden in Abhängigkeit von der Art der Bewirtschaftung, vom Klima und der Topographie für schweizerische Verhältnisse abzuschätzen (Abb. 5–8). Es wurden dabei die folgenden Werte ermittelt:

	P- und N-Verluste in rein forstwirtschaftlich genutzten Gebieten		P- und N-Verluste in rein landwirtschaftlich genutzten Gebieten	
	kg P/km ² ·Jahr	kg N/km ² ·Jahr	kg P/km ² ·Jahr	kgN/km ² ·Jahr
Schweizerische Voralpen	0-4	82	69	1634
Schweizerisches Mittelland	0-1	959	35	2102

Die höheren Phosphorverluste in landwirtschaftlich genutzten voralpinen Gebieten sind mit den grösseren spezifischen Abflussmengen (m³/km²·Jahr) und mit den die Erosion begünstigenden steileren Lagen zu erklären. Es wird vermutet, dass bei dem milderen Klima im Mittelland die höheren Stickstoffverluste der Mittellandböden zum Teil auf die intensivere mikrobielle Mobilisierung, zum Teil auf die vermehrte Stickstoffdüngung in diesen Gebieten zurückzuführen ist.

Der Anteil der Landwirtschaft an der Gesamtnährstoffbelastung eines Sees hängt neben der Art der Bewirtschaftung des Einzugsgebietes wesentlich von dessen Bevölkerungsdichte und der Abwasserklärtechnik ab (Tab. 17, Abb. 9). Es wird angenommen, dass für schweizerische Verhältnisse in der Regel mehr als 70% des Stickstoffs, aber weniger als 50% des den Seen zugeführten Phosphors aus den Böden des Einzugsgebietes stammen.

Bei ausgeglichenem Wachstum bauen Algen Stickstoff und Phosphor im Gewichtsverhältnis von etwa 7:1 in ihre Körpersubstanz ein. Das N:P-Verhältnis der vom Abwasser nicht beeinflussten Vorfluter liegt im voralpinen Gebiet im Bereich von 30, im Mittelland im Bereich von 80 und würde erst nach der Mischung mit ungeklärtem Abwasser (N:P = 4:1) von 200 bis 300 Einwohnern/km² auf etwa 7 absinken (Abb. 10). Daraus wird geschlossen, dass von diesen beiden Makroelementen wohl in den meisten Fällen Stickstoff im Überschuss vorhanden ist und das Algenwachstum durch das Phosphorangebot kontrolliert wird.

Es werden tolerierbare Phosphorexporte aus dem Einzugsgebiet in Abhängigkeit von der mittleren Seetiefe und dem Umgebungsfaktor f_V (f_V = Fläche des Einzugsgebietes/Seefläche) angegeben (Abb. 12). Es ist zu befürchten, dass dieser kritische Wert in vielen Fällen allein durch die Phosphorverluste des Bodens erreicht oder gar überschritten wird.

RÉSUMÉ

Dans les lacs suisses, la croissance des algues est généralement contrôlée par l'offre en phosphore, mais quelques fois aussi par l'offre en azote. L'apport allochtone de ces éléments nutritifs provient de l'atmosphère (pluie, fixation d'azote), du sol du bassin versant (éluation, érosion) et des eaux usées.

Se basant sur les données de sept rapports originaux en partie inédits, on a essayé d'estimer les pertes de phosphore et d'azote de sols en relation avec le système d'exploitation agricole, le climat et la topographie (fig. 5-8). Les valeurs suivantes ont été trouvées:

	Perte de P et N dans des régions uniquement forestières		Perte de P et N dans des régions uniquement agricoles	
	kg P/km ² · année	kg N/km ² · année	kg P/km ² · année	kg N/km ² · année
Préalpes suisses	0-4	82	69	1634
Plateau suisse	0-1	959	35	2102

Les pertes élevées de phosphore dans les régions préalpines agricoles sont dûes aux débits spécifiques relativement importants (m³/km² · année) et aux régions en pente, favorisant l'érosion. On suppose que sur le Plateau, où le climat est plus doux, les sols perdent relativement beaucoup d'azote, d'une part à cause de la mobilisation microbienne plus intense et d'autre part à cause de l'application plus importante d'engrais azotés.

La contribution de l'agriculture à la charge nutritive totale d'un lac dépend, d'une part du système d'exploitation agricole du bassin versant et d'autre part de la densité de sa population et de la technique d'épuration des eaux usées (table 17, fig. 9). On suppose qu'en Suisse, en général, plus de 70% d'azote, mais moins de 50% de phosphore apportés dans les lacs, proviennent des sols des bassins versants.

En cas de croissance équilibrée, les algues assimilent de l'azote et du phosphore dans une proportion de 7:1. La proportion N:P dans les cours d'eau de la région préalpine, non influencés par des eaux usées, se situe à 30, sur le Plateau à 80, et baisserait à 7 seulement lors d'un mélange avec des eaux usées non purifiées (N:P = 4:1) de 200 à 300 habitants/km² (fig. 19). On peut en déduire que, de ces deux macro-éléments, c'est l'azote qui est presque toujours en surplus, tandis que le phosphore est le facteur limitant la croissance des algues.

Les quantités de phosphore tolérées provenant du bassin versant sont mentionnées (fig. 12) en relation avec la profondeur moyenne du lac et le «facteur d'environnement» f_U (f_U = bassin versant/surface du lac). Il est à craindre que dans la plupart des cas, cette valeur critique soit déjà atteinte, ou même dépassée, uniquement par les pertes de phosphore du sol.

SUMMARY

In Swiss lakes, the growth of algae is generally limited by the supply of phosphorus but sometimes also by that of nitrogen. This nutrient supply into waters originates from the atmosphere (rainfall, fixation of nitrogen), from the soils in the drainage area (leaching and erosion) and from wastewater.

Based on data from seven, in part unpublished original reports, one has tried to assess the phosphorus and nitrogen loss in soil dependent on the method of cultivation, climatic conditions and topography (fig. 5-8). The resulting figures are as follows:

Nitrogen and phosphorus loss in soils	Regions used for forestry only		Regions used for agricultural purposes only	
	kg P/km ² · year	kg N/km ² · year	kg P/km ² · year	kg N/km ² · year
the Lower Alps of Switzerland	0-4	82	69	1634
Swiss lowland	0-1	959	35	2102

The increased loss of phosphorus in the Lower Alpine regions used for agricultural purposes accounts for the greater amount of specific run-off (m³/km² · year) and for the steep positions favouring erosion. It is assumed that the higher rate of nitrogen in soils of the lowland regions where

the climate is milder, is caused on the one hand by the more intensive microbiological mobilization and on the other by the more frequent application of nitrogenous fertilizers.

The agricultural contribution to the total nutrient load of a lake depends on the cultivation method in the drainage area, as well as on the population density and the effectiveness of wastewater purification (Table 17, Fig. 9). As a rule, it is assumed that for conditions prevailing in Switzerland, more than 70% of nitrogen, but less than 50% of phosphorus discharged into the lakes, originate from the soil of drainage areas.

In the case of balanced growth, nitrogen and phosphorus are assimilated by algae in a weight ratio of about 7:1. The N/P ratio in receiving water bodies of the Lower Alpine region, not influenced by wastewater, amounts to about 30, in the lowland region to about 80 and would only decrease to about 7 when mixed with untreated sewage (N/P = 4:1) from a population of 200 to 300 inhabitants/km² (fig. 10). From those two macro-elements one can infer that in most cases there is a nitrogen surplus, while the phosphorus supply is the growth limiting element in algae.

A tolerable supply of phosphorus from the drainage area dependent on the mean depth of a lake and the surrounding factor f_V (f_V = drainage area/lake surface) is given (fig. 12). The danger exists that in many cases this critical value is attained or even exceeded through phosphorus depletion in soil alone.

LITERATURVERZEICHNIS

- [1] AMBÜHL, H., *Die Nährstoffzufuhr zum Hallwilersee. Chemische Untersuchungen an seinen Zuflüssen*, Schweiz. Z. Hydrol. 22 (1960).
- [2] EAWAG, *Bericht über den gegenwärtigen Zustand des Laghetto di Muzzano und die Möglichkeiten einer Sanierung* (1968, nicht publiziert).
- [3] EAWAG, *Zwischenbericht über den gegenwärtigen Zustand des Mauensees, die getroffenen Sanierungsmassnahmen und die Auswirkungen der Tiefenwasserabteilung* (1971, nicht publiziert).
- [4] EAWAG, *Bericht über den gegenwärtigen Zustand des Inkwiliersees, die getroffenen Sanierungsmassnahmen und die Belüftung* (1970, nicht publiziert).
- [5] EAWAG, *Der Murtensee. Sein gegenwärtiger chemisch-biologischer Zustand. Die Herkunft der eutrophierenden Stoffe. Seesanieung - Schutz vor Verunreinigung* (1960, nicht publiziert).
- [6] EAWAG, *Limnologische Untersuchungen im Einzugsgebiet des Sarnersees* (1955, nicht publiziert).
- [7] EAWAG, *Die Verunreinigung von Linth und Limmat* (1959, nicht publiziert).
- [8] Eidgenössisches Statistisches Amt, *Hauptergebnisse der Landwirtschaftszählung vom 30. Juni 1979*, Volkswirtschaft 6 (1970).
- [9] GÄCHTER, R., *Phosphorhaushalt und planktische Primärproduktion im Vierwaldstättersee (Horwer Bucht)*, Schweiz. Z. Hydrol. 30 (1968).
- [10] GÄCHTER, R., SZABO, E., und MARES, A., *Die lokale Beeinflussung eines stehenden Gewässers durch eine punktförmige Abwasserbelastung; ein direkter Nachweis der wachstumsbegrenzenden Wirkung des Phosphors im Vierwaldstättersee*, Schweiz. Z. Hydrol. 33 (1971).
- [11] GISIGER, L., *Landwirtschaft und Düngewirtschaft in der Schweiz*, V^e Congrès mondial des fertilisants (Zürich, 4.-7. Mai 1964).
- [12] KELLER, H. M., *Der Chemismus kleiner Bäche in teilweise bewaldeten Einzugsgebieten in der Flyschzone eines Voralpentales*. Mitt. Schweiz. Anstalt forstliches Versuchswesen 46, 113-155 (1970).
- [13] KRUMMENACHER, T., *Die Nährstoffbilanz des Alpnachersees*, Dissertation ETH Zürich, in Vorbereitung.
- [14] MAERKI, E., *Die Verunreinigung von Linth und Limmat*, Wasser- und Energiewirtschaft 10, 3-28 (1961).
- [15] OHLE, W., *Nährstoffanreicherung der Gewässer durch Düngemittel und Meliorationen*, Münchner Beiträge 12 (1965).
- [16] PLEISCH, P., *Die Herkunft eutrophierender Stoffe beim Pfäffiker- und Greifensee*, Vjschr. naturf. Ges. Zürich 115 (1970).
- [17] STADELMANN, P., *Stickstoffkreislauf und Primärproduktion im mesotrophen Vierwaldstättersee (Horwer Bucht) und im eutrophen Rotsee, mit besonderer Berücksichtigung des Nitrats als limitierenden Faktors*, Schweiz. Z. Hydrol. 33 (1971).

- [18] THOMAS, E. A., *Empirische und experimentelle Untersuchungen zur Kenntnis der Minimumstoffe in 46 Seen der Schweiz und angrenzender Gebiete*, Schweiz. Ver. Gas- und Wasserfachm. 2 (1953).
- [19] VOLLENWEIDER, R. A., *Die wissenschaftlichen Grundlagen der Seen- und Fließgewässereutrophierung, unter besonderer Berücksichtigung des Phosphors und des Stickstoffs als Eutrophierungsfaktoren*, OECD/DAS/CSI/68.27 (1968).

Anschrift der Autoren: Dr. R. Gächter, Hydrobiologisches Laboratorium der ETHZ,
CH-6047 Kastanienbaum.
Dr. O. J. Furrer, Eidg. Forschungsanstalt für Agrikulturchemie,
CH-3097 Liebefeld-Bern.