

KALIMOD - Tool zur Optimierung und Unsicherheitsanalyse von Modellrechnungen

Malte Henrichs^{1*}, Dominik Leutnant¹, Mathias Uhl¹

¹ Fachhochschule Münster, Institut für Wasser•Ressourcen•Umwelt, Corrensstraße 25, 48149 Münster

*Email des korrespondierenden Autors: henrichs@fh-muenster.de

Kurzfassung KALIMOD ist ein Softwaretool, das am IWARU zur Unterstützung des Modellierers bei der Kalibrierung und Systemoptimierung entwickelt wurde. Für diese Aufgaben wurden sowohl mono- als auch multikriterielle Optimierungsverfahren implementiert. KALIMOD fungiert dabei als Schnittstelle zwischen Simulationsmodellen und Optimierungsverfahren. Anhand der Kalibrierung und der Systemoptimierung einer Fallstudie (1180 ha) konnten Empfehlungen für den Einsatz von KALIMOD abgeleitet werden. Für die Modellkalibrierung hat sich der Einsatz von multikriteriellen Optimierungsverfahren bewährt. Je Niederschlag-Abfluss-Ereignis werden mehrere Zielgrößen (Volumen, Spitzenwert, Verlauf) bei der Kalibrierung berücksichtigt. Neben den best-fit Parameterwerten erlaubt die multikriterielle Kalibrierung auch die Analyse von pareto-optimalen Lösungen hinsichtlich Parameterwerten und Modellergebnissen. Die Systemoptimierung kann insbesondere für große, komplexe Einzugsgebiete empfohlen werden. Die Netzstruktur derartiger Einzugsgebiete erschwert oftmals Optimierungspotenziale effizient zu nutzen. Rechnergestützte Systeme und multikriterielle Optimierungsalgorithmen liefern auch unter anspruchsvollen Bedingungen objektive Ergebnisse, weshalb ihr Einsatz für komplexe Planungsaufgaben der Siedlungswasserwirtschaft empfehlenswert ist.

Schlagwörter: Kalibrierung, Systemoptimierung, hydrologische Modellierung, Softwaretool, KALIMOD

1 EINLEITUNG

Wasserwirtschaftliche Planungsaufgaben erfordern Simulationsmodelle zur Analyse derzeitiger Systemzustände und der Untersuchung und Bewertung von Planungsvarianten. Die Kalibrierung von Modellparametern anhand von Messdaten ist eine entscheidende Voraussetzung für die realitätsnahe Simulation von Abflüssen und Stofffrachten in urbanen, ruralen oder natürlichen Einzugsgebieten. In der Praxis wird zumeist die sogenannte Expertenkalibrierung durch Sachbearbeiter durchgeführt, die je nach Talent und Zeitbudget zu individuellen Parameterwahlen führen.

Planungsvarianten können mit Hilfe von Optimierungsalgorithmen sicherer und schneller entwickelt werden als durch das gängige trial-and-error-Verfahren. Durch die Unterstützung des Planers mittels automatisierter Verfahren können Planungen systematischer hinsichtlich infrastrukturellen, ökologischen und wirtschaftlichen Interessen analysiert und optimiert werden.

Unsicherheiten in Simulationsmodellen, Systemdaten, Belastungsdaten und Messdaten zur Kalibrierung belegen auch die Berechnungsergebnisse mit Unsicherheiten. Ist der Unsicherheitsbereich von Berechnungsergebnissen bekannt oder zumindest einschätzbar, so erhöht sich der Realitätsbezug der Ergebnisse und eröffnet Abwägungspotenzial für planerische Entscheidungsprozesse. Die Unsicherheitsanalyse führt somit zu einer sicheren Entscheidungsfindung.

KALIMOD verknüpft diese Ansätze zu einem Softwaretool mit dem Ziel, die Qualität von Modellergebnissen sowie die Effizienz bei der Modellanwendung zu erhöhen. Die Fortschritte bei der Rechengeschwindigkeit heutiger PCs ermöglichen auch die Anwendung von automatisierten Verfahren für Simulationsmodelle mit langen Rechenzeiten.

2 KALIMOD

KALIMOD stellt ein generisches Softwaretool mit Schnittstellen zu Modellen, Optimierungsverfahren und Zeitreihendaten dar. Ein Ziel der Softwareentwicklung ist der praxisorientierte Einsatz, so dass Simulationsmodelle über eine Schnittstelle eingebunden werden. Diese Schnittstelle besitzt die Funktionen (i) Analyse der Systemelemente von Modelldateien, (ii) Modifikation von Parameterwerten innerhalb der Modelldatei, (iii) Starten und Prüfung des Verlaufs von Simulationen sowie (iv) Importieren von Modellergebnissen wie Zeitreihen oder Einzelwerten. In der aktuellen Version sind die Simulationsmodelle HYSTEM-EXTRAN (ITWH [2010]), KOSIM (ITWH [2012]), MOMENT (BGS Wasser [2007]), NASIM (Hydrotec [2012]) und SWMM (Rossman [2004]) eingebunden.

Die mathematische Optimierung kann sowohl für die automatische Modellkalibrierung als auch für die Systemoptimierung eingesetzt werden. Bei der Modellkalibrierung werden Parameter anhand des Vergleichs zwischen Messdaten und Berechnungsergebnis angepasst. Bei der Systemoptimierung werden die Auswirkungen der Änderung von Bauwerkseigenschaften (z.B. Lage, Drosselabfluss, Abmessungen) analysiert. Algorithmen zur Optimierung und Unsicherheitsanalyse sind ebenfalls über eine Schnittstelle implementiert. Bei der Integration der Optimierungsverfahren NSGA II (Deb et al. [2002]), AMALGAM (Vrugt/Robinson [2007]), DREAM (Vrugt et al. [2009]) und SCE-UA (Duan et al. [1993]) wurden die Algorithmen für einen parallelen Rechnerbetrieb angepasst. Für die Durchführung von Sensitivitätsanalysen stehen weiterhin die Methoden Monte-Carlo Simulation, Latin-Hypercube-Sampling (Helton/Davis [2003]) sowie lokale Verfahren zur Verfügung. Die Steuerung zwischen Optimierungsverfahren und Simulationsmodellen erfolgt durch den „KALIMOD-Controller“. Auf der Basis von Modellergebnissen und –parametern werden Zielfunktionswerte und Randbedingungen berechnet (z. B. Abweichungen zu Messdaten, Kostenfunktionen gemäß Bauwerksgeometrie, Gesamtemissionen von Entlastungsbauwerken oder maximaler Zufluss zur Kläranlage).

Neben dem leistungsstarken Rechenkern ist KALIMOD mit einer grafischen Benutzeroberfläche ausgestattet, die dem Anwender bei der Konfiguration von Optimierungsläufen und der Analyse der Ergebnisse unterstützt. Eine projektspezifische Variantenhaltung ermöglicht dem Anwender, unterschiedliche Planungsvarianten übersichtlich gegenüberzustellen. Sämtliche Anwendungseinstellungen sowie Simulationsergebnisse werden zudem in einer offenen Datenbank gespeichert. Diese dokumentiert alle Ergebnisse und stellt damit die Grundlage für die Erstellung von Berichten dar.

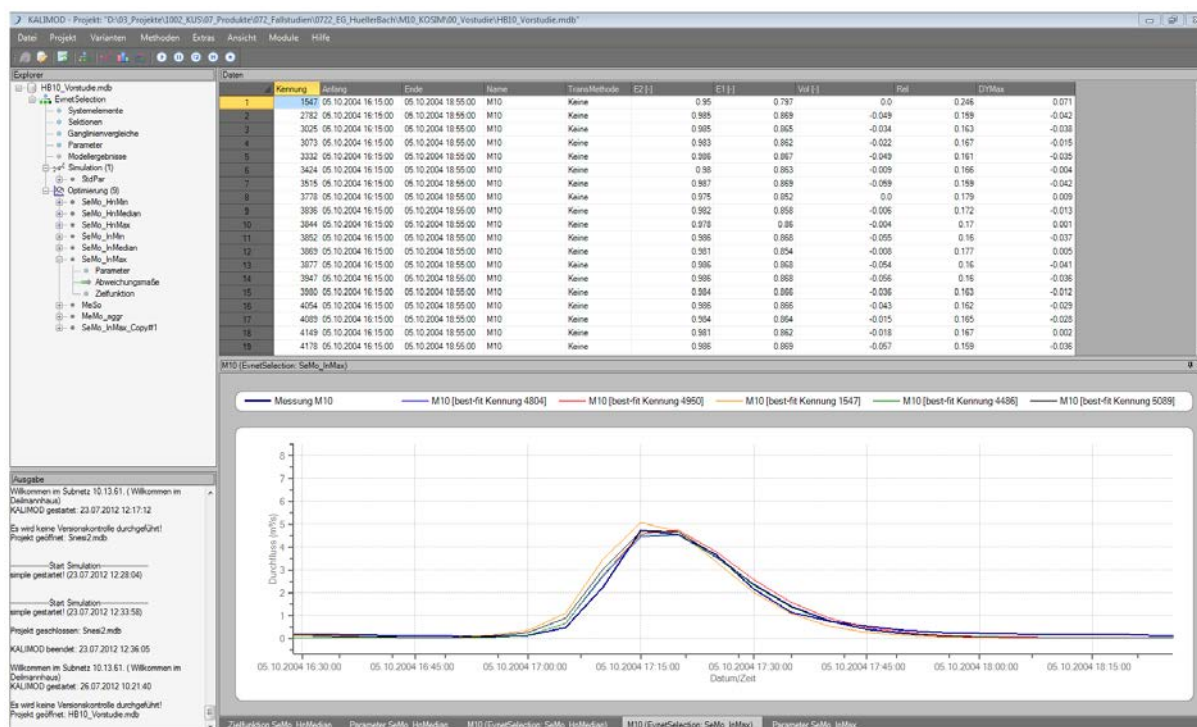


Abbildung 1: Screenshot der KALIMOD-Oberfläche, Ergebnisdarstellung eines Optimierungslaufes

Für die Analyse von Zeitreihendaten steht dem Anwender das Modul GaMo zur Verfügung, welches neben der Visualisierung von Zeitreihen und Optimierungsergebnissen auch zur Datenprüfung, Berechnung von Messunsicherheiten oder Detektion von Niederschlag-Abfluss-Ereignissen eingesetzt werden kann. Für die Speicherung von Zeitreihendaten wird der netCDF Standard (unidata [2013]) eingesetzt.

Abbildung 1 zeigt exemplarisch die gemeinsame Darstellung der Ganglinien von Messung und Simulationsergebnis (unten) und von Abweichungsmaßen zur Quantifizierung für unterschiedliche pareto-optimale Lösungen (oben).

3 FALLBEISPIEL

Das Fallbeispiel ist ein 1180 ha großes, urban geprägtes Einzugsgebiet in Nordrhein-Westfalen, das einen Versiegelungsgrad von 43 % aufweist. Im Rahmen der Neuplanung der Mischwasserentlastung erfolgte eine Kalibrierung von 13 Teileinzugsgebieten. Die Systemoptimierung konzentriert sich auf die Abstimmung von Drosselbauwerken und Rückhaltevolumina zur Minimierung von Investitionskosten bei gleichzeitiger Minimierung von Entlastungsvolumina. Die Simulationen wurden mit dem hydrologischen Schmutzfrachtmodell KOSIM durchgeführt.

4 ERGEBNISSE

Für die **Modellkalibrierung** hat sich der Einsatz eines multikriteriellen Verfahrens bewährt. Für die Zielfunktionen werden 15 Niederschlag-Abfluss-Ereignisse eingesetzt. Für jedes Ereignis werden die Abweichungsmaße Nash-Sutcliffe-Effizienz, Volumenabweichung und Maximalwertabweichung mittels Euklidischem Abstand zu einem Zielfunktionswert aggregiert. Durch den Einsatz dieser multi-event multi-objective Strategie kann aus den pareto-optimalen Lösungen ein robustes und übertragbares Kalibrierergebnis bestimmt werden.

Mittels **Systemoptimierung** wurden an 21 Regenüberläufen und 30 Regenbecken die Drosselleistungen optimiert. Als Zielgröße diente die Entlastungsrate am letzten Becken vor der Kläranlage. Als Randbedingungen fungierten hier die Mindestmischungsverhältnisse der Bauwerke sowie die Entlastungsrate am letzten Bauwerk vor der Kläranlage. Dadurch konnte die Entlastungsrate des Gesamtsystems reduziert werden. Erwartungsgemäß zeigte sich hierbei, dass Drosseln im Unterlauf größeren Einfluss haben als im Oberlauf.

5 FAZIT UND AUSBLICK

KALIMOD stellt dem Modellierer ein effizientes Softwaretool zur Optimierung und Unsicherheitsanalyse von Modellrechnungen zur Verfügung. Die Softwarearchitektur bietet die Möglichkeit, weitere Simulationsmodelle oder Optimierungsverfahren einfach zu integrieren. Die Schnittstelle zu Modellen wird aktuell um weitere marktverfügbare Simulationsmodelle erweitert.

Auf der Basis der Kalibrierergebnisse können repräsentative und objektive Qualitätsstandards abgeleitet werden. Für die objektive Bewertung von Modell- und Kalibrierergebnissen fehlt ein kombiniertes Ereignis-spezifisches Abweichungsmaß.

Die Systemoptimierung kann insbesondere für große, komplexe Einzugsgebiete empfohlen werden. Die Netzstruktur derartiger Einzugsgebiete erschwert oftmals Optimierungspotenziale zu nutzen. Rechnergestützte Systeme und multikriterielle Optimierungsalgorithmen liefern auch unter anspruchsvollen Bedingungen objektive Ergebnisse, weshalb ihr Einsatz für komplexe Aufgaben der Siedlungswasserwirtschaft prädestiniert ist. Weitere Arbeiten werden sich mit der GIS-Kopplung der Software zur Systemoptimierung (Allokationsproblematik) befassen.

DANKSAGUNG

Die dargestellten Arbeiten sind Bestandteil des vom BMBF geförderten F/E-Vorhabens „Tools zur Kalibrierung und Unsicherheitsanalyse integraler Simulationsmodelle (KUS)“ (FKZ: 17 020X 10). Projektpartner sind das Institut für technisch-wissenschaftliche Hydrologie GmbH (itwh, Hannover), der Lippeverband (Essen) und der Ruhrverband (Essen).

6 REFERENZEN

- BGS Wasser (2007): *MOMENT 8, Modellierung von Mischwasserentlastungen, Handbuch Version 8*. Darmstadt, Brandt Gerdes Sitzmann Wasserwirtschaft GmbH.
- Deb, K., Pratap, A., Agarwal, S. und Meyarivan, T. (2002): *A fast and elitist multiobjective genetic algorithm: NSGA-II*. In: Ieee Transactions on Evolutionary Computation, 6 (2), S. 182-197.
- Duan, Q., Gupta, H.V. und Sorooshian, S. (1993): *Shuffled complex evolution approach for effective and efficient global minimization*. In: Journal of Optimization Theory and Applications, 76 (3), S. 501 - 521.
- Helton, J.C. und Davis, F.J. (2003): *Latin hypercube sampling and the propagation of uncertainty in analyses of complex systems*. In: Reliability Engineering and System Safety, 81 (1), S. 23-69.
- Hydrotec (2012): *Niederschlag-Abfluss-Modell NASIM - Programmdokumentation, Version 4.1.3*. Aachen, Hydrotec - Ingenieurgesellschaft für Wasser und Umwelt.
- ITWH (2010): *HYSTEM-EXTRAN 7: Hydrodynamische Abfluss-Transport- und Schmutzfrachtberechnung (Modellbeschreibung)*. Hannover: Institut für technisch-wissenschaftliche Hydrologie GmbH.
- ITWH (2012): *Kontinuierliche Simulation zur Bemessung von Speicherbauwerken in urbanen Entwässerungssystemen (KOSIM Modellbeschreibung)*. Hannover: Institut für technisch-wissenschaftliche Hydrologie GmbH.
- Rossman, L.A. (2004): *Storm Water Management Model, User's Manual, Version 5.0*.
- unidata (2013): *NetCDF (Network Common Data Form)*. <http://www.unidata.ucar.edu/software/netcdf/>. Zuletzt besucht: 10.06.2013.
- Vrugt, J.A. und Robinson, B.A. (2007): *Improved evolutionary optimization from genetically adaptive multimethod search*. In: Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 104 (3), S. 708-711.
- Vrugt, J.A., ter Braak, C.J.F., Diks, C.G.H., Robinson, B.A., Hyman, J.M. und Higdon, D. (2009): *Accelerating Markov Chain Monte Carlo Simulation by Differential Evolution with Self-Adaptive Randomized Subspace Sampling*. In: International Journal of Nonlinear Sciences and Numerical Simulation, 10 (3), S. 273-290.