



***Sustainable Reservoir Management Approaches under Impacts of
Climate Change - A Case Study of Mangla Reservoir, Pakistan***

Nachhaltige Managementstrategien von Stauseen unter Berücksichtigung des
Klimawandels – Eine Fallstudie am Mangla-Stausee in Pakistan

*An der
Fakultät Bauingenieurwesen
der Technischen Universität Dresden
zur Erlangung der Würde eines
Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)
eingereichte und genehmigte*

Dissertation

von

Dr.-Ing. Muhammad Adnan Khan
geboren am 16.07.1992 in Faisalabad, Pakistan

Gutachter:	Prof. Dr.-Ing. Jürgen Stamm	(Technische Universität Dresden)
	Prof. Dr. Christian Bernhofer	(Technische Universität Dresden)
	Prof. Dr.-Ing. Hamza Farooq Gabriel	(National University of Sciences and Technology, Pakistan)

eingereicht am: 27. Februar 2023
verteidigt am: 11. Juli 2023

Abstract

Reservoir sedimentation is a major issue for water resource management around the world. It has serious economic, environmental, and social consequences, such as reduced water storage capacity, increased flooding risk, decreased hydropower generation, and deteriorated water quality. Increased rainfall intensity, higher temperatures, and more extreme weather events due to climate change are expected to exacerbate the problem of reservoir sedimentation. As a result, sedimentation must be managed to ensure the long-term viability of reservoirs and their associated infrastructure. Effective reservoir sedimentation management in the face of climate change necessitates an understanding of the sedimentation process and the factors that influence it, such as land use practices, erosion, and climate. Monitoring and modelling sedimentation rates are also useful tools for forecasting future impacts and making management decisions.

The goal of this research is to create long-term reservoir management strategies in the face of climate change by simulating the effects of various reservoir-operating strategies on reservoir sedimentation and sediment delta movement at Mangla Reservoir in Pakistan (the second-largest dam in the country). In order to assess the impact of the Mangla Reservoir's sedimentation and reservoir life, a framework was developed. This framework incorporates both hydrological and morphodynamic models and various soft computing models. In addition to taking climate change uncertainty into consideration, the proposed framework also incorporates sediment source, sediment delivery, and reservoir morphology changes. Furthermore, the purpose of this study is to provide a practical methodology based on the limited data available.

In the first phase of this study, it was investigated how to accurately quantify the missing suspended sediment load (SSL) data in rivers by utilizing various techniques, such as sediment rating curves (SRC) and soft computing models (SCMs), including local linear regression (LLR), artificial neural networks (ANN) and wavelet-cum-ANN (WANN). Further, the Gamma and M-test were performed to select the best-input variables and appropriate data length for SCMs development. Based on an evaluation of the outcomes of all leading models for SSL estimation, it can be concluded that SCMs are more effective than SRC approaches. Additionally, the results also indicated that the WANN model was the most accurate model for reconstructing the SSL time series because it is capable of identifying the salient characteristics in a data series.

The second phase of this study examined the feasibility of using four satellite precipitation datasets (SPDs) which included GPM, PERSIANN_CDR, CHIRPS, and CMORPH to predict streamflow and sediment loads (SL) within a poorly gauged mountainous catchment, by

employing the SWAT hydrological model as well as SWAT coupled soft computing models (SCMs) such as artificial neural networks (SWAT-ANN), random forests (SWAT-RF), and support vector regression (SWAT-SVR). SCMs were developed using the outputs of un-calibrated SWAT hydrological models to improve the predictions. The results indicate that during the entire simulation, the GPM shows the best performance in both schemes, while PERSIAN_CDR and CHIRPS also perform well, whereas CMORPH predicts streamflow for the Upper Jhelum River Basin (UJRB) with relatively poor performance. Among the best GPM-based models, SWAT-RF offered the best performance to simulate the entire streamflow, while SWAT-ANN excelled at simulating the SL. Hence, hydrological coupled SCMs based on SPDs could be an effective technique for simulating streamflow and SL, particularly in complex terrain where gauge network density is low or uneven.

The third and last phase of this study investigated the impact of different reservoir operating strategies on Mangla reservoir sedimentation using a 1D sediment transport model. To improve the accuracy of the model, more accurate boundary conditions for flow and sediment load were incorporated into the numerical model (derived from the first and second phases of this study) so that the successive morphodynamic model could precisely predict bed level changes under given climate conditions. Further, in order to assess the long-term effect of a changing climate, a Global Climate Model (GCM) under Representative Concentration Pathways (RCP) scenarios 4.5 and 8.5 for the 21st century is used. The long-term modelling results showed that a gradual increase in the reservoir minimum operating level (MOL) slows down the delta movement rate and the bed level close to the dam. However, it may compromise the downstream irrigation demand during periods of high water demand. The findings may help the reservoir managers to improve the reservoir operation rules and ultimately support the objective of sustainable reservoir use for societal benefit.

In summary, this study provides comprehensive insights into reservoir sedimentation phenomena and recommends an operational strategy that is both feasible and sustainable over the long term under the impact of climate change, especially in cases where a lack of data exists. Basically, it is very important to improve the accuracy of sediment load estimates, which are essential in the design and operation of reservoir structures and operating plans in response to incoming sediment loads, ensuring accurate reservoir lifespan predictions. Furthermore, the production of highly accurate streamflow forecasts, particularly when on-site data is limited, is important and can be achieved by the use of satellite-based precipitation data in conjunction with hydrological and soft computing models. Ultimately, the use of soft computing methods produces significantly

improved input data for sediment load and discharge, enabling the application of one-dimensional hydro-morphodynamic numerical models to evaluate sediment dynamics and reservoir useful life under the influence of climate change at various operating conditions in a way that is adequate for evaluating sediment dynamics.

Kurzfassung

Die Verlandung von Stauseen ist für das Wasserressourcenmanagement weltweit von zentraler Bedeutung. Sie zieht schwerwiegende wirtschaftliche, ökologische und soziale Folgen mit sich, z. B. eine verringerte Wasserspeicherkapazität, ein erhöhtes Überschwemmungsrisiko, eine geringere Stromerzeugung aus Wasserkraft oder auch eine schlechtere Wasserqualität. Nach Auffassung von Experten wird die Problematik der Stauraumverlandung durch eine zunehmende Niederschlagsintensität, höhere Temperaturen und extreme Wetterereignisse infolge des Klimawandels weiter verschärft. Daher müssen der Verlandungsprozess überwacht und ggf. Maßnahmen ergriffen werden, um eine langfristige Nutzung von Stauseen und der dazugehörigen Infrastruktur zu ermöglichen. Ein wirksames Sedimentmanagement von Stauseen erfordert ein Verständnis des Verlandungsprozesses und jener Faktoren, die diesen beeinflussen, wie Landnutzungspraktiken, Sedimentverfügbarkeit und Erosion sowie die hydrologischen Verhältnisse und das Klima. Die Überwachung und die Modellierung von Sedimentationsraten stellen darüber hinaus nützliche Instrumente für betriebliche Entscheidungen und für die Prognose zukünftiger Entwicklungen dar.

Ziel der vorliegenden Dissertation ist es, langfristige Strategien für das Management von Stauseen angesichts des Klimawandels zu entwickeln, indem die Auswirkungen verschiedener operationeller Strategien auf die Verlandung des Stausees und insbesondere auf die Entwicklung des Deltapunkts (äußere, obere Kante der Sedimentablagerung unter Wasser) am Beispiel des Mangla-Stausees, dem zweitgrößten Staudamm in Pakistan, simuliert werden. Zur Ermittlung der Auswirkungen der Verlandung auf die Nutzungsdauer des Mangla-Stausees wurde ein methodisches Konzept entwickelt. Dieses umfasst die Nutzung sowohl von hydrologischen und morphodynamischen Modellen als auch von verschiedenen Soft-Computing-Modellen. Ferner werden zur Erfassung der Unschärfen infolge des Klimawandels auch die Sedimentquelle, der Sedimenteintrag und die Veränderungen der Sohlenmorphologie berücksichtigt. Darüber hinaus soll diese Studie eine praktische Vorgehensweise bei nur begrenzt verfügbarer Datengrundlage liefern.

In der ersten Phase dieser Studie wurde untersucht, wie fehlende Daten zur Schwebstoffbelastung (SSL) in Flüssen genau quantifiziert werden können, indem verschiedene Techniken wie Sediment-Abfluss-Beziehungen (SRC) und Soft-Computing-Modelle (SCMs), einschließlich lokaler linearer Regression (LLR), künstlicher neuronaler Netze (ANN) und Wavelet-cum-ANN (WANN) zur Anwendung kommen. Hierzu sind Gamma- und M-Tests durchgeführt worden, um die besten Eingangsvariablen und einen geeigneten Anteil des Datenumfangs für die Entwicklung

von SCMs auszuwählen. Die Auswertung der jeweils besten Ergebnisse aller Modelle für eine SSL-Prognose lässt den Schluss zu, dass SCMs effektiver sind als SRC-Ansätze. Darüber hinaus zeigten die Ergebnisse auch, dass das WANN-Modell das genaueste Modell für die Rekonstruktion von SSL-Zeitreihen darstellt, da es in der Lage ist, die signifikanten Besonderheiten in einer Datenreihe zu identifizieren.

In der zweiten Phase dieser Studie wurde zur Vorhersage des Abflusses und der Sedimentfracht (SL) die Verwendung von vier satellitengestützten Niederschlagsdatensätzen (SPDs) in einem gebirgigen Einzugsgebiet mit geringer oder ungleichmäßiger Messstellenabdeckung auf Ihre Effektivität untersucht, darunter GPM, PERSIANN_CDR, CHIRPS und CMORPH. Dabei kamen das hydrologische Modell SWAT sowie mit SWAT gekoppelte Soft-Computing-Modelle wie künstliche neuronale Netze (SWAT-ANN), Random-Forest (SWAT-RF) und Support-Vector-Regression (SWAT-SVR) zum Einsatz. Um die Vorhersagen zu verbessern, wurden die SCMs unter Verwendung der Ergebnisse der nicht kalibrierten hydrologischen SWAT-Modelle entwickelt. Die Ergebnisse zeigen, dass das GPM während der gesamten Simulation die beste Leistung in beiden Schemata erbringt. PERSIANN_CDR und CHIRPS liefern ebenfalls gute Ergebnisse, während hingegen die Resultate von CMORPH bei der Vorhersage des Abflusses für das Einzugsgebiet des Oberen Jhelum (UJRB) unzureichend sind. Unter den besten GPM-basierten Modellen bei der Simulation des gesamten Abflusses lieferte SWAT-RF die besten Ergebnisse, während sich SWAT-ANN bei der Simulation der Sedimentfracht auszeichnete. Daher könnten hydrologisch gekoppelte SCMs auf der Grundlage von satellitengestützten Niederschlagsdaten eine wirksame Technik zur Simulation von Abfluss und Sedimentfrachten darstellen, insbesondere in komplexem Gelände mit geringer oder ungleichmäßiger Messstellenabdeckung.

In der dritten und letzten Phase dieser Studie wurden die Auswirkungen verschiedener Betriebsstrategien auf die Verlandung des Mangla-Stausees mit Hilfe eines 1D-Sedimenttransportmodells untersucht. Um die Genauigkeit des Modells zu verbessern, sind präzisere Randbedingungen für die Strömung und die Sedimentfracht in das numerische Modell implementiert worden (abgeleitet aus der ersten und zweiten Phase dieser Arbeit), so dass das morphodynamische Modell die Veränderungen des Bodenniveaus unter gegebenen Klimabedingungen relativ genau vorhersagen konnte. Zur Bewertung der langfristigen Auswirkungen des Klimawandels, wurde ein globales Klimamodell (GCM) mit den Szenarien RCP 4,5 und RCP 8,5 zum Ende des 21. Jahrhunderts eingesetzt. Die Ergebnisse der langfristigen Modellierung zeigen, dass eine allmähliche Erhöhung des Mindestbetriebswasserspiegels (MOL) im Stausee die Fortschrittsrate des Deltapunkts und die Sohlenaufhöhung in der Nähe des

Dammes vorteilhaft verlangsamt. Inwieweit dies flussabwärts temporär zu Konflikten im Rahmen der Erfüllung des Bewässerungsbedarfs führt, wäre separat zu bewerten. Die gewonnenen Ergebnisse helfen den Fachbehörden, die Regeln für den Betrieb von Stauseen zu verbessern und unterstützen letztlich das Ziel einer nachhaltigen Nutzung dieser Speicher.

Abschließend kann zusammengefasst werden, dass diese Arbeit einen umfassenden Einblick in die Verlandungsphänomene von Stauseen bietet und eine Methodik aufzeigt, wie die Auswirkungen des Klimawandels auf die Verlandung von Stauseen berücksichtigt und insbesondere wirksame Strategien zum Umgang mit fehlenden oder auch unzureichende Daten angewendet werden können. Grundsätzlich ist es sehr relevant, möglichst genaue Abschätzungen der Sedimentfracht vorzunehmen, da sie für die Planung und den Betrieb des Stauraums von zentraler Bedeutung sind und nur so eine belastbare Vorhersage der Nutzungsdauer von Stauseen in Abhängigkeit des Staumanagements möglich wird. Darüber hinaus sind insbesondere bei begrenzten Daten vor Ort hochwertige Abflussprognosen wichtig, wobei sich diese durch die Nutzung von satellitengestützten Niederschlagsdaten in Verbindung mit hydrologischen Modellen und Soft-Computing-Modellen erstellen lassen. Der Einsatz von Soft-Computing-Methoden führt letztlich zu erheblich verbesserten Eingangsdaten für die Sedimentfracht und den Abfluss, so dass mit Hilfe eines eindimensionalen hydro-morphodynamischen, numerischen Modells die Sedimentdynamik sowie die Nutzungsdauer eines Stauraums unter dem Einfluss des Klimawandels bei verschiedenen Betriebsbedingungen mit ausreichender Güte bewertet werden können.