

Simulationsverfahren für den optimierten Betrieb von Talsperren im operationellen Betrieb

Alexander Rötz
Christian Bouillon
Stephan Theobald

Die Bewirtschaftung von Talsperren mit konkurrierenden Nutzungen stellt im Echtzeitbetrieb eine besondere Herausforderung dar. Um abhängig von den äußeren Einflussfaktoren eine optimale Betriebsweise festzulegen, sind möglichst gute Vorhersagedaten sowie detaillierte Kenntnisse zur Wirkung von verschiedenen Betriebsstrategien auf die Abflussdynamik im Gewässersystem und auf die Einhaltung der Bewirtschaftungsziele erforderlich. Eingebettet in einer Vorhersageumgebung kann mit Simulations- und Optimierungsverfahren eine vorrausschauende (prädiktive) Steuerungsstrategie abgeleitet und daraufhin die Betriebsweise von wasserbaulichen Anlagen im operationellen Betrieb optimiert werden. Die Möglichkeit des Einsatzes der modellbasierten prädiktiven Regelung im laufenden Betrieb als Entscheidungsunterstützung zur Festlegung einer bedarfsgerechten Betriebsstrategie wird dargelegt und die Bedeutung des Simulationsverfahrens zur modellhaften Abbildung des wasserwirtschaftlichen Systems hervorgehoben. Am Beispiel der operationellen Bewirtschaftung der Edertalsperre wird die Anwendbarkeit gezeigt.

Stichworte: Modellbasierte prädiktive Regelung, Entscheidungsunterstützung, Optimierung, Talsperrensteuerung, Fließgewässermodellierung

1 Einleitung

Der Bau und Betrieb von Talsperren ist seit jeher eng mit der Nutzung der Ressource Wasser verbunden. Durch den künstlichen Aufstau des Gewässers und der damit einhergehenden Wasserspeicherung wird ein Ausgleich zwischen dem natürlich vorhandenen Wasserdargebot und dem Bedarf an Wasser für die Erfüllung unterschiedlicher Bedürfnisse, wie z. B. Wasserkraftnutzung, Hochwasserschutz, Bewässerung, Brauch- und Trinkwasserversorgung, Niedrigwasserbewirtschaftung und Binnenschifffahrt geschaffen. Aus den unterschiedlichen Nutzungsanforderungen resultiert ein Interessenskonflikt und es ergibt sich die Optimierungsaufgabe, mit welcher Betriebsweise die Wassernutzungseffizienz gesteigert werden kann. Zur Ableitung von effizienten Betriebsweisen und zur Entscheidungsunterstützung werden im Echtzeitbetrieb vermehrt computerge-

stützte Simulationsverfahren zur modellhaften Abbildung der Strömungs- und Regelungsprozesse im wasserwirtschaftlichen System eingesetzt. Mit der Möglichkeit auf Grundlage von gebietspezifischen Vorhersagedaten modellbasierte Simulationen zur zukünftigen Wirkung von verschiedenen Betriebsstrategien durchzuführen, werden Betreiber von wasserbaulichen Anlagen in der Lage versetzt, eine vorrausschauende Steuerungsstrategie für den individuellen Bewirtschaftungsfall abzuleiten.

2 Simulationsverfahren zur Entscheidungsunterstützung

2.1 Prinzip des Entscheidungsprozesses

Der auf einem Simulationsmodell beruhende Entscheidungsprozess zur Festlegung einer bedarfsgerechten und somit optimalen Talsperrenabgabe setzt zunächst voraus, dass das wasserwirtschaftliche System mit seiner komplexen Systemdynamik vollständig und möglichst realitätsnah in einem Prozessmodell abgebildet wird. Erfolgt darüber hinaus die Kopplung mit einem Optimierungsverfahren, wird dieses Prinzip als modellbasierte prädiktive Regelung (MPR) bezeichnet (*Dittmar, 2004*). Wie Abbildung 1 zeigt, wird dabei auf Grundlage eines Anfangszustandes zum Vorhersagezeitpunkt T_0 und den gebietspezifischen Zuflussvorhersagen das Prozessmodell in einer Optimierungsschleife wiederholt angestoßen, um sämtliche Zustandsgrößen (Modellprognose) des zu regelnden Systems über den Zeitraum T vorherzusagen. Dieser Prozess wird unter Berücksichtigung der zulässigen Abgabemengen (Nebenbedingung) solange – mit einer immer neuen vom Optimierer gewählten Folge von Stellgrößenänderungen (Talsperrenabgabe) – durchlaufen, bis die über eine Kostenfunktion (vgl. Glg. 1) quantifizierbaren Abweichungen zwischen simulierter Zielgröße ($x_{i,sim,k}$) und Zielvorgabe ($x_{i,soll,k}$) minimiert werden.

$$\min J = \sum_{i=1}^n \left(\omega_i \cdot \sum_{k=1}^T (x_{i,sim,k} - x_{i,soll,k})^a \right) \quad (1)$$

Die Kostenfunktion beschreibt dabei das individuelle Optimierungsproblem vom jeweiligen Bewirtschaftungsfall und nimmt eine parametergewichtete (ω_i) Priorisierung der teilweise konkurrierenden Bewirtschaftungsziele (z. B. Minimierung des Abflussscheitels unterhalb einer Talsperre, Einhaltung von Mindest- und Maximalabgaben, Einhaltung von Stauzielen, Einhaltung eines Mindestwasserstandes an einem Pegel) vor. Vom Anwender sind in der ereignisbezogenen Bewirtschaftung lediglich die betrieblichen Bewirtschaftungsziele (z. B. Zielwasserstand Talsperre, Abflussminderung Unterwasserpegel) und ggf. zu berücksichtigende Restriktionen (Nebenbedingungen) vorzugeben.

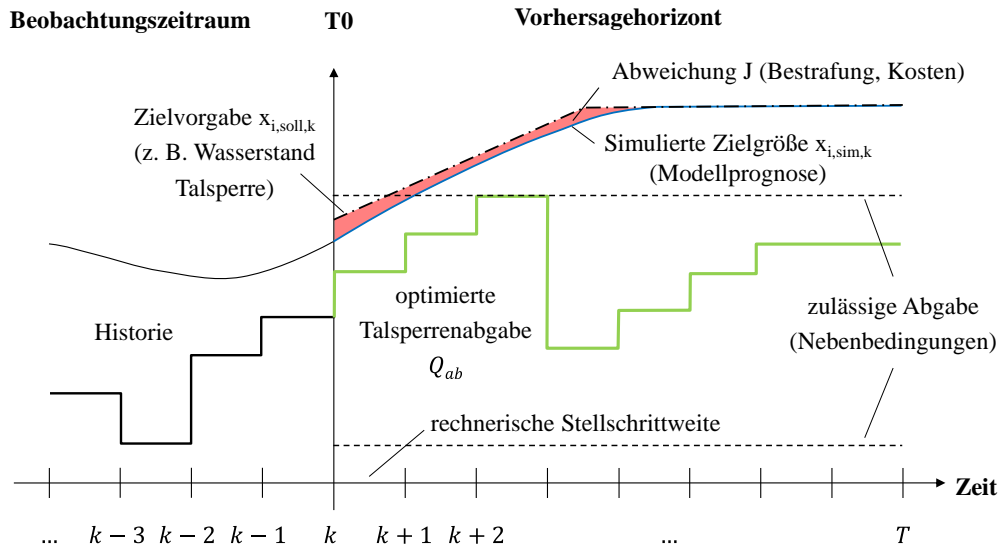


Abbildung 1: Anwendung der modellbasierten prädiktiven Regelung im operationellen Talsperrenbetrieb zur Einhaltung eines Pegelwasserstandes durch Optimierung der Talsperrenabgabe (Rötz und Theobald, 2016)

Den Simulations- und Entscheidungsprozess zur Festlegung einer optimierten Betriebsstrategie im operationellen Talsperrenbetrieb zeigt Abbildung 2. Auf Grundlage der abschließend vom Optimierer (z. B. IPOPT, *Wächter, 2009*) gefundenen Lösung kann der Anwender mit dem Simulationsverfahren weiterführende Szenarienrechnungen unter veränderten Zielvorgaben durchführen oder die für die nahe Zukunft (Stunden, Tag) simulierten Stellschritte in eine Abgabestrategie überführen. Die Entscheidung zur abschließenden Festlegung einer Betriebsstrategie obliegt demnach immer dem Betriebspersonal.

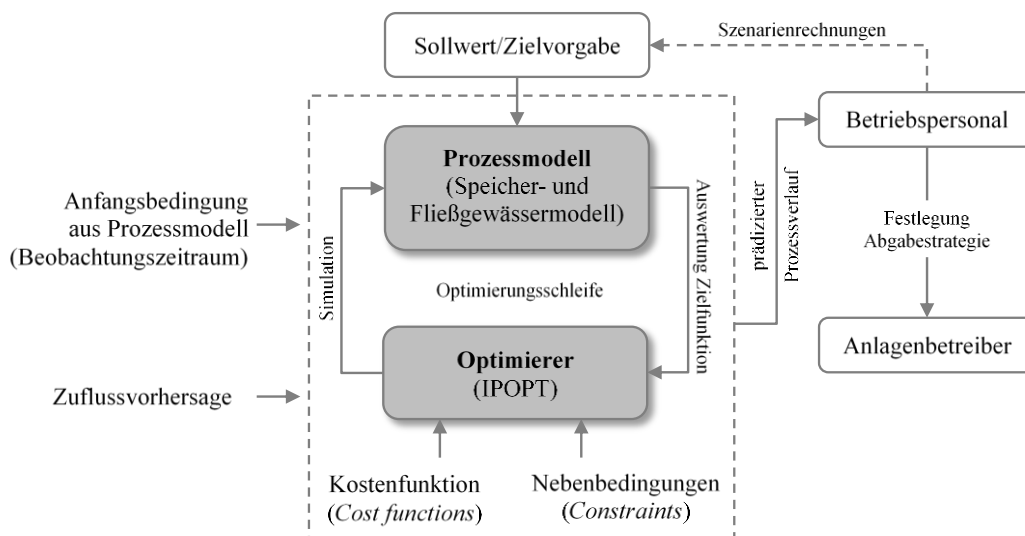


Abbildung 2: Prozess zur Optimierung einer Betriebsstrategie (Rötz und Theobald, 2016)

Stehen im operationellen Betrieb aktualisierte Prognosedaten bereit, kann der Prozess erneut durchlaufen werden, um die zuletzt getroffene Abgabestrategie, die Zielerreichung sowie das Eintreffen der Zuflussprognose zu überprüfen.

2.2 Modellhafte Abbildung des wasserwirtschaftlichen Systems

Die mit dem Prozessmodell erzielten Ergebnisse der simulierten Zustandsgrößen (Modellprognose) dienen dem Anwender als Entscheidungshilfe zur Festlegung einer bedarfsgerechten Betriebsstrategie und sollten daher ein hohes Vertrauen zugesprochen bekommen können. Voraussetzung für den operationellen Einsatz und zur Entscheidungsunterstützung ist zunächst, dass mit dem Prozessmodell auf Grundlage eines Speichermodells die Bilanzierung des zukünftigen Talsperrenvolumens und der resultierende Wasserstand möglichst genau beschrieben werden. Um die Auswirkungen von verschiedenen Betriebsstrategien auf die unterhalb der Talsperre gelegenen Gewässerstrecken darlegen zu können, ist das Speichermodell über die Talsperrenabgabe mit einem Fließgewässermodell zu koppeln. Die Notwendigkeit eines detaillierten Fließgewässermodells ergibt sich insbesondere dann, wenn sich der Ziel- und Steuerpegel weit unterhalb der Talsperre befindet. Folglich sind bei der hydrodynamischen Analyse des Wellenablaufs die Systemreaktionszeit (Wellenlaufzeit) und die Retentionseffekte im Gewässersystem bestmöglich wiederzugeben.

Im ereignisbezogenen Betrieb einer Talsperre sind Entscheidungen häufig in einem engen Zeitplan zu treffen. In diesem Zusammenhang kann es erforderlich sein, eine Bandbreite von verschiedenen Abgabeszenarien zu berechnen, um daraus eine möglichst optimale Bewirtschaftungsstrategie abzuleiten. Das Simulationsverfahren sollte daher im laufenden Talsperrenbetrieb über das gesamte Abflussspektrum (von Niedrig- bis Hochwasser) eine hohe Rechenperformance, ein zuverlässiges Laufverhalten und eine hohe Modellstabilität aufweisen. Da zugleich die nichtlineare Dynamik der strömungsmechanischen Vorgänge möglichst exakt beschrieben werden sollen, ist für die wiederholten Simulationen und für die Lösung des nichtlinearen Optimierungsproblems mit einem erheblichen numerischen Rechenaufwand zu rechnen. Aus diesem Grund werden für diesen Anwendungsbereich zugunsten des Rechenaufwandes effiziente hydrodynamisch-numerische Berechnungsverfahren eingesetzt, welche zumeist auf Vereinfachungen der 1D-Saint-Venant-Gleichungen basieren.

3 Anwendungsbeispiel „Edertalsperre“

Im Auftrag der Bundesanstalt für Gewässerkunde (BfG) wurde ein auf den freien Software-Produkten RTC-Tools (*Schwanenberg und Becker, 2015*) und

Delft-FEWS (*Werner et al., 2013*) basierendes und operationell zu betreibendes Vorhersage- und Optimierungsmodell für die Bewirtschaftung der Edertalsperre entwickelt (*Rötz et al., 2016*).

Die im nordhessischen Landkreis Waldeck-Frankenberg, etwa 35 km südwestlich von Kassel an einer Engstelle des Edertals gelegene Edertalsperre, staut mithilfe einer Schwergewichtsmauer die Eder zu einem ca. 28,5 km langen Stausee auf (vgl. Abbildung 3). Der langjährige mittlere Talsperrenzufluss beträgt am Zulaufpegel Schmittlotheim $MQ = 19,1 \text{ m}^3/\text{s}$, das oberirdische Einzugsgebiet des Stausees ca. 1.450 km^2 . Mit max. 199,3 Mio. m^3 Speichervolumen und einer Stauseeoberfläche von ca. 11 km^2 ist der Edersee bei Vollstauverhältnissen der volumen- und flächenmäßig drittgrößte Stausee Deutschlands (*Heimerl, et al., 2013*). Die Edertalsperre gehört neben der Diemeltalsperre zu den einzigen von der Wasser-

und Schifffahrtsverwaltung des Bundes betriebenen Talsperren. Abbildung 4 veranschaulicht den jahreszeitlich bedingten Einfluss der Talsperrenbewirtschaftung auf den unterhalb gelegenen Gewässerabschnitt. Während in den Sommermonaten der mittlere monatliche Mittelwasserabfluss am Zulaufpegel Schmittlotheim auf bis zu $Q = 7 \text{ m}^3/\text{s}$ absinkt, ist am Ablaufpegel Affoldern ein zunehmender Abfluss von bis zu $Q = 20 \text{ m}^3/\text{s}$ erkennbar. Auch der mittlere monatliche Niedrigwasserabfluss erhöht sich in dieser Zeit auf bis zu $Q = 11 \text{ m}^3/\text{s}$, obwohl der Zulaufpegel auf ca. $Q = 3 \text{ m}^3/\text{s}$ abfällt. Als primäre Zweckbestimmungen der Talsperre dient die erhöhte Talsperrenabgabe der saisonalen Niedrigwasseraufhöhung und durch Stützung des Wasserstandes an der Oberweser ab Hann. Münden zur Verbesserung der Schifffahrtsverhältnisse. Der Mehrzwecktalsperre fügen sich als weitere Zweckbestimmungen der Hochwasserschutz für die untere Eder, die untere Fulda und die Weser sowie die Energieerzeugung aus Wasserkraft an. Dabei ist die Betriebsstrategie bedarfsgerecht und abhängig von der jeweiligen hydrologischen und füllstandsabhängigen Situation anzupassen. Weitere Nebennutzungen sind Tourismus, Freizeit- und Naherholung sowie Binnenfischerei (*Hohenrainer et al., 2012*).

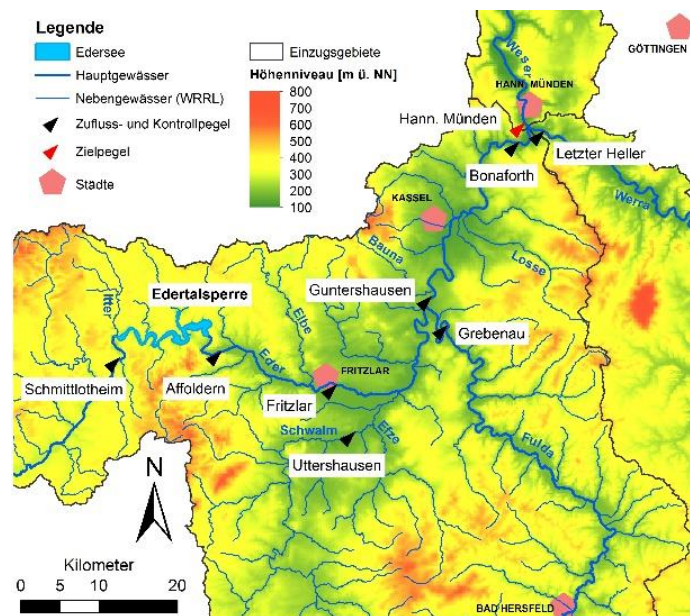


Abbildung 3: Untersuchungsgebiet der Edertalsperre mit relevanten Fließgewässern und Pegeln (*Rötz et al. 2016*)

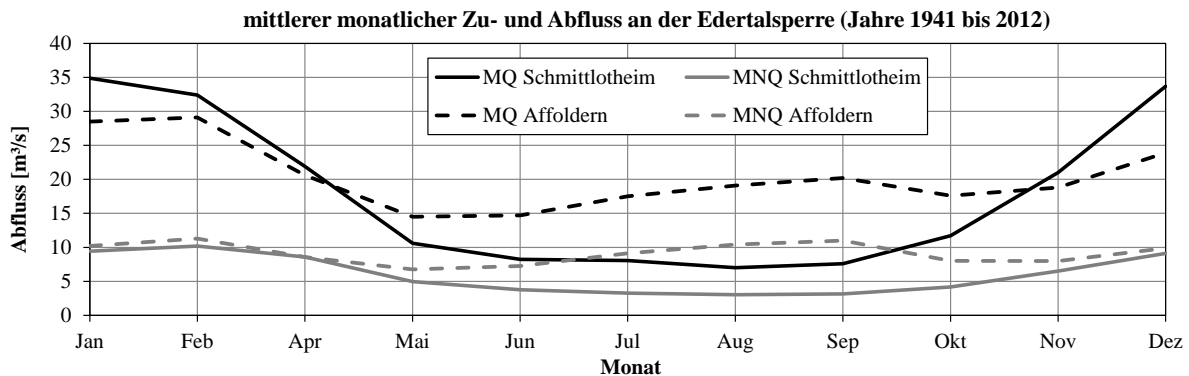


Abbildung 4: Mittlerer monatlicher Mittelwasser- und Niedrigwasserabfluss am Zu- und Ablaufpegel der Edertalsperre (Zahlen aus NLWKN, 2014)

Das zur operationellen Bewirtschaftung der Edertalsperre entwickelte Modellsystem berücksichtigt diese komplexen Nutzungsanforderungen sowie die örtlichen Rahmenbedingungen an den Gewässerabschnitten unterhalb der Talsperre und knüpft an Vorhersagedaten aus vorgeschalteten hydrologischen Modellen der BfG (*Cemus und Richter, 2008*) sowie jeweils aktuellen Abfluss- und Wasserstandsvorhersagen vom Hessischen Landesamt für Naturschutz, Umwelt und Geologie (HLNUG) an (*Brahmer, 2009*). Das Optimierungsmodell ermittelt im laufenden Betrieb eine im Hinblick auf die Talsperrenbilanz und der Wellenfortpflanzung in den Gewässerabschnitten bestmögliche Talsperrenabgabe und dient dem Betreiber als Entscheidungsunterstützungssystem.

Das Vorhersagesystem Delft-FEWS stellt die Benutzeroberfläche dar, verwaltet sämtliche Eingangs- und Ergebnisdaten und ruft über eine Schnittstelle die externen Modellkomponenten von RTC-Tools auf. Mit RTC-Tools erfolgt die Bilanzierung des Talsperrenvolumens, die hydrodynamische Modellierung des Wellenablaufs im Gewässersystem und die Optimierung der Steuergröße nach dem Prinzip der modellbasierten prädiktiven Regelung.

Das wasserwirtschaftliche Prozessmodell bildet die rund 106 km lange Gewässerstrecke zwischen der Edertalsperre und dem Pegel Hann. Münden mit 38 aneinandergereihten und kaskadenartig angeordneten Berechnungselementen (*Nodes*, vgl. Abbildung 5, links) ab (*Rötz et al., 2016*). Diese, auf Grundlage von Fluss- und Vorlandprofilen parametrisierten Elemente, bilden die Speicherwirkung im jeweiligen Gewässerabschnitt in Form einer Wasserstands-Volumen-Beziehung ab. Das hydraulische System besteht ferner aus Verbindungselementen (*Branch*) zwischen zwei Knotenpunkten. Der Abflussweitergabe von einem zum anderen Knoten wird mit der in RTC-Tools implementierten vereinfachten Bewegungsgleichung des diffusiven Wellenansatzes (*Schwanenberg und Becker, 2015*) ermittelt. Die Variablen der durchflossenen Fläche, des hydraulischen Radius und des Rauheitseiwertes werden auf Grundlage eines repräsentativen

tiven Querprofils vom Gewässerabschnitt als geometrische Funktion vom Wasserstand ausgedrückt. Umfangreiche Vergleichsuntersuchungen mit einem detaillierten 1D-HN-Modell haben gezeigt, dass mit dem gewählten Berechnungsverfahren eine gute Annäherung an die voll dynamische Lösung erreicht wird, der numerische Lösungsaufwand gering ausfällt und somit eine Eignung für den operationellen Einsatz gegeben ist (Rötz, 2016). Exemplarisch sind in Abbildung 5 (rechts) die mit beiden Modellen simulierte Abflussganglinien am Pegel Hann. Münden für ein ausgewähltes Abflussereignis aufgetragen. Der Vergleich der Abflussganglinien zeigt, dass trotz des deutlich höheren Abstraktionsgrades vom Fließgewässermodell der Wellenablauf sehr gut wiedergegeben wird und eine hohe Übereinstimmung zum 1D-HN-Modell vorliegt. Die für die Bewirtschaftung bedeutsamen Zielgrößen von Wellenanstieg und Wellenlaufzeit werden in nahezu gleicher Qualität wiedergegeben.

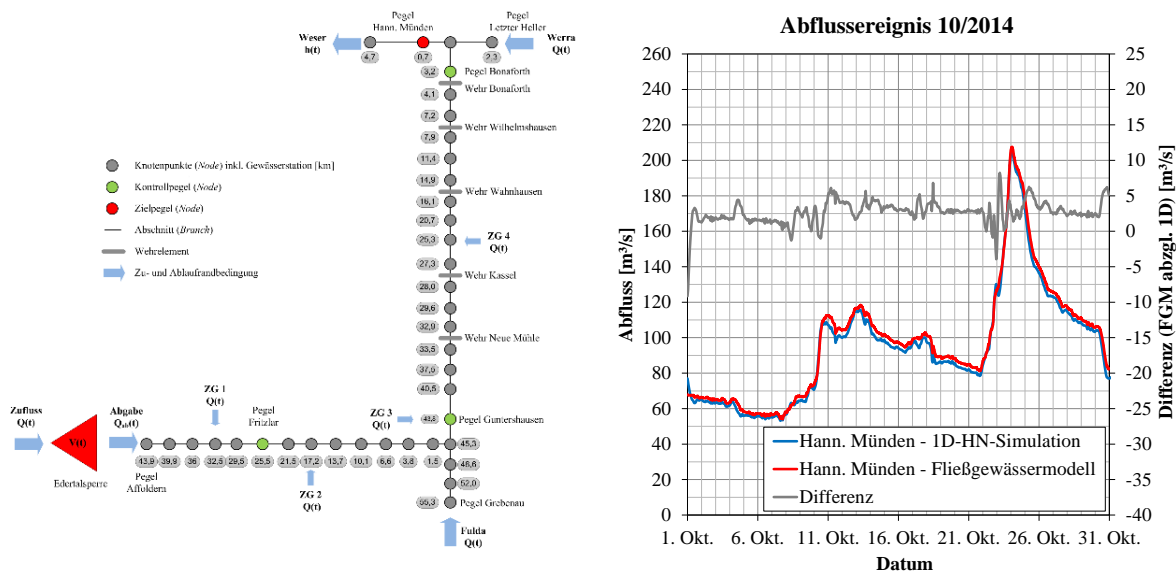


Abbildung 5: System vom Prozessmodell (links) sowie simulierte Abflussganglinien (rechts) am Zielpegel Hann. Münden zwischen dem Fließgewässermodell und einem 1D-HN-Modell (räumliche Auflösung mit 771 Querprofilen)

In dem Optimierungsmodell werden derzeit die speziellen Anforderungen der Bewirtschaftungsfälle „Schifffahrt“, „Niedrig- und Mittelwasser“ sowie „Hochwasser“ als getrennt formulierte Optimierungsprobleme berücksichtigt (Rötz et al., 2016). Der Anwender gibt im operationellen Betrieb die aus seiner Sicht zu erreichenden Bewirtschaftungsziele (z. B. Zielwasserstand Talsperre, Scheitelreduktion oder Mindestwasserstand Unterwasserpegel) vor. Die praktische Anwendbarkeit des Modellsystems wurde durch eine intensiv begleitete Testphase beim Wasser- und Schifffahrtsamt Hann. Münden sowie bei der Bundesanstalt für Gewässerkunde belegt (Rötz et al., 2016). Abbildung 6 zeigt ein Fallbeispiel zum Bewirtschaftungsfall „Hochwasser“ die Anwendung und Ergebnisverwert-

barkeit des Optimierungsmodells. Neben den prognostizierten Zuflussganglinien sind die optimierte Talsperrenabgabe (Stellgrößenfolge), die simulierte Abflussganglinie am Pegel Hann. Münden, der sich aus der Talsperrenbilanzierung ergebene Talsperrenfüllstand sowie die beobachteten Werte vom Vortag aufgetragen. In diesem Beispiel soll zum Schutz der Unterlieger als Bewirtschaftungsziel der Abfluss von $Q = 522 \text{ m}^3/\text{s}$ am Pegel Hann. Münden ($\hat{=} 470 \text{ cm}$, Meldestufe II) nicht überschritten werden. Zum Vorhersagezeitpunkt T_0 beträgt der Abfluss am Pegel Hann. Münden rund $Q_{T_0} = 345 \text{ m}^3/\text{s}$. Die aktuell prognostizierten Gebietszuflüsse zeigen, dass sich die Abflusssituation weiter verschärfen wird. Zugleich liegt der Talsperrenfüllstand innerhalb des Hochwasserschutzraumes (HWSR) und nur geringfügig unter der Vollstaugrenze.

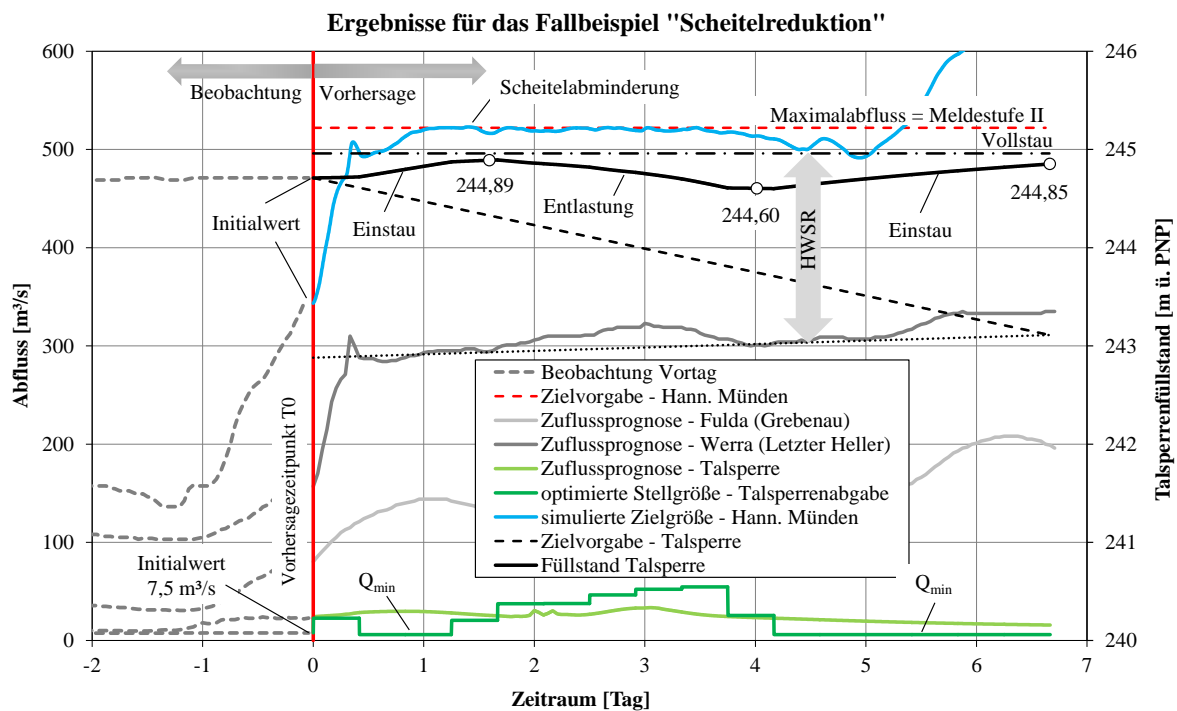


Abbildung 6: Optimierungsrechnung für den Bewirtschaftungsfall „Hochwasser“

Den prädiktiven Simulationsergebnissen ist zu entnehmen, dass das vorgegebene Bewirtschaftungsziel in den ersten Tagen eingehalten werden kann und mit der parametergewichteten Kostenfunktion der HWSR für Einstau- und Entlastungsprozesse ausgenutzt werden kann. Der modellbasierte Optimierungsprozess hat ergeben, dass zur Minderung des Wellenscheitels die Talsperrenabgabe in den ersten $1\frac{1}{2}$ Tagen auf bis zu $Q_{\min} = 6 \text{ m}^3/\text{s}$ gedrosselt und folglich ein Talsperreneinstau in Höhe von 19 cm ($\hat{=} 2,01 \text{ Mio. m}^3$) initiiert wird, ohne dass ein Talsperrenüberlauf stattfindet. Im weiteren Verlauf wird die Talsperrenabgabe schrittweise angehoben, um zunächst den HWSR um ca. 30 cm zu entlasten und im Anschluss einen wiederholten Einstau vorzunehmen. Da die prognostizierten

Modellzuflüsse am Ende des Vorhersagezeitraumes erneut ansteigen und das Abgabeminimum erreicht ist, kann auf das Hochwassergeschehen kein Einfluss mehr genommen werden. Auf dieser Ergebnisgrundlage kann der Anwender die zum Vorhersagezeitpunkt T_0 bestehende Talsperrenabgabe zunächst beibehalten. Die Belastbarkeit der simulierten Steuer- und Zielgrößen ist dabei primär von der Eintrittswahrscheinlichkeit der Wetter- und Zuflussprognose abhängig. So gilt die Aussage, dass die Unsicherheiten mit länger andauerndem Vorhersagezeitraum zunehmen. Diesem Umstand kann im Praxisbetrieb Rechnung getragen werden, indem das Optimierungsmodell mehrmals täglich mit aktualisierten Prognosedaten angewendet wird. Dadurch findet ein fortlaufender Abgleich zwischen beobachteten und simulierten Zustandsgrößen statt und der Anwender kann frühzeitig auf unerwartete Abweichungen reagieren. Ergänzend dazu können die Ergebnisse durch individuelle Abgabeberechnungen weiter verifiziert und verfeinert werden.

Die Anwendung des Optimierungsmodells zeigt, dass mit dem Einsatz von derartigen Simulationsverfahren verbesserte Betriebsstrategien festgelegt werden können. Die Auswirkung einer gewählten oder optimierten Talsperrenabgabe werden dem Anwender im Vorfeld seiner Entscheidung dargelegt und mögliche Handlungsspielräume in der Bewirtschaftung aufgezeigt, wodurch schlussendlich auch eine verbesserte Zielerreichung möglich ist.

4 Literatur

- Brahmer, G. (2009): Operationelle Wasserhaushaltsmodellierung zur Hochwasservorhersage in Hessen. Jahresbericht des HLNUG, S. 55-61.
- Cemus, J.; Richter K. (2008): Bewirtschaftung der Edertalsperre. – In: Bundesanstalt für Gewässerkunde (BfG) (Hrsg.): Veranstaltungen 6/2008, Wasserbewirtschaftung und Niedrigwasser, Kolloquium am 26./27. Mai 2008 in Koblenz, S. 84-95.
- Dittmar, R. (2004): Modellbasierte prädiktive Regelung. Eine Einführung für Ingenieure. – Verlag Oldenbourg, München.
- Heimerl, S.; Kohler, B.; Ebert, M.; Libisch, C. (2013): Die großen Stauanlagen Deutschlands im Portrait. In: Deutsches TalsperrenKomitee e.V. (Hrsg.): Talsperren in Deutschland: S. 35–492. Springer Vieweg. Wiesbaden.
- Hohenrainer, J.; Cemus, J.; Ebner von Eschenbach, A.-D.; Preuß, P.; Richter, K.: BEWASYS Edertalsperre - Aufbau eines Bewirtschaftungsmodells der Edertalsperre für den operationellen Betrieb. In: Bundesanstalt für Gewässerkunde (BfG) (Hg.): Veranstaltungen 2/2012, Überregionale Wasserbewirtschaftung - Entwicklung und Einsatz eines Informationssystems und verschiedener Modelle, Kolloquium am 12./13.10.2011 in Hannover, S. 61–71.
- NLWKN, Niedersächsischer Landesbetrieb für Wasserwirtschaft, Küsten- und Naturschutz (2014): Deutsches Gewässerkundliches Jahrbuch, Weser- und Emsgebiet 2012. Norden 2014.

- Rötz, A. (2016): Ein simulationsbasiertes Entscheidungshilfegerzeug zur Optimierung der operationellen Talsperrenbewirtschaftung. – Dissertation, Kasseler Wasserbau-Mitteilungen, Fachgebiet Wasserbau und Wasserwirtschaft, Heft 21, Universität Kassel.
- Rötz, A.; Bouillon, C.; Theobald, S.; Hohenrainer, J.; Ebner von Eschenbach, A.-D. (2016): Synthese von Praxiserfahrung und Modelloptimierung als Grundlage eines verbesserten Talsperrenbetriebes. – Forum für Hydrologie und Wasserbewirtschaftung, Heft 37.16, S. 315-325.
- Rötz, A.; Theobald, S.: Einsatz simulationsgestützter Modelloptimierung im ereignisbezogenen Talsperrenbetrieb. Hydrologie & Wasserbewirtschaftung 60 (6). 368-379.
- Schwanenberg, D.; Becker, B. (2015): RTC-Tools, Software Tools for Modeling Real-Time Control. – Referenz Manual, Onlinezugriff, http://content.oss.deltares.nl/delft3d/manuals/RTC_Tools_User_Manual.pdf.
- WÄCHTER, A. (2009): Short Tutorial: Getting Started With Ipopt in 90 Minutes. – <http://drops.dagstuhl.de/volltexte/2009/2089/pdf/09061.WaechterAndreas.Paper.2089.pdf>
- Werner, M.; Schellekens, J.; Gijysbers, P.; van Dijk, M.; van den Akker, O.; Heynert, K. (2013): The Delft-FEWS flow forecasting system. – Environmental Modelling & Software 40, 65-77.

Autoren:

Dipl.-Ing Alexander Rötz

Dipl.-Hydrol. Christian Bouillon

Fachgebiet Wasserbau und Wasserwirtschaft
Universität Kassel
Kurt-Wolters-Straße 3
34125 Kassel

Fachgebiet Wasserbau und Wasserwirtschaft
Universität Kassel
Kurt-Wolters-Straße 3
34125 Kassel

Tel.: +49 561 804-3203
Fax: +49 561 804-3952
E-Mail: a.roetz@uni-kassel.de

Tel.: +49 561 804-3538
Fax: +49 561 804-3952
E-Mail: c.bouillon@uni-kassel.de

Prof. Dr.-Ing. Stephan Theobald

Fachgebiet Wasserbau und Wasserwirtschaft
Universität Kassel
Kurt-Wolters-Straße 3
34125 Kassel

Tel.: +49 561 804-2679
Fax: +49 561 804-3952
E-Mail: s.theobald@uni-kassel.de