

Koppelung statistischer und wasserwirtschaftlicher numerischer Modelle

Jens Bender
Jürgen Jensen

Zur Ausweisung von Überflutungsgebieten unterhalb von wasserwirtschaftlichen Speichern wie Talsperren oder Hochwasserrückhaltebecken bleibt der Einfluss der Seeretention häufig unberücksichtigt. Dies liegt nicht zuletzt daran, dass zumeist nur oberhalb der Speicher langjährige Abflusszeitreihen existieren, die für eine statistische Auswertung herangezogen werden können. Jedoch besitzt jeder Speicher der im Haupt- oder Nebenschluss durchflossen wird, abhängig von seiner Größe und dem zur Verfügung stehenden Retentionsraum, einen Einfluss auf die Form und den Scheitelwert einer einlaufenden Hochwasserwelle. Am Beispiel der Obernautalsperre in Nordrhein-Westfalen werden auf Grundlage von 40-jährigen Zufluss- und Wasserstandsaufzeichnungen die belastungsrelevanten Parameter einlaufender Hochwasserwellen gemeinsam mit dem Initialwasserstand der Talsperre statistisch analysiert. Dabei werden Copula-Funktionen und parametrische, sowie nicht-parametrische Verteilungsfunktionen verwendet um die trivariate Eintrittswahrscheinlichkeit aus Scheitel, Volumen und Initialwasserstand im Speicher abzuschätzen. Die Ergebnisse werden anschließend in ein numerisches Speicherbewirtschaftungsmodell unter Berücksichtigung der Betriebsvorschriften eingesteuert um die Abflüsse der Talsperre aus Hochwasserentlastung und Grundablass im Bemessungsfall zu berechnen. In einem gekoppelten zweidimensionalen numerischen Strömungsmodell werden anschließend die resultierenden Überflutungsgebiete der Bemessungsabflüsse aus der Talsperre simuliert und den Überflutungsgebieten ohne Beachtung des Speichers gegenübergestellt. Es zeigt sich, dass ein beispielsweise 100-jährlicher Zufluss in die Talsperre erheblich gedämpft wird, so dass es im Unterliegergebiet nur zu geringen Ausuferungen des Gewässers kommt; im Vergleich führt ein 100-jährlicher Abfluss ohne Beachtung des Speichers zu weitreichenderen Überschwemmungen.

Stichworte: Hochwasserrisiko, wasserwirtschaftliche Speicher, Copula-Funktionen

1 Einführung

Für die Festlegung von potenziell gefährdeten Überflutungsgebieten entlang Gewässern werden üblicherweise Bemessungsabflüsse mit einem festen Wiederkehrintervall (z. B. 100 Jahren) angesetzt. Für die Abschätzung dieser Bemessungsabflüsse existieren zahlreiche extremwertstatistische Verfahren (z. B.

DWA, 2012). Die Bemessungsabflüsse werden dann mithilfe von Strömungsmodellen in Wasserstände überführt und die Überflutungsbereiche so festgelegt. Unterhalb von gesteuerten wasserwirtschaftlichen Speichern, wie beispielsweise Talsperren, lässt sich diese Methodik jedoch nicht ohne weiteres anwenden. Dies liegt im Wesentlichen daran, dass der Speicher durch den Einfluss der See- retention und den Betrieb (z. B. vorgehaltener Hochwasserschutzraum und die Entlastungssteuerung) einlaufende Hochwasserwellen beeinflusst. Somit sind die Kriterien der Homogenität und der Repräsentanz für eine extremwertstatistische Auswertung auslaufender Hochwasserwellen, bzw. deren Parameter nicht gegeben. Aus diesem Grund ist eine Betrachtung des Gesamtsystems, bestehend aus der einlaufenden Hochwasserwelle sowie der betrieblichen und natürlichen Wirkung des Speichers notwendig, um den resultierenden Abfluss, bzw. Wasserstände unterhalb des Staubauwerkes zu ermitteln.

In diesem Beitrag wird die Koppelung verschiedener, in der Wasserwirtschaft gängiger Modelle vorgestellt um die Überflutungsbereiche unterhalb eines Speichers bei einem Bemessungshochwasserereignis zu ermitteln. Dabei werden die wesentlichen statistischen Parameter der einlaufenden Hochwasserwelle, sowie der Speicherbetrieb in der Modellierung berücksichtigt. Die Methodik wird beispielhaft an der Obernautalsperre im südlichen Nordrhein-Westfalen für ein 100-jährliches Hochwasserereignis angewendet.

2 Methodik

In dem hier vorgestellten Ansatz werden synthetische Hochwasserganglinien für den Zufluss des Speichers auf Grundlage einer statistischen Analyse mit einer festgelegten Eintrittswahrscheinlichkeit generiert und in ein instationäres Speicherraumbewirtschaftungsmodell eingesteuert. Da der Wasserstand im Speicher und somit die Kapazität der Hochwasserentlastungsanlage berücksichtigt werden können, ist es notwendig sowohl den Scheitelabfluss (Q), das Volumen der Hochwasserwelle (V), als auch den zu Beginn des Hochwasserereignisses vorherrschenden Wasserstand (h) im Becken in die statistische Betrachtung mit einzubeziehen. Entsprechend der Stauhöhen-Stauvolumen-Beziehung, sowie den Betriebsvorschriften des Speichers wird so die entsprechende Abflussganglinie am Auslass des Sperrbauwerkes berechnet. Der Scheitelabfluss der auslaufenden Ganglinie wird anschließend in ein zweidimensionales hydrodynamisch-numerisches Modell eingesteuert um die entsprechenden Überflutungsflächen zu ermitteln. Abbildung 1 stellt die Koppelung der verschiedenen Modelle schematisch dar.

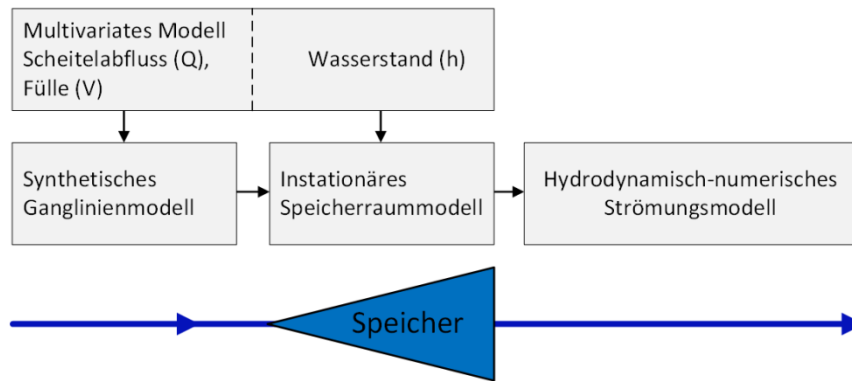


Abbildung 1: Schematische Darstellung der Modellkette zur Bestimmung der Überflutungsflächen unterhalb eines Speichers

2.1 Statistische Modellierung

Die statistische Auswertung der Parameter Q , V und h wird unter Verwendung von Copula-Funktionen (Copulas) durchgeführt. Copulas sind multivariate Verteilungsfunktionen zur Modellierung von Abhängigkeitsstrukturen von zwei oder mehreren Variablen. Die theoretische Grundlage von Copulas basiert auf dem Satz von Sklar (1959). Das gemeinsame statistische Verhalten von beispielsweise zwei Variablen X und Y mit kontinuierlichen Randverteilungen $u = F_X(x) = P(X \leq x)$ und $v = F_Y(y) = P(Y \leq y)$ kann eindeutig mit einer zugehörigen Abhängigkeitsfunktion, der Copula C , beschrieben werden. Im bivariaten Fall kann die Abhängigkeit für alle $(u, v) \in [0, 1]^2$ mit

$$F_{X,Y}(x,y) = C[F_X(x), F_Y(y)] = C(u,v) \quad (1)$$

beschrieben werden. Wobei $F_{X,Y}(x,y)$ die gemeinsame kumulative Verteilungsfunktion der Variablen X und Y darstellt. Copulas mit einer stetig, streng monoton fallenden Generator-Funktion $\varphi: [0, 1] \rightarrow [0, \infty]$ mit $\varphi(1) = 0$ gehören zur Familie der Archimedischen Copulas. Archimedische Copulas werden häufig in hydrologischen Untersuchungen angewendet, da sie relativ einfach zu modellieren sind und ein breites Spektrum an Abhängigkeitsstrukturen abbilden können. Nähere Informationen zur Copula-Theorie sind z. B. Nelson (2006) und Salvadori et al. (2007) zu entnehmen.

Zur Modellierung von mehr als zwei Variablen unter Verwendung von bivariaten Copulas ist es notwendig die Abhängigkeiten der Variablen untereinander zu berücksichtigen. Dafür existieren verschiedene Ansätze (Berg und Aas, 2009), wie beispielsweise hierarchisch genestete Copula-Modelle. Bei genesteten Copulas wird zunächst die Abhängigkeitsstruktur von zwei der zu untersuchenden Variablen über eine Copula beschrieben und jede weitere Variable über eine weitere Copula hinzugefügt. Abbildung 2 stellt das Vorgehen zur Konstruktion eines trivariaten genesteten Copula-Modells schematisch dar.

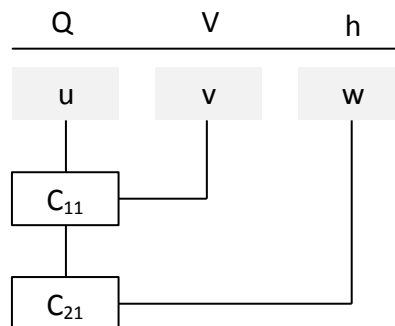


Abbildung 2: Schematische Darstellung der Konstruktion von hierarchisch genesteten Copula-Modellen

Dabei ist zu berücksichtigen, dass die Abhängigkeit der Variablen mit zunehmender Dimension abnimmt. In dieser Untersuchung werden die archimedischen Clayton-, Frank- und Gumbel-Copulas berücksichtigt.

2.2 Ganglinienmodell und instationäre Speicherraumrechnung

Mit den aus dem statistischen Modell gewonnenen Werten für Q und V wird nun eine synthetische Ganglinie generiert. Dabei stehen verschiedene Ansätze zur Verfügung. Eine umfangreiche Zusammenfassung gängiger Methoden ist z. B. in *Klein (2009)* zu finden. In dieser Untersuchung wird das in *Bender und Jensen (2014)* beschriebene Simulationsverfahren angewendet, welches den an- und absteigenden Ast, die Scheitelanstiegszeit sowie die Scheiteldauer unabhängig voneinander beschreibt. Dabei werden für jeden der vier Parameter die Mittelwerte aus den beobachteten Hochwasserganglinien angesetzt. So kann die Charakteristik der Abflussbildung in dem betrachteten Einzugsgebiet auch auf die synthetische Hochwasserganglinie übertragen werden. Die gewonnene Ganglinie wird im nächsten Schritt in das instationäre Speicherraummodell eingesteuert. Dieses numerische Modell basiert auf der allgemeinen Speichergleichung (z.B. *Maniak, 2010*):

$$\frac{[Q_Z(t)]+[Q_Z(t+\Delta t)]}{2} - \frac{[Q_A(t)]+[Q_A(t+\Delta t)]}{2} = \frac{\Delta V}{\Delta t} \quad (2)$$

D. h. der Mittelwert aus dem diskretisierten Zufluss $Q_Z(t)$ und $Q_Z(t+\Delta t)$ abzüglich des Mittelwertes des Abflusses $Q_A(t)$ und $Q_A(t+\Delta t)$ ergibt die Volumenänderung ΔV der Stauanlage in dem Zeitschritt Δt . Zur vollständigen iterativen Lösung der Speichergleichung ist es notwendig die Speicherinhaltsfunktion mit zu berücksichtigen, da der Abfluss Q_A bzw. die hydraulische Leistungsfähigkeit der Entlastungsorgane i. d. R. abhängig von dem Wasserstand h im Speicher ist. Als Initialwasserstand wird der aus dem statistischen Modell berechnete Wert für h angesetzt.

2.3 Numerische Strömungsmodellierung

Die aus der Speicherraumrechnung gewonnene Abflussganglinie kann im nächsten Schritt unter Berücksichtigung der geometrischen Verhältnisse in dem unterstrom des Speichers vorhandenen Gewässerabschnitt als Einlauftrandbedingung in einem numerischen Strömungsmodell verwendet werden. Dabei bleibt es dem Anwender überlassen ob ein ein-, zwei- oder dreidimensionales Modell verwendet wird. In dieser Studie kommt das zweidimensionale Strömungsmodell Hydro_AS-2D zum Einsatz (Nujic, 1999). Das Modell basiert auf den tiefengemittelten Flachwassergleichungen und lässt senkrechte Beschleunigungsterme unberücksichtigt. Die Rauheiten für den Gewässerbereich sowie die Vorländer werden entsprechend den gängigen Regelwerken (z.B. Bollrich, 2013) berücksichtigt. Für eine direkte Vergleichbarkeit mit den Überflutungsflächen des unbeeinflussten Abflusses wird das Modell unter stationären Abflussbedingungen betrieben.

3 Anwendung auf die Obernautalsperre

Die Obernautalsperre befindet sich im südlichen Nordrhein-Westfalen nahe der Stadt Netphen. Die Talsperre dient seit 1972 als Mehrzweckspeicher neben der Trinkwasserversorgung auch dem Hochwasserschutz für die Ortschaften im Kreisgebiet. Die Talsperre ist mit einem Stauvolumen von 14,8 Mio. m³ der Talsperrenklasse 1 zuzuordnen (DIN 19700-11, 2004). Das direkte Einzugsgebiet beträgt $A_{EO} = 11,3 \text{ km}^2$, wobei weitere 10,1 km² durch einen Überleitungstollen im Jahr 1984 aus dem benachbarten Siegtal angeschlossen worden sind. Diese Überleitung wird i. d. R. im Hochwasserfall verschlossen. Daher bleibt der Zufluss aus dem angeschlossenen Einzugsgebiet in dieser Untersuchung unberücksichtigt. Die Obernautalsperre verfügt über insgesamt drei Entlastungsorgane: (1) einen Grundablass, bestehend aus zwei DN 700 Rohren, (2) der Hochwasserentlastungsanlage, ausgeführt als dreifeldrige Überlaufschwelle mit aufgesetzten Fischbauchklappen, sowie (3) dem Entnahmeturm zur Rohwasserentnahme, der bei extremen Hochwasserereignissen als Notentlastung genutzt werden kann. Weitere Informationen sind z. B. in DTK (2013) verfügbar.

3.1 Datenverfügbarkeit

Am Zulauf des Vorstaubeckens der Talsperre wird der natürliche Zufluss in den Stauraum seit 1972 lückenlos erfasst. Die Zuflussganglinien stehen in 15-min. Mittelwerten bis zum Jahr 2011, d. h. in Form einer 40-jährigen Zeitreihe zur Verfügung. Die Wasserstände in der Talsperre werden ebenfalls seit 1972 täglich abgelesen. Durch den zusätzlichen Zufluss aus dem benachbarten Einzugs-

gebiet kann die Wasserstandszeitreihe jedoch erst ab 1985 verwendet werden. Desweiteren steht ein digitales Tiefenmodell des Speichers sowie digitale Höhendaten von dessen Uferrandstreifen zur Verfügung.

3.2 Statistische Modellierung

Zunächst werden die zu modellierenden Variablen aus der Zuflusszeitreihe ermittelt. Der Scheitelabfluss Q wird im Vorfeld als dominierende Belastungsgröße festgelegt, so dass zunächst die jährlichen Maximalabflüsse ermittelt werden. Dabei wird als Jahr das hydrologische Jahr (1. November – 31. Oktober) berücksichtigt. Im nächsten Schritt werden die korrespondierenden Füllen V der Hochwasserereignisse und der Initialwasserstand h im Speicher zu Beginn des jeweiligen Hochwasserereignisses bestimmt. Als nächstes werden Randverteilungen an die zwei Variablen Q und V angepasst. In beiden Fällen lässt sich die Allgemeine Extremwertverteilung (AEV) an das Kollektiv anpassen (vgl. Abbildung 3). Da der Initialwasserstand h stark durch den Betrieb der Talsperre beeinflusst ist und daher nicht als stochastisch unabhängige Größe angesehen werden kann, wird hier eine nicht-parametrische Verteilungsfunktion auf Basis einer Kerndichteschätzung (*engl. kernel density estimation*) durchgeführt. Dabei wurde als Obergrenze der Kerndichteschätzung ein Wert von 371,00 m NN angesetzt, der dem Vollstau der Talsperre, d. h. Oberkante der Hochwasserentlastungsanlage entspricht.

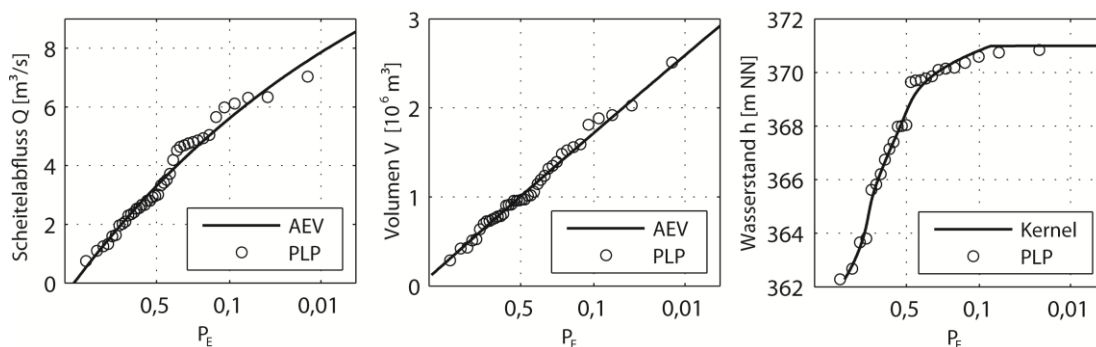


Abbildung 3: Randverteilungen und Plotting Positionen (PLP) der Variablen Q (AEV, links), V (AEV, mitte) und h (Kernel, rechts)

Die Abhängigkeitsstruktur der Variablen untereinander lässt sich durch die Rangkorrelation, bzw. durch Kendalls Korrelationskoeffizienten τ darstellen. Es ist zu erkennen, dass für alle drei Kombinationen, d. h. Q - V , Q - h und V - h eine Korrelation vorhanden ist (Abbildung 4).

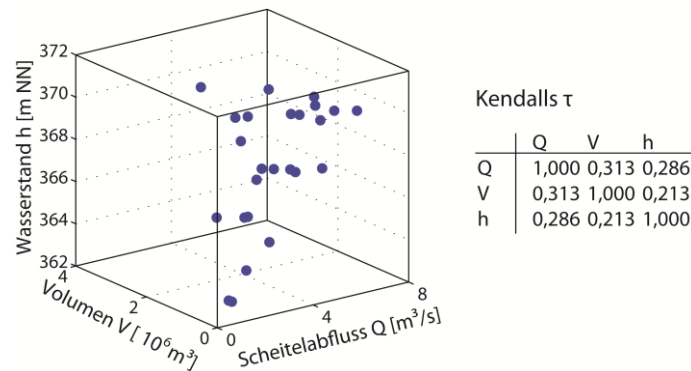


Abbildung 4: Beobachtete Werte von Scheitelabfluss Q , Volumen der Hochwasserwelle V und Initialwasserstand im Speicher (links) sowie Rangkorrelationsmatrix der Variablen (rechts)

Für die Modellierung der Abhängigkeitsstruktur von Q und V (C_{11} , vgl. Abbildung 2) eignet sich die Frank-Copula am besten, wie auch zur Modellierung der Abhängigkeit von QV - h (C_{21}). Die trivariate Dichtefunktion lässt sich wegen der Dimension grafisch nicht mehr darstellen. Aus diesem Grund, sowie aufgrund der Tatsache, dass der Scheitelabfluss Q als maßgebende Variable betrachtet wird, kann die kombinierte Eintrittswahrscheinlichkeit für V und h unter der Bedingung angegeben werden, dass die Eintrittswahrscheinlichkeit von Q gegeben ist (vgl. Abbildung 5). Hier wird der Scheitelabfluss mit $Q = 7,85 \text{ m}^3/\text{s}$, d. h. einer jährlichen Eintrittswahrscheinlichkeit von $P_E = 0,01$ berücksichtigt, was einem 100-jährlichen Ereignis entspricht.

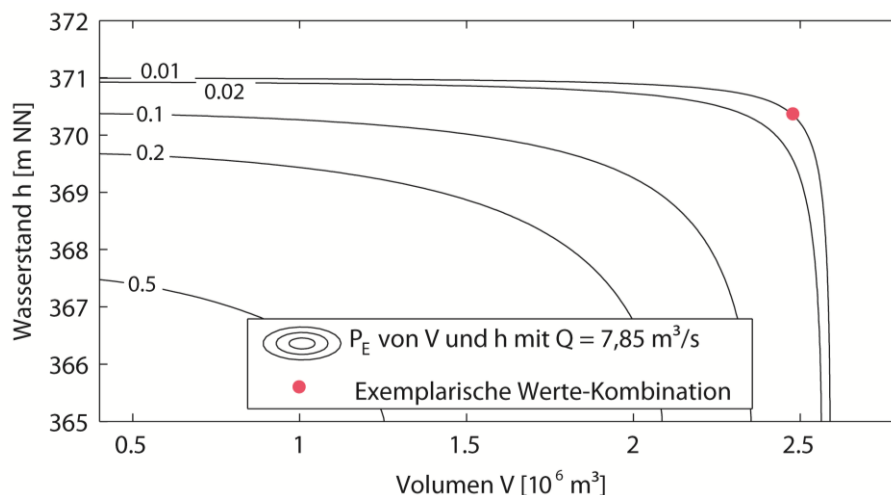


Abbildung 5: Quantil-Isolinien für V und h bei gegebenem $Q = 7,85 \text{ m}^3/\text{s}$

Somit besitzen alle möglichen Wertekombinationen auf der äußersten Quantil-Isolinie eine jährliche Eintrittswahrscheinlichkeit von $P_E = 0,01$ bei gegebenem Q ($7,85 \text{ m}^3/\text{s}$). Exemplarisch wird hier jedoch nur die Kombination

$V = 2,5 \cdot 10^6 \text{ m}^3$ und $h = 271,60 \text{ m NN}$ berücksichtigt (in Abbildung 5 als roter Punkt dargestellt).

3.3 Gangliniengenerierung und Speicherraumrechnung

Die aus den statistischen Untersuchungen gewonnenen Werte für Q ($7,85 \text{ m}^3/\text{s}$) und V ($2,5 \cdot 10^6 \text{ m}^3$) dienen nun als Grundlage zur Generierung einer synthetischen Hochwasserganglinie (vgl. Abbildung 6). Diese wird wiederum in das Speicherraummodell bei einem Initialwasserstand von $h = 270,6 \text{ m NN}$ eingesteuert. Für die Entlastung der Talsperre während eines Hochwasserereignisses stehen neben der Hochwasserentlastungsanlage verschiedene weitere Möglichkeiten zur Verfügung, wie beispielsweise die zusätzliche Entlastung über den Grundablass und/oder die Notentlastung. Diese Optionen werden an dieser Stelle vernachlässigt und es wird ein konservativer Ansatz gewählt, der nur die Entlastung über die Hochwasserentlastungsanlage vorsieht. Abbildung 6 stellt die simulierte Zuflussganglinie und die entsprechende Abflussganglinie aus dem Speicher dar.

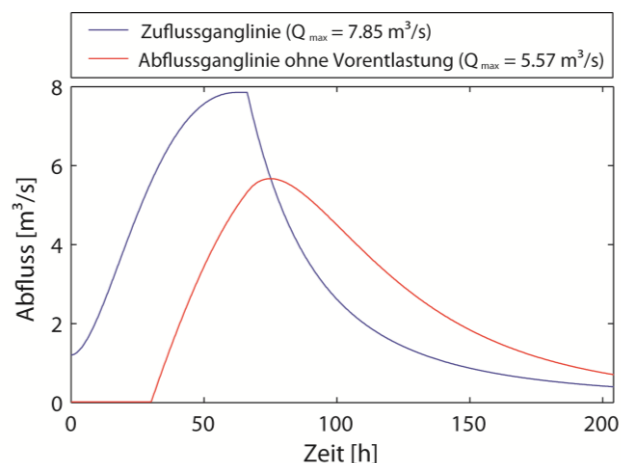


Abbildung 6: Simulierte Zuflussganglinie und die im Speicherraummodell berechnete Abflussganglinie

Es ist zu erkennen, dass die Hochwasserwelle durch die der Seeretention stark verformt wird. Der ursprüngliche Scheitelwert im Zufluss von $Q_{\text{Zu}} = 7,85 \text{ m}^3/\text{s}$ wird auf $Q_{\text{Ab}} = 5,57 \text{ m}^3/\text{s}$ reduziert. Dies entspricht einer prozentualen Reduktion um nahezu 30 %.

3.4 Hydrodynamisch-numerische Strömungsmodellierung

Unterhalb der Talsperre werden die Wasserstände nun mithilfe eines zweidimensionalen hydrodynamisch-numerischen Modells ermittelt. Für die direkte Vergleichbarkeit des Szenarios mit dem unbeeinflussten Abfluss aus dem natürlichen Einzugsgebiet ($Q = 7,85 \text{ m}^3/\text{s}$) und dem durch die Talsperre reduzierten Abfluss ($Q = 5,57 \text{ m}^3/\text{s}$) werden in beiden Modellläufen identische Randbedin-

gungen angesetzt. Zudem werden beide Modelle unter stationären Abflussbedingungen betrieben.

Der nicht durch den Speicher beeinflusste Abfluss führt im gesamten Bereich des Gewässers zu höheren Wasserständen als der gedämpfte Abfluss. Daraus resultierend ergeben sich auch weitreichendere Überschwemmungsgebiete, wie in Abbildung 7 beispielhaft für einen ausgewählten Gewässerabschnitt unterhalb der Talsperre dargestellt.



Abbildung 7: Beispielhafte Darstellung von Überschwemmungsgebieten unterhalb der Obernautalsperre ohne Berücksichtigung des Speichers (links) und mit Berücksichtigung des Speichers (rechts)

4 Diskussion

Die hier vorgestellte Koppelung verschiedener Modelle zur Ermittlung von Überschwemmungsflächen unterhalb von wasserwirtschaftlichen Speichern zeigt, dass der Speicher einen signifikanten Einfluss auf den Scheitelabfluss der Hochwasserwelle hat. An dem Fallbeispiel der Obernautalsperre kann für ein 100-jährliches Hochwasserereignis gezeigt werden, dass die trivariate Betrachtung der einlaufenden Hochwasserwelle (Scheitel und Volumen) mit einem entsprechenden Initialwasserstand h dazu führt, dass der Scheitel um ca. 30 % Prozent gedämpft wird. Dies wiederum führt zu kleineren Überschwemmungsflächen im Unterlauf der Talsperre.

In weiteren Untersuchungen sind die Unsicherheiten dieser Modellkette hinsichtlich einer möglichen Aufsummierung der einzelnen Teilmodelle zu untersuchen und das Gesamtergebnis auf dieser Basis zu bewerten.

5 Literatur

- Bender, J. und Jensen, J. (2014): Ein erweitertes Verfahren zur Generierung synthetischer Bemessungshochwasserganglinien, in: Vorsorgender und nachsorgender Hochwasserschutz (Heimerl, S. und Meyer, H., Hrsg.), Springer.
- Berg, D. und Aas, K. (2009): Models for construction of higher-dimensional dependence: A comparison study, *European Journal of Finance*, 15, 639-659.
- DIN 19700-11 (2004): Stauanlagen – Teil 11: Talsperren, Deutsches Institut für Normung e. V., Beuth Verlag.
- DTK (2013): Talsperren Deutschlands, Deutsches Talsperrenkomitee e.V., Springer.
- DWA (2012): Ermittlung von Hochwasserwahrscheinlichkeiten, Merkblatt DWA M-552 der Deutschen Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e.V..
- Gräler, B., M. J. van den Berg, S. Vandenberghe, A. Petroselli, S. Grimaldi, B. De Baets, und N. E. C. Verhoest (2013): Multivariate return periods in hydrology: a critical and practical review focusing on synthetic design hydrograph estimation, *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 17, 1281–1296.
- Klein, B. (2009): Ermittlung von Ganglinien für die risikoorientierte Hochwasserbemessung von Talsperren, Dissertation, Lehrstuhl für Hydrologie, Wasserwirtschaft und Umwelttechnik, Ruhr-Universität Bochum.
- Maniak, U. (2010): Hydrologie und Wasserwirtschaft – Eine Einführung für Ingenieure, 6. Auflage, Springer, Heidelberg.
- Nelsen, R.B. (2006): An introduction to copulas. *Lecture Notes in Statistics*, 2nd ed., Springer, New York, 2006.
- Nujic, M. (1999) Praktischer Einsatz eines hochgenauen Verfahrens für die Berechnung von tiefengemittelten Strömungen. *Mitteilungen des Instituts für Wasserwesen der Universität der Bundeswehr München*, Nr. 64.
- Salvadori, G., C. De Michele, N. Kottegoda, und R. Rosso (2007): *Extremes in Nature: An Approach Using Copulas*, Springer, New York.
- Sklar, A. (1959): Fonction de répartition à n dimensions et leurs marges. *Publications de l'Institut de Statistique Université de Paris*, 8, 229–231.
- Wahl, T., C. Mudersbach, und J. Jensen (2012): Assessing the hydrodynamic boundary conditions for risk analyses in coastal areas: A multivariate statistical approach based on Copula functions, *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 12, 495-510.

Autoren:

M.Sc. Jens Bender

Prof. Dr.-Ing. Jürgen Jensen

Forschungsinstitut Wasser und Umwelt
Universität Siegen
Paul-Bonatz-Str. 9-11
57076 Siegen

Forschungsinstitut Wasser und Umwelt
Universität Siegen
Paul-Bonatz-Str. 9-11
57076 Siegen

Tel.: +49 271 740 3401

Tel.: +49 271 740 2172

Fax: +49 271 740 2722

Fax: +49 271 740 2722

E-Mail: jens.bender@uni-siegen.de

E-Mail: juergen.jensen@uni-siegen.de