ETH zürich

ETH Library

Highways through the soil

properties of preferential flow paths and transport of reactive compounds

Doctoral Thesis

Author(s):
Bundt, Maya

Publication date:
2000

Permanent link:
https://doi.org/https://doi.org/10.3929/ethz-a-004036424

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 NO. 13825

Highways Through the Soil

Properties of Preferential Flow Paths and Transport of Reactive Compounds

Dissertation, submitted to the
SWISS FEDERAL INSTITUTE OF TECHNOLOGY ZÜRICH
for the degree of
DOCTOR OF NATURAL SCIENCES

presented by

MAYA BUNDT
Dipl. Geoök., University of Bayreuth (Germany)
born January 25, 1971 in San Francisco, USA

accepted on the recommendation of

Prof. Dr. Hannes Flühler, examiner
Dr. Peter Blaser, co-examiner
Prof. Dr. Martin Kaupenjohann, co-examiner

Summary

Although heterogeneous water flow and solute transport is a widespread phenomenon, little is known about the chemical and biological properties of the preferential flow paths. This thesis aimed at characterizing preferential flow paths in a forest soil and at assessing the effects of a massive disturbance: an experimental wood ash application of 8 Mg ha^{-1} onto the soil surface in a forest in Unterehrendingen, Switzerland, in May 1998. Wood ash application to forests is tested as a soil amendment to replace elements exported with tree harvest and as a cheap option for disposal. We conducted dye tracer experiments to stain the preferential flow paths in the soil and sampled soil material from preferential flow paths and from the soil matrix.

The activities of the atmospherically deposited radionuclides ^{137}Cs, ^{210}Pb, $^{239,240}Pu$, ^{238}Pu, and ^{241}Am were higher in the preferential flow paths than in the matrix by factors of up to 3.5. Despite their different deposition histories, the enrichment in preferential flow paths was similar for all radionuclides. This indicates a temporal stability of preferential flow paths for more than 40 years. Furthermore, the enrichment of radionuclides in the preferential flow paths might influence the uptake by plants, because root biomass was also higher in the preferential flow paths. Taking both, radionuclide and root distribution between the two flow regions into account provides a more physical and biological basis for the calculation of plant activities with soil-to-plant transfer models than using the homogeneously mixed bulk soil activities as input parameters.

Preferential flow paths had higher concentrations of soil organic C (SOC) and total N (15 to 75%) and were significantly depleted in ^{13}C and ^{15}N relative to the soil matrix. This suggests that SOC is 'younger' in the preferential flow paths. Adding a highly enriched ^{15}N-tracer homogeneously onto the soil surface showed a higher recovery of ^{15}N in soil samples and in the fine roots from preferential flow paths than in those from the soil matrix, indicating that N cycling is more rapid in the preferential flow paths.

Distinct differences in physico-chemical properties existed between preferential flow paths and matrix. In preferential flow paths, the effective cation exchange capacity and the base saturation were higher, while the pH was similar in the two flow regions. Also, the sorption capacity for Cu was increased as compared to the matrix, whereas the

sorption capacity for Sr was similar in both flow regions. This points to enhanced sorption of organically bound heavy metals, which potentially counterbalances the enhanced transport of heavy metals by preferential flow.

Microbial biomass was 10 to 90% higher in the preferential flow paths than in the soil matrix, probably due to the better nutrient and substrate supply. Domain-specific genetic fingerprints did not reflect the differences between preferential flow paths and soil matrix, while the single genera *Pseudomonas* did. This indicates that possibly only few populations with a broad acceptance for substrates and aerobic as well as anaerobic growth specifically profit from the favorable conditions in the preferential flow paths.

The impact of the application of 8 Mg wood ash ha^{-1} on soil chemical properties was mainly restricted to the uppermost 20 cm of the soil and was negligible in the matrix. Concentrations of exchangeable Ca in the preferential flow paths increased nearly ten-fold during the six months following the wood-ash application, those of organically bound Pb by 50%. The opposite effect was found for exchangeable Al. The results show that in our study only part of the whole soil volume, approximately 50% of 0 to 20 cm depth, participated in transporting and sorbing the elements applied with the wood ash or as tracers.

In the forest soil, the concentrations of 20 polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in the organic layer were in the range of moderately polluted soils (sum of 20 PAHs: 0.8 to 1.6 mg kg^{-1}), but sum concentrations of 14 polychlorinated biphenyls (PCBs) were high (21 to 48 µg kg^{-1}) as compared to other forest soils in Central Europe. In the mineral soil, the preferential flow paths of the A-horizon were enriched with PAHs and PCBs, in particular with higher molecular compounds. The wood ash application increased the PAH concentrations in the organic layer up to a factor of 6 in the Oa horizon. In contrast, PCB concentrations decreased by a third in the Oe-horizon. The decrease was probably caused by re-mobilization of already stored PCBs due to the pH effect of the wood ash.

In conclusion, characteristics of preferential flow paths and rates of soil processes occurring within the preferential flow paths are very different from those of the matrix. This must be considered in models as well as when assessing the impacts of fertilizers or wood ash applications.

Zusammenfassung

Bis heute ist noch wenig über die chemischen und biologischen Eigenschaften von sogenannten „präferentiellen Fliesswegen" bekannt, obwohl bevorzugter Wasserfluss in den meisten Böden vorkommt. Das Ziel dieser Dissertation war es, die präferentiellen Fliesswege genauer zu charakterisieren und die Auswirkungen einer massiven Störung durch Holzascheausbringung abzuschätzen. Im Mai 1998 wurden in einem Wald im Schweizer Mittelland 8 Mg Holzasche ha^{-1} ausgebracht. Infiltrationsexperimente wurden durchgeführt, bei denen die präferentiellen Fliesswege im Boden mit einem Lebensmittelfarbstoff angefärbt wurden. Auf diese Weise konnte Bodenmaterial von den Fliesswegen und von der Bodenmatrix beprobt werden.

In den präferentiellen Fliesswegen war die Aktivität der atmosphärisch eingetragenen Radionuklide ^{137}Cs, ^{210}Pb, $^{239,240}Pu$, ^{238}Pu und ^{241}Am bis zu einem Faktor von 3,5 erhöht. Obwohl sich ihre Depostitionsgeschichte stark voneinander unterscheidet, war die Verteilung der unterschiedlichen Radionuklide zwischen Fliesswegen und Matrix ähnlich. Dieses Ergebnis deutet auf eine zeitliche Persistenz der Fliesswege von mindestens 40 Jahren hin. Die Anreicherung der Radionuklide in den Fliesswegen kann die Pflanzenaufnahme dieser Elemente beeinflussen, da auch die Wurzelbiomasse in den Fliesswegen erhöht war. Berücksichtigt man beide Phänomene, lassen sich Transfermodelle auf eine wissenschaftlich besser fundierte Basis stellen.

Die Fliesswege hatten gegenüber der Matrix erhöhte Konzentrationen an organischem Kohlenstoff und totalem Stickstoff (15 bis 75%). Ausserdem waren sie relativ zur Matrix an ^{13}C und ^{15}N abgereichert. In den Bodenproben und in den Wurzeln aus den präferentiellen Fliesswegen wurde ein höherer Anteil des gleichmässig auf die Bodenoberfläche aufgetragenen ^{15}N Tracers wiedergefunden. Diese Befunde deuten darauf hin, dass die organische Substanz in den Fliesswegen „jünger" ist als in der Matrix (bzw. mehr „frische" organische Substanz hinzukommt) und dass Stickstoff in den Fliesswegen schneller umgesetzt oder ausgewaschen wird.

Zwischen den Fliesswegen und der Matrix bestanden deutliche physico-chemische Unterschiede, z.B. waren sowohl die effektive Kationenaustauschkapazität als auch die effektive Basensättigung in den Fliesswegen signifikant erhöht. Der pH-Wert wies allerdings keinen Unterschied zwischen den Fliessregionen auf, was wahrscheinlich auf die relative Insensitivität dieses Parameters zurückzuführen ist. Die Sorptionskapazität der Fliesswege war für Cu gegenüber der Matrix erhöht, nicht jedoch für Sr. Das deutet auf eine erhöhte Sorption organisch gebundener Schwermetalle in den Fliesswegen hin

und könnte den präferentiellen Transport von Schwermetallen in den Fliesswegen ausgleichen.

Die mikrobielle Biomasse war in den Fliesswegen zwischen 10 und 90% höher als in der Matrix. Dies ist wahrscheinlich auf ihre bessere Nährstoffversorgung zurückzuführen. Mit genetischen Fingerabdrücken konnten jedoch keine Unterschiede auf Stammesebene zwischen den mikrobiellen Populationen in den Fliesswegen und in der Matrix festgestellt werden. Nur die bakterielle Gattung *Pseudomonas* sp zeigte deutliche Unterschiede in der Zusammensetzung ihrer Lebensgemeinschaft zwischen Fliesswegen und Matrix. Wahrscheinlich können sich nur wenige Gattungen mit einer sehr breiten ökologischen Nische spezifisch anpassen und von den guten Lebensbedingungen in den Fliesswegen profitieren.

Die Holzascheausbringung beeinflusste in erster Linie die Fliesswege in den oberen 20 cm des Bodens, während die Matrix relativ unbeeinflusst blieb. Die Konzentrationen austauschbaren Kalziums stiegen in den Fliesswegen um das zehnfache, die Konzentrationen organisch gebundenen Bleis um 50%. Der umgekehrte Effekt wurde für Al beobachtet. In unserer Studie standen nur etwa die Hälfte des Bodens in den oberen 20 cm für den Stofftransport und die Pufferung oder Sorption zur Verfügung.

In der organischen Auflage entsprachen die Konzentrationen an polycyklischen aromatischen Kohlenwasserstoffen (PAKs) denen von mässig belasteten Standorten (Σ20 PAK: 0.8 bis 1.6 mg kg^{-1}), während die Konzentrationen an polychlorierten Biphenylen (PCBs) im Vergleich zu anderen mitteleuropäischen Waldböden hoch waren (Σ14 PCB: 21 bis 48 µg kg^{-1}). Die präferentiellen Fliesswege wiesen höhere Gehalte an organischen Schadstoffen auf als die Matrix. Nach der Holzascheausbringung erhöhten sich die PAK Konzentrationen in einzelnen Horizonten der organischen Auflage um bis zu einen Faktor von 6, während die PCB Konzentrationen um ein Drittel abnahmen. Diese Abnahme kann wahrscheinlich auf einen Mobilisierungseffekt durch die Erhöhung des pH-Wertes und durch verstärkte Mineralisierung nach der Aschedüngung zurückgeführt werden.

Die präferentiellen Fliesswege und die Bodenmatrix haben sehr unterschiedliche Eigenschaften und Prozessraten. Dies muss sowohl in der Stofftransportmodellierung als auch bei der Abschätzung der maximalen Ausbringmengen von Dünger, Kalk oder Holzasche beachtet werden.