



**Untersuchung wasserbaulicher und wasserwirtschaftlicher
Optionen zur Sicherstellung zuverlässig kalkulierbarer
Transportbedingungen am Rhein bei Niedrigwasser**

Auftragsnummer BfG: M39610204073

Auftragsnummer BAW: B3953.02.06.10197

Untersuchung wasserbaulicher und wasserwirtschaftlicher Optionen zur Sicherstellung zuverlässig kalkulierbarer Transportbedingungen am Rhein bei Niedrigwasser

Auftraggeber: Generaldirektion Wasserstraßen und Schifffahrt

Auftrag vom: 10.06.2021, Az.: 3800W21-233.03/3900/014-003000/2

Auftrags-Nr.: BfG: M39610204073
BAW: B3953.02.06.10197

Aufgestellt von: Bundesanstalt für Gewässerkunde
Abteilung: Quantitative Gewässerkunde
Referate: Wasserhaushalt, Vorhersagen, Prognosen (M2)
Hydrometrie, Gewässerkundl. Begutachtung (M1)
Bearbeitung: Dr.-Ing. Anna-Dorothea Ebner von Eschenbach,
Dr.-Ing. Martin Helms, Dr.-Ing. Thomas Maurer,
Dr. Enno Nilson

Bundesanstalt für Wasserbau
Abteilung: Wasserbau im Binnenbereich (W)
Referate: Flussbau (W2), Schifffahrt (W4)
Bearbeitung: Dr. Martin Hämmerle, Dr.-Ing. Sven Wurms,
Dipl.-Ing. Andreas Orlovius

Koblenz und Karlsruhe, 09.09.2022

Der Bericht darf nur ungekürzt vervielfältigt werden. Die Vervielfältigung und eine Veröffentlichung bedürfen der schriftlichen Genehmigung von BfG und BAW.

Zusammenfassung

Die vorliegende Synthese¹ widmet sich der Frage, ob und inwieweit die für die Schifffahrt negativen Auswirkungen in einer – in Ausprägung und Charakteristik – dem Niedrigwasserereignis 2018 ähnlichen hydrologischen Situation auf dem Rhein durch wasserbauliche und wasserwirtschaftliche Optionen vermieden bzw. reduziert werden können. Sie liefert aufgrund ihres abstrakten Charakters Potenzialabschätzungen, jedoch keine konkreten Hinweise auf einzelne Maßnahmen mit ihren Wirksamkeiten und ihren Umsetzbarkeiten.

Zentrale Erkenntnisse:

- Sowohl mit wasserbaulichen als auch mit wasserwirtschaftlichen Optionen hätten unter den hydrologischen Rahmenbedingungen des Niedrigwasserjahres 2018 Verbesserungen in der Befahrbarkeit des Rheins von Iffezheim bis Emmerich erreicht werden können.
- Die wasserwirtschaftlichen Optionen würden sich bei ausreichender Wasserverfügbarkeit episodisch auswirken und könnten ereignisbezogen gesteuert werden. Dagegen wären die wasserbaulichen Optionen dauerhaft wirksam und würden einen schifffahrtlichen Nutzen auch über extreme Niedrigwasserbedingungen hinaus erzeugen.
- Eine durchgehende Aufhöhung auf den derzeit gültigen gleichwertigen Abfluss wäre mit den untersuchten wasserwirtschaftlichen Optionen im Jahr 2018 nicht möglich gewesen. Allerdings zeigt sich, dass mit einem gezielten Einsatz von etwas mehr als 5 % des Volumens der betrachteten wasserwirtschaftlichen Optionen im Niedrigwasserjahr 2018 zeitlich unterbrechungsfrei ein Abfluss hätte gehalten werden können, bei dem die an den jeweiligen Flussabschnitten gängigen Schiffstypen zumindest grundsätzlich² hätten verkehren können.
- Die berücksichtigten wasserwirtschaftlichen Optionen befinden sich überwiegend in den Einzugsgebieten der Rheinzuflüsse. Sie wirken systemweit innerhalb des unterstrom gelegenen Teils des Einzugsgebietes des Rheins und dienen überwiegend anderen Nutzungsinteressen (Energieerzeugung, Hochwasserschutz, Trinkwasserbereitstellung, Freizeit und Erholung) als der Niedrigwasseraufhöhung. Die Zuständigkeit für die wasserwirtschaftlichen Optionen liegt i. d. R. nicht auf Bundesseite.
- Die untersuchten wasserbaulichen Optionen, die ausschließlich im Flusslauf des Rheins umgesetzt würden, wirken primär lokal und wären mit Nutzungsinteressen vor Ort in Einklang zu bringen.

Insgesamt ist davon auszugehen, dass durch – im Rahmen der hier vorgestellten Studien noch nicht untersuchte – Kombinationen wasserwirtschaftlicher, wasserbaulicher und ggf. weiterer (z. B. schiffstechnischer) Optionen die Resilienz des Verkehrsträgers Wasserstraße Rhein insgesamt stärker erhöht werden könnte als durch einzelne Optionen. Hierbei geht es nicht nur um

¹ Die Synthese fasst die Erkenntnisse der beiden separat, jedoch in enger Abstimmung durchgeführten Studien zu den wasserbaulichen (Bundesanstalt für Wasserbau 2022) und wasserwirtschaftlichen Optionen (Bundesanstalt für Gewässerkunde 2022) zusammen.

² mit jeweiligem Mindesttiefgang zzgl. Sicherheitszuschlägen.

eine (ggf. noch im Detail auszuarbeitende) summarische Betrachtung der vorteilhaften Wirkungen der einzelnen Optionen, sondern auch um deren ausgewogenere und flexiblere Gestaltung mit Blick auf die vielfältigen Nutzungsanforderungen an die Ressource Wasser und die vielfältigen Funktionen der großen Flüsse in Deutschland.

Die Kernaussagen mit spezifisch wasserbaulichem oder wasserwirtschaftlichem Bezug finden sich im Anhang A.1 zur Abschätzung des Potenzials wasserwirtschaftlicher Optionen (Seite 11 ff.) und im Anhang A.2 zur Abschätzung des Potenzials wasserbaulicher Optionen (Seite 17 ff.).

Inhaltsverzeichnis		Seite
1	Veranlassung	1
2	Synthese	2
2.1	Methodische Ansätze	2
2.2	Hydrologische Defizitvolumina und schiffahrtliche Engpässe	3
2.3	Verbesserung der schiffahrtlichen Bedingungen durch wasserwirtschaftliche und wasserbauliche Optionen	4
2.4	Schlussfolgerungen	8
3	Literatur	10
Anhang – Vorgehen bei den Einzeluntersuchungen		11
A.1 Abschätzung des Potenzials wasserwirtschaftlicher Optionen		11
A.2 Abschätzung des Potenzials wasserbaulicher Optionen		17

Bildverzeichnis	Seite
Bild 1: Schematische Darstellung der Herangehensweisen zur Abschätzung der Wirkung extrem geringer Abflüsse. a) hydrologische Perspektive: Defizitvolumina, b) wasserbauliche Perspektive: Fehlstellen und ggf. daraus folgende schiffahrtliche Engpässe.	4
Bild 2: Wasserwirtschaftliche und wasserbauliche Optionen zur Entschärfung für die Schifffahrt negativer Auswirkungen von extremen Niedrigwassersituationen mit Abflüssen und einer Dauer wie im Jahr 2018. Mit einem rein rechnerischen Einsatz von 5 % des Gesamtvolumens von wasserwirtschaftlichen Optionen und spezifischen wasserbaulichen Optionen könnten schiffahrtliche Engpässe bereits substanziell entschärft werden.	7
Bild 3: Schematische Darstellung der Wirkungsmechanismen wasserwirtschaftlicher und wasserbaulicher Optionen.	8
Bild 4: Rechnerisch verfügbare bewirtschaftbare Wasservolumina der Talsperren und Speicherseen sowie der Flussstauhaltenungen bei Mittelwasser im Rheineinzugsgebiet mit angenommener Verfügbarkeit von 5 %, 10 %, 20 % bzw. 30 % des theoretisch verfügbaren bewirtschaftbaren Gesamtvolumens	12
Bild 5: Vergleich der rot beschrifteten schwellenwertbezogenen Defizitvolumina (2018) an den Pegeln Maxau, Kaub und Duisburg-Ruhrort mit den angenommenen bewirtschaftbaren Anteilen von 5 % bis 30 % der in den jeweiligen Pegelinzugsgebieten rein theoretisch verfügbaren Volumina von Talsperren und Speicherseen (TSV) und Flussstauhaltenungen bei Mittelwasser (SSV). Für die Schifffahrt werden minimale Tiefgänge zugrunde gelegt, bei der noch nennenswerte Ladung transportiert werden kann.	16
Bild 6: Beispiel für die räumliche Verteilung von Fehlstellen in einem Engpass. Zugrunde liegt ein extrem geringer Abfluss von GIQ – 30 %. Die Fehlstellen mit einer potentiellen Abladetiefe unter 1,60 m (gelb) treten im Engpassbereich häufig auf über 50 % der Fahrrinnenbreite auf, die Fehlstellen mit einer potentiellen Abladetiefe unter 1,35 m (grün) treten nur bei Rh-km 386,7 und 386,8 auf über 50 % der Fahrrinnenbreite auf. Die seitliche Fahrrinnenbegrenzung ist mit dunkelblauen Linien dargestellt, die Übersichtskarte links oben erlaubt die Einordnung des Engpassbereichs im Flussverlauf.	20
Bild 7: Grafische Zusammenfassung der 16 im Untersuchungsgebiet identifizierten schiffahrtlichen Engpässe bei einem dem Ereignis 2018 vergleichbaren Niedrigwasserabfluss (oberer Teil der Abbildung) sowie der engpassspezifischen, potenziell zielführenden flussbaulichen Optionen (mittlerer Teil der Abbildung). Unterer Teil der Abbildung: Erläuterungen.	24

Tabellenverzeichnis	Seite
Tabelle 1: Abschätzung der räumlichen Reichweite des bewirtschaftbaren Volumens und Zuordnung der identifizierten schiffahrtlichen Engpässe bei extremem Niedrigwasser zu den betrachteten Pegelbereichen.	5
Tabelle 2: Übersicht der betrachteten wasserbaulichen Optionen zur Erhöhung der Wassertiefen unter extremen Niedrigwasserabflussbedingungen.	22

1 Veranlassung

Das Rhein-Niedrigwasser des Jahres 2018 trat nicht zuletzt aufgrund der starken ökonomischen Auswirkungen medial und politisch stark in den Vordergrund. Als Reaktion auf dieses Ereignis wurde im Sommer 2019 der Aktionsplan „Niedrigwasser Rhein“ initiiert, eine gemeinsame Vereinbarung zwischen dem Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMVI, seit 12/2021 Bundesministerium für Digitales und Verkehr, BMDV) und Vertretern großer Industrieunternehmen im Rheineinzugsgebiet sowie des Binnenschiffahrtsgewerbes. Ziel dieses Plans ist es einerseits, die Dringlichkeit des Themas zu unterstreichen, sowie andererseits das Wissen über bestehende Reaktionsmöglichkeiten zu bündeln bzw. weiterzuentwickeln und neue Adaptionsoptionen zu evaluieren.

Die Bundesanstalten für Wasserbau (BAW) und Gewässerkunde (BfG) wurden gemäß Handlungspunkt 7 „Wasserbauliche und wasserwirtschaftliche Optionen“ (Handlungsfeld „Langfristige Lösungsansätze“) am 10.6.2021 zu Untersuchungen wasserbaulicher und wasserwirtschaftlicher Optionen zur Sicherstellung zuverlässig kalkulierbarer Transportbedingungen am Rhein bei Niedrigwasser beauftragt, wobei Klimawandelszenarien und Maßnahmen zur Abladeoptimierung am Mittel- und Niederrhein nicht einzubeziehen waren. Eine Untersuchung der Option „Errichtung von Staustufen“ war nicht vorgesehen. Im Zuge der Betrachtung wasserwirtschaftlicher Optionen war das Thema Bodenseeregulierung durch die BfG ausschließlich im Rahmen einer Auswertung der bislang hierzu veröffentlichten Literatur zu behandeln.

Der vorliegende Synthesebericht führt die separat, jedoch in enger Abstimmung durchgeführten Untersuchungen der Bundesanstalten zu den wasserbaulichen (BAW) und wasserwirtschaftlichen (BfG) Optionen zusammen.

Das Ziel der Untersuchungen war es, das Potenzial sowohl wasserbaulicher Optionen im Rhein zwischen Iffezheim und Emmerich als auch wasserwirtschaftlicher Optionen im internationalen Rheineinzugsgebiet zur Reduzierung der negativen Auswirkungen einer dem Ereignis 2018 vergleichbaren extremen Niedrigwassersituation auf den Rhein in seiner Wasserstraßenfunktion zu ermitteln. Die Untersuchungen waren laut Auftrag auf abstrakter Ebene, d. h. im Sinne einer überschlägigen Betrachtung durchzuführen. Nutzungskonkurrenzen wurden nicht berücksichtigt.

2 Synthese

Mit der vorliegenden Synthese werden, ausgehend von den abstrakten Untersuchungen zum Potenzial wasserbaulicher und wasserwirtschaftlicher Optionen zur Verbesserung der schifffahrtlichen Bedingungen auf dem Rhein bei extremen Niedrigwasserbedingungen, die Gemeinsamkeiten und Unterschiede der beiden Bearbeitungsstränge skizziert. Die überschlägig ermittelten Ergebnisse werden einander gegenübergestellt und darauf aufbauend übergeordnete Schlussfolgerungen gezogen.

Beide Untersuchungsstränge (wasserwirtschaftliche Optionen, Zusammenfassung in Anhang A.1; wasserbauliche Optionen, Zusammenfassung in Anhang A.2) erfolgten auf abstrakter Ebene und liefern Potenzialabschätzungen. Konkrete Maßnahmenplanungen wurden auf diesem Betrachtungsniveau nicht durchgeführt.

2.1 Methodische Ansätze

Die Untersuchungen zu den wasserbaulichen und wasserwirtschaftlichen Optionen basieren auf der gleichen hydrologischen Ausgangssituation und den gleichen grundsätzlichen Zielen. Sie sind in ihrer jeweils fachlich begründeten Herangehensweise jedoch unterschiedlich, so dass sich auf der bewusst gewählten Abstraktionsebene nicht alle Ergebnisse quantitativ und vollständig komplementär in Beziehung setzen lassen.

Hydrologische Grundlage der Untersuchungen zu den wasserbaulichen und wasserwirtschaftlichen Optionen ist das Wasserhaushaltsjahr 2018³. Dieses auch aufgrund seiner ungewöhnlich langen Dauer extreme Niedrigwasserjahr hat alle betrachteten Rheinabschnitte hinsichtlich des zeitlichen Verlaufs und der Intensität in ähnlicher Weise betroffen. Es ist zudem gut dokumentiert und somit ein geeignetes Referenzjahr für die durchgeführten Untersuchungen.

Untersucht wurden schifffahrtliche Engpässe, die unter den Bedingungen des Jahres 2018 mit extrem niedrigen Abflüssen von bis zu 30 % unter dem heutigen gleichwertigen Abfluss GlQ (GlQ - 30 %) bestanden haben. Davon ausgehend wurden wasserbauliche und wasserwirtschaftliche Optionen hinsichtlich ihres Potenzials zur Erhöhung der nautisch nutzbaren Wassertiefen evaluiert, um eine signifikante und kontinuierliche Verbesserung der Schifffahrtsverhältnisse bei extremen Niedrigwasserereignissen zu erreichen. Dies erfolgte einerseits durch eine angenommene Bereitstellung von Wassermengen aus bewirtschaftbaren Speichern im Einzugsgebiet, um den Abfluss auf pegelweise ausgewählte Schwellenwerte aufzuheben (wasserwirtschaftliche Optionen zum Ausgleich von Defizitvolumina bzgl. GlQ, GlQ - 10 %, GlQ - 20 %, GlQ - 30 %).

³ Das Wasserhaushaltsjahr 2018 beginnt am 01.04.2018 und endet am 31.03.2019.

Andererseits wurde untersucht, welche wasserbaulichen Optionen das größte Potenzial zur Verbesserung der schiffahrtlichen Verhältnisse an den Engpässen unter extremen Niedrigwasserbedingungen (GIQ – 30 %) haben. Betrachtet wurden im Wesentlichen Optionen zur Stützung der Wasserspiegellagen und zu Sohlabtrag.

2.2 Hydrologische Defizitvolumina und schiffahrtliche Engpässe

Die Vorgehensweisen bei den Untersuchungen pegelbezogener hydrologischer Defizitvolumina und schiffahrtlicher Engpässe bei extremen Niedrigwasserabflüssen sind in Bild 1 illustriert und werden nachfolgend erläutert.

Für die Abschätzung des Potenzials wasserwirtschaftlicher Optionen wurden pegelbezogen zunächst die Volumina ermittelt, die für das Niedrigwasserereignis im Wasserhaushaltsjahr 2018 zusätzlich erforderlich gewesen wären, um den Abfluss über die Dauer des Niedrigwasserereignisses auf die definierten Abflussschwellenwerte GIQ – 30 %, GIQ – 20 %, GIQ – 10 % bzw. GIQ aufzuheben (Defizitvolumina, Bild 1 a). Bei den wasserwirtschaftlichen Analysen wurden ergänzend dazu Aufhöhungsziele für eine Reihe von Schiffstypen und ihre jeweiligen Tiefenansprüche untersucht. Die Mindesttiefgänge dieser Schiffstypen wurden wiederum bei der Untersuchung der wasserbaulichen Optionen als Schwellenwerte herangezogen, um Fehltiefen und ggf. daraus folgende schiffahrtliche Engpässe in der Strecke zu identifizieren. Schiffahrtliche Engpässe treten gemäß Definition in dieser Untersuchung auf, wenn Fehltiefen bei den oben angeführten Niedrigwasserabflüssen auf mehr als 50 % der Fahrrinnenbreite festgestellt wurden (Bild 1 b). Dem liegt die Annahme zugrunde, dass einspuriger Begegnungsverkehr unter Beteiligung der für den untersuchten Fall maßgebenden Fahrzeuge auf einem Großteil der Strecke auf etwa 50 % der Fahrrinnenbreite noch stattfinden kann, wenn auch gegebenenfalls mit eingeschränkter Leichtigkeit.

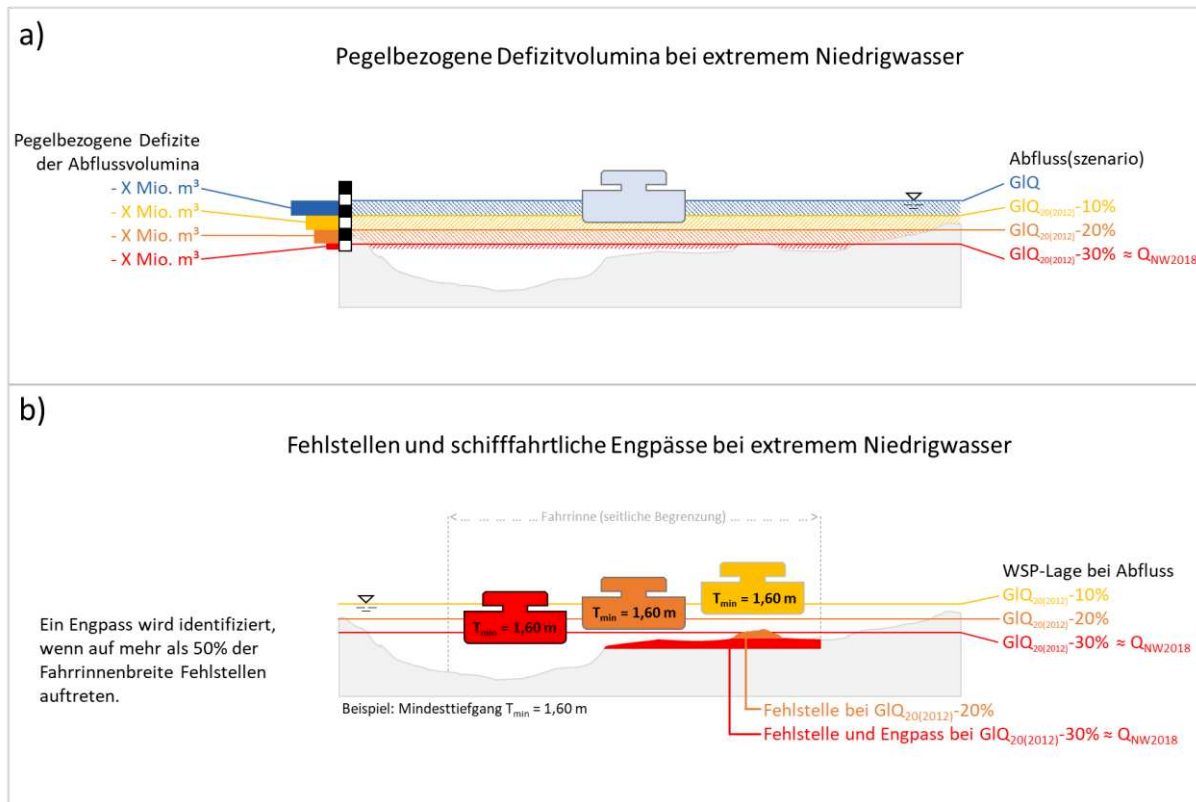


Bild 1: Schematische Darstellung der Herangehensweisen zur Abschätzung der Wirkung extrem geringer Abflüsse. a) hydrologische Perspektive: Defizitvolumina, b) wasserbauliche Perspektive: Fehlstellen und ggf. daraus folgende schiffahrtliche Engpässe.

2.3 Verbesserung der schiffahrtlichen Bedingungen durch wasserwirtschaftliche und wasserbauliche Optionen

Als wasserwirtschaftliche Option wurde – rein rechnerisch und vereinfacht – eine stärker auf die Niedrigwasseraufhöhung im Rhein ausgelegte Nutzung von Wasserspeichern im internationalen Rheineinzugsgebiet betrachtet. Die gesamten Wasservolumina wurden durch Summation der Volumina von Talsperren, Speicherseen und Flusstauhaltungen bis zum betrachteten Flussquerschnitt (Pegel) berechnet, ohne dabei die Vorhersage- und Steuerungsproblematik zu berücksichtigen. Dieses bewirtschaftbare Volumen wurde den pegelbezogenen⁴ Defizitvolumina im Rhein gegenübergestellt, die sich im Jahr 2018 durch Unterschreitung von verschiedenen niedrigen, aus Sicht der Wasserstraßen- und Schifffahrtsverwaltung relevanten Schwellenwerte ergeben haben. Zu beachten ist, dass die Zuständigkeit für wasserwirtschaftliche Optionen i. d. R. nicht auf Bundesseite liegt.

Die wasserbaulichen Optionen haben das Ziel, bei extremem Niedrigwasser durch Stützung der Wasserspiegellagen und/oder Sohlabtrag im Bereich des Engpasses Wassertiefe zu gewinnen und so Fehltiefen, die beim betrachteten Mindesttieftgang zum Engpass führen, zu verringern oder zu

⁴ Pegel: Maxau, Kaub und Duisburg-Ruhrort

beheben. Für alle identifizierten Engpässe konnte eine Auswahl potenziell zielführender Optionen zusammengestellt werden.

Die wasserwirtschaftlichen Untersuchungen beziehen sich auf volumenbezogene Vergleiche des Abflussdefizits unter einem Schwellenwert an einem schiffahrtlich relevanten Pegel (Defizitvolumen) mit dem bewirtschaftbaren Volumen von Wasserspeichern im Pegelinzugsgebiet. Dagegen basieren die wasserbaulichen Analysen der Wassertiefen innerhalb der Fahrrinne auf der gesamten Strecke auf räumlich hochauflösenden Daten des Flussbetts. Um die Ergebnisse räumlich zueinander in Bezug zu setzen, wurden die in den wasserbaulichen Analysen identifizierten, schiffahrtlich relevanten Engpässe bei extremem Niedrigwasser den schiffahrtlich relevanten Pegeln zugeordnet (Tabelle 1). Diese Zuordnung berücksichtigt die angenommene Wirksamkeit des pegelbezogenen bewirtschaftbaren Volumens der Talsperren, Speicherseen und Flusstauhaltungen nach ober- und unterstrom (siehe Beispiele in den Erläuterungen zur Tabelle 1).

Tabelle 1: Abschätzung der räumlichen Reichweite des bewirtschaftbaren Volumens und Zuordnung der identifizierten schiffahrtlichen Engpässe bei extremem Niedrigwasser zu den betrachteten Pegelbereichen.

Pegel	Abschätzung der räumlichen Reichweite des bewirtschaftbaren Volumens	Zugeordnete schiffahrtliche Engpässe
Maxau	Iffezheim bis oberhalb der Einmündung des Neckars	Hagenbacher Grund Sondernheim Germersheim Oberhausen-Rheinhausen MA-LU-Stadtstrecke
Kaub	Einmündung des Neckars bis oberhalb der Einmündung der Lahn	Eisenbahnbrücke Worms ^[1] Biblis ^[1] Kemptener Fahrwasser Binger-Loch-Strecke Assmannshausen-Clemensgrund Lorcher Werth Lorch-Lorchhauser Grund Kauber Werth Tauber Werth-Geisenrücken Loreley
Duisburg-Ruhrort	unterhalb der Loreley bis unterhalb der Ruhrmündung	Deutzer Platte ^[2]

[1] Die pegelbezogene Zuordnung zu den Engstellen Eisenbahnbrücke Worms und Biblis ist im relativen Vergleich als kritischer als an den anderen Engpässen einzuschätzen, da das bewirtschaftbare Volumen am Pegel Kaub auch die Volumina der Speicher in den drei Teil-Einzugsgebieten von Neckar, Main und Nahe einbezieht, von denen für diese beiden Engstellen nur die vergleichsweise geringen Volumina aus dem Neckar-Einzugsgebiet wirksam werden.

[2] Es steht an dieser Stelle nicht das vollständig bewirtschaftbare Wasservolumen entsprechend der abgestuften prozentualen Annahme zur Verfügung, das für den Pegel Duisburg-Ruhrort abgeleitet wurde. Demzufolge wird dieser Pegel-Streckenbezug als kritisch eingeschätzt. Das bewirtschaftbare Volumen am Pegel Duisburg-Ruhrort steht ausschließlich an diesem Pegel vollständig zur Verfügung.

Bild 2 stellt die zentralen Ergebnisse aus den Untersuchungen zu wasserwirtschaftlichen und wasserbaulichen Optionen gegenüber und bildet damit eine Grundlage für Überlegungen zur Verknüpfung der jeweiligen Optionen.

Es zeigt sich, dass mit einem gezielten Einsatz von etwas mehr als 5 % des Volumens der betrachteten wasserwirtschaftlichen Optionen an allen drei betrachteten Rheinabschnitten⁵ im Niedrigwasserjahr 2018 zeitlich unterbrechungsfrei ein Abfluss hätte gehalten werden können, bei dem die an den jeweiligen Flussabschnitten gängigen Schiffstypen zumindest grundsätzlich⁶ hätten verkehren können. Für den Ober- und den Mittelrhein (Bezugspegel Maxau und Kaub) gilt dies bei einem Abfluss im Bereich von GlQ – 20%, im unmittelbaren Umfeld des Pegels Duisburg-Ruhrort bereits bei geringeren Abflusswerten.

Für jeden der identifizierten Engpässe konnte eine Auswahl wasserbaulicher Optionen entwickelt werden, die potenziell zu verbesserten schiffahrtlichen Bedingungen bei extremem Niedrigwasser (GlQ – 30 %) führen und dauerhaft wirksam sind (unterer Teil in Bild 2). Unter dem Gesichtspunkt der Eingriffsminimierung bietet sich insbesondere die vertiefte Untersuchung der innovativen Option *Niedrigwasserkorridor* an. Dieser zielt auf die Nutzung vorhandener, nautisch nutzbarer Übertiefen in Kombination mit zusätzlichen, baulich hergestellten Tiefen und Breiten ab. Im Niedrigwasserkorridor könnten die schiffahrtlichen Bedingungen bei extrem geringen Abflüssen, ggf. mit reduzierter Leichtigkeit der Schifffahrt, verbessert werden. Gleichzeitig wären gegenüber einer Vertiefung der Fahrrinne über ihre gesamte Breite geringere nachteilige hydraulisch-morphologische Auswirkungen sowie ein reduzierter Herstellungs- und Unterhaltungsaufwand zu erwarten.

⁵ Maxau (Oberrhein), Kaub (Mittelrhein) und Duisburg-Ruhrort (Niederrhein)

⁶ mit jeweiligem Mindesttiefgang zzgl. Sicherheitszuschlägen.

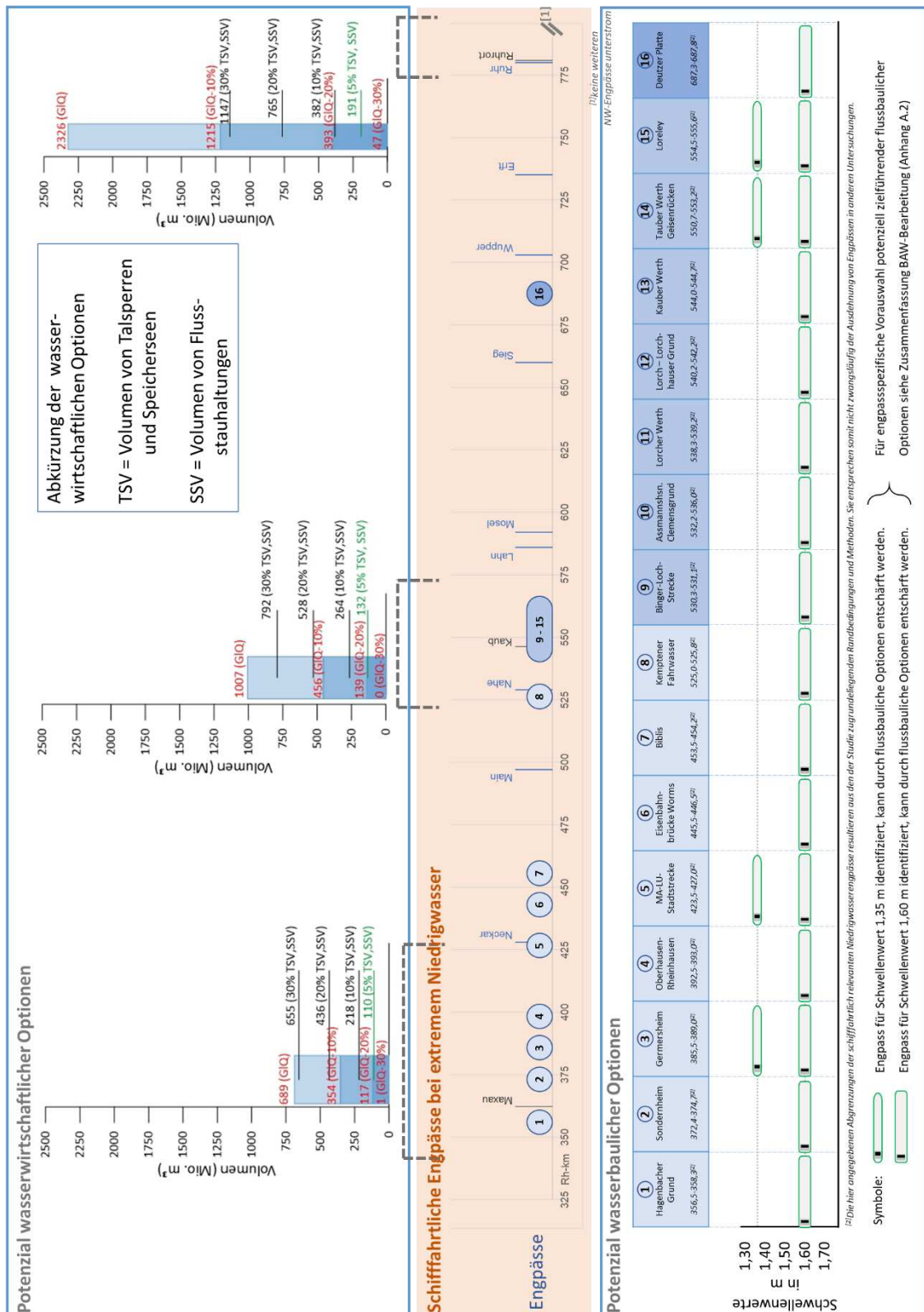


Bild 2: Wasserwirtschaftliche und wasserbauliche Optionen zur Entschärfung für die Schifffahrt negativer Auswirkungen von extremen Niedrigwassersituationen mit Abflüssen und einer Dauer wie im Jahr 2018. Mit einem rein rechnerischen Einsatz von 5 % des Gesamtvolumens von wasserwirtschaftlichen Optionen und spezifischen wasserbaulichen Optionen könnten schiffahrtliche Engpässe bereits substantiell entschärft werden.

Insbesondere bei einer Verknüpfung beider Herangehensweisen (Bild 3) ist zu erwarten, dass einerseits die zur Abflussaufhöhung benötigten bewirtschaftbaren Volumina verringert werden könnten, wenn die in der Strecke identifizierten Engpässe wasserbaulich dauerhaft entschärft werden. Andererseits könnten die Dimensionierung und die Eingriffstiefe wasserbaulicher Optionen – bei zuverlässiger Verfügbarkeit zusätzlicher Wasservolumina aus bewirtschafteten Speichern – geringer ausfallen, wenn in extremen Niedrigwassersituationen die Fehltiefen im Bereich eines Engpasses bereits durch die Abflussaufhöhung reduziert werden. Dabei können wasserwirtschaftliche Optionen jedoch nur im Zeitraum der Verfügbarkeit zusätzlicher Wasservolumina und entsprechend der räumlichen Reichweite von Aufhöhungen nach unterstrom zu einer Erhöhung der nautisch nutzbaren Wassertiefen führen. Gegebenenfalls führen sie auch zu zusätzlichen, schiffahrtlich nutzbaren Breiten. Auch andere Nutzungen können davon profitieren. Die wasserbaulichen Optionen hingegen verbessern die schiffahrtlichen Bedingungen zwar nur räumlich auf die Engpässe begrenzt, dies jedoch dauerhaft, auch über die Phasen extremer Niedrigwasserabflüsse hinaus.

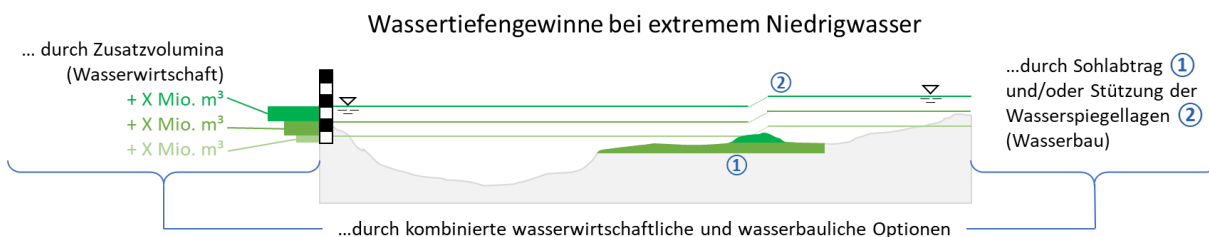


Bild 3: Schematische Darstellung der Wirkungsmechanismen wasserwirtschaftlicher und wasserbaulicher Optionen.

2.4 Schlussfolgerungen

Die betrachteten wasserwirtschaftlichen und wasserbaulichen Optionen haben das Potenzial, schiffahrtliche Engpässe, die sich bei extrem niedrigen Abflüssen wie z. B. im Jahr 2018 ergeben, substanziell zu entschärfen. Das Wasservolumen, das erforderlich wäre, um die niedrigen Abflüsse von bis zu 30 % unter dem heutigen gleichwertigen Abfluss auf einen Wert zu heben, der Verbesserungen für die Befahrbarkeit mit den gängigen Schiffstypen im gesamten Verlauf einer Niedrigwassersituation wie im Jahr 2018 ermöglicht, liegt bei etwas mehr als 5 % des jeweils im oberstrom gelegenen Einzugsgebiet vorhandenen bewirtschaftbaren Speichervolumens. Auch sind viele wasserbauliche Optionen denkbar, mit denen schiffahrtliche Engpässe bei extremem Niedrigwasser im freifließenden Rhein zwischen Iffezheim und Emmerich behoben oder gemildert werden könnten. Insgesamt gilt, dass jeder Wassertiefengewinn bei Niedrigwasser – sei es in maßgebenden Engpässen oder über größere Strecken – zu verbesserten schiffahrtlichen Bedingungen führt.

Die vorliegenden Studien liefern, entsprechend der abstrakten Betrachtungsebene, keine ausreichende Entscheidungsgrundlage für konkrete Umsetzungsschritte. Dies ist zum einen in ihrem abschätzenden Charakter begründet. Deutlich detailliertere, wesentlich aufwändigere Untersuchungen mit konkretem Bezug auf Einzelmaßnahmen und der Dialog mit den dafür zuständigen

Akteuren wären erforderlich. Zum anderen wären die verschiedenen Optionen detaillierter auszuarbeiten, um eine umfassendere Entscheidungsgrundlage zu schaffen. So ist davon auszugehen, dass durch im Rahmen der hier vorgestellten Studien noch nicht untersuchte Kombinationen wasserwirtschaftlicher, wasserbaulicher und ggf. weiterer (z. B. schiffstechnischer) Optionen die Resilienz des Verkehrsträgers Wasserstraße Rhein insgesamt stärker erhöht werden kann, als durch einzelne Optionen. Hierbei geht es nicht nur um eine ggf. noch im Detail ausarbeitende summarische Betrachtung der vorteilhaften Wirkungen einzelner Maßnahmen, sondern auch um ihre aufeinander abgestimmte und damit ausgewogenere und flexiblere Gestaltung mit Blick auf unterschiedliche Niedrigwassersituationen sowie auf die vielfältigen Nutzungsanforderungen an die Ressource Wasser und die unterschiedlichen Funktionen der großen Flüsse in Deutschland.

3 Literatur

Bundesanstalt für Gewässerkunde (2022): Untersuchung wasserwirtschaftlicher Optionen zur Sicherstellung zuverlässig kalkulierbarer Transportbedingungen am Rhein bei Niedrigwasser. BfG-Bericht-2100, Koblenz.

Bundesanstalt für Wasserbau (2022): Aktionsplan Niedrigwasser Rhein, Handlungspunkt 7: Untersuchung wasserbaulicher Optionen zur Sicherstellung zuverlässig kalkulierbarer Transportbedingungen am Rhein bei Niedrigwasser (BAW-Gutachten, B3953.02.06.10197).

Anhang – Vorgehen bei den Einzeluntersuchungen

Im vorliegenden Anhang werden die spezifischen Vorgehensweisen und Ergebnisse zur Untersuchung wasserwirtschaftlicher und wasserbaulicher Optionen zusammenfassend dargestellt. Ausführlichere Darstellungen finden sich in den separaten Berichten der BAW und der BfG:

- Bundesanstalt für Gewässerkunde (2022): Untersuchung wasserwirtschaftlicher Optionen zur Sicherstellung zuverlässig kalkulierbarer Transportbedingungen am Rhein bei Niedrigwasser. BfG-Bericht-2100, Koblenz.
- Bundesanstalt für Wasserbau (2022): Aktionsplan Niedrigwasser Rhein, Handlungspunkt 7: Untersuchung wasserbaulicher Optionen zur Sicherstellung zuverlässig kalkulierbarer Transportbedingungen am Rhein bei Niedrigwasser (BAW-Gutachten, B3953.02.06.10197).

A.1 Abschätzung des Potenzials wasserwirtschaftlicher Optionen

Kern der Untersuchungen war die Frage, in welchem mengenmäßigen Verhältnis das bewirtschaftbare Volumen von wasserwirtschaftlichen Optionen im internationalen Rheineinzugsgebiet zu dem Wasservolumen steht, das erforderlich gewesen wäre, um die starken ökonomischen Auswirkungen der Niedrigwassersituation 2018 für den Rhein in seiner Wasserstraßenfunktion zu mildern.

Um diese Fragestellung beantworten zu können, wurden in grob aggregierender Weise in einem **ersten Schritt** die rein theoretisch bewirtschaftbaren Volumina von verschiedenen wasserwirtschaftlichen Optionen im internationalen Rheineinzugsgebiet wie Talsperren, Speicherseen und Flusstauhaltungen, Polder und Hochwasserrückhaltebecken sowie Entnahmen und Einleitungen mit Hilfe der Literatur ermittelt, plausibilisiert sowie um eigene Analysen ergänzt.

Auftragsgemäß wurde dabei eine Errichtung neuer Staustufen am Rhein ausgeklammert und eine Bodenseeregulierung ausschließlich anhand einer Auswertung der bislang hierzu veröffentlichten Literatur betrachtet. In die Analyse der vorliegenden Studie gingen diese Optionen nicht ein. Anschließend wurden die untersuchten wasserwirtschaftlichen Optionen hinsichtlich ihrer grundsätzlichen Eignung zur Niedrigwasseraufhöhung bewertet. Auch Polder und Hochwasserrückhaltebecken sowie Entnahmen und Einleitungen wurden nach der ersten Bewertung aus der sich anschließenden Analyse ausgeschlossen.

Die wasserwirtschaftlichen Kategorien Talsperren und Speicherseen sowie Flusstauhaltungen im Rhein und in seinen größeren Nebenflüssen werden als potenziell für die Niedrigwasseraufhöhung geeignet angesehen. Dabei ist das Wasservolumen, das durch diese Optionen im Fall extremer Niedrigwassersituationen zur Stützung der Abflüsse und damit der Wasserstände am Rhein verfügbar gemacht werden könnte, jedoch nicht im Detail bekannt. Dieser Unsicherheit wird mit einer abgestuften Verfügbarkeit von 5 %, 10 %, 20 % und 30 % des theoretisch maximal verfügbaren bewirtschaftbaren Gesamtvolumens Rechnung getragen. Bild 4 zeigt die rechnerisch zur

Verfügung stehenden bewirtschaftbaren Wasservolumina der Talsperren und Speicherseen sowie der Flussstauhaltungen (bei Mittelwasser) im internationalen Rheineinzugsgebiet mit Wirkung auf die Pegel (Flussabschnitte) Maxau (Oberrhein), Kaub (Mittelrhein) und Duisburg-Ruhrort (Niederrhein). Damit stehen am Pegel Maxau mit 30 % des maximal rein theoretisch verfügbaren bewirtschaftbaren Volumens bis zu 655 Mio. m³ Wasser zur Milderung des Niedrigwassers zur Verfügung, am Pegel Kaub 792 Mio. m³ Wasser und am Pegel Duisburg-Ruhrort 1147 Mio. m³ Wasser. In der Zusammenschau der drei Pegel wird deutlich, dass ca. 85 % des rein theoretisch verfügbaren bewirtschaftbaren Volumens auf Talsperren und Speicherseen und ca. 15 % auf Flussstauhaltungen entfallen.

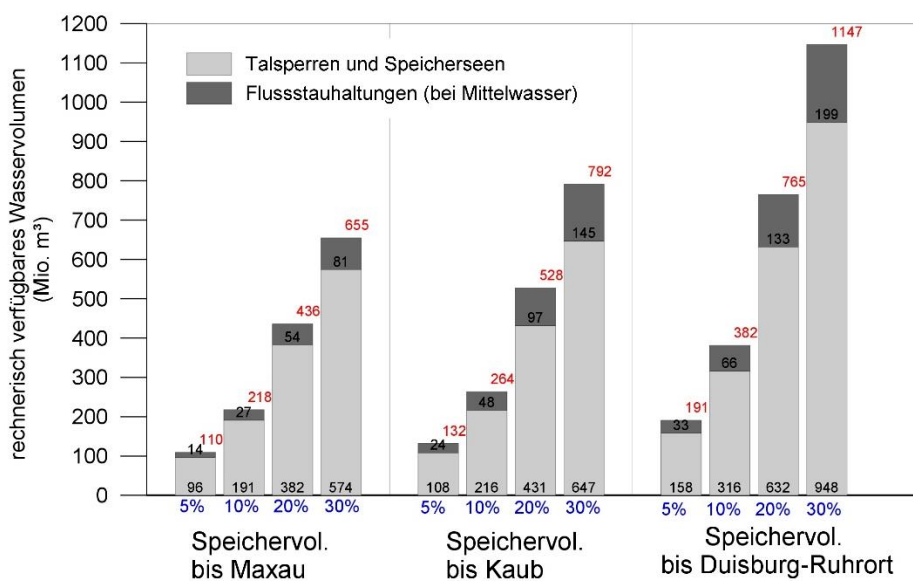


Bild 4: Rechnerisch verfügbare bewirtschaftbare Wasservolumina der Talsperren und Speicherseen sowie der Flussstauhaltungen bei Mittelwasser im Rheineinzugsgebiet mit angenommener Verfügbarkeit von 5 %, 10 %, 20 % bzw. 30 % des theoretisch verfügbaren bewirtschaftbaren Gesamtvolumens

In einem **zweiten Schritt** erfolgte die Analyse der Ausprägung des Niedrigwasserjahres 2018 für die drei schiffahrtlich bedeutsamen Rheinpegel Maxau, Kaub und Duisburg-Ruhrort vollumfänglich anhand der täglichen Abflussganglinien sowie verschiedener Niedrigwasserkenngößen (minimaler, über sieben Tage gemittelter Abfluss pro Wasserhaushaltsjahr NM7Q; summarische Unterschreitungsdauern sumD und der während dieser Unterschreitung anfallenden Defizitvolumina sumV).

Für das summarische, pegelbezogene Defizitvolumen wurden Schwellenwerte angesetzt. Dabei handelte es sich um Grenzwerte bzw. Stützwerte, bis zu denen – durch Zugabe von Wasser aus Talsperren und Speicherseen und aus den Flussstauhaltungen – aufgehört werden muss, um sie über die Zeit unterbrechungsfrei zu erreichen. Verwendet wurden in der Studie der gleichwertige Abfluss GlQ bzw. ein stufenweiser um bis 30 % reduzierter gleichwertiger Abfluss (siehe Bild 1,

Teil a und Bild 5, Kategorie „Wasserstraßenmanagement“), die approximierten Abflüsse, die für eine Fahrt bei minimalen Tauchtiefen typischer Schiffstypen erforderlich sind (siehe Bild 5, Kategorie „Schifffahrt“) sowie ein Abfluss unterhalb dessen Transporte bzw. Kleinwasserzuschläge im Containersegment frei verhandelt werden (siehe Bild 5, Kategorie „Logistik“). Diese Schwellenwerte sind repräsentativ für den Niedrigwasserbereich bzw. für eine realistische Flottenkonstellation im jeweiligen Streckenabschnitt.

Das Niedrigwasserereignis 2018 lässt sich basierend auf den oben genannten Kenngrößen hydrologisch wie folgt beschreiben:

- Im Frühjahr entsprachen die täglichen Abflusswerte an den Pegeln bis ca. Mitte Juni noch dem mittleren jährlichen Abfluss (MQ).
- Im Sommer fielen die Abflüsse infolge der großräumig trockenen Witterung zunächst bis Ende August bis deutlich in den Niedrigwasserbereich.
- In der ersten Septemberhälfte wurde dieser Abflussrückgang durch ein kleineres, vor allem aus dem Schweizer Teilgebiet stammendes Ereignis mit leicht erhöhten Abflüssen kurzzeitig unterbrochen.
- Anschließend setzte sich der Abflussrückgang unterbrochen von weiteren kleinen Zwischenereignissen fort, um in der zweiten Oktoberhälfte die geringsten Abflusswerte zu erreichen und im Wesentlichen auf diesem geringen Abflussniveau bis Ende November zu verharren.
- Anfang Dezember kam es zu deutlichen Abflussanstiegen, die das Niedrigwasserereignis 2018 beendeten.

Die besondere Verwundbarkeit des Systems Rhein im Niedrigwasserjahr 2018 ergab sich aus dem Zusammentreffen der ungewöhnlich lang andauernden Periode mit niedrigen Abflüssen mit der heutigen Flottenkonstellation. Eine Niedrigwasserperiode wie 2018 war jedoch in der jüngeren Vergangenheit nach 1950 hinsichtlich einiger Niedrigwasser Aspekte kein Einzelfall. Einige Jahre wie 1962 und 2003 zeigten ähnlich intensive bzw. persistente Niedrigwasserphasen oder haben das Jahr 2018 sogar übertroffen.

In einem **dritten Schritt** wurden die für die Beschreibung des Niedrigwasserereignisses ermittelte Kenngröße des summarischen Defizitvolumens (SumV) für die drei Pegel (siehe Schritt 2) mit den rein theoretisch vorhandenen bewirtschaftbaren Volumina aus Talsperren, Speicherseen und Flusstauhaltungen in ihrer prozentualen Abstufung (siehe Schritt 1) vergleichend ins Verhältnis gesetzt (Bild 5).

Bild 5 zeigt den Vergleich des summarischen pegelbezogenen Defizitvolumens (sumV) mit den Anteilen des rein theoretisch verfügbaren bewirtschaftbaren Volumen.

Folgende Erkenntnisse lassen sich daraus im Detail ableiten:

1. Die angenommenen verfügbaren Volumina der wasserwirtschaftlichen Optionen Talsperren, Speicherseen und Flussstauhaltungen (bei Mittelwasser) in Höhe von maximal 30 % des bewirtschaftbaren Gesamtvolumens und die Defizitvolumina des Jahres 2018 (in Bezug auf die berücksichtigten Schwellenwerte) bewegen sich an den betrachteten Pegeln in vergleichbarer Größenordnung.
2. Die Defizitvolumina bezogen auf die Schwellenwerte des Kollektivs „*Wasserstraßenmanagement*“ (GLQ, GLQ – 10 %, GLQ – 20 %, GLQ – 30 %, linke Säule in Bild 5) nehmen stromabwärts zu⁷. Eine Stützung des um 30 % reduzierten gleichwertigen Abflusses (GLQ – 30 %) ist – sofern erforderlich – mit nur geringen Anteilen (< 1,5 %) der verfügbaren bewirtschaftbaren Volumina von Talsperren, Speicherseen und Flussstauhaltungen (bei Mittelwasser) an allen drei Pegeln möglich. An den Pegeln Maxau und Kaub ist mit etwas mehr als 5 % dieser Volumina auch eine Stützung des um 20 % reduzierten gleichwertigen Abflusses GLQ – 20 % zumindest annähernd möglich, am Pegel Duisburg-Ruhrort jedoch nicht (siehe hierzu aber 3).
3. Die Defizitvolumina bezogen auf die Schwellenwerte des Kollektivs „*Schifffahrt*“ zeigen aufgrund der unterschiedlichen Tiefenverhältnisse der betrachteten Flussabschnitte ein differenziertes Bild:
 - Am Niederrhein (am Pegel Duisburg-Ruhrort) ist aufgrund der dort günstigen Schifffahrtsverhältnisse selbst bei dem größten untersuchten Schiffstyp (Schubverband SV 4x4) das ermittelte Defizitvolumen zwischen vorhandener Wassertiefe im Jahr 2018 und minimalem Tiefgang des Schiffes vergleichsweise gering, so dass durch Einsatz von etwas mehr als 1,5 % des bewirtschafteten Gesamtvolumens der Talsperren, Speicherseen und Flussstauhaltungen ein Ausgleich rechnerisch möglich gewesen wäre.
 - Auf der Mittelrheinstrecke (Pegel Kaub) mit schwierigen Schifffahrtsbedingungen kommt es bei mehreren Schiffstypen (wie z. B. Großmotorschiff GMS110 und Containerschiff JOWI) zu Defizitvolumina zwischen den im Jahr 2018 vorhandenen Wassertiefen und den minimalen Tiefgängen der Schiffe. Ein Ausgleich der Defizitvolumina wäre für ein GMS110 mit dem Einsatz von 11 % des bewirtschafteten Gesamtvolumens rechnerisch möglich gewesen. Bei größeren Schiffen (wie z. B. JOWI) würde auch der Einsatz von 30 % des bewirtschaftbaren Gesamtvolumen keinen vollständigen Ausgleich ermöglichen.
 - Am Oberrhein (Pegel Maxau) wäre unter Ausnutzung von 30 % des bewirtschaftbaren Gesamtvolumens ein vollständiger Ausgleich des im Jahr 2018 aufgetretenen Defizitvolumens für den minimalen Tiefgang größerer Schiffe (z. B. JOWI) rechnerisch möglich gewesen. Für das GMS110 hätten bereits weniger als 5 % des bewirtschafteten Gesamtvolumens ausgereicht.

⁷ Ausnahme: Die geringen Defizitvolumina bezogen auf GLQ – 30 % an den Pegeln Maxau und Kaub bleiben annähernd in derselben Größenordnung.

4. Eng gekoppelt mit den schiffahrtsrelevanten Schwellenwerten (siehe vorangehender Punkt) ist der Schwellenwert des Kollektivs „Logistik“ (Schwellenwert, bei dessen Unterschreitung die Transportverpflichtung im Containersegment endet). Es zeigt sich folgendes Bild: Das Defizitvolumen am Niederrhein (Pegel Duisburg-Ruhrort) ist durch den Einsatz von etwas mehr als 5 % des bewirtschaftbaren Gesamtvolumens rechnerisch ausgleichbar. Ein vollständiger Ausgleich des Defizitvolumens am Mittelrhein (Pegel Kaub) ist rechnerisch selbst bei Einsatz von 30 % des bewirtschaftbaren Gesamtvolumens nicht möglich.

Die zusammenfassende Kernbotschaft lautet: Die angenommenen bewirtschaftbaren Wasservolumina in den Talsperren, Speicherseen und Flusstauhaltungen im Rheineinzugsgebiet in abgestufter Höhe bis hin zu maximal 30 % des Gesamtvolumens liegen in vergleichbarer Größenordnung wie die Wasservolumina, die zur Verbesserung der Schifffahrtsverhältnisse in extremen Niedrigwassersituationen wie im Jahr 2018 erforderlich wären. Bereits der Einsatz von 5 % des bewirtschaftbaren Gesamtvolumens würde rechnerisch zu einer substantiellen und kontinuierlichen Verbesserung der Schifffahrtsverhältnisse führen.

Auf der abstrakten Ebene des rein rechnerischen Vergleichs von bewirtschaftbarem Speichervolumen und pegelbezogenem Defizitvolumen können – ohne Berücksichtigung von Nutzungskonkurrenzen und der Vorhersage- und Steuerungsproblematik – noch keine belastbaren Entscheidungen hinsichtlich Realisierung, Planung und Umsetzung konkreter Maßnahmen gefällt werden. Jedoch konnten auf Basis der erarbeiteten Informationen bereits einige der zusammengetragenen wasserwirtschaftlichen Optionen als nicht sinnvoll umsetzbar ausgeschlossen werden. Detailliertere Erhebungen und Untersuchungen werden notwendig sein, die die unterschiedlichsten Aspekte, sowohl technischer und operationeller Art als auch administrativer, wirtschaftlicher und letztlich politischer Natur berücksichtigen. Ein nationaler und internationaler Dialog mit den zuständigen Behörden und Stakeholdern mit einer Konsensfindung wird notwendig sein.

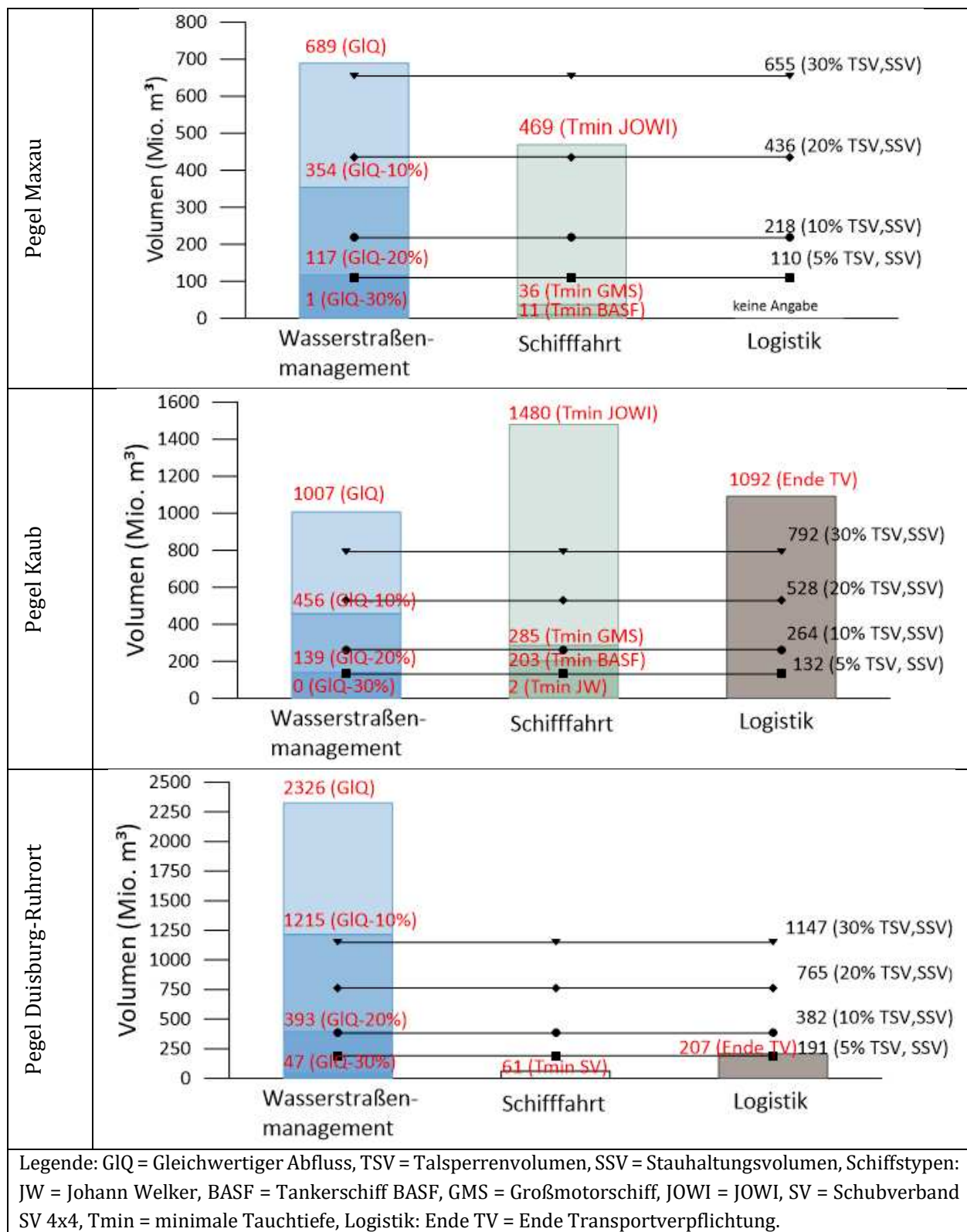


Bild 5: Vergleich der rot beschrifteten schwellenwertbezogenen Defizitvolumina (2018) an den Pegeln Maxau, Kaub und Duisburg-Ruhrort mit den angenommenen bewirtschaftbaren Anteilen von 5 % bis 30 % der in den jeweiligen Pegelinzugsgebieten rein theoretisch verfügbaren Volumina von Talsperren und Speicherseen (TSV) und Flussstauhaltungen bei Mittelwasser (SSV). Für die Schifffahrt werden minimale Tiefgänge zugrunde gelegt, bei der noch nennenswerte Ladung transportiert werden kann.

A.2 Abschätzung des Potenzials wasserbaulicher Optionen

Folgende Kernaussagen lassen sich aus den Untersuchungen zur Abschätzung des Potentials wasserbaulicher Optionen ableiten:

- Für extrem geringe Abflüsse, wie sie zuletzt im Niedrigwasserjahr 2018 auftraten, wurden unter den getroffenen Annahmen im freifließenden Rhein zwischen Iffezheim und Emmerich 16 schiffahrtliche Engpässe identifiziert, die ab einem Tiefgang von 1,60 m bzw. in vier Fällen bereits ab einem Tiefgang von 1,35 m auftreten.
- Für jeden der identifizierten Engpässe konnte eine Auswahl flussbaulicher Optionen entwickelt werden, die zu verbesserten schiffahrtlichen Bedingungen auch bei extremem Niedrigwasser führen können und die dauerhaft wirksam sind.
- Vor dem Hintergrund der Eingriffsminimierung bietet sich insbesondere die vertiefte Untersuchung der innovativen Option „Niedrigwasserkorridor“ an. Diese zielt auf die Nutzung in Längsrichtung durchgängig vorhandener, nautisch nutzbarer Übertiefen ab. Zur Verbesserung der schiffahrtlichen Bedingungen bei extremem Niedrigwasser ließe sich der Niedrigwasserkorridor mit – im Gegensatz zu einer Vertiefung der Fahrrinne auf gesamter Breite – vergleichsweise geringen baulichen Eingriffen um zusätzliche Tiefen und Breiten erweitern. Hierdurch könnten die schiffahrtlichen Bedingungen innerhalb des Niedrigwasserkorridors bei extrem geringen Abflüssen, ggf. unter Inkaufnahme reduzierter Leichtigkeit, verbessert werden. Gleichzeitig wären gegenüber einer Vertiefung der Fahrrinne über ihre gesamte Breite geringere nachteilige hydraulisch-morphologische Auswirkungen sowie ein reduzierter Herstellungs- und Unterhaltungsaufwand zu erwarten.

Folgende Punkte sind bei der Interpretation der im Folgenden präsentierten Ergebnisse und der zugrundeliegenden Methodik zu beachten:

- Die beschriebenen Untersuchungen der BAW bewegen sich auf hohem Abstraktionsgrad und können deshalb flussbauliche Untersuchungen, die mit einer der Prozesskomplexität angemessenen Untersuchungstiefe zu flussbaulichen Lösungen kommen, nicht ersetzen.
- Die Untersuchung der Strecke auf schiffahrtliche Engpässe erfolgte räumlich hochaufgelöst. Die verfügbaren, den Analysen zugrundeliegenden Datensätze unterscheiden sich dabei hinsichtlich der Einheitlichkeit und Aktualität. Die Ergebnisse der Untersuchungen sind daher mit Unsicherheiten behaftet und dem Auftrag entsprechend auf einer hohen Abstraktionsebene zu interpretieren.
- Eine Vielzahl weiterer denkbarer und möglicher Ausprägungen (z. B. weitere Tiefgangsszenarien, umfassende Breitenbedarfsanalysen) wurde aufgrund der gegebenen Bearbeitungstiefe zunächst nicht berücksichtigt.

Die Untersuchungen wasserbaulicher Optionen zur Verbesserung der schiffahrtlichen Bedingungen auf dem Rhein bei extremem Niedrigwasser umfassten die folgenden Positionen:

- Identifikation und Charakterisierung schiffahrtlich relevanter Niedrigwasserengpässe zwischen Iffezheim und Emmerich,
- Zusammenstellung wasserbaulicher Optionen zur Erhöhung der nautisch nutzbaren Wassertiefen unter extremen Niedrigwasserabflussbedingungen und
- Verknüpfung von Engpässen und potenziell zielführenden wasserbaulichen Optionen auf qualitativer Basis vor dem Hintergrund der Eingriffsminimierung und schiffahrtlicher Randbedingungen.

Im Untersuchungsauftrag ist das Ziel formuliert, die Voraussetzungen, das Potenzial und die Auswirkungen verschiedener Lösungsansätze auf abstrakter Ebene zu ermitteln. Als Ausgangspunkt der Untersuchungen dient das Niedrigwasserjahr 2018.

Die Auftragsbearbeitung fokussierte explizit auf wasserbauliche Aspekte. Schifffahrtsrechtliche, verkehrliche und wirtschaftliche Aspekte, die Betrachtung bestimmter Relationen sowie Szenarien der Flottenentwicklung wurden nicht miteinbezogen. Klimawandelszenarien und Maßnahmen zur Abladeoptimierung am Mittel- und Niederrhein sollten ebenfalls nicht mitberücksichtigt werden. Eine Untersuchung der Option „Errichtung von Staustufen“ war nicht vorgesehen.

Randbedingungen der BAW-Untersuchungen sind definierte Niedrigwasserabflüsse unterhalb der an den Abflusspegeln des Rheins jeweils definierten GlQ, die diese um 10 %, 20 % beziehungsweise 30 % unterschreiten. Der Fall GlQ – 30 % entspricht mit geringen Abweichungen dabei in etwa den Abflüssen, die während des extremen Niedrigwasserereignisses im Wasserhaushaltsjahr 2018 an den Pegeln an 20 Tagen unterschrittenen wurden (siehe Anhang A.1). Aus der Wahl dieser Randbedingungen ergibt sich implizit eine Abgrenzung zu anderen Engpassanalysen mit Niedrigwasserbezug, denen in der Regel der gleichwertige Abfluss GlQ zugrunde liegt.

Die zentrale Größe bei der **Identifikation schiffahrtlicher Engpässe** bei extremen Niedrigwasserabflüssen in dieser Studie ist die potentielle Abladetiefe. Diese entspricht der auf einen Abfluss bezogenen, ortsspezifisch maximal möglichen Abladetiefe. Unter Verwendung modellgestützt berechneter Wasserspiegellagen und eines auf Basis unterschiedlicher Sohlpeilungen konstruierten Sohlenmodells wurde die potentielle Abladetiefe für jeden Punkt innerhalb der Fahrrinne mit nachfolgender Beziehung ermittelt:

Potentielle Abladetiefe = Wassertiefe – Mindestflottwasser⁸ – fahrdynamisches Einsinken

Zur Identifikation von Fehltiefen wurden die ortsspezifisch berechneten Werte der potentiellen Abladetiefen in der gesamten Strecke zwischen Iffezheim und Emmerich mit ausgewählten schiffsbezogenen Schwellenwerten verglichen: Ist die potentielle Abladetiefe in einem Punkt geringer als der jeweilige Schwellenwert, so liegt eine Fehltiefe für den entsprechenden Schiffstyp

⁸ Das Mindestflottwasser beträgt bei einer alluvialen Sohle (Sand / Kies) 0,2 m und bei einer Felssohle 0,4 m.

vor. Als Schwellenwerte wurden die Mindesttiefgänge bestimmter Schiffstypen (DST 2015⁹) verwendet. Die gewählten Schwellenwerte lassen sich im Sinne einer Grenzbetrachtung mit dem genannten Mindesttiefgang, aber auch mit Szenarien teilabgeladener Schiffe mit geringerem Mindesttiefgang sowie mit schiffbaulichen Neuentwicklungen verknüpfen.

Um zur Einschätzung zu kommen, ob an einer Stelle mit Fehltiefen auch ein schiffahrtlicher Engpass besteht, wurde im Anschluss untersucht, über welche Breite innerhalb der Fahrrinne Fehltiefen jeweils auftreten. Dem liegt die Annahme zugrunde, dass einspuriger Begegnungsverkehr bei Niedrigwasser unter Beteiligung der für den untersuchten Fall maßgebenden Fahrzeuge auf einem Großteil der Strecke auf etwa 50 % der Fahrrinnenbreite noch stattfinden kann, wenn auch gegebenenfalls mit eingeschränkter Leichtigkeit. Es gilt somit: Ein schiffahrtlicher Engpass liegt vor, wenn auf mehr als 50 % der Fahrrinnenbreite Fehlstellen auftreten, in denen die potentielle Abladetiefe geringer ist als der jeweilige schiffsbezogene Schwellenwert (Beispiel siehe Bild 6).

Insgesamt wurden auf der Strecke von Iffezheim bis Emmerich bei den genannten Randbedingungen 16 schiffahrtlich relevante Niedrigwasserengpässe für den extremen Niedrigwasserabfluss GlQ – 30 % identifiziert. Davon liegen acht im Oberrhein, sieben im Mittelrhein und einer im Niederrhein. Bei Abflüssen von GlQ – 20 % oder höher wurden unter den gegebenen Annahmen keine Engpässe identifiziert

⁹ Entwicklungszentrum für Schiffstechnik und Transportsysteme e.V. (DST) (2015): Auswirkungen unterschiedlicher Abflüsse auf die Transportkosten und Kapazität der Binnenschifffahrt auf dem Rhein (DST-Bericht, Nr. 2073).

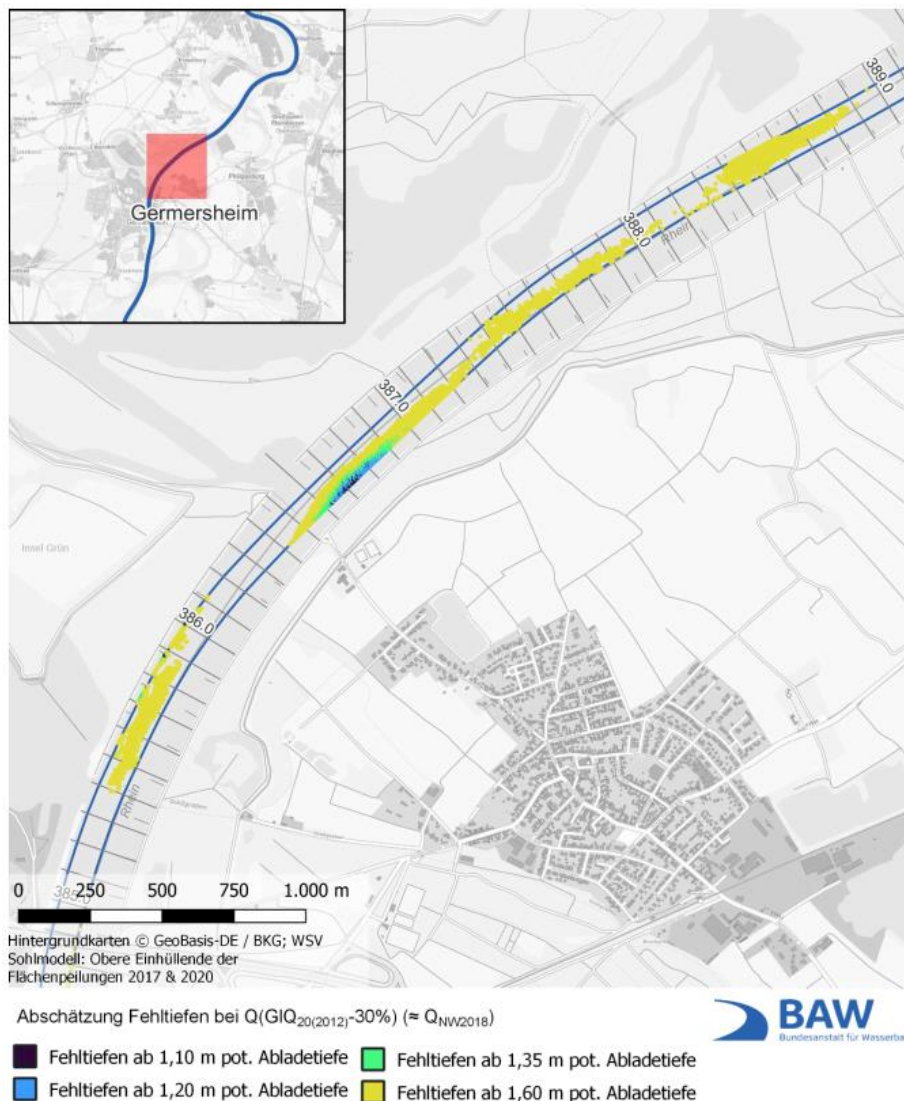


Bild 6: Beispiel für die räumliche Verteilung von Fehlstellen in einem Engpass. Zugrunde liegt ein extrem geringer Abfluss von $GIQ - 30\%$. Die Fehlstellen mit einer potentiellen Abladetiefe unter 1,60 m (gelb) treten im Engpassbereich häufig auf über 50 % der Fahrrinnenbreite auf, die Fehlstellen mit einer potentiellen Abladetiefe unter 1,35 m (grün) treten nur bei Rh-km 386,7 und 386,8 auf über 50 % der Fahrrinnenbreite auf. Die seitliche Fahrrinnenbegrenzung ist mit dunkelblauen Linien dargestellt, die Übersichtskarte links oben erlaubt die Einordnung des Engpassbereichs im Flussverlauf.

Eine Möglichkeit zur Verbesserung der schifffahrtlichen Bedingungen am freifließenden Rhein bei extremen Niedrigwasserabflüssen ist die **Erhöhung der nautisch nutzbaren Wassertiefen in den identifizierten Engpässen mit Hilfe wasserbaulicher Optionen**. Dies kann grundsätzlich mit Maßnahmen des klassischen Flussbaus in Abhängigkeit der Engpasscharakteristik entweder durch eine Stützung der Wasserspiegellagen, die Reduzierung von Sedimentanlandungen oder durch Sohlabtrag erreicht werden. Allerdings sind dem Potenzial klassischer flussbaulicher Maßnahmen zur Erhöhung der Wassertiefen in extremen Abflusssituation im Einzelfall Grenzen gesetzt, insbesondere wenn Erhöhungen von mehreren Dezimetern erforderlich wären, um die bei GIQ vorhandenen Wassertiefen zu erreichen, wie dies im Niedrigwasserjahr 2018 zeitweise der

Fall war. Eine Stützung der Wasserspiegellagen mit Buhnen oder Längswerken in dieser Größenordnung ist ohne eine Erhöhung der Wasserspiegellagen bei höheren Abflüssen in aller Regel kaum möglich, auch wenn die Auswirkungen der Querschnittseinengung mit zunehmend höheren Wasserständen geringer werden und bei sehr hohen, mit Abfluss über das Vorland verbundenen Wasserständen, asymptotisch ausklingen. Eine Vertiefung der Fahrrinne über ihre gesamte Breite als weitere Option geht insbesondere bei einer Erhöhung der nutzbaren Wassertiefen in Größenordnungen von mehreren Dezimetern in freifließenden Gewässern mit einem unerwünschten Wasserspiegelverfall einher.

Wenn die örtlichen Verhältnisse keine ausreichend kompensierenden Maßnahmen außerhalb des Niedrig- oder Mittelwasserbetts zulassen, beispielsweise im Fall von kleinen oder gänzlich fehlenden Vorlandflächen, können innovative Ansätze wie bewegliche Konstruktionen (z. B. Schlauch- oder Sektorwehre), die in Abflussbereichen außerhalb der Fahrrinne platziert werden, eine sinnvolle Maßnahme darstellen. Die Flexibilität der Bauwerke ermöglicht es, die Regelungswirkung bedarfsweise an hydrologische Ereignisse anzupassen. Hierdurch kann eine deutliche Wasserspiegelanhebung durch Einengung des Abflussquerschnitts bei extremem Niedrigwasser mit vergleichsweise geringen Auswirkungen bei höheren Abflüssen erzielt werden.

Vor dem Hintergrund der Eingriffsminimierung bietet sich die vertiefte Untersuchung des Niedrigwasserkorridors zur Ausnutzung größerer nautisch nutzbarer Wassertiefen bei extremen Niedrigwasserabflüssen an. Mit dem Konzept des Niedrigwasserkorridors wird die Idee verfolgt, im Falle extrem niedriger Abflüsse natürlich vorhandene Übertiefen schiffahrtlich zu nutzen, um Verringerungen der Transportkapazität in Niedrigwasserphasen, wie sie beim Ereignis 2018 zu größeren wirtschaftlichen Verlusten geführt haben, entgegenzuwirken (Bundesanstalt für Wasserbau 2022b¹⁰). Liegen die erforderlichen Tiefen auf der für die Schifffahrt erforderlichen Breite nicht im Längsschnitt zusammenhängend vor, so könnte der Korridor mit einem im Vergleich zu einer Fahrrinnenvertiefung über die gesamte Fahrrinnenbreite geringerem Aufwand baulich hergestellt und unterhalten werden. Der Mehrwert der baulichen Herstellung läge im Vergleich zur ausschließlichen Nutzung vorhandener und bekannter Übertiefen in den zusätzlich geschaffenen nautisch nutzbaren Tiefen und Breiten. Hierdurch treten fehliefenbedingte Einschränkungen der Schifffahrt im Falle extremer Niedrigwasserabflüsse verglichen mit dem Istzustand später auf und fallen geringer aus. Auch speziell für Niedrigwasser neu entwickelte Schiffstypen, die einen Niedrigwasserkorridor aufgrund ihres geringen Tiefgangs nicht benötigen, könnten von einem hergestellten Niedrigwasserkorridor profitieren, da auch sie entsprechend der gewonnenen nautisch nutzbaren Wassertiefen tiefer abladen und somit wirtschaftlicher fahren könnten. Weitere zu erwartende Vorteile eines Niedrigwasserkorridors gegenüber einer Vertiefung der Fahrrinne über ihre gesamte Breite wären geringere nachteilige hydraulisch-morphologische Auswirkungen sowie ein reduzierter Herstellungs- und Unterhaltungsaufwand. Durch die Herstellung und Ausweisung eines Niedrigwasserkorridors, in dem im Vergleich zur freigegebenen Fahrrinne größere

¹⁰ Bundesanstalt für Wasserbau (2022b): Entwicklung eines Niedrigwasserkorridors zur Verbesserung der Schiffbarkeit bei extremen Niedrigwasserereignissen am Mittelrhein. (BAW-Gutachten, B3953.04.06.10136).

Tiefen auf einer reduzierten Breite vorliegen, könnte somit eine Verbesserung der Schifffahrtsverhältnisse bei extremen Niedrigwasserereignissen zumindest unter Inkaufnahme einer eingeschränkten Leichtigkeit erreicht werden.

Um das Konzept des Niedrigwasserkorridors in den Status einer praktikablen wasserbaulichen Option für extreme Niedrigwassersituationen zu überführen, sind pilothafte Umsetzungen zwingend notwendig. Nur hierdurch können die erforderlichen praktischen Erfahrungen bezüglich Betrieb und Unterhaltung einer derartigen Maßnahme unter realen Bedingungen gewonnen werden.

Tabelle 2 gibt einen Überblick über wasserbauliche Optionen zur Erhöhung der nautisch nutzbaren Wassertiefen bei extremen Niedrigwasserereignissen, gruppiert nach unterschiedlichen Zielstellungen. Dabei ist auch Geschiebeentzug als Option aufgeführt, mit dem grundsätzlich Tiefenengpässe in größeren Streckenabschnitten, in denen ein Sedimentüberschuss vorliegt, entschärft werden können. Längswerke zur Erhöhung der Sohlschubspannung sind in Tabelle 2 um eine Variante mit nachregelbarer Hinterströmung (Zentralkommission für die Rheinschifffahrt 2011¹¹) ergänzt, die eine größere Flexibilität hinsichtlich der erzielbaren Schubspannungsänderungen im Hauptstrom bietet.

Tabelle 2: Übersicht der betrachteten wasserbaulichen Optionen zur Erhöhung der Wassertiefen unter extremen Niedrigwasserabflussbedingungen.

Zielstellung, Gruppe	Nr.	Wasserbauliche Option
Ausnutzung vorhandener Übertiefen	11	NW-Korridor
Sohlabtrag	21	Nassbaggerung
	22	Felsabtrag
WSP-Stützung	31	Buhnen
	32	Flexibles Querbauwerk (abflussereignisabhängig gesteuert)
	33	Kolkverbau
	34	Längswerk
Erhöhung Sohlschubspannung	41	Buhnen
	42	Flexibles Querbauwerk (abflussereignisabhängig gesteuert)
	43	Kolkverbau
	44	Längswerk
	45	Längswerk mit nachregelbarer Hinterströmung
Reduzierung Sedimentdargebot	51	Geschiebeentzug
Umlenkung Transportpfad	52	Grundswellen
Q-Konzentration bei NW	53	Buhnenkopfschwellen

¹¹ Zentralkommission für die Rheinschifffahrt (ZKR) (Hg.) (2011): Endgültig angenommene Beschlüsse. (CC/R (11) 2011-II). Straßburg. Dort v. a. Protokoll 22 und 23, S. 159 -170. Online verfügbar unter https://www.ccr-zkr.org/files/documents/resolutions/ccr2011_IId.pdf, zuletzt geprüft am 30.03.2022.

Die Auswahl geeigneter wasserbaulicher Optionen zur Erhöhung der nautisch nutzbaren Wassertiefen in den identifizierten Engpässen hängt neben den engpassspezifischen Regelungszielen grundsätzlich von den örtlichen Gegebenheiten und einzuhaltenden Randbedingungen (z. B. hydraulisch-morphologische Prozesse, Platzverhältnisse, Auswirkungen auf Hochwasserspiegel-lagen) ab. Eine effiziente Vorauswahl möglicher zielführender flussbaulicher Optionen wurde dadurch möglich, dass die Engpässe vor diesem Hintergrund zielgerichtet über geeignete Kriterien charakterisiert wurden. Konkret bedeutet dies, dass mindestens diejenigen Kriterien, die Voraussetzung für die ortsspezifische Auswahl eines geeigneten flussbaulichen Maßnahmentyps (z. B. Längswerke, Buhnen) sind, Bestandteil der Beschreibung der einzelnen Engpässe sein mussten. Die anschließende **Verknüpfung von Engpässen und potenziell zielführenden wasserbaulichen Optionen** erfolgte anhand solcher Kriterien.

Die Optionen, welche aus der kriterienbasierten Vorauswahl hervorgingen, wurden unter Einbeziehung von Streckenexpertise und flussbaulicher Erfahrung plausibilisiert und auf ihre Wirkung hinsichtlich ihrer Eignung zur Behebung der schwellenwertspezifischen Engpässe geprüft. Die als zielführend erachteten Anpassungsoptionen wurden in einem letzten Schritt auf Basis des Zielerreichungspotenzials sowie des abgeschätzten Umsetzungsaufwandes qualitativ bewertet und ge-
reihet. Die in Bild 7 dargestellte Vorauswahl engpassspezifischer wasserbaulicher Anpassungsoptionen könnte gemäß der durchgeführten Reihung für prioritär zu entschärfende Engpässe in einem nächsten Schritt gezielt auf eine konkretere Betrachtungsebene gehoben werden. Entsprechend vertiefte flussbauliche Untersuchungen könnten zur Erhöhung der angestrebten Wirkung um engpassspezifische Kombinationen von flussbaulichen Optionen erweitert werden.

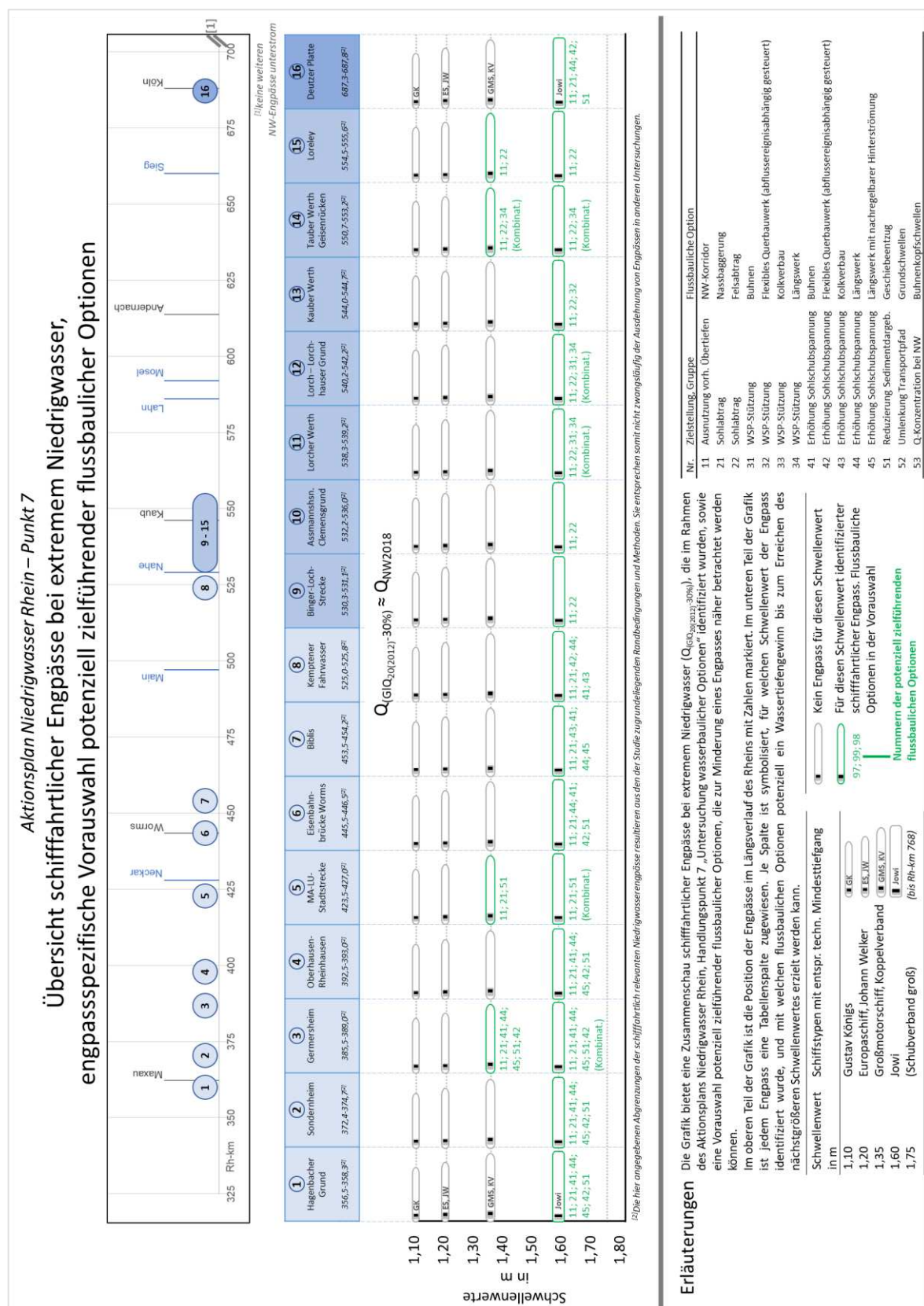


Bild 7: Grafische Zusammenfassung der 16 im Untersuchungsgebiet identifizierten schiffahrtlichen Engpässe bei einem dem Ereignis 2018 vergleichbaren Niedrigwasserabfluss (oberer Teil der Abbildung) sowie der engpassspezifischen, potenziell zielführenden flussbaulichen Optionen (mittlerer Teil der Abbildung). Unterer Teil der Abbildung: Erläuterungen.

Die Untersuchungen der BAW fokussieren explizit auf flussbauliche Optionen zur Erhöhung der nautisch nutzbaren Wassertiefen, um einen Beitrag zum Erreichen des Ziels zuverlässig kalkulierbarer Transportbedingungen am Rhein unter extremen Niedrigwasserabflussbedingungen zu leisten. Speziell das Niedrigwasser 2018 hat verdeutlicht, dass solchen Extremereignissen aus Sicht der Bereitstellung von Verkehrsinfrastruktur kurzfristig kaum erfolgreich begegnet werden kann. Nicht zuletzt aus der Annahme heraus, dass die Häufigkeit vergleichbarer oder noch extremerer Abflussverhältnisse zukünftig steigt, entsteht verstärkt der Bedarf an einer vorausschauenden, dauerhaft und verlässlich wirkenden Anpassung der Bundeswasserstraßen, um auch bei Niedrigwasser zuverlässige Transportbedingungen am Rhein zu erreichen.