

**KLIWAS Schriftenreihe  
KLIWAS-45/2014**

**Schlussbericht  
KLIWAS-Projekt 4.03**

**Verkehrswasserbauliche Regelungs- und  
Anpassungsoptionen an klimabedingte  
Veränderungen des Abflussregimes am  
Beispiel des Rheins zwischen Mainz und  
St. Goar**

Koblenz, im Dezember 2014



# KLIWAS Schriftenreihe

## KLIWAS-45/2014

Schlussbericht  
KLIWAS-Projekt 4.03

Verkehrswasserbauliche Regelungs- und  
Anpassungsoptionen an klimabedingte  
Veränderungen des Abflussregimes am  
Beispiel des Rheins zwischen Mainz und  
St. Goar

**Autoren:**

**Michael Schröder  
Sven Wurms**

*Zitiervorschlag:*

SCHRÖDER, M., WURMS, S. (2014): Verkehrswasserbauliche Regelungs- und Anpassungsoptionen an klimabedingte Veränderungen des Abflussregimes. Schlussbericht KLIWAS-Projekt 4.03. KLIWAS-45/2014. BAW / BfG, Koblenz.

DOI: 10.5675/Kliwas\_45/2014\_4.03

URL: [http://doi.bafg.de/KLIWAS/2014/Kliwas\\_45\\_2014\\_4.03.pdf](http://doi.bafg.de/KLIWAS/2014/Kliwas_45_2014_4.03.pdf)



## Inhaltsverzeichnis

<b>04</b>		<b>TABELLENVERZEICHNIS</b>
<b>04</b>		<b>ABBILDUNGSVERZEICHNIS</b>
<b>07</b>	<b>1</b>	<b>KURZFASSUNG</b>
<b>09</b>	<b>2</b>	<b>ZIELE</b>
<b>10</b>	<b>3</b>	<b>STAND DER FORSCHUNG</b>
<b>13</b>	<b>4</b>	<b>METHODEN</b>
<b>18</b>	<b>5</b>	<b>DURCHGEFÜHRTE ARBEITEN</b>
<b>18</b>	<b>5.1</b>	<b>MODELLERSTELLUNG</b>
<b>22</b>	<b>5.2</b>	<b>DATENERHEBUNG</b>
<b>22</b>	<b>5.3</b>	<b>HYDRAULISCH-MORPHOLOGISCHE ANALYSE DER BETROFFENHEIT DER WASSERSTRAßE</b>
<b>24</b>	<b>5.4</b>	<b>KONZEPTION VERKEHRSWASSERBAULICHER ANPASSUNGSOPTIONEN</b>
<b>26</b>	<b>6</b>	<b>VERNETZUNG DES PROJEKTES, KOOPERATIONSPARTNER</b>
<b>28</b>	<b>7</b>	<b>ERGEBNISSE</b>
<b>28</b>	<b>7.1</b>	<b>ERREICHTER METHODISCH-WISSENSCHAFTLICHER FORTSCHRITT</b>
<b>28</b>	<b>7.2</b>	<b>KERNAUSSAGEN ZU DEN ERGEBNISSEN</b>
<b>29</b>	<b>7.2.1</b>	<b>NAHE ZUKUNFT</b>
<b>30</b>	<b>7.2.2</b>	<b>FERNE ZUKUNFT</b>
<b>32</b>	<b>7.3</b>	<b>EINSCHÄTZUNG ZUM GRAD DER BETROFFENHEIT DES SYSTEMS WASSERSTRAßE UND DES OPERATIVEN GESCHÄFTS DER WSV IM GESCHÄFTSBEREICH DES BMVI</b>
<b>32</b>	<b>7.4</b>	<b>KERNAUSSAGEN ÜBER MÖGLICHE ANPASSUNGSOPTIONEN UND HANDLUNGSEMPFEHLUNGEN</b>
<b>42</b>	<b>8</b>	<b>DISKUSSION UND AUSBLICK</b>
<b>44</b>	<b>9</b>	<b>DANKSAGUNG</b>
<b>45</b>	<b>10</b>	<b>LITERATUR</b>
<b>47</b>	<b>11</b>	<b>ABKÜRZUNGEN</b>

Seite

Tabelle

## Tabellenverzeichnis

27	1	PROJEKT 4.03 - KOOPERATIONEN UND AUFTRÄGE
29	2	PROJIZIERTE ÄNDERUNGEN DER BAGGERUNGEN IN DER NAHEN ZUKUNFT IM VERGLEICH ZUR REFERENZPERIODE 1961 BIS 1990 UNTER ANGABE DER ZUGRUNDE LIEGENDEN ABFLUSSPROJEKTIONEN UND DER ÄNDERUNGEN DER HYDROLOGISCHEN KENNWERTE
31	3	PROJIZIERTE ÄNDERUNGEN DER BAGGERUNGEN IN DER FERNEN ZUKUNFT IM VERGLEICH ZUR REFERENZPERIODE 1961 BIS 1990 UNTER ANGABE DER ZUGRUNDE LIEGENDEN ABFLUSSPROJEKTIONEN UND DER ÄNDERUNGEN DER HYDROLOGISCHEN KENNWERTE

Seite

Abbildung

## Abbildungsverzeichnis

13	1	PILOTSTRECKE MAINZ BIS ST. GOAR (RHEIN-KM 493,00 BIS 557,50)
15	2	PROJIZIERTE ÄNDERUNGEN DES GLQ IN DER NAHEN UND FERNEN ZUKUNFT BEZOGEN AUF DIE REFERENZPERIODE 1961 BIS 1990 SOWIE FESTGELEGTE SZENARIENKORRIDORE AM PEGEL KAUB. DATEN AUS NILSON ET AL. (2013)
17	3	BESCHLEUNIGUNG DES 2D-MORPHODYNAMISCHEN MODELLS UNTER VERWENDUNG EINES MORPHOLOGISCHEN BESCHLEUNIGUNGSFAKTORS (MFAC) BEI GLEICHZEITIGER SKALIERUNG DER HYDROLOGISCHEN RANDBEDINGUNGEN (GANGLINIE VOM 1.7.1997 BIS 30.6.2000) UM MFAC UND ANPASSUNG DER UNTERHALTUNGSAKTIVITÄTEN
20	4	ABLAUFSCHHEMA DER 2D-MORPHODYNAMISCHEN SIMULATIONEN VON DER MODELLERSTELLUNG BIS ZUR MODELLANWENDUNG IM RAHMEN DER MORPHODYNAMISCHEN PROJEKTIONEN
21	5	GEGENÜBERSTELLUNG DER VOLUMINA REALER UNTERHALTUNGS- BAGGERUNGEN INNERHALB DES GESCHIEBEFANGS (OBERES DIAGRAMM) UND DER FAHRRINNE (UNTERES DIAGRAMM) MIT BAGGERUNGEN AUS DEM 2D-FESTSTOFFTRANSPORTMODELL FÜR DEN ZEITRAUM VOM 1.7.1997 BIS 30.6.2004

Seite	Abbildung	
24	6	ANPASSUNG DER HEUTIGEN FAHRRINNENTIEFEN AN DIE VERÄNDERTEN BEZUGSWASSERSTÄNDE ÜBER DIE GESAMTE FAHRRINNENBREITE (ABB. LINKS) SOWIE AUF REDUZierter BREITE (ABB. RECHTS)
28	7	VOLUMINA DER FEHLSTELLEN INNERHALB DER FAHRRINNE IN DEN TEILSTRECKEN ZWISCHEN MAINZ UND ST. GOAR (RHEIN-KM 493,00 BIS 557,50) GEMÄß WSV-EINTEILUNG INFOLGE REDUZierter NIEDRIGWASSERABFLÜSSE GLQ (SOHLENPEILUNGEN 2004 BIS 2006)
30	8	PROJIZIERTE BANDBREITE DER IN LÄNGSRICHTUNG AKKUMULIERTEN VOLUMINA DER SOHLENÄNDERUNGEN ÜBER DIE FLUSSBREITE IN DER PERIODE 2021 BIS 2050 (NAHE ZUKUNFT) IM VERGLEICH ZUR SOHLENÄNDERUNG IN DER REFERENZ-PERIODE 1961 BIS 1990, BEGINNEND UNTERSTROM DES GESCHIEBEFANGS AB RHEIN-KM 494,46 UNTER ANGABE DER ÄNDERUNGEN DER HYDROLOGISCHEN KENNWERTE DER ABFLUSSPROJEKTIONEN, WELCHE IM UNTEREN BZW. OBEREN RAND DER BANDBREITE RESULTIEREN
31	9	PROJIZIERTE BANDBREITE DER IN LÄNGSRICHTUNG AKKUMULIERTEN VOLUMINA DER SOHLENÄNDERUNGEN ÜBER DIE FLUSSBREITE IN DER PERIODE 2071 BIS 2100 (FERNE ZUKUNFT) IM VERGLEICH ZUR SOHLENÄNDERUNG IN DER REFERENZ-PERIODE 1961 BIS 1990, BEGINNEND UNTERSTROM DES GESCHIEBEFANGS AB RHEIN-KM 494,46 UNTER ANGABE DER ÄNDERUNGEN DER HYDROLOGISCHEN KENNWERTE DER ABFLUSSPROJEKTIONEN, WELCHE IM UNTEREN BZW. OBEREN RAND DER BANDBREITE RESULTIEREN
33	10	REDUKTION DER KLIMABEDINGTEN ERHÖHUNG DES UNTERHALTUNGSaufWANDES IN DEN TEILSTRECKEN INFOLGE DER ABGESTUFTEN UNTERHALTUNG UNTER VERWENDUNG DER ABFLUSSPROJEKTION C20_A1B_EH5R1_CCLM_20_LS FÜR DIE FERNE ZUKUNFT (2071 BIS 2100)
33	11	DIFFERENZ DER HÖHEN DER MODELLSOHLE IM BEREICH OESTRICH AUFGRUND DES EINBAUS DER REGELUNGSMAßNAHMEN SOWIE DER ABGESTUFTEN FAHRRINNE GEGENÜBER IST-ZUSTAND
34	12	AUSWIRKUNG DER REGELUNGSMAßNAHMEN IM BEREICH OESTRICH AUF DIE SOHLSCHUBSPANNUNGEN BEI BETTBILDENDEM ABFLUSS
35	13	DIFFERENZ DER HÖHEN DER MODELLSOHLE IM BEREICH KEMPTENER FAHRWASSER AUFGRUND DES EINBAUS DER REGELUNGSMAßNAHME SOWIE DER ABGESTUFTEN FAHRRINNE GEGENÜBER IST-ZUSTAND
35	14	AUSWIRKUNG DER REGELUNGSMAßNAHME IM BEREICH RÜDESHEIMER AUE AUF DIE SOHLSCHUBSPANNUNGEN BEI BETTBILDENDEM ABFLUSS
36	15	DIFFERENZ DER HÖHEN DER MODELLSOHLE IM BEREICH BACHARACHER WERTH AUFGRUND DER REGELUNGSMAßNAHME SOWIE DES EINBAUS DER ABGESTUFTEN FAHRRINNE GEGENÜBER IST-ZUSTAND

Seite	Abbildung	
37	16	AUSWIRKUNG DER REGELUNGSMABNAHMEN IM BEREICH BACHARACHER WERTH AUF DIE SOHLSCHUBSPANNUNGEN BEI BETTBILDENDEM ABFLUSS
38	17	DIFFERENZ DER HÖHEN DER MODELLSOHLE IM BEREICH TAUBER WERTH/ JUNGFERNGRUND AUFGRUND DER REGELUNGSMABNAHME SOWIE DES EINBAUS DER ABGESTUFTEN FAHRRINNE GEGENÜBER IST-ZUSTAND
38	18	AUSWIRKUNG DER REGELUNGSMABNAHMEN IM BEREICH TAUBER WERTH/ JUNGFERNGRUND AUF DIE SOHLSCHUBSPANNUNGEN BEI BETTBILDENDEM ABFLUSS
39	19	VERRINGERUNG DER KLIMABEDINGTEN ERHÖHUNG DER BAGGERVOLUMINA („FERNE ZUKUNFT PESSIMISTISCH“) IN DEN TEILSTRECKEN GEMÄß WSV-EINTEILUNG INFOLGE EINER KOMBINATION DER ABGESTUFTEN FAHRRINNE MIT ZWEI LÄNGSWERKEN IN DEN BEREICHEN OESTRICH UND KEMPTENER FAHRWASSER („FERNE ZUKUNFT PESSIMISTISCH + ANPASSUNGSOPTIONEN“)
40	20	WIRKUNG EINER TEMPORÄREN, VOLLSTÄNDIGEN ABSPERRUNG DES SEITENARMS EINER STROMVERZWEIGUNG AUF DIE WASSERSPIEGELLAGE BEI EXTREMEM NIEDRIGWASSERABFLUSS



# 1 Kurzfassung

Abflussprojektionen für den Rhein zeigen, dass die Häufigkeit und Dauer der Niedrigwasserabflüsse in der fernen Zukunft (Jahre 2071 bis 2100) zunehmen könnten (Nilson et al., 2010). Für die Schifffahrt bedeutet dies einerseits eine Verringerung der Leichtigkeit und Sicherheit insbesondere in Engpassbereichen und andererseits die Abnahme der Wirtschaftlichkeit des Transports per Schiff, da die maximal möglichen Abladetiefen reduziert werden. Im KLIWAS-Projekt 4.03 wurden daher die Eignung und Wirksamkeit verkehrswasserbaulicher Anpassungsoptionen als Reaktion auf mögliche klimabedingte hydrologische und morphologische Änderungen untersucht, um die Schifffahrt in frei fließenden Wasserstraßen auch unter extremen Niedrigwasserbedingungen – optimalerweise unter Minimierung des erforderlichen Unterhaltungsaufwandes – aufrecht erhalten zu können.

Die Untersuchung der potenziellen Wassertiefen innerhalb der Fahrrinne in der Pilotstrecke Mainz bis St. Goar (Rhein-km 493,00 – 557,50) unter Verwendung des heutigen Ausbauzustandes der Wasserstraße zeigt, dass mit einer Verschärfung der Engpasssituation im Falle sinkender Niedrigwasserabflüsse zu rechnen ist. In der nahen Zukunft ist keine eindeutige Tendenz hinsichtlich einer Erhöhung oder Verringerung des Unterhaltungsaufwands zur Aufrechterhaltung der heutigen Fahrrinntiefen erkennbar, wohingegen diesbezüglich in der fernen Zukunft mit einer Erhöhung der Unterhaltungsbaggermengen zu rechnen ist. Maßgeblichen Einfluss auf die Höhe der Unterhaltungsmengen hat dabei die Lage des für die Unterhaltung relevanten Bezugswasserstandes.

Eine aus hydraulisch-morphologischer Sicht geeignete verkehrswasserbauliche Anpassungsoption stellt die Anpassung der heutigen Fahrrinntiefe an die potenziell reduzierten Bezugswasserstände auf reduzierter Fahrrinnenbreite unter Ausnutzung von Übertiefen dar. Hierdurch kann die maximale projizierte Zunahme des Unterhaltungsaufwandes in einzelnen Teilstrecken der Pilotstrecke nahezu vollständig ausgeglichen werden. In Bereichen mit Anlandungstendenzen kann eine Verbesserung der Fahrwasserhältnisse durch Regelungsmaßnahmen erreicht werden, die auf eine Erhöhung der Schubspannungen und damit eine Verringerung der Anlandungsraten abzielen. Mit den in vier Bereichen zwischen Mainz und St. Goar identifizierten Regelungsmaßnahmen kann die maximal projizierte Zunahme des Unterhaltungsaufwandes reduziert und in der Teilstrecke Bingen sogar halbiert werden. Eine weitere, aus konstruktiver Sicht jedoch noch vertieft zu untersuchende Option könnten flexible, nur bei Niedrigwasserabflüssen wirksam werdende Regelungselemente zur Erhöhung der Wasserspiegellagen darstellen. Derartige Regelungselemente hätten aufgrund ihrer zeitlich beschränkten Wirkung vergleichsweise geringe Auswirkungen sowohl auf die Hochwasserstände als auch auf die Morphologie.

Die eingesetzte Technik zur Reduzierung der Rechenzeiten der morphodynamischen Langzeitsimulationen ermöglichte es, die morphodynamischen Simulationen für die nahe und fer-

## 2 Ziele

Im Projekt 4.03 werden potenzielle wasserbauliche Maßnahmen identifiziert und bewertet, die geeignet sind, Mindestfließtiefen für die Schifffahrt in frei fließenden Wasserstraßen zu garantieren, auch dann wenn aufgrund von klimabedingten Veränderungen extreme Niedrigwasserperioden auftreten. Extrem bedeutet in diesem Zusammenhang eine Zunahme der Dauer und Häufigkeit von Niedrigwasserständen, die in der Größenordnung des Niedrigwassers im Sommer 2003 am Rhein liegen.

Hierfür wird zunächst der derzeitige Ausbauzustand des Gewässers hydraulisch analysiert, um die zu erwartenden Fließtiefen bei einer Variation der Niedrigwasserabflüsse zu bestimmen und zu bewerten. Die Untersuchungen werden unter Verwendung eines 2D-hydrodynamisch-numerischen (2D-HN) Modells an der 65 km langen Pilotstrecke Mainz bis St. Goar durchgeführt, die bereits unter heutigen Bedingungen maßgebliche Engpässe des frei fließenden Rheins aufweist. Die Fahrrinntiefe beträgt hier lediglich 1,90 m unter dem für die Unterhaltung relevanten Bezugswasserstand GIW<sup>1</sup> und ist damit geringer als in den ober- und unterstromigen Rheinabschnitten. Für die durchgehende Schifffahrt begrenzt dieser Rheinabschnitt daher die mögliche Abladetiefe der Binnenschiffe.

Basierend auf der Identifikation der Schwachstellen des Systems ist eine erste Anpassungsoption zur Bereitstellung der erforderlichen Fließtiefen bei reduzierten Niedrigwasserabflüssen eine auf reduzierter Breite abgestuft unterhaltene Fahrrinne, welche im Projekt 4.04 unter fahrdynamischen Aspekten festgelegt wurde. Weitere Ausbau- und Regulationsmaßnahmen, gegebenenfalls auch begleitend zur abgestuften Fahrrinne werden konzipiert und hinsichtlich ihrer Eignung zur Stützung des Wasserspiegels oder zur Vermeidung von Fehlstellen durch die Erhöhung der Sohlenschubspannungen bewertet. Hierfür wird neben konventionellen Regelungsbauwerken wie Buhnen und Leitwerke das Regelungspotenzial flexibler, ausschließlich bei Niedrigwasser wirksamer Elemente wie Schlauchbuhnen oder -wehre betrachtet.

Die Abschätzung des potenziellen zukünftigen Unterhaltungsaufwandes mit Hilfe 2D-morphodynamischer Modelluntersuchungen unter Verwendung eines Bagger- und Verklappmoduls ist ein wesentlicher Bestandteil im Optimierungsprozess der einzelnen baulichen Anpassungsoptionen. 2D-morphodynamische Berechnungen über die Länge der Pilotstrecke befinden sich heute im Bereich des technisch realisierbaren, jedoch sind Langzeitsimulationen, wie sie vor dem Hintergrund des Themas Klimawandel erforderlich sind, bisher nur mit deutlichen Abstrichen bezüglich der möglichen Feinheit der Modelldiskretisierung durchzuführen. In diesem Zusammenhang sind geeignete Strategien zu identifizieren, mit welchen morphodynamische Langzeitsimulationen in hinreichender Prognosequalität bei vertretbaren Rechenzeiten auf den zur Verfügung stehenden Großrechnern realisierbar sind.

<sup>1</sup> GIW ist der gleichwertige Wasserstand, der im langjährigen Jahresmittel an 20 eisfreien Tagen unterschritten wird.

### 3 Stand der Forschung

Die Grundlage für die Untersuchung der Auswirkungen des Klimawandels auf die Systeme der Bundeswasserstraßen und deren Nutzbarkeit wurde im Rahmen der Bestandsaufnahme zum Thema „Schifffahrt und Wasserstraßen in Deutschland – Zukunft gestalten im Zeichen des Klimawandels“ (BMVBS, 2007) gelegt. Hinweise zur Veränderung des Abflussregimes des Rheins aus der Analyse vergangener Abflussmessreihen, insbesondere die Häufigkeit und Intensität extremer Abflüsse betreffend, dienten als Grundlage für eine erste Abschätzung der zukünftigen Betroffenheit der Binnenschifffahrt. Da neben dem Abfluss der Sedimenthaushalt und der Zustand des Gewässerbetts für die Schifffahrt der Wasserstraßen entscheidend sind, wird für nachfolgende Untersuchungen zunächst eine fundierte Abschätzung über die tatsächliche Betroffenheit des Verkehrssystems Schifffahrt/ Wasserstraße gefordert. Auf dieser Basis sollen Fragen zur Anpassung des Managements der Wasserstraßen zur Stabilisierung der Tiefenverhältnisse in den Bundeswasserstraßen beantwortet werden können. Auswirkungen auf die Schifffahrt werden insbesondere durch ansteigende oder fallende Wasserspiegellagen und Fließgeschwindigkeiten sowie die hieraus resultierenden Änderungen der Ausprägungen von Anlandungs- und Erosionsbereichen verursacht (PIANC, 2008). Dies wiederum wirkt sich auf den zur Aufrechterhaltung der Fahrrinntiefen erforderlichen Unterhaltungsaufwand aus.

Auch weitere Anrainerstaaten des Rheins beschäftigen sich bereits mit den Auswirkungen des Klimawandels auf die Wasserstraße. So sollen im Rahmen des niederländischen Programms „Duurzame Vaardiepte Rijndelta“ („Sustainable Navigation Depth for the Rhine Delta“) Maßnahmen als Reaktion auf eine klimabedingte Verschärfung nautischer Engpässe definiert werden, mit deren Hilfe die Schifffahrt des Rheins erhalten bzw. verbessert werden kann (van Vuren et al., 2008).

Nicht nur die Zunahme der Abflusssituationen, bei welchen der höchste schiffbare Wasserstand (HSW) überschritten wird, auch die Zunahme extremer Niedrigwassersituationen führt zu einer Beeinträchtigung der Schifffahrt. Im Rahmen des Projekts „Climate Impacts on Inland Waterways“ wurden vor dem Hintergrund der potenziellen Auswirkungen des Klimawandels am Beispiel des Mississippi zunächst die wirtschaftlichen Verluste abgeschätzt, welche in der Vergangenheit einerseits durch Niedrigwasserabflussphasen, andererseits durch Hochwasserabflussphasen verursacht wurden. Die Verluste in Niedrigwasserperioden überwogen deutlich. Anpassungsmaßnahmen wurden daher im Kontext von Niedrigwasserabflüssen diskutiert (U.S. Army Corps of Engineers, 2005). In den nordamerikanischen Great Lakes führen fallende Wasserspiegellagen infolge veränderter Niederschläge und einer zeitliche Verschiebung der Hoch- und Niedrigwasserphasen bereits heute zu einem erhöhten Bedarf an Unterhaltungsbaggerungen (Kling, 2003).

Aus Sicht der Befahrbarkeit ist die Situation bei Niedrigwasser anders zu bewerten als bei Hochwasser (Stamm, 2007). Während ab dem HSW kein Schiffsverkehr mehr erlaubt ist,

kann den Niedrigwassersituationen entweder von Seiten der Schifffahrt durch eine Verringerung der Abladetiefen oder dem Einsatz kleinerer Schiffe oder von Seiten des Wasserbaus begegnet werden. Neben betrieblichen Maßnahmen wie der Wassermengen- oder Geschiebebewirtschaftung stellen die Optimierung der statischen Regelungsmaßnahmen, die Nutzbarmachung durchgehender Übertiefen, aber auch neue Formen dynamischer, d.h. temporär wirkender Flussbauwerke denkbare Maßnahmen zur Verbesserung der Befahrbarkeit dar (Stamm, 2007). Hinter temporär wirkenden Flussbauwerken verbirgt sich der Gedanke, die Flussregelung der Dynamik des Flusssystems entsprechend ebenfalls dynamisch zu gestalten. Eine Anpassung der Regelungswirkung an Abflussänderungen kann so verstanden werden, dass durch ein flexibles Bauwerk, z.B. ein Schlauchwehr, eine Stützung des Niedrigwasserstandes erzielt wird, das Bauwerk jedoch bei Hochwasserabflüssen den Fließquerschnitt vollständig freigibt und damit hochwasserneutral ist.

Die Eignung flexibler Konstruktionen zur Regelung des Rheins wurde bereits 1987 vertieft untersucht (BMV, 1987). Einer Reihe von Untersuchungen an gegenständlichen Modellen folgte die Umsetzung mehrerer flexibler Buhnenkonstruktionen in Form von Schlauchkörpern. Die damaligen Erfahrungen zeigten, dass derartige Schlauchbuhnen bis zu einer Länge von 40 m zwar machbar, in der Handhabung mit normalen Mitteln jedoch nicht beherrschbar waren. Eine Weiterentwicklung der Technik und der eingesetzten Materialien führte dazu, dass Schlauchkörper heutzutage erfolgreich in zahlreichen Projekten, jedoch in anderen thematischen Zusammenhängen beispielsweise als Sturmflutschutzbauwerk, zur Stauhaltung oder zum Hochwasserschutz umgesetzt werden (PIANC, 2006).

Die flexible Anpassung von Regelungsbauwerken an morphologische Änderungen an der Waal ist Inhalt eines aktuellen Projekts in den Niederlanden. Über Längswerke mit variablen Ein- und Auslässen der hinterströmten Bereiche der Parallelwerke soll u.a. eine Niedrigwasseranhebung bei gleichzeitiger Kontrolle der Sohlenlagen erreicht werden (Zentralkommission für die Rheinschifffahrt, 2011).

Morphodynamische Berechnungen für ausgedehnte Flussabschnitte von 50 bis 300 km werden bis heute auch aufgrund der langen zu simulierenden Zeiträume meist mit 1D-Verfahren durchgeführt. Für kürzere Flussabschnitte von rd. 10 – 100 km befinden sich 2D-morphodynamische Berechnungsverfahren inzwischen im Bereich dessen, was technisch auf Großrechnern realisierbar ist. Hierbei müssen bislang jedoch deutliche Abstriche bei der möglichen Feinheit der Diskretisierung gemacht werden, da die im Kontext von Klimaprojektionen erforderlichen Langzeitsimulationen ansonsten einen für die Untersuchungen praktikablen Zeitraum sprengen. Diese Einschränkungen gehen zu Lasten der Modellgenauigkeit, so dass die Strömungsvorgänge nicht in jedem gewünschten Detail, sondern mehr in einer integralen Betrachtung berechnet werden können.

Im Rahmen einer von der BAW in Auftrag gegebenen Literaturstudie zu „Langzeitstrategien für morphodynamische Modelle“ (Wieprecht & Gebler, 2008) wurden aus 114 internationalen Publikationen gängige Techniken zur Rechenzeitverkürzung im Rahmen der morphodynamischen Modellierung dokumentiert und kategorisiert. Die Kategorie „Modellgestaltung“ zielt darauf ab, die Modellgeometrie bzw. die Modellauflösung so gering wie möglich zu

halten, ohne dabei die Modellqualität nachhaltig zu beeinträchtigen. Hierzu zählen u.a. die Begrenzung der Modellausdehnung auf das Notwendige, die Kopplung von Modellen unterschiedlicher Dimensionalität sowie die Reduktion der Querschnittszahl bzw. die Reduktion der Gitternetzauflösung. Die zweite Kategorie „Eingabefilterung“ befasst sich mit Methoden, durch geeignete Abstraktion der Anfangs- und Randbedingungen den Berechnungsaufwand zu reduzieren. Die dritte Kategorie „Modellsteuerung“ beinhaltet Möglichkeiten, beispielsweise die Variation der Zeitschritte, die eingeschränkte Kopplung von Hydrodynamik und Morphologie oder die Extrapolation der morphologischen Veränderungen, durch welche der Modellierungsvorgang bestmöglich auf die hydrologischen Verhältnisse angepasst wird. Die Vernachlässigung von Prozessen, welche hinsichtlich des Simulationsergebnissen eine geringe Sensitivität aufweisen stellt ebenso wie die Optimierung numerischer Algorithmen eine weitere, in dieser Literaturstudie nicht genannte Möglichkeit zur Verkürzung der Rechenzeit dar.

Nachteilig beim Einsatz der genannten Techniken zur Rechenzeitverkürzung ist, dass durch die erforderlichen Abstraktionen bei der Modellgestaltung und der Erzeugung von Anfangs- und Randbedingungen die Aussagefähigkeit der Modellergebnisse mitunter erheblich reduziert wird. Ein wesentliches Ziel der Feststofftransportmodellierung an Bundeswasserstraßen ist die Ermittlung des Unterhaltungsaufwands z. B. in erforderlichen Baggermengen bei einem angepassten Regelungssystem oder einem veränderten Sedimentmanagement im Vergleich zum heutigen Unterhaltungsaufwand. Daher ist die modellhafte Reproduktion von Anlandungs- bzw. Erosionsprozessen in Raum und Zeit unbedingt erforderlich, ebenso wie die Möglichkeit, raum- und zeitbezogene Unterhaltungsaktivitäten in das Modell einzubinden. Der mögliche Abstraktionsgrad bezüglich Modell, Anfangs- und Randbedingungen wird hierdurch erheblich limitiert, wodurch eine Vielzahl gängiger Techniken zur Rechenzeitverkürzung auszuschließen ist.

Die Ertüchtigung eines 2D-morphodynamischen Modells mit dem Ziel der Effizienzsteigerung, um damit Fragestellungen im Klimawandelkontext beantworten zu können, ist Inhalt aktueller Arbeiten von Delft Hydraulics. Techniken zur Rechenzeitbeschleunigung stehen dabei ebenso im Fokus wie Funktionalitäten zur modellhaften Umsetzung von Sedimentbewirtschaftungsstrategien (van Vuren et al., 2008).



## 4 Methoden

Die Auswirkung veränderter hydrologischer Randbedingungen, insbesondere reduzierter Niedrigwasserabflüsse zeigt sich lokal in der Ausbildung neuer bzw. der Verschärfung bestehender Tiefen- und Breitenengpässe. Die hydro- und morphodynamische Analyse dieser potenziellen Zustände und hierauf basierend die Entwicklung wasserbaulicher Anpassungsmaßnahmen ist im Rahmen der Projektlaufzeit nicht für die gesamte Strecke des freifließenden Rheins zu realisieren. Aus diesem Grund wurde für die Untersuchungen die Pilotstrecke Mainz bis St. Goar (Rhein-km 493,00 – 557,50) ausgewählt (Abbildung 1), da diese bereits unter heutigen Abflussbedingungen maßgebliche Engpässe des freifließenden Rheins beinhaltet. Aufgrund der heterogenen Streckenzusammensetzung bedarf es zudem unterschiedlicher Methoden der Anpassung.

Die Passage durch den Rheingau zwischen Mainz und Bingen wird dem Oberrhein zugeordnet. Hier findet man ein sehr geringes Gefälle ( $< 0,1 \text{ ‰}$ ) bei großen Gerinnebreiten. Charakteristisch für den Rheingau sind Stromspaltungen mit dazwischen liegenden, lang gestreckten Inseln. Die nachfolgende Gebirgsstrecke, welche dem Mittellrhein zugeordnet wird, steht mit ihrem starken Gefälle von bis zu  $0,65 \text{ ‰}$  und hohen Fließgeschwindigkeiten in Kontrast zur Rheingautrecke (WSV, 2008). Der Übergang zur Gebirgsstrecke wird durch den Gefälleknick unterhalb der Nahemündung bei Rhein-km 528,5 gekennzeichnet. Wie im Rheingau trifft man in der Gebirgsstrecke auf eine große Anzahl von Inseln, Gründen und künstlichen Bauwerken. Bis Rhein-km 524,5 ist der Rhein mit Mittelwasser-Bauwerken geregelt, unterhalb mit Niedrigwasserbauwerken.



**Abbildung 1: Pilotstrecke Mainz bis St. Goar (Rhein-km 493,00 bis 557,50).**

Das geringe Gefälle im Rheingau begünstigt die Tendenz zur Ablagerung des von oberstrom eingetragenen Geschiebes. Zur Verminderung der Dünenbildung, die in der Vergangenheit zu

einer permanenten Behinderung der Schifffahrt geführt hat, betreibt das Wasser- und Schifffahrtsamt Bingen seit dem Jahr 1989 einen Geschiebefang bei Mainz Weisenau (Rhein-km 494,30 bis 494,46) auf einem Niveau von 4,5 m unter dem Bezugswasserstand für die Unterhaltung, dem Gleichwertigen Wasserstand GIW (Krajewski, 1979). Die Unterhaltung des Geschiebefangs erfolgt auf einer Breite von 250 m und einer Länge von 160 m. Eine weitere Verbesserung der Fahrwasserverhältnisse wurde durch die Errichtung des Binger Längswerks erzielt. Durch diese Maßnahme wurde eine Wasserspiegelanhebung von ca. 40 cm bei Niedrig- und ca. 20 cm bei Mittelwasser erreicht, die sich bis zur unterstromigen Spitze der Mariannenaue auswirkt und dadurch die Anlandungstendenzen im Bereich oberhalb der Nahemündung verstärkt hat (WSV, 2008).

Zwischen Mainz und St. Goar beträgt die Fahrrinnenbreite in der Regel 120 m. Die Anzahl der Unfälle durch Grundberührungen ist im Abschnitt Bingen – St. Goar mit 1,49 Unfällen pro Kilometer und Jahr fast dreimal so hoch wie in den anderen Rheinabschnitten. Im Bereich des Tauberwerths (Rhein-km 550,2) treten die größten Probleme auf (BMVBS, 1997). Die Prognose der Flottenentwicklung macht es erforderlich, dass der Schifffahrt im Bereich zwischen Mainz und St. Goar die gleiche Abladung ermöglicht wird (WSV, 2003), wie in den ober- und unterstromigen Rheinabschnitten.

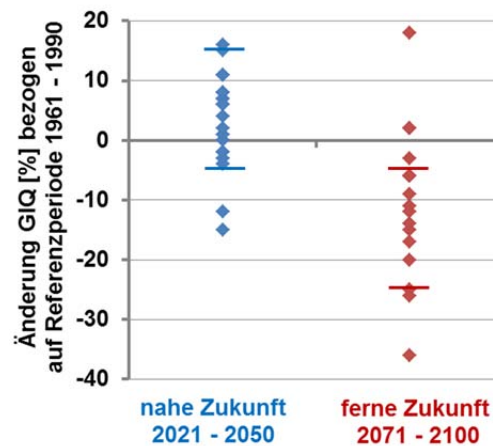
Die Entwicklung potenzieller Tiefen- und Breitenengpässe innerhalb der Pilotstrecke Mainz bis St. Goar wird im Rahmen einer hydraulischen Sensitivitätsanalyse unter Verwendung eines 2D-hydrodynamisch-numerischen Strömungsmodells der Pilotstrecke mit der Simulationssoftware Telemac-2D (Hervouet & Bates, 2000) untersucht. Hierbei wird der Status Quo der Wasserstraße, d.h. der aktuelle Ausbauzustand unter sukzessiv reduzierten Niedrigwasserabflüssen betrachtet. Als zu betrachtende Niedrigwasserkenngroße wird dabei der sogenannte Gleichwertige Abfluss (GIQ) herangezogen, aus dem der für die Regelung und Unterhaltung relevante Bezugswasserstand (GIW) abgeleitet wird. Zur Herleitung des aktuell gültigen GIQ am Pegel Kaub, dem  $GIQ_{2002}$  wurden die Beobachtungsreihen der Abflüsse der Jahre 1966 bis 2000 verwendet. Der resultierende Abfluss von  $750 \text{ m}^3/\text{s}$  entspricht dabei dem Abfluss, welcher in ca. 3% der eisfreien Tage im Jahr unterschritten wird.

In Anlehnung an die für die nahe und ferne Zukunft bezüglich der Referenzperiode projizierten Änderungen des GIQ (Abbildung 2) werden im Rahmen der Sensitivitätsanalyse reduzierte Niedrigwasserabflüsse im Bereich von  $GIQ - 5\%$  und  $GIQ - 25\%$  betrachtet. Damit ist der Wertebereich aller projizierten Änderungen innerhalb der für die nahe und ferne Zukunft aufgespannten Szenarienkorridore ( $-5\%$  bis  $+15\%$  bzw.  $-5\%$  bis  $-25\%$ ) abgedeckt. Als Ergebnis liefert die Sensitivitätsanalyse Aussagen zu potenziellen Tiefen- und Breitenengpässen in Abhängigkeit des Reduzierungsgrades des GIQ, ausgedrückt durch die Änderung der Fehlvolumina innerhalb der Fahrrinne.

Auf Grundlage dieser Sensitivitätsanalyse werden dann erste Anpassungsoptionen entwickelt, um die für eine leichte und sichere Schifffahrt erforderlichen Fließtiefen bei extremen Niedrigwasserabflüssen zu garantieren. Unter Ausnutzung vorhandener Übertiefen wird im KLIWAS Projekt 4.04 „Ermittlung von Mindestfahrrinnenbreiten für eine sichere und leichte Schifffahrt“ unter fahrdynamischen Aspekten die erforderliche Breite und Lage der Fahrrinne

festgelegt (Wassermann et al., 2010). Weitere Ausbau- und Regulationsmaßnahmen, gegebenenfalls auch begleitend zur abgestuft unterhaltenen Fahrrinne werden konzipiert und hinsichtlich ihrer Eignung zur Stützung des Wasserspiegels und zur Vermeidung von Fehlstellen als Folge von Sedimentationsprozessen bewertet. Hierfür wird neben konventionellen Regelungsbauwerken wie Buhnen und Leitwerken das Regelungspotenzial flexibler, ausschließlich bei Niedrigwasser wirksamer Elemente wie Schlauchbuhnen oder -wehre betrachtet (Wurms & Schröder, 2011).

Verkehrswasser-  
bauliche Rege-  
lungs- und  
Anpassungs-  
optionen an  
klimabedingte  
Veränderungen  
des Abfluss-  
regimes



**Abbildung 2: Projizierte Änderungen des GIQ in der nahen und fernen Zukunft bezogen auf die Referenzperiode 1961 bis 1990 sowie festgelegte Szenarienkorridore am Pegel Kaub. Daten aus Nilson et al. (2013).**

Die Konzeption der konventionellen Regulationsmaßnahmen erfolgt zunächst auf Basis hydrodynamischer Berechnungen. Die Einschätzung der Wirksamkeit einer Maßnahme bezüglich der Reduzierung von Anlandungstendenzen innerhalb eines Engpassbereichs kann dabei qualitativ über die Änderung der Schubspannungen in morphologisch relevanten Abflussbereichen erfolgen. Hydrodynamische Berechnungen unter Einbindung der bautechnischen Varianten dienen weiterhin dazu, die Unschädlichkeit der Baumaßnahmen einerseits hinsichtlich eines Wasserspiegelverfalls im Bereich von Niedrig- bis Mittelwasserabfluss, sowie andererseits hinsichtlich eines Anstiegs der Wasserspiegellagen im Falle extremer Hochwasserabflüsse zu erkennen. Sollte eine bauliche Variante hydraulisch ungünstige Auswirkungen aufweisen, so ist die iterative Umgestaltung der Variante derart erforderlich, dass der gewünschte Nutzen weitestgehend ohne begleitende nachteilige Auswirkungen erzielt werden kann. In weiteren bisher noch nicht durchgeführten Betrachtungen muss eine Bewertung der ökologischen Auswirkungen erfolgen und ggf. eine Anpassung des Bauwerks vorgenommen oder ökologische Kompensationsmaßnahmen geplant werden.

Langfristige Änderungen der Hydrologie und damit einhergehend der hydraulischen Größen führen zu einer veränderten Sedimenttransportdynamik. Zur Abschätzung der Auswirkungen der sich in diesem Zuge einstellenden morphodynamischen Änderungen auf den zukünftigen Unterhaltungsaufwand wurde ein 2D-morphodynamisches Modell unter Verwendung der Simulationssoftware Sisyphe (Villaret, 2010) erstellt. Sisyphe ist mit Telemac-2D derart gekoppelt, dass die hydrodynamischen Größen zu jedem Zeitschritt an Sisyphe übergeben wer-



den, welches im Gegenzug die jeweiligen Sohlenänderungen an Telemac-2D zurückgibt. Hierdurch werden die hydraulischen Größen zu jedem Zeitpunkt unter Berücksichtigung einer aktualisierten Sohle berechnet. Das Modell, bestehend aus ca. 315000 Gitterknoten mit einem mittleren Abstand von ca. 10,0 m (8,9 m im Bereich des Flussschlauchs), wurde instationär für den Zeitraum 1.7.1997 bis 30.6.2004 kalibriert und anschließend für den Zeitraum 1.7.2004 bis 15.3.2009 validiert. Unter Verwendung der instationären Abflussprojektionen für die nahe und ferne Zukunft als Randbedingungen für die morphodynamischen Simulationen lässt sich – zunächst noch ohne Berücksichtigung der verkehrswasserbaulichen Anpassungsoptionen – der potenzielle Unterhaltungsaufwand jeweils in Abhängigkeit von der zugrunde liegenden Projektion abschätzen.

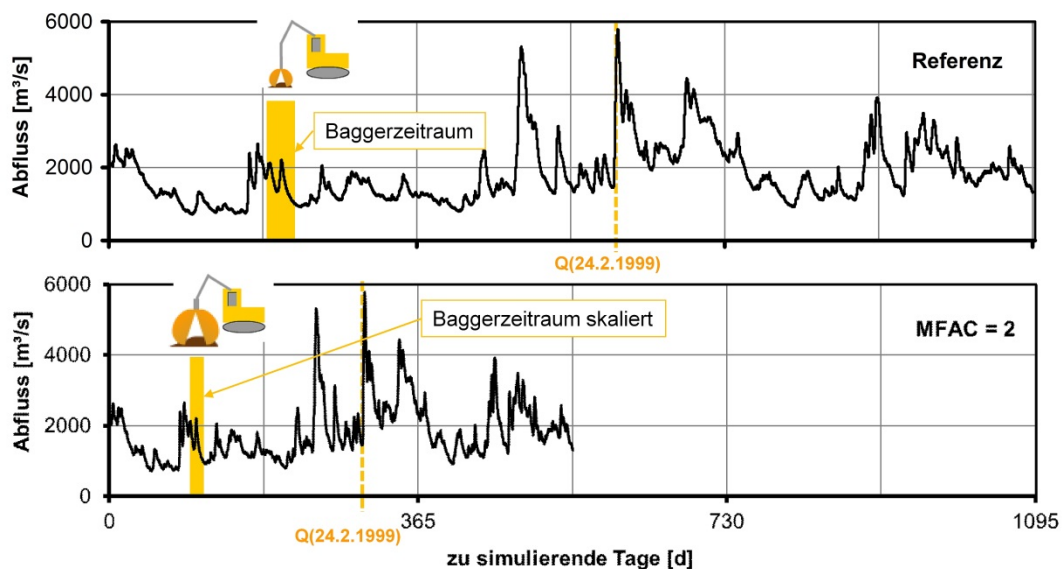
Die durchgängige Simulation der Periode von 1961 bis 2100 ist aufgrund des erheblichen Rechenzeitaufwandes zur Durchführung der Simulation nicht möglich. Eine morphodynamische Simulation unter Verwendung der Abflussganglinie des Referenzzeitraums von 1961 bis 1990 liefert den Unterhaltungsaufwand zur Aufrechterhaltung der aktuellen Fahrrinntiefen ohne Einfluss des Klimawandels und somit die Basis für die Abschätzung der potenziellen Änderungen des Unterhaltungsaufwandes. Als Randbedingungen für die Untersuchungen der morphologischen Entwicklung in der nahen und fernen Zukunft dienen Abflussprojektionen, welche jeweils durch den größten Anstieg bzw. die größte Verringerung der Niedrig-, Mittel- und Hochwasserkennwerte gekennzeichnet sind. Hierdurch werden die Einflüsse sowohl einer verringerten bzw. gesteigerten Morphodynamik als auch eines veränderten Bezugswasserstands auf die Unterhaltungsmengen berücksichtigt. Insgesamt resultiert dies in einer Auswahl von acht instationären Ganglinien für die nahe und fünf Ganglinien für die ferne Zukunft aus einer Gesamtheit von 21 Projektionen, welche für den Zeitraum von 1951 bis 2100 verfügbar sind. Jede der ausgewählten Ganglinien erstreckt sich über einen Zeitraum von 30 Jahren. Allen Simulationen liegt die gleiche Sohle zugrunde, um die resultierenden morphologischen Änderungen eindeutig auf den Einfluss des Klimawandels zurückführen zu können.

Wesentliches Element im Rahmen der morphodynamischen Analyse ist die mit Sisyphé koppelbare Software DredgeSim (Maerker & Malcherek, 2010) zur Berücksichtigung von Maßnahmen der Geschiebemanagement wie Umlagerungs- und Entnahmegabbungen oder Geschiebezugaben. Die Durchführung einer Baggerung mit DredgeSim erfordert einen Bezugswasserstand, auf welchen sich sowohl das die Baggerung auslösende Tiefenkriterium als auch die zu baggernden Tiefen beziehen. Aktuell ist dies der Gleichwertige Wasserstand (GIW<sub>2002</sub>), für die Untersuchungen der nahen und fernen Zukunft ist der Bezugswasserstand jedoch noch unbekannt. In Anlehnung an die Festlegung des GIW erfolgt daher für jede einzelne Projektion die iterative Berechnung des Bezugswasserstandes unter Berücksichtigung der Veränderungen des GIQ sowie der projektionsspezifischen Sohlenänderungen in den jeweils 30 Jahre andauernden Berechnungszeiträumen. Die Leerung des Geschiebefangs Mainz Weisenau erfolgt in allen Simulationen jeweils einmal jährlich auf ein Niveau von 4,50 m unter Bezugswasserstand.

Die Auswirkungen der verkehrswasserbaulichen Anpassungsoptionen auf den potenziellen Unterhaltungsaufwand werden unter Verwendung einer Abflussprojektion für die ferne Zu-

kunft, welche zum maximalen Anstieg der Unterhaltungsmengen innerhalb der Fahrrinne führt abgeschätzt. Es werden drei unterschiedliche Anpassungsvarianten betrachtet: Eine auf reduzierter Breite an die veränderten Bezugswasserstände angepasste Fahrrinne, ein Längswerk im Kemptener Fahrwasser zur Reduzierung des Unterhaltungsaufwandes (Teilstrecke Bingen) sowie eine Kombination aus abgestufter Fahrrinne und zwei Längswerken in den Bereichen Kemptener Fahrwasser sowie unterstrom der Mariannenaue (Teilstrecke Oestrich).

Im Verlauf der Kalibrierung zeigte sich, dass die erforderlichen Rechenzeiten der morphodynamischen Simulationen vor dem Hintergrund der zahlreichen Simulationen während des Kalibrierungsprozesses und der zu untersuchenden Varianten selbst unter Verwendung des in der BAW Karlsruhe verfügbaren Hochleistungsrechners (SGI ICE Altix 8400 EX mit 3072 Rechenkernen) keinen effizienten Betrieb des Modells erlauben. Die Beschleunigung der morphodynamischen Simulation unter weitgehender Beibehaltung der Ergebnisgenauigkeit wurde daher erforderlich. Vor diesem Hintergrund wurde die meist im Zusammenhang mit morphodynamischen Simulationen unter Verwendung stationärer oder periodischer hydrologischer Randbedingungen (z.B. Tidenströmungen) eingesetzte Technik der Modellbeschleunigung mit Hilfe des sogenannten morphologischen Beschleunigungsfaktors an die Erfordernisse des instationär betriebenen Modells angepasst. Hierbei wird die orts- und zeitabhängige, errechnete spezifische Geschiebetransportrate im Modell mit einem bestimmten Faktor (MFAC) skaliert. Zur Wahrung der Massenbilanz wird jedoch gleichzeitig die Zeitachse der Abflussganglinie um denselben Faktor gestaucht (Abbildung 3). Über die Anpassung der Ausführungszeiten und -dauern von Unterhaltungsmaßnahmen an die gestauchte Zeitskala lassen sich anthropogene Eingriffe im Modell nahezu ohne Genauigkeitsverlust abbilden, sofern die Bagger- und Zugaberraten ebenfalls um MFAC skaliert werden (Wurms & Schröder, 2012).



**Abbildung 3:** Beschleunigung des 2D-morphodynamischen Modells unter Verwendung eines morphologischen Beschleunigungsfaktors (MFAC) bei gleichzeitiger Skalierung der hydrologischen Randbedingungen (Ganglinie vom 1.7.1997 bis 30.6.2000) um MFAC und Anpassung der Unterhaltungsaktivitäten.

## 5 Durchgeführte Arbeiten

### 5.1 Modellerstellung

Für die 65 km lange Pilotstrecke zwischen Mainz und St. Goar (Rhein-km 493,00 – 557,50) wurde ein Berechnungsgitter für ein **2D-hydrodynamisch-numerisches (2D-HN) Modell** erstellt. Die laterale Modellgrenze beruht auf der Überschwemmungsgrenze des 1995er Hochwassers (IKSR, 2001), das etwa einem 100-jährlichen Ereignis entsprach. Die hydrographische und topographische Grundlage des Modells sind Linien- und Flächenpeilungen aus den Jahren 2003 bis 2006, digitale Bauwerksdaten sowie Vorlanddaten aus dem Jahr 2003. Das resultierende Gitternetz besteht aus ca. 404000 Knoten bzw. 801000 unstrukturierten Dreieckselementen mit einem mittleren Knotenabstand von ca. 8 m im Flussschlauch bzw. 14 m auf den Vorländern.

Zur Kalibrierung des 2D-HN-Modells wurden insgesamt sieben Wasserspiegellagen aus Fixierungen sowie Pegelaufzeichnungen der Jahre 2003 bis 2006 herangezogen. Die Kalibrierung über die abschnittsweise Anpassung der Sohlenrauheit über Bereiche, welche den ATKIS-Landnutzungsflächen entsprechen, erfolgte einerseits für den Abflussbereich zwischen Niedrig- und Mittelwasser, andererseits für den Bereich zwischen Mittel- und Hochwasser. Die über den Streckenverlauf gemittelte Abweichung der gerechneten zu den gemessenen Wasserspiegellagen weist nach der erfolgten Kalibrierung für den unteren Abflussbereich einen Mittelwert von 0,00 m bei einer Standardabweichung von 0,02 m und einem 95%-Konfidenzintervall von -0,04 m bis 0,05 m auf.

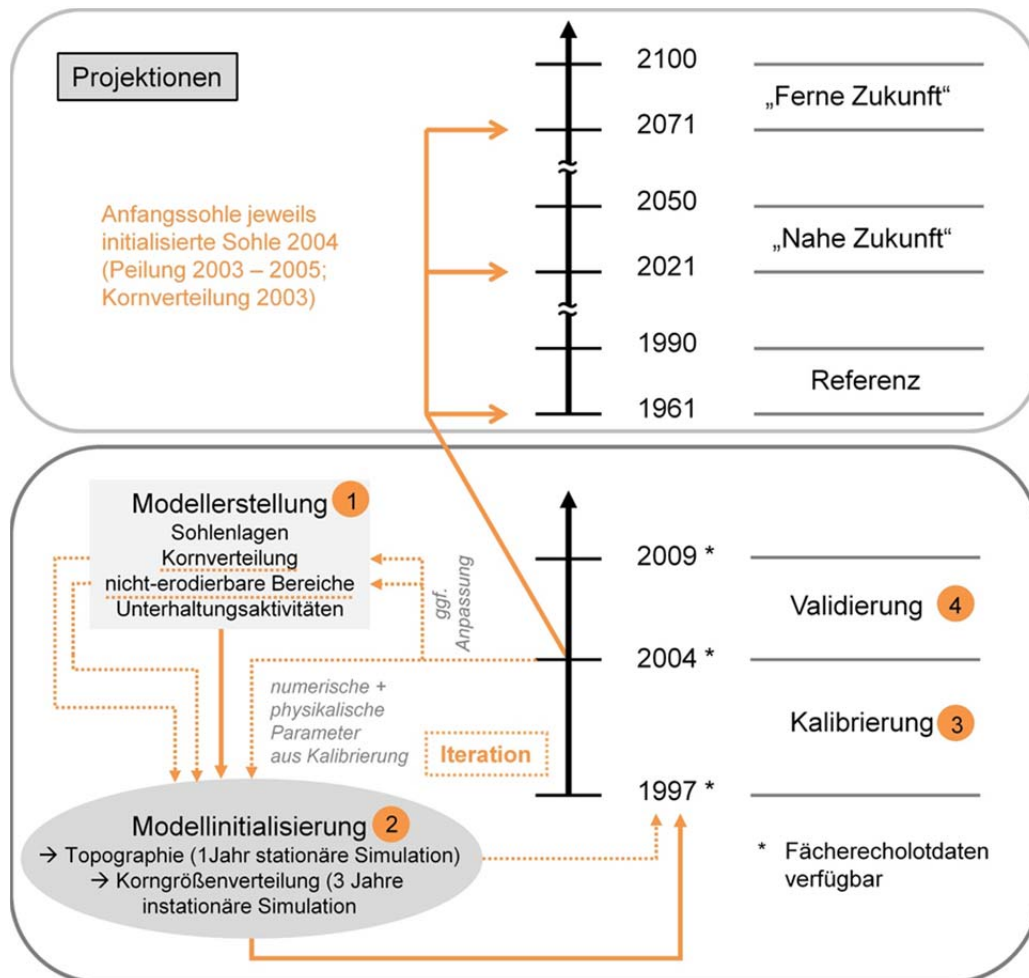
Der Modellbereich des **2D-morphodynamischen Modells** deckt den Bereich zwischen Mainz und Trechtingshausen (Rhein-km 493,00 bis 535,36) ab. Grund für die Verkürzung des Modellbereichs gegenüber den 2D-HN-Untersuchungen ist die Unkenntnis der flächenhaften Verteilung des Felshorizonts, welcher sowohl direkt an der Gewässersohle ansteht als auch mit geringmächtiger Sedimentüberdeckung versehen ist. Die Sinnhaftigkeit von Modellaussagen steht aufgrund der hohen Geschiebetransportkapazitäten innerhalb der Gebirgsstrecke somit in direktem Bezug zur realitätsnahen Festlegung der nicht erodierbaren Sohlenhorizonte. Bezüglich des Modellaufbaus gilt es zu beachten, dass sowohl die Einrichtung des Geschiebefangs Mainz Weisenau im Jahr 1989 als auch der Bau des Binger Längswerks, welches 1995 fertig gestellt wurde, eine wesentliche Änderung der Abfluss- und Transportcharakteristik innerhalb des Rheingaus nach sich zogen. Auf Basis der verfügbaren Daten und der wasserbaulichen Historie wurde für die Kalibrierung des morphodynamischen Modells daher der Zeitraum vom 1.7.1997 bis 30.6.2004 festgelegt. Die nachfolgende Validierung erstreckte sich vom 1.7.2004 bis zum 15.3.2009.

Die Erstellung des morphodynamischen Modells beinhaltet neben der Integration hydrographischer Daten aus dem Zeitraum des Beginns der Kalibrierung bzw. der Validierung und der Festlegung der nicht erodierbaren Sohlenlagen innerhalb des Modells die Belegung der Gewässersohle mit einer Anfangskorngrößenverteilung. Hierfür kann auf Daten aus sedimento-

logischen Untersuchungen der Rheinsohle mit Hilfe des WSV-eigenen Taucherschachtes („Kaiman“) bzw. der Taucherglocke („Carl Straat“) aus den Jahren 2003 und 2004 zurückgegriffen werden, welche zwischen Mainz und Trechtingshausen erhoben wurden. Die Diskretisierung der Kornverteilungen im morphodynamischen Modell erfolgte unter Zusammenfassung der kleinsten und größten Siebgrößen in insgesamt neun Fraktionen. Von der stark vereinfachenden Annahme einer konstanten Korngrößenverteilung über das gesamte Modellgebiet als Anfangsbedingung für die drei Sohlenschichten des morphodynamischen Modells, welche die Bereiche 0 bis 0,1 m, 0,1 m bis 1,0 m und 1,0 m bis zum nicht erodierbaren Horizont abdecken, wird aufgrund der großen räumlichen Heterogenität der Korngrößen im Modellgebiet abgesehen. Als Vorgehensweise wird die Mittelung der Fraktionsanteile der Kornverteilungen jeweils eines Abflussquerschnitts und die anschließende lineare Interpolation der gemittelten Sieblinien in Strömungsrichtung unter Berücksichtigung von Krümmungen und Verzweigungen im Flussverlauf gewählt. Dieser Vorgehensweise liegt die Annahme zugrunde, dass durch die der Modellkalibrierung vorgeschalteten Initialisierung der Korngrößen im Rahmen einer instationären, morphodynamischen Simulation (Abbildung 4) eine laterale Umverteilung der Kornverteilungen erzielt werden kann, welche in einem naturähnlichen Zustand resultiert.

Erstrecken sich die Sohlpeilungen über einen längeren Zeitraum, so besteht die im Modell verwendete Anfangssohle aus nicht konsistenten Teilstrecken und weicht demzufolge erheblich von der natürlichen, zum Startzeitpunkt der morphologischen Simulation tatsächlich vorliegenden Sohle ab. Aufgrund der Modellabstraktionen, die u.a. aus der räumlichen und zeitlichen Mittelung der Grundgleichungen resultieren und Modellannahmen (z.B. Turbulenzmodelle) erfordern, bestehen zudem Inkonsistenzen zwischen der natürlichen Strömung und der aus der hydrodynamischen Modellierung resultierenden, tiefengemittelten Strömung. Zu Beginn einer morphodynamischen Simulation ist aus den genannten Gründen mit einer verstärkten Sohlenumlagerung zu rechnen, die sich aus der Anpassung der im Modell verwendeten Anfangssohle an das tiefengemittelte Strömungsfeld ergibt. Der Modellkalibrierung wird daher zusätzlich eine Initialisierung der Sohlenlage zur Anpassung der Modellsohle an das Strömungsfeld vorgeschaltet, welche im Rahmen einer morphodynamischen Simulation eines Jahres unter Verwendung eines stationären Abflusses geringer Intensität erfolgt. Aus der Zusammenführung von initialisierter Korngrößenverteilung und Sohlenlage resultiert die für die Kalibrierung erforderliche Anfangssohle.

Die Initiierung der mit DredgeSim umgesetzten Unterhaltungsbaggerungen erfolgt durch Vorgabe von Baggerkriterien innerhalb potenzieller Baggerflächen. Hierfür wurden in Abstimmung mit dem zuständigen Wasser- und Schifffahrtsamt in Anlehnung an die gängige Unterhaltungspraxis die entsprechenden, im morphodynamischen Modell umzusetzenden Bagger- und Zugabekriterien festgelegt. Dies sind neben dem Peilintervall zur Identifikation der Fehlstellen innerhalb der Fahrrinne beispielsweise Baggertiefen unterhalb eines Bezugswasserstands, also dem simulierten Wasserstand bei GIQ bzw. reduziertem GIQ. Im Fall des Geschiebefangs werden Baggerzeitpunkte in Kombination mit Baggerhorizonten vorgegeben.



**Abbildung 4: Ablaufschema der 2D-morphodynamischen Simulationen von der Modellerstellung bis zur Modellanwendung im Rahmen der morphodynamischen Projektionen.**

Vor Beginn der morphodynamischen Kalibrierung gilt es, die für den effizienten Modelleinsatz nötige, maximal mögliche **morphologische Beschleunigung** (Siehe Kapitel 4) des Modells festzulegen. Je nach Genauigkeitsanspruch an die Modellergebnisse wird die maximale Skalierbarkeit des Modells bereits durch nicht tolerierbare Abweichungen berechneter Größen in der hydrodynamischen Simulationen limitiert. Einerseits führt die Stauchung der Zeitachse der instationären Randbedingungen dazu, dass im Fall von Hochwasserereignissen die Abbildung von Retentionseffekten aufgrund der im Vergleich zum ungestauchten Referenzfall geringeren Volumina der Hochwasserwelle nicht mehr adäquat abgebildet werden. Andererseits führt die numerische Dispersion innerhalb des Modells dazu, dass Wellen mit zunehmender Steilheit der Wellenfront einer verstärkten Abflachung unterliegen. Für die Vorauswahl des Beschleunigungsfaktors MFAC dienten morphodynamische Simulationen eines Zeitraumes von drei Jahren. Als Kriterium für die maximale Modellbeschleunigung wurde die Reproduzierbarkeit der im Referenzfall in Raum und Zeit ermittelten Unterhaltungsereignisse festgelegt, einer wesentlichen Zielgröße der späteren Modellanwendung.

Die Modellergebnisse zeigten, dass ein morphologischer Beschleunigungsfaktor von MFAC = 10 ohne wesentliche Einbußen der Ergebnisgenauigkeit möglich ist. Dies zeigt sich zum einen in den Sohlhöhenänderungen und Korngrößenverteilungen, welche erst ab



MFAC = 20 eine deutliche Abweichung aufwiesen. Zum anderen werden bei Beschleunigungen bis MFAC = 10 alle vom Referenzmodell ermittelten Unterhaltungsbaggerungen in Raum und mit geringen Abweichungen auch in der Zeit nachgebildet. Erst ab MFAC = 20 werden zwei der vier Unterhaltungsbaggerungen innerhalb der Fahrrinne aus dem Referenzfall nicht mehr reproduziert. Die Relevanz der Modellbeschleunigung wird bei der Betrachtung der Rechenzeiten eines 30-Jahreszeitraums im Rahmen der morphologischen Projektionen deutlich, welche unter Verwendung eines hydraulischen Zeitschritts von 4 s und eines morphologischen Zeitschritts von 120 s beschleunigt bereits ca. 6,1 Tage beträgt und unbeschleunigt mit einer Dauer von über 52 Tagen nicht realisierbar wäre.

Eine Netzvergrößerung des Modells in vier unterschiedlichen Qualitäten erbrachte zwar einen Gewinn hinsichtlich einer Rechenzeiterparnis, jedoch genügte die durch die Netzvergrößerung erreichte Ergebnisgenauigkeit nicht den geforderten Ansprüchen der Reproduktion der Unterhaltungsbaggerungen (Wurms & Schröder, 2012). Alle morphodynamischen Simulationen wurden daher auf Basis des ursprünglichen, nicht vergrößerten Modells durchgeführt.

Zielgrößen der **morphodynamischen Kalibrierung** sind neben den beobachteten Änderungen der Sohlenhöhen und gemessenen Transport-Abfluss-Beziehungen die für den Kalibrierungszeitraum dokumentierten Baggervolumina innerhalb der Fahrrinne und des Geschiebefangs. Abbildung 5 zeigt die gute Übereinstimmung der berechneten mit den realen Baggervolumina in den von der Wasser- und Schifffahrtsverwaltung des Bundes (WSV) festgelegten Teilstrecken einerseits sowie innerhalb des Geschiebefangs andererseits.

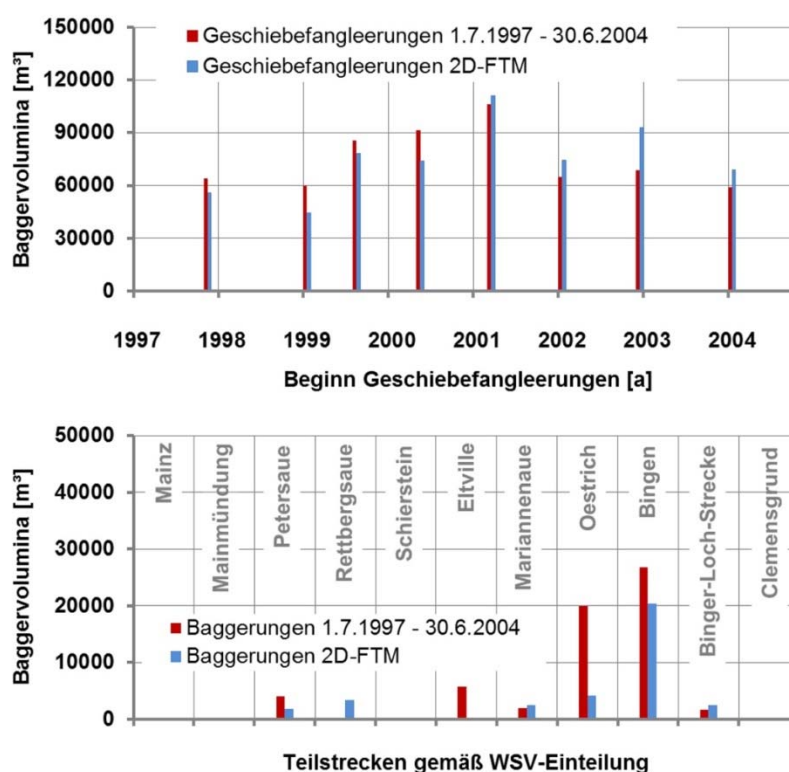


Abbildung 5: Gegenüberstellung der Volumina realer Unterhaltungsbaggerungen innerhalb des Geschiebefangs (oberes Diagramm) und der Fahrrinne (unteres Diagramm) mit Baggerungen aus dem 2D-Feststofftransportmodell für den Zeitraum vom 1.7.1997 bis 30.6.2004.

Abweichungen sind u.a. auf die erforderliche Idealisierung der realen Baggerstrategien zurückzuführen. Die Jahre 2004 bis 2009 dienten der Validierung des morphodynamischen Modells. Insgesamt ist das Modell nach der erfolgten Kalibrierung und Validierung in der Lage, den überwiegenden Teil der Unterhaltungsbaggerungen der Jahre 1997 bis 2009 in Lage und Volumen nachzubilden.

Auf der Basis des kalibrierten und validierten Modells wurden die morphodynamischen Untersuchungen der ausgewählten Abflussprojektionen, die sich jeweils über 30 Jahre erstrecken, durchgeführt.

## 5.2 Datenerhebung

Im Rahmen der Erstellung sowohl des Strömungs- als auch des Transportmodells konnte auf eine breite Datenbasis zurückgegriffen werden, welche überwiegend aus der kontinuierlichen Datenerhebung der WSV, insbesondere des Wasser- und Schifffahrtsamtes Bingen stammt. Um eine Grundlage zur Beurteilung der aktuellen Kornzusammensetzung und der Sedi-mentdynamik innerhalb der Strecke zu erhalten, wurden im Rahmen des aktuellen WSV-Projekts „Abladeoptimierung Mittelrhein“ in Ergänzung zu den sedimentologischen Daten aus den Beprobungen der Jahre 2003 und 2004 weitere Sohlenbeprobungen mit dem WSV-eigenen Taucherglockenschiff „Carl Straat“ durchgeführt. Im Zeitraum vom 4.10. – 2.11.2010 wurden dabei unter Beteiligung von BAW und BfG zwischen Rhein-km 494,00 – 556,50 insgesamt ca. 520 Schürf- und Gefrierkernproben entnommen. Diese Daten konnten zur Verbesserung des morphodynamischen Modells herangezogen werden.

Weitere Sohlenbeprobungen erfolgten in den Jahren 2011 und 2012 im Bereich der Rüdesheimer Aue zwischen Rhein-km 524,00 und 527,50 im Nachgang zu einer Unterhaltungsbaggerung im Januar 2011. Auf Basis dieser Beprobungen wurde die ETH Zürich zur „Begleitung und Analyse fotooptischer Unterwasseraufnahmen von Flusssohlen“ mit dem Ziel beauftragt, die Kornverteilung der Oberschicht aus Fotos der Flusssohle mittels automatischer Objekterkennung (Detert & Weitbrecht, 2012) zu ermitteln. Der Vorteil gegenüber der herkömmlichen Methode der Entnahme von Schürf- oder Gefrierkernproben ist, dass über die Auswertung des Bildmaterials eine größere und damit repräsentativere Fläche erfasst und hinsichtlich der Kornverteilung der Oberschicht ausgewertet werden kann.

## 5.3 Hydraulisch-morphologische Analyse der Betroffenheit der Wasserstraße

Die Identifikation der Bereiche innerhalb der Fahrrinne, die bei extremen Niedrigwasserabflüssen Fehlstellen aufweisen, erfolgte im Rahmen der hydraulischen Analyse des heutigen Ausbauzustandes der Wasserstraße unter Verwendung des sukzessive reduzierten Niedrigwasserabflusses  $GIQ$  im Bereich von  $GIQ_{2002} - 5\%$  bis  $GIQ_{2002} - 25\%$ . Mithilfe der bei den jeweiligen Abflüssen berechneten Fließtiefen wurden die Fehlstellen innerhalb der Fahrrinne ermittelt und die für die Schifffahrt relevanten Tiefen- und Breitenengpässe lokalisiert. Auf Basis der identifizierten Engstellen erfolgte anschließend die Auswahl der für verkehrswasserbauliche Anpassungsoptionen geeigneten Bereiche um den potenziell gestiegenen Unterhaltungsaufwand zur Aufrechterhaltung der Fahrrinntiefen zu reduzieren.

Die morphodynamische Analyse des Status quo der Wasserstraße unter klimabedingt veränderten Randbedingungen berücksichtigt den Einfluss der Sediment- und Morphodynamik auf den potenziellen Unterhaltungsaufwand. Eine weitere Einflussgröße ist der veränderte Bezugswasserstand, auf den sich die Unterhaltungsbaggerungen in der Fahrrinne und innerhalb des Geschiebefangs beziehen. Die Berechnung des Bezugswasserstandes nimmt daher eine zentrale Rolle im Rahmen der morphodynamischen Analyse ein. Der Ablauf einer morphodynamischen Simulation unter iterativer Anpassung des Bezugswasserstandes für die Abflussprojektionen der nahen oder fernen Zukunft gliedert sich wie folgt:

- Eine stationäre 2D-HN-Simulation mit dem jeweiligen reduzierten GlQ der verwendeten Abflussprojektion als Randbedingung auf Basis der Modellsohle 2004 führt zu einem vorläufigen Bezugswasserstand.
- Nach Herstellung der initialen Fahrrinntiefen und des initialen Geschiebefangniveaus, jeweils bezogen auf den vorläufigen Bezugswasserstand, erfolgt die instationäre morphodynamische Simulation des 30-Jahreszeitraums.
- Die zeitliche Mittelung der berechneten Sohlhöhen innerhalb des Flussschlauchs über den Betrachtungszeitraum von 30 Jahren dient als geometrische Grundlage für eine Neuberechnung des Bezugswasserstandes im Rahmen einer stationären 2D-HN-Simulation.
- Unter Verwendung des aktualisierten Bezugswasserstandes und der hinsichtlich Fahrrinne und Geschiebefang initialisierten Sohle erfolgt die endgültige, instationäre morphodynamische Simulation des jeweiligen 30-Jahreszeitraums.

Eine weitere Iterationsschleife hinsichtlich der Bestimmung des Bezugswasserstandes unter Verwendung der aus dem letzten Arbeitsschritt resultierenden Sohlhöhen führt lediglich zu Änderungen des Bezugswasserstandes im Millimeterbereich und wird infolgedessen nicht mehr durchgeführt.

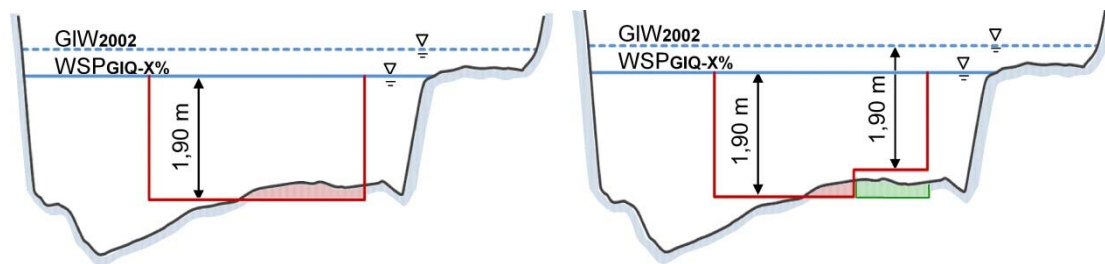
Der Sedimenteintrag in das Modellgebiet wird durch eine sogenannte Gleichgewichtsrandbedingung gesteuert. Das bedeutet, dass zu jedem Zeitschritt genau die Menge an Sediment in das Modell gelangt, welche die Strömung in Abhängigkeit der hydraulischen Größen jeweils zu transportieren vermag. Durch den Gefälleknick an der Nackenheimer Schwelle mit einer stromab gerichteten Abnahme der Transportkapazität ist davon auszugehen, dass unabhängig von klimabedingten Änderungen von oberstrom immer ausreichend Sediment verfügbar ist, um die Transportkapazität am Einlaufrand des Modells zu erfüllen. Klimabedingte Abflussänderungen sowie klimabedingte Sohlhöhenänderungen unterstrom des Einlaufrandes führen zu einer Änderung der jeweiligen Transportkapazität am Einlaufrand und somit zu veränderten Sedimenteintragsmengen in das Modellgebiet.

Als Resultat aus der morphodynamischen Analyse erhält man für die nahe und ferne Zukunft die potenziellen Unterhaltungsbaggermengen für den Geschiebefang und die Fahrrinne sowie die potenziellen Sohlhöhen und Kornzusammensetzungen. Ein Vergleich mit den Ergebnissen der morphodynamischen Simulation für den Referenzzeitraum 1961 bis 1990 verdeutlicht die klimabedingten Änderungen der Zielgrößen.



## 5.4 Konzeption verkehrswasserbaulicher Anpassungsoptionen

Die mitunter deutlichen Anstiege der erforderlichen Unterhaltungsmengen zur Aufrechterhaltung der heutigen Fahrrinnentiefen sind nicht zuletzt darauf zurückzuführen, dass die Anpassung der Fahrrinnentiefen an die veränderten Bezugswasserstände über die gesamte Fahrrinnenbreite erfolgt. Eine erste Option zur Reduzierung der potenziellen Unterhaltungsmengen könnte daher die Anpassung der heutigen Fahrrinnentiefen an die veränderten Bezugswasserstände auf reduzierter Breite darstellen (Abbildung 6). Die Mindestbreite für diese „abgestufte Fahrrinne“ wird im Rahmen fahrdynamischer Betrachtungen des KLIWAS-Projekts 4.04 bestimmt.



**Abbildung 6: Anpassung der heutigen Fahrrinnentiefen an die veränderten Bezugswasserstände über die gesamte Fahrrinnenbreite (Abb. links) sowie auf reduzierter Breite (Abb. rechts).**

Die hydraulische Untersuchung der „abgestuften Fahrrinne“ mit dem 2D-HN-Modell belegt die positive Wirkung dieser angepassten Fahrrinnenunterhaltung im Abflussspektrum von Niedrig- bis Mittelwasser. Der Absink der Wasserspiegellage nach Implementierung der „abgestuften Fahrrinne“ beträgt im Fall von GIQ - 25 % lokal lediglich 0,02 m, bei Mittelwasser lokal ca. 0,01 m.

Der potenzielle Unterhaltungsaufwand lässt sich auch mit Hilfe wasserbaulicher Regulationsmaßnahmen reduzieren, welche auf die Erhöhung der Schubspannungen in Anlandungsbereichen und somit eine Verringerung der Anlandungsraten abzielen. Diese Regulationsmaßnahmen sind auch zur Unterstützung der „abgestuften Fahrrinne“ denkbar, da als eine Folge der angepassten Unterhaltung auf reduzierter Breite – wie auch im Fall der Anpassung auf der gesamten Fahrrinnenbreite – leicht reduzierte Schubspannungen in den unmittelbaren Unterhaltungsbereichen auftreten.

Die Regulationsmaßnahmen, jeweils in Form von Längswerken, wurden modellgestützt für die vier maßgeblichen Engpassbereiche Oestrich, Kemptener Fahrwasser, Bacharacher Werth und Jungferngrund entwickelt, in welchen die maximalen Herstellungsvolumina zur Umsetzung der „abgestuften Fahrrinne“ mitunter heutigen Bedingungen ständig wiederkehrenden Anlandungsstellen zusammenfällt. Die hydraulische Wirksamkeit der einzelnen Maßnahmen wurde dabei auf Basis des Vergleichs der Schubspannungen im Bereich des für die Transportdynamik relevanten bettbildenden Abflusses zwischen Status Quo und Planungszustand bewertet. Für jeden Planungsschritt wurde dabei die Veränderung der Wasserspiegellagen im Hochwasserfall berücksichtigt. Aus diesen beiden Randbedingungen ergab sich die Notwendigkeit einer iterativen Entwicklung der einzelnen Bauwerke, um deren maximale gewünschte

te Wirkung bei minimalen Auswirkungen auf die Wasserspiegellagen bei Hochwasser zu erhalten.

Den nachteiligen Effekt von Regulationsmaßnahmen auf die Hochwasserspiegellagen gilt es auch bei der Planung von Regulationsmaßnahmen zur Stützung von Niedrigstwasserständen zu berücksichtigen. Geeigneter als konventionelle Regulationsmaßnahmen wie Längswerke oder Buhnen wären flexible, nur bei Niedrigwasserabflüssen wirksam werdende Regulationsmaßnahmen zur Erhöhung der Fließtiefe.

Befinden sich Streckenabschnitte, welche unter Niedrigstwasserbedingungen Fehltiefen in der Fahrrinne aufweisen, im Bereich einer Stromverzweigung, stellt die flexible und somit hochwasserneutrale Abtrennung eines Seitenarmes der Verzweigung in derartigen Abflusssituationen aus hydraulischer Sicht eine Option zur Stützung der Wasserspiegellagen dar. Im Rahmen des Projekts wurden die temporäre Absperrung von Seitenarmen im Bereich von Stromverzweigungen sowie die Kombination von Parallelwerken mit temporär verschließbarem Uferanschluss betrachtet und als zielführende Optionen zur hochwasserneutralen Niedrigwasseranhebung erachtet. Eine Literaturrecherche im Rahmen einer Projektarbeit zum Thema flexible, temporär wirkende Regulationsmaßnahmen in Kooperation mit dem Institut für Wasserbau und technische Hydromechanik der TU Dresden verdeutlichte allerdings den Untersuchungsbedarf, der hinsichtlich der konstruktiven Umsetzung derartiger Regelungselemente besteht.

Verkehrswasser-  
bauliche Rege-  
lungs- und  
Anpassungs-  
optionen an  
klimabedingte  
Veränderungen  
des Abfluss-  
regimes

## 6 Vernetzung des Projektes, Kooperationspartner

Innerhalb des Forschungsprogramms KLIWAS ist das Projekt 4.03 thematisch mit den Projekten 4.01 ("Wasserhaushalt, Wasserstand und Transportkapazität"), 4.02 („Klimaprojektionen für Sedimenthaushalt und die Flussbettentwicklung“) und 4.04 („Ermittlung von Mindestfahrrinnenbreiten für eine sichere und leichte Schifffahrt“) vernetzt. Neben der Abstimmung der zur Projektbearbeitung erforderlichen Datenflüsse zwischen den genannten Projekten im Rahmen von Workshops fand ein fachlicher Austausch zu folgenden Themen statt:

- Auswahl repräsentativer hydrologischer Projektionen als Randbedingung für die morphodynamischen Analysen,
- Abstimmung eines an die Wasser- und Schifffahrtsämter zu richtenden Fragenkatalogs bezüglich der in die morphodynamischen Modelle zu implementierenden Bagger- und Zugabekriterien, und
- Fahrrinnenparameter (Lage, Mindestbreite) im Rahmen der abgestuften Unterhaltung der Fahrrinne.

Mit Projekt 4.04 wurden gemeinsame Projektergebnisse im Rahmen des BAW-Kolloquiums „Verkehrswasserbauliche Untersuchungen am Rhein“, des HTG Kongresses in Würzburg (Schmidt et al., 2011) sowie der internationalen Konferenz River Flow 2010 (Wurms et al., 2010) in Braunschweig veröffentlicht.

Auf Projektebene fand eine Vernetzung des Projekts 4.03 mit dem aktuellen WSV-Projekt „Abladeoptimierung Mittelrhein“ unter Beteiligung der GDWS, ASt Südwest, des WSA Bingen, der BfG sowie der BAW-Referate W1 und W4 statt. Durch die thematischen Überschneidungen des genannten Projekts mit KLIWAS-Projekt 4.03 bestand die Möglichkeit, die im thematischen Umfeld von KLIWAS erarbeiteten Ergebnisse in ein aktuelles WSV-Projekt einzubringen und mit Vertretern der WSV zu diskutieren. Aus den kurzen Bearbeitungszeiten für die numerischen Modelluntersuchungen unter Verwendung der im Rahmen von KLIWAS generierten Modelle resultieren deutliche Vorteile für die AG Abladeoptimierung. Der Einsatz des 2D-morphodynamischen Modells ist im Anschluss an die im Abschluss befindliche Voruntersuchungsphase des Projekts „Abladeoptimierung Mittelrhein“ vorgesehen.

Externe Partner wurden im Rahmen von Kooperationen (studentische Arbeiten wie Projekt- und Diplomarbeiten) und Auftragsvergaben in das Projekt involviert. Die behandelten Themen sowie die beteiligten Institutionen und Personen sind Tabelle 1 zu entnehmen.

**Tabelle 1: Projekt 4.03 - Kooperationen und Aufträge**

<b>Kooperationspartner/ Auftragnehmer</b>	<b>Kurztitel</b>	<b>Ansprech- partner</b>
Dipl.-Ing. Dipl.- Umweltwiss. Peter Hänßig	Durchführung 2D-numerischer Modellrechnungen zur Untersuchung wasserbaulicher Regelungsmaßnahmen	siehe Auftrag- nehmer
smile consult GmbH, Hannover	Vergrößerung des Modells Mainz-St. Goar	Dr.-Ing.Frank Sellerhoff
TU Dresden, Institut für Wasserbau und technische Hydro- mechanik	Literaturrecherche und hydraulisch/ morphologische Untersuchung von flexiblen, temporär wirkenden Flussbaumaßnahmen (studentische Projektarbeit)	Univ.-Prof. Dr.- Ing. Jürgen Stamm
TU Dresden, Institut für Wasserbau und technische Hydro- mechanik	Implementierung und Test der Wilcock-Formel zur hydronumerischen Simulation bimodaler Korngrößen- verteilungen. Diplomarbeit. (Warken, 2012)	Univ.-Prof. Dr.- Ing. Jürgen Stamm
ETH Zürich, Versuchs- anstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glazio- logie	Begleitung und Analyse fotooptischer Unterwasserauf- nahmen von Flusssohlen	Dr.-Ing. Martin Detert

Verkehrswasser-  
bauliche Rege-  
lungs- und  
Anpassungs-  
optionen an  
klimabedingte  
Veränderungen  
des Abfluss-  
regimes

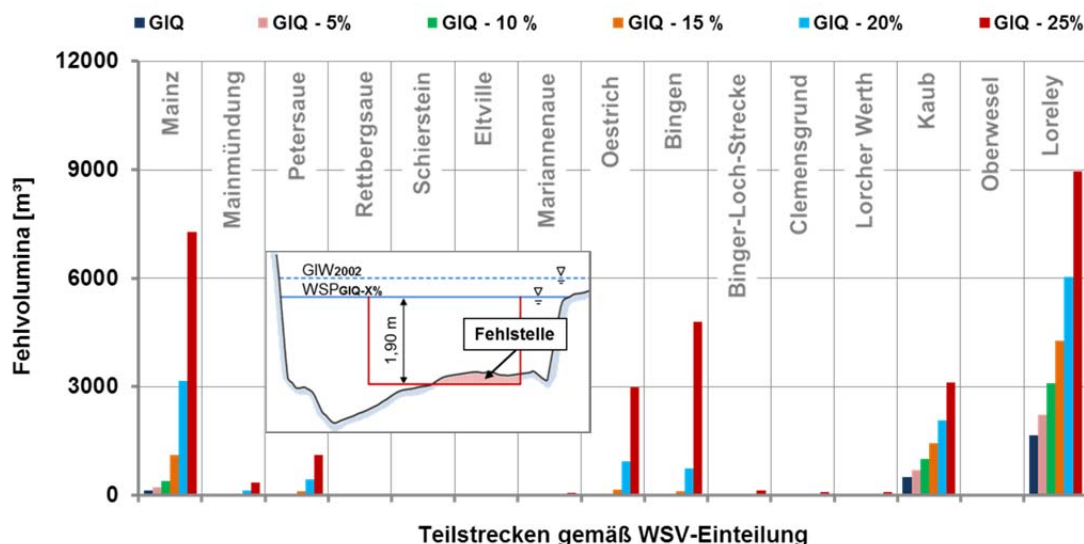
## 7 Ergebnisse

### 7.1 Erreichter methodisch-wissenschaftlicher Fortschritt

Die Ergebnisse der Untersuchungen zur Reduzierung der Rechenzeiten morphodynamischer Simulationen unter weitgehender Beibehaltung der Ergebnisqualität ermöglichten es, die geschilderten Simulationen in Anzahl und berechnetem Zeitraum überhaupt erst durchführen zu können. Die Modellergebnisse zeigen, dass morphologische Faktoren bis zehn ohne wesentliche Einbußen der Ergebnisgenauigkeit möglich sind. Das beschleunigte Modell ist in der Lage, alle vom Referenzmodell ermittelten Unterhaltungsbaggerungen in Raum und Zeit nachzubilden (Wurms & Schröder, 2012). Die erforderliche Simulationszeit des beschleunigten Modells bezogen auf die Simulationszeit des Referenzmodells verhält sich dabei nahezu linear-reziprok zum gewählten morphologischen Faktor.

### 7.2 Kernaussagen zu den Ergebnissen

Die Betrachtung der verfügbaren Wassertiefen innerhalb der Fahrrinne zeigt ohne weitere Anpassungsmaßnahmen im Rahmen einer Sensitivitätsanalyse (vgl. Kap. 4), dass in der Pilotstrecke Mainz bis St. Goar mit einer Verschärfung der Engpasssituation im Falle sinkender Niedrigwasserabflüsse zu rechnen ist. Während bis zu einer Verringerung des GIQ um 10 % aufgrund der vorhandenen Tiefenreserven in der Fahrrinne überwiegend eine volumetrische Zunahme der bereits heute in der Fahrrinne existierenden Fehlstellen zu erwarten ist, würden bei einer weiteren Verringerung zahlreiche neue Fehlstellen in bislang unkritischen Fahrrinnenbereichen auftreten (Abbildung 7).



**Abbildung 7: Volumina der Fehlstellen innerhalb der Fahrrinne in den Teilstrecken zwischen Mainz und St. Goar (Rhein-km 493,00 bis 557,50) gemäß WSV-Einteilung infolge reduzierter Niedrigwasserabflüsse GIQ (Sohlenpeilungen 2004 bis 2006).**

Die Aussagen der Sensitivitätsanalyse besitzen qualitativen Charakter, da das 2D-Strömungsmodell die Dynamik der Flusssohle und deren Auswirkung auf die potenziellen Fehlvolumina nicht berücksichtigt. Auf Basis der Ergebnisse und deren Einordnung in die Szenarienkorridore der Änderungen des GIQ in der nahen und fernen Zukunft lässt sich folgern, dass für die nahe Zukunft keine eindeutige Aussage hinsichtlich der Entwicklung der Engpasssituation möglich ist. In der fernen Zukunft ist von einer Verschärfung der geometrischen Engpässe auszugehen.

### 7.2.1 Nahe Zukunft

Die Unterhaltung der Fahrrinne derart, dass eine Anpassung der heutigen Tiefen an die veränderten Bezugswasserstände erfolgt, führt zu den in Tabelle 2 dargestellten, projizierten Änderungen der Baggermengen in der nahen Zukunft im Vergleich zur Referenzperiode 1961 bis 1990. Die Änderungen der Baggermengen aus den Geschiebefangleerungen sind auf die veränderten Sedimenteintragsmengen in das Modellgebiet sowie die veränderten Bezugswasserstände zurückzuführen, auf welche sich die Baggertiefe von 4,50 m im Rahmen der Geschiebefangleerungen jeweils bezieht.

In der nahen Zukunft ist keine eindeutige Tendenz hinsichtlich einer Erhöhung oder Verringerung der Unterhaltungsbaggermengen erkennbar. Eine Verringerung des GIQ führt zu einem Absinken des Bezugswasserstands und damit zur Erhöhung der Baggermengen, wenn die Solltiefe auf ganzer Breite zur Verfügung gestellt werden soll. Umgekehrt führt eine Erhöhung des GIQ zu einer Verringerung der Baggermengen. Eine Erhöhung der Abflusskennwerte für Mittel- und Hochwasser hat die Erhöhung der erforderlichen Unterhaltungsmengen zur Folge.

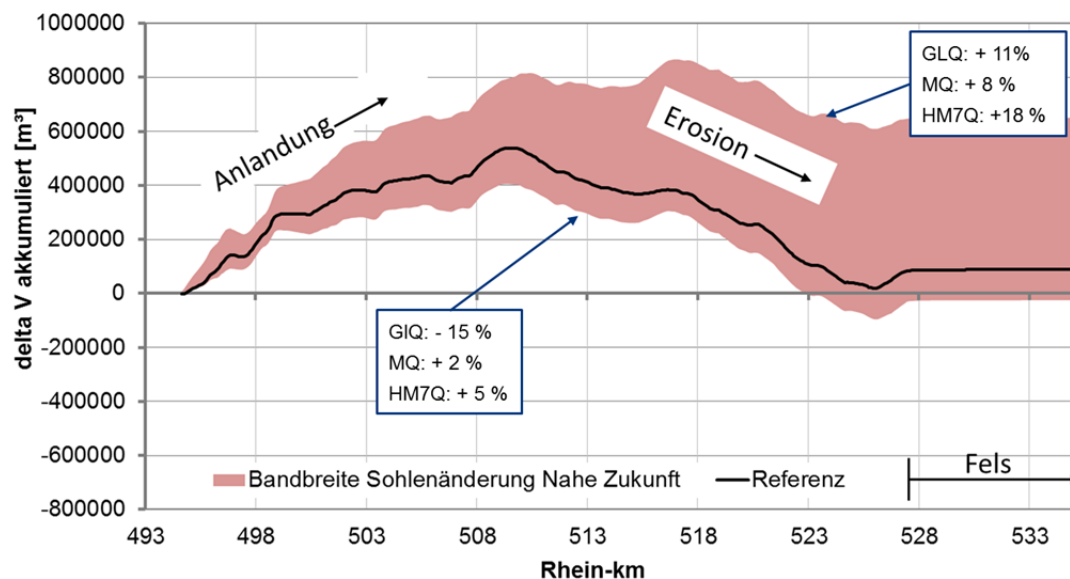
**Tabelle 2: Projizierte Änderungen der Baggermengen in der Fahrrinne (FR) und im Geschiebefang (GF) in der nahen Zukunft im Vergleich zur Referenzperiode 1961 bis 1990 unter Angabe der zugrunde liegenden Abflussprojektionen und der Änderungen der hydrologischen Kennwerte.**

Projektion <sup>2</sup>	Änderung der hydrologischen Kennwerte (hydrologisches Jahr)			Änderung der Baggermenge (gerundet)	
	GIQ	MQ	HM7Q	FR	GF
C20_A1B_HADCM3Q3_HADRM3Q3_25_ls	+11%	+8%	+18%	-31%	-1%
C20_A2_EH5r1_REMO_10_ls	+8%	+3%	-4%	-18%	-5%
C20_A1B_BCM_RCA_25_ls	+6%	+11%	+11%	-5%	-3%
C20_A1B_EH5r3_REMO_25_ls	+6%	-1%	+4%	-18%	-5%
C20_A1B_HADCM3Q0_CLM_25_ls	+2%	0%	+6%	-3%	-2%
C20_A1B_HADCM3Q0_HADRM3Q0_25_ls	-3%	0%	0%	+25%	+3%
C20_A1B_EH5r3_RACMO_25_ls	-4%	-2%	0%	+25%	+2%
C20_A1B_EH5r1_CCLM_20_ls	-15%	+2%	+5%	+123%	+15%

<sup>2</sup> Die Benennung der hydrologischen Projektionen erfolgt nach dem Schema <Emissionsszenario>\_<Globales Klimamodell>\_<Regionales Klimamodell>\_<räumliche Auflösung in km>\_<Biaskorrekturverfahren (ls = linear scaling) >>

Die zukünftige Sohlenentwicklung in der Strecke hängt insbesondere von den klimabedingt veränderten Sedimenteinträgen in die Strecke, der Sedimentdynamik und den zukünftigen Baggermengen ab. Die projizierten Änderungen der Flusssohle unterstrom des Geschiebefangs Mainz-Weisenau sind Abbildung 8 zu entnehmen.

In der nahen Zukunft ist in der Strecke unterstrom des Geschiebefangs bis zum Eintritt in die Gebirgsstrecke tendenziell mit einer klimabedingten Erhöhung der Sedimentakkumulation im Vergleich zur Referenzperiode 1961 bis 1990 zu rechnen<sup>3</sup>. Die Abflussprojektion, welche durch den größten Anstieg des GIQ charakterisiert ist, führt aufgrund der damit einhergehenden Anhebung des für die Unterhaltung relevanten Bezugswasserstands zur größten Sedimentakkumulation in der Strecke und umgekehrt.



**Abbildung 8: Projizierte Bandbreite der in Längsrichtung akkumulierten Volumina der Sohlenänderungen über die Flussbreite in der Periode 2021 bis 2050 (nahe Zukunft) im Vergleich zur Sohlenänderung in der Referenzperiode 1961 bis 1990, beginnend unterstrom des Geschiebefangs ab Rhein-km 494,46 unter Angabe der Änderungen der hydrologischen Kennwerte der Abflussprojektionen, welche im unteren bzw. oberen Rand der Bandbreite resultieren.**

### 7.2.2 Ferne Zukunft

In der fernen Zukunft ist tendenziell mit einer Erhöhung der Unterhaltungsbaggermengen zu rechnen. Je ausgeprägter die Verringerung des GIQ ist, desto größer fällt die Erhöhung der Baggermengen aus, sofern die Maßstäbe zur Festlegung des Bezugswasserstands  $GIW_{2002}$  angesetzt werden. Deutlich wird weiterhin der Zusammenhang zwischen erhöhten Abfluss-

<sup>3</sup> Da die morphodynamische Analyse für alle drei Perioden (Referenzzeitraum, nahe und ferne Zukunft) auf der gleichen Anfangssohle (2004) basiert und sich die Geschiebefangleerungen über den gesamten Zeitraum der Referenzperiode erstrecken (tatsächlich wurde der Geschiebefang erst im Jahr 1989 eingerichtet), um alle berechneten Änderungen explizit auf die klimabedingten Änderungen der Abflüsse zurückführen zu können, sind die ermittelten Baggermengen und Sohlenänderungen der Referenzperiode nicht mit realen Werten vergleichbar.



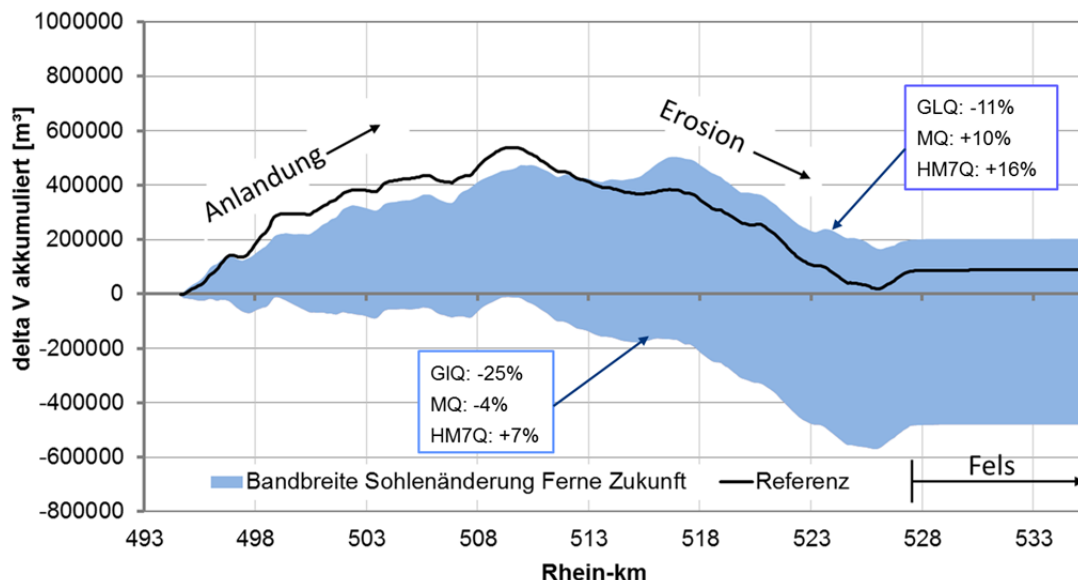
kennwerten für Mittel- und Hochwasser einerseits und einem Anstieg der erforderlichen Unterhaltungsmengen andererseits (Tabelle 3).

Verkehrswasser-  
bauliche Rege-  
lungs- und  
Anpassungs-  
optionen an  
klimabedingte  
Veränderungen  
des Abfluss-  
regimes

**Tabelle 3: Projizierte Änderungen der Baggerungen in der fernen Zukunft im Vergleich zur Referenzperiode 1961 bis 1990 unter Angabe der zugrunde liegenden Abflussprojektionen und der Änderungen der hydrologischen Kennwerte.**

Projektion	Änderung der hydrologischen Kennwerte (hydrologisches Jahr)			Änderung der Baggermenge (gerundet)	
	GIQ	MQ	HM7Q	FR	GF
C20_A1B_EH5r3_REMO_25_Is	-3%	+4%	+19%	+16%	+1
C20_A2_EH5r1_REMO_10_Is	-6%	+5%	+21%	+32%	+5%
C20_A1B_HADCM3Q0_CLM_25_Is	-9%	-10%	-1%	+14%	+5%
C20_A1B_EH5r3_RACMO_25_Is	-11%	+10%	+16%	+106%	+12%
C20_A1B_EH5r1_CCLM_20_Is	-25%	-4%	+7%	+196%	+18%

In der fernen Zukunft ist im Vergleich zur Referenzperiode 1961 bis 1990 in der Strecke unterstrom des Geschiebefangs bis zum Eintritt in die Gebirgsstrecke tendenziell mit einer klimabedingten Abnahme der Sedimentakkumulation zu rechnen. Die Abflussprojektion, welche durch die größte Verringerung des GIQ charakterisiert ist, führt aufgrund der damit einhergehenden Absenkung des für die Unterhaltung relevanten Bezugswasserstands zur ausgeprägtesten Nettoerosion in der Strecke (Abbildung 9). Der obere Rand der Bandbreite der projizierten Sohlenänderungen wird nicht durch die Abflussprojektion mit der geringsten Abnahme des GIQ verursacht, sondern durch die Abflussprojektion, welche aufgrund der deutlichen Erhöhung der Mittel- und Hochwasserkennwerte mit einer verstärkten Sedimentdynamik und damit dem größten Sedimenteintrag in die Strecke einhergeht.



**Abbildung 9: Projizierte Bandbreite der in Längsrichtung akkumulierten Volumina der Sohlenänderungen über die Flussbreite in der Periode 2071 bis 2100 (ferne Zukunft) im Vergleich zur Sohlenänderung in der Referenzperiode 1961 bis 1990, beginnend unterstrom des Geschiebefangs ab Rhein-km 494,46 unter Angabe der Änderungen der hydrologischen Kennwerte der Abflussprojektionen, welche im unteren bzw. oberen Rand der Bandbreite resultieren.**



### 7.3 Einschätzung zum Grad der Betroffenheit des Systems Wasserstraße und des operativen Geschäfts der WSV im Geschäftsbereich des BMVI

Die für die **nahe Zukunft** projizierten Änderungen lassen keine eindeutige Aussage zum Grad der Betroffenheit der Wasserstraße zu. Die Ergebnisse indizieren auf der einen Seite eine Verbesserung der Leichtigkeit, Sicherheit und Wirtschaftlichkeit der Schifffahrt aufgrund ansteigender Niedrig- und Mittelwasserspiegel. Damit einher ginge die Abnahme des zur Aufrechterhaltung der Fahrrinntiefe erforderlichen Unterhaltungsaufwandes infolge ebenfalls ansteigender Bezugswasserstände. Möglich ist jedoch auch der gegenteilige Fall, dass die Schifffahrt von häufiger auftretenden Niedrigwasserabflüssen betroffen wäre, was den operativen Aufwand für die WSV hinsichtlich der Unterhaltungsaktivitäten und der hierfür erforderlichen Verkehrssicherungspeilungen erhöhen würde.

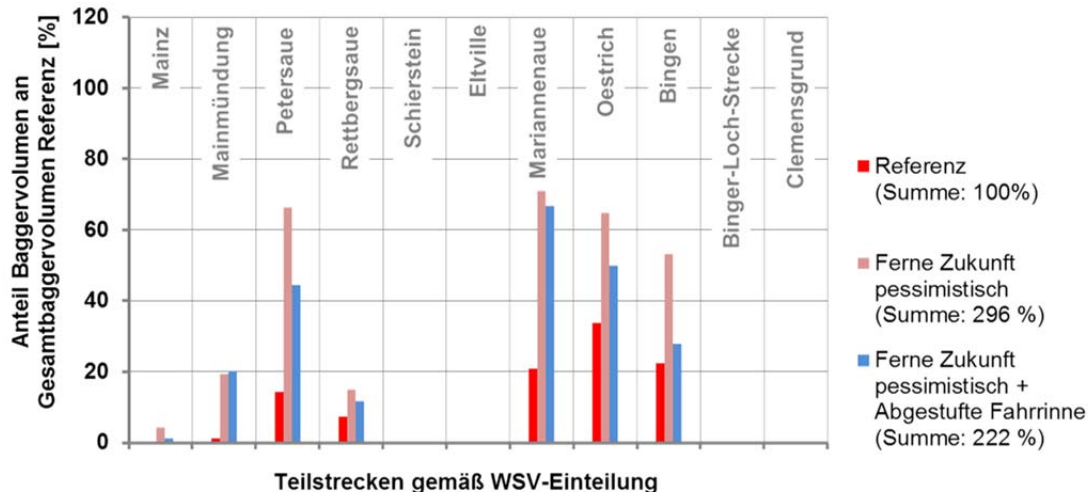
Für die **ferne Zukunft** projizierte Änderungen indizieren tendenziell eine Zunahme der Häufigkeit und Dauer von Niedrigwasserphasen und der Unterhaltungsbaggermengen. Dadurch würden einerseits die Leichtigkeit und Sicherheit der Schifffahrt beeinträchtigt und andererseits der operative Aufwand der WSV (Geschiebemanagement) erhöht.

### 7.4 Kernaussagen über mögliche Anpassungsoptionen und Handlungsempfehlungen

Die verkehrswasserbaulichen Anpassungsoptionen dienen dazu, den projizierten klimabedingten Mehraufwand, der zur Aufrechterhaltung der heutigen Fahrrinntiefen erforderlich wäre auszugleichen. Ein Nebeneffekt hiervon ist die Verringerung der erforderlichen Baggerfrequenz in den Engpassstellen, wodurch die Beeinträchtigungen für die Schifffahrt in der Fahrrinne reduziert und die Leichtigkeit und Sicherheit der Schifffahrt erhöht werden könnten. Die Wirksamkeit der im Rahmen der hydrodynamischen Modellierung identifizierten verkehrswasserbaulichen Anpassungsoptionen wurde im 2D-morphodynamischen Modell mit der Abflussprojektion C20\_A1B\_EH5r1\_CCLM\_20\_Is der fernen Zukunft als Randbedingung untersucht, da unter Verwendung dieser Projektion der größte Anstieg der Unterhaltungsmengen projiziert wurde (siehe Tabelle 3).

#### Abgestufte Fahrrinne

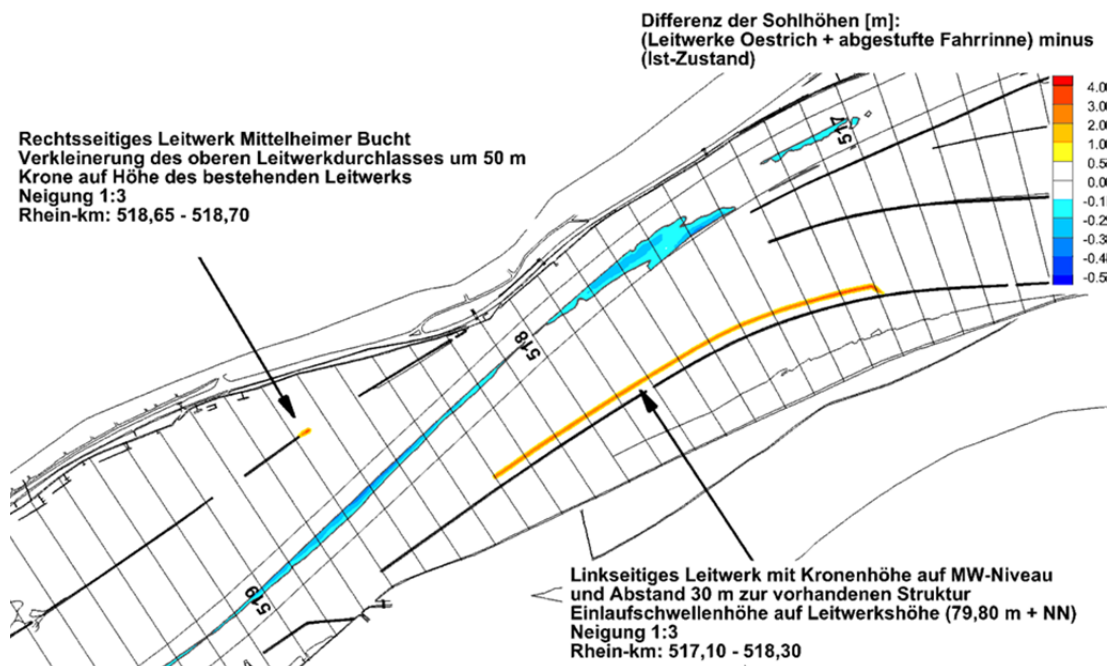
Durch die auf reduzierter Breite erfolgende Anpassung der Fahrrinne an die veränderten Bezugswasserstände kann eine deutliche Verringerung des erforderlichen Unterhaltungsaufwandes erzielt werden. In Teilbereichen der untersuchten Strecke lässt sich durch die abgestufte Unterhaltung der Fahrrinne die klimabedingte Zunahme des Unterhaltungsaufwandes nahezu ausgleichen. In anderen Teilstrecken ist die Wirkung weniger ausgeprägt (Abbildung 10). Hinsichtlich der Verringerung des klimabedingten Mehraufwands an Unterhaltung ist es daher denkbar, die Anpassungsoption der Unterhaltung der Fahrrinne auf abgestufter Breite auf ausgewählte Engpassbereiche zu reduzieren. Im betrachteten Szenario lässt sich der klimabedingte Anstieg der Baggermengen in der Fahrrinne von +196 % auf +122 % reduzieren.



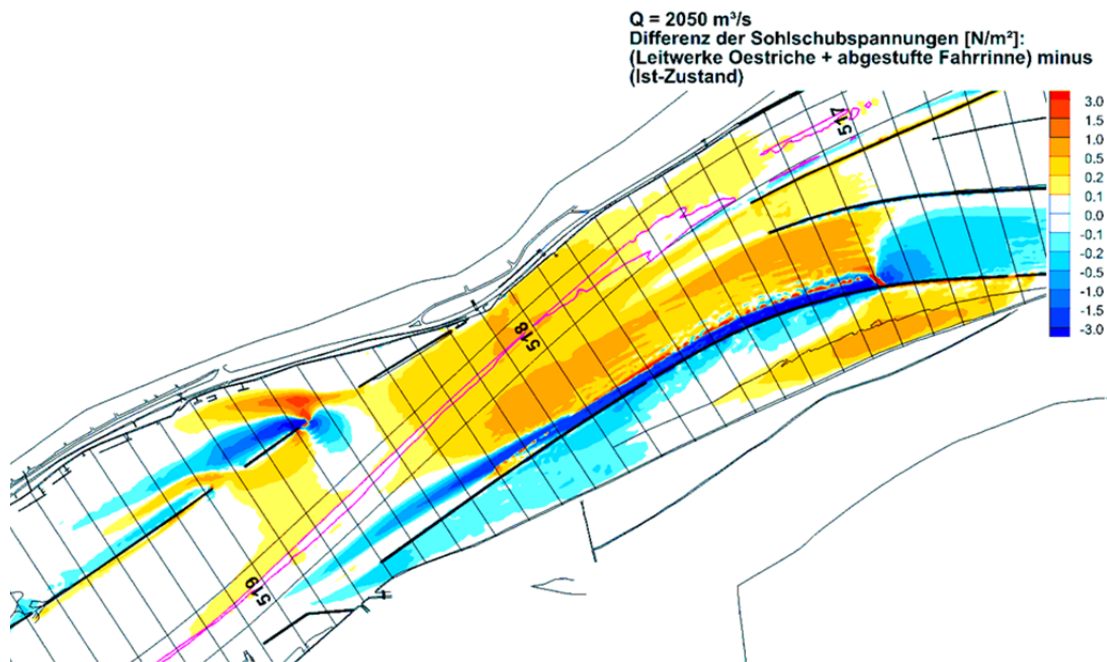
**Abbildung 10: Reduktion der klimabedingten Erhöhung des Unterhaltungsaufwandes in den Teilstrecken infolge der abgestuften Unterhaltung unter Verwendung der Abflussprojektion C20\_A1B\_EH5r1\_CCLM\_20\_Is für die ferne Zukunft (2071 bis 2100).**

### Bereich Oestrich

Auf Basis der Ergebnisse des 2D-HN-Modells lässt sich eine Reduzierung des Unterhaltungsaufwandes im Bereich Oestrich durch eine Kombination aus einem linksseitigem Längswerk im Bereich des Freiweinheimer Grundes mit Kronenhöhe auf MW-Niveau und einer Länge von 1200 m (Rhein-km 517,10 - 518,30) mit einer Verkleinerung des oberstromigen Durchlasses des Mittelheimer Längswerks um ca. 50 m (Rhein-km 518,65 - 518,70) auf bestehendem Niveau der Kronenhöhe (79,70 m+NN) erreichen.



**Abbildung 11: Differenz der Höhen der Modellsohle im Bereich Oestrich aufgrund des Einbaus der Regelungsmaßnahmen sowie der abgestuften Fahrrinne gegenüber Ist-Zustand.**



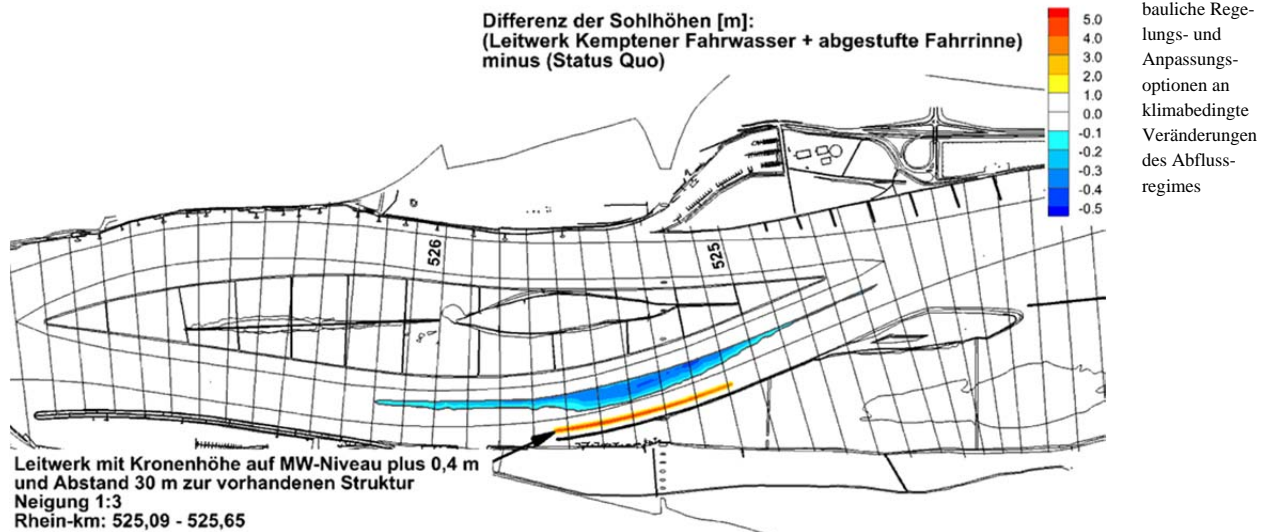
**Abbildung 12: Auswirkung der Regulationsmaßnahmen im Bereich Oestrich auf die Sohl-schubspannungen bei bettbildendem Abfluss.**

Wie die morphodynamischen Modellrechnungen zeigen, reichen die aus den Bauwerken resultierenden Schubspannungserhöhungen jedoch nicht aus, den klimabedingten Mehraufwand an Unterhaltung maßgeblich zu verringern. Es wird daher empfohlen, die Regulationsbauwerke weiter zu optimieren, jedoch auch das in diesem Bereich deutlich von Inkonsistenzen der Eingangsdaten sowie von Datenlücken betroffene morphodynamische Modell weiter zu verbessern.

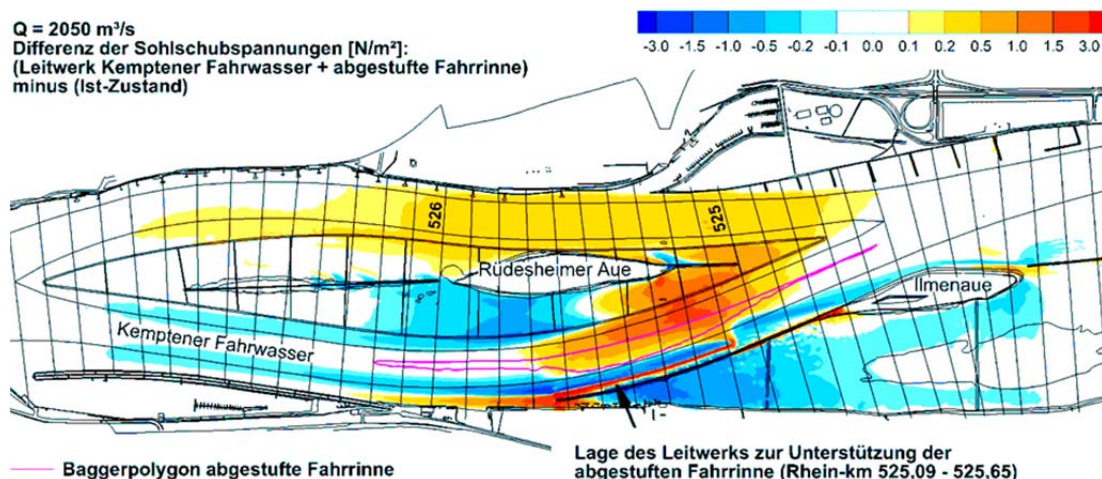
#### Bereich Kemptener Fahrwasser

Die hier dargestellte Maßnahme besteht aus einem linksseitigen Längswerk im Kemptener Fahrwasser mit einer Kronenhöhe auf MW-Niveau plus 0,4 m (78,90 m+NN) und einer Länge von 560 m (Rhein-km 525,09 - 525,65), welches dem bestehenden Längswerk um 30 m vorgelagert ist. Den bei Abflüssen größer MQ durch die Querströmung aus dem Altarm Ilmenaue verursachten Anlandungstendenzen im Kemptener Fahrwasser, welche in den Bereichen der Baggerungen durch die Querschnittsaufweitungen erhöht werden, wird durch die Verminderung dieser Querströmung bei gleichzeitiger Einengung des Fließquerschnitts durch das vorgelagerte Längswerk entgegengewirkt. Die linksseitige Zufahrt zum Altarm Ilmenaue (Rhein-km 525,6) bleibt von dieser Maßnahme unberührt.

Die morphodynamische Simulation zeigt die Eignung des Längswerks zur Reduzierung des projizierten Mehraufwands an Unterhaltung. Die klimabedingte Erhöhung der Baggermengen in der Teilstrecke Bingen um + 137 % kann auf einen Wert von + 69 % reduziert und somit nahezu halbiert werden.



**Abbildung 13: Differenz der Höhen der Modellsohle im Bereich Kemptener Fahrwasser aufgrund des Einbaus der Regelungsmaßnahme sowie der abgestuften Fahrrinne gegenüber Ist-Zustand.**



**Abbildung 14: Auswirkung der Regelungsmaßnahme im Bereich Rüdeshheimer Aue auf die Sohlschubspannungen bei bettbildendem Abfluss.**

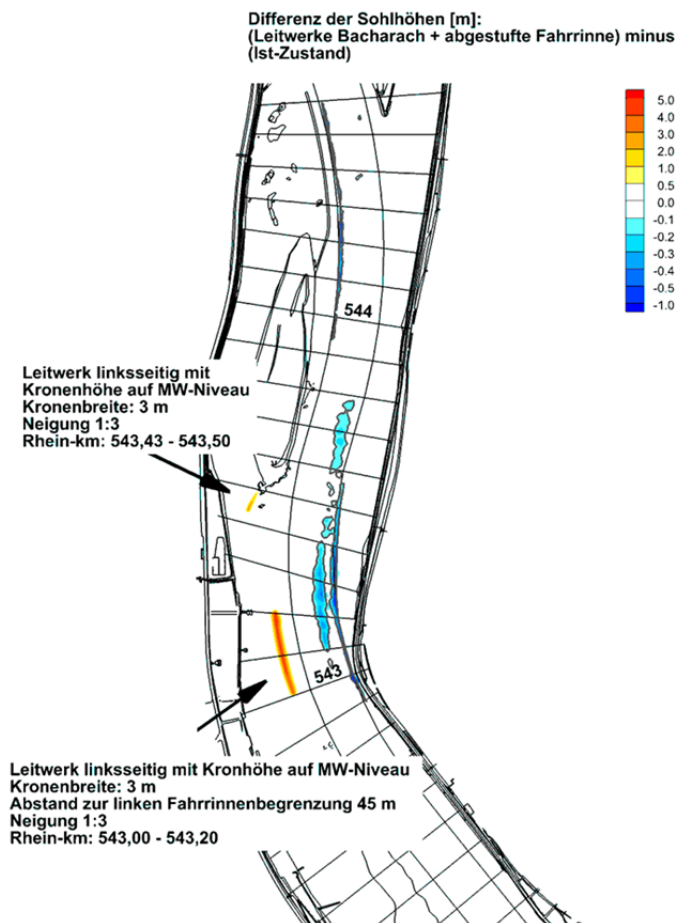
### Bereich Bacharacher Werth

Eine mögliche Maßnahme kombiniert ein in Strommitte links lokalisierendes Längswerk mit Kronenhöhe auf MW-Niveau und einer Länge von 200 m (Rhein-km 543,00 - 543,20) mit einer an das Bacharacher Werth anbindenden Längsstruktur mit einer Länge von ca. 70 m (Rhein-km 543,43 - 543,50) und einer Kronenhöhe ebenfalls auf MW-Niveau.

Die Wirkung der Maßnahme beruht auf der Reduzierung des Abflusses hinter dem Bacharacher Werth einerseits sowie der Einengung des Fließquerschnitts durch das oberstromige Längswerk andererseits. Die sich einstellende Schubspannungserhöhung im Hauptstrom



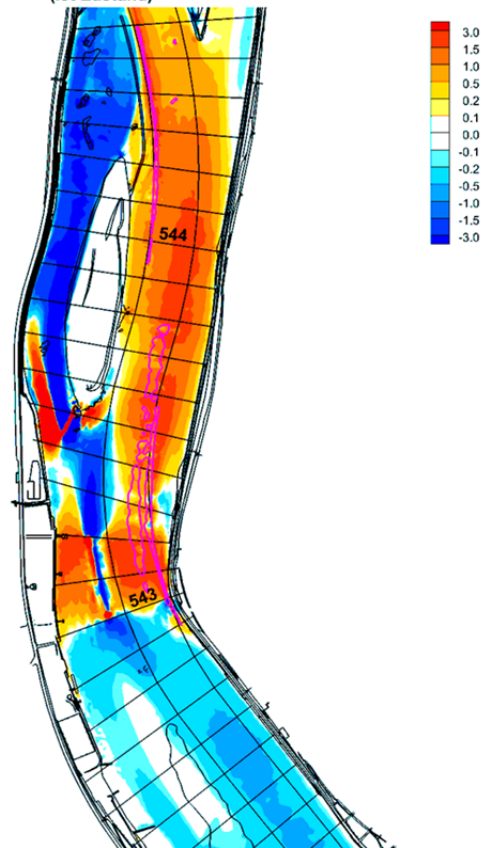
wirkt den erhöhten Anlandungstendenzen in den Baggerbereichen entgegen. Die Kombination beider Maßnahmen ist erforderlich, da sich die Wirkung der einzelnen Bauwerke jeweils nur auf einen Teilbereich der Anlandungsstelle erstreckt.



**Abbildung 15: Differenz der Höhen der Modellsohle im Bereich Bacharacher Werth aufgrund der Regelungsmaßnahme sowie des Einbaus der abgestuften Fahrrinne gegenüber Ist-Zustand.**

Die Auswirkung der Kombination der beiden Regelungsbauwerke auf den Unterhaltungsaufwand wurde nicht untersucht, da die Bauwerke außerhalb des morphodynamischen Modells liegen.

Q = 2050 m³/s  
Differenz der Sohlschubspannungen [N/m²]:  
(Bacharacher Leitwerke + abgestufte Fahrrinne) minus  
(Ist-Zustand)



Verkehrswasser-  
bauliche Rege-  
lungs- und  
Anpassungs-  
optionen an  
klimabedingte  
Veränderungen  
des Abfluss-  
regimes

**Abbildung 16: Auswirkung der Regulationsmaßnahmen im Bereich Bacharacher Werth auf die Sohlschubspannungen bei bettbildendem Abfluss.**

#### Bereich Jungferngrund

Eine hinsichtlich der Erhöhung der Sohlschubspannungen zielführende Maßnahme besteht aus einem an das Tauber Werth anbindenden Längswerk mit Kronenhöhe auf MW-Niveau und einer Länge von 260 m (Rhein-km 550,70 - 550,96) und aus einem in den Jungferngrund eingebundenem Längswerk mit einer Kronenhöhe auf MW-Niveau und einer Länge von 360 m (Rhein-km 550,65 - 551,01).

Die Wirkung der Maßnahme beruht auf der Reduzierung der Abflüsse hinter dem Tauber Werth und dem Jungferngrund, wodurch die durch die Baggerungen reduzierten Schubspannungen im Bereich des Hauptstroms erhöht werden.

Die Auswirkung der Kombination der beiden Regulationsbauwerke auf den Unterhaltungsaufwand wurde nicht untersucht, da die Bauwerke außerhalb des morphodynamischen Modells lokalisiert sind.

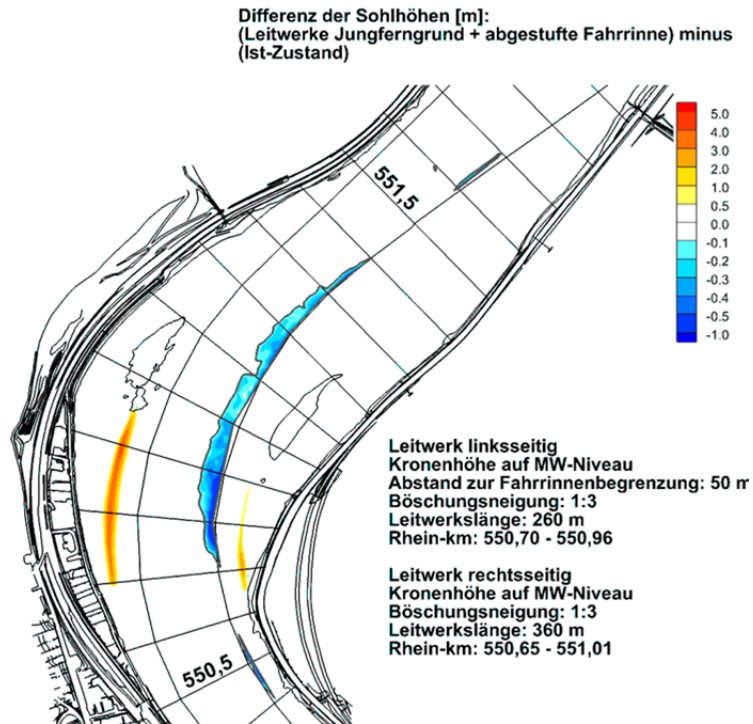


Abbildung 17: Differenz der Höhen der Modellsohle im Bereich Tauber Werth/ Jungferngrund aufgrund der Regulationsmaßnahme sowie des Einbaus der abgestuften Fahrrinne gegenüber Ist-Zustand.

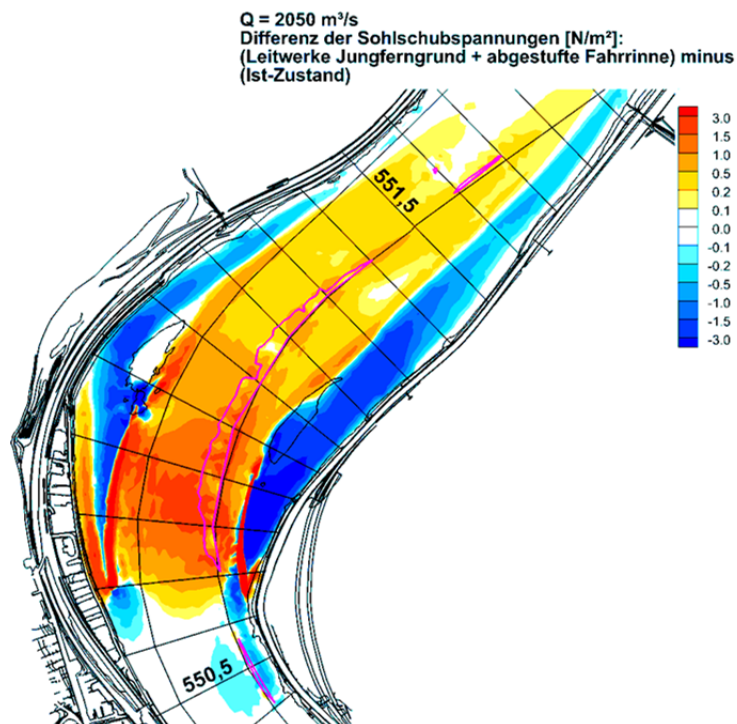
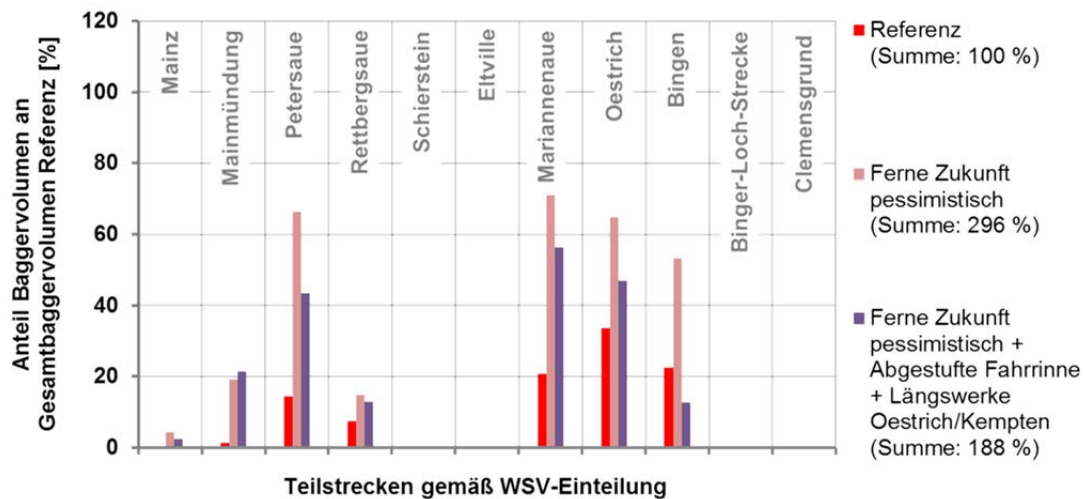


Abbildung 18: Auswirkung der Regulationsmaßnahmen im Bereich Tauber Werth/ Jungferngrund auf die Sohlschubspannungen bei bettbildendem Abfluss.

## Kombination der abgestuften Fahrrinne mit zwei Längswerken in den Bereichen Oestrich und Kemptener Fahrwasser

Verkehrswasser-  
bauliche Rege-  
lungs- und  
Anpassungs-  
optionen an  
klimabedingte  
Veränderungen  
des Abfluss-  
regimes

Eine Kombination aus abgestufter Fahrrinne einerseits und den oben genannten Längswerken in den Bereichen Oestrich und Rüdeshheimer Fahrwasser andererseits führt insgesamt zu einer Verringerung der im pessimistischen Szenario projizierten Zunahme des Unterhaltungsaufwands von + 196 % auf einen Wert von + 88 %. In Teilstrecken kann die klimabedingte Zunahme des Unterhaltungsaufwandes ausgeglichen werden (Abbildung 19).

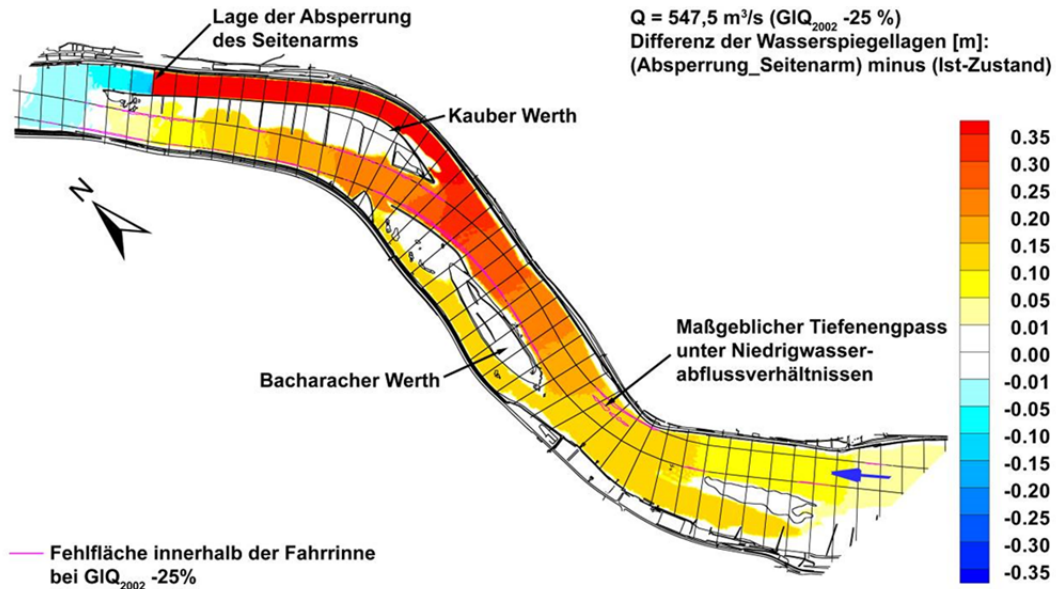


**Abbildung 19: Verringerung der klimabedingten Erhöhung der Baggervolumina („Ferne Zukunft pessimistisch“) in den Teilstrecken gemäß WSV-Einteilung infolge einer Kombination der abgestuften Fahrrinne mit zwei Längswerken in den Bereichen Oestrich und Kemptener Fahrwasser („Ferne Zukunft pessimistisch + Anpassungsoptionen“)**

## Temporäre Absperrung des Nebenarmes der Stromverzweigung am Kauber Werth

Die auf Niedrigwasserabflussphasen beschränkte Absperrung des Nebenarms einer Stromverzweigung im Fall von GIQ - 25 % führt zu einem Tiefengewinn in der Fahrrinne von bis zu 0,3 m im direkten Verzweigungsbereich und von etwa 0,14 m noch 1,4 km stromauf, im Bereich eines unter Niedrigwasserverhältnissen maßgeblichen Tiefenengpasses (Abbildung 20).





**Abbildung 20: Wirkung einer temporären, vollständigen Absperrung des Seitenarms einer Stromverzweigung auf die Wasserspiegellage bei extremem Niedrigwasserabfluss.**

### Fazit

Die Projektionen der Abflussänderungen und der Änderungen des Unterhaltungsaufwandes in der nahen Zukunft bieten aufgrund der indifferenten Änderungssignale keine Grundlage für Empfehlungen, eine klimabedingte Verschärfung der hydraulisch-morphologischen Situation und den damit verbundenen Mehraufwand für die WSV durch die Umsetzung der vorgestellten verkehrswasserbaulichen Anpassungsoptionen auszugleichen. Nichts desto trotz sind einige der identifizierten Regelungsbauwerke dazu geeignet, bereits unter heutigen Bedingungen zu einer Verringerung des Unterhaltungsaufwandes beizutragen. Es ist daher möglich, diese Optionen in aktuellen Projekten der WSV zur Verbesserung der Leichtigkeit, Sicherheit und Wirtschaftlichkeit der Schifffahrt zu betrachten und gegebenenfalls weiter zu optimieren.

Grundsätzlich ist es möglich, alle projizierten, klimabedingten hydraulischen und morphologischen Änderungen und deren Auswirkungen auf die Wasserstraße im untersuchten Bereich zwischen Mainz und St. Goar unter Inkaufnahme eines erhöhten Unterhaltungsaufwandes auszugleichen. Um auf mögliche Änderungen adäquat reagieren zu können, ist es jedoch nötig, die Entwicklung des hydraulisch-morphologischen Systems durch ein ausreichend dichtes Monitoring der hydraulischen, sedimentologischen und morphologischen Größen zu beobachten und Tendenzen frühzeitig zu erkennen. In diesem Kontext ist es ebenfalls erforderlich, die Erfolgskontrolle der heutigen Sedimentbewirtschaftung kontinuierlich weiter zu führen. Hierdurch wird ein Verständnis für die Wirkungsweise der aktuellen Unterhaltungsmaßnahmen auf die Sohlenentwicklung gewonnen, welches erforderlich ist, um auf mögliche Systemänderungen gezielt reagieren zu können.

Die abgestuft unterhaltene Fahrrinne sowie die genannten Regelungsbauwerke stellen aus hydraulisch-morphologischer Sicht geeignete Anpassungsoptionen dar, um die projizierte klimabedingte Verschärfung der Engpasssituation und die Auswirkungen der morphologischen Änderungen auf den Unterhaltungsaufwand in der fernen Zukunft weitgehend auszugleichen. Aufgrund der langen Realisierungszeiten wasserbaulicher Projekte ist es sinnvoll, bereits heute die erforderlichen Anpassungsoptionen zu untersuchen und zu planen. Sofern wirtschaftlich sinnvoll, können die Anpassungsoptionen aufgrund ihrer positiven Wirkung auf den Unterhaltungsaufwand auch in aktuelle WSV-Projekte eingebunden werden. Sollte dies nicht geschehen, so muss bei der Planung aktueller Ausbaumaßnahmen jedoch berücksichtigt werden, dass die projizierten Abflussänderungen durchaus im angesetzten Projektierungszeitraum eintreten könnten. Die Regelungsmaßnahmen sollten daher möglichst so geplant werden, dass eine Anpassung ihrer Wirkung an die projizierten Zustände ohne wesentlichen Zusatzaufwand gewährleistet werden kann.

Verkehrswasser-  
bauliche Rege-  
lungs- und  
Anpassungs-  
optionen an  
klimabedingte  
Veränderungen  
des Abfluss-  
regimes

## 8 Diskussion und Ausblick

Mit den erstellten Modellen stehen geeignete Werkzeuge zur Verfügung, die Auswirkungen der projizierten Änderungen der hydraulischen und morphologischen Größen auf den Betrieb und die Unterhaltung der freifließenden Binnenwasserstraßen zu bewerten und durch die exemplarisch vorgestellten Anpassungsoptionen in der Pilotstrecke weitgehend auszugleichen.

Das Potenzial flexibler, temporär wirksamer Regulationsmaßnahmen hinsichtlich einer Anpassung der Regelungswirkung an hydraulische oder morphologische Änderungen lohnt eine vertiefte Untersuchung. Insbesondere wenn eine erforderliche Verschärfung der Regelung, beispielsweise zur Niedrigwasseranhebung, aufgrund konkurrierender Ziele wie dem Hochwasserschutz nicht mehr möglich ist, bieten flexible Regelungskonzepte eine Handlungsoption.

Die Abflussprojektionen als eine wesentliche Eingangsgröße der vorliegenden Untersuchungen beinhalten infolge der zahlreichen zu treffenden Annahmen und Modellabstraktionen bereits Unsicherheiten. Aufgrund weiterer vereinfachender Annahmen in der anschließenden Modellkette, im konkreten Fall in den hydro- und morphodynamischen Modellen, werden die Unsicherheiten der Modellergebnisse zunehmend größer. Auf der hydro- und morphodynamischen Modellseite resultieren diese Unsicherheiten einerseits aus der Wahl der Modelldimensionalität und der vereinfachenden Modellansätze. Dies sind. z.B.

- die Modellierung von Turbulenz und Sohlenschubspannungen,
- dem eingeschränkte Gültigkeitsbereich der zu Grunde liegenden, unter Verwendung von Einkornmaterial abgeleiteten Transportformel und
- die vereinfachende Beschreibung der komplexen morphologischen Prozesse.

Darüber hinaus sind viele der wesentlichen morphodynamischen Prozesse, wie z.B. die vertikale Kornsortierung im Sedimentkörper oder Kornabschattungseffekte noch nicht abschließend verstanden und auch nicht umfassend beschreibbar.

Auch auf der Datenseite sind Unsicherheiten zu verzeichnen, die aus räumlichen und zeitlichen Datenlücken und Messungenauigkeiten resultieren. Dies betrifft z.B. fehlende qualitativ hochwertige Sohlpeilungen aus vergangenen Jahrzehnten, sedimentologische Daten, die nur punktuell vorliegen, die fehlende Information der flächigen Verteilung von nicht erodierbaren Horizonten usw. Die Modellkalibrierung und -validierung führt jedoch dazu, dass die wesentlichen hydraulischen und morphologischen Prozesse naturähnlich abgebildet werden. Dabei können die Ergebnisse der morphodynamischen Simulationen die Realität zwar nicht punktuell repräsentieren, aber auf einer größeren Skala bilanziert (z.B. Sohlenevolution zwischen zwei Hektometerprofilen) werden jedoch wesentliche Tendenzen wiedergeben.

Die Methodik, alle betrachteten Zeiträume mit ein und derselben Anfangssohle zu berechnen, bzw. den Geschiebefang bereits von Beginn der Referenzperiode an zu unterhalten, um die

resultierenden Änderungen im Modellergebnis auf den Klimawandeleinfluss zurückführen zu können, macht es erforderlich, Planungen von Anpassungsoptionen oder Unterhaltungsstrategien im konkreten Fall nochmals auf der jeweils aktuellsten Datengrundlage zu wiederholen. Die aus der Analyse des Referenzzeitraumes gewonnenen Unterhaltungsmengen und Sohlenänderungen können infolge der gewählten Methodik nicht mit den tatsächlichen, innerhalb der Periode von 1961 bis 1990 angefallenen Werten verglichen werden.

Die Aussagen der vorliegenden Arbeit sind weitgehend relativer Natur. Dies erhöht die Belastbarkeit der Ergebnisse deutlich, da beispielsweise die gleichen Modellunsicherheiten jeweils in allen vergleichenden Simulationen auftreten. Unterschiede im Modellergebnis sind somit weitgehend, wenn auch nicht vollständig, auf die unterschiedliche Wahl der Randbedingungen zurückzuführen. Dies betrifft nicht nur die morphodynamischen Analysen der unterschiedlichen Zeitscheiben des Referenzzeitraums sowie der nahen und fernen Zukunft, sondern auch die Identifikation der verkehrswasserbaulichen Anpassungsmaßnahmen, die ebenfalls auf vergleichenden Berechnungen basiert, nämlich des Ausgangszustands einerseits sowie des Ausgangszustands mit lediglich einer geometrischen Änderung andererseits. Die Vorgehensweise, verkehrswasserbauliche Anpassungsoptionen zunächst auf Basis der Schubspannungsbetrachtung im Rahmen stationärer Strömungsmodellierungen zu entwerfen und anschließend unter Verwendung des morphodynamischen Modells, und damit unter zeitlich variablen Randbedingungen und Systemzuständen hinsichtlich ihrer Wirksamkeit zu bewerten, erhöht ebenfalls die Belastbarkeit der gefundenen Ergebnisse.

Ein Vergleich der Ergebnisse der morphodynamischen Analyse mit den Ergebnissen der 1D-morphodynamischen Analyse im Rahmen des KLIWAS Projekts 4.02 wurde aufgrund der methodischen Unterschiede nicht weiter verfolgt.

Die angewandte Technik zur Reduzierung der Rechenzeiten der morphodynamischen Simulationen unter weitgehender Beibehaltung der Ergebnisqualität ermöglichte es, die Simulationen in der genannten Anzahl und jeweils über einen Zeitraum von 30 Jahren durchführen zu können. Zur Anwendung der geschilderten Vorgehensweise in anderen Projekten mit morphologischem Bezug wird jedoch empfohlen, die maximale Skalierbarkeit hinsichtlich der Geschiebetransportraten bzw. Evolutionsraten, der instationären Abflussganglinie sowie der Zeitpunkte, Dauern bzw. Bagger- und Zugaberaten projektspezifisch zu untersuchen. In Abhängigkeit der Anfangs- und Randbedingungen, der Modellausdehnung sowie der Zielstellung der jeweiligen Untersuchung sind möglicherweise Skalierungsfaktoren abweichend von zehn erforderlich, um die gewünschte Ergebnislösung bei maximal möglicher Modellbeschleunigung zu erreichen.

Die Ergebnisse hinsichtlich der Betroffenheit und der Anpassungsoptionen in der Pilotstrecke Mainz bis St. Goar sind hochgradig streckenspezifisch. Sollen Aussagen zu anderen Strecken oder Wasserstraßen getroffen werden, so sind die Arbeitsschritte der hydraulischen und morphologischen Analyse im Kontext der jeweiligen Strecke unumgänglich. Dies gilt gleichermaßen für die Identifikation der Anpassungsoptionen, welche jeweils an die streckenspezifischen Besonderheiten und Randbedingungen ausgerichtet erfolgen muss.

## 9 Danksagung

Die Autoren möchten den Kollegen des KLIWAS-Projekts 4.01, insbesondere Enno Nilson und Maria Carambia für die Lieferung der Abflussprojektionen sowie zahlreicher weiterer hydrologischer Daten und den hilfreichen Informationen zu deren Interpretation herzlich danken. Dank geht weiterhin an die Kollegen des Projekts 4.04, die Informationen zur Lage und Breite der abgestuften Fahrrinne erarbeitet haben.

Ein besonderer Dank gilt den Mitarbeitern des WSA Bingen, ohne deren kontinuierliche Datenerhebungen in der Strecke der Aufbau und der Betrieb sowohl des hydro- als auch des morphodynamischen Modells in der durchgeführten Form nicht möglich gewesen wäre. Eine Vielzahl ergänzender Informationen zu streckenspezifischen Aspekten, insbesondere zur Bagger- und Zuagbestrairie des WSA Bingen hat dazu beigetragen, die morphodynamische Modellierung unter realitätsnahen Annahmen und Randbedingungen durchführen zu können.

Dank geht weiterhin an die Mitarbeiter der KLIWAS-Koordination für ihren organisatorischen und gestalterischen Einsatz im Rahmen der für das Gelingen des Forschungsvorhabens erforderlichen internen und externen Veranstaltungen sowie der nötigen Abstimmungen, des Weiteren für ihre Unterstützung im Vorfeld des 5. KLIWAS-Plenums, welches im Frühjahr 2013 im Hause der BAW Karlsruhe durchgeführt wurde.

## 10 Literatur

- BMV (1987). *Untersuchung der Abfluss- und Geschiebeverhältnisse des Rheins*. Schlussbericht, Abteilung Binnenschifffahrt und Wasserstraßen, Bonn.
- BMVBS (1997). *Sohlengleichgewicht am Rhein. Bestandsaufnahme und Maßnahmenprogramm. Bericht der Arbeitsgruppe "Rheinsohlenerosion"*. Textband und Anlagenband.
- BMVBS (2007). *Schifffahrt und Wasserstraßen in Deutschland - Zukunft gestalten im Zeichen des Klimawandels*. Bestandsaufnahme. Bonn.
- Detert, M., & Weitbrecht, V. (2012). Automatic object detection to analyze the geometry of gravel grains - a free stand-alone tool. In Murillo (Hrsg.), *River Flow 2012*, (S. 595 - 1796). San José, Costa Rica.
- Hervouet, J., & Bates, P. (. (2000). The Telemac Modelling System. *Special Issue of Hydrological Processes.*, Volume 14 (Issue 13), S. 2007 - 2363.
- IKSR (2001). *Atlas 2001. Atlas der Überschwemmungsgefährdung und möglichen Schäden bei Extremhochwasser am Rhein*.
- Kling, G. e. (2003). *Confronting climate change in the Great Lakes Region: Impacts on our communities and ecosystems*. Union of Concerned Scientists, Cambridge, Massachusetts, and the Ecological Society of America, Washington, D.C.
- Krajewski, C. (1979). Der Gleichwertige Wasserstand des Rheins, Begriff und praktische Bedeutung. *Zeitschrift für Binnenschifffahrt und Wasserstraßen*, 106(Nr. 5), 178-181.
- Maerker, C., & Malcherek, A. (2010). Die Analyse von Baggern und Verklappen. Teil 1: Das Softwarepaket DredgeSim. *KW - Korrespondenz Wasserwirtschaft*(10), S. 550-555.
- Nilson, E. (2013). Auswirkungen des Klimawandels auf das Abflussregime und die Binnenschifffahrt im Rheingebiet. In *BfG-Berichte*. Koblenz.
- Nilson, E. C. (2010). Low Flow Changes in the Rhine River Basin. In I. K. Rheingebietes, *Assessment of Climate Change Impacts on Discharge in the Rhine River Basin: Results of the RheinBlick2050 Project* (Bde. Report No. I-23 of the CHR, S. 115-119).
- PIANC (2006). *Design of movable weirs and storm surge barriers*. InComWorking Group 26 of the Inland Navigation Commission. PIANC.
- PIANC (2008). *Waterborne transport, ports and waterways: A review of climate change drivers, impacts, responses and mitigation*. Brüssel, Belgien: PIANC.
- Schmidt, A., Wurms, S., Hahne, L., & Söhngen, B. (2011). Untersuchungen zu verkehrswasserbaulichen Anpassungsoptionen an extreme Niedrigwassersituationen am Beispiel des Rheins. *HTG Kongress 2011*. Würzburg.
- Stamm, J. (2007). Wasserbauliche Strategien für die Zukunft – Binnenschifffahrt und Hochwasserschutz. *Klimawandel, Wasserhaushalt und Naturschutz. Zukünftige Entwicklung in Fließgewässern und Auen*. Bonn: Bundesamt für Naturschutz.
- U.S. Army Corps of Engineers (2005). *Climate Impacts on Inland Waterways*. Final Report, U.S. Army Corps of Engineers, Institute for Water Resources, Alexandria, VA.

- van Vuren, S. e. (2008). *Voorspelinstrument duurzame vaarweg. Reducing Computation Time*. WL Delft Hydraulics.
- Villaret, C. (2010). *Sisyphé 6.0 User Manual. EDF R&D Internal Report No. H-P73-2010-01219*. Chatou.
- Warken, L. (2012). *Implementierung und Test der Wilcock-Formel zur hydronumerischen Simulation bimodaler Korngrößenverteilungen*. Diplomarbeit, Technische Universität Dresden, Institut für Wasserbau und technische Hydromechanik.
- Wassermann, S., Söhngen, B., Dettmann, T., & Heinzelmann, C. (2010). Investigations to define Minimum Fairway Widths for Inland Navigation Channels. XXXII. *Internationaler Schifffahrtskongress*. PIANC Deutschland.
- WSV (2003). *Entwurf HU - Ausbau des Rheins zwischen Köln und Koblenz. Herstellen einer Fahrrinntiefe von 3,40 m unter AZW98\* unter Berücksichtigung der Ungleichwertigkeit der Wasserstände bei GIW und AZW zwischen Rhein-km 493,600 und 592,200*.
- WSV (2008). *Rheingauanalyse - Hydraulisch-morphologische Untersuchung des Rheins zwischen Mainz und Bingen*. Unveröffentlicht.
- Wurms, S., & Schröder, M. (2011). Untersuchungen zu verkehrswasserbaulichen Anpassungsoptionen an extreme Niedrigwassersituationen. In BMVBS (Hrsg.), *Auswirkungen des Klimawandels auf Wasserstraßen und Schifffahrt in Deutschland. Tagungsband zur 2. Statuskonferenz. 25. - 26. Oktober 2011*. Berlin.
- Wurms, S., & Schröder, P. M. (2012). Evaluation of strategies for the acceleration of morphodynamic simulations against the background of waterways maintenance. In Murillo (Hrsg.), *River Flow 2012*, (S. 1235 - 1241). San José, Costa Rica.
- Wurms, S., Schröder, M., Weichert, R., & Wassermann, S. (2010). Strategies to overcome the possibly restricted utilisation of fairways due to climate changes. In Dittrich (Hrsg.), *River Flow 2010*, (S. 1647 - 1654). Braunschweig.
- Zentralkommission für die Rheinschifffahrt (2011). *Herbstsitzung 2011. Angenommene Beschlüsse*. Straßburg: ZKR.



## 11 Abkürzungen

Verkehrswasser-  
bauliche Rege-  
lungs- und  
Anpassungs-  
optionen an  
klimabedingte  
Veränderungen  
des Abfluss-  
regimes

FR	Fahrrinne
GDWS	Generaldirektion Wasserstraßen und Schifffahrt
GF	Geschiebefang
GIQ	Der Gleichwertige Abfluss ist ein definierter Abfluss an den Richtpegeln des Rheins, der im langjährigen Mittel an 10 – 20 eisfreien Tagen (je nach Pegel) unterschritten wird
GIW	Der Gleichwertige Wasserstand ist der Wasserstand, der bei als gleichwertig festgelegtem Abfluss GIQ längs einer Flussstrecke auftritt
HM7Q	Höchstes arithmetisches Mittel des Abflusses an sieben aufeinanderfolgenden Tagen
MFAC	Morphologischer Beschleunigungsfaktor
MQ	Arithmetisches Mittel des Abflusses im Bezugszeitraum
NM7Q	Niedrigstes arithmetisches Mittel des Abflusses an sieben aufeinanderfolgenden Tagen
WSA	Wasser- und Schifffahrtsamt
WSV	Wasser- und Schifffahrtsverwaltung





**Bundesanstalt für Wasserbau**  
Kompetenz für die Wasserstraßen

**Bundesanstalt für Wasserbau  
(BAW)**

Kußmaulstraße 17  
76187 Karlsruhe

[www.baw.de](http://www.baw.de)  
[info@baw.de](mailto:info@baw.de)

**Bundesamt für Seeschifffahrt  
und Hydrographie (BSH)**

Bernhard-Nocht-Straße 78  
20359 Hamburg

[www.bsh.de](http://www.bsh.de)  
[posteingang@bsh.de](mailto:posteingang@bsh.de)



**BUNDESAMT FÜR  
SEESCHIFFFAHRT  
UND  
HYDROGRAPHIE**



**Deutscher Wetterdienst (DWD)**

Frankfurter Straße 135  
63067 Offenbach/Main

[www.dwd.de](http://www.dwd.de)  
[info@dwd.de](mailto:info@dwd.de)

**Bundesanstalt für  
Gewässerkunde (BfG)**

Am Mainzer Tor 1  
56068 Koblenz

[www.bafg.de](http://www.bafg.de)  
[posteingang@bafg.de](mailto:posteingang@bafg.de)



## IMPRESSUM

### Herausgeber:

Bundesanstalt für Gewässerkunde  
KLIWAS Koordination  
Am Mainzer Tor 1  
Postfach 20 02 53  
56002 Koblenz  
Tel.: 0261 / 1306-0  
Fax: 0261 / 1306-5302  
E-Mail: [kliwas@bafg.de](mailto:kliwas@bafg.de)  
Internet: <http://www.kliwas.de>

**Redaktion:** KLIWAS-Koordination  
Bundesanstalt für Gewässerkunde

**Autoren:** Michael Schröder, Sven Wurms (BAW)

**Layout:** Christin Hantsche und Tobias Knapp,  
Bundesamt für Seeschifffahrt  
und Hydrographie - Rostock

**Druck:** Bundesanstalt für Gewässerkunde

**DOI:** 10.5675/Kliwas\_45/2014\_4.03