# Geotechnische Problemstellungen bei der Sicherung bestehender Mainbrücken gegen Schiffsstoß

Dr.-Ing. M. Raithel; Dipl.-Ing. E. Leusink, Kempfert + Partner Geotechnik, Würzburg Dr.-Ing. H.-J. Franke GMP - Geotechnik GmbH & Co. KG, Würzburg Dipl.-Ing. R. Haupt Staatliches Bauamt Schweinfurt

## 1 Einführung

Der Main stellt als Bundeswasserstraße und Teil eines transeuropäischen Binnenwasserstraßennetzes eine wichtige Verbindungsstrecke zwischen dem Rhein und der Donau dar. Durch den Ausbau des Mains mit einer Vertiefung der Fahrrinne von 2,50 m auf 2,90 m und einer Verbreiterung von 36 m auf 40 m zur europäischen Wasserstraßenklasse Vb soll eine ganzjährige Befahrbarkeit mit Großmotorgüterschiffen bis 110 m Länge und 11,4 m Breite sowie von Schub- und Koppelverbänden bis 185 m Länge von der Mainmündung bis zum Rhein-Main-Donau Kanal gewährleistet werden.



#### Wasserstraßenklassen (Vergangenheit)

Bild 1: Hochstufung des Mains in die Wasserstraßenklasse Vb

Der Großteil der schiffbaren Strecke des Mains liegt mit 330 km Länge in Bayern, wobei 83 Brückenbauwerke den Main kreuzen (Goj 2010). 48 dieser Brückenbauwerke befinden sich hierbei im Bereich der staatlichen Bauämter Würzburg, Schweinfurt und Aschaffenburg, wobei die meisten Brückenbauwerke zwischen 1960 und 1980 errichtet wurden und nunmehr bei vielen dieser Brücken Sanierungsbedarf besteht. Da die Schiffe mit dem Ausbau des Mains immer schwerer werden, ergeben sich nunmehr für die Brückenbauwerke entsprechend größere Stoßkräfte. Diese sind bei den Planungen zur Sanierung bzw. Ertüchtigung der bestehenden Brückenbauwerke zu berücksichtigen.

#### 2 Regelungen zum Schiffsstoß

Der Anprall von Schiffen an die Pfeiler oder Überbau von Brücken war lange Zeit im Gegensatz zu Anprall von Kfz und Anprall von Schienenfahrzeugen normativ gemäß DIN 1072 nicht geregelt. Die erforderlichen Angaben sollten von der zuständigen Behörde erfragt werden. Mit der DIN 1055-9:2003-08, Einwirkungen auf Bauwerke, Außergewöhnliche Einwirkungen, lag erstmals eine allgemein gültige Regelung zu Lastannahmen und Vorgehensweisen für den Schiffsanprall auf Brücken vor (siehe auch Kunz, 2006). Diese Regelungen wurden dann durch zusätzliche Vorgaben und Erläuterungen der Bundesanstalt für Wasserbau im BAW-Brief Nr. 1 - März 2006 585 – B und dem Merkblatt über den Nachweis bestehender Brücken auf Schiffsanprall (MNaBS) vom März 2010 ergänzt und präzisiert. Demzufolge sind beim Nachweis von Brückenbauwerken dynamische Stoßlasten als Frontalund Seitenstoß anzusetzen, die sich in Abhängigkeit der Wasserstraßenklasse ergeben, vgl. Bild 2. Hierbei wird zwischen einem plastischen Stoß (bei Stoßlasten über 5 MN, Frontalstoß) und einem elastischen Stoß unterschieden. Des Weiteren ist aufgrund der Gleitreibung des Schiffes am Pfeiler im Zuge des Flankenstoßes auch ein Reibungsstoß R in Pfeilerlängsrichtung zu berücksichtigen, der mit R =  $0.4 \times F_L$  angesetzt wird.



Bild 2: Schiffsstoß / Stoßlasten (Auszug aus DIN 1055-9)

Weiterhin kann eine Abschätzung des dynamischen Verhaltens auch anhand einer quasistatischen Betrachtung erfolgen, wobei in DIN 1055-9 Anhaltswerte aufgenommen wurden, die auf Erfahrungen mit verschiedenen dynamischen Analysen beruhen und in der Regel "konservative" Ergebnisse zeigen. Die quasi-statischen Lasten sind hierbei unter Ansatz eines dynamischen Lastfaktors DLF mit  $F_{stat} = DLF \times F_{dyn}$  aus den dynamischen Lasten zu errechnen.

## 3 Mainbrücke Eltmann

#### 3.1 Bauwerk und Baugrund

Die fünffeldrige Straßenbrücke steht mit den beiden südlichen Pfeilern (Pfeiler 1 und Pfeiler 2) im Bereich der Fahrrinne der Bundeswasserstraße Main. Mit dem Bauwerk quert die Bundesstraße 26 das Mainvorland zwischen Eltmann und Ebelsbach in Nord-Süd-Richtung siehe Bild 3). Der Spannbetonüberbau liegt auf Rundpfeilern mit 3,5 m Durchmessern auf, die flach auf Einzelfundamenten gegründet sind. Die lichte Weite zwischen den Pfeilern beträgt 52 m.



Bild 3: Mainbrücke Eltmann (Quelle: Staatliches Bauamt Schweinfurt)

Nach Vorberechnungen durch das Ingenieurbüro Mangerig & Zapfe wurde festgestellt, dass das bestehende Bauwerk ohne Ertüchtigungsmaßnahmen keine ausreichende Sicherheit im Lastfall Schiffsanprall aufweist. Daher erfolgt durch das Staatliche Bauamt Schweinfurt eine umfassende Planung der erforderlichen zusätzlichen Maßnahmen zur Sicherung der Mainbrücke gegen Schiffsstoß.

An beiden Flusspfeilern wurden die Baugrundverhältnisse jeweils mittels zwei Aufschlussbohrungen bis ca. 9 m unterhalb der geplanten Pfahlfußebene erkundet. Weiterhin wurden an einem Pfeiler zwei schwere Rammsondierungen zur Ermittlung des Festigkeit bzw. der Lagerungsdichte der Böden ausgeführt. Die Ergebnisse sind in Bild 4 dargestellt.



Bild 4: Erkundungsergebnisse Pfeiler2

Im Brückenbereich wird der tiefere Untergrund durch Felsschichten des Mittleren Keuper (km) aufgebaut. Die Felsschichten bestehen im tieferen Untergrund aus Estherienschichten, die überwiegend aus Tonsteinen mit einzelnen Gipssteinlagen aufgebaut werden. Darüber wurde der Schilfsandstein als Leithorizont aufgeschlossen. Im Bereich der Mainbrücke Eltmann besteht der Schilfsandstein aus einer Wechsellagerung aus bankigen bis dickbankigen Sand- und plattigen Tonsteinen Die Festgesteine werden durch eine Verwitterungshorizont aus vollständig zersetzten Tonund Schluffsteinen (Verwitterungslehm, tonig-sandige und kiesige Schluffe) vorwiegend von steifer bis halbfester Konsistenz abgedeckt. Die Mächtigkeit dieser Verwitterungslehme beträgt zwischen ca. 5 bis 20 cm.

Das Festgestein und der Verwitterungshorizont wird abschließend vollständig von quartären Sedimenten des Main in Form von Kiesen und Sanden überlagert. Die bei Pfeiler 2 durchgeführten Sondierungen mit der schweren Rammsonde erreichen in den Kiesen und Sanden Schlagzahlen um  $N_{10} = 2 - 8$ , einzelne Schlagzahlspitzen deuten auf eingelagerte Gerölle hin. Damit sind die Sande und Kiese überwiegend locker bis maximal mitteldicht gelagert.

Als Laborversuche wurden in einem 1. Schritt Korngrößenverteilungen und einaxiale Druckversuche an Felsproben durchgeführt. In einem 2. Schritt wurden 2 zyklische Triaxialversuche an Mainkiesproben (Sande/Kiese) insbesondere zur direkten Ermittlung der dynamischen Steifigkeitsparameter (Elastizitäts- bzw. Schubmodul) und indirekten Ermittlung der statischen Steifigkeitsparameter ausgeführt. Dazu wurden gestörte Proben aufbereitet. Die im Versuch ermittelten dynamischen E-Moduln betragen 90 MN/m<sup>2</sup> bzw. ca. 120 MN/m<sup>2</sup> und sind auch bei zunehmender Anzahl von Lastzyklen konstant, vgl. Bild 5. Die dynamischen Steifemoduln für das Festgestein wurden auf der Grundlage von Erfahrungswerten in einer Bandbreite von ca. 200 bis 400 MN/m<sup>2</sup> angesetzt.



Bild 5: Zyklische Triaxialversuche

#### 3.2 Konzeption der SchiffsstoßsicherungBerechnungs

Die Konzeption der Schiffsstoßsicherung sieht vor, eine direkte Beanspruchung der Brücke infolge Schiffsstoßlasten durch vorgelagerte Schutzbauwerke zu verhindern. Die Schutzbauwerke bestehen jeweils aus einer Stahlbetonplatte (d = 2 m) von 6,9 m x 15,0 m, wobei keine kraftschlüssige Verbindung zwischen Schutzbauwerk und Pfeiler besteht (planmäßiger Ringspalt von 10 cm zwischen Schutzbauwerk und Pfeiler).

Jedes Schutzbauwerk wird auf 4 Bohrpfählen mit einem Durchmesser von D = 150 cm und einer Länge von jeweils ca. L = 9,0 m tief gegründet, vgl. Bild 6.



Bild 6: Konzeption Schiffsstoßsicherung (Mangerig & Zapfe)

#### 3.3 Berechnungskonzept

Das Berechnungskonzept sah eine Kombination und Interaktion von verschiedenen Berechnungsmodellen vor:

- Dynamisches FE-Berechnungsmodell des Gesamttragwerkes als gebettetes System
- Dynamisches, 2-dimensionales geotechnisches FE-Kontinuumsmodell
- Quasi-Statisches 3-dimensionales geotechnisches FE-Kontinuumsmodell

Bei Abbildung des Gesamttragwerkes als gebettetes System ist zu beachten, dass der herkömmlicher Ansatz des Bettungsmoduls anhand des Quotienten aus Steifemodul und Pfahldurchmesser ( $k_s = E_s/D$ ) nicht zur Ermittlung von realistischen Verformungen dienen kann, sondern lediglich zur Ermittlung der Pfahlbeanspruchungen bzw. Schnittgrößen für die

Stahlbetonbemessung. Hierauf weist auch das Regelwerk in Form der DIN 1054:2005-01 und die EA-Pfähle hin.

Da im Berechnungsmodell des Tragwerksplaners der Baugrund nur über lineare Bettungsfedern erfasst werden konnte, wurden die geotechnischen Kontinuumsmodelle daher insbesondere einer Abschätzung und Überprüfung der Bettungsmoduln und einer realistischen Verformungsprognose eingesetzt. Insbesondere zur Ermittlung der Verformungen des Schutzbauwerkes und der Mitnahmeverformungen der Brückengründung infolge eines Frontalstoßes wurden numerische 2-dimensionale dynamische Berechnungen mit dem Programmsystem PLAXIS jeweils unter Ansatz der unteren und oberen Kennwerte für die dynamische Steifigkeit durchgeführt.

In den Berechnungen mit dem ebenen Kontinuumsansatz wurde neben dem flachgegründeten Pfeiler das auf Bohrpfählen gegründete Schutzbauwerk berücksichtigt. Dabei wurden die Bohrpfähle als fiktive Wand angenommen, vgl. Bild 7.



Bild 7: 2-dimensionales dynamisches FE-Berechnungsmodell

Die Berechnungen mit dem FE-Modell zeigten, dass zeitabhängige Horizontalverschiebungen des Schutzbauwerkes in einer Größenordnung von ca. 1,5 cm auftreten können, vgl. Bild 8. Neben den Verformungen des Schutzbauwerkes erfährt auch das Bestandfundament durch die über das Schutzbauwerk in den Baugrund eingeleiteten Kräfte und Verformungen bei einem Schiffsanprall horizontale Verschiebungen in der Größenordnung bis ca. 1 cm und eine geringfügige Verdrehung/Verkippung.

![](_page_7_Figure_1.jpeg)

Bild 8: 2-dimensionales dynamisches FE-Berechnungsmodell

Durch diese dynamische Verformungseinwirkung auf das Fundament des Bestands werden Verformungs- und Schnittgrößenbeanspruchungen im aufgehenden Brückenbauwerk ausgelöst, die beim "Rückschwingen" wiederum zu einer Anregung des Baugrundes im Bereich des Schutzbauwerkes führen können. Diese Anregung des Baugrundes infolge dieser zeitabhängigen Verformung des Bestands wurde in einem 2. Schritt im gebetteten Berechnungsmodell des Gesamtsystems erfasst. Anschließend wurde eine bodendynamische FEM-Berechnung mit PLAXIS bei entsprechender zusätzlicher Berücksichtigung der Einwirkungen aus der Interaktion zwischen dem Schutzbauwerk und dem "Rückschwingen" des Brückenbauwerkes auf das Bestandsfundament ausgeführt.

Zur Überprüfung der dynamischen 2D-Berechnungen für den Frontalstoß sowie zur Erfassung des Flankenstoßes wurden des Weiteren auch 3-dimensionale Berechnungen mit dem Programmsystem PLAXIS 3D mit einem quasi statischen Lastansatz ausgeführt. Hierbei konnte auch die räumliche Konstruktion des Schutzbauwerkes inkl. der gegenseitigen Abstände und Anordnung der Bohrpfähle abgebildet werden. Zur Ermittlung der quasistatischen Lasten aus den vorgegebenen dynamischen Lastansätzen wurde der dynamische Lastfaktor gemäß DIN 1055 Teil 9 verwendet. Des Weiteren wurde untersucht, welche Auswirkungen durch eine angenommene Fuge in Unterkante Pfahlkopfplatte, d.h. bei der Vernachlässigung des Lasteintrags über die Sohlfläche der Pfahlkopfplatte in den Baugrund entstehen, vgl. Bild 9.

![](_page_8_Figure_1.jpeg)

Bild 9: 3-dimensionales FE-Berechnungsmodell

Eine Zusammenstellung der Berechnungsergebnisse des Frontalstoßes im 2-dimensionalen FE-Berechnungsmodell unter Ansatz der dynamischen Lasten sowie des Frontal- und Flankenstoßes im 3-dimensionalen FE-Berechnungsmodell unter Ansatz von quasistatischen Lasten enthält Tabelle 1.

	Maximale Horizontalverformung [cm]		
	2D-Berechnung	3D-Berechnung	3D-Berechnung mit Sohlfuge
Frontalstoß	1,4	1,5	2,2
Flankenstoß	-	0,5	0,8

Tabelle 1: Zusammenstellung	ı der berechneten	Maximalverformungen
rabelle 1. Zusammenstellung		maximalivementiungen

Auf der Grundlage dieser Ergebnisse ist festzustellen, dass aufgrund der zu erwartenden Verformungen beim Schiffsanprall keine Vergrößerung des vorgesehenen Ringsspalts von 10 cm zur Vermeidung eines Kontaktes zwischen dem verformten Schutzbauwerk und Pfeiler erforderlich ist.

## 4 Zusammenfassung und Ausblick

Mit der Einstufung des Main in die europäische Wasserstraßenklasse Vb ist der Ansatz von höheren Schiffsstoßlasten verbunden, wodurch die bestehende Mainbrücke Eltmann ohne Ertüchtigungsmaßnahmen keine ausreichende Sicherheit im Lastfall Schiffsanprall aufweist. Die Konzeption der Schiffsstoßsicherung sieht vor, eine direkte Beanspruchung der Brücke infolge Schiffsstoßlasten durch vorgelagerte Schutzbauwerke zu verhindern. Die Schutzbauwerke bestehen jeweils aus einer Stahlbetonplatte, welche auf 4 Bohrpfählen mit einem Durchmesser von D = 150 cm gegründet wird. Eine kraftschlüssige Verbindung zwischen Schutzbauwerk und Pfeiler soll dabei bewusst vermieden werden, um die Einleitung von Stoßkräften in das bestehende Bauwerk zu vermeiden.

Da im Berechnungsmodell des Gesamttragwerkes der Baugrund nur über lineare Bettungsfedern erfasst wurde, wurden 2- und 3-dimensionale geotechnische Kontinuumsmodelle zur Ermittlung der Verformungen des Schutzbauwerkes und der Mitnahmeverformungen der Brückengründung infolge Schiffsstoß verwendet. Eine kontinuierliche Zusammenarbeit, Abstimmung und Interaktion zwischen dem Tragwerksplaner und dem geotechnischen Sachverständigen bzw. Fachplaner ist hierbei während der gesamten Planungsphase zwingend erforderlich. Aufgrund der Ergebnisse der verschiedenen Berechnungsmodelle konnte letztlich bestätigt werden, dass aufgrund der zu erwartenden Verformungen beim Schiffsanprall keine Vergrößerung des vorgesehenen Ringsspalts von 10 cm zur Vermeidung eines Kontaktes zwischen dem verformten Schutzbauwerk und Pfeiler erforderlich ist.

Entsprechende Untersuchungen und Konzeptionen zur Ertüchtigung von bestehenden Brückenbauwerken bzw. zur Planung von Schutzbauwerken sind für weitere Mainbrücken vorgesehen. Dies umfasst die Mainbrücken bei Horhausen und Hassfurt sowie die historische Mainbrücke bei Marktheidenfeld, siehe Bild 10. Aufgrund der Erfordernis eines Erhalts des optischen Erscheinungsbildes der Mitte des 19 Jahrhunderts gebauten Brücke kann hier die Schiffsstoßsicherung nicht durch ein vorgelagertes Schutzbauwerk sondern muss durch direkte Ertüchtigung des Bestandes erfolgen. Hieraus werden sich zusätzliche Anforderungen an die geotechnische Erfassung und Berücksichtigung der Boden-Bauwerk-Interaktion ergeben.

![](_page_9_Picture_4.jpeg)

Bild 10: Mainbrücke Marktheidenfeld (Quelle: Staatliches Bauamt Würzburg)

### 5 Literatur

- Bundesanstalt für Wasserbau: BAW-Brief Nr. 1 585 B: Schiffsanprall auf Brücken nach DIN 1055-9, März 2006.
- Bundesanstalt für Wasserbau: Merkblatt über den Nachweis bestehender Brücken auf Schiffsanprall (MNaBS), März 2010.

DIN 1055:2003-08 Teil 9: Einwirkungen auf Bauwerke, Außergewöhnliche Einwirkungen.

- GMP Geotechnik GmbH & Co. KG: B 26 Straßenbrücke Eltmann Main-km 369,540. Geotechnischer Entwurfsbericht, September 2010 (unveröffentlicht).
- Goj, K.: Erneuerung von schiffstoßgefährdeten Mainbrücken. Vier bayerische Public-Private-Partnership-Projekte. 10. Symposium Brückenbau in Leipzig, 2010.
- Kempfert + Partner Geotechnik: B 26, Mainbrücke Eltmann, Ertüchtigung gegen Schiffstoß. Prüfberichte, September 2010 (unveröffentlicht).
- Kunz, C.: DIN 1055, Teil 9 Außergewöhnliche Einwirkungen und probabilistische Verfahren. Der Prüfingenieur, Oktober 2006.
- Mangerig und Zapfe, Beratende Ingenieure GmbH: Verstärkung Flusspfeiler 2, Mainbrücke Eltmann, Stand September 2009 (unveröffentlicht).