



Auswirkungen von Brücken auf das Abflussgeschehen 2021

*Lisa Burghardt , Elena-Maria Klopries  und
Holger Schüttrumpf *

Die Folgen des Katastrophenhochwassers 2021 sind in Rheinland-Pfalz und Nordrhein-Westfalen heute noch zu sehen. Die Schäden in Milliarden Höhe sind zu einem hohen Anteil an sogenannter kritischer Infrastruktur entstanden, die für die Versorgung und das Leben unentbehrlich sind (Krings 2020; Deutsches Komitee Katastrophenvorsorge e. V. 2022). Neben Wasser- und Energieversorgung zählen auch Transport und Verkehr zu den Sektoren der kritischen Infrastruktur (Pohl 2015). Durch den hohen Verlust an Straßen- und Bahnbrücken wurden ganze Stadtteile von der Verkehrsinfrastruktur abgetrennt und Hilfsmaßnahmen während des Hochwasserereignisses stark verzögert. Bis dato bilden Behelfsbrücken einen wichtigen Bestandteil der lokalen Infrastruktur, die nach und nach durch neue Brückenbauwerke ersetzt werden müssen. Doch der Wiederaufbau der Brücken sollte nicht ohne eine genaue Bewertung der Rolle von Brücken auf das vergangene Hochwasser geschehen, um das zukünftige Schadensausmaß an Brücken und in deren Umfeld möglichst gering halten zu können. Im Folgenden werden die Schäden an Brücken, hervorgerufen durch das Hochwasser im Jahr 2021, analysiert. Auf Basis von numerischen Modellierungen werden zudem die Auswirkungen von Brückenbauwerken auf das Hochwassergeschehen 2021 genauer untersucht. Hieraus lassen sich zahlreiche Empfehlungen für den Neubau von Brücken in den betroffenen Gebieten sowie Handlungsempfehlungen für den operationellen Hochwasserschutz ableiten.

10.1 Schäden an Brücken

10

An den vier deutschen Flüssen Ahr, Inde, Vicht und Erft wurde im Nachgang des Hochwassers eine Analyse der Brückenschäden durch Begehung vor Ort sowie auf Basis von Foto- und Videodokumentationen durchgeführt. Hierbei wurden angelehnt an Maiwald und Schwarz (2023) fünf Klassen für Brückenschäden unterschieden (siehe ■ Tab. 10.1), die von verwitterungsähnlichen Schäden (Klasse D0) bis hin zum vollständigen Abriss des Bauwerks reichen (Klasse D4) (siehe ■ Abb. 10.1). Eine Brücke erhält durch den Verlust des Geländers (Klasse D1) im Zuge der herkömmlichen Bauwerkprüfung aufgrund mangelnder Verkehrssicherheit die schlechteste Zustandsnote. Da allerdings ein Großteil der Bausubstanz noch vorhanden ist und auch gut erhalten sein kann, fallen die Instandsetzungskosten im Vergleich zu einem Neubau der gesamten Brücke sehr viel niedriger aus. Die hier aufgeführte Schadensklassifizierung konzentriert sich daher auf den Zustand des Bauwerks mit Blick auf Wiederaufbau- und Instandsetzungsaufwand.

Die höchste Schadensdichte wurde an der Ahr, besonders im Stadtgebiet Bad Neuenahr-Ahrweiler, verzeichnet. Von 114 Brücken vor der Flut, wurden knapp 40 Brücken als beschädigt (Schadensklasse D1 bis D3) und 40 Brücken als zerstört (Schadensklasse D4) klassifiziert. Gerade am Unterlauf der Ahr waren viele Brücken flachgegründet und erlitten aufgrund der hohen Wassermassen starke Schäden. Am nordrhein-westfälischen Fluss Inde traten deutlich weniger Brückenschäden auf. Rund 32 % der 77 frei zugänglichen Brücken wurden beschädigt oder zerstört, dabei wurden die meisten Brücken der Schadensklasse D1 zugeordnet. Vier Brücken wurden durch das Hochwasser vollständig zerstört. An der Vicht, die auf Höhe Stolberg in die Inde mündet, wurden 23 der 52 untersuchten Brücken als beschädigt eingestuft. Auch hier überwiegt der Anteil an leicht beschädigten Brücken und nur zwei Brücken wurden zerstört. Entlang der Erft wurden 15 % der 109 Brücken im hochwasserbetroffenen Gebiet zerstört. Brücken der Schadensklassen D1 und D2 erreichten den gleichen Anteil und fast die Hälfte der Brücken wurden bis zum Überbau angeströmt oder sogar überströmt.

Tab. 10.1 Schadensklassen für die Bewertung der Brückenschäden nach dem Hochwasser 2021. (Burghardt et al. 2024)

Schadensart	Schadensbeschreibung	Schadensklasse				
		Intakt	Beschädigt			Zerstört
		D0	D1	D2	D3	D4
Oberflächliche Schäden	Verwitterung	x				
	Feuchtegehalt der Bauteile	x				
	Verlust von Geländer, Leitplanke und Verzierungen		x			
	Kleinflächige Ablösungen ($< 1 \text{ m}^2$) des Fahrbahnbelags		x			
	Verstopfung oder Abriss der Straßenentwässerung		x			
	Kleine Risse in der Bausubstanz ($< 50 \text{ cm}$)			x		
	Leichte Freilegung der Bewehrung			x		
	Größere Risse in der Bausubstanz ($> 50 \text{ cm}$)				x	
	Durchdringende Risse in der Bausubstanz ($> 1 \text{ m}$)				x	
Strukturelle Schäden	Abriss der Zufahrtsrampen			x		
	Absinken, Verschieben oder Abreißen einzelner Brückenpfeiler				x	
	Abriss des Überbaus und einzelner Widerlager				x	
	Kolkbildung am Pfeiler				x	
	Großflächiger Abriss von Bausubstanz ($> 1 \text{ m}^3$)				x	
	Vollständiger Abriss					x

Entlang der vier Flüsse zeigt sich, dass der Anteil an beschädigten oder zerstörten Brücken in dicht besiedelten Gebieten stark ansteigt. Brücken mit leichter Bauweise, wie beispielsweise für Wander- oder Radwegnutzungen, haben häufig höhere Schäden erlitten und wurden leichter von den Fluten mitgerissen. Die Öffnungsform der Brücke konnte nicht als signifikante Ursache für ein höheres Schadensausmaß an den Brücken identifiziert werden. An den Flüssen Ahr und Inde zeigte sich, dass mit größerer Öffnungsbreite und höherem Freibord an den Brücken tendenziell weniger Schäden aufgetreten sind. Besonders an Brücken entlang der Ahr wurden während und nach dem Hochwasser große Treibgutansammlungen und -rückstände beobachtet, die sich zum einen direkt auf die Belastung des Bauwerks und auch auf das Flutgeschehen selbst ausgewirkt haben.

10.2 Die Rolle von Brücken auf das Hochwassergeschehen 2021

Brücken stellen ein Abflusshindernis im Flussquerschnitt dar, die durch Pfeiler, Widerlager und bei hohen Wasserständen auch durch den Überbau den Abflussquerschnitt reduzieren. Bereits beim Umfließen des Brückenpfeilers kommt es zum sogenannten Pfeilerstau (siehe auch Patt und Jüpner 2020) und somit zu einer Erhöhung des Was-

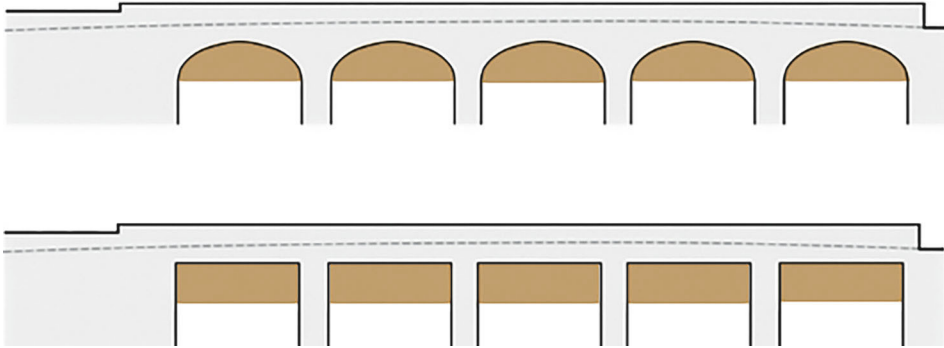


Abb. 10.1 Beispielhafte Darstellung der Schadensmerkmale an Brücken nach dem Hochwasser 2021 an der Ahr. **a** Verlust des Geländers, **b** Verlust von Zufahrtsrampen, **c** Verlust des Überbaus, **d** vollständiger Abriss (a, c Burghardt et al. 2024; b, d eigene Abbildung)

serspiegels. Dieser hängt neben der Pfeilergeometrie auch von den hydraulischen Bedingungen, insbesondere Wassertiefe und Froude-Zahl ab (siehe auch Patt und Jüpner 2020). Sollte der Abflussquerschnitt zu gering sein, um den Abfluss eines Hochwassers abzuführen, wird das Wasser aufgestaut und es kommt je nach Form des Umlandes zum Umströmen oder sogar zum Überströmen der Brücken. Zusätzliche Verlegungen des Abflussquerschnitts durch Treibgut oder Geschiebe können bereits bei geringeren Wasserständen oder Froude-Zahlen zu einem Um- oder Überströmen der Brücke führen.

Im Zuge der Schadensanalyse wurden gerade in der Nähe der Brückenbauwerke starke Veränderungen des Umlandes durch Erosionsprozesse beobachtet. An einer Vielzahl von Brückenpfeilern kam es zur Kolkbildung und bei einigen Pfeilern durch die Unterspülung der Gründung auch zum Absinken. Auch die Widerlager vieler Brücken waren starken Belastungen ausgesetzt, wodurch diese freigelegt oder teilweise auch verschoben wurden. Dies zeigt, dass gerade an Brückenstandorten hohe Wasserstände und Fließgeschwindigkeiten erreicht wurden.

Mit Hilfe des hydrodynamischen-numerischen Programms HydroAS wurden im Nachgang des Hochwassers Berechnungen des Abflussgeschehens 2021 durchgeführt. Neben den geografischen Eingangsdaten, bereitgestellt durch das Landesamt für Umwelt Rheinland-Pfalz, dienten die Abflussberechnungen des Deutschen GeoForschungsZentrums als Randbedingungen für die Modellierung. Im Fokus lag hier die Auswirkung von Brückenbauwerken sowie Treibgutansammlungen auf das Flutgeschehen. Generell hängt der Einfluss einer Brücke auf einen möglichen Aufstau des Hochwassers stark von den angrenzenden Vorländern und beispielsweise angrenzender Bebauung ab. Nach den



■ **Abb. 10.2** Implementierung einer Verklauung der Brückenöffnung um 50 % (dargestellt in *braun*) gemessen von der Höhe der Öffnung in der numerischen Modellierung. (Eigene Abbildung)

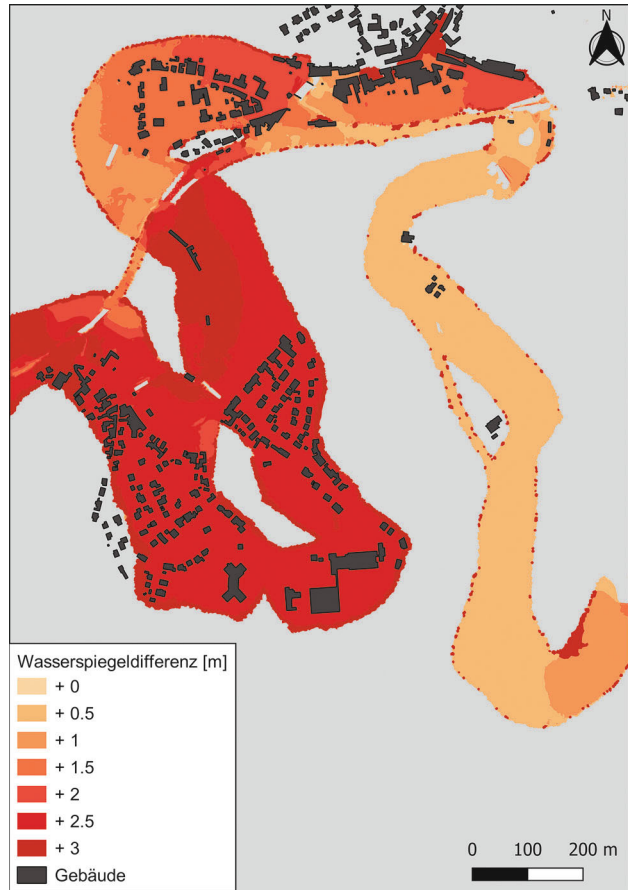
numerischen Berechnungen hat die bloße Anwesenheit einer Brücke im Stadtgebiet Bad Neuenahr-Ahrweiler je nach Umland von entweder kaum merklichen Veränderungen der Wasserspiegellage am Brückenstandort bis hin zu über einem Meter Aufstau geführt.

Allerdings wurden auch große Mengen an Treibgut besonders an Brücken beim Hochwasser 2021 beobachtet. Die Verlegung des Brückenquerschnitts durch Treibgut hat zusätzlich zu einer Reduktion des Abflussquerschnitts geführt und sich demnach auch stark auf die Wasserspiegellagen des Flutgeschehens ausgewirkt. Die genauen Treibgutmengen lassen sich nur schwer rekonstruieren und sind bis heute unbekannt. Eine Verklauung der Brückenöffnung wurde mit Hilfe der Software HydroAS durch Absenken des Brückenüberbaus (siehe ■ Abb. 10.2) um einen bestimmten Betrag dargestellt, da sich die Treibgutansammlungen, meist bestehend aus schwimmenden Materialien, von der Wasseroberfläche aus in Richtung Sohle ausbilden. Die Rekonstruktion des Abflussgeschehens 2021 mit Hilfe der numerischen Modellierung deutet jedoch darauf hin, dass eine Verlegung der Brückenöffnung von mehr als 50 % für die meisten Brücken nicht eingetreten sein wird. Mit steigendem Grad an Verklauung steigt auch der Einfluss des Brückenbauwerks auf Wasserstands- und Abflussbedingungen.

Unter der Annahme eines Verklauungsgrads von bis zu 50 % ergab sich im Modellgebiet Bad Neuenahr-Ahrweiler eine Erhöhung des Wasserstandes vor der Brücke um durchschnittlich 50 cm, maximal jedoch 1,16 m. Im oberstrom liegenden Gebiet Altenahr, das in einem engen Kerbtal ohne Retentionsflächen liegt, haben sich Treibgutansammlungen vor Brücken noch stärker ausgewirkt. Durch die Anwesenheit von Treibgut und einer schätzungsweise maximalen Verlegung des Brückenquerschnitts um 50 %, wurden Erhöhungen des Wasserstands um bis zu drei Meter berechnet (siehe ■ Abb. 10.3).

Neben den Auswirkungen auf den Wasserstand führt die Verengung des Fließquerschnitts zusätzlich zu einer Erhöhung der Fließgeschwindigkeiten innerhalb der Brückenöffnung und in unmittelbarer Nähe des Bauwerks sowie unterstrom der Brücke. Dies birgt zum einen eine Gefahr für Personen, aber auch für die Stabilität des Bauwerks. Durch erhöhte Sohlschubspannungen werden Erosionsprozesse in Gang gesetzt oder beschleunigt. Die Ansammlung von Treibgut begünstigt dies zusätzlich, kann Kolkbildung verstärken und durch erhöhte hydrostatische Kräfte die Stabilität des Bauwerks in Gefahr bringen. Im Zuge der Schadensanalyse wurde zudem festgestellt, dass auch die Treibgutansammlung von Form und Beschaffenheit des Umlands beeinflusst wird und nicht immer, wie

Abb. 10.3 Berechnung der Wasserspiegeldifferenzen in Altenahr für Berechnungsläufe mit und ohne Verkläunungen. (Eigene Abbildung)



oben angenommen, symmetrisch verlaufen muss. In Flusskurven lagert sich das Treibgut in der Außenkurve ab, was zu erhöhten Fließgeschwindigkeiten in der Innenkurve führt, wo häufig dann größere Schäden am Bauwerk und stärkere Erosionen des Umlandes beobachtet wurden.

Aufgrund der höheren Lasten durch steigende Wasserstände könnten einige Brücken vor Erreichen eines hohen Verkläunungsgrades schon versagt haben. Der Abriss von Brücken und den davor aufgestauten Treibgutansammlungen führt zur Ausbreitung von Schwallwellen, die durch höhere Fließgeschwindigkeiten und die Mitnahme von Treibgut ein hohes Schadenspotenzial bieten. Auch dies konnte mit Hilfe der Modellierung mit HydroAS untersucht werden. Durch den Abriss von Brückenbauwerken kam es zu einer Erhöhung der Fließgeschwindigkeiten um bis zu 2 m/s je nach Brückenstandort. Dies lässt sich aktuell nicht mit Messungen aus dem Hochwasserereignis belegen, Anwohnende berichteten jedoch, den Abriss und die Ausbreitung von Wellen durch das Tal beobachtet zu haben.

Abflussquerschnitt	Vergrößerter Abflussquerschnitt	Vertiefter Abflussquerschnitt	Mehr Raum für den Fluss	Niedrigwasserrinne
Deckwerk	Hubbrücke	Klappbrücke	Strömungsgünstiges Deckwerk	Keine Untergrüte
Pfeiler	Form 	Tiefengründung und Erosionsschutz	Vergrößerte Spannweite	Positionierung der Pfeiler
Dimensionierung	Zusätzliche Bemessungslasten	Verzicht auf Brücke oder Standortwechsel	Beachtung in Rettungsmaßnahmen	Beachtung in Überschwemmungskarten

■ **Abb. 10.4** Empfehlungen für den Wiederaufbau von Brücken. (Eigene Darstellung)

10.3 Empfehlungen für den Wiederaufbau

Aus den oben genannten Schadensbildern sowie Modellierungsergebnissen lassen sich bereits erste Empfehlungen für die Neuplanung der Brücken in den betroffenen Gebieten ableiten (siehe ■ Abb. 10.4).

Hinweis für Entscheidungsprozesse

Als wichtigster Aspekt kann die Größe der Brückenöffnung genannt werden, die möglichst groß und frei von Hindernissen gehalten werden sollte. Neben der Brückenhöhe, die oft durch Anschlusspunkte festgelegt wird, spielen auch Öffnungsbreite und Anzahl der Pfeiler eine Rolle. Die Öffnungsbreite sollte ebenso wie die Höhe möglichst groß gehalten werden, um zunächst einmal einen Aufstau durch den Brückenüberbau aber auch gleichzeitig die Ansammlung von Treibgut zu reduzieren. Besonders die Anzahl der Pfeiler im Flusslauf und damit die Öffnungsbreite wirken sich stark auf die Verklausungswahrscheinlichkeit aus (siehe auch Gschnitzer et al. 2017), weshalb die Pfeilerzahl möglichst gering gehalten werden sollte. Besonders in eng bebauten Gebieten, die kaum Möglichkeit zum schadfreien Umströmen der Brücke lassen, können sich Hub- oder Klappbrücken anbieten, um Wasser- und Treibgutmassen abführen zu können. Auch ein möglichst dünner, stromlinienförmiger Überbau der Brücke kann sich negativ auf die Verklausungswahrscheinlichkeit auswirken und Treibgutansammlungen sowie den Aufstau vor der Brücke reduzieren. Der Einbau von klappbaren Geländern, die ab bestimmten Lasten nachgeben oder manuell abgelegt werden können, sind empfehlenswert, um Treibgutansammlungen vor Brücken und so einen Aufstau an Brückenstandorten zu minimieren.

Im Planungsprozess von Brücken an kritischen Standorten, die bereits häufiger von Hochwassern betroffen waren oder durch enge Flusstäler gekennzeichnet sind, sollten zusätzliche Lasten durch Aufstau und Überströmen in der Brückenstatik berücksichtigt werden. Auch Anpralllasten durch Treibgut sowie höhere Drücke aufgrund einer Verlegung des Brückenquerschnitts können für diese Standorte eine relevante Rolle in der Bemessung spielen. Tiefengründungen an Pfeilern sowie Erosionsschutz sind wichtige Hilfsmittel, um die Stabilität des Bauwerks im Hochwasserfall zu unterstützen. Generell sollten Abfluss-

hindernisse in dicht bebauten Gebieten reduziert werden, um einen zusätzlichen Aufstau zu verhindern. Hier bietet sich beispielsweise die Zusammenlegung von Brücken unterschiedlicher Nutzung an. Zusätzlich kann durch Treibgutrechnen die Ansammlung von Schwemmholz und weiteren Treibgutbestandteilen gesteuert und beispielsweise bereits oberstrom der Ortschaft verhindert werden.

Im Zuge der Modellierung hat sich gezeigt, dass Brücken einen starken Einfluss auf das Abschlussgeschehen, Wasserstände und Fließgeschwindigkeiten im Hochwasserfall haben können. Dies sollte in zukünftigen Warnprozessen, beispielsweise in Hochwassergefahren- und -risikokarten, beachtet werden, um neben Anwohnenden auch das Rettungspersonal schützen zu können. Mit Hilfe von Modellierungen für kritische Brückenstandorte können Alarm- und Einsatzpläne präzisiert werden, da beispielsweise der Ausfall von wichtigen Verbindungsbrücken aufgrund von Überströmen ab einem gewissen Wasserstand eingeplant werden kann. Auch eine frühzeitige Warnung kann eine entscheidende Rolle spielen, um beispielsweise große Treibgutmengen von Campingplätzen zukünftig verhindern zu können. An besonders engen Brückenstandorten in dicht bebauten Gebieten und für Brücken, die häufig bei Hochwasser an- und überströmt werden, ist es empfehlenswert, einen möglichen Rückstau durch die Brücke, durch Verklausung sowie die Folgen eines Brückenabbrisses zu berechnen. Hierbei spielt auch die Qualität der Eingangsdaten, sowie die Annahme von Verklausungsszenarien für die Modellierung eine große Rolle, um die Abflussprozesse detailliert genug abbilden zu können.

10.4 Zusammenfassung

Das Hochwasser 2021 hat in Nordrhein-Westfalen und Rheinland-Pfalz zum Verlust einer Vielzahl von Brücken und damit dem Abriss der Verkehrsinfrastruktur geführt. Zudem haben sich die Bauwerke vor ihrem und durch ihr Versagen stark auf das Abflussgeschehen ausgewirkt. Besonders in dicht bebauten Gebieten kam es aufgrund der hohen Abflüsse und somit hohen Wasserstände in engen Flussquerschnitten bereits durch die Anwesenheit der Brückenbauwerke zu einem Aufstau der Wassermassen. Dies führte schnell zum Um- und Überströmen der Brücken und erhöhte somit die Lasten auf die Bauwerke. Gleichzeitig wurden Erosionsprozesse in Gang gesetzt, die Fundamente und Gründungen der Pfeiler sowie Widerlager von Brücken gefährdeten. Durch die Ansammlung von Treibgut wurden diese Effekte weiter verstärkt, Wasserstände unerwarteten Ausmaßes erreicht und ein Abriss der Bauwerke begünstigt. Der Abriss von bereits eingestauten Brückenbauwerken führte dann zur Ausbreitung von Schwallwellen, die durch ihre Fließgeschwindigkeit und das Mitreißen von Treibgut das Schadensausmaß erhöhten. Für die zukünftige Planung neuer Brückenbauwerke sollten demnach die Vielzahl an Lasten, die durch ein Hochwasser dieses Ausmaßes entstehen können, beachtet werden. Neben einer Vergrößerung des Abflussquerschnitts sollte auch der Treibgutrückhalt an besonders kritischen Brückenstandorten bedacht werden. Gleichzeitig sollte der Aufstau der Hochwasserwelle an Brückenbauwerken sowie das Um- und Überströmen dieser in Hochwassergefahren- sowie -risikokarten Beachtung finden, um Bevölkerung und Rettungskräfte besser schützen zu können. Durch einen hochwasserangepassten Neubau der Brücken kann auch im Hochwasserfall die Mobilität gewährleistet werden.

Zusammenfassung

- Das Hochwasser 2021 hat in Nordrhein-Westfalen und Rheinland-Pfalz zum Verlust einer Vielzahl von Brücken und damit dem Abriss der Verkehrsinfrastruktur geführt.
- Zudem haben sich die Bauwerke vor ihrem und durch ihr Versagen stark auf das Abflussgeschehen ausgewirkt.
- Der Abriss von bereits eingestauten Brückenbauwerken führte zur Ausbreitung von Schwallwellen, die durch ihre Fließgeschwindigkeit und das Mitreißen von Treibgut das Schadensausmaß erhöhten.
- Für die zukünftige Planung neuer Brückenbauwerke sollten demnach die Vielzahl an Lasten, die durch ein Hochwasser dieses Ausmaßes entstehen können, beachtet werden.
- Beim (Wieder-)Aufbau von Brückenbauwerken sollte neben einer Vergrößerung des Abflussquerschnitts auch der Treibgutrückhalt an besonders kritischen Brückenstandorten bedacht werden. Gleichzeitig sollte der Aufstau der Hochwasserwelle an Brückenbauwerken sowie das Um- und Überströmen dieser in Hochwassergefahren- sowie -risikokarten Beachtung finden, um Bevölkerung und Rettungskräfte besser schützen zu können. Durch einen hochwasserangepassten Neubau der Brücken kann auch im Hochwasserfall die Mobilität gewährleistet werden.

Danksagung Die Autorinnen und Autoren von ► Kap. 10 bedanken sich beim Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) und beim DLR Projektträger für die Unterstützung und Förderung des KAHR-Projekts. Diese Forschung wurde vom BMBF unter dem Förderkennzeichen 01LR2102A-M finanziert.

Literatur

- Burghardt L, Klopries E-M, Schüttrumpf H (2024) Structural damage, clogging, collapsing: analysis of the bridge damage at the rivers Ahr, Inde and Vicht caused by the flood of 2021. J Flood Risk Manag. <https://doi.org/10.1111/jfr3.13001>
- Deutsches Komitee Katastrophenvorsorge e. V. (DKKV) (2022) Die Flutkatastrophe im Juli 2021 in Deutschland. Ein Jahr danach: Aufarbeitung und erste Lehren für die Zukunft. DKKV-Schriftenreihe, Bd 62. DKKV, Bonn. Online verfügbar unter https://dkkv.org/wp-content/uploads/2023/02/DKKV__Schriftenreihe_Juli_2022__Webversion_-_2te_Version_August3.pdf
- Gschnitzer T, Gerns B, Mazzorana B, Aufleger M (2017) Towards a robust assessment of bridge clogging processes in flood risk management. Geomorphology. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2016.11.002>
- Krings S (Hrsg) (2020) 10 Jahre „KRITIS-Strategie“. Einblicke in die Umsetzung der Nationalen Strategie zum Schutz Kritischer Infrastrukturen. Deutschland. Stand: Februar 2020. Praxis im Bevölkerungsschutz, 21. Bundesamt für Bevölkerungsschutz und Katastrophenhilfe, Bonn
- Maiwald H, Schwarz J (2023) Ermittlung von Hochwasserschäden unter Berücksichtigung der Bauwerksverletzbarkeit. Erweitertes EDAC-Hochwasserschadensmodell, 2. Aufl. Bauhaus-Universitätsverlag Weimar, Ilmtal-Weinstraße
- Patt H, Jüpner R (2020) Hochwasser-Handbuch. Springer, Wiesbaden
- Pohl R (2015) Brücken aus der Sicht des Wasserbauers. Bautechnik 92(7):461–468. <https://doi.org/10.1002/bate.201500034>

Open Access Dieses Kapitel wird unter der Creative Commons Namensnennung 4.0 International Lizenz (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.de>) veröffentlicht, welche die Nutzung, Vervielfältigung, Bearbeitung, Verbreitung und Wiedergabe in jeglichem Medium und Format erlaubt, sofern Sie den/die ursprünglichen Autor(en) und die Quelle ordnungsgemäß nennen, einen Link zur Creative Commons Lizenz beifügen und angeben, ob Änderungen vorgenommen wurden.

Die in diesem Kapitel enthaltenen Bilder und sonstiges Drittmaterial unterliegen ebenfalls der genannten Creative Commons Lizenz, sofern sich aus der Abbildungslegende nichts anderes ergibt. Sofern das betreffende Material nicht unter der genannten Creative Commons Lizenz steht und die betreffende Handlung nicht nach gesetzlichen Vorschriften erlaubt ist, ist für die oben aufgeführten Weiterverwendungen des Materials die Einwilligung des jeweiligen Rechteinhabers einzuholen.

