
Analyse der Schäden an Brücken- und Ingenieur- bauwerken im Bundes- fernstraßennetz durch das Hochwasserereignis in NRW und RLP im Juli 2021

Fachveröffentlichung der
Bundesanstalt für
Straßenwesen

Analyse der Schäden an Brücken- und Ingenieurbauwerken im Bundesfernstraßennetz durch das Hochwasserereignis in NRW und RLP im Juli 2021

von

Karin Reißen, Joerg Gallwoszus, Hans-Peter Doser, Leony Scheper, Florian Hunecke, Lisa Jünger

Doser Kempen Krause Ingenieure GmbH, Aachen

Impressum

Fachveröffentlichung zu Forschungsprojekt: 15.0698
Analyse der Schäden an Brücken- und Ingenieurbauwerken im Bundesfernstraßennetz durch das Hochwasserereignis in NRW und RLP im Juli 2021

Fachbetreuung:
Daniel Eickmeier, Iris Vivien Dahms

Referat:
Grundsatzfragen der Bauwerkserhaltung

Herausgeber:
Bundesanstalt für Straßenwesen
Brüderstraße 53, D-51427 Bergisch Gladbach
Telefon: (0 22 04) 43 - 0

<https://doi.org/10.60850/FV-B-15.0698>

Bergisch Gladbach, Juli 2024

Zu diesem Forschungsprojekt werden nur die Kurzfassung und der Kurzbericht veröffentlicht. Die Langfassung des Schlussberichts kann auf Anfrage an verlag@bast.de zur Verfügung gestellt werden.

Es wird darauf hingewiesen, dass die unter dem Namen der Verfasser veröffentlichten Berichte nicht in jedem Fall die Ansicht des Herausgebers wiedergeben. Nachdruck und photomechanische Wiedergabe, auch auszugsweise, nur mit Genehmigung der Bundesanstalt für Straßenwesen, Stabsstelle Presse und Kommunikation.

Kurzfassung

Analyse der Schäden an Brücken- und Ingenieurbauwerken im Bundesfernstraßennetz durch das Hochwasserereignis in NRW und RLP im Juli 2021

Seit einigen Jahrzehnten nehmen Naturkatastrophen wie Starkregenereignisse und daraus folgende Flusshochwasser zu. Das Hochwasserereignis im Juli 2021 mit seinen teils verheerenden Folgen bekräftigt die Notwendigkeit einer umfassenden Hochwasservorsorge. Teil des Hochwasserrisikomanagements ist die hochwasserangepasste Planung und Instandsetzung bzw. Verstärkung von Brücken- und Ingenieurbauwerken in überschwemmungsgefährdeten Gebieten. Hierdurch können negative Auswirkungen zukünftiger Hochwasserereignisse auf die Funktions- und Leistungsfähigkeit der Bauwerke deutlich reduziert oder vermieden werden, sodass insgesamt die Funktionsfähigkeit des Straßennetzes auch im Falle von extremen Hochwasserereignissen erhalten bleibt.

Infolge des erhöhten Abflusses bei einem Flusshochwasser kann es an Brücken- und Ingenieurbauwerken zu verschiedenen sogenannten lokalen Phänomenen kommen, wie Auskolkungen und Längserosion, Anprall und Verklausung sowie Überströmung bzw. Überschwemmung. Basierend auf einer umfassenden Literaturrecherche werden die Hintergründe, Abläufe und Zusammenhänge der lokalen Phänomene erläutert und mögliche Maßnahmen zur Vermeidung der Phänomene und deren Folgeschäden aus bestehenden Richtlinien und Regelungen sowie dem Stand der Wissenschaft zum hochwasserangepassten Bauen aufgezeigt.

Im Rahmen des Forschungsprojektes wurden die im Zuge des Hochwasserereignisses 2021 eingetretenen Schäden an Brücken und sonstigen Ingenieurbauwerken, wie z.B. Stützbauwerke und Tunnel, gesammelt und ausgewertet. Es wurden insgesamt 153 Bauwerke, davon 113 Brücken, 26 Stützbauwerke und 14 Tunnel / Trogbauwerke für die Aufnahme und Auswertung in der Datenbank ausgewählt. Durch die Kategorisierung der erfassten Schäden in Verbindung mit den bauwerksspezifischen Konstruktionsdetails können konstruktive oder materialtechnische Schwachstellen erkannt sowie Ursachen und Wirkmechanismen herausgearbeitet werden. Bei der Datenbankauswertung werden zudem die im Rahmen der Literaturrecherche gewonnenen Erkenntnisse zu Gestaltungsgrundsätzen und zusätzlichen baulichen Maßnahmen auf ihre Umsetzung und Wirkung geprüft, sowie Zusammenhänge, Wirkungsketten und Schadensauswirkungen auf die Standsicherheit, Verkehrssicherheit und Dauerhaftigkeit herausgearbeitet. Ausgewählte repräsentative Schadensbeispiele werden schließlich im Rahmen der Erfahrungssammlung „Hochwasserschäden an Brücken- und Ingenieurbauwerken“ vorgestellt.

Die schwerwiegendsten Schäden mit Einfluss auf die Standsicherheit traten im Zusammenhang mit Auskolkungen bzw. Längserosion auf. Durch eine Bemessung der Gründung unterhalb der maximalen Kolkentiefe kann in vielen Fällen zukünftig die Standsicherheit auch bei extremen Hochwasserereignissen sichergestellt werden. Zudem sollten zusätzliche Kolkenschutzmaßnahmen an kolkgefährdeten Bauwerken vorgesehen werden.

Die Analyse der Schäden an Brücken- und Ingenieurbauwerken zeigt, dass viele Bauwerke nicht ausreichend für den Hochwasserabfluss 2021 und voraussichtlich auch nicht für kommende Hochwasserabflüsse bemessen und dimensioniert sind. Um bestehende Bauwerke für den Hochwasserfall zu verstärken, Neubauten hochwasserangepasst zu planen und gleichzeitig Kosten und Verkehrsbehinderungen zu minimieren, sollte ein Leitwerk mit umfassenden Empfehlungen für hochwasserresiliente Bauweisen von Ingenieurbauwerken und gezielten Maßnahmenempfehlungen erarbeitet werden. Der vorliegende Bericht liefert einen wichtigen Beitrag hierzu.

Aufbauend auf den Erkenntnissen aus dem Stand der Wissenschaft und Technik und der Datenbankauswertung wird ein Vorschlag für ein Ablaufschema zur hochwasserangepassten Planung und Bemessung neuer Bauwerke sowie für die Planung von Schutzmaßnahmen zur Ertüchtigung bestehender Bauwerke vorgestellt. Hierbei werden Vorschläge für die einzelnen Planungsschritte erläutert sowie offene Punkte aufgezeigt.

Abstract

Analysis of damages to bridges and engineering structures in the federal trunk road network caused by the flood event in NRW and RLP in July 2021

For several decades, the number of natural disasters such as extreme rainfall events and resulting riverine floods has been increasing. The flood event in July 2021 with its partly disastrous consequences highlights the necessity of comprehensive flood prevention. Part of flood risk management is a flood-adapted planning, repair and strengthening of bridges and engineering structures in flood-prone areas. By this, negative effects of future flood events on the function and performance of bridges and engineering structures can be significantly reduced or avoided, to maintain the overall functionality of the road network even in case of extreme flood events.

As a result of the increased flood drain during a riverine flood, various so-called local phenomena can occur at bridges and engineering structures, such as scouring and parallel erosion, ramming and log jam as well as overtopping or flooding. Based on a comprehensive literature research, the background, processes and correlations of the local phenomena are explained and possible measures from existing guidelines and regulations as well as the state of science on flood-adapted construction to avoid the phenomena and their consequential damages are presented.

Within the research project, the damages due to the 2021 flood event to bridges and other engineering structures, such as retaining structures and tunnels, were collected and evaluated. A total of 153 structures, including 113 bridges, 26 retaining structures and 14 tunnels / trough structures, were selected for consideration and evaluation in the database. By categorizing the recorded damages in connection with the structure-specific design details, structural or material-technical weak points, causes and mechanisms of action can be identified. During the database evaluation, the insights gained from the literature research on design principles and additional constructive measures are examined regarding their implementation and effectiveness, and correlations, chains of effects and damage impacts on stability, traffic safety and durability are elaborated. Finally, a selected range of damage examples is presented in the collection of experiences "Flood damages to bridges and engineering structures".

The most serious damages that affected stability were related to scouring and longitudinal erosion. By designing the foundation below the maximum scour depth, in many cases the stability can be ensured in the future, even during extreme flood events. Furthermore, additional scour protection measures should be provided for scour-prone structures.

The analysis of damages to bridge and engineering structures clearly shows that many structures were not sufficiently designed and dimensioned for the flood drain of 2021 and probably also not for future flood drains. To strengthen existing structures for the event of flooding, to plan new structures to be compatible with floods and at the same time to minimize costs and traffic disruptions, a guideline with comprehensive recommendations for flood-resistant construction methods of engineering structures and specific recommendations for measures should be developed. This report makes an important contribution to this regard. Based on the knowledge gained from the current state of science and technology and the evaluation of the database, a proposal is presented for a flow chart for the flood-adapted planning and dimensioning of new structures as well as for the planning of protective measures for the retrofitting of existing structures. Proposals for the individual planning steps are explained and open points are presented.

Kurzbericht

Analyse der Schäden an Brücken- und Ingenieurbauwerken im Bundesfernstraßennetz durch das Hochwasserereignis in NRW und RLP im Juli 2021

1 Veranlassung, Zielsetzung und Vorgehen

Seit einigen Jahrzehnten nehmen Naturkatastrophen wie Starkregenereignisse und daraus folgende Flusshochwasser deutlich zu. Das Hochwasserereignis im Juli 2021 mit seinen teils verheerenden Folgen bekräftigt die Notwendigkeit einer umfassenden Hochwasservorsorge. Teil des Hochwasserrisikomanagements ist die hochwasserangepasste Planung und Instandsetzung bzw. Verstärkung von Brücken- und Ingenieurbauwerken in überschwemmungsgefährdeten Gebieten. Hierdurch können negative Auswirkungen zukünftiger Hochwasserereignisse auf die Funktions- und Leistungsfähigkeit der Bauwerke deutlich reduziert oder vermieden werden, so dass damit insgesamt die Funktionsfähigkeit des Straßennetzes auch im Falle von extremen Hochwasserereignissen erhalten bleibt.

Im Rahmen des Forschungsprojektes wurden die im Zuge des Hochwasserereignisses 2021 eingetretenen Schäden an Brücken und sonstigen Ingenieurbauwerken, wie z.B. Stützbauwerke und Tunnel, gesammelt und ausgewertet. Durch die Kategorisierung der erfassten Schäden in Verbindung mit den bauwerksspezifischen Konstruktionsdetails können konstruktive oder materialtechnische Schwachstellen erkannt und Ursachen und Wirkmechanismen herausgearbeitet werden. Eine umfassende Literaturrecherche zu bestehenden Richtlinien und Regelungen zu hochwasserangepassten Gestaltungsgrundsätzen und zusätzlichen baulichen Maßnahmen sowie die durch die Datenbank geschaffene Datenbasis bilden die Grundlage für die Entwicklung neuer Planungshilfen für eine hochwasserangepasste Konstruktion und Bemessung neuer Bauwerke sowie für die Planung von Schutzmaßnahmen zur Ertüchtigung bestehender Bauwerke.

2 Hochwasserschäden und deren Vermeidung

2.1 Übersicht

Ursache für die Schäden an Brücken- und Ingenieurbauwerken im Zuge des Hochwasserereignisses im Juli 2021 waren Hochwasser an Flüssen und Bächen. Bild 1 gibt eine Übersicht über den Ablauf eines Flusshochwassers und die grundlegenden Zusammenhänge. Durch den erhöhten Abfluss im Zuge eines Starkregenereignisses kommt es zu höheren Fließgeschwindigkeiten, vermehrtem Treibguteintrag und hohen Pegelständen. Übergeordnete Maßnahmen zur Verringerung des Hochwasserrisikos ist die Rückhaltung von Hochwasserabflüssen durch die Schaffung von Retentionsräumen und die Verringerung des Treibguteintrags durch eine entsprechende Gewässerunterhaltung und Forstwirtschaft in angrenzenden Gebieten.

An den Ingenieurbauwerken kommt es bei einem Flusshochwasser infolge des erhöhten Abflusses zu verschiedenen sogenannten lokalen Phänomenen, wie Auskolkungen und Längserosion, Anprall und Verklausung sowie Überströmung bzw. Überschwemmung (Bild 1). Nachfolgend werden jeweils die Abläufe und Hintergründe der lokalen Phänomene kurz erläutert, die wesentlichen entstandenen Schäden an Brücken- und Ingenieurbauwerken infolge des Hochwasserereignisses 2021 vorgestellt und mögliche Maßnahmen zur Vermeidung der Phänomene und deren Folgeschäden aufgezeigt.

Es wurden insgesamt 153 Bauwerke, davon 113 Brücken, 26 Stützbauwerke und 14 Tunnel / Trogbauwerke für die Aufnahme und Auswertung in der Datenbank ausgewählt. Hierbei wurde auf eine breite Streuung bezüglich der Lage, dem Bauwerkstyp, der Materialität und der

betroffenen Bauteile geachtet. Bei der Datenbankauswertung werden die im Rahmen der Literaturrecherche gewonnenen Erkenntnisse zu Gestaltungsgrundsätzen (hauptsächlich aus den erst kürzlich aktualisierten Regelwerken DIN 19661 (Entwurf 2022) und RE-ING (2022)) und zusätzlichen baulichen Maßnahmen auf ihre Umsetzung und Wirkung geprüft, sowie Zusammenhänge, Wirkungsketten und Schadensauswirkungen auf die Standsicherheit, Verkehrssicherheit und Dauerhaftigkeit herausgearbeitet.

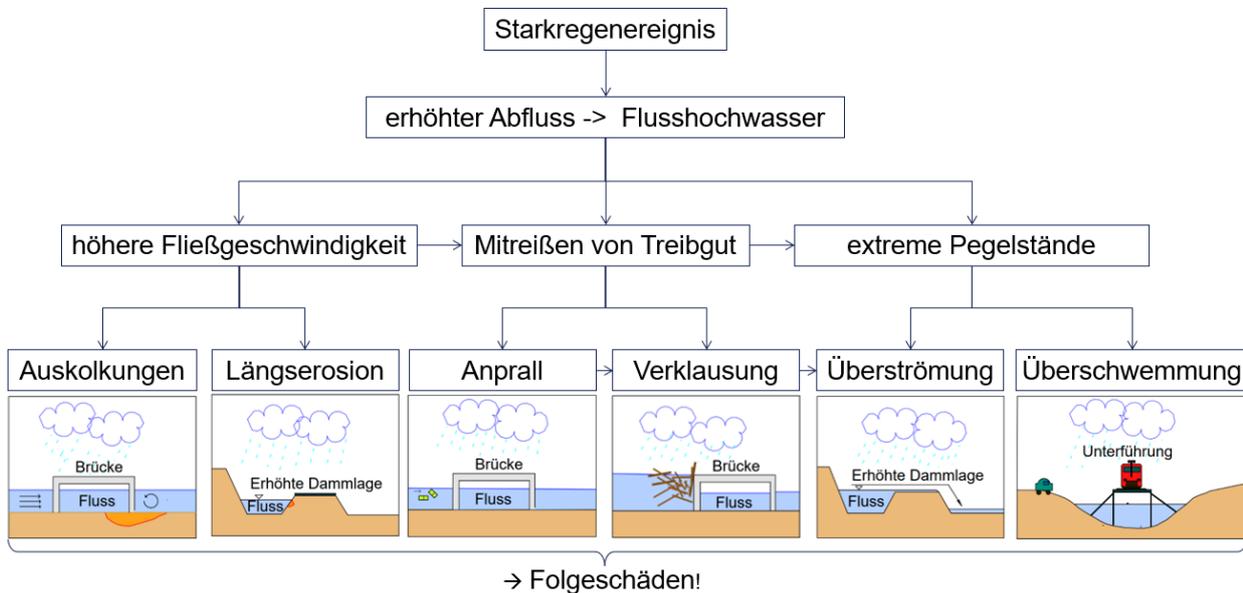


Bild 1: Ablaufschema für ein Flusshochwasser und Auswirkungen auf Ingenieurbauwerke

2.2 Auskolkung / Längserosion

Infolge des erhöhten Abflusses kommt es zu höheren Fließgeschwindigkeiten. Diese haben zur Folge, dass Sedimente und das Gelände an den Fundamenten von Pfeilern und Widerlagern ausgespült werden können. Durch den Bodenabtrag entlang des Flussufers entstehen Längserosionen z.B. an Dämmen und den Fundamenten von Längsbauwerken wie Stützmauern. Die oft schwerwiegenden Folgeschäden reichen vom Kippen oder Absacken eines Bauteils bis zum Verlust der Lagesicherheit (z.B. von Flusspfeilern) und dadurch zum Verlust der Gesamttragfähigkeit des Bauwerks.

Zur Verringerung der Kolkgefahr können schon bei der Lage und Ausrichtung des Bauwerks und dem Bauwerksentwurf folgende Grundsätze einbezogen werden:

- Möglichst Lage in geraden Flussabschnitten (sonst erhöhte Kolkgefahr am Prallhang) und möglichst nicht an Engstellen (höhere Fließgeschwindigkeit)
- Ausbildung von (mind. 5 m breiten) Gewässerrandstreifen (zurückgesetzte Widerlager)
- Widerlagerwand senkrecht oder Neigung an Böschung angepasst (strömungsgünstig)
- Kanten der Widerlager abrunden oder umgelegte (und entsprechend anschließender Böschung geneigte) Flügelwände am Übergang zur Böschung (strömungsgünstig)
- Durchflussquerschnitt freihalten, möglichst auf Pfeiler verzichten
- Falls Pfeiler notwendig werden:
 - Anordnung möglichst außerhalb des Mittelwasserstandes; bei erforderlicher Anordnung im Gewässer: nicht im Stromstrich (maximale Fließgeschwindigkeit)
 - strömungsgünstiger Grundriss (z.B. rund / ellipsenförmig / sechseckig) und Ausrichtung in Strömungsrichtung

- vertikal gerade oder mit leichter Aufweitung zum Fußpunkt hin (günstiger Einfluss auf die Kolkentiefe)

Als wichtigster Grundsatz zur Sicherstellung der Tragfähigkeit ist die Gründung stets ausreichend tief unter der maximalen Kolkentiefe für das Bemessungshochwasser zu bemessen. Bei der nachträglichen Verstärkung von Stützmauern im Bestand kann eine Rückverankerung zur Lagesicherung der Wand sinnvoll sein.

Zudem sollten zur Erhöhung der Dauerhaftigkeit und zur Verhinderung oder Verminderung von Auskolkungen zusätzliche Kolkenschutzmaßnahmen an kolkgefährdeten Bauwerken vorgesehen werden. Gebundener Kolkenschutz blieb nach dem Hochwasser oft (schollenweise) erhalten, wurde jedoch teils großflächig unterspült. Daher sollte zukünftig ungebundener Kolkenschutz (z.B. aus möglichst großen Wasserbausteinen) bevorzugt werden. Aus der Auswertung einzelner Beispiele können als weitere wirksame Kolkenschutzmaßnahmen Wasserbausteine in Drahtgitterkörben oder die Sicherung der Gründung durch einen Spundwandkasten empfohlen werden.

2.3 Anprall

Durch den hohen Wasserstand und die hohe Fließgeschwindigkeit in extremen Hochwasserereignissen wird viel loses Material, wie z.B. Holz oder Geröll mitgerissen. An Brückenbauwerken oder Stützbauwerken ist je nach Pegelstand der Zusammenstoß dieses Materials mit den Brückenpfeilern, Überbauten oder anderen Bauwerksteilen möglich. Dieser Anprall führt neben (kleineren) direkten Schäden am Bauwerk (z.B. Betonabplatzungen) insbesondere bei leichten Fuß- und Radwegbrücken im schlimmsten Fall zum Lageverlust oder Versagen des Bauwerks.

Zu den übergeordneten Entwurfgrundsätzen zur Verringerung der Gefahr des Treibgutpralls, der Verklausung und der Überströmung ist die Schaffung eines möglichst großen Durchflussquerschnittes durch Maximierung des Freibords (i.d.R. Mindestfreibord 0,5 m, ggfs. Festlegung eines erhöhten Freibords von ≥ 1 m) und der Ausbildung von Gewässerrandstreifen. Bei der Bemessung des Bauwerks und der Lagerung sollte zukünftig auch bei nicht schiffbaren Gewässern ein Anprall als außergewöhnlicher Lastfall berücksichtigt werden.

2.4 Verklausung

Treibgut kann sich (z.B. nach einem Anprall) am oder unter dem Bauwerk ansammeln und so den Gewässerquerschnitt teilweise oder vollständig verschließen. Als Folge kommt es infolge des Aufstauens des Wassers zu einem erhöhten Staudruck am Bauwerk oder dem betroffenen Bauteil, der zukünftig in der Bemessung des Bauwerks und der Lagerung als außergewöhnlicher Lastfall berücksichtigt werden sollte.

Neben den häufig aufgetretenen direkten Schäden an Ausbauten wie Leitungen, Geländern und Brüstungsmauern wird durch eine Verklausung die Überströmung des Bauwerks begünstigt. Vor allem bei leichten Überbauten hat dies in einzelnen Fällen zum Lageverlust des Bauwerks geführt bzw. dazu beigetragen. Zudem wird durch die Verringerung des Durchflussquerschnitts die Fließgeschwindigkeit erhöht, wodurch wiederum Auskolkungen begünstigt werden.

Zur Verhinderung oder Verminderung von Verklausungen kann neben Berücksichtigung der zuvor beschriebenen allgemeinen Gestaltungsgrundsätze auf eine möglichst (über-)strömungsgünstige und verklausungsunempfindliche Ausbildung des Bauwerks geachtet werden. Günstig sind hierbei schlanke, geschlossene Querschnitte möglichst mit abgerundeter oder gevouteter Überbauunterkante (z.B. Spannbetonplatten). Gegebenenfalls kann zudem durch eine angepasste Geländer- und Kappengeometrie die Verklausungsgefahr reduziert werden. Ungünstig hingegen sind offene Querschnitte (z.B. Verbundbrücken mit offenen Trägern), Fachwerkbrücken oder Bogen- oder Schrägseilbrücken mit abgehängter Fahrbahn, da sich hier potenziell vermehrt Treibgut verfangen kann.

2.5 Überströmung / Überschwemmung

Durch den erhöhten Abfluss hervorgerufene extreme Pegelstände können (oft zusätzlich begünstigt durch eine Verkläuserung) zu einer An- oder Überströmung des Bauwerks oder des umliegenden Geländes führen. Steigt der Pegel bei einer Überströmung über die Bauwerksoberkante, führt dies unter anderem zu einer temporären Nutzungseinschränkung von Straßen und Brücken und den bereits genannten Folgeschäden im Zusammenhang mit Anprall und Verkläuserung. Becken-, Trog- und Tunnelbauwerke, deren Abflusssystem überlastet ist, werden überschwemmt, was auch bei diesen Bauwerken vorübergehend zur eingeschränkten Verkehrssicherheit, sowie selten zu weiteren Folgeschäden am Bauwerk, jedoch häufig zu Schäden an der Betriebstechnik geführt hat.

Neben der Berücksichtigung eines Lastansatzes für eine An- bzw. Überströmung sollte bei überströmungsgefährdeten Bauwerken auf eine hochwasserresiliente, robuste Bauweise geachtet werden. Während Steinbogen- und Gewölbebrücken tendenziell durch größere Bauteilflächen mehr Angriffsfläche für An- oder Überströmungen aufweisen, weisen Rahmenbrücken oder semi-integrale Bauweisen durch die monolithische Verbindung von Über- und Unterbau keine Lager als Schwachstelle oder begünstigenden Faktor für Treibgutablagerungen auf. Vorgespannte Plattenbrücken ermöglichen durch ihre geringe Überbauhöhe größere Freiborde und bieten eine kleinere Angriffsfläche bei einer Anströmung als z.B. Plattenbalken oder Verbundbauwerke.

Sollten bei überschwemmungsgefährdeten Bestandsbauwerken Kappen (nach alter Bauart) lediglich über eine Schubaukantung in ihrer Lage gesichert sein, sollte eine Kappenverankerung nach aktueller Richtzeichnung oder eine nachträgliche Kappenverankerung ergänzt werden. Hierdurch kann ein Lageverlust der Kappe bei Überströmung, wie er in Einzelfällen auftrat, verhindert werden.

Ein entscheidendes Problem bei der Hochwasserkatastrophe im Jahr 2021 bestand darin, dass insbesondere an Flussquerungen die Telekommunikation sowie die Strom- und Wärmeversorgung häufig auf einzelne Versorgungsleitungen angewiesen war. Beim Versagen der Brückenbauwerke fielen auch die entlang der Brücken verlegten Versorgungsleitungen aus, was zu schwerwiegenden Kaskadeneffekten auch für die umliegenden Bereiche führte. Daher sollte in hochwassergefährdeten Gebieten nach Möglichkeit auf eine Montage von Versorgungsleitungen an Brückenbauwerken verzichtet und die Ausführung von gedückerten Leitungen bevorzugt werden.

3 Vorschläge zur hochwasserangepassten Planung von Ingenieurbauwerken

Bei der Auswertung der Schadensbeispiele wird deutlich, dass viele Bauwerke nicht ausreichend für den Hochwasserabfluss 2021 und voraussichtlich auch nicht für kommende Hochwasserabflüsse bemessen und dimensioniert sind. Um bestehende Bauwerke für den Hochwasserfall zu verstärken, Neubauten hochwasserangepasst zu planen und gleichzeitig Kosten und Verkehrsbehinderungen zu minimieren, sollte ein Leitwerk mit umfassenden Empfehlungen für hochwasserresiliente Bauweisen von Ingenieurbauwerken und gezielten Maßnahmenempfehlungen erarbeitet werden. Der vorliegende Bericht liefert einen wichtigen Beitrag hierzu. Aufbauend auf den Erkenntnissen aus dem Stand der Wissenschaft und Technik und der Datenbankauswertung wird ein Vorschlag für ein Ablaufschema zur hochwasserangepassten Planung und Bemessung von Ingenieurbauwerken vorgestellt. Hierbei werden Vorschläge für die folgenden einzelnen Planungsschritte sowie offene Punkte aufgezeigt:

- Über eine grundsätzliche Einstufung des Hochwasserrisikos über Hochwassergefahrenkarten wird zunächst festgelegt, ob für das betrachtete Bauwerk eine hochwasserangepasste Planung verfolgt werden muss.

- Die Risikobewertung mittels der hierfür entwickelten RAINEX-Methode ermöglicht die Bewertung der Exposition und Vulnerabilität für die einzelnen möglicherweise auftretenden lokalen Phänomene.
- Die Risikobewertung der lokalen Phänomene ist abhängig von den Planungsrandbedingungen wie den Eigenschaften des anstehenden Bodens (Kolkgefahr), der Trassenführung (Lage am Flusslauf) und der im Zuge des Entwurfs zu definierenden bauwerksspezifischen Merkmale wie der Freibordhöhe bzw. des Durchflussquerschnitts, der Pfeileranordnung und der verwendeten Baustoffe. Abhängig von den äußeren Planungsrandbedingungen werden Empfehlungen für resultierende Gestaltungsgrundsätze gegeben.
- Zusätzlich sind für die Risikobewertung der lokalen Phänomene hydraulische Parameter wie Hochwasserabfluss, Wasserstand / Freibordhöhe und Fließgeschwindigkeit sowie nach Möglichkeit der voraussichtliche Treibgutanteil von Bedeutung.
- Einfluss auf die hydraulischen Berechnungen haben gegebenenfalls vorhandene zusätzliche Maßnahmen, wie Hochwasserschutzanlagen oder Retentionsräume, Maßnahmen zum Treibgutrückhalt (V-Rechen) oder sonstige Maßnahmen der Gewässerunterhaltung.
- Entsprechend der Risikobewertung für verschiedene lokale Phänomene können angepasste Entwurfsgrundsätze zur Verhinderung oder Verminderung der Auswirkung der lokalen Phänomene ausgewählt werden.
- Bei der Bemessung (und Nachrechnung) von hochwassergefährdeten Bauwerken sollten für den Hochwasserfall in der außergewöhnlichen Bemessungssituation je nach Randbedingungen und Risiko für die lokalen Phänomene Lastfälle für Treibgutprall, An- und Überströmung sowie Staudruck infolge Verkläuerung berücksichtigt werden. Zudem sollte bei kolkgefährdeten Bauwerken die Gründung unterhalb der maximalen Kolkentiefe erfolgen und durch einen Kolkschutz geschützt werden.

4 Erfahrungssammlung „Hochwasserschäden an Brücken- und Ingenieurbauwerken“

Repräsentative Schadensbeispiele werden in Form von Steckbriefen zu einer Erfahrungssammlung „Hochwasserschäden an Brücken- und Ingenieurbauwerken“ zusammengefasst. Neben den Bauwerksdaten und allgemeinen Angaben zum Schadenfall wird jeweils eine Beschreibung der Schäden und der möglichen Schadensursachen, Wirkmechanismen und konstruktiven, materialtechnischen oder betriebstechnischen Schwachstellen vorgestellt. Zudem werden – soweit bekannt – die Maßnahmen zur Schadensbeseitigung erläutert und mögliche Schlussfolgerungen für eine hochwasserresilientere Bauweise aufgezeigt. Die Erläuterungen werden hierbei jeweils durch aussagekräftige Bilder und Bauwerksskizzen ergänzt. Insgesamt leistet die Aufarbeitung und Analyse der Schäden einen wichtigen Beitrag für die Entwicklung einer hochwasserangepassten Planung und Bemessung von Brücken- und Ingenieurbauwerken.

Danksagung

An dieser Stelle wird der Bundesanstalt für Straßenwesen für die Beauftragung des Projektes und den Mitgliedern des Betreuungsausschusses für die fruchtbaren Diskussionen gedankt. Weiterhin ist den Mitarbeitern der Straßenbauverwaltungen, die die Unterlagen zu den Schadensbeispielen zur Verfügung gestellt haben und bei Rückfragen gerne zur Verfügung standen, zu danken.

Summary

Analysis of damages to bridges and engineering structures in the federal trunk road network caused by the flood event in NRW and RLP in July 2021

1 Inducement, aims and procedure

For several decades, the number of natural disasters such as extreme rainfall events and resulting riverine floods has been significantly increasing. The flood event in July 2021 with its partly disastrous consequences highlights the necessity of comprehensive flood prevention. Part of flood risk management is a flood-adapted planning, repair and strengthening of bridges and engineering structures in flood-prone areas. By this, negative effects of future flood events on the function and performance of bridges and engineering structures can be significantly reduced or avoided, to maintain the overall functionality of the road network even in case of extreme flood events.

Within the research project, the damages due to the 2021 flood event to bridges and other engineering structures, such as retaining structures and tunnels, were collected and evaluated. By categorizing the recorded damages in connection with the structure-specific design details, structural or material-technical weak points, causes and mechanisms of action can be identified. A comprehensive literature research on existing guidelines and regulations for flood-adapted design principles and additional constructive measures as well as the evaluation of the database aim to contribute to the development of new planning tools for flood-adapted construction and design of new structures as well as for the planning of protective measures for the retrofitting of existing structures.

2 Flood damages and their prevention

2.1 Overview

The damage to bridges and engineering structures in the flood event of July 2021 was caused by floods on rivers and streams. Figure 1 gives an overview of the process of a riverine flood and the basic correlations. The increased flood drain during an extreme rainfall event leads to higher flow velocities, increased entrainment of flotsam and higher water levels. Higher-level measures to reduce flood risk are the prevention of flood drains by creating retention areas and the reduction of log jam input through appropriate waterway maintenance and forestry in neighboring areas.

In the event of a riverine flood, various so-called local phenomena occur at engineering structures as a result of the increased flood drain, such as scouring and parallel erosion, ramming and log jam, as well as overtopping or overflowing (Figure 1). A brief explanation of the processes and backgrounds of the local phenomena is given below, as well as the main damages caused to bridges and engineering structures because of the 2021 flood event are presented, and possible measures to prevent the phenomena and their resulting damages are described.

A total of 153 structures, including 113 bridges, 26 retaining structures and 14 tunnels / trough structures, were selected for consideration and evaluation in the database. A broad range regarding the location, the type of structure, the materials and the affected components was considered. During the database evaluation, the insights gained from the literature research on design principles (mainly from the recently updated regulations DIN 19661 (draft 2022) and RE-ING (2022)) and additional structural measures are examined regarding their implementation and effectiveness, and correlations, chains of effects and damage impacts on stability, traffic safety and durability are elaborated.

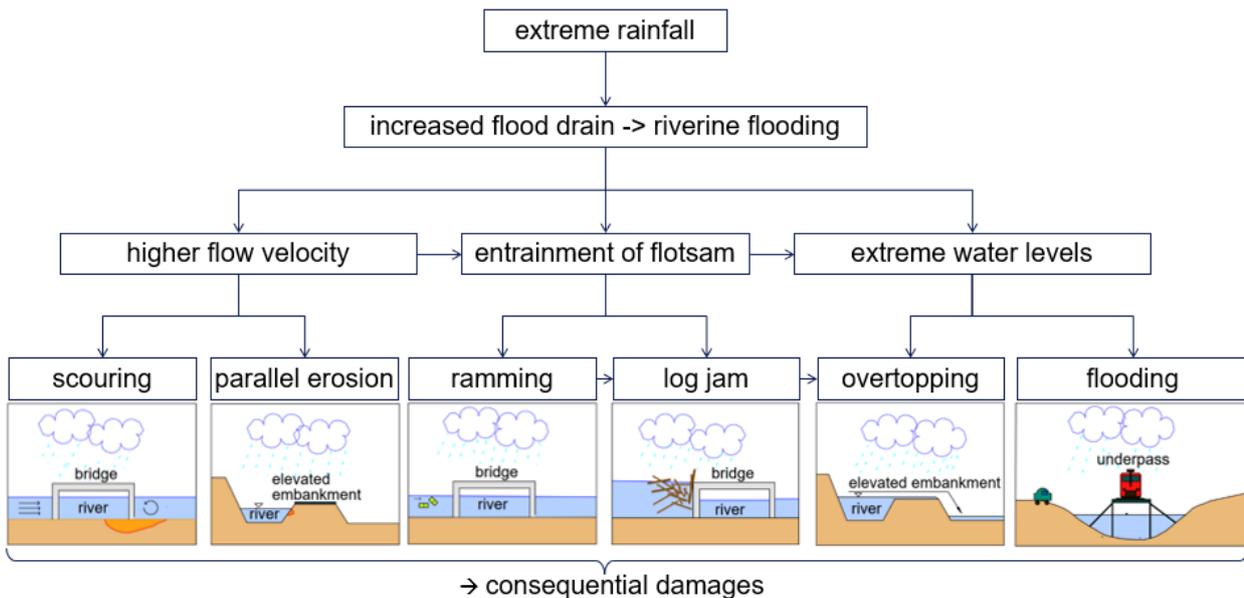


Figure 1: Flow chart for a riverine flood and effects on engineering structures

2.2 Scouring / parallel erosion

As a result of the increased flood drain, higher flow velocities occur, which lead to a washout of sediments and the soil around the foundations of piers and abutments. The removal of soil along the riverbank causes parallel erosion, e.g. at dams and foundations of longitudinal structures such as retaining walls. The resulting damages have often serious impact on the stability and range from tilting or sagging of a structural element to the total loss of stability (e.g. of river piers) and thus to loss of the overall load-bearing capacity of the structure.

To reduce the risk of scouring, the following principles concerning the location and orientation of the structure and the overall structure design can be incorporated in early design phases:

- If possible, position in straight sections of the river (otherwise increased risk of scouring on the impact slope) and not at narrow points (higher flow velocity)
- Consideration of (at least 5 m wide) watercourse margins (set-back abutments)
- Abutment wall perpendicular or inclination adapted to embankment (streamlined)
- Rounded edges of the abutments or inclined abutment walls in top view and side view (according to the connecting embankment) at the transition to the embankment (streamlined).
- Keep flow cross-section free, avoid piers if possible.
- If piers are necessary:
 - Positioning outside the mean water level if possible; if positioning in the water is necessary: not in the flow stream (maximum flow velocity)
 - streamlined layout (e.g. round / elliptical / hexagonal) and orientation in flow direction
 - vertically straight or with slight widening towards the base (favourable influence on scour depth)

As the most important principle for ensuring structural stability, the foundation should always be designed sufficiently deep under the maximum scour depth according to the dimensioned flood. As strengthening measures for retaining walls, it may be advisable to use grouted anchors to stabilize the position of the wall.

Furthermore, to increase durability and prevent or reduce scouring, additional scour protection measures should be provided for scour-prone structures. Bonded scour protections often were

hollowed and remained clod-like after the flood. Therefore, unbonded scouring protection (e.g. using large format riprap) should be preferred in the future. From the evaluation of individual examples, armourstones in wire mesh baskets or securing the foundation with a sheet pile box can be recommended as further effective scouring protection measures.

2.3 Ramming

Due to the high water level and the high flow velocity in extreme flood events, a lot of loose material, such as wood or debris, is carried along. According to the water level, the collision of this material with the bridge piers, superstructures or other parts of the structure is possible. In addition to (minor) direct damages to the structure (e.g. concrete spalling), this collision leads in the worst case to loss of position or failure of the structure, especially in the case of lightweight pedestrian and cycle bridges.

One of the primary design principles to reduce the risk of flotsam ramming, scouring and overtopping is the design of the largest possible flow cross-section by maximizing the freeboard (usually minimum freeboard 0.5 m; if necessary, an increased freeboard of ≥ 1 m) and the consideration of watercourse margins. When designing the structure and the bearings, ramming should be considered as an exceptional load case also for non-navigable rivers in the future.

2.4 Log jam

Flotsam can accumulate (e.g. after ramming) on or under the structure and thus partially or completely close the flow cross-section. As a result, the water level is dammed up, which leads to an increased damming pressure at the structure or affected part of the structure. In the future, log jam and the resulting damming pressure should be considered as an exceptional load case in the design of the structure and support details.

Beneath often detected direct damages to pipelines, railings and parapet walls, log jam increases the danger of overtopping of the structure. Especially for lightweight superstructures, this led or contributed in some cases to the loss of position of the structure. Additionally, the flow velocity is increased by the reduction of the flow cross-section, which in turn enhances scouring.

To prevent or reduce log jam, besides considering the general design principles described above, attention may be given to a design of the structure that is as robust and favourable as possible for log jam and overtopping. Slender, closed cross-sections with a rounded or haunched lower edge of the superstructure (e.g. prestressed concrete slabs) are favorable in this regard. Where necessary, the risk of log jam can also be reduced by adapting the geometry of the railings and parapets. Open cross-sections (e.g. composite bridges with open girders), truss bridges, arched or cable-stayed bridges with suspended deck are unfavorable, as flotsam gets potentially caught here.

2.5 Overtopping / Flooding

Extreme water levels caused by increased flood drain (often additionally enhanced by log jam) can lead to an overtopping of the structure or the surrounding terrain. If the water level rises above the upper edge of the structure during overtopping, the use of roads and bridges is temporarily restricted. Furthermore, the consequential damages mentioned above in correlation with ramming and log jam occur. Basins, troughs and tunnels with overloaded drainage systems are flooded, which also leads to temporarily restricted traffic safety. In case of the 2021 flood event, further consequential damages to the structure of tunnels were rarely, but in many cases the operating equipment was damaged.

Apart from the consideration of an exceptional load case for overtopping, a flood-resilient, robust construction should be considered for flood-prone structures. Whereas arched stone and vaulted bridges tend to have a larger surface area and thus are prone to inflow or overtopping, frame bridges or semi-integral constructions are flood-resilient and robust due to the monolithic connection of superstructure and foundation, as they do not have bearings as weak point or as contributing factor to flotsam deposits. Pre-stressed deck bridges allow larger freeboard due to their low superstructure height and offer a smaller area of contact in the event of an approaching flow compared to T-beam or composite bridges, for example.

In case the position of bridge caps is only secured by a shear edging (old design method), an anchorage according to the current guideline drawings or a retrofitted bridge cap anchorage should be added in flood-endangered regions. This can prevent the bridge cap from losing its position in the event of overtopping, which has happened in some cases.

A critical problem in the 2021 flood disaster was, that particularly at river crossings, telecommunications as well as power and heat energy supply often depended on single supply lines. When the bridge structures collapsed, the supply lines along the bridges also failed, leading to serious cascading effects for the surrounding areas as well. Therefore, in flood-prone areas, the installation of supply lines on bridge structures should be avoided whenever possible, and the design of culverted lines should be preferred.

3 Proposals for flood-adapted design of engineering structures

The analysis of damage to bridge and engineering structures due to the July 2021 flood event clearly shows that many structures were not sufficiently designed and dimensioned for the flood drain of 2021 and probably also not for future flood drains. To strengthen existing structures for the event of flooding, to plan new structures to be compatible with floods and at the same time to minimize costs and traffic disruptions, a guideline with comprehensive recommendations for flood-resistant construction methods of engineering structures and specific recommendations for measures should be developed. This report makes an important contribution to this regard. Based on the knowledge gained from the current state of science and technology and the evaluation of the database, a proposal is presented for a flow chart for the flood-adapted planning and dimensioning of new structures as well as for the planning of protective measures for the retrofitting of existing structures. Proposals for the individual planning steps are explained and open points are presented:

- By means of a general classification of the flood risk by flood hazard maps, it may first be defined whether a flood-adapted design must be pursued for the structure under consideration.
- Risk assessment using the RAINEX method, which was developed for this purpose, enables the evaluation of exposition and vulnerability for the individual local phenomena that may occur.
- The risk assessment of the local phenomena depends on the design conditions such as the properties of the surrounding soil (danger of scouring), the routing (location on the river course), the free board or the flow cross-section, the pier layout and the construction materials used. Depending on the external design boundary conditions, recommendations for resulting design principles are given.
- In addition, hydraulic parameters such as flood drain, water level / freeboard and flow velocity as well as, if possible, the expected flotsam accumulation are also important for the risk assessment of the local phenomena.

- The hydraulic calculations may be influenced by additional measures, such as flood protection facilities or retention areas, flotsam retaining measures (V-rakes) or other watercourse maintenance measures.
- According to the risk assessment for different local phenomena, adapted design principles can be selected to prevent or reduce the impact of the local phenomena.
- In the structural dimensioning (and recalculation) of flood-prone structures, load cases for flotsam ramming, inflow and overtopping, and dynamic pressure due to scouring should be taken into account for the flood case in the extraordinary design situation, depending on the boundary conditions and risk for the local phenomena. In addition, the foundation of scour-prone structures should be below the maximum scouring depth and additionally protected against scouring.

4 Collection of experiences "Flood damages to bridges and engineering structures"

Representative examples of damaged bridges and engineering structures are summarized in fact sheets to form a collection of experiences on "Flood damages to bridges and civil engineering structures". In addition to the structure parameters and general information on the damage by key points, a description of the damage and the possible causes of damage, mechanisms of action and structural, material-technical or service-related deficiencies are presented in each case. Additionally, in some cases the measures for damage repair are explained and possible conclusions for a more flood-resilient construction method are highlighted. The explanations are supplemented in each case by informative pictures and construction sketches of the structures. Altogether, the review and analysis of the damages due to the 2021 flood-event makes an important contribution to the development of flood-adapted planning and design of bridges and engineering structures.

Acknowledgment

At this point, the Federal Highway Research Institute is thanked for the commissioning of the project and the members of the advisement council for the fruitful discussions. We also want to thank the employees of the road authorities, who have submitted the documents to the examples of flood damages and who were available for questions.