



Dünger düngt Sempachersee

René GÄCHTER und Antonin MARES, Forschungszentrum für Limnologie, EAWAG, CH-6047 Kastanienbaum
 Christian STAMM, Institut für Terrestrische Ökologie ITÖ, Grabenstrasse 3, CH-8952 Schlieren
 Ute KUNZE, Bireggring 6a, CH-6005 Luzern
 Josef BLUM, Zentralstelle für Ökologie in der Landwirtschaft, CH-6204 Sempach

Um den Zusammenhang zwischen dem Abfluss eines Bachs und seiner Stoffkonzentration besser zu verstehen, wurde die Kleine Aa, ein stark belasteter Zufluss des Sempachersees, mit zeitlich hoch aufgelösten Messungen untersucht. Die präsentierten Daten deuten darauf hin, dass in Einzugsgebieten mit schlecht durchlässigen Böden und hohem Düngereinsatz, neben der oberflächlichen Abschwemmung von PO_4 , auch der Wassertransport über Makroporen erheblich zur PO_4 -Belastung von Fließgewässern und damit von Seen beitragen kann.

Das Einzugsgebiet der Kleinen Aa liegt am östlichen Ende des Sempachersees. Das Gewässernetz von 14,8 km Länge entwässert ein Einzugsgebiet von 6,9 km². 38 % oder 5,6 km des Gewässerlaufs sind eingedolt (Fischer und Blum 1995). 0,9 km² sind bewaldet, 0,6 km² werden als Siedlungsfläche genutzt und 5,4 km² landwirtschaftlich bewirtschaftet (Ming 1989), wobei Graswirtschaft und intensive Viehwirtschaft vorherrschen. Die durchschnittliche Tierdichte liegt mit rund 3,1 DGVE/ha über dem gesetzlich erlaubten Maximalwert von 3 DGVE (1 DGVE = 15 kg Phosphor/Jahr). Es wird kein häusliches Abwasser in den Bach eingeleitet. Der Boden des Einzugsgebiets ist schlecht wasserdurchlässig. Dementsprechend sind die Böden mehrheitlich vernässt (Bodenkarte, Blatt Hochdorf, 1983); vergleyte Braunerden und Gleye herrschen vor. Die intensive Landwirtschaft setzt eine grossflächige Drainierung voraus (Stamm 1994). 109 Drainagesysteme leiten Wasser in den Bach ab. Im

Mittel führt die Kleine Aa dem See jährlich rund 4 Mio m³ Wasser oder durchschnittlich 0,13 m³/sec zu. Im Beobachtungsjahr (1.3.93 bis 28.2.94) flossen 5,5 Mio m³ ab. Der Abfluss variiert zeitlich sehr stark. Spitzenabflüsse von mehr als 1 m³/sec treten jedes Jahr mehrere Male auf. Am 11.

Juli 1993 wurde ein Spitzenwert von 6 m³ pro Sekunde beobachtet.

Rund 15'000 Proben wurden untersucht

Um die Phosphat-, Nitrat- und Ammonium-Frachten zu bestimmen, wurde nahe an der Mündung in den See eine automatische Messstation eingerichtet. Der Abfluss wurde kontinuierlich, die PO_4 -, NO_3 - und NH_4 -Konzentrationen im Abstand von 35 Minuten in filtrierten Proben gemessen. Die Messgeräte wurden täglich gewartet und die Membranfilter (0,45 µm) mindestens einmal pro Tag, bei Hochwas-

Bestimmung der Nährstofffrachten

Die Bestimmung der Nährstofffrachten verlangt sowohl die Erfassung des Abflusses der Wassermengen (Q), als auch der Konzentrationen an gelösten oder suspendierten Stoffen ([C]). Da in Fließgewässern eine kontinuierliche Bestimmung von Nährstoffkonzentrationen technisch aufwendig ist, begnügt man sich häufig, Q kontinuierlich zu messen und [C] mit Stichproben zu erfassen. Mit Hilfe dieser Stichproben wird eine mittlere [C]/Q-Funktion hergeleitet (z.B. Cohn *et al.* 1992; Symader 1993), die neben der Ermittlung der Fracht auch Rückschlüsse auf die Herkunft der Nährstoffe erlaubt: Primär abwasserbürtige Stoffe zeigen mit zunehmendem Q sinkende [C] (Verdünnung), primär bodenbürtige Stoffe, dagegen häufig steigende [C] (Erosion, Abschwemmung, Auswaschung). Abbildung 1 (links) zeigt die [C]/Q-Beziehung für PO_4 , die in früheren Jahren an der Kleinen Aa aufgenommen wurde (Kunze *et al.* 1990). Es fällt auf, dass die Messpunkte nicht normal um die Q/[PO_4] - Beziehung ($[PO_4] = 0,0015/Q + 0,4336 \cdot Q^{0,4918}$) verteilt sind (Abb. 1 (rechts)). Die Verteilung lässt sich als Summe von zwei symmetrischen Verteilungen um die Mittelwerte M-50 und M+150 interpretieren, wobei M den Mittelwert der Ausgleichsfunktion bezeichnet. Die anormale Verteilung der Messwerte um die Ausgleichskurve lässt vermuten, dass im Falle der Kleinen Aa, die PO_4 -Konzentration nicht nur von Q, sondern noch von anderen Faktoren bestimmt wird.

¹DGVE: Düngergrossvieheinheit

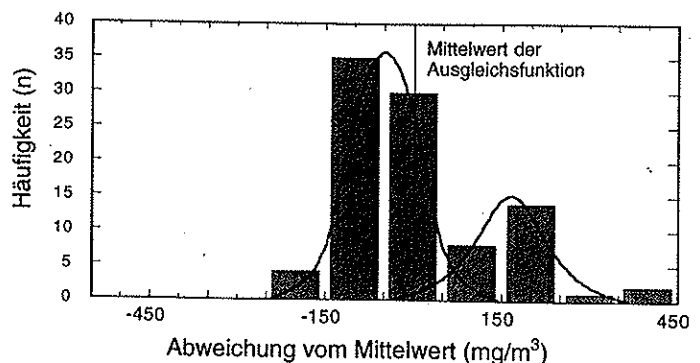
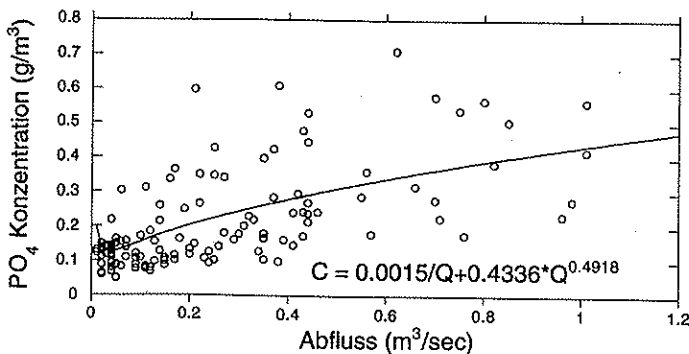


Abb. 1. Links: Abfluss-Konzentrationsbeziehung für die Kleine Aa (aus Kunze *et al.* 1990). Rechts: Verteilung der Messpunkte um die berechnete Ausgleichskurve (x-Achse: Abweichung von der Ausgleichskurve (mg/m³); y-Achse: Anzahl Messpunkte pro Klasse; Kurven: Schematische Aufteilung auf zwei symmetrische Verteilungen).

ser mit hohen Trübstofffrachten mehrmals täglich, gewechselt.

Saisonale und abflussabhängige Dynamik

Die Dynamik der Nährstoffkonzentration im Bach kann durch drei Grundmuster charakterisiert werden:

■ Bei Trockenwetterabfluss waren sowohl die PO_4 - als auch die NH_4 -Konzentrationen niedrig (Abb. 2 und 3). Die NO_3 -Konzentration betrug unabhängig von der Jahreszeit im Mittel etwa $4000 \text{ mg } NO_3\text{-N/m}^3$.

■ Manchmal stiegen die PO_4 - und NH_4 -Konzentrationen bei unverändertem Abfluss und konstanter NO_3 -Konzentration unerwartet, gleichzeitig an (Abb. 4).

■ Nach Niederschlägen, die zu einem erhöhten Abfluss führten, nahmen im Bach die PO_4 - und NH_4 -Konzentrationen vorübergehend zu (Abb. 3). Die NO_3 -Konzentration nahm dagegen mit steigendem Abfluss ab und stieg erst wieder an, wenn dieser im Abklingen begriffen war.

Jahresfrachten und Düngemiteleinsatz

Als Jahresfrachten wurden für PO_4 , NO_3 und NH_4 die in Tabelle 1 zusammengestellten Werte ermittelt. Der See könnte es verkraften, wenn aus dem Boden jährlich

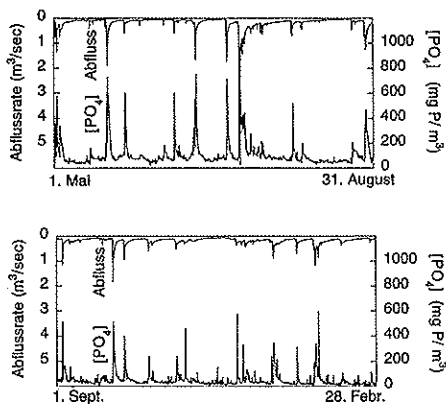


Abb. 2. Abfluss und PO_4 -Konzentration in Abhängigkeit von der Zeit für die Perioden Mai bis August 1993 und September bis Februar.

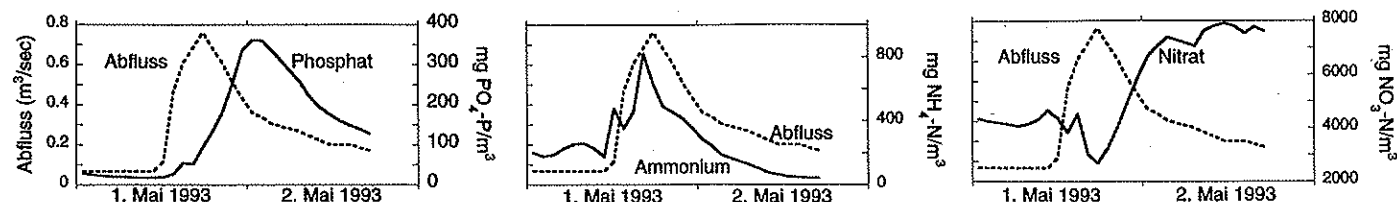


Abb. 3. Abfluss- und Konzentrationsganglinien des Ereignisses vom 1.5. bis 2.5.1993. Linke y-Achse: Abfluss, rechte y-Achse PO_4 -, NH_4 - und NO_3 -Konzentration.

nicht mehr als 50 bis 90 kg/km^2 gelöster PO_4 -Phosphor ausgewaschen oder abgeschwemmt würde (Gächter und Stadelmann 1993). Wenn das Einzugsgebiet der Kleinen Aa diesem Anspruch genügen wollte, so müssten die Verluste des Bodens an gelöstem PO_4 -Phosphor um 22 bis 57 % vermindert werden. Im Einzugsgebiet der Kleinen Aa werden pro Jahr die in Tabelle 2 zusammengestellten Düngermengen ausgebracht. Ein Vergleich der Tabellen 1 und 2 zeigt, dass etwa 3 % des ausgebrachten Phosphor-Düngers und 19 % des ausgebrachten Stickstoffdüngers in das Gewässer gelangten. Insgesamt werden dem Boden mit einer durchschnittlichen Ernte an pflanzlichem Material jährlich etwa 16,2 t Phosphor (30 kg P/ha Jahr) und 108 t Stickstoff (200 kg N/ha Jahr) entzogen. Daraus folgt, dass der Phosphor-Gehalt des landwirtschaftlich genutzten Bodens und damit wahrscheinlich auch der Phosphoraustrag ins Gewässer weiterhin zu- statt abnehmen wird.

Die drei Komponenten der Jahresfracht

Die Jahresfracht von 793 kg PO_4 -Phosphor lässt sich auf die drei Komponenten «Hochwasserfracht», «Basisfracht» und «Unvorsichtiger Umgang mit Düngstoffen» aufteilen. Die «Hochwasserereignisse» trugen 78 %, die «Basisfracht» 20 % und die «Gülleneignisse» (siehe unten) nur 2 % zur Jahresfracht bei. Das bedeutet, dass während weniger als 20 % der Zeit beinahe 80 % der Fracht abgeflossen ist. Allein das Hochwasser vom 10. bis 17. Juli trug 230 kg oder 29 % zur Jahresfracht bei. Jahresfrachten werden also durch wenige Einzelereignisse geprägt und können, rein wetterbedingt, erheblichen Schwankungen unterworfen sein.

Die in Drainagewässern gemessenen PO_4 -Konzentrationen waren meist höher als 100 mg/m^3 , überschritten zum Teil 1000 mg/m^3 und zeigten mit steigendem Abfluss steigende Konzentrationen. Im Einzugsgebiet der benachbarten Grossen Aa wurde in einer Drainage nach dem Aus-

bringen von Gülle eine Gesamt-Phosphorkonzentration von $26'000 \text{ mg/m}^3$ gemessen (Stamm 1994). In den wenigen Proben von oberflächlich über Wiesen abfließendem Wasser bestimmten wir PO_4 -Konzentrationen zwischen 600 und $4600 \text{ mg } PO_4\text{-P/m}^3$. Sie lagen in der gleichen Größenordnung wie jene, der gleichzeitig beprobten, sich in unmittelbarer Nähe befindlichen Drainageröhren.

Interpretation der Daten

Der Trockenwetterabfluss ($Q < 0,15 \text{ m}^3/\text{sec}$) wird ausschliesslich durch das Grundwasser gespeist. Da NO_3 im Boden sehr mobil ist, NH_4 und PO_4 aber deutlich höhere Affinitäten zur Bodenmatrix aufweisen (z.B. Gisi *et al.* 1990), erstaunt es nicht, dass während Trockenwettersituationen die NO_3 -Konzentrationen im Bach hoch, die PO_4 - und NH_4 -Konzentration dagegen niedrig ausfielen. Zusätzlich fällt auf, dass die PO_4 -Konzentration bei Trockenwetterabfluss während der Sommermonate höher war als während der übrigen Jahreszeiten. Häufig werden erhöhte PO_4 -Konzentrationen mit oberflächlich abgeschwemmtem PO_4 erklärt (z.B. Hurni *et al.* 1992). Da während Trockenwettersituationen sicher kein Oberflächenabfluss auftritt, muss es noch andere Transportwege geben, über die PO_4 -reiches Wasser via das Grundwasser in den Bach gelangt.

Rund 50 Mal stiegen die NH_4 - und PO_4 -Konzentrationen vorübergehend an, ohne dass gleichzeitig auch der Abfluss zugenommen hätte. Ein Eintrag von Gülle in den Bach während oder unmittelbar nach dem Ausbringen könnte zu dieser Art Verunreinigung beitragen. Auch wenn solche «Gülleneignisse» für die Jahresbelastung des Sees unerheblich sind (siehe oben), so lassen sich daraus doch interessante Schlüsse ableiten: Pro Ereignis transportierte die Kleine Aa zusätzlich zur Basisfracht 4 bis 2900 g Phosphor in den Sempachersee. Man kann davon ausgehen, dass pro Düngergabe etwa $30 \text{ m}^3/\text{ha}$ (3 mm) Gülle ausgebracht wird, und dass die Vollgülle vor dem Ausbringen etwa

Tab. 1. Absolute und flächenbezogene Jahresfrachten für PO₄-Phosphor, NO₃- und NH₄-Stickstoff. Beobachtungsperiode 1.3.93 bis 28.2.94

Nährstoff	kg/Jahr	kg/km ² Jahr gesamtes EZG* (6,9 km ²)	kg/km ² Jahr landw. genutztes EZG* (5,4 km ²)
PO ₄ -P	793	115	147
NO ₃ -N	24075	3489	4458
NH ₄ -N	456	66	84

*EZG: Einzugsgebiet

Tab. 2. Düngemittelsatz im Einzugsgebiet der Kleinen Aa (t/Jahr)

Nährstoff	Hofdünger	Mineraldünger	Biol. N-Fixierung	Niederschläge	total
Phosphor	25,2	geringer Einsatz	-	0,7	25,9
Stickstoff	125,6	3,2*	35,0**	20,7***	184,5

* geschätzter Wert (150 kg NH₄NO₃/ha Jahr offene Ackerfläche)

** geschätzter Wert (65 kg N/ha Jahr)

*** geschätzter Wert (30 kg N/ha Jahr)

1:1 mit Wasser verdünnt wurde. Aufgrund der beobachteten, erhöhten P-Fracht (rund 2,9 kg PO₄-P) und dem angenommenen Phosphor-Gehalt der Gülle (1 g/l), müssten in dem in Abbildung 2 dargestellten Fall rund 5,7 m³ verdünnte Gülle in den Bach geflossen sein. Das entspricht der Güllemenge, die auf einer Fläche von 1900 m² ausgebracht wurde. Da die Annahme eines 100 %igen Verlustes unrealistisch ist, muss die Fläche, die zu diesem Ereignis beitrug, aber wesentlich grösser gewesen sein. Gemäss dem Konzentrationsplateau in Abbildung 2 muss die verdünnte Gülle während mindestens sieben Stunden mit einer nahezu konstanten Fließrate von etwa 6 l/min in den Bach geflossen sein. Es ist kaum vorstellbar, dass sie, auf einer so grossen Fläche ausgebracht, während sieben Stunden nicht versickerte, sondern in oberflächlichen Rinnsalen mit beinahe konstanter Rate in den Bach abfloss. Da 24 Stunden vor und während des Ereignisses kein Nieder-

schlag fiel, kann die Gülle nicht oberflächlich abgeschwemmt worden sein. Also muss sie grossflächig durch den Boden gesickert und anschliessend in den Bach gelangt sein. Dies ist ein zweiter Hinweis darauf, dass Phosphat nicht nur über Oberflächenabfluss, sondern auch durch den Boden ins Gewässer gelangen kann. Als mögliche Sickerwege kommen präferenzielle Fließwege wie zum Beispiel Trockenrisse, Maulwurfgänge, Wurmlöcher, Wurzelkanäle und schliesslich Drainageröhren in Frage. Drainageröhren, die sichtbar und zum Teil riechbar verdünnte Gülle führten, wurden während unserer Feldarbeit verschiedentlich beobachtet. Es liegt auf der Hand, dass über diese Sickerwege nicht nur Gülle, sondern auch Niederschlagswasser, das sich in der überdüngten Bodenoberschicht mit PO₄ anreichert, abfließt. So wird es verständlich, weshalb jedes Regenereignis, das im Bach einen erhöhten Abfluss bewirkte, ausnahmslos zu erhöhten PO₄-Konzentrationen führte, unabhängig davon, ob Oberflächenabfluss von landwirtschaftlich bewirtschafteten Flächen beobachtet wurde oder nicht (Abb. 2). Während der Hauptvegetationszeit wird häufiger gegüllt als während der übrigen Monate. Braun *et al.* (1993) haben gezeigt, dass die Mobilität des mit der Gülle ausgebrachten Phosphats mit wachsender Zeitspanne zwischen dem Ausbringen der Gülle und dem Auftreten des Niederschlags abnimmt. Häufiges Ausbringen von Gülle verkürzt bei einer gegebenen Niederschlagsfrequenz - diese Zeitspanne, bewirkt somit höhere Konzentrationen an mobilem Phosphat im Oberboden und damit einen verstärkten Phosphattransport vom Oberboden über grobporige Sickerwege ins

Grundwasser und ins Gewässer. Das erklärt, weshalb während des Sommers die Phosphatkonzentrationen im Bach auch bei Niedrigwasser höher ausfielen als während der übrigen Jahreszeiten.

Oberflächenabschwemmung erklärt nicht alles

Häufig wird angenommen, dass oberflächliche Abschwemmung die Fracht an gelöstem PO₄-Phosphor von Fließgewässern dominiere, und dass Drainagen und der Zwischenabfluss nur wenig zur Phosphor-Belastung von Gewässern beitragen würden (z.B. Hurni *et al.* 1992). Aufgrund unserer Beobachtung muss diese Annahme teilweise revidiert werden. Oberflächliche Phosphor-Abschwemmung von Wiesen kann während intensiven oder lang anhaltenden Niederschlägen oder während der Schneeschmelze auftreten. Es muss aber davon ausgegangen werden, dass

■ solche Ereignisse von kurzer Dauer sind;

■ der Oberflächenabfluss den Bach erreicht, bevor im Bach der Abflusspeak überschritten wird.

Ein solcher Oberflächenabfluss würde also hohe PO₄-Konzentration auf der ansteigenden Flanke der Abflusswelle verursachen. Während der beobachteten 30 Hochwasserereignisse (Q_{max} > 0,23 m³/sec) wurde ein derartiges Muster aber nur zweimal beobachtet.

In der Nacht vom 10. auf den 11. Juli trat die Kleine Aa über die Ufer und oberflächliche Abschwemmung wurde an verschiedenen Standorten beobachtet. Trotzdem nahm die PO₄-Konzentration bei Abflussraten von mehr als 2,5 m³ pro Sekunde kaum mehr zu. Im Oberflächenabfluss, in Drainagen und im Bach wurden etwa gleich hohe Konzentrationen gemessen (700 bis 800 mg PO₄-P/m³). Offenbar wird beim schnellen Abfluss über Makroporen der Kontakt zwischen dem Boden und dem abfließenden Wasser so unbedeutend, dass die PO₄-Konzentration des versickernden Wassers während der raschen Bodenpassage kaum noch abnimmt. Wenn daher während eines lang anhaltenden Regenereignisses der Makroporenabfluss den Abfluss im Bach dominiert, so nimmt die PO₄-Konzentration im Bach nicht mehr wesentlich zu, wenn zusätzlich noch Oberflächenabfluss auftritt.

Wie in Abbildung 3 exemplarisch dargestellt, erreichte während Hochwasserereignissen die NH₄-Konzentration den

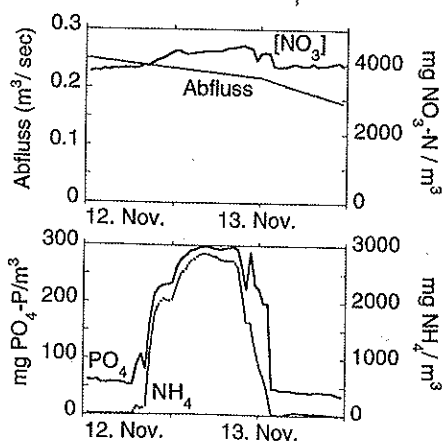


Abb. 4. Veränderung des Abflusses, der NO₃-, der PO₄- und der NH₄-Konzentrationen während eines «Güllenereignisses» (siehe Text).

Maximalwert in der Regel vor, diejenige von PO_4 dagegen erst nach dem Abflusspeak, und die NO_3 -Konzentration durchlief während der Zunahme des Abflusses ein Minimum. Das abfließende Bachwasser ist eine Mischung der Komponenten «Grundwasser», «Oberflächenabfluss, abfließend von befestigten Flächen», «Drainage- und Zwischenabflusswasser» und «Oberflächenabfluss, abfließend von gedüngten Flächen». In den meisten Fällen können die unterschiedlichen Nährstoffkonzentrationen der ersten drei Komponenten und ihr zeitlich variabler Beitrag zum Gesamtabfluss die während eines Abflussereignisses beobachteten Konzentrationsveränderungen im Bach erklären: Die PO_4 -Konzentrationen des Trockenwetterabflusses und des Regenwassers, das über nicht mit Dünger verunreinigte befestigte Oberflächen abfließt, unterscheiden sich nicht wesentlich. Die NH_4 -Konzentration des Niederschlagswassers ist zu Beginn des Niederschlags deutlich höher (meist $> 500 \text{ mg N/m}^3$), seine NO_3 -Konzentration aber deutlich niedriger (meist $< 1000 \text{ mg N/m}^3$) als jene des Bachwassers bei Trockenwetterabfluss ($[\text{NH}_4]_{\text{Bach}} < 50 \text{ mg/m}^3$ und $[\text{NO}_3]_{\text{Bach}} > 4000 \text{ mg N/m}^3$). Von befestigten Oberflächen abfließendes Wasser trifft im Bach vor jenem Wasser ein, das den Boden passiert hat, und es bewirkt deshalb im Bach bei zunehmendem Abfluss eine vorübergehend erhöhte NH_4 - und eine erniedrigte NO_3 - und eine kaum veränderte PO_4 -Konzentration. Hält ein Regen länger an, so erreicht zeitlich verzögert der Drainage- und Zwischenabfluss den Bach. In dieser Abflusskomponente sind in der Regel die PO_4 - und die NO_3 -Konzentrationen höher, die NH_4 -Konzentration aber niedriger als im Regenwasser. Bei abklingendem Abfluss von befestigten Oberflächen und zunehmendem Drainageabfluss werden daher die PO_4 - und NO_3 -Konzentrationen zunehmen und die NH_4 -Konzentration abnehmen. Wenn schliesslich auch das Drainagewasser und der Zwischenabfluss wieder abklingen und das Grundwasser wieder an Bedeutung gewinnt, nimmt auch die PO_4 -Konzentration wieder ab und diejenige von NO_3 bleibt hoch. Dieses wechselnde Zusammenspiel der drei Abflusskomponenten erklärt, weshalb bei einem bestimmten Abfluss bei abklingendem Hochwasser meist höhere Phosphatkonzentrationen beobachtet werden als bei anschwellendem Hochwasser. Damit wird auch klar, weshalb in Abbildung 1 die Messpunkte nicht normal

um die berechnete $Q/[\text{PO}_4]$ -Beziehung verteilt sind: Werden im Bach 24 h-Sammelproben erhoben, so ist die Chance gross, dass entweder die ansteigende oder die abklingende Hochwasserwelle präferenziell beprobt wird und damit die gemessenen PO_4 -Konzentration entweder deutlich niedriger oder höher ausfallen als die Werte der Ausgleichsfunktion. «Gülenenereignisse», die zwar zur Jahresfracht wenig beitragen, aber relativ häufig auftreten (durchschnittlich etwa 1 Ereignis pro Woche), können die $Q/[\text{PO}_4]$ -Beziehung zusätzlich verfälschen. Wird ein solches Ereignis zufällig erfasst, so kann dadurch die dem mittleren Abfluss zugeordnete PO_4 -Konzentration deutlich erhöht werden. Schliesslich scheint die $Q/[\text{PO}_4]$ -Beziehung auch noch von der Jahreszeit abhängig zu sein.

Folgerungen

Die in Abbildung 1 (links) gezeigte, auf Tagesmittelwerten beruhende $Q/[\text{PO}_4]$ -Beziehung vermag als Basis für die Berechnung von Jahresfrachten zu genügen. Ansätze zu einem besseren Verständnis über das Verteilungsmuster der Messpunkte wurden aber erst möglich dank eines Messprogramms mit hoher zeitlicher Auflösung. Es zeigte auf, dass dieses Muster geprägt wird durch das wechselnde Zusammenspiel verschiedener Abflusskomponenten mit unterschiedlichen Nährstoffkonzentrationen, durch saisonale Effekte und durch Störungen, die im Zusammenhang mit der Applikation von Gülle stehen. Die präsentierten Daten deuten darauf hin, dass in Einzugsgebieten mit schlecht durchlässigen Böden und hohem Düngereinsatz, neben der oberflächlichen Abschwemmung von PO_4 , auch der Wassertransport über Makroporen erheblich zur PO_4 -Belastung von Fliessgewässern und damit von Seen beitragen kann. Massnahmen, die allein darauf abzielen, die Oberflächenabschwemmung von Nährstoffen zu verhindern, garantieren daher nicht, dass das angestrebte Gewässerschutzziel (ein mesotropher² See mit einer Phosphorkonzentration von 20 bis 30 mg P/m^3) erreicht werden kann. Wenn der Phosphataustrag aus dem Boden auf das notwendige Mass abnehmen soll, so muss sein Reservoir an mobilem Phosphat abgebaut werden. Das setzt voraus, dass dem Boden vorübergehend weniger Phosphat zugeführt als ihm mit der Ernte und der Auswaschung entzogen wird (30 kg P/ha Jahr). Ferner könnte geprüft

werden, ob es geeignete Massnahmen gibt, die Mobilität des überschüssigen Phosphats im Boden zu vermindern.

LITERATUR

Die Literaturliste ist beim Erstautor erhältlich.

RÉSUMÉ

Le purin à l'origine de l'eutrophisation

Nos résultats montrent que les concentrations en éléments nutritifs de la rivière Kleine Aa dépendent des contributions relatives de quatre composantes «eaux souterraines», «interflow» (compris décharge par drainage), «décharge des surfaces imperméables» et «décharge superficielle des sols», qui s'ajoutent au débit total de la rivière. Elles dépendent aussi des saisons, probablement à cause d'applications plus fréquentes de purin pendant les mois d'été.

La décharge des phosphates du sol dans l'eau conduit à une augmentation du phosphate dans l'eau du lac. La charge tolérable est ainsi dépassée de 20 à 60 %. Pour diminuer cette charge, il faudrait soit réduire la quantité de P mobile du sol en appliquant moins de purin ($2,3$ équivalents vache/ha, an), soit réduire la mobilité du P du sol par d'autres techniques.

SUMMARY

Agricultural fertilizers cause eutrophication

According to our findings, the concentration pattern of nutrients in the river Kleine Aa depends on the relative contribution of the four components „ground water“, „interflow“ (including water from drainage pipe systems), „discharge from impermeable surfaces“ and „surface runoff from soils“ to the total discharge. It is further modified by seasonal effects, likely due to varying frequencies of manure application throughout the seasons.

The loss of PO_4 from the soil to the water exceeds the tolerable PO_4 load of the receiving Lake Sempach by 20 to 60 %. In order to lower the P load of the lake the content of the soil in mobile P has to decrease. This can be achieved by transiently spreading less manure ($< 2,3$ cattle equivalents / ha yr) or by decreasing the mobility of P by other measures.

KEY WORDS: agricultural fertilizers, phosphate, nitrate, eutrophication, C/Q relationship, preferential flow

²mesotropher See: See mit einer Kohlenstoffassimilationsrate von 150 bis $200 \text{ g C/m}^2 \text{ Jahr}$.