

P-Verluste durch Abschwemmung - Ein Bewertungsmodell

Fritz DENOTH, Markus EGLI und Britta ALLGÖWER, Geographisches Institut, Universität Zürich, Winterthurerstrasse 190, CH-8057 Zürich

Besonders durch oberflächliche Abschwemmung werden dem Sempachersee seit Jahrzehnten eutrophierende Mengen an Phosphor zugeführt. In dieser Arbeit wird ein Modell vorgestellt, das landwirtschaftlich genutzte Flächen einer Abschwemm-Gefährdungsstufe zuordnet. Die Analyse wird mit einem Geographischen Informationssystem (GIS) durchgeführt. Es integriert dabei Bodendaten genauso wie Informationen zur Topographie und Nutzungsintensität.

Der jährliche Phosphoreintrag in den Sempachersee ist nach wie vor zu hoch. Als Hauptquelle gilt die Landwirtschaft (Hurni *et al.* 1992; Stamm 1994). Nach dem auf Braun *et al.* (1991) zurückgehenden und von den Autoren an die lokalen Verhältnisse im Einzugsgebiet des Sempachersees angepassten Schätzverfahren (Hurni *et al.* 1992) gelangen 85 % der jährlich in den See verfrachteten P-Menge (100 %) über Abschwemmung und Erosion in das Gewässersystem. Gächter *et al.* (1996) kommen zum Schluss, dass neben der Abschwemmung auch der Wasser- und Nährstofftransport über das Grobporensystem des Bodenkörpers (präferentieller Fluss, insbesondere in Drainagen) einen erheblichen Beitrag zur jährlichen P-Belastung im See leistet.

Ziel und methodischer Hintergrund

Landwirtschaftsflächen sind unterschiedlichen Abschwemmriskien ausgesetzt. Im Hinblick auf seeexterne Massnahmen ist die Bezeichnung von besonders gefährdeten Geländeteilen wünschenswertes Ziel. Das Bewertungsverfahren zur Abschätzung der P-Abschwemm-Gefährdungsstufe vermittelt zwischen der Komplexität der beteiligten Einflussgrössen und dem Bedürfnis der Praxis nach zu treffenden, effizient ableitbaren Aussagen. Damit steht es in der Tradition des systemtheoretischen Ansatzes der Landschaftsökologie und ist methodisch angelehnt an die von Marks *et al.* (1989) vorgeschlagene Anleitung, um das Leistungsvermögen des Landschaftshaushaltes zu bewerten. Der systemtheoretische Ansatz erfasst dabei die durchschnittlichen Ausprägungen der Einflussgrössen.

Geographisches Informationssystem (GIS)

Im Einzugsgebiet des Sempachersees sind in den letzten Jahrzehnten zahlreiche Forschungsarbeiten durchgeführt worden, die in mehr oder weniger direktem Zusammenhang mit der Gewässerproblematik stehen (z.B. Braun 1990; Von Albertini 1990; Von Albertini *et al.* 1993; EAWAG 1990; AGBA 1988; Braun *et al.* 1993; Hurni *et al.* 1992). Damit mit dem bereits vorhandenen Wissen neue Fragestellungen bearbeitet werden können, drängt sich die Verwendung eines GIS auf.

Zur Anwendung gelangte die kommerzielle GIS-Software ARC/INFO™, das sowohl vektor- wie auch rasterbasierte Daten ineinander umzuwandeln und zu verarbeiten vermag.

Das prinzipielle Vorgehen beinhaltet folgende Schritte: Über den zu untersuchenden Geländeausschnitt, zum Beispiel das Einzugsgebiet eines Baches, wird durch den Rechner ein planares Gitter mit einem Ursprung bekannter Lage gelegt, ausgedrückt in Landeskoordinaten. Da es sich bei den Gitterzellen um Quadrate gleicher Grösse und definierter Kantenlänge handelt, lässt sich ihre Lage ohne grossen Aufwand digital speichern. Jede Einflussgrösse der Phosphorabschwemmung kann als thematische Ebene aufgefasst und in Form eines solchen Gitters organisiert werden. Abhängig von der Ausprägung der Einflussgrösse innerhalb einer Zelle wird der entsprechende Zellenwert gespeichert. Benachbarte Rasterzellen mit gleichem Zellenwert können zu Zonen zusammengefasst werden und deuten auf eine einheitliche Ausprägung des Indikators innerhalb dieser Fläche hin. Die Rasterzelle stellt demnach die kleinste

Informationseinheit dar. Ihre Kantenlänge (7 x 7 m) soll abhängig vom zu beschreibenden Prozess und der zur Verfügung stehenden Datendichte beziehungsweise -genauigkeit gewählt werden.

Das Bewertungsmodell berücksichtigt sieben die Abschwemmung von Phosphor beeinflussende Grössen beziehungsweise ihre Indikatoren. Ihre Ausprägung wird gemäss ihres im Modell postulierten Beitrags zur Gesamtgefährdung einer Klasse von 1 bis 4 zugeordnet. Die jeweilige Klassenzugehörigkeit wird als Zellenwert gespeichert. Die Beitragsklassen werden gemäss aus der Theorie abgeleiteten Modellvorstellungen zur Gesamtwirkung verknüpft, indem die Zellenwerte gleicher Lage mathematisch zueinander in Beziehung gesetzt werden (vgl. Kasten «Aufbau des Modells»).

Modell-Gebiet Lippenrütibach

Die allgemein gute Datenlage gab Anlass, das Bewertungsverfahren in einem Teileinzugsgebiet des Sempachersees anzuwenden. Ausgewählt wurde das Einzugsgebiet Lippenrütibach (3,3 km², Gemeinden Neuenkirch und Ruswil). Auf die Gebietscharakteristiken gehen Naturforschende Gesellschaft Luzern (1993), Von Albertini (1990) und AGBA (1988) ausführlich ein. In einer Vielzahl von Böden findet sich ein beträchtlicher Phosphorvorrat (Stamm 1994). Messungen der EAWAG (1990) im Mündungsbereich des Baches ergaben die flächenspezifisch höchste P-Jahresfracht der untersuchten Teileinzugsgebiete des Sempachersees.

Modul Boden

Durchlässigkeit: Die im Einzugsgebiet Lippenrütibach kartierten Bodeneinheiten werden entsprechend ihrer Durchlässigkeit für Niederschlagswasser in vier Gruppen gegliedert (Tab. 1). Kriterium hierfür ist jener Betrag der Flussdichte nach Darcy-Buckingham, welcher unter

Aufbau des Modells

Das Modell gliedert ausgesuchte Einflussgrößen thematisch in die Bereiche Boden, Wasserhaushalt und P-Angebot, in der Folge als «Module» bezeichnet. Die Addition der Beitragsklassen innerhalb der Module Boden und Wasserhaushalt führt zu modulspezifischen Summenzahlen, die wiederum einer Klasse von 1 bis 4 zugeordnet werden. Die Summe aus diesen beiden Modulklassen ergibt die «natürliche (potentielle) P-Abschwemmunggefährdung». Diese wird anschliessend mit der Klasse der Bewirtschaftungsintensität multipliziert, welche dem Befund des Moduls P-Angebot entspricht. Das so erhaltene Produkt wird erneut klassiert (von 0 bis 4) und ergibt die «nutzungsbedingte (oder aktuelle) Gefährdungsstufe für die P-Abschwemmung». In einem nachgelagerten Analyseschritt werden Landschaftselemente des Einzugsgebietes einbezogen, welche auch tatsächlich Oberflächenwasser in Gewässer leiten. Dies geschieht zum einen aufgrund der Annahme, dass auf Flächen mit einer Neigung unter 3 % oberflächliches Fließen zum Erliegen kommt oder gar nicht erst entsteht (Prasuhn und Braun 1994). Zum andern muss davon ausgegangen werden, dass Phosphor im Oberflächenabfluss, der das Gerinnesystem oder aber die Strassen- beziehungsweise Hofplatzentwässerung erreicht, früher oder später den See erreicht. In der Landwirtschaftszone sind diese Abflusswege in der Regel nicht einer Kläranlage angeschlossen. Unter Berücksichtigung der Informationen aus dem digitalen Geländemodell (DGM) kann für jede Rasterzelle eine Entwässerungsrichtung gerechnet werden. Diese verbinden sich mit jenen der Nachbarzellen zu Fliesslinien, die sich alle spätestens an der Mündung des Bachs in den See vereinen. Umgekehrt kann jeder Rasterzelle ihr individuelles Einzugsgebiet zugeordnet werden, bestehend aus Zellen, die in diese entwässern. Die Einzugsgebiete aller Rasterzellen mit einem Gefälle kleiner als 3 % und die Ebenen selbst verlieren im Endergebnis ihre Klassierung, während alle andern sie behalten. Eine schematische Übersicht des Modellaufbaus gibt Abbildung 1.

Die im Modell verarbeiteten Informationen sind im wesentlichen drei unterschiedlichen Datensätzen entnommen: (a) Bodenkarte, (b) Landnutzungskartierung und (c) digitales Geländemodell. Für das Einzugsgebiet des Sempachersees liegen zwei Übersichts-bodenkartierungen im Massstab 1:5'000 und 1:10'000 vor (AGBA 1993). Häflicher (1996) hat im Zusammenhang mit der Planung eines Amphibien-Laichplatzverbundes in der Gemeinde Neuenkirch die Landnutzung weiter Teile des Untersuchungsgebietes digital erfasst. Als Informationsquellen dienten eine Lebensrauminventarkarte im Massstab 1:5'000 sowie Luftbilder der Landestopographie im Massstab 1:10'000. Die Kategorie «Landwirtschaftlich genutztes Land» ist weiter aufgefächert in Fruchtfolgeflächen (FFF) und Grasland. Für letzteres sind zudem unterschiedliche Intensitäten der Bewirtschaftung gemäss BLW/BUWAL (1994) festgehalten. Die topographische Information für das DGM ist den entsprechenden Übersichtsplänen (1:10'000) entnommen.

der Annahme einer speicherneutralen Sickerbewegung an der Bodenoberfläche eine vollständige Wassersättigung beziehungsweise einen hydrostatischen (Über-) Druck herbeiführt (q_{krit}). Die Flusssdichte ist dabei mit der Infiltrationsrate gleichgesetzt. Jenseits dieses Wertes wird davon ausgegangen, dass die Infiltrierfähigkeit des Bodens überschritten ist, sich also Oberflächenwasser bildet, das prinzipiell abfliessen kann. Dieses Vorgehen setzt die Verfügbarkeit folgender Bodeninformationen voraus:

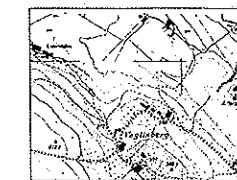
■ **Bodenprofil:** Für jede Kartiereinheit muss ein Bodenprofil mit Angabe der Horizontabfolge beziehungsweise zur Korngrößenverteilung vorliegen, das als Referenzprofil die bodenkundlichen Eigenschaften der Kartiereinheit verkörpert.

■ **Bodenphysikalische Kennwerte:** Für jeden Horizont muss die k_u -Funktion (Durchlässigkeit im ungesättigten Zustand) beziehungsweise der gesättigte Wasserleitkoeffizient k_s bekannt sein oder hergeleitet werden können.

Diese Informationen werden im Rahmen einer Bodenkartierung in der Regel nicht

erhoben. Aus diesem Grunde wurde jede Bodeneinheit unter bodenkundlichen Gesichtspunkten einem Referenzprofil und diesem Referenzprofil eine Abfolge aus Horizonten der Lokalformen aus Richard *et al.* (1978-1987) mit im Labor ermittelter k_u -Funktion zugeordnet. Die unter Verwendung des Rechenprogramms PROFILSYNTHESE von Schulin (1994) errechneten kritischen Flusssdichten zeigen sich in erster Linie abhängig von der Korngrößenverteilung im Profil und reichen von 2 bis 160 cm pro Tag, mit einem Schwergewicht zwischen 5 und 25 cm pro Tag. In Klasse 4, den Böden mit der geringsten Durchlässigkeit und damit dem höchsten Beitrag zur Abschwemmgefährdung, finden sich ausschliesslich stark hydromorphe Bodentypen (Gleye, Pseudogleye, Braunerde-Gleye und Braunerde-Pseudogleye).

■ **Verdichtungsgrad:** Die Durchlässigkeit von Böden wird durch ihre jeweilige Kompaktiertheit beeinflusst. Gemäss Weisskopf *et al.* (1988) lassen sich die Variablen, die die Verdichtungsgefährdung eines Bodens bestimmen, grup-



Ausschnitt aus EZG-Lippenrütibach: (LX 656350 217500 | 657260 218200)

Einflussgrößen:

Durchlässigkeit des Bodenkörpers
+ Verdichtungsgrad
+ Speicherkapazität des Bodenkörpers

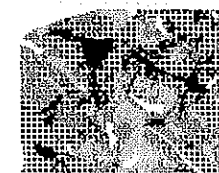
= Modul Boden

Oberflächenform
+ Durchschnittliche Wassersättigung
+ Vegetationsbedingtes Wasserückhaltevermögen

= Modul Wasserhaushalt

Nutzungsintensität
= Modul P-Angebot

Gefährdungsstufe der nutzungsbedingten P-Abschwemmung



Grundlagen:

Raumauschnitt
Topographie
Bodenkarte
Landnutzung
Klimaeignung

Legende:

Beitragsklasse



□ Siedlung, Strassen, etc.

Abbildungsmassstab 1: 16000
Zellenweite 7m x 7m
© Identith/magli
Daten: K. Luzern,
GIS Koordinationsstelle

Abb. 1. Exemplarische Darstellung der «Gefährdungsstufe der nutzungsbedingten (aktuellen) P-Abschwemmung» für einen Ausschnitt des Lippenrütibachgebietes.

pieren in: (1) Boden- und Klimaeigenschaften, (2) Kulturwahl und Fruchtfolgegestaltung sowie (3) die Mechanisierung und Art des Anbausystems. Die Berechnung der potentiellen Verdichtungsgefährdung basiert auf dem nach Weisskopf *et al.* (1988) vorgeschlagenen Prinzip.

In einem weiteren Schritt wird die landwirtschaftliche Nutzung miteinbezogen. Es wird davon ausgegangen, dass eine intensivere Nutzung mit einem häufigeren Befahren der Fläche einhergeht und somit die Gefährdung einer Verdichtung des Bodens grösser ist. Die Klassierungen der Verdichtungsgefährdung und der vermutlichen Vorverdichtung werden im Modell zusammengefasst zu einem einzigen Befund, dem Verdichtungsgrad.

■ **Speicherkapazität:** Die Speicherkapazität ist ein Mass für das Vermögen eines Bodens, Wasser aufzunehmen und im Porensystem zurückzuhalten. Zwischen der Wasserspeicherkapazität und der für Pflanzenwurzeln erschliessbaren Profilmächtigkeit besteht gemäss FAP (1992) eine direkt proportionale Beziehung. Dar-

Tab. 1. Definition und Klassierung der berücksichtigten Einflussgrößen von Phosphor-Verlusten auf landwirtschaftlich genutzten Flächen

Beitragsklasse 0 1 2 3 4	Definition
Durchlässigkeit:	1. kritische Flusssdichte (q_{krit}) nach Darcy-Buckingham $q_{krit} > 20 \text{ cm pro Tag}$ $15 \text{ cm d}^{-1} < q_{krit} < 20 \text{ cm d}^{-1}$ $10 \text{ cm d}^{-1} < q_{krit} < 15 \text{ cm d}^{-1}$ $q_{krit} < 10 \text{ cm d}^{-1}$
Verdichtungsgrad: aufgerundetes arithmetisches Mittel aus 2A. und 2B.	2A. Index der pot. Verdichtungsgefährdung nach Weisskopf <i>et al.</i> (1988): B4 und C1-4: Klimazonen nach Jeanneret <i>et al.</i> (1977), G: Fremdnässegrad im Profil, S: Staunässegrad im Profil, R: Grad der dauernden Grund- und Hangnässe; B4: keine Nässezeichen oder G1 B4: I1, G2 C1-4: keine Nässezeichen oder G1 B4: I2, G3, R1 oder R2; C1-4: I1, G2 B4: I3 oder I4, G4 oder G5 oder G6, R3 oder R4 oder R5 C1-4: I2, G3, R1 oder R2 C1-4: I3 oder I4, G4 oder G5 oder G6, R3 oder R4 oder R5
Speicherkapazität	3. Physiologische Gründigkeit nach FAP (1992): $\geq 70 \text{ cm}$ (tiefgründig, sehr tiefgründig, extrem tiefgründig) $50 \text{ cm} - 70 \text{ cm}$ (mässig tiefgründig) $30 \text{ cm} - 50 \text{ cm}$ (ziemlich flachgründig) $< 30 \text{ cm}$ (flachgründig, sehr flachgründig)
Modul Boden	Klassierte Summen aus den Einflussgrößen 1, 2 und 3: 3, 4 5, 6, 7 8, 9, 10 11, 12
Oberflächenform	4. Krümmung der Höhen- und der Fallinie: In vertikaler und horizontaler Richtung planar oder konvex In vertikaler Richtung planar oder konvex, in horizontaler Richtung konkav: Talformen In vertikaler Richtung konkav, in horizontaler Richtung konkav oder planar: Mulden und Hangabflachungen
Durchschnittliche Wassersättigung	5. Wasserhaushaltsgruppe gemäss Bodenkarte (Nomenklatur: FAP 1992): Senkrecht durchwaschene Böden, normal durchlässig, Senkrecht durchwaschene Böden, mässig staunass, Senkrecht durchwaschene Böden, mässig grund- oder hangnass Staunasse Böden, selten bis zur Oberfläche porengesättigt, Grund- oder hangnasse Böden, selten bis zur Oberfläche porengesättigt Staunasse Böden, häufig bis zur Oberfläche porengesättigt, Grund- oder hangnasse Böden, häufig bis zur Oberfläche porengesättigt Grund- oder hangnasse Böden, meist bis zur Oberfläche porengesättigt
Vegetationsbedingtes Wasser- rückhaltevermögen	6. Bewertung der Bodenbedeckung hinsichtlich ihres Effekts auf Abflussverhinderung (nach Marks <i>et al.</i> 1989): Hecken und Feldgehölze Brachen und Odland, Trockenstandorte, extensiv genutztes Wiesland, wenig intensiv genutztes Wiesland (Mahd), Hochstammobstgärten Weiden, mittelintensiv bis intensiv bewirtschaftetes Wiesland, Intensivobstanlagen, Offene Ackerflächen, Kunstwiesen, Flächen mit Freilandgemüse, Baumschulen, Glas- und Treibhäuser;
Modul Wasserhaushalt	Aufgerundetes arithmetisches Mittel der Einflussgrößen 4, 5 und 6: ≤ 1 ≤ 2 ≤ 3 ≤ 4
Natürliche (potentielle) P-Abschwemmungsgefährdung	klassierte Werte aus der Summe der Module Boden und Wasserhaushalt
Modul P-Angebot	7. Nutzungsintensität - Definitionen gemäss BLW/BUWAL (1994): extensive Bewirtschaftung - keine Hofdüngergaben wenig intensiv mittelintensiv, intensiv
Gefährdungsstufe der nutzungsbedingten (aktuellen) P-Abschwemmung	klassierte Werte der Summe der Module Boden und Wasserhaushalt multipliziert mit dem Modul P-Angebot Produkt = 0 Produkt ≤ 4 Produkt ≤ 6 Produkt ≤ 10 Produkt ≤ 16
Gefährdungsstufe des nutzungsbedingten P-Eintrags	Berücksichtigung der einleitungswirksamen Geländeelemente: Alle Geländeteile im direkten Einzugsgebiet von Flächen mit einer Neigung kleiner als 3% verlieren ihre Gefährdungsstufe, alle andern behalten sie bei.

aus wird im Modell abgeleitet, dass ein Boden mit geringer Mächtigkeit weniger Wasser speichern - und damit auch aufnehmen kann - als ein in seinen sonstigen Eigenschaften identischer, jedoch tiefgründiger Bodenkörper.

Modul Wasserhaushalt

Oberflächenform: Die Hanggeometrie beziehungsweise die Oberflächenform bestimmt darüber, ob oberflächlich oder über präferentielle Wege abfließendes Hangwasser konvergiert beziehungsweise divergiert. Burt und Butcher (1985) bezeichnen zwei Geländekategorien, welche durch Hangwassereinfluss besonders betroffen sind: (1) In Hang-Hohlformen zeigt die Höhenlinie einen konkaven Verlauf. An Stellen, wo gleichzeitig auch die Fallinie konkav verläuft, ist konvergierendes Fließen noch wahrscheinlicher. (2) Am Hangfuss verzögert die abnehmende Hangneigung ein Abfließen des Wassers. Hier zeigt nur die Fallinie einen konkaven Verlauf. An diesen Geländestellen ist ein vermehrt wassergesättigter Boden zu erwarten. Die konkaven Geländeformen (Tobel, Hangabflachungen, usw.) werden auf der Grundlage des DGM (digitales Geländemodell) rechnerisch ermittelt. Während glatten Oberflächenformen kein Beitrag zu einer zusätzlichen Gefahr der Oberflächenabflussbildung beigemessen wird, erhalten Talformen die Beitragsklasse 2, Hangabflachungen und die sowohl in horizontaler als auch vertikaler Richtung konkav verlaufenden Geländeteile Beitragsklasse 4.

Durchschnittliche Wassersättigung: Je öfter ein Boden wassergesättigt ist, desto grösser ist die Wahrscheinlichkeit einer Wassersättigung, und damit eines potentiellen Oberflächenabflusses.

Vegetationsbedingtes Wasserrückhaltevermögen: Als das Abflussgeschehen modifizierende Faktoren führen Marks *et al.* (1989) unter anderem auch die Bodenbedeckung durch Vegetation an. Die dort angegebene Bewertung unterschiedlicher Bodenbedeckung ist auf die kartierten Landnutzungskategorien (Häfliger 1996) übertragen.

Modul P-Angebot

Nutzungsintensität: Häufiges Ausbringen von Gülle bewirkt eine höhere Konzentration an mobilem Phosphat im Oberboden. In durch langjährige Dün-

gung mit Phosphor übertroffenen Böden muss darüber hinaus angenommen werden, dass auch ohne unmittelbar vorausgegangene Begüllung bei entsprechendem Niederschlag erhebliche Mengen an Phosphor durch Abschwemmung wegtransportiert werden. Schmitt (1996) führt dies auf die wenigen noch verbleibenden freien Adsorptionsstellen an den Porenwänden im Oberboden zurück. Das Modul P-Angebot besteht aus einer einzigen Einflussgrösse, deren Indikator die Nutzungsintensität darstellt.

Gefährdungsstufe für P-Abschwemmung

Die mit der Wahl des Parameterwertes 0 und der Definition der Nutzungsintensität als Faktor zusammenhängende Annahme, dass auf nicht begüllten Flächen auch kein Risiko des P-Verlustes besteht, ist von zentraler Bedeutung: Flächen, die sowohl wegen ihrer Bodeneigenschaften als auch hinsichtlich ihres Wasserhaushalts sehr stark zu Oberflächenabflussbildung neigen, verlieren ihre nutzungsbedingte P-Abschwemmungsgefährdung, falls auf ihnen kein Phosphor ausgebracht wird. Flächen mit der Gefährdungsstufe 0 sind demnach ausschliesslich ungedüngte und damit extensiv bewirtschaftete Parzellen oder Geländestreifen. In die höchste Klasse (= Gefährdungsstufe 4) gelangen ausschliesslich Flächen, die intensiv bewirtschaftet werden, auf denen also viel Phosphor in Form von Hofdünger ausgebracht wird.

Flächen mit der Gefährdungsstufe 0 finden sich im Testgebiet auf ungedüngten, extensiv bewirtschafteten Parzellen oder auf wenig intensiven Mähwiesen mit zumindest mässig tiefgründigen und gut durchlässigen Braunerden. 7,04 ha (3 % der landwirtschaftlich genutzten Fläche) werden vom Modell der Gefährdungsstufe 0 zugeordnet. Erwartungsgemäss wird auch der Gefährdungsstufe 1, welche sich vorwiegend an Standorten mit wenig intensiven Mähwiesen und Braunerden mit unterschiedlich stark ausgeprägten Vernässungszeichen befindet, nur ein kleiner Anteil zugewiesen (22,8 ha oder 9 % der Fläche). Einen wesentlich höheren Anteil machen Flächen mit einer mittleren (Gefährdungsstufe 2: 49 ha bzw. 20 % der Fläche) und insbesondere mit einer höheren (Gefährdungsstufe 3: 118 ha bzw. 48 % der Fläche) P-Abschwemmungsgefährdung aus: Rund ein Fünftel der 250 ha grossen Landwirtschaftsfläche gehört Ge-

fährdungsstufe 4 an. Das Modell ordnet häufig vernässte Böden in Hangmulden mit trotzdem intensiver Bewirtschaftung genauso dieser Klasse zu wie Flächen über heute in Röhren verlegten Bachläufen. Ein qualitativer Vergleich der Ergebnisse mit Befunden früherer Felduntersuchungen einzelner Geländeauschnitte im Einzugsgebiet des Lippenrütibachs (Fedrizzi und Zemp 1991; Brun *et al.* 1995) zeigt ermutigende Übereinstimmungen.

Anwendbarkeit des Bewertungsmodells

Folgende Eigenschaften zeichnen das vorgeschlagene Bewertungsverfahren aus:

■ Das Modell ist transparent. Die darin eingehenden Annahmen und Parameter der Abschwemmung sind klar definiert. Die einbezogenen Einflussgrössen sind aufgrund des aktuellen Wissensstandes als prozessrelevant anerkannt.

■ Das Modell verarbeitet bereits erfasstes Datenmaterial und daraus ableitbare Grössen. Es bedingt topographische und pedologische Informationen sowie Kenntnis über den lokalen P-Versorgungsgrad der Böden. Die problemorientiert festgelegte Auflösung der Information (Rasterzelle von 7 m Kantenlänge) bedarf einer entsprechenden Genauigkeit und Dichte der Grundlagendaten. Im Hinblick auf eine Übertragung des Vorgehens auf grössere Gebiete ist die Datenbeschaffung je nach Ausgangslage mit einem nicht zu unterschätzenden Aufwand verbunden.

■ Die Struktur des Modells ist offen. Zwar werden die verwendeten Parameter als unverzichtbar für eine Beurteilung der Phosphor-Verlust-Gefährdung betrachtet; ihre Erhebung beziehungsweise ihre Indikatoren stehen jedoch einer Überprüfung beziehungsweise Weiterentwicklung offen. Der Einbezug eines GIS als Datenverwaltungs- und Analyseinstrument steigert die Verfügbarkeit der erhobenen Daten und ermöglicht eine effizientere Organisation ihrer Nachführung.

■ Die Zuordnung aller Ausprägungen unterschiedlicher Indikatoren auf ein gemeinsames ordinales Skalenniveau ist problematisch, weil empirisch nicht belegt. Die vorgenommene Gewichtung, etwa durch Mehrfachverwendung von Indikatoren für unterschiedliche Einflussgrössen, mag inhaltlich zwar begründbar sein, ist aber subjektiv und deshalb immer anfechtbar. Gleiches gilt für die Klassenzuordnung. Zudem wird durch die additive Verknüpfung den Zusammenhängen Lineari-

tät unterstellt. Diese methodenbezogenen Schwierigkeiten dürfen nicht überspielt werden, schränken aber die Aussagekraft von Bewertungsverfahren dieser Art nicht von vornherein ein (Marks *et al.* 1989).

■ Die Ergebniskarten stellen in anschaulicher Weise problemrelevante Informationen flächendeckend für das gesamte Einzugsgebiet dar.

Die Verwendung eines GIS bietet eine Möglichkeit über den Weg attraktiver Informationsübertragung die betroffenen Akteure weiter zu sensibilisieren. Eine ganzheitlich argumentierende Düngeberatung kann davon genauso profitieren wie die Bewirtschaftenden selbst.

LITERATUR

Das vollständige Literaturverzeichnis ist bei den Autoren erhältlich.

RÉSUMÉ

La décharge superficielle du phosphore - un modèle d'évaluation

Le présent modèle, qui se base sur le SIG, classifie la perte de phosphore causée par la décharge superficielle des sols dans des écosystèmes d'agriculture. L'approche du modèle proposé nécessite les données suivantes: une carte détaillée des sols, une carte de l'usage du sol et le modèle digital de la topographie. Les cartes nécessaires ainsi qu'un grand nombre de données physiques et chimiques étaient disponibles pour le bassin hydrologique du Lippenrütibach, où le modèle a été développé. Les calculs effectués ne fournissaient pas de données absolues mais relatives et évaluent pour une parcelle le risque potentiel d'une perte de phosphore et par conséquent d'eutrophication des systèmes aquatiques. Les résultats obtenus sont prometteurs lorsqu'ils sont comparés avec des investigations dans des sites différents du bassin hydrologique du Lippenrütibach.

SUMMARY

Surface runoff of phosphorus - an evaluation model

The presented, GIS-based model classifies the loss of phosphorus due to surface runoff in agricultural ecosystems. The proposed modelling approach employs the following fundamental data: a detailed soil map, a map on land use, and the digital elevation model. The required maps and a voluminous data base was available for the Lippenrütibach basin, where the model was developed. The calculations performed produce not absolute but relative values and evaluate the potential risk for a parcel of leached phosphorus and the resulting eutrophication in related aquatic systems. The obtained results are promising when comparing them with field investigations on different sites of the catchment area.

KEY WORDS: phosphorus, surface runoff, modelling, eutrophication, GIS, DGM