

Phosphor in landwirtschaftlich genutzten Böden in einem Teileinzugsgebiet der Antiesen im oberösterreichischen Innviertel

Andreas Bohner, Christa Huemer, Jakob Schaumberger und Peter Liebhard

Zusammenfassung

Das Ziel des INTERREG IV A-Projekts „Gewässer-Zukunft“ ist eine nachhaltige Verbesserung der Wasserqualität der Antiesen im oberösterreichischen Innviertel. Dazu müssen die Phosphor-Einträge aus landwirtschaftlich genutzten Flächen in den Fluss reduziert werden. Um die tatsächlichen und möglichen Phosphor-Einträge qualitativ beurteilen zu können, sind zunächst einmal Kenntnisse über den Phosphor-Gehalt der landwirtschaftlich genutzten Böden im Einzugsgebiet erforderlich. Daher wurde in den Jahren 2010 und 2011 in einem Teileinzugsgebiet der Antiesen der Nährstoffstatus der Acker- und Grünlandböden erhoben. Insgesamt wurden in dem überwiegend ackerbaulich genutzten Untersuchungsgebiet 590 Bodenproben aus dem Oberboden (0-15 cm Bodentiefe) gezogen. Für den Nachweis einer erosions- und abschwemmungsbedingten lateralen Nährstoffverlagerung wurde auf jedem Schlag in Hanglage zumindest der Ober-, Mittel- und Unterhang beprobt. Die im Boden unterschiedlich verfügbaren Phosphor-Anteile wurden mit verschiedenen Methoden ermittelt. Die Ergebnisse der Bodenanalysen belegen sehr niedrige Gehalte an CAL-löslichem Phosphor auf den meisten Grünlandflächen. Die Ackerböden mit den Kulturarten Getreide, Mais und Ölpflanzen (Raps, Lein) sind in den obersten 15 cm im Durchschnitt besser mit CAL-löslichem Phosphor versorgt als die Grünlandböden. Auf den landwirtschaftlich genutzten Flächen sind die wasserlöslichen Phosphor-Gehalte im Oberboden zum Teil sehr hoch. Auf diesen Flächen kann Phosphor bei Oberflächenabfluss leicht gelöst und abgeschwemmt werden. Die untersuchten Böden besitzen eine hohe Phosphor-Speicherkapazität. Der Phosphor-Sättigungsgrad ist sowohl in den Acker- als auch in den Grünlandböden mit wenigen Ausnahmen niedrig. Somit dürfte das Risiko für erhöhte Phosphor-Verluste durch Auswaschung gering sein. Eine erosions- und abschwemmungsbedingte Phosphor-Anreicherung am Unterhang konnte nicht festgestellt werden. Die Untersuchungsergebnisse werden im Hinblick auf die Eutrophierungsgefahr der Antiesen diskutiert.

Schlagwörter: Ackerböden, Grünlandböden, Eutrophierung, Phosphor-Speicherkapazität, Phosphor-Sättigungsgrad

Summary

Aim of the INTERREG IV A-project "Gewässer-Zukunft" is a sustainable improvement of the water quality of river Antiesen in Upper Austria. To reach this target, phosphorus inputs from agricultural used areas have to be reduced. In order to assess the actual and potential losses of phosphorus from arable land and grassland to the river Antiesen, knowledge of the soil phosphorus levels in the catchment is necessary. Therefore, in 2010 and 2011 the nutrition status of the arable soils and grassland soils within a subcatchment of river Antiesen was investigated. In the study area, dominated by arable land, a total of 590 soil samples from the topsoil (0-15 cm depth) were collected. To assess the risk of phosphorus losses from agricultural used soils by soil erosion and surface runoff, in each sloping field soil samples were taken at least from the upper, middle and lower part of the slope. The pools of various forms of phosphorus were determined by different methods. Most of the grassland soils investigated exhibit very low levels of CAL-soluble phosphorus. Arable land, cropped with cereals, maize or oil plants (rapeseed, flax), has on average higher contents of CAL-soluble phosphorus in the topsoil than grassland. In the agricultural used soils, the levels of water-soluble phosphorus in the uppermost 15 cm are sometimes very high, increasing the risk of greater phosphorus losses in surface runoff in dissolved form on slopes. The soils investigated possess high phosphorus sorption capacities. With few exceptions, both in the arable soils and in the grassland soils the degree of phosphorus saturation is low. Therefore, also the risk of elevated phosphorus losses by leaching seems to be low. Surprisingly, we could not observe a phosphorus enrichment on the lower part of the slope due to soil erosion and surface runoff. The findings will be discussed with regard to the risk of eutrophication of river Antiesen.

Keywords: arable soils, grassland soils, eutrophication, phosphorus sorption capacity, degree of phosphorus saturation

1. Einleitung

Für die Eutrophierung der Oberflächengewässer ist in erster Linie der Phosphor verantwortlich (KUMMERT und STUMM 1989). In den Einzugsgebieten eutrophierter und eutrophierungsgefährdeter Gewässer muss daher versucht werden, die Phosphor-Einträge aus punktuellen und diffusen Quellen zu verringern. Die wichtigsten diffusen Quellen im landwirtschaftlichen Bereich sind Bodenerosion, Abschwemmung und Auswaschung (BRAUN et al. 1991, BRAUN und HURNI 1993, PRASUHN und BRAUN 1994, GÄCHTER et al. 1996, FROSSARD et al. 2004). Auch das Grundwasser und Dränwasser können wichtige Eintragspfade für Phosphor in die Oberflächengewässer sein (HÖLTL und VOGL 1983, SEIFFERT 1990, WERNER et al. 1991, PRASUHN und LAZZAROTTO 2005). Der Phosphor-Eintrag aus der Atmosphäre hingegen stellt in der Regel keine besondere Gefährdungsquelle dar (WERNER und WODSAK 1994). Die Bodenerosion hat im Dauergrünland für die Eutrophierung der Oberflächengewässer im Allgemeinen nur eine geringe Bedeutung (WERNER et al. 1991, VON ALBERTINI et al. 1993). Eine Erosionsgefahr besteht am ehesten im Falle einer Neuansaat oder bei einer nicht an den Standort angepassten, zu intensiven Bewirtschaftung. Auch auf Wechselwiesen ist zeitweise eine nennenswerte Bodenerosion möglich, insbesondere wenn in der Fruchtfolge regelmäßig Mais angebaut wird. Vom Grünland können allerdings erhebliche Mengen an gelöstem Phosphor abgeschwemmt werden (BRAUN und LEUENBERGER 1991, BRAUN und PRASUHN 1997, POMMER et al. 2001, PRASUHN und LAZZAROTTO 2005). Der gelöste Phosphor im Oberflächenabfluss und oberflächennahen Abfluss stammt aus der atmosphärischen Deposition, dem Boden und aus oberflächenappliziertem Dünger. Die Gefahr einer Gewässer-Eutrophierung durch Abschwemmung von gelöstem Phosphor nimmt daher mit steigenden Düngermittelgaben zu (SHARPLEY et al. 1994). Vor allem verdichtete Böden in Hanglagen weisen infolge verminderter Infiltration von Regen- und Schneeschmelzwasser einen erhöhten Oberflächenabfluss sowie eine niedrigere Infiltrationsrate der Flüssigdünger (Gülle, Jauche) auf. Dies erhöht das Risiko für eine Abschwemmung der flüssigen Wirtschaftsdünger, insbesondere wenn sie kurz vor einem Starkregenereignis ausgebracht werden (VON ALBERTINI et al. 1993). Die Phosphor-Austräge durch Abschwemmung sind auch vom wasserextrahierbaren Phosphor-Gehalt in der obersten Bodenschicht (1-2,5 cm) abhängig (SHARPLEY et al. 1994). Daher fördert ein hoher wasserlöslicher Phosphor-Gehalt im Oberboden die Gewässer-Eutrophierung (PRASUHN und LAZZAROTTO 2005). Beim Ackerland ist die Bodenerosion der wichtigste diffuse Eintragspfad für Phosphor in die Oberflächengewässer (SHARPLEY et al. 1994, KLAGHOFER 1997, PRASUHN 2001, 2005). Die Phosphor-Belastung hängt einerseits von der Menge des in ein Gewässer transportierten Bodenmaterials und andererseits vom Phosphor-Gehalt des Erosionsmaterials ab (PRASUHN 2005). Durch Bodenerosion wird partikulär gebundener Phosphor in die Oberflächengewässer eingetragen (PRASUHN und BRAUN 1994, PRASUHN 2005). Der Bodenabtrag kann durch Stark- oder Dauerregen hervorgerufen werden (FRIELINGHAUS 1990). Für die flächenhafte Bodenerosion und Abschwemmung kann auch die Schneeschmelze eine große Bedeutung haben. Besonders erosions- und abschwemmungsgefährdet sind steile Hanglagen, vor allem wenn die Böden verdichtet sind. Die Eutrophierungs-Gefahr der Oberflächengewässer ist dann sehr hoch, wenn sich Steilhänge mit großer Hanglänge in ihrer unmittelbaren Nähe befinden. Dadurch gelangt bei erosions- und abschwemmungsauslösenden Niederschlägen oder während intensiver Schneeschmelze der gelöste und partikulär gebundene Phosphor sehr häufig direkt in die Oberflächengewässer. Die Bodenerosion führt nicht nur zu einer Gewässer-Eutrophierung („Off-site-Schäden“), sondern sie bewirkt auf Ackerflächen auch nahezu irreversible „On-site-Schäden“ durch Ertragsrückgänge sowie durch eine Abnahme der Ertragsicherheit und Bodenfruchtbarkeit (AUERSWALD 1989, FRIELINGHAUS 1990). Die Bodenerosion durch Wasser verursacht eine laterale Boden- und Nährstoffverlagerung am Hang. Daher weisen die Böden auf erodierten Kuppen und Hängen häufig einen niedrigeren Humus- und Nährstoffgehalt als die Senken auf (FRIELINGHAUS et al. 1983). Nach STROHBACH (1986) nimmt der Phosphor-Gesamtgehalt im Boden von der Kuppe hin zur Senke zu. Der DL-lösliche Phosphor-Gehalt hingegen kann hangabwärts auch abnehmen. Das Grundwasser ist sehr wesentlich an der Nährstoffbefruchtung der Oberflächengewässer beteiligt (WERNER et al. 1991). Die Auswaschung von gelöstem Phosphor mit dem Sickerwasser kann daher sowohl im Ackerland als auch im Grünland unter bestimmten Boden-, Vegetations- und Witterungsverhältnissen für die Nährstoffanreicherung im Grundwasser und in der Folge für die Eutrophierung der Oberflächengewässer von Bedeutung sein (OTTO 1980, BOHNER et al. 2007). Generell begünstigen klima- und/oder reliefbedingt hohe Sickerwassermengen im Boden die Phosphor-Auswaschung. Böden mit ständig sehr hoch anstehendem Grundwasser wie beispielsweise Anmoore und Nassogleye, vor allem aber stark saure, eisenarme Hochmoorböden sind in Bezug auf Phosphor besonders auswaschungsgefährdet (SCHEFFER 1977, NIEDER 2000).

Aus landwirtschaftlich genutzten Flächen (Ackerland und Grünland) nehmen die Phosphor-Einträge in die Oberflächengewässer mit steigenden Phosphor-Gehalten im Boden zu (OTTO 1980, MEISSNER et al. 1992, PRASUHN und BRAUN 1994, RÖMER 1997, FROSSARD et al. 2004). Um die tatsächlichen und mögli-

chen Phosphor-Einträge qualitativ beurteilen zu können, sind daher Kenntnisse über den Phosphor-Gehalt in den verschiedenen Phosphor-Fractionen der landwirtschaftlich genutzten Böden im Einzugsgebiet von Gewässern erforderlich. Anschließend können wirksame Maßnahmen zur Verminderung der Phosphor-Einträge aus landwirtschaftlich genutzten Flächen in die Gewässer sowie Maßnahmen, welche ein Ansteigen dieser Phosphor-Einträge nachhaltig verhindern, ausgearbeitet werden.

Mit der vorliegenden Studie werden primär folgende Ziele verfolgt:

- Flächendeckende Beurteilung des Phosphor-Versorgungszustandes der landwirtschaftlich genutzten Böden in einem Teileinzugsgebiet der Antiesen im Hinblick auf die aktuelle und potenzielle Eutrophierungsgefahr des Flusses,
- Ermittlung von Flächen mit erhöhtem Austragspotenzial für Phosphor (hot spots),
- Analyse des Einflusses verschiedener Kulturarten und der Reliefposition auf den Phosphor-Gehalt den einzelnen Phosphor-Fractionen im Oberboden und
- Schaffung von Grundlagen für die Entwicklung von regionalen Maßnahmen zur nachhaltigen Verbesserung der Wasserqualität der Antiesen.

2. Untersuchungsgebiet

Die Untersuchungen wurden in einem Teileinzugsgebiet der Antiesen in den Gemeinden Ort im Innkreis, Lambrechten und Eggerding im oberösterreichischen Innviertel durchgeführt. Das Untersuchungsgebiet liegt in der Molassezone. In dieser geologischen Zone ist der Schlier ein häufiges und weit verbreitetes Sedimentgestein. Es handelt sich dabei vorwiegend um feinsandig-glimmerige Mergel (OBERHAUSER 1980). Glimmerreiche Gesteine begünstigen eine Dichtlagerung und Staunässebildung im Boden (NESTROY et al. 2011) und fördern somit den Oberflächenabfluss und oberflächennahen Abfluss in Hanglagen. Dadurch erhöht sich auch die Erosions- und Abschwemmungsgefahr. Die Landschaft repräsentiert ein flachwelliges Hügelland mit Seehöhen zwischen 380 und 490 m. Im Untersuchungsgebiet dominieren Hanglagen mit einer Hangneigung von 5-15%. Stellenweise kommen allerdings auch Steilhänge mit einer Hangneigung über 35% vor. Die Böden sind überwiegend Braunerden, Pseudogleye, Gleye und Kulturrohböden (eBOD 2012). Die hydromorphen Böden werden zum Großteil drainiert; die drainierte Fläche ist im Untersuchungsgebiet allerdings nicht bekannt. Die nächstgelegene Wetterstation befindet sich in Reichersberg in 350 m Seehöhe. Hier beträgt im langjährigen Mittel (1971-2000) die Juli-Temperatur 17,5 °C, die Jänner-Temperatur -2,0 °C und die Jahresmittel-Temperatur 7,9 °C. Der Jahres-Niederschlag macht im Durchschnitt 840 mm aus. Die Niederschläge sind relativ gleichmäßig über das Jahr verteilt. In der Vegetationsperiode (April bis September) fallen etwa 63% des Jahres-Niederschlags. Der Juli ist im langjährigen Mittel der niederschlagsreichste Monat, im Februar fallen die geringsten Niederschlagsmengen. Potenziell erosionsauslösende Starkregen treten vor allem im Zeitraum Juni bis August auf. Die Zahl der Tage mit Gewitter beträgt 22 im Jahr und die jährliche Schneedeckenperiode erstreckt sich über 41 Tage (ZAMG 2002). Das Klima, die Böden und das Relief begünstigen den Ackerbau. Im Untersuchungsgebiet dominieren daher Ackerflächen. Die Grünland- und Waldflächen erreichen jeweils nur ein Fünftel der Ackerflächen. Die Hauptkulturen sind Körner- und Silomais, Wintergerste, Winterweichweizen und Winterraps. Angebaut werden auch Sommerhafer, Triticale und Sonderkulturen wie beispielsweise Öllein oder Kümmel. Die Ackerflächen werden regelmäßig mit Mineral- und Wirtschaftsdünger gedüngt. Das Grünland wird in Abhängigkeit vom Pflanzenbestand (Dauergrünland oder Wechselgrünland) und von der Jahreswitterung meist drei- bis fünfmal pro Jahr gemäht und regelmäßig mit Wirtschaftsdünger gedüngt. Der Viehbesatz beträgt in den Gemeinden Ort im Innkreis, Lambrechten und Eggerding 0,6, 1,0 und 1,2 GVE pro Hektar und ist damit – nach europäischen Maßstäben gemessen – nicht sehr hoch.

3. Material und Methoden

Im Untersuchungsgebiet wurden insgesamt 590 Bodenproben für routinemäßige Bodenanalysen zur Beurteilung der Nährstoffsituation aus dem Oberboden (0-15 cm Bodentiefe) gezogen. Damit wurden alle landwirtschaftlich genutzten Flächen beprobt. Zusätzlich wurden 98 umfassendere Bodenanalysen primär zur Beurteilung der Phosphor-Speicherkapazität und des Phosphor-Sättigungsgrades durchgeführt. Auf jedem Probenahmepunkt wurden auf einer Fläche von rund 2 m² Einzelproben mit dem Spaten entnommen und zu einer Mischprobe vereinigt. Die Probenahme erfolgte vor der Düngung im Sommer und Herbst 2010 sowie im Frühjahr 2011. Gemäß ÖNORM L 1055 (Probenahme von ackerbaulich genutzten Böden) und

ÖNORM L 1056 (Probenahme von Dauergrünland) werden in Österreich die Bodenproben auf Ackerflächen aus der Tiefenstufe 0-20 cm und auf Grünlandflächen aus 0-10 cm gezogen. Um die Ackerböden mit den Grünlandböden hinsichtlich ihres Nährstoffgehaltes im Oberboden vergleichen zu können, erfolgte die Probenahme auf allen Flächen einheitlich aus der Tiefenstufe 0-15 cm. Somit können die ermittelten Nährstoffgehalte streng genommen nicht nach den „Richtlinien für die sachgerechte Düngung“ (2006) beurteilt werden. Eine qualitative Beurteilung des Nährstoffzustandes der landwirtschaftlich genutzten Böden ist innerhalb des Untersuchungsgebietes aber möglich. Für den Nachweis einer erosions- und abschwemmungsbedingten lateralen Nährstoffverlagerung wurde auf jedem Schlag in Hanglage zumindest am Oberhang (inklusive Kuppe und Rücken), Mittel- und Unterhang (inklusive Hangfuss, Mulde und Wanne) jeweils eine Bodenprobe gezogen. Auf jenen Schlägen, wo reliefbedingt die Eutrophierungsgefahr der Fließgewässer durch Bodenerosion und Abschwemmung größer ist, wurde die Anzahl der Bodenproben erhöht.

Die Bodenproben wurden luftgetrocknet, homogenisiert und bei 2 mm Maschenweite gesiebt. Die Analysemethoden richteten sich nach der jeweiligen ÖNORM (pH-Wert in einer 0,01 M CaCl₂-Lösung gemäß ÖNORM L 1083, elektrische Leitfähigkeit konduktometrisch gemäß ÖNORM L 1092, Phosphor und Kalium mit der CAL-Methode gemäß ÖNORM L 1087, wasserlöslicher Phosphor-Gehalt gemäß ÖNORM L 1092). Der Gesamtgehalt an Kohlenstoff, Stickstoff und Schwefel wurde mittels Elementaranalyse bestimmt. Die Aggregatstabilität wurde mit einem Tauchsiebverfahren nach KEMPER und KOCH (1966) ermittelt. Die Aggregatstabilität ist ein Maß für die Widerstandsfähigkeit des Bodens gegen die Verschlammung durch Wasser (SCHACHTSCHABEL und HARTGE 1959) und sie beeinflusst die Bodenerodierbarkeit (FRANKEN und LOH 1987).

Auf Grund der speziellen Problemstellung (Gewässer-Eutrophierung) wurden die Bodenanalysen auf den Phosphor fokussiert. Die unterschiedlich verfügbaren Phosphor-Anteile im Boden wurden mit verschiedenen Phosphor-Bestimmungsmethoden charakterisiert. Die in Österreich übliche Routineuntersuchungsmethode für Phosphor ist die Calcium-Acetat-Lactat-Methode (CAL-Methode). Mit der CAL-Extraktionsmethode wird der CAL-lösliche Phosphor-Gehalt im Boden erfasst. Dieser dient in der Landwirtschaft als Grundlage für die Erstellung einer Phosphor-Düngeempfehlung. Im Gegensatz zum CAL-löslichen Kalium-Gehalt hängt der CAL-lösliche Phosphor-Gehalt im Oberboden primär von der Höhe der zugeführten Düngermenge in der Gegenwart und/oder Vergangenheit ab und ist daher ein geeigneter Indikator für das langjährige Düngungsniveau (BOHNER 2005). Der Phosphor-Gehalt im Wasserextrakt liefert Informationen über die Menge an wasserlöslichem und damit leicht mobilisierbarem Phosphor im Boden. Der wasserlösliche Phosphor-Gehalt im Oberboden ist ein Maß für die Kapazität des Oberbodens Phosphor an den Oberflächenabfluss abzugeben (SHARPLEY et al. 1986).

Die tatsächlichen und möglichen Phosphor-Einträge aus landwirtschaftlich genutzten Flächen in die Oberflächengewässer können allein auf Grund der wasserlöslichen und CAL-löslichen Phosphor-Gehalte im Oberboden nicht abgeschätzt werden (PIHL und WERNER 1993). Um das Phosphor-Austragspotenzial einer Fläche beurteilen zu können, sind auch Kenntnisse über die Phosphor-Speicherkapazität und den Phosphor-Sättigungsgrad der Böden erforderlich. Für die Phosphor-Speicherkapazität der Böden sind die Gehalte an amorphem Aluminium-, Eisen- und Mangan-Oxiden (inklusive Hydroxide und Oxihydroxide) hauptverantwortlich (KELLER und VAN DER ZEE 2004). Daher wurden zur Abschätzung der Phosphor-Speicherkapazität die oxalatrextrahierbaren Aluminium-, Eisen- und Mangan-Gehalte bestimmt. Sie repräsentieren die in Böden amorph vorliegenden Aluminium-, Eisen- und Mangan-Oxide, an die bei neutraler bis saurer Bodenreaktion Phosphor stark gebunden werden kann (KELLER und VAN DER ZEE 2004). Das Phosphor-Austragspotenzial einer Fläche hängt aber nicht nur von der Phosphor-Speicherkapazität im Boden ab, auch der bereits erreichte Phosphor-Sättigungsgrad der Sorbenten hat eine große Bedeutung. Die Phosphor-Speicherkapazität (PSC) und der Phosphor-Sättigungsgrad (DPS) wurden folgendermaßen berechnet (ECKHARDT und LEINWEBER 1997):

$$PSC \text{ (in mmol kg}^{-1}\text{)} = 0,5 \times (Al_{ox} + Fe_{ox} + Mn_{ox})$$

$$DPS \text{ (in \%)} = 100 \times P_{ox} \times PSC^{-1}$$

Je höher der Phosphor-Sättigungsgrad im Boden ist, desto höher ist in der Regel die Phosphor-Konzentration in der Bodenlösung und somit die potenzielle Gefahr von Phosphor-Verlusten durch Auswaschung (PIHL und WERNER 1993, FROSSARD et al. 2004, KELLER und VAN DER ZEE 2004). Bei einer geringen Phosphor-Speicherkapazität führt eine übermäßige Düngung (nicht an den mengenmäßigen und zeitlichen Bedarf der Pflanzen angepasste Düngung) rasch zu einem hohen Phosphor-Sättigungsgrad im Boden, und die Gefahr der Eutrophierung von Grundwasser und Oberflächengewässern nimmt zu (LOOKMANN et al. 1996). Deshalb sind die bewirtschaftungsunabhängige Phosphor-Speicherkapazität und der bewirtschaftungs-

ungsabhängige Phosphor-Sättigungsgrad geeignete Indikatoren für die Abschätzung von Phosphor-Auswaschungsverlusten aus landwirtschaftlich genutzten Böden (LEINWEBER et al. 1999). Im Rahmen der umfassenderen Bodenanalysen wurden oxalatrextrahierbares Aluminium, Eisen und Mangan sowie oxalatlöslicher Phosphor nach SCHWERTMANN (1964) analysiert. Der oxalatlösliche Phosphor entspricht der Menge des hauptsächlich an pedogene Aluminium-, Eisen- und Mangan-Oxide adsorbierten Phosphates (LEINWEBER et al. 1997). Der Gesamtelementgehalt an Phosphor wurde nach Mikrowellenaufschluss mit Königswasser bestimmt. Der Gesamtgehalt an anorganischem Phosphor wurde nach Extraktion mit 0,1 M Schwefelsäure ermittelt. Der Gesamtgehalt an organischem Phosphor wurde als Differenz aus Phosphor-Gesamtgehalt und Gesamtgehalt an anorganischem Phosphor errechnet.

Das Phosphor-Austragspotenzial kann innerhalb eines Einzugsgebietes aus lithologischen, bodenkundlichen und topografischen Gründen sowie düngungs- und nutzungsbedingt räumlich stark variieren. Außerdem müssen die Bodendaten in Beziehung gesetzt werden zur Entfernung zu Oberflächengewässern. Folglich ist im Hinblick auf die Eutrophierungsgefahr der Gewässer eine räumlich differenzierte Beurteilung notwendig. Hierfür wurden die punktförmig ermittelten CAL-löslichen und wasserlöslichen Phosphor-Gehalte in den landwirtschaftlich genutzten Böden auf das Teileinzugsgebiet der Antiesen interpoliert. Die Kartenerstellung erfolgte mit dem geostatistischen Interpolationsverfahren Kriging (KRIGE 1951). Als GIS-Software wurde Geostatistical Analyst (ArcGIS der Firma ESRI) verwendet.

4. Ergebnisse und Diskussion

Die Häufigkeitsverteilung in den Abbildungen 1 und 2 zeigt, dass die Ackerböden (inklusive Böden des Wechselgrünlandes) hinsichtlich des CAL-löslichen Phosphor-Gehaltes im Oberboden überwiegend mittlere Werte und die Grünlandböden größtenteils niedrige Werte aufweisen. Nach den „Richtlinien für die sachgerechte Düngung“ (2006) würde dies ausreichende Phosphor-Gehalte in den meisten Ackerböden und niedrige Phosphor-Gehalte beim Großteil der Grünlandböden bedeuten. In den Grünlandböden wurden erhöhte CAL-lösliche Phosphor-Gehalte vor allem in der Nähe von Güllegruben und Mistlagerstätten festgestellt. Diese Flächen besitzen ein größeres Phosphor-Austragspotenzial.

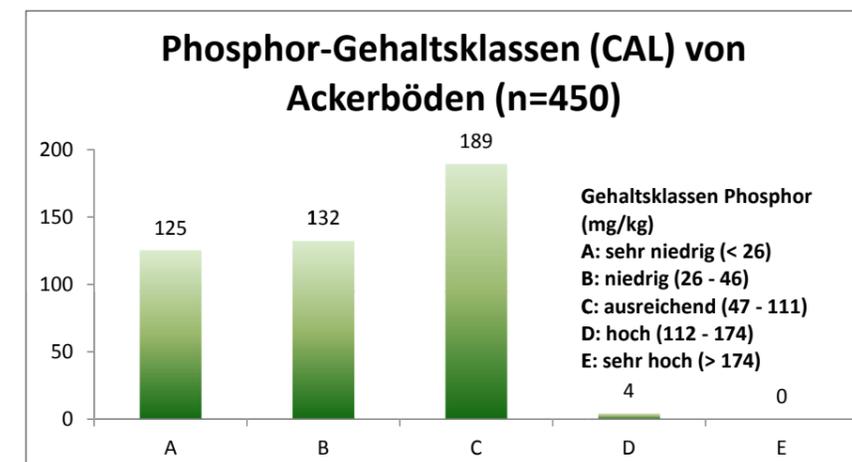


Abb. 1: Phosphor-Gehaltsklassen (CAL-Methode) der Ackerböden und Böden des Wechselgrünlandes (n = 450)

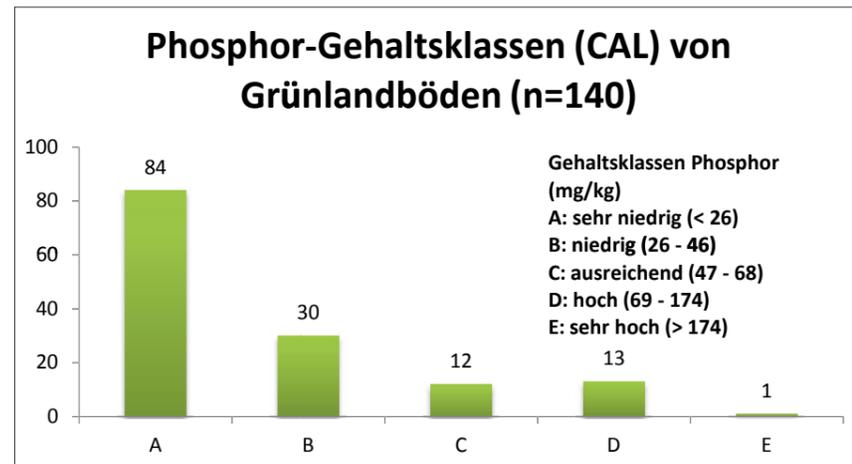


Abb. 2: Phosphor-Gehaltsklassen (CAL-Methode) der Böden des Dauergrünlandes (n = 140)

In den Abbildungen 3 und 4 sind die Probenahmepunkte sowie die CAL-löslichen und wasserlöslichen Phosphor-Gehalte von den Acker- und Grünlandböden kartographisch dargestellt. Die Phosphor-Gehalte weisen innerhalb des Untersuchungsgebietes eine ungleichmäßige räumliche Verteilung mit lokal erhöhten und sehr niedrigen Werten auf. Es besteht eine zufriedenstellende räumliche Übereinstimmung zwischen den beiden Phosphor-Fractionen. Die wasserlöslichen Phosphor-Gehalte sind im Oberboden zum Teil sehr hoch. Auf diesen Acker- und Grünlandflächen kann Phosphor bei Oberflächenabfluss leicht gelöst und abgeschwemmt werden. Besonders abschwemmungsgefährdet sind steile Hänge mit verdichteten Böden und großer Hanglänge sowie Böden aus glimmerreichem Molassematerial. Vor allem Hangpseudogleye weisen ein höheres Phosphor-Austragsrisiko auf, weil mit dem Hangwasser erhebliche Mengen an gelöstem Phosphor abgeschwemmt werden können. Auf Grünlandflächen mit erhöhten wasserlöslichen Phosphor-Gehalten im Oberboden ist die Phosphor-Abschwemmungsgefahr vor allem dann sehr groß, wenn es durch falsche Bewirtschaftung zu einer Bodenverdichtung, Narbenauflockerung und Lückenbildung im Pflanzenbestand kommt.

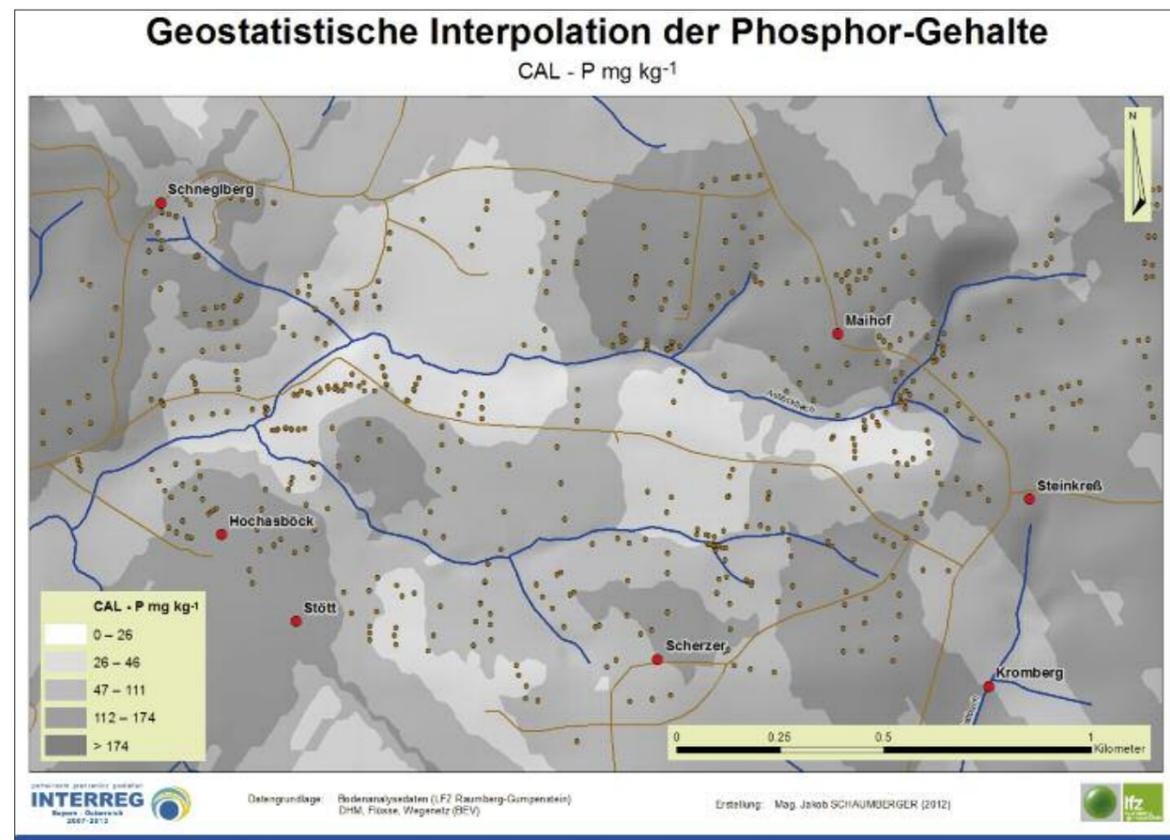


Abb. 3: CAL-lösliche Phosphor-Gehalte in den Acker- und Grünlandböden (n = 590) in der Bodentiefe 0-15 cm

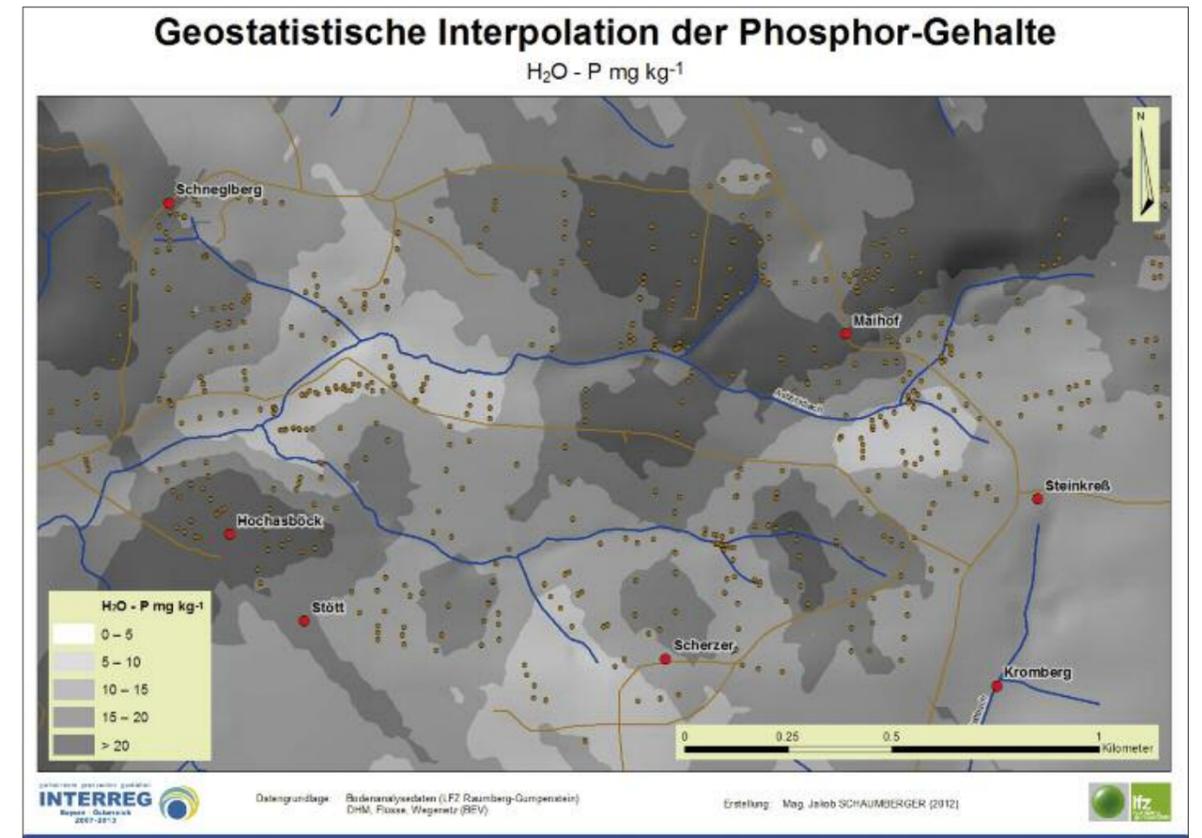


Abb. 4: Wasserlösliche Phosphor-Gehalte in den Acker- und Grünlandböden (n = 590) in der Bodentiefe 0-15 cm

Die Acker- und Grünlandböden weisen im Oberboden in der Regel eine günstige Bodenreaktion auf (BOHNER et al. 2012). Erwartungsgemäß ist in den Böden des Dauergrünlandes der pH-Wert im Durchschnitt niedriger als in den Ackerböden (Tab. 1). Der Humusgehalt, die Humusqualität, die Nährstoffgehalte und Aggregatstabilität im Oberboden sind stark von der Kulturart abhängig (Tab. 1, 2). Der Humusgehalt und somit auch die Gesamtgehalte an Stickstoff und Schwefel sind in den Böden des Dauergrünlandes erwartungsgemäß deutlich höher als in den Ackerböden. Die Ackerböden mit den Kulturarten Mais und Getreide weisen in den obersten 15 cm im Durchschnitt die niedrigsten C:N-Verhältnisse auf. Dies zeigt einen vergleichsweise stickstoffreicheren Humus in diesen Böden an. Die Ackerböden mit den Kulturarten Ölpflanzen (Raps, Lein), Getreide und Mais sind im Oberboden im Durchschnitt besser mit CAL-löslichem Phosphor versorgt als die Grünlandböden. Ein höheres Düngungsniveau könnte der Grund hierfür sein. Die Böden des Dauergrünlandes sind im Durchschnitt am besten mit CAL-löslichem Kalium versorgt. Die Aggregatstabilität ist in den obersten 15 cm in den Grünlandböden erwartungsgemäß deutlich höher als in den Ackerböden. Die intensivere Durchwurzelung der Grünlandböden und der höhere Humusgehalt dürften dafür hauptverantwortlich sein. Auf Grund der hohen Aggregatstabilität und ganzjährig geschlossenen Vegetationsdecke ist die Gefahr einer Bodenerosion auf Grünlandflächen beträchtlich geringer als auf Ackerflächen. Eine niedrige Aggregatstabilität führt häufig zu einer Verschlammung und Verkrustung der Bodenoberfläche (FRANKEN und LOH 1987). Dies begünstigt den Oberflächenabfluss und somit auch die Abschwemmung und Bodenerosion. Die Ackerböden mit der Kulturart Mais weisen im Durchschnitt die niedrigste Aggregatstabilität und folglich auch die höchste Erosions- und Abschwemmungsgefährdung auf. Mehrere Erosionsrillen auf einigen Ackerflächen zeigen an, dass eine lineare Erosion im Untersuchungsgebiet stattfindet. Auch die Kulturrohböden im Untersuchungsgebiet sind Zeugen einer langandauernden Bodenerosion.

Tab. 1: Allgemeine Bodenkennwerte (arithmetischer Mittelwert, 0-15 cm Bodentiefe) in Abhängigkeit von der Kulturart

Kulturart	n	CaCl ₂ pH	μS cm ⁻¹ eL	%						
				C _t	N	S	C:N	S	C:S	N:S
Getreide	174	6,0	65	1,64	0,20	0,02	8,0	94	12	
Mais	132	6,0	69	1,67	0,22	0,02	7,8	107	14	
Ölpflanzen	79	6,6	93	1,97	0,22	0,02	8,7	146	16	
Wechselgrünland	67	5,9	89	2,80	0,30	0,02	9,1	144	16	
Dauergrünland	138	5,6	95	3,15	0,37	0,04	8,4	103	12	

n = Anzahl der Bodenanalysen; eL = elektrische Leitfähigkeit; C_t, N_t, S_t = Gesamtgehalt an Kohlenstoff, Stickstoff, Schwefel

Tab. 2: Allgemeine Bodenkennwerte (arithmetischer Mittelwert, 0-15 cm Bodentiefe) in Abhängigkeit von der Kulturart

Kulturart	n	mg kg ⁻¹			%
		CAL-P	CAL-K	H ₂ O-P	
Getreide	174	48	130	16	45
Mais	132	43	143	14	43
Ölpflanzen	79	54	119	15	47
Wechselgrünland	67	26	90	11	72
Dauergrünland	138	31	163	14	85

n = Anzahl der Bodenanalysen; CAL-P und CAL-K = CAL-löslicher Phosphor- und Kalium-Gehalt; H₂O-P = wasserlöslicher Phosphor-Gehalt; AS = Aggregatstabilität

Der vorhandene Phosphor-Vorrat liegt in den Böden des Untersuchungsgebietes in unterschiedlicher Bindungsform vor. Es besteht ein deutlicher Unterschied zwischen Acker- und Grünlandböden (Tab. 3). Die Ackerböden weisen auf Grund der geringeren Humusgehalte im Durchschnitt einen niedrigeren Gesamtgehalt an Phosphor und einen geringeren Gesamtgehalt an organischem Phosphor als die Grünlandböden auf. Im Gegensatz dazu sind die Gehalte an anorganischem Phosphor und oxalatrextrahierbarem Phosphor vergleichsweise höher. Dies sind Indizien für eine düngungsbedingte stärkere Anreicherung anorganischer Phosphor-Fractionen in den Ackerböden im Vergleich zu den Grünlandböden. Der mittlere Gesamtgehalt an Phosphor beträgt in deutschen Ackerböden 680 mg P pro kg Feinboden (WERNER et al. 1991). Die Ackerböden im Untersuchungsgebiet weisen häufig einen ähnlichen Wert auf (Tab. 3). Die landwirtschaftlich genutzten Flächen enthalten im Oberboden meist weniger als 1000 mg P pro kg Feinboden; der Höchstwert an Gesamt-Phosphor beträgt 1370 mg P pro kg Feinboden. Somit kann im Untersuchungsgebiet eine übermäßige Phosphor-Anreicherung im Oberboden durch Düngung weitgehend ausgeschlossen werden. Der häufig niedrige Viehbesatz dürfte der Hauptgrund hierfür sein. Der Anteil des organisch gebundenen Phosphors am Phosphor-Gesamtgehalt beträgt in den Ackerböden im Durchschnitt 50% und in den Grünlandböden 63%. In den Ackerböden ist der oxalatrextrahierbare Phosphor und in den Grünlandböden der organisch gebundene Phosphor die dominierende Phosphor-Fraktion und somit der größte Phosphor-Pool im Oberboden. In den Ackerböden sind die C_t:P_t- und C_t:P_o-Verhältnisse mit durchschnittlich 29:1 und 58:1 enger als in den Grünlandböden; hier betragen die entsprechenden Quotienten im Oberboden im Durchschnitt 39:1 und 63:1. Die Acker- und Grünlandböden besitzen in den obersten 15 cm auf Grund der hohen Gehalte an amorphen Eisen-Oxiden (Tab. 4) eine große Phosphor-Speicherkapazität (PSC). Sie ist in den Ackerböden im Durchschnitt etwas geringer als in den Grünlandböden. Der Phosphor-Sättigungsgrad (DPS) ist zumindest in den obersten 15 cm sowohl in den Acker- als auch in den Grünlandböden mit durchschnittlich 19 bzw. 16% niedrig. Ein Phosphor-Sättigungsgrad über 30% wird in der internationalen Literatur als kritischer Wert für einen erhöhten Phosphor-Austrag in die Gewässer angeführt (SCHOETERS et al. 1995, DE SMET et al. 1996, LOOKMANN et al. 1996, LEINWEBER et al. 1997). Dieser Grenzwert wird in den Ackerböden sechsmal und in den Grünlandböden nur einmal überschritten. Auf Grund des überwiegend niedrigen Phosphor-Sättigungsgrades dürfte im Untersuchungsgebiet die Gefahr einer erhöhten Phosphor-Auswaschung mit dem Sickerwasser gering sein.

Tab. 3: Phosphor-Fractionen, Phosphor-Speicherkapazität und Phosphor-Sättigungsgrad (0-15 cm Bodentiefe)

	Ackerböden (n = 67)							Grünlandböden (n = 31)								
	mg kg ⁻¹				%	mmol kg ⁻¹		%	mg kg ⁻¹				%	mmol kg ⁻¹		%
	P _t	P _i	P _o	P _{ox}		P _{org}	PSC		DPS	P _t	P _i	P _o		P _{ox}	P _{org}	
Min	427	114	242	175	29	52	4	476	68	194	205	28	65	6		
Max	1269	842	772	911	81	133	36	1370	992	660	930	86	132	30		
Median	689	350	351	456	50	81	17	744	266	475	369	64	86	14		
MW	764	397	367	485	50	88	19	808	329	479	433	63	92	16		

n = Anzahl der Bodenanalysen; Min = Minimum; Max = Maximum; MW = arithmetischer Mittelwert; P_t = Gesamtelementgehalt an Phosphor; P_i = Gesamtgehalt an anorganischem Phosphor; P_o = Gesamtgehalt an organischem Phosphor; P_{ox} = Gesamtgehalt an oxalatrextrahierbarem Phosphor; P_{org} = Anteil des organisch gebundenen Phosphors am Phosphor-Gesamtgehalt; PSC = Phosphor-Speicherkapazität; DPS = Phosphor-Sättigungsgrad

Tab.4: Oxalatrextrahierbares Aluminium, Eisen und Mangan (0-15 cm Bodentiefe)

	Ackerböden (n = 67)			Grünlandböden (n = 31)		
	mg kg ⁻¹			mg kg ⁻¹		
	Al _{ox}	Fe _{ox}	Mn _{ox}	Al _{ox}	Fe _{ox}	Mn _{ox}
Min	780	2772	155	1085	4283	292
Max	2895	8601	1389	2885	8100	1245
Median	1361	5556	811	1586	5685	785
MW	1573	5763	785	1755	5795	805

n = Anzahl der Bodenanalysen; Min = Minimum; Max = Maximum; MW = arithmetischer Mittelwert; Al_{ox}, Fe_{ox}, Mn_{ox} = oxalatrextrahierbares Aluminium, Eisen, Mangan

In den Tabellen 5 und 6 sind die Bodenkennwerte in Abhängigkeit von der Reliefposition dargestellt. Auf Grund einer besseren Übersichtlichkeit und Vergleichbarkeit sind in den Tabellen nur die Bodendaten vom Ober- und Unterhang angeführt. Der Unterhang weist sowohl bei den Acker- als auch bei den Grünlandflächen im Durchschnitt höhere Humus- und somit auch höhere Gesamtgehalte an Stickstoff als der Oberhang auf. Die C:N- und C:S-Verhältnisse sind ebenfalls vergleichsweise weiter. Dies sind Indizien für eine Anreicherung von stickstoff- und schwefelärmerem Humus am Unterhang der Acker- und Grünlandflächen. Der Anteil des organisch gebundenen Phosphors am Phosphor-Gesamtgehalt ist sowohl bei den Acker- als auch bei den Grünlandböden am Unterhang größer als am Oberhang. Dies ist ein Indiz für eine stärkere Anreicherung von organisch gebundenem Phosphor am Unterhang der landwirtschaftlich genutzten Flächen. Bemerkenswert ist ferner die höhere Aggregatstabilität bei den Ackerböden am Unterhang im Vergleich zum Oberhang. Der höhere Humusgehalt am Unterhang dürfte dafür verantwortlich sein. Der CAL-lösliche Kalium-Gehalt hingegen ist sowohl bei den Acker- als auch bei den Grünlandböden am Unterhang deutlich niedriger als am Oberhang. Bei einem Bodenabtrag von 1 Tonne pro Hektar und Jahr können auf den Ackerflächen durch Wassererosion im Durchschnitt etwa 0,8 kg Gesamt-Phosphor verlagert werden. Eine erosionsbedingte Phosphor-Anreicherung am Unterhang der Ackerflächen konnte allerdings nicht festgestellt werden. Bei den Grünlandböden sind die Phosphor-Gehalte der einzelnen Phosphor-Fractionen am Unterhang sogar deutlich niedriger als am Oberhang. Nach FRIELINGHAUS (1990) ist das Bodenmaterial, das durch Erosionsereignisse vorrangig bis in Senken und Vorfluter gelangt, auf Grund des wesentlich höheren Tonanteils nährstoffreicher als das am Hangfuß abgelagerte Material. PRASUHN und BRAUN (1994) weisen darauf hin, dass vor allem bei einer durch Starkregen ausgelösten linearen Erosion das Bodenmaterial sehr häufig direkt in die Oberflächengewässer transportiert wird. Möglicherweise findet auf den Ackerflächen im Untersuchungsgebiet bei erosionsauslösendem Starkregen eine selektive Boden- und Nährstoffverlagerung statt, wobei ton- und phosphorreicherer Bodenmaterial bevorzugt in die Fließgewässer gelangt, während ton- und phosphorärmeres Erosionsmaterial zum Großteil am Unterhang abgelagert wird. Diese selektive Boden- und Nährstoffverlagerung würde gleichzeitig auch die im Vergleich zum Oberhang niedrigeren CAL-löslichen Kalium-Gehalte am Unterhang der Ackerflächen erklären. Die Humusanreicherung, das weitere C:N- und C:S-Verhältnis und der höhere Anteil des organisch gebundenen Phosphors am Phosphor-Gesamtgehalt am Unterhang der Acker- und Grünlandflächen dürften weniger die Folge einer Sedi-

mentation von erodiertem humusreichen Bodenmaterial sondern vielmehr das Ergebnis einer reliefabhängigen (staunässebedingten) geringeren Mineralisierung der organischen Substanz in dieser Hangposition sein.

Tab. 5: Allgemeine Bodenkennwerte (arithmetischer Mittelwert, 0-15 cm Bodentiefe) in Abhängigkeit von der Reliefposition

Reliefposition	n	CaCl ₂	μS cm ⁻¹	%					
		pH	eL	C _t	N	C:N	C:S	N:S	
Oberhang Acker	132	6,0	69	1,74	0,22	0,02	8,0	107	13
Unterhang Acker	167	6,1	80	2,06	0,24	0,02	8,6	127	15
Oberhang Grünland	39	5,7	104	2,98	0,36	0,04	8,3	98	12
Unterhang Grünland	54	5,6	100	3,27	0,38	0,04	8,5	102	15

n = Anzahl der Bodenanalysen; eL = elektrische Leitfähigkeit; C_t, N_t, S_t = Gesamtgehalt an Kohlenstoff, Stickstoff, Schwefel

Tab. 6: Allgemeine Bodenkennwerte (arithmetischer Mittelwert, 0-15 cm Bodentiefe) in Abhängigkeit von der Reliefposition

Reliefposition	n	mg kg ⁻¹				%	
		CAL-P	CAL-K	H ₂ O-P	P _t	P _{org}	AS
Oberhang Acker	132	45	139	15	776	47	46
Unterhang Acker	167	43	105	14	778	54	52
Oberhang Grünland	39	42	201	17	875	55	82
Unterhang Grünland	54	29	176	12	722	68	85

n = Anzahl der Bodenanalysen; CAL-P und CAL-K = CAL-löslicher Phosphor- und Kalium-Gehalt; H₂O-P = wasserlöslicher Phosphor-Gehalt; P_t = Gesamtelementgehalt an Phosphor (67 Bodenanalysen Acker, 31 Bodenanalysen Grünland); P_{org} = Anteil des organisch gebundenen Phosphors am Phosphor-Gesamtgehalt (67 Bodenanalysen Acker, 31 Bodenanalysen Grünland); AS = Aggregatstabilität

5. Schlussfolgerung

Die vorliegenden Bodenuntersuchungsergebnisse zeigen, dass im Untersuchungsgebiet der Phosphor-Gehalt in den verschiedenen Phosphor-Fractionen sehr wesentlich von der Art der landwirtschaftlichen Nutzung abhängt. Die Grünlandböden weisen im Durchschnitt einen höheren Gesamtgehalt an Phosphor, einen höheren Anteil an organisch gebundenem Phosphor und einen niedrigeren Gehalt an CAL-löslichem Phosphor als die Ackerböden auf. Der Phosphor-Gesamtgehalt beträgt in den landwirtschaftlich genutzten Böden des Untersuchungsgebietes meist weniger als 1000 mg P pro kg Feinboden. Eine übermäßige Phosphor-Anreicherung im Oberboden durch Düngung kann weitgehend ausgeschlossen werden. Die Böden des Untersuchungsgebietes besitzen eine hohe Phosphor-Speicherkapazität. Der Phosphor-Sättigungsgrad ist sowohl in den Acker- als auch in den Grünlandböden mit wenigen Ausnahmen niedrig. Somit dürfte die Gefahr einer erhöhten Phosphor-Auswaschung mit dem Sickerwasser bei standortangepasster Bewirtschaftung und durchschnittlichen Witterungsverhältnissen gering sein. Allerdings sind die wasserlöslichen Phosphor-Gehalte im Oberboden zum Teil sehr hoch. Diese Acker- und Grünlandflächen besitzen in Hanglagen ein größeres Phosphor-Abschwemmungspotenzial, insbesondere wenn die Oberböden verdichtet sind oder von Natur aus zur Staunässe neigen (Hangpseudogley). Auch Böden aus glimmerreichem Molassematerial sind besonders abschwemmungs- und erosionsgefährdet. Auf Grünlandflächen mit erhöhten wasserlöslichen Phosphor-Gehalten im Oberboden ist die Gefahr einer Abschwemmung von gelöstem Phosphor vor allem dann sehr hoch, wenn es durch falsche Bewirtschaftung zu einer Bodenverdichtung, Narbenauflockerung und Lückenbildung im Pflanzenbestand kommt. Außerdem besteht die Möglichkeit, dass größere Phosphor-Mengen von „Problemflächen“ mit erhöhten Phosphor-Gehalten im Oberboden, wie beispielsweise die unmittelbare Umgebung von Güllegruben und Mistlagerstätten, in die Oberflächengewässer des Teileinzugsgebietes gelangen.

Diese Untersuchung kommt zum Ergebnis, dass für die Eutrophierung der Fließgewässer im Untersuchungsgebiet vor allem die Phosphor-Einträge durch Abschwemmung und Bodenerosion verantwortlich sind. Die Phosphor-Auswaschung mit dem Sickerwasser hingegen dürfte, von Sonderstandorten abgesehen, keine be-

sondere Gefährdungsquelle darstellen. Allerdings muss darauf hingewiesen werden, dass auch nennenswerte Phosphor-Einträge über Drainagen möglich sind. Eine nachhaltige Verbesserung der Wasserqualität der Auen kann erst dann erfolgen, wenn wirksame erosions- und abflussmindernde Maßnahmen im Einzugsgebiet ausgearbeitet und auch umgesetzt werden. Auf Ackerflächen in erosionsgefährdeten steilen Hanglagen beispielsweise sollte kein Mais angebaut werden, wenn die Gefahr sehr hoch ist, dass bei erosiven Starkregen das erodierte Bodenmaterial zum Großteil direkt in die Fließgewässer gelangt. Außerdem müssen auf den landwirtschaftlich genutzten Flächen die zum Teil hohen wasserlöslichen Phosphor-Gehalte im Oberboden reduziert werden, insbesondere in abschwemmungsgefährdeten steilen Hanglagen und bei unmittelbarer Nähe von Fließgewässern. Weitere präventive Boden- und Gewässerschutzmaßnahmen sind:

- Vermeidung bzw. Beseitigung von Bodenverdichtungen und Strukturschäden zur Erhöhung der „Regenverdaulichkeit“ des Bodens
- Erhöhung des Humusgehaltes von Ackerböden zur Verbesserung der Aggregatstabilität im Oberboden
- keine Düngergabe in Hanglagen wenn ein Stark- oder Dauerregen zu erwarten ist
- stärkere Berücksichtigung des Bodentyps und Bodenwasserhaushaltes bei Phosphor-Düngeempfehlungen
- wirksame acker- und pflanzenbauliche Erosionsschutzmaßnahmen auf allen erosionsgefährdeten Ackerflächen.

Literatur

- AUERSWALD, K., 1989: Prognose des P-Eintrags durch Bodenerosion in die Oberflächengewässer der BRD. Mitt. Dtsch. Bodenkundl. Ges. 59, 661-664.
- BOHNER, A., 2005: Bodenindikatoren für die Bewirtschaftungsintensität und die floristische Artenvielfalt im Wirtschaftsgrünland. Mitt. der Österr. Bodenkundl. Ges. 72, 67-73.
- BOHNER, A., G. EDER und M. SCHINK, 2007: Nährstoffkreislauf und Stoffflüsse in einem Grünland-Ökosystem. 12. Gumpensteiner Lysimetertagung. Bericht HBLFA Raumberg-Gumpenstein, 91-99.
- BOHNER, A., C. HUEMER, J. SCHAUMBERGER und P. LIEBHARD, 2012: Einfluss der landwirtschaftlichen Bewirtschaftung und des Reliefs auf den Nährstoffgehalt im Oberboden mit besonderer Berücksichtigung des Phosphors. LFZ Raumberg-Gumpenstein. 3. Umweltökologisches Symposium, 91-100.
- BRAUN, M., M. FREY und P. HURNI, 1991: Abschätzung der Phosphor- und Stickstoffverluste aus diffusen Quellen in die Gewässer im Rheineinzugsgebiet der Schweiz unterhalb der Seen (Stand 1986). FAC Liebefeld, 87 S.
- BRAUN, M. und P. HURNI, 1993: Abschwemmung von Phosphor auf Grasland an zwei verschiedenen Standorten im Einzugsgebiet des Sempachersees. Landwirtschaft Schweiz 6, 615-620.
- BRAUN, M. und J. LEUENBERGER, 1991: Abschwemmung von gelöstem Phosphor auf Ackerland und Grasland während den Wintermonaten. Landwirtschaft Schweiz 4, 555-560.
- BRAUN, M. und V. PRASUHN, 1997: Maßnahmen, um die Gewässerbelastung zu vermindern. Agrarforschung 4, 339-342.
- DE SMET, J., G. HOFMAN, J. VANDERDEELEN, M. VAN MEIRVENNE and L. BAERT, 1996: Phosphate enrichment in the sandy loam soils of West-Flanders, Belgium. Fertilizer Research 43, 209-215.
- eBOD, 2012: <http://www.bfw.ac.at/ebod/ebod.main>.
- ECKHARDT, K.-U. und P. LEINWEBER, 1997: P-Fractionen zur Vorhersage von P-Austrägen aus landwirtschaftlich genutzten Böden. Mitt. Dtsch. Bodenkundl. Ges. 85, 871-874.
- FRANKEN, H. und M. LOH, 1987: Der Einfluss ackerbaulicher Maßnahmen auf die Dynamik der Aggregatstabilität. Z. f. Kulturtechnik und Flurbereinigung 28, 35-41.
- FRIELINGHAUS, M., F. FICHTNER und J. FELGENTREU, 1983: Charakterisierung der erodierten Kuppen und Hänge pleistozäner Nordstandorte und Ursachen für Ertragsausfälle. Arch. Acker- u. Pflanzenbau u. Bodenk. 27, 35-46.
- FRIELINGHAUS, M., 1990: Boden- und Nährstoffabtrag durch Wassererosion auf Moränenstandorten. Arch. Acker- u. Pflanzenbau u. Bodenk. 34, 587-597.

- FROSSARD, E., P. JULIEN, J.-A. NEYROUD und S. SINAJ, 2004: Phosphor in Böden, Düngern, Kulturen und Umwelt – Situation in der Schweiz. Schriftenreihe Umwelt Nr. 368, 172 S.
- GÄCHTER, R., A. MARES, C. STAMM, U. KUNZE und J. BLUM, 1996: Dünger düngt Sempachersee. Agrarforschung 3, 329-332.
- HÖLTL, W. und H. VOGL, 1983: Untersuchungen zur Ermittlung des Nährstoffaustrages durch die Dränung mit Hilfe von Beregnungsversuchen. Berichte über Landwirtschaft 61, 400-415.
- KELLER, A. und S. VAN DER ZEE, 2004: Phosphorverfügbarkeit in intensiv genutzten Grünlandböden. Agrarforschung 11, 396-401.
- KEMPER, W.D. and E.J. KOCH, 1966: Aggregate stability of soils from Western United States and Canada. Measurement procedure, correlations with soil constituents. Technical Bulletin 1355. Agricultural Research Service. United States Department of Agriculture, Washington, 1-52.
- KLAGHOFER, E., 1997: Bodenerosion. In: Bodenschutz in Österreich. Bundesamt und Forschungszentrum für Landwirtschaft, 37-45.
- KRIGE, D.G., 1951: A statistical approach to some basic mine valuation problems on the Witwatersrand. Journal of Chemical, Metallurgical and Mining Society of South Africa 52, 119-139.
- KUMMERT, R. und W. STUMM, 1989: Gewässer als Ökosysteme. Grundlagen des Gewässerschutzes. Teubner Verlag, 331 S.
- LEINWEBER, P., F. LÜNSMANN and K.U. ECKHARDT, 1997: Phosphorus sorption capacities and saturation of soils in two regions with different livestock densities in northwest Germany. Soil Use and Management 13, 82-89.
- LOOKMANN, R., K. JANSEN, R. MERCKX and K. VLASSAK, 1996: Relationship between soil properties and phosphate saturation parameters. A transect study in northern Belgium. Geoderma 69, 265-274.
- MEISSNER, R., H. KLAPPER und J. SEEGER, 1992: Wirkungen einer erhöhten Phosphatdüngung auf Boden und Gewässer. Wasser und Boden 4, 217-220.
- NESTROY, O. et al., 2011: Systematische Gliederung der Böden Österreichs. Österreichische Bodensystematik 2000 in der revidierten Fassung von 2011. Mitt. der Österr. Bodenkundl. Ges. 79, 96 S.
- NIEDER, R., 2000: Nährstoffanreicherung in Ackerkrumen vor dem Hintergrund des Boden-, Klima- und Gewässerschutzes. Z. f. Kulturtechnik und Landentwicklung 41, 49-56.
- OBERHAUSER, R. (Red.), 1980: Der geologische Aufbau Österreichs. Springer Verlag, 699 S.
- OTTO, A., 1980: Gewässerbelastung durch Land- und Forstwirtschaft. Wasser und Boden 1, 26-30.
- PIHL, U. und W. WERNER, 1993: Zur Interpretation von Quantitäts-/Intensitäts-Quotienten als Kriterien vertikaler Phosphatverlagerung in Böden. VDLUFA Kongressband 37, 99-102.
- POMMER, G., R. SCHRÖPEL und F. JORDAN, 2001: Austrag von Phosphor durch Oberflächenabfluss auf Grünland. Wasser & Boden 53, 34-38.
- PRASUHN, V. und M. BRAUN, 1994: Abschätzung der Phosphor- und Stickstoffverluste aus diffusen Quellen in die Gewässer des Kantons Bern. Schriftenreihe der FAC Liebefeld 17, 214 S.
- PRASUHN, V., 2001: Abschätzung der P- und N-Einträge in die Gewässer des Kantons Zürich mittels GIS. Mitt. Dtsch. Bodenkundl. Ges. 96, 645-646.
- PRASUHN, V., 2005: Phosphorbelastung der Oberflächengewässer durch Erosion. Schriftenreihe der FAL Reckenholz 57, 108-119.
- PRASUHN, V. und P. LAZZAROTTO, 2005: Abschwemmung von Phosphor aus Grasland im Einzugsgebiet des Sempachersees. Schriftenreihe der FAL Reckenholz 57, 95-107.
- RICHTLINIEN FÜR DIE SACHGERECHTE DÜNGUNG, 2006: Anleitung zur Interpretation von Bodenergebnissen in der Landwirtschaft. 6. Aufl. Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft, 80 S.
- RÖMER, W., 1997: Phosphoraustrag aus der Landwirtschaft in Gewässer. Wasser & Boden 49, 51-54.
- SCHACHTSCHABEL, P. und K. HARTGE, 1959: Die Verbesserung der Strukturstabilität von Ackerböden durch eine Kalkung. Z. f. Pflanzenernährung, Düngung und Bodenkunde 83, 193-202.
- SCHEFFER, B., 1977: Stickstoff- und Phosphorverlagerung in nordwestdeutschen Niederungsböden und Gewässerbelastung. Geol. Jb. F4, 203-221.

- SCHOETERS, L., R. LOOKMANN, R. MERCKX and K. VLASSAK, 1995: Inventorisation and evaluation of phosphate saturation in Northern Belgium. Proceedings of the International Workshop. Phosphorus Loss to Water from Agriculture, Wexford, 79-80.
- SCHWERTMANN, U., 1964: Differenzierung der Eisenoxide des Bodens durch Extraktion mit Ammoniumoxalat-Lösung. Z. f. Pflanzenernährung, Düngung und Bodenkunde 105, 194-202.
- SEIFFERT, P., 1990: Stoff-Einträge aus der Landwirtschaft in ein kleineres Stehgewässer. Ökologie & Naturschutz 3, 127-149.
- SHARPLEY, A.N., S.J. SMITH and R.G. MENZEL, 1986: Phosphorus criteria and water quality management for agricultural watersheds. Lake and Reservoir Management 2, 177-182.
- SHARPLEY, A.N., S.C. CHAPRA, R. WEDEPOHL, J.T. SIMS, T.C. DANIEL and K.R. REDDY, 1994: Managing agricultural phosphorus for protection of surface waters: issues and options. J. Environ. Qual. 23, 437-451.
- STROHBACH, B., 1986: Gesetzmäßigkeiten der arealen Verteilung des Gesamtphosphorgehaltes auf landwirtschaftlich genutzten Flächen. Arch. Acker- u. Pflanzenbau u. Bodenk. 30, 573-580.
- VON ALBERTINI, N., M. BRAUN und P. HURNI, 1993: Oberflächenabfluss und Phosphorabschwemmung von Grasland. Landwirtschaft Schweiz 6, 575-582.
- WERNER, W., H.-W. OLFS, K. AUERSWALD und K. ISERMANN, 1991: Stickstoff- und Phosphoreintrag in Oberflächengewässer über „diffuse Quellen“. In: Hamm, A. (ed.): Studie über Wirkungen und Qualitätsziele von Nährstoffen in Fließgewässern. Academia Verlag, Sankt Augustin, 665-764.
- WERNER, W. und H.-P. WODSAK, 1994: Stickstoff- und Phosphoreintrag in Fließgewässer Deutschlands unter besonderer Berücksichtigung des Eintragungsgeschehens im Lockergesteinsbereich der ehemaligen DDR. Agrarspectrum 22, 243 S.
- ZAMG (Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik) 2002: Klimadaten von Österreich 1971-2000. http://www.zamg.ac.at/fix/klima/oe71-00/klima2000/klimadaten_oesterreich_1971_frame1.htm.

Autoren

Dr. Andreas Bohner und Mag. Jakob Schaumberger, HBLFA Raumberg-Gumpenstein, Raumberg 38, A-8952 Irdning, andreas.bohner@raumberg-gumpenstein.at
 Christa Huemer, Hauptstraße 1, A-4552 Wartberg an der Krems
 A.o. Univ.Prof. Dr. Peter Liebhard, Universität für Bodenkultur, Institut für Pflanzenbau und Pflanzenzüchtung, Gregor-Mendel-Straße 33, A-1180 Wien