

HENRY

Hydraulic Engineering Repository

Ein Service der Bundesanstalt für Wasserbau

Conference Paper, Published Version

Johnen, Gregor; Becker, Bernhard; Bouaziz, Laurène; Piovesan, Teresa; Dacheneder, Felix; Snippen, Edwin

Optimale Talsperrenbewirtschaftung und ihr Nutzen für ein adaptives Einzugsgebietsmanagement: Eine Fallstudie für das Maas-Einzugsgebiet

Dresdner Wasserbauliche Mitteilungen

Zur Verfügung gestellt in Kooperation mit/Provided in Cooperation with:

Technische Universität Dresden, Institut für Wasserbau und technische Hydromechanik

Verfügbar unter/Available at: <https://hdl.handle.net/20.500.11970/107536>

Vorgeschlagene Zitierweise/Suggested citation:

Johnen, Gregor; Becker, Bernhard; Bouaziz, Laurène; Piovesan, Teresa; Dacheneder, Felix; Snippen, Edwin (2021): Optimale Talsperrenbewirtschaftung und ihr Nutzen für ein adaptives Einzugsgebietsmanagement: Eine Fallstudie für das Maas-Einzugsgebiet. In: Technische Universität Dresden, Institut für Wasserbau und technische Hydromechanik (Hg.): Wasserbau zwischen Hochwasser und Wassermangel. Dresdner Wasserbauliche Mitteilungen 65. Dresden: Technische Universität Dresden, Institut für Wasserbau und technische Hydromechanik. S. 97-106.

Standardnutzungsbedingungen/Terms of Use:

Die Dokumente in HENRY stehen unter der Creative Commons Lizenz CC BY 4.0, sofern keine abweichenden Nutzungsbedingungen getroffen wurden. Damit ist sowohl die kommerzielle Nutzung als auch das Teilen, die Weiterbearbeitung und Speicherung erlaubt. Das Verwenden und das Bearbeiten stehen unter der Bedingung der Namensnennung. Im Einzelfall kann eine restriktivere Lizenz gelten; dann gelten abweichend von den obigen Nutzungsbedingungen die in der dort genannten Lizenz gewährten Nutzungsrechte.

Documents in HENRY are made available under the Creative Commons License CC BY 4.0, if no other license is applicable. Under CC BY 4.0 commercial use and sharing, remixing, transforming, and building upon the material of the work is permitted. In some cases a different, more restrictive license may apply; if applicable the terms of the restrictive license will be binding.



Optimale Talsperrenbewirtschaftung und ihr Nutzen für ein adaptives Einzugs- gebietsmanagement: Eine Fallstudie für das Maas-Einzugsgebiet

Gregor Johnen
Bernhard Becker
Laurène Bouaziz
Teresa Piovesan
Felix Dacheneder
Edwin Snippen

Die letzten Jahre haben gezeigt, dass während langer Dürreperioden sowohl die Gewässergüte als auch Wasserquantität der Maas gefährdet sind. Hierdurch steigt die Bedeutung des Talsperrenverbundes im oberen Rur Einzugsgebiet für die transnationale Wasserversorgung. Eine optimierte Bewirtschaftung dieses Verbundsystems unter Berücksichtigung der zum Teil konkurrierenden Bewirtschaftungsziele in verschiedenen Anrainerstaaten bietet eine Möglichkeit, um den wachsenden Herausforderungen zu begegnen. In der vorliegenden Studie werden sowohl die bestehende reaktive Steuerung des Verbundsystems als auch eine prädiktive Steuerung zur Mehrzieloptimierung mit der wasserwirtschaftlichen Optimierungssoftware RTC-Tools modelliert. Unter Annahme perfekter Informationen über die Talsperrenzuflüsse zeigt die Studie folgende Ergebnisse: Die Speicher des Rurtalsperren-Verbundsystems haben Kapazitätsreserven zur Unterstützung der flussabwärts gelegenen Wassernutzer während ausgewählter Trockenperioden. Mit der Methode der Zielprogrammierung können diese Kapazitäten ohne Einbußen hinsichtlich der betrieblichen oder ökologischen Zielsetzungen des Talsperrenbetreibers genutzt werden.

Stichworte: Talsperrensteuerung, Verbundbewirtschaftung, Modellbasierte prädiktive Steuerung, MPC, Multikriterielle Optimierung, real-time control, RTC-Tools

1 Einleitung

Während die Nachfrage nach sauberem Oberflächenwasser für die öffentliche Trinkwasserversorgung, die Industrie, die Landwirtschaft sowie zur Erhaltung aquatischer Ökosysteme steigt, verändern sich Klima und Umwelt, wodurch Wiederkehrintervalle von Überschwemmungen und Dürren verkürzt werden. Für Talsperrenbetreiber und Manager von Flusseinzugsgebieten ist eine effektive und nachhaltige Nutzung der vorhandenen Ressourcen deshalb wichtiger denn je, um einen kurz- und langfristigen Ausgleich zwischen dem natürlichen Wasserdargebot und transnationalen Nutzungsanforderungen zu schaffen (*Bouillon & Theobald, 2018*).

Um Konflikte zwischen den verschiedenen Nutzungszielen zu lösen, werden für Talsperren zumeist Betriebsregeln definiert, um basierend auf dem aktuellen Systemzustand operationelle Entscheidungen zu treffen. In der Regel wird hierbei der Betrieb von Talsperren durch eine mit dem saisonalen Talsperrenvolumen in Verbindung stehende Abgabe definiert (sog. Lammellenplan). Die bei der Erstellung der Regeln definierten Nutzungsziele werden hierdurch auf mittel- bis langfristige Sicht bestmöglich erfüllt. Für komplexe Verbundsysteme (*Dorchies et al., 2014*) und für Zustände, die signifikant vom Durchschnitt abweichen (*Ficchi et al., 2016*), ist eine solche reaktive und dezentrale Steuerung jedoch unter Umständen nicht effizient, da mit den allgemeingültigen Betriebsregeln die volle Kapazität des Systems für den Sonderfall nicht optimal genutzt wird. Um den Talsperrenbetrieb an variable Randbedingungen (erhöhte Wassernachfrage / fortschreitender Klimawandel) anzupassen und Bewirtschaftungsziele einzugsgebietsweit zu berücksichtigen, können Abgaben auch basierend auf einer Vorhersage des Systemzustandes festgelegt werden. Ist diese Vorhersage modellbasiert, spricht man von Model Predictive Control (MPC) (*Schwanenberg & Becker 2019*). Eine prädikative Steuerung ermöglicht es, auf zukünftige Ereignisse zu reagieren (Antizipieren) und rechtzeitig geeignete Maßnahmen zu ergreifen, wodurch das System Einzugsgebiet-Talsperre effizienter betrieben werden kann (*Becker et al., 2014*).

2 Untersuchungsgebiet

2.1 Das Maas-Einzugsgebiet und die Rurtalsperren

Der Fluss Maas erstreckt sich über fast 900 km und fließt dabei von der Quelle in Frankreich durch Belgien und mündet an der niederländischen

Küste in die Nordsee. Das Einzugsgebiet erstreckt sich über 34.548 km² und umfasst weitere Teileinzugsgebiete in Luxemburg und Deutschland. Derzeit leben ca. 9 Mio Menschen in dem vor allem flussabwärts intensiv bevölkerten und landwirtschaftlich genutzten Einzugsgebiet der Maas (*De Wit et al. 2007*).

Das Abflussregime der Maas ist hauptsächlich durch die Niederschläge und Evapotranspiration bestimmt. Hierdurch ergeben sich starke Abflussschwankungen, weshalb der durchschnittliche Winterabfluss mitunter das Vierfache des Sommerabflusses betragen kann. An der Mündung der Maas in den südlichen Hauptstrom des Rhein-Maas-Deltas beträgt der durchschnittliche Abfluss ca. 350 m³/s. Da die Maas heutzutage vielen Unternehmen als wichtige Quelle für Brauchwasser dient, aber auch rund sechs Millionen Menschen in Belgien und den Niederlanden mit Trinkwasser aus der Maas versorgt werden, ist eine Anpassung des Wasserressourcenmanagements an sich ändernde Rahmenbedingungen unerlässlich (*Bannink et al., 2019*).

Eines der wichtigsten Teileinzugsgebiete der Maas ist die Rur. Die Rur entspringt im hohen Venn in Belgien, durchfließt in Deutschland als Mittelgebirgsfluss die Eifel und mündet in den Niederlanden bei Roermond in die Maas (Abbildung 1). Da auch der Abfluss der Rur auf Grund der geologischen und klimatischen Randbedingungen der Nordeifel starken Schwankungen unterliegt, wurde ein System von neun Talsperren konstruiert, wovon der Wasserverband Eifel-Rur (WVER) heute sechs in einem Verbundsystem betreibt. Hauptaufgabe des Systems ist es, Hochwasserabflüsse auf 60 m³/s zu begrenzen sowie eine dauerhafte Niedrigwasseraufhöhung von 5 m³/s sicherzustellen. Weitere Aufgaben sind die Rohwasserbereitstellung für die Trinkwassergewinnung sowie die Versorgung der Dürener Papierindustrie mit Brauchwasser (*Demny et al., 2018*). Vor Allem während Niedrigwasserperioden leistet der Abfluss der Rur dank der guten Wasserqualität einen wichtigen Beitrag für die Trinkwasserversorgung im unteren Maas-Einzugsgebiet. Die Rur stellt in Trockenzeiten mitunter bis zu 25 % des gesamten Abflusses der Maas.

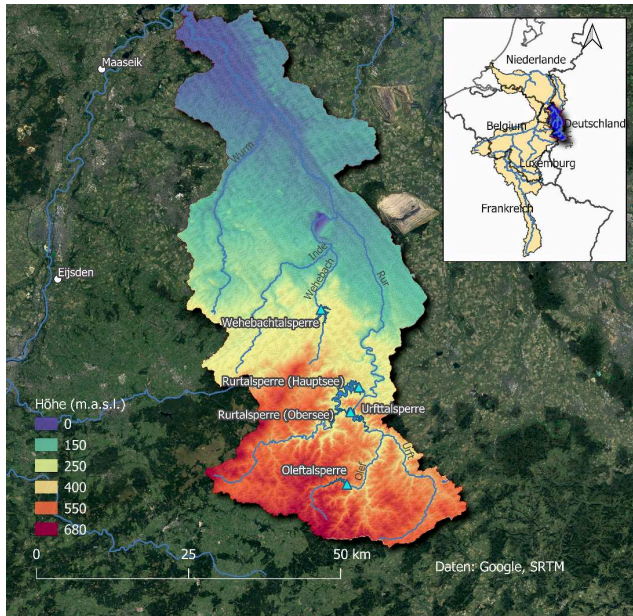


Abbildung 1: Topografie und Talsperren des Rur Einzugsgebietes mit Übersicht zur Lage des Teileinzugsgebietes im Maas Einzugsgebiet

Zur Bewirtschaftung des Mehrzweckspeichersystems nutzt der WVER derzeit Betriebsregeln, welche alle oben genannten betrieblichen Zielsetzungen miteinander vereinen (siehe z. B. *Kufeld, 2013*).

3 Methodik

Zur Analyse des Wasserdargebots sowie der verschiedenen Nutzungen wurde mit RIBASIM ein Wasserhaushaltsmodell des Maas-Einzugsgebietes entwickelt. Die Randbedingungen dieses Modells stammen aus dem einzugsgebietsweiten hydrologischen Modell (wflow). Um verschiedene Bewirtschaftungsalternativen des Talsperrenverbundsystems zu simulieren und Alternativen aufzuzeigen, wird das bestehende Wasserhaushaltsmodell in ein Prozessmodell auf Basis der Software RTC-Tools (*Schwanenberg & Becker, 2019*) überführt. Während das RIBASIM-Modell eine Zeitschrittweite von zehn Tagen verwendet, arbeitet das RTC-Tools-Modell mit einer zeitlichen Auflösung von einem Tag. Abbildung 2 veranschaulicht das Zusammenwirken der verschiedenen Modelle.

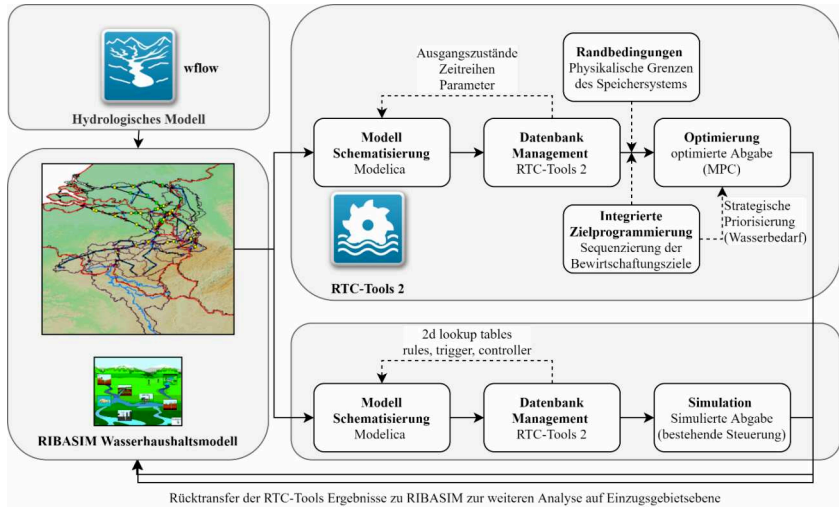


Abbildung 2: Methodik des kombinierten Modellansatzes zum Vergleich beider Steuerungsvarianten

Zur Simulation mit RTC-Tools wird zunächst der Lamellenplan in einen binären Entscheidungsbaum übertragen. Das RTC-Tools-Modell berechnet für jeden Simulationszeitschritt die Wasserabgabe der Talsperren anhand des Lamellenplans auf Basis des Talsperreninhalts und des Zeitpunktes im Jahr.

Bei einer Optimierung der Steuerung (MPC) wird die Abgabe für mehrere Simulationszeitschritte gleichzeitig mit Hilfe eines Optimierungsalgorithmus so bestimmt, dass die konkurrierenden Betriebsziele so gut wie möglich eingehalten werden (Schwanenberg & Becker, 2019). Zur Mehrzieloptimierung bietet RTC-Tools die Methode der Zielprogrammierung (Lexicographic Goal Programming), bei der den Steuerungszielen Prioritäten zugewiesen werden. Für Ziele mit gleicher Priorität können darüber hinaus Wichtungsfaktoren vorgegeben werden. Die betrieblichen als auch ökologischen Zielsetzungen des Betreibers werden so in verschiedene Teilziele mit unterschiedlicher Priorisierung sequenziert. Die höher priorisierten Ziele werden zuerst sichergestellt. Anschließend folgt die Optimierung auf Ziele mit niedrigerer Priorität, wobei die Zielerfüllung der bereits erreichten Ziele nicht mehr reduziert wird. Neben den zuvor genannten Zielen aus dem Talsperrenbetrieb wurden für diese Studie außerdem die wichtigen Wasserentnahmen der Maas unterhalb der Rur Mündung als Optimierungsziele definiert. Insgesamt sind nach dem Ansatz der lexicographischen Ordnung elf Bewirtschaftungsziele mit sechs unterschiedlichen Prioritäten festgelegt.

B3

Darüber hinaus ist der Wasserbedarf bzw. der Verbrauch von 18 Nutzern in Deutschland und den Niederlanden als Zielgrößen in das Optimierungsproblem aufgenommen (Johnen, 2020).

Beide Steuerungsvarianten werden mit historischen Zuflussdaten ausgewählter Trockenjahre gerechnet. Somit ergibt sich für die prädikative Steuerung relevante Vorhersagehorizont also perfekte Information des gesamten Optimierungshorizontes. Im technischen Sinne ist diese Methode als sogenanntes Hindcasting zu beschreiben (Schwanenberg & Becker, 2019). Ziel der Studie ist es, so die Möglichkeiten einer operationellen Verbundbewirtschaftung zur Minderung des Niedrigwasserrisikos mit dem Ansatz der modellbasierten Mehrzieloptimierung unter Anwendung von MPC (mit perfekter Information) im Vergleich zu den bestehenden Betriebsregeln aufzuzeigen. Eine ausführliche Beschreibung der Modellkonfiguration sowie der Bewertung der Ergebnisse gibt Johnen (2020).

4 Ergebnisse und Diskussion

4.1 Simulation nach derzeitigen Betriebsregeln und Minderung des Niedrigwasserrisikos durch prädiktive Steuerung

Die Rurtalsperre und die Urfttalsperre werden mit einem Betriebsplan im Verbund gesteuert. Deshalb werden diese beiden Talsperren sowie das Staubecken Heimbach im Simulationsmodell als Talsperrenkomplex modelliert, während die Oleftalsperre (seperater Betriebsplan) getrennt modelliert wird. Abbildung 3 zeigt die Ergebnisse des Simulationslaufs zusammengefasst für den Talsperrenkomplex aus Rurtalsperre, Urfttalsperre und Stausee Heimbach im Vergleich zur tatsächlich gemessenen Talsperrenabgabe in Heimbach für das Trockenjahr 2018. Die kombinierte Darstellung des Lamellenplans, des Talsperrenvolumens sowie der daraus resultierenden Wasserabgabe wird zur Validierung des RTC-Tools-Modells herangezogen (Abbildung 3, siehe auch Johnen 2020).

Hauptaugenmerk zur Quantifizierung der Reduktion des Niedrigwasserrisikos war in den ausgewählten Trockenjahren die sommerliche Abgabe. Abbildung 4 zeigt die Ganglinie der optimierten Abgabe im Vergleich zu denen der bestehenden Steuerung sowie die daraus resultierenden Dauerlinien der Abgabe im Jahresverlauf des Trockenjahres 2018. Für den optimierten Betrieb ist eine Verschiebung der Abgabestufen festzustellen. Alle Steuerungsvarianten erfüllen die Hochwasserschutzfunktion, bei der optimierten Steue-

zung länger werden jedoch mehr mittelgroße Regelabgaben von 7,5 - 11 m³/s eingestellt. Gleichzeitig werden Mengen von 17 - 40 m³ seltener abgegeben.

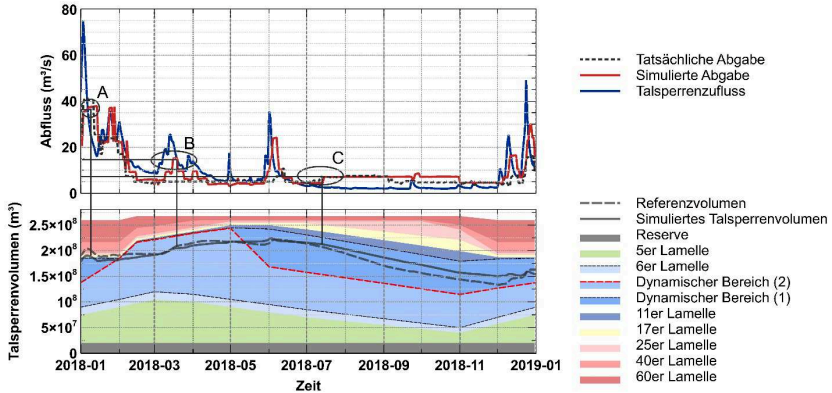


Abbildung 3: Validierung des Simulationsmodells für den Talsperrenkomplex aus Rurtalsperre, Urfttalsperre und Staubecken Heimbach am Betriebsplan

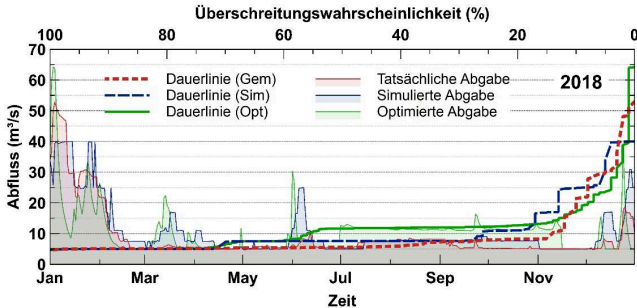


Abbildung 4: Ganglinien der Talsperrenabgaben sowie die sich daraus ergebenden Dauerlinien der Referenzstation Obermaubach als Vergleich der verschiedenen Bewirtschaftungsoptionen für das Trockenjahr 2018

Die Ganglinien der Talsperrenabgaben zeigen, dass diese Verschiebung durch erhöhte sommerliche Abgaben im optimierten Betrieb begründet sind. Außerdem kommt es gleichzeitig seltener zu Hochwasserentlastungen im Winterhalbjahr. Der Effekt des optimierten Betriebs zeigt sich darüber hinaus auch deutlich im Hauptgewässer der Maas, was den hohen Einfluss der Rur während Niedrigwasserperioden erneut belegt.

In Abbildung 5 ist dargestellt, dass es durch den optimierten Betrieb sowohl deutlich seltener zu Unterschreitungen des kritischen Niedrigwasserschwell-

lenwertes von $41 \text{ m}^3/\text{s}$ ($T=5$) in Lith (Maas-Hauptstrom) kommt. Darüber hinaus weisen die Unterschreitungen auch eine geringere Intensität sowie eine kürzere Dauer auf.

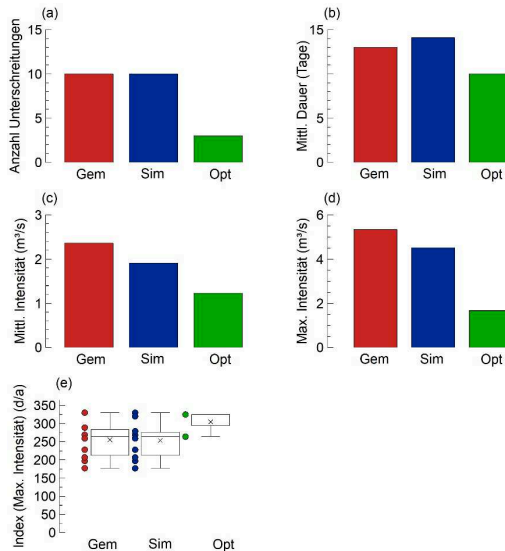


Abbildung 5: Bewertung des Niedrigwasserrisikos (Anzahl, Dauer und Intensität der Unterschreitung eines kritischen Abflusswertes) für die bestehenden Steuerung (rot u. blau) sowie des optimierten Betriebes (grün) zusammengesamt für alle fünf ausgewählten Trockenjahre

5 Schlussfolgerungen und Ausblick

Die Ergebnisse der Studie zeigen, dass der Speicher des Rurtalsperren-Verbundsystems - unter Annahme perfekter Informationen über die Talsperrenzuflüsse - Kapazitäten für erhöhte sommerliche Abgaben zur Unterstützung der flussabwärts gelegenen Wassernutzer während Dürreperioden bietet. Dies kann einen entscheidenden Beitrag in der jeweiligen Niedrigwassersituation leisten, ohne dass dabei Einbußen hinsichtlich anderer betrieblicher oder ökologischer Ziele wie der Hochwasserschutz hingenommen werden müssen. Die oben genannte perfekte Information über Talsperrenzuflüsse ist allerdings im operativen Betrieb niemals verfügbar. Sogenannte Ensemble Streamflow Predictions (ESPs) oder die immer besser werdende saisonalen hydrologischen Vorhersagen (*Sutanto*

et al., 2020) bieten jedoch jetzt schon Potential, um den hier vorgestellten prädiktiven Ansatz für ein transnationales und integriertes Wasserressourcenmanagement zu nutzen. Dies kann die Systemeffizienz erheblich steigern und einen entscheidenden Schritt für den zukunftssicheren Betrieb von Talsperren vor dem Hintergrund der sich ändernden Rahmenbedingungen (erhöhte Wassernachfrage / fortschreitender Klimawandel) sein. Die in dieser Studie erarbeitete Methode kann somit einen Beitrag zur Sicherstellung des Wasserdargebots, des Wohlergehens der Bevölkerung und des sozioökonomischen Wohlstands im gesamten Maas-Einzugsgebiet leisten.

6 Literatur

- Bannink, A., Ploeg, M. v.d., Schothorst, B. v., & Schauff, E. (2019). *Jaarrapport 2018 De Maas*. RIWA-MAAS (Vereniging van Rivierwaterbedrijven)
- Becker, B., Schruff, T., & Schwanenberg, D. (2014). Modellierung von reaktiver Steuerung und Model Predictive Control. Simulationsverfahren und Modelle für Wasserbau und Wasserwirtschaft, 50, 165–174. <http://henry.baw.de/handle/20.500.11970/103438>
- Bouillon, C., & Theobald, S. (2018). Modellansatz zur Koordinierung zukünftiger Steuerungsmaßnahmen in einem Talsperren-Verbundsystem. Hydrologie & Wasserbewirtschaftung, 62(5), 336–347. https://doi.org/DOI: 10.5675/HyWa_2018_5_3
- De Wit, M., Van Den Hurk, B., Warmerdam, P. M. M., Torfs, P. J. J. F., Roulin, E., & Van Deursen, W. P. A. (2007). Impact of climate change on low-flows in the river Meuse. Climatic Change, 82(3–4), 351–372. <https://doi.org/10.1007/s10584-006-9195-2>
- Demny, G., Kufeld, M., Hausmann, B., Homann, C., Rose, T., Sinaba, B., & Schüttrumpf, H. (2018). Auswirkung des Klimawandels auf die Talsperren der Eifel-Rur. In *Vorsorgender und nachsorgender Hochwasserschutz* (pp. 44–50). Springer Vieweg, Wiesbaden
- Dorchies, D., Thirel, G., Jay-Allemand, M., Chauveau, M., Dehay, F., Bourgin, P.-Y., Perrin, C., Jost, C., Rizzoli, J.-L., Demerliac, S., & Thépot, R. (2014). Climate change impacts on multi-objective reservoir management: Case study on the Seine River basin, France. International Journal of River Basin Management, 12(3), 265–283
- Ficchi, A., Raso, L., Dorchies, D., Pianosi, F., Malaterre, P.-O., Van Overloop, P.-J., & Jay-Allemand, M. (2016). Optimal operation of the multireservoir system in the seine river basin using deterministic and ensemble forecasts. Journal of Water Resources Planning and Management, 142(1), 05015005

- Johnen, G. (2020). Optimal reservoir operation and its use for adaptive catchment management: A case study for the Meuse catchment. [Master thesis]. Institute of Hydraulic Engineering and Water Resources Management, University Duisburg-Essen and Institute for Science in Society, Radboud University Nijmegen
- Kufeld, M. (2013). Anpassung der Talsperrensteuerung and Klimaänderungen: Bewertung von Leistungsfähigkeit und Robustheit [Doctoral dissertation, RWTH Aachen, Fakultät für Bauingenieurwesen]. <http://publications.rwth-aachen.de/record/229467>
- Schwanenberg, D., & Becker, B. (2019). Software tools for modelling Real-Time control [Technical Reference Manual]. Deltares. https://content.oss.deltares.nl/delft3d/manuals/RTC-Tools_Technical_Reference_Manual.pdf
- Sutanto, S. J., Van Lanen, H. A. J., Wetterhall, F., & Lloret, X. (2020). Potential of Pan-European Seasonal Hydrometeorological Drought Forecasts Obtained from a Multihazard Early Warning System. Bulletin of the American Meteorological Society, 101(4), E368–E393. <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-18-0196.1>

Autoren:

M.Sc. Gregor Johnen
M.Sc. Felix Dacheneder

Dr.-Ing. Bernhard Becker
M.Sc. Laurène Bouaziz
Dr. Teresa Piovesan
Eng. Edwin Snippen

Universität Duisburg-Essen
Institut für Wasserbau und
Wasserwirtschaft
Universitätsstraße 15
45141 Essen

Deltares
P.O. box 177
2600MH Delft
Niederlande

Tel.: +49 201 183 4303
Mail:
gregor.johnen@uni-due.de

Tel.: +31 6 52416736
E-Mail:
Bernhard.Becker@deltares.nl

Dr.-Ing. Bernhard Becker

RWTH Aachen
Institut für Wasserbau und Wasserwirtschaft
Mies-van-der-Rohe-Str. 17
52074 Aachen