

Diss. ETH No. 12868

Identification of Runoff Processes in Catchments with a Small Scale Topography

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

presented by

HANS MARIA JOZEF FEYEN
Ir., Faculty of Agricultural Sciences, Catholic University of Leuven (BE)
born November 14, 1970
Belgium

accepted on the recommendation of

Prof. Dr. Hannes Flühler, examiner
Prof. Dr. Paolo Burlando, co-examiner
Dr. Andreas Papritz, co-examiner
Prof. Dr. Andrea Rinaldo, co-examiner

1998

Abstract

This thesis presents a study on the generation of runoff from prealpine catchments at three spatial scales. The study was part of the Nitrogen Saturation Experiments (NITREX), a European project on the cycling of nitrogen in forest ecosystems. On the Swiss NITREX site in the Erlenbach catchment (Alptal valley, canton of Schwyz), the nitrogen deposition onto forested sub-catchments (1500 m²) delineated by trenches was experimentally increased, and its transfer into the soil and vegetation and the losses by runoff and denitrification were investigated. Preliminary results of the nitrogen budget strongly suggested that the nitrate losses of the sub-catchment were hydrologically controlled. To obtain detailed information on the effect of runoff processes on nitrogen turnover, we monitored the fluxes of water and dissolved solutes from the sub-catchments, from the Erlenbach headwater catchment (0.7 km²) and from two isolated soil plots (13 m²). The Erlenbach is a steep (20 percent) and narrow catchment, with a network of drainage trenches connected to permanent brooks in deeply incised gorges. Two sub-catchments are forested, the third is a wetland. In the forested sub-catchments, closely linked to the topography, two soil types predominate: a wet muck humus soil in small depressions and a better drained mor humus soil on mounds and ridges. On the wetland sub-catchment only the muck humus occurs. The soil plots, which represent these two soil types, were instrumented to monitor the outflow at three depths and the moisture status of the different soil layers. On the soil plots, we carried out controlled irrigation and tracer experiments as well as observations under natural boundary conditions. By comparing the dominating runoff processes at all scales, we studied the effect of vegetation, soil type distribution and drainage area on the runoff generation.

To identify the runoff dynamics, we estimated linear discrete transfer functions from water input and outflow measurements. Before estimating the transfer functions, the data series were linearized by means of the following approach. First, we fitted a linear transfer function with parameters which were allowed to vary in time to the observed data. The fitting procedure we applied based on Kalman filtering and fixed interval smoothing techniques. Then, the parameter which describes the hydrological gain (i.e. the amount of runoff caused by one unit of water input) was compared to additional data characterizing the water regime of the soils. Since the level of the groundwater correlated best with the time variable gain, this variable served to transform the measured precipitation nonlinearly into an effective precipitation. From the linearized rainfall-runoff data we estimated linear transfer functions with constant parameters, which could be given a physical interpretation. To obtain unbiased parameter estimates, we employed a recursive and iterative instrumental variable method. To

avoid overparameterization, we selected the model structure (i.e. number of parameters of the transfer functions) based on an information criterion. This procedure was applied to data from the irrigation experiments on the soil plots and to rainfall-runoff measurements on the soil plots (13 m²), the sub-catchments (1500 m²) and the Erlenbach headwater catchment (0.7 km²). To locate the pathways of the runoff processes in the soil plots, we performed tracer experiments under a controlled water regime. To unravel the effect of the various soil horizons on the runoff dynamics, Cl⁻ and Br⁻ tracers were applied onto the soil surface and also injected below ground at the interface between the upper humus layer and the gleyic subsoil of both plots. Water sampled at the outflow of the plot, sub-catchments and headwater catchment allowed to quantify the ratio of event or pre-event water in the runoff.

On the soil plots, runoff reacted generally very fast to rainfall or irrigation water inputs. On the wet muck humus plot, few but large macropores in the gleyic subsoil contributed substantially to the runoff generation. On the better drained mor humus plot, the tracer recovery and the runoff ratio were higher, but the runoff dynamics of the flow processes were clearly slower. We attributed this to the effect of the better structured subsoil of this plot. On both soil plots, water entering through the subsoil contributed considerably to the runoff generation during rainfall events. At the same time, large quantities of water drained from the soil plots as deep seepage without directly contributing to the outflow.

Despite the different vegetation and soil type distribution, the runoff dynamics were very similar in all sub-catchments. Thus, it was not the abundance of the mor and muck humus soil which determined the characteristics of the runoff, but rather the spatial arrangement of the muck humus zones and the presence of waterlogged areas. All sub-catchments reacted faster to rainfall than the smaller soil plots, which was likely due to the presence of waterlogged areas. The electrical conductivity indicated, particularly during peak runoff, that the residence time of rainwater in the sub-catchments was very limited. Furthermore, the contribution of the mor humus areas to the sub-catchment runoff was very limited.

Regardless of the larger area of the headwater catchment, the dynamics of the runoff processes resembled those of the sub-catchments closely. The transfer functions and the electrical conductivity measurements indicated that two flow components added to the runoff. The slow component had an electrical conductivity comparable to that of the runoff of the mor humus soil plot. It passed through the macropores of the subsoil which contributed directly to the main brook of the Erlenbach catchment. The fast component originated from wet or waterlogged muck humus areas and was rapidly routed to the brooks by the drainage trenches.

The identified flow processes in the sub-catchments agree well with the preliminary nitrogen budget. Because of the short residence time of water and solutes, nitrate may not be removed from the rainwater by the slow microbial activity. Still, the contact time may be sufficient to retain the ammonium by the much faster adsorption process.

Kurzfassung

Diese Arbeit präsentiert eine Untersuchung zur Abflussbildung in voralpinen Einzugsgebieten auf drei räumlichen Skalen. Sie wurde im Rahmen des NITREX Projektes (Nitrogen Saturation Experiments) durchgeführt, ein Europäisches Projekt, das den Stickstoffkreislauf in Waldökosystemen untersucht. Im Erlenbach Einzugsgebiet (Alptal, Kanton Schwyz) wurde der Stickstoffeintrag in bewaldeten Teileinzugsgebieten künstlich erhöht, um die Stickstoffumsetzung im Boden, die Aufnahme durch die Vegetation sowie die Austräge durch Abfluss und als Denitrifikation zu untersuchen. Erste Ergebnisse zeigten, dass die Stickstoffausträge aus den Teileinzugsgebieten durch hydrologische Prozesse gesteuert werden. Um detailliertere Informationen über den Einfluss der Abflussprozesse auf den Stickstoffkreislauf zu erhalten, beobachteten wir in den Teileinzugsgebieten (1500 m^2), im Erlenbach Einzugsgebiet (0.7 km^2) und auf zwei isolierten Flächen (13 m^2) die Abflüsse und die darin gelösten Stoffe. Das Erlenbach Einzugsgebiet umfasst einen schmalen, steilen Hang (20 Prozent) und wird von Abflussgräben durchzogen. Diese münden in tief eingeschnittene Bachläufe. Die Teileinzugsgebiete wurden durch 80 cm tiefe Gräben abgetrennt. Zwei Teileinzugsgebiete sind bewaldet, das dritte ist eine feuchte Wiese. In den bewaldeten Teileinzugsgebieten treten in Abhängigkeit von der Topographie zwei Humusformen auf: ein nasser Anmoor Humus in Senken und ein gut drainierter Rohhumus auf Kuppen. In der feuchten Wiese kommt nur Anmoor Humus vor. Die 13 m^2 grossen isolierten Flächen wurden in je einer dieser Humusformen eingerichtet um den Abfluss und die Bodenfeuchte in verschiedenen Tiefen zu erfassen. Auf diesen Flächen führten wir unter kontrollierten Randbedingungen Bewässerungs- und Tracerexperimente durch und beobachteten das Verhalten des Systems bei natürlichen Niederschlagsereignissen. Um die Auswirkungen der Vegetation, der Humusform und der Gebietsgrösse auf die Abflussbildung bestimmen zu können, verglichen wir die Abflüsse auf allen drei Skalen.

Zur Identifikation der Abflussdynamik schätzten wir lineare diskrete Transferfunktionen von den Wasserinput- und Abflussmessungen. Bevor wir die Transferfunktionen schätzen konnten, wurden die Daten folgendermassen linearisiert: zuerst schätzten wir eine lineare Transferfunktion mit zeitabhängigen Parametern ausgehend von den erhobenen Daten. Dieses Schätzverfahren basiert auf dem Kalman Filter und auf Glättungsalgorithmen. Danach verglichen wir die zeitabhängigen Parameter mit zusätzlichen Messungen zum Wasserhaushalt. Weil die Grundwassertiefe am besten mit dem hydrologischen Gewinn (i.e. die Abflusszunahme, die durch eine Einheit Wasserzufuhr verursacht wird) korrelierte, verwendeten wir diese Grösse, um die gemessenen Niederschläge in effektive Niederschläge umzuwandeln.

Von den so linearisierten Niederschlags- und Abflussdaten schätzten wir erneut lineare Transferfunktionen, die wir physikalisch interpretieren können. Damit systematische Abweichungen der geschätzten Parameter vermieden werden, benutzten wir einen auf Hilfsvariablen basierenden rekursiven und iterativen Schätzalgorithmus. Die Struktur der Transferfunktion (d.h. die Anzahl Parameter) wurde anhand eines statistischen Kriteriums bestimmt. Dieses Verfahren wendeten wir auf die Daten der Bewässerungsexperimente und auf die Daten zu natürlichen Abflussereignissen auf allen drei Skalen an. Zusätzlich führten wir Tracerexperimente auf den isolierten Flächen durch, um die Fließwege des Wassers zu lokalisieren. Wir applizierten Cl^- und Br^- an der Bodenoberfläche und in der Tiefe, um die Auswirkung unterschiedlicher Bodenhorizonte auf die Abflussdynamik zu charakterisieren. Über die elektrische Leitfähigkeit der Abflüsse auf allen drei Skalen quantifizierten wir den direkten Beitrag des Niederschlags zu den Abflüssen.

Der Abfluss der isolierten Flächen reagierte schnell auf Niederschlag oder Bewässerung. Im nassen Anmoor Humus trugen vereinzelte Makroporen wesentlich zum Abfluss bei. Die Wiederfindungsrate für Wasser und Tracer war zwar höher im Rohhumus, die Abflussbildung war jedoch wesentlich langsamer. Wir führten dies auf den besser strukturierten Unterboden der Rohhumusfläche zurück. Auf beiden Flächen flossen während natürlichen Niederschlagsereignissen nicht unerhebliche Wassermengen unterirdisch aus angrenzende Gebieten zu; gleichzeitig aber sickerten grössere Wassermengen in tiefere Bodenschichten, ohne zum Abfluss beizutragen.

Trotz der unterschiedlichen Verteilung von Vegetation und Humusformen war die Abflussdynamik der Teileinzugsgebiete ähnlich. Daraus folgt, dass nicht der Flächenanteil an Anmoor oder Rohhumus sondern deren räumliche Anordnung und die Anwesenheit wassergesättigter Gebiete die Abflussbildung bestimmte. Die Reaktion der Teileinzugsgebiete auf Regenereignisse war schneller als diejenige der isolierten Flächen, was wir ebenfalls auf die Präsenz wassergesättigter Gebiete zurückzuführen. Die elektrische Leitfähigkeit der Abflüsse zeigte zudem, dass die Verweilzeit des Niederschlagswassers in den Teileinzugsgebieten sehr gering und der Beitrag der Rohhumusgebiete zum Abfluss limitiert war.

Trotz der grösseren Fläche des Erlenbacheinzugsgebietes war dessen Abflussverhalten ähnlich demjenigen der Teileinzugsgebiete. Die Transferfunktionen und die elektrische Leitfähigkeit des Abflusswassers zeigten, dass eine langsame und eine schnelle Komponente zum Abfluss beitrugen. Die langsame Komponente hatte eine Leitfähigkeit vergleichbar mit derjenigen der Rohhumusfläche. Das Wasser floss durch Makroporen im Unterboden, die direkte Verbindung zum Vorfluter hatten. Die schnelle Abflusskomponente entstand auf nassem und wassergesättigtem Anmoor Humus und wurde durch die Drainagegräben schnell zum Vorfluter geführt.

Die identifizierten Abflussprozesse stimmen mit den ersten Ergebnissen der Stickstoffhaushaltsstudie gut überein. Wegen des relativ grossen Zeitbedarfs zum Abbau des Nitrats durch Mikroorganismen bei gleichzeitig kurzer Verweilzeit des Wassers und der gelösten Stoffen im Boden, wird Nitrat nicht aus dem Regenwasser entfernt. Die Verweilzeit reicht aber für die schnellere Adsorption von Ammonium aus.