

HENRY

Hydraulic Engineering Repository

Ein Service der Bundesanstalt für Wasserbau

Conference Paper, Published Version

Wurms, Sven; Schröder, Paul Michael

Untersuchungen zu verkehrswasserbaulichen Anpassungsoptionen an extreme Niedrigwassersituationen

Verfügbar unter/Available at: <https://hdl.handle.net/20.500.11970/100827>

Vorgeschlagene Zitierweise/Suggested citation:

Wurms, Sven; Schröder, Paul Michael (2012): Untersuchungen zu verkehrswasserbaulichen Anpassungsoptionen an extreme Niedrigwassersituationen. In: 2. KLIWAS-Statuskonferenz 'Auswirkungen des Klimawandels auf Wasserstraßen und Schifffahrt in Deutschland', 25. und 26. Oktober 2011 BMVBS, Berlin. Bonn: Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung. S. 70-76.

Standardnutzungsbedingungen/Terms of Use:

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

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



(2009): KLIWAS – Auswirkungen des Klimawandels auf Wasserstraßen und Schifffahrt in Deutschland, Tagungsband zur 1. Statuskonferenz. 80–82.

■ NILSON, E., CARAMBIA, M., KRAHE, P., LARINA, M., BELZ, J. U. & M. PROMNY (2012): Ableitung und Anwendung von Abflussszenarien für verkehrswasserwirtschaftliche Fragestellungen am Rhein. In diesem Band.

■ PLANCO & BFG (2007): Verkehrswirtschaftlicher und ökologischer Vergleich der Verkehrsträger Straße, Schiene und Wasserstraße. Essen, Koblenz, 2007.

■ SCHOLTEN, A. & B. ROTHSTEIN (2009): Kritische Einflussgrößen für die massengutaffine Wirtschaft, In: BMVBS (2009): KLIWAS – Auswirkungen des Klimawandels auf Wasserstraßen und Schifffahrt in Deutschland, Tagungsband zur 1. Statuskonferenz. 83–87.

■ SCHOLTEN, A. & B. ROTHSTEIN (2012): Auswirkungen von Niedrigwasser und Klimawandel auf die verladende Wirtschaft, Binnenschifffahrt und Häfen entlang des Rheins – Untersuchungen zur gegenwärtigen und zukünftigen Vulnerabilität durch Niedrigwasser, Würzburger Geographische Arbeiten, Heft 107, Würzburg.

Untersuchungen zu verkehrswasserbaulichen Anpassungsoptionen an extreme Niedrigwassersituationen

Sven Wurms (BAW) & Michael Schröder (BAW)

1 Einleitung

Für die Schifffahrt ist von wesentlicher Bedeutung, welche potenziellen Auswirkungen durch den Klimawandel auf die Nutzung der Wasserstraßen zu erwarten sind. Abflussprojektionen für den Rhein als wichtigste Wasserstraße Europas, welche aus dem Forschungsprogramm „Auswirkungen des Klimawandels auf Wasserstraßen und Schifffahrt“ (KLIWAS) resultieren, deuten auf eine mögliche Verschärfung der Niedrigwasserabflüsse in der fernen Zukunft (Jahre 2071–2100) hin (NILSON et al. 2010). Durch häufigere und länger anhaltende Niedrigwasserperioden würde einerseits die maximal mögliche Abladetiefe reduziert, was unmittelbare Folgen für die Wirtschaftlichkeit des Transports per Schiff hätte. Andererseits käme es bei Wasserständen unter dem heutigen Gleichwertigen Wasserstand (GIW_{2002}) zu Breitereinschränkungen in der Fahrrinne, wodurch die Leichtigkeit und Sicherheit beeinträchtigt würde, mit der ein Binnenschiff in Engpassstellen zu navigieren vermag. Im Rahmen des KLIWAS-Projekts 4.03 „Verkehrswasserbauliche Regelungs- und Anpassungsoptionen an Klima bedingte Veränderungen des Abflussregimes“ werden daher die Eignung und Wirksamkeit verkehrswasserbaulicher Anpassungsmaßnahmen als Reaktion auf mögliche Klima bedingte hydrologische und morphologische Änderungen untersucht (HEINZELMANN & SCHMIDT 2010).

2 Analyse des heutigen Niedrigwasserausbaus unter veränderten hydrologischen Randbedingungen

Als Grundlage für mögliche Anpassungsoptionen an die Folgen des Klimawandels wird zunächst das Ausmaß der Betroffenheit der Binnenschifffahrt durch zu-

künftig möglicherweise verschärfte Niedrigwasserabflüsse exemplarisch für den Rheinabschnitt zwischen Mainz und St. Goar (Rhein-km 493,0–557,5) untersucht. Hierfür wird der heutige Zustand der Wasserstraße mit Hilfe eines hochaufgelösten, 2D-hydrodynamisch numerischen Modells unter Verwendung des Verfahrens TELEMAC-2D (HERVOUET & BATES 2000) unter veränderten hydrologischen Randbedingungen betrachtet, um so auf potenzielle zukünftige Tiefenengpässe schließen zu können.

2.1 Pilotstrecke Mainz—St. Goar

Innerhalb der Pilotstrecke befindet sich zwischen Rhein-km 508,0 und 557,0 der Abschnitt mit der geringsten im frei fließenden Rhein freigegebenen Fahrrinntiefe. Diese beträgt 1,90 m unter dem GLW_{2002} und ist damit um 0,2 m geringer als in den angrenzenden ober- bzw. unterstromigen Abschnitten. Bei niedrigen und mittleren Wasserständen werden die mögliche Abladetiefe und damit die Wirtschaftlichkeit für die durchgehende Binnenschifffahrt maßgeblich durch diesen Stromabschnitt eingeschränkt. Auf einer Länge von ca. 65 km ist der Rhein in dieser Strecke durch sehr unterschiedliche Charakteristika geprägt. Während das Bild im Rheingau von Mainz bis Bingen von einem äußerst geringen Gefälle, sehr breiten Fließquerschnitten und einer Vielzahl von Stromverzweigungen dominiert wird, schließt zwischen Bingen und St. Goar der steilste Abschnitt des frei fließenden Rheins an. Die kompakten Fließquerschnitte in dieser Teilstrecke gehen überwiegend mit steilen Uferberandungen und einer felsdurchsetzten Sohle einher.

Mögliche Klima bedingte Abflussänderungen innerhalb der Pilotstrecke fließen in Form von Bandbreiten projizierter Änderungen an den Haupt- und Nebenpegeln in die Untersuchungen ein. Um diese Bandbreiten – ein Resultat des in KLIWAS verfolgten Multimodellansatzes und somit einem zentralen methodischen Ansatz von

KLIWAS – weiter prozessieren zu können, erfolgt die Analyse des heutigen Niedrigwasserausbaus in Form einer Sensitivitätsuntersuchung unter Verwendung sukzessive reduzierter, die Bandbreite abdeckender Niedrigwasserabflüsse. So wird für den Pegel Kaub, maßgeblicher Pegel für die Binnenschifffahrt innerhalb der Pilotstrecke, eine Änderung der Niedrigwasserkenngröße $NM7Q^1$ von +10% bis –10% in der nahen Zukunft (2021–2050) projiziert. Im Gegensatz hierzu zeigen die Projektionen für die ferne Zukunft (2071–2100) eine eindeutige Tendenz mit Änderungen des $NM7Q$ von –10% bis –25% (NILSON et al. 2010). Die Analyse des heutigen Niedrigwasserausbaus erfolgt jedoch unter Verwendung des im Hinblick auf den Ausbau und die Unterhaltung der Wasserstraße relevanten GIQ anstelle des $NM7Q$. Bei dem GIQ handelt es sich um einen definierten, rheinspezifischen Niedrigwasserabfluss, welcher am Pegel Kaub mit $750 \text{ m}^3/\text{s}$ nur geringfügig unterhalb des $NM7Q$ liegt. In Anlehnung an die projizierten Abflussänderungen wird die Bandbreite der zu untersuchenden Niedrigwasserabflüsse daher auf GIQ bis $GIQ -25\%$ festgelegt.

2.2 Ergebnisse der Analyse

Wesentliche Ergebnisse der hydraulischen Analyse des heutigen Niedrigwasserausbaus sind sowohl die Lage als auch die Volumina potenzieller zukünftiger Fehlstellen, also der Bereiche innerhalb der Fahrrinne, in welchen die Fahrrinnsolltiefe aufgrund zu geringer Wassertiefen unterschritten wird. Obwohl es sich bei den gepeilten Sohlagen, welche die Grundlage der Analyse darstellen, lediglich um Momentaufnahmen des dynamischen Systems Flusssohle handelt, zeigt Abbildung 1 deutlich, dass mit einer Verschärfung der Niedrigwasserabflüsse ein nichtlinearer Anstieg der Gesamtvolumina der Fehlstellen einhergeht. Während eine moderate Reduktion des GIQ noch durch bereichsweise vorhandene Tiefenreserven innerhalb der Fahrrinne gepuff-

¹ $NM7Q$ bezeichnet das niedrigste arithmetische Mittel des Abflusses an sieben aufeinanderfolgenden Tagen (BELZ et al. 2004)

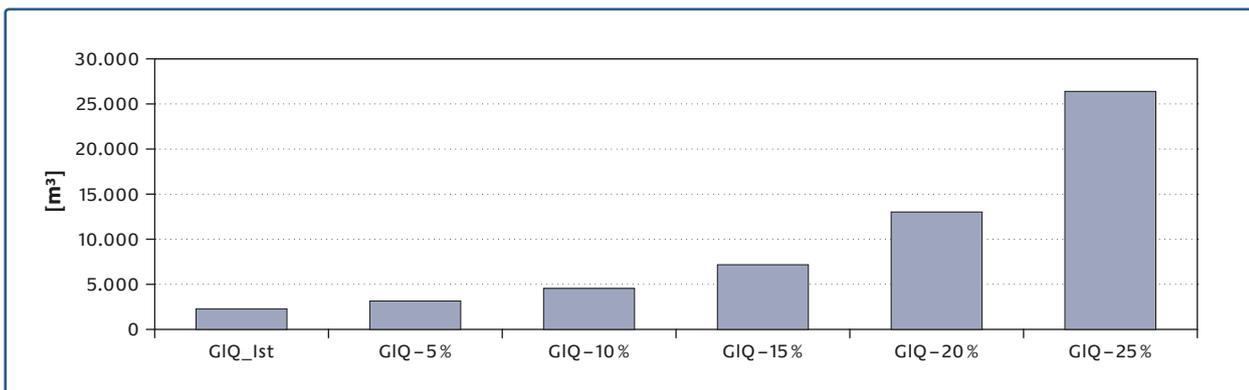


Abb. 1: Gesamtvolumen der Fehlstellen innerhalb der existierenden Fahrrinne infolge reduzierter Niedrigwasserabflüsse (Rhein-km 493,0–557,5; Sohle 2004/2006)

fert wird, treten ab einer Reduktion des GIQ um ca. 15% eine Vielzahl neuer Fehlstellen innerhalb der Fahrrinne auf (WURMS et al. 2010). Den größten Anteil am Gesamtvolumen der Fehlstellen haben die Mittelgründe, welche in Abhängigkeit der Reduktion der Niedrigwasserabflüsse mitunter über die gesamte Fahrrinnenbreite in den Fahrrinnenkasten ragen und damit eine erhebliche Beeinträchtigung für die Binnenschifffahrt darstellen.

3 Verkehrswasserbauliche Anpassungsoptionen

Wichtige Elemente zur Verbesserung der Befahrbarkeit in extremen Niedrigwasserperioden sind neben einer Anpassung des Schiffbaus und der Flottenstruktur verkehrswasserbauliche Anpassungsmaßnahmen. Generell lässt sich eine Erhöhung der Fahrwassertiefe durch unterschiedliche Maßnahmen erreichen. Eine Option stellt die Modifikation der Fahrrinne in ihrer Lage und Geometrie dar. Weiterhin lässt sich eine Verbesserung der Befahrbarkeit über den Einsatz von Regelungselementen erzielen, wobei diese entweder für eine Stützung des Wasserspiegels oder aber für die Reduzierung vorhandener Anlandungstendenzen ausgelegt werden können. Interessant sind in diesem Zusammenhang flexible, nur bei niedrigen Abflüssen wirksam werdende Regelungsmaßnahmen, da sie neben ihrer Wirkung in-

nerhalb eines definierten Abflussspektrums deutlich geringere Auswirkungen auf das Gesamtsystem Wasserstraße aufweisen als konventionelle Regelungsmaßnahmen wie z. B. Buhnen oder Leitwerke.

3.1 Anpassung der Fahrrinne

Eine Option, die Leistungsfähigkeit der Binnenschifffahrt auch bei extremen Niedrigwasserabflüssen aufrecht zu erhalten, stellt die Vertiefung der Fahrrinne auf eingeschränkter Breite unter Ausnutzung von Übertiefen dar. Hieraus resultiert auch in Niedrigwasserphasen ein durchgehendes Fahrwasser mit ausreichender Tiefe, welches zusätzlich zur existierenden Fahrrinne unterhalten wird. Lage und Mindestbreite der Vertiefung resultieren aus dem KLIWAS-Projekt 4.04 „Ermittlung von Mindestfahrrinnenbreiten für eine sichere und leichte Schifffahrt“ (WASSERMANN et al. 2010). Vorteil dieser abgestuften Vertiefung gegenüber einer Vertiefung der Fahrrinne über deren gesamte Breite ist unter anderem der zu erwartende reduzierte Unterhaltungsaufwand. Dies gilt es im Rahmen weiterer Untersuchungen unter Verwendung eines morphodynamischen Modells zu bestätigen.

Hydrodynamische Untersuchungen belegen die positive Wirkung der Vertiefung der Fahrrinne auf einge-

schränkter Breite auf eine Solltiefe von 2,10 m unter dem Wasserspiegel, welcher sich bei GIQ -25% einstellt, zuzüglich 0,1 m Baggertoleranz. Hierdurch kann im gesamten Untersuchungsbereich die Fahrwassertiefe von 2,10 m bei GIQ -25% erreicht werden, da lokal auftretende Absenkungen der Wasserspiegellagen bei genanntem Abfluss im Maximum 0,02 m betragen. In den unmittelbaren Vertiefungsbereichen treten leicht reduzierte Schubspannungen auf, wodurch die Anlandungstendenz in den zur Umsetzung der abgestuften Vertiefung erforderlichen Baggerbereichen etwas erhöht wird. Langfristig ist jedoch eine Minimierung des Unterhaltungsaufwandes anzustreben. Ergänzend zur Vertiefung der Fahrrinne, sofern diese in dynamischen Bereichen wiederkehrender Anlandungen erfolgt, ist daher unter wirtschaftlichen Aspekten der Einsatz von Regelungsbauwerken zur Erhöhung der Schubspannungen in den Vertiefungsbereichen zu untersuchen.

3.2 Regelungsmaßnahmen zur Reduzierung von Anlandungstendenzen in Tiefenengstellen

Im Falle reduzierter Niedrigwasserabflüsse sind es insbesondere die Bereiche der bereits unter heutigen Abflussbedingungen wiederkehrenden Anlandungen, in welchen Beeinträchtigungen der Schifffahrt auftreten. Zur Verbesserung dieses Umstands können entweder als alleinige Maßnahme innerhalb solcher Bereiche oder in Ergänzung zur abgestuft vertieften Fahrrinne jene Regelungsmaßnahmen beitragen, die auf eine Erhöhung der Schubspannung innerhalb der maßgeblichen Anlandungsbereiche abzielen und somit die Anlandungsraten verringern. In welchen Bereichen der Fahrrinne vor dem Hintergrund der Verkehrssicherung relevante, wiederkehrende Anlandungen auftreten, kann der Baggerhistorie eines jeden Streckenabschnitts entnommen werden. Abbildung 2 zeigt den Einsatz einer Regelungsmaßnahme zur Reduzierung der Anlandungstendenz, welche hinsichtlich ihrer Wirkungen auf die Fließtiefen

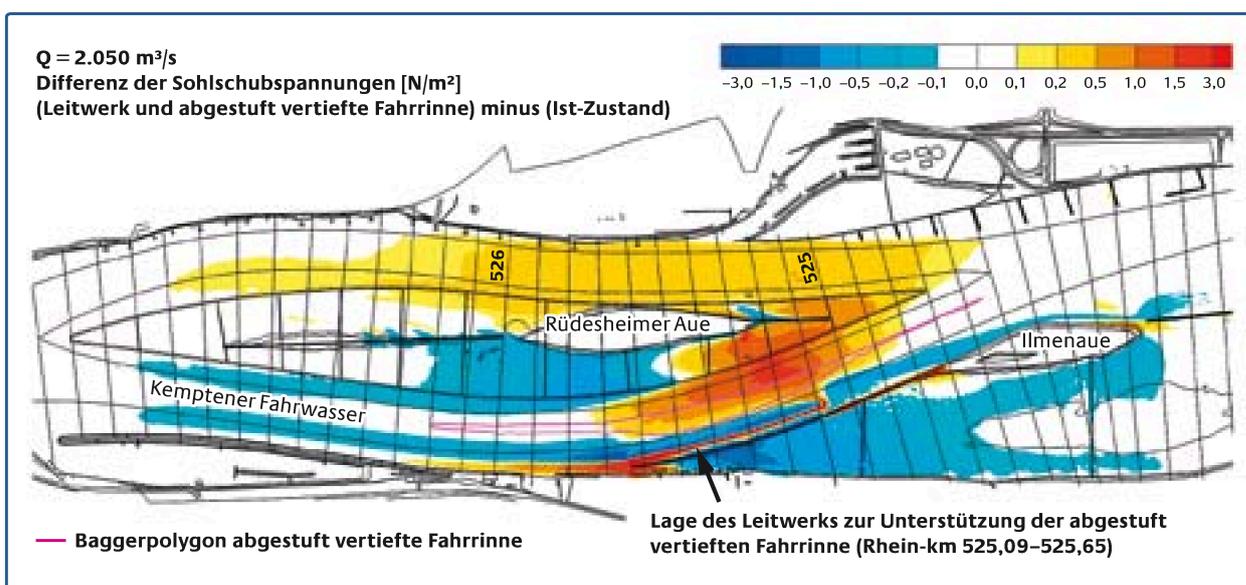


Abb. 2: Auswirkungen eines Leitwerks zur Unterstützung der abgestuft vertieften Fahrrinne auf die Sohl Schubspannungen bei bettbildendem Abfluss im Bereich Rüdeshheimer Aue

hochwasserneutral ausgeführt werden muss, exemplarisch für den Bereich des Kemptener Fahrwassers.

Als wesentliche Ursache für die Entstehung der wiederkehrenden Anlandungen zwischen Rhein-km 524,6 und 526,1 wurde die Querströmung identifiziert, welche bei Abflüssen größer als Mittelwasser bei der Überströmung des mit der Ilmenau verbundenen Längswerkes im Kemptener Fahrwasser auftritt. Durch die Querströmung wird ein Energieverlust im Kemptener Fahrwasser und dadurch ein die Sedimentationstendenz begünstigender Rückstau oberstrom der Einmündung induziert. Die Regelungsmaßnahme zur Verminderung des Querströmungseinflusses und damit einhergehend der Erhöhung der Schubspannungen im Anlandungsbereich besteht aus einem linksseitig angeordneten Leitwerk im Kemptener Fahrwasser zwischen Rhein-km 525,09 und 525,65 mit einer Kronenhöhe auf Mittelwasser-Niveau plus 0,4 m, welches dem bestehenden Leitwerk um 30 m vorgelagert ist. Eine Optimierung der Regelungsmaßnahme hinsichtlich ihrer morphologischen Auswirkungen hat im Rahmen anschließender morphodynamischer Simulationen zu erfolgen.

3.3 Flexible, temporär wirkende Regelungsmaßnahmen zur Stützung des Wasserspiegels

Fahrwassertiefe lässt sich weiterhin über den Einbau von Regelungsmaßnahmen gewinnen. Konventionelle, statische Regelungsbauwerke wie Buhnen oder Leitwerke kommen dann in Frage, wenn durch sie weder eine Erhöhung der Wasserspiegellagen bei Hochwasserabflüssen induziert, noch die Schifffahrt behindert wird. Sollte dies nicht der Fall sein, so könnten flexible Regelungselemente in den genannten Situationen Abhilfe schaffen. Deren Wirkung entfaltet sich lediglich in einem begrenzten Abflussspektrum, im konkreten Fall z. B. während der temporären Stützung des Wasserspiegels in Niedrigwasserperioden. Ein deutlicher Vorteil flexibler, temporär wirkender gegenüber statischer Regelungsmaßnahmen wäre, dass die Morphodynamik im Umfeld der Regelungsmaßnahme durch die auf Niedrigwasserabflüsse begrenzte Wirkung nur gering-

fügig beeinflusst würde. Nachfolgend soll exemplarisch das Regelungspotential einer auf spezifische Abflussbedingungen zielenden Regelungsmaßnahme aufgezeigt werden, ohne jedoch genauer auf deren konstruktive Umsetzung einzugehen.

Sind Streckenabschnitte, welche unter reduzierten Niedrigwasserabflussbedingungen Fehltiefen innerhalb der Fahrrinne aufweisen, oberstrom einer Stromverzweigung lokalisiert, so bietet sich zur Stützung der Wasserspiegellagen aus hydraulischer Sicht die temporäre Abtrennung des Seitenarmes der Verzweigung an. Abbildung 3 zeigt beispielhaft für den Bereich des Bacharacher Werths den Anstieg des Wasserspiegels infolge einer vollständigen Absperrung des Seitenarmes (Kauber Wasser) bei extremem Niedrigwasserabfluss (GIQ –25%). Durch die Absperrung des Seitenarms könnte ein maximaler Tiefengewinn in der Fahrrinne von bis zu 0,3 m und von etwa 0,14 m noch 1,4 km stromauf, im Bereich eines unter Niedrigwasserhältnissen maßgeblichen Tiefenengpasses, erzielt werden. Zur Feststellung der konstruktiven Machbarkeit solch eines gegebenenfalls nur bei entsprechenden Niedrigwassersituationen wirksam werdenden Absperrbauwerks bedarf es jedoch weitergehender grundsätzlicher Untersuchungen.

4 Zusammenfassung und Ausblick

Die vorliegenden Projektionen zur möglichen Abflussentwicklung als Folge klimatischer Veränderungen weisen auf eine potenzielle Verschärfung der Niedrigwassersituationen in der fernen Zukunft (2071–2100) hin. Als Konsequenz hieraus wäre eine verkehrswasserbauliche Anpassung erforderlich, um auch zukünftig die Leichtigkeit und Sicherheit der Schifffahrt in Niedrigwasserperioden gewährleisten zu können.

Obgleich die Pilotstrecke als Folge mehrerer Ausbauphasen in der Vergangenheit bereits nahezu über die gesamte Länge flussbaulich geregelt ist, besteht dennoch ein wasserbauliches Potenzial zur Anpassung der Schifffahrtsverhältnisse an zukünftige hydrologische und morphologische Änderungen. Unter rein technischen

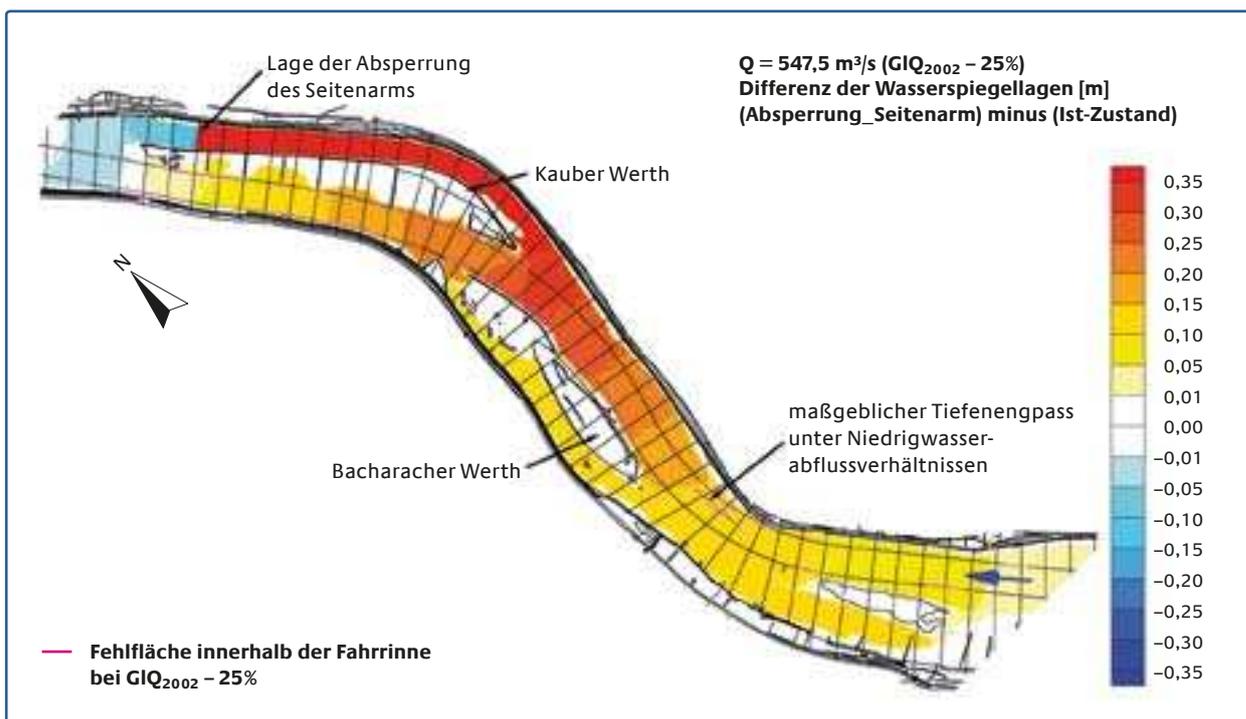


Abb. 3: Wirkung einer vollständigen Absperrung des Seitenarms einer Stromverzweigung auf die Wasserspiegellage bei extremem Niedrigwasserabfluss

Aspekten stellt eine auf reduzierter Breite vertiefte Fahr- rinne eine geeignete Maßnahme dar, um ausreichende Fahrwassertiefen zu erzielen. Ein Vorteil dieser Vorge- hensweise gegenüber einer Vertiefung der Fahrrinne auf ihrer gesamten Breite ist der zu erwartende redu- zierte Unterhaltungsaufwand.

Eine Verbesserung der Fahrwasserverhältnisse in Be- reichen ständig wiederkehrender Anlandungen kann – mit oder ohne Vertiefung der Fahrrinne auf einge- schränkter Breite – durch Regelungsmaßnahmen er- reicht werden, welche auf die Erhöhung der Schubspan- nungen in den Anlandungsbereichen und damit eine Verringerung der Anlandungsraten abzielen.

Ein nicht zu vernachlässigendes Potenzial zur Erhö- hung der Wasserspiegellagen bei Niedrigwasserabflüs- sen weisen flexible, nur bei diesen Abflüssen wirksam werdende Regelungselemente auf. Insbesondere unter

konstruktiven Aspekten besteht in diesem Zusammen- hang jedoch noch erheblicher Untersuchungsbedarf.

Hinsichtlich der Umsetzung der hier beschriebenen verkehrswasserbaulichen Anpassungsmaßnahmen in anderen Streckenbereichen deutscher Wasserstraßen sind aufgrund der ortsspezifischen Charakteristika der Pilotstrecke sicherlich nicht alle genannten Maßnah- men als grundsätzlich zielführend anzusehen. Hierfür sind weitere, auf die Gegebenheiten der jeweiligen Stre- cke zugeschnittene Untersuchungen erforderlich, wel- che in ihrer Gesamtheit jedoch nicht innerhalb der Pro- jektlaufzeit durchführbar sind.

Literatur

- BELZ, J. U., ENGEL, H. & P. KRAHE (2004): Das Niedrigwasser 2003 in Deutschlands Stromgebieten. *Hydrologie und Wasserbewirtschaftung* 48., H. 4., S. 162–169, 2004.
- HEINZELMANN, C. & A. SCHMIDT (2010): Verkehrswasserbau im Zeichen des Klimawandels. *Dresdner Wasserbauliche Mitteilungen* Heft 40, S. 3–13, 2010.
- HERVOUET, J. A. & P. BATES (ED.) (2000): The Telemac Modelling System. *Special Issue of Hydrological Processes*, Volume 14, Issue 13, 2207–2363, 2000.
- NILSON, E., CARAMBIA, M. & P. KRAHE (2010): Low Flow Changes in the Rhine River Basin. In: Görgen, K. et al.: *Assessment of climate change impacts on discharge in the Rhine River Basin: Results of the Rhein-Blick2050 Project*. CHR Report No. I-23, pp. 115–119, 2010. Download: http://www.chr-khr.org/files/CHR_I-23.pdf.
- WASSERMANN, S., SÖHNGEN, B., DETTMANN, T. & C. HEINZELMANN (2010): Investigations to define Minimum Fairway Widths for Inland Navigation Channels. 32. PIANC Congress, Liverpool, Großbritannien, 2010.
- WURMS, S., SCHRÖDER, P. M., WEICHERT, R. B. & S. WASSERMANN (2010): Strategies to Overcome the Possibly Restricted Utilisation of Fairways due to Climate Changes. *River Flow 2010*, Braunschweig, 2010.

Ermittlung von Fahrrinnenmindestbreiten durch Naturuntersuchungen

Bernhard Söhngen (BAW) & Lucia Hahne (BAW)

1 Einleitung

Jüngste Studien zum Einfluss des Klimawandels auf die zukünftigen Bedingungen für die Schifffahrt auf dem Rhein lassen für die ferne Zukunft (2071 bis 2100) längere und intensivere Phasen mit extremen Niedrigwasser erwarten (siehe NILSON et al. in diesem Band). Eine mögliche Anpassungsmaßnahme, um die durch verringerte Abladetiefen entstehenden wirtschaftlichen Einbußen aufzufangen, könnte eine ca. 2 dm tiefere Unterhaltung der heutigen Fahrrinne im Bereich zwischen Mainz und St. Goar sein. Das vorliegende Projekt untersucht entsprechende Anpassungsoptionen aus fahrdynamischer Sicht. Da deren Grenzen- und Möglichkeiten stark von den Fahrrinnenabmessungen abhängen, ermittelt das vorgestellte Projekt die minimalen Fahrrinnenbreiten für eine sichere und leichte Schifffahrt. Eine der derzeit untersuchten Anpassungsoptionen ist eine abgestufte Fahrrinne mit einer größeren Tiefe auf der ermittelten Mindestbreite. Durch die Ausnutzung der vorhandenen Übertiefen im Rahmen der nautischen Möglichkeiten heutiger Schiffe und durch die Begrenzung auf Mindestbreiten, könnten bei dieser Anpassungsoption die Kosten für die Tiefenunterhaltung gegenüber den Kosten für die Vertiefung auf der heutigen vollen Breite deutlich verringert werden.

Die Mindestbreiten werden mit Hilfe eines fahrdynamischen Modells bestimmt, das zunächst um die Instabilität des Schiffsfadens, die verminderte Ruderwirkung bei geringen Wassertiefen, um moderne Steuereinrichtungen, Autopiloten und verbesserte Informationssysteme auf zukünftigen Schiffen ergänzt wurde. Der Einfluss von menschlichen Fähigkeiten und einer evtl. Häufung von Fahrfehlern aufgrund der erhöhten Anforderungen an den Schiffsführer unter Engpassbedingungen soll durch die Implementierung eines „human fac-