



Doctoral Thesis

**Analysis of flow patterns  
the influence of soil compaction and soil structure on the  
infiltration pathways of dye tracer solutions and the quantitative  
evaluation of flow patterns**

**Author(s):**

Kulli Honauer, Beatrice

**Publication Date:**

2002

**Permanent Link:**

<https://doi.org/10.3929/ethz-a-004437447> →

**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. 14658

## **Analysis of Flow Patterns**

*The influence of soil compaction and soil structure on the infiltration pathways of dye tracer solutions and the quantitative evaluation of flow patterns.*

A dissertation submitted to the  
SWISS FEDERAL INSTITUTE OF TECHNOLOGY  
for the degree of Doctor of Natural Sciences

presented by  
BEATRICE KULLI HONAUER  
Dipl. Sci. Nat. ETHZ

born April 2. 1970  
citizen of Olten and Solothurn

accepted on the recommendation of

Prof. Hannes Flühler, examiner  
Prof. Rainer Schulin, co-examiner  
Prof. Philippe Baveye, co-examiner

Zürich, 2002

# Summary

Infiltration patterns visualized by means of dye tracers provide information about the flow regime in a given soil under given boundary and initial conditions. The tracer distribution in the soil is affected by the soil structure and in particular the sequence of soil horizons. Soil compaction may remarkably change soil structure and the continuity of the pore network.

The goal of this thesis was (i) to find out how soil compaction affects water infiltration patterns, (ii) to link soil properties, in particular its layering structure, with types of flow patterns, and (iii) to develop a method for a quantitative analysis and comparison of flow patterns.

Compaction modifies the pore system, often by reducing the pore volume or by destroying the structure. As a consequence, not only pre-consolidation load, bulk density or porosity are changed, but also the transport properties of the soil. The effects of heavy vehicle traffic on the infiltration patterns of dye tracer solutions were studied at different sites under vehicles equipped with caterpillar tracks and vehicles on wheels. The influences of soil compaction made visible by the tracer infiltration images were then compared with effects found by laboratory measurements (bulk density, porosity and pre-consolidation load).

The results show that in most of the cases there is a good agreement between effects found on the basis of soil mechanical measurements and flow patterns. The pre-consolidation load was found to be a good indicator to predict soil stability and the bulk density was sensitive for detecting compaction effects.

The experiment showed that soil mechanical measurements may provide information about how compaction propagates with depth whereas infiltration patterns showed the changes of the water infiltration pathways caused by soil compaction. At one site, which was trafficked with a sugarbeet harvester, soil compaction led to an increased preferential flow regime. After compaction, the fine pore structures in the topsoil were locked up and no longer available for water infiltration. The water was ponding on the surface and preferentially entering open worm burrows, bypassing the main root zone.

Most of the tracer experiments were conducted with Brilliant Blue as a tracer and by comparing the flow patterns of trafficked with non-trafficked plots. However, the spatially variable soil structure makes it difficult to compare the flow patterns of neighbouring plots quantitatively. Comparing the flow patterns before and after compaction at one and the same plot overcomes this basic experimental difficulty of discriminating treatment effects from between-plot variability. Therefore, an experiment was carried out with two fluorescent tracers applied onto the same plot, one before and the other after controlled compaction with a heavy vehicle. The distributions of the two dyes in the excavated soil profiles were photographed separately using a digital camera and a light source, both equipped with tracer-specific filters. The superposition of the two flow patterns shows the effect of the compaction treatment directly. This method is more sensitive than experiments using a single tracer and the quantification of the differences is easier, because the flow patterns can be compared one-to-one.

However, it is technically less demanding and less costly to use the single tracer technique. This technique requires the analysis of numerous images of patchy stained profiles. To compare such images objectively is one major focus of this thesis. Therefore, we wanted to develop a quantitative method to analyze the spatial distribution of the stained areas in vertical profiles and to link the characteristics of these patterns with soil properties, in particular its structure. Since soil layers strongly affect the infiltration patterns we first divided the flow patterns into layers of similar patterns. All layers found at several sites were then partitioned into groups of similar layers by hierarchical clustering. This classification reliably distinguishes between a homogeneous infiltration and preferential flow regime, but also between zones of pronounced preferential flow and zones of lateral spreading, e.g. sand or gravel lenses. The dye coverage and the mean width of the stained structures were the most indicative characteristics for the different clusters. We found good agreement between the sequences of layers found in the flow patterns and the soil horizons.

# Zusammenfassung

Infiltrationsmuster von Farbtracern in vertikalen oder horizontalen Bodenprofilen geben Aufschluss über das Transport Regime im Boden bei bestimmten Anfangs- und Rahmenbedingungen. Die Tracerverteilung im Boden wird durch die Bodenstruktur beeinflusst, insbesondere durch die Abfolge der Bodenhorizonte. Bodenverdichtung verändert die Struktur und Kontinuität des Porensystems. Das Ziel dieses Doktorats war (i) den Einfluss von Bodenverdichtung auf die Infiltrationsmuster von Farbtracern zu untersuchen, (ii) den Einfluss der Bodenstruktur auf die Fliessmuster zu untersuchen und einen Zusammenhang zwischen bestimmten Bodenhorizonten und Fliessmustertypen herzustellen und (iii) eine quantitative Methode zur Analyse und zum Vergleich von Fliessmustern zu entwickeln.

Bodenverdichtung verändert das Porensystem häufig durch eine Reduktion des Porenraums oder durch eine Zerstörung der Struktur. Dadurch werden nicht nur bodenmechanische Parameter wie Lagerungsdichte, Vorbelastung oder Porosität verändert, sondern auch die Transporteigenschaften des Bodens. Der Effekt von Befahrungen auf die Infiltrationsmuster der Tracerlösung im Boden wurde an verschiedenen Standorten unter Raupen- und Radfahrzeugen untersucht. Verdichtungseffekte, die anhand der Tracerbilder festgestellt wurden, wurden dann mit bodenmechanischen Messungen verglichen.

Die Resultate zeigen in den meisten Fällen eine gute Übereinstimmung zwischen den beiden Methoden. Die Vorbelastungsmessungen gaben Aufschluss über die Verdichtungsempfindlichkeit eines Bodens geben und , wie die Lagerungsdichte, sensitiv den Effekt einer Befahrung zeigt. Die bodenmechanischen Messungen gaben Aufschluss über die Tiefenwirkung der Verdichtung, während die Infiltrationsmuster die durch die Bodenverdichtung verursachten Veränderungen der Fliesswege zeigten. Ein Befahrungsversuch mit einem Zuckerrübenvollernter führte zu einer Zunahme des präferenziellen Transportes im Boden. Nach der Verdichtung war das feine Porennetzwerk im Oberboden nicht mehr am Transport beteiligt. Das Wasser staute sich auf der Bodenoberfläche und floss durch einige vertikale Wurmgänge schnell in grosse Tiefe, wobei der Hauptwurzelraum umflossen wurde.

Die meisten Farbtracerexperimente dieser Studie wurden mit dem Farbstoff 'Brilliant Blue' durchgeführt, wobei die Fliessmuster in befahrenen und unbefahrenen Versuchsflächen miteinander verglichen wurden. Das Vergleichen von Fliessmusterbildern verschiedener Plots wird jedoch durch die räumliche Variabilität der Bodenstruktur und damit der Fliessmuster erschwert. Der Vergleich von Fliessmustern vor und nach der Befahrung auf derselben Fläche wäre wesentlich einfacher. Deshalb wurde ein weiteres, methodologisch orientiertes Experiment durchgeführt, bei dem zwei Fluoreszenztracer auf dieselbe Versuchsfläche appliziert wurden, einer vor und einer nach der Befahrung. Die Verteilungen der beiden Farbstoffe konnte mit Hilfe einer digitalen Kamera und tracerspezifischer Filterung des Lichtes unabhängig voneinander aufgenommen werden. Die Überlagerung der beiden Fliessmuster zeigte den Effekt der Verdichtung direkt. Diese Methode ist empfindlicher als der Vergleich von Fliessmustern aus verschiedenen Versuchsfläche, da die Muster eins-zu-eins verglichen werden können und der Effekt nicht durch die räumliche Variabilität der Muster gestört wird.

Für Routineversuche ist die Applikation von einem Farbtracer und der Vergleich von Fliessmustern verschiedener Flächen jedoch einfacher und weniger kostspielig. Das Ergebnis sind zahlreiche Infiltrationsmuster, entweder von ein und derselben Versuchsfläche, von verschiedenen Plots oder von verschiedenen Standorten. Solche Muster objektiv zu vergleichen ist ein weiteres Ziel dieser Arbeit.

Wir wollten eine quantitative Methode zur Analyse der räumlichen Verteilung der gefärbten Bereiche in den vertikalen Bodenprofilen entwickeln und anschliessend die Eigenschaften dieser Muster mit der Bodenstruktur verknüpfen. Da die Fliessmuster stark von der Schichtung des Bodens beeinflusst werden, wurden sie zuerst in Schichten eingeteilt. Alle Schichten der Fliessmuster von 25 Versuchsflächen an 8 Standorten wurden dann mit Hilfe hierarchischer Clusterbildung in Gruppen ähnlicher Schichten eingeteilt. Die Gruppen unterschieden zuverlässig zwischen Horizonten mit homogener Infiltration und Horizonten mit präferenziellen Fliesswegen, aber auch zwischen Zonen mit ausgeprägtem präferenziellem Fluss und Zonen mit lateraler Ausbreitung des Tracers, wie zum Beispiel Sand- oder Kieslinsen. Der Farbbedeckungsgrad und die mittlere Breite der der gefärbten Strukturen waren

die Faktoren, die die Cluster am stärksten unterschieden. Wir fanden eine gute Übereinstimmung zwischen der Schichtabfolge der Fließmustern und derjenigen der Bodenhorizonte.