

## ABSTRACT

This study presents the results from field observations and subsequent development and solution of a process-based, two-dimensional numerical model capturing surface runoff processes in the Volta Basin, West Africa. The developed model summarizes the interactions between temporally varying rainfall intensity and interactive infiltration processes in soils with spatially varied soil physical and hydraulic characteristics. Varied catchment geometry, microtopographic (vegetated and soil surface) forms, slope length and angle were also examined. The model also incorporates the rainfall interception by mixed vegetation.

The interactive infiltration process is modeled with the Philip two-term equation (PTT), while ponding time is approximated with the time compression algorithm. Interception by vegetation is estimated with the modified Gash model, while the friction effect of vegetation on surface overland flow is quantified. The developed surface flow equations were solved with a second-order Leapfrog explicit finite difference scheme, with centered time and space derivatives. This scheme was modified to accommodate the peculiar nature of surface runoff on a complex microtopographical plane. The model reliably reproduces the results from experimental field data on the basis of parameterized effective soil hydraulic parameters and passed severe numerical tests for hydrodynamic equations.

The analyses of results from both field observations and numerical simulations shows that the dominant runoff generation mechanism in the study area is the infiltration excess (Hortonian) process. A consistent trend of exponential reduction runoff coefficient and runoff discharge per unit area with increasing slope length was observed. The results also showed that both temporal and spatial variability induced factors determine runoff response to rainfall events. Spatial variability in infiltration opportunities, which varies with slope length, and the distribution pattern of saturated conductivity, leading to differences in temporal dynamics of transmission losses potential during runoff routing downslope; moderated by surface roughness and vegetation (Microtopography), which determines surface depression shapes and networks, results in the consistent differences in runoff response. Temporal patterns of rainfall intensity, particularly the distribution in terms of number of pulses, the duration of pulses, total event time, length of time for recession, also affect runoff response. Initial moisture status of the soil may also significantly increase runoff volume. However, a classical demarcation of the prevalent factor at any instant could be defined. Variability in temporal factors dominates the response to high intensity events, while spatial variability in the distribution pattern of soil-related factors i.e., hydraulic properties dominate the response to low intensity events. The prevalence of temporal factors in the basin is traceable to the high intensity tropical storms, which often do not allow the spatial factors to become fully manifest.

The developed model will be useful in studying surface runoff, water erosion, and nutrient dynamics under complex microtopographic conditions, spatially varying soil hydraulic characteristics and temporally dynamic rainfall intensity occurring in many tropical catchments. It also provides practical tool for facilitating decision processes in soil management techniques aimed at managing surface runoff and soil erosion.

# **Oberflächenabfluss und Infiltrationsprozess im Volta-Becken: Beobachtungen und Modellierung**

## **KURZFASSUNG**

Diese Studie präsentiert die Ergebnisse aus Felduntersuchungen sowie die Entwicklung und Lösung eines prozessbasierten, zweidimensionalen numerischen Modells, das den Prozess des Oberflächenabflusses im Voltabecken, Westafrika, darstellt. Das Modell erfasst die Wechselwirkung zwischen zeitlich variierender Niederschlagsintensität und Versickerungsprozessen in Böden mit räumlich variierenden physikalischen und hydraulischen Eigenschaften. Eine unterschiedliche Oberflächengestalt des Wassereinzugsgebiets, verschiedene mikrotopographische Formen (mit und ohne Vegetationsbedeckung), Hanglängen und -neigungen wurden ebenfalls untersucht. Das Modell berücksichtigt auch die Interzeption des Niederschlags durch die Vegetation.

Der interaktive Infiltrationsprozess ist mit der ‚Philip two-term‘ Gleichung (PTT) gekoppelt, während die Wasserakkumulation (ponding) mit dem Algorithmus der Zeitkompression (Zeitverdichtung) ermittelt wird. Die Interzeption durch den Niederschlag wird mit dem modifizierten Gash Modell bestimmt, der Reibungseffekt der Vegetation durch einen entwickelten Vegetationsfaktor. Die Gleichung wurde mit dem bekannten Schema 2. Ordnung, Leapfrog Explizit-Finite-Unterschiede (FDM) mit zentrierten zeitlichen und räumlichen Differentialquotienten gelöst. Dieses Schema wurde modifiziert, um die besondere Natur des Oberflächenabflusses auf einer komplexen mikrotopographischen Ebene zu erfassen. Das Modell reproduziert zuverlässig die Ergebnisse der Feldversuche auf der Basis von parametrisierten wirksamen bodenhydraulischen Parametern und bestand die strengen numerischen Tests für die hydrodynamischen Gleichungen.

Die Analysen sowohl der Felddaten als auch der numerischen Simulationen weisen den Prozess des Infiltrationsüberschusses als den am stärksten bestimmenden Mechanismus bei der Erzeugung von Oberflächenabfluss im Voltabecken nach. Ein durchgängiger Trend hinsichtlich der exponentiellen Reduktion des Abflusskoeffizienten und der Menge des Oberflächenabflusses wurde mit zunehmender Hanglänge beobachtet. Die Ergebnisse zeigen weiterhin, dass die sowohl durch zeitliche als auch räumliche Variabilität bedingten Faktoren die Reaktion des Abflusses auf das Niederschlagsereignis bestimmen. Eine klassische Abgrenzung des zum jeweiligen Zeitpunkt vorherrschenden Faktors konnte jedoch definiert werden. Zeitliche Muster der Niederschlagsintensität, insbesondere die Verteilung hinsichtlich Anzahl und Dauer der Impulse, Gesamtlänge des Ereignisses, Rezession und durchschnittliche Intensitätswerte kombiniert mit der zeitlichen Variation der Wasserbewegung hangabwärts bestimmen weitgehend die Reaktion auf Niederschlagsereignisse von hoher Intensität. Die räumliche Variabilität der bodenabhängigen Faktoren, z. B. hydraulische Eigenschaften und Hanglänge, beeinflusst Ereignisse von geringer Niederschlagsintensität. Das Vorherrschen der zeitlichen Faktoren im Voltabecken kann auf die Niederschlagsereignisse von hoher Intensität, gleichbedeutend mit tropischen Stürmen, zurückgeführt werden, die oft die Manifestierung der räumlichen Faktoren verhindern. Ein weiterer Bodenfaktor, der die Reaktion beeinflusste, ist der anfängliche Bodenfeuchtigkeitsstatus. Dieser Einfluss wird jedoch ebenfalls begrenzt, da er schnell

durch die hohe Niederschlagsintensität überlagert wird. Bei Ereignissen von geringer Niederschlagsintensität könnte eine hohe anfängliche Bodenfeuchte die Abflussmenge signifikant erhöhen.

Das entwickelte Modell wird hilfreich sein bei Untersuchungen über Oberflächenabfluss, Erosion durch Wasser sowie Nährstoffdynamik unter komplexen mikrotopographischen Bedingungen, mit räumlich variierenden bodenhydraulischen Eigenschaften und bei zeitlich dynamischer Niederschlagsintensität, wie sie in vielen tropischen Wassereinzugsgebieten vorkommen. Es stellt auch ein nützliches Instrument für die Unterstützung von Entscheidungsprozessen im Zusammenhang mit Bodenbewirtschaftungstechniken zur Kontrolle von Oberflächenabfluss und Bodenerosion zur Verfügung.