

DISS. ETH No. 20309

Biogeochemistry of a large tropical floodplain system
(Kafue Flats, Zambia): River-floodplain exchange and dam impacts

A dissertation submitted to

ETH ZÜRICH

for the degree of

Doctor of Sciences

presented by

ROLAND ZURBRÜGG

Dipl. Umwelt-Natw. ETH

Born 8 September 1983

citizen of Reichenbach im Kandertal (BE), Switzerland

accepted on the recommendation of

Prof. Dr. Bernhard Wehrli, examiner

Prof. Dr. Moritz F. Lehmann, co-examiner

Dr. David B. Senn, co-examiner

2012

Summary

Floodplains are among the most valuable ecosystems on the planet because they provide important ecosystem services such as flood mitigation, water purification, and habitat formation. Floodplains also act as biogeochemical reactors that impact particle, nutrient and carbon (C) transport between headwaters and oceans. However, the effect of floodplain carbon and nutrient cycling on river biogeochemistry is not well constrained, particularly in the tropics. The functioning of floodplains strongly depends on alternating water levels that cause water flows from the river to the floodplain and back. This hydrological river-floodplain exchange is a key process for deposition and mobilization of organic matter (OM) and nutrients, and the migration of biota. Any changes in the hydrology can thus compromise the natural functioning of such systems. Dams built along rivers with floodplains, whether for hydropower generation or irrigation, have the potential to impact the flooding regime and nutrient cycles. Ultimately, dam impacts on floodplains in temperate and boreal systems have been studied in much greater detail than in the tropics, but the increasing number of dams in tropical catchments requires better understanding of these processes.

The Zambezi River basin (1.4×10^6 km²) in southern Africa is a catchment that includes both, dams, and valuable wetlands along the Kafue and the Zambezi Rivers. The studies presented in this thesis investigated biogeochemical processes in the Kafue Flats (6,500 km²), a dam-impacted floodplain along the Kafue River, the Zambezi's largest tributary. The following research questions were addressed: (1) What are the characteristics of river-floodplain exchange in the Kafue Flats, and how is it affected by dam operation? (2) How do river-floodplain exchange and dam operation influence the loads and bioavailability of organic C (OC) and organic nitrogen (ON)? (3) Are the Kafue Flats a source or sink of inorganic N and phosphorus (P) and how could dam operation have changed the nutrient and carbon cycling in the Flats? To answer these questions, four spatially intense sampling campaigns and a one-year monitoring campaign were conducted between 2008 and 2010 covering 410 km of the Kafue River flowing through the Kafue Flats. Sampling included detailed discharge surveys along with measurements of natural tracers, nutrients, and OC and ON species and their chemical properties.

The general flood-pulse concept of gradual flooding and receding phases poorly describes the conditions in the Kafue Flats. Instead, high resolution measurements of discharge and natural tracers along the river revealed substantial spatial variations in both the magnitude and direction of river-floodplain exchange. During peak discharge, a constriction in the river channel diverted as much as 70% of the river discharge into the floodplain. Downstream expansions in channel capacity allowed water flowing back from the floodplain and into the main channel. As a result, >80% of water exiting the Kafue Flats via the river passed through the floodplain. River-floodplain exchange had considerable influence on river water quality, evidenced by a seasonally-recurring sharp decline in

dissolved oxygen levels to $<50 \mu\text{M}$ that persisted for 150 km. Box-model estimates suggest that lateral exchange with low-oxygen water from the floodplain caused up to 90% of the dissolved oxygen deficit with only a small contribution from in-stream respiration. A comparison with historical flow data indicates that similar spatial and temporal variations in river-floodplain exchange existed prior to dam construction in the 1970s, but dam operation has reduced the water flows between river and floodplain by ~50%.

During the floodplain transit, river waters mobilized substantial amounts of organic carbon and organic nitrogen, causing net exports of $110\text{-}220 \text{ t OC d}^{-1}$ and $6\text{-}9 \text{ t ON d}^{-1}$ from the Kafue Flats. ON accounted for $>95\%$ of the total N, and a system-scale N budget showed that high N-fixation rates of $>50 \mu\text{M N m}^{-2} \text{ h}^{-1}$ are needed to balance the high ON exports. Stable isotopes, C:N ratios and excitation-emission spectroscopy measurements showed that the dissolved OM (DOM) along the Kafue River was mainly terrestrially-derived, despite travelling through the large upstream reservoir. The particulate OM (POM) and DOM elemental composition and C and N stable isotopic signature differed considerably along the entire river with POM displaying much lower $\delta^{13}\text{C}$ (-29‰ vs. -22‰) and C:N (~ 8 vs. ~ 20) than DOM. This suggested that POM consisted of phytoplankton and was relatively bioavailable. While the reservoir had little impact on the DOM properties, it efficiently trapped terrestrial POM and, instead, phytoplankton-derived POM was discharged to the downstream Kafue Flats.

The large exports of OM from the Kafue Flats were accompanied by a net export of limiting nutrients (130 t N yr^{-1} and 76 t P yr^{-1}) from the system. We compared the nutrient export with the amount of OM respiration in the Kafue Flats, which was estimated by quantifying the dissolved oxygen deficit and CO_2 production along the river. Over an annual cycle, $58,000\text{-}97,000 \text{ t C}$ was respired in the Kafue Flats, whereof $\sim 20,000 \text{ t C}$ may have been through sulfate reduction. The outgassing of CO_2 from the Kafue Flats accounted for $48,000 \pm 19,000 \text{ t C}$ per year. Only 2% of N and 7% of P that was released during mineralization was actually exported via the river. This suggests considerable loss and uptake in the floodplain, which was confirmed by low N:P ratios of <4 along reaches of intense river-floodplain exchange. Despite reduced nutrient inputs due to dam operation and efficient N and P retention in the floodplain, the Kafue Flats are a net local source of nutrients to downstream systems.

These results in this thesis show that hydrological river-floodplain exchange is a crucial process for the biogeochemistry of the Kafue Flats. The floodplain systems represents a hotspot for nutrient and carbon cycling, ultimately resulting in high exports of C, N, and P and low oxygen levels in the Kafue River during the flooding season. The upstream dam has impacted the floodplain by retaining nutrients and changing the flooding patterns and thus river-floodplain exchange in the Kafue Flats, which may have reduced the overall productivity of the system.

Zusammenfassung

Die nützlichen Funktionen von Flussauen wie Hochwasserschutz, Wasserreinigung, oder Lebensraum machen diese zu äusserst wertvollen Ökosystemen. Auengebiete beeinflussen auch den Partikel, Nähr- und Kohlenstoff (C)-Transport zwischen Oberläufen von Flüssen und Ozeanen. Dieser Einfluss ist bislang wenig erforscht, vor allem in tropischen Gebieten. Auen sind auf sich ändernde Wasserstände angewiesen, die dazu führen, dass Wasser vom Fluss in die Aue und wieder zurück fliesst. Dieser hydrologische Austausch ist ein wichtiger Prozess für die Ablagerung und Mobilisierung von organischem Material (OM), Nährstoffen und für die Migration von Lebewesen. Veränderungen der Hydrologie, zum Beispiel durch Staudämme (für Wasserkraft oder Bewässerung) oberhalb von Auengebieten, können daher die natürlichen Funktionen von Auen beeinträchtigen und dabei Nährstoffkreisläufe beeinflussen. Die Auswirkungen von Staudämmen auf Auengebiete wurden bisher vor allem in gemässigten und borealen Systemen erforscht, aber die zunehmende Anzahl von Staudämmen verlangt nach einem besseren Verständnis dieser Prozesse in tropischen Gebieten.

Das Einzugsbiet des Sambesi ($1.4 \times 10^6 \text{ km}^2$) im südlichen Afrika ist ein fragmentiertes System mit vier grossen Staudämmen und wertvollen Feuchtgebieten. In dieser Arbeit wurden biogeochemische Prozesse in den „Kafue Flats“, einem $6'500 \text{ km}^2$ grossen Auengebiet zwischen zwei Staudämmen entlang des Kafue, dem grössten Zufluss des Sambesi mit Hinblick auf folgende Forschungsfragen untersucht: (1) Was sind die Eigenschaften des Wasseraustauschs zwischen Fluss und Aue und wie wurde dieser durch die Staudämme verändert? (2) Wie beeinflussen Staudämme und das hydrologische Regime die Mobilisierung von organischem Kohlenstoff (OC) und organischem Stickstoff (ON)? (3) Sind die Kafue Flats eine Quelle oder eine Senke für die anorganischen Nährstoffe Stickstoff (N) und Phosphor (P) und wie könnten die Staudämme Nährstoff- und Kohlenstoff-Kreislauf beeinflusst haben? Um diese Fragen zu beantworten wurden vier hoch auflösende Feldkampagnen und eine einjährige Monitoring-Kampagne durchgeführt. Die Probenahmen beinhalteten detaillierte Abflussmessungen, Messungen von natürlichen Tracern, Nährstoffen und OC und ON Spezies und deren chemischen Eigenschaften.

Das einfache Konzept einer jährlichen Dynamik einer Überflutung gefolgt von einer Entwässerungsphase der Auengebiete beschreibt die Hydrologie in den Kafue Flats nur unzureichend. Stattdessen wurden durch hoch aufgelöste Abflussmessung starke räumliche Veränderungen des Wasseraustauschs zwischen Fluss und Aue sichtbar. Während des Abflussmaximums leitete eine Verengung im Flusslauf $>70\%$ des Abflusses von $700 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ in die Aue. Weiter flussabwärts führte eine Verbreiterung des Flusslaufs zur Entwässerung von grossen Teilen des Feuchtgebiets, was zu einem Anstieg des Abflusses führte. Als Folge wurden $>80\%$ des Gesamtabflusses des Kafue durch das Auengebiet geleitet. Dieser intensive Austausch hatte beträchtliche Auswirkungen auf die Gewässerchemie des Kafue und verursachte einen starken Abfall der Sauerstoffkonzentration bis <50

μM , der über 150 km anhielt und jedes Jahr beobachtet wurde. Modellberechnungen zeigten, dass dieser Abfall zu 90% durch den starken Fluss-Auen Austausch mit sauerstoffarmem Wasser aus dem Feuchtgebiet verursacht wurde und nur zu einem kleinen Teil durch Respiration im Fluss. Ein Vergleich der heutigen Situation mit historischen Abflussdaten zeigte, dass der Betrieb der Dämme den Austausch um bis zu 50% verringert hat.

Während der Passage durch das Auengebiet mobilisierte das Flusswasser grosse Mengen an OC und ON, was zu einem netto Export von 110-220 t OC d^{-1} und 6-9 t ON d^{-1} führte. Der N-Pool bestand zu >95% aus ON und ein Stickstoff-Budget der Kafue Flats zeigte, dass hohe N-Fixierungsraten ($>50 \mu\text{M N m}^{-2} \text{h}^{-1}$) benötigt werden um den hohen ON Verlust auszugleichen. Stabile Isotope, C:N-Verhältnisse und spektroskopische Messungen zeigten, dass das gelöste OM (DOM) im Kafue vorwiegend aus terrestrischen Quellen kam, trotz des Durchflusses durch den Stausee. Entlang des Flusses wiesen die Elementzusammensetzung sowie die C und N-Isotopensignaturen grosse Unterschiede zwischen DOM und partikulärem OM (POM) auf: POM zeigte tiefere Werte für $\delta^{13}\text{C}$ (-29‰ vs. -22‰) und im C:N-Verhältnis (~8 vs. ~20) als DOM, was auf planktonische Quellen und hohe Bioverfügbarkeit von POM deutet. Während das DOM den Stausee beinahe unverändert passierte, wurde terrestrisches POM effizient zurückgehalten und stattdessen gelangte POM in Form von Phytoplankton in die Kafue Flats.

Dank des ausgeprägten hydrologischen Austauschs zwischen Fluss und Aue war es möglich, die Mineralisation vom OM im ganzen System durch Messungen des Sauerstoffdefizits und der CO_2 -Produktion im Fluss abzuschätzen. Während einem Jahr wurden in den Kafue Flats 58'000-97'000 t organischer Kohlenstoff mineralisiert, davon entwichen etwa $48'000 \pm 19'000$ t C den Kafue Flats in Form von CO_2 . Nur etwa 2% des N und 7% des P, die bei der Mineralisation von OM freigesetzt wurden, wurden aus dem System exportiert, was auf hohe Verluste und effiziente Wiederaufnahme im Feuchtgebiet schliessen lässt. Tatsächlich wurde entlang Flussabschnitten mit hohem Wasseraustausch neben einem beträchtlichen Anstieg der CO_2 -Konzentration auch tiefe N:P-Verhältnisse von <4 gemessen. Trotz geringerer Nährstoffzufuhr durch den Betrieb der Staudämme und effizienten Nährstoffrückhalt in der Aue, sind die Kafue Flats eine netto Quelle von 130 t anorganischem N und 76 t P pro Jahr.

Wie diese Resultate zeigen, ist der Wasseraustausch zwischen Fluss und Aue ein entscheidender Faktor für die biogeochemischen Prozesse in den Kafue Flats. Der Austausch verursachte einen Abfall der Sauerstoffkonzentration und erhöhte die OM- und Nährstofffrachten im Kafue. Trotz den tiefen Nährstoffkonzentrationen zeigten hohe C, N und P Exportraten, dass die Kafue Flats ein „Hotspot“ für den C- und Nährstoffumbau des gesamten Einzugsgebiets sind. Die Staudämme beeinträchtigten das Auengebiet durch tiefere Nährstoffzuflüsse und ein verändertes hydrologisches Regime, was wohl die Produktivität der Kafue Flats verringert hat.