

Einfluss der landwirtschaftlichen Bewirtschaftung und des Reliefs auf den Nährstoffgehalt im Oberboden mit besonderer Berücksichtigung des Phosphors

Andreas Bohner^{1*}, Christa Huemer², Jakob Schaumberger¹ und Peter Liebhard³

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 einem Teileinzugsgebiet der Antiesen der Nährstoffstatus der Acker- und Grünlandböden erhoben. Insgesamt wurden 590 Bodenproben aus dem Oberboden (0-15 cm Bodentiefe) gezogen. Für den Nachweis einer erosionsbedingten horizontalen 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 im Oberboden im Durchschnitt besser mit CAL-löslichem Phosphor versorgt als die Grünlandböden. Die untersuchten Böden besitzen eine hohe Phosphor-Speicherkapazität. Der Phosphor-Sättigungsgrad ist mit wenigen Ausnahmen sehr niedrig. Somit dürfte das Risiko für erhöhte Phosphor-Verluste durch Auswaschung gering sein. Eine erosionsbedingte Phosphor-Anreicherung im Unterhang konnte nicht festgestellt werden. Die Untersuchungsergebnisse werden im Hinblick auf die Eutrophierungsgefahr der Antiesen diskutiert.

Schlagwörter: Ackerböden, Grünlandböden, Bodenerosion, 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. 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, the nutrition status of the arable soils and grassland soils within a selected catchment of river Antiesen was investigated. A total of 590 soil samples from the topsoil (0-15 cm of soil depth) were collected. To assess the risk of phosphorus losses from agricultural used soils by soil erosion, 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 an average higher contents of CAL-soluble phosphorus in the topsoil than grassland. The soils investigated possess high phosphorus sorption capacities. With few exceptions, the degree of phosphorus saturation is very 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. The findings will be discussed with regard to the risk of eutrophication of river Antiesen.

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

Einleitung

Gemäß EU-Wasserrahmenrichtlinie (WRRL 2000/60/EG) müssen die österreichischen Gewässer (Oberflächengewässer und Grundwasser) ab 2015 einen „guten Zustand“ bzw. ein „gutes ökologisches Potenzial“ aufweisen. Die Antiesen im oberösterreichischen Innviertel wird dieses

Ziel möglicherweise nicht erreichen. Für eine eventuelle Zielverfehlung sind vermutlich Phosphor-Einträge aus landwirtschaftlich genutzten Flächen verantwortlich. Daher wurde von der oberösterreichischen Landesregierung das INTERREG IV A-Projekt „Gewässer-Zukunft“ initiiert. Das primäre Ziel dieses Forschungsprojekts ist die nachhaltige Verbesserung der Wasserqualität der Antiesen, um den

¹ Lehr- und Forschungszentrum für Landwirtschaft Raumberg-Gumpenstein (LFZ), Raumberg 38, A-8952 IRDNING

² Hauptstraße 1, A-4552 WARTBERG AN DER KREMS

³ Universität für Bodenkultur Wien, Institut für Pflanzenbau und -züchtung, Gregor-Mendel-Straße 33, A-1180 WIEN

* Ansprechpartner: Dr. Andreas Bohner, andreas.bohner@raumberg-gumpenstein.at



Vorgaben der EU-Wasserrahmenrichtlinie zu entsprechen. Für die Zielerreichung ist es notwendig, dass die Phosphor-Einträge in den Fluss reduziert werden. Die Phosphor-Einträge aus landwirtschaftlich genutzten Flächen werden vom Wasserhaushalt (insbesondere Niederschlagsmenge und -intensität), von der Parzellentopographie (insbesondere Hangneigung und Hanglänge), von den Bodeneigenschaften (insbesondere Phosphor-Gehalt, pH-Wert, Redoxpotential, Gründigkeit, Textur, Struktur), von der Art und Intensität der Bewirtschaftung sowie von der Art und vom Ausmaß der Bewirtschaftungsmaßnahmen (insbesondere Menge, Häufigkeit, Art und Zeitpunkt der Düngung) im Einzugsgebiet der Gewässer bestimmt (FROSSARD et al. 2004). Der Phosphor-Eintrag in die Oberflächengewässer aus diffusen Quellen erfolgt vorwiegend durch Erosion, Abschwemmung und Auswaschung (BRAUN et al. 1991, BRAUN und HURNI 1993, GÄCHTER et al. 1996, FROSSARD et al. 2004). Die Bodenerosion hat im Dauergrünland für die Gewässer-Eutrophierung im Allgemeinen nur eine geringe Bedeutung (WERNER et al. 1991, VON ALBERTINI et al. 1993). Vom Grünland können allerdings erhebliche Mengen an gelöstem Phosphor abgeschwemmt werden, insbesondere wenn Gülle kurz vor einem Starkregenereignis ausgebracht wird (BRAUN und LEUENBERGER 1991, VON ALBERTINI et al. 1993, BRAUN und PRASUHN 1997, POMMER et al. 2001, PRASUHN und LAZZAROTTO 2005). Die Phosphor-Einträge durch Abschwemmung nehmen generell mit steigenden Düngermittelgaben zu (SHARPLEY et al. 1994). Beim Ackerland ist die Bodenerosion der wichtigste diffuse Eintragungspfad 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). Die Phosphor-Auswaschung kann sowohl im Ackerland als auch im Grünland unter bestimmten Boden-, Vegetations- und Witterungsverhältnissen für die Gewässer-Eutrophierung von Bedeutung sein (SCHEFFER 1977, OTTO 1980, BOHNER et al. 2007, DIEPOLDER und RASCHBACHER 2007). Die Phosphor-Einträge in die Gewässer aus landwirtschaftlich genutzten Flächen nehmen generell mit steigenden Phosphor-Gehalten im Boden zu (SCHEFFER 1977, OTTO 1980, MEISSNER et al. 1992, Römer 1997). Um die tatsächlichen und möglichen Phosphor-Einträge aus landwirtschaftlich genutzten Flächen qualitativ beurteilen zu können, sind zunächst einmal Kenntnisse über den Phosphor-Gehalt der Acker- und Grünlandböden 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:

- Beurteilung und Bewertung des Phosphor-Versorgungszustandes der landwirtschaftlich genutzten Oberböden in einem Teileinzugsgebiet der Antiesen im Hinblick auf die 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 im Boden und
- Schaffung von Grundlagen für die Entwicklung von regionalen Maßnahmen zur Verbesserung der Wasserqualität der Antiesen.

Untersuchungsgebiet

Die Untersuchungen wurden in einem Teileinzugsgebiet der Antiesen in den Gemeinden Eggerding, Lambrecht und Ort im Innkreis durchgeführt. Das Untersuchungsgebiet liegt in der Molassezone. Der Schlier ist ein häufiges und weit verbreitetes Molassegestein. Es handelt sich dabei vorwiegend um feinsandig-glimmerige Mergel (OBERHAUSER 1980). Die Landschaft repräsentiert ein flachwelliges Hügelland mit Seehöhen zwischen 380 und 490 m. Hanglagen mit einer Hangneigung von 5-15 % dominieren. Stellenweise kommen allerdings auch Steilhänge mit einer Hangneigung über 35 % vor. Die Böden sind überwiegend Braunerden, Pseudogleye, Gleye und Kulturrohböden (eBOD 2012). 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 hingegen fallen die geringsten Niederschlagsmengen. Erosionsfördernde 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 Hauptkulturen sind Körner- und Silomais, Wintergerste, Winterweichweizen und Winterraps. Angebaut werden auch Sommerhafer, Triticale und Sonderkulturen wie beispielsweise Öllein oder Kümmel (SCHNEIDERBAUER, mündliche Mitteilung). 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.

Material und Methoden

Im Untersuchungsgebiet wurden insgesamt 590 Bodenproben für routinemäßige Bodenanalysen zur Bewertung 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 mit dem Spaten Einzelproben entnommen und zu einer Mischprobe vereinigt. Die Probe-

nahme erfolgte vor der Düngung im Sommer und Herbst 2010 sowie im Frühjahr 2011. Gemäß ÖNORM L 1056 (Probenahme von Dauergrünland) und ÖNORM L 1055 (Probenahme von ackerbaulich genutzten Böden) werden in Österreich die Bodenproben auf Grünlandflächen aus der Tiefenstufe 0-10 cm und auf Ackerflächen aus 0-20 cm gezogen. Um die Grünlandböden mit den Ackerböden hinsichtlich ihres Nährstoffgehaltes im Oberboden vergleichen zu können, erfolgte die Probenahme auf allen Flächen einheitlich aus der Tiefenstufe 0-15 cm. Für den Nachweis einer erosionsbedingten horizontalen Nährstoffverlagerung wurde auf jedem Schlag in Hanglage zumindest vom Ober-, Mittel- und Unterhang (inklusive Hangfuss, Mulde und Wanne) 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). Eine niedrige Aggregatstabilität führt häufig zu Verschlammung und Verkrustung der Bodenoberfläche sowie bei Hanglage zu Bodenerosion (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-Pool im Boden erfasst. Damit kann der „Kapazitätsfaktor“ annähernd ermittelt werden. Der CAL-lösliche Phosphor-Gehalt im Oberboden 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 (RUTHSATZ 2001, BOHNER 2005). Mit der Messung des Phosphor-Gehaltes im Wasserextrakt wird der „Intensitätsfaktor“ festgestellt. Die Extraktion mit Wasser 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 Quantität des hauptsächlich an pedogene Aluminium-, Eisen- und Mangan-Oxide ad-

sorbierten Phosphates wurde durch die Bestimmung des oxalatlöslichen Phosphors ermittelt (PIHL und WERNER 1993, LEINWEBER et al. 1997). Der Gesamtelementgehalt an Phosphor repräsentiert den „Quantitätsfaktor“. Zur Abschätzung der Phosphor-Speicherkapazität der Acker- und Grünlandböden und zur Beurteilung der potenziellen Gefahr von Phosphor-Verlusten durch Auswaschung wurden die Phosphor-Speicherkapazität (PSC) und der Phosphor-Sättigungsgrad (DPS) folgendermaßen berechnet (ECKHARDT und LEINWEBER 1997):

$$\text{PSC (in mmol kg}^{-1}\text{)} = 0,5 \times (\text{Al}_{\text{ox}} + \text{Fe}_{\text{ox}} + \text{Mn}_{\text{ox}})$$

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

Die Gehalte an amorphen Aluminium-, Eisen- und Mangan-Oxiden bzw. -Hydroxiden sind hauptverantwortlich für die Phosphor-Speicherkapazität des Bodens. 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, und die Gefahr der Eutrophierung von Grundwasser und Oberflächengewässern nimmt zu (LOOKMANN et al. 1996). Deshalb sind die Phosphor-Speicherkapazität und der 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. Die Gesamtelementgehalte an Aluminium, Eisen, Mangan und Phosphor wurden nach Mikrowellenaufschluss mit Königswasser bestimmt. Der Gesamtgehalt an anorganischem Phosphor wurde nach Extraktion mit 0,1 M H₂SO₄ ermittelt. Der Gesamtgehalt an organischem Phosphor wurde als Differenz aus Phosphor-Gesamtgehalt und Gesamtgehalt an anorganischem Phosphor errechnet.

Die Kartenerstellung erfolgte mit dem geostatistischen Interpolationsverfahren Kriging (KRIGE 1951). Als GIS-Software wurde Geostatistical Analyst (ArcGIS der Firma ESRI) verwendet.

Ergebnisse

Die untersuchten Ackerböden befinden sich nahezu ausschließlich im Karbonat- und Silikat-Pufferbereich (*Abbildung 1*). Diese pH-Bereiche sind für die im Untersuchungsgebiet hauptsächlich angebauten Kulturarten optimal. Die untersuchten Grünlandböden gehören überwiegend dem Silikat-Pufferbereich an (*Abbildung 2*). Dieser pH-Bereich ist für die Grünlandpflanzen günstig. Der Großteil der Ackerböden fällt hinsichtlich des Gehaltes an CAL-löslichem Phosphor und Kalium in die Gehaltsstufe C (ausreichende Phosphor- und Kalium-Gehalte) (*Abbildung 3,4*). Nur wenige Ackerböden weisen hohe Phosphor-Gehalte (Gehaltsstufe D) sowie hohe und sehr hohe Kalium-Gehalte (Gehaltsstufe D und E) auf. Die Grünlandböden hingegen sind – bewertet nach den „Richtlinien für die sachgerechte Düngung“ (2006) – meist sehr schlecht mit CAL-löslichem Phosphor versorgt; der Großteil fällt in die Gehaltsstufe A (sehr niedrige Phosphor-Gehalte) (*Abbildung 5*). Nur wenige Grünlandböden gehören der Gehaltsstufe D und E (hohe

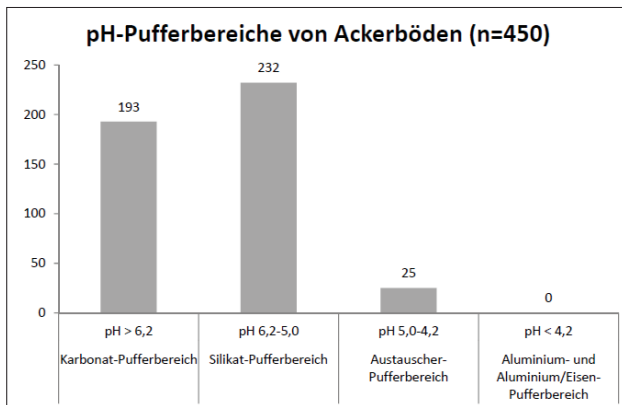


Abbildung 1: pH-Werte (pH CaCl₂) der untersuchten Ackerböden (n = 450) in der Bodentiefe 0-15 cm

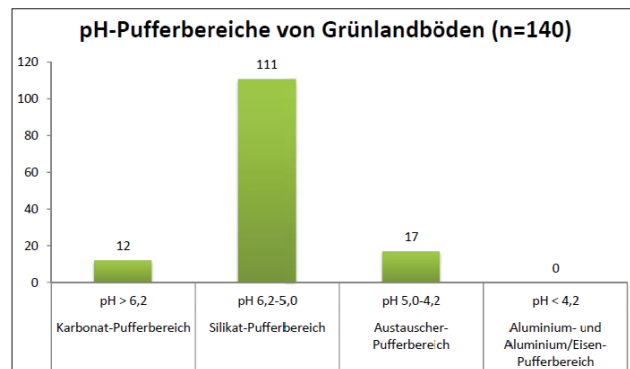


Abbildung 2: pH-Werte (pH CaCl₂) der untersuchten Grünlandböden (n = 140) in der Bodentiefe 0-15 cm

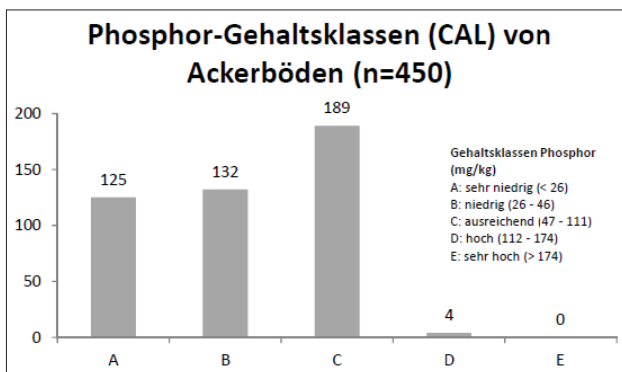


Abbildung 3: Phosphor-Gehaltsklassen (CAL-Methode) der untersuchten Ackerböden (n = 450) in der Bodentiefe 0-15 cm

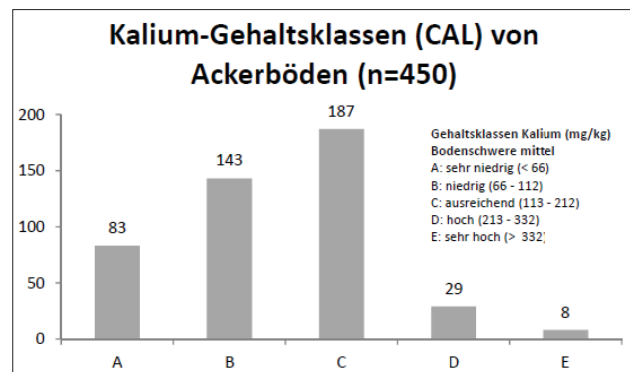


Abbildung 4: Kalium-Gehaltsklassen (CAL-Methode) der untersuchten Ackerböden (n = 450) in der Bodentiefe 0-15 cm

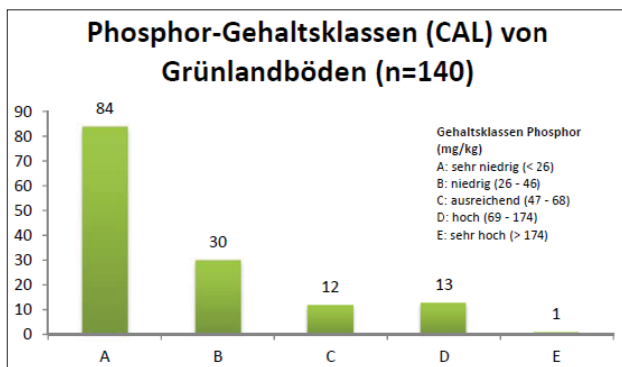


Abbildung 5: Phosphor-Gehaltsklassen (CAL-Methode) der untersuchten Grünlandböden (n = 140) in der Bodentiefe 0-15 cm

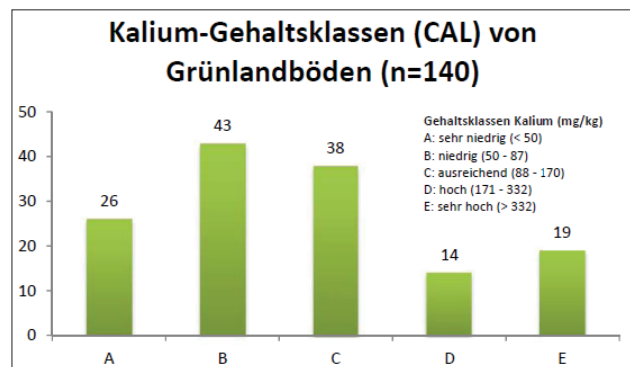


Abbildung 6: Kalium-Gehaltsklassen (CAL-Methode) der untersuchten Grünlandböden (n = 140) in der Bodentiefe 0-15 cm

und sehr hohe Phosphor-Gehalte) an. Erhöhte CAL-lösliche Phosphor-Gehalte im Oberboden wurden vor allem in der unmittelbaren Umgebung von Güllegruben und Mistlagerstätten festgestellt. Etwas günstiger ist die Versorgung mit CAL-löslichem Kalium. Die Mehrheit der untersuchten Grünlandböden befindet sich in der Gehaltsstufe B und C (niedrige und ausreichende Kalium-Gehalte) (Abbildung 6). Einige Grünlandböden weisen allerdings auch hohe und sehr hohe Kalium-Gehalte (Gehaltsstufe D und E) auf.

In den Abbildungen 7 und 8 sind die Probenahmepunkte sowie die CAL-löslichen und wasserlöslichen Phosphor-Gehalte von den untersuchten 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 Flächen kann Phosphor bei Oberflächenabfluss leicht gelöst und abgeschwemmt werden. Insbesondere verdichtete und strukturgeschädigte Böden mit hohen wasserlöslichen Phosphor-Gehalten im Oberboden sind bei entsprechender Hangneigung und Hanglänge „hot spots“, auf denen die Gefahr der Abschwemmung von gelöstem bodenbürtigen

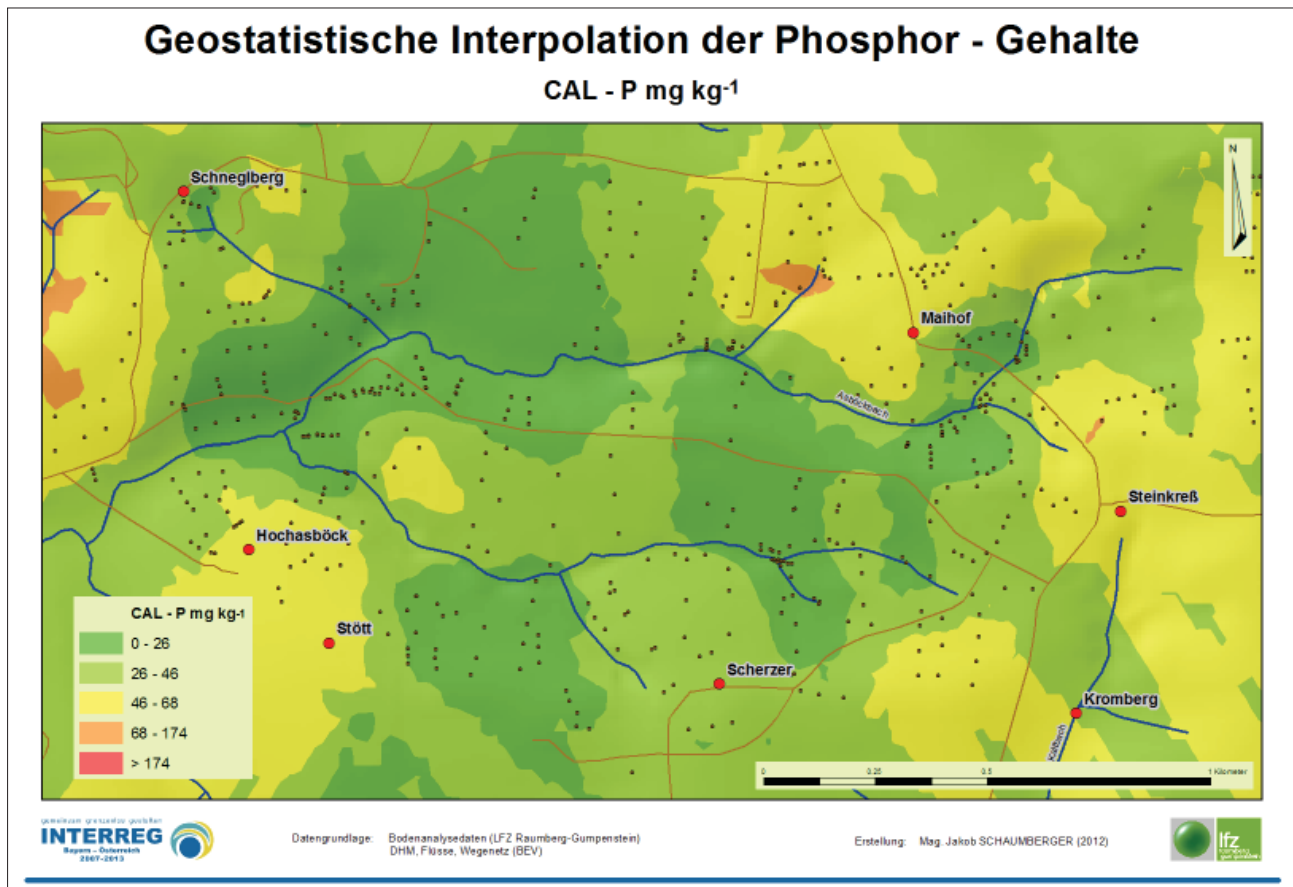


Abbildung 7: CAL-lösliche Phosphor-Gehalte in den untersuchten Acker- und Grünlandböden (n = 590) in der Bodentiefe 0-15 cm

Phosphor und die Gefahr von Phosphor-Verlusten durch direkte Gülleabschwemmung besonders hoch sind.

Wie die polynomische Regressionsfunktion in *Abbildung 9* zeigt, nimmt der wasserlösliche Phosphor-Gehalt im Oberboden mit steigendem CAL-löslichem Phosphor-Gehalt im Schwankungsbereich der gemessenen Phosphor-Werte tendenziell zu. Ungefähr 35 % des CAL-löslichen Phosphors liegen im Oberboden in wasserlöslicher und damit leicht mobilisierbarer Form vor. In den Grünlandböden ist dieser prozentuale wasserlösliche Phosphor-Anteil mit 45 % im Durchschnitt etwas höher als in den Ackerböden mit 33 %.

Der Humusgehalt, die Humusqualität und die Nährstoffgehalte im Oberboden sind stark von der Kulturart abhängig (*Tabelle 1,2*). Der Humusgehalt und somit auch die Gesamtgehalte an Stickstoff und Schwefel sind in den Böden des Dauergrünlandes deutlich höher als in den Ackerböden. Die Ackerböden mit den Kulturarten Mais und Getreide weisen 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. Dies ist ein Indiz für vergleichsweise nährstoffreichere Bodenverhältnisse in den Ackerböden. Die Böden des Dauergrünlandes hingegen sind im Durchschnitt am besten mit CAL-löslichem Kalium versorgt. Die Aggregatstabilität ist in den Grünlandböden deutlich höher als in den Ackerböden. Die Ackerböden mit

der Kulturart Mais weisen im Durchschnitt die niedrigste Aggregatstabilität auf.

Der vorhandene Phosphor-Vorrat liegt im Oberboden in unterschiedlicher Bindungsform vor. Es besteht ein deutlicher Unterschied zwischen Acker- und Grünlandböden (*Tabelle 3*). Die Ackerböden weisen im Durchschnitt einen niedrigeren Gesamtelementgehalt an Phosphor und einen geringeren Gesamtgehalt an organischem Phosphor als die Grünlandböden auf. Im Gegensatz dazu sind die Gehalte an anorganischem Phosphor und oxalatreziehbarem Phosphor vergleichsweise höher. Der niedrigere Humusgehalt in den Ackerböden und die stärkere Düngung der Ackerflächen dürften für die nutzungsspezifischen Unterschiede hauptverantwortlich sein. Die Gesamtelementgehalte an Phosphor weisen in den Grünland- und Ackerböden meist Werte unter 1000 mg pro kg Feinboden auf; somit besteht keine übermäßige anthropogene Phosphor-Anreicherung im Oberboden. 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 oxalatreziehbare 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:P_i- und C_i: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. In den untersuchten Acker- und

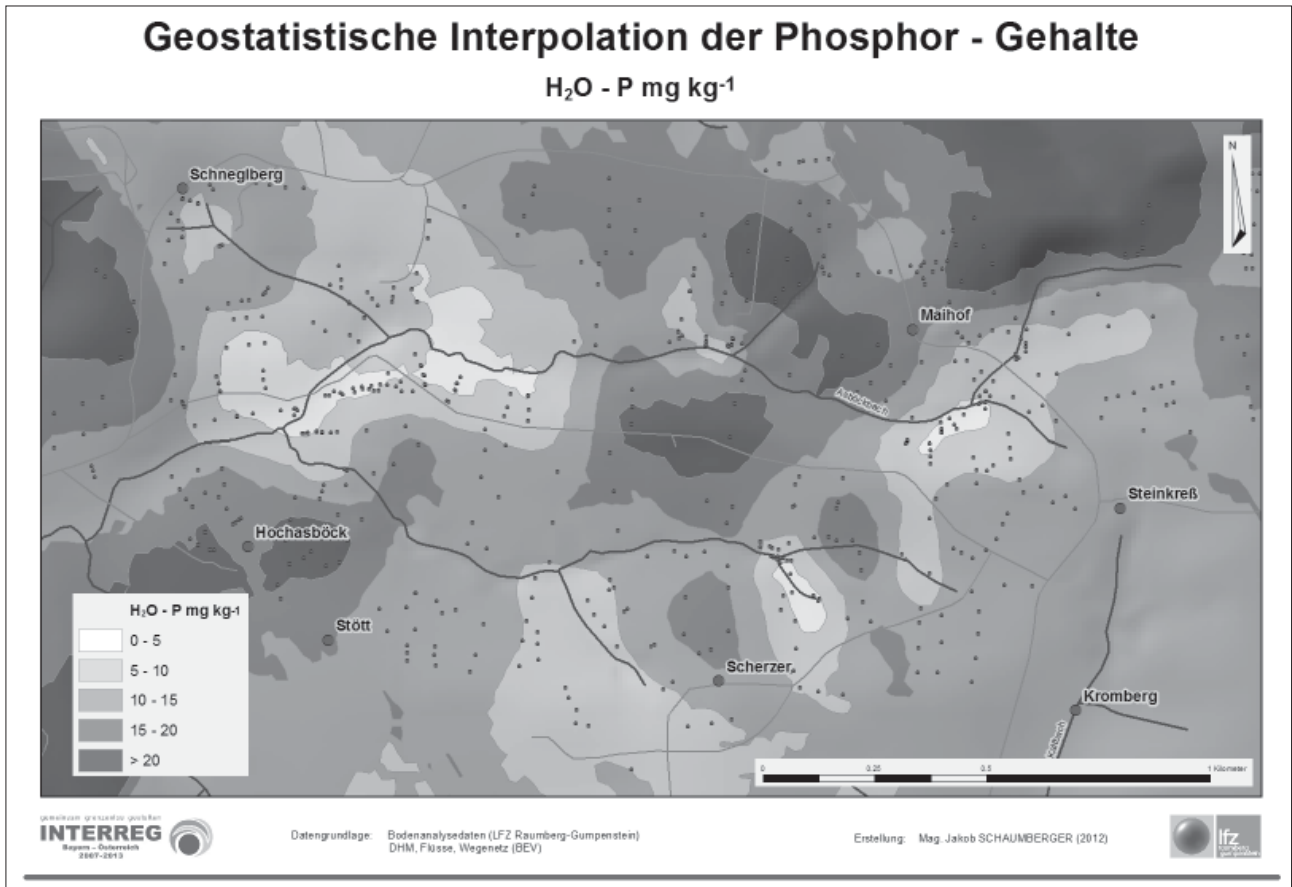


Abbildung 8: Wasserlösliche Phosphor-Gehalte in den untersuchten Acker- und Grünlandböden (n = 590) in der Bodentiefe 0-15 cm

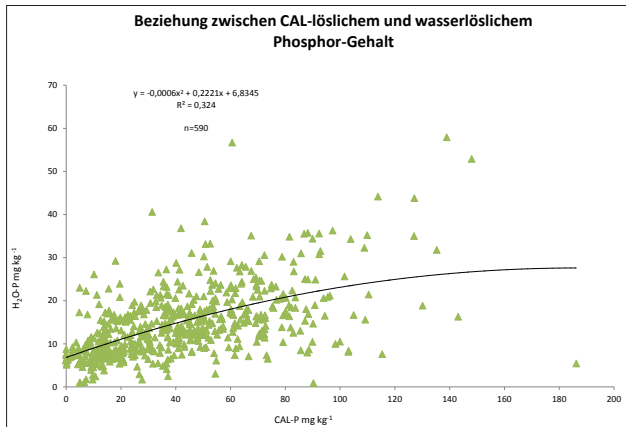


Abbildung 9: Beziehung zwischen CAL-löslichem Phosphor-Gehalt und wasserlöslichem Phosphor-Gehalt in den Acker- und Grünlandböden in der Bodentiefe 0-15 cm (n = 590)

Grünlandböden haben vor allem die oxalateextrahierbaren Eisen-Oxide und -Hydroxide eine große Bedeutung für die Adsorption und Festlegung von Phosphat (Tabelle 4). Die Böden besitzen in den obersten 15 cm auf Grund der hohen Gehalte an amorphen Eisen-Oxiden bzw. -Hydroxiden eine große Phosphor-Speicherkapazität (PSC). Sie ist in den Ackerböden im Durchschnitt etwas geringer als in den Grünlandböden (Tabelle 3). Der Phosphor-Sättigungsgrad (DPS) ist sowohl in den Acker- als auch in den Grünlandbö-

den mit durchschnittlich 19 bzw. 16 % sehr niedrig (Tabelle 3). Somit dürfte das Risiko für erhöhte Phosphor-Verluste durch Auswaschung gering sein.

In den Tabellen 5 und 6 sind die Bodenkennwerte in Abhängigkeit von der Reliefposition dargestellt. 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 und die C:N-Verhältnisse sind vergleichsweise weiter. Dies sind Indizien für eine Anreicherung von stickstoffärmerem Humus im Unterhang der Acker- und Grünlandflächen. Auch der Anteil des organisch gebundenen Phosphors am Phosphor-Gesamtgehalt ist sowohl bei den Acker- als auch bei den Grünlandböden im Unterhang größer als im Oberhang. Dies ist ein Indiz für eine stärkere Anreicherung von organisch gebundenem Phosphor im Unterhang der landwirtschaftlich genutzten Flächen. Bemerkenswert ist ferner die höhere Aggregatstabilität bei den Ackerböden im Unterhang im Vergleich zum Oberhang. Der höhere Humusgehalt im Unterhang dürfte dafür verantwortlich sein. Auffallend und zurzeit nicht plausibel ist die fehlende Phosphor-Anreicherung im Unterhang der Ackerflächen. Bei den Grünlandböden sind die Phosphor-Gehalte der einzelnen Phosphor-Fractionen im Unterhang sogar deutlich niedriger als im Oberhang. In der Tabelle 7 ist das Verhältnis der einzelnen Bodenkennwerte zwischen Ober- und Unterhang angeführt. Die Quotienten sind mit drei Ausnahmen (S_p , CAL-K, P_{org}) bei den Ackerböden immer enger als bei

Tabelle 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 _t	S _t	C:N	C:S	N:S
Getreide	174	6,0	65	1,64	0,20	0,02	8,2	82	10
Mais	132	6,0	69	1,67	0,22	0,02	7,6	84	11
Ölpflanzen	79	6,6	93	1,97	0,22	0,02	8,9	99	11
Wechselgrünland	67	5,9	89	2,80	0,30	0,02	9,3	140	15
Dauergrünland	138	5,6	95	3,15	0,37	0,04	8,5	79	9

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

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

Kulturart	n	CAL-P	mg kg ⁻¹ CAL-K	H ₂ O-P	% AS
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

den Grünlandböden. Dies ist ein Indiz für eine relativ stärkere Humus- und Nährstoffanreicherung im Unterhang der Ackerflächen im Vergleich zu den Grünlandflächen.

Diskussion

Die Daten aus den Bodenanalysen ermöglichen eine Beurteilung und Bewertung des Phosphor-Versorgungszustandes der landwirtschaftlich genutzten Oberböden im Hinblick auf die Eutrophierungsgefahr der Antiesen.

Die untersuchten Grünlandböden sind – bewertet nach den „Richtlinien für die sachgerechte Düngung“ (2006) – meist sehr schlecht mit CAL-löslichem Phosphor versorgt; der Großteil fällt in die Gehaltsstufe A (sehr niedrige Phosphorgehalte). Auch HEINZLMAIER et al. (2005), BOHNER und EDER (2006) sowie BOHNER und SCHINK (2007) mussten in anderen österreichischen Naturräumen den Großteil ihrer untersuchten Grünlandböden der Gehaltsstufe A zuordnen. Nach GERZABEK et al. (2004) zeigen Grünlandböden in Österreich tendenziell eine Unterversorgung mit CAL-löslichem Phosphor. Ein hoher Anteil an ungenügend mit CAL-löslichem Phosphor versorgten Grünlandböden dürfte somit kein Unikum des Untersuchungsgebietes sein. Eine Überprüfung der zurzeit gültigen Gehaltsklasseneinstufung für den CAL-löslichen Phosphorgehalt von Grünlandböden gemäß den „Richtlinien für die sachgerechte Düngung“ (2006) ist daher notwendig. Der Großteil der untersuchten Ackerböden fällt hinsichtlich des Gehaltes an CAL-löslichem Phosphor in die Gehaltsstufe C (ausreichende Phosphorgehalte). Die Ackerböden sind im Oberboden im Durchschnitt besser mit CAL-löslichem Phosphor versorgt als die Grünlandböden. Auch die Gehalte an anorganischem Phosphor und oxalatextrahierbarem

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

	Ackerböden (n = 67)							Grünlandböden (n = 31)						
	P _t	mg kg ⁻¹		%		mmol kg ⁻¹	%	P _t	mg kg ⁻¹		%		mmol kg ⁻¹	%
	P _i	P _o	P _{ox}	P _{org}	PSC	DPS		P _i	P _o	P _{ox}	P _{org}	PSC	DPS	
Min	427	114	242	175	29	52	4	476	68	194	205	28	65	6
Max	1269	842	773	911	81	133	36	1370	992	660	930	86	132	30
Median	689	350	351	456	50	81	17	745	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 oxalatextrahierbarem Phosphor; P_{org} = Anteil des organisch gebundenen Phosphors am Phosphor-Gesamtgehalt; PSC = Phosphor-Speicherkapazität; DPS = Phosphor-Sättigungsgrad

Tabelle 4: Oxalatextrahierbares Aluminium, Eisen und Mangan (0-15 cm Bodentiefe)

	Ackerböden (n = 67)			Grünlandböden (n = 31)		
	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} = oxalatextrahierbares Aluminium, Eisen, Mangan

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

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

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

Tabelle 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 Phosphor am Phosphor-Gesamtgehalt (67 Bodenanalysen Acker, 31 Bodenanalysen Grünland); AS = Aggregatstabilität

Tabelle 7: Allgemeine Bodenkennwerte (arithmetischer Mittelwert, 0-15 cm Bodentiefe, n = 392) im Verhältnis Oberhang : Unterhang

	Acker	Grünland
pH CaCl ₂	0,98	1,02
eL	0,86	1,04
C _t	0,84	0,91
N _t	0,91	0,93
S _t	0,99	0,95
P _t	1,00	1,21
C:N	0,92	0,98
CAL-P	1,05	1,44
CAL-K	1,32	1,14
H ₂ O-P	1,11	1,49
P _{org}	0,87	0,81
AS	0,88	0,96

eL = elektrische Leitfähigkeit; C_t, N_t, S_t = Gesamtgehalt an Kohlenstoff, Stickstoff, Schwefel; P_t = Gesamtelementgehalt an Phosphor (67 Bodenanalysen Acker, 31 Bodenanalysen Grünland); CAL-P und CAL-K = CAL-löslicher Phosphor- und Kalium-Gehalt; H₂O-P = wasserlöslicher Phosphor-Gehalt; P_{org} = Anteil des organisch gebundenen Phosphor am Phosphor-Gesamtgehalt (67 Bodenanalysen Acker, 31 Bodenanalysen Grünland); AS = Aggregatstabilität

Phosphor sind trotz niedrigerem Gesamtelementgehalt vergleichsweise höher. Dies sind Indizien für eine stärkere Anreicherung anorganischer Phosphor-Fractionen in den Ackerböden im Vergleich zu den Grünlandböden. Das höhere Düngungsniveau auf den Ackerflächen dürfte dafür hauptverantwortlich sein. Die untersuchten Böden besitzen eine hohe Phosphor-Speicherkapazität. Sie ist in den Ackerböden in den obersten 15 cm im Durchschnitt etwas geringer als in den Grünlandböden. Der Großteil der untersuchten Böden weist einen niedrigen Phosphor-Sättigungsgrad auf. 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, LOOKMAN et al. 1996, LEINWEBER et al. 1997). Dieser Grenzwert wird in den Ackerböden in den obersten 15 cm sechsmal und in den Grünlandböden nur einmal überschritten. Auf Grund des überwiegend niedrigen Phosphor-Sättigungsgrades dürfte die Gefahr einer erhöhten Phosphor-Auswaschung mit dem Sickerwasser bei den untersuchten Acker- und Grünlandböden im Falle einer standortangepassten Bewirtschaftung, sachgerechten Düngung und bei durchschnittlichen Niederschlagsereignissen gering sein.

Verdichtete und strukturgeschädigte Böden in Hanglage 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 Phosphor-Abschwemmung in die Fließgewässer (VON ALBERTINI et al. 1993). Die Phosphor-Einträge 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). Im Untersuchungsgebiet weisen landwirtschaftlich genutzte Flächen in steiler Hanglage vor allem dann ein größeres Phosphor-Abschwemmungsrisiko auf, wenn die Oberböden verdichtet und stark mit wasserlöslichem Phosphor angereichert sind. Außerdem besteht die Möglichkeit, dass größere Phosphor-Mengen von „Problemflächen“ (hot spots) mit überdurchschnittlich hohen Phosphor-Gehalten im Oberboden, wie beispielsweise die unmittelbare Umgebung von Güllegruben und Mistlagerstätten in die Fließgewässer gelangen. Das Phosphor-Eintragspotenzial aus Grünlandflächen ist auch erhöht, wenn es durch falsche Grünlandbewirtschaftung zu einer Narbenauflockerung und Lückenbildung im Pflanzenbestand kommt.

Die Aggregatstabilität ist in den untersuchten Grünlandböden deutlich höher als in den Ackerböden. Die intensivere Durchwurzelung der Grünlandböden und der höhere Humusgehalt dürften dafür hauptverantwortlich sein. Die Gefahr einer Bodenerosion ist daher auf Grünlandflächen beträchtlich geringer als auf Ackerflächen. Die Ackerböden mit der Kulturart Mais weisen im Durchschnitt die niedrigste Aggregatstabilität und somit die höchste Erosionsgefährdung auf. Mehrere Erosionsrillen auf einigen Ackerflächen zeigen an, dass eine lineare Erosion im Untersuchungsgebiet stattfindet. Durch Bodenerosion wird partikulär gebundener Phosphor in die Fließgewässer eingetragen (PRASUHN 2005).

Erodiertes Bodenmaterial ist normalerweise mit Phosphor angereichert (SHARPLEY et al. 1994). Eine Phosphor-Anreicherung im Unterhang der Ackerflächen konnte allerdings nicht festgestellt werden. Die Ursache hierfür ist noch nicht bekannt. Sowohl bei den Acker- als auch bei den Grünlandflächen ist der Unterhang mit stickstoffärmerem Humus angereichert. Auch der Anteil des organisch gebundenen Phosphors am Phosphor-Gesamtgehalt ist im Unterhang größer als im Oberhang. Möglicherweise wird auf den Ackerflächen bei erosionsauslösenden Starkniederschlägen das von den Hangflächen erodierte Bodenmaterial zum Großteil nicht im Unterhang abgelagert, sondern gelangt sofort in die Fließgewässer. Die Humusanreicherung, das weitere C:N-Verhältnis und der höhere Anteil des organisch

gebundenen Phosphors am Phosphor-Gesamtgehalt im Unterhang der Acker- und Grünlandflächen dürften weniger die Folge einer Sedimentation von erodiertem humusreichen Bodenmaterial sondern vielmehr das Ergebnis einer reliefbedingten (staunässebedingten) geringeren Mineralisierung der organischen Substanz im Unterhang sein.

Schlussfolgerung

Bei der Ausarbeitung regionaler Maßnahmen zur Verminderung der Phosphor-Einträge aus landwirtschaftlich genutzten Flächen in die Antiesen müssen Abschwemmung, Bodenerosion und einzelne „hot spots“ mit höchster Priorität berücksichtigt werden. Um den Phosphor-Eintrag in die Fließgewässer zu begrenzen, sollte insbesondere in steilen Hanglagen eine starke Anreicherung von wasserlöslichem Phosphor im Oberboden vermieden werden. Dazu ist eine Anpassung der Phosphor-Düngung an den mengenmäßigen und zeitlichen Bedarf der Pflanzen notwendig (WERNER et al. 1991). Auf Ackerflächen in erosionsgefährdeten steilen Hanglagen sollte kein Mais angebaut werden, wenn die Gefahr sehr hoch ist, dass bei Starkniederschlägen das erodierte Bodenmaterial zum Großteil direkt in die Fließgewässer gelangt. Zur Verringerung der Phosphor-Einträge durch Erosion und Abschwemmung müssen strukturschädigende Bewirtschaftungs- und Bodenbearbeitungsmaßnahmen sowie eine Bodenverdichtung vermieden werden. Außerdem sollten spezielle erosions- und abflussmindernde pflanzenbauliche Maßnahmen zur Minimierung von Phosphor-Verlusten eingeleitet und Strategien zu einer umweltschonenderen Düngerausbringung konzipiert werden.

Danksagung

Diese Untersuchungen wurden im Rahmen des INTERREG IV A-Projekts „Gewässer-Zukunft“ durchgeführt.



Literatur

- BOHNER, A., 2005: Bodenindikatoren für die Bewirtschaftungsintensität und die floristische Artenvielfalt im Wirtschaftsgrünland. Mitt. der Österr. Bodenkundl. Ges., Heft 72, 67-73.
- BOHNER, A. und G. EDER, 2006: Boden- und Grundwasserschutz im Wirtschaftsgrünland. Seminar Umweltprogramme für die Landwirtschaft. Bericht HBLFA Raumberg-Gumpenstein, 53-64.
- BOHNER, A. und M. SCHINK, 2007: Ergebnisse der Bodenuntersuchungen im Einzugsgebiet des Mondsees und Irrsees mit besonderer Berücksichtigung des Phosphors. Schriftenreihe BAW 26, 34-50.
- BOHNER, A., G. EDER und M. SCHINK, 2007: Nährstoffkreislauf und Stoffflüsse in einem Grünland-Ökosystem. 12. Gumpensteiner Lysimetertagung. Bericht HBLFA Raumberg-Gumpenstein, 91-99.
- 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 Liebfeld, 87 S.
- BRAUN, M. und P. HURNI, 1993: Abschwemmung von Phosphor auf Grasland an zwei verschiedenen Standorten im Einzugsgebiet des Sempachersees. Landwirtschaft Schweiz, Band 6, 615-620.
- BRAUN, M. und J. LEUENBERGER, 1991: Abschwemmung von gelöstem Phosphor auf Ackerland und Grasland während den Wintermonaten. Landwirtschaft Schweiz, Band 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.
- DIEPOLDER, M. und S. RASCHBACHER, 2007: Quantifizierung von P-Austrägen aus landwirtschaftlichen Flächen – Ergebnisse eines Forschungsprojekts. Schule und Beratung, Heft 8-9/07, 5-12.
- 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. der Deutschen Bodenkundl. Ges. 85, II, 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.
- 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.
- GERZABEK, M.H., A. BAUMGARTEN, M. TULIPAN und S. SCHWARZ, 2004: Ist die Nährstoffversorgung der Pflanzen noch ausgewogen? Eine Analyse aufgrund von Bodenuntersuchungsergebnissen und Langzeitversuchen. Ländlicher Raum 2/2004, 1-8.
- HEINZLMAIER, F., M.H. GERZABEK, M. TULIPAN und A. BAUMGARTEN, 2005: Pflanzennährstoffe in Österreichs Böden: Räumliche und zeitliche Variationen sowie Wechselwirkungen mit Bodeneigenschaften. Mitt. Ges. Pflanzenbauwiss. 17, 96-97.
- 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.
- 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.
- LEINWEBER, P., R. MEISSNER, K.-U. ECKHARDT and J. SEEGER, 1999: Management effects on forms of phosphorus in soil and leaching losses. European Journal of Soil Science 50, 413-424.
- 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.
- OBERHAUSER, R. (Red.), 1980: Der geologische Aufbau Österreichs. Springer Verlag, 699 S.
- OTTO, A., 1980: Gewässerbelastung durch Land- und Forstwirtschaft. Wasser und Boden 1/1980, 26-30.

- PIHL, U. und W. WERNER, 1993: Zur Interpretation von Quantitäts-/ Intensitäts-Quotienten als Kriterien vertikaler Phosphatverlagerung in Böden. VDLUFA Kongressband 1993, 37, 99-102.
- POMMER, G., R. SCHRÖPEL und F. JORDAN, 2001: Austrag von Phosphor durch Oberflächenabfluss auf Grünland. Wasser & Boden, 53/4, 34-38.
- PRASUHN, V., 2001: Abschätzung der P- und N-Einträge in die Gewässer des Kantons Zürich mittels GIS. Mitt. der Deutschen Bodenkundl. Ges., Band 96, Heft 2, 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 Bodenuntersuchungsergebnissen 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. Jahrgang, 51-54.
- RUTHSATZ, B., 2001: Pflanzen- und Boden-Indikatoren für die Intensivierung der Landwirtschaft in Mittelgebirgen – am Beispiel des Wirtschaftsgrünlandes einer kleinen Gemeinde bei Trier. Arch. für Nat.-Lands. Vol. 40, 289-323.
- SCHACHTSCHABEL, P. und K. HARTGE, 1959: Die Verbesserung der Strukturstabilität von Ackerböden durch eine Kalkung. Z. f. Pflanzenernährung, Düngung, Bodenkunde 83, 193-202.
- SCHEFFER, B., 1977: Stickstoff- und Phosphorverlagerung in nordwestdeutschen Niedrungsböden 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.
- 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.
- VON ALBERTINI, N., M. BRAUN und P. HURNI, 1993: Oberflächenabfluss und Phosphorabschwemmung von Grasland. Landwirtschaft Schweiz, Band 6, 575-582.
- WERNER, W., H.-W. OLFS, K. AUERSWALD und K. ISERMANN, 1991: Stickstoff- und Phosphoreintrag in Oberflächengewässer über „diffuse Quellen“. In: A. Hamm (ed.): Studie über Wirkungen und Qualitätsziele von Nährstoffen in Fließgewässern. Academia Verlag, Sankt Augustin.
- 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.