

# ProNaHo



## Kurzbericht

Sonja Teschemacher, Michael Neumayer, Fabian Merk, René Heinrich,  
Johanna Springer, Susanne Haas, Markus Disse

Juli 2020

Bearbeiter: Sonja Teschemacher  
Michael Neumayer  
Fabian Merk  
René Heinrich  
Johanna Springer  
Susanne Haas

Projektmitwirkende: Christian Ansarian, Lisa Balke, Stefan Bäumler, Stephen Bond, Eileen Büchner, Sophia Demmel, Markus Disse, Michael Dura, Andrea Eberle, Saskia Ederle, Anna Fischer, Christiane Frank, Alexandra Geist, Mario Gramm, Ferdinand Guggeis, Susanne Haas, René Heinrich, Johannes Horvath, Tobias Huber, Jonas Hürten, Peter Jaud, Eva-Maria Jetzlsperger, Jorge Leandro, Fabian Merk, Michael Neumayer, Mathias Riebesmaier, Wolfgang Rieger, Christian Rumbaur, Timo Schaffhauser, Jochen Scholtes, Robin Schroff, Marlo Sedlmair, Omar Shehata, Johanna Springer, Michael Tarantik, Sonja Teschemacher, Michaela Weinberger, Ronja Wolf

Projektleitung: Michael Neumayer  
Sonja Teschemacher  
Dr.-Ing. Wolfgang Rieger

Lehrstuhlleitung: Prof. Dr.-Ing. Markus Disse

Lehrstuhl für Hydrologie und Flussgebietsmanagement  
Ingenieur fakultät Bau Geo Umwelt  
Technische Universität München

Das Forschungsvorhaben „Prozessbasierte Modellierung Natürlicher sowie Dezentraler Hochwasserrückhaltemaßnahmen zur Analyse der ereignis- und gebietsabhängigen Wirksamkeit (ProNaHo)“ wurde vom Bayerischen Staatsministerium für Umwelt und Verbraucherschutz (StMUV) gefördert und vom Bayerischen Landesamt für Umwelt (LfU) betreut.

## Inhaltsverzeichnis

<b>Kurzfassung</b>	<b>5</b>
<b>1 Einleitung</b>	<b>7</b>
1.1 Hintergrund	7
1.2 Problemstellung	7
1.3 Zielsetzung	8
<b>2 Gebietswahl, Gebietsanalyse und Modellbasis</b>	<b>9</b>
2.1 Wahl der Untersuchungsgebiete	9
2.2 Gebietsbeschreibung und -vergleich	11
2.3 Hydrologische Modellierung	14
2.4 Hydraulische Modellierung	17
<b>3 Hydrologische Feldmessungen, Szenarien und Sensitivitätsanalysen</b>	<b>20</b>
3.1 Bodenhydraulische Untersuchungen	20
3.2 Landnutzungs- und Bewirtschaftungsmaßnahmen	23
3.3 Hydrologische Sensitivitätsanalysen	26
3.4 Dezentrale Hochwasserrückhaltebecken	28
<b>4 Hydraulische Szenarien und Sensitivitätsanalysen</b>	<b>32</b>
4.1 Auengestaltung und Gewässerrenaturierung	32
4.2 Renaturierung mit variabler Auenstruktur	36
4.3 Modellierung des Weißen Mains und ausgewählter Zuflüsse	38
4.4 Hydraulische Sensitivitätsanalysen	41
4.5 Biberdammsszenarien	43
<b>5 Szenarien- und Modellübergreifende Analysen</b>	<b>45</b>
5.1 Kombinationsszenarien	45
5.2 Szenarien-, gebiets- und ereignisübergreifende Analysen	48
5.3 Analyse konzeptioneller Routing-Ansätze	51
<b>6 Zusammenfassung, Fazit und Ausblick</b>	<b>57</b>
6.1 Zusammenfassung	57
6.2 Fazit und Ausblick	60
<b>7 Literaturverzeichnis</b>	<b>61</b>



## Kurzfassung

In Bayern wurde der dezentrale Hochwasserrückhalt als wichtiger Bestandteil eines integralen Hochwasserschutzkonzepts erklärt. In diesem Zusammenhang sollten in *ProNaHo* Aussagen zur Wirksamkeit natürlicher und dezentraler Hochwasserrückhaltmaßnahmen in verschiedenen Naturräumen Bayerns getroffen werden. Die untersuchten Maßnahmen beinhalten Landnutzungs- und Bewirtschaftungsänderungen, dezentrale Rückhaltebecken, Renaturierungs- und Auengestaltungsmaßnahmen und Biberdammkaskaden. Zudem wurden die Möglichkeiten und Grenzen der in hydrologischen Modellen berücksichtigten Routingansätze untersucht. Für die Analysen wurden acht mesoskalige Einzugsgebiete selektiert, die ein möglichst breites Spektrum der in Bayern vorhandenen Gebiets- und Gewässereigenschaften abdecken: Main (Pegel Mainleus, Bayreuth, Ködnitz), Mangfall (Pegel Valley, Schmerold und Rottach), Glonn (Pegel Odelzhausen) und Otterbach (Pegel Hammermühle).

Die hydrologische Modellierung wurde mithilfe des physikalisch-basierten Wasserhaushaltsmodells *WaSiM* durchgeführt. Zur weiteren Plausibilisierung der Ergebnisse wurden Feldmessungen zu den Prozessen der Abflussbildung und -konzentration sowie Sensitivitätsanalysen ausgewählter Modellparameter durchgeführt. Die hydraulischen Szenarien wurden mit dem hydrodynamisch-numerischen Modell *HYDRO\_AS-2D* unter Berücksichtigung der *WaSiM*-Ganglinien berechnet. Im Rahmen der Renaturierungs- und Auengestaltungsmaßnahmen wurden verschiedene Methoden zur Umsetzung des jeweils gewässerspezifischen potenziell natürlichen Zustands entwickelt und der Einfluss der Rauheitsparametrisierung anhand von Sensitivitätsanalysen untersucht. Zur Bestimmung des Effekts von Biberdämmen wurden potenzielle Dammkaskaden in die hydrodynamischen Modelle integriert. Die Maßnahmen wurden zu Kombinationsszenarien verknüpft und mit den einzeln untersuchten Maßnahmen verglichen. Zudem wurden die Ergebnisse der in den Modellen *WaSiM* und *LARSIM* implementierten konzeptionellen Routingansätze mit dem Wellenablauf in *HYDRO\_AS-2D* verglichen und neben der Ermittlung des Kalibrierungspotenzials die räumliche Übertragbarkeit der Parameter untersucht.

Die Wirksamkeiten der einzelnen Maßnahmen unterscheiden sich stark in Abhängigkeit der Gebiets- und Ereigniseigenschaften sowie der Maßnahmenumsetzung. Die wirksamste Maßnahme waren Rückhaltebeckenkombinationen, wobei bei einem  $HQ_{100}$  und einem spezifischen Volumen von 5 mm Scheitelabminderungen von 15-30 % erreicht werden konnten. Bei den Maßnahmen der Landnutzungs- und Bewirtschaftungsänderungen war eine Abhängigkeit vom veränderten Flächenanteil erkennbar. Die maximalen Scheitelabminderungen durch Aufforstungs- und Extensivierungsmaßnahmen in einem potenziell realistischen Umfang lagen bei einem  $HQ_{100}$  bei ca. 10 % und waren deutlich größer als die der anderen Landnutzungs- und Bewirtschaftungsmaßnahmen. Für die Renaturierungsmaßnahmen war eine tendenzielle Abnahme der Scheitelabminderung mit zunehmender Jährlichkeit und zunehmendem Abflussvolumen erkennbar, wobei diese bei einem  $HQ_{100}$  bei maximal 1,9 % (Glonn) lag. Eine Erweiterung des renaturierten Bereichs um seitliche Zuflüsse oder eine detailliertere Abbildung der Gewässer- und Auenstruktur resultierte nur in geringfügigen Veränderungen. Der Einfluss der untersuchten Biberdammkaskaden auf den Hochwasserabfluss war bereits bei 5- bzw. 20-jährlichen Ereignissen vernachlässigbar gering. Die Kombination aller Maßnahmen resultierte gebiets- und ereignisübergreifend in deutlichen Scheitelabminderungen, die überwiegend die aufsummierten Scheitelabminderungen der Einzelszenarien übersteigen. Die aus dem Modellvergleich resultierende Optimierung der Routingparameter konnte die Berechnung des Wellenablaufs in *WaSiM* und *LARSIM* verbessern, jedoch war eine Übertragbarkeit der kalibrierten Parameter oder die Vorhersage der erforderlichen Parameterveränderung zur Abbildung von Renaturierungsmaßnahmen in hydrologischen Modellen nicht möglich.

Insgesamt sind natürliche und dezentrale Hochwasserrückhaltmaßnahmen eine wichtige und sinnvolle Ergänzung zum technischen Hochwasserschutz. Aufgrund der großen natürlichen Heterogenität ist zur Gewinnung einer zuverlässigen Information zur Wirksamkeit einer Maßnahmenumsetzung eine jeweils individuelle Modellierung zu empfehlen.



# 1 Einleitung

## 1.1 Hintergrund

Bis Mitte des 20. Jahrhunderts wurde im Hochwasserschutz durch die Begradigung und Eindeichung von Flüssen vor allem Gefahrenabwehr betrieben (StMUV 2014), um die Wassermassen an den zu schützenden Siedlungsbereichen vorbeizuleiten. Infolge der gehäuft aufgetretenen Hochwasserereignisse mit seltenen Jährlichkeiten in den letzten Jahrzehnten fand ein Umdenken vom rein technischen Hochwasserschutz zu einer integralen Strategie statt. Im Jahr 2001 hat die bayerische Staatsregierung ein Aktionsprogramm für einen nachhaltigen Hochwasserschutz (AP 2020) beschlossen, in dessen Rahmen bis 2020 in ganz Bayern Maßnahmen in den drei Handlungsfeldern *Natürlicher Rückhalt*, *Technischer Hochwasserschutz* und *Hochwasservorsorge* durchgeführt werden (StMLU 2002). Nach dem Juni-Hochwasser 2013 wurde es unter Berücksichtigung des Risikomanagementkreislaufs zum Aktionsprogramm 2020plus erweitert (Abb. 1, StMUV (2014)). Das Projekt *ProNaHo* dient in diesem Zusammenhang dazu, die Maßnahmen des *Natürlicher Rückhalts* sowie dezentrale Hochwasserrückhaltebecken hinsichtlich ihrer potenziellen Wirksamkeit gebiets- und ereignisabhängig zu analysieren.



Abb. 1:  
Schematische Darstellung der Handlungsfelder im Hochwasserschutz-Aktionsprogramm 2020plus des bayerischen Staatsministeriums für Umwelt und Verbraucherschutz (StMUV 2014)

## 1.2 Problemstellung

Wie aus Abb. 1 ersichtlich ist, sind technischer Hochwasserschutz und natürlicher Rückhalt eng miteinander verbunden. Während man beim technischen Hochwasserschutz die physikalische Wirksamkeit mit Hilfe komplexer hydrodynamischer Modelle gut berechnen kann, wird die hochwasserreduzierende Wirkung natürlicher sowie dezentraler Hochwasserrückhaltemaßnahmen in der Fläche noch immer kontrovers diskutiert (DWA-M550 2015).

Die Wirksamkeiten natürlicher sowie dezentraler Hochwasserrückhaltemaßnahmen wurden in der Vergangenheit bereits in einer Vielzahl an Studien untersucht, wobei die Ergebnisse zum Teil stark voneinander abweichen. Unter Wirksamkeit wird die Höhe der Hochwasserscheitelabminderung und die zeitliche Verzögerung der Hochwasserwelle verstanden, wobei der Schwerpunkt auf der Scheitelabminderung liegt. Im DWA-Merkblatt DWA-M550 (2015) wurden verschiedene dezentrale Maßnahmen bezüglich ihrer Umsetzungspotenziale, ihrer Wirkungsweise und Abbildung im Modell, ihrer Wirksamkeit sowie der resultierenden Kosten beschrieben. Zudem wurden die Wirksamkeiten bereits durchgeführter Studien verglichen, analysiert und diskutiert. In Abb. 2 ist eine statistische Auswertung der in diesen Studien bei einem  $HQ_{100}$  ermittelten Scheitelabminderungen dargestellt. Die Unterschiede zwischen Mittelwert und Median zeigen die große Heterogenität der möglichen Scheitelabminderungen. Dabei sind insbesondere die Maßnahmen Aufforstung und konservierende Bodenbearbeitung betroffen, da sie vor allem die Abflussbildung maßgeblich beeinflussen. Die Variabilität der Ergebnisse verdeutlicht zudem die großen Unsicherheiten, die mit der Abschätzung einer zu erwartenden Scheitelabminderung verbunden sind. Die jeweiligen Aussagen zu den Maßnahmenwirksamkeiten in den verschiedenen Studien sind daher primär nur gebietsbezogen gültig.

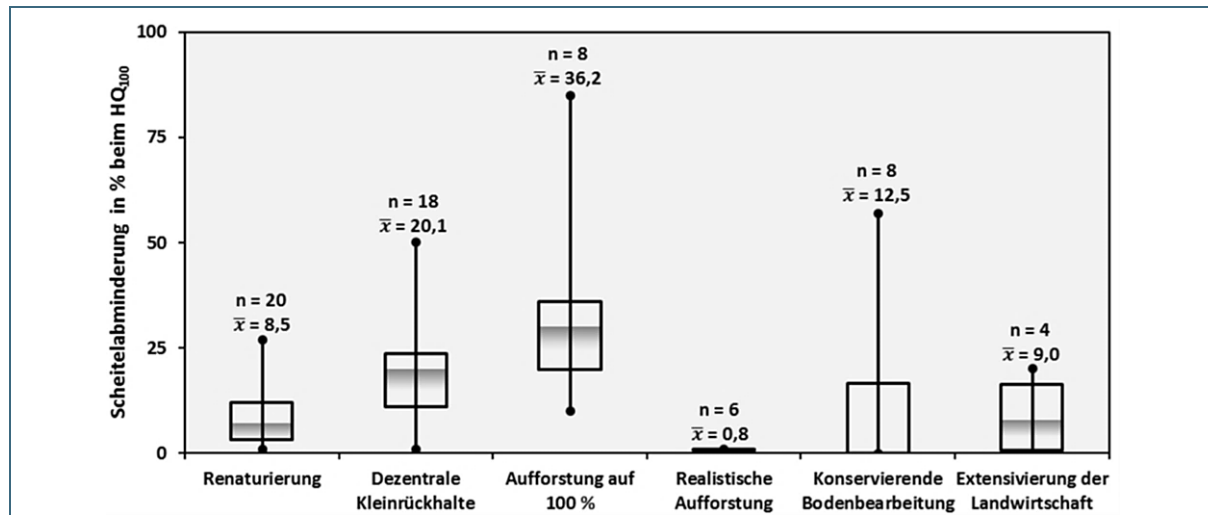


Abb. 2: Zusammenfassung maßnahmenspezifischer Hochwasserscheitelabminderungen beim  $HQ_{100}$  für ausgewählte Studien;  $\bar{x}$ : Mittelwert,  $n$ : Anzahl der Studien, grauer Balken: Median (DWA-M550 2015)

### 1.3 Zielsetzung

Im Rahmen des Projekts wurden ausgewählte natürliche und dezentrale Hochwasserrückhaltemaßnahmen ereignis-, gebiets- und skalenübergreifend untersucht, um möglichst allgemeingültige Aussagen zu deren potenzieller Wirksamkeit bezogen auf verschiedene Naturräume Bayerns zu erhalten. Dabei wurden folgende Projektziele verfolgt:

- Verbesserung des Prozessverständnisses und der Modellparametrisierung durch die Einbindung landnutzungsabhängiger Messdaten zu den Prozessen der Abflussbildung und -konzentration
- Wahl geeigneter Untersuchungsgebiete, die sowohl eine große Bandbreite an Skalen (ca. 100 km<sup>2</sup> bis 1000 km<sup>2</sup> Einzugsgebietsfläche) als auch verschiedene Naturräume abdecken
- Verringerung der Modellunsicherheiten und Verbesserung der Vergleichbarkeit zwischen den Gebieten durch die Entwicklung und Anwendung einer geeigneten Modellierungsstrategie
- Modellierung von Renaturierungs- und Auengestaltungsszenarien, Landnutzungs- und Bewirtschaftungsänderungen sowie dezentraler Rückhaltebecken zur Quantifizierung der ereignis-, gebiets- und skalenabhängigen Wirksamkeiten
- Untersuchung des gebiets- und ereignisabhängigen Beitrags von Biberdammkaskaden zum Hochwasserrückhalt durch die Entwicklung und Anwendung einer geeigneten Methodik zur Berücksichtigung fiktiver Dämme im hydrodynamischen Modell
- Analyse der Effekte verschiedener hydrologischer und hydraulischer Modellparameter durch gebiets- und ereignisübergreifende Sensitivitätsanalysen.

Die Ergebnisse der einzelnen Szenarien und Analysen wurden gegenübergestellt, verglichen und diskutiert, um die Möglichkeiten und Grenzen der einzelnen Maßnahmen zu bestimmen. Der vorliegende Kurzbericht stellt eine kompakte Zusammenfassung der angewandten Methoden sowie der wichtigsten Ergebnisse und Schlussfolgerungen dar. Weitere Informationen zu den einzelnen Arbeitspaketen sind in den fünf Bänden des Langberichts (TESCHEMACHER et al. 2020b, TESCHEMACHER et al. 2020c, TESCHEMACHER et al. 2020a, NEUMAYER et al. 2020, MERK et al. 2020) sowie in den im Anschluss der einzelnen Abschnitte angegebenen Veröffentlichungen enthalten.

### Weitere Informationen

RIEGER, W., TESCHEMACHER, S., HAAS, S., SPRINGER, J. & DISSE, M. (2017): Multikriterielle Wirksamkeitsanalysen zum dezentralen Hochwasserschutz. *Wasserwirtschaft* 107 (11): 56–60.



## 2 Gebietswahl, Gebietsanalyse und Modellbasis

Die Auswahl und Beschreibung der Untersuchungsgebiete sowie die hydrologischen und hydrodynamischen Modelle stellen die Basis der in Kapitel 3 bis 5 beschriebenen Untersuchungen dar.

### 2.1 Wahl der Untersuchungsgebiete

#### Hintergrund und Zielsetzung

Bisherige Studien zeigen, dass das Potenzial natürlicher und dezentraler Hochwasserrückhaltmaßnahmen von den Eigenschaften des jeweiligen Einzugsgebiets beeinflusst wird. Daher ist die Wahl der Untersuchungsgebiete entscheidend für die Bandbreite der resultierenden Wirksamkeiten. Um bayernweit gültige Aussagen zur Wirkung der Maßnahmen treffen zu können, bedarf es daher einer möglichst weiträumigen Berücksichtigung der Naturräume und Fließgewässerlandschaften Bayerns.

Ziel der Gebietswahl war die Selektion von vier Einzugsgebieten, die einen bestimmten Skalenbereich beinhalten (2 x ca. 100 km<sup>2</sup>, 1 x ca. 500 km<sup>2</sup>, 1 x ca. 1000 km<sup>2</sup>) und verschiedene Regionen Bayerns abdecken (Tertiäres Hügelland, Nördliche Donauzuflüsse, Region Oberer Main, Alpenvorland). Durch die Definition geeigneter Kriterien sollte die Heterogenität Bayerns auf verschiedenen Skalen abgebildet und die Modellierbarkeit der Maßnahmen sichergestellt werden.

#### Methodik und Vorgehensweise

Zur Auswahl der Gebiete wurden 13 Kriterien definiert (Tab. 1), mithilfe derer die Pegelstandorte und Einzugsgebiete schrittweise ausgeschlossen bzw. selektiert wurden.

Die Kriterien 1 bis 6 führen zu einer Reduktion der Pegelanzahl und einer Einteilung der Gebiete in die verschiedenen Größenkategorien. Zunächst wurden alle Pegel, die sich außerhalb der zu untersuchenden Naturräume, Fließgewässerlandschaften und Regionen befinden, ausgeschlossen (Kriterium 1). Durch die Kriterien 2 bis 5 (Messzeitraum, Kopfgebiete, Lage in Bayern, Möglichkeit der Abbildung in den Modellen) wurde die Anzahl der Pegel weiter reduziert. Das Kriterium der Gebietsgröße (Kriterium 6) definiert die Anzahl der Gebiete, die in die weiter zu untersuchenden Gebietsgrößen fallen.

Für die Auswahl der Gebiete in den einzelnen Größenkategorien wurden weitere Kriterien eingeführt. Diese beinhalten die Eignung für die Betrachtung von durch Pegel definierten Teilgebieten, als Messgebiet (Kapitel 3.1) oder für die Berechnung der geplanten Szenarien (Kapitel 3.2, 3.4, 4.1, 4.2, 4.3 und 4.5). Zunächst wurden das 1000 km<sup>2</sup>-Gebiet und das 500 km<sup>2</sup>-Gebiet gewählt. Maßgeblich waren hier die Abbildung der Heterogenität Bayerns und die Pegeldichte (Kriterium 7). Die Regionen der 100 km<sup>2</sup>-Gebiete wurden durch die vorherige Wahl der beiden großen Gebiete reduziert. Aufgrund der großen Auswahl an Gebieten und der kleinen Gebietsfläche wurde hier ein größeres Augenmerk auf die Parameter der Eignung gelegt (Kriterien 8 bis 13).

Tab. 1: Übersicht der definierten Kriterien zur Selektion der Untersuchungsgebiete

Kriterien zur Reduzierung der Pegelanzahl	Kriterien für Eignung der Szenarien
1: Naturräume, Fließgewässerlandschaften, Regionen	7: Pegeldichte
2: Messzeitraum	8: Bevorzugung des Grundgebirges im Bereich der nördlichen Donauzuflüsse
3: Kopfgebiete	9: Landnutzung (Einzugsgebiet, Vorland)
4: Lage in Bayern	10: Vorkommen von Bibern
5: Modellierbarkeit	11: Renaturierungspotenzial
6: Gebietsgröße	12: Bestehende Hydraulische Modelle
	13: Lage zu München (Alpenvorland)

## Zusammenfassung der Auswahl

Die aus den Analysen resultierenden Untersuchungsgebiete sind in Tab. 2 aufgelistet und in Abb. 3 dargestellt. Das Einzugsgebiet des Mains deckt die Naturräume des südwestlichen und westlichen Mittelgebirges ab und beinhaltet die Fließgewässerlandschaften des Grund- und Deckgebirges. Mit den Pegeln Bayreuth und Ködnitz wurden die beiden großen Zuflüsse des Mains berücksichtigt. Das Einzugsgebiet der Mangfall liegt im Bereich der Alpen und des Alpenvorlands und enthält die Fließgewässerlandschaften der Alpen und des Jungmoränenlandes. Die beiden gewählten Teilgebiete der Mangfall überlappen sich. Hierbei ist im Teilgebiet der Rottach der alpine Charakter am deutlichsten ausgeprägt. Das Einzugsgebiet der Glonn befindet sich im Tertiären Hügelland, wohingegen das Einzugsgebiet des Otterbachs ein nördlicher Donauzufluss ist und im Grundgebirge liegt. Die Fließgewässerlandschaften der beiden letztgenannten Gebiete sind jeweils vergleichsweise homogen.

Größenkategorie	Gewässer, Pegel (Fläche)
ca. 1000 km <sup>2</sup>	Main, Mainleus (1167 km <sup>2</sup> ) Roter Main, Bayreuth (331 km <sup>2</sup> ) Weißer Main, Ködnitz (313 km <sup>2</sup> )
ca. 500 km <sup>2</sup>	Mangfall, Valley (382 km <sup>2</sup> ) Mangfall, Schmerold (223 km <sup>2</sup> ) Rottach, Rottach (31 km <sup>2</sup> )
ca. 100 km <sup>2</sup>	Glonn, Odelzhausen (97 km <sup>2</sup> ) Otterbach, Hammermühle (91 km <sup>2</sup> )

Tab. 2:  
Übersicht der vier gewählten Untersuchungsgebiete und der vier selektierten Teilgebiete

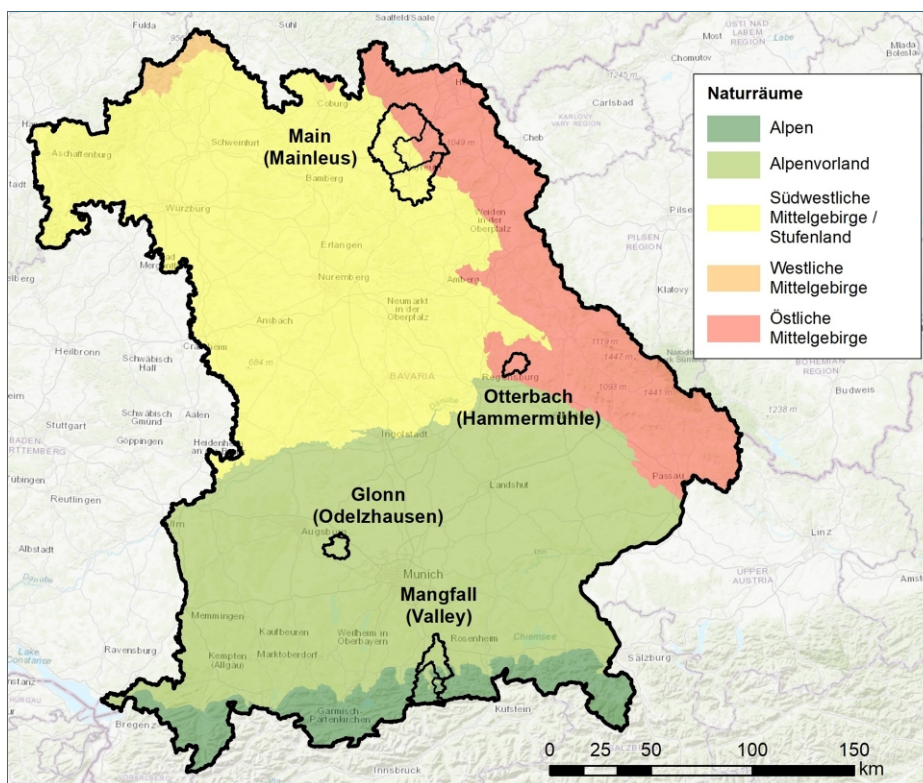


Abb. 3:  
Lage der vier gewählten Untersuchungsgebiete sowie der vier selektierten Teilgebiete in Bayern

## 2.2 Gebietsbeschreibung und -vergleich

Die Charakteristik der gewählten Untersuchungsgebiete wurde anhand verschiedener Parameter untersucht, beschrieben und miteinander verglichen. Die große Bandbreite der über die Gebiete abgedeckten Eigenschaften ermöglicht deren Analyse hinsichtlich der Beeinflussung der einzelnen Maßnahmenwirksamkeiten.

### Topographie und Geomorphologie

Die Größe der gewählten Untersuchungsgebiete variiert zwischen 31 km<sup>2</sup> (Rottach, Pegel Rottach) und 1167 km<sup>2</sup> (Main, Pegel Mainleus) und deckt geodätische Höhen von 287 bis 1841 m+NN ab (Tab. 3). Sowohl die Einzugsgebietsgröße als auch der Höhenunterschied wirken sich maßgeblich auf die Abflussreaktion aus. Der größte Höhenunterschied (> 1200 m) besteht im Einzugsgebiet der Mangfall (Abb. 4), gefolgt vom Einzugsgebiet des Mains (ca. 700 m). Den geringsten Höhenunterschied weist mit 93 m das Einzugsgebiet der Glonn auf.

Das Gewässernetz des Otterbachs ist am stärksten verzweigt, das Gewässernetz der Glonn am schwächsten. Otterbach und Mangfall haben eine eher gestreckte Gebietsform, die grundsätzlich zu flacheren Hochwasserwellen führen würde. Dieser Effekt wird jedoch durch das im Gebietsvergleich größte Wasserlaufgefälle der beiden Gebiete überlagert.

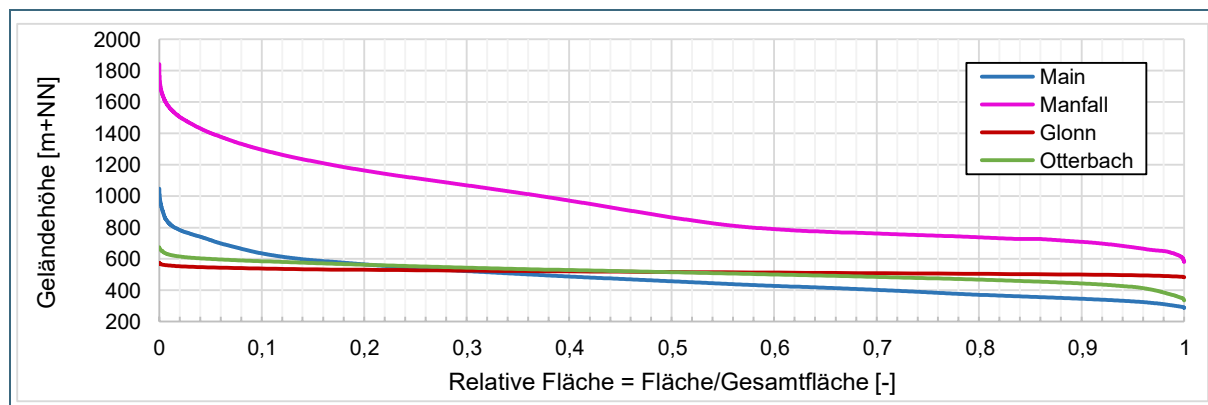


Abb. 4: Hypsometrische Kurven der vier Untersuchungsgebiete

### Geologie und Böden

Die aus der Geologie resultierenden Durchlässigkeiten des oberen Grundwasserleiters liegen zwischen mäßig bis gering ( $10^{-4}$ - $10^{-7}$ , Glonn), gering bis äußerst gering ( $< 10^{-5}$ , Otterbach) und mittel bis äußerst gering ( $10^{-3}$ - $10^{-9}$ , Main). Das Einzugsgebiet der Mangfall weist sehr unterschiedliche Durchlässigkeiten zwischen hoch und äußerst gering ( $10^{-2}$ - $10^{-9}$ ) auf. Höhere Durchlässigkeiten treten überwiegend im Bereich der Gewässer auf.

Für den Vergleich der Bodeneigenschaften der vier Einzugsgebiete wurden nur Bodentypen mit einem Flächenanteil von mindestens 5 % berücksichtigt (Abb. 5). In allen vier Gebieten kommt der Bodentyp Braunerde sehr großflächig vor, wobei der Anteil im Einzugsgebiet des Otterbachs mit 91 % am größten ist. Gleyböden sind ebenfalls in allen Untersuchungsgebieten zu finden. Da die vorliegenden Bodeneigenschaften gerade bei den Landnutzungs- oder Bewirtschaftungsmaßnahmen (Kapitel 3.2) eine große Rolle spielen, ist die detaillierte Analyse der vorliegenden Böden von großer Bedeutung. Die Variabilität von flachgründigen, schwach ausgebildeten Rendzinaböden bis hin zu tiefgründigen Braunerdestandorten innerhalb der Untersuchungsgebiete ist groß. Die flachgründigen Böden im südlichen Teil des Mangfall-Gebiets resultieren im Gebietsvergleich in den geringsten nutzbaren Feldkapazitäten, wohingegen die Böden des Tertiärhügellandes zu den gebietsübergreifend höchsten nutzbaren Feldkapazitäten im Gebiet der Glonn führen. Gerade in den Gebieten von Mangfall und Main konnte eine regional sehr unterschiedliche Verteilung der vorliegenden Bodentypen festgestellt werden.

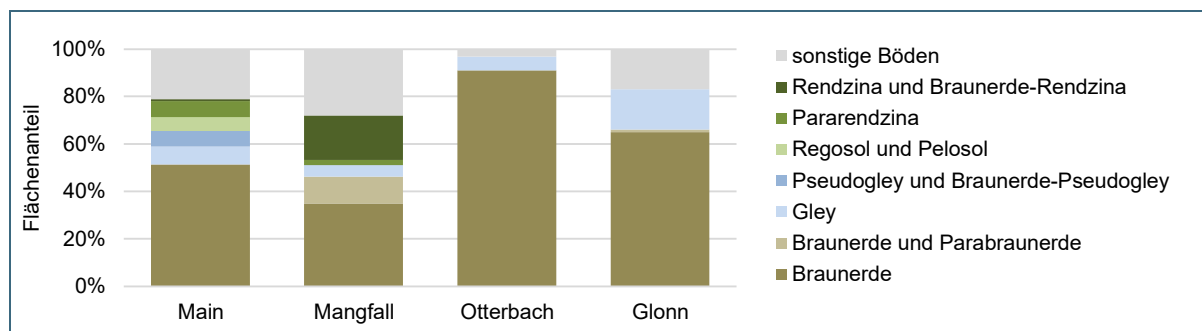


Abb. 5: Hauptbodentypen (Flächenanteil > 5 %) der vier Untersuchungsgebiete

## Landnutzung

Die Flächenanteile der Hauptlandnutzungstypen sind in Abb. 6 für die vier Untersuchungsgebiete dargestellt. Der Anteil der Siedlungsfläche ist mit 8,0 % im Maingebiet am höchsten und mit 4,8 % im Otterbachgebiet am niedrigsten. Sehr deutliche Unterschiede sind vor allem bei den Anteilen der Landnutzung durch Ackerland zu erkennen. Im Einzugsgebiet der Glonn ist über die Hälfte der Fläche als Ackerland landwirtschaftlich genutzt, wohingegen nur 0,2 % des Einzugsgebiets der Mangfall mit Ackerland bedeckt sind. Dementsprechend sind in diesem Gebiet die Anteile an Grünlandflächen (26,1 %) und Waldflächen (62,0 %) im Gebietsvergleich am größten.

Die insgesamt vergleichsweise geringen Anteile an Siedlungsflächen lassen in allen Gebieten eine großflächige Umsetzung von natürlichen und dezentralen Hochwasserrückhaltemaßnahmen zu. Einschränkungen entstehen jedoch für die jeweiligen Maßnahmentypen gebietspezifisch durch die jeweils vorliegende Landnutzung. So kann die Maßnahme „konservierende Bodenbearbeitung“ im Glonngebiet großflächig, dagegen im Mangfallgebiet nur auf 0,2 % der Einzugsgebietsfläche umgesetzt werden. Bei der Entwicklung gebietspezifischer, effektiver und gleichzeitig realisierbarer Maßnahmenkonzepte spielt der Einfluss der vorliegenden Landnutzung eine besondere Rolle.

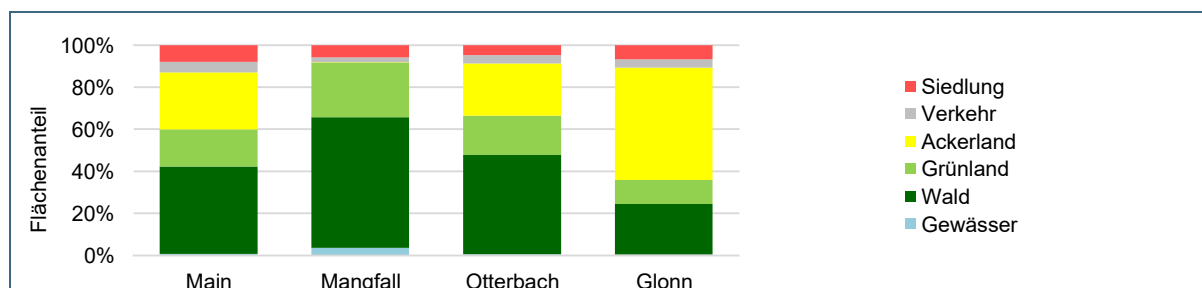


Abb. 6: Landnutzungsverteilung der vier Untersuchungsgebiete

## Meteorologie und Hydrologie

Die jährlichen Niederschlagssummen der vier Untersuchungsgebiete (Tab. 3) weisen deutliche Unterschiede und einen ansteigenden Gradienten von Nord nach Süd (711 mm auf 1760 mm) auf. Mit Ausnahme des südlichen Bereichs im Einzugsgebiet der Mangfall betragen die mittleren Temperaturen der Untersuchungsgebiete zwischen 8,5°C und 8,8°C und überschreiten damit das bayernweite Temperaturmittel, das aufgrund der niedrigeren Temperaturen im Süden von Bayern (Alpenrand) etwas geringer ausfällt. Im südlichen Teil des Einzugsgebiets der Mangfall zeigen die Temperaturen mit zunehmender geodätischer Höhe eine Abnahme bis zu einer mittleren Jahrestemperatur von 4,6°C. Hieraus resultieren das vergleichsweise hohe Schneeaufkommen des Gebiets und das damit verbundene nivo-pluviale Abflussregime. Die übrigen drei Gebiete weisen ein pluviales Abflussregime auf, wobei die geringsten Abflussschwankungen an der Glonn auftreten.

Erwartungsgemäß steigt mit zunehmender Gebietsgröße der mittlere jährliche Abfluss in den Untersuchungsgebieten (Tab. 3). Überraschend hingegen sind die vergleichsweise hohen mittleren Abflussspenden der großen Untersuchungsgebiete gegenüber den kleinen, in denen grundsätzlich größere Spenden

zu erwarten wären. Bei ähnlicher Einzugsgebietsgröße der Gebiete Glonn und Otterbach weisen die Hochwasserereignisse im Einzugsgebiet des Otterbachs deutlich kürzere Anstiegszeiten auf, die sich durch das hohe Wasserlaufgefälle  $I_s$  (8,7 ‰) erklären lassen. Die Längen der Fließwege der beiden größeren Gebiete Main bzw. Mangfall sind mit 71 km bzw. 53 km relativ ähnlich, während die Einzugsgebietsgrößen (1167 km<sup>2</sup> bzw. 382 km<sup>2</sup>) stark voneinander abweichen. Da aber große Unterschiede im mittleren Wasserlaufgefälle vorliegen (2,3 ‰ bzw. 6,1 ‰), sind im Mangfallgebiet grundsätzlich kürzere Anstiegszeiten der Hochwasserwellen zu erwarten. Bei Betrachtung der einzelnen Hochwasserereignisse kann dies jedoch nicht grundsätzlich bestätigt werden, was auf die dämpfende Wirkung des Tegernsees (Mangfallgebiet), die jeweiligen Gebietsformen sowie die unterschiedlichen Niederschlagscharakteristika bei den einzelnen Hochwasserereignissen zurückgeführt werden kann.

Tab. 3: Topographische, Meteorologische und Hydrologische Eigenschaften der Untersuchungsgebiete;  
 1: statistische Auswertung anhand der im Zeitraum von 1995-2015 verfügbaren Pegeldata

		Bayern	Main	Mangfall		Glonn	Otterbach
				(N)	(S)		
Topographie	Fläche [km <sup>2</sup> ]	70 550	1167	382		97	91
	Tiefster Punkt [m+NN]		287	579		482	336
	Höchster Punkt [m+NN]		1046	1841		575	674
Meteorologie	Jahresniederschlag [mm]	933	774	1054	1760	837	711
	Mittlere Jahrestemperatur [°C]	7,8	8,2	8,5	4,6	8,7	8,8
Hydrologie	MQ <sup>1</sup> [m <sup>3</sup> /s]		14,1	6,6		0,91	0,79
	Mq [l/(s*km <sup>2</sup> )]		12,0	17,3		9,4	8,7
	HQ <sup>1</sup> [m <sup>3</sup> /s]		246,0	156		35,9	32,4
	Hq [l/(s*km <sup>2</sup> )]		209,9	408,4		370,1	356,0

## Hydraulik

Innerhalb der vier hydrologischen Einzugsgebiete (Main, Mangfall, Glonn, Otterbach) wurde jeweils ein Abschnitt des Hauptfließgewässers mittels des hydrodynamischen Modells HYDRO\_AS-2D modelliert. Im Falle des Main Einzugsgebiets wurde sowohl ein Gewässerabschnitt des Roten Mains als auch einer des Weißen Mains untersucht. Die Abschnittslängen in den verschiedenen Gebieten variieren dabei zwischen 21,5 und 8,6 km. Nähere Informationen zu den Modell- und Gebietscharakteristika der hydrodynamisch modellierten Gewässerabschnitte können Abschnitt 2.4 entnommen werden.

## Schlussfolgerungen

- Mithilfe der durchgeführten Analysen konnte die große Bandbreite verschiedener Einzugsgebietscharakteristika (Topographie, Geologie, Boden, Landnutzung, Meteorologie, Hydrologie) innerhalb der gewählten Einzugsgebiete und Teilgebiete aufgezeigt werden.
- Die Modellgebiete der hydrodynamischen Modelle sind unterschiedlich stark anthropogen überprägt. In Kombination mit den vielfältigen Gewässereigenschaften erhält man eine große Variabilität an Modellen, um die jeweils spezifische Auswirkung der Renaturierungs- und Auengestaltungsszenarien zu analysieren und zu quantifizieren.
- Die getroffene Auswahl ist demzufolge für die Untersuchung der Möglichkeiten und Grenzen dezentraler und natürlicher Hochwasserrückhaltemaßnahmen gut geeignet.

### 2.3 Hydrologische Modellierung

Die hydrologische Modellierung wurde mithilfe des Wasserhaushaltsmodells WaSiM (SCHULLA 2015) durchgeführt. Das Vorgehen von Modellaufbau und Parametrisierung, Kalibrierung, Validierung und Ereignisgenerierung war dabei in den Untersuchungsgebieten gleich, um eine möglichst gute Vergleichbarkeit der Szenarienergebnisse (Kapitel 3 und 4) gewährleisten zu können.

#### Wasserhaushaltsmodell WaSiM

Das hydrologische Modell WaSiM ist ein deterministisches Wasserhaushaltsmodell, in dem sowohl physikalische als auch konzeptionelle Ansätze zur Abbildung der hydrologischen Prozesse implementiert sind. Das Modell wurde 1997 von Jörg Schulla an der ETH Zürich entwickelt (SCHULLA 1997) und wird laufend in Kooperation mit mehreren Universitäten erweitert. Durch den modularen Aufbau können in Abhängigkeit der jeweiligen Fragestellung verschiedene Teilmodelle genutzt werden, wodurch WaSiM für unterschiedliche hydrologische Fragestellungen geeignet ist und eine gute Beschreibung komplexer Untersuchungsgebiete ermöglicht.

Das Modell basiert auf meteorologischen Zeitreihen und Rasterdaten von Topographie, Boden und Landnutzung. Die Zeitschritte und Rasterweiten können dabei frei gewählt werden. Für jede Rasterzelle erfolgt eine separate Berechnung der vertikalen Flüsse für die gewählten Teilmodelle. Anschließend werden die in der Zelle gebildeten Abflusskomponenten entsprechend der definierten Vorgaben an die Nachbarzellen bzw. den Teilgebietsauslass weitergegeben. Von dort werden die Abflüsse auf den bei der Gebietsableitung definierten Gewässerabschnitten zum nächsten Teilgebietsauslass bzw. dem Gesamtgebietsauslass geroutet. Die Dokumentation (SCHULLA 2015) bietet eine detaillierte Beschreibung des Modells und der darin berücksichtigten hydrologischen Prozesse.

#### Modellaufbau und Parametrisierung

Für den Aufbau und die Kalibrierung der WaSiM-Modelle werden räumliche Daten und Zeitreihen verschiedener meteorologischer und hydrologischer Parameter benötigt.

Basis der räumlichen Daten ist ein digitales Geländemodell. Aufgrund der teilweise großen Gebietsgrößen wurde eine einheitliche Rasterweite der Modelle von 100 m gewählt. Weitere im Modell benötigte topographische Eingangsdaten wie beispielsweise die Einzugsgebietsfläche und das Gewässernetz wurden mithilfe des topographischen Analyseprogramms TANALYS (SCHULLA 2015) erstellt.

Die Landnutzungskarte setzt sich aus Daten der tatsächlichen Nutzung (ATKIS-Datensatz, LDBV (2008-2014)) und den InVeKoS-Daten (StMELF 2005-2014) zusammen. Hierbei wurden die als landwirtschaftliche Flächen ausgezeichneten Bereiche im ATKIS-Datensatz durch die Informationen der InVeKoS-Daten ersetzt, um unterschiedliche Feldfrüchte berücksichtigen zu können.

Die Bodenkarte in WaSiM stellt eine Verschneidung der Übersichtsbodenkarte (LFU 2015a) und der auf die Hauptlandnutzungstypen aggregierten Landnutzungskarte dar. Die daraus resultierenden Kombinationen sind die Basis der landnutzungsabhängigen Bodenparametrisierung. Die für die Richards-Gleichung benötigten van-Genuchten-Parameter wurden mithilfe der Pedotransferfunktion nach WÖSTEN et al. (1999) berechnet, wobei die darin eingehenden Bodeneigenschaften Dichte und organischer Anteil landnutzungsabhängig über die Lagerungsdichte und den Humusgehalt definiert wurden (Abb. 7).

Grünland			Acker			Wald		
15 cm	Ld1	h4	20 cm	Ld2	h3	5 cm	Ld1	h5
15 cm	Ld2	h3	10 cm	Ld4	h3	25 cm	Ld2	h3
	Ld3	h2		Ld3	h1		Ld3	h2
	Ld4	h1		Ld4	h1		Ld4	h1

Abb. 7: Horizontmächtigkeiten, Lagerungsdichtestufen (Ld) und Humusklassifikation (h) gemäß BfGR (2005) für die oberen 30 cm der drei Hauptlandnutzungstypen Grünland, Acker und Wald

Weiterhin wurde der im Bodenmodell enthaltene Ansatz zur Simulation von Makroporen nach RIEGER (2012) landnutzungsabhängig hinsichtlich der Kapazität (von 0,5 mm bis 3 mm) und der Tiefe (von 0,3 m bis 1,0 m) der Makroporen parametrisiert.

Als meteorologischer Input wurden für die Modelle stündliche Zeitreihen von Temperatur [°C], relativer Luftfeuchte [%], Globalstrahlung [W/m²], Windgeschwindigkeit [m/s] und Niederschlag [mm] benötigt. Dafür wurden die verfügbaren Stationsdaten des Deutschen Wetterdiensts (DWD), der Bayerischen Landesanstalt für Landwirtschaft (LfL), des Gewässerkundlichen Diensts (GKD), des Landesüberwachungssystems Bayern (LÜB), des Bayerischen Lawinenwarndiensts (LWD) und des Automatischen Wetterkartensystems (AWEKAS) in den Untersuchungsgebieten und in einem Umkreis von 25 km zusammengefasst und zu Stundenschritten aggregiert.

Als hydrologische Daten wurden die Abflusszeitreihen aller in den Gebieten liegenden Pegelstationen berücksichtigt. Die Abflussdaten wurden zur Kalibrierung der Modelle für die hydrologischen Jahre 1996 bis 2015 in stündlichen Zeitschritten aufbereitet.

### Kalibrierung und Validierung

Die Modellkalibrierung und -validierung wurde jeweils unter Berücksichtigung aller im Gebiet liegenden Pegel durchgeführt, wobei der Hauptfokus auf dem Gebietsauslass und den ausgewählten Teilgebietspegeln lag. Die Kalibrierung der Modelle erfolgte in drei Schritten: Identifikation von Kalibrierungsparametern, Sensitivitätsanalysen der Parameter und Manuelle Kalibrierung. Dieses Vorgehen wurde für alle Gebiete identisch definiert und durchgeführt.

Die Simulationen wurden für den Zeitraum der hydrologischen Jahre 1996 bis 2014 durchgeführt, wobei aus diesem Zeitraum für jedes Gebiet drei charakteristische Hochwasserereignisse sowie verschiedene Zeiträume für die Kalibrierung und Validierung der Modelle gewählt wurden. Zur Bewertung der Simulationen wurden die Gütekriterien nach Nash-Sutcliffe (*NSE*) und Nash-Sutcliffe mit logarithmierten Werten (*NSE<sub>log</sub>*), die prozentuale Volumenabweichung (*PBIAS*) und die prozentuale Scheiteldifferenz ( $\Delta S$ ) verwendet. Bei der Einzelbetrachtung der Ereignisse wurde zudem die Scheitelabweichung herangezogen. Zusätzlich zu den statistischen Verfahren gingen die Anteile der einzelnen Abflusskomponenten und deren zeitlicher Verlauf anhand einer visuellen Analyse in die Bewertung der Simulationen mit ein. Diese dienten vor allem der Beurteilung einer physikalisch plausiblen Verteilung des Verlaufs verschiedener Abflusskomponenten bei unterschiedlichen Abflussereignissen.

Die Modellkalibrierung und -validierung konnte insgesamt als erfolgreich eingestuft werden. Die Ergebnisse der einzelnen Gebiete (Abb. 8) liegen für die Einzelereignisse in einem überwiegend guten bis sehr guten Bereich.

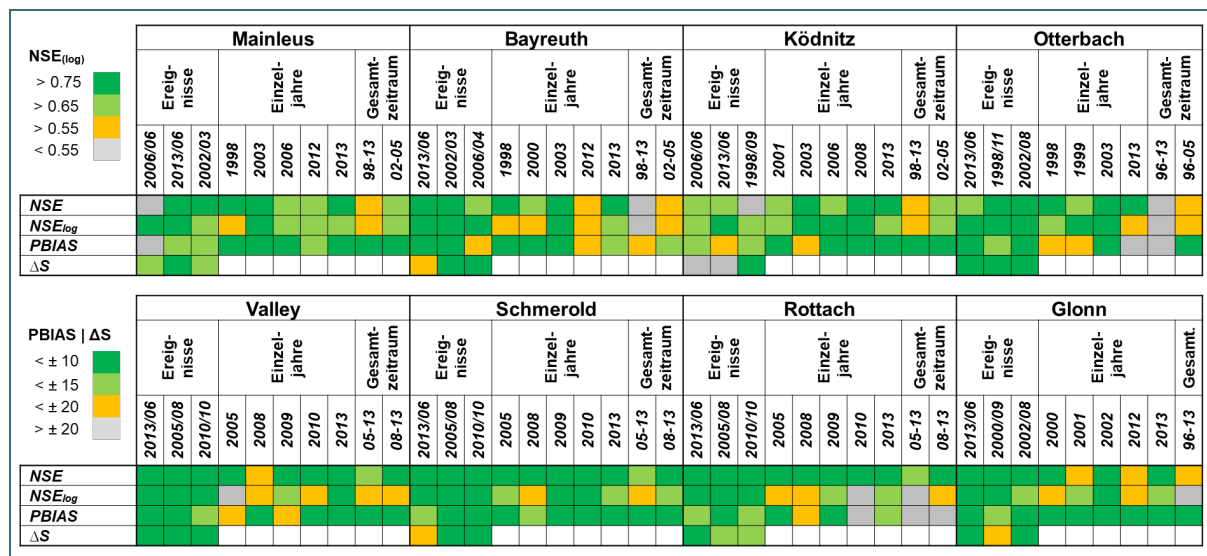


Abb. 8: Ergebnisse der Modellkalibrierung und -validierung (*NSE* [-], *NSE<sub>log</sub>* [-], *PBIAS* [%],  $\Delta S$  [%])

Für die Einzeljahre bzw. den Gesamtzeitraum musste die Modellgüte dagegen vereinzelt als ausreichend bzw. ungenügend klassifiziert werden. Ursachen sind hier beispielsweise schlecht abgebildete Hochwasserereignisse während des Winterhalbjahrs (Schneeschnmelze), deren Abbildung aufgrund der zu beantwortenden Fragestellung eine untergeordnete Rolle gespielt hat.

### **Ereignisgenerierung**

Die ereignisbasierten Wirksamkeitsanalysen der Maßnahmen (Kapitel 3 bis 5) erfordern eine Auswahl an Ereignissen, die einerseits für die jeweiligen Gebiete charakteristisch sind und andererseits unter den Gebieten vergleichbare Eigenschaften besitzen. Daher wurden für jedes Gebiet fünf Ereignisse generiert, die verschiedene Jährlichkeiten (HQ<sub>5</sub>, HQ<sub>20</sub>, HQ<sub>100</sub>) und Niederschlagscharakteristika (advektiv, konvektiv) abdecken. Demzufolge können die Wirksamkeiten sowohl für kurze und intensive Regenereignisse (konvektive HQ<sub>5</sub> und HQ<sub>20</sub>) als auch für langanhaltenden Dauerregen (advektive HQ<sub>5</sub>, HQ<sub>20</sub> und HQ<sub>100</sub>; Glonn: HQ<sub>300</sub>) untersucht werden.

Die Generierung der Ereignisse erfolgte über eine Selektion charakteristischer Ereigniszeiträume, der Analyse gebietstypischer räumlicher und zeitlicher Niederschlagsverteilungen sowie einer entsprechenden Auswahl der Bodenfeuchte bzw. Anpassung des Interzeptionsspeichers und der meteorologischen Rahmenbedingungen der Ereignisse. Die jeweiligen Jährlichkeiten wurden über eine Skalierung der räumlichen und zeitlichen Niederschlagsverteilungen definiert, wobei bei advektiven Ereignissen vor allem die Niederschlagsdauer und bei konvektiven Ereignissen überwiegend die Niederschlagsintensität verändert wurde. Zur Validierung der generierten Ereignisse wurden diese mit den gemessenen Ereignissen verglichen. Es konnte dabei eine gute Übereinstimmung der Ereignischarakteristika innerhalb der Gebiete festgestellt werden, wohingegen sich die Eigenschaften der Ereignisganglinien zwischen den gewählten Untersuchungsgebieten erwartungsgemäß unterschieden.

### **Schlussfolgerungen**

- Das Wasserhaushaltsmodell WaSiM ist aufgrund des modularen Aufbaus und der physikalisch-basierten Beschreibung des vertikalen Wasserflusses gut geeignet, um die unterschiedlichen Einzugsgebiete (Kapitel 2.1) sowie die Landnutzungs- und Bewirtschaftungsmaßnahmen (Kapitel 3.2) abzubilden.
- Die Kalibrierungen und Validierungen der einzelnen Modelle war für die Abbildung von Sommer-Hochwasserereignissen erfolgreich. Aber auch längere Zeiträume unterschiedlicher Charakteristik konnten mit meist ausreichender Genauigkeit beschrieben werden.
- Die generierten Ereignisse (advektiv: HQ<sub>5</sub>, HQ<sub>20</sub>, HQ<sub>100</sub>, Glonn: HQ<sub>300</sub>; konvektiv: HQ<sub>5</sub>, HQ<sub>20</sub>) sind einerseits für die jeweiligen Gebiete charakteristisch und andererseits durch die über die Jährlichkeit und die Niederschlagscharakteristik definierten Eigenschaften zwischen den Gebieten vergleichbar. Sie sind dementsprechend gut geeignet, um die Wirksamkeit der zu untersuchenden Maßnahmen gebietsübergreifend zu analysieren.



## 2.4 Hydraulische Modellierung

Die hydraulischen Berechnungen wurden mit dem hydrodynamisch-numerischen Modell HYDRO\_AS-2D (NUJIĆ & HYDROTEC 2018) ausgeführt, wobei die gewählten Modellierungsabschnitte durch die Erstellung neuer Modelle sowie die Überarbeitung bzw. Erweiterung von Bestandsmodellen abgebildet wurden. Die Übergabe der in WaSiM generierten Hochwasserereignisse als Zuflussrandbedingung erfolgte über eine Kopplung an das hydrodynamische Modell.

### 2D-Simulationsmodell HYDRO\_AS-2D

HYDRO\_AS-2D wurde ursprünglich für die Simulation von Damm- und Deichbruchwellen von Dr. Nujić basierend auf dem Simulationsprogramm FLOODSIM an der Universität der Bundeswehr München entwickelt (NUJIĆ 1998). Das Programm wird sehr häufig für die Hochwassersimulation und Bestimmung von Überflutungsbereichen sowie Wassertiefen angewendet (NUJIĆ & HYDROTEC 2018). Als Berechnungsgrundlage für die mathematische Modellierung werden in HYDRO\_AS-2D zweidimensional-tiefengemittelte Strömungsgleichungen, die sogenannten Flachwassergleichungen (ABBOTT 1979), verwendet. Das in HYDRO\_AS-2D angewandte numerische Verfahren basiert auf der räumlichen Diskretisierung nach der Finiten-Volumen-Methode und der zeitlichen Diskretisierung nach dem expliziten RUNGE-KUTTA-Verfahren zweiter Ordnung (NUJIĆ & HYDROTEC 2018).

Der Rechenaufwand für zweidimensionale Modelle ist wesentlich höher als der eines eindimensionalen Modells, jedoch trägt deren Einsatz zur genaueren Abbildung von Strömungen bei. Nach YÖRÜK (2009) eignen sie sich insbesondere bei der Simulation von Abflüssen mit unterschiedlichen Strömungsrichtungen in Überschwemmungsflächen sowie für die Darstellung von Strömungen in Gerinnekurven. Hochwasserwellenausbreitungen und Ausuferungen sowie Interaktionen zwischen Hauptgewässer und Vorland wie beispielsweise Auenbereiche können daher über 2D-Modelle abgebildet werden. Die angepasste Berechnungsmethode in der verwendeten Modellversion (HYDRO\_AS-2D 4.5.0, unveröffentlicht) ermöglicht eine volumentreue Berechnung der Abflussganglinien an Kontrollquerschnitten der hydrodynamischen Modelle und ist ab der Version HYDRO\_AS-2D 5.0 standardmäßig implementiert.

### Modellaufbau und -überarbeitung

Für die fünf hydraulischen Untersuchungsabschnitte (Weißer Main, Roter Main, Mangfall, Glonn, Otterbach) wurden zunächst hydrodynamische Modelle erstellt, die den Ist-Zustand des betrachteten Gebiets abbilden. In diesem Zustand entsprechen Geländetopographie, Landnutzung, Gewässergeometrie und die Berücksichtigung von Bauwerken (z. B. Wehrüberfälle, Brücken, den Talraum querende Straßen- bzw. Eisenbahndämme, Hochwasserrückhaltemaßnahmen, etc.) den zum Zeitpunkt der Datenerhebungen aktuellen realen Gegebenheiten im Einzugsgebiet. Diese Modelle werden als Szenario „Ist mit Bauwerken“ (*Ist-Mit*) bezeichnet und bilden die Ausgangsmodelle für die Modellierung aller weiteren hydraulischen Szenarien.

Die Ausgangslage zur Erstellung der Ist-Zustands-Modelle mit Bauwerken war zwischen den Untersuchungsgebieten sehr unterschiedlich. Teilweise waren Bestandsmodelle mit variierender Modellgüte für den gesamten zu untersuchenden Abschnitt vorhanden. In manchen Fällen deckten diese jedoch nicht den gesamten zu betrachtenden Flussabschnitt ab und wurden entsprechend durch einen neu erstellten Modellabschnitt erweitert. Wenn kein Bestandsmodell vorlag, musste ein neues hydrodynamisches Modell erstellt werden. Hierfür waren die in Abb. 9 dargestellten Arbeitsschritte durchzuführen. Im Falle der Verwendung von Bestandsmodellen wurden diese in die zum Zeitpunkt der Modellerstellung aktuelle HYDRO\_AS-2D-Version 4 konvertiert und auf etwaige Modelldefizite untersucht. Es wurde beispielsweise sichergestellt, dass die Güte des Berechnungsnetzes die Anforderungen des LfU (LfU 2015b) erfüllt und Überflutungsflächen den Modellrand nicht berühren. Vereinzelt war in den Bereichen der Überflutungsflächen eine lokale Erweiterung des Bestandsmodellumfangs erforderlich. Bei allen Modellen wurden die Zuflussrandbedingungen neu gesetzt und an die Lage der Pegelpunkte des hydrologischen Modells, welches die Eingangsdaten lieferte, angepasst.

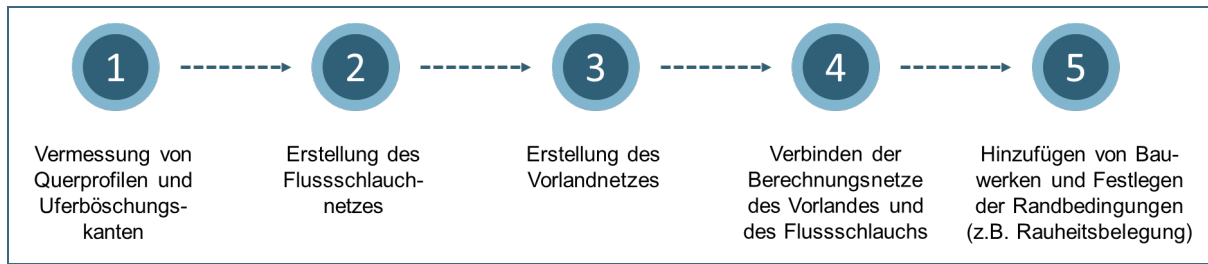


Abb. 9: Schritte zum Aufbau eines neuen HYDRO\_AS-2D Modells

### Charakteristik der Modellgebiete

Die wichtigsten Gebiets- und Modellcharakteristika der hydrodynamisch modellierten Untersuchungsabschnitte sind in Tab. 4 aufgelistet. Hierbei ist deutlich zu erkennen, dass der Modellabschnitt des Weißen Mains mit 570 km<sup>2</sup> das größte Einzugsgebiet aufweist. Das Gebiet des Roten Mains und der Mangfall haben mittlere Einzugsgebietsgrößen von ca. 340 km<sup>2</sup>. Die Modelle am Otterbach und an der Glonn entwässern mit ca. 100 km<sup>2</sup> die kleinsten Einzugsgebiete. Die Länge der modellierten Talabschnitte variiert je nach Untersuchungsgebiet zwischen 8,6 km und 21,5 km. Der Otterbach stellt mit ca. 10 ‰ Talsohlengefälle gefolgt von der Mangfall (7,4 ‰) das steilste der fünf Untersuchungsgebiete dar. Die beiden Untersuchungsabschnitte im Einzugsgebiet des Oberen Mains haben ein vergleichsweise moderates durchschnittliches Talsohlengefälle von 4,1 ‰ bzw. 3,5 ‰. Der flachste Untersuchungsabschnitt befindet sich mit einem durchschnittlichen Talsohlengefälle von 1,5 ‰ an der Glonn. Die vorherrschenden Talformen variieren je nach Untersuchungsgebiet und zum Teil auch innerhalb eines Untersuchungsgebietes stark. Die weitesten Vorländer ohne erkennbare Talform finden sich an der Glonn. Der Untersuchungsabschnitt am Otterbach hingegen weist durchgehend sehr enge und steil ansteigende Vorländer auf.

### Kopplung der hydrologischen und hydrodynamischen Modelle

Für die Verwendung der mit WaSiM generierten Ganglinien in HYDRO\_AS-2D waren in beiden Programmen spezifische Schritte erforderlich. Zunächst mussten Übergabestellen definiert werden, an welchen die Ausgabeganglinien aus WaSiM als Eingangsganglinien in HYDRO\_AS-2D verwendet werden. Diese beinhalten den hydraulischen Modellbeginn sowie alle größeren seitlich einmündenden Zuflüsse. Zudem wurden Übergabestellen in einem Abstand von ca. 500 m entlang der berücksichtigten Gewässerabschnitte definiert, um die Zugabe von diffusen Abflüssen in das hydrodynamische Modell zu ermöglichen.

Tab. 4: Übersicht der Gebiets- und Modellcharakteristika der hydraulischen Untersuchungsabschnitte

Untersuchungsgebiet	Einheit	Weißer Main	Roter Main	Mangfall	Glonn	Otterbach
Induziertes Einzugsgebiet	[km <sup>2</sup> ]	570	335	343	104	91
Talmittellinie	[km]	17,6	21,5	8,6	13,1	13,5
Talsohlengefälle	[‰]	4,1	3,5	7,4	1,5	10,1
Länge Hauptfließgewässer <i>Ist Mit Bauwerken</i>	[km]	24,2	26,1	9,1	13,6	15,6
Windungsgrad <i>Ist Mit Bauwerken</i>	[-]	1,4	1,2	1,1	1,0	1,1
Ø Sohlgefälle <i>Ist Mit Bauwerken</i>	[‰]	3,0	2,9	7,0	1,5	8,9

Im hydrologischen Modell wurden an den Übergabepositionen zunächst Pegelpunkte gesetzt und die für die Modellierung erforderliche Einzugsgebietsstruktur dementsprechend angepasst. Im Anschluss erfolgte eine Nachkalibrierung des WaSiM-Modells und eine Ausgabe der benötigten Ganglinien. Diese wurden

dem hydrodynamischen Modell als Zufluss-Randbedingung zugegeben, wobei zwischen der Zugabe des Gesamtabflusses an den Rändern des hydraulischen Modells und der Zugabe der in Zwischengebieten gebildeten Abflüsse an den Zugabepunkten für diffuse Abflüsse unterschieden wurde.

### **Schlussfolgerungen**

- Das zweidimensionale hydrodynamisch-numerische Modell HYDRO\_AS-2D ist in der Lage, unstrukturierte dreiecks- oder vierecksvermaschte Gitter als Berechnungsnetz zu verwenden, wodurch komplexe topographische Gegebenheiten, wie beispielsweise die im Rahmen der hydraulischen Modellszenarien untersuchte naturnahe Gewässer- und Auenstruktur, abgebildet werden konnten.
- Die konsistente Überarbeitung und Qualitätssicherung der verwendeten Bestandsmodelle bzw. der neu erstellten Modellabschnitte sichert eine gebietsübergreifend gute Vergleichbarkeit der hydrodynamischen Modellierungsergebnisse.
- Die volumentreue Berechnung von Abflussganglinien an den Kontrollquerschnitten innerhalb eines Untersuchungsgebietes in der verwendeten Modellversion ermöglichte eine abschnittsweise Auswertung der Abflussganglinien mit hoher Genauigkeit.
- Die verwendete Kopplungsmethodik weist einen hohen Detaillierungsgrad auf und berücksichtigt neben Zuflüssen zum Hauptgewässer auch die diffuse Zugabe von Abflüssen in der Fläche.

## 3 Hydrologische Feldmessungen, Szenarien und Sensitivitätsanalysen

Kapitel 3 enthält das Vorgehen und die Ergebnisse der bodenhydraulischen Untersuchungen, der Landnutzungs- und Bewirtschaftungsmaßnahmen, der hydrologischen Sensitivitätsanalysen und der Beckenszenarien.

### 3.1 Bodenhydraulische Untersuchungen

Die Entstehung von Hochwasserereignissen wird maßgeblich von den auftretenden Oberflächen- und Zwischenabflüssen beeinflusst. Folglich ist eine korrekte Modellabbildung der entsprechenden Abflussprozesse maßgeblich für die Belastbarkeit der Modellergebnisse.

#### Hintergrund und Zielsetzung

Bei bisherigen Untersuchungen zur Wirksamkeit dezentraler Hochwasserrückhaltemaßnahmen zeigt sich vor allem beim Einfluss von Landnutzungs- und Bewirtschaftungsänderungen eine große Heterogenität der zu erwartenden Wirksamkeit (Abb. 2, DWA-M550 2015). Daraus kann auf größere Unsicherheiten bei der korrekten Abbildung dieser Maßnahmen in hydrologischen Modellen geschlossen werden. Grundsätzlich ermöglichen Feldmessungen eine verbesserte Schätzung der Eingangsdaten dieser Modelle. Zudem kann durch einen direkten Vergleich der Ergebnisse aus Feldmessungen und Modellierungen die Abbildung entsprechender Prozessabläufe im hydrologischen Modell bewertet werden.

Ziel der Feldmessungen war die Untersuchung der landnutzungsabhängigen Unterschiede von Bodenaufbau und bodenhydraulischen Parametern, sowie deren Einfluss auf die Prozesse der Abflussbildung und -konzentration. Zudem sollte anhand der im Feld erhobenen Daten eine Bewertung der Parametrisierung und Kalibrierung des hydrologischen Modells WaSiM vorgenommen werden.

#### Methodik und Vorgehensweise

Die Messfelder befinden sich im südlichen Teil des Einzugsgebiets der Glonn und damit am südlichen Rand der Fließgewässerlandschaft des Tertiärhügellandes. Die Messflächen sind parallel an einem in nord-westlicher Richtung ausgerichteten Hang angeordnet und schließen eine Acker-, eine Grünland- und eine Waldfläche ein.

Über einen multikriteriellen und räumlich differenzierten Ansatz konnten die Zwischenabflussprozesse von verschiedenen Blickwinkeln betrachtet werden. Die Messung der Abflusskomponenten erfolgte in den drei Messflächen mithilfe von Gräben, in denen der Oberflächenabfluss sowie der Zwischenabfluss in zwei Ebenen (35 cm, 70 cm) und in drei Segmenten (je 2 m breit) gemessen wurde. Zudem wurden die Rahmenbedingungen der Zwischenabflussereignisse erfasst, indem meteorologische Parameter, Bodenfeuchte und Saugspannung an verschiedenen Standorten oberhalb der Gräben sowie der Abfluss im angrenzenden Rambach aufgezeichnet wurden. Im Zeitraum zwischen Juni 2016 und Mai 2018 konnten ca. 30 bis 45 Zwischenabflussereignisse je Landnutzung gemessen und analysiert werden.

Die topographischen Eigenschaften der Acker- und Grünlandstandorte sind sehr ähnlich (Akkumulationsflächen: 6076 m<sup>2</sup> und 5133 m<sup>2</sup>, mittlere Hangneigung: 11,4 % und 11,7 %), wohingegen der Waldstandort deutlich kleiner und steiler ist (Akkumulationsfläche: 273 m<sup>2</sup>, mittlere Hangneigung: 18,7 %). Der Bodentyp im unteren Bereich der Messflächen ist laut Übersichtsbodenkarte (LFU 2015a) Braunerde aus lehmiger Deckschicht und geht nach Süden in Braunerde aus Lößlehm über. Die Gräben waren nicht ins Grundgestein eingebunden, wodurch nur ein Teil des Zwischenabflusses erfasst werden konnte. Dieser schloss jedoch die Bodenschichten ein, bei denen der größte Einfluss der Landnutzung zu erwarten war. Insgesamt waren die gewählten Messflächen daher sehr gut geeignet, um Fragestellungen zur Landnutzungsabhängigkeit hydrologischer Prozesse zu beantworten.

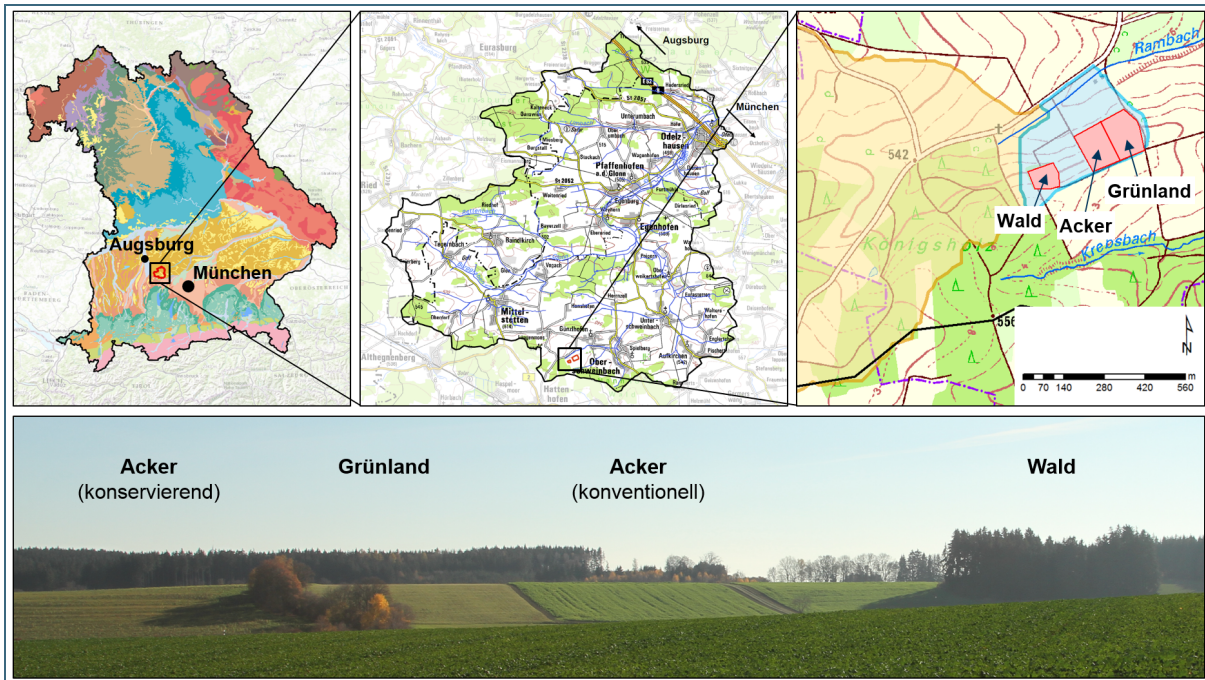


Abb. 10: Geographische Lage, Exposition und Landnutzungsverteilung der Messfelder

### Prozessverständnis der Abflussbildung und -konzentration

Die Ergebnisse der Analysen ermöglichen die Schlussfolgerung, dass sich die dominierenden Zwischenabflussprozesse zwischen den Landnutzungstypen unterscheiden. Im Wald wird der Zwischenabfluss durch Makroporenabfluss dominiert, was durch die kurzen Reaktionszeiten bei Starkregeneignissen und die große horizontale und vertikale Heterogenität begründet werden kann. Im Acker wird der Zwischenabfluss dagegen vor allem durch den Matrixabfluss gespeist, da durch die Bodenbearbeitung in regelmäßigen Abständen die Makroporen zerstört werden. Folglich konnten gemäßigte Abflussvolumina und relativ gleichmäßige Charakteristika in den Grabenbereichen beobachtet werden. Der Abfluss in der Grünlandfläche kann sowohl von Matrixabfluss als auch von Makroporenabfluss dominiert werden. Der dominierende Zwischenabflussprozess ist in diesem Fall von den jeweiligen Ereignischarakteristika abhängig. Diese Annahme basiert auf den deutlichen Unterschieden der Reaktionszeiten und den großen Abflussvolumina der Messungen im Grünland.

Für allgemeingültige Aussagen ist die Stichprobengröße der erfassten Abflussereignisse jedoch nicht ausreichend groß. Daher wäre eine Erweiterung der Datenbank empfehlenswert. Diese könnte einerseits durch eine Verlängerung des Messzeitraums und damit eine größere Anzahl an gemessenen Ereignissen umgesetzt werden. Ereignisse mit definierter Charakteristik könnten durch Berechnungsversuche erzeugt werden. Andererseits könnten die Messdaten anderer Untersuchungsgebiete mitberücksichtigt werden. Dennoch zeigen die Analysen bereits deutliche Unterschiede der Zwischenabflusscharakteristik in Abhängigkeit der Landnutzung und verdeutlichen so die Bedeutung einer realitätsnahen Abbildung der Zwischenabflussprozesse in hydrologischen Modellen, um Landnutzungsszenarien und deren Einfluss auf die Hochwassergeneese zu bewerten.

### Modellierbarkeit des Messhangs mit WaSiM

Zur Bewertung der Modellierbarkeit des Messhangs mit WaSiM wurde das Teilgebiet, in dem sich die Messflächen befinden (blaue Fläche in Abb. 10), in WaSiM nachmodelliert (Rasterweite: 10 m, zeitliche Auflösung: 5 min). Dabei wurden die Bodeneigenschaften einerseits mit dem in Kapitel 2.3 beschriebenen Ansatz definiert und andererseits mithilfe der gemessenen Bodeneigenschaften berücksichtigt.

Beide Parametrisierungsansätze wurden manuell am Teilgebietsabfluss kalibriert und anhand der verschiedenen gemessenen Parameter validiert. Der Vergleich der beiden Modellparametrisierungen mit den

gemessenen Daten zeigt die Möglichkeiten und Grenzen der Modellierbarkeit des Messhangs mit WaSiM und verdeutlicht die Bedeutung der Erfassung von Messdaten zur Überprüfung der Modellierung. Ein direkter Vergleich der gemessenen und modellierten Daten war jedoch in vielen Fällen aufgrund der implementierten Modellansätze und der damit verbundenen Diskretisierung in Boden- bzw. Berechnungsschichten nicht möglich. Der mittlere zeitliche Verlauf der Bodenfeuchten konnte für die Acker- und Grünlandfläche weitgehend nachgebildet werden. Für Unterschiede zwischen den Messplots ist jedoch der Detailgrad der Modellabbildung nicht hoch genug. Der Vergleich der Abflusskomponenten hat gezeigt, dass die Übereinstimmung der Zwischenabflusscharakteristik mit einer messdatengestützten Parametrisierung verbessert werden kann. Jedoch verdeutlicht er auch die Notwendigkeit einer physikalischen Prozessabbildung von vertikalem und lateralem Wasserfluss im Boden. Insbesondere die lateralen Wasserflüsse werden im Modell WaSiM bisher nur konzeptionell abgebildet.

### Schlussfolgerungen

- Der Landnutzungstyp und die Art der Bewirtschaftung beeinflussen die Charakteristik des Zwischenabflusses. Diese Eigenschaften beinhalten die Aufteilung in Makroporen- und Matrixabfluss sowie die Reaktionszeiten und die Abflussvolumina einzelner Ereignisse.
- Landnutzungsabhängige Unterschiede werden in WaSiM mithilfe des gewählten Ansatzes der Parametrisierung grundsätzlich plausibel abgebildet. Die Verbesserung der Modellgüte durch die Berücksichtigung von Messdaten verdeutlicht die Relevanz einer bayernweiten landnutzungsabhängigen Definition der Boden-Modellprofile für die hydrologische Modellierung, in der auch die pF-WG-Beziehungen enthalten sind.

### Weitere Informationen

TESCHEMACHER, S. & RIEGER, W. (2016): Experimentelle Untersuchung des Direktabflusses in Abhängigkeit der Landwirtschaft. *48. Jahrestreffen des Arbeitskreises Hydrologie vom 17.-19. November 2016 in München* (Vortrag).

TESCHEMACHER, S., RIEGER, W. & DISSE, M. (2018): Experimentelle und modellgestützte Untersuchung der Abflussbildung und -konzentration in verschiedenen Landnutzungen am Beispiel eines Messhangs im Einzugsgebiet der Glonn (Odelzhausen). *Forum für Hydrologie und Wasserbewirtschaftung*, 39, 95–106.

Heller, H. & Teschemacher, S. (2018): Internet of Things: Moderne Technik für die Umweltdatenerfassung. *Workshop UIS; Arbeitskreis Umweltinformationssysteme: Nürnberg, Deutschland, 2018.*

TESCHEMACHER, S., RIEGER, W. & DISSE, M. (2019): Experimental Investigation of Lateral Subsurface Flow Depending on Land Use and Soil Cultivation. *Water* 11, 4, 766.

## 3.2 Landnutzungs- und Bewirtschaftungsmaßnahmen

Maßnahmen der Landnutzungs- und Bewirtschaftungsänderungen werden flächig verteilt umgesetzt und sollen so der Hochwasserentstehung im Einzugsgebiet entgegenwirken.

### Hintergrund und Zielsetzung

Landnutzungs- und Bewirtschaftungsmaßnahmen beeinflussen die Prozesse der Abflussbildung und Abflusskonzentration. Im Bereich der Abflussbildung kann der Effektivniederschlag durch eine Erhöhung des Interzeptionspeichers, des Bodenspeichers und der Infiltration reduziert werden. Das führt zu einer Abnahme des Abflussvolumens, die meist eine Scheitelreduktion zur Folge hat. Die Abflusskonzentration wird durch die Aufteilung zwischen Oberflächen- und Zwischenabfluss beeinflusst, wobei die Konzentrationszeit mit zunehmendem Zwischenabflussanteil verlängert wird. Zudem kann der Oberflächenabfluss durch eine erhöhte Rauheit der Bodenbedeckung verzögert werden.

Im Merkblatt DWA-M550 (2015) werden verschiedene Retentionsmaßnahmen sowie deren Wirkungsweise und potenzielle Wirksamkeit beschrieben. Die Bandbreite der im Rahmen bisheriger Studien ermittelten Scheitelabminderungen ist dabei relativ groß (s. Abb. 2). Ziel der durchgeführten Landnutzungs- und Bewirtschaftungsszenarien ist die Bestimmung und der Vergleich der Potenziale ausgewählter Maßnahmen des natürlichen Hochwasserrückhalts. Neben der Bewertung der Wirksamkeit der Einzelmaßnahmen sollen die Ergebnisse daher auf gebiets- und skalenübergreifende Aussagen hin untersucht werden.

### Methodik und Vorgehensweise

Im Rahmen der Landnutzungs- und Bewirtschaftungsänderungen wurden sechs Maßnahmentypen im hydrologischen Modell WaSiM für die acht Gebiete und die fünf bzw. sechs Ereignisse untersucht.

### Definition der Szenarien

Die sechs ausgewählten Maßnahmentypen wurden jeweils in einem Szenario mit einem potenziell realistischen Umfang sowie einem Extremszenario umgesetzt:

- **Extensivierung der Landwirtschaft:** Umwandlung von Ackerfläche in Grünlandfläche (Umsetzung auf 30 % bzw. 100 % der Ackerfläche)
- **Konservierende Bewirtschaftung:** Reduktion der Bodenbearbeitung auf den Ackerflächen durch Verwendung von Grubbern anstelle eines Pflugeinsatzes (Umsetzung auf 30 % bzw. 100 % der Ackerfläche)
- **Direktsaat:** Bewirtschaftung der Ackerflächen ohne Bodenbearbeitung durch Pflug oder Grubber (Umsetzung auf 30 % bzw. 100 % der Ackerfläche)
- **Aufforstung:** Umwandlung von Acker- oder Grünlandflächen in Wald (Umsetzung auf 10 % der Einzugsgebietsfläche bzw. 100 % der Acker- und Grünlandflächen)
- **Ökologischer Waldumbau:** Erhöhung des Laubwaldanteils und Ergänzung einer Strauchschicht (Umsetzung auf ca. 50 % bzw. 100 % der Waldflächen)
- **Entsiegelung:** Reduktion der versiegelten Flächen (Umsetzung auf 10 % bzw. 100 % der Siedlungsflächen)

### Umsetzung der Szenarien

Die Veränderungen der Einzugsgebietseigenschaften innerhalb der Szenarien wurden mithilfe von Anpassungen der Landnutzungs- und Bodenverteilung sowie der Landnutzungs- und Bodenparametrisierung in den Modellen berücksichtigt. Die Anpassungen basieren auf der in Kapitel 2.3 beschriebenen landnutzungsabhängigen Bodenparametrisierung. Die verschiedenen Szenarien wurden ereignisbasiert berechnet und ausgewertet, wobei die Veränderungen einen Monat vor Ereignisbeginn in den kalibrierten Modelllauf integriert wurden. Ziel dieses gebietsübergreifend einheitlichen Vorgehens war die Gewährleistung einer möglichst guten Vergleichbarkeit der Vorbedingungen zwischen den Gebieten.

## Wirksamkeit der Maßnahmen

Mit den Szenarien Extensivierung der Landwirtschaft und Aufforstung können ereignis- und gebietsübergreifend die größten Scheitelabminderungen von bis zu ca. 13 % bzw. ca. 9 % (HQ<sub>100</sub>, potenziell realistischer Umfang) erreicht werden (Abb. 11). Dabei sind die Maßnahmen bei advektiven Ereignissen meist wirksamer als bei konvektiven Ereignissen. Die ermittelten Wirksamkeiten unterscheiden sich stark zwischen den Gebieten, was vor allem auf die unterschiedliche potenziell veränderliche Einzugsgebietsfläche zurückzuführen ist. Aufgrund der sehr geringen Ackerflächen in den Gebieten der Mangfall sind die Wirksamkeiten der entsprechenden Maßnahmen in diesem Gebiet sehr gering. Die mittleren Scheitelabminderungen der Gebiete bei einem HQ<sub>100</sub> sind bei einem potenziell realistischem Umfang bei der Aufforstung (4,9 %) und der Extensivierung der Landwirtschaft (3,4 %, ohne Mangfall: 5,5 %) am größten. Geringere mittlere Abminderungen konnten für die Szenarien des ökologischen Waldumbaus (1,5 %) und der Entsigelung (1,0 %) festgestellt werden. Die Maßnahmen der Bewirtschaftung haben mit 0,6 % (Direktsaat, ohne Mangfall: 1,0 %) und 0,4 % (konservierende Bewirtschaftung, ohne Mangfall: 0,6 %) nur einen geringfügigen Effekt, wohingegen bei einem HQ<sub>5</sub> (adv) mit im Mittel 3,4 % bzw. 3,6 % (jeweils ohne Mangfall) noch eine deutliche Abminderung festgestellt werden konnte. Beim Vergleich der Scheitelabminderung je % veränderter Einzugsgebietsfläche weisen Entsigelungsmaßnahmen das größte Potenzial, aber auch die größte Ereignisabhängigkeit auf. Die mögliche Veränderung durch Aufforstungs- oder Extensivierungsmaßnahmen ist deutlich größer als die infolge von konservierender Bewirtschaftung, Direktsaat oder ökologischem Waldumbau.

Der Vergleich der Ergebnisse mit den in DWA-M550 (2015) zusammengefassten Scheitelabminderungen zeigt grundsätzlich einen ähnlichen Wertebereich (Abb. 11). Die Vergleichbarkeit der Ergebnisse ist jedoch aus verschiedenen Gründen nur bedingt gegeben. Die deutliche Abhängigkeit der Wirksamkeit von der Ereignis- und Gebietscharakteristik erschwert einen direkten Vergleich der Wertebereiche des DWA-Merkblatts mit den ermittelten Ergebnissen. Eine weitere Einschränkung ist die Vergleichbarkeit der Szenarienumsetzung. Diese beinhaltet die Wahl des hydrologischen Modells, die Parameterveränderungen und den gewählten Flächenumfang der Änderungen. Entsprechend ist die Größe beider Stichprobenumfänge im Vergleich zur Anzahl der Einflussfaktoren nicht ausreichend groß, um eine belastbare Aussage zum möglichen bzw. wahrscheinlichen Wertebereich der einzelnen Maßnahmen zu treffen. Die Ergebnisse können allerdings als Orientierung dienen.

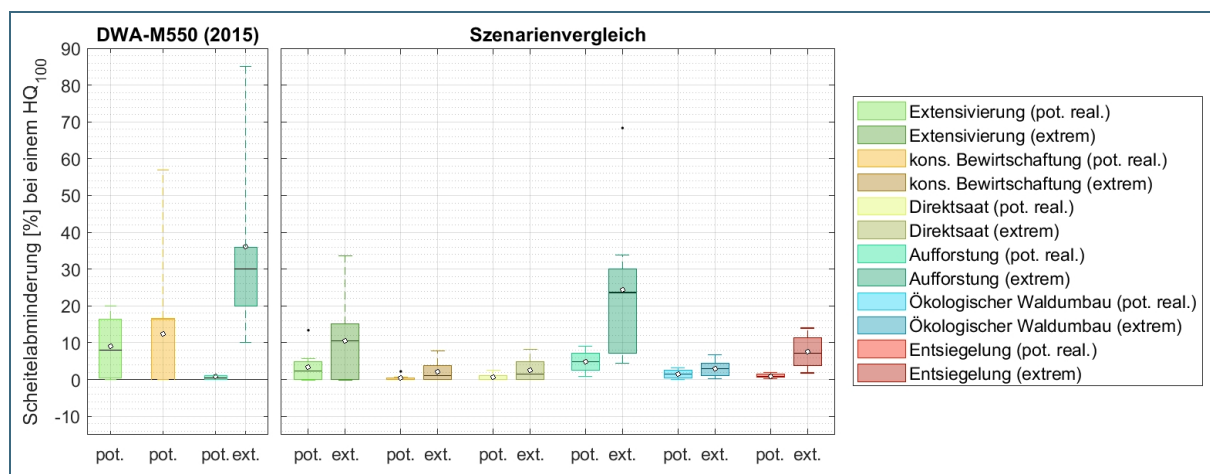


Abb. 11: Vergleich der ermittelten Wertebereiche der Szenarien („pot.“: potenziell realistischer Umfang und „ext.“: Extremszenario) mit den Ergebnissen aus DWA-M550 (2015)



## Gebiets- und szenarienübergreifende Aussagen

Die räumliche Variabilität der Scheitelabminderung ermöglicht die Definition von für die jeweilige Maßnahme wirksamen Flächen und begründet den größeren Wertebereich der Scheiteländerungen bei kleinen Einzugsgebieten. Jedoch erschwert gleichzeitig die zugrundeliegende räumliche und zeitliche Variabilität der Wasserbilanzkomponenten die Interpretation der Ergebnisse.

Zur Analyse der Zusammenhänge, der Bestimmung von wichtigen Einflussfaktoren und der Bewertung der Übertragbarkeit wurden deshalb *Regression Trees* bzw. *Random Forests* erstellt. Der wichtigste Einflussfaktor auf die Scheitelabminderung ist der Anteil der im Rahmen des Szenariums veränderten Einzugsgebietsfläche. Weitere wichtige Faktoren sind die Veränderung des Blattflächenindex, der Makroporenkapazität, der Trockenrohddichte, des organischen Anteils, der nutzbaren Feldkapazität und des Vegetationsbedeckungsgrads. Während der Anteil der veränderten Einzugsgebietsfläche entscheidend ist, hat die absolute Einzugsgebietsfläche selbst nur einen geringen Einfluss auf die Wirksamkeit. Die Analysen haben zudem gezeigt, dass die Scheitelabminderungen gut auf Ereignisse oder Einzugsgebiete mit ähnlicher Charakteristik projiziert werden können. Eine Übertragung auf Ereignisse oder Gebiete mit abweichender Charakteristik, auf andere Umsetzungsumfänge oder auf weitere Szenarien ist dagegen auf Basis der durchgeführten Simulationen nicht möglich.

### Schlussfolgerungen

- Der gewählte Modellierungsansatz entspricht dem Stand der Forschung und ist dementsprechend im Rahmen der genannten Unsicherheiten und insbesondere im Vergleich zu einfacheren Methoden, wie z.B. dem SCS-Verfahren belastbar. Die gebietsübergreifend einheitliche Modellparametrisierung sowie Umsetzung der Szenarien führt zudem zu einer erhöhten Belastbarkeit des Gebietsvergleichs.
- Die Wirksamkeiten der untersuchten Maßnahmen zeigen, dass insbesondere Erhöhungen der Grünland- und Waldflächen in einem Einzugsgebiet selbst bei einem HQ<sub>100</sub> einen Beitrag zum Hochwasserschutz leisten können. Der Einfluss der Bewirtschaftungsmaßnahmen ist dagegen überwiegend auf Ereignisse mit kleineren Jährlichkeiten beschränkt.
- Die große Variabilität der ermittelten Szenarienwirksamkeiten zwischen den Gebieten und Ereignissen wird durch die Überlagerungseffekte verschiedener Einflussfaktoren verursacht. Diese beinhalten neben verschiedenen Ereignis- und Gebietseigenschaften vor allem den Flächenanteil der möglichen Veränderung.
- Eine Übertragbarkeit der Simulationsergebnisse konnte nur bei ähnlichen Gebiets- und Ereigniseigenschaften festgestellt werden, wodurch allgemeingültige Aussagen anhand des berücksichtigten Simulationsumfangs nicht möglich sind. Allerdings besteht weiterhin die Möglichkeit, dass bei einer sinnvollen Erweiterung des Datensatzes eine Übertragbarkeit auf eine größere Anzahl von Gebieten, Ereignissen und Szenarien erreichbar wäre.

### Weitere Informationen

TESCHEMACHER, S., NEUMAYER, M., DISSE, M. & RIEGER, W. (2017): Retentionspotenzial von Aufforstungsmaßnahmen in einem voralpinen Einzugsgebiet. *LWF Wissen*, 82, 11-18.

TESCHEMACHER, S. & DISSE, M. (2019): Land use change and agricultural soil cultivation as flood mitigation measures at the catchment scale. *Geophysical Research Abstracts*. Vol.21, Vortrag, EGU2019-15206. Wien.

### 3.3 Hydrologische Sensitivitätsanalysen

Um die Wirkung einzelner Einflussfaktoren auf den Hochwasserabfluss detaillierter analysieren und bewerten zu können, wurden eindimensionale Sensitivitätsanalysen ausgewählter Modellparameter durchgeführt.

#### Hintergrund und Zielsetzung

Während der Modellparametrisierung, der Kalibrierung und der Durchführung der Landnutzungs- und Bewirtschaftungsszenarien wurden neben den konzeptionellen Kalibrierungsparametern auch Parameter mit physikalischem Hintergrund definiert. Die Werte dieser Parameter stammen aus Kartenwerken oder Literaturquellen und unterliegen verschiedenen Unsicherheiten. Mithilfe von Sensitivitätsanalysen kann der Einfluss einzelner Eingangsparameter auf die Modellergebnisse analysiert, quantifiziert und verglichen werden.

Anhand von eindimensionalen Sensitivitätsanalysen sollen die Bandbreiten möglicher Scheitel- und Volumenänderungen sowie normierte Parametersensitivitäten gebiets- und ereignisübergreifend ermittelt werden. Ziel ist dabei, die Modellparameter mit physikalischer Grundlage zu bestimmen, die einen besonders großen Einfluss auf den Abfluss bei Hochwasserereignissen haben und deren korrekte Abbildung dementsprechend bei einer Modellparametrisierung und -kalibrierung sowie einer Maßnahmenuntersuchung von besonderer Relevanz ist.

#### Methodik und Vorgehensweise

Die eindimensionalen Sensitivitätsanalysen wurden für Parameter durchgeführt, die im Rahmen der Landnutzungs- und Bewirtschaftungsmaßnahmen verändert wurden und mit deren Hilfe dementsprechend der Einfluss des Landnutzungstyps auf die Abflussprozesse beschrieben werden kann. Die Methodik hat den Vorteil, dass Veränderungen des Simulationsergebnisses dem jeweils untersuchten Parameter eindeutig zugeordnet werden können, jedoch lassen sich auftretende Interaktionen zwischen den Parametern nicht quantifizieren. Die gewählten Parameter beinhalten vier Bodenparameter (Dichte, organischer Anteil, Makroporenkapazität, Makroporentiefe) und sechs Landnutzungsparameter (Blattflächenindex, Pflanzenhöhe, Wurzeltiefe, Vegetationsbedeckungsgrad, Stomatawiderstand, Boden-Oberflächenverdunstungswiderstand), deren Wertebereiche in jeweils neun Stufen unterteilt wurden.

Die Durchführung der Sensitivitätsanalysen entspricht dem Vorgehen der Landnutzungs- und Bewirtschaftungsszenarien (Kapitel 3.2), bei dem das Ereignis an einen einmonatigen Vorlauf mit veränderten Parameterwerten angehängt wurde.

#### Scheitel- und Volumenänderungen

Die Zusammenhänge zwischen den einzelnen Parametern und der Scheiteländerung haben gebietsübergreifend meist einen ähnlichen Verlauf. Die Spannweiten der Änderungen unterscheiden sich jedoch in Abhängigkeit der Gebiete, wobei sie von den Mangfall-Gebieten über die Main-Gebiete und die Glonn zum Gebiet des Otterbachs zunehmen. Lediglich bei der Makroporenkapazität sind die Unterschiede zwischen advektiven und konvektiven Ereignissen größer als zwischen den Gebieten. Die maximalen Bandbreiten der Scheitel- und Volumenänderungen treten bei den Variationen von Dichte und Oberflächenverdunstungswiderstand auf. Mittlere Änderungen konnten bei Blattflächenindex, Vegetationsbedeckungsgrad und Stomatawiderstand festgestellt werden. Der Einfluss von organischem Anteil und Makroporentiefe wirkt sich überwiegend auf die Änderungen bei advektiven Ereignissen aus, bei denen die Sättigung der limitierende Faktor ist. Der Effekt der Makroporenkapazität ist dagegen auf konvektive Ereignisse beschränkt, da durch die hohe Niederschlagsintensität die Infiltrationskapazität limitierend wirkt. Die Änderungen durch die Pflanzenhöhe und die Wurzeltiefe sind allgemein gering.

Die Ergebnisse zeigen große Unterschiede zwischen den Parametern in Bezug auf die Veränderung der Hochwasserscheitelabflüsse und verdeutlichen damit die unterschiedliche Relevanz der jeweils beeinflussten Prozesse für den Abfluss. Die daraus resultierende Reihung der Parameterwichtigkeit ermöglicht eine Priorisierung bei der Modellparametrisierung und -kalibrierung. Je größer die im Rahmen der Sensi-

tivitätsanalysen ermittelte Spannweite der Scheitel- und Volumenänderung ist, desto größer sind die Unsicherheiten der Modellergebnisse. Dementsprechend ist es bei diesen Parametern besonders wichtig, die Größe der Wertebereiche z.B. basierend auf Messdaten zu reduzieren.

### Normierte Parametersensitivität

Durch die Berücksichtigung des Sensitivitätsindex bzw. der normierten Parametersensitivitäten konnte bei den Analysen die Abhängigkeit der Bewertung vom Parameterwertebereich reduziert werden, da für die einzelnen Stufen jeweils die Sensitivität einer prozentualen Änderung bewertet wird. Die Reihung der Parameterwichtigkeit verändert sich dadurch geringfügig im Vergleich zur Betrachtung der Bandbreiten der Scheitel- und Volumenänderungen. Die Dichte ist weiterhin der mit Abstand sensitivste Parameter. Der Vegetationsbedeckungsgrad wird durch die Normierung deutlich höher eingestuft. Durch die Betrachtung der Standardabweichung der normierten Sensitivitäten konnte zudem bewertet werden, wie gleichmäßig sich ein Scheitelabfluss bei einer kontinuierlichen Parameteränderung entwickelt. Hierbei konnten sprunghafte Veränderungen insbesondere bei der Dichte, dem Boden-Oberflächenverdunstungswiderstand und dem organischen Anteil festgestellt werden.

Parameter mit großer mittlerer Sensitivität und großer Standardabweichung können selbst bei kleinen prozentualen Veränderungen große, durch mögliche Sprünge der Zusammenhänge schwer vorherzusagende Variationen der Ergebnisgrößen verursachen. Sie sollten daher detaillierter betrachtet und entsprechend parametrisiert werden.

### Schlussfolgerungen

- Die Ergebnisse der durchgeführten Sensitivitätsanalysen können bei zukünftigen Modellparametrisierungen, -kalibrierungen und Szenariendefinitionen dazu dienen, relevante Parameter zu selektieren, um deren Wertebereiche bereits vorab mithilfe von Messkampagnen oder detaillierten Literaturlauswertungen möglichst weit einzuschränken.
- Der Fokus sollte dabei auf Parameter gelegt werden, die eine große Spannweite, eine große mittlere normierte Sensitivität und einen nichtlinearen Verlauf haben, der zu einer großen Standardabweichung der normierten Sensitivität führt. Diese beinhalten insbesondere den Boden-Oberflächenwiderstand sowie die Dichte und den organischen Anteil.
- Die große Sensitivität der im Rahmen der landnutzungsabhängigen Bodendefinition berücksichtigten Modellparameter (Dichte, org. Anteil) verdeutlicht die Notwendigkeit einer auf individuellen Messdaten basierenden Definition landnutzungs- und bewirtschaftungsabhängiger Bodenmodellprofile. Diese würden sowohl zu einer besseren Parametrisierung hydrologischer Modelle beitragen als auch die Unsicherheiten von Szenarien der Landnutzungs- und Bewirtschaftungsänderung maßgeblich reduzieren.

### Weitere Informationen

TESCHEMACHER, S. (2017): Land use and soil parameter sensitivities in WaSiM and their impact on flood generation. *3rd WaSiM User Conference*, 18-19. Oktober 2017 (Vortrag). Garching.

### 3.4 Dezentrale Hochwasserrückhaltebecken

Dezentrale Hochwasserrückhaltebecken sind meist kleine Rückhalteräume, die dezentral in einem Einzugsgebiet angeordnet werden und in Kombination wirken. Maßgeblich ist dabei nicht die lokale Wirkung der Einzelbecken, sondern die kombinierte Wirksamkeit am zu schützenden Standort.

#### Hintergrund und Zielsetzung

Im Bereich des dezentralen und natürlichen Hochwasserrückhalts (DWA-M550 2015) zählen dezentrale Kleinrückhaltebecken zu den potenziell wirksamen Maßnahmen. Durch die notwendigen baulichen Maßnahmen werden sie den technischen Hochwasserschutzmaßnahmen zugeordnet. Im Rahmen des Projekts wurden sehr kleine und kleinste Stauanlagen berücksichtigt. Die Anwendung der Bemessungsvorschriften basiert auf dieser Klassifikation der Hochwasserrückhaltebecken und wird in DWA-M522 (2015) basierend auf DIN 19700-12 (2004) geregelt. Die Implementierung der Becken erfolgte als ungesteuerte Becken im Hauptschluss der Gewässer.

Ziel der durchgeführten Beckenszenarien war die Ermittlung der Bandbreite des im Rahmen dieser Maßnahme zur Verfügung stehenden Retentionspotenzials. Zudem sollten die Einflüsse der Ereignis- und Gebietseigenschaften, der Standort- und Drosseloptimierung und der Beckenanzahl berücksichtigt und bewertet werden.

#### Methodik und Vorgehensweise

Die Beckenstandortanalyse und die Wirkungsanalyse der Beckenkombinationen wurden mithilfe der MATLAB-Tools *LOCASIN* und *TOBI* durchgeführt.

#### Beckenstandortanalyse

Die teilweise großen Einzugsgebietsflächen erforderten eine automatisierte Vorgehensweise bei der Bestimmung von Beckenstandorten und deren Eigenschaften. *LOCASIN* (*LOCation detection of retention and detention bASINs*) ist ein MATLAB-Tool, das eine automatische und schnelle Bestimmung, Charakterisierung und Bewertung von Beckenstandorten ermöglicht (Abb. 12). Die Standortbestimmung basiert auf einer numerischen Rasteranalyse, um die optimale Dammausrichtung, die Dammgeometrie, die Beckenfläche und das Beckenvolumen zu bestimmen. Im Rahmen des Projekts wurden im Vergleich zur auf GitHub frei verfügbaren Version (<https://github.com/steschemacher/LOCASIN>) vereinfachte Ansätze zur Bestimmung des Dammvolumens und der Standortbewertung angewandt. Als Grenzwerte für die Ermittlung der Beckenstandorte wurde ein Gesamtstauraum von bis zu 50 000 m<sup>3</sup> und eine maximale Höhe des Absperrbauwerks von 4 m definiert. Zudem wurden Standorte ausgeschlossen, die zu einem Einstau von Restriktionsbereichen, wie z.B. Siedlungsflächen, führen würden.



Abb. 12:  
Beispielhafte Darstellung verschiedener Beckenstandorte im Einzugsgebiet der Glonn

### Wirksamkeitsanalyse

Mithilfe des MATLAB-Tools *TOBI* (*Throttle and location Optimization of BasIns*) kann die Wirksamkeit dezentraler Hochwasserrückhaltebecken sowie deren Interaktion untereinander untersucht werden. Zur Ermittlung der Wirksamkeit einer Beckenkombination wurde in MATLAB das Abflussrouting-Teilmodell aus WaSiM nachgebildet. Die Berechnung erfolgt schrittweise in Fließrichtung, wobei die Retentionswirkung der Becken über das Prinzip der stehenden Retention berechnet wird. Die Optimierung der Drosselweiten erfolgt ebenfalls schrittweise, um die Verformung der Hochwasserwelle durch oberstrom liegende Rückhaltebecken zu berücksichtigen. Alternativ können vorab definierte Drosseldurchmesser eingelesen werden. Die Wirksamkeitsanalyse dezentraler Rückhaltebecken wurde einerseits für zufällig gewählte Beckenkombinationen und andererseits für standortoptimierte Kombinationen durchgeführt. Um den Einfluss der Drosseloptimierung auf die Wirksamkeit quantifizieren zu können, wurden die Wirksamkeiten mit verschiedenen Drosselweiten berechnet. Einerseits wurden die auf das jeweils ablaufende Ereignis optimierten Drosselweiten der Kombinationen berücksichtigt und andererseits die auf die übrigen Ereignisse optimierten Drosselweiten eingelesen und als feste Drosselweiten definiert.

### Beckenstandortanalysen

Durch eine Analyse der Topographie im Bereich der Gewässer konnten in den vier Untersuchungsgebieten zwischen 0,9 und 2,0 für die Wirksamkeitsanalysen geeignete Beckenstandorte pro km<sup>2</sup> bestimmt werden, die einem spezifischen Volumen von 8,1 mm bis 32,3 mm entsprechen. Das mittlere Beckenvolumen liegt zwischen ca. 10 000 m<sup>3</sup> im Gebiet der Mangfall und ca. 20 000 m<sup>3</sup> im Gebiet der Glonn. Die große Anzahl der ermittelten potenziellen Beckenstandorte war die Basis für eine aus hydrologischer Sicht sinnvolle Standortwahl bei den Wirksamkeitsanalysen.

### Wirksamkeitsanalysen

Im Rahmen der Wirksamkeitsanalysen wurden ca. 1,3 Mio. Beckenkombinationen berechnet und analysiert, um die Einflussfaktoren auf die Wirksamkeit bestimmen und bewerten zu können und gebiets- und skalenübergreifende Aussagen zu treffen.

### Bewertung der Einflussfaktoren

Die wichtigsten Einflussfaktoren der Wirksamkeit sind das spezifische Retentionsvolumen, das spezifische Anstiegsvolumen des Ereignisses und die Einzugsgebietsgröße.

Eine aus hydrologischer Sicht sinnvolle *Wahl der Beckenstandorte* führt zu einer maßgeblichen Erhöhung der Scheitelabminderung. Durch eine günstige Beckenvorauswahl konnte bei der zufälligen Selektion der Kombinationen eine Steigerung der Scheitelabminderung um ca. 10 % (Median) erreicht werden. Die Durchführung einer Standortoptimierung führte zu einer weiteren Zunahme der Scheitelabminderung um ca. 50 % (Median) verglichen mit denen der günstigen Vorauswahl. Die standort- und drosseloptimierten Beckenkombinationen erreichen damit im Mittel ca. 50-60 % der Scheitelabminderung, die durch eine horizontale Kappung der Ganglinie um das berücksichtigte Retentionsvolumen erreicht worden wäre.

Die zu erwartenden Scheitelabminderungen variieren stark in Abhängigkeit von *Gebiets- und Ereigniseigenschaften* und liegen bei einem advektiven HQ<sub>100</sub> und einem spezifischen Volumen von 5 mm im Bereich von ca. 15-30 % (Abb. 13). Die erreichten Scheitelabminderungen bei einem bestimmten spezifischen Volumen werden dabei deutlicher nach den Gebieten gruppiert als nach den Ereignissen. Für ein Gebiet nimmt die Scheitelabminderung tendenziell mit zunehmendem Abflussvolumen und Scheitelabfluss der Ereignisse ab.

Der Einfluss der *Drosseloptimierung* unterscheidet sich stark zwischen den Gebieten und den Ereignissen. Tendenziell wirkt sich eine Drosseloptimierung auf ein kleineres Ereignis (Unterdimensionierung der Drosselweiten) positiver auf die zu erwartende Scheitelabminderung aus als eine Drosseloptimierung auf ein größeres Ereignis (Überdimensionierung der Drosselweiten).

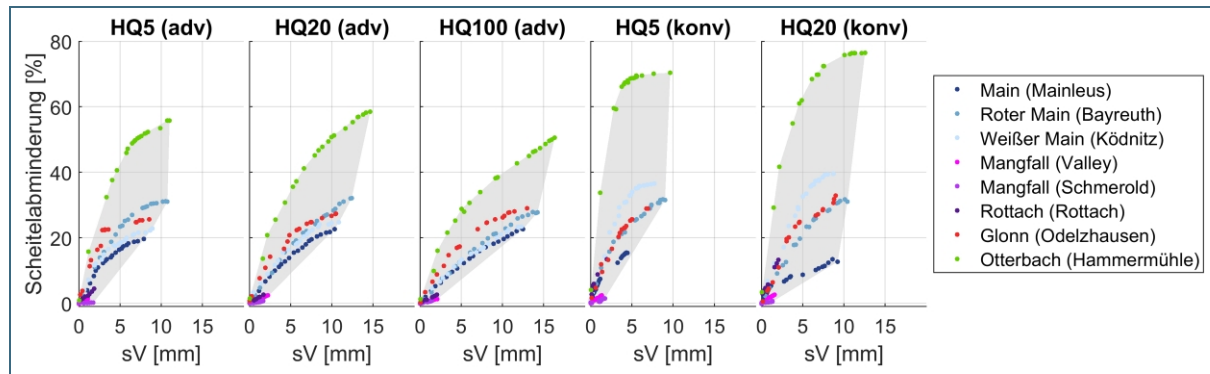


Abb. 13: Gebietsübergreifende Betrachtung der standort- und drosseloptimierten Beckenkombinationen für die fünf Hochwasserereignisse

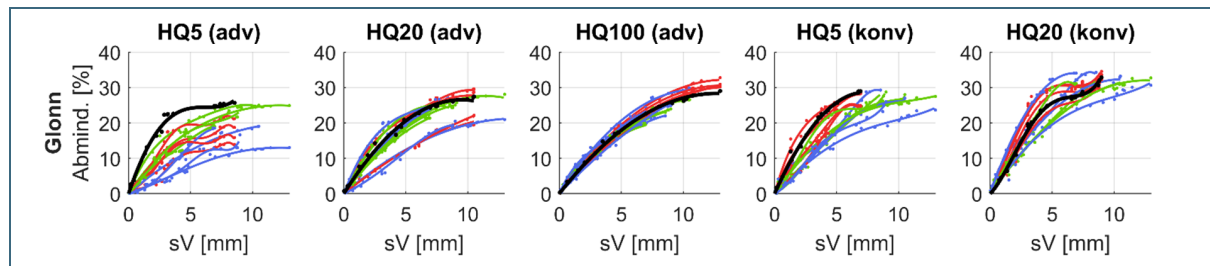


Abb. 14: Abhängigkeit der Scheitelabminderung von der Standort- und Drosseloptimierung für das Einzugsgebiet der Glonn (schwarz: standort- und drosseloptimiert, grün: drosseloptimiert, rot: standortoptimiert, blau: nicht standort- oder drosseloptimiert)

Die Streuung der aus den verschiedenen Drosseloptimierungen resultierenden Wirksamkeiten um die Wirksamkeit der auf das ablaufende Ereignis drosseloptimierten Beckenkombination ist dementsprechend beim größten untersuchten Ereignis am geringsten, da in diesem Fall alle übrigen Ereignisse kleiner sind als das untersuchte Ereignis. Die Wirksamkeit bei diesem Ereignis (HQ<sub>100, adv</sub> bzw. HQ<sub>300, adv</sub> an der Glonn) wird also am wenigsten von der Drosseloptimierung beeinflusst. Dieser Zusammenhang ist beispielhaft in Abb. 14 für das Einzugsgebiet der Glonn dargestellt (ohne HQ<sub>300</sub>), wobei die Farben die verschiedenen Kombinationen der Standort- bzw. Drosseloptimierung angeben.

*Überlagerungseffekte* haben einen großen Einfluss auf die Scheitelabminderung, konnten aber wegen der Komplexität der Zusammenhänge zwischen Gebietsstruktur und Ereignischarakteristik nur beispielhaft untersucht werden. In der Standortoptimierung der Beckenkombinationen werden die durch diese Überlagerungen mit seitlichen Zuflüssen verursachten Veränderungen der Wirksamkeit berücksichtigt. Der Einfluss der *Beckenanzahl* war im Vergleich zu den Überlagerungseffekten gering.

### Gebiets- und skalenübergreifende Aussagen

Die Bandbreite der ermittelten Scheitelabminderungen nimmt mit zunehmender Einzugsgebietsgröße ab. Jedoch zeigt der Vergleich der Gebietsgrößen und ermittelten Wirksamkeiten der Untersuchungsgebiete, dass die Einzugsgebietsgröße nicht der einzige maßgebliche Faktor ist. Eine allgemeingültige Aussage bzw. Vorhersage einer zu erwartenden Scheitelabminderung kann entsprechend ohne eine detaillierte Analyse unter Berücksichtigung der genannten Einflussfaktoren nicht getroffen werden.

Grundsätzlich ist ein ideal gesteuertes Becken direkt vor dem zu schützenden Standort wirksamer als eine dezentrale Anordnung ungesteuerter, kleiner Rückhaltebecken des gleichen Retentionsvolumens, da diese von Überlagerungseffekten beeinflusst werden. Der Nutzen dezentraler Rückhaltebecken liegt entsprechend darin, dass aufgrund der Topographie einfacher erschließbare Rückhalteräume genutzt werden können und durch die verteilte Anordnung die Scheitelabflüsse in größeren Bereichen des Einzugsgebiets reduziert werden können. Sie sind entsprechend zu empfehlen, wenn nicht nur am Gebietsauslass, sondern auch in den Gewässerabschnitten oberstrom eine Wirkung gewünscht wird. Die im Rahmen des

Arbeitspakets ermittelten Scheitelabminderungen haben gezeigt, dass mithilfe dezentraler Rückhaltebecken auch bei größeren Hochwasserereignissen und in den größeren Untersuchungsgebieten (untersucht bis ca. 1200 km<sup>2</sup>) ein maßgeblicher, scheidelreduzierender Effekt erreicht werden kann.

### Schlussfolgerungen

- Die angewandten Methoden zur Beckenstandortanalyse, Standortoptimierung, Drosseloptimierung und Wirksamkeitsanalyse bieten ein großes Potenzial bei der Entwicklung dezentraler Rückhaltebeckenkombinationen im Rahmen von Hochwasserschutzkonzepten.
- Die ermittelten Scheitelabminderungen im Bereich von ca. 15-30 % (HQ<sub>100</sub>, sV = 5 mm) verdeutlichen das hydrologische Potenzial der untersuchten Maßnahme. Die große Bandbreite zeigt gleichzeitig den Einfluss der Gebietseigenschaften.
- Der Effekt der Drosseloptimierung auf die Scheitelabminderung in Verbindung mit dem Ziel einer ereignisübergreifenden Bewertung ungesteuerter Beckenkombinationen zeigt, dass eine Übertragung der für Einzelbecken entwickelten Bemessungsvorschriften auf Beckenkombinationen möglicherweise nicht optimal ist. Diese sollten entsprechend auf ihre Anwendbarkeit geprüft und bei Bedarf angepasst werden.

### Weitere Informationen

TESCHEMACHER, S., & RIEGER, W. (2018). Ereignisabhängige Optimierung dezentraler Kleinrückhaltebecken unter Berücksichtigung von Standort, Retentionsvolumen und Drosselweite. *Hydrologie & Wasserbewirtschaftung*, 62(5), 321–335.

TESCHEMACHER, S. (2019): LOCASIN – LOCation detection of retention and detention bASINs: MATLAB-Tool. Verfügbarkeit auf GitHub: <https://github.com/steschemacher/LOCASIN> .

TESCHEMACHER, S. & DISSE, M. (2020): Automated location optimization of detention basins as a contribution to an efficient flood mitigation strategy. *EGU General Assembly 2020*, Online, 4–8 May 2020, EGU2020-18342.

TESCHEMACHER, S., BITTNER, D. & DISSE, M. (2020): Automated Location Detection of Retention and Detention Basins for Water Management. *Water*.

## 4 Hydraulische Szenarien und Sensitivitätsanalysen

Die hydraulischen Szenarien und Sensitivitätsanalysen beinhalten Wirksamkeitsanalysen verschiedener Methoden der Renaturierung und Auengestaltung sowie eine Betrachtung unterschiedlicher Einflussfaktoren anhand charakteristischer Modellabschnitte. Zudem wurde der Beitrag von Biberdämmen zum Hochwasserrückhalt untersucht.

### 4.1 Auengestaltung und Gewässerrenaturierung

Maßnahmen der Renaturierung und Auengestaltung werden entlang des Gewässers umgesetzt und führen durch eine Anpassung des Gewässerverlaufs und der angrenzenden Aue zu Veränderungen der Abflusseigenschaften.

#### Hintergrund und Zielsetzung

Unter Renaturierung versteht man die Wiederherstellung der Natürlichkeit anthropogen beeinflusster Ökosysteme bzw. die Erhaltung und Förderung von natürlichen Ökosystemen (StMUV 2014). Die meisten Fließgewässer in Bayern wurden in den letzten Jahrhunderten ausgebaut, um intensivere Landnutzung und Besiedlung zu ermöglichen. Im Zuge von Begradigungen und Laufverkürzungen sind eine Vielzahl individueller Charakteristika sowie natürlicher Retentionsräume verloren gegangen.

Der Schwerpunkt dieser Studie liegt auf der Untersuchung des möglichen Beitrags von Renaturierungs- und Auengestaltungsmaßnahmen zur Stärkung des natürlichen Hochwasserrückhalts. Das Renaturierungsziel war dabei eine potenziell natürliche, gewässerspezifische Morphologie und Auenlandschaft. Dabei handelt es sich um Extremszenarien der Renaturierung, in denen, bis auf Bereiche mit hohen Restriktionen gegenüber einer Veränderung (z. B. Siedlungsgebiete), der gesamte theoretische Auenbereich der Hauptgewässer für die Gestaltung des natürlichen Flusslaufs und Auwaldes genutzt wurde. Durch eine weitgehend homogene und prozessbasierte Modellierung verschiedener Gewässer wurde eine gebietsübergreifende Wirksamkeitsbetrachtung ermöglicht.

#### Methodik und Vorgehensweise

Innerhalb der Studie wurden vier Methoden der Renaturierung und Auengestaltung berücksichtigt, die aus dem die Realität abbildenden Ist-Zustand entwickelt wurden und sich in ihrem Detailgrad unterscheiden (Abb. 15).

In Methode 1 wurde die Laufverlängerung, Querprofiländerung und Auwaldentwicklung getrennt und als Kombination modelliert. Da die festgelegten Veränderungen unabhängig vom Leitbild des jeweiligen Gewässers definiert wurden, erfüllt diese Betrachtung nicht das angestrebte Renaturierungsziel und wurde daher auch nicht weiterverfolgt. Die Modellierungsmethoden 2 bis 4 basieren demgegenüber auf einem ganzheitlichen, gewässerspezifischen Renaturierungsansatz. Dementsprechend wurde das jeweils spezifische hydromorphologische Leitbild einer potenziell natürlichen Auenlandschaft anhand von gewässer- und vorlandmorphologischen Untersuchungen sowie auf Grundlage von Literatur zur Gewässertypologie (POTTGIESSER & SOMMERHÄUSER 2008, DAHM et al. 2014, KOENZEN 2005, BRIEM 2002) abgeleitet und in Modellparameter umgesetzt. Der Vergleich der vier Ansätze zeigt den zunehmenden Detaillierungsgrad der modellierten Auenentwicklung, aber auch den damit einhergehenden höheren Datenbedarf, den größeren Aufwand der Modellerstellung sowie den zunehmenden Rechenaufwand.

Insgesamt wurden für die fünf hydraulischen Untersuchungsgebiete Weißer Main, Roter Main, Mangfall, Glonn und Otterbach jeweils drei hydrodynamische Modellszenarien aufgebaut. Das *Ist-Mit* Szenario spiegelt den heutigen Ausbauzustand der Gewässer mit allen Bauwerken wider. Das *Ist-Ohne* Szenario basiert auf dem *Ist-Mit* Modell, jedoch wurden den Hochwasserablauf beeinflussende Bauwerke (z.B. den Talraum querende Straßendämme) entfernt oder durchlässig gestaltet.



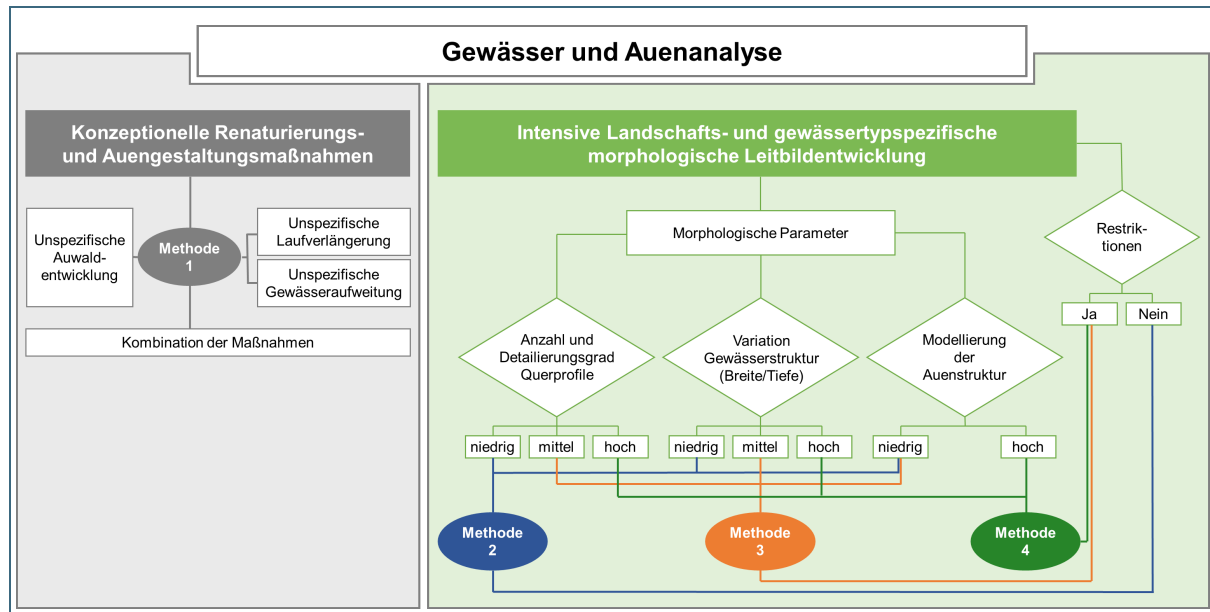


Abb. 15: Vergleichende Gegenüberstellung der konzeptionellen (links) und der drei ganzheitlichen (rechts) Renaturierungsmethoden im hydrodynamischen Modell

Das dritte Modellszenario basiert auf dem *Ist-Ohne* Modell und stellt den renaturierten Zustand des Gewässers dar, wobei je Gebiet maximal zwei der zuvor beschriebenen Methoden umgesetzt wurden. Durch die Bauwerksentfernung bzw. -anpassung in beiden Modellszenarien (*Ist-Ohne*, *Renat*) wurden die Retentionseffekte von anthropogenen Strukturen reduziert, um die Einflüsse der Renaturierungsmaßnahmen unter Berücksichtigung natürlicher Gebietseigenschaften abschätzen zu können. In Tab. 5 sind die jeweils verwendeten Renaturierungsmethoden sowie die daraus resultierenden Gewässereigenschaften zusammengefasst. Die Bandbreite der Fließwegverlängerungen liegt in den Gebieten zwischen ca. 9 % am Otterbach und 87 % an der Glonn. Dementsprechend hat sich der Windungsgrad an der Glonn nahezu verdoppelt, wohingegen der Unterschied am Otterbach vergleichsweise gering ist.

Tab. 5: Übersicht der wichtigsten Gebiets- und Modellcharakteristika der fünf Untersuchungsabschnitte

Untersuchungsgebiet	Einheit	Weißer Main	Roter Main	Mangfall	Glonn	Otterbach
Renaturierungsmethode(n)		3 + 4	3	1 + 2	2 + 3	3
Talsolehnegefälle	[%]	4,1	3,5	7,4	1,5	10,1
Länge Hauptfließgewässer <i>Ist-Mit</i> bzw. <i>Ist-Ohne</i>	[km]	24,2	26,1	9,1	13,6	15,6
Länge Hauptfließgewässer <i>Renat</i>	[km]	30,8	31,8	10,9	25,4	17,0
Windungsgrad <i>Ist-Mit</i> bzw. <i>Ist-Ohne</i>	[-]	1,4	1,2	1,1	1,0	1,1
Windungsgrad <i>Renat</i>	[-]	1,7	1,5	1,3	1,9	1,3
Ø Sohlgefälle <i>Ist-Mit</i> bzw. <i>Ist-Ohne</i>	[‰]	3,0	2,9	7,0	1,5	8,9
Ø Sohlgefälle <i>Renat</i>	[‰]	2,3	2,4	5,8	0,8	8,1

Für die Wirksamkeitsbetrachtung wurden in allen Gebieten mit allen drei Modellszenarien fünf Hochwasserereignisse unterschiedlicher Jährlichkeit und zugrundeliegender Niederschlagscharakteristik simuliert. Am Gebiet der Glonn wurde zusätzlich ein 300-jährliches advektives Extremereignis berechnet. Der Gebietsvergleich der Renaturierung basiert auf den nach Methode 3 entwickelten Modellen (Mangfall: Methode 2). Die detaillierte Abbildung der Auenstruktur nach Methode 4 wurde beispielhaft für den Untersuchungsabschnitt des Weißen Mains umgesetzt und wird in Kapitel 4.2 beschrieben.

### Wirksamkeit der Renaturierungs- und Auengestaltungsmaßnahmen

Die erreichten Scheitelabminderungen und -verzögerungen der Maßnahmenumsetzungen sind stark von den Untersuchungsgebieten und Hochwasserereignissen abhängig (Abb. 16). Innerhalb der einzelnen Gebiete führten eine zunehmende Ereignisjährlichkeit und ein zunehmendes Abflussvolumen meist zu einer Abnahme der resultierenden Wirksamkeit. Im Gebiet der Glonn konnten durch die Renaturierung mit einer maximalen Scheitelabminderung von 28,1 % (HQ<sub>5</sub>, konv) und einem maximalen zeitlichen Versatz von 7,75 h (HQ<sub>5</sub>, konv) über fünfmal höhere Wirksamkeiten als am Weißen Main erreicht werden, wo insgesamt die zweithöchsten Scheitelabminderungen auftraten (HQ<sub>5</sub>, konv: 5,1 %). Die untersuchten Maßnahmen haben jedoch nicht immer eine merkbare Wirksamkeit auf die Hochwasserwellen. Beim HQ<sub>100</sub> ist die Scheitelabminderung mit maximal 1,9 % (Glonn) gebietsübergreifend sehr gering, während im Gebiet der Mangfall ereignisübergreifend eine maximale Abminderung von 0,6 % erreicht wurde. Der Vergleich der Gebietsgrößen der fünf untersuchten Gewässer, und dabei insbesondere des Otterbachs und der Glonn, haben gezeigt, dass die Einzugsgebietsgröße nicht der maßgebliche Faktor für eine zu erwartende Scheitelabminderung ist. Die Wirksamkeit einer Gewässerrenaturierung wird vielmehr von einer Kombination verschiedener, sich gegenseitig beeinflussender Gebiets- und Ereignisseigenschaften (z. B. Sohlgefälle, Talform, Anstiegsvolumen, etc.) bestimmt.

Insgesamt resultieren die im Modell umgesetzten Renaturierungs- und Auengestaltungsmaßnahmen, mit Ausnahme der Glonn, welche ein großes Renaturierungspotenzial hinsichtlich Laufverlängerung und Auwaldentwicklung bietet, aufgrund der geringen zusätzlichen aktivierten Retentionsvolumina in vergleichsweise niedrigen Wirksamkeiten in Bezug auf die Abminderung von Hochwasserereignissen. Allerdings werden die Wirksamkeiten der Maßnahmen durch ein Zusammenspiel vieler gebietspezifischer Faktoren beeinflusst, die nur bedingt vorhergesagt werden können und dementsprechend nur über eine modellgestützte Einzelbetrachtung ermittelt werden können.

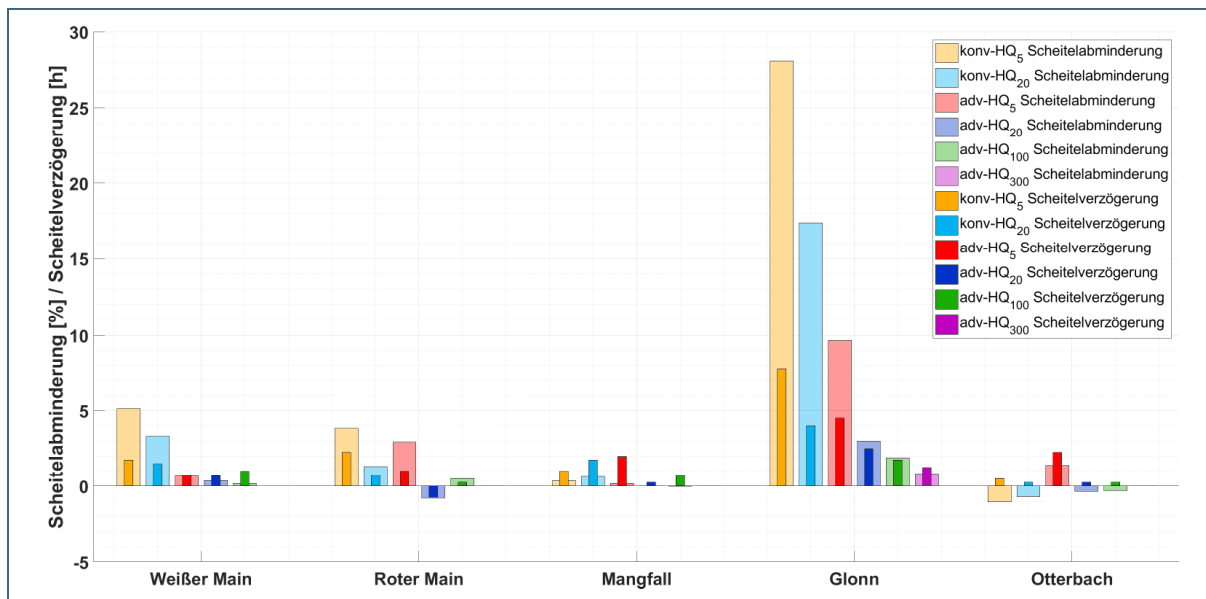


Abb. 16: Gebietsübergreifende Darstellung der Retentions- und Translationseffekte zwischen den Hochwasserscheiteln der Modellszenarien *Ist-Ohne* und *Renat* (Methode 3) am Gebietsauslass

## Skalenübergreifende Effekte

Die Analyse weiterer Abflussquerschnitte innerhalb der Modellierungsabschnitte hat gezeigt, dass sich die aus den Renaturierungs- und Auengestaltungsmaßnahmen resultierenden Scheitelabminderungen über den Gewässerverlauf meist kontinuierlich aufbauen, jedoch von lokalen Wellenüberlagerungen seitlicher Zuflüsse stark beeinflusst werden können. Diese Überlagerungseffekte sind von Gebiets- und Ereigniseigenschaften, wie beispielsweise der Gewässerstruktur oder der Niederschlagsverteilung, abhängig und unterscheiden sich dementsprechend deutlich in ihrer jeweiligen Ausprägung.

Sie können sowohl einen positiven als auch negativen Einfluss auf die resultierende Scheitelabminderung haben. Die Ergebnisse zeigen deutlich, dass gebiets- und ereignisspezifische Eigenschaften, wie beispielsweise die Lage der Mündung eines Zuflusses im Modellierungsabschnitt oder auch dessen relativer Anteil am Gesamtabfluss eine entscheidende Rolle für den Grad der Effekte spielen. Diese können jedoch nur durch eine gebiets- und ereignisspezifische Modellierung ermittelt werden.

### Schlussfolgerungen

- Der Vergleich der drei entwickelten Modellszenarien (*Ist-Mit*, *Ist-Ohne*, *Renat*) stellt grundsätzlich eine robuste Methodik zur Analyse der Wirksamkeiten von Renaturierungsmaßnahmen dar. Eine Verbesserung des Ansatzes wäre durch eine Berücksichtigung der Evaporation und der Infiltration bzw. der Interaktion mit dem Grundwasser möglich.
- Die aus Renaturierungs- und Auengestaltungsmaßnahmen resultierenden Scheitelabminderungen variieren deutlich zwischen den Gebieten und Ereignissen, wobei innerhalb der Gebiete ein zunehmender Scheitelabfluss und ein zunehmendes Abflussvolumen zu einer Abnahme der Wirksamkeit führen.
- Gebietsübergreifend konnte bei einem HQ<sub>100</sub> eine maximale Scheitelabminderung von 1,9 % (Glonn) festgestellt werden, weshalb die Retentionswirkung bei der für eine Renaturierung zur Verfügung stehenden Fläche insgesamt als gering einzuschätzen ist. Ungeachtet dessen kann eine Umsetzung von Renaturierungsmaßnahmen aufgrund der ökologischen Verbesserungen sinnvoll sein.

### Weitere Informationen

TESCHEMACHER, S., NEUMAYER, M., DISSE, M. & RIEGER, W. (2017): Retentionspotenzial von Aufforstungsmaßnahmen in einem voralpinen Einzugsgebiet. *LWF Wissen*, 82, 11-18.

NEUMAYER, M., HEINRICH, R., DISSE, M. & RIEGER, W. (2018): Vergleich unterschiedlicher Methoden zur Modellierung von Renaturierungs- und Auengestaltungsmaßnahmen mit zweidimensionalen hydrodynamisch-numerischen Modellen. *Forum für Hydrologie und Wasserbewirtschaftung*, 39, 147-156.

DISSE, M., NEUMAYER, M. & HEINRICH, R. (2018): Modellierung von Renaturierungsmaßnahmen mit HYDRO\_AS-2D. *Anwendertreffen HYDRO\_AS-2D 2018*, 13. November 2018 (Vortrag). Aachen.

NEUMAYER, M., TESCHEMACHER, S. & DISSE, M. (2019): Modelling river restoration and floodplain measures in Bavaria on different scales. *Geophysical Research Abstracts*. Vol.21, EGU2019-15467 (Poster). Wien.

NEUMAYER, M., TESCHEMACHER, S., MERK, F. & DISSE, M. (2020): Retention potential analysis of river restoration and floodplain measures in different catchments of Bavaria, Germany, *EGU General Assembly 2020*, Online, 4–8 May 2020, EGU2020-13199

NEUMAYER, M., TESCHEMACHER, S., MERK, F. & DISSE, M. (accepted): Retentionspotenzialanalyse von Renaturierungsmaßnahmen an bayerischen Gewässern. *Auenmagazin*,

NEUMAYER, M., TESCHEMACHER, S., MERK, F. & DISSE, M. (2020): Analysis of the retention potential of restoration measures in Bavarian streams. *Danube news*, 41, 22, 11-16.

## 4.2 Renaturierung mit variabler Auenstruktur

Durch eine detaillierte Modellierung der Gewässerrenaturierung und Auenstrukturen am Weißen Main, wurde der Einfluss des Detaillierungsgrades der Modellumsetzung auf die resultierenden Retentionseffekte untersucht.

### Hintergrund und Zielsetzung

Die Abbildung der Gewässer- und Auenstruktur in Modellen ist grundsätzlich mit Unsicherheiten verbunden. Während der renaturierte Gewässerverlauf und die Talform über die Analyse historischer Karten und Vermessungsdaten vergleichsweise gut berücksichtigt werden können, wird die Heterogenität des Gewässerbetts und der Auenstruktur meist nur in einer groben Form implementiert. Der Einfluss des Detailgrads der Abbildung in diesem Bereich wurde bisher nicht untersucht und quantifiziert.

Die Zielstellung der Renaturierung mit variabler Auenstruktur war daher die exemplarische Bestimmung der Retentionswirkung einer weitgehend detailgetreu modellierten renaturierten Gewässer- und Auenstruktur.

### Methodik und Vorgehensweise

Zur Umsetzung des Ziels, die Aue und das Gewässerbett in einem potenziell natürlichen, historischen Zustand vor den anthropogenen Eingriffen abzubilden, wurde die Methode 4 (Abb. 15) zur Umsetzung der Renaturierung entwickelt. Im Vergleich zur Methode 3 umfasst sie neben der Anhebung und Verbreiterung des Flussbettes auch eine räumlich differenzierte naturnahe Sohl-, Gelände- und Vegetationsstruktur der Auenlandschaft. Methode 4 wurde beispielhaft für das Hauptgewässer des Weißen Mains entwickelt und umgesetzt und anhand der fünf für den Pegel Ködnitz generierten Hochwasserereignisse analysiert und bewertet.

### Bewertung der Renaturierungsmethode

Der zeitliche Aufwand zur Erstellung des nach Methode 4 renaturierten Modells mit variabler Auenstruktur ist im Vergleich zu Methode 3 um ein Vielfaches höher. Eine automatisierte Erstellung der Grabenverläufe sowie der Grabentiefen und Vorlandstrukturen ist nur bedingt möglich und erfordert eine zeitaufwendige händische Nacharbeit, um eine ausreichende Netzqualität gewährleisten zu können. Aufgrund der deutlich größeren Knoten- und Elementanzahl, die aus der Abbildung der variablen Auenstruktur und der detaillierter abgebildeten Gewässersohle resultieren, wird auch der Rechenaufwand des Modells deutlich erhöht. Bei einer differenzierten Analyse, z.B. der Fließtiefen und Geschwindigkeiten im Vorland (Abb. 17), konnten Unterschiede zwischen den Renaturierungen nach Methode 3 und Methode 4 festgestellt werden, da durch die Grabenstrukturen in diesen Bereichen erhöhte Geschwindigkeiten auftreten. Ein ausschließlicher Vergleich der durch die Renaturierung verursachten Scheitelabminderungen und Translationen hat dagegen nur vernachlässigbar kleine Unterschiede gezeigt.

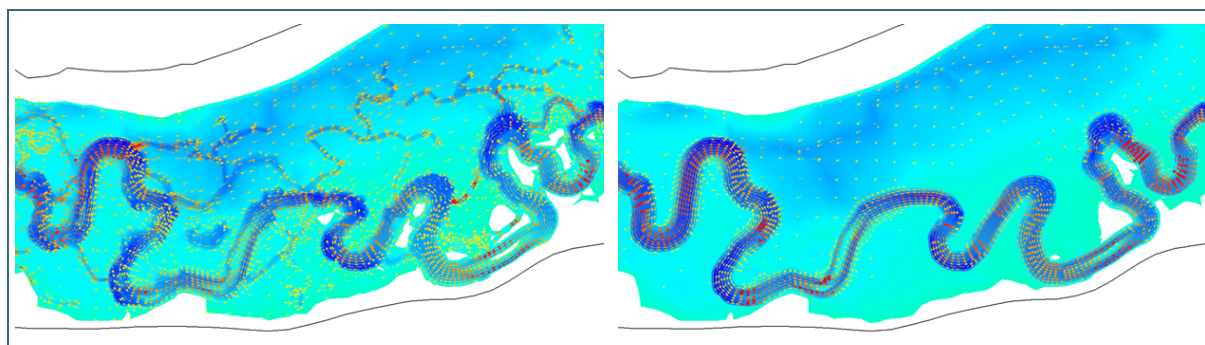


Abb. 17: Qualitative räumliche Verteilung der Fließtiefen (Flächen; dunkel: tiefer) und der maximalen Fließgeschwindigkeiten (Pfeile; rot: schneller) im Flussbett und im Vorland. links: Methode 4, rechts: Methode 3

### Schlussfolgerungen

- Die Umsetzung einer Renaturierung mit variabler Gewässer- und Auenstruktur ist mithilfe von HYDRO\_AS-2D möglich, jedoch steigt durch die Berücksichtigung der Graben- und Vorlandstruktur der zeitliche Aufwand für die Modellerstellung und -berechnung erheblich.
- Die vernachlässigbar kleinen Unterschiede der Scheitelabminderungen zwischen Methode 3 und Methode 4 am Weißen Main verdeutlichen einerseits die Robustheit der Renaturierung nach Methode 3 und zeigen andererseits den geringen Einfluss des modellierten Detailgrads der Auenstruktur auf die Form einer Hochwasserganglinie.
- Basierend auf den geringen Unterschieden bei der Wellenverformung und dem deutlich größeren Zeitbedarf der Analysen nach Methode 4 ist für die Ermittlung des Retentionspotenzials von Renaturierungs- und Auengestaltungsmaßnahmen Methode 3 zu empfehlen.
- Bei zusätzlicher Modellierung der Interaktion Grundwasser-Oberflächenwasser sowie bei ökologischen Fragestellungen (Biodiversität) könnte die Methode 4 wichtige zusätzliche Details gegenüber der Methode 3 bieten.

### Weitere Informationen

HEINRICH, R., NEUMAYER, M., DISSE, M. & RIEGER, W. (2018): Methoden zu Aufbau und Modellerstellung von Renaturierungs- und Auengestaltungsmaßnahmen mit zweidimensionalen hydrodynamisch-numerischen Modellen. *Tag der Hydrologie 2018*, 22.-23. März 2018 (Poster), Dresden.

### 4.3 Modellierung des Weißen Mains und ausgewählter Zuflüsse

Das Potenzial großräumig umgesetzter Renaturierungs- und Auengestaltungsmaßnahmen wurde beispielhaft am Weißen Main untersucht, indem die Maßnahme auch an charakteristischen Zuflüssen umgesetzt wurde.

#### Hintergrund und Zielsetzung

Die Umsetzung der Renaturierungs- und Auengestaltungsmaßnahmen war in den einzelnen Untersuchungsgebieten jeweils auf das Hauptgewässer beschränkt. Jedoch hat sich gezeigt, dass sich die Wirksamkeiten der Maßnahmen einerseits über den Gewässerverlauf aufbauen und andererseits von den Überlagerungen mit seitlichen Zuflüssen stark beeinflusst werden (vgl. Kapitel 4.1). Es sind demzufolge Veränderungen der Effekte zu erwarten, welche sowohl durch eine Verlängerung des renaturierten Bereichs als auch durch günstige bzw. ungünstige Überlagerungseffekte beeinflusst werden.

Die sich aus diesem Zusammenhang ergebenden Konsequenzen für das maximal mögliche Retentionspotenzial eines Gewässers sollen beispielhaft im Untersuchungsgebiet des Weißen Mains untersucht werden. Ziele sind dabei die Wirkungsabschätzung der Renaturierung charakteristischer seitlicher Zuflüsse sowie die detaillierte Betrachtung der sich daraus ergebenden Effekte auf die Wellenüberlagerungen am Hauptgewässer.

#### Methodik und Vorgehensweise

Die Untersuchung des Wirksamkeitspotenzials eines maximalen räumlichen Umfangs der Renaturierungs- und Auengestaltungsmaßnahmen wurde im Untersuchungsgebiet des Weißen Mains durchgeführt. Der erweiterte renaturierte Bereich enthält die Gewässer Kronach, Trebgast und Schorgast und schließt damit verschiedene Fließgewässerlandschaften ein.

Bei der Erstellung der HYDRO\_AS-2D-Modelle wurden sowohl bestehende Modelle berücksichtigt als auch Querprofile und Uferlinien aufgenommen, um den Untersuchungsbereich zu erweitern. In den Modellierungen sind jeweils die drei in Kapitel 4.1 beschriebenen Modellzustände (*Ist-Mit*, *Ist-Ohne*, *Renat*) enthalten, wobei die Renaturierung nach Methode 3 (Abb. 15) umgesetzt wurde. Die resultierenden Eigenschaften der Modelle sind in Tab. 6 zusammengefasst. Die Berechnungen wurden für die fünf für den Pegel Ködnitz generierten Ereignisse durchgeführt, wodurch die Jährlichkeiten an den jeweiligen Teilgebietsauslässen der hydraulisch modellierten Zuflüsse von den Jährlichkeiten in Ködnitz abweichen.

Tab. 6: Übersicht der wichtigsten Gebiets- und Modellcharakteristika des Weißen Mains und der drei ausgewählten charakteristischen Zuflüsse

Untersuchungsgebiet	Einheit	Weißer Main	Schorgast	Trebgast	Kronach
EZG-Fläche	[km <sup>2</sup> ]	570	248	63	40
Talsolehnegefälle	[‰]	4,1	1,8	1,9	8,7
Talraumlänge	[km]	ca. 17,6	ca. 8,0	ca. 8,0	ca. 6,5
Länge Hauptfließgewässer <i>Ist-Mit</i> bzw. <i>Ist-Ohne</i>	[km]	24,2	11,0	8,8	7,5
Länge Hauptfließgewässer <i>Renat</i>	[km]	30,8	16,3	16,5	11,6
Windungsgrad <i>Ist-Mit</i> bzw. <i>Ist-Ohne</i>	[-]	1,4	1,4	1,1	1,2
Windungsgrad <i>Renat</i>	[-]	1,7	2,0	2,1	1,8

### Wirksamkeit der Renaturierung an den seitlichen Zuflüssen

Die Größe der Überflutungsflächen sowie deren prozentuale Zunahme durch die Renaturierung wird von der Talform, der Änderung der Hauptfließgewässerlänge und der Ereignisjährlichkeit beeinflusst. An der Schorgast ist mit  $\pm 2\%$  nahezu keine Änderung festzustellen, wohingegen die Überflutungsflächen an der Kronach um 50 % bis 85 % zunehmen. An der Trebgast nehmen die Überflutungsflächen bei den häufigeren konvektiven Ereignissen um ca. 3 % bzw. ca. 10 % zu, wohingegen bei den sehr seltenen advektiven Ereignissen eine leichte Abnahme von maximal 2 % erkennbar war. Insgesamt liegen die Überflutungsflächen der Kronach aufgrund des etwas kürzeren und deutlich engeren Talraums bei ca. 30 % der Flächen der anderen Gebiete.

Die durch die Renaturierung verursachten Scheitelabminderungen an den drei Zuflüssen sind mit ca. 0,25 % bis 2 % sehr gering. Trotz der deutlich größeren Jährlichkeiten der advektiven Ereignisse an der Trebgast sind die resultierenden Wirksamkeiten größer als in den anderen Gebieten. Ebenso kann kein gebietsübergreifender Zusammenhang zwischen den Unterschieden der Überflutungsflächenänderung und den resultierenden Scheitelabminderungen an den Gebietsauslässen hergestellt werden, was auf eine Überprägung durch andere Einflussfaktoren hindeutet. Einer dieser Faktoren sind Wellenüberlagerungen mit seitlichen Zuflüssen. Diese werden beispielsweise durch die Abnahme der Scheitelabminderungen in der Schorgast nach dem Zufluss der Unteren Steinach verdeutlicht. Die zeitlichen Verzögerungen von bis zu 2 h liegen ebenfalls in einem niedrigen Bereich und können auf die erhöhte Rauheit im Vorland zurückgeführt werden.

### Wirksamkeit der Renaturierung am Gesamtflusssystem

Der Einfluss der umfangreichen Renaturierungs- und Auengestaltungsmaßnahmen auf die Abflussganglinie am Gebietsauslass des Weißen Mains ist grundsätzlich gering (Tab. 7). Aufgrund der kleinen Scheitelverzögerungen (1 h bis 2,25 h) ist bei den deutlich kürzeren konvektiven Ereignissen ein größerer Einfluss durch eine günstige bzw. ungünstige Überlagerung mit seitlichen Zuflüssen über den Gewässerverlauf wahrscheinlicher als bei den advektiven Ereignissen. Dieser Unterschied zwischen den Ereignischarakteristika ist auch am Gebietsauslass zu erkennen, wobei die Scheitelabminderungen der advektiven Ereignisse mit maximal 0,7 % deutlich geringer sind als die der konvektiven Ereignisse (HQ<sub>5</sub>: 5,9 %, HQ<sub>20</sub>: 4,2 %). Die Unterschiede zwischen den beiden untersuchten Modellzuständen (hydraulisch modellierte Zuflüsse bzw. Zuflüsse aus WaSiM) sind ebenfalls gering: Die Berücksichtigung von Renaturierungen an den drei Hauptzuflüssen resultiert in einer Steigerung der Scheitelabminderung von 0,0 % bis 0,2 % bei den advektiven Ereignissen und 0,7 % bzw. 0,9 % bei den konvektiven Ereignissen (Vergleich Renat/Ist-Ohne).

Tab. 7: Scheitelabminderungen am Gebietsauslass des Gesamtmodells (inkl. ausmodellierter Zuflüsse) und Veränderungen der Scheitelabminderungen im Vergleich zum Modell ohne ausmodellerte Zuflüsse (Kapitel 4.1) für die drei Modellszenarien und die fünf Ereignisse

Ereignis	Scheitelabminderung [%]			Änderung Scheitelabminderung [%]		
	Ist-Ohne/Ist-Mit	Renat/Ist-Mit	Renat/Ist-Ohne	Ist-Ohne/Ist-Mit	Renat/Ist-Mit	Renat/Ist-Ohne
adv HQ <sub>5</sub>	0,1	0,8	0,7	0,2	0,2	0,0
adv HQ <sub>20</sub>	-0,9	-0,3	0,6	-0,1	0,2	0,2
adv HQ <sub>100</sub>	-0,3	0,1	0,4	-0,3	-0,1	0,2
konv HQ <sub>5</sub>	-1,0	4,9	5,9	-0,5	0,3	0,7
konv HQ <sub>20</sub>	-2,3	2,0	4,2	-0,8	0,0	0,9

Die skalenübergreifenden Analysen innerhalb des Modellierungsabschnitts wurden unter Berücksichtigung ausgewählter Kontrollquerschnitte vor und nach den Zuflüssen der drei Gewässer durchgeführt. Die zum Teil gegensätzlichen Veränderungen der Scheitel infolge der seitlichen Zuflüsse verdeutlichen einerseits deren großen Einfluss auf die von einer Renaturierungs- und Auengestaltungsmaßnahme ausgehenden Scheitelabminderung. Andererseits konnten deutliche Unterschiede zwischen den advektiven und konvektiven Ereignissen festgestellt werden, die die Relevanz der Ereignischarakteristik und insbesondere

der Niederschlagsverteilung hervorheben.

Zwischen den beiden Modellversionen konnten bei den advective Ereignissen nur sehr geringe Unterschiede von maximal 0,6 % festgestellt werden. Bei den konvektiven Ereignissen waren die Abweichungen dagegen mit -2,1 % bis +1,8 % deutlich größer und konnten einzelnen Gewässerabschnitten zugeordnet werden. Während bei den untersuchten konvektiven Ereignissen die Renaturierung der Trebgast einen deutlichen Mehrwert liefert, musste der Effekt der Kronach auf den Scheitelabfluss des Weißen Mains als negativ eingestuft werden. Durch die kombinierte Betrachtung der *Renat*-Szenarien aller drei untersuchter Zuflüsse, ist es allerdings nicht möglich die isolierte Auswirkung einer Renaturierung der Trebgast oder Schorgast auf den Hochwasserablauf des Weißen Mains zu bestimmen.

### Schlussfolgerungen

- Die geringen Scheitelabminderungen in den ausgewählten Zuflüssen des Weißen Mains (Schorgast, Trebgast, Kronach) durch die Renaturierungs- und Auengestaltungsmaßnahmen liegen in einer ähnlichen Größenordnung wie die der bisherigen Simulationen und bestätigen damit die bereits festgestellte vergleichsweise geringe Retentionswirkung der Maßnahme bei größeren Hochwasserereignissen.
- Die Komplexität der Wirkungsweise der Maßnahme wird durch den fehlenden gebietsübergreifenden Zusammenhang zwischen Jährlichkeit, Änderung der Überflutungsfläche und Scheitelabminderung deutlich. Insbesondere gebiets- und ereignisspezifisch auftretende Überlagerungseffekte haben dagegen einen großen Einfluss auf die Wirksamkeit.
- Die auftretenden Erhöhungen und Reduktionen der Scheitel am Weißen Main durch eine Renaturierung ausgewählter seitlicher Zuflüsse in Kombination mit dem ereignisabhängig unterschiedlichen Verhalten verdeutlicht die Bedeutung der Gebiets- und Ereignischarakteristik für das Auftreten von Überlagerungseffekten.



## 4.4 Hydraulische Sensitivitätsanalysen

Mithilfe eindimensionaler Sensitivitätsanalysen wurde der Einfluss der Rauheitsparametrisierung auf die Wellenverformung bestimmt, um die Belastbarkeit der für die Umsetzung der hydrodynamischen Szenarien angewandten Methodik zu untersuchen.

### Hintergrund und Zielsetzung

Modelle stellen stets eine Vereinfachung der Realität dar, wodurch Modellierungsergebnisse von Unsicherheiten, wie beispielsweise der korrekten Definition der Parameterwerte, beeinflusst werden. Da in HYDRO\_AS-2D alle im modellierten Abschnitt auftretenden kontinuierlichen Energieverluste bzw. Fließwiderstände pauschal über die Rauheit berücksichtigt werden, ist die Definition des Rauheitsparameters von besonderer Bedeutung für die Quantifizierung von Retentionseffekten. Diese werden flächendeckend über konstante oder tiefenabhängige landnutzungsspezifische Strickler-Beiwerte definiert.

Ziel der hydrodynamischen Sensitivitätsanalysen war die Quantifizierung des aus der Definition des Strickler-Beiwerts resultierenden Retentionseffekts für verschiedene Modellcharakteristika. Die daraus abgeleiteten Möglichkeiten und Grenzen der angewandten Methodik zur Umsetzung der Renaturierungen ermöglichen eine Bewertung der Belastbarkeit der ermittelten Szenarienwirksamkeiten.

### Methodik und Vorgehensweise

Die Simulationen wurden an fünf ca. 2 km langen Modellabschnitten durchgeführt, die aus den Untersuchungsgebieten des Roten Mains, des Weißen Mains und des Otterbachs selektiert wurden. Die Abschnitte sind durch einen möglichst geringen Anteil an Restriktionsbereichen (in denen keine Renaturierung umgesetzt wurde) charakterisiert und enthalten keine größeren seitlichen Zuflüsse. Zudem wurde darauf geachtet, dass gebietsübergreifend eine möglichst große Bandbreite verschiedener Gebiets- und Gewässercharakteristika abgedeckt werden.

In den einzelnen Abschnitten wurden jeweils zwei Modellszenarien (*Ist-Ohne*, *Renat*) umgesetzt und jeweils sowohl mit einer konstanten als auch einer tiefenabhängigen Rauheitsparametrisierung belegt. Für die tiefenabhängige Rauheitsbelegung wurden zwei Szenarien definiert, die die minimalen und die maximalen Rauheitsparameterwerte beinhalten. In den drei Szenarien mit konstanter Rauheitsbelegung ist zudem die ursprüngliche Parametrisierung der Renaturierungs- und Auengestaltungsmaßnahmen (vgl. Kapitel 4.1) enthalten. Die verschiedenen Modellabschnitte wurden jeweils für die fünf generierten Ereignisse des jeweiligen Untersuchungsgebiets berechnet. Insgesamt wurden dementsprechend 250 Simulationen durchgeführt.

### Sensitivität der Rauheitsparametrisierung

Die den Untersuchungen zugrundeliegenden 2 km langen Modellabschnitte zeigen lediglich eine geringe bis moderate Sensitivität gegenüber der variierten Rauheitsparametrisierung in Bezug auf die Verformung der Hochwasserganglinie. Die pro Modellszenario (*Ist-Ohne*, *Renat*) mehrdimensional ermittelten vertikalen und horizontalen Unsicherheiten (Scheitelabminderung und -verzögerung für verschiedene Rauheitsbelegungen eines der beiden Modellszenarien) zeigen ähnliche Tendenzen wie die Verteilungen der resultierenden Retentionen und Translationen (Scheitelabminderung und -verzögerung für verschiedene Rauheitsbelegungen bei Vergleich der Modellszenarien *Ist-Ohne* und *Renat*). Insgesamt ist die Größenordnung aller analysierten Werte jedoch sehr klein. Zudem können diese aufgrund eines durch die 15-minütige zeitliche Auflösung der Simulationen nicht immer exakt abgebildeten Hochwasserscheitels bereits mit wesentlichen Unsicherheiten belastet sein, wodurch eine zuverlässige Analyse der Ergebnisdaten mit Rückschlüssen auf einzelne Gebietscharakteristika erschwert wird. Allerdings fällt eine häufig erhöhte Sensitivität des oberstrom liegenden Untersuchungsgebiets (UG1) im Einzugsgebiet des Weißen Mains in Bezug auf die analysierten Größen gegenüber den anderen beiden Untersuchungsgebieten auf.

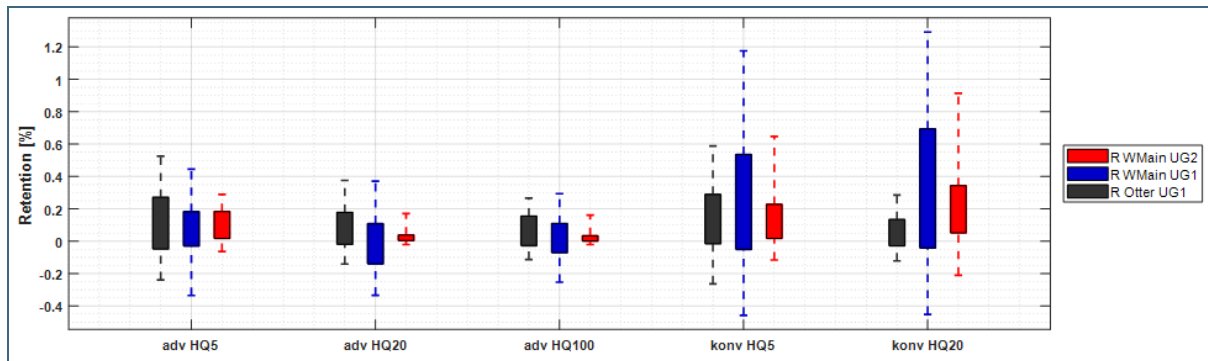


Abb. 18: Gebietsübergreifende Darstellung der ereignis- und gebietsabhängigen Verteilung der Retention (Scheitelabminderung zwischen *Ist-Ohne* und *Renat* der verschiedenen Rauheitsparametrisierungen)

In Abb. 18 sind beispielhaft die Bandbreiten der Retention der beiden Abschnitte am Weißen Main und des Abschnitts am Otterbach dargestellt. Es wurden dabei jeweils alle Rauheitsparametrisierungen des *Ist-Ohne* Modells mit allen des *Renat* Modells verglichen. Eine Begründung für die ermittelten Unterschiede der Sensitivitäten zwischen den Modellabschnitten sollte durch eine Analyse der jeweiligen Eigenschaften, wie z.B. der Landnutzungsverteilung, der Einzugsgebietsgröße oder des Sohl- und Talsohlengefälles, möglich sein. Grundsätzlich sind die Landnutzungsverteilungen der *Ist-Ohne* Modelle durch Grünlandflächen dominiert, wobei im untersuchten Abschnitt des Otterbachs an die Grünlandflächen bewaldete Areale grenzen. Das induzierte Einzugsgebiet des UG1 am Weißen Main (167 km<sup>2</sup>) ist deutlich größer als das am Otterbach (50 km<sup>2</sup>), allerdings nur nahezu halb so groß wie das des unterstrom liegenden Untersuchungsgebiets (UG2) am Weißen Main (315 km<sup>2</sup>). Das Sohl- und Talsohlengefälle des UG1 liegt dabei ebenfalls zwischen dem des Otterbachs und des UG2 am Weißen Main. Ob diese Kombination aus einem vergleichsweise kleinen induzierten Einzugsgebiet mit einem moderaten Sohl- und Geländegefälle die tatsächliche Ursache für die leicht erhöhte Sensitivität gegenüber der Rauheit ist, kann aufgrund der niedrigen absoluten Werte nicht sicher bestimmt werden.

### Schlussfolgerungen

- Die aus einem rauen *Ist-Ohne* Modell und einem glatten *Renat* Modell resultierenden negativen Retentionen und Translationen verdeutlichen die Relevanz der Rauheitsparametrisierung und die damit verbundene Überprägung einer Veränderung der Gewässer- und Auenstruktur. Gleichzeitig resultieren die umgekehrten Grenzwerte (glattes *Ist-Ohne* Modell und raues *Renat* Modell) gebiets- und ereignisübergreifend in moderaten Retentionen und Translationen.
- Aufgrund der ähnlichen Verteilungen der untersuchten Größen zwischen den Untersuchungsabschnitten und der geringen Anzahl verschiedener Abschnitte konnten keine Abhängigkeiten der Sensitivitäten zu Gebieteigenschaften hergestellt werden.
- Eine Vorhersage der Sensitivitäten für längere Gewässerbereiche aus den Ergebnissen der 2 km-Abschnitte ist ebenfalls nicht möglich. Einerseits ist eine einfache lineare Extrapolation nicht möglich und andererseits können die ereignis- und gebietsspezifischen Überlagerungen mit seitlichen Zuflüssen nicht pauschal vorhergesagt werden.

## 4.5 Biberdammsszenarien

Biber sind in Bayern heute nahezu flächendeckend vertreten, wobei die Beeinflussung des Abflussgeschehens durch ihre Dammbautätigkeit allgemein bekannt ist. Es ist dagegen unklar, ob auch bei Hochwasserereignissen ein Effekt zu erwarten ist.

### Hintergrund und Zielsetzung

Nachdem der Biber in den 1960er Jahren durch den Bund Naturschutz in Bayern wieder angesiedelt wurde, sind die Zahlen der Biberreviere auf ca. 4500 und die der Individuen auf ca. 17 000 angestiegen (SCHWAB & SCHWEMMER 2017). Über die Gestaltung seines Lebensraums – dem Bau von Dämmen – übt der Nager einen großen Einfluss auf das Flussökosystem aus. In den USA und Kanada konnte der Einfluss des Bibers auf den Wasserhaushalt ganzer Landschaften, die Biodiversität und den Grundwasserspiegel bestätigt werden und auch in Europa wurden diese Interaktionen beispielsweise von NYSSSEN et al. (2011) und PUTTOCK et al. (2017) untersucht. Die Ergebnisse dieser Studien belegen zum Teil deutliche Retentionseffekte aufgrund von Biberdämmen. Die betrachteten Einzugsgebiete und maximalen Hochwasserabflüsse sind jedoch im Vergleich zu den in dieser Studie untersuchten Gebieten und Ereignissen klein. Ziel der durchgeführten Biberdammsszenarien war daher die Quantifizierung des Hochwasserrückhaltepotenzials potenzieller Biberdammkaskaden in den Einzugsgebieten von Otterbach und Glonn, um deren Effekt im Vergleich zu anderen natürlichen Hochwasserrückhaltemaßnahmen bewerten zu können. Es sollte dabei sowohl der lokale Einfluss an den Dammstandorten als auch der regionale Effekt auf den Hochwasserabfluss am jeweiligen Gebietsauslass berücksichtigt werden.

### Methodik und Vorgehensweise

Die Biberdammstandorte und die Charakteristik der einzelnen Dämme wurden anhand eines Drei-Stufen-Modells, das in Zusammenarbeit mit der Hochschule Weihenstephan-Triesdorf entwickelt wurde, definiert. Die darin enthaltenen Grenzwerte wurden aus der Studie „Die Wirkung des Europäischen Bibers (*castor fiber*) auf den natürlichen Wasserrückhalt an ausgewählten Fließgewässern Bayerns“ (ZAHNER et al. 2017) abgeleitet. Berücksichtigt wurden dementsprechend Dammkaskaden mit jeweils drei bis sieben Dämmen, deren Oberkanten mit der Böschungsoberkante abschließen (Tab. 8).

Als Grundlage für die Modellierungen dienten die *Ist-Ohne* Modelle aus Kapitel 4.1. In diese Modelle wurden pro Gebiet zwei potenziell natürliche Biberdammkaskaden implementiert und sowohl getrennt voneinander als auch in Kombination betrachtet. Der Dammzustand wurde über zwei Durchlässigkeitsvarianten der modellierten Dämme berücksichtigt. Berechnet wurden die einzelnen Szenarien für jeweils vier Ereignisse, die verschiedene Niederschlagscharakteristika (advektiv/konvektiv) und Jährlichkeiten (HQ<sub>5</sub>/HQ<sub>20</sub>) abdecken. Insgesamt ergeben sich daraus 48 Szenarienzüge.

Tab. 8: Eigenschaften der potenziellen Dammkaskaden an Otterbach und Glonn

Gebiet	Kaskade	Anzahl der Dämme	Abstand zwischen den Dämmen [m]	Gewässerbreite [m]	Sohlgefälle des Abschnitts [%]	Einzugsgebietsgröße am Kaskadenstandort [km <sup>2</sup> ]
Glonn	1	4	42-22-31	7	4,1	18,2
	2	3	114-33	11	0,5	75,2
Otterbach	1	4	17-21-46	5	5,2	25,8
	2	7	9-16-12-14-9-9	6	41,1	44,3

### Wirksamkeiten der untersuchten Biberdammszenarien

Am Otterbach liegen die resultierenden Scheitelabminderungen nach den beiden Kaskaden zwischen -0,5 und 0,1 % mit einer maximalen zeitlichen Verzögerung von 15 Minuten und sind damit vernachlässigbar gering. Am Auslass ist variantenübergreifend nahezu keine Beeinflussung der Ganglinie zu erkennen. Die maximalen Überflutungsflächen und maximal genutzten Retentionsräume erhöhen sich in den Einflussbereichen der Biberdämme. An der unterstrom liegenden Kaskade erhöhen sich die maximalen Überflutungsflächen um bis zu 96 % auf 0,14 ha. An der oberstrom liegenden Kaskade ist die relative Zunahme der maximalen Überflutungsflächen dagegen deutlich geringer (bis zu 52 %).

An der Glonn haben die Biberdämme am oberstrom liegenden Standort keinen merklichen Effekt auf den Verlauf der Ganglinien direkt an der Kaskade oder am Modellauslass. Die Dämme der unteren Kaskade bewirken hingegen eine kleine Verformung der Ganglinien, welche durch anschließende Überlagerungseffekte mit seitlichen Zuflüssen in einer Scheitelerhöhung von bis zu 3,1 % am Modellauslass führt. Dabei trifft der Scheitel um 1 h früher ein. An diesem Standort sind die durch die Biberdämme verursachten Überflutungsflächen durch das flache Gelände bis zu zweimal größer als im *Ist-Ohne* Szenario. An der oberen Kaskade treten dagegen nur Erhöhungen der maximal überfluteten Flächen um bis zu 21 % auf. Die untersuchten Biberdammszenarien weisen gebietsübergreifend nur sehr geringe bis gar keine Retentionseffekte während der untersuchten Hochwasserereignisse auf. Zudem ist kein maßgeblicher Unterschied zwischen den beiden Durchlässigkeitsvarianten vorhanden. Für alle Biberdammvarianten erhöhen sich die lokalen maximalen Überflutungsflächen und genutzten Retentionsräume. Im Vergleich zum Gesamtgebiet sind diese zusätzlichen Überflutungsflächen und genutzten Retentionsvolumina jedoch als vernachlässigbar gering anzusehen. Die an der Glonn aufgetretenen Überlagerungseffekte sind generell stark gebiets- und ereignisabhängig. Trotz der niedrigen Wirksamkeiten für den Hochwasserschutz spielt der Biber eine wichtige ökologische Rolle in der Gestaltung seiner Reviere und beeinflusst damit stark die angrenzenden Habitate. Zudem haben Biberreviere einen positiven Effekt auf die Wasserqualität der von ihm besiedelten Fließgewässer.

### Schlussfolgerungen

- Der gebiets- und ereignisübergreifend sehr geringe Effekt der untersuchten Biberdammkaskaden sowohl an den Standorten als auch am Gebietsauslass lässt darauf schließen, dass von Biberdämmen kein Beitrag zu einem dezentralen Hochwasserrückhalt erwartet werden kann.
- Aus den Untersuchungen können jedoch Effekte bei kleineren Ereignissen nicht ausgeschlossen werden. Zudem kann keine Aussage zu einem möglicherweise negativen Einfluss durch einen während eines Hochwasserereignisses auftretenden Dambruch getroffen werden. Hierzu wären weitergehende Untersuchungen erforderlich.

### Weitere Informationen

NEUMAYER, M., TESCHEMACHER, S., SCHLOEMER, S., ZAHNER, V., & RIEGER, W. (2020): Hydraulic Modeling of Beaver Dams and Evaluation of Their Impacts on Flood Events. *Water* 12, 1, 300.

## 5 Szenarien- und Modellübergreifende Analysen

Die in Kapitel 3 und 4 untersuchten Einzelmaßnahmen haben einen unterschiedlichen Einfluss auf die verschiedenen Abflussprozesse. In diesem Kapitel werden daher die Einzelmaßnahmen miteinander verknüpft sowie die resultierenden Ergebnisse analysiert und mit denen der bereits untersuchten Einzelmaßnahmen verglichen. Zudem wird die Prozessabbildung und Parametrisierung des Wellenablaufs in den hydrologischen Modellen WaSiM und LARSIM analysiert, bewertet und optimiert.

### 5.1 Kombinationsszenarien

Die Kombinationsszenarien stellen eine beispielhafte Kombination der im Rahmen des Projekts untersuchten dezentralen Hochwasserrückhaltemaßnahmen dar. Die Einzelszenarien wurden schrittweise in die hydrologischen und hydraulischen Modelle implementiert, um sowohl die Einzelbausteine als auch die integrierte Kombination der Maßnahmen analysieren und diskutieren zu können.

#### Hintergrund und Zielsetzung

Aufgrund des unterschiedlichen Einflusses der Einzelmaßnahmen auf die Abflussprozesse *Abflussbildung*, *Abflusskonzentration* und *Wellenablauf* ist für einen effektiven und nachhaltigen Hochwasserschutz eine Kombination der verschiedenen Maßnahmen empfehlenswert. Durch die Verbindung der Maßnahmen können die gebiets- und maßnahmenspezifischen Wirksamkeitspotenziale in integrierter Weise betrachtet und genutzt werden. Die Untersuchungen innerhalb dieses Arbeitspakets verfolgen daher die Zielsetzung, beispielhafte Kombinationsszenarien aus den bisher einzeln betrachteten Hochwasserrückhaltemaßnahmen zu entwickeln, ganzheitlich zu bewerten und gegenseitige Wirkungsbeeinflussungen der Maßnahmen zu analysieren.

#### Methodik und Vorgehensweise

Im Rahmen der Kombinationsszenarien wurden die bisher im Projekt separat betrachteten Maßnahmen als integrierte Kombinationen untersucht. Dazu wurden Landnutzungs- und Bewirtschaftungsänderungen (Kapitel 3.2), dezentrale Rückhaltebecken (Kapitel 3.4) und Renaturierungs- und Auengestaltungsmaßnahmen (Kapitel 4.1) schrittweise implementiert (Abb. 19).

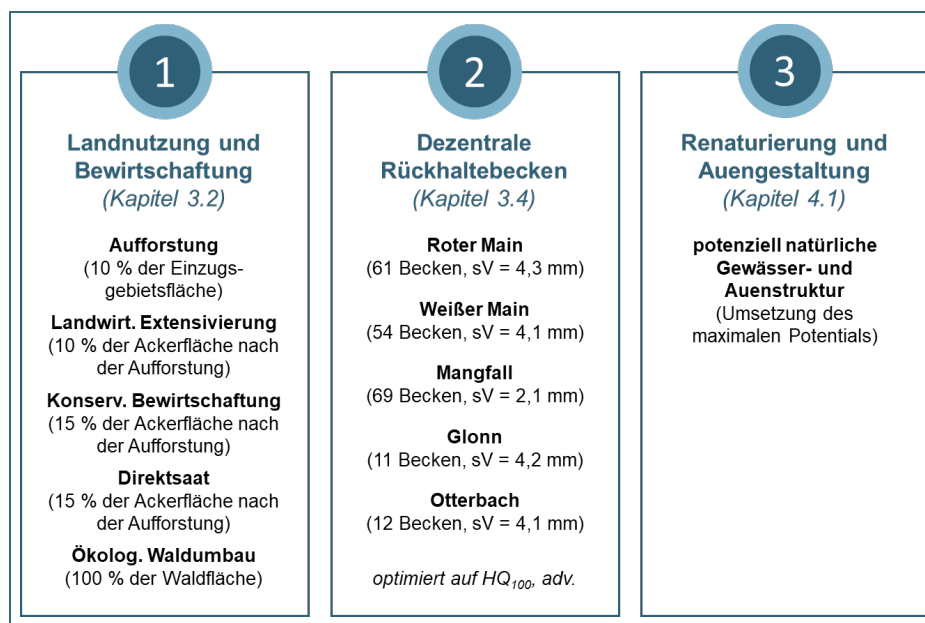


Abb. 19: Schema der schrittweisen Erstellung der beispielhaften Kombinationsszenarien

Die Maßnahmen der Landnutzungs- und Bewirtschaftungsänderungen sowie der dezentralen Kleinrückhaltebecken orientieren sich an einem potenziell realistischem Umfang. Bei den Gewässerrenaturierungen wurde dagegen das maximale Umsetzungspotenzial der potenziell natürlichen Gewässer- und Auenstruktur berücksichtigt (Methode 3). Die Maßnahmen wurden in drei Schritten sukzessive miteinander verknüpft, wobei die Berechnungsergebnisse des vorangegangenen Schritts als Eingabewert der folgenden Maßnahmen dienen. Neben einer detaillierten Auswertung der einzelnen Maßnahmenschritte wurden die Kombinationsszenarien auch hinsichtlich ihrer kombinierten Wirksamkeit untersucht.

### **Wirksamkeiten der Einzelschritte und des Kombinationsszenarios**

Als gebietsübergreifend effektive Kombinationsmaßnahme bei advektiven Hochwasserereignissen konnte die *Aufforstung* identifiziert werden. Der *ökologische Waldumbau* führt dagegen vor allem in Gebieten mit erhöhtem (Roter Main) bzw. hohem Waldanteil (Otterbach) zu einer hohen Wirksamkeit. Die Landnutzungs- und Bewirtschaftungsmaßnahmen sind entsprechend in Gebieten mit hohem Ackerflächenanteil besonders wirksam (z.B. Glonn), wohingegen sie in Gebieten mit geringem Ackeranteil kaum Einfluss haben (z.B. Weißer Main). Unter Berücksichtigung aller Landnutzungs- und Bewirtschaftungsänderungen konnten Scheitelabminderungen beim HQ<sub>100</sub> von 4 % (Mangfall), 11 % (Roter Main), 12 % (Weißer Main), 13 % (Glonn) und 20 % (Otterbach) erreicht werden. Durch die Anknüpfung von potenziell realisierbaren Beckenkombinationen an die Landnutzungs- und Bewirtschaftungsänderungen ist eine weitere wirksame Scheitelabminderung möglich. So konnten Beckenkombinationen mit einem spezifischen Volumen von ca. 4,2 mm das HQ<sub>100</sub> um weitere 11 % (Weißer Main, Roter Main), 14 % (Glonn) bzw. 17 % (Otterbach) reduzieren (Mangfall: 2,1 mm; Scheitelabminderung: 4,3 %). Durch die Integration von Renaturierungsmaßnahmen treten prinzipiell in allen Gebieten bei allen Hochwasserereignissen weitere Scheitelabminderungen und Translationen der Abflussganglinien auf. Diese unterscheiden sich jedoch deutlich in ihrer Wirksamkeit. Während im flachen Glonn-Gebiet tendenziell hohe Scheitelabminderungen (weitere 2 % beim HQ<sub>100</sub> bzw. bis zu 29 % beim konvektiven HQ<sub>5</sub>) auftreten, ist in den Gebieten Weißer Main und Otterbach die Wirksamkeit deutlich geringer (Scheitelabminderungen HQ<sub>100</sub> < 0,6 %). Zudem konnte ein größerer Unterschied der Wirksamkeiten in Abhängigkeit der Jährlichkeit festgestellt werden.

Obwohl sich die Umsetzungen der einzelnen Maßnahmen in der Fläche und bei den Becken an einem potenziell realisierbaren Umfang orientieren, repräsentieren die beispielhaften Kombinationsszenarien eine wirksame Methode, um den Scheitelabfluss effektiv zu reduzieren. Beispielsweise wird das HQ<sub>100</sub> in allen Gebieten (außer Mangfall) zu einem Abfluss abgemindert, der kleiner als das HQ<sub>50</sub> des jeweiligen Gebiets ist. Beim Weißen Main und Otterbach ist dieser Abfluss zudem kleiner als das ursprüngliche HQ<sub>300</sub> der Gebiete. Obwohl die Wirksamkeiten beim seltenen Hochwasser HQ<sub>300</sub> im Glonn-Gebiet vergleichsweise geringer sind, konnte auch hier durch die Kombination aller Maßnahmen eine Reduktion des Scheitelabflusses um 17 % erreicht werden. Hohe Wirksamkeit für die Integration der Maßnahmen zu einem Kombinationsszenario treten in allen Gebieten vor allem für die kleineren Hochwasserereignisse HQ<sub>20</sub> und HQ<sub>5</sub> auf. Eine Ausnahme stellt das Mangfall-Gebiet dar, bei welchem aufgrund der Topographie und der Landnutzungsverteilung bei allen Hochwasserereignissen nur sehr geringe Wirksamkeiten erreicht werden konnten.

### **Gebiets- und skalenübergreifende Bewertung**

Die Gebiete können in drei Gruppen mit jeweils ähnlichen Gebietsflächen unterteilt werden: 390 km<sup>2</sup> (Mangfall), ca. 320 km<sup>2</sup> (Weißer Main und Roter Main) und ca. 95 km<sup>2</sup> (Glonn und Otterbach). Für die Gebiete Roter Main und Weißer Main konnten ähnliche Wirksamkeiten der beispielhaften Kombinationsszenarien festgehalten werden, jedoch haben die Gebiete nicht nur eine vergleichbare Einzugsgebietsgröße, sondern auch eine ähnliche Landnutzungsverteilung mit einem erhöhten Waldanteil, der insbesondere hohe Wirksamkeiten des ökologischen Waldumbaus begünstigt. In den vergleichsweise kleineren Gebieten Glonn und Otterbach konnten mithilfe des Kombinationsszenarios etwas größere Wirksamkeiten erreicht werden als in den Gebieten des Roten Mains und Weißen Mains. Aufgrund der unterschiedlichen Landnutzungsverteilungen und Gebietsformen bedingen allerdings verschiedene Maßnahmen die letztlich

effektiven Scheitelabminderungen. So haben Bewirtschaftungsänderungen im Glonn-Gebiet maßgeblichen Effekt, wohingegen diese im Otterbach-Gebiet kaum Einfluss haben. Hier ist der ökologische Waldumbau ein wesentlicher Faktor der Scheitelabminderung. Die Wirksamkeiten der Beckenkombinationen sind aufgrund der Drosseloptimierung auf das HQ<sub>100</sub> sehr ereignisabhängig, wobei insbesondere bei kleinen advektiven Ereignissen nur eine niedrige Scheitelabminderung erreicht wurde. Ausschlaggebend für die Wirksamkeit der integrierten Maßnahmenkombinationen sind dementsprechend neben Gebietscharakteristiken wie Größe, Form und Steigung bzw. Topographie vor allem die Landnutzungs- und Boden-typverteilung innerhalb der Untersuchungsgebiete. Eine Übertragbarkeit der Ergebnisse auf andere Gebiete ist aufgrund der geringen Stichprobe in Verbindung mit der großen Anzahl verschiedener Einflussfaktoren nicht möglich.

### Schlussfolgerungen

- Die deutlichen Scheitelabminderungen bei allen Gebieten und Ereignissen durch die Umsetzung der ausgewählten Maßnahmenkombination verdeutlicht das Potenzial dieser Anwendung im Rahmen von integralen Hochwasserschutz- und Rückhaltekonzepten.
- Die jeweiligen Wirkungsweisen der Maßnahmenbausteine bewirken, dass die verschiedenen Ereignis- und Gebietseigenschaften zu unterschiedlichen potenziellen Wirksamkeiten führen. Dementsprechend können durch eine Kombination verschiedener Maßnahmen ereignisspezifische Defizite einzelner Maßnahmen ausgeglichen werden.
- Die gebietsabhängig unterschiedlichen Wirksamkeiten der Einzelschritte der Maßnahmen zeigen, dass sich die optimale Zusammensetzung bzw. der Umfang der einzelnen Maßnahmen je nach Einzugsgebietscharakteristik unterscheiden. Dementsprechend sollte die Möglichkeit einer Optimierung gebietsspezifischer Maßnahmenkombinationen bei der Erstellung integraler Hochwasserschutz- und Rückhaltekonzepte untersucht werden.

## 5.2 Szenarien-, gebiets- und ereignisübergreifende Analysen

Im Rahmen von szenarien-, gebiets- und ereignisübergreifenden Analysen wurden die Wirksamkeiten der einzelnen untersuchten Maßnahmen zueinander in Bezug gesetzt und bewertet.

### Hintergrund und Zielsetzung

In Kapitel 3, 4 und 5.1 wurden die Wirksamkeiten einzelner Maßnahmen bzw. einer Kombination verschiedener Maßnahmen dargestellt, analysiert und diskutiert. Die separate Betrachtung der Maßnahmen ermöglichte eine Bewertung verschiedener Einflussfaktoren wie Gebiets-, Ereignis- und Szenarieneigenschaften. Ein Vergleich der Wirkungsweisen und der daraus resultierenden Wirksamkeiten zwischen den Maßnahmen fand darin keine Berücksichtigung.

Ziel der szenarienübergreifenden Analysen ist eine vergleichende Betrachtung und Diskussion der innerhalb der Maßnahmenuntersuchungen ermittelten Wirksamkeiten. Einerseits sollen darin die Einflüsse der Ereignis-, Gebiets- und Szenarieneigenschaften sowie der Gebietsgröße betrachtet werden. Andererseits wird der Einfluss der Überlagerung von Einzelszenarien auf die Wirksamkeit untersucht.

### Vergleich der Szenarienwirksamkeiten

Die Scheitelabminderungen der verschiedenen Maßnahmen sind in Abb. 20 für die untersuchten Gebiete und Ereignisse zusammengefasst. Die Landnutzungsszenarien beinhalten mit Ausnahme des ökologischen Waldumbaus den als potenziell realistisch angenommenen Umfang (vgl. Kapitel 3.2), während für den ökologischen Waldumbau das Extremszenario berücksichtigt wurde. Aus den Berechnungen der dezentralen Hochwasserrückhaltebecken (Kapitel 3.4) wurden beispielhaft verschiedene spezifische Volumina und Drossel- bzw. Standortoptimierungen aus den interpolierten Kurven selektiert. Die Spalte „Ereignis“ enthält die auf das jeweilige Ereignis durchgeführte Standort- und Drosseloptimierung, wohingegen die Standort- und Drosseloptimierung in der Spalte „HQ<sub>100</sub>“ für das advektive HQ<sub>100</sub> durchgeführt wurde. Im Bereich der Renaturierungs- und Auengestaltungsmaßnahmen (Kapitel 4.1) wurden die Scheitelabminderungen der Zustandsänderungen *Ist-Mit zu Ist-Ohne*, *Ist-Mit zu Renat* und *Ist-Ohne zu Renat* berücksichtigt. In den beispielhaften Kombinationsszenarien (Kapitel 5.1) wurden die einzelnen Maßnahmen aufeinander aufbauend umgesetzt, wobei die Werte in Abb. 20 jeweils den Änderungen durch das jeweilige zusätzliche Szenarium entsprechen und nicht der gesamten Summe.

Bei allen Gebieten und Szenarien ist eine Veränderung der Scheitelabminderung mit der Ereignisjährlichkeit zu beobachten. Dabei nehmen die Abminderungen mit zunehmender Jährlichkeit tendenziell ab. Die Unterschiede zwischen advektiven und konvektiven Ereignissen sind dagegen szenarienübergreifend nicht einheitlich. Während Renaturierungen und dezentrale Rückhaltebecken bei konvektiven Ereignissen wirksamer sind, erreichen die Szenarien der Landnutzungs- und Bewirtschaftungsänderung bei advektiven Ereignissen gleicher Jährlichkeit größere Effekte.

Die szenarienübergreifend geringsten Wirksamkeiten wurden im Einzugsgebiet der Mangfall erreicht. Der sehr geringe Ackerflächenanteil führt dazu, dass nur die Maßnahmen der Aufforstung und des ökologischen Waldumbaus eine merkliche Änderung bewirkten. Die Gebiete von Main, Roter Main und Weißer Main weisen jeweils innerhalb eines Szenarienblocks ähnliche Scheitelabminderungen auf. Im Gesamtgebiet konnten dabei geringfügig niedrigere Wirksamkeiten erreicht werden als in den beiden Teilgebieten. In den vergleichsweise kleinen Gebieten von Glonn und Otterbach konnten die größten Scheitelabminderungen erreicht werden.

Die Beckenszenarien können ereignis- und gebietsübergreifend als wirksam bis sehr wirksam klassifiziert werden. Das Szenario Extensivierung der Landwirtschaft stellt das zweitwirksamste Szenario dar, gefolgt von der Aufforstung. Die Renaturierungs- und Auengestaltungsmaßnahmen haben dagegen im Allgemeinen eine geringe Wirksamkeit. Insgesamt wird deutlich, dass die Reihung der einzelnen Szenarien nach ihrer Wirksamkeit zwischen den Gebieten und Ereignissen variiert.





Die Gründe hierfür können einerseits in den gebietsabhängig unterschiedlichen potenziell veränderlichen Einzugsgebietsflächen gefunden werden. Andererseits treten Interaktionen zwischen den Ereignis- und den Szenarieneigenschaften auf.

Bei den Maßnahmen der Extensivierung, der konservierenden Bewirtschaftung und der Direktsaat konnte eine Abnahme der maximalen Wirksamkeit und der Variabilität zwischen den Gebieten mit zunehmender Einzugsgebietsgröße festgestellt werden, wohingegen bei der Aufforstung, dem ökologischen Waldumbau und der Entsiegelung vor allem die Streuung abnimmt. Bei den Beckenszenarien zeigt sich eine deutlichere Abhängigkeit von der Gebietsgröße bei allen spezifischen Volumina (sV) und Optimierungen, welche durch das gewählte sV, die Optimierung und die Ereignischarakteristik überlagert wird. Bei den Renaturierungsmaßnahmen ist keine Abhängigkeit von der Gebietsgröße erkennbar, da ausschließlich das Gebiet der Glonn größere Wirksamkeiten aufweist.

### Überlagerung von Einzelszenarien

Der Effekt einer Überlagerung von Einzelmaßnahmen auf die Szenarienwirksamkeit wurde durch einen Vergleich der Wirksamkeit der Kombinationsszenarien mit einer Aufsummierung der Wirksamkeiten der Einzelmaßnahmen untersucht. Die Veränderungen der Flächenanteile der Einzelmaßnahmen wurden dabei so gewählt, dass sie denen der Kombinationsszenarien (Kapitel 5.1) entsprechen.

Bei den Kombinationsszenarien konnten meist größere Scheitelabminderungen ermittelt werden als für die aufsummierten Einzelszenarien. Bei einzelnen Gebieten oder Ereignissen treten umgekehrte Verhältnisse auf, wobei die Differenzen aber gering waren. Die Unterschiede bei den Landnutzungsszenarien sind auf eine veränderte Flächenwahl zurückzuführen. Die Differenzen bei den Beckenszenarien bzw. der Renaturierung sind dagegen durch geringere Abflussvolumen der vorher bereits durch die Landnutzungs- und Bewirtschaftungsszenarien beeinflussten Wellen bzw. eine veränderte Ganglinienform erklärbar.

### Schlussfolgerungen

- Aus der vergleichenden Betrachtung der Szenarienwirksamkeiten kann gefolgert werden, dass sich die ideale Szenarienumsetzung in Abhängigkeit des Gebiets, aber auch des Ereignisses unterscheidet. Im Umkehrschluss bedeutet das aber auch, dass durch eine Kombination verschiedener Szenarien für eine große Bandbreite an Gebiets- und Ereignisseigenschaften gute Wirksamkeiten erzielt werden können.
- Aufgrund der geringen Anzahl und den gleichzeitig sehr unterschiedlichen Eigenschaften der Gebiete sind die teilweise beobachteten Trends einer abnehmenden Wirksamkeit mit zunehmender Gebietsgröße nicht belastbar. Dieser häufig angenommene Zusammenhang kann daher anhand der Analysen weder bestätigt noch widerlegt werden.
- Die überwiegend größeren Scheitelabminderungen der Kombinationsszenarien im Vergleich zu den aufsummierten Einzelszenarien deuten auf das Potenzial positiver Synergieeffekte zwischen den einzelnen Maßnahmen hin.

### 5.3 Analyse konzeptioneller Routing-Ansätze

Der Prozess des Wellenablaufs wird sowohl in hydrologischen Modellen als auch in hydrodynamisch-numerischen Modellen berücksichtigt, wobei die Abbildung in letzteren deutlich detaillierter ist. Demzufolge können aus den Ergebnissen der detaillierten Berechnung Schlussfolgerungen für die Anwendungsbereiche konzeptioneller Ansätze sowie der Belastbarkeit der Ergebnisse gezogen werden.

#### Hintergrund und Zielsetzung

In HYDRO\_AS-2D wird der Prozess des Wellenablaufs über das Lösen der Flachwassergleichungen zwei-dimensional abgebildet. In Verbindung mit der Möglichkeit einer dreidimensionalen Abbildung der Talraumgeometrien können damit komplexe Gewässer- und Auenstrukturen beschrieben werden. Die resultierenden Ergebnisse ermöglichen detaillierte Analysen basieren jedoch gleichzeitig auf zeit- und damit kostenintensiven Simulationen. In hydrologischen Modellen sind dagegen meist konzeptionelle Routing-Ansätze berücksichtigt. Aufgrund des fehlenden Detailgrads der Eingangsdaten (z.B. Gewässerquerprofile) sowie der Kalibrierungsdaten werden diese Ansätze in den meisten Einzugsgebietsmodellen weder detailliert parametrisiert noch kalibriert. Generell wäre es jedoch wünschenswert, den Wellenablauf verschiedener Gewässerzustände innerhalb der hydrologischen Modelle mit ausreichender Genauigkeit berücksichtigen zu können, da damit der hohe Zeitaufwand für den Modellaufbau und die Berechnung der hydrodynamisch-numerischen Modelle eingespart werden könnte.

Ziel der folgenden Analysen ist daher die Bewertung der in den hydrologischen Modellen WaSiM und LARSIM berücksichtigten konzeptionellen Routing-Ansätze in Hinsicht auf die Abbildung der bereits in Kapitel 4.1 mithilfe des hydrodynamischen Modells HYDRO\_AS-2D berechneten Gewässerzustände. Dabei sollen die Möglichkeit einer gebiets- und gewässerabschnittsabhängigen Kalibrierung dieser Routingparameter sowie deren potenzielle Übertragbarkeit bewertet werden.

#### Methodik und Vorgehensweise

Die Methodik zur Analyse und Bewertung der in hydrologischen Modellen implementierten Routing-Ansätze basiert auf einem Vergleich der Ganglinienverformung zwischen HYDRO\_AS-2D und WaSiM bzw. LARSIM. Die hydrologischen Modelle wurden mit HYDRO\_AS-2D gekoppelt, um durch einen Ganglinienvergleich das Abflussrouting in den hydrologischen Modellen bewerten zu können.

Das methodische Vorgehen der Analysen kann in fünf Schritte eingeteilt werden (Abb. 21). Zur allgemeinen Bewertung wurden die Ganglinien der kalibrierten hydrologischen Modelle für verschiedene Ereignisse und Gewässerquerschnitte mit denen des HYDRO\_AS-2D Modells verglichen. Die folgenden Sensitivitätsanalysen beinhalten sowohl eine Parametervariation im gesamten Bereich der hydrologischen Modelle (Schritt 2) als auch beschränkt auf den Bereich des jeweiligen hydrodynamischen Modells (Schritt 3). Dies ermöglicht eine erste Abschätzung, inwieweit eine Nachbildung der Ganglinienverformung aus HYDRO\_AS-2D grundsätzlich möglich ist. Abschließend wurden zunächst die Routingparameter auf die verschiedenen Modellszenarien der hydrodynamischen Modelle kalibriert (Schritt 4) und eine mögliche Übertragbarkeit auf weitere Gewässerabschnitte geprüft (Schritt 5). Hierbei wurden in WaSiM die Retentionskonstanten der Einzellinearspeicher ( $kh$ ,  $k_v$ ) und in LARSIM die Skalierungsfaktoren der Abflussschwindigkeiten ( $E_{KM}$ ,  $E_{KV}$ ) berücksichtigt (Tab. 9).

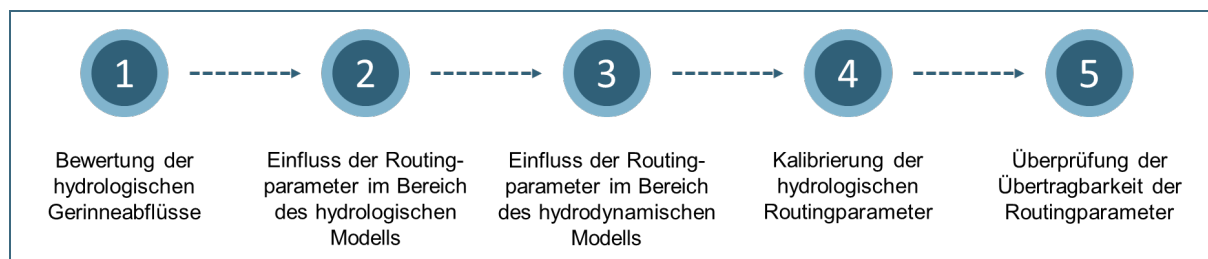


Abb. 21: Methodische Vorgehensweise der Analyse und Bewertung konzeptioneller Routingansätze



Die Scheitelverzögerungen lagen mit Gebietsmittelwerten von 0,75 h bis 3,7 h in einem im Vergleich zu den Dauern der konvektiven Ereignisse relativ großen Bereich. Die durchgehend auftretenden Scheitelverzögerungen deuten zudem auf einen systematischen Fehler der Parametrisierung des Routing-Modells in WaSiM hin. Bei den LARSIM-Modellen konnten mit Ausnahme des Weißen Mains meist deutliche Überschätzungen der Scheitelabflüsse im Vergleich zu den Ergebnissen des hydrodynamischen Modells von bis zu ca. 20 % festgestellt werden. Gebietsabhängig wurden sowohl frühere als auch spätere Eintreffzeitpunkte der Scheitelabflüsse beobachtet. Die Analyse über den Gewässerverlauf konnte überwiegend eine gleichmäßige Veränderung der Scheiteländerungen und -verzögerungen über den Gewässerverlauf im Vergleich zu HYDRO\_AS-2D nachweisen. Sprünge traten gehäuft bei seitlichen Zuflüssen und hier insbesondere bei den schnellen konvektiven Ereignissen auf.

### **Globaler Einfluss der Routingparameter**

Die Untersuchung des globalen Einflusses der Routingparameter auf den Abfluss am Gebietsauslass basiert auf einer Variation der Routingparameter im gesamten Bereich der hydrologischen Modelle mit dem Ziel, generelle Aussagen zu den Sensitivitäten der Parameter treffen zu können. In den WaSiM-Modellen wurden neun Parameter berücksichtigt, für die jeweils ein minimaler und ein maximaler Wert angenommen wurde. Die Parameter beinhalten die Speicherkoeffizienten, die Stricklerbeiwerte sowie geometriebeschreibende Parameter. In LARSIM wurden die Skalierungsfaktoren der Geschwindigkeiten von Gewässer und Vorland sowohl einzeln als auch in Kombination verändert, wobei jeweils verschiedene Stufen der Parameterwerte berücksichtigt wurden.

Die Analyse der Parametersensitivitäten resultiert gebiets- und ereignisübergreifend in großen Variationen bei einer Veränderung der Speicherkoeffizienten ( $kh$ ,  $kv$ ), des Stricklerbeiwerts im Hauptstrom sowie der Länge der Gerinnestrecke. Die Sensitivitäten der Vorlandbreite und des Stricklerbeiwerts im Vorland sind dagegen deutlich geringer. Die Sensitivitätsanalysen der LARSIM-Modelle zeigen für die Gebiete Aisch, Fränkische Saale und Weißer Main ein ähnliches Verhalten, wobei aus einer Veränderung der Parameterwerte von  $EKM$  bzw.  $EKV$  ein maßgeblicher Retentions- und Translationseffekt resultiert. Im Einzugsgebiet des Roten Mains ist dagegen die aus den Parametervariationen resultierende Retention deutlich geringer. Insbesondere bei den kleineren Ereignissen ist der Einfluss einer veränderten Retention im Vorland sehr gering.

### **Einfluss der Routingparameter im Bereich der hydrodynamischen Modelle**

In einer zweiten Sensitivitätsanalyse wurde der Einfluss einer Veränderung der Routingparameter im Bereich der hydrodynamischen Modelle untersucht. Die Parametervariationen waren dementsprechend auf die Gewässerabschnitte beschränkt, die auch mithilfe des hydrodynamischen Modells berechnet wurden, und ermöglichen so einen direkten Vergleich zwischen den Routingmethoden der hydrologischen Modelle und des hydrodynamischen Modells. Die Parameterbereiche der Variationen wurden in WaSiM und LARSIM jeweils gebietsübergreifend identisch gewählt und die resultierende Veränderung am Gebietsauslass verglichen und bewertet.

Die Reihung der resultierenden Sensitivitäten der Routing-Parameter in WaSiM stimmt mit der aus der Analyse der Gesamtgebiete überein, wobei die normierten Sensitivitäten bei den konvektiven Ereignissen meist deutlich größer sind als bei den advektiven Ereignissen. In vielen der Kombinationen aus Untersuchungsgebiet und Ereignis kann zudem durch die Anpassung eines einzelnen sensitiven Parameters die Ganglinie in den Bereich der Kurve des hydrodynamischen Modells verschoben werden, wodurch eine Kalibrierung des Abflussroutings an den Ganglinien des hydrodynamischen Modells prinzipiell möglich ist. Die Sensitivitäten der Parameter in LARSIM sind ebenfalls vergleichbar mit denen des Gesamtgebiets. Auffällig sind die vergleichsweise hohen normierten Sensitivitäten an der Aisch sowie die sehr geringen normierten Sensitivitäten der Vorland-Retention am Roten Main, die aus der in diesem Gebiet durchgehend sehr schmal definierten Vorlandbreite resultiert. Zudem konnten an der Aisch und der Fränkischen Saale eine systematische Unterschätzung der Abflussvolumina im Vergleich zu HYDRO\_AS-2D festgestellt werden.

## Gebiets- und abschnittsabhängige Ableitung der Routingparameter

Die Ableitung der Routingparameter zur Angleichung der hydrologischen Modelle an die Ergebnisse des hydrodynamischen Modells wurde in beiden hydrologischen Modellen auf die konzeptionellen Parameter beschränkt (Tab. 9). Dementsprechend wurden je Modell zwei Parameter variiert und so eine zweidimensionale Optimierung unter Berücksichtigung der gegenseitigen Beeinflussung durchgeführt. Die Analyse und Selektion der optimalen Parameterkombinationen wurden für 37 (WaSiM) bzw. 16 (LARSIM) verschiedene Gewässerabschnitte innerhalb der Untersuchungsgebiete, für zwei Modellzustände (*Ist-Mit*, *Renat*) und für die jeweiligen Ereignisse der Untersuchungsgebiete ausgeführt. Die Güte der Übereinstimmung zwischen den Ganglinien basiert auf einer Zielfunktion, in die die Scheiteldifferenz, die Scheitelverzögerung sowie zwei Parameter aus dem Series Distance Ansatz nach SEIBERT et al. (2016) eingehen. Anhand der Analysen sollte einerseits eine optimierte Wahl der Routingparameter für die verschiedenen Modellzustände abgeleitet und andererseits die Veränderung der Parameter vom Modellzustand *Ist-Mit* zu *Renat* bestimmt werden.

Die zweidimensionalen Parametervariationen wurden rasterbasiert ausgewertet, wobei jeweils Bereiche von Parameterkombinationen ermittelt wurden, die in den jeweils besten Reproduktionen der Ganglinie aus HYDRO\_AS-2D für die Abschnitt-Ereignis-Kombination resultieren. Zur Bestimmung eines einzelnen optimalen Parameterbereichs (Paretofront) bzw. der optimalen Kombination (Paretooptimum) für einen Modellabschnitt wurden die Bereiche der einzelnen Ereignisse miteinander kombiniert und eine gemeinsame Zielfunktion gebildet. Die optimalen Bereiche der Parameterkombinationen bzw. kalibrierten Werte für  $kh$  und  $kv$  liegen bei den Abschnitten der WaSiM-Modelle meist in einem niedrigen Bereich, wobei auch die Form und Lage der Bereiche zwischen den Gebieten, Abschnitten und Ereignissen überwiegend ähnlich sind. In LARSIM konnten dagegen deutlichere Sprünge der Optima von  $EKM$  und  $EKV$  zwischen den Abschnitten und Gebieten festgestellt werden. Zudem war die Sensitivität der Zielfunktion gegenüber der Parameterwahl in LARSIM meist geringer als in WaSiM.

Der Mehrwert dieser Form der Kalibrierung von  $kh$  und  $kv$  (WaSiM) bzw.  $EKM$  und  $EKV$  (LARSIM) wurde durch einen Vergleich der abschnittsweise definierten optimalen Parameter mit der Bestandsparametrisierung der hydrologischen Modelle untersucht. Die Anwendung der kalibrierten Parameter mit abschnittsweiser HYDRO\_AS-2D-Koppelung zeigt meist eine gute bis sehr gute Reproduktion der resultierenden Ganglinien. Die durchgehende Modellierung des HYDRO\_AS-2D-Modellbereichs mit WaSiM führt dagegen zu Abweichungen, die sich über den Gewässerverlauf aufbauen, jedoch dennoch zu einer Verbesserung im Vergleich zur Bestandsparametrisierung führen. Beispielhaft ist dieser Vergleich für das mit WaSiM modellierte konvektive HQ<sub>20</sub> der Glonn in Abb. 22 dargestellt.

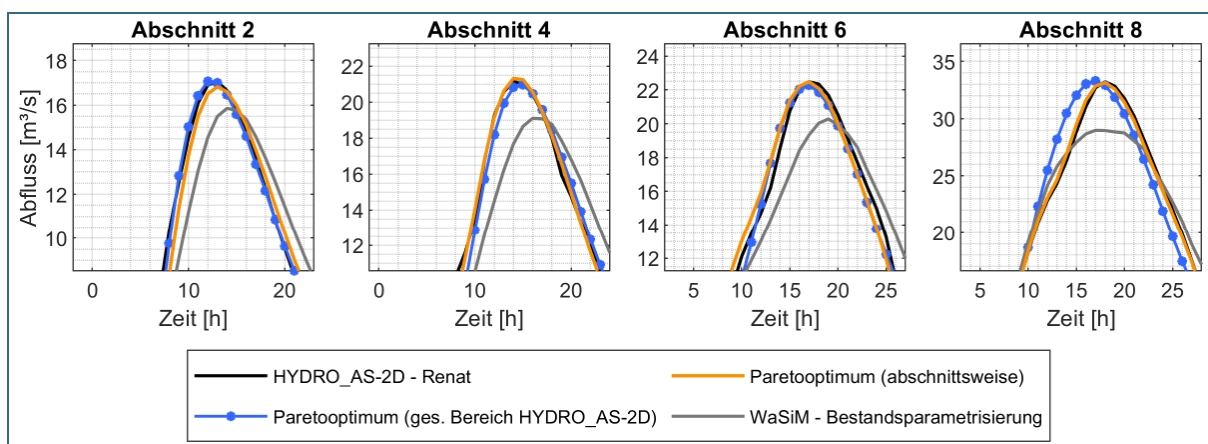


Abb. 22: Ganglinien des HYDRO\_AS-2D-Modells, der Anwendung der kalibrierten Parameter mit abschnittsweiser HYDRO\_AS-2D-Koppelung, der Anwendung der kalibrierten Parameter für den gesamten HYDRO\_AS-2D-Bereich sowie des WaSiM-Modells mit der Bestandsparametrisierung an ausgewählten Abschnitten der Glonn für das konvektive HQ<sub>20</sub>

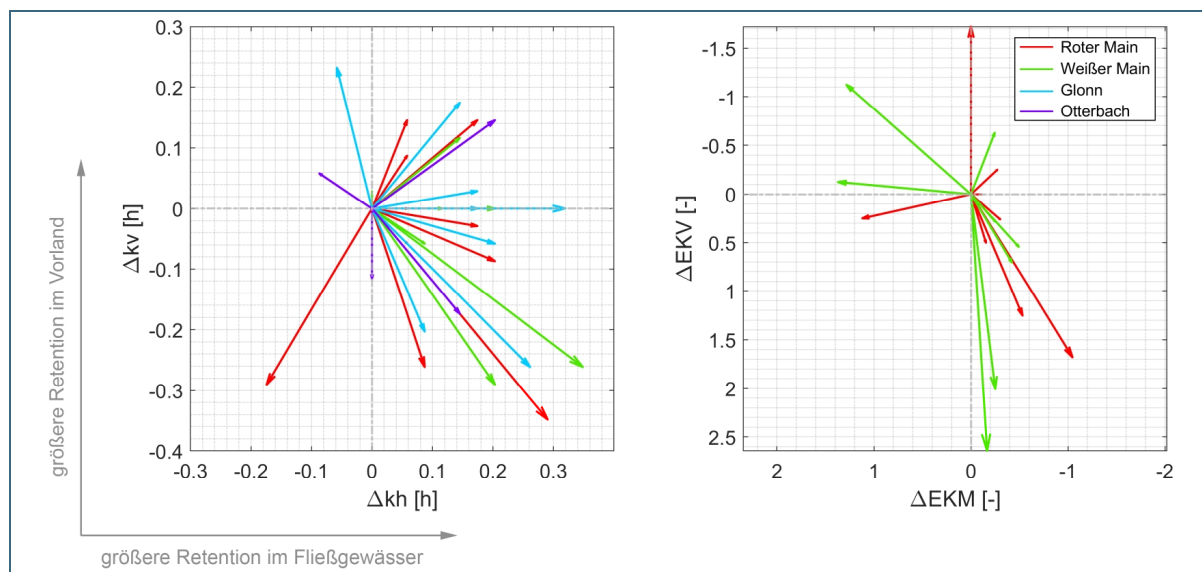


Abb. 23: Veränderungen der Retentionsparameter (WaSiM, links) bzw. der Skalierungsfaktoren (LARSIM, rechts) zur Anpassung der an den *Ist-Mit* Zustand kalibrierten Modelle an den *Renat* Zustand (die Pfeile entsprechen den Abschnitten der jeweiligen Gebiete und geben die Richtung der Veränderung von *Ist-Mit* zu *Renat* an:  $\Delta = \text{Renat} - \text{Ist-Mit}$ ; die Wirkungsweisen der Parameter sind Tab. 9 erklärt)

Aus den Kalibrierungsergebnissen der Modellzustände *Ist-Mit* und *Renat* können die für die Abbildung einer Renaturierung im hydrologischen Modell erforderlichen Parameteranpassungen für die einzelnen Abschnitte abgeleitet werden. Die Analysen zeigen eine große Streuung der erforderlichen Veränderungen, wobei keine Gruppierung der Abschnitte nach Gebieten zu erkennen ist (Abb. 23). Zur Abbildung einer Renaturierung in WaSiM ist meist eine Erhöhung der Retentionswirkung der Gewässer bei einer gleichzeitigen Erhöhung der Fließgeschwindigkeiten im Vorland erforderlich. Diese Geschwindigkeitsveränderungen resultieren möglicherweise aus den Effekten der Bauwerksentfernung bzw. -anpassung. In LARSIM konnten ebenfalls überwiegend entgegengesetzte Veränderungen von *EKM* und *EKV* als Optimum festgestellt werden.

### Übertragbarkeit der Routingparameter

Zur Untersuchung einer Übertragbarkeit der optimierten Routingparameter auf weitere Gewässerabschnitte wurden Zusammenhänge zwischen den Eigenschaften der Gewässerabschnitte und den optimalen Routingparametern gesucht. Aufgrund der komplexen Interaktionen zwischen den einzelnen Parametern, die insgesamt zu einer geringen Güte der Korrelationen zwischen den Einzelparametern geführt haben, wurde eine Multiple Lineare Regressionsanalyse durchgeführt. In diese gehen die Eigenschaften der Gewässerabschnitte wie beispielsweise das durchschnittliche Sohlgefälle, die Breite der Vorländer oder die Einzugsgebietsgröße ein, es können jedoch auch Interaktionen zwischen den einzelnen Faktoren berücksichtigt werden.

Sowohl für WaSiM als auch für LARSIM können die Zusammenhänge der Gewässer- und Vorlandeigenschaften zu den kalibrierten Routingparameter mithilfe multipler linearer Regressionsmodelle abgebildet werden. Die Güte dieser Modelle ist dementsprechend für den Kalibrierungsdatensatz meist gut, wobei die Korrelationen als signifikant bewertet werden können. Die Anwendung der für die einzelnen hydraulischen Modellzustände ermittelten Gleichungen auf den Validierungsdatensatz führt dagegen zu einer meist deutlich schlechteren Abbildung der Ganglinien bzw. maßgeblich größeren Werten der Zielfunktion. Eine Übertragbarkeit zwischen verschiedenen Gewässerabschnitten bzw. Gebieten ist dementsprechend nicht möglich. Grund für dieses Modellverhalten ist die große Anzahl an physikalischen Einflussfaktoren des Wellenablaufs und dementsprechend der Routing-Parameter im Vergleich zur geringen Zahl der für die Kalibrierung und Validierung berücksichtigten Gewässerabschnitte, die zu einer Überparametrisierung der Regressionsmodelle führt.

## Schlussfolgerungen

- Der abschnittsweise Vergleich zwischen den Ganglinien von HYDRO\_AS-2D, WaSiM und LARSIM ermöglicht eine Bewertung der in den hydrologischen Modellen implementierten konzeptionellen Routing-Ansätze für verschiedene Ereignischarakteristika und verdeutlicht die Bedeutung einer entsprechenden Parametrisierung und Kalibrierung.
- Die maßgeblichen Unterschiede in der Güte des Abfluss-Routings in Abhängigkeit der Ereignischarakteristik deuten auf die Bedeutung einer Scheitelverschiebung für die Abbildung von Überlagerungseffekten insbesondere bei schnellen Ereignissen hin. Eine korrekte Repräsentation des Wellenablaufs ist daher bei hydrologischen Modellen insbesondere in von Überlagerungseffekten beeinflussten Bereichen wie z.B. der Hochwasservorhersage oder einer optimierten Beckensteuerung von großer Relevanz.
- Die deutliche Verbesserung des Abfluss-Routings in WaSiM und LARSIM durch eine angepasste Parametrisierung der konzeptionellen Routingparameter verdeutlicht das Potenzial einer Kalibrierung dieser Parameter für eine plausible Abbildung des Wellenablaufs. Die Verschlechterung der Abbildungsqualität durch die abschnittsweise Fortpflanzung kleiner Abweichungen und die fehlende Berücksichtigungsmöglichkeit dreidimensionaler Geländegeometrien verdeutlicht jedoch auch die Notwendigkeit einer hydrodynamisch-numerischen Modellierung in Abhängigkeit der zu beantwortenden Fragestellung.
- Die breite Streuung der erforderlichen Veränderungen der Retentionsparameter zur Abbildung einer Renaturierungs- und Auengestaltungmaßnahme in einem hydrologischen Modell spiegelt die Komplexität der Abbildung dieser Maßnahmen und das dementsprechend geringe Potenzial einer belastbaren Vorhersage im Rahmen großflächiger Retentionspotenzialanalysen wider.
- Eine Übertragbarkeit der für die einzelnen Gewässerabschnitte optimierten Kombinationen der Routingparameter ist aufgrund der im Vergleich zu den Einflussfaktoren zu geringen Anzahl an betrachteten Gewässerabschnitten nicht möglich.

## Weitere Informationen

MERK, F., NEUMAYER, M., TESCHEMACHER, S. & DISSE, M. (2019): Derivation of hydrological flood routing parameters for reproducing hydrodynamic processes of river restoration measures, *EGU General Assembly 2019*, Vol.21, EGU2019-15467 (Poster). Wien.

MERK, F., NEUMAYER, M., TESCHEMACHER, S. & DISSE, M. (2020): Evaluation of adapted hydrological flood routing approaches as a cost-efficient contribution for the assessment of nature-based flood mitigation measures, *EGU General Assembly 2020*, Online, 4–8 May 2020, EGU2020-13150.



## 6 Zusammenfassung, Fazit und Ausblick

Der vorliegende Kurzbericht beschreibt die wichtigsten Ergebnisse und die daraus abgeleiteten Schlussfolgerungen des Forschungsvorhabens „Prozessbasierte Modellierung Natürlicher sowie Dezentraler Hochwasserrückhaltemaßnahmen zur Analyse der ereignis- und gebietsabhängigen Wirksamkeit (ProNaHo)“.

### 6.1 Zusammenfassung

#### Wahl der Untersuchungsgebiete

Für die Wahl der Untersuchungsgebiete wurde eine auf 13 Kriterien basierende Analyse aller Pegel und der zugehörigen Einzugsgebiete in Bayern durchgeführt. Die aus der Gebietswahl resultierenden Untersuchungsgebiete waren der Main (Pegel Mainleus), die Mangfall (Pegel Valley), die Glonn (Pegel Odelzhausen) und der Otterbach (Pegel Hammermühle). Zudem wurden für die Analysen zwei Teilgebiete des Mains (Roter Main, Pegel Bayreuth und Weißer Main, Pegel Ködnitz) und zwei Teilgebiete der Mangfall (Mangfall, Pegel Schmerold und Rottach, Pegel Rottach) selektiert.

#### Gebietsbeschreibung und -vergleich

Die vier gewählten Untersuchungsgebiete wurden in Bezug auf ihre Topographie, Geomorphologie, Landnutzung, Geologie, Böden, Hydrologie und Hydraulik analysiert, charakterisiert und miteinander verglichen. Die Gebietsgrößen der acht (Teil)Gebiete decken mit Flächen von 32 km<sup>2</sup> (Rottach) bis 1167 km<sup>2</sup> (Main, Pegel Mainleus) ein breites Spektrum ab. Die Höhenunterschiede innerhalb der Gebiete liegen zwischen 93 m (Glonn) und ca. 1200 m (Mangfall) und sind damit auch sehr variabel. Während des Simulationszeitraums von 1995 bis 2014 ist der mittlere spezifische Abfluss der Mangfall (17,3 l/(s km<sup>2</sup>)) im Vergleich am größten, gefolgt vom Main (12,0 l/(s km<sup>2</sup>)), der Glonn (9,4 l/(s km<sup>2</sup>)) und dem Otterbach (8,7 l/(s km<sup>2</sup>)).

#### Hydrologische Modellierungen

Für die vier Untersuchungsgebiete wurden hydrologische Modelle mit dem Wasserhaushaltsmodell WaSiM erstellt, parametrisiert, kalibriert und validiert. Die Parametrisierung der Böden erfolgte dabei in Abhängigkeit der überdeckenden Hauptlandnutzungsart. Mithilfe der kalibrierten Modelle wurden je Gebiet fünf Hochwasserereignisse mit unterschiedlichen Jährlichkeiten und Charakteristika generiert (advektiv: HQ<sub>5</sub>, HQ<sub>20</sub>, HQ<sub>100</sub>, (Glonn: HQ<sub>300</sub>); konvektiv: HQ<sub>5</sub>, HQ<sub>20</sub>). Diese basieren auf den für die jeweiligen Gebiete charakteristischen räumlichen und zeitlichen Niederschlagsverteilungen.

#### Hydraulische Modellierungen

Die Abschnitte der Gewässer Weißer Main, Roter Main, Mangfall, Glonn und Otterbach wurden mit dem 2D-hydrodynamisch-numerischen Modell HYDRO\_AS-2D modelliert. Dabei wurden bestehende Modelle überarbeitet (Roter Main, Weißer Main, Mangfall) und erweitert (Glonn) sowie neue Modelle erstellt (Otterbach). Nach der Durchführung der notwendigen Modellanpassungen wurden die Modelle an das hydrologische Modell WaSiM gekoppelt.

#### Bodenhydraulische Untersuchungen

Im Einzugsgebiet der Glonn wurden an einem Hang mit einer Acker-, einer Grünland- und einer Waldfläche Zwischenabflüsse, Bodenfeuchte- und Saugspannungsprofile sowie die meteorologischen Bedingungen erfasst. Die Ergebnisse zeigen deutliche Unterschiede zwischen den Zwischenabflussmengen, der räumlichen Verteilung und der Reaktionszeit in Abhängigkeit der Landnutzung. Der Vergleich der Messungen mit den Modellierungen mit WaSiM hat eine grundsätzliche Übereinstimmung der Gebietscharakteristik gezeigt.

## Landnutzungs- und Bewirtschaftungsmaßnahmen

Die Wirksamkeiten der Maßnahmentypen *Extensivierung der Landwirtschaft*, *konservierende Bewirtschaftung*, *Direktsaat*, *Aufforstung*, *ökologischer Waldumbau* und *Entsiegelung* wurden für einen potenziell realistischen und einen extremen Umfang ermittelt. Mit den Szenarien Extensivierung der Landwirtschaft und Aufforstung konnte ereignis- und gebietsübergreifend die größte Scheitelabminderung von bis zu ca. 13 % bzw. ca. 9 % bei einem  $HQ_{100}$  erreicht werden. Die mögliche Veränderung durch Aufforstungs- oder Extensivierungsmaßnahmen ist deutlich größer als die infolge konservierender Bewirtschaftung. Der wichtigste Einflussfaktor auf die Scheitelabminderung ist der Anteil der im Rahmen des Szenariums veränderten Einzugsgebietsfläche. Die absolute Einzugsgebietsfläche des Untersuchungsgebiets hat nur einen geringen Einfluss auf die Wirksamkeit.

## Hydrologische Sensitivitätsanalysen

Basierend auf eindimensionalen Sensitivitätsanalysen konnten die Bandbreite möglicher Scheitel- und Volumenänderungen sowie normierte Parametersensitivitäten gebiets- und ereignisübergreifend ermittelt werden. Große Bandbreiten der Scheiteländerungen bzw. große mittlere normierte Sensitivitäten und Standardabweichungen konnten insbesondere für die Dichte, den organischen Anteil, den Boden-Oberflächenverdunstungswiderstand und den Vegetationsbedeckungsgrad festgestellt werden.

## Dezentrale Hochwasserrückhaltebecken

Für die acht Untersuchungsgebiete wurden mithilfe eines automatisierten Ansatzes potenzielle Beckenstandorte ( $0,9 - 2,0/\text{km}^2$ ) bestimmt, mit denen ein spezifisches Gesamtrückhaltevolumen von 8,1 bis 32,3 mm erreicht werden kann. Bei zufällig gewählten Beckenkombinationen konnte durch eine günstige Beckenvorauswahl die Scheitelabminderung am jeweiligen Gebietsauslass um ca. 10 % gesteigert werden. Eine Standortoptimierung der Becken führte zu einer weiteren Zunahme um ca. 50 %. Standort- und drosseloptimierte Beckenkombinationen erreichen damit im Mittel ca. 50-60 % der Scheitelabminderung, die bei gleichem Beckenvolumen durch eine horizontale Kappung der Ganglinie erreicht würde. Die zu erwartenden Scheitelabminderungen variieren stark in Abhängigkeit von Gebiets- und Ereigniseigenschaften und liegen bei einem advektiven  $HQ_{100}$  und einem spezifischen Volumen von 5 mm im Bereich von ca. 15-30 %.

## Auengestaltung und Gewässerrenaturierungen

Die Wirksamkeit der Renaturierungs- und Auengestaltungsmaßnahmen wurde an fünf Gewässern unter Berücksichtigung der drei Modellszenarien „*Ist mit Bauwerken*“, „*Ist ohne Bauwerke*“ und „*potenziell natürlich*“ (nach Methode 3) untersucht. Es konnte eine starke Abhängigkeit der erreichten Scheitelabminderungen und -verzögerungen von den Untersuchungsgebieten und Hochwasserereignissen festgestellt werden. In allen Gebieten wurden durch die Auswertungen der Kontrollquerschnitte lokale Wellenüberlagerungseffekte nachgewiesen, die den Scheitelabfluss sowohl reduzieren als auch erhöhen können. Es wurde eine tendenzielle Abnahme der Scheitelabminderung mit zunehmender Jährlichkeit und zunehmendem Abflussvolumen festgestellt, wobei diese bei einem advektiven  $HQ_{100}$  bei maximal 1,9 % (Glonn) liegt.

## Renaturierung mit variabler Auenstruktur

Die Renaturierungsmethode 4 wurde für das Hauptgewässer des Weißen Mains entwickelt und angewandt. Im Vergleich zur Methode 3 beinhaltet sie eine variable, naturnahe Sohl-, Gelände- und Vegetationsstruktur der Auenlandschaft. Der zeitliche Aufwand zur Erstellung und Berechnung des resultierenden Modells ist im Vergleich zu Methode 3 deutlich erhöht. Bei einer differenzierten Analyse, z.B. der Geschwindigkeiten im Vorland, konnten Unterschiede zwischen den beiden Methoden festgestellt werden, da durch die Grabenstrukturen in diesen Bereichen erhöhte Geschwindigkeiten auftreten. Ein ausschließlicher Vergleich der durch die Renaturierung erreichbaren Scheitelabminderungen und Translationen hat dagegen nur vernachlässigbar kleine Unterschiede gezeigt.

## **Modellierung des Weißen Mains und ausgewählter Zuflüsse**

Für drei Zuflüsse des Weißen Mains (Schorgast, Trebgast, Kronach) wurden die drei oben genannten Modellszenarien erstellt, an das bestehende Modell des Weißen Mains angeschlossen und als Gesamtmodell gerechnet. Ziele waren dabei die Berücksichtigung zusätzlicher Fließgewässercharakteristika sowie die Analyse von Wellenüberlagerungseffekten am Weißen Main. Die Unterschiede zwischen den beiden Modellen sind vergleichsweise gering, wobei aus den zusätzlich renaturierten Gewässerabschnitten sowohl positive als auch negative Veränderungen der Wellenüberlagerungen resultieren.

## **Hydraulische Sensitivitätsanalysen**

Die Möglichkeiten und Grenzen der angewandten Methodik der hydraulischen Modellierung wurde anhand von Sensitivitätsanalysen der Rauheitsparametrisierung untersucht. An den ausgewählten 2 km langen Modellabschnitten konnte eine geringe bis moderate Sensitivität gegenüber der variierten Rauheitsparametrisierung in Bezug auf die Verformung der Hochwasserganglinie festgestellt werden.

## **Biberdammsszenarien**

Basierend auf Messdaten und Literaturanalysen zu an Biberdammstandorten typischen Gewässereigenschaften, Kaskadenformen und Dammkonstruktionsparametern wurden in die hydrodynamischen Modelle von Otterbach und Glonn jeweils zwei potenzielle Biberdammkaskaden implementiert. Durch die Berücksichtigung der Biberdämme nehmen die Überflutungsflächen und der genutzte Retentionsraum im Bereich der Dammstandorte deutlich zu, wohingegen die durch Überlagerungseffekte beeinflussten Scheitelabminderungen an den Gebietsauslässen für die untersuchten 5- bzw. 20-jährlichen Ereignisse im Bereich von -3,1 % bis +0,1 % lagen. Der Einfluss der untersuchten Biberdammkaskaden auf den Hochwasserabfluss ist daher vernachlässigbar.

## **Kombinationsszenarien**

Die Kombinationsszenarien stellen eine gemeinsame Betrachtung der im Rahmen des Projekts untersuchten dezentralen Hochwasserrückhaltmaßnahmen dar. Die Einzelszenarien wurden nacheinander in die hydrologischen und hydrodynamischen Modelle implementiert. Es konnte eine deutliche Variation der Wirksamkeit der einzelnen Maßnahmenbausteine in Abhängigkeit der Gebiets- und Ereignischarakteristik festgestellt werden. Durch die Kombination aller Maßnahmen führte das gebiets- und ereignisübergreifend zu deutlichen Scheitelabminderungen (16 % bis 53 %). Die Jährlichkeit des  $HQ_{100}$  konnte so auf  $< HQ_{50}$  (Roter Main, Glonn) bzw. auf  $< HQ_{20}$  (Weißer Main, Otterbach) reduziert werden.

## **Szenarien-, gebiets- und ereignisübergreifende Analysen**

Die Gegenüberstellung der einzelnen Maßnahmen konnte die große Variabilität der möglichen Scheitelreduktionen in Abhängigkeit des Gebiets, des Ereignisses sowie des untersuchten Szenarios verdeutlichen. Die festgestellte Bandbreite lag zwischen -5,3 % und +65,9 %. Bei den Analysen der Einflüsse der Ereignis-, Gebiets- und Szenarieneigenschaften konnten zwar Tendenzen abgeleitet werden, jedoch waren keine allgemeingültigen Abhängigkeiten der Wirksamkeit von den Einflussfaktoren erkennbar. Bei den Kombinationsszenarien konnten meist größere Scheitelabminderungen ermittelt werden als für die aufsummierten Einzelszenarien.

## **Analyse konzeptioneller Routingansätze**

Der Vergleich der in WaSiM und LARSIM implementierten konzeptionellen Routing-Ansätze mit der Wellenverformung durch das hydrodynamisch-numerische Modell HYDRO\_AS-2D konnte eine potenzielle Verbesserung des Abfluss-Routings durch eine optimierte Parametrisierung nachweisen. Die Übertragbarkeit der kalibrierten Parameter auf weitere Gewässerabschnitte bzw. Modellgebiete war dagegen nicht möglich. Zudem ist aufgrund der breiten Streuung der für die Abbildung einer Renaturierungsmaßnahme in einem hydrologischen Modell erforderlichen Parameterveränderungen eine Ermittlung der daraus resultierenden Retentionseffekte mit sehr großen Unsicherheiten behaftet.

## 6.2 Fazit und Ausblick

Die gewählten Gebiete decken eine große Bandbreite der Fließgewässerlandschaften in Bayern ab und liegen in einem weiten Skalenbereich von ca. 100 km<sup>2</sup> bis 1000 km<sup>2</sup>. Allerdings war es aus der geringen Anzahl von acht untersuchten Gebieten und Teilgebieten nicht möglich, allgemeingültige Beziehungen zwischen natürlichen bzw. dezentralen Hochwasserrückhaltemaßnahmen und einer daraus resultierenden Hochwasserscheitelreduzierung aufzustellen.

Die Kombination des physikalisch-basierten hydrologischen Modells WaSiM und des hydrodynamisch-numerischen Modells HYDRO\_AS-2D in einem gekoppelten Modellansatz ermöglichte eine gute Abbildung der einzelnen Szenarienbausteine, wodurch die Modellunsicherheiten insgesamt reduziert werden konnten. Aufgrund von identischen Ansätzen zur Erstellung, Parametrisierung und Kalibrierung der Modelle sowie der Generierung von Hochwasserereignissen konnte zudem die Vergleichbarkeit zwischen den Untersuchungsgebieten verbessert werden.

Die Quantifizierung der potenziellen Wirksamkeiten von Renaturierungs- und Auenszenarien, Landnutzungs- und Bewirtschaftungsänderungen, dezentralen Rückhaltebecken und Biberdammkaskaden konnte erfolgreich durchgeführt werden. Im Rahmen der Sensitivitätsanalysen wurden sensitive Parameter bestimmt, die die Abhängigkeit der Wirksamkeit von der jeweiligen Szenarienumsetzung verdeutlichen und dementsprechend bei weiteren Simulationen vertiefter betrachtet und analysiert werden sollten. Aus den Modellergebnissen konnten Tendenzen zum Einfluss der Ereignis-, Gebiets- und Szenarieneigenschaften sowie der Skala auf die Retention und Translation abgeleitet werden.

Die Kalibrierung der Retentionsparameter in den Routing-Ansätzen hydrologischer Modelle führt zu einer Verbesserung der Abbildung des Wellenablaufs und damit zu einer belastbareren Ermittlung von Überlagerungseffekten. Eine Übertragbarkeit der Parameter zwischen den Gewässerabschnitten bzw. eine Vorhersage der erforderlichen Veränderungen für die Berücksichtigung einer Renaturierung in den hydrologischen Modellen ist nicht möglich.

Aufgrund des großen Umfangs der untersuchten Szenarien können die Ergebnisse der Studie zur Abschätzung einer zu erwartenden potenziellen Wirksamkeit bzw. einer grundsätzlichen Maßnahmenbewertung dienen. Die Stichprobe der Gebiete war jedoch wegen der großen Variabilität der Eingangsdaten, der Komplexität der hydrologischen und hydraulischen Prozesse sowie der aus den Modellanwendungen resultierenden Ergebnisse zur Ableitung allgemeingültiger Aussagen nicht umfangreich genug. Dementsprechend ist weder die Vorhersage einer gebietsspezifischen Wirksamkeit noch eine quantitative Bewertung der verschiedenen Einflussfaktoren möglich. Die große Heterogenität der bayerischen Flussgebiete lässt vermuten, dass die Unsicherheiten zwischen den zu erwartenden Wirksamkeiten für universelle Formeln oder Nomogramme im Allgemeinen zu groß sind. Daher ist zur Gewinnung einer zuverlässigen Information zur Wirksamkeit einer Maßnahmensumsetzung eine jeweils individuelle Modellierung und Bewertung des Gewässers zu empfehlen. Gegebenenfalls könnte die Übertragbarkeit bzw. die Prognose von Wirksamkeiten durch eine maßgebliche Erhöhung der Gebiete, Szenarien und Ereignisse in Kombination mit Methoden des maschinellen Lernens bzw. der künstlichen Intelligenz verbessert werden.

Insgesamt sind natürliche und dezentrale Hochwasserrückhaltemaßnahmen eine wichtige und sinnvolle Ergänzung zum technischen Hochwasserschutz. Die größten Wirksamkeiten können durch dezentrale Rückhaltebecken gefolgt von Landnutzungsänderungen erreicht werden. Die Scheitelabminderungen durch eine Gewässerrenaturierung mit Auwaldanschluss und die untersuchten Bewirtschaftungsmaßnahmen liegen auf einem vergleichbaren, deutlich niedrigeren Niveau. Der Effekt von Biberdämmen auf den Hochwasserabfluss ist vernachlässigbar klein.

## 7 Literaturverzeichnis

ABBOTT, M.B. (1979): Computational hydraulics: Elements of the theory of free surface flows. Monographs and surveys in water resources engineering 1. London: Pitman.

BCE (2020): 2D-Renaturierungsmodellierungen an ausgewählten Flussabschnitten von Aisch und Fränkische Saale: Erläuterungsbericht. (unveröffentlicht).

BFGR (2005<sup>5</sup>): Bodenkundliche Kartieranleitung der Ad-Hoc-Arbeitsgruppe Boden: Mit 41 Abbildungen, 103 Tabellen und 31 Listen. Hannover: Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe.

BRIEM, E. (2002): Fließgewässerlandschaften in Bayern. Deggendorf: Wasserwirtschaftsamt Deggendorf.

DAHM, V., KUPILAS, B., ROLAUFFS, P., HERING, D., HAASE, P., KAPPES, H., LEPS, M., SUDNERMANN, A., DÖBBELT-GRÜNE, S., HARTMANN, C., KOENZEN, U., REUVERS, C., ZELLMER, U., ZINS, C. & WAGNER, F. (2014): Hydromorphologische Steckbriefe der deutschen Fließgewässertypen: Anhang 1 von „Strategien zur Optimierung von Fließgewässer-Renaturierungsmaßnahmen und ihrer Erfolgskontrolle“, 43/2014.

DIN 19700-12 (2004): Stauanlagen - Teil 12: Hochwasserrückhaltebecken. Berlin: Beuth (2004) 93.160, 19700-12.

DWA-M522 (2015): Kleine Talsperren und kleine Hochwasserrückhaltebecken. Hennef: Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e.V. (DWA) (2015), 522.

DWA-M550 (2015): Dezentrale Maßnahmen zur Hochwasserminderung. Hennef: Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e.V. (DWA) (2015), 550.

KOENZEN, U. (2005): Fluss- und Stromauen in Deutschland - Typologie und Leitbilder. – Angewandte Landschaftsökologie, 65.

LDBV (2008-2014): Tatsächliche Nutzung der Erdoberfläche: Bestandteil des ALKIS im Maßstab 1:1000. München: Bayerisches Landesamt für Digitalisierung, Breitband und Vermessung.

LFU (2015a): Digitale Übersichtsbodenkarte von Bayern im Maßstab 1:25'000 (ÜBK25). Augsburg: Bayerisches Landesamt für Umwelt.

LFU (2015b): Handbuch hydraulische Modellierung: Vorgehensweisen und Standards für die 2D-Modellierung von Fließgewässern in Bayern: Handbuch. München (2015).

MERK, F., TESCHEMACHER, S., NEUMAYER, M. & DISSE, M. (2020): Band V: Szenarien- und Modellübergreifende Analysen, Fazit und Ausblick. In: DISSE, M. (Hrsg.). Prozessbasierte Modellierung Natürlicher sowie dezentraler Hochwasserrückhaltmaßnahmen zur Analyse der ereignis- und gebietsabhängigen Wirksamkeit (ProNaHo): Abschlussbericht. München (unveröffentlicht).

NEUMAYER, M., HEINRICH, R., MERK, F., TESCHEMACHER, S. & DISSE, M. (2020): Band IV: Hydraulische Szenarien und Sensitivitätsanalysen. In: DISSE, M. (Hrsg.). Prozessbasierte Modellierung Natürlicher sowie dezentraler Hochwasserrückhaltmaßnahmen zur Analyse der ereignis- und gebietsabhängigen Wirksamkeit (ProNaHo): Abschlussbericht. München (unveröffentlicht).

NUJIĆ, M. (1998): Praktischer Einsatz eines hochgenauen Verfahrens für die Berechnung von tiefengemittelten Strömungen. Mitteilungen / Institut für Wasserwesen 62. Neubiberg: Inst. für Wasserwesen Univ. der Bundeswehr München.

NUJIĆ, M. & HYDROTEC (2018): HYDRO\_AS-2D Benutzerhandbuch: 2D-Strömungsmodell für die wirtschaftliche Praxis. Aachen.

NYSSSEN, J., PONTZEELE, J. & BILLI, P. (2011): Effect of beaver dams on the hydrology of small mountain streams: Example from the Cheval in the Ourthe Orientale basin, Ardennes, Belgium. – Journal of Hydrology 402, 1-2, 92–102.

POTTGIESSER, T. & SOMMERHÄUSER, M. (2008): Aktualisierung der Steckbriefe der bundesdeutschen Fließgewässertypen.

- PUTTOCK, A., GRAHAM, H.A., CUNLIFFE, A.M., ELLIOTT, M. & BRAZIER, R.E. (2017): Eurasian beaver activity increases water storage, attenuates flow and mitigates diffuse pollution from intensively-managed grasslands. – *The Science of the total environment* 576, 430–443.
- RIEGER, W. (2012): Prozessorientierte Modellierung dezentraler Hochwasserschutzmaßnahmen. *Mitteilungen / Institut für Wasserwesen* 116. Neubiberg: Shaker Verlag.
- SCHULLA, J. (1997): Hydrologische Modellierung von Flussgebieten zur Abschätzung der Folgen von Klimaänderungen. Zürich.
- SCHULLA, J. (2015): Model Description: WaSiM, [www.wasim.ch/downloads/doku/wasim/wasim\\_2015\\_en.pdf](http://www.wasim.ch/downloads/doku/wasim/wasim_2015_en.pdf) (Zugriff: 2017-12-20).
- SCHWAB, G. & SCHWEMMER, H. (2017): Der Biber in Bayern: Willkommen zurück!, <https://www.bund-naturschutz.de/tiere-inbayern/saeugetiere/biber.html> (Zugriff: 2018-02-06).
- SEIBERT, S.P., EHRET, U. & ZEHE, E. (2016): Disentangling timing and amplitude errors in streamflow simulations. – *Hydrology and Earth System Sciences* 20, 3745–3763.
- STMELF (2005-2014): Zentrale InVeKoS Datenbank. München: Bayerisches Staatsministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Forsten.
- STMLU (2002): Daten+Fakten+Ziele: Hochwasserschutz in Bayern: Aktionsprogramm 2020. München.
- STMUV (2014): Hochwasserschutz: Aktionsprogramm 2020plus. München: StMUV.
- TESCHEMACHER, S., MERK, F. & NEUMAYER, M. (2020a): Band III: Hydrologische Feldmessungen, Szenarien und Sensitivitätsanalysen. In: DISSE, M. (Hrsg.). *Prozessbasierte Modellierung Natürlicher sowie dezentraler Hochwasserrückhaltmaßnahmen zur Analyse der ereignis- und gebietsabhängigen Wirksamkeit (ProNaHo): Abschlussbericht*. München (unveröffentlicht).
- TESCHEMACHER, S., NEUMAYER, M., MERK, F., HEINRICH, R., SPRINGER, J., HAAS, S. & DISSE, M. (2020b): Band I: Projektübersicht. In: DISSE, M. (Hrsg.). *Prozessbasierte Modellierung Natürlicher sowie dezentraler Hochwasserrückhaltmaßnahmen zur Analyse der ereignis- und gebietsabhängigen Wirksamkeit (ProNaHo): Abschlussbericht*. München (unveröffentlicht).
- TESCHEMACHER, S., NEUMAYER, M., MERK, F., SPRINGER, J., HAAS, S. & DISSE, M. (2020c): Band II: Gebietswahl, Gebietsanalyse und Modellbasis. In: DISSE, M. (Hrsg.). *Prozessbasierte Modellierung Natürlicher sowie dezentraler Hochwasserrückhaltmaßnahmen zur Analyse der ereignis- und gebietsabhängigen Wirksamkeit (ProNaHo): Abschlussbericht*. München (unveröffentlicht).
- WÖSTEN, J.M., LILLY, A., NEMES, A. & LE BAS, C. (1999): Development and use of a database of hydraulic properties of European soils. – *Geoderma*, 90(3-4), 169–185.
- YÖRÜK, A. (2009): Unsicherheiten bei der hydrodynamischen Modellierung von Überschwemmungsgebieten: Zugl.: Neubiberg, Univ. der Bundeswehr München, Diss., 2008. *Mitteilungen / Universität der Bundeswehr München, Institut für Wasserwesen, Siedlungswasserwirtschaft und Abfalltechnik* 99. Aachen: Shaker.
- ZAHNER, V., LORZ, C. & SCHLOEMER, S. (2017): Die Wirkung des Europäischen Bibers (*Castor fiber*) auf den natürlichen Wasserrückhalt an ausgewählten Fließgewässern Bayerns. Weihenstephan.