

**Decision Support Tool to Optimize the Operation of Multi-Purpose Reservoirs: A Case Study in the Lake Tana Catchment, Ethiopia**

**Entscheidungsunterstützungswerkzeug zur Optimierung des Betriebs von Mehrzweckspeichern: Eine Fallstudie im Einzugsgebiet des Lake Tana, Äthiopien**

Abstract and Theses

Zusammenfassung und Thesen

**vorgelegt von**

**Alemayehu Habte Saliha, M.Sc.**

an der Fakultät Bauingenieurwesen

der Technischen Universität Dresden

zur Erlangung der Würde eines

Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)

**Supervisor:** Prof. Dr.-Ing. habil. Hans-B. Horlacher

**Co-supervisor:** Prof. Dr.-Ing. Markus Disse

**Local supervisor:** Dr.-Ing. Seleshi Bekele Awulachew

Technische Universität Dresden

Sept. 2012, Deutschland

## Abstract

This dissertation presents the work of developing decision support tools for the management of multi-purpose multi-reservoir systems in hydro-meteorological data scarce areas. In the planning and design of water resource systems comprising a large number of reservoirs, it is necessary to optimize simultaneously the operation of the entire system rather than to consider the reservoirs separately. One of the basic input variables in reservoir operation is inflow to each reservoir. Predicting runoff in ungauged basins is still a big challenge in the field of hydrology. Despite the lack of sufficient hydro-meteorological information, water resources development particularly in developing countries is crucial. Therefore, this research proposes two methods: (1) Building a regional model to estimate runoff for ungauged catchments by coupling artificial intelligence and a watershed model and (2) developing a method to generate optimal operation rule curves of multi-objective multi-reservoir systems by integrating a reservoir simulation model and an optimization algorithm.

The proposed tools were tested to generate optimal operating policies for a multi-objective multi-reservoir system in the Lake Tana sub-basin of the Blue Nile river basin and to estimate runoff from ungauged catchments of the Blue Nile river basin, Ethiopia. At first, a self-organizing map (SOM) was used to group hydrological homogeneous catchments. Then, the water balance model WaSiM-ETH was used to generate daily flow for the ungauged catchments in the respective group identified by SOM. The reservoir system was set up using the reservoir simulation model HEC-5 to guide the releases of the reservoir system. The Covariance Matrix Adaptation Evolutionary Strategy (CMA-ES) was adopted for optimizing the rule curves of the multi-objective multi-reservoir system.

SOM identified five hydrological homogenous groups of catchments in the case study area. The regional model, which is the coupled SOM and WaSiM-ETH models, was able to transfer hydrological information from a data rich catchment to a data poor (ungauged) catchment. The regional model generally overestimates the low flows. For some catchments, the regional model underestimates the daily peak flows but fits very well on the 10-day and monthly peak flows. Considering the Nash-Sutcliffe (N-S) and coefficient of determination ( $R^2$ ) efficiency criteria, the validation results for sub-catchments whose flow data have never been involved during calibration showed that the regional model is promising and quite satisfactory.

The integrated reservoir simulation and optimization (single and multi-objective CMA-ES and HEC-5) model was demonstrated by considering the existing development situation and future water resources development scenarios in four artificial reservoirs and Lake Tana, which is the largest fresh water lake in Ethiopia. The competing water sectors considered were irrigation, domestic water supply, environmental flows for ecosystems and flows that are needed to maintain the aesthetic value of the Tis-Issat waterfall, navigation and hydropower production. Thus, the objective function was set to minimize the water shortage for the domestic water supply, the environmental flows, irrigation and hydropower generation and to keep the best possible water level for navigation. Comparison has been done between single objective CMA-ES (SO-CMA-ES) and multi-objective CMA-ES (MO-CMA-ES) for the multi-objective multi-

reservoir system. In the case of SO-CMA-ES, an approximate pareto-curve was generated by running the model for several times with different combinations of priorities given to each demand. However, the choice of priorities is subjective. Moreover, it was found that the performance of MO-CMA-ES as compared to SO-CMA-ES was superior in terms of finding pareto-optimal solutions for the operating rule curves. Therefore, for the case study considered in this dissertation, the MO-CMA-ES was chosen to investigate different future water resources development scenarios in the Lake Tana sub-basin and a clear trade-off amongst demands was observed. Results for optimal reservoir operation under full water resources development scenario showed that 90% of the total water supply and 91% of hydropower demands can be met with Lake Tana navigation level kept as high as 1784.8 m a.s.l. For the same scenario, 91% of the total water supply and 88% of hydropower demands with navigation level of 1784.6 m a.s.l. were obtained for reservoir operation in favour of total water supply.

The stand-alone developed tools, i.e. the regional and integrated reservoir simulation-optimization models, enable decision makers and planners to choose an optimal operation policy amongst competing water uses in existing and planned multi-objective multi-reservoir systems in hydro-meteorological data scarce areas.

However, it further needs a graphical user interface to link all the inputs and outputs of the regional and the reservoir simulation-optimization models to the database and vice versa. Generally, the results highlighted a paramount importance of the proposed regional model and an integrated reservoir simulation-optimization model to support decision makers and planners.

## Zusammenfassung

In der Dissertation werden Instrumente zur Unterstützung von Entscheidungen für die Bewirtschaftung von Mehrzweckspeicher-Verbundsystemen in Gebieten entwickelt, in denen nur wenige hydrometeorologische Daten vorhanden sind. Bei der Planung und Konstruktion von wasserwirtschaftlichen Systemen mit einer Vielzahl von Speichern ist es eher erforderlich, den Betrieb des Gesamtsystems zu optimieren, anstatt die Speicher getrennt zu betrachten. Eine der grundlegenden Eingangsgrößen beim Betrieb von Speichern ist der Wasserzufluss zu jedem Speicher. Die Vorhersage des Abflusses in unbeobachteten Einzugsgebieten gehört immer noch zu den großen Herausforderungen der Hydrologie. Obwohl keine ausreichenden hydro-meteorologischen Informationen vorhanden sind, ist die Erschließung der Wasserressourcen in Entwicklungsländern von äußerster Wichtigkeit. In dieser Forschungsarbeit wird folgendes Vorgehen vorgeschlagen: (1) Die Erstellung eines regionalen Modells durch die Kopplung von künstlicher Intelligenz mit einem Einzugsgebietsmodell zur Abfluss-Abschätzung in unbeobachteten Einzugsgebieten sowie (2) die Entwicklung einer Methode zur Ermittlung optimaler Speicherinhaltskurven für Mehrzweckspeicher-Verbundsysteme durch die Einbindung eines Speicher-Simulationsmodells und eines Optimierungsalgorithmus.

Die vorgeschlagenen Instrumente wurden zur Ermittlung der optimalen Speicherinhaltskurven für Mehrzweckspeicher im Lake Tana-Teileinzugsgebiet des Blauen Nil eingesetzt sowie zur Schätzung des Abflusses in unbeobachteten Einzugsgebieten des Blauen Nils in Äthiopien. Zuerst wurden mit Hilfe von Selbstorganisierenden Merkmalskarten (SOM) Gruppen hydrologisch homogener Einzugsgebiete bestimmt. Im Anschluss wurde das Wasserhaushaltsmodell WaSiM-ETH zur Berechnung der Tagesabflussmengen von unbeobachteten Einzugsgebieten angewendet, die zu einer der von der SOM zuvor bestimmten Gruppen gehören. Mit Hilfe des Reservoir-Simulationsmodells HEC-5 wurde das aus dem Speichersystem abgegebene Wasser gesteuert. Die Covariance Matrix-Adaptation Evolution Strategy (CMA-ES) wurde zur Optimierung der Speicherinhaltskurven des Mehrzweckspeicher-Verbundsystems angewandt.

Mit Hilfe der Merkmalskarten wurden fünf Gruppen hydrologisch homogener Einzugsgebiete für die Fallstudie ermittelt. Mit dem regionalen Modell, bei dem SOM mit WaSiM-ETH gekoppelt wurde, konnten hydrologische Informationen aus einem Einzugsgebiet mit vielen Daten auf ein (unbeobachtetes) Einzugsgebiet mit wenigen Informationen übertragen werden. Das regionale Modell neigt generell zu einer Überschätzung der Niedrigwasserabflüsse. Bei einigen Einzugsgebieten werden mit dem regionalen Modell zu geringe Tages-Abflussspitzen ermittelt, während die 10-Tages- und monatlichen Abflussspitzen gut abgebildet werden. Basierend auf dem Nash-Sutcliffe Koeffizienten und dem Bestimmtheitsmaß, zeigen sich in der Validierung für diejenigen Teileinzugsgebiete, die während der Kalibrierung nicht berücksichtigt wurden, vielversprechende und sehr gute Ergebnisse.

Das integrierte Speichersimulations- und Optimierungsmodell (Einzweck- und Mehrzweck-CMA-ES und HEC-5) wurde für den gegenwärtigen Zustand und für zukünftige wasserwirtschaftliche Entwicklungsszenarien für vier Speicher und den größten See Äthiopiens, Lake Tana, eingesetzt. Die konkurrierenden Wassersektoren sind Bewässerung, kommunale Wasserversorgung, ökologischer Mindestabfluss, Erhalt des ästhetischen Werts des Tis-Issat Wasserfalls, Schifffahrt und Wasserkrafterzeugung. Daher wurde die Zielfunktion so gewählt, dass die Summe der Wasserdefizite bei der kommunalen Wasserversorgung, den ökologischen Mindestabflüssen, der Bewässerung und der Wasserkrafterzeugung minimiert und der für die Schifffahrt bestmögliche Wasserstand

eingehalten werden. Dabei wurde für das Mehrzeckspeicher-Verbundsystem CMA-ES mit einer und mit mehreren Zielgrößen (SO-CMA-ES bzw. MO-CMA-ES) miteinander verglichen. Bei SO-CMA-ES wurde eine Pareto-Kurve approximiert, indem den Zielgrößen in mehreren Modellläufen unterschiedliche Gewichtungsfaktoren zugeordnet wurden. Jedoch ist die Auswahl der Gewichtungsfaktoren subjektiv. Außerdem erzielte MO-CMA-ES höhere Güten bei der Ermittlung pareto-optimaler Lösungen für die Speicherinhaltskurven. Daher wurde in der betrachteten Fallstudie MO-CMA-ES für die Untersuchung verschiedener zukünftiger wasserwirtschaftlicher Entwicklungsszenarien im Lake Tana Teileinzugsgebiet verwendet und es konnte ein eindeutiger Kompromiss für die konkurrierenden Zielgrößen ermittelt werden. Bei einer vollständigen Nutzung der Wasserressourcen und einer optimalen Bewirtschaftung können bei einem Füllstand des Lake Tana von 1784.8 m 90% der gesamten Wasserversorgung und 91% der Wasserkraftnutzung realisiert werden. Wird die Wasserversorgung beim Speicherbetrieb bevorzugt, so können bei einem Füllstand von 1784.6m 91% der gesamten Wasserversorgung und 88% der Wasserkraftnutzung erfüllt werden.

Die entwickelten Instrumente, d.h. das regionale und das integrierte Speichersimulations-Optimierungs-Modell, können von Entscheidungsträgern und Planern in anderen Einzugsgebieten mit wenigen hydro-meteorologischen Daten für die Auswahl einer optimalen Bewirtschaftungsstrategie bei konkurrierenden Wassernutzungen in bestehenden und geplanten Mehrzweckspeicher-Verbundsystemen genutzt werden.

Jedoch ist hierfür eine grafische Benutzeroberfläche erforderlich, um alle Inputs und Outputs der regionalen und Speicher-Simulations-Optimierungsmodelle mit der Datenbank zu vernetzen. Die Ergebnisse heben die besondere Bedeutung des vorgestellten regionalen Modells und integrierten Speichersimulations-Optimierungsmodells zur Unterstützung von Entscheidungsträgern und Planern hervor. Die Instrumente ermöglichen ihnen, optimale Strategien unter konkurrierenden Wassernutzungen bei bestehenden und geplanten Mehrzweckspeichersystemen in Regionen mit geringen hydro-meteorologischen Datenbeständen zu ermitteln.

## Theses

1. The provision of adequate water supply is of fundamental importance to social and economic security worldwide. The general increasing in demand for water of sufficient quantity and quality makes the water resources development and reservoir operation of sustainable water resources systems and related management strategies continuously more important.
2. Multi-purpose reservoir operation is a complex optimization problem that involves multiple objectives, many decision variables, a number of physical and operational constraints. In addition, the trade-off between different conflicting objectives pose challenges for water resources planners and managers when making operational decisions.
3. Optimal use of the available limited water resources requires a scientific approach to plan and operate new and existing reservoir systems.
4. For existing and planned water resource development having a large number of multi-purpose reservoirs, like the reservoir system in the Lake Tana sub-basin, it is necessary to optimize the operation of the entire system rather than to consider each reservoirs separately. The coordinated operation of such multi-purpose multiple reservoir system, in order to maximize the resultant economic benefit, social welfare and ecosystem, is a complex decision-making process. It is even more complex when the system comprises of conflicting interests, which is common in most real world multi-objective multi-reservoir system.
5. Reservoir simulation models, an abstract representation of a reservoir system, are used to understand the operation of the underlining physical and hydrological characteristics of a reservoir. However, their reservoir operating performance are limited for a given operation policy that are usually derived during design stage. On the other hand, optimisation models are search algorithms that are used to find optimum policy(ies) from many alternative set of feasible operating policies for the given decision variables and constraints. A coupled simulation-optimization model plays a complementary role in a sense that optimization models make decisions based on the benefit achieved for system objectives over time, whereas simulation models demonstrate the outcome of the proposed rules achieved by the optimization model.
6. Most classical optimization algorithms are developed for single-objective problems whereas many optimization problems naturally involve multiple objectives. Almost all classical direct and gradient-based optimization methods suggest converting multi-objective optimization problem into a single-objective optimization problem by emphasizing one particular pareto-optimal solution at a time. Thus, conversion techniques are inconvenient to solve multi-objective optimization problems.

7. In light of the existence of a plethora of hydrologic models from a simple black box model to a complex physical based model, which become increasingly useful for many water resources development studies, now a days there is a real need for extending their application to a hydrological data scarce area (ungauged catchments).
8. Most of the previous methods of regionalization that attempted to relate watershed models parameters with catchment characteristics are applicable for lumped type of watershed models with limited success. It is too difficult, if not impossible, to follow the business as usual two-step method that relates watershed model parameters with catchment characteristics for distributed type of hydrologic models. However, advances in GIS and remote sensing technologies have opened many opportunities for enhancing distributed or semi-distributed type of hydrological models.
9. Thus, there is a need of methodology to assess water resources potential and optimal allocation of the water resources in hydro-meteorological data scarce area having complex and multi-objective multi-reservoir systems.
10. The proposed Decision Support Tools (DST) are designed to simulate the hydrological processes of a watershed and optimal operation of a reservoir system by combining watershed model, cluster analysis tool, reservoir simulation model and optimization algorithm.
11. The proposed regional model that integrate WaSiM-ETH and SOM model is able to generate stream flow in hydro-meteorological data scarce area, which is vital for any water resources development activities in a basin.
12. The coupled HEC-5 reservoir simulation model and a state-of-the-art multi-criteria optimization algorithm (MO-CMA-ES) able to generate a pareto-front for 65 decision variables that can be used by decision makers and planners to select the best reservoir operation policy for each reservoir in the case study area.
13. The proposed Decision Support Tools provide an important insight to decision makers and planners before the realization of any future water resources development. It offers many alternative optimal solutions for planned and/or existing multi-purpose multi-reservoir systems in ungauged catchments.

## Thesen

1. Weltweit ist eine angemessene Wasserversorgung eine zentrale Grundvoraussetzung für soziale und wirtschaftliche Sicherheit. Aufgrund des allgemein steigenden Bedarfs an Wasser in ausreichenden Mengen und guter Qualität erlangen die Entwicklung und der Betrieb nachhaltiger Wasserressourcensysteme und damit verbundener Bewirtschaftungsstrategien einen immer höheren Stellenwert.
2. Der Betrieb von Mehrzweckspeichern ist ein komplexes Optimierungsproblem, das vielfältige Zielsetzungen verfolgt, zahlreiche Entscheidungsvariablen beinhaltet und welches eine Vielzahl an physikalischen und betrieblichen Vorgaben berücksichtigen muss. Zudem stellen die fallweise gegensätzlichen Ziele eines Speicherbetriebs die verantwortlichen Bewirtschafter und Planer vor beträchtliche Herausforderungen im Hinblick auf zu fällende operative Entscheidungen.
3. Die optimale Nutzung der verfügbaren begrenzten Wasserressourcen erfordert einen wissenschaftlichen Ansatz zur Planung und zum Betrieb neuer und bestehender Speichersysteme.
4. Für bestehende und geplante Wasserressourcensystemen, die ein große Anzahl von Mehrzweckspeichern beinhalten (wie z. B. auch das Speichersystem im Gebiet des Tana Sees), ist es vielmehr notwendig, den Betrieb des Gesamtsystems zu optimieren, als einzelne Speicher separat zu betrachten. Der koordinierte Betrieb eines derartigen multifunktionalen Mehrspeichersystems zur Maximierung des wirtschaftlichen, sozialen und auch ökologischen Nutzens beinhaltet einen komplexen Entscheidungsfindungsprozess. Dieser wird noch komplexer, sobald im System gegensätzliche Interessen involviert sind, wie es bei den meisten realen Mehrzweck-Mehrspeichersystemen der Fall ist.
5. Speichersimulationsmodelle, mit denen sich Speichersysteme abstrahiert abbilden lassen, werden zur Untersuchung der grundlegenden physikalischen und hydrologischen Charakteristika eines Speichers und deren Wechselwirkungen mit dem Speicherbetrieb eingesetzt. Jedoch sind die Speicherbewirtschaftungsregeln häufig an einer Betriebsvorschrift ausgerichtet, die üblicherweise bereits während der Planungsphase erarbeitet worden ist. Im Gegensatz dazu sind Optimierungsmodelle Suchalgorithmen, die darauf abzielen, aus der Vielzahl möglicher Bewirtschaftungsstrategien diejenige(n) zu identifizieren, die mit den bestehenden Vorgaben und Entscheidungsvariablen zu einem optimalen Ergebnis führt. Bei gekoppelten Simulations-Optimierungs-Modellen werden komplementäre Aufgaben dahingehend erfüllt, dass die Optimierungsmodelle auf Grundlage des Nutzens, der für die Systemziele im Laufe der Zeit erreicht wurde, Entscheidungen treffen, während Simulationsmodelle die Auswirkungen der Regeln, die durch das Optimierungsmodell vorgeschlagen werden, aufzeigen.

- 
6. Die meisten klassischen Optimierungsalgorithmen wurden für Einzelziel-Probleme entwickelt, während viele reale Optimierungsprobleme Mehrfachziele involvieren. Nahezu alle klassischen, direkten und gradientenbasierten Optimierungsmethoden empfehlen die Umwandlung von Mehrziel-Optimierungsproblemen in ein Einzelziel-Optimierungsproblem durch Betonung jeweils einer bestimmten Pareto-optimalen Lösung. Daher sind Konversionsmethoden ungünstig zur Lösung von Mehrziel-Optimierungsproblemen.
  7. Vor dem Hintergrund der Vielzahl bestehender hydrologischer Modelle, von einfachen Black-Box-Modellen bis hin zu komplexen physikalisch basierten Modellen, besteht die Notwendigkeit, diese auch auf Gebiete mit geringer hydrologischer Datendichte (Einzugsgebiete ohne Datenerfassung) anzuwenden.
  8. Die meisten der klassischen Regionalisierungsmethoden, die dazu dienen, Modell-Parameter mit Einzugsgebietscharakteristika in Relation zu setzen, sind mehr oder weniger erfolgreich auf nichtverteilte Einzugsgebietsmodelle anwendbar. Es ist allerdings schwierig, wenn nicht gar unmöglich, die klassischerweise übliche 2-Stufen Methode für räumlich verteilte Modelle anzuwenden. Fortschritte in GIS und in den Fernerkundungstechnologien haben jedoch zahlreiche Möglichkeiten für eine Weiterentwicklung der verteilten und semi-verteilten hydrologischen Modelle eröffnet.
  9. Daher bedarf es einer Methodologie zur Beurteilung des Potentials von Wasserressourcen sowie der optimalen Allokation dieser Ressourcen in einem hydrometeorologisch datenarmen Gebiet mit komplexen und Mehrzweck-Mehrspeichersystemen.
  10. Die vorgestellten Werkzeuge zur Entscheidungshilfe vereinen Clusteranalyse, Einzugsgebietsmodell, Speichersimulation und Optimierungs-Algorithmus um hydrologische Prozesse im Einzugsgebiet abzubilden und Speicherbewirtschaftung zu optimieren.
  11. Das Regionalmodell integriert WaSiM-ETH und selbstorganisierende Merkmalskarten. Mit dem Modell können Bemessungszeitreihen auch in unbeobachteten Gebieten generiert werden.
  12. Das mit dem Optimierungsalgorithmus MO-CMA-ES gekoppelte hec-5 Speichersimulationsmodell ermöglicht die Berechnung einer Paretofront für 65 Entscheidungsvariablen. Diese kann von Betreibern operationeller Dienste genutzt werden um optimale Bewirtschaftungsregeln für alle Speicher in der Pilotregion aufzustellen.
  13. Die vorgestellten Entscheidungshilfswerkzeuge können zur Planung und zum Aufstellen von Betriebsregeln für Wasserbewirtschaftungsmaßnahmen verwendet werden. Sie bieten optimale Lösungen, insbesondere für unbeobachtete Gebiete und für Merzweckspeicher in verteilten Systemen an.