

# Potenziale eines optimierten, vorhersagegestützten Speicherbetriebs

Oliver Buchholz  
Philip Meier  
Ulf Winkler  
Dirk Schwanenberg

Für die Talsperre Eibenstock der LTV wurde im Oberlauf der Zwickauer Mulde bis zum Pegel Aue 3 ein Prototyp-Simulationssystem mit der Vorhersageplattform Delft-FEWS aufgebaut. Ziel war es abzuschätzen, in wie weit eine vorhersagegestützte, optimierte Steuerung der Talsperre zu einem verbesserten Hochwasserschutz beitragen kann. Das System besteht aus dem Niederschlag-Abfluss-Modell NASIM und RTC-Tools (Real Time Control) für die Vorhersage und die Abbildung bzw. Optimierung von Steuerszenarien.

Randbedingungen der Simulations-, Vorhersage- und Steuerszenarien sind die Steuerziele des Talsperrenbetreibers sowie die bestehenden Betriebsregeln und örtlichen Gegebenheiten. Für die vorhersagegestützte Steuerung werden drei Fälle unterschieden: (i) eine Variante mit „perfekten“ Vorhersagen zur Evaluierung des Potenzials der Steuerung, (ii) eine Variante mit gemessenen Niederschlägen als Antrieb des hydrologischen Modells, die die hydrologische Unsicherheit berücksichtigt, (iii) eine Berechnung mit meteorologischen Vorhersagen, gemäß der operationellen Steuerung im Ereignisfall.

Für das Hochwasserereignis Juni 2013 wurden Simulationsläufe in Delft-FEWS, durchgeführt und in Bezug auf die Effektivität des Hochwasser-Rückhalts bewertet. Neben Messwerten wurden die KLISY-Stationsdaten des DWD sowie die Wettervorhersage-Produkte COSMO-DE, COSMO-EU und GME verwendet. Eine Empfehlung zum Einsatz konnte ausgesprochen werden.

Stichworte: Hochwasserschutz, Speicherbetrieb, Optimierung, Vorhersage

## 1 Veranlassung

Viele Mehrzweckspeicher dienen dem Hochwasserschutz für unterhalb gelegene Flussabschnitte. Aufgrund ihres begrenzten Hochwasserschutzraums sind Steuerereingriffe rechtzeitig vorzunehmen, um einen effektiven Hochwasserrückhalt zu erzielen. Üblicherweise beruhen die Steuerregeln von Speichern auf aktuellen Messwerten, wie Zuflüssen, Füllständen, Unterwasserpegeln etc.. Operationelle Abflussvorhersagesysteme erweitern diese Datengrundlage durch determinis-

tische oder probabilistische Vorhersagen von Niederschlägen und Abflüssen. Eine weitere Steigerung der Rückhalteeffektivität ist erreichbar, wenn Optimierungswerkzeuge die Entscheidung über die im Ereignisfall anzuwendende Steuerstrategie unterstützen.

In der hier vorgestellten Studie (*Meier, 2014*) wurde für die Talsperre Eibenstock der Landestalsperrenverwaltung (LTV) Sachsen am Beispiel des Hochwassers Juni 2013 untersucht, inwieweit eine vorhersagebasierte und optimierte Steuerung den HW-Rückhalt gegenüber einer regel- bzw. erfahrungsbasierten

durchg Oliver Buchholz,  
Philip Meier

Ulf Winkler,

Dirk Schwanenberg eführten Steuerung verbessern kann. Dazu wurde für das Untersuchungsgebiet Zwickauer Mulde bis zum Pegel Aue 3 ein Prototyp-Simulationssystem mit der Vorhersageplattform Delft-FEWS aufgebaut. Es besteht aus dem Niederschlag-Abfluss-Modell NASIM und RTC-Tools (Real Time Control) für die Vorhersage und die Abbildung bzw. Optimierung von Steuer Szenarien.

## 2 Untersuchungsgebiet und Talsperre

Die Talsperre Eibenstock liegt im Westerzgebirge im Oberlauf der Zwickauer Mulde und hat ein Einzugsgebiet von 200 km<sup>2</sup>. Der gewöhnliche Hochwasserrückhalteraum des Mehrzweckspeichers umfasst 10,014 Mio. m<sup>3</sup> und liegt zwischen dem Stauziel auf 536,66 mNHN und dem Vollstau auf 539,60 mNHN mit 74,650 Mio. m<sup>3</sup>. Die Hochwasser-Steuerung ist auf den Pegel Aue 3 (685 km<sup>2</sup>) nach Einmündung des Schwarzwassers (Pegel Aue 1, 364 km<sup>2</sup>) ausgerichtet. Am Pegel Aue 3 sollte ein Abfluss von 210 m<sup>3</sup>/s nicht überschritten werden. Das Zwischeneinzugsgebiet unterhalb der Talsperre Eibenstock ist 121 km<sup>2</sup> groß, sodass die Talsperre nur Abflüsse aus knapp 30% des Gesamtgebiets des Zielpegels kontrollieren kann. Die Grundablasskapazität beträgt maximal 54 m<sup>3</sup>/s. Bei Überschreitung des Abfluss von 36 m<sup>3</sup>/s unterhalb der Talsperre, der noch schadfrei abgeführt werden kann, beginnt der Einstau nach den Betriebsregeln. Ziel der Steuerung ist es, eine ungünstige Überlagerung der Wellenscheitel aus der Zwickauer Mulde und dem Schwarzwasser zu vermeiden.

Aufgrund der steilen Topographie im Oberlauf der Zwicker Mulde fließen Hochwasser-Ereignisse schnell ab. Intensive Niederschläge führen bei den geringmächtigen Böden zu einer schnellen Abflussbildung.

### 3 Instrumentarium und Daten

**Delft-FEWS.** Den softwaretechnischen Rahmen der Untersuchung liefert das von Deltares, NL entwickelte, modular aufgebaute Hochwasservorhersagesystem Delft-FEWS (Flood Early Warning System) (Werner *et al.*, 2012). Delft-FEWS vereint alle notwendigen Arbeitsschritte in der operationellen Vorhersage wie Zeitreihen-Datenimport, -analyse, -aufbereitung, Ausführen von Modellläufen (Update- und Vorhersagesimulationen), Berechnung von Modellgüte-Indikatoren, Fehlerkorrektur, Verwalten von Systemzuständen, Visualisierung und Auswertung der Vorhersagen, Exporte und Berichtserstellung. Wesentliches Merkmal von Delft-FEWS ist die logische und praktische Trennung der Daten- und Modellebene, die es ermöglicht im Rahmen der individuellen Konfiguration die zweckmäßigsten Modelle anzukoppeln (Werner, 2012); (Buchholz, 2013). Im Rahmen der Untersuchung wurde für die LTV ein Pilotsystem erstellt.

**NASIM.** Zur Simulation von Abflüssen aus gemessenen und vorhergesagten Niederschlägen wird das hydrologische Modell NASIM (Hydrotec, 2013) eingesetzt. Für das Schwarzwasser konnte ein existierendes Modell der LTV übernommen werden. Für die Zwickauer Mulde oberhalb Einmündung Schwarzwasser wurde ein Modell neu erstellt. Die Kalibrierung erfolgte mit Messdaten für den Zulaufpegel Talsperre Eibenstock und für Pegel Aue 1 für die Jahre 2005 bis Juni 2013. Die Simulationsschrittweite beträgt 1 Stunde.

**RTC-Tools (Real Time Control).** Die Abbildung der Talsperrensteuerung und der Optimierung wird von RTC-Tools übernommen. RTC-Tools wird von Deltares als Open Source Projekt weiterentwickelt ([oss.deltares.nl/web/rtc-tools](http://oss.deltares.nl/web/rtc-tools)) und vielfach zur vorhersagebasierten, operationellen Steuerung von Speichersystem zur Optimierung der Energieerzeugung unter konkurrierenden Bewirtschaftungszielen eingesetzt (Schwanenberg *et al.*, 2010, 2013).

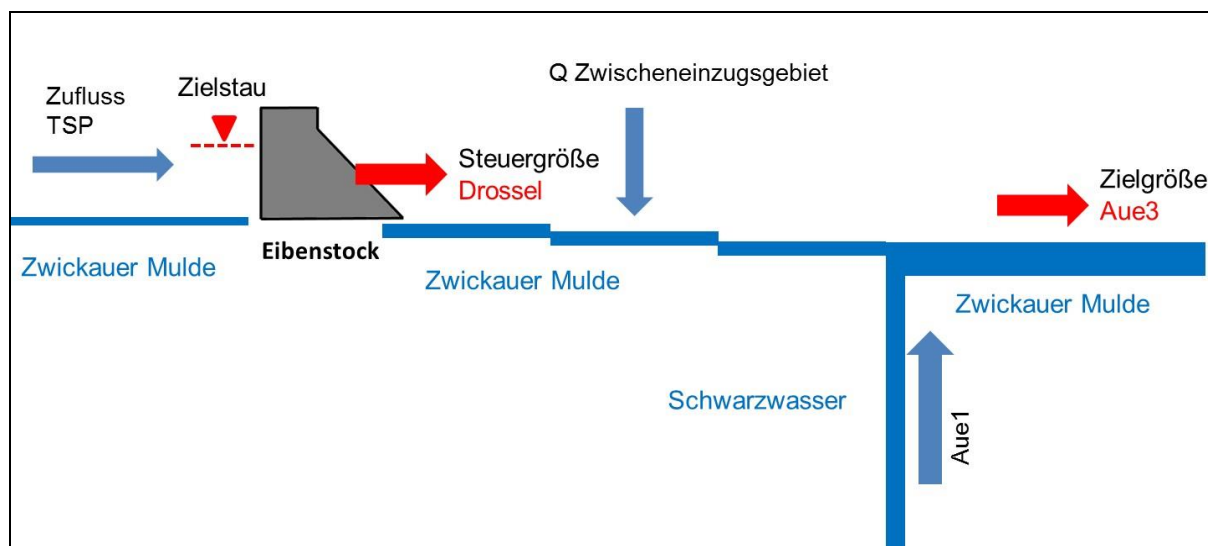
**Daten.** Für die Modellerstellung wurden im Rahmen dieser Studie historische Pegel- und meteorologische Stationszeitreihen des Niederschlags, der Temperatur und der Verdunstung benutzt. Das operationelle System benötigt ebenfalls aktuelle Messdaten (Pegel, Meteorologie) für die Updateläufe (Generierung aktueller Systemzustände) und Niederschlags- und Temperaturvorhersagen für die Vorhersagesimulationen. Letztere Daten sind die vom DWD zur Verfügung gestellte Produkte:

- COSMO-DE, 2,8\*2,8 km, Länge 21 h, 8 Vorhersagen pro Tag,
- COSMO-EU, 7\*7 km, Länge 24/48/78 h, 8 Vorhersagen pro Tag,
- GME, 40\*40 km, Länge 48/174 h, 4 Vorhersagen pro Tag.

Die probabilistischen Ensemble-Vorhersagen COSMO-DE-EPS (20 Ensemble-Member) und COSMO-LEPS (16 Ensemble-Member) können ebenfalls in das FEWS-System importiert werden, wurden im Rahmen der Studie jedoch nicht verwendet.

## 4 Methodik

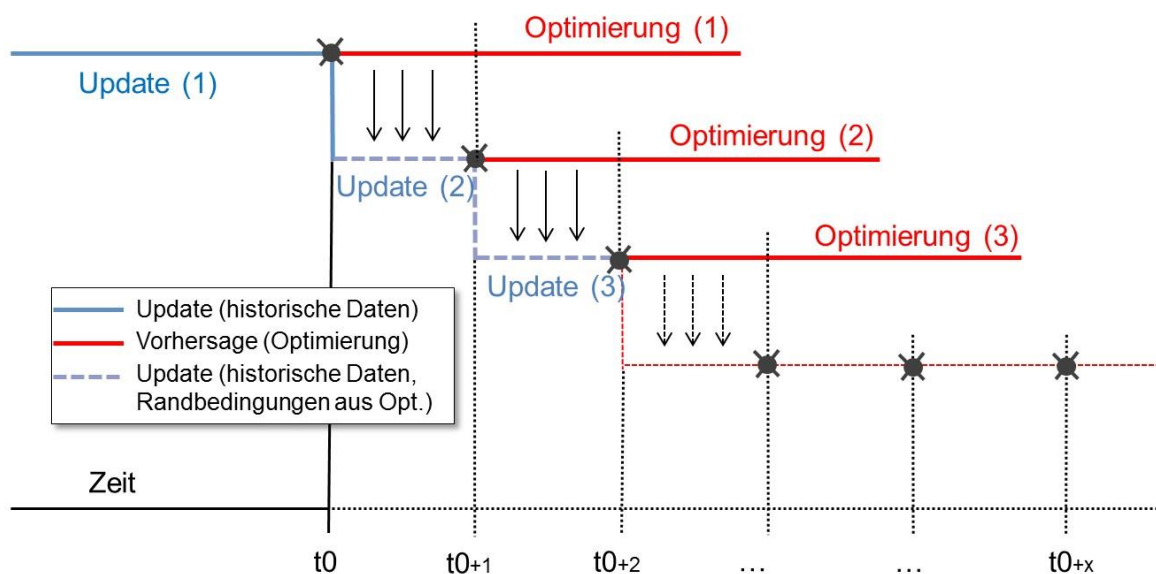
Für die Optimierung der Talsperrenabgabe mit RTC-Tools ist ein vereinfachtes Ersatzsystem bestehend aus der Talsperre und der Fließstrecke unterhalb bis zum Pegel Aue 3 konfiguriert. Der Speicherinhalt und die zugehörige Einstaukote werden über den Zufluss und die Abgabe bilanziert. Die Fließstrecke wird über eine einfache Speicherkaskade modelliert. Die Optimierung erfolgt über einen definierten Vorhersagehorizont von mehreren Tagen. Für diesen Zeitraum berechnet NASIM einmalig für jeden Vorhersagezyklus den Zufluss der Talsperre Eibenstock, den Abfluss des Schwarzwassers und des Zwischeneinzugsgebiets. RTC-Tools optimiert durch wiederholte Simulation die Drosselabgabe, sodass die Steuerziele über den Vorhersagehorizont optimal erreicht werden: (i) Einhalten des Stauziels von 536,66 mNHN und (ii) möglichst keine Überschreitung von 210 m<sup>3</sup>/s am Pegel Aue 3. Durch eine quadratisch formulierte Straffunktion führt dies am Pegel Aue 3 zu abgeflachten HW-Scheiteln. Ein weiteres Kriterium ist die Unterbindung von starken Fluktuationen in der Drosselabgabe.



**Abbildung 1:** Ersatzsystem der Optimierung, rot Zielgrößen / Steuergrößen, blau simulierte Größen

Das Zusammenspiel der einzelnen Module im operationellen Betrieb ist nachfolgend erläutert. Delft-FEWS importiert alle externen Daten und stellt sie den

Modellen aufbereitet zur Verfügung. Delft-FEWS organisiert die Kommunikation zwischen NASIM und RTC-Tools. Die Updateläufe werden von NASIM ausgeführt. Zum Vorhersagezeitpunkt  $t_0$  schließt sich eine Vorhersage an, für die ebenfalls die nicht optimierbaren Abflüsse von NASIM berechnet werden. Mit diesen Informationen optimiert RTC-Tools die Abgabe der Talsperre über den ersten Vorhersagehorizont. Im Falle eines Talsperrenüberlaufs setzt sich die Abgabe aus dem Grundablass und der HW-Entlastung zusammen. Für den nächsten Vorhersagezyklus zum Zeitpunkt  $t_0+1$  führt NASIM mit den dann verfügbaren Messwerten den nächsten Updatelauf und mit den numerischen Wettervorhersagen die nächste Vorhersagesimulation aus. Daran schließt sich wiederum der nächste RTC-Tools-Updatelauf zum Nachführen der Speicherfüllung und des Wellenablaufs und die nächste Optimierung der RTC-Tools an. Die Häufigkeit der Update- und Vorhersageläufe ist insbesondere davon abhängig, wie oft neue meteorologische Vorhersagen vorliegen.



**Abbildung 2:** Ablaufschema der sukzessiven Update- und Optimierungssimulation

Die Qualität der erzielbaren Ergebnisse hängt von der Güte der Messdaten, der hydrologischen Modellierung und der Güte der numerischen Wettervorhersagen ab. Um diese Einflüsse bei der Beurteilung der Zweckmäßigkeit dieses Simulationssystems trennen zu können, wurden drei Simulationsfälle definiert:

- ClosedLoop1 (Perfekte Vorhersage),
- ClosedLoop2 (Hydrologische Unsicherheit),
- ClosedLoop3 (Komplette Unsicherheit).

Alle Testsimulationen wurden für das Niederschlagsereignis vom Juni 2013 durchgeführt, für das sowohl Messwerte als auch DWD-Vorhersagen vorlagen.

**Perfekte Vorhersage.** In ClosedLoop1 werden die hydrologischen Abflussvorhersagen durch Pegelmesswerte ersetzt. Da das Zwischeneinzugsgebiet unterhalb der Talsperre unbeobachtet ist, wurden hier die Vorhersageabflüsse mit N- und T-Messwerten berechnet. Die perfekte Vorhersage stellt den Referenzfall unter optimalen Daten dar, der das maximale Potenzial der vorhersagegestützten Optimierung für Eibenstock aufzeigt.

**Hydrologische Unsicherheit.** Der Einfluss der Modellgüte des hydrologischen Modells wird bemerkbar, wenn Pegelmesswerte durch simulierte Abflüsse ersetzt werden. Als Input für die Vorhersagesimulationen dienen in diesem Fall jedoch gemessene und nicht vorhergesagte Niederschläge und Temperaturen.

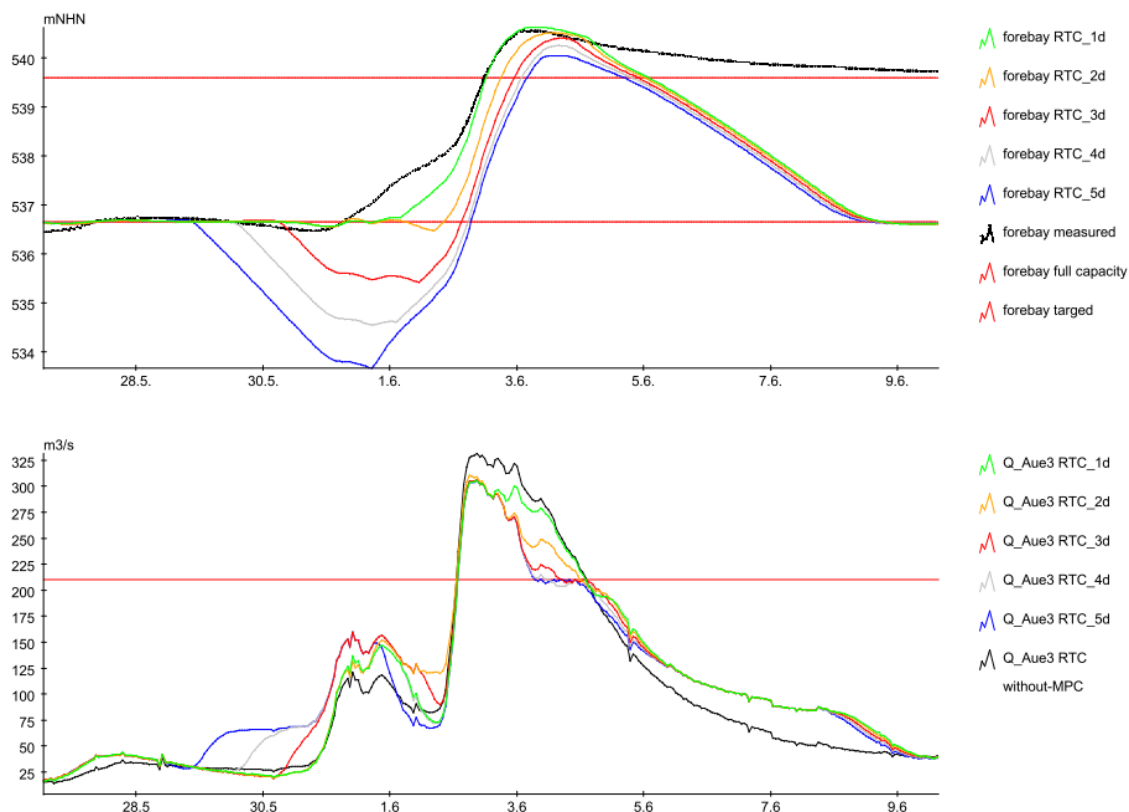
**Komplette Unsicherheit.** Dieser Fall entspricht dem operationellen Betrieb. Hier kommt die Unsicherheit der Wettervorhersagen dazu, die dem NA-Modell für den Vorhersagehorizont als Input dienen.

## 5 Testfall der Optimierung, Ereignis vom Juni 2013

Im Juni 2013 war Mitteleuropa von extremen Niederschlägen und daraus resultierenden extremen Hochwasserereignissen betroffen. Das von der Schweiz über Norditalien und Tschechien bis Polen wandernde Tiefdrucksystem „Günther“ transportierte auf der Westseite feuchte Luftmassen von Nord nach Süd, die am nördlichen Rand des Erzgebirges, bedingt durch die orographische Situation, zu langanhaltenden und intensiven Niederschlägen führten. Im Einzugsgebiet der TSP Eibenstock wurden vom 16.05. bis zum 06.06. ca. 300 mm Niederschlag im Gebietsmittel gemessen, für das Einzugsgebiet des Pegel Aue 3 ca. 270 mm. Die intensivsten Niederschläge traten vom 30.05. bis zum 03.06. mit ca. 190 mm im Einzugsgebiet der TSP Eibenstock auf. Die Zuflusswelle zur Talsperre hatte mit ca. 172 m<sup>3</sup>/s am 02.06. 8:00 h ihren Scheitel. Am Pegel Aue 1 wurde der Spitzenabfluss am 02.06. um 04:45 h mit 215 m<sup>3</sup>/s registriert. Zu diesem Zeitpunkt betrug der gedrosselte Abfluss der Talsperre nur 28,8 m<sup>3</sup>/s. Durch die von der LTV vorgenommene Steuerung konnte eine ungünstige Wellenüberlagerung verhindert werden. Der Maximalabfluss der TSP Eibenstock einschl. Überlauf trat erst am 03.06 um 06:00 h auf, und setzte sich somit hinter den Scheitelabfluss des Schwarzwassers. Für den Pegel Aue 3 ergibt sich der Maximalabfluss im Ereignis rechnerisch zu ca. 330 m<sup>3</sup>/s, als Überlagerung der Ganglinien des Pegels Aue 1, der Abgabe TSP Eibenstock und des simulierten Zwischengebietsabflusses.

## 6 Ergebnisse

**Perfekte Vorhersage.** In allen Simulationsszenarien wurden unterschiedliche Vorhersagehorizonte von 1 d bis 9 d getestet. Das Ergebnis zeigt: Je länger der Vorhersagehorizont, desto sicherer erkennt RTC das Ereignis und desto stärker wird vorentlastet. Zusätzlich setzt der Überlauf später mit einer geringeren Überlaufhöhe ein. Die Optimierung wirkt sich insbesondere im abfallenden Ast aus. Zum Zeitpunkt des Spitzenabflusses aus Aue1 wird die Abgabe der Talsperre zu Null gesetzt. Bei diesem Ereignis beträgt die maximal erreichbare Spitzenabflussenkung ca. 30 m<sup>3</sup>/s. Wesentlich deutlicher ist die Reduzierung der Dauer der Überschreitung des kritischen Abflusses von 210 m<sup>3</sup>/s. Diese reduziert sich von 47 h (Messwert) auf 29 h. Ab einem Vorhersagehorizont von 3 Tagen verbessern sich die Ergebnisse nicht mehr signifikant. Ein Vorhersagehorizont von einem Tag ist zu kurz, um wirksam vorzuentlasten. Die resultierenden Spitzenabflüsse am Pegel Aue 3 sind in Abb. 4 dargestellt.



**Abbildung 3:** Wasserstände in der Talsperre (oben) und Abflüsse am Pegel Aue 3 (unten) für unterschiedliche Vorhersagehorizonte, closed Loop 1

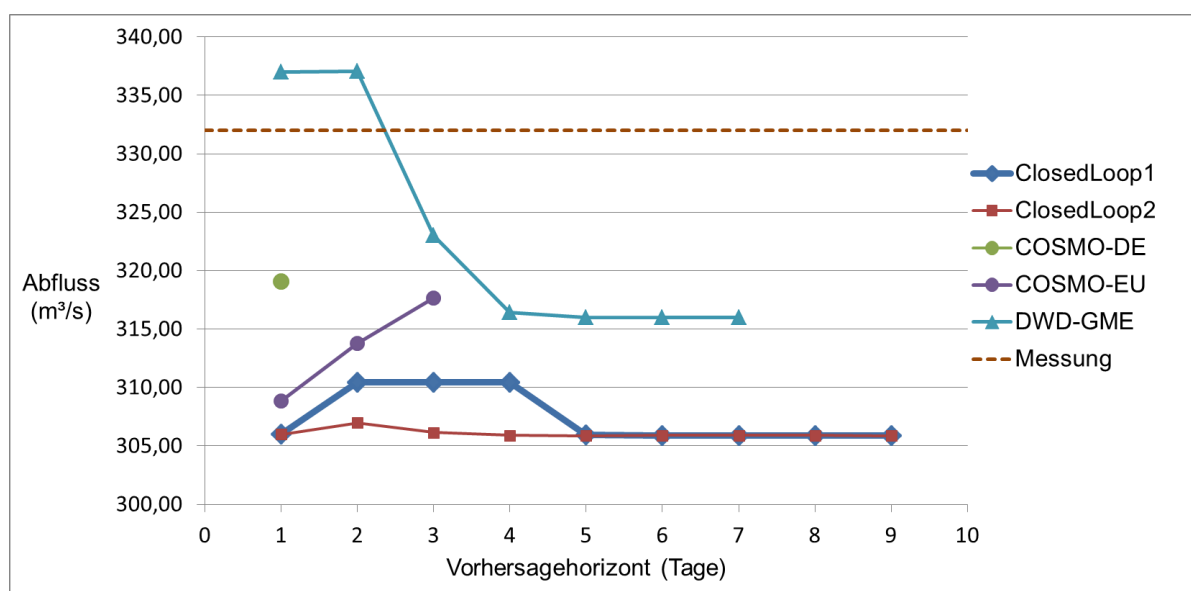
**Hydrologische Unsicherheit.** Dieses Simulationsszenario zeigt prinzipiell die gleichen Ergebnisse. Abb. 4 zeigt geringere Spitzenabflüsse als bei der perfekten Vorhersage. Dies liegt daran, dass das hydrologische Modell in diesem Ereignis

den Scheitel überschätzt, und damit bei kleinen Vorhersagezeiten größeren Abgaben optimiert werden. Dies ist günstig, da bei zu kleinen Vorhersagezeiten das Ereignis zu spät und nicht in seiner Gänze erkannt wird. Die Abflussminderung im abfallenden Ast fällt hingegen geringer aus. Erst auf einem Niveau von 230 m<sup>3</sup>/s halbiert sich die Ereignisdauer für einen Vorhersagehorizont von 5 d und auf ca. 260 m<sup>3</sup>/s für einen Vorhersagehorizont von 3 d.

**Komplette Unsicherheit.** In diesem Simulationsszenario wurden unterschiedliche deterministische Vorhersageprodukte (COSMO-DE, COSMO-EU, GME) über verschiedene Vorhersagehorizonte getestet. Dabei fällt das Ergebnis sehr differenziert aus.

Mit einer Länge von nur 21 h kann COSMO-DE das dreitägige Ereignis nicht überschauen. Die COSMO-DE Vorhersagen korrelieren gut mit den Stations-Messdaten. Im Ereignisschwerpunkt werden jedoch die Stationsmesswerte für einzelne Zeitpunkte bis zu 50% überschätzt mit der Folge einer eingeschränkten Spitzenabflussreduzierung auf ca. 319 m<sup>3</sup>/s (s. grüner Punkt in Abb. 4).

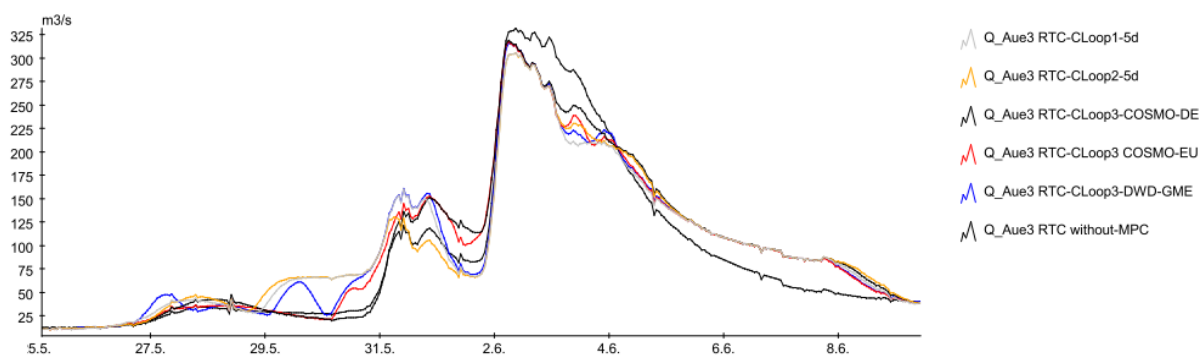
Für COSMO-EU mit einer Länge von 78 h wurden Vorhersagehorizonte von bis zu drei Tagen ausgewertet. Mit zunehmendem Vorhersagehorizont nimmt zwar die erreichbare Spitzenabflussreduzierung minimal ab (s. Abb. 4), jedoch können im abfallenden Ast oberhalb von 210 m<sup>3</sup>/s die Abflüsse gesenkt werden. Im Vergleich zu den Messwerten unterschätzt COSMO-EU die Niederschläge für dieses Ereignis im Mittel um 15%, für einzelne Vorhersagen um bis zu 40%.



**Abbildung 4:** Vergleich der Spitzenabflüsse für Simulations- und Produktvarianten

**DWD-GME** deckt den längsten Vorhersagezeitraum bis zu 174 h / 7 Tage ab. Die Summen und der zeitliche Intensitätsverlauf der N-Vorhersagen, fluktuieren

im Vergleich zu den Messwerten. Im Mittel werden die Messwerte um 20% unterschätzt, zu einzelnen Zeitpunkten auch überschätzt. Dieser Simulationsfall weicht am deutlichsten von der „perfekten Vorhersage“ ab. Erst ab einem Vorhersagehorizont von 3 Tagen liegen die Vorhersagen besser als die Ergebnisse der händischen Steuerung. Ab 4 Tagen kann keine weitere Reduzierung des Spitzenabflusses erreicht werden (s. Abb. 4). Für alle Simulationen kann jedoch die Überschreitung eines Abflussniveaus von 235 m<sup>3</sup>/s für Aue 3 auf 26 h reduziert werden gegenüber 40 Stunden während des Ereignisses.



**Abbildung 5:** Wasserstände in der Talsperre (oben) und Abflüsse am Pegel Aue 3 (unten) für unterschiedliche Vorhersagehorizonte, closed Loop 1

In Abb. 5 sind die Ganglinien für alle Szenarien und für unterschiedliche Vorhersagehorizonte, für jeweils den besten Fall dargestellt. Abb. 4 zeigt ebenfalls, dass ein Vorhersagehorizont länger als 5 Tage, keine Verbesserung bringt. Dies liegt an der Größe des Einzugsgebiets, dessen Reaktionszeit auf die Niederschläge und den prinzipiellen Steuermöglichkeiten.

Dieses Ereignis, bei dem ein Überlaufen der Talsperre nicht zu verhindern ist, erfordert eine Vorabsenkung in Verbindung mit einer Drosselabgabe von Null während des Scheiteldurchgangs im Schwarzwasser und einem möglichst späten Überlauf. Die unterschiedlichen Vorhersageprodukte unterscheiden sich darin, wie das erforderliche Maß der Vorabsenkung der Talsperre erkannt wird. Die resultierenden Ganglinien sind vom Typ alle gleich, mit Spitzenabflüssen, die relativ eng beieinander liegen.

## 7 Fazit

Die Untersuchung zeigt, dass das vorgestellte Verfahren geeignet ist, Steuerentscheidungen des Betreibers der Talsperre im Ereignisfall zu testen, zu beurteilen und abzusichern. Im Vergleich zur ohnehin schon guten Steuerung aufgrund des

Erfahrungs- und Expertenwissen der LTV kann noch eine leichte weitergehende HW-Scheitelabsenkung erreicht werden.

Vorhersagen sollten im operativen Einsatz mit allen Produkten vergleichend parallel durchgeführt werden. Die in Delft-FEWS automatisierten Workflows vom Datenimport bis zur Simulation ermöglichen es dem Hydrologen sich voll auf die fachlichen Belange zu konzentrieren. Weitere Untersuchungen zur Verwendung probabilistischer Vorhersagen (Ensembles) sind vorgesehen und führen vermutlich zu einer noch robusteren Entscheidungsunterstützung.

## 8 Literatur

Hydrotec (2013): NASIM-Modellbeschreibung, Version 4.2

Meier, P (2014): Short-term reservoir optimization for mitigation downstream flood risks, Master Thesis in „Transnational ecosystem-based Water Management (TWM)“, Radboud University Nijmegen, the Netherlands and University of Duisburg-Essen, Germany

Schwanenberg, D. and van Overloop, P.-J. (2010). Nonlinear Model Predictive Control of Flood Detention Basins in Operational Flood Forecasting. 9th International Conference on Hydroinformatics Tianjin, CHINA.

Schwanenberg, D. und Becker, B. (2013). RTC-Tools - Software Tools for Modeling Real-Time Control - Reference Manual. Delft. Deltares.

Werner, M.; J. Schellenkens; P. Gijsbers; M. van Dijk, O. van den Akker, K. Heynert (2012): The Delft-FEWS flow forecasting system, Environmental Modelling & Software, July 7, 2012, pp. 1-13

Autoren:

Dr.-Ing. Oliver Buchholz

MSc. Philip Meier

Dr.-Ing. Dirk Schwanenberg

Hydrotec Ingenieurgesellschaft für Wasser  
und Umwelt mbH  
Bachstraße 62-64  
52066 Aachen

Institut für Wasserbau und Wasserwirt-  
schaft, Universität Duisburg Essen,  
Universitätsstraße 15  
45141 Essen

Tel.: +49 241 94689-0

Tel.: +49 201 183 4303

Fax: +49 241 506889

Fax: +49 201 183 2886

E-Mail: o.buchholz@hydrotec.de

E-Mail: dirk.schwanenberg@uni-due.de

Dipl.-Hydrologe Ulf Winkler

Landestalsperrenverwaltung des Freistaates Sachsen, Bahnhofstr. 14, 01796 Pirna

Tel.: +49 3501 796375

Fax: +49 3501 796101

E-Mail: Ulf.Winkler@ltv.smul.sachsen.de