

# HENRY

Hydraulic Engineering Repository

Ein Service der Bundesanstalt für Wasserbau

---

Report, Published Version

**Simons, Franz; Kasper, Julia**

## **Strategien zur Abfluss- und Stauregelung der Wasserstraßen bei extremen Wetterereignissen. FuE-Abschlussbericht B3953.03.04.70005**

BMVI-Expertennetzwerk Wissen Können Handeln

---

Verfügbar unter/Available at: <https://hdl.handle.net/20.500.11970/106981>

Vorgeschlagene Zitierweise/Suggested citation:

Bundesanstalt für Wasserbau (Hg.) (2019): Strategien zur Abfluss- und Stauregelung der Wasserstraßen bei extremen Wetterereignissen. FuE-Abschlussbericht B3953.03.04.70005. Karlsruhe: Bundesanstalt für Wasserbau (BMVI-Expertennetzwerk Wissen Können Handeln).

### **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.

Verwertungsrechte: Alle Rechte vorbehalten

**FuE-Abschlussbericht**  
**Strategien zur Abfluss- und Stauregelung**  
**der Wasserstraßen bei extremen**  
**Wetterereignissen**

**B3953.03.04.70005**



**November 2019**





## **Zusammenfassung**

Im Zuge des Klimawandels werden extreme Wetterereignisse häufiger. So gilt es die Wirkung stoßartiger Belastungen durch geeignete Maßnahmen bei der Steuerung und Regelung von Stauanlagen zu kompensieren, um die Sicherheit und Leichtigkeit der Schifffahrt zu gewährleisten.

Starkregenereignisse in urbanen Einzugsgebieten können durch Überlastung der Abwassersysteme innerhalb kurzer Zeit zu einer Einleitung in nahegelegene Fließgewässer führen. Diese stoßartigen Belastungen in Kombination mit ausgeprägten Niedrigwasserperioden sind eine anspruchsvolle Regelungsaufgabe. Ziel des Projekts war deshalb die Entwicklung einer allgemeingültigen und praxisnahen Lösung, um die Auswirkungen von Starkregen auf die automatisierte Abfluss- und Stauregelung zu reduzieren und damit die Resilienz der Wasserstraßen gegenüber extremen Wetterereignissen zu verbessern.

Der hier verwendete Lösungsansatz besteht darin, messtechnisch nicht erfasste Einleitungen in staugeregelte Wasserstraßen abzuschätzen und diese Daten rechtzeitig an das Regelungssystem zu übermitteln, sodass der Abfluss über Wehr und Kraftwerk vorausschauend an die zu erwartenden seitlichen Einleitungen angepasst werden kann. Durch die Anwendung moderner Regelungsmethoden und die Einbindung von kurzfristigen Niederschlags- und Abflussvorhersagen steht der WSV ein zukunftsfähiges Regelungssystem zur Verfügung, das auch bei zunehmenden Auswirkungen des Klimawandels eine robuste Abfluss- und Stauregelung sicherstellt.

<b>Inhaltsverzeichnis</b>		<b>Seite</b>
1	Einleitung	1
1.1	Hintergrund	1
1.2	Problemdarstellung	2
1.3	Ziele	3
1.4	Untersuchungsmethoden und Vernetzung im Expertennetzwerk	3
1.5	Aufbau des Projektberichts	3
2	Regelungsstrategie	4
2.1	Abfluss- und Stauregelung der Wasserstraßen	4
2.2	Stand der Technik	5
2.3	Konzept	6
2.4	Niederschlagsdaten	7
2.5	Einleitungsprognosen	8
2.6	Vorausschauende Regelung von Abfluss und Wasserstand	9
3	Pilotprojekt	12
3.1	Mischwasserentlastungen in die Neckarstauhaltung Hofen	12
3.2	Untersuchungen	15
3.2.1	Niederschlagsstatistik	15
3.2.2	Niederschlag-Abfluss-Modellierung	16
3.2.3	Niederschlagsdaten für ausgewählte Ereignisse	18
3.2.4	Die modellprädiktive Vorsteuerung	20
3.3	Entscheidungsunterstützung	25
4	Fazit	27
4.1	Zusammenfassung und Schlussfolgerungen	27
4.2	Nutzen und Verwertung der Ergebnisse	28
4.3	Weiterer Forschungsbedarf	28
5	Literaturverzeichnis	30

<b>Bildverzeichnis</b>	<b>Seite</b>
Bild 1: Organisationsstruktur des BMVI-Expertennetzwerks (Bundesanstalt für Straßenwesen 2016)	1
Bild 2: Schema der automatisierten Abfluss- und Stauregelung an Wasserstraßen	4
Bild 3: Die Komponenten der neuen Regelungsstrategie zur Entscheidungsunterstützung oder für den automatisierten Betrieb der ASR bei Starkregenereignissen	7
Bild 4: Schema der automatisierten Abfluss- und Stauregelung mit modellprädiktiver Vorsteuerung (MPFFC) an Wasserstraßen	10
Bild 5: Schematische Darstellung der optimierten Wasserstands- und Abflustrajektorie, berechnet durch die modellprädiktive Vorsteuerung (MPFFC) bei gegebener Zuflussprognose	11
Bild 6: Schematische Darstellung der beiden Teileinzugsgebiete des Mischwassersammlers Nesenbach in Stuttgart	12
Bild 7: Einleitungsbauwerk des Mischwassersammlers Nesenbach im Unterwasser der Neckarstauhaltung Cannstatt (Quelle: BAW/Belzner)	13
Bild 8: Simulationsergebnisse für Laufzeit, Retentionszeit und Stauvolumen der Neckarstauhaltung Hofen in Abhängigkeit vom Abfluss	14
Bild 9: Blockdiagramm des hydrologischen Modells für das Einzugsgebiet des Stuttgarter Mischwassersammlers Nesenbach (Quelle: Belzner und Schmitt-Heiderich 2012)	16
Bild 10: Beispielhafte Darstellung der Unsicherheit von kurzfristigen Niederschlagsprognosen anhand des Vergleichs einer Radarmessung mit der Nowcasting-Prognose 5 Minuten vor, 5 Minuten nach und 15 Minuten nach Beginn eines sommerlichen Starkregens im Einzugsgebiet des Stuttgarter Mischwassersammlers Nesenbach	20
Bild 11: Vergleich der Ergebnisse der Regelungssysteme ohne Berücksichtigung der Entlastungsvorhersage	22
Bild 12: Vergleich der Ergebnisse der Regelungssysteme mit Berücksichtigung der Entlastungsvorhersage	22
Bild 13: Prognose eines Starkregenereignisses mit $T_N = 0,5$ a und $D = 180$ min bei einem realen Ereignis mit $T_N = 5$ a und $D = 180$ min	24
Bild 14: Prognose eines Starkregenereignisses mit $T_N = 5$ a und $D = 180$ min bei einem realen Ereignis mit $T_N = 0,5$ a und $D = 180$ min	24
Bild 15: Simulationsergebnisse eines Echtzeit-Prognosesystems für die Abfluss- und Stauregelung an der Neckarstauhaltung Hofen am Beispiel eines Starkregenereignisses am 7. Juni 2018 um 18:31 Uhr (UTC) bei konstantem direktem Zufluss über die Staustufe Cannstatt <b>Fehler! Textmarke nicht definiert.</b>	

<b>Tabellenverzeichnis</b>	<b>Seite</b>
Tabelle 1: Gewässerkundliche Hauptwerte des Abflusspegels Plochingen, nach LUBW Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg (2009)	13
Tabelle 2: Niederschlagshöhen in mm nach KOSTRA-DWD-2010R für das Einzugsgebiet des Stuttgarter Mischwassersammlers Nesenbach in Abhängigkeit von der Dauerstufe $D$ und der Jährlichkeit $T$	15
Tabelle 3: Messung von Einstau und Überlauf des Regenüberlaufbeckens Schwanenplatz in Stuttgart für ausgewählte Niederschlagsereignisse im Jahr 2016, verwendet zur Nachjustierung des Niederschlag-Abfluss-Modells	17
Tabelle 4: Vergleich der von Belzner (2011) ermittelten Parameter für das hydrologische Modell des Stuttgarter Mischwassersammlers Nesenbach mit den im vorliegenden FuE-Projekt verwendeten Werten	17
Tabelle 5: Messung von Einstau und Überlauf des Regenüberlaufbeckens Schwanenplatz in Stuttgart für ausgewählte Niederschlagsereignisse im Jahr 2016, verwendet zur Validierung des Niederschlag-Abfluss-Modells	18
Tabelle 6: Ausgewählte Niederschlagsereignisse im Jahr 2018 im Einzugsgebiet des Stuttgarter Mischwassersammlers Nesenbach	19

## Abkürzungen

ASR	Abfluss- und Stauregelung
BAW	Bundesanstalt für Wasserbau
BAST	Bundesanstalt für Straßenwesen
BMVI	Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur
DWD	Deutscher Wetterdienst
EPS	Ensemble Prediction System (Ensemble-Vorhersage-System)
HQ	höchster Abfluss im Bezugszeitraum
MHQ	mittlerer Hochwasserabfluss im Bezugszeitraum
MNQ	mittlerer Niedrigwasserabfluss im Bezugszeitraum
MPFFC	Model Predictive Feed Forward Control (Modellprädiktive Vorsteuerung)
MQ	mittlerer Abfluss im Bezugszeitraum
NQ	niedrigster Abfluss im Bezugszeitraum
OW	Oberwasser
OW/Q-Regelung	kombinierte Oberwasserstandsregelung und Abflusssteuerung
UW	Unterwasser
WSV	Wasserstraßen- und Schifffahrtsverwaltung des Bundes

# 1 Einleitung

## 1.1 Hintergrund

Um drängende Fragen zum Verkehr in der Zukunft zu beantworten und die Leistungsfähigkeit der Verkehrsnetze zu sichern, haben sich Ressortforschungseinrichtungen und Fachbehörden des Bundesministeriums für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMVI) zu einem Netzwerk zusammengeschlossen (Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur 2016). Auch die Bundesanstalt für Wasserbau (BAW) leistet in den Bereichen Anpassung an den Klimawandel, umweltgerechte Gestaltung und Erhöhung der Zuverlässigkeit einen Beitrag zum BMVI-Expertennetzwerk (s. Bild 1). Das hier vorgestellte FuE-Projekt „Strategien zur Abfluss- und Stauregelung der Wasserstraßen bei extremen Wetterereignissen“ ist Teil des Schwerpunktthemas „Prognosen, Vulnerabilitätsanalysen und Maßnahmen“ im Themenfeld 3 „Verlässlichkeit der Verkehrsinfrastrukturen erhöhen“.

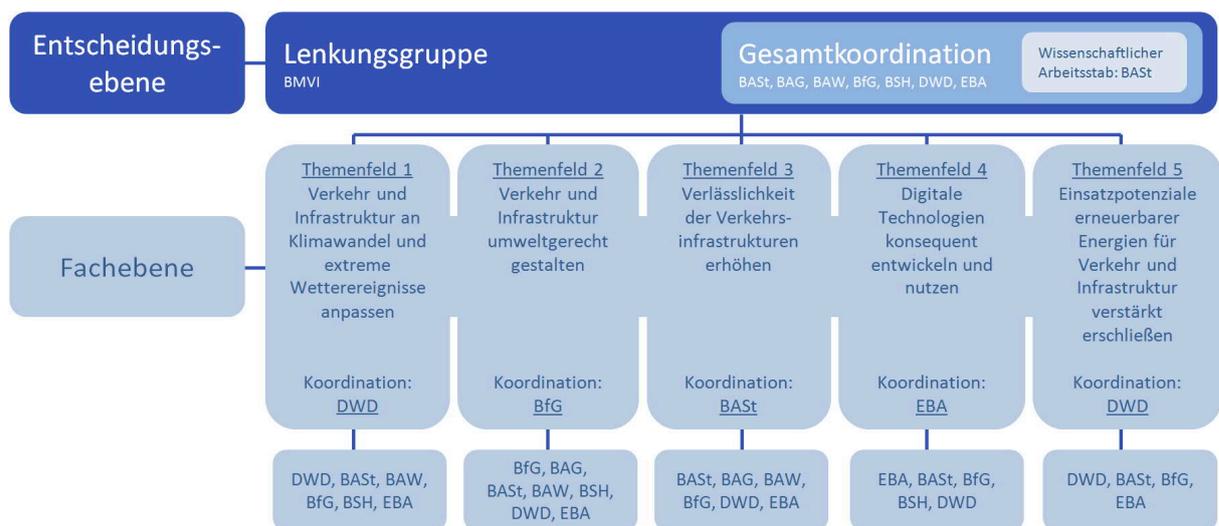


Bild 1: Organisationsstruktur des BMVI-Expertennetzwerks (Bundesanstalt für Straßenwesen 2016)

Für die Verlässlichkeit der Verkehrsinfrastruktur an den Bundeswasserstraßen spielt neben der Funktionstüchtigkeit der Wasserbauwerke auch deren operationeller Betrieb eine große Rolle. Etwa 3000 km der Bundeswasserstraßen sind mit Staustufen ausgebaut, die im Allgemeinen aus beweglichem Wehr, Schleuse und Laufwasserkraftwerk bestehen. Durch Änderung des Abflusses über Kraftwerk und Wehr hält ein lokaler Regler den Wasserstand oberstrom der jeweiligen Staustufe innerhalb einer vorgegebenen Toleranz um das Stauziel. Auf diese Weise gewährleistet die Abfluss- und Stauregelung (ASR) der Wasserstraßen die Sicherheit und Leichtigkeit der Schifffahrt, reduziert Abflussschwankungen und ermöglicht eine effiziente Nutzung des Wasserkraftpotenzials. Die Stauverantwortung teilen sich die Energieversorgungsunternehmen als Betreiber der Wasserkraftwerke sowie die Wasserstraßen- und Schifffahrtsverwaltung des

Bundes (WSV) als Betreiber von Wehren und Schleusen (Bundesanstalt für Wasserbau 2012). Dabei wird die WSV von der BAW unterstützt.

Die Verlässlichkeit des operationellen Betriebs von Wasserstraßen kann unter anderem durch äußere Einwirkungen wie Extremwetter beeinträchtigt werden. Siedl und Schweighofer (2014) schlagen im Rahmen des europäischen Forschungsprojekts MOWE-IT Strategien vor, wie europäische Binnenwasserstraßen an extreme Wetterereignisse angepasst werden können. Dabei nennen sie unter anderem den verstärkten Einsatz von Informations- und Kommunikationstechnologien („smart waterways“), eine intensivere Zusammenarbeit der Wasserstraßenverwaltungen und verbesserte hydrologische Vorhersagen.

Aufgrund des Klimawandels ist mit einer Zunahme extremer Wetterereignisse zu rechnen. Im Abschlussbericht des BMVI-Forschungsprogramms KLIWAS wird die ASR an Wasserstraßen als mögliche Anpassungsoption an die Folgen des Klimawandels genannt (Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur 2015). Dabei wird die ASR unter dem Gesichtspunkt einer großräumigen Wassermengenbewirtschaftung bei Niedrig- oder Hochwasser betrachtet. Belzner und Schmitt-Heiderich (2012) haben jedoch festgestellt, dass sich auch ein einzelnes Starkregenereignis in einem urbanen Einzugsgebiet erheblich auf die ASR einer angrenzenden Stauhaltung auswirken kann, und haben eine speziell auf die Staustufe Hofen am Neckar angepasste Lösung erarbeitet. Die Bereitstellung einer vorausschauenden Komponente für eine automatisierte ASR durch das Institut für Systemdynamik der Universität Stuttgart (Amann et al. 2016) sowie die enge Kooperation mit dem Deutschen Wetterdienst (DWD) im BMVI-Expertennetzwerk haben es ermöglicht, im hier vorgestellten Projekt eine allgemeingültige Lösungsstrategie zu entwickeln. Als Teil des BMVI-Expertennetzwerks lagen die Ziele des Projekts auf der Ausarbeitung von Anpassungsmaßnahmen für die ASR der Wasserstraßen an extreme Niederschlagsereignisse, auf der Vernetzung mit den beteiligten Behörden sowie auf der Entwicklung und Demonstration von verkehrsträgerübergreifenden Ansätzen.

## 1.2 Problemdarstellung

Tritt ein Starkregenereignis in einem urbanen Einzugsgebiet auf, so wird das Regenwasser über die Kanalisation abtransportiert und aufgrund der begrenzten Abflusskapazitäten in ein nahegelegenes Fließgewässer entlastet. Solche Regen- oder Mischwassereinleitungen können für wenige Stunden ein Vielfaches des jeweils aktuellen Abflusses in eine staugeregelte Wasserstraße einbringen. Da die ASR diese seitlichen Einleitungen messtechnisch nicht erfasst, wird eine Änderung im Gesamtzufluss erst registriert, wenn eine Wasserstandsänderung am Pegel direkt oberhalb der betroffenen Staustufe gemessen wird. Aufgrund des sehr schnell ansteigenden Gesamtzuflusses kann die Leistungsfähigkeit sowohl eines automatisierten als auch eines manuellen Regelungssystems überschritten werden. In einem solchen Fall treten große Abweichungen vom Stauziel sowie verstärkte Schwankungen des Abflusses über Kraftwerk und Wehr auf. Solche Wasserstands- und Abflussschwankungen können die Schifffahrt gefährden, da es zu Grundberührungen oder Brückenanfahrungen kommen kann. Besonders bei Niedrigwasser sind das Verhältnis von seitlichem Zufluss zum Gesamtzufluss und damit die Folgen eines Starkregenereignisses für die ASR besonders groß. Erschwerend kommt hinzu, dass bei Niedrig- und Mittelwasser die Stauhaltungen dazu neigen, Abflussschwankungen zu verstärken. Wegen dieser Verstärkung kann sich ein lokales Ereignis auf eine ganze Stauhaltungskette auswirken.

Im Zuge des Klimawandels ist mit einer Zunahme extremer Wetterereignisse zu rechnen. Das heißt, es ist mit ausgedehnten Niedrigwasserperioden im Sommer und einer Zunahme der Häufigkeit von Starkregenereignissen zu rechnen. Kritische Situationen für die ASR nehmen also zu.

### **1.3 Ziele**

Ziel des Projekts war die Bereitstellung einer allgemeingültigen und praxisnahen Lösung, um die Auswirkungen von Starkregen auf die ASR zu reduzieren und damit die Resilienz der Wasserstraßen gegenüber extremen Wetterereignissen zu verbessern. Eine Implementierung des entwickelten Regelungskonzepts ist in Form eines Pilotprojekts für die Neckarstaustufe Hofen in Stuttgart geplant. Folgendes steht mit Abschluss des Projekts zur Verfügung:

- verlässliche Prognosen der Mischwasserentlastungen aus dem Stuttgarter Hauptsammler Nesenbach in die Neckarstauhaltung Hofen als Entscheidungsunterstützung für den manuellen Betrieb der ASR,
- ein vorausschauend agierendes Regelungssystem für den automatisierten Betrieb der ASR, das vorhandene Zuflussprognosen berücksichtigt und
- Empfehlungen für den Einsatz von Frühwarnsystemen für Extremwetterereignisse im Bereich der Verkehrsinfrastruktur. Diese Empfehlungen basieren auf ersten Erfahrungen aus dem Pilotprojekt.

### **1.4 Untersuchungsmethoden und Vernetzung im Expertennetzwerk**

Der hier verwendete Lösungsansatz besteht darin, messtechnisch nicht erfasste Einleitungen in staugeregelte Wasserstraßen abzuschätzen und diese Daten rechtzeitig an das Regelungssystem zu übermitteln, sodass der Abfluss über Wehr und Kraftwerk vorausschauend an die zu erwartenden seitlichen Einleitungen angepasst werden kann. Dazu mussten verschiedene Komponenten aufeinander abgestimmt werden: Niederschlagsprognosen, Niederschlag-Abfluss-Modell und das Regelungssystem.

Die Einbindung von hochaufgelösten Niederschlagsprognosen erfolgte in enger Zusammenarbeit mit dem DWD, der am BMVI-Expertennetzwerk-Projekt „Ensembleprognosen extremer Wetterereignisse“ beteiligt ist. Das Niederschlag-Abfluss-Modell und das Regelungssystem wurden mithilfe der Softwareprodukte MATLAB und Simulink der Firma MathWorks implementiert. In einer Pilotstudie wurde die Wirkungsweise des neuen Konzepts anhand von Simulationen am Beispiel der Neckarstauhaltung Hofen untersucht, in die ein Teil der Stuttgarter Kanalisation entlastet. Das Tiefbauamt der Stadt Stuttgart hat Messdaten zu Mischwassereinleitungen aus dem Hauptsammler Nesenbach in den Neckar zur Verfügung gestellt.

### **1.5 Aufbau des Projektberichts**

Die durchgeführten Untersuchungen und die jeweiligen Ergebnisse sind in zwei Kapitel gegliedert: Regelungsstrategie (Kap. 2) und Pilotprojekt (Kap. 3). Der Projektbericht schließt mit einem Fazit, das Schlussfolgerungen aus den vorliegenden Ergebnissen beinhaltet, den Nutzen für die WSV und für die im BMVI-Expertennetzwerk beteiligten Behörden beschreibt sowie weiteren Forschungsbedarf nennt.

## 2 Regelungsstrategie

### 2.1 Abfluss- und Stauregelung der Wasserstraßen

Die wichtigsten Elemente der ASR an Wasserstraßen sind vereinfacht in Bild 2 dargestellt. Der Flussabschnitt zwischen der betrachteten *Staustufe* und der nächsthöher gelegenen Staustufe, dem *Oberlieger*, wird als *Stauhaltung* bezeichnet. Das Wasser, das über Wehr und Kraftwerk des Oberliegigers in die Stauhaltung fließt, bildet den *Zufluss*. Während der Zufluss durch den Oberlieger in der Regel bekannt ist, kann durch seitliche *Einleitungen* aus Flüssen, Bächen oder Regen- und Mischwasserentlastungsbauwerken zusätzlich Wasser in die Stauhaltung gespeist werden.

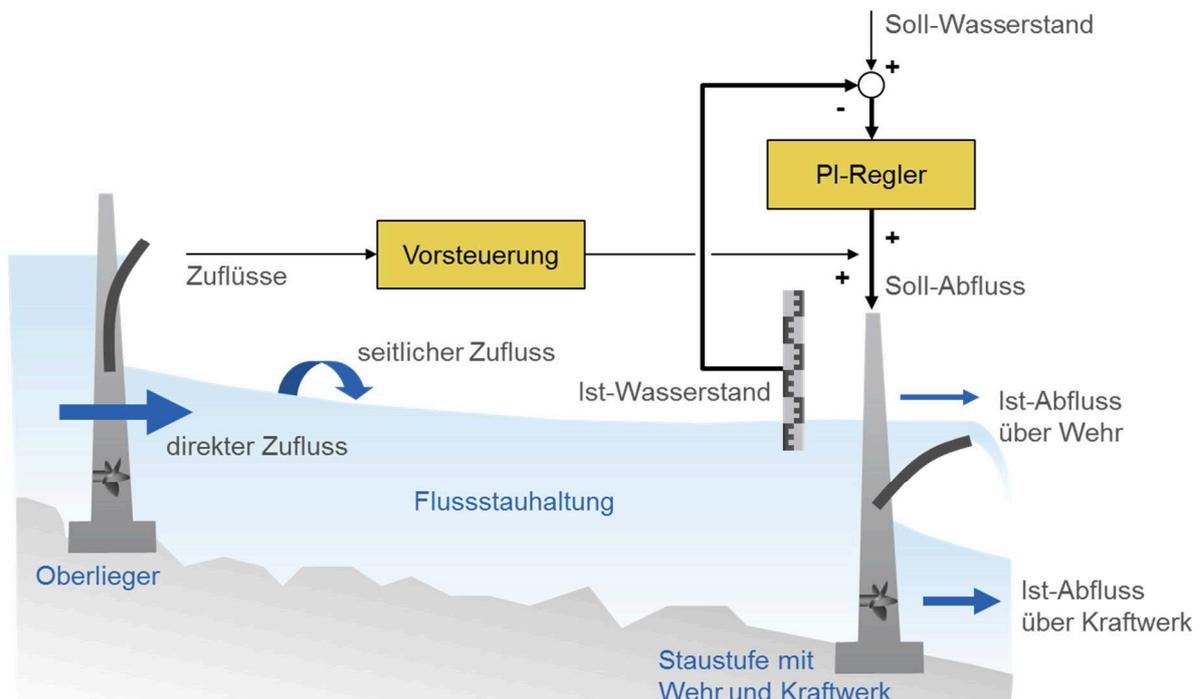


Bild 2: Schema der automatisierten Abfluss- und Stauregelung an Wasserstraßen

Eine Änderung des Gesamtzuflusses wird erst am *Oberwasserpegel* bemerkt, der sich in der Regel direkt oberhalb der Staustufe befindet. An dieser Stelle wird der aktuelle Wasserstand, genannt *Ist-Wasserstand*, gemessen und mit dem *Soll-Wasserstand* verglichen. Der Soll-Wasserstand wird durch das *Stauziel* bestimmt, das in Verwaltungsvorschriften festgelegt ist. Dabei ist im Rahmen der *Stautoleranz* eine vorgegebene Abweichung nach oben und unten erlaubt. Bei Hochwasser kann das Stauziel mit steigendem Abfluss schrittweise abgesenkt werden. Unterscheiden sich Soll- und Ist-Wasserstand am Oberwasserpegel der betrachteten Staustufe, wird der *Abfluss* über Kraftwerk oder Wehr entsprechend verringert oder erhöht. Die wiederholte Prozedur aus Wasserstandsmessung und Abflusskorrektur wird als *Regelung* bezeichnet, wobei der zugehörige *Regelkreis* in Bild 2 hervorgehoben ist. Wie groß die Abflusskorrektur sein muss, berechnet für jeden Zeitschritt ein Proportional-Integral-Regler, kurz *PI-Regler*, aus der Differenz von Soll- und Ist-Wasserstand.

Diese *Wasserstandsregelung* lässt sich verbessern, wenn der Zufluss vom Oberlieger bekannt ist. Diese zusätzliche Information wird im *manuellen* Betrieb vom Personal auf Grundlage seiner Erfahrung bewertet und in der manuellen Regelung als „Erfahrungswissen“ berücksichtigt. Dagegen wird bei einer *automatisierten* Regelung der Zufluss zeitlich verzögert und gedämpft als Abfluss an der betrachteten Staustufe vorgegeben. Da dieser Abflussanteil nicht vom Ist-Wasserstand abhängt und somit nicht Teil des Regelkreises ist, handelt es sich dabei um eine *Vorsteuerung*. Der Regelungsanteil muss in diesem Fall nur die Fehler der Vorsteuerung sowie nicht erfasste seitliche Einleitungen ausgleichen. Die Summe aus Steuerungs- und Regelungsanteil ergibt den Gesamtabfluss an der Staustufe. Im Bereich der Wasserstraßen wird für die kombinierte Oberwasserstandsregelung und Abflusssteuerung die Bezeichnung *OW/Q-Regelung* verwendet. Wie die Parameter für Vorsteuerung und PI-Regler ermittelt werden, wird von Schmitt-Heiderich und Gebhardt (2012) und Schmitt-Heiderich und Belzner (2012) erläutert.

Bei Niedrig- und Mittelwasser wird der Abfluss bis zur Auslastung der Turbinen über die Kraftwerke abgeführt. Diese werden in der Regel von *Fernsteuerzentralen* aus bedient und überwacht. Falls Feinregulierungsklappen an den Wehranlagen vorhanden sind, können diese ebenfalls durch die Fernsteuerzentrale genutzt werden. Mit der Nutzung des Wehres bei höheren Abflüssen geht die Überwachung und bedarfsweise Steuerung an die Schichtleiter der WSV über (Hörter 2012).

Die ASR muss wegen der Mehrfachnutzung der Wasserstraßen unterschiedliche, zum Teil gegensätzliche Ziele erfüllen: Einhaltung des Stauziels innerhalb des festgelegten Toleranzbereichs, Verminderung von Abflussschwankungen über eine *Kette* von Staustufen, optimale Nutzung der Wasserkraft sowie eine minimale Anzahl von Verstellschritten zur Reduzierung des Verschleißes von Wehrverschlüssen. Aus diesem Grund und wegen des nichtlinearen Fließverhaltens des Gewässers ist die ASR eine anspruchsvolle Regelungsaufgabe.

## 2.2 Stand der Technik

Etwa 40% der deutschen Bundeswasserstraßen sind staugeregelte Flussstrecken. Im Bereich der automatisierten ASR ist die OW/Q-Regelung (siehe Abschnitt 2.1) aktueller Stand der Technik (Bundesanstalt für Wasserbau 2012). Sie wird derzeit an der Mosel eingesetzt und soll in naher Zukunft an der Saar implementiert werden. Auch bezüglich Main und Neckar wird die einheitliche Verwendung einer automatisierten Regelung diskutiert. Die lokalen Regler an den einzelnen Staustufen unterscheiden sich dabei lediglich durch ihre Parametrierung. Technische Details zur Bestimmung der Regelparameter werden durch Schmitt-Heiderich und Belzner (2012) erläutert. Seitliche Zuflüsse werden bei der automatisierten ASR bisher nur berücksichtigt, wenn es sich dabei um größere Fließgewässer handelt, die ständig Wasser führen und deren Abfluss bekannt ist, wie beispielsweise der Zufluss der Sauer und der Saar in die Mosel.

Die Schwachstelle der OW/Q-Regelung besteht darin, dass sie bei Abflüssen kleiner als dem mittleren Abfluss dazu neigt, große Abflussschwankungen verstärkt an die jeweils folgende Stauhaltung weiterzugeben und damit erhebliche Probleme für die ganze Stauhaltungskette hervorzurufen (Arnold et al. 2012; Gebhardt und Wohlfart 2012). Um eine Vergleichmäßigung des Abflusses zu erreichen, entwickelte das Institut für Systemdynamik der Universität Stuttgart in einem gemeinsamen FuE-Projekt mit der BAW ein vorausschauendes Regelungssystem, das

auf einer modellprädiktiven Vorsteuerung (engl. model predictive feed forward control, kurz MPFFC) aufbaut (Amann et al. 2014; Amann et al. 2016; Simons et al. 2018). Ein Prototyp dieser MPFFC wird derzeit unter realen Bedingungen an einer Moselstauhaltung getestet (Pranner et al. 2019).

Für die Entwicklung und Untersuchung von Regelungssystemen gehört die modellbasierte Betrachtung (engl. model-based design) zum Stand der Technik. In der modellbasierten Betrachtung werden für die einzelnen Komponenten des Regelkreises mathematische Ersatzmodelle entwickelt. Dazu gehören das Stellorgan, der Wasserstandsregler und die Regelstrecke. Als Entwicklungsplattform wird für die Modellierung an der BAW die Software MATLAB/Simulink der Firma MathWorks verwendet, die sowohl die Entwicklung der Modelle für die Leittechnik als auch die Anbindung an ein hydrodynamisch-numerisches (HN) Verfahren zur Simulation der Regelstrecke erlaubt (Schmitt-Heiderich und Gebhardt 2012). Die modellbasierte Betrachtung erlaubt, das Verhalten eines Regelungssystems vor einer Inbetriebnahme bei verschiedensten Abflussszenarien anhand von Simulationen zu parametrieren und zu testen. Das Modell eines Regelungssystems muss sowohl für die OW/Q-Regelung als auch für die Regelung mit MPFFC erstellt werden.

### **2.3 Konzept**

Die Idee, Niederschlagsprognosen in die ASR der Wasserstraßen einzubinden, ist durch die enge Zusammenarbeit mit dem DWD im BMVI-Expertennetzwerk entstanden. Die aus den Prognosen abgeleiteten Informationen über plötzliche Zuflussänderungen durch Regen- oder Mischwasserentlastungen können wegen des kurzen Handlungszeitraums durch eine OW/Q-Regelung nur begrenzt genutzt werden (Kasper et al. 2018). Um die Folgen von Starkregenereignissen für die ASR zu minimieren, werden die Einleitungsprognosen daher mit der MPFFC kombiniert, die das bestehende lokale Regelungssystem erweitert. Bild 3 zeigt eine Übersicht der verschiedenen Komponenten der neuen Regelungsstrategie, die sich aus Niederschlagsprognosen, Niederschlag-Abfluss-Modell und Regelungssystem zusammensetzt.

Wurde ein urbanes Einzugsgebiet identifiziert, bei dem Starkregenereignisse zu Regen- oder Mischwasserentlastungen in eine staugeregelte Wasserstraße und daraufhin zu Problemen für die ASR führen, werden zunächst hochaufgelöste Niederschlagsprognosen für dieses Einzugsgebiet benötigt. Durch ein Niederschlag-Abfluss-Modell der städtischen Kanalisation wird anschließend aus der Niederschlagsvorhersage eine Vorhersage des seitlichen Zuflusses in die Stauhaltung berechnet. Mithilfe eines Optimierungsalgorithmus bestimmt die modellprädiktive Regelung anhand eines linearisierten Stauhaltungsmodells aus gegebenen Prognosen für den Gesamtzufluss einen idealen zeitlichen Verlauf von Wasserstand und Abfluss, der im automatisierten Betrieb durch den lokalen Regler umgesetzt wird. Auf diese Weise werden die Auswirkungen von Regen- oder Mischwasserentlastungen auf die ASR minimiert. Im manuellen Einsatz dient der optimierte Wasserstands- und Abflussverlauf als Entscheidungsunterstützung für das Betriebspersonal.

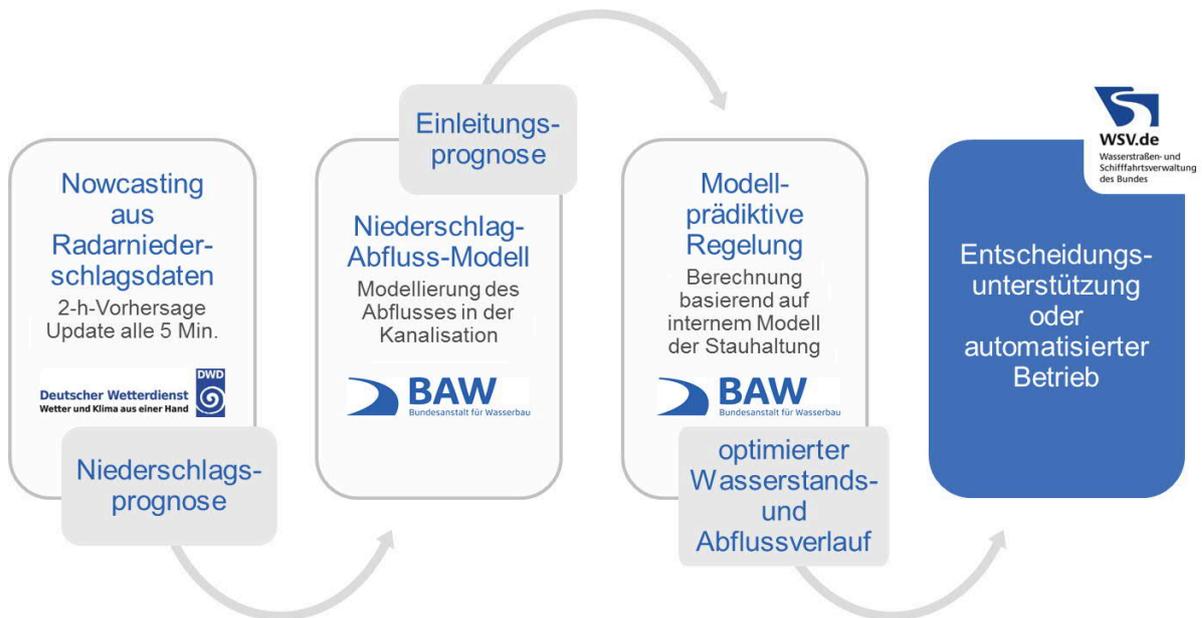


Bild 3: Die Komponenten der neuen Regelungsstrategie zur Entscheidungsunterstützung oder für den automatisierten Betrieb der ASR bei Starkregenereignissen

## 2.4 Niederschlagsdaten

Der DWD verbessert ständig die Qualität seiner Wettervorhersagen<sup>1</sup> durch die Entwicklung neuer hochauflösender Modelle, die Weiterentwicklung komplexer Algorithmen bei der Datenassimilation und die zunehmende Einbeziehung von immer genaueren Beobachtungen. Im Bereich der Niederschlagsmessungen, -prognosen und -statistiken stellt der DWD verschiedene Produkte bereit.

Für die Fernerkundung von Niederschlägen betreibt der DWD ein Radarnetz über Deutschland, das flächendeckende Messungen auf einem Raster mit einer Auflösung von 1 km × 1 km ermöglicht. Aus diesen Beobachtungen werden alle fünf Minuten Prognosen in Form von 5-min-Niederschlagssummen bereitgestellt. Dieses *Nowcasting* liefert mit Hilfe empirischer Modelle eine Niederschlagsvorhersage mit einer maximalen Vorlaufzeit von zwei Stunden.

Das probabilistische Ensemble-Vorhersagesystem (engl. ensemble prediction system, kurz EPS) des DWD zur numerischen Wettervorhersage besteht aus einem globalen Ensemble mit 40 Mitgliedern basierend auf dem deterministischen ICON-Modell. *ICON-EPS* wird auf einem Gitter mit 40 km horizontaler Auflösung betrieben mit einer Gitterverfeinerung von 20 km über Europa (Denhard et al. 2017). Das europäische Ensemble *ICON-EU-EPS* gibt Prognosen für stündliche Niederschlagssummen aus und liefert darüber hinaus Randbedingungen für *COSMO-D2-EPS*, das mit einer Gitterweite von etwa 2 km für eine begrenzte Fläche inklusive Deutschland konvektionsauflösende Simulationen erlaubt. *COSMO-D2-EPS* berechnet alle drei Stunden Niederschlagsprognosen in Form von 15-min-Niederschlagssummen mit einer maximalen Vorlaufzeit

<sup>1</sup> Die Begriffe Vorhersage und Prognose werden in diesem Bericht synonym verwendet.

von 27 Stunden. Grundlegende Informationen zu Wettersvorhersagen finden sich unter anderem in Deutscher Wetterdienst (2009) und Deutscher Wetterdienst (2011).

Statistische Rasterdaten zu Starkniederschlägen liefert *KOSTRA-DWD*, die koordinierte Starkniederschlagsregionalisierung und -auswertung des DWD, die aktuell in der Version 2010R als Open Data vorliegt (DWD Climate Data Center 2018). Diese statistischen Niederschlagswerte, in Abhängigkeit von Dauerstufe und Jährlichkeit angegeben, werden hauptsächlich für wasserwirtschaftliche Fragestellungen verwendet.

Im Rahmen des Themenfelds „Verlässlichkeit der Verkehrsinfrastrukturen erhöhen“ im BMVI-Expertennetzwerk ist der DWD auf zwei Gebieten aktiv: Erstens bei der Einführung neuer Algorithmen zur Festlegung von Anfangszustandsstörungen, um ein zuverlässiges EPS zu erhalten, und zweitens bei der Bereitstellung spezifischer Prognosen von Starkniederschlägen für die BAW, um die ASR an Binnenwasserstraßen zu unterstützen.

Die Vorhersage von extremen Niederschlagsereignissen ist sehr schwierig. Auch wenn eine beträchtliche Anzahl von Ensemblemitgliedern eine bestimmte Niederschlagsmenge vorhersagen, treten diese Ereignisse möglicherweise weder am gleichen Ort noch zur gleichen Zeit auf. Sie können jedoch trotzdem zu einem großräumigeren Wettergeschehen mit besserer Vorhersagbarkeit gehören. Um die Skala der Vorhersagbarkeit zu ermitteln, hat der DWD eine adaptive Umgebungsmethode entwickelt (Anastassiadou et al. 2019). Als Indikator für die lokale Vorhersagbarkeit wurden die vergangenen („lagged“) Prognosen aus dem EPS verwendet. Die Umgebung eines Ortes, d. h. die Gitterbox des Modells, wird nur dann vergrößert, wenn die EPS-Prognosen dadurch konsistenter werden. In einem solchen Fall wird die lokale Gitterbox Teil des größeren Gebiets und erhält die für dieses Gebiet gültige Wahrscheinlichkeit. Dies führt dazu, dass auch in der Umgebung vorhergesagte Ereignisse Einfluss auf die Gitterbox haben können. Es ist durch die Vorhersage nicht auszuschließen, dass ein außerhalb der Gitterbox vorhergesagtes Ereignis auch innerhalb der Gitterbox auftreten kann und umgekehrt. Es entsteht dabei die Frage, welche Aussagekraft solche skalierten Wahrscheinlichkeiten für ein Einzugsgebiet von etwa 40 km<sup>2</sup> haben, das in eine einzige Gitterbox des ICON-EPS passt.

Für das hier vorgestellte FuE-Projekt hat der DWD Radarbeobachtungen, kurzfristige Niederschlagsvorhersagen durch Nowcasting und probabilistische Niederschlagsvorhersagen durch COSMO-D2-EPS mit der neuen Umgebungsmethode bereitgestellt. Darüber hinaus werden Starkregenstatistiken aus *KOSTRA-DWD-2010R* genutzt, um für ein gegebenes urbanes Einzugsgebiet die seitlichen Zuflüsse durch Regen- und Mischwasserentlastungen in eine Wasserstraße abzuschätzen. Für den Echtzeitbetrieb eines Prognosesystems für die ASR sind die zeitlich hochaufgelösten Nowcasting-Vorhersagen geeignet, da städtische Einzugsgebiete schnell auf Starkregen reagieren und außerdem sowohl Vorsteuerung als auch Regler in 1-min-Schritten arbeiten. Die Ensemble-Vorhersage für die kommenden 24 Stunden bietet sich dagegen als zusätzliche Information für das Betriebspersonal an, sodass es sich frühzeitig auf ein eventuell bevorstehendes Starkregenereignis einstellen kann.

## 2.5 Einleitungsprognosen

In Deutschland werden urbane Einzugsgebiete in der Regel über eine Regen- und/oder eine Mischwasserkanalisation entwässert. Das Wasser gelangt dabei schnell von der Oberfläche in

die Kanalisation, die es in kurzer Zeit abtransportiert. Wegen der begrenzten Kapazitäten von Kanalisation und Kläranlagen muss das Regen- oder Mischwasser an geeigneten Stellen in die nahegelegenen Fließgewässer entlastet werden. Dies ist in wasserrechtlichen Einleitgenehmigungen festgelegt, die den jeweiligen Wasserstraßen- und Schifffahrtsämtern vorliegen.

Um die Regen- oder Mischwasserentlastungen aus einem bestimmten Einzugsgebiet zu berechnen, wird ein Niederschlag-Abfluss-Modell benötigt. Da die Niederschlag-Abfluss-Modellierung nicht zu den Kernaufgaben der BAW gehört und bei der Implementierung für die automatisierte ASR aufgrund technischer Vorgaben eine sehr kurze Rechenzeit erreicht werden muss, soll das Modell möglichst einfach sein. Die BAW hat die Auswirkungen von Regen- oder Mischwasserentlastungen auf die ASR bereits im Rahmen einer Masterarbeit untersuchen lassen. Belzner (2011) hat dazu mithilfe der Software MATLAB/Simulink der Firma MathWorks ein stadthydrologisches Modell des Teileinzugsgebietes „Nesenbach“ der Stadt Stuttgart implementiert, das auf linearen Speicherkaskaden basiert und auf diese Weise das Retentionsvermögen der versiegelten Oberfläche sowie der Kanalisation nachbildet. Darüber hinaus sind die wichtigsten hydraulischen Kontrollbauwerke des betrachteten Einzugsgebiets wie Regenrückhaltebecken und Regenüberlaufbecken enthalten.

Die Gesamtmenge des Regenwassers, die über den Mischwasserhauptsammler Nesenbach abgeführt wird, wird über die reduzierte Fläche  $A_{\text{red}}$  festgelegt. Die Abflusskonzentration, d. h. der Weg des Niederschlags von der Oberfläche in die Kanalisation, und die Abflusstransformation, d. h. der Weg innerhalb des Kanalnetzes, werden jeweils durch eine lineare Speicherkaskade abgebildet. Eine solche Kette von Speichern wird durch zwei Parameter beschrieben, zum einen durch die Anzahl  $n$  der Speicher und zum anderen durch die Speicherkonstante  $k$ , die für alle Speicher den gleichen Wert annimmt. Die Parameterwerte der beiden linearen Speicherkaskaden lassen sich auf zwei Arten ermitteln, entweder empirisch über die Eigenschaften des Kanalnetzes oder durch Anpassung an die Lösung eines bereits existierenden, detaillierten hydrodynamischen Modells der Kanalisation. Liegt kein hydrodynamisches Modell des zu untersuchenden Einzugsgebietes vor, werden für die empirische Ermittlung der Parameter folgende Werte benötigt: versiegelte Fläche des Einzugsgebietes sowie Gefälle und Laufzeit des Kanalnetzes (Belzner 2011). Ob ein solches stark vereinfachendes Modell zufriedenstellende Ergebnisse bei der Prognose von Regen- oder Mischwasserentlastungen zeigt, wird in Abschnitt 3.2.2 anhand einer Pilotstudie genauer betrachtet.

## 2.6 Vorausschauende Regelung von Abfluss und Wasserstand

Die durch das Institut für Systemdynamik der Universität Stuttgart entwickelte MPFFC ist eine vorausschauende Vorsteuerung, die die bisherige Vorsteuerung der OW/Q-Regelung ersetzt (Bild 4). Das Grundprinzip besteht darin, mithilfe eines internen Modells der Stauhaltung einen idealen zeitlichen Verlauf von Wasserstand und Abfluss zu berechnen. Mit der Kenntnis der zeitlichen Zustände der Regelstrecke kann der ideale Abfluss über das Regelorgan (Kraftwerk und Wehr) bestimmt werden. Damit ersetzt der MPFFC den Q-Anteil der OW/Q-Regelung und ergänzt ihn um einen Anteil zur Vorhersage eines optimierten Sollwasserstandes, der in engen Grenzen um den vorgegebenen Sollwasserstand geführt werden darf. Diese Antizipation des Sollwasserstandes nutzt die zulässige Speicherlamelle in der Stauhaltung und bewirkt, dass der

lokale PI-Regler nur kleine Wasserstandsunterschiede verarbeiten muss, sofern die erlaubten Toleranzen des optimierten Sollwasserstandes nicht erschöpft sind.

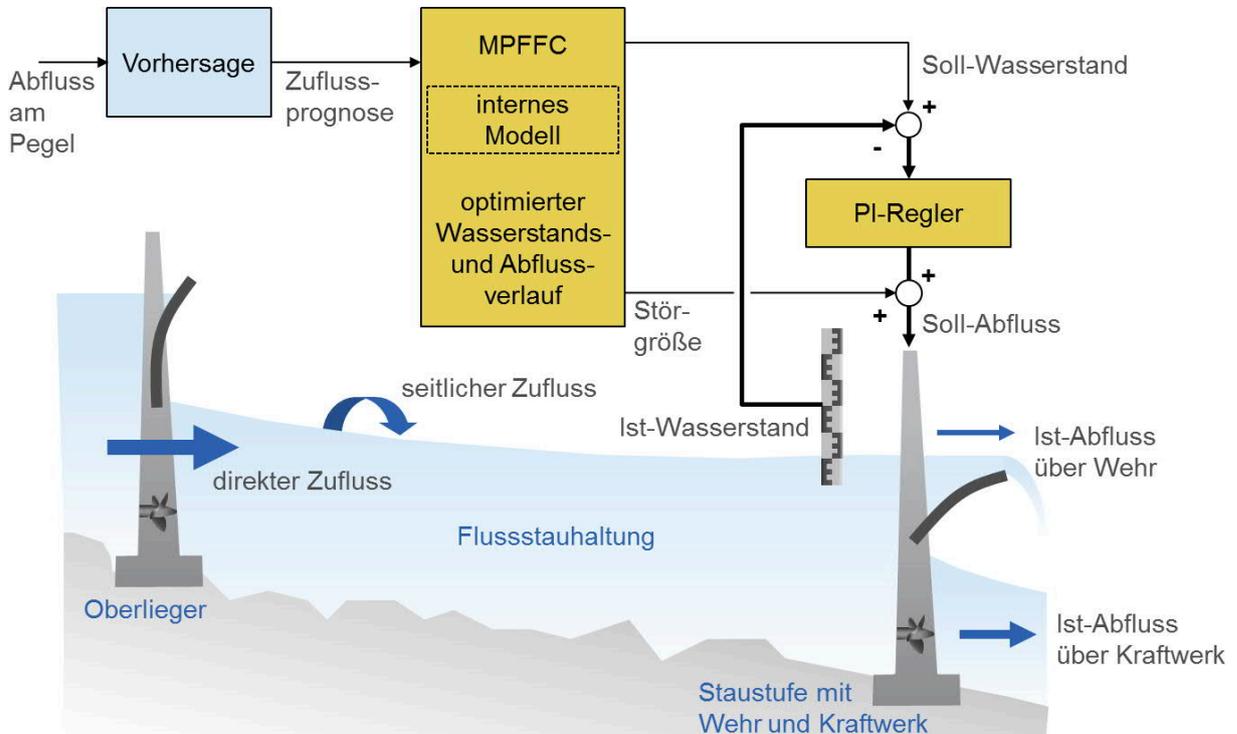


Bild 4: Schema der automatisierten Abfluss- und Stauregelung mit modellprädiktiver Vorsteuerung (MPFFC) an Wasserstraßen

Vergleicht man das Schema in Bild 4 mit dem Schema der ASR mit konventioneller Vorsteuerung in Bild 2, so wird deutlich, dass die modellprädiktive Vorsteuerung im Gegensatz zur bisher verwendeten Steuerungskomponente nicht nur aktuelle Zuflusswerte, sondern zusätzliche Daten in Form von Zuflussvorhersagen benötigt. Neben den im vorigen Abschnitt beschriebenen Einleitungsprognosen müssen daher auch Prognosen für den direkten Oberlieger-Zufluss zur Verfügung gestellt werden. Nur für die erste Staustufe in einer Kette von automatisch geregelten Stauhaltungen müssen die Zuflussvorhersagen anhand von oberstrom erfassten Abflussmessungen berechnet werden. Für alle nachfolgenden Staustufen kann der optimierte Abflussverlauf des jeweiligen Oberliegers, der durch die MPFFC ausgegeben wird, verwendet werden. Die von der Universität Stuttgart entwickelte Vorsteuerung benötigt Vorhersagen mit einer zeitlichen Auflösung von einer Minute und einem Zeithorizont von ca. drei Stunden.

Als internes Modell der Stauhaltung werden die linearisierten Saint-Venant-Gleichungen eingesetzt. Deren Parameter werden anhand von Simulationen über den Vergleich mit der Lösung des vorhandenen hydronumerischen Modells bestimmt. Um den gesamten Abflussbereich von Niedrigwasserabfluss bis zum Ausbauabfluss der Staustufe abzudecken, wird das interne Modell der Stauhaltung während des Betriebs gewechselt, wobei jedes Modell für einen anderen Arbeits-

punkt bzw. Abfluss linearisiert wird (Amann et al. 2016). Um einen störungsfreien Wechsel zwischen zwei Modellen zu ermöglichen, werden die Ergebnisse der Modelle in einem Übergangsbereich interpoliert.

Die MPFFC berechnet den idealen zukünftigen Wasserstands- und Abflussverlauf mithilfe eines Optimierungsalgorithmus, der für den vorhergesagten Gesamtzufluss sowohl Abweichungen vom Stauziel als auch Abflussschwankungen minimiert (Amann et al. 2014). Dabei werden für den Wasserstand harte Grenzen vorgegeben, die innerhalb der Stautoleranz liegen und einen zusätzlichen Sicherheitsabstand zu den vorgeschriebenen Toleranzgrenzen aufweisen (s. Bild 5). Der Wert des ersten Zeitschritts der optimierten Abflusskurve wird als Steuerungsanteil des Soll-Abflusses genutzt. Beim Vergleich von Bild 4 mit Bild 2 fällt auf, dass der Soll-Wasserstand bei der Anwendung einer MPFFC nicht durch das jeweilige Stauziel vorgegeben, sondern durch die MPFFC ausgegeben wird. Dabei entspricht der Soll-Wasserstand immer dem Wert des ersten Zeitschritts der aktuellen Wasserstandskurve.

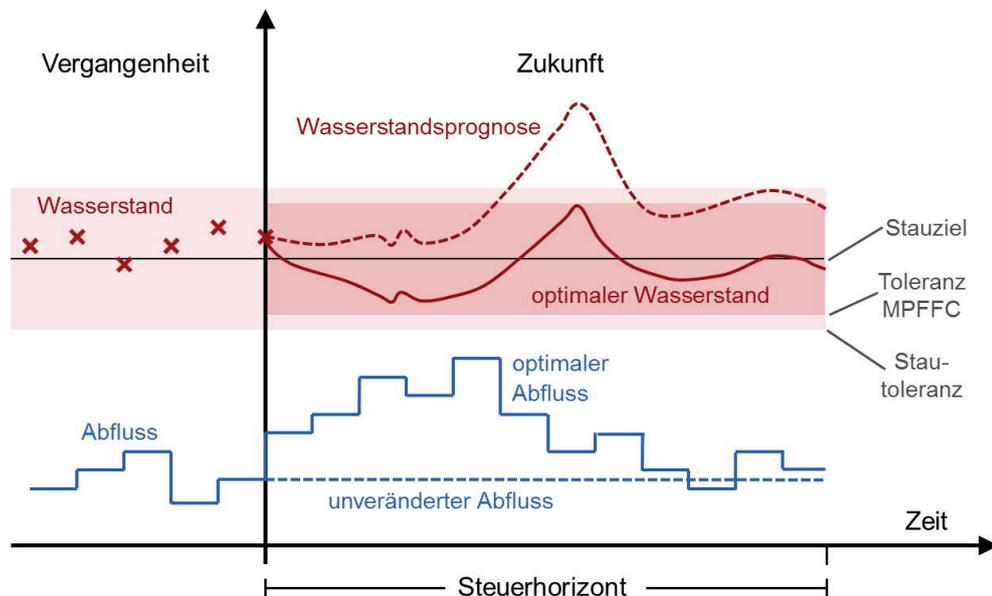


Bild 5: Schematische Darstellung der optimierten Wasserstands- und Abflustrajektorie, berechnet durch die modellprädiktive Vorsteuerung (MPFFC) bei gegebener Zuflussprognose

Auf diese Weise kann die MPFFC den Wasserstand im Rahmen der erlaubten Stautoleranz vorausschauend anpassen und so frühzeitig auf eine bevorstehende Abflussänderung reagieren. Der PI-Regler führt den Ist-Wasserstand dem von der MPFFC berechneten Soll-Wasserstand nach, indem er einen positiven oder negativen Proportional- und Integralanteil zum Steuerungsanteil hinzuaddiert. Durch diesen Schritt werden Ungenauigkeiten in den Modellen der Stauhaltung sowie in den Vorhersagen ausgeglichen. Wie durch Pranner et al. (2019) an einem realen Szenario gezeigt wurde, kann durch die Verwendung der MPFFC anstelle der bisherigen Vorsteuerung eine deutliche Vergleichmäßigung des Abflusses bei gleichzeitiger Einhaltung der Stautoleranzgrenzen erreicht werden. Dieser Vorteil der modellprädiktiven Vorsteuerung wird

genutzt, um die Auswirkungen von starkregeninduzierten seitlichen Einleitungen auf die ASR zu minimieren.

### 3 Pilotprojekt

#### 3.1 Mischwasserentlastungen in die Neckarstauhaltung Hofen

Die BAW hat sich erstmals 2011 mit den Auswirkungen von Starkregen auf die ASR auseinandergesetzt, nachdem die WSV an der Stauhaltung Hofen am Neckar einen Zusammenhang zwischen Starkregenereignissen und Verletzungen der Stautoleranz vermutet hatte. Im Rahmen einer Masterarbeit an der BAW wurde diese Annahme bestätigt und eine Mischwassereinleitung der Stadt Stuttgart identifiziert (Belzner 2011; Belzner und Schmitt-Heiderich 2012). Die Neckarstauhaltung Hofen liegt teils innerhalb, teils unterstrom des dicht bebauten Stuttgarter Stadtgebiets und hat mehrere seitliche Zuflüsse. Dabei bringt der Nesenbach, der innerhalb der Stadt unterirdisch als Mischwassersammler verläuft, mit Abstand die größten seitlichen Einleitungen in die Stauhaltung ein (Schmitt-Heiderich und Belzner 2012). Das Einzugsgebiet des Nesenbachs ist in Bild 6 dargestellt.

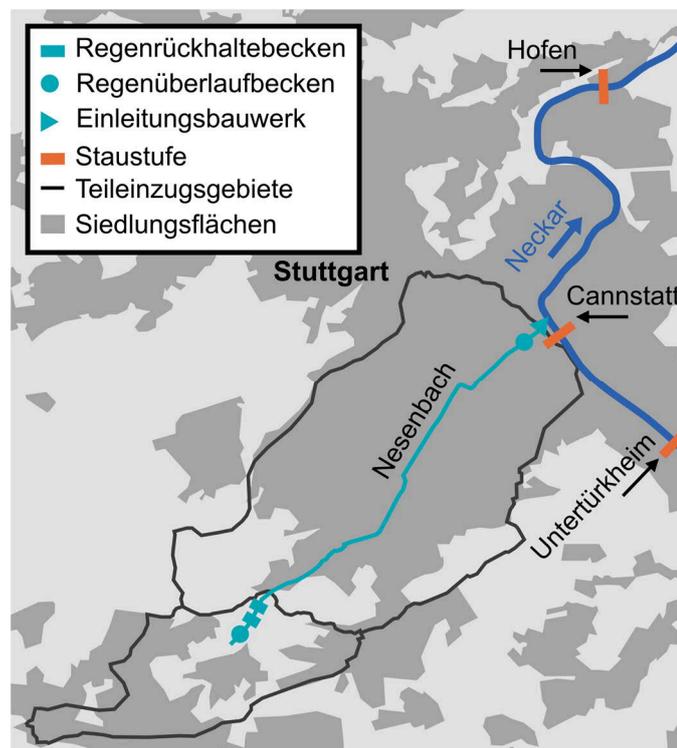


Bild 6: Schematische Darstellung der beiden Teileinzugsgebiete des Mischwassersammlers Nesenbach in Stuttgart

Bei einem Niederschlagsereignis füllt das Mischwasser aus dem Hauptsammler Nesenbach zunächst ein Regenüberlaufbecken, das RÜB Schwanenplatz, bevor es über ein Einleitungsbauwerk

in den Neckar fließt. Dieses Einleitungsbauwerk befindet sich unmittelbar unterhalb der Staustufe Cannstatt (s. Bild 7) und entlastet bis zu  $130 \text{ m}^3/\text{s}$  an Mischwasser in die Stauhaltung Hofen. Die Lage des Einleitungsbauwerks bietet einen großen Vorteil für die Anwendung der MPFFC des Instituts für Systemdynamik der Universität Stuttgart, da der Abstand zum Oberlieger vernachlässigt werden kann. Aus diesem Grund kann das bereits bestehende Verfahren zur Erstellung des internen linearisierten Modells angewendet werden. Der direkte Zufluss über die Staustufe Cannstatt und der seitliche Zufluss durch Mischwasserentlastungen werden zu einem Gesamtzufluss in die Stauhaltung Hofen addiert.



Bild 7: Einleitungsbauwerk des Mischwassersammlers Nesenbach im Unterwasser der Neckarstausthaltung Cannstatt (Quelle: BAW/Belzner)

In Tabelle 1 sind die Abflusswerte des Pegels Plochingen aufgeführt, der ungefähr 26 km oberhalb der Staustufe Hofen liegt. An etwa der Hälfte der Tage im Jahr wird ein Abfluss von  $30 \text{ m}^3/\text{s}$  unterschritten (LUBW Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg 2009). Der seitliche Zufluss durch Mischwasserentlastungen aus dem Nesenbach kann den jeweils aktuellen Zufluss vom Oberlieger Cannstatt also um ein Vielfaches übersteigen.

Gewässerkundlicher Hauptwert 1941/2009, Abflussjahr: 1.11. des Vorjahres bis 31.10.	Abfluss in $\text{m}^3/\text{s}$
NQ 02.10.1949	3,7
MNQ	11,7
MQ	47,8
MHQ	462
HQ 07.03.2006	1220

Tabelle 1: Gewässerkundliche Hauptwerte des Abflusspegels Plochingen, nach LUBW Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg (2009)

Das Wehr der Staustufe Hofen befindet sich bei Neckar-km 176,195 und das Wehr des Oberliegers Cannstatt bei Neckar-km 182,730. Die Stauhaltung ist demnach nur 6,5 km lang. Für die Staustufe Hofen liegt das Stauziel bei 213,83 m+NN und darf nicht unterschritten werden, wobei der Toleranzbereich für den Wasserstand nach oben 15 cm beträgt. Diese und weitere Daten zu den Staustufen der Bundeswasserstraße Neckar liefert Krajewski (2007).

In Bild 8 sind Laufzeit und Retentionszeit dargestellt, die anhand von Simulationen mit einem hydronumerischen Modell der Stauhaltung Hofen bestimmt wurden. Nach Schmitt-Heiderich und Gebhardt (2012) entspricht die Laufzeit dem Zeitintervall, nach dem sich eine Zuflussänderung am Regelungspegel im Oberwasser einer Staustufe nachweisen lässt. Die Retentionszeit hingegen beruht auf stationären Überlegungen. Sie gibt die Zeitdauer an, die bei einer Zuflussänderung vergehen muss, damit das Wasservolumen in der Stauhaltung genau denjenigen Wert annimmt, der für die neue stationäre Wasserspiegellage nötig ist (Theobald 2006). Dies ist zu unterscheiden von der Zeitdauer, nach der sich der Wasserspiegel stationär ausgebildet hat.

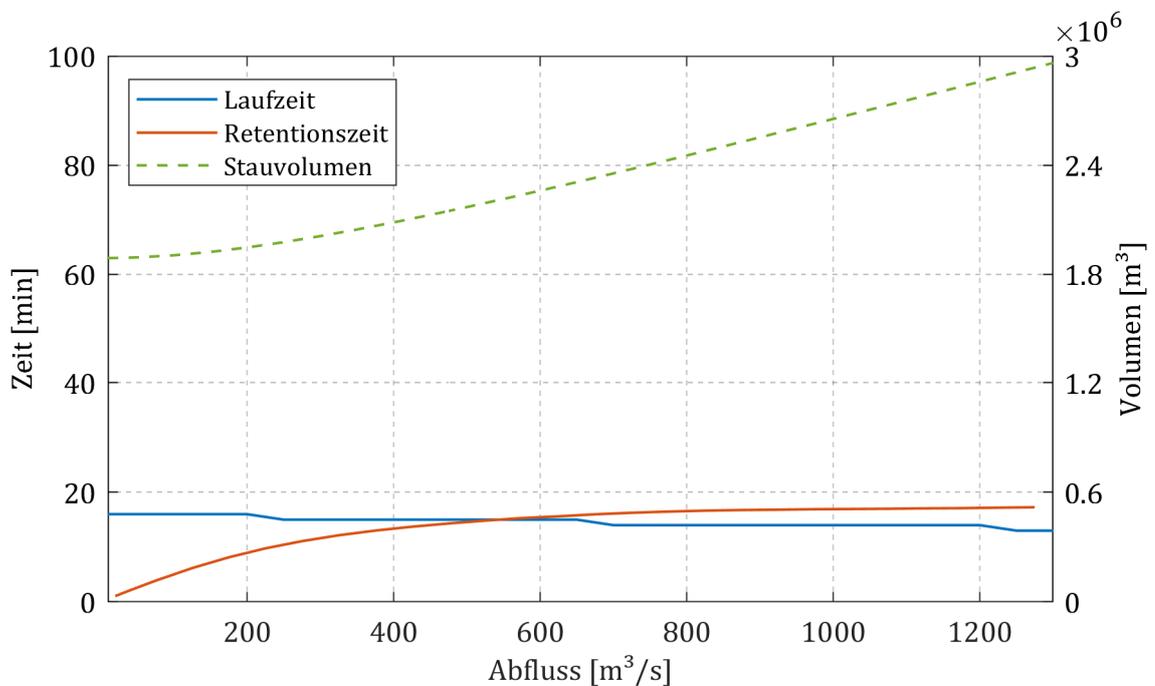


Bild 8: Simulationsergebnisse für Laufzeit, Retentionszeit und Stauvolumen der Neckarstauhaltung Hofen in Abhängigkeit vom Abfluss

Wie in Bild 8 zu erkennen ist, ist die Retentionszeit der Stauhaltung Hofen bis zu einem Abfluss von knapp 500 m³/s kleiner als die Laufzeit. Bis zu diesem Abflusswert ist die ASR besonders anfällig für unvorhergesehene seitliche Einleitungen, da bei einer Zuflussänderung zu wenig bzw. zu viel Wasservolumen aus der Stauhaltung fließt, bevor die Zuflussänderung vom Oberwasserpegel erfasst und der Abfluss korrigiert wird. In einem solchen Fall treten vermehrt Abfluss- und Wasserstandsschwankungen auf.

### 3.2 Untersuchungen

#### 3.2.1 Niederschlagsstatistik

Um die Niederschlagshöhen im Einzugsgebiet des Nesenbachs einschätzen zu können, wurde die Starkregenstatistik aus KOSTRA-DWD-2010R genutzt. Diese liegt in Form von Rasterdaten vor, wobei das betrachtete Einzugsgebiet durch mehrere Gitterzellen abgedeckt wird. Die Daten in Tabelle 2 ergeben sich als Durchschnittswerte aus den Daten der Zellen für Stuttgart (Zelle 84028), Vaihingen (Zelle 85027) und Echterdingen (Zelle 85028). Die Stuttgarter Gitterzelle wurde dabei doppelt gewichtet, da die Überschneidungsfläche mit dem Einzugsgebiet hier am größten ist. Die Dauerstufe gibt die Dauer eines Starkregenereignisses an, während die Jährlichkeit das Wiederkehrintervall eines Ereignisses beschreibt.

D in min	D in h	T in a								
		1	2	3	5	10	20	30	50	100
5		5,6	7,8	9,1	10,8	13,0	15,2	16,5	18,1	20,3
10		9,0	11,8	13,5	15,6	18,5	21,3	23,0	25,1	28,0
15		11,3	14,6	16,5	19,0	22,3	25,6	27,6	30,0	33,3
20		12,9	16,6	18,7	21,4	25,1	28,8	30,9	33,7	37,4
30		15,0	19,3	21,8	24,9	29,3	33,5	36,1	39,2	43,5
45		16,9	21,9	24,8	28,4	33,4	38,4	41,3	45,0	50,0
60		18,0	23,6	26,8	30,9	36,4	42,0	45,2	49,3	54,8
90		19,9	25,6	29,0	33,2	39,0	44,8	48,1	52,4	58,2
120	2	21,3	27,2	30,7	35,1	41,0	46,9	50,4	54,8	60,7
180	3	23,5	29,6	33,2	37,8	44,0	50,1	53,7	58,3	64,4
240	4	25,2	31,5	35,2	39,9	46,3	52,6	56,3	61,0	67,3
360	6	27,8	34,4	38,2	43,1	49,7	56,3	60,2	65,0	71,6
540	9	30,6	37,5	41,5	46,6	53,5	60,3	64,3	69,4	76,2
720	12	32,9	39,9	44,0	49,2	56,3	63,3	67,5	72,7	79,7
1080	18	36,3	43,6	47,9	53,3	60,6	68,0	72,3	77,7	85,0
1440	24	38,9	46,4	50,8	56,4	63,9	71,5	75,9	81,5	89,0

Tabelle 2: Niederschlagshöhen in mm nach KOSTRA-DWD-2010R für das Einzugsgebiet des Stuttgarter Mischwassersammlers Nesenbach in Abhängigkeit von der Dauerstufe  $D$  und der Jährlichkeit  $T$

Bei einem Niederschlagsereignis im betrachteten Einzugsgebiet, das 15 Minuten andauert und in seiner Intensität alle fünf Jahre auftritt, fällt also statistisch eine Niederschlagsmenge von 19 mm bzw. 19 l/m<sup>2</sup>. Ein Niederschlagsereignis von gleicher Dauer und mit einer Niederschlagsmenge von 11,3 mm ist einmal im Jahr zu erwarten.

### 3.2.2 Niederschlag-Abfluss-Modellierung

Für das hier vorgestellte FuE-Projekt wurde das Niederschlag-Abfluss-Modell von Belzner (2011) verwendet, das mithilfe der Software MATLAB/Simulink der Firma MathWorks implementiert wurde und vereinfacht in Bild 9 dargestellt ist. Das Modell bildet die zwei Teileinzugsgebiete des Mischwassersammlers Nesenbach ab. Darüber hinaus werden für das südwestlich gelegene Teileinzugsgebiet (s. Bild 6), im Folgenden als EZG1 bezeichnet, ein Regenüberlaufbecken und zwei Regenrückhaltebecken berücksichtigt, die im Blockdiagramm in Bild 9 zu einem einzigen Block in Form eines Regenüberlaufbeckens zusammengefasst sind. Für das nordöstlich gelegene Teileinzugsgebiet (EZG2) beinhaltet das Modell das Überlaufbecken Schwanenplatz.

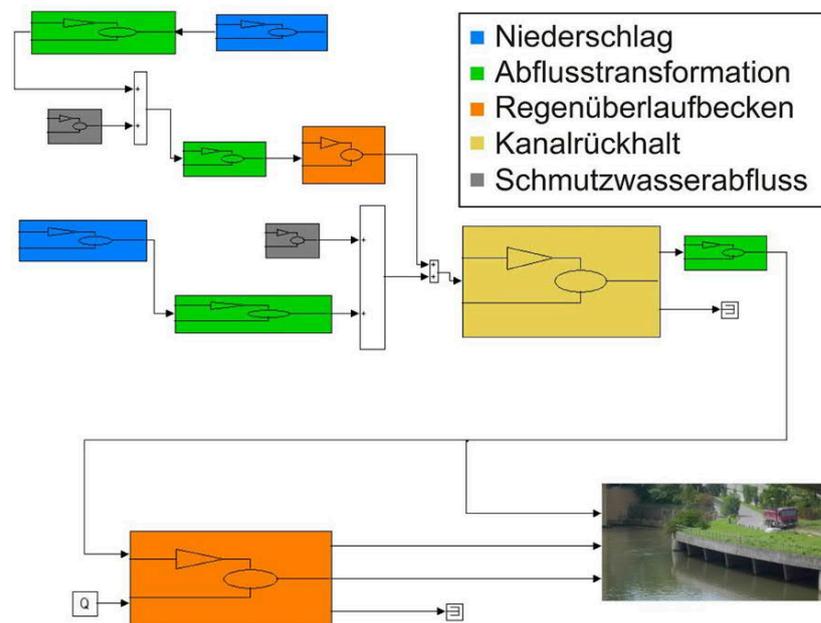


Bild 9: Blockdiagramm des hydrologischen Modells für das Einzugsgebiet des Stuttgarter Mischwassersammlers Nesenbach (Quelle: Belzner und Schmitt-Heiderich 2012)

Anhand von Messdaten aus dem Jahr 2016 wurden die empirisch ermittelten Parameter des stadthydrologischen Modells für die vorliegende Arbeit nachjustiert. Dazu hat der DWD Radarniederschlagsmessungen für die einzelnen Teileinzugsgebiete bereitgestellt. Bezüglich der Mischwasserentlastungen liegen Messwerte für Einstau und Überlauf des Regenüberlaufbeckens Schwanenplatz vor, die das Tiefbauamt der Stadt Stuttgart zur Verfügung gestellt hat. Die Messwerte des Überlaufs sind dabei aufgrund der langen Überlaufkante weniger verlässlich als die Messwerte des Einstaus. In Tabelle 3 sind diejenigen Ereignisse aufgelistet, anhand derer die Nachjustierung erfolgte. Das Niederschlagsereignis im Jahr 2016, an dem mit  $75,6 \text{ m}^3/\text{s}$  der höchste Wert für den seitlichen Zufluss in den Neckar von den Messungen erfasst wurde, fand am 8. Juni statt.

Datum	Maximaler Einstau in Prozent	Maximaler Überlauf in m <sup>3</sup> /s
01.-02.06.2016	100	4,7
05.06.2016	100	4,2
08.-09.06.2016	100	75,6
14.06.2016	100	29,1
12.07.2016	20	0,0
13.07.2016	90	0,0
18.08.2016	100	21,4
28.08.2016	80	0,0
28.08.2016	100	28,6

Tabelle 3: Messung von Einstau und Überlauf des Regenüberlaufbeckens Schwanenplatz in Stuttgart für ausgewählte Niederschlagsereignisse im Jahr 2016, verwendet zur Nachjustierung des Niederschlag-Abfluss-Modells

Zur Beschreibung der Abflusskonzentration wurde analog zu Belzner (2011) für beide Teileinzugsgebiete ein einzelner Linearspeicher mit einer Speicherkonstante von  $k = 1,5$  min gewählt. Die Werte für die reduzierte Fläche  $A_{\text{red}} = f_{\text{red}} \cdot A$ , die zum Regenwasserabfluss durch den Nesenbach beiträgt, sowie die Parameter der Abflusstransformation für EZG1 und EZG2 wurden angepasst. Die Abflusstransformation wurde mit Hilfe einer linearen Speicherkaskade mit einer Beckenanzahl  $n$  beschrieben. Dazu wurden die Unterschiede zwischen Messdaten und Simulationsergebnissen mit dem hydrologischen Modell für die Ereignisse in Tabelle 3 in Bezug auf folgende Aspekte minimiert: das Gesamtvolumen des Einstaus und der Entlastung, das Verhältnis der Beiträge der einzelnen Teileinzugsgebiete zum Gesamtvolumen, die Gradienten von Einstau und Entlastung sowie der Zeitpunkt des Beginns der Entlastung. Die von Belzner (2011) ermittelten Werte und die im Rahmen dieser Arbeit vorgenommenen Anpassungen sind in Tabelle 4 aufgeführt.

Einzugsgebiet	Parameter	Belzner (2011)	Wert nach Anpassung
EZG1	$f_{\text{red}}$	0,46	0,23
	$n$	6	18
	$k$	2,32	1,392
EZG2	$f_{\text{red}}$	0,51	0,408
	$n$	6	20
	$k$	4,9	2,94

Tabelle 4: Vergleich der von Belzner (2011) ermittelten Parameter für das hydrologische Modell des Stuttgarter Mischwassersammlers Nesenbach mit den im vorliegenden FuE-Projekt verwendeten Werten

Die Validierung des nachjustierten Niederschlag-Abfluss-Modells erfolgte anhand weiterer Niederschlagsereignisse aus Tabelle 5, die nicht zur Nachjustierung genutzt wurden. Bezogen auf

den jeweiligen Maximalwert für den seitlichen Zufluss in den Neckar stimmen die Ergebnisse aus der Simulation mit den Messwerten einiger Niederschlagsereignisse gut überein, bei anderen Ereignissen wird der maximale Zufluss durch das Einleitungsbauwerk um bis zu 60% unterschätzt oder um bis zu 80% überschätzt. Werden bei der Bewertung dieser Abweichungen die große Messungenauigkeit des Überlaufs und die Unsicherheit in den Radarbeobachtungen berücksichtigt, so kann die Genauigkeit des stark vereinfachten Niederschlag-Abfluss-Modells als ausreichend betrachtet werden (Kasper et al. 2018).

Nach der Anpassung der Parameter des stadthydrologischen Modells wurden anhand sogenannter Blockregen, d. h. Niederschlägen von bestimmter Dauer und konstanter Intensität nach KOSTRA-DWD-2010R (s. Tabelle 2), Simulationen durchgeführt, um den Zeitabstand von Niederschlagsbeginn bis zum Beginn der Entlastung in den Neckar in Abhängigkeit von Dauerstufe und Jährlichkeit zu bestimmen. Für die Laufzeit in der Kanalisation ergibt sich bei Dauerstufen bis zu einer halben Stunde ein Wert von etwa 35 Minuten für alle betrachteten Wiederkehrintervalle. Bei Niederschlagsereignissen größerer Dauerstufen wächst die Laufzeit auf bis zu 50 Minuten an. Zusammen mit der abflussabhängigen Retentionszeit der Stauhaltung Hofen (s. Bild 8) bleiben nach Beginn eines Niederschlagsereignisses demnach etwa 35 bis 45 Minuten, um auf eine Mischwassereinleitung zu reagieren. Dabei muss jedoch zusätzlich die Zeit berücksichtigt werden, die benötigt wird, um an der Staustufe Hofen den Abfluss zu verändern.

Datum	Maximaler Einstau in Prozent	Maximaler Überlauf in m <sup>3</sup> /s
09.02.2016	100	4,5
16.-17.04.2016	100	4,2
27.05.2016	100	4,8
29.-30.05.2016	100	21,9
11.06.2016	90	0,0
12.-13.06.2016	100	4,3
18.06.2016	90	0,0
24.-25.06.2016	100	4,2
25.06.2016	100	0,0
22.-23.07.2016	100	0,0
28.07.2016	70	0,0
04.-05.08.2016	100	28,6

Tabelle 5: Messung von Einstau und Überlauf des Regenüberlaufbeckens Schwanenplatz in Stuttgart für ausgewählte Niederschlagsereignisse im Jahr 2016, verwendet zur Validierung des Niederschlag-Abfluss-Modells

### 3.2.3 Niederschlagsdaten für ausgewählte Ereignisse

Für die Bereitstellung von Niederschlagsprognosen durch den DWD wurden aktuellere Starkregenereignisse für das betrachtete Einzugsgebiet benötigt als die im vorigen Abschnitt genannten Ereignisse im Jahr 2016. Anhand von Radarbeobachtungen wurden daher die in Tabelle 6 aufgeführten Ereignisse ausgewählt und nach den größten anzunehmenden Auswirkungen auf die

ASR, d. h. nach Niederschlagssumme und Dauer, priorisiert. Hierbei entspricht die Priorität 1 einer großen Auswirkung.

Datum, Zeitraum (UTC)	Priorität
10.04.2018, 15-21 Uhr	3
13.05.2018, 18-23 Uhr	3
20.05.2018, 0-7 Uhr	2
22.05.2018, 12-14 Uhr	3
31.05.-01.06.2018, 21-2 Uhr	2
07.06.2018, 17-20 Uhr	1
11.06.2018, 15-18 Uhr	2
12.06.2018, 17-19 Uhr	2
04.07.2018, 9-12 Uhr	2
21.07.2018, 8-13 Uhr	3
23.08.2018, 12-15 Uhr	1

Tabelle 6: Ausgewählte Niederschlagsereignisse im Jahr 2018 im Einzugsgebiet des Stuttgarter Mischwassersammlers Nesenbach

Die Niederschlagsdaten, sowohl Radarbeobachtungen, Nowcasting als auch Ensemble-Prognosen, wurden durch den DWD jeweils für die einzelnen Teileinzugsgebiete EZG1 und EZG2 aggregiert, sodass die Eingangsdaten für das Niederschlag-Abfluss-Modell direkt zur Verfügung standen. Aus den Abweichungen zwischen Gitterboxen und Einzugsgebiet ergeben sich je nach verwendetem Produkt des DWD Unterschiede bei der berücksichtigten Fläche. Darüber hinaus liegen die Daten in Form von 5-min- bzw. 15-min-Niederschlagssummen vor. Da sowohl Niederschlag-Abfluss-Modell als auch Regelungssystem Eingangsdaten mit einer zeitlichen Auflösung von einer Minute benötigen, wurde ein abschnittsweise konstanter Niederschlagsverlauf angenommen. Als Referenzwerte für die tatsächliche Einleitung aus dem Mischwassersammler Nesenbach dienen die Ergebnisse aus der Simulation mit Niederschlag-Abfluss-Modell und Radarniederschlagsmessungen. Die Ergebnisse aus den Simulationen mit Niederschlag-Abfluss-Modell und Nowcasting-Vorhersagen werden für die Erstellung von Zuflussprognosen verwendet, die von der MPFFC benötigt werden. Für den Umgang mit Ensemble-Prognosen wurden zunächst Schwellwerte festgelegt, um aus den unterschiedlichen Ergebnissen der einzelnen Ensemble-Member eine Wahrscheinlichkeit für eine bestimmte Niederschlagsintensität zu berechnen: 0,01 mm, 0,1 mm, 0,5 mm, 1 mm, 2 mm, 3 mm, 5 mm, 7,5 mm, 8 mm, 9 mm und 14 mm. Diese Schwellwerte sollten anhand der Erfahrungen aus einem Testbetrieb des Prognosesystems nach Bedarf angepasst werden. Die resultierenden Wahrscheinlichkeiten aus den Ensemble-Prognosen werden in der vorliegenden Arbeit zur Entscheidungsunterstützung für das Betriebspersonal grafisch darstellt, aber nicht durch die automatisierte ASR genutzt.

Bei der Erstellung von Zuflussprognosen für die MPFFC spielt die Verlässlichkeit der Vorhersagen eine große Rolle für das Regelungsverhalten. Bild 10 zeigt ein Beispiel dafür, dass die vorhergesagten Niederschlagssummen aus dem Nowcasting mit deutlichen Unsicherheiten behaftet

sein können. So wird die Niederschlagsmenge des ausgewählten Ereignisses durch die Prognose deutlich unterschätzt, sowohl 5 Minuten vor als auch 5 Minuten nach dem Anstieg der momentanen Niederschlagsintensität auf über 5 mm/h. Erst 15 Minuten nach Beginn des Starkregens wird der übrige Verlauf des Ereignisses mit ausreichender Genauigkeit durch das Nowcasting vorhergesagt. In diesem Fall würde die MPFFC zunächst mit einem geringeren als dem tatsächlich bevorstehenden seitlichen Zufluss rechnen und den Wasserstand an der Staustufe Hofen vorerst nur geringfügig absenken. Im Beispiel aus Bild 10 würden zum Zeitpunkt der verlässlichen Nowcasting-Prognose, also 15 Minuten nach Beginn des Starkregens, noch etwa 20 Minuten verbleiben, bis die Zuflussänderung die Staustufe Hofen erreicht. Aufgrund der Unsicherheiten der Zuflussprognosen ist es von großem Vorteil, dass die MPFFC in 1-min-Schritten aus der jeweils aktuellen Zuflussprognose eine neue optimale Wasserstands- und Abflusstrajektorie berechnet, wobei die Werte für den nächsten Zeitschritt unmittelbar durch eine lokale automatisierte Regelung umgesetzt werden. Die Leistungsgrenze der MPFFC in Bezug auf fehlerhafte Prognosen wird am Ende des folgenden Abschnitts genauer beschrieben.

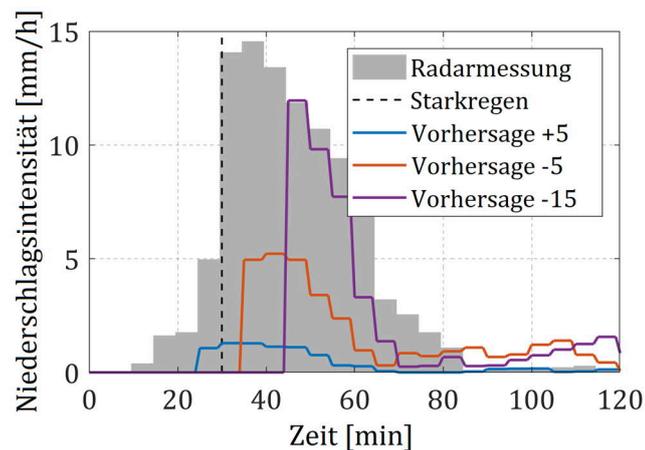


Bild 10: Beispielhafte Darstellung der Unsicherheit von kurzfristigen Niederschlagsprognosen anhand des Vergleichs einer Radarmessung mit der Nowcasting-Prognose 5 Minuten vor, 5 Minuten nach und 15 Minuten nach Beginn eines sommerlichen Starkregens im Einzugsgebiet des Stuttgarter Mischwassersammlers Nesenbach

### 3.2.4 Die modellprädiktive Vorsteuerung

Sowohl für die OW/Q-Regelung, als auch für die MPFFC-Regelung wurden von Pranner (2018) in der Software MATLAB/Simulink Regelungssysteme aufgebaut. Die Parametrierung der OW/Q-Regelung ist ausführlich in den BAWMitteilungen Nr. 96 beschrieben (Bundesanstalt für Wasserbau 2012). Mit Hilfe eines eindimensionalen hydrodynamisch-numerischen Fließgewässermodells der Stauhaltung Hofen wurden vier linearisierte Modelle für die Arbeitspunkte 30, 150, 250 und 400 m<sup>3</sup>/s angepasst, die den gesamten Abflussbereich hinreichend genau abdecken. Der im MPFFC-Regelungssystem vorhandene PI-Regler wurde analog zum Regler der OW/Q-Regelung parametrierung. Aufgrund der kurzen Stauhaltung Hofen und damit geringen Speicherkapazität wurde der Prognosehorizont für die modellprädiktive Vorsteuerung auf nur zwei Stunden festgelegt.

Zur Untersuchung der Leistungsfähigkeit der neuen Regelstrategie wurde das Niederschlagsereignis vom 08.-09.06.2016 (Tabelle 3) verwendet und für die beiden in Abschnitt 3.2.2 genannten Teileinzugsgebiete Mischwasserentlastungsszenarien erstellt. Der Zufluss von oberstrom in die Stauhaltung Hofen wurde auf  $12 \text{ m}^3/\text{s}$  festgelegt, was in etwa dem mittleren Niedrigwasserabfluss entspricht (vgl. Tabelle 1). Da sich die Mischwassereinleitung in der Nähe der oberstrom gelegenen Staustufe befindet, werden Basisabfluss und Mischwassereinleitung zum Gesamtzufluss in die Flussstrecke aufsummiert. Der Wasserstand wird direkt vor der Wehranlage Hofen bestimmt, an der eine obere Abweichung von 15 cm vom Soll-Wasserstand zulässig ist.

Ohne Kenntnis der Mischwasserentlastung führen sowohl die ursprünglich verwendete OW/Q-Regelung als auch die modellprädiktive Regelung zu schlechten Ergebnissen (Bild 11). Bei beiden Systemen wird die Wasserspiegeltoleranz nach oben überschritten. Darüber hinaus kommt es zu keinerlei Dämpfung der entstehenden Abflussspitze, was zu Problemen in den unterstrom gelegenen Stauhaltungen führen kann.

Wird die Entlastungsvorhersage in der Regelung berücksichtigt, erhält man das entsprechende Verhalten in Bild 12. Beide Systeme halten den Wasserstand mehr oder weniger perfekt innerhalb des Toleranzbereichs. In der OW/Q-Regelung wird jedoch die Abflussspitze um etwa 5% gegenüber der Zuflussspitze erhöht. Im Gegensatz dazu vermeidet die MPFFC trotz Mischwasserentlastung eine Verstärkung der Zuflussspitzen. Die geringe Differenz zwischen dem vom MPFFC berechneten Soll-Wasserstand und dem Ist-Wasserstand zeigt, dass der PI-Regler nur kleine Ungenauigkeiten der internen linearisierten Modelle des MPFFC ausgleichen muss.

Pranner (2018) untersuchte auch, wie sich die Regelung mit modellprädiktiver Vorsteuerung verhält, wenn sich die Einleitungsprognose von der Realität unterscheidet. Es wurden vier verschiedenen Arten von Fehlprognosen betrachtet:

- **Jährlichkeit**  
Die Niederschlagsereignisse unterscheiden sich in der Jährlichkeit ihres Auftretens, aber nicht in der Dauer. Das heißt, es wird über den gleichen Zeitraum entweder eine zu hohe oder zu niedrige Einleitung aus dem Nesenbach prognostiziert.
- **Dauer**  
Die Niederschlagsereignisse unterscheiden sich in der Dauer, aber nicht in der Jährlichkeit ihres Auftretens. Das heißt, es wird eine Einleitung über einen entweder zu langen, oder zu kurzen Zeitraum prognostiziert.
- **Zeitpunkt**  
Eine Mischwassereinleitung tritt früher oder später auf als prognostiziert.
- **Extremfall**  
Als Extremfall wird ein Ereignis bezeichnet, das stattfindet, ohne dass eine Einleitungsprognose es vorhersagt oder aber eine prognostizierte Einleitung, die nicht stattfindet

Beispielhaft werden hier die Ergebnisse für eine fehlerhaft vorhergesagte Jährlichkeit gezeigt. Die vollständigen Ergebnisse werden von Pranner (2018) beschrieben. Die Dauer dieses künstlichen Blockregenereignisses beträgt in dieser Untersuchung 180 min. Als erstes wurde eine Fehlprognose mit zu geringer Jährlichkeit untersucht. Damit wird die Einleitung unterschätzt.

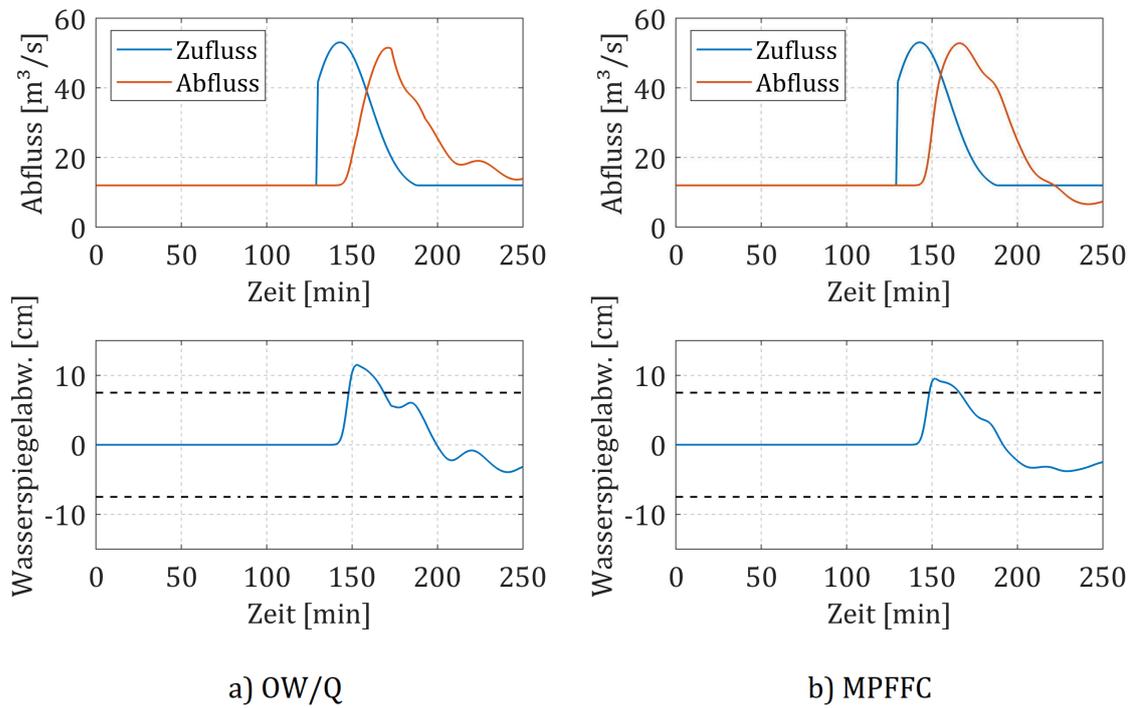


Bild 11: Vergleich der Ergebnisse der Regelungssysteme ohne Berücksichtigung der Entlastungsvorhersage

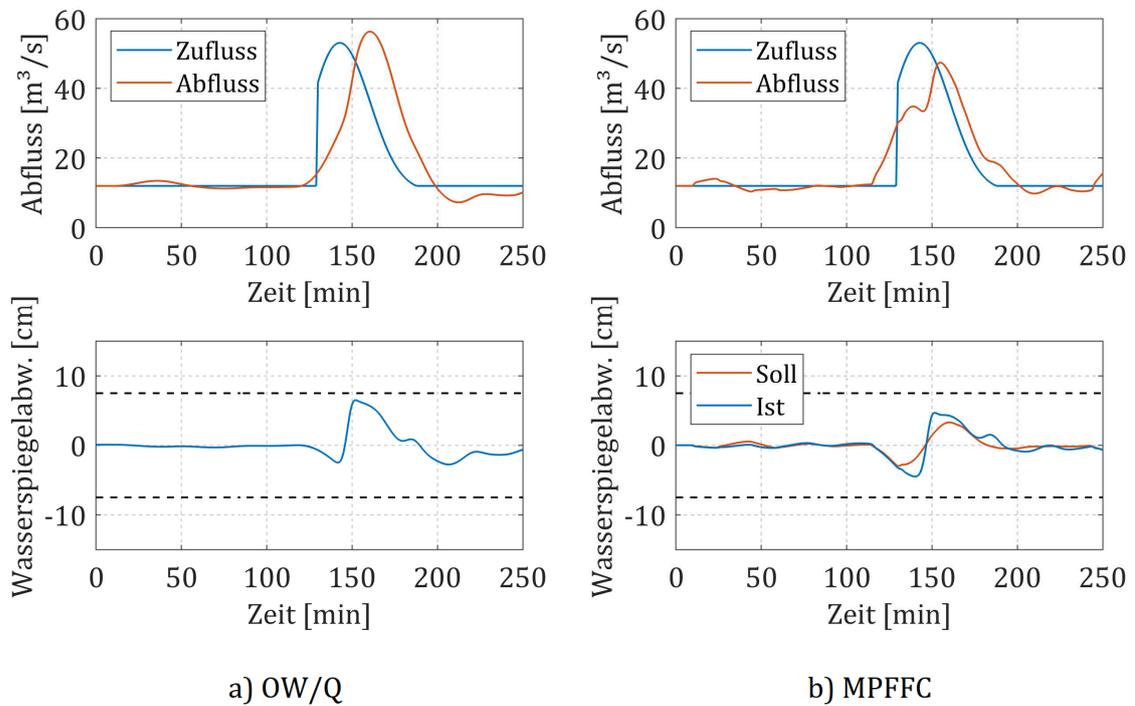


Bild 12: Vergleich der Ergebnisse der Regelungssysteme mit Berücksichtigung der Entlastungsvorhersage

In Bild 13 sind die Auswirkungen klar zu erkennen. Der Steuerungsanteil des Sollabflusses, der aus der Abflussprognose des MPFFC stammt, ist viel kleiner als der reale Abfluss und der durch den MPFFC vorgegebene Sollwert des Wasserstands entspricht nicht dem für die Realität optimalen Verlauf. Allerdings kommt es trotzdem nicht zu einer Überschreitung der Stauzieltoleranz, da die grundlegende Tendenz der Absenkung und Erhöhung des Sollwertes zum richtigen Zeitpunkt geschieht. So kann der Fehler in der Prognose durch den PI-Regler ohne jegliche Verletzung der Toleranzen ausgeglichen werden. Darüber hinaus überschreitet der Abfluss nur schwach den Zufluss und unterschreitet diesen nach der Einleitung nur leicht. Es tritt also keine wesentliche Verstärkung der Abflussspitzen auf. Der umgekehrte Fall ist in Bild 14 dargestellt. Hier zeigt die Prognose einen zu großen Abfluss im Vergleich zur Realität. Da ein höherer Zufluss erwartet wird, wird durch die Vorsteuerung der Abfluss erhöht und gleichzeitig der Soll-Wasserstand abgesenkt. Allerdings tritt nicht die durch die Prognose angekündigte große Einleitung, sondern ein geringerer Zufluss ein. Dadurch kann der Zufluss das durch die Wasserstandsabsenkung gewonnene Volumen nicht schnell genug auffüllen und es kommt zu einer leichten Verletzung der Stauzieltoleranz.

Am Ende des Szenarios ist das gleiche Phänomen in entgegengesetzter Richtung zu beobachten. Es kommt zu einer Verletzung der oberen Stauzieltoleranz. Allerdings sind die Überschreitungen der Toleranzen immer nur von kurzer Dauer und der grundlegende Verlauf des vorgegebenen Soll-Wasserstandes stimmt. Zudem liegt der maximale Abflusswert nur geringfügig über dem maximalen Zuflusswert, obwohl die Vorsteuerung einen sehr großen Wert vorgibt. Auch das Unterschwingen des Abflusses nach der Einleitung ist nicht sehr stark ausgebildet.

Zusammengefasst zeigte sich, dass eine fehlerhafte Prognose oftmals keine kritischen Auswirkungen auf die Stauhaltung hat. Wichtig ist zu beachten, dass sich ein falsch prognostizierter Zeitraum der Einleitung kritischer auswirkt als ein falsch prognostizierter maximaler Zufluss der seitlichen Einleitung.

Zusätzlich wurde untersucht, wie sich eine Verbesserung der Niederschlagsprognose bei näherkommendem oder andauerndem Niederschlagsereignis auf das Verhalten der MPFFC auswirkt.

Wenn sich die Prognosen des Niederschlags nur in der Intensität unterscheiden, sind die Regelungsergebnisse mit einer Prognosekorrektur schlechter als ohne diese Korrektur. Die Unterschiede entstehen durch den Sprung in der Prognose nach der Korrektur. Die Korrektur der Prognose verbessert jedoch das Regelungsergebnis, wenn eine falsch prognostizierte Dauer oder ein falsch prognostizierter Anfangszeitpunkt des Ereignisses korrigiert wird. Die Ergebnisse für Wasserstand und Abfluss sind hier fast so gut, wie mit einer von Anfang an richtigen Prognose.

Die Prognosekorrektur zu einer der Realität näheren Vorhersage, sollte also nicht innerhalb eines Zeitschrittes geschehen. Stattdessen ist bei der Aktualisierung der Zuflussprognose die Differenz zum zuvor prognostizierten Zufluss zu berücksichtigen. Ist diese Differenz zu groß, sollte nicht direkt auf die neue Prognose aktualisiert werden, sondern eine Interpolation über mehrere Zeitschritte durchgeführt werden, um Abflusssprünge zu verhindern. Anstatt einer Interpolation der Einleitung ist auch eine Interpolation zwischen den Ergebnissen des MPFFC über die Zeitspanne der Prognosekorrektur denkbar.

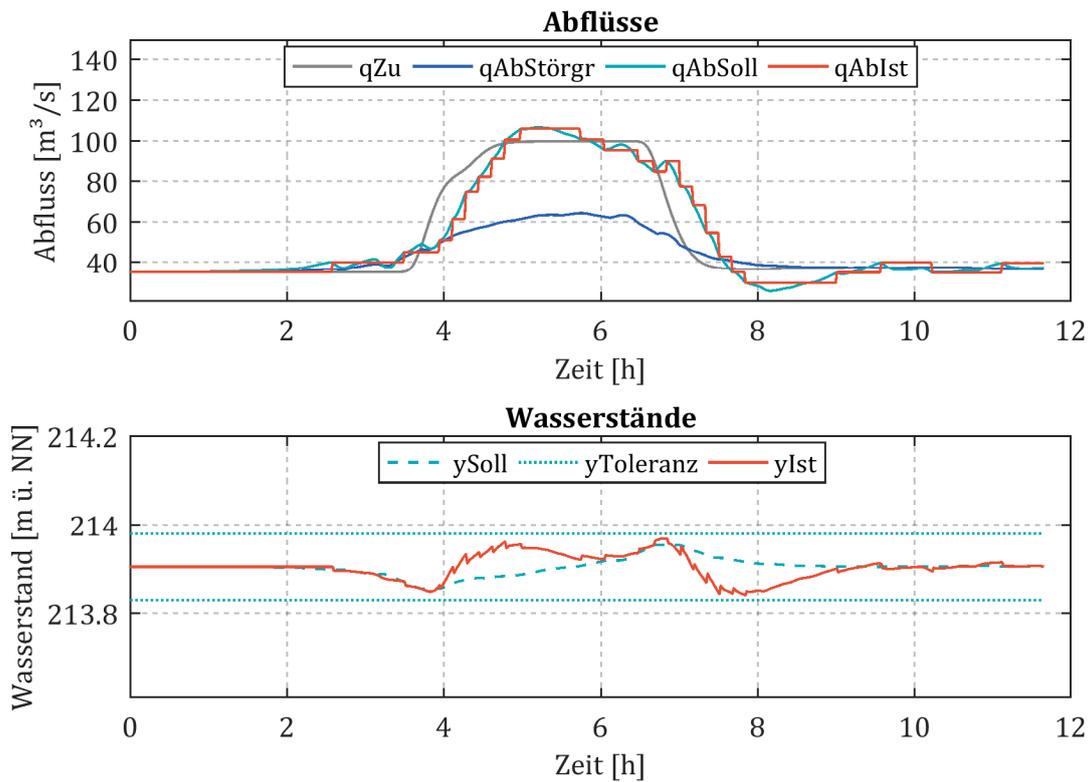


Bild 13: Prognose eines Starkregenereignisses mit  $T_N = 0,5$  a und  $D = 180$  min bei einem realen Ereignis mit  $T_N = 5$  a und  $D = 180$  min

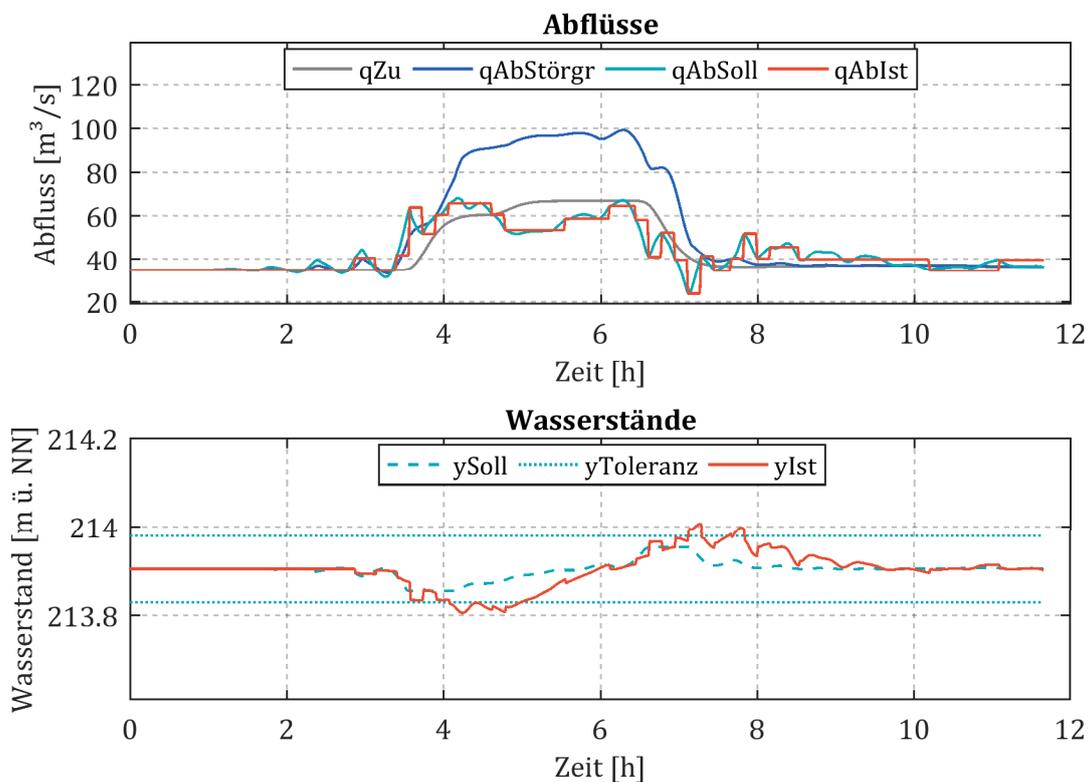


Bild 14: Prognose eines Starkregenereignisses mit  $T_N = 5$  a und  $D = 180$  min bei einem realen Ereignis mit  $T_N = 0,5$  a und  $D = 180$  min

### 3.3 Entscheidungsunterstützung

Unabhängig von der an der Stauanlage Hofen verwendeten Regelungsstrategie können Stauzieltoleranzverletzungen durch Starkregenereignisse mit Hilfe der Einleitungsprognose vermieden werden. Die von der modellprädiktiven Vorsteuerung berechneten optimierten Wasserstands- und Abflussverläufen können sowohl in der Automatisierung, als auch zur Entscheidungsunterstützung für die manuelle Regelung genutzt werden. Eine beispielhafte Visualisierung der minütlich aktualisierten Entscheidungsunterstützung ist in **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.** dargestellt (Kasper 2019). Beim Pilotprojekt für die Stauhaltung Hofen werden dazu neben der oben beschriebenen Vorhersage der Mischwasserentlastung auch Vorhersagen des direkten Zuflusses aus der Stauhaltung Cannstatt benötigt. Die zusätzlichen Informationen wie Niederschlags-, Einleitungs- und Zuflussprognosen sowie optimierter zukünftiger Wasserstands- und Abflussverlauf sollen das Personal bei der Einhaltung der Ziele der ASR unterstützen. Darüber hinaus werden vorhandene Messwerte der vergangenen Stunde aufgetragen. Da bei der Optimierung die aktuellen Werte für Oberwasserstand und Abfluss der Staustufe Hofen nicht einbezogen werden, sondern ausschließlich die Vorhersagen (Amann et al. 2016), lässt sich aus der Differenz zwischen Istwert und optimiertem Wert zur Vorhersagezeit von 0 min (vgl. Bild 15) die Qualität der Einleitungs- und Zuflussprognose abschätzen.

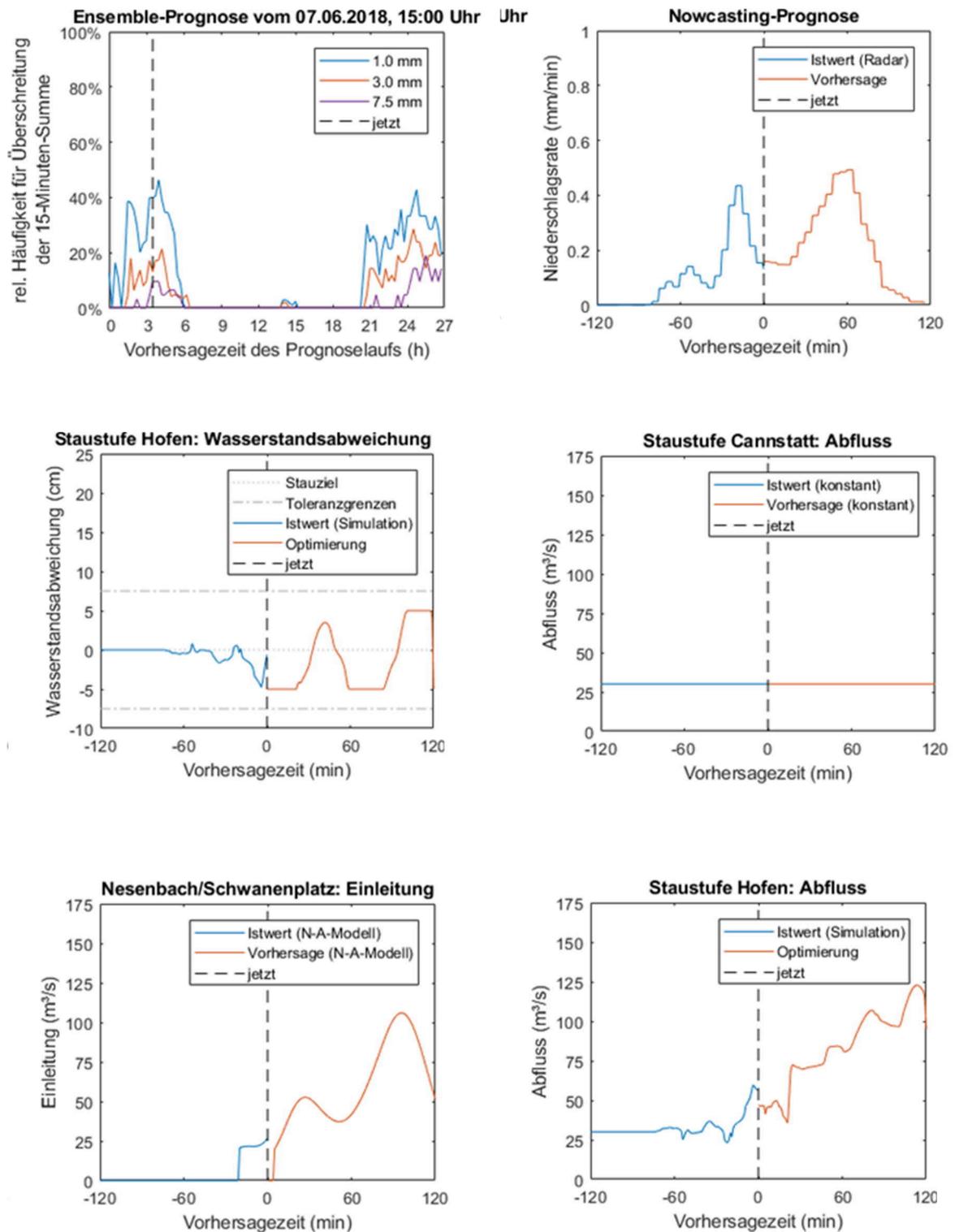


Bild 15: Simulationsergebnisse eines Echtzeit-Prognosesystems für die Abfluss- und Stauregelung an der Neckarstauhaltung Hofen am Beispiel eines Starkregenereignisses am 7. Juni 2018 um 18:31 Uhr (UTC) bei konstantem direktem Zufluss über die Staustufe Cannstatt

## 4 Fazit

### 4.1 Zusammenfassung und Schlussfolgerungen

Starkregenereignisse in urbanen Einzugsgebieten können durch Überlastung der Abwassersysteme innerhalb kurzer Zeit zu einer Einleitung in nahegelegene Fließgewässer führen. Diese stoßartigen Belastungen in Kombination mit ausgeprägten Niedrigwasserperioden sind eine anspruchsvolle Regelungsaufgabe. Ziel des Projekts war deshalb die Entwicklung einer allgemeingültigen und praxisnahen Lösung, um die Auswirkungen von Starkregen auf die ASR zu reduzieren und damit die Resilienz der Wasserstraßen gegenüber extremen Wetterereignissen zu verbessern.

Der hier verwendete Lösungsansatz besteht darin, messtechnisch nicht erfasste Einleitungen in staugeregelte Wasserstraßen abzuschätzen und diese Daten in Echtzeit an das Regelungssystem zu übermitteln, sodass der Abfluss über Wehr und Kraftwerk vorausschauend an die zu erwartenden seitlichen Einleitungen angepasst werden kann. Dazu mussten verschiedene Komponenten aufeinander abgestimmt werden: Niederschlagsprognosen, Niederschlag-Abfluss-Modell und das Regelungssystem.

Die Niederschlagsprognose beruht auf dem sogenannten Nowcasting des DWD. Hierbei werden mit Hilfe empirischer Modelle alle fünf Minuten Niederschlagsprognosen auf Basis hochaufgelöste Niederschlagsradarmessungen erstellt. Das Niederschlag-Abfluss-Modell und das Regelungssystem wurden mithilfe der Softwareprodukte MATLAB und Simulink der Firma MathWorks implementiert. In einer Pilotstudie wurde die Wirkungsweise des neuen Konzepts anhand von Simulationen am Beispiel der Neckarstauhaltung Hofen untersucht, in die ein Teil der Stuttgarter Kanalisation entlastet.

Die Untersuchungen zeigten, dass die Verwendung von Niederschlags- und Einleitungsprognosen trotz Unsicherheiten in einem automatisierten System möglich ist, da der lokale PI-Regler die Fehler in den Vorhersagen und im Niederschlag-Abfluss-Modell in jedem Regelungsschritt, der hier eine Minute beträgt, korrigiert. Darüber hinaus wird die Regelung von einer Fernsteuerzentrale aus durch das Personal der WSV oder durch Mitarbeiter der Energieversorgungsunternehmen überwacht. Diese können im Notfall auf eine manuelle Steuerung des Abflusses umschalten.

Denkbar ist auch die Übertragung der Verwendung von kurzfristigen Niederschlagsvorhersagen für eine automatisierte Entscheidungsfindung auf andere Verkehrsträger. Jedoch sollte dies dann je nach Anwendungsfall kritisch geprüft werden. Ist es z. B. nicht möglich durch lokale Messungen am betrachteten Element der Verkehrsinfrastruktur eine automatisierte Korrektur der einzuleitenden oder bereits eingeleiteten Maßnahmen vorzunehmen, kann es erforderlich sein, eine durch ein System (z. B. eine Software) vorgeschlagene Reaktion auf eine Niederschlagsvorhersage durch speziell geschultes Personal beurteilen und bestätigen oder ablehnen zu lassen.

## 4.2 Nutzen und Verwertung der Ergebnisse

Zum einen birgt das Projekt einen unmittelbaren Nutzen für die Wasserstraßen- und Schifffahrtsverwaltung des Bundes (WSV), die für die Verwaltung und Unterhaltung der Bundeswasserstraßen und damit auch für den operationellen Betrieb der ASR verantwortlich ist. Durch die Anwendung moderner Regelungsmethoden und die Einbindung von kurzfristigen Niederschlags- und Abflussvorhersagen steht der WSV ein zukunftsfähiges Regelungssystem zur Verfügung, das auch bei zunehmenden Auswirkungen des Klimawandels eine robuste Abfluss- und Stauregelung sicherstellt. Die neue Regelungsstrategie soll die Wirkung stoßartiger Belastungen in Stauhaltungen kompensieren, indem sie vorausschauend reagiert, die Gefährdung durch starke Wasserstands- und Abflussschwankungen minimiert und eine schnelle „Erholung“ des Systems ermöglicht. Auf diese Weise wird die Resilienz der Wasserstraßen erhöht und die Sicherheit und Leichtigkeit der Schifffahrt gewährleistet.

Zum anderen liefert das Projekt einen Mehrwert für das BMVI-Expertenetzwerk, indem der Einsatz von Frühwarnsystemen für Extremwetterereignisse beispielhaft am Verkehrsträger Wasserstraße demonstriert wird. Aus den im Pilotprojekt gewonnenen Erfahrungen können die anderen beteiligten Institutionen potentielle Anwendungsfälle von operationellen Vorhersagesystemen für die Verkehrsträger Straße und Schiene ermitteln und den jeweiligen Nutzen abschätzen.

## 4.3 Weiterer Forschungsbedarf

Weiterer Forschungsbedarf besteht im Bereich der Vulnerabilitätsanalyse. Es muss eine Herangehensweise zur Identifizierung von Staustufen, an denen Starkregenereignisse zu einer Gefährdung der Schifffahrt führen können, entwickelt werden. Hierbei sollen charakteristische Eigenschaften einer Staustufe, des zugehörigen Flussabschnitts und des jeweiligen urbanen Einzugsgebiets ermittelt werden, aufgrund derer die ASR anfällig sein kann für starkregeninduzierte seitliche Einleitungen. Darauf aufbauend können dann in Zusammenarbeit mit der GDWS und den WSÄ systematisch Staustufen identifiziert werden, an denen die Abfluss- und Stauregelung durch starkregeninduzierte Einleitungen beeinträchtigt werden kann. Hierbei sollte eine systematische Befragung bezüglich Einleitungsgenehmigungen und Erfahrungen des Betriebspersonals erfolgen.

Um die Resilienz der Abfluss- und Stauregelung zu erhöhen, ist eine gute Schulung des Personals unabdingbar. Durch die Einführung eines einheitlichen Staustufensimulators in der WSV könnten verschiedene Extremereignisse erprobt und dadurch Stresssituationen vermieden werden.

Durch die Einbindung des Vorhersageprodukts SINFONY, einer Kombination von Nowcasting und Ensemble-Prognosen, das derzeit vom DWD entwickelt wird, könnte die Genauigkeit der Vorhersagen von starkregeninduzierten Einleitungen verbessert werden.

Zukünftig steht die BAW vor der Herausforderung den Nutzen von Big Data für die Wasserstraßeninfrastruktur zu erschließen. Hierbei sollte z. B. das Potential von Methoden aus dem Bereich der künstlichen Intelligenz (KI) für die Auswertung von Wehrbetriebsdaten und ihre Steuerung mit Hilfe von maschinellem Lernen evaluiert werden. Die so gewonnenen Erkenntnisse können beispielsweise in den vollautomatisierten Betrieb von Wehranlagen mit einfließen.

Bundesanstalt für Wasserbau

FuE-Abschlussbericht Strategien zur Abfluss- und Stauregelung der Wasserstraßen bei extr. Wetterereignissen

BAW-Nr. B3953.03.04.70005 ▪ November 2019

Bundesanstalt für Wasserbau

Karlsruhe, November 2019

## 5 Literaturverzeichnis

Amann, Kai-Uwe; Arnold, Eckard; Sawodny, Oliver (2016): Online real-time scheduled model predictive feedforward control for impounded river reaches applied to the Moselle river. In: 2016 IEEE International Conference on Automation Science and Engineering (CASE). IEEE CASE 2016. Fort Worth, TX, 21.-25. August 2016. Piscataway, NJ: IEEE, S. 1276–1281.

Amann, Kai-Uwe; Arnold, Eckhard; Sawodny, Oliver (2014): Comparison of model based feed-forward control strategies for impounded rivers. In: 2014 European Control Conference (ECC). Strasbourg, France, 24.-27. Juni 2014: IEEE, S. 1361–1366.

Anastassiadou, Kalliopi; Holst, Ralph; Kasper, Julia; Simons, Franz; Denhard, Michael; Winkler, Jens et al. (2019): Assessing and enhancing resilience to extreme weather for transport infrastructure in Germany. Proceedings of 8th Transport Research Arena TRA 2020. In Vorbereitung.

Arnold, Eckhard; Schmitt-Heiderich, Peter; Sawodny, Oliver (2012): Parametrisierung von Reglern zur automatisierten Abfluss- und Stauzielregelung (ASR) – Stand von Wissenschaft und Technik. In: Bundesanstalt für Wasserbau (Hg.): Automatisierte Abfluss- und Stauzielregelung. Karlsruhe (BAWMitteilungen, 96), S. 23–63.

Belzner, Fabian (2011): Einfluss der Mischwasserentlastungen der Stadt Stuttgart bei sommerlichen Starkregenereignissen auf die Abfluss- und Stauzielregelung am Neckar. Masterthesis. Hochschule Karlsruhe – Technik und Wirtschaft, Karlsruhe.

Belzner, Fabian; Schmitt-Heiderich, Peter (2012): Einfluss urbaner Einzugsgebiete auf die Abfluss- und Stauzielregelung. In: Bundesanstalt für Wasserbau (Hg.): Innovation mit Tradition: Hydraulischer Entwurf und Betrieb von Wasserbauwerken. BAWKolloquium. Karlsruhe, 4.-5. Juli 2012, S. 93–98.

Bundesanstalt für Straßenwesen (Hg.) (2016): BMVI Expertennetzwerk. Online verfügbar unter <https://www.bmvi-expertennetzwerk.de>, zuletzt geprüft am 08.10.2019.

Bundesanstalt für Wasserbau (Hg.) (2012): Automatisierte Abfluss- und Stauzielregelung. Karlsruhe (BAWMitteilungen, 96).

Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (Hg.) (2015): KLIWAS - Auswirkungen des Klimawandels auf Wasserstraßen und Schifffahrt in Deutschland. Abschlussbericht des BMVI - Fachliche Schlussfolgerungen aus den Ergebnissen des Forschungsprogramms KLIWAS. Berlin.

Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (Hg.) (2016): Das BMVI-Expertennetzwerk Wissen - Können - Handeln. Berlin.

Denhard, Michael; Primo Ramos, Cristina; Frank, H.; Rhodin, A.; Ambadan, J. T.; Anlauf, H. et al. (2017): The spread skill properties of the global ICON Ensemble. In Vorbereitung.

Deutscher Wetterdienst (Hg.) (2009): Moderne Verfahren und Instrumente der Wettervorhersage im Deutschen Wetterdienst (promet - Meteorologische Fortbildung, 35. Jahrgang, Heft 1/3).

Deutscher Wetterdienst (Hg.) (2011): Probabilistische Wettervorhersage (promet - Meteorologische Fortbildung, 37. Jahrgang, Heft 3/4).

DWD Climate Data Center (2018): Raster der Wiederkehrintervalle für Starkregen (Bemessungsniederschläge) in Deutschland (KOSTRA-DWD). Version 2010R. Online verfügbar unter [https://opendata.dwd.de/climate\\_environment/CDC/grids\\_germany/return\\_periods/precipitation/KOSTRA/KOSTRA\\_DWD\\_2010R/asc/BESCHREIBUNG\\_gridsgermany\\_return\\_periods\\_precipitation\\_KOSTRA\\_KOSTRA\\_DWD\\_2010R\\_asc\\_de.pdf](https://opendata.dwd.de/climate_environment/CDC/grids_germany/return_periods/precipitation/KOSTRA/KOSTRA_DWD_2010R/asc/BESCHREIBUNG_gridsgermany_return_periods_precipitation_KOSTRA_KOSTRA_DWD_2010R_asc_de.pdf), zuletzt geprüft am 17.07.2019.

Gebhardt, Michael; Wohlfart, Sven (2012): Die automatische Regelung einer Stauhaltungskette – Von den Voruntersuchungen bis zur Inbetriebnahme der automatisierten Moselstauaufstufen. In: Bundesanstalt für Wasserbau (Hg.): Automatisierte Abfluss- und Stauzielregelung. Karlsruhe (BAWMitteilungen, 96), S. 135–144.

Hörter, Peter (2012): Anforderungen der Wasser- und Schifffahrtsverwaltung an die automatisierte Abfluss- und Stauzielregelung (ASR). In: Bundesanstalt für Wasserbau (Hg.): Automatisierte Abfluss- und Stauzielregelung. Karlsruhe (BAWMitteilungen, 96), S. 15–22.

Kasper, Julia (2019): Entscheidungsunterstützung bei Starkregen für die Abfluss- und Stauregelung am Neckar. In: Bundesanstalt für Wasserbau (Hg.): Hydraulik der Wasserbauwerke – Neues aus Praxis und Forschung. BAWKolloquium. Karlsruhe, 20.-21. Februar 2019. Online verfügbar unter <https://hdl.handle.net/20.500.11970/106419>.

Kasper, Julia; Pranner, Georg; Simons, Franz; Denhard, Michael; Thorenz, Carsten (2018): Enhancing automated water level control at navigable waterways by high-resolution weather predictions. In: Goffredo La Loggia, Gabriele Freni, Valeria Puleo und Mauro De Marchis (Hg.): HIC 2018. 13th International Conference on Hydroinformatics. Palermo, Italien, 1.-6. Juli 2018: Easy Chair (EPiC Series in Engineering, 3), S. 1022–1029. Online verfügbar unter <https://easychair.org/publications/paper/92nV>.

Krajewski, Christian (2007): Bundeswasserstraße Neckar. Auszug aus dem Kompendium der WSD Südwest vom Juni 2007. Hg. v. Wasser- und Schifffahrtsdirektion Südwest. Mainz.

LUBW Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg (Hg.) (2009): Deutsches Gewässerkundliches Jahrbuch. Rheingebiet, Teil I. Karlsruhe.

Pranner, Georg (2018): Anwendung einer modellprädiktiven Vorsteuerung für die Abfluss- und Stauregelung von Wasserstraßen am Beispiel der Neckarstauhaltung Hofen. Bachelor-Arbeit. Karlsruher Institut für Technologie, Karlsruhe.

Pranner, Georg; Simons, Franz; Schmitt-Heiderich, Peter; Amann, Kai-Uwe (2019): Verwendung moderner Regelungsmethoden in der Bewirtschaftung von Stauhaltungsketten am Beispiel der Mosel. In: Bundesanstalt für Wasserbau (Hg.): Hydraulik der Wasserbauwerke – Neues aus Praxis und Forschung. BAWKolloquium. Karlsruhe, 20.-21. Februar 2019, S. 79–84. Online verfügbar unter <https://hdl.handle.net/20.500.11970/106418>.

Schmitt-Heiderich, Peter; Belzner, Fabian (2012): Verfahren zur Parametrisierung von PI-Reglern einer automatisierten Abfluss- und Stauzielregelung. In: Bundesanstalt für Wasserbau (Hg.): Automatisierte Abfluss- und Stauzielregelung. Karlsruhe (BAWMitteilungen, 96), S. 123–133.

Schmitt-Heiderich, Peter; Gebhardt, Michael (2012): Der Einfluss der Regelstrecke Stauhaltung auf die Abfluss- und Stauzielregelung (ASR). In: Bundesanstalt für Wasserbau (Hg.): Automatisierte Abfluss- und Stauzielregelung. Karlsruhe (BAWMitteilungen, 96), S. 81–98.

Siedl, Nina; Schweighofer, Juha (2014): Guidebook for Enhancing Resilience in European Inland Waterway Transport in Extreme Weather Events. via donau - Österreichische Wasserstraßen-Gesellschaft mHB. Wien, Österreich.

Simons, Franz; Kasper, Julia; Amann, Kai-Uwe; Arnold, Eckard; Sawodny, Oliver; Thorenz, Carsten (2018): On migrating to advanced model predictive control strategies at the Moselle River. In: Goffredo La Loggia, Gabriele Freni, Valeria Puleo und Mauro De Marchis (Hg.): HIC 2018. 13th International Conference on Hydroinformatics. Palermo, Italien, 1.-6. Juli 2018: Easy Chair (EPiC Series in Engineering, 3), S. 1989–1999. Online verfügbar unter <https://easychair.org/publications/paper/WRzg>.

Theobald, Stephan (Hg.) (2006): Automatisierter Betrieb von Staustufen. Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall. April 2006. Hennef: DWA (DWA-Themen). Online verfügbar unter [http://deposit.dnb.de/cgi-bin/dokserv?id=2819237&prov=M&dok\\_var=1&dok\\_ext=htm](http://deposit.dnb.de/cgi-bin/dokserv?id=2819237&prov=M&dok_var=1&dok_ext=htm).



Kußmaulstraße 17 · 76187 Karlsruhe  
Tel. +49 (0) 721 97 26-0 · Fax +49 (0) 721 97 26-45 40

Wedeler Landstraße 157 · 22559 Hamburg  
Tel. +49 (0) 40 81 908-0 · Fax +49 (0) 40 81 908-373

[www.baw.de](http://www.baw.de)