

Diss ETH No. 13919

**Nitrogen Dynamics and Leaching
from Humus-Rich and Tile-Drained Agricultural Soil**

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

presented by

BARBARA SCHMIED
Dipl. Ing. Agr., ETH Zürich
born 22 April 1951
citizen of Niederwichtrach BE

Prof. Dr. Rainer Schulin, examiner
Prof. Dr. Urs Schmidhalter, co-examiner
Prof. Dr. Emanuel Frossard, co-examiner

2001

Summary

The wetland soils in the basin of the Furttal valley, north of Zürich, Switzerland, were reclaimed in 1920's and brought under cultivation. The humus-rich soils of the valley have since been under intensive arable production and vegetable gardening, and hence, suspected of being a major source of N input to the Furtbach creek, especially during the growing season. The aim of the current research study was to test the hypotheses that the mineralisation of the organic matter in the drained humus-rich soils is the major source of nitrogen export and that the mineralised nitrogen is transported rapidly through the preferential flow paths and via the subsurface drainage system to the Furtbach creek. Thus, substantial N export through the drainage system may occur during periods of low groundwater table and high temperatures.

The most important results of the current research are summarised as follows:

Field studies of N fluxes

Field studies showed that during the growing season of 1996 the net mineralised nitrogen in two tile drained fields with different crops were about 150 and 300 kg N ha⁻¹ in the main root horizon from 0-40 cm depth. Contrary to the expectations, *ex situ* mineralisation studies using undisturbed soil cores indicated that net N mineralisation from the "fossil" organic matter in the subsoil was of minor importance. This is because the soil investigated is in transition from a wetland to a mineral soil and only few places exist where the humus rich layer still reaches to about 100 cm in thickness. It was estimated that about 8 kg N ha⁻¹ y⁻¹ was released from the 40-70 cm subsoil layer.

Monitoring the outflow of different drainage subsystems showed that annual N exports via drain varied between 12 and 31 kg N ha⁻¹ y⁻¹ of which a substantial portion (20-60%) was leached during the 6-month period from May through October. Since mineral N in these soils mainly accumulated in the spring before plant uptake became effective, the risk of N leaching was very high at the beginning of the vegetation period.

Although subject to a high degree of uncertainty in estimation, net N mineralisation and plant N uptake were found to be the most important N fluxes. In comparison, N losses via drain were small, that is after a 17-month monitoring period, about 5-7% of plant N uptake and 3-10% of net N mineralisation. However, they were not negligible for the water quality of the Furtbach.

Modelling mineral N dynamics in the field

It was possible to successfully describe the water and mineral N dynamics of the investigated field soil by using inverse modelling to identify the model parameters. Addressing the inherent modelling uncertainties, the concept of ‘conditioned parameter distributions’ was introduced as a more appropriate alternative to ‘best-fit’ parameters. In this study measured pressure heads and nitrate concentrations were used to estimate 12 hydraulic parameters and up to 14 nitrogen turnover related parameters. Most of the measurements in three soil layers fell within the 95% confidence interval of the Bayesian distribution. Some observed pressure heads corresponding to intense rainfall events and periods of soil freezing were exceptions, as well as some high nitrate concentrations in the subsoil between 40 and 70 cm depth. The discrepancies were attributed to processes that were not addressed by the simulation model, such as freezing and short-circuiting due to macropore flow.

The results suggest that this approach may be a promising tool not only for modelling well-controlled lab experiments, but also for field ecosystems.

Modelling net N mineralisation

Using net N mineralisation rates determined in *ex situ* incubation experiments of undisturbed subsoil cores in combination with an empirical moisture and temperature response function provided a good description of the observed fluctuations of mineral N in the field. To describe the net N mineralisation below the plough layer (20-40 cm depth), it was sufficient to assume a single “humus” pool. For the topsoil (0-20 cm) it was necessary to account for an additional “litter” pool with a higher turnover rate.

The two-pool model resulted in a fair description of the overall net N mineralisation in 0-40 cm depth, but did not honour the observed dynamics in the topsoil, dominated by litter turnover. This may be due to the upward movement of capillary water evaporating at the soil surface leading to nitrate accumulation and, thus, to an overestimation of measured NNM in the uppermost layer. However, the mineralisation model applied did not account for N transport. In addition, it may be needed to include greater differentiation of fast decomposing organic matter pools and factors affecting decomposition rates in the surface layer, such as short-time wetting-drying processes.

The calibrated two-pool model estimated that about 340 kg N ha⁻¹ were mineralised during the experimental year in the upper 40 cm of the soil, of which about 50% derived from the fast decomposing material.

Transport characteristics of solutes depending on initial moisture and application mode

The hypothesis was tested that the leaching characteristics may strongly depend on the way solutes are applied to the soil, in particular if the soil is dry at the beginning of infiltration. Two leaching experiments were conducted with undisturbed soil monoliths taken from the study site. One monolith was initially wet, the other dry, when infiltration started and three mobile tracers (deuterium (D), bromide (Br) and chloride (Cl)) were applied, each in a different way, that is by the infiltrating water (D), placed on the soil surface (Br), and injected in the soil matrix at 5 cm depth (Cl). Elution curves were almost identical for Br and Cl under initially wet conditions, whereas the displacement of Br was faster than that of Cl in the initially dry column. Apparently, a large fraction of Cl had been bypassed in the initial phase of infiltration in the initially dry column, indicating a higher degree of flow through preferential paths. An important practical implication of these findings to a field situation for the application of nitrate fertilisers is that if the fertiliser is applied shortly before a rainfall event to dry soils, then there is a higher risk of leaching than if the fertiliser is placed within the soil or applied to a wet soil. This assumption also holds for mineral N released from organic matter decomposing at the soil surface.

Application of the steady-state transport models using the CXTFIT code led to reasonable descriptions of the observed elution curves under initially moist conditions, which were not far from steady-state equilibrium of the infiltration. For the initial dry column, neither a equilibrium nor a non-equilibrium model assuming steady-state flow could adequately described the experimentally observed leaching characteristics of chloride. To some degree, this was probably due to the inadequate description of the initial distribution of resident solutes, since the simulation codes used in this study automatically assume equilibrium between mobile and immobile regions as conditions for solutes initially present in the columns. Even a model allowing for transient and macropore flow and, thus, also for more flexibility with respect to the initial conditions, was not able to fully cope with the change of transport conditions in the initially dry column at the beginning of the infiltration.

Zusammenfassung

Die Ried- und Moorböden in der Talsohle des schweizerischen Furttals, nördlich von Zürich, wurden in den 1920er Jahren künstlich entwässert. Seither werden die humusreichen Böden des Tales intensiv für den Acker- und Gemüsebau genutzt. Die Frage stellte sich, inwieweit diese Böden für die Stickstoffeinträge in den Furtbach, vor allem während der Vegetationsperiode, verantwortlich sind. Mit vorliegender Studie werden folgende Hypothesen getestet: In den Böden der dränierten ehemaligen Feuchtgebiete ist die Mineralisation der organischen Substanz die Hauptquelle der Stickstoffbelastung des Furtbachs. Der Transport des mineralischen Stickstoffs im Boden wird durch schnelle (präferenzielle) Flüsse begünstigt, so dass er via Dräne rasch in die Vorflut ausgetragen wird. Infolgedessen können insbesondere in Perioden mit tiefen Grundwasserständen und hohen Temperaturen beträchtliche N Exporte entstehen.

Die wichtigsten Ergebnisse dieser Studie lassen sich wie folgt zusammenfassen:

Stickstoffdynamik im Feld

Im Hauptwurzelraum (0-40 cm Tiefe) von zwei unterschiedlich bewirtschafteten Parzellen wurden während der Vegetationsperiode 1996 netto rund 150 bzw. 300 kg N ha⁻¹ mineralisiert. Die N-Nettomineralisation aus dem ‚fossilen‘ Material des Unterbodens war hingegen gering. Letzteres ist vor allem darauf zurückzuführen, dass die ehemaligen Ried- und Moorböden des Untersuchungsgebiets sich im Übergangsstadium zu mineralischen Böden befinden, und die humusreichen Schichten sich nur noch an einigen wenigen Stellen bis in tiefere Bodenschichten erstrecken. Aufgrund von *ex situ* Mineralisationsstudien mit ungestörten Bodenproben wurde für die Tiefe von 40-70 cm eine jährliche Stickstofffreisetzung von rund 8 kg N ha⁻¹ berechnet.

Die Überwachung des Abflusses verschiedener Dränabteile zeigte, dass die mittleren mineralischen N Exporte im Bereich von 12 und 31 kg N pro ha⁻¹ a⁻¹ lagen. Davon wurde ein beträchtlicher Anteil (20-60%) während des Sommerhalbjahres von Mai bis Oktober beobachtet. Da der mineralische Stickstoff (N_{min}) im Boden vor allem im Frühjahr bis zum Einsetzen einer effizienten Pflanzenaufnahme akkumulierte, war sein Auswaschungsrisiko zu Beginn der Vegetationsperiode besonders gross.

Trotz des hohen Unsicherheitsbereichs der geschätzten Flussgrößen waren die N-Nettomineralisation und die N-Aufnahme der Kulturen die dominierenden Bilanzgrößen. Im

Vergleich dazu fielen die N-Verluste via Dräne gering aus: Nach einer 17-monatigen Überwachungsperiode betrugen diese nur 5-7% der Pflanzenaufnahme und 3-10% der N-Nettomineralisation. Trotzdem stellten sie für den Furtbach eine relevante Beeinträchtigung der Wasserqualität dar.

Modellierung der Dynamik des mineralischen Bodenstickstoffs im Feld

Mithilfe der inversen Modellierung konnte der Wasserhaushalt und die Nmin-Dynamik im Feld erfolgreich beschrieben werden. Im Hinblick auf die Unsicherheit der Modellparameter wurde das Konzept der "konditionierten Parameterverteilung" als bessere Alternative zu den "bestgefitteten Parameter" eingeführt. In vorliegender Studie wurden die in drei Tiefen gemessenen Wasserpotentiale und Nitratkonzentrationen verwendet, um 12 hydraulische Parameter und bis zu 14 Parameter der Stickstofftransformation zu schätzen. Die meisten Messungen fielen in das resultierende 95%-Vertrauensintervall der Bayesian'schen Verteilung. Nur einige der - nach intensiven Regenfällen oder in Frostperioden - gemessenen Wasserpotentiale und wenige Nitratkonzentrationen im Unterboden in 40-70 cm Tiefe lagen ausserhalb dieses Intervalls. Die Diskrepanzen zwischen Messung und Simulation wurden darauf zurückgeführt, dass Prozesse wie Gefrieren und Makroporenfluss nicht im Modell enthalten waren.

Aufgrund der Ergebnisse empfiehlt sich der hier verwendete Ansatz als vielversprechendes Vorgehen nicht nur bei der Modellierung von gut kontrollierten Laborexperimenten, sondern auch im Falle von Agrarökosystemen.

Modellierung der Stickstoffnettomineralisation

Auf der Grundlage von *ex situ* bestimmten Raten der Stickstoffnettomineralisation (NNM) und ihrer Feuchtigkeits- und Temperaturabhängigkeit wurden die über drei Tiefen beobachteten Veränderungen des Nmin-Gehaltes *in situ* gut beschrieben. Zur Beschreibung der NNM unterhalb der Pflugsohle (20-40 cm Tiefe) genügte es, einen einzigen „Humuspool“ anzunehmen. Für den Oberboden (0-20 cm Tiefe) musste hingegen ein zusätzlicher Pool an organischer Substanz mit einer höheren Abbaurate („Streupool“) eingeführt werden.

Dieses Zwei-Pool-Modell konnte die N Mineralisation für den Hauptwurzelraum insgesamt (0-40 cm Tiefe) gut wiedergeben, nicht jedoch die durch den Streuabbau dominierte Dynamik im Oberboden. Letzteres kann unter anderem damit erklärt werden, dass der mineralische Stickstoff im Feld in Form von Nitrat mit dem aufsteigenden Kapillarwasser nach oben transportiert wurde und aufgrund der Evaporation an der Bodenoberfläche akkumulierte. Dieses Phänomen würde die Diskrepanz zwischen Messung und Modellierung erklären, da es zur Überschätzung der NNM in der obersten

Bodenschicht führen kann und ein Stofftransport im Mineralisationsmodell nicht berücksichtigt wurde. Möglicherweise muss auch eine grössere Differenzierung des schnell abbauenden organischen Materials im Oberboden und der Einfluss der kurzfristigen Feuchtigkeits- und Temperaturschwankungen auf die verschiedenen Umsatzraten in die Modellierung mit einbezogen werden.

Aufgrund des kalibrierten Zwei-Pool-Modells wurde die jährliche NNM in den oberen 40 cm des Untersuchungsstandortes auf rund 340 kg N ha⁻¹ geschätzt. Rund 50% davon stammte aus dem schnell abbaubaren Pool.

Charakteristik des Stofftransports in Abhängigkeit der Bodenfeuchte und der Stoffapplikation

Die Hypothese wurde getestet, dass der Stofftransport stark von der Ausbringungsart der Stoffe abhängt, insbesondere bei trockenen Anfangsbedingungen. Dazu wurden Auswaschungsexperimente mit zwei Bodenmonolithen aus dem Untersuchungsgebiet durchgeführt. Drei mobile Tracer (Deuterium (D), Bromid (Br) und Chlorid (Cl)) wurden auf verschiedene Weise ausgebracht, nämlich im Beregnungswasser (D), salzformig auf die Bodenoberfläche gestreut (Br) und gelöst in 5 cm Tiefe eingespritzt (Cl). Zu Beginn der Beregnung unterschieden sich die beiden Monolithen zudem in ihrer Bodenfeuchte (nass/trocken). Die Austragskurven im anfänglich nassen Monolithen waren für Br and Cl nahezu identisch, während Br in der anfänglich trockenen Bodensäule rascher als Cl verlagert wurde. In der Anfangsphase wurde offenbar ein grosser Anteil des Chlorides im trockenen Boden umflossen, was darauf hindeutet, dass das infiltrierende Wasser vermehrt über präferentielle Fliesswege in die Tiefe gelangte. Für die Praxis bedeutet dieses Resultat, dass Mineraldünger, der kurz vor einem Niederschlag auf trockene Böden appliziert wird einem höheren Auswaschungsrisiko unterliegt als wenn er in oder auf einen nassen Boden ausgebracht wird. Dies gilt auch für Nitrat, das aus der Mineralisation von organischem Material an der Bodenoberfläche stammt.

Im Falle der anfänglich nassen Bodensäule konnte mit Hilfe eines steady-state Transportmodells (CXTFIT Code) eine zufriedenstellende Übereinstimmung zwischen simulierten und gemessenen Tracerkonzentrationen im Abflusswasser erzielt werden. Offenbar beeinflusste die anfängliche Zustandsänderung der Bodenfeuchtigkeit den Transportprozess wenig, was auf einen annähernd stationären Zustand schliessen lässt. Dasselbe Model konnte die Austragskurven im anfänglich trockenen Bodenmonolithen hingegen nicht beschreiben, weder unter der Bedingung eines chemisch-physikalischen Gleichgewichts noch mit Hilfe eines Zwei-Regionen-Modells. Möglicherweise ist das teilweise auf die mangelhafte Beschreibung der Anfangsverteilung der Stoffe im Boden

zurückzuführen, da das verwendete Simulationsmodell automatisch Gleichgewicht zwischen der mobilen und der immobilen Region annimmt. Jedoch konnte auch ein Modell, das transiente Bedingungen und Makroporenfluss und demzufolge mehr Flexibilität bezüglich der Anfangsbedingungen zulässt, die sich verändernden Transportbedingungen in der anfänglich trockenen Bodensäule nicht zufriedenstellend beschreiben.