ETH zürich

ETH Library

Investigating the temporal scale of phosphorus cycling in soil

Doctoral Thesis

Author(s):
Helfenstein, Julian

Publication date:
2019-08

Permanent link:
https://doi.org/https://doi.org/10.3929/ethz-b-000359939

Rights / license:
In Copyright - Non-Commercial Use Permitted

This page was generated automatically upon download from the ETH Zurich Research Collection.
For more information, please consult the Terms of use.

DISS. ETH Nr. 25905

Investigating the temporal scale of phosphorus cycling in soil

A thesis submitted to attain the degree of
DOCTOR OF SCIENCES of ETH Zürich
(Dr. sc. ETH Zürich)

Presented by
Julian Helfenstein
Master of Science ETH Zürich in Environmental Sciences

Born on 13.05.1990
Citizen of Luzern, LU

On the recommendation of
Prof. Emmanuel Frossard, examiner
Dr. Federica Tamburini, co-examiner
Prof. Peter Vitousek, co-examiner
Prof. Sebastian Doetterl, co-examiner

Abstract

The phosphorus (P) cycle is central to several ecosystem services important for human well-being, including food production, water quality regulation, and carbon sequestration. To better predict future interactions between P cycling and ecosystem services, it is necessary to improve our understanding of the temporal scale of P cycling in soil. In this thesis, novel isotopic and spectroscopic methods as well as literature review were used to develop robust estimates of mean residence times of P in soil pools, and analyze the dependencies of mean residence times on soil properties.

Firstly, we developed a derivation for calculating P turnover in the soil solution from parameters measured in isotope-exchange kinetic experiments. Soil solution turnover was then calculated for 217 soil samples, for which the isotope exchange kinetic parameters could be found in the literature. The inverse of turnover rate, the mean residence time, was on a range of milliseconds to seconds for most soil samples, suggesting a very rapid turnover of this pool. Shorter mean residence times were found for soils known to have a high P buffering capacity, such as Andosols and Ferralsols, while Podzols had longer mean residence times. However, at time scales relevant for plant growth, not only the turnover rates within the soil solution but also the exchange with inorganic and organic pools is important.

P dynamics between inorganic and organic pools and the soil solution were analyzed on a well-described model system, the Kohala climatic gradient on Hawaii. Here, high P concentrations and well-constrained factors of soil development allowed studying P pools, their turnover, and the relative importance of biological P cycling by combining sequential extraction with P *K*-edge X-ray absorption spectroscopy and isotopic methods (^{33}P and ^{18}O in phosphate). The P pools analyzed were resin-extractable P (resin-P), microbial-P, NaOH-extractable inorganic and organic P (NaOH-Pi and -Po), and HCl-extractable P. Isotope exchange kinetics suggested that mean residence time of resin-P is on the order of minutes, NaOH-Pi on the order of days-months, and HCl-P on the order of years to millennia. In soils from the arid sites, the stable oxygen isotope ratio of HCl-P still retained the parent material signature, suggesting that this pool may remain stable even after 150’000 years of soil development, given the right environmental conditions.

Three soils from the Kohala climatic gradient were then subjected to a five-month drying-rewetting experiment to trace isotope incorporation and determine the impact of drying-rewetting on soil P turnover. In general, relative radioisotope recovery decreased on the order

of resin-P/microbial-P > NaOH-Pi > NaOH-Po/HCl-P. This confirms the relative order of mean residence times for the inorganic pools (resin-P, NaOH-Pi, HCl-P) and suggests that the NaOH-Po pool is very stable, with a mean residence time similar to HCl-P (years to millennia). Radioisotope recovery differed between different soils. For example, recovery was much lower in HCl-P from arid sites than from subhumid or humid sites, while drying-rewetting only had a small effect on relative radioisotope recovery. However, biological P cycling, assessed by tracing stable oxygen isotope incorporation into phosphate, decreased under drying-rewetting. Overall, results from the incubation experiment confirm the ranges for mean residence times of P pools and suggest that soil properties are more important determinants of P turnover than short-term disturbances such as drying-rewetting.

After studying soil P cycling in detail on the Kohala climatic gradient, the lessons learned were applied at the global scale to estimate mean residence times in inorganic soil P pools in a wide range of soils. This was done by re-analyzing isotope exchange kinetic and sequential extraction data from published literature. In general, the range of mean residence times of P in resin-P, NaOH-Pi, and HCl-P confirmed the estimates of mean residence times from the Kohala climatic gradient. However, there was large variability between soils. The strongest predictor of mean residence time in HCl-P was pH, where the estimated mean residence time increased from 0.75 years for pH = 4.5 to several hundred millennia for a pH of 7.5.

In conclusion, this thesis provides insights into mean residence times of P in sequentially-extracted soil phosphorus pools. Comparing our estimates of mean residence times provided here with estimates currently used in land surface models shows that existing land surface models underestimate inorganic soil P turnover by several orders of magnitude, with large consequences for model accuracy and credibility. Soil phosphorus mean residence times provided in this thesis can be used to improve these models and more accurately depict soil P cycling. This will allow more realistic predictions about future crop production capacity, water quality regulation, and terrestrial carbon sequestration in interaction with the phosphorus cycle.

Zusammenfassung

Der Phosphorkreislauf ist von zentraler Bedeutung für verschiedene Ökosystemdienstleistungen, die für das menschliche Wohlbefinden von Bedeutung sind. Darunter zählen die Nahrungsmittelproduktion, die Regulierung der Wasserqualität und die Kohlenstoffspeicherung. Um zukünftige Wechselwirkungen zwischen dem Phosphorkreislauf und Ökosystemdienstleistungen besser vorhersagen zu können, ist es erforderlich, das zeitliche Verständnis des Phosphorkreislaufs im Boden zu verbessern. In dieser Arbeit wurden neuartige isotopische und spektroskopische Methoden sowie Literaturrecherchen verwendet, um robuste Abschätzungen der mittleren Verweilzeiten von Phosphor (P) in Bodenpools zu erstellen und die Abhängigkeiten der mittleren Verweilzeiten von Bodeneigenschaften zu analysieren.

Zunächst wurde eine Ableitung zur Berechnung des P-Umsatzes in der Bodenlösung aus Parametern entwickelt, die in kinetischen Experimenten des Isotopenaustauschs gemessen wurden. Anschliessend wurde der P-Umsatz in der Bodenlösung für 217 Bodenproben berechnet, für welche die erforderlichen kinetischen Parameter in der Literatur gefunden wurden. Die Umkehrung der Umsatzrate, die mittlere Verweilzeit, lag für die meisten Bodenproben im Bereich von Millisekunden bis Sekunden, was auf einen sehr schnellen Umsatz dieses Pools schliessen lässt. Kürzere mittlere Verweilzeiten wurden für Böden gefunden, von denen bekannt ist, dass sie eine hohe P-Pufferungskapazität aufweisen, wie Andosole und Ferralsole, während Podzole tendenziell längere mittlere Verweilzeiten aufwiesen. Um den P-Zyklus auf einem für das Pflanzenwachstum relevanten Zeitmassstab zu verstehen, müssen die grösseren anorganischen und organischen Pools untersucht werden, die mit der Bodenlösung ausgetauscht werden.

Die Dynamik zwischen anorganischen und organischen Pools und der Bodenlösung wurde auf einem gut beschriebenen Modellsystem, dem Kohala-Klimagradienten auf Hawaii, analysiert. Hohe P-Konzentrationen und klare Beschränkung von bodenbildenden Faktoren erlaubten es hier, P-Pools, ihren Umsatz und die relative Bedeutung von biologischen Prozessen zu untersuchen. Hierfür wurden sequenzielle Extraktionen von P-Pools (Resin-P, Mikrobielles-P, NaOH-extrahierbares anorganisches und organisches P (NaOH-Pi und -Po) und HCl-extrahierbares P) mit P Röntgenabsorptionsspektroskopie und Isotopischen Untersuchungen kombiniert (^{33}P und ^{18}O in Phosphat). Die Isotopenaustauschkinetik deutete an, dass die mittlere Verweilzeit von Resin-P in der Grössenordnung von Minuten, NaOH-Pi in der Grössenordnung von Tagen bis Monaten und HCl-P in der Grössenordnung von Jahren

bis Jahrtausenden liegt. In Böden von ariden Standorten deutete das Sauerstoffisotopenverhältnis in Phosphat darauf hin, dass dieser Pool unter den richtigen Umgebungsbedingungen selbst nach 150'000 Jahren Bodenentwicklung stabil bleiben kann.

Drei Böden des Kohala-Klimagradienten wurden dann einem fünfmonatigen Trocknen-Wiederbenetzens-Experiment unterzogen, um die Isotopenaufnahme zu verfolgen und die Auswirkungen des Trocknens und Wiederbenetzens auf den P-Umsatz des Bodens zu bestimmen. Im Allgemeinen nahm die relative Konzentration von Radioisotopen in der Reihenfolge Resin-P / Mikrobielles-P> NaOH-Pi > NaOH-Po / HCl-P ab. Dies bestätigte die relative Reihenfolge der mittleren Verweilzeiten für die anorganischen Pools (Resin-P, NaOH-Pi, HCl-P) und legte nahe, dass NaOH-Po sehr stabil ist, mit einer mittleren Verweilzeit ähnlich wie HCl-P (Jahre bis Jahrtausende). Die Radioisotopenkonzentration unterschied sich zwischen den verschiedenen Böden. Zum Beispiel war die Radioisotopenkonzentration von HCl-P an ariden Standorten viel niedriger als an subhumiden oder feuchten Standorten, während Trocknen-Wiederbenetzen nur einen geringen Einfluss auf die relative Radioisotopenkonzentration hatte. Biologische Prozesse, welche durch den Einbau von ^{18}O in Phosphat beurteilt wurde, nahmen jedoch unter Trocknen-Wiederbenetzen ab. Insgesamt bestätigten die Ergebnisse des Inkubationsversuchs die Bereiche für die mittleren Verweilzeiten von P-Pools und wiesen darauf hin, dass die Bodeneigenschaften wichtigere Faktoren für den P-Umsatz waren als kurzfristige Störungen wie Trocknen-Wiederbenetzen.

Nach einer detaillierten Untersuchung des P-Kreislaufs auf dem Kohala-Klimagradienten wurden die gewonnenen Erkenntnisse auf globaler Ebene angewandt, um die mittleren Verweilzeiten in anorganischen P-Pools in einem breiten Spektrum von Böden abzuschätzen. Dies wurde durch erneute Analyse der kinetischen und sequentiellen Extraktionsdaten des Isotopenaustauschs aus der Literatur durchgeführt. Im Allgemeinen bestätigte der Bereich der mittleren Verweilzeiten von P in Resin-P, NaOH-Pi und HCl-P Schätzungen der mittleren Verweilzeiten aus dem Kohala-Klimagradienten. Es gab jedoch grosse Unterschiede zwischen den Böden. Unter den erklärenden Variablen, die die mittlere Verweilzeit signifikant vorhersagten, war die Beziehung zwischen der mittleren Verweilzeit von HCl-P und dem pH-Wert am stärksten. Die geschätzte mittlere Verweilzeit stieg von 0,75 Jahren für pH = 4,5 auf mehrere hundert Jahrtausende für einen pH von 7,5.

Zusammenfassend liefert diese Arbeit Einblicke in mittlere Verweilzeiten von P in sequentiell extrahierten Bodenphosphorpools. Ein Vergleich der hier angegebenen Schätzungen der mittleren Verweilzeiten mit den derzeit in Landoberflächenmodellen verwendeten Schätzungen zeigt, dass bestehende Landoberflächenmodelle den P-Umsatz von

anorganischen Böden um mehrere Grössenordnungen unterschätzen, was grosse Auswirkungen auf die Genauigkeit und Glaubwürdigkeit der Modelle hat. Die hier angegebenen mittleren Verweilzeiten von P ermöglichen die Verbesserung dieser Modelle. Dies ermöglicht realistischere Vorhersagen über die künftige Nahrungsmittelproduktion, die Regulierung der Wasserqualität und die Bindung von terrestrischem Kohlenstoff sowie die Wechselwirkungen mit dem Phosphorkreislauf.