



Bundesministerium  
für Bildung  
und Forschung

der Bundeswehr  
**Universität München**



FZ **Forschungszentrum**  
**Risiko, Infrastruktur, Sicherheit und Konflikt**  
Universität der Bundeswehr München

Bilaterale Forschungszusammenarbeit für die zivile Sicherheit  
zwischen Deutschland und Indien

# Abschlussbericht

## zum BMBF- Verbundforschungsprojekt

Verletzlichkeit von Transportinfrastrukturen, sowie Warnung und  
Evakuierung im Falle von großräumigen Hochwasserereignissen im Inland

Akronym: FloodEvac

### Teilvorhaben 3:

Bewertung kritischer Transportinfrastrukturen (TransInfra)

### Projekt Förderkennzeichen:

13N13194 bis 13N13200

### Laufzeit des Vorhabens:

01/2015 – 12/2018

### Auftragnehmer:

Universität der Bundeswehr München  
Fakultät für Bauingenieurwesen und Umweltwissenschaften  
Institut für Mechanik und Statik / Labor für Ingenieurinformatik  
Forschungszentrum RISK

### Bearbeiter:

Norbert Gebbeken, Inna Videkhina, Eberhard Pfeiffer, Maximilian Garsch

## Impressum

<b>Auftraggeber:</b>	Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) 53170 Bonn
<b>Betreuer des Projektes:</b>	VDI Dr. Jan Bornemeier VDI-Platz 1 40468 Düsseldorf <a href="mailto:bornemeier@vdi.de">bornemeier@vdi.de</a>
<b>Projektpartner:</b>	<p><b>1. Teilvorhaben: Koordination und Administration</b> Das Verbundvorhaben FloodEvac wird durch die Universität der Bundeswehr München (UniBwM) koordiniert und administriert.</p> <p><b>2. Teilvorhaben: Technische Universität München (TUM)</b> Hochwassermodellierung und Überschwemmungsflächen (HWMoD) Leitung: Prof. Dr.-Ing. M. Disse, Dr. J. Leandro Bearbeiter: P. Bohla, I. Konnerth, K. Amin</p> <p><b>3. Teilvorhaben: Universität der Bundeswehr München (UniBwM)</b> Bewertung kritischer Transportinfrastrukturen (TransInfra) Leitung: Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. N. Gebbeken Bearbeiter: Dr.-Ing. I. Videkhina, E. Pfeiffer, M. Garsch</p> <p><b>4. Teilvorhaben: Jacobs University Bremen (JUniB)</b> Unterwasser Roboter (UUV) Leitung: Prof. Dr. A. Birk Bearbeiter: T. Dörnbach, Chr. Müller</p> <p><b>5. Teilvorhaben: Hochschule Mittweida (HSMW)</b> Smartphone-basierte Sensorfusion (SmabaSenf) Leitung: Prof. Dr. rer. nat. habil. Th. Haenselmann Bearbeiter: M. Benndorf</p> <p><b>6. Teilvorhaben: Technische Universität Kaiserslautern (TUK)</b> Robuste Evakuierung und Zivile Sicherheitsplanung (RobEZiS) Leitung: Univ.- Prof. Dr. rer. nat. H. W. Hamacher Bearbeiter: A. Kinscherff, S. Schmitt, C. Heßler</p> <p><b>7. Teilvorhaben: Freie Universität Berlin (FUB)/ Katastrophenforschungsstelle (KFS)</b> Katastrophenkulturen in Deutschland und Indien im Klimawandel“ (Katastrophenkultur) Leitung: Prof. Dr. Martin Voss Bearbeiter: S. Merkes, L. Bledau, H. Upadhyay</p>
<b>Verbundkoordinator:</b>	Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. Norbert Gebbeken Universität der Bundeswehr München Fakultät für Bauingenieurwesen und Umweltwissenschaften Institut für Mechanik und Statik / Labor für Ingenieurinformatik Forschungszentrum RISK  Werner-Heisenberg-Weg 39, Geb. 33/400 D-85577 Neubiberg Tel.: +49-89-6004-3414, Fax: +49-89-6004-4549 <a href="mailto:norbert.gebbeken@unibw.de">norbert.gebbeken@unibw.de</a>

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Kurze Darstellung</b> .....	<b>4</b>
1.1	Aufgabenstellung .....	4
1.2	Voraussetzungen .....	4
1.3	Planung und Ablauf des Vorhabens .....	5
1.4	Wissenschaftlicher und technischer Stand .....	7
1.5	Zusammenarbeit mit anderen Stellen .....	9
<b>2</b>	<b>Eingehende Darstellung</b> .....	<b>10</b>
2.1	Verwendung der Zuwendung und des erzielten Ergebnisses .....	10
2.2	AP 1 Aufbereitung wissenschaftlicher und praktischer Informationen ....	10
2.3	AP 2: Einwirkungen aus Hochwasser-Szenarien .....	11
2.4	AP 3: Methoden zur Schwachstellenanalyse baul. Verkehrsinfrastr. ....	14
2.5	AP 4: Methoden zur statischen Grenzwertbetrachtung.....	17
2.6	AP 5: Risikokarten für bestehende Infrastruktur .....	21
2.7	AP 6: Entwicklung baulicher Schutzmaßnahmen .....	25
2.8	AP 7: Methoden zur Schnelldiagnose .....	26
2.9	AP 8: Erarbeitung von Checklisten zur Schadensbewertung.....	29
2.10	AP 9: Bewertung und Auswertung von Signal- und Sensordaten im Hinblick auf das Tragverhalten .....	30
2.11	AP 10: Software-Module für den Demonstrator .....	34
2.12	Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises .....	38
2.13	Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit .....	38
2.14	Nutzen und insbesondere Verwertbarkeit der Ergebnisse .....	38
2.15	Projektrelevante Fortschritte bei anderen Stellen innerhalb des Förderzeitraums.....	39
2.16	Veröffentlichungen des Ergebnisses.....	39

# 1 Kurze Darstellung

## 1.1 Aufgabenstellung

Im Gesamtprojekt FloodEvac wird in Kooperation zwischen indischen und deutschen Partnern untersucht, wie neue und verbesserte Methoden, Techniken und technische Hilfsmittel eingesetzt werden können, um die Folgen großer Flussüberschwemmungen abzumildern. Die gesamte Forschergruppe konzentriert sich dabei darauf, die Vulnerabilität der Transportinfrastruktur zu verbessern und Warn- und Evakuierungssysteme aufzubauen. Hierzu wird ein System-Demonstrator hergeleitet und entworfen, der Soft- und Hardware-Elemente enthält und der auf verschiedenen Plattformen genutzt werden kann.

Im Teilprojekt 3 „Bewertung kritischer Transportinfrastrukturen (TransInfra)“ wurden Methoden erarbeitet, die es ermöglichen, die Befahrbarkeit von Transportwegen unter Risikobetrachtungen einzuschätzen. Hierzu gehört z.B. die Bestimmung der Resttragfähigkeit von Brücken. Diese Methoden benötigen als Eingabedaten Monitoring- und Erkundungsdaten, die in anderen Teilvorhaben gewonnen werden.

Die Ergebnisse von TransInfra führen zu einer Software, die Teil des Demonstrators ist und z.B. auch für virtuelle Übungen eingesetzt werden kann (Training). Auf diese Weise wird eine kostengünstige Möglichkeit geboten, sich auf den realen Katastrophenfall vorzubereiten. Wesentlicher Teil ist dabei eine Visualisierung der Ergebnisse mit Darstellung von Risikostufen und Handlungsempfehlungen.

## 1.2 Voraussetzungen

Das Vorhaben wurde unter Zuhilfenahme der Infrastruktur der Professur für Baustatik und des daran angegliederten Labors für Ingenieurinformatik durchgeführt. Die Einrichtung der Professur war essentiell für die Durchführung. Außerdem wurde auf Erfahrung aus anderen Projekten der Professur bezüglich der Bewertung von Brücken und dem Erstellen von Risikokarten zurückgegriffen. Neben diesen Erfahrungen, die vor allem aus anderen Projekten bezüglich der Bewertung beschädigter Brücken stammen, flossen die praktischen Erfahrungen des Projektleiters in das Vorhaben ein. Neben dem Einsatz von Messmethoden und der Überprüfung der baulichen Infrastruktur nach einem Hochwasser in den Alpen 2005, der Berufung in die Beckstein-Kommission nach dem Einsturz der Eishalle in Bad Reichenhall 2006, der Beurteilung des deutschen Generalkonsulates in Chengdu, China 2008 oder der Beratung Betroffener nach dem Juni Hochwasser 2013, konnte der Projektleiter weiteres praktisches Wissen in das Projekt einfließen lassen. So war es möglich, praxisnahe und anwendungstaugliche

Anwendungsprogramme zur schnellen Bewertung der Befahrbarkeit von Brückentragwerken unter Einwirkungen durch Hochwasser zu entwickeln.

### **1.3 Planung und Ablauf des Vorhabens**

Das Teilvorhaben "TransInfra" wurde in 10 Arbeitspakete (AP) untergliedert:

- AP1: Aufbereitung wissenschaftlicher und praktischer Informationen
- AP2: Einwirkungen aus Hochwasser-Szenarien
- AP3: Methoden zur Schwachstellenanalyse baulicher Verkehrsinfrastruktur
- AP4: Methoden zur statischen Grenzwertbetrachtung
- AP5: Risikokarten für bestehende Infrastruktur
- AP6: Entwicklung baulicher Schutzmaßnahmen
- AP7: Methoden zur Schnelldiagnose
- AP8: Erarbeitung von Checklisten zur Schadensbewertung
- AP9: Bewertung und Auswertung von Signal- und Sensordaten im Hinblick auf das Tragverhalten
- AP10: Vorbereitung der Software-Anteile zur Implementierung in den Demonstrator
- AP11: Virtuelle und reale Übungen

Nach einer Verlängerung des Gesamtvorhabens von 6 Monaten wurde außerdem ein 12. AP ergänzt, dessen vorrangiges Ziel die Vorbereitung des Abschlusstreffens in Indien war.

- AP12: Vorbereitung der Software-Anteile zum Demonstrator zur Vorführung in Indien

Nachdem die Suche und die Anstellung von wissenschaftlichem Personal erst nach dem Beschluss des Vorhabens erfolgen konnten, wurde der offizielle Projektbeginn um 6 Monate auf Juli 2015 verschoben. Eine anschließende kostenneutrale Verlängerung um 6 Monate hat diesen Zeitverzug kompensiert.

Anschließend wurde eine Aufstockung über 6 Monate bewilligt, die der Vorbereitung des Abschlusstreffens in Indien diente.



Während der Projekttreffen (s.u.), bei Telefonaten und mit Hilfe der Kommunikationsplattform konnten die Projektbeteiligten vernetzt werden. Es fanden folgende Projekttreffen statt.

- Kick-off Meeting: München 27.02.2015
- Projekt-Besprechung: Berlin 12.06.2015
- Projekt-Besprechung: München 09.10.2015 (mit Ind. Partnern)
- Projekt-Besprechung: Bremen 25./26.11.2015 (mit Ind. Partnern)
- Workshop: München 15.02.2016 (mit HSMW)
- Projekt-Besprechung: München 24.05.2016
- Workshop: Kulmbach 30.09.2016 (mit HSMW)
- Brückenmessungen: Mittweida 04.10. – 07.10.2016 (mit HSMW)
- Telko - Nov. 2016 (mit UniKI)
- Workshop: Delhi 28.02. – 03.03.2017
- Telko - 02.05. (mit UniKI)
- Projekt-Besprechung: München 11.04.2017 (mit TUM)
- Schwingungsmessung: Bremen 23.05.2017
- Projekt-Besprechung: München 31.05.2017 (mit TUM, UniKI)
- Schwingungsmessungen: München 21.08.2017 – 22.08.2017
- Workshop: Lambrecht 09.10. – 10.10.2017
- Projekt-Besprechung: München 17.11.2017
- Forschungsklausur: Raitenhaslach 25.+26.06.2018
- Onlineworkshop: - 08.10.2018 (mit FUB, TUK, THW)
- Projekt-Besprechung: Mittweida 11.10.2018
- Abschlusstreffen: Delhi 05.12.2018

Bei allen Projekttreffen war der Projektträger VDI vertreten.

#### **1.4 Wissenschaftlicher und technischer Stand**

Im Katastrophenfall operieren Einsatzleitung und Einsatzkräfte auf der Basis von Einsatzplänen und Hilfsmitteln unterschiedlichster Art. Die Bewertung von (beschädigten) Gebäuden basiert auf der Basis grober Abschätzungen, die z.B. in vfdB 03/01: 2005-03 „Hinweise für Maßnahmen der Feuerwehr und anderer Hilfskräfte nach Gebäudeeinstürzen“ oder „THW Einsatztaktik bei Gebäudeschäden“ dargestellt werden. Einsatzkräfte sind im besten Fall so genannte Baufachberater, die zwar einsatztaktisch

geschult, aber nicht notwendigerweise Bauexperten sind. Bei den Feuerwehren sind viele Bauingenieure angestellt, die ihre Spezialisierungen in der Regel im Brandschutz haben, nicht aber in der Bewertung von Resttragfähigkeiten.

Zur wiederkehrenden Bewertung von Brücken gibt es die DIN 1076. Sie ist eine Norm zu Schadensklassifikation, nicht aber zur Bewertung der Resttragfähigkeit. Anhand von Kriterien wird festgelegt, ob die Schäden die Tragfähigkeit grundsätzlich beeinflussen. Dann erfolgt eine grobe Klassifikation. Seit 2011 existiert die Richtlinie zur Nachrechnung von Straßenbrücken im Bestand (Nachrechnungsrichtlinie), die zwar auf Alterungsschäden eingeht, jedoch nicht auf Schäden, wie sie im Katastrophenfall anzutreffen sind. Letztere würden zur Vollsperrung der Brücke zum Schutz der Verkehrsteilnehmer führen, können aber im Katastrophenfall jedoch unter Risikobetrachtungen möglicherweise noch akzeptiert werden.

Nach dem Einsturz der Eislaufhalle in Bad Reichenhall im Jahre 2006 wurde eine ähnliche Richtlinie für Gebäude erarbeitet, die VDI Ri 6200 – Standsicherheit von Bauwerken – regelmäßige Überprüfung (2008). Auch diese Richtlinie behandelt keine Katastrophenszenarien.

Ergänzend zu diesen zeitlich punktuellen Untersuchungen können Sensoren an die Tragwerke angebracht werden, mit denen eine kontinuierliche Bauwerks-Überwachung möglich ist (s. auch Verbundprojekt SALV). Diese Sensoren messen Daten, wie Beschleunigungen (Erschütterungen), Geschwindigkeiten, Verformungen, Temperatur, Feuchte etc. Tragwerksingenieure können diese Daten auswerten und dem Tragverhalten bzw. der Änderung des Tragverhaltens zuordnen. Hierzu gibt es Fachartikel (z.B. Klinzmann C. [2008], Peil U. et al. [2008]), jedoch noch keine Richtlinie bzw. Norm. Strauss et al. [2009] behandeln die Resttragfähigkeit von Tragwerken im Hinblick auf typische Bauschäden und Luco et al. [2004] behandeln Erdbeben. Insgesamt gibt es nur wenig Literatur zur Resttragfähigkeit, fast keine für Katastrophen-Lastfälle.

Die bestehenden Ansätze sind für die Katastrophenplanung zu konservativ. In Abhängigkeit von der Fragestellung kann eine risikobasierte Lösung Ziel führend sein; z.B. Überfahren einer beschädigten Brücke mit Einzelfahrzeug im Schritttempo in Fahrbahnmitte mit Einweiser.

Relevante Veröffentlichungen:

[Vdfdb05]vfdb 03/01: 2005-03 „Hinweise für Maßnahmen der Feuerwehr und anderer Hilfskräfte nach Gebäudeeinstürzen“

[THW08]Hohage H.: THW Einsatztaktik bei Gebäudeschäden 02/2008, 1-19

[DIN1076]DIN 1076: Ingenieurbauwerke im Zuge von Straßen und Wegen - Überwachung und Prüfung, 11/1999

[Ri6200]VDI Ri 6200 – Standsicherheit von Bauwerken – regelmäßige Überprüfung (2008)

[Kli08] Klinzmann C.: Methodik zur computergestützten probabilistischen Bauwerksbewertung unter Einbeziehung von Bauwerksmonitoring, Dissertation, TU Braunschweig, Heft 203, ISBN 978-3-89288-186-5 2008

[Peil08]U. Peil, M. Frenz, I. Schendel: Life time assessment of steel bridges via monitoring and test-ing. Life-Cycle Civil Engineering, CRC Press, 2008, Varenna, IT, IALCEE'08, Biondini&Frangopol, ISBN 978-0-415-46857-2.

[Strauss09] Strauss A., et al.: Betonkalender 2009, Berlin Ernst & Sohn ISBN 978-3-433-01854-5, 103-107

[Luco04] Luco N. et al.: Dynamic versus static computation of the residual capacity of a mainshock-damaged building to withstand an aftershock, 13th World Conference on Earthquake Engineering Vancouver, B.C., Canada August 1-6, 2004, Paper No. 2405

## **1.5 Zusammenarbeit mit anderen Stellen**

Neben den regulären Partnern, die die anderen Teilprojekte bearbeiteten, bestand ein enger Kontakt zu den anderen Verbundvorhaben des Deutsch-Indischen Forschungsprogrammes zur inneren Sicherheit.

Außerdem wurde eine universitätsinterne Zusammenarbeit mit dem Forschungszentrum RISK – Risiko, Infrastruktur, Sicherheit und Konflikt gepflegt. Damit konnten die Ergebnisse des Projektes auch auf Workshops und Messen durch das FZ RISK dargestellt werden.

Die Oberste Bayerische Baubehörde (OBB) - jetzt Bayerisches Staatsministerium für Wohnen, Bau und Verkehr, das Landesamt für Umwelt (LfU), die Kreisverwaltung Kulmbach, das staatliche Bauamt Bayreuth sowie das Amt für Straßen und Verkehr Bremen stellten Eingangsdaten zur Bearbeitung der Arbeitspakete zur Verfügung. Dabei handelte es sich in erster Linie um Daten zu Brücken im Referenzgebiet oder anderer untersuchter Brücken, aber auch um Informationen und Daten zu aktuellen Hochwasserinformationen und Kartenmaterial.

## **2 Eingehende Darstellung**

### **2.1 Verwendung der Zuwendung und des erzielten Ergebnisses**

Die Zuwendung wurde für die Bearbeitung der einzelnen Arbeitspakete verwendet.

Ziel des Teilprojektes TransInfra war es, unter Berücksichtigung des Einwirkungsszenarios „Hochwasser“ Analyse- und Beurteilungsmöglichkeiten für Bauwerke der kritischen Transportinfrastruktur zu untersuchen und zu entwickeln. Dabei wurden zwei Ansätze einbezogen, die sich in unterschiedliche Bereiche des Katastrophenzyklus (Prävention, Ereignis, Wiederherstellung und Nachsorge) einordnen lassen. Die kurzfristige Planung (während des Ereignisses) soll Informationen für Rettungskräfte in-Situ bereitstellen. Für eine mittelfristige Planung (vor dem Ereignis, Prävention) werden vorab Szenarien generiert, die dann von den Einsatzkräften zu Übungszwecken verwendet werden können.

Um das Gesamtziel des Projektes FloodEvac zu erreichen, wurde für den Beitrag des Teilprojektes TransInfra die unter 1.3 genannten AP bearbeitet. Die Ziele und Ergebnisse der einzelnen AP sind im Folgenden kurz dargestellt.

### **2.2 AP 1 Aufbereitung wissenschaftlicher und praktischer Informationen**

Ziel des AP 1 war es, durch Literaturrecherchen Ansatzpunkte für den Forschungsbedarf im Hinblick auf Optimierung, Weiterentwicklung und Neuentwicklung zu finden.

Mit Hilfe von Bibliotheksrecherchen und Internetrecherchen wurde eine Literaturdatenbank erstellt. Die Quellen wurden ausgewertet. Die Auswertung lieferte Erkenntnisse über den Forschungsbedarf im Hinblick auf Optimierungen, Weiterentwicklungen und Neuentwicklungen. Die wichtigsten Themen im Hinblick auf die Arbeitspakete befassen sich mit Literatur zu den physikalisch-technischen Grundlagen und zum Stand der Technik zur Feststellung und Ermittlung von Einwirkungen während eines Hochwassers, der Beurteilung von Resttragfähigkeiten und der numerischen Strömungsmechanik. Diese Vorarbeiten bildeten eine wichtige Grundlage zum Erreichen der wissenschaftlich-technischen Ergebnisse.

### 2.3 AP 2: Einwirkungen aus Hochwasser-Szenarien

Ziel von AP 2 war es, die Einwirkungen aus Hochwasser-Szenarien möglichst genau zu erfassen und zu dokumentieren. Dabei wurden die determinierten Einwirkungen zusammengefasst und mit Formeln zur Berechnung dargestellt.

Um die kritische Transportinfrastruktur auf ihre Tragfähigkeit, Gebrauchstauglichkeit, Vulnerabilität und Resilienz hin beurteilen zu können, müssen alle Einwirkungen während eines Hochwasserereignisses definiert sein. Hierzu gibt es jedoch keine Normen oder Richtlinien, weder in Bezug auf die Einwirkungsarten noch auf die Lasten. Es gibt von verschiedenen Organisationen Handlungsrichtlinien (z.B. Paff, Jüpner: Hochwasserhandbuch Springer, BMUNBR - Hochwasserfibel), die jedoch keine Aussagen zu Lastannahmen treffen. Aus diesem Grund müssen im Rahmen von FloodEvac alle möglichen Einwirkungen während eines Hochwasser-Ereignisses erfasst werden. Im Zuge von AP 2 wurden die Einwirkungen, die während eines Hochwassers auftreten, in qualitativer und, sofern möglich, in quantitativer Form bestimmt. In Abb. 1 ist eine Übersicht über die maßgebenden Einwirkungen dargestellt. Folgende Einwirkungen wurden für den Hochwasserfall bestimmt:

- direkte Einwirkungen
  - hydrostatischer Druck
  - hydrodynamischer Druck
  - Auftrieb
  - ggf. dynamische Anregung (z.B. bei Überströmung der Fahrbahnplatte)
  - Auf- / Anprall (z.B. Baumstämme, Wurzelstöcke, Container, PKW, etc.)
  - Verkehr / Fußgänger (Zielwert der Berechnung: wie viel Last kann noch aufgenommen werden?)
- indirekte Einwirkungen
  - Kolkbildung
  - Verklausung
  - Boden-Bauwerk-Interaktion

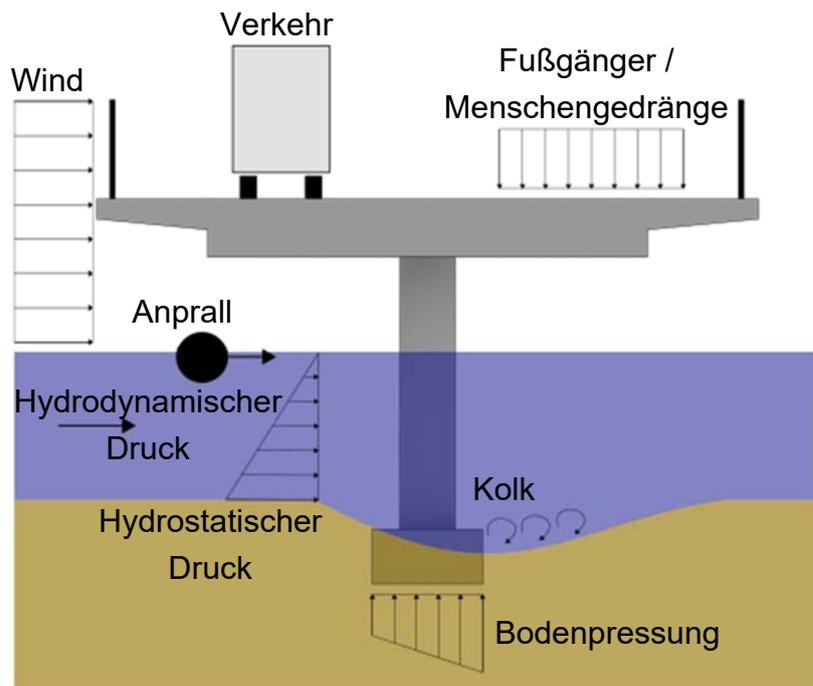


Abb. 1: Übersicht, Einwirkungen auf ein Hindernis im (strömenden) Gewässer während eines Hochwassers

Die in Abb. 1 dargestellten Einwirkungen wurden in ihrer Wirkungsweise, -größe und -ort bestimmt und berechnet. Lasten, deren Wirkungsgrößen nicht für alle Fälle analytisch ermittelbar sind (hydrodynamische Kräfte auf Brückenpfeiler), werden mit Hilfe von Hilfsparametern (Strömungsbeiwerten) ermittelt.

Die Einwirkung durch einen **Anprall** von Schwemmgut hängt von der Strömungsgeschwindigkeit, der Geometrie, der Masse und dem Einwirkungsort des Schwemmgutes ab. Die Strömungsgeschwindigkeiten können den hydrologischen Messwerten oder den Simulationsdaten der TUM entnommen werden. Die Geometrie, die Masse und der Anprallort sind jedoch unbekannte Größen. Sie müssen für jede Region und für jedes Gewässer bestimmt werden. Dabei sind z.B. die Bewaldung, die Vegetation im Einflussbereich des Gewässers sowie Baustellen und andere Treibgutquellen (z.B. Parkflächen oder Lagerflächen im Überflutungsbereich) zu berücksichtigen. Größere Schwemmgüter (z.B. Container, PKW) sind eher in Gebieten mit großen Überflutungsflächen, wie beispielsweise Indien zu erwarten.

**Ein Kolk** stellt einen maßgeblichen Einflussfaktor für die Standsicherheit eines Bauwerkes während eines Hochwasserereignisses dar. Wird die Strömung durch Einbauten im / am Fließgewässer lokal beschleunigt, dann können dort Erosionserscheinungen auftreten (lokale Kolkbildung). In Abhängigkeit von der Gründung und von der Konstruktion des Überbaus können durch Kolkbildung die Standsicherheit und die Gebrauchstauglichkeit der Konstruktion beeinträchtigt sein. Für die Gründungselemente von Brückenbauwerken müssen verschiedene Kolktypen, wie

Verengungskolk, Pfeiler- / Widerlagerkolk und Kolk durch Verkläusung oder einen angeströmten Überbau, berücksichtigt werden. Es existieren zahlreiche empirische Formeln zur Bestimmung der Kolkentiefe. Mit Hilfe eines selbst programmierten Ingenieur-Tools (**AP 10**) werden empirische Ansätze ausgewertet und zur Schnelldiagnose und Identifizierung von Kolk gefährdeten Bauwerken herangezogen. In der Regel überschätzen die empirischen Ergebnisse die tatsächlich auftretende Kolkbildung. Damit werden für Katastrophenszenarien realitätsnahe Voraussagen erhalten, die den auf der sicheren Seite liegenden empirischen Ergebnissen gegenübergestellt werden können.

Eingangswerte für die Ermittlung der Evakuierungsrouten (TUK) sind die maximalen **Verkehrslasten** aus Fahrzeug- und Personenverkehr unter Berücksichtigung der im AP 2 erfassten Einwirkungen. Es wird das Lastmodell 3 (LM 3) „Achslastkonfigurationen idealisierter Sonderfahrzeuge“ analog zur DIN EN 1991-2 (EC 1-2) angenommen. Den Angaben zu Sonderfahrzeugen in EC 1-2 werden z.B. Angaben zu THW-Fahrzeugen (Achslast, -abstand, Gesamtgewicht) hinzugefügt. Lasten aus regulärem Fahrzeugverkehr werden hier ausgeschlossen, da durch die Einsatzkräfte eine Möglichkeit der Regulierung der Verkehrswege besteht. Der Lastansatz mit Achslasten konkreter Fahrzeuge stellt eine Versorgungs- oder Evakuierungssituation durch Hilfskräfte dar. Alle Fahrzeuge, die für die Bewertung der Überfahrbarkeit einer Brücke herangezogen werden sollen, können in einem Android-basierten Eingabetool in ein Lastmodell übersetzt werden (**AP 10**).

Je nach Region / Fluchtverhalten besteht die Möglichkeit der selbstständigen Flucht von Hochwasserbetroffenen. Deshalb werden die Lastfälle „Menschengedränge“ und „PKW-Flucht“ eingeführt. LM 4 „Menschenansammlungen“ wird im EC 1-2 als optionaler Lastfall beschrieben. Die anzunehmende Flächenlast von 5 kN/m<sup>2</sup> (inkl. dynamischem Vergrößerungsfaktor, etwa 5 Personen pro Quadratmeter) wird jedoch als zu konservativ für ein Fluchtszenario angesehen. Basierend auf den Ergebnissen der FU Berlin wurde diese Lastannahme vernachlässigt. Aufgrund der Verteilung von Fliehenden und der Möglichkeit der Regulierung der Verkehrswege durch Einsatzkräfte kann angenommen werden, dass ein Lastfall „Menschenansammlung“ mit einer reduzierten Last nicht maßgebend wird.

Die Aufteilung der Fahrbahn in verschiedene Fahrstreifen wird, wie in DIN EN 1991-2 beschrieben, verwendet, um maßgebende und günstige Fahrstreifen zu ermitteln, sowie gegebenenfalls vorhandene Restriktionen zur Befahrbarkeit der Brücke anzugeben. (**AP 10**)

## **2.4 AP 3: Methoden zur Schwachstellenanalyse baul. Verkehrsinfrastruktur.**

Das Ziel des AP 3 war es, Schwachstellen der baulichen Verkehrsinfrastruktur zu identifizieren.

Die Eingangsdaten für die „robuste Evakuierung und zivile Sicherheitsplanung“ (TUK) sind Daten zur Belastbarkeit von Infrastruktur im gewählten Referenzgebiet (oberer Main im Gebiet Kulmbach). Der Gewinnung der Daten zur Belastbarkeit von gefährdeter Infrastruktur geht zunächst eine Schwachstellenanalyse der Verkehrsinfrastruktur voraus.

Der Schwachstellenanalyse ging eine Datenrecherche / -beschaffung voraus. Bestimmte Brückendaten müssen durch eine nach DIN 1076 „Ingenieurbauwerke im Zuge von Straßen und Wegen“ geforderte regelmäßige Überprüfung von Ingenieurbauwerken dokumentiert werden. Diese Daten werden (für Bundesstraßen) in einer digitalen Datenbank (SIB-Datenbank) gespeichert oder (im Fall von Landes- und Kreisstraßen) in Form von Bauwerksbüchern hinterlegt. Einträge der SIB-Bauwerke Datenbank konnten von der Obersten Bayerischen Baubehörde bezogen werden. Weitere Daten in Form von Bauwerksbüchern wurden vom staatlichen Bauamt Bayreuth und der Kreis- und Stadtverwaltung Kulmbach zur Verfügung gestellt.

Bei den kritischen Verkehrsinfrastrukturen im Referenzgebiet, handelt es sich ausschließlich um Brücken und Durchlässe. Diese wurden kategorisiert und katalogisiert. Damit wurde eine Übersicht über die Typen von Brücken im Kreis Kulmbach erhalten. Abb. 2 zeigt die prozentualen Anteile der Konstruktionsmaterialien nach Brückenanzahl. Der Großteil der Brücken ist mit Stahl- oder Spannbeton errichtet. Betrachtet man die Konstruktionsart der im betrachteten Gebiet vorhandenen Brücken, die gefährdet sein könnten (Abb. 3), erkennt man den maßgeblichen Anteil von Platten- und Plattenbalkenbrücken von 58 %. Es wurden demnach Stahlbeton-Platten- und Stahlbeton-Plattenbalkenbrücken untersucht. Das Ingenieurtool zur Bewertung von Brücken beschränkt sich jedoch nicht ausschließlich auf diese.

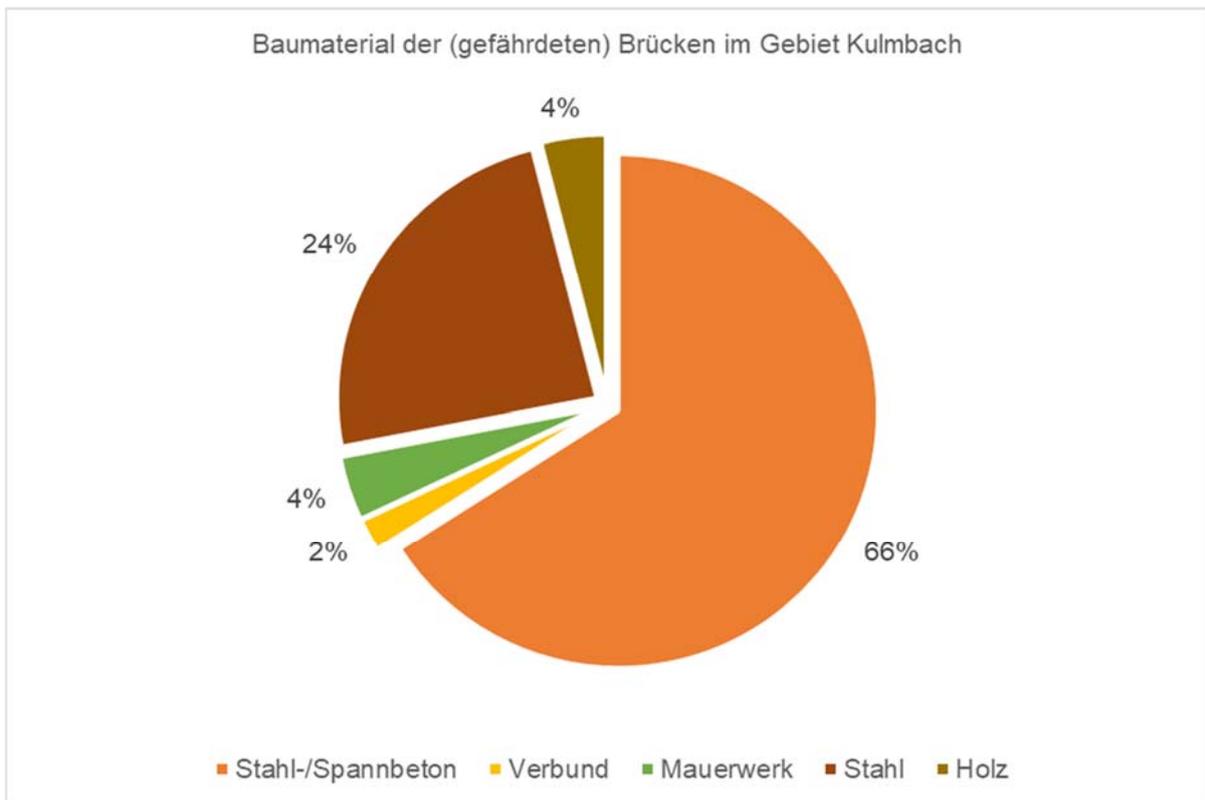


Abb. 2: Baumaterialien der Brücken im Referenzgebiet Kulmbach; Prozentanteile nach Brückenanzahl)

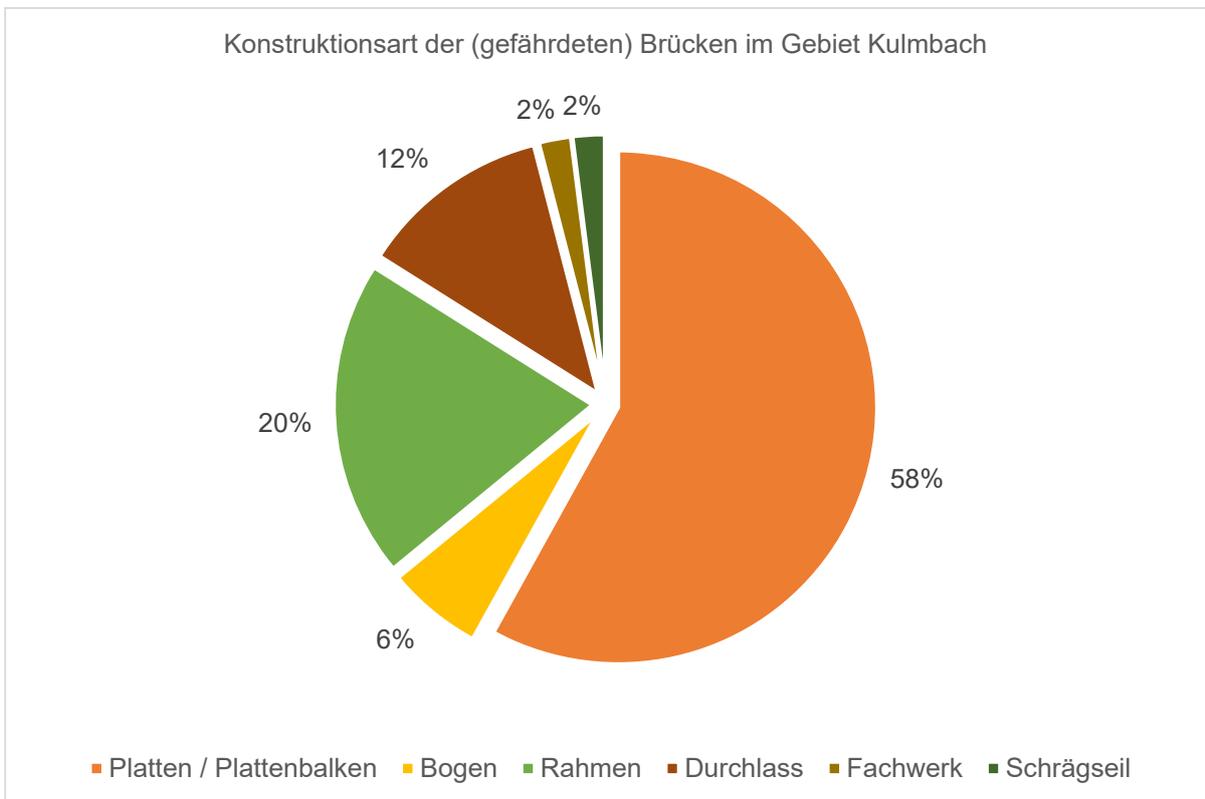


Abb. 3: Konstruktionsarten der Brücken im Referenzgebiet Kulmbach; Prozentanteile nach Brückenanzahl)

Die vorhandenen Bauwerke werden bezüglich ihrer Nutzungseigenschaften unterschieden in Eisenbahn-, Fußgänger- und Straßenbrücken. Die Nutzung und das Baujahr sind maßgeblich für die zur Zeit der Planung der Bauwerke angesetzten Lasten und konstruktiven Vorgaben. Diese Informationen sind relevant für die softwaremäßige Umsetzung (**AP 10**) und können bei der Nachberechnung dienlich sein. Für die Nutzung einer Brücke für eine Evakuierung wurden nur Straßenbrücken berücksichtigt.

Weitere Analysen umfassten die in AP 2 bestimmten Einwirkungen. Diese wurden auf ihre Einflussparameter hin untersucht. Ein maßgebender Einflussparameter ist die Strömungsgeschwindigkeit. Nimmt diese zu, erhöht sich zum Beispiel der hydrodynamische Druck mit dem Quadrat der Geschwindigkeit. Verdoppelt sich die Strömungsgeschwindigkeit, dann vervierfacht sich der Anprall. Zusätzlich steigt die Gefahr einer Kolkbildung, wodurch die Tragfähigkeit und die Gebrauchstauglichkeit herabgesetzt werden können. Es besteht also sowohl ein Einfluss auf der Einwirkungsseite, als auch auf der Widerstandsseite.

Auf der Grundlage der vorhandenen Daten wurden mögliche Schwachstellen der baulichen Verkehrsinfrastruktur zunächst qualitativ betrachtet. Kriterien für die Analyse der Tragwerksstrukturen waren die statische Bestimmtheit oder Unbestimmtheit, der Überbau, das Konstruktionsmaterial, die Konstruktionsart und der Unterbau. Zu den Gründungsverhältnissen liegen nur sehr begrenzt Daten vor. Diese sind auch bei den zuständigen Behörden nicht vorhanden, da in der Regel keine Untersuchung von Bauteilen unter der Wasseroberfläche stattfindet, sofern keine Hinweise durch sichtbare Schäden gegeben sind. Gemeinsam mit der JUniB wurden Bilddaten des in TV 4 entwickelten Unterwasserroboters ausgewertet. Allgemein kann eine ungenügende Gründungstiefe, beziehungsweise ungenügender Erosionsschutz für extremes Hochwasser als Schwachstelle der Gründung angegeben werden.

Brückenpfeiler sind Hauptangriffspunkte für die Wasserströmung und für das Schwemmgut. Hierbei ist die Querschnittsform der Pfeiler von essentieller Bedeutung, da sie sowohl den Druck des strömenden Wassers, als auch die Nachlaufwirbel und damit die Kolkbildung beeinflusst. Bei höheren Wasserständen kann auch der Überbau an- oder überströmt werden.

Die häufigsten Brückenkonstruktionen im Referenzgebiet sind Stahlbeton-Plattenbalken-Brücken. Viele davon haben einen Überbau, der als statisch unbestimmtes Durchlaufsystem trägt. Aus diesem Grund wurden diese Brücken bei der Schwachstellenanalyse bevorzugt behandelt.

Die quantitative Schwachstellenanalyse wurde ebenfalls durchgeführt. Für den angegebenen Brückentyp bestehen kaum Risiken für den Überbau und oder die Pfeiler

durch direkte Einwirkungen. Dies setzt jedoch eine Planung, Berechnung und Ausführung nach deutschen Standards voraus und kann nicht ohne weiteres auf andere Staaten übertragen werden. Die größte Gefahr stellt die Kolkbildung und damit eine Unterspülung der Brückenpfeiler dar.

## **2.5 AP 4: Methoden zur statischen Grenzwertbetrachtung**

Das Ziel von AP 4 ist die Festlegung geeigneter Methoden zur statischen Grenzwertbetrachtung und die Untersuchung dieser auf ihre Anwendungstauglichkeit.

Die Grenzwertbetrachtungen beziehen sich auf die in Arbeitspaket 2 beschriebenen Einwirkungen aus Hochwasser-Szenarien und auf Arbeitspaket 3, in welchen z.B. Brückentypen klassifiziert wurden.

Die Auswertung der vorhandenen Brücken und Durchlässe nach deren Typ bzw. Tragwerksform im Referenzgebiet Kulmbach (Arbeitspaket 3) hat gezeigt, dass die meisten Brücken-Bauwerke aus Stahlbeton erstellt wurden. 58% aller Brücken sind als Platten- und Plattenbalkenbrücken ausgeführt und stellen die meist verwendete Bauweise dar. An zweiter Stelle folgen Rahmenbrücken mit 20% (Abb. 3).

Da der größte Anteil, der im Referenzgebiet vorhandenen Brücken aus Platten- und Plattenbalkenbrücken besteht, wurde diese Tragwerksart detailliert modelliert. Mit Hilfe von numerischen Modellen wurden die statischen Grenzwertbetrachtungen durchgeführt. Zunächst wurden mögliche Methoden z.B. der Elastizitäts- und Plastizitätstheorie auf ihre Anwendungstauglichkeit untersucht und anschließend geeignete Verfahren festgelegt. Die Ergebnisse dieser Untersuchung wurden für eine detaillierte Vulnerabilitätsbewertung der Tragwerke im Referenzgebiet herangezogen. Außerdem dienten die Erkenntnisse als Grundlage für die Entwicklung der Schnelldiagnoseverfahren (AP 7).

Neben dem Ansatz einer detaillierten und zeitaufwendigen Analyse wurden auch die analytischen Bewertungsmethoden untersucht und eine Methodik für die schnelle Tragwerksanalyse entwickelt. Je nach Ressourcenverfügbarkeit (Zeit, Personal, Daten, Rechenkapazität) können Schnelldiagnoseverfahren eine maßgebliche Rolle für die Rettungskräfte im Katastrophenfall spielen. Ausgearbeitete Algorithmen wurden in das Engineering-Tool unter der GIS-Plattform aufgenommen. Dies diente als Basis für die Erstellung von Risikokarten (AP 5).

Mit der detaillierten und schnellen Tragwerksanalyse werden die Schnittgrößen und Verformungen eines Tragwerks ermittelt. Die Bemessung von Tragwerken ist grundsätzlich für Grenzzustände der Tragfähigkeit und der Gebrauchstauglichkeit nach

z.B. DIN1055-100 „Grundlagen der Tragwerksplanung, Sicherheitskonzept und Bemessungsregeln“ ausgelegt. Praktisch bedeutet dies, dass für Brücken folgende Nachweise erbracht werden müssen:

1. *Grenzzustand der Tragfähigkeit (GZT)*

- Bruch infolge Biegung mit und ohne Normalkraft
- Bruch infolge Querkraft
- Bruch infolge Torsion
- Verlust des statischen Gleichgewichts (z.B. Kippen)
- Stabilitätsversagen (Knicken)

2. *Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit (GZG)*

- Unzulässige Spannungen
- Unzulässige Rissbildung
- Übermäßige Formänderungen (z.B. Durchbiegungen)

Ein Tragwerk versagt rechnerisch, wenn der Grenzzustand der Tragfähigkeit überschritten wird. Um das Versagen auszuschließen, muss nachgewiesen werden, dass

$$E_d \leq R_d.$$

Dabei sind  $E_d$  der Bemessungswert der Auswirkung (Schnittgrößen, Verformungen) infolge einer Einwirkung und  $R_d$  der Bemessungswert des Tragwiderstandes.

Die Berechnung der Schnittgrößen einer Struktur beruht auf der wirklichkeitsnahen Modellbildung. Deshalb muss in einem ersten Schritt ein statisches System gefunden werden, das das Tragverhalten mit einem vertretbaren Berechnungsaufwand und in ausreichender Genauigkeit beschreibt. Dafür sind folgende maßgeblichen Bearbeitungsschritte erforderlich:

1. Die Wahl eines geeigneten mechanischen Modelles (statisches System), das das reale komplexe 3D- Tragwerk und sein Verhalten genügend genau abbildet. Hierzu gehören unter anderem die Wahl des Systems, der Lagerung, der Belastung und des Werkstoffes. Das reale Objekt wird durch das Ersatzmodell z.B. als Ersatzstab-, Trägerrost- oder Plattenmodell abgebildet.
2. Die Wahl eines geeigneten Berechnungsmodells (analytisch, numerisch), das eine genügend genaue Analyse des mechanischen Modells ermöglicht, z.B. ein numerisches Modell mit der Methode der Finiten Elemente.

In einem zweiten Schritt müssen für die Ermittlung der Schnittgrößen grundsätzlich verschiedene Einwirkungen unterschieden werden (AP 2):

- Lasten und Kräfte infolge von Eigenlast (ständige Lasten)
- Lasten und Kräfte aus Nutzung Straßenverkehr (SLW, LKW, MLC) oder Personen (Verkehrslasten)
- Lasten und Kräfte durch Überschwemmungshöhe (hydrostatischer und hydrodynamischer Wasserdruck auf z.B. die Fahrbahnplatte) (veränderliche / außergewöhnliche Lasten)
- Kolkbildung an Brückenpfeilern (Unterspülung) durch erhöhte Fließgeschwindigkeit des Gewässers (Strömungskräfte, hydrodynamischer Druck) (Einfluss Stabilitätsbetrachtung)
- Anprall von mitgeführtem Treibgut (Fahrzeuge, Baumstämme, Wurzelstöcke etc.) (außergewöhnliche Lasten)
- Setzung einzelner Stützen oder Kippen der Fundamente infolge ungleicher Bodenbedingungen oder lokaler Fehlstellen im Baugrund (Zwang)

Die Ermittlung der Tragfähigkeit einer Brückenkonstruktion wurde im Rahmen dieses Projektes auf die Bestimmung der maximalen zulässigen Schwerlastwagen (SLW, THW-Fahrzeuge) in Kombination mit anderen Lasten wie z.B. einer Stützensenkung konkretisiert (Abb. 4). Eine beschädigte Stütze kann z.B. mit einer reduzierten Federsteifigkeit modelliert werden.

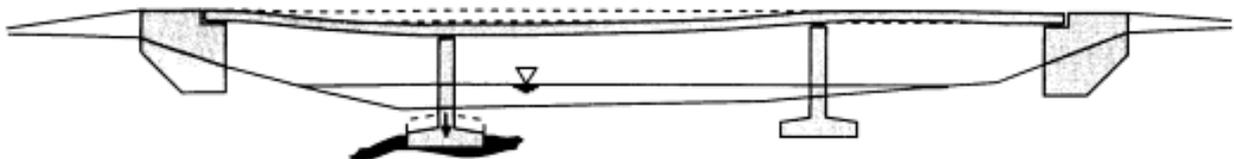
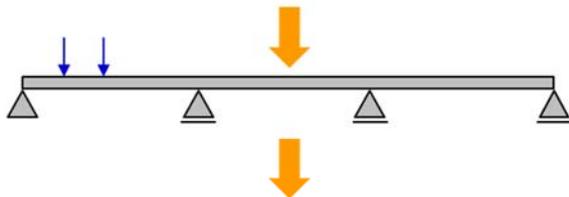


Abb. 4: Setzung einer Stütze

Weitere Einwirkungen wie z. B. Temperaturbeanspruchung oder Windeinwirkungen etc. wurden bei der Ermittlung der Schnittgrößen nicht berücksichtigt. Bezieht man sich auf die aktuelle Normung, müssen Windlasten bei außergewöhnlichen Lastfällen (bspw. Hochwasser) nicht berücksichtigt werden.

Für die Berechnung der Schnittgrößen und Verformungen für den *Grenzzustand der Tragfähigkeit (GZT)* und den *Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit (GZG)* von Ersatzmodellen werden in einem dritten Schritt mathematische Modelle herangezogen (Abb. 3), die dann bei der Berechnung verwendet werden. Für die Erstellung der mathematischen Modelle werden systematische Herleitungen von Differentialgleichungen für Stab- und Flächentragwerke durchgeführt.

Kurzüberblick von Differentialgleichungen zur Berechnung von  
 Stab- und Flächentragwerken



gewöhnliche Differentialgleichung:

Differentialgleichung für einen einfachen Stab

$$\frac{d^4 w}{dx^4} = \frac{q}{EI}$$

Balke mit Berücksichtigung der Querverschiebung

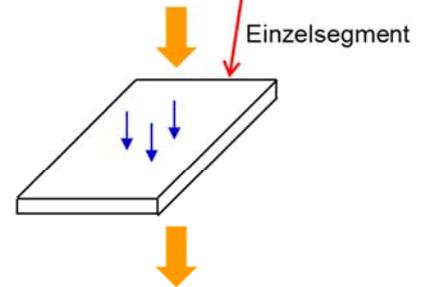
$$\begin{cases} \frac{d^3 \varphi}{dx^3} = \frac{q}{EI} \\ \varphi = \frac{dw}{dx} + \gamma \frac{d^2 w}{dx^2} \end{cases}$$

Elastisch gebetteter Stab

$$\frac{d^4 w}{dx^4} + 4\alpha^4 = \frac{q}{EI} \quad \text{mit} \quad \alpha = \sqrt[4]{\frac{kb}{4EI}}$$

Harmonische Schwingungen (Timoschenko-Balken)

$$\frac{\partial^4 w(x, t)}{\partial x^4} = \frac{q(t)}{EI} - \frac{\gamma A}{g} \frac{\partial^2 w(x, t)}{\partial t^2}$$



partielle Differentialgleichung:

Differentialgleichung für eine Platte

$$\frac{\partial^4 w}{\partial x^4} + 2 \frac{\partial^4 w}{\partial x^2 \partial y^2} + \frac{\partial^4 w}{\partial y^4} = \frac{p}{K}$$

Abb. 5: Mathematische Modelle für Stab- und Flächentragwerke (exemplarisch)

Für das Engineering-Tool wurde eine Elementbibliothek für die Berechnung oben gezeigter Tragwerke erstellt (Abb. 5). Das führt zu einer automatisierten und deshalb zeiteffizienten Berechnung der Tragfähigkeit von Bauwerken

Nachdem die Idealisierung des Systems durch Aufteilung in Teilbereiche im Sinne der Finiten Elemente (Stab, Platte etc.) erfolgt ist und die mechanischen Ersatzmodelle durch mathematische Modelle aus z.B. der Elastizitätstheorie beschrieben wurden, können klassische Berechnungsmethoden wie das *Verschiebungsgrößenverfahren*

angewendet werden. Auf der Basis der Steifigkeitsmatrizen werden Schnittgrößen und Verformungen für eine Konstruktion berechnet.

Bei den Berechnungen komplexer Konstruktionen ergeben sich umfangreiche Gleichungssysteme, die man in Matrixform sehr kompakt darstellen kann. Darüber hinaus ist diese Darstellung besonders gut geeignet für die numerische Berechnung mit Computern. Dies setzt voraus, dass die Gleichungen aus der Elastizitätstheorie in eine Matrizenformulierung gebracht werden.

Sogenannte „Matrix-Verschiebungsgrößenverfahren“ können als Ausgangspunkt für Anwendungen der FEM betrachtet werden.

Das Ziel dieses Verfahrens ist die Berechnung der unbekanntenen Verschiebungen und Verdrehungen der Knoten. Aus ihnen lassen sich die Verzerrungen und Spannungen in den Elementen berechnen. Diese Knotenverschiebungen und -verdrehungen stehen mit den Elementkräften durch die Gleichung

$$\underline{K} \cdot \vec{U} = \vec{F} \quad (1)$$

mit  $\underline{K}$  – Steifigkeitsmatrix,  $\vec{U}$  - Vektor der Knotendeformationen,  $\vec{F}$  - Vektor der Knotenkräfte in Beziehung.

In AP 4 wurden die Methoden festgelegt, die zur Analyse und Beurteilung der Brücken herangezogen wurden. Es wurde festgelegt, ausschließlich Grenzzustände der Tragfähigkeit zu betrachten, da zum einen eine Einschränkung der Gebrauchstauglichkeit (große Verformung) in einer außergewöhnlichen Situation offensichtlich ist und von den Einsatzkräften abgeschätzt werden kann.

Für die weitere Bearbeitung wurden sowohl vereinfachte Methoden, als auch die Methode der Finiten Elemente als tauglich befunden.

## **2.6 AP 5: Risikokarten für bestehende Infrastruktur**

Ziel des AP 5 war es, die betroffene Verkehrsinfrastruktur zu identifizieren und deren Risiko möglichst genau bewerten zu können. In diesem Arbeitspaket wurden die Ergebnisse der TUM und der AP 2 – 4 zusammengefasst.

Risiko wird in verschiedenen Fachdisziplinen unterschiedlich definiert. Im Versicherungswesen und in den Ingenieur- und Umweltwissenschaften wird Risiko in der einfachsten Form als das Produkt aus Gefahr, Exposition und Vulnerabilität verstanden:

Risiko = Gefahr × Exposition × Vulnerabilität (Abb. 6)

Dabei gilt:

- Gefahr: Gefahrenzone, Eintrittswahrscheinlichkeit einer Gefahr [ $1/(n\text{-Jahren})$ ]
- Exposition: Geographischer Ort und Risikoelemente (Bauwerkswert [EUR], betroffene Personen [Anzahl])
- Vulnerabilität: Verletzbarkeit der Objekte [%]

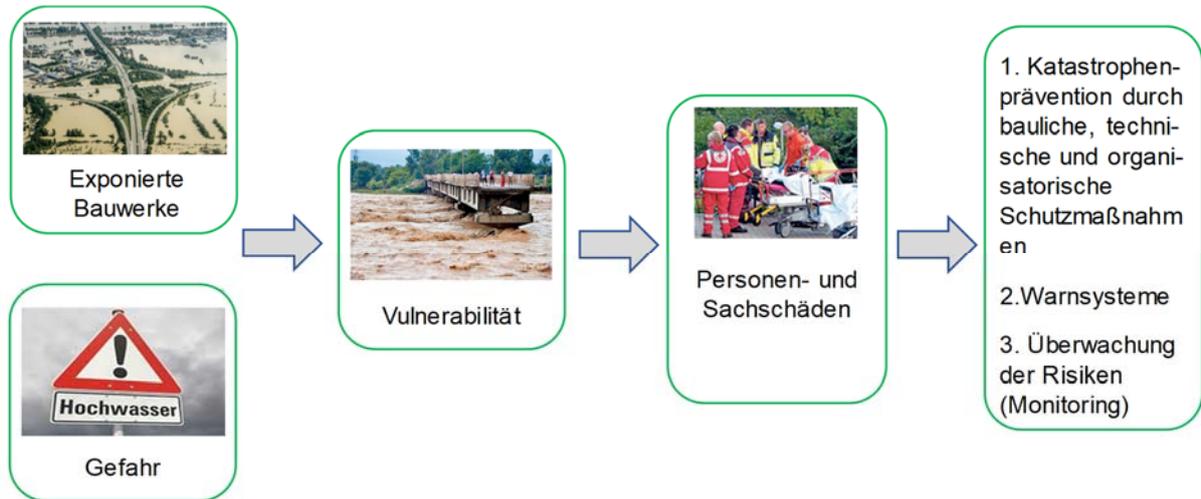


Abb. 6: Parameter für die Risikobewertung und Schutzmaßnahmenplanung

Auf Basis dieser Grunddefinition wurde der Brücken-Status (z.B. befahrbar, eingeschränkt befahrbar, nicht befahrbar) ermittelt und in einer Risikokarte in leicht verständlicher Form nach dem Ampel-Prinzip dargestellt (Abb. 7)

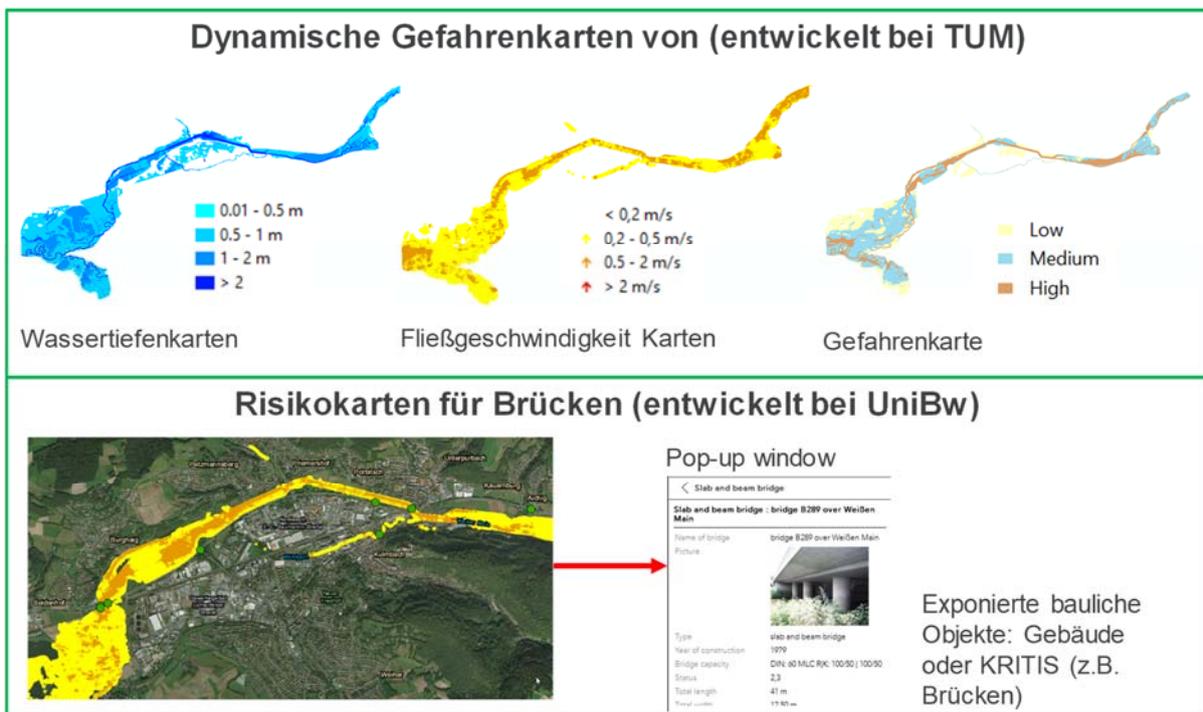


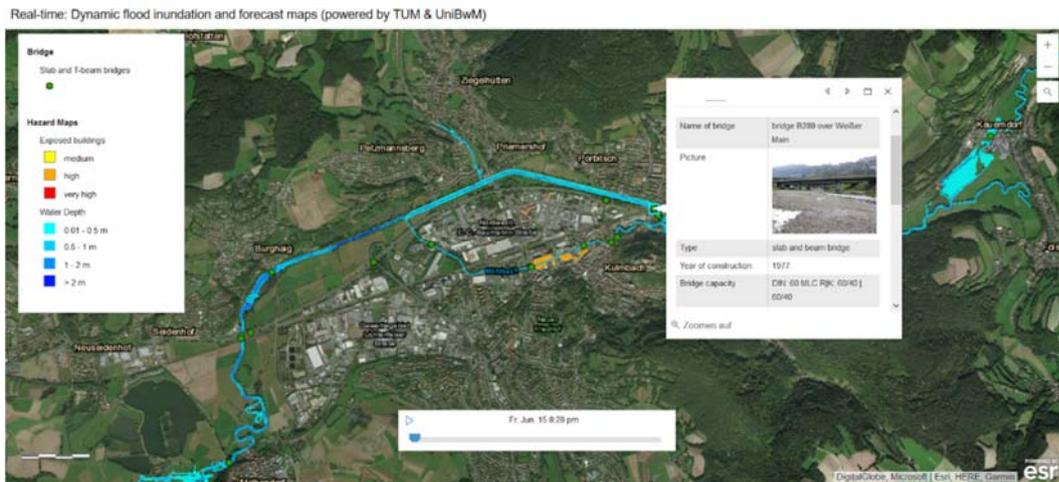
Abb. 7: Risikoarten für Brücken (prototypisch)

Gemeinsam mit der TUM wurde eine Masterarbeit zum Thema "Visualizing Uncertainties and Dynamic Flood Inundation Mapping Using a Web Based GIS System: Case Study City Kulmbach" betreut. Die Ergebnisse dieser Arbeit, die sich auf wesentliche Vorarbeiten der UniBwM stützt, sind zu einem großen Teil in die „TransInfra“-WebGIS Plattform und in den FloodEvac-Demonstrator integriert.

In Rahmen dieser Masterarbeit waren folgende wesentliche Ziele zu bearbeiten:

- Erstellung von dynamischen bzw. zeitabhängigen Überschwemmungskarten mit Wassertiefen und Fließgeschwindigkeiten für die Hochwasservorhersage (Abb. 8)
- Erstellung von Gefahren- und Risikokarten für exponierte bauliche Objekte wie Brücken und Gebäude
- Entwicklung einer Datenstruktur für die Übertragung bzw. Visualisierung der Daten aus der Simulations-Software in die FloodEvac-Plattform
- Verbesserung der Performance der WebGIS-Applikation im Kontext von großen Mengen von Hochwasser-Datensätzen (Abb. 9). Dabei wurden eigene Funktionen mit der Programmiersprache Python entwickelt, die die Automatisierung des Daten-Managements unterstützen.

**Anfangszeit der Überschwemmung** im Einzugsgebiet Kulmbach und automatische Brücken-Datenabfrage (z.B. Baujahr, Brückentyp, Kapazität, Form der Brückenpfeiler) in einem Pop-Up Fenster:



**Erwartete Hochwassersituation nach ca. 8 Stunden:**



**Erwartete Hochwassersituation nach ca. 12 Stunden:**

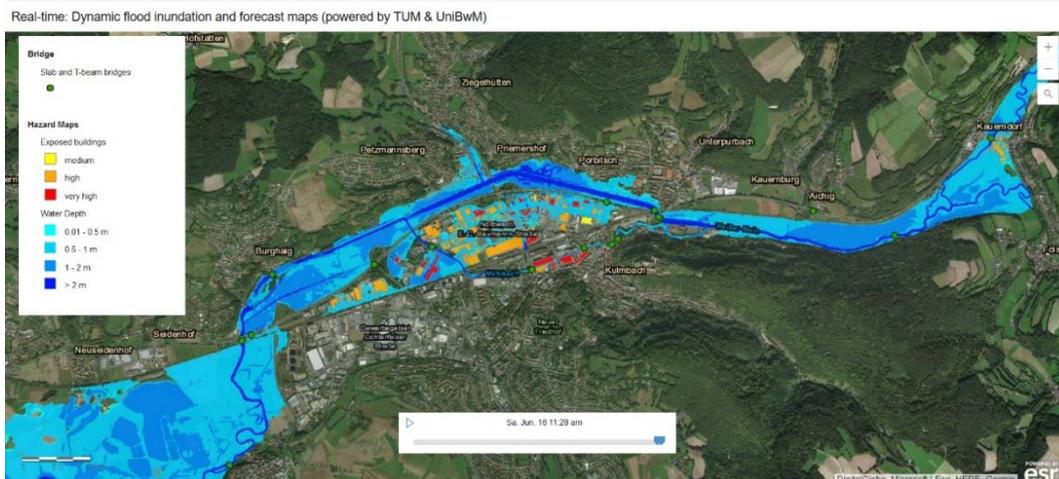


Abb. 8: Dynamische Hochwasserkarten (Wassertiefen, Fließgeschwindigkeiten) und exponierte bauliche Objekte



Abb. 9: Risikokarten –automatische Ermittlung exponierter Bauwerke

Das Ziel, die Entwicklung von Risikokarten, wurde damit erfüllt.

## 2.7 AP 6: Entwicklung baulicher Schutzmaßnahmen

Das Ziel von AP6 war es, bauliche Schutzmaßnahmen auf Basis des AP 5 zu erarbeiten. Dabei wurde ein Maßnahmenkatalog mit Schutzmaßnahmen erstellt und in den Risikokarten hinterlegt.

Die baulichen Schutzmaßnahmen für Brücken im Bestand wurden auf Basis der im AP 2 beschriebenen Auswirkungen durch Hochwasser auf Transportinfrastrukturen abgeleitet.

Der Katalog der Schutzmaßnahmen wird unter der WebGIS-Plattform mit folgenden Funktionen integriert:

- Automatische Auflistung von objektbezogenen baulichen Schutzmaßnahmen, die aus bauwerkstypischen Schwachstellen abgeleitet werden,
- Entscheidungshilfesystem zur Auswahl spezifischer Schutzmaßnahmen für Überbauten und Unterbauten, um Einwirkungen wie Anprall, beginnende oder fortschreitende Kolkbildung, sowie Verklausung vorzubeugen,
- Hinweise zum Einsatzbereich von Maßnahmen, zum Installationsaufwand und zum Wirkungsgrad.

Abb. 10 zeigt einen Ausschnitt aus dem Maßnahmenkatalog

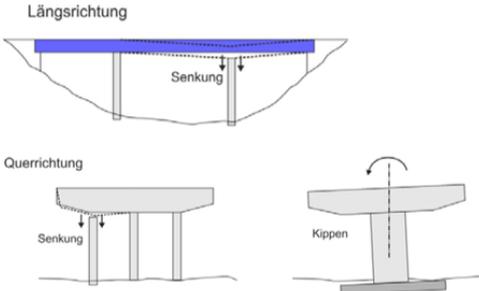
<p><b>Schadensbilder für Unterbau (Brückenpfeiler)</b></p> <p><b>Kolkbildung</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Senkung eines Brückenpfeilers</li> <li>• Kippen eines Pfeilers</li> <li>• Grundbruch nach Unterspülen eines Fundamentes</li> </ul>		<p><b>Maßnahmen</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Gesteinsschüttung (Riprap)</li> </ul>  <ul style="list-style-type: none"> <li>• Gabionen / Reno Matratze®: Drahtgitterkörbe, Matratze mit losen Steinen gefüllt</li> </ul>  <ul style="list-style-type: none"> <li>• Monitoring: Unterwasserkontrolle durch Taucher oder mit Fernsensoren</li> </ul>
<p><b>Schadensbilder für Unterbau (Brückenpfeiler) und Überbau (Brückenplatte)</b></p> <p><b>Verklausung</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Abflusskapazität vorzeitig erschöpft durch Aufstau des Gewässerquerschnitts</li> <li>• Kolkbildung</li> <li>• Abschieben der Brückenplatte durch Wasserdruck</li> </ul>		<p><b>Maßnahmen</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• V-Rechen</li> </ul> 

Abb. 10: Ausschnitt aus dem Maßnahmenkatalog

## 2.8 AP 7: Methoden zur Schnelldiagnose

Das Ziel von AP 7 war die Entwicklung von Verfahren zur Schnelldiagnose und die Implementierung von Schnelldiagnose-Werkzeugen.

Um schnelle Entscheidungen über die Tragfähigkeit von Brücken im Einsatzfall vor Ort, aber auch in einem Lagezentrum zu ermöglichen, wurden mehrere Ingenieur-Tools entwickelt, die in Kombination die ganze Bandbreite an notwendigen Bewertungen zur Brückenbelastbarkeit ermöglichen. Die für eine Einstufung notwendigen geometrischen und materiellen Bauwerksparameter können wahlweise über graphikunterstützte Eingabemasken oder archivierte Brückensysteme (Templates) definiert werden. Üblicherweise werden Brücken nach genormten Lastbildern für unterschiedliche Brückenklassen bemessen. In vielen Fällen besteht aber auch die Notwendigkeit, die

Zulässigkeit einer Überfahrt für Sonderfahrzeuge von Einsatzkräften oder spezielle Schwertransporte zu ermitteln. Zu diesem Zweck wurde ein Hilfsprogramm zur Eingabe von Lastbildern für bestimmte bekannte Fahrzeuge entwickelt.

Maßgeblich für die Standsicherheit von Brücken sind im Wesentlichen die im Überbau durch die Belastung hervorgerufenen Feld- und Stützmomente, die Querkräfte an den Auflagern sowie die ungestörte Belastbarkeit der Unterbauten (Abb. 11).

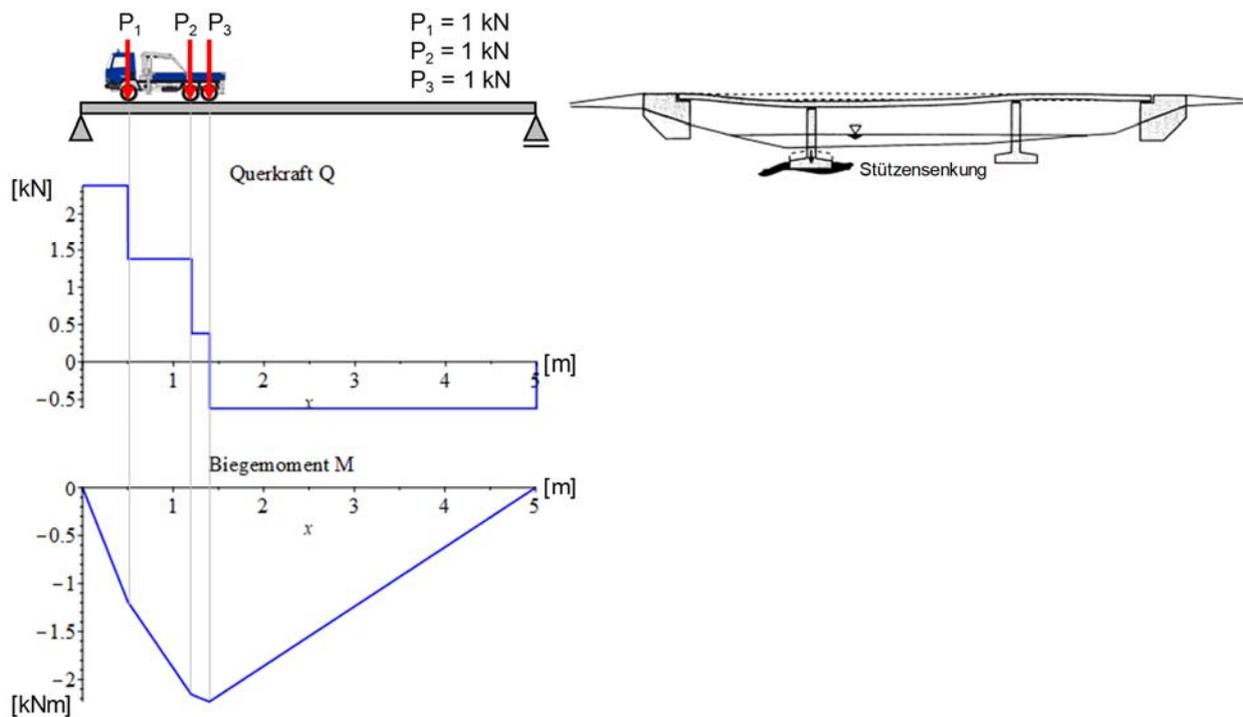


Abb. 11: Beispielhafte Schnittgrößenberechnung eines Einfeldträgers (links), Stützensenkung bei einem Dreifeldträger (rechts)

Je nach dem notwendigen Grad einer Brückenbewertung, wurden verschiedene Tools entwickelt, die vom Aufwand und von der Analysetiefe her ein abgestuftes Vorgehen ermöglichen. Die dabei verwendeten Brückenmodelle stützen sich dann entweder auf vereinfachte Ersatzsysteme (z.B. Durchlaufträger) oder auf realitätsnahe Finite-Elemente-Modelle. Für verschiedene Bewertungsmethoden wurden unterschiedliche Algorithmen implementiert, die z.T. mit unterschiedlichen Werkzeugen in Programmcodes wie JavaScript oder Java umgesetzt wurden, die sich aber in die WebGIS-Plattform und in ein zentrales Bewertungstool problemlos integrieren lassen.

Ein zentraler Programmbaustein widmet sich der Bewertung von Brückenüberbauten im Hinblick auf deren Tragfähigkeit. In diesem kann der Anwender verschiedene Brückentypen auswählen, z.B. Platten-, Plattenbalken- oder Fachwerkbrücken. Dies führt zu einer typenspezifischen Eingabeoberfläche, über die alle geometrischen Daten zum Brückenquerschnitt (z.B. Plattendicke, Balkenabmessungen, Kappengeometrie)

und zum Längssystem (Anzahl und Spannweite der Brückenfelder) typenspezifisch eingegeben werden können. Von Bedeutung ist noch, ob es sich bei einer mehrfeldrigen Brücke um ein Durchlaufträgersystem oder um eine Folge von Einfeldträgern handelt. Schließlich muss der Anwender entweder ein Referenzfahrzeug wählen, auf das das Brückentragwerk geprüft werden soll oder ob iterativ eine maximal zulässige Fahrzeugbelastung ermittelt werden soll. Innerhalb des Bewertungstools kann eine Auswahl zwischen den verschiedenen Analysemethoden getroffen werden, von einem schnellen Überschlagsverfahren bis zu einer FEM-Berechnung.

Um die Tragfähigkeit einer Brücke bewerten zu können, ist eine Begutachtung des Unterbaus unumgänglich. Über die GUI besteht die Möglichkeit, Abmessungen, Formen und Anordnungen von Pfeilern zu definieren. Da Pfeiler in der Regel parallel zur Fließrichtung des überquerten Gewässers stehen, dieses jedoch nicht zwingend im 90°-Winkel zur Brückenlängsachse verläuft, ist die Möglichkeit zur Angabe eines Winkels der Pfeilerstellung gegeben. Mit Hilfe des bereits entwickelten Tools zur empirischen Berechnung von Kolk-tiefen, werden, abhängig von den Strömungsverhältnissen bei Hochwasser, potentielle Unterspülungen identifiziert. Durch die Berechnung der resultierenden Druckkraft der Bodenpressung werden die Standsicherheit und die Kippgefahr von Pfeilern und Brücke untersucht. Gegebenenfalls ergeben sich somit Beschränkungen der maximal möglichen Lasten aus dem Überbau auf die Pfeiler.

Das Ergebnis der Gesamtbewertung der Standsicherheit eines Brückentragwerks wurde schließlich in leicht verständlicher Form nach dem Ampel-Prinzip in einer Risikokarte dargestellt (Abb. 12).



Abb. 12: Risikokarte mit Anzeige des Brücken-Status

Um im Hochwasserfall schnell Brückenbewertungen für verschiedene Katastrophenszenarien vornehmen zu können, ist es ratsam, für typische Hochwasserregionen Brückendaten in einer Datenbank vorzuhalten. Es wurde die Möglichkeit geschaffen, für die Bewertungs-Tools eine solche Datenbank aufzubauen, die jederzeit um ereignisbedingt neu einzustufende Brücken erweitert werden kann. Der aktuelle Status von Brücken kann damit, außer über die ständig aktualisierte Risikokarte, auch über mobile Geräte kommuniziert werden, die per Datenbanksynchronisation automatisch über veränderte Lagen informiert werden.

Der Zielwert der Beurteilung ist die Befahrbarkeit für bestimmte Fahrzeuge. Nicht standardisierte Fahrzeuge, z.B. ein Bus zur Evakuierung oder ein Einsatzfahrzeug des THW können in einem speziell dafür programmierten Tool definiert werden. Der „Fahrzeuggenerator“ wurde als eigenständige Android-Applikation programmiert und mit der Bewertungs-App verknüpft (**AP 10**). Über vordefinierte Eingabefelder einer GUI können damit Lastbilder eigener Fahrzeuge und Fahrzeugkombinationen (z.B. LKW mit Anhänger) erstellt werden. Hier wurde ebenfalls auf eine Datenbankspeicherung zurückgegriffen. Auf diese Datenbank kann von der Bewertungs-App zugegriffen werden. Somit ist es möglich, alle definierten Lastbilder zur Prüfung der Befahrbarkeit eines Brückentragwerks heranzuziehen.

## **2.9 AP 8: Erarbeitung von Checklisten zur Schadensbewertung**

In AP 8 wurden Kriterien zur Bewertung von Schäden nach einem Ereignis im Hinblick auf die Statik untersucht. Das Ziel ist eine Checkliste, die als Handlungsempfehlung für Einsatzkräfte dient.

Auf Basis der DIN 1076 und der VDI-Ri 6200 wurden Checklisten erstellt, die Handlungsanweisungen geben, wann ein Schaden ein signifikantes Ausmaß überschreitet und damit statisch relevant wird.

Eine eindeutige Aussage ist hierbei nicht zu treffen. Es muss immer von einer Fachperson eingeschätzt werden, inwiefern sich Kombinationen von Schäden auf das statische Verhalten auswirkt. So sind Risse mit einer Rissbreite von mehreren Millimetern kein statisches Problem (lediglich Langlebigkeit gefährdet), jedoch gehen derartige Risse in der Regel aus sehr großen Verformungen hervor, die wiederum ein Stabilitätsproblem erzeugen können. Stellt sich beispielsweise ein Druck belastetes Bauteil (Stütze) schief, bedeutet das eine erhöhte Belastung und damit eine geringere Resttragfähigkeit.

AP 8 wurde zugunsten der Arbeitspakete 5 und 9 lediglich im Mindestumfang bearbeitet.

## **2.10 AP 9: Bewertung und Auswertung von Signal- und Sensordaten im Hinblick auf das Tragverhalten**

Ziel von AP 9 war die Auswertung von Signal- und Sensordaten im Hinblick auf das Tragverhalten. Das Ergebnis sind die Anforderungen an die Messgenauigkeit sowie eine Anwendung zur Brückenuntersuchung.

Das Arbeitspaket 9 befasst sich mit der Auswertung von Daten, die zusammen mit den Teilvorhaben 4 (JUniB) und 5 (HSMW) gewonnen werden. Dabei handelt es sich zum einen um Bildinformationen der Sonarkamera des Unterwasserroboters, zum anderen um Signaldaten von Beschleunigungssensoren von Smartphones (SP).

Die Bildqualität der Sonarkamera konnte von der Jacobs University Bremen so weit verbessert werden, dass durch Fach- oder geschultes Personal eine Auswertung im Hinblick auf geometrische Abmessungen von Pfeilern und Fundamenten stattfinden kann. Zusätzlich ist es nun möglich, Auskolkungen an Brückenpfeilern zu erkennen und somit die aktuelle Gründungssituation zu erfassen. Die Bilder, die durch die Sonarkamera unter der Wasseroberfläche gewonnen werden, sind hilfreich und unterstützen die Einsatzkräfte bei der Bewertung des Unterbaues. Selbst bei schlechten Sichtverhältnissen können so Daten gewonnen werden. Die Bilder stellen jedoch nur eine Unterstützung dar. Um verlässliche Werte zu erhalten, müsste die Technologie noch um die Messung von geometrischen Abmessungen erweitert und die Bildqualität verbessert werden. Dieses Ziel konnte jedoch mit den vorhandenen Mitteln nicht weiterverfolgt werden.

Zusammen mit der Hochschule Mittweida wurden Sensoren von Smartphones auf ihre Eignung zur Messung von Brückenschwingungen untersucht. Hierbei kamen unterschiedliche Modelle der mobilen Geräte, die verschiedene Beschleunigungssensoren besitzen, zum Einsatz. Zusätzlich wurde mit einem klassischen Schwingungsmesssystem der Firma Beitzler gemessen. Die Messaufnehmer dieses Systems sind Geophone, die die Geschwindigkeit aufzeichnen. Erste Messungen fanden an einer Testbrücke am Gelände der UniBwM statt. Zusätzlich wurde ein detailliertes numerisches Modell (FE-Modell) erstellt. Die Messungen wurden mit Hilfe einer „Fast-Fourier-Transformation“ (FFT) ausgewertet. Die Auswertungen der Messungen mit den SP wurden mit den Auswertungen der Messungen des Beitzler-Messsystems verglichen. Die Antwortfrequenzspektren zeigen die gleichen Charakteristika. Vergleiche der Eigenfrequenzen, die aus den Frequenzspektren ausgelesen wurden, zeigten gute Übereinstimmungen mit geringen Abweichungen gegenüber den ermittelten Frequenzen aus der FEM und des Beitzler Messsystems.

Eine Anwendbarkeit von Smartphones zur Schwingungsmessung von Brücken kann damit bestätigt werden.

Nachdem die Anwendbarkeit geprüft wurde, wurden weitere Messungen mit Smartphones und dem Beitzer-Messsystem durchgeführt. Die Messungen fanden vom 04. bis 07.10.2016 in Mittweida statt. Es wurden fünf weitere Brücken aufgenommen. Es handelt sich dabei um zwei sehr schwingfähige Hängebrücken in Stahlbauweise, zwei steifere Balkenbrücken in Stahlbauweise (Hauptträger Stahl, Aufbau Holz) und eine sehr steife Bogen-Balken-Brücke in Massivbauweise (Stahlbeton). Alle Messdaten wurden zur Untersuchung aufbereitet. Die aufgezeichneten Signale wurden nach Messreihe und Messkanal in einzelne Dateien getrennt und kategorisiert. Die einzelnen Messreihen wurden mittels FFT ausgewertet und die gemessenen Eigenfrequenzen ermittelt. Die schwingfähigen Hänge- und Balkenbrücken (Stahl) konnten durch Gehen, Laufen, Springen und Hammerschläge angeregt werden. Die Antwortschwingung der Systeme auf diese Anregungen konnten mit allen Messaufnehmern (SP und Beitzer) aufgezeichnet werden. Im Fall der steifen Stahlbetonbrücke reichten die genannten Anregungen nicht mehr aus, um auswertbare Antwortsignale zu erzeugen. Hier musste die Intensität der Anregung deutlich erhöht werden. In diesem Fall wurde zusätzlich ein KFZ zur Anregung verwendet.

Die Anwendbarkeit der Schwingungsmessungen durch Smartphonesensoren zur Systemidentifikation wurde geprüft. Außerdem wurden Möglichkeiten zur Ermittlung von Torsionsschwingungen durch die Kombination von Messsignalen, aufgezeichnet von mehreren Messkanälen, untersucht. Verschiedene Arten der Anregung von steifen Stahlbetonbrücken zur Erzeugung ausreichender, messbarer Systemantworten wurden ebenfalls untersucht und auf ihre Anwendungstauglichkeit hin geprüft.

Aufgrund der erzielten, vielversprechenden Ergebnisse und des großen Interesses an einem System zur Schwingungsmessung durch Smartphones von Seiten des Auftraggebers (BMBF) und der Praxispartner (THW), wurde dieses AP in der Bearbeitung erweitert.

Am 23.05.2017 wurden Schwingungsmessungen an zwei Brücken in Bremen (Lesumbrücke, Wümmebrücke) durchgeführt. Beides sind abgehängte Bogenbrücken mit orthotroper Fahrbahnplatte. Zur Untersuchung des Tragverhaltens der Lesumbrücke, wurde zunächst ein numerisches Modell erstellt. Das Tragwerk wurde nach Originalplänen als 3D-Stubtragwerk modelliert, wobei die Fahrbahnplatte als Trägerrost idealisiert wurde. Mit diesem numerischen Modell wurden u.a. Schwingungsanalysen durchgeführt. Die Schwingungsmessung an der Lesumbrücke wurde mit dem „Beitzer System 9000“ sowie mit Smartphones durchgeführt. Als Anregung der Brücke diente der laufende Verkehr, bestehend aus PKW, Transportern

und LKW. Es konnten erstmalig verwertbare Schwingungen einer Straßenbrücke durch Smartphones aufgezeichnet werden. Dies ist auf die relativ weiche Tragstruktur sowie auf die intensive Anregung durch den Verkehr zurückzuführen. Einzelne Signalabschnitte der aufgezeichneten Antwortschwingung der Brücke wurden mit einer eigenen, in der Software MATLAB implementierten, Fast-Fourier-Transformation ausgewertet. Ein Vergleich der ausgewerteten Messdaten (Eigenfrequenzen) des Schwingungsmesssystems und der Smartphones mit den Ergebnissen des numerischen Modelles zeigte eine gute Übereinstimmung (Abb. 13). Die Messwerte der Smartphones konnten damit erneut validiert werden. Das lässt die Schlussfolgerung auf ein intaktes Bauwerk zu, weil dessen Systemantworten dem ursprünglichen Bauzustand entsprechen.

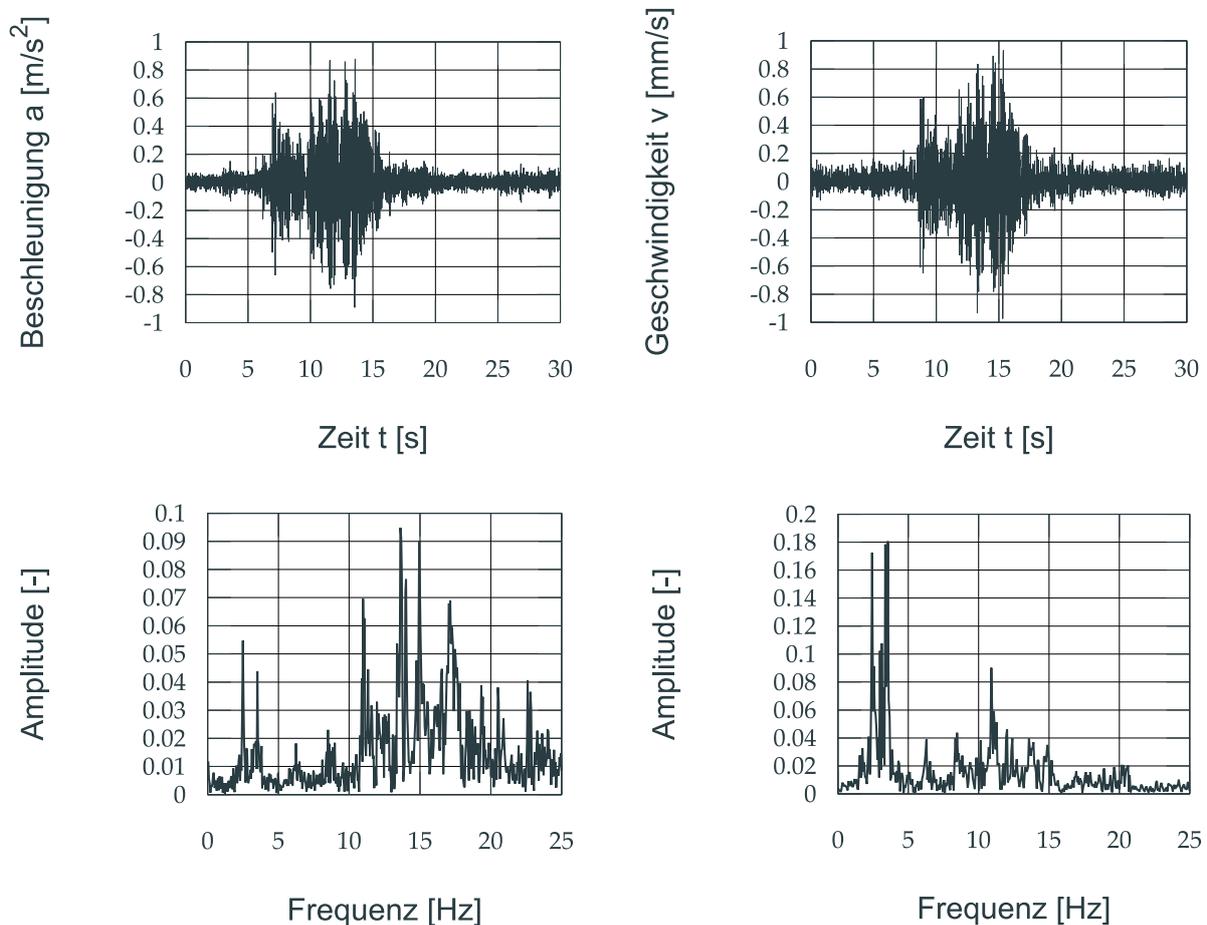


Abb. 13: Schwingungsmessung an der Lesumbrücke Bremen - Links: Smartphone, rechts: Beitzler; oben: Aufgezeichnete Schwingungen durch Verkehr, unten: zugehöriges Frequenz-Energie-Spektrum (FFT)

Neben der numerischen und experimentellen Untersuchung der Brücke, wurde auch ein Roboter der JUB eingesetzt, der eine (semi-)autonome Ausbringung der Sensoren (Smartphones) ermöglicht. Zusätzlich zur Ausbringung der Sensoren, konnten durch den Roboter Daten aufgezeichnet werden, wie die Position des Roboters und geometrische Umgebungsdaten in Form einer Punktwolke.

Durch erneute Messungen an der Testbrücke der UniBwM wurde das System weiterentwickelt. Zum einen wurden die hardwaretechnischen Anforderungen zur Sensitivität und Basisgenauigkeit durch einen Messversuch im Labor an einem Einfeldträger ermittelt. Zum anderen wurde die Indikation von strukturellen Veränderungen eines Tragsystems durch Schwingungsversuche an verschiedenen Umbauten der Testbrücke verfeinert. Die Systemänderungen konnten mit allen Geräten aufgezeichnet werden.

Um eine Einschätzung und Referenzwerte zu erhalten, wurde eine MATLAB-Umgebung entwickelt (Abb. 14), die es erlaubt, Brücken als einfaches Stabwerk zu berechnen und damit sowohl die Eigenfrequenzen, als auch die Eigenformen auszugeben. Das Tool dient der Planung von Messungen, aber auch der Kontrolle eines Tragwerks durch einen Vergleich von Messwerten mit einem Referenz- oder Idealwert.

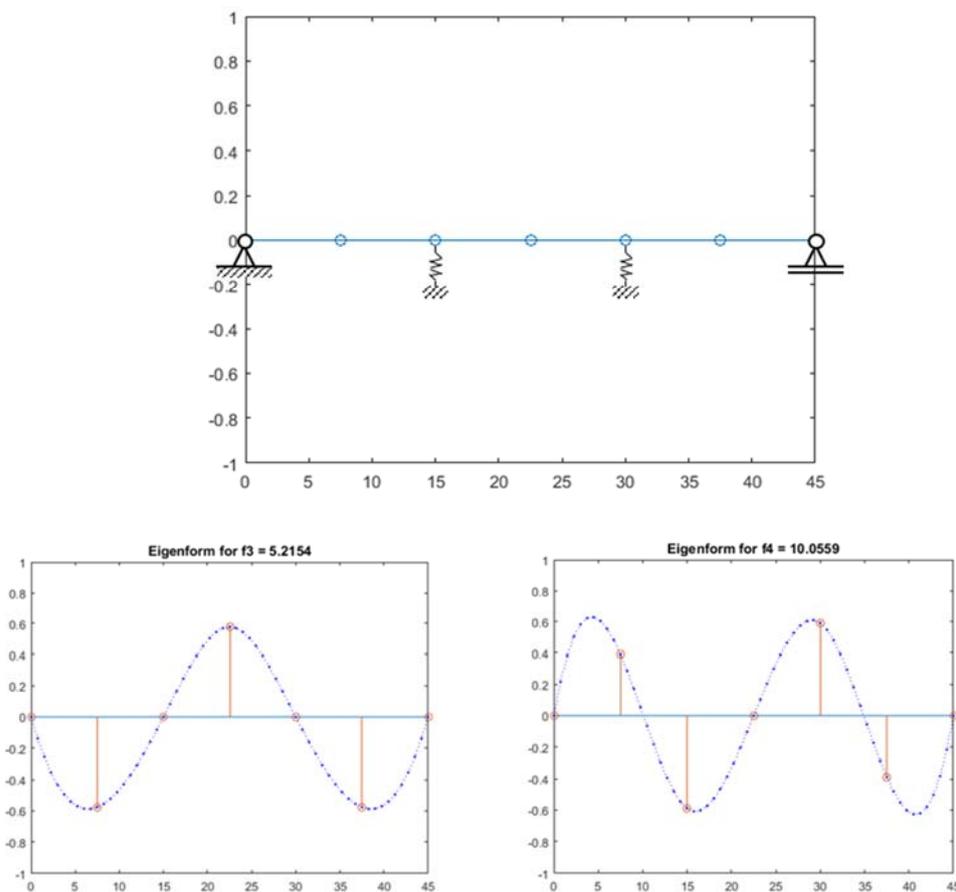


Abb. 14: Matlab-Tool zur Berechnung von Eigenfrequenzen und Eigenformen: oben: Ausgabe des gegebenen Systems, unten links: 3. Eigenfrequenz und die zugehörige Eigenform, unten rechts: 4. Eigenfrequenz und die zugehörige Eigenform

Eine Bewertung von Tragwerken durch Schwingungssensoren mit Hilfe von Smartphones ist damit möglich.

## 2.11 AP 10: Software-Module für den Demonstrator

AP 10 befasst sich mit der Erstellung von Software-Bausteinen für die betreffenden APs. Ziel ist es, für alle implementierbaren Anwendungen ein Software-Modul zu entwickeln.

Zur Schwachstellenanalyse betroffener Verkehrsinfrastruktur (AP3), der Nutzung zur Schnelldiagnose (AP7) und für Referenzwerte zur Prüfung der Kolkiefen (gemessen durch JUnIB, AP9) wurde eine grafische Benutzeroberfläche (GUI) für Endnutzer zur Kolkiefenberechnung entwickelt. Diese ist in Abb. 15 dargestellt.

Der umgesetzte Programmcode dient der ersten Einschätzung von lokalen Kolkiefen an Brückenbauteilen im Fließgewässer. Dabei kann unter verschiedenen empirischen Formeln zur Berechnung der kritischen Geschwindigkeit und zur Berechnung von Kolkiefen gewählt werden. Mit dem Tool ist es möglich, „Kontraktionskolk“ und „Kolk an Brückenpfeilern“ zu berechnen. Auch komplexe Pfeilerstrukturen mit Fundament und / oder Pfahlgründung können im Programm eingegeben und in der Berechnung berücksichtigt werden.

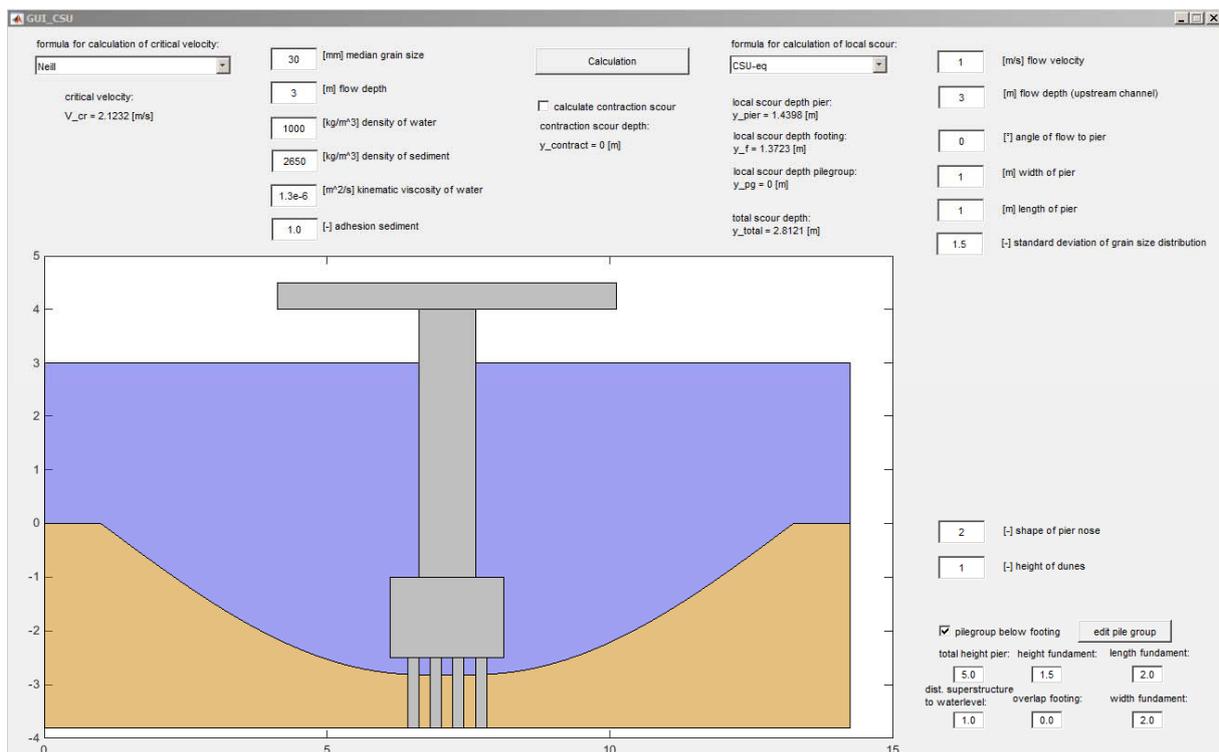


Abb. 15: Grafische Benutzeroberfläche(GUI) des Berechnungsprogrammes zur Kolkiefenermittlung

Das GUI beinhaltet alle relevanten Eingabewerte, die für die gewählten empirischen Formeln benötigt werden, und eine grafische Darstellung des Kolkes sowie der Zahlenwerte der Kolkiefen. Bei Bedarf kann das Programm von geschulten Einsatzkräften bedient und ausgelesen werden.

Des Weiteren wurden Softwaremodule im Tool ergänzt, die es ermöglichen, Die Kolkentiefe an Widerlagern zu bestimmen.

Zur Bewertung der Bauwerke im Referenzgebiet wurde eine Herangehensweise zur möglichst einfachen und schnellen Berechnung entwickelt. Das Vorgehen besteht aus zwei Modulen, die Berechnung des Überbaues und des Unterbaues.

Es fand eine Abstimmung bezüglich der Schnittstellen und der Kompatibilität der verschiedenen Module der jeweiligen Projektpartner für den Demonstrator statt. Somit wurde ein Ansatz entwickelt, wie die einzelnen Module zu einem Gesamt-Tool verknüpft werden können.

Die Bewertung des Unterbaus erhielt keine eigene GUI, da beide Programme mit wenig Programmieraufwand miteinander verknüpft werden können und dann automatisch miteinander kommunizieren. Für die Bewertung des Unterbaues wurde eine reine Stabilitätsbetrachtung programmiert. Die Basis umfasst einen Parser (Einlesen einer Eingabedatei), das Initialisieren des Gleichungssystems (GLS) sowie die Berechnung der Bestandteile des GLS. Um das GLS mit Daten (Steifigkeitsmatrix, Kraftvektor) zu füllen, wurde ein Bernoulli-Balkenelement implementiert. Eine Ergänzung weiterer Element-Typen kann aufgrund des objektorientierten Ansatzes der Programmiersprache Java bei Bedarf erfolgen.

Das Tool zur Bewertung des Überbaues besitzt eine GUI (Abb. 16), die mittels der Programmiersprache Java als Android-Applikation entwickelt wurde.

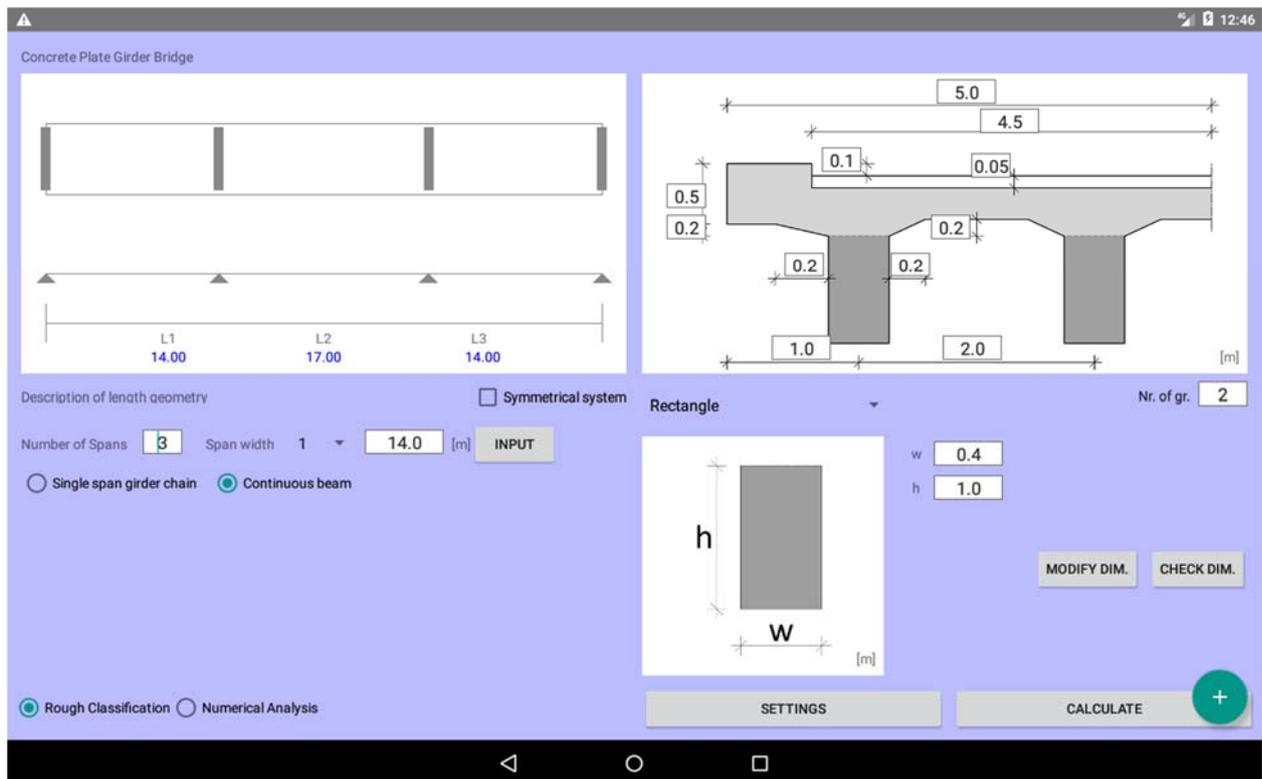


Abb. 16: Android-Bewertungstool für Brücken - Eingabe zur schnellen Bewertungsmethode von Stahlbeton-Plattenbalkenbrücken

Es wurden drei Ansätze (schnelle/analytische, numerische und Einflusslinien/Flächen) mit unterschiedlichen statischen Systemen (Stab- und Flächentragwerke) für die Abschätzung der Befahrbarkeit von Brücken entwickelt. Dabei wurde, wie in AP 4 festgelegt, sowohl ein einfacher Ansatz mit Stabwerks-/Tabellenberechnungen, aber auch ein FEM-Ansatz mit finiten Flächenelementen umgesetzt. Die Eingabe ist möglichst einfach entwickelt, um dem Nutzer eine schnelle Eingabe zu ermöglichen. Eine Schulung ist empfohlen, die Software muss aber nicht durch Experten bedient werden. Die Eingabe umfasst Bauwerksdaten, die vorab aus den Bauwerksdokumenten (SIB-Datenbank, Bauwerksbuch, Planung) oder auch vor Ort durch einfache Messmethoden bestimmt werden können. Beispielsweise muss der Nutzer die Anzahl der Felder, die Feldweiten und die geometrischen Daten des Querschnittes angeben. Unterschiedliche Materialien und Brückentypen (z.B. Plattenbalken aus Stahlbeton, Stahl-Stahlbeton-Verbundbrücke, usw.) sind vorab hinterlegt und werden ausgewählt, bevor die eigentliche Eingabe erfolgt. Der Nutzer sieht damit sofort, welche Daten benötigt werden.

Über ein Datenbanksystem (SQLite) wurde die persistente Speicherung von Brückentragwerken auf den mobilen Geräten ermöglicht. Dieses System kann mit Hilfe einer Synchronisation außerdem dazu genutzt werden, alle Geräte der Einsatzkräfte in einem Einsatzgebiet mit derselben Datenbasis zu versorgen. Wird ein neues Tragwerk

(oder Fahrzeug) auf einem Gerät hinterlegt, kann das neue Objekt auf alle Geräte, die eine Netzwerkverbindung haben, verteilt, bearbeitet und bewertet werden. Zusätzlich können mit einem ähnlichen Ansatz einzelne Daten, wie Hochwasserdaten oder Ergebnisse der Brückenbewertung, auf verschiedene Geräte und Anwendungen verteilt und aktuell gehalten werden. Das ermöglicht einen automatisierten Datenaustausch zwischen den Bewertungs-Apps und dem Demonstrator sowie den Risikokarten, sofern eine entsprechende Schnittstelle implementiert wird.

Die Bewertung der Brücken erfolgt, wie in AP 2 beschrieben, bezüglich der Befahrbarkeit durch bestimmte Fahrzeuge. Da diese Fahrzeuge variieren können und verschiedene Einheiten ggf. unterschiedliche Fahrzeugflotten besitzen, wurde ein Android-Tool zur Eingabe und Erstellung von Lastbildern zur Brückenbewertung implementiert. Das Tool ist in Abb. 17 dargestellt.

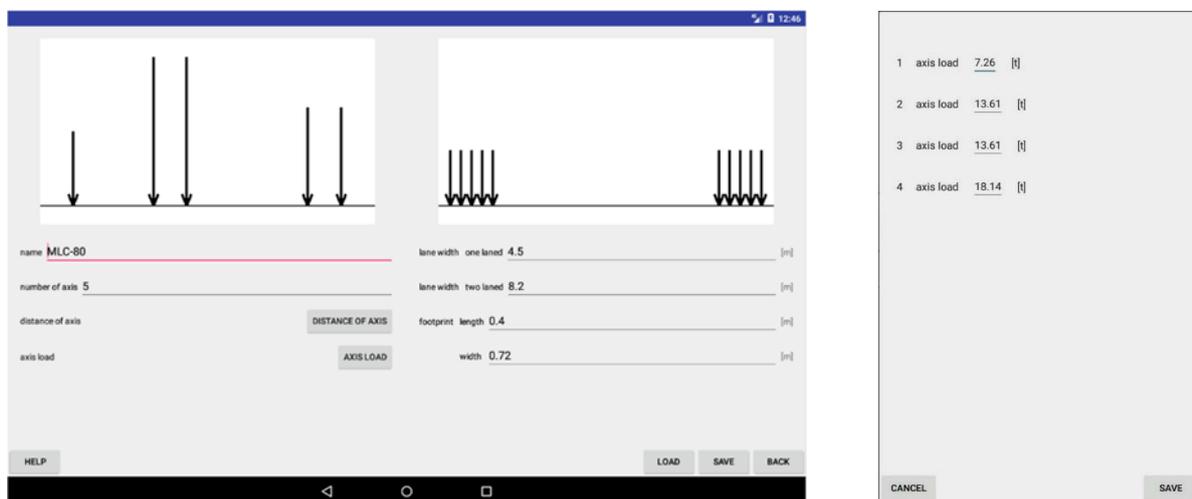


Abb. 17: Fahrzeuggenerator - links: Eingabeoberfläche für Radfahrzeuge, rechts: Pop-Up Eingabe für Achslasten

Um mehrere Fahrzeugflotten anzulegen, wurde die Möglichkeit geschaffen, diese mit einzelnen Markern zusammenzufassen.

Alle eingegebenen Fahrzeuge werden, wie auch die Brücken, in einer SQLite Datenbank gespeichert und können ebenso verteilt werden. Auf diese Datenbank wird aus der Android-Applikation zur Brückenbewertung zugegriffen. Damit ist gewährleistet, dass Einsatzkräfte Brücken maximal flexibel bewerten können.

## **2.12 Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises**

Die wichtigste Position waren die Personalmittel zur Finanzierung des wissenschaftlichen Personals über 42 Monate (inklusive 6 Monate Verlängerung). Ohne diese Finanzierung hätten die Ergebnisse nicht im vorliegenden Umfang und der gegebenen Qualität erreicht werden können.

Außerdem wurden die Reisemittel benötigt um Persönliche Abstimmungen mit den anderen Projektpartnern, die Projektpräsentationen, das Meilensteintreffen sowie die beiden Projekttreffen in Indien zu ermöglichen.

Für eine detaillierte Einsicht wird auf die Projektabrechnung der Universitätsverwaltung verwiesen.

## **2.13 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit**

Durch den Beitrag zur Weiterentwicklung des Wissenschafts- und Innovationsstandortes Deutschland, wurde durch das Projekt sowohl die Verwertungschance, als auch die Marktposition der deutschen zivilen Sicherheitsforschung und -wirtschaft verbessert.

Da mit dem Projekt kein unmittelbares wirtschaftliches Interesse verfolgt wurde, hätte es ohne die Zuwendung nicht durchgeführt werden können. Außerdem bestanden, wie bei jedem Forschungsprojekt, vor der Durchführung nicht abschätzbare Risiken. Diese Risiken konnten nur durch eine öffentliche Förderung übernommen werden.

Die geleistete Arbeit war, wie aus den Ergebnissen der einzelnen Arbeitspakete ersichtlich, umfangreich. Viele der Ergebnisse bezüglich Grundlagen und Entwicklung können noch weiter ausgearbeitet werden. Durch die geleistete Arbeit konnte gezeigt werden, dass durch den Einsatz von interdisziplinärem Wissensaustausch und der Umsetzung in Softwaretools, Anwender profitieren und moderne Anwendungsmethoden geschaffen werden.

## **2.14 Nutzen und insbesondere Verwertbarkeit der Ergebnisse**

Die Ergebnisse der einzelnen Arbeitspakete sind für sich allein betrachtet schon wichtige Bausteine des Gesamtvorhabens (Demonstrator). Grundsätzlich können die Bausteine auch alleine als Module in beliebige Systeme zur Bewertung baulicher Verkehrsinfrastruktur eingesetzt werden. Die Methoden und Verfahren sind so aufbereitet, dass sie nicht an einen regionalen Untersuchungsraum gebunden sind.

Insbesondere die Verwertung der Risikokarten (WebGIS-Plattform), kombiniert mit Infrastrukturdaten und Bewertungstools, stellt einen erheblichen Fortschritt dar, der in

der Praxis so noch nicht angewendet wird. Die Vereinheitlichung und weitere Nutzung detaillierter Hochwasserdaten für den gesamten Bundesraum oder die Betrachtung regionaler Räume, kombiniert mit Hochwassersimulationen (TUM) bietet einen erheblichen Vorteil in der Risikoermittlung von Verkehrsinfrastruktur.

Außerdem wurden die Erkenntnisse, wie Verkehrsinfrastruktur, insbesondere Brücken, bewertet werden können, ohne dass hinreichende Daten bekannt sind, erheblich erweitert. Die Untersuchung der Anwendungstauglichkeit von Smartphones zur Schwingungsmessung an Brücken wird nach weiterer Entwicklung einen Beitrag zum dauerhaften Monitoring sowie der Bewertung von Tragwerken und damit zur Sicherheit der baulichen Infrastruktur liefern.

Außer den theoretischen Ergebnissen wurde im Projekt gezeigt, dass praktisch anwendbare Software für die Unterstützung von Entscheidungsträgern im Evakuierungsfall beim Auftreten von Inlandsfluten geschaffen werden kann. So wurde beispielsweise bereits Interesse an der Bewertung von Brücken durch das THW bekundet, vor allem für eine Anwendung im Ausland. Neben Katastrophenhelfern ist eine Anwendung in anderen Bereichen, wie beispielsweise dem Versicherungssektor denkbar.

## **2.15 Projektrelevante Fortschritte bei anderen Stellen innerhalb des Förderzeitraums**

Dem Projektteam von TransInfra sind keinerlei Fortschritte bei anderen Stellen innerhalb des Förderzeitraums bekannt.

## **2.16 Veröffentlichungen des Ergebnisses**

Die Ergebnisse des Teilprojektes TransInfra wurden in folgenden Artikeln und Konferenzbeiträgen veröffentlicht:

Gebbeken N., Weigl W.: Baulicher Hochwasserschutz – *100-Prozent-Schutz gibt es nicht, Das Projekt FloodEvac und Auszeichnung mit der Wasserwacht-Medaille.*  
Bayerische Staatszeitung Nr. 21, Freitag 22. Mai (2015)

Gebbeken N.: *Baulicher Bevölkerungsschutz, Abriss oder Sanierung: Warum wird nach Katastrophen das Restrisiko beschädigter Tragwerke so divergent beurteilt?* Der Prüflingenieur Nr. 46, Mai 2015, Berlin Bundesvereinigung der Prüflingenieure, ISSN 1430-9084, 67-74

Gebbeken N., Pfeiffer E., Videkhina I., Garsch M., Rüdiger L.: *Risikobewertung und Schutz von baulichen Infrastrukturen bei Hochwassergefahr*. Bautechnik, Berlin Verlag Ernst & Sohn Bautechnik 88 (2016) Heft 4, ISSN 0932-8351

Benndorf M., Garsch M., Haenselmann T., Gebbeken N., Videkhina I.: *Mobile Bridge Integrity Assessment*, Konferenzbeitrag Sensors IEEE, 2016

Mueller C. A., Fromm T., Buelow H., Birk A., Garsch M., Gebbeken N.: *Robotic Bridge Inspection Within Strategic Flood Evacuation Planning*, Konferenzbeitrag Oceans, 2017

Benndorf M., Garsch M., Haenselmann T., Gebbeken N., Mueller C. A., Fromm T., Luczynski T., Birk A.: *Robotic Bridge Statics Assessment Within Strategic Flood Evacuation Planning Using Low-Cost Sensors*, Symposium on Safety Security and Resuce Robotics, Schanghai, 2017

Garsch M., Gebbeken N.: *Schwingungsmessungen an Brücken mit Hilfe von Smartphones*, Konferenzbeitrag Baustatik-Baupraxis, 2018

Bhola, P.K.; Leandro, J.; Videkhina, I.; Disse, M.: *Dynamic Risk Mapping in Fluvial Flood Application Using a Two-dimensional Hydrodynamic Model Incorporating the Model Parameter Uncertainties*. International Conference on "Natural Hazards and Risks in a Changing World", University of Potsdam 4-5 October 2018

Hertle T., Garsch M., Gebbeken N.: Die aktuellen Vorgehensweisen bei der Bauwerksprüfung und der Dokumentation sind heute nicht mehr zeitgemäß, Der Prüflingenieur Nr. 53, November 2018, Bundesvereinigung der Prüflingenieure, ISSN 1430-9084

Mit einer Vorstellung der Projektergebnisse wurde an folgenden **Veranstaltungen** teilgenommen:

- BMBF – Innovationsforum 2016
- BMBF-Katastrophenschutzkongress 2016
- AquaAlta – Essen 2016
- BMBF - Innovationsforum 2018
- BMBF - Sommerakademie 2018