

Bilanzierung der Phosphor-Eintragspfade für den Weißenstädter See

Marion Mertens

Zusammenfassung

Gemäß den Anforderungen der EU-Badegewässer-Richtlinie 76/160/EWG darf in Badeseen eine Sichttiefe von 1 m zu keinem Zeitpunkt unterschritten werden. Selbst Seen mit funktionierender Ringkanalisation erfüllen diese Norm wegen zu hoher diffuser Phosphor-Einträge und dem damit verbundenen Algenwachstum häufig nicht. Um wirkungsvolle Gegenmaßnahmen ergreifen zu können, müssen die Phosphor-Eintragspfade in das Gewässer bilanziert werden.

1. Einleitung

Der Schutz stehender Gewässer vor Phosphor-Einträgen manifestierte sich zunächst in der Bekämpfung punktueller Eintragspfade, d.h. vor allem dem Anschluss aller Siedlungsgebiete an eine Kanalisation mit biologischer Reinigungsstufe. Durch den Anschluss aller Ortsteile im Einzugsgebiet des Weißenstädter Sees (Fichtelgebirge, Nordbayern) an eine unterhalb des Sees gelegene Kläranlage konnten die Einträge aus punktuellen Quellen auf < 4% des Gesamt-Eintrags verringert werden. Daher ist dieses Gewässer in idealer Weise für die Untersuchung der diffusen Phosphor-Eintragspfade geeignet.

Seit den 80er Jahren wird zusätzlich eine Verminderung der Einträge aus landwirtschaftlich genutzten Flächen angestrebt [1]. Hierbei gilt Bodenerosion als der bedeutendste Eintragspfad. Mit verschiedenen Modellansätzen zur Quantifizierung der Bodenerosion wird versucht, die maximal tolerierbaren Phosphor-Gehalte auf landwirtschaftlich genutzten Flächen in Abhängigkeit von Hangneigung, Bodenart und Gewässerabstand zu ermitteln [2], [3]. Einen Überblick über die verschiedenen Methoden zur Quantifizierung diffuser Phosphor-Einträge in Oberflächengewässer gibt Scheer [4].

2. Untersuchungsgebiet

Das Untersuchungsgebiet „Weißenstädter Becken“ umfasst das Wassereinzugsgebiet der Eger von der Quelle bis zum Weißenstädter See und hat eine Größe von 32 km² [5]. Es liegt auf dem Gemeindegebiet der Stadt Weißenstadt (Lkrs. Wunsiedel, Bayern), die den 49,5 ha großen See 1976 durch Anlage eines Damms aufgestaut hat (s. Bild 1). Mit einer P_{GESAMT}-Konzentration von 50 µg/l ist der Weißenstädter See ein typisches eutrophes Stillgewässer.

Aufgrund seiner geringen Tiefe (Ø 2 m) und einer starken Windexposition ist das Wasser des Sees ganzjährig durchmischt und die Sedimentoberfläche durchweg oxisch. Im Sommer treten erhöhte Algenkonzentrationen im See auf, welche die Eignung des Sees als wichtigstes Badegewässer im Fichtelgebirge gefährden. Eine 1991 auftretende Algenblüte führte zu einem Fischsterben.

Bild 1: Weißenstädter Becken mit See (Nord-Bayern)

Das Einzugsgebiet liegt in einer ostexponierten Mittelgebirgslage 613-1051 m über NN, der Jahresniederschlag beträgt 730-1250 mm, die Jahresmitteltemperatur 5-6 °C. Ca. 2/3 des Einzugsgebiets werden forstwirtschaftlich genutzt, 98% der Waldflächen sind mit Fichten-Monokulturen bestockt. 28% der Gesamtfläche wird landwirtschaftlich genutzt (davon 40% Acker, 60% Grünland, überwiegend Gemischtbetriebe mit Milchviehhaltung, mittlerer Viehbesatz 1,1 GV/ha). Hinzu kommt als gebietstypische Nutzungsform die Teichbewirtschaftung (190 Fischteiche). Der Fremdenverkehr spielt eine bedeutende wirtschaftliche Rolle, da der Weißenstädter See in der Region einer der Hauptanziehungspunkte für Touristen ist.

3. Ausgangslage

Anfang der 80er Jahre lagen die P_{GESAMT} -Werte im Seewasser auf einem hohen Niveau (50-180 $\mu\text{g P/l}$), bis es im trockenen Sommer 1991 zur Algenblüte kam. Aufgrund des nachfolgenden Fischsterbens wurde der See im Herbst 1991 abgefischt. Der sehr hohe P_{GESAMT} -Wert im Mai 1992 entstand durch Phosphor-Rücklösung aus dem Sediment. Seit dem 1997 fertiggestellten Anschluss aller Ortsteile an die Kanalisation schwankt die P_{GESAMT} -Konzentration im Weißenstädter See um die 50 $\mu\text{g/l}$ (Bild 2).

Bild 2: P_{GESAMT} -Konzentration im Weißenstädter See seit 1979

Trotz der Eliminierung der punktuellen Phosphor-Einträge ist die minimale Sichttiefe im See während der Badesaison im Sommer mit 40 cm (2002) und knapp 30 cm (heißer Sommer 2003) immer noch viel zu niedrig.

4. Untersuchungen

4.1 Konzeption der Messkampagne, Datenquellen

Die wichtigste Datenquelle für Fließgewässer sind die bis ins Jahr 1979 zurückreichenden Messreihen des Wasserwirtschaftsamts Bayreuth an den Zuläufen des Weißenstädter Sees. Die Messfrequenz (3 - 5× jährlich) reicht jedoch nicht aus, um die Phosphor-Fracht für den Weißenstädter See zu quantifizieren. Ergänzend zu den Messungen des WWA Bayreuth wurden daher von Dezember 2001 bis März 2003 die Zuläufe des Weißenstädter Sees monatlich beprobt (Bild 3). Im 14-tägigen Wechsel erfolgte während der Vegetationsperiode die monatliche Phosphor-Probenahme im Rahmen des Projekts „Biomaniplulation“ des Landesamts für Wasserwirtschaft. Zusätzlich erfolgte eine ereignisbezogene Probenahme bei Hochwasser durch den Wasserwart der HEW Hof Energie+Wasser GmbH. Durch diese kombinierte Probenahmestrategie konnten mit einer vergleichsweise geringen Anzahl an Proben und vertretbarem materiellen Aufwand die Phosphor-Einträge quantifiziert werden.

Bild 3: Messpunkte am Weißenstädter See

Zusätzlich zu diesem Messprogramm wurden Spezialuntersuchungen zum landnutzungs-spezifischen Phosphor-Austrag durchgeführt:

- Fischteiche: Für die insgesamt 190 Fischteiche umfassenden Teichketten oberhalb des Sees wurden Phosphor-Bilanzen erstellt [6].
- Drainagen: Der Phosphor-Austrag wurde an 6 Drainagen im Einzugsgebiet gemessen.
- Wald: Untersuchung der Phosphor-Konzentration von Trinkwasserbrunnen mit forst- und landwirtschaftlich genutzten Einzugsgebieten

4.2 Messparameter

Gemessen wurden Gesamt-Phosphor (P_{GESAMT}), Gesamt-Phosphor aus der filtrierten Probe ($P_{\text{FILTRIERT}}$), gelöster Phosphor (P_{ORTHO}), sowie Temperatur, Leitfähigkeit und pH-Wert. Die P_{GESAMT} -Konzentration gibt dabei Aufschluss über die Gesamtmenge des eingetragenen Phosphors inklusive dem partikulär gebundenen Phosphor aus Bodenerosions-Ereignissen. Die $P_{\text{FILTRIERT}}$ -Konzentration ergibt den gelösten und den partikulären Phosphor $< 0,45 \mu\text{m}$. Die P_{ORTHO} -Konzentration erfasst näherungsweise die direkt algenverfügbare Fraktion des gelösten Phosphors. Für die Eger (ohne Zufluss 4) liegen von 1996 bis 2002 stündliche Pegeldata vor. Der Abfluss der anderen Zuflüsse wurde – analog der Methode des WWA Bayreuth – geschätzt. Zur Eichung der Schätzungen und genauen Quantifizierung des Teichketten-Zuflusses wurden die Abflüsse an Messpunkt 12 mit der Chlorid-Tracer-Methode gemessen.

5. Ergebnisse

5.1 Verhältnis P_{GESAMT} zu P_{ORTHO}

Im Weißenstädter See liegen die $P_{\text{FILTRIERT}}$ -Gehalte deutlich niedriger als die P_{GESAMT} -Gehalte. Die P_{ORTHO} -Konzentrationen liegen bis auf 2 Messwerte bei Hochwasser unter $15 \mu\text{g P/l}$, häufig wird die Nachweisgrenze von 10 (bzw. 5) $\mu\text{g P/l}$ unterschritten. Als Indikator für die Algenverfügbarkeit des Phosphors wird das Verhältnis P_{ORTHO} zu P_{GESAMT} herangezogen. Das algenverfügbare P_{ORTHO} und auch das - vergleichsweise leicht in P_{ORTHO} umwandelbare - $P_{\text{FILTRIERT}}$ werden während der Vegetationsperiode von der Biomasse inkorporiert. Daher liegt das Verhältnis P_{ORTHO} zu P_{GESAMT} während der Vegetationsperiode bei 10%, in den Wintermonaten (Nov. - März) deutlich höher bei 25% (1997-2002; nur Niedrigwasser-Messwerte). In den Zuläufen des Weißenstädter Sees liegt das Verhältnis von P_{ORTHO} zu P_{GESAMT} höher als im See: In der Eger liegen z.B. 33% der P_{GESAMT} -Menge als P_{ORTHO} vor. Eine Ausnahme bilden kurzfristig sehr hohe P_{ORTHO} -Einträge bei Hochwasser, die zu einem deutlichen Anstieg der P_{ORTHO} -Konzentration im See führen, da so große Mengen nicht auf einmal inkorporiert werden können. Die Messwerte belegen, dass Phosphor ganzjährig der limitierende Faktor für das Algenwachstum ist.

5.2 Verlauf der P-Konzentration in den See-Zuläufen

Der Vergleich von See-Einlauf (Eger) und See-Ablauf zeigt, dass beide im Mittel ähnliche P_{GESAMT} -Konzentrationen aufweisen, jedoch die P_{GESAMT} -Werte im Zulauf wesentlich stärker schwanken als im See. Ähnliche Effekte zeigen auch die anderen See-Zuläufe. Der Weißenstädter See fungiert somit als Puffer für die Phosphor-Belastungsspitzen. Da die Phosphor-Konzentrationen in Zuläufen und See im

Mittel gleich sind und der Seegrund keinerlei Anzeichen von Sauerstoffmangel zeigt (Tauchkartierung im Auftrag des Landesamts für Wasserwirtschaft), kann eine quantitative Phosphor-Rücklösung aus dem Sediment ausgeschlossen werden.

5.3 Einfluss der Teichwirtschaft

Die sehr extensiv genutzten Teiche im Weißenstädter Becken stellen im Jahresmittel keine zusätzliche Belastung für den Weißenstädter See dar [6].

Zwar sind im Sommer die Phosphor-Austräge aus den Teichen erhöht und auch beim - allerdings nur wenige Tage andauernden - Abfischen wurden erhöhte Werte festgestellt: Im Mittel 100 µg P/l (kontinuierliche Probenahme des WWA Bayreuth 2001 und 2002). Diese Effekte werden jedoch durch die Hochwasser-Rückhalteleistung der Teiche kompensiert. Zudem sind gerade im Sommer die Abflussmengen aus den Teichen – und damit die Phosphor-Frachten – besonders gering. Bei Hochwasser wird deutlich mehr Phosphor in die Teiche eingetragen als ausgetragen. Die Differenz aus Eintrag und Austrag sedimentiert in den Teichen und Verbindungsgräben ab. Dieser Effekt hat einen großen Einfluss auf die Gesamtbilanz, da bei Hochwasser die größten P_{GESAMT} -Frachten transportiert werden.

5.4 Phosphor-Einträge durch Hochwasser

In Bild 4 wird der Abfluss am Egerpegel den ebenfalls am Egerpegel gemessenen P_{GESAMT} -Konzentrationen gegenübergestellt (Probenahme durch HEW HofEnergie+Wasser GmbH). Die Proben wurden gezielt ereignisbezogen bei Hochwasser entnommen, dargestellt sind alle P_{GESAMT} -Konzentrationen bei Abflüssen größer 800 l/s. Unterhalb dieses Werts findet keine Bodenerosion statt, was sich in durchweg niedrigen Phosphor-Konzentrationen äußert. Die so gewonnene Beziehung zwischen Abfluss und P_{GESAMT} -Konzentration bildet die Grundlage für die Berechnung der Phosphor-Frachten in der Eger am Egerpegel.

Bild 4: Separierung von fallendem und steigendem Hochwasser

Die Auswertung der Daten zeigt, dass bei Hochwasser-Ereignissen zwischen steigendem und fallendem Hochwasser unterschieden werden muss. Wäre nur zeitverzögert bei fallendem Hochwasser beprobt worden, würden die erosionswirksamen Steigphasen des Hochwassers nicht mit erfasst. Durch die zeitnahe Beprobung konnte steigendes Hochwasser auch ohne aufwändige kontinuierliche Probenahme erfasst werden. Das Maximum der Phosphor-Konzentration liegt an allen Messpunkten bei steigendem Hochwasser zwischen 1200 und 1500 l/s Abfluss am Egerpegel. Das ist genau der Punkt, an dem das Wasser der Eger beginnt, über die Ufer zu treten.

Die quantitative Auswertung der Beziehung Abfluss/ P_{GESAMT} -Konzentration erfolgte für steigendes Hochwasser (ab 800 l/s) rein empirisch durch ein Polynom 3. Grades. Bei fallendem Hochwasser wurde für die Frachtberechnung der Niedrigwasser-Durchschnittswert (43 µg P/l) mit dem jeweiligen Stunden-Abflusswert multipliziert. Die Niedrigwasser-Austräge werden ebenfalls über den Niedrigwasser-Durchschnittswert berechnet.

Bei noch höheren Pegelständen strömt das Wasser flächig durch die Egeraue, wo ein Teil des mitgeführten Bodenmaterials sedimentiert. Das belegen die niedrigeren Phosphor-Konzentrationen bei noch höheren Pegelständen. Die in Bild 4 dargestellte Korrelation Pegelstand/ P_{GESAMT} -Konzentration lässt sich auch für 3 weitere Messpunkte oberhalb des Egerpegels sowie für den Hirtenbach (Messpunkt 7) beobachten, allerdings ist hier die Absenkung der Phosphor-Konzentration bei hohen Abflüssen nicht so ausgeprägt. Dies ist möglicherweise eine Folge der geringeren Ausdehnung der Überschwemmungsflächen entlang des Hirtenbachs.

Um zu eine Gesamtbilanz zu erhalten, wurden die Frachtberechnungen für den Egerpegel auf das Gesamtgebiet umgerechnet: Phosphor-Einträge aus Alter Eger (Messpunkt 4) und Hahnenbach (Messpunkt 5), die unterhalb des Egerpegels in die Eger fließen, sowie die Zuflüsse Hirtenbach (Messpunkt 7) und die Teichgräben (Messpunkte 8-10) werden entsprechend ihrer Abfluss-Spenden eingerechnet.

Würde man die Berechnungen nur für das Jahr 2002 durchführen, ergäbe sich wegen der außerordentlich hohen und zahlreichen Hochwässer in diesem Jahr ein im langjährigen Mittel zu hoher Austrag von 1114 kg P_{GESAMT} . Daher wurden die Frachtberechnungen für die Jahre 1997-2002 an die jeweiligen Eger-Pegeldaten angepasst und eine mittlere Fracht für diesen Zeitraum berechnet.

5.5 Einfluss der Drainagen

21% der Ackerflächen (72,8 ha) und 45% des Grünlands (227,8 ha) im Weißenstädter Becken sind drainiert [5]. Die Untersuchung der Drainagen im Weißenstädter Becken ergab eine gegenüber den jeweiligen Vorflutern deutlich höhere Phosphor-Belastung. Eine bei jedem Messtermin beprobte Drainage, deren Einzugsgebiet eine vergleichbare Nutzungsverteilung wie das Gesamtgebiet aufweist, ergab im Mittel 38 $\mu\text{g P/l}$. Die Mittelwerte der anderen 5 beprobten Drainagen schwanken zwischen 45 und 70 $\mu\text{g P/l}$. Ein signifikanter Unterschied zwischen Acker- und Grünlandflächen konnte nicht nachgewiesen werden. In einer überschlägigen Berechnung wurde mit einer Schüttung von 0,3 l/s-ha während 30% des Jahres für alle Drainagen gerechnet. Bei einer mittleren P_{GESAMT} -Konzentration der untersuchten Drainagen von 50 $\mu\text{g/l}$ ergibt sich 50 kg reiner Phosphor, der jährlich über Drainagen in den See eingetragen wird. Insbesondere auf dem vergleichsweise extensiv genutzten Grünland wurden die während Flurbereinigung in den 60er und 70er Jahren verlegten Drainagen nur teilweise gepflegt. Daher ergibt die obige Abschätzung eher den maximal möglichen Phosphor-Austrag an.

5.6 Phosphor-Einträge aus Wald

Messdaten aus verschiedenen Quellen belegen, dass im Einzugsgebiet wider Erwarten erhebliche Phosphormengen aus Waldgebieten ausgetragen werden: Die 17 Trinkwasser-Brunnen der HEW HofEnergie+Wasser im Weißenstädter Becken enthalten im Mittel 47 $\mu\text{g P/l}$, das entspricht in etwa der P_{GESAMT} -Konzentration im See. Brunnen, deren Einzugsgebiete zumindest teilweise landwirtschaftlich genutzt werden, zeigen mit 52 $\mu\text{g/l}$ nur leicht höhere Durchschnittswerte als Brunnen in reinen Waldeinzugsgebieten (37 $\mu\text{g/l}$). Diese Ergebnisse werden durch die P-Konzentrationen in den Quellen der Stadtwerke Weißenstadt bestätigt. Die Messungen an einem Waldbach (Messpunkt 12) zeigen im Frühjahr und bei Hochwasser ebenfalls erhöhte Phosphor-Austräge.

Batch-Versuche mit Bodenmaterial belegen, dass aus wechselfeuchten, stark versauerten Waldböden des Waldsteingebiets (pH teilweise < 3) erhebliche Phosphormengen ausgewaschen werden können. Dies dürfte nach derzeitigem Kenntnisstand eine Folge des unterschiedlichen Phosphor-Bindungsvermögens von Fe(III) (oxische Bedingungen) und Fe(II) (anoxische Bedingungen) sein. Weitergehende Untersuchungen zu diesem Thema stehen noch aus.

5.7 sonstige Einträge

Phosphor-Einträge aus unterirdischen Zuflüssen (Grundwasserströmungs-Modellierung des Einzugsgebiets mit Visual MODFLOW) und Niederschlägen (Konzentrationsdaten Wetterstation Waldstein) spielen keine Rolle. Der Phosphor-Eintrag durch Badegäste (0,5 kg P/a) ist bei einem Gewässer mit 50 ha Wasserfläche ebenso zu vernachlässigen wie Phosphor-Einträge durch Wasservögel.

6. Gesamtbilanz

Die Ergebnisse belegen, dass es neben der Bodenerosion von Ackerflächen noch weitere wesentliche diffuse Phosphor-Einträge in den See gibt. Eine größere Rolle spielen die Phosphor-Mobilisierung aus den umliegenden Waldgebieten sowie die Einträge über Drainagen. Die Bilanzierung von 190 Fischteichen oberhalb des Sees ergab eine überraschend geringe Phosphor-Fracht.

Die Eintragspfade für Phosphor in den Weißenstädter See (ohne unterirdische Zuflüsse und Niederschlag) werden in Tabelle 1 dargestellt. Es dominieren die Einträge durch Bodenerosion und aus dem Wald, Einträge aus Drainagen spielen eine untergeordnete Rolle. Alle Ortsteile sind an die Kanalisation angeschlossen, so dass die Einträge aus Siedlungsflächen mit insgesamt 4% sehr niedrig ausfallen.

Interessant ist ein Vergleich mit den Ergebnissen des Einzugsgebiets „Eixendorfer See“, da hier das bayerische Landesamt für Landwirtschaft intensive Messungen zum Phosphor-Eintrag durchführt [7]. Die prozentualen Phosphor-Austräge aus Waldgebieten sind in Weißenstadt wesentlich höher als in Eixendorf, auch dann, wenn man die insgesamt niedrigeren Gesamt-Austräge pro Fläche berücksichtigt. Ursachen hierfür sind die stärkere Bodenversauerung im Weißenstädter Becken in Kombination mit hohen Flächenanteilen wechselfeuchter Böden. Das landwirtschaftlich etwas intensiver genutzte Einzugsgebiet des Eixendorfer Sees hat ca. 40% höhere Phosphor-Austräge pro km² aus landwirtschaftlichen Flächen, was auf höhere Bodenerosion und größere Austräge aus den Drainagen zurückzuführen ist. Der niedrige P_{GESAMT}-Austrag aus den Drainagen in Weißenstadt ist wegen des schlechten Erhaltungszustands der Drainagen und leichten Böden ohne präferenzielle Fließwege plausibel. Die Austräge aus Fischteichen sind wegen der sehr extensiven Bewirtschaftungsweise der Teiche im Weißenstädter Becken gering.

Tabelle 1: Phosphor-Eintragsquellen im Einzugsgebiet Weißenstädter See

7. Umsetzung von Maßnahmen zur Verringerung der Phosphor-Einträge

Knapp die Hälfte des in den Weißenstädter See eingetragenen Phosphors stammt aus Hochwasser-Ereignissen. Daraus lässt sich als wichtigste Konsequenz ableiten, dass die Hochwasserspitzen

bereits vor dem See abgefangen bzw. abgemildert werden müssen. Derzeit werden folgende Maßnahmen im Einzugsgebiet umgesetzt:

- Renaturierung des Hirtenbach-Einlaufs mit Anlage von Flachwasserzonen und Sedimentfalle
- Schaffung zusätzlicher Überschwemmungsflächen an der Eger
- Beratung der Landwirte zur Erreichung einer maßvollen P-Gehaltsstufe der Böden im Einzugsgebiet des Sees, insbesondere auf drainierten Flächen
- Förderung des Winterzwischenfruchtanbaus als Kombinationsmaßnahme zur Verminderung von Nitratausträgen ins Trinkwasser und zur Verringerung der Bodenerosion

Aktuelle Informationen zum Stand der Umsetzungsmaßnahmen sowie zum Gesamtprojekt finden sich unter **www.wasser-verbundet.de**

Dank

„wasser-verbundet“ wird gefördert von der Deutschen Bundesstiftung Umwelt.

Literatur

- [1] UMWELTBUNDESAMT, 1994: Stoffliche Belastung der Gewässer durch die Landwirtschaft und Maßnahmen zu deren Verringerung, Berichte 2/94, 208 S.
- [2] AUERSWALD, K., 1998: Bodenerosion, Schutzmaßnahmen und Prognose mit PC-ABAG. Auswertungs- und Informationsdienst für Ernährung, Landwirtschaft und Forsten e.V., 38 S.
- [3] LINDSTROM, M., SCHUMACHER, J., SCHUMACHER, T., 2000: A tillage erosion prediction model to calculate soil translocation rates from tillage. J. Soil Water Conserv. 55/1, S. 105-108.
- [4] SCHEER, C., 1999: Bewertung verschiedener Verfahren zur Quantifizierung diffuser Nährstoffeinträge in Oberflächengewässer. DVWK-Materialien, 5/1999, 90 S.
- [5] MERTENS, M., 2001: Die Anwendung der Fuzzy-Set-Theorie auf die Modellierung von Stickstoffbilanzen im Weißenstädter Becken. Bayreuther Forum Ökologie, Band 85.
- [6] MEIER, H., MERTENS, M., HUWE, B., 2003: Phosphorbilanzierung von Fischteichen – Der Einfluss der Teichwirtschaft auf die Wasserqualität des Weißenstädter Sees. Fischer & Teichwirt 7/2003.
- [7] BAYERISCHES LANDESAMT FÜR WASSERWIRTSCHAFT, 2003: Jahresbericht des Instituts für Agrarökologie, ökologischen Landbau und Bodenschutz, Freising. Im Internet unter www.lfl.bayern.de

Autorin

Dr. Marion Mertens, Universität Bayreuth, Abteilung Bodenphysik, Universitätsstr. 30, 95447 Bayreuth
marion.mertens@uni-bayreuth.de