

DISS. ETH NO. 15312

**THE INFLUENCE OF PROCESSES CONTROLLING PHOSPHORUS
AVAILABILITY ON PHOSPHORUS LOSSES IN GRASSLAND SOILS**

A dissertation submitted to the
SWISS FEDERAL INSTITUTE OF TECHNOLOGY ZURICH

for the degree of
Doctor of Natural Sciences

presented by
MICHAEL SCHÄRER

Dipl. Umwelt-Natw. ETH, Swiss Federal Institute of Technology Zurich

born 12.10.1970

citizen of Wädenswil (ZH)

accepted on the recommendation of

Prof. Dr. E. Frossard, examiner

Prof. Dr. H. Flühler, co-examiner

Dr. S. Sinaj, co-examiner

2003

Summary

Phosphorus (P) losses from agricultural soil to water bodies are mainly related to the excessive accumulation of available P as a result of long-term inputs of fertiliser P. This is particularly the case in regions with intensive livestock production, where P inputs in excess of plant needs over decades and the absence of tillage management lead to high total and available P content in topsoil of grassland soils. P concentrations in surface runoff show a close relationship to available P concentrations in the topsoil. In an interdisciplinary study, different treatments to reduce P availability in grassland soil were studied as a model to investigate the processes controlling P availability on phosphorus losses in grassland soils. Two field sites with permanent grassland soils rich in available P were chosen for this study. The factors influencing P availability in grassland soils are presented in this dissertation. The interplay between available P and soil hydrology controlling P losses in surface runoff is discussed in the dissertation of T. Vollmer (2003).

The influence of water composition on P concentration in runoff induced by sprinkling experiments was studied. Results from field and batch experiments underlined the importance of the use of water having a composition similar to rainwater to achieve an appropriate assessment of P losses in the field.

A soil amendment to reduce P availability in soil has been evaluated in two sets of laboratory experiments. The effects of three types of amendments (boehmite, CaCO_3 , and the application of iron sulfate on a soil-calcium hydroxide-mixture (Fe/OH)) were investigated and evaluated in the first set of experiments. Short term effects were studied in desorption, sorption and isotopic exchange kinetic experiments. Amendment effects on available P were also investigated in an incubation experiment over 20 weeks. The influence on plant available P was evaluated in a pot experiment using $^{33}\text{P}_i$ -labelled amended soils. Over all experiments, Fe/OH was the most effective treatment in increasing P sorption and decreasing P_i desorption and soil P availability. In the second set of experiments, the Fe/OH amendment was subjected to incubation under aerobic, anaerobic and changing conditions. Under aerobic conditions, the amendment strongly decreased P solubility in soil. The characterization of the solid phase demonstrated that the Fe added to the soil precipitated as hydrous Fe(III) oxides, in the form of small particles of goethite and a very poorly crystalline Fe oxide, probably ferrihydrite. The effect of the amendment addition completely

disappeared under strongly anaerobic conditions. This was due to a reduction of the precipitated Fe(III) oxides to Fe(II), resulting in an increased solubility and extractability of Fe and P.

In a field experiment on the two grassland sites three types of so called "remediation treatments" were applied to reduce high available P content in topsoil and consequently P losses by surface runoff. The treatments consisted of i.) zero P fertilization (zero P treatment), ii.) zero P fertilization plus single tillage of soil to 25 cm depth to decrease the high concentration in available P in the topmost cm (tillage treatment) and iii.) zero P fertilization plus single tillage plus application of the Fe/OH amendment to increase P sorption capacity of the topsoil (Fe/OH treatment). On each site, the treatments have been compared to a control treatment receiving inorganic N, P, and K fertilisation according to plant needs. Changes in P status, other soil properties and forage yield were investigated over 17 months. Zero P fertilization did not significantly decrease P availability compared with the control treatment. Significant decrease in organic P pointed to the potential of this treatment to reduce available P on the long term. The breakdown of the P gradient in the upper cm of the profile through single tillage significantly reduced available P content of the topsoil on the short and medium term. The strongest reduction was observed for the Fe/OH treatment. The P availability slightly increased with time in this treatment, but it remained lower compared with the tillage treatment on the medium term.

Our observations underlined the strong control of P saturation of amorphous iron and aluminium oxides on P availability. In addition, we observed that biological activity can play an important role in replenishing soil available P in soils having a negative P balance and therefore maintain P losses at augmented levels. The results suggest that tillage and the application of P sorbing amendments can be very efficient treatments to achieve an immediate and significant reduction in available P and P losses in grassland soils. But an application in the field has to be carefully assessed.

Zusammenfassung

Phosphor (P) Verluste aus landwirtschaftlichen Böden in Oberflächengewässer stehen in direkter Beziehung zur Anreicherung von überschüssigem verfügbarem P aus jahrzehntelanger Düngung. Dies ist speziell auf Dauergrasland in Gebieten mit intensiver Viehhaltung der Fall, wo P über lange Zeit im Überschuss zum Pflanzenbedarf ausgebracht wurde. Da solche Weiden in der Regel nicht gepflügt werden, führte dies zu sehr hohen Gehalten an verfügbarem P in der obersten Bodenschicht (0-2 cm), die in direkter Beziehung zu hohen P Konzentrationen im Oberflächen- und oberflächennahem Abfluss stehen.

In dieser interdisziplinären Studie wurde in einem ersten Teil der Einfluss der Zusammensetzung des Wassers auf die P-Konzentrationen im durch Beregnungsexperimente induzierten Oberflächen(-nahen)-Abfluss untersucht. Kombinierte Feld- und Laborexperimente ergaben, dass für solche Experimente Wasser mit einer ähnlichen Zusammensetzung wie Regenwasser eingesetzt werden sollte, um eine zuverlässigere Abschätzung der P-Verluste zu erreichen.

Im weiteren wurden verschiedene Massnahmen zur Reduktion der P Verfügbarkeit in Graslandböden evaluiert. Diese Massnahmen dienten als Modell zur Untersuchung derjenigen Faktoren, die die P Verfügbarkeit und somit auch die P Verluste kontrollieren. Die Studie wurde auf zwei Parzellen mit unterschiedlichen Bodeneigenschaften durchgeführt. Diese Dissertation befasst sich mit den Prozessen und Bodeneigenschaften, die die P Verfügbarkeit beeinflussen. Die Faktoren, welche die Interaktion des Wassers mit dem Boden P und somit die P-Verluste steuern, werden in der Dissertation von T. Vollmer (2003) diskutiert.

In zwei Laborstudien wurde ein Bodenzusatz zur Verringerung der P-Verfügbarkeit evaluiert. In der ersten Studie wurden drei verschiedene Zusätze (Böhmit, CaCO_3 , sowie die Applikation einer Eisensulfatlösung auf den mit Kalziumhydroxid vermischten Boden (Fe/OH)) untersucht. Die unmittelbaren Auswirkungen wurden anhand von Sorptions-, Desorptions- sowie Isotopenaustauschexperimenten studiert. Die längerfristige Effizienz wurde in einem Inkubationsexperiment über 20 Wochen untersucht. Zusätzlich wurde die Wirkung der Zusätze auf das pflanzenverfügbare P in einem Topfexperiment mit ^{33}P -markierten Böden überprüft. Über alle Untersuchungen stellte sich der Fe/OH-Zusatz als effektivstes Mittel zur Reduktion der P-Verfügbarkeit heraus.

In der zweiten Studie wurden mit dem Fe/OH-Zusatz behandelte Böden unter anaeroben, aeroben und wechselnden Bedingungen inkubiert. Unter aeroben Bedingungen führte die Addition des Bodenzusatzes zu einer drastischen Reduktion der P Verfügbarkeit. Eine Charakterisierung der Fe-Festphasen der Proben zeigte, dass die Zugabe des Bodenzusatzes zur Ausfällung von kleinen Partikeln führte, die aus Goethit und einem hochamorphen Fe-Oxide, sehr wahrscheinlich Ferrihydrit, bestanden. Der Effekt des Bodenzusatzes auf die P Verfügbarkeit verschwand unter anaeroben Bedingungen. Dies war hauptsächlich auf die Reduktion der ausgefällten Fe(III) zurückzuführen, die gleichzeitig die Löslichkeit von Fe und P stark erhöhten.

In einem Feldexperiment auf den zwei Versuchsstandorten wurden drei verschiedene Bewirtschaftungsmassnahmen eingesetzt mit dem Ziel, die P Verfügbarkeit und damit auch die P Verluste zu reduzieren. Die Massnahmen bestanden aus i.) Null P Düngung, ii.) Null P Düngung plus Umpflügen des Oberbodens auf 25 cm Tiefe, sowie iii.) Null P Düngung plus Umpflügen des Oberbodens plus Addition des Fe/OH Bodenzusatzes. Auf jeder Fläche wurden die drei Massnahmen mit einer Kontroll-Massnahme verglichen, in der mit einer auf den Pflanzenbedarf ausgerichteten Menge P gedüngt wurde. Veränderungen im Boden P, weiteren Bodeneigenschaften und Futterertrag wurden über 17 Monate untersucht.

Null P Düngung führte zu keiner signifikanten Reduktion der P Verfügbarkeit. Eine signifikante Abnahme des organischen P im Boden wies jedoch auf potentielle Langzeitauswirkungen dieser Massnahme hin. Umpflügen des Oberbodens führte zu einer unmittelbaren und über den Untersuchungszeitraum konstant bleibenden Abnahme der P Verfügbarkeit. Die stärkste unmittelbare Reduktion wurde jedoch für die Fe/OH-Addition festgestellt. Längerfristig nahm die P Verfügbarkeit leicht zu, blieb jedoch immer auf dem tiefsten Niveau im Vergleich zu den anderen Massnahmen.

Unsere Beobachtungen unterstrichen den starken Einfluss der P Sättigung der amorphen Fe- und Al-Oxide auf die P Verfügbarkeit. Im Weiteren zeigte sich die grosse Bedeutung der biologischen Aktivität für die Nachlieferung von verfügbarem P bei Böden mit stark negativer P Bilanz. Unsere Erkenntnisse weisen darauf hin, dass das Umpflügen des Oberbodens und das Ausbringen von Bodenzusätzen die P Verfügbarkeit (und folglich auch die P-Verluste) unmittelbar und effizient zu reduzieren. Die Umsetzung solcher Massnahmen in die Praxis sollte aber einer sorgfältigen Evaluation unterzogen werden.