

| |
|---|
| DEGES im Auftrag der Autobahn GmbH des Bundes |
| Straße: A 1 / Betr.km: 155+962 bis 157+657, inkl. Anpassungsbereich bis 158+267 |
| Bundesautobahn A 1 8-streifige Erweiterung zwischen AD Süderelbe und AS HH-Harburg VKE 7143: AS HH-Harburg - AD Süderelbe (o) |
| PROJIS-Nr.: 0200000530 |

FESTSTELLUNGSENTWURF

- Kolkstudie und Kolkschutzkonzept -

| | |
|---|--|
| aufgestellt: 29.04.2022 | |
| DEGES | |
| Berlin, den 29.04.2022 gez. Martens (PL/E3.3.2) | |
| | |

Strömungsgutachten für den Neubau der A1-Süderelbbrücke

Kolkstudie und Kolkschutzkonzept

Bericht
14805534-01

17. Dezember 2021

Erstellt für DEGES Deutsche Einheit

Strömungsgutachten für den Neubau der A1-Süderelbbrücke

Kolkstudie und Kolkschutzkonzept

Bericht
14805534-01

Erstellt für: DEGES Deutsche Einheit
Vertreten durch Herrn Hampel

Dieser Bericht wurde im Rahmen des DHI Business-Management-Systems
(Bureau Veritas - zertifiziert nach ISO 9001, Qualitätsmanagement) erstellt.



Erstellt von
Martin Dixen, Janett Brandt, Anika Scholl

A handwritten signature in blue ink, appearing to read 'J. Brandt', is written over a horizontal line.

Genehmigt von
Marcus Richter

21.12.2021

A handwritten signature in blue ink, appearing to read 'MRichter', is written over a horizontal line.

Signed by: Marcus Richter

Projekt Manager: Martin Dixen, Janett Brandt, Anika Scholl
Quality Supervisor: Janett Brandt
Autor: Martin Dixen, Übersetzung: Marion Dziengel, Oliver von Högen
Projekt-Nr.: 14805534-01
Genehmigt von: Marcus Richter
Genehmigungsdatum: 21.12.2021
Revision: Final 1.1
Dateiname: 14805534-01_DEGES_Kolkstudie_Suederelbe_Dez_vers1.1.docx

Inhaltsverzeichnis

| | | |
|----------|--|-----------|
| 1 | Zusammenfassung | 6 |
| 2 | Einleitung und Vorgehen | 8 |
| 3 | Datengrundlagen | 9 |
| 4 | Bemessungsgrundlagen..... | 10 |
| 4.1 | Brückenpfeiler während des Bauzustands | 10 |
| 4.2 | Brückenpfeiler während des Endzustands | 12 |
| 4.3 | Geotechnische Bodenbeschaffenheit | 13 |
| 4.4 | Strömungsverhältnisse | 14 |
| 5 | Kolkprognose..... | 19 |
| 5.1 | Kolkregime..... | 19 |
| 5.2 | Kolkbildung an Brückenpfeilern in nicht-kohäsivem Boden | 21 |
| 5.3 | Maximale potenzielle Kolkentiefe während des Bauzustands | 22 |
| 5.4 | Maximale potenzielle Kolkentiefe im Endzustand..... | 26 |
| 5.5 | Globale Kolkentwicklung | 28 |
| 6 | Kolkschutzkonzept..... | 29 |
| 6.1 | Stabilität von Decksteinen | 29 |
| 6.2 | Kolkschutzlayout für die Pfeiler 20, 30 und 40 | 30 |
| 6.3 | Kolkschutzlayout für den Pfeiler 50 | 34 |
| 7 | Einbau und Monitoring | 37 |
| 7.1 | Installationsverfahren | 37 |
| 7.2 | Monitoring | 37 |
| 8 | Literatur | 38 |

Abbildungen

| | | |
|----------------|--|----|
| Abbildung 2.1: | Lage der A1-Süderelbebrücke in Hamburg | 8 |
| Abbildung 4.1: | Übersichtsplan der neuen Brücke. Schwarze Brückenpfeiler (Planung), gelbe Brückenpfeiler (Ist-Zustand) | 10 |
| Abbildung 4.2: | Zeichnung des Brückenpfeiler 30 in Bauphase 1 | 11 |
| Abbildung 4.3: | Zeichnung des Brückenpfeiler 30 in Bauphase 5 | 11 |
| Abbildung 4.4: | Planungszeichnung des Brückenpfeilers 20 im Endzustand | 12 |
| Abbildung 4.5: | Planungszeichnung des Brückenpfeilers 30 im Endzustand | 13 |
| Abbildung 4.6: | Lage und Nummerierung der Brückenpfeiler für die Bauphase 5 – 8 mit einbezogenen Spundwänden und bestehenden Brückenpfeilern (links), sowie für den Endzustand (rechts). | 15 |
| Abbildung 4.7: | Tiefengemittelte Strömungsgeschwindigkeit in m/s (x-Achse) mit entsprechender Wassertiefe in m (y-Achse) an einem Punkt oberhalb (östlich) des Brückenpfeilers 40 | 16 |
| Abbildung 4.8: | Verteilung der tiefengemittelten Strömungsgeschwindigkeiten während des HW2013-Ereignisses oberhalb (östlich) der Brückenpfeiler 20, 30, 40 und 50 | 17 |
| Abbildung 5.1: | Kolkregime und -dauer für die Ereignisse HW2013, MNQ und Sturmflut während der Flutphase (Westseite) und der Ebbphase (Ostseite) | 20 |
| Abbildung 5.2: | Kolkausdehnung mit deren ungefähren Abmessungen um eine rechteckige Spundwand während des Bauzustands. Im Laufe der Zeit kann sich der Kolk auch stromabwärts an den Seiten der Spundwand entwickeln | 26 |
| Abbildung 6.1: | Konzept des Kolkschutzes während des Bauzustands (A) und während des Endzustands (B). Das Layout gilt für die Pfeiler 20, 30 und 40. Die Ausdehnung ist in der Draufsicht dargestellt. Der rote Kasten kennzeichnet den Bereich, in dem die Kolkschutzsteine so gewählt werden können, wie sie für den Bau- und Endzustand spezifiziert wurden | 31 |
| Abbildung 6.2: | Foto vom Bereich, in dem der Pfeiler 50 errichtet werden soll, und vom bestehenden Brückenpfeiler. Das obere Foto ist vom bestehenden Pfeiler aus gesehen und das untere Foto ist vom Baum (abgebildet im oberen Foto) aus gesehen in Richtung des bestehenden Brückenpfeilers | 35 |
| Abbildung 6.3: | Das Foto zeigt den bestehenden Brückenpfeiler an der Stelle, an der der Pfeiler 50 errichtet werden soll. | 36 |

Tabellen

| | | |
|--------------|---|----|
| Tabelle 4.1: | Abmessung der Spundwände für jeden der vier Brückenpfeiler | 10 |
| Tabelle 4.2: | Abmessungen der neuen Brückenpfeiler | 12 |
| Tabelle 4.3: | Bodenverhältnisse der verschiedenen Bodenschichten im Bereich der Brücke | 13 |
| Tabelle 4.4: | Mächtigkeit der Schicht 1 bis 3 im Bereich der Brückenpfeiler | 14 |
| Tabelle 4.5: | Maximale tiefengemittelte Strömungsgeschwindigkeit während der Flutphase stromaufwärts (Westseite) von jedem Brückenpfeiler | 18 |
| Tabelle 4.6: | Maximale tiefengemittelte Strömungsgeschwindigkeit stromaufwärts jedes Brückenpfeilers (Ostseite) während der Ebbphase | 18 |
| Tabelle 5.1: | Maximale potenzielle Kolkentiefe am Brückenpfeiler 20 während der Bauphase 1 – 8, an der westlichen und östlichen Seite des Brückenpfeilers | 24 |
| Tabelle 5.2: | Maximale potenzielle Kolkentiefe am Brückenpfeiler 30 während der Bauphase 1 – 8, an der westlichen und östlichen Seite des Brückenpfeilers | 24 |
| Tabelle 5.3: | Maximale potenzielle Kolkentiefe am Brückenpfeiler 40 während der Bauphase 1 – 8, an der westlichen und östlichen Seite des Brückenpfeilers | 25 |

| | | |
|--------------|--|----|
| Tabelle 5.4: | Maximale potenzielle Kolk­tiefe am Brückenpfeiler 50 während der Bauphase 1 – 8, an der westlichen und östlichen Seite des Brückenpfeilers..... | 25 |
| Tabelle 5.5: | Maximale potenzielle Kolk­tiefe an jedem Brückenpfeiler während des Endzustands für die Abflussbedingungen HW2013, MNQ und Sturmflut. Die Kolk­tiefe wird auf der Grundlage der HEC-18- sowie FDOT-Kolkgleichungen berechnet..... | 27 |
| Tabelle 5.6: | Zeitskala für die maximal potenzielle Kolk­tiefe | 28 |
| Tabelle 5.7: | Das Kontraktionsverhältnis für den Ist-, den Bau- und den Endzustand, mit $W_1 = 258\text{m}$ | 28 |
| Tabelle 6.1: | Mittlerer erforderlicher Mindestkorndurchmesser (D_{50}) und mittleres erforderliches Mindestgewicht (M_{50}) der Decksteine, die während des Bauzustands und Endzustands stabil gegenüber den in Tabelle 4.6 aufgezeigten Strömungsverhältnissen sind | 30 |
| Tabelle 6.2: | Kolkschutzkonzept für die Pfeiler 20, 30 und 40 während des Bau- und Endzustands. Die angegebenen Werte sind die anzusetzenden Mindestwerte. | 32 |

1 Zusammenfassung

Das vorliegende Gutachten umfasst eine Analyse der Kolktiefe und den Entwurf eines Kolkschutzes für den Bauzustand und den Endzustand der geplanten A1-Süderelbbrücke über die Süderelbe in Hamburg. Die geplante Brücke wird die bestehende Brücke ersetzen und ebenfalls vier Brückenpfeiler aufweisen. Während des Bauzustands werden an den geplanten Pfeilerbereichen Spundwandkästen eingebaut. Die Spundwandkästen werden eine rechteckige Form mit den Maßen 10,3 m x 75,5 m haben. Das Wasser innerhalb der rechteckigen Spundwandkonstruktion wird abgepumpt. Nach der Bauphase werden die bauzeitlichen Spundwände und die Pfeiler und Unterbauten der bestehenden Brücke zurückgebaut, was nachfolgend als Endzustand bezeichnet wird. Die Kolkprognose und der konzeptionelle Entwurf des Kolkschutzes werden in Form einer nicht-numerischen Studie durchgeführt.

Der Baugrund am Brückenstandort besteht aus nicht kohäsiven Schichten. Die oberste Schicht besteht aus Mittelsand mit einem mittleren Korndurchmesser von $d_{50} = 0,5$ mm. Weitere Informationen über den Baugrund sind in Kapitel beschrieben.

Die Kolkprognose und der Kolkschutz basieren auf den simulierten Strömungsbedingungen an der geplanten Brücke für den Bau- und Endzustand aus DHI (2021):

- MNQ-Ereignis mit niedrigem Abfluss im Zeitraum 14.09.2017 bis 01.10.2017.
- HW2013-Ereignis mit hohem Abfluss im Zeitraum 04.06.2013 bis 27.06.2017.
- Bemessungssturmflut SFBEMFQ2600 (im Weiteren Sturmflut genannt) im Zeitraum 01.01.1976 bis 04.01.1976.

Weitere Informationen zu den Strömungsbedingungen, die bei der Kolkprognose und der Bemessung des Kolkschutzes angesetzt wurden, sind in Kapitel angegeben.

Die Kolkprognose zeigt, dass an den Spundwänden erhebliche Kolkiefen im Bauzustand zu erwarten sind. Die maximale potenzielle Kolktiefe an jeder der vier Spundwandkästen wird auf folgende Werte berechnet:

7,2 m an Pfeiler 20

10,2 m an Pfeiler 30

13,7 m an Pfeiler 40

5,5 m an Pfeiler 50 (unter der Annahme aus Mittelsand bestehender Oberboden)

Die größte Kolktiefe wird sich voraussichtlich an der Ostseite der Spundwandkästen infolge Ebbströmung einstellen. Weitere Informationen über die Kolktiefe an den Spundwänden sind in Kapitel angegeben.

Im Endzustand liegen die Kolkiefen geringer und bleiben im Trend unter den Werten des Bauzustandes, lediglich am Pfeiler 50 sind höhere Kolkiefen prognostiziert. Die maximale potenzielle Kolktiefe an jedem der vier Pfeiler wird auf folgende Werte berechnet:

5,6 m an Pfeiler 20

8,9 m an Pfeiler 30

10 m an Pfeiler 40

5,7 m an Pfeiler 50 (unter der Annahme aus Mittelsand bestehender Oberboden)

Auch im Endzustand wird sich die größte Kolkentiefe an der Ostseite der Brückenpfeiler infolge Ebbströmung einstellen. Weitere Informationen über den Kolk an den Brückenpfeilern im Endzustand enthält Kapitel 5.4.

Neben der lokal begrenzten Kolkentiefe durch die Pfeilerstrukturen, kann es durch baulich bedingte Einschnürung im Gesamtquerschnitt auch zu einem sogenannten globalen Kolk kommen. Dieser ist nicht auf den Bereich der Pfeiler begrenzt, sondern führt zur Eintiefung des Flussbettes über der gesamten Gewässerbreite im Brückenbereich. Ein solcher globaler Kolke wird nur im Bauzustand zwischen den Spundwänden aufgrund der Einschnürung der Strömung erwartet. Die maximale Eintiefung der Flusssohle in Folge globalen Kolks zwischen den Spundwänden wird auf 0,8 m beziffert. Wobei anzunehmen ist, dass diese maximale Eintiefung aufgrund der zeitlichen Begrenzung der Bauphase nicht erreicht wird. Im Endzustand der geplanten Brückenpfeiler ergibt sich der gleiche globale Kolk wie bei den bereits bestehenden Brückenpfeilern.

Im Ergebnis wird ein Kolkschutzkonzept für die Pfeiler 20, 30 und 40 vorgeschlagen, bei dem der Kolkschutz für die Spundwände des Bauzustands als Teil des endgültigen Kolkschutzes für die Brückenpfeiler fungiert. Der vorgeschlagene Kolkschutzentwurf basiert auf einer breit abgestuften Decksteinschicht mit Steinen eines 2,5- bis 3,5-fachen des mittleren Decksteindurchmessers, D_{50} . Die Ausdehnung des Kolkschutzes für die Spundwände des Bauzustands sowie der Brückenpfeiler des Endzustands ist in Abbildung 6.1 dargestellt. Der mittlere Mindeststeindurchmesser D_{50} und das Mindeststeingewicht M_{50} ist in Tabelle 6.1 und in Tabelle 6.2 für den Bau- und den Endzustand zusammengefasst. Das Kapitel 6.2 legt dar, welche Standardabstufungen EN13383 für den Kolkschutz für jeden der vier Brückenpfeiler angewendet werden können. Der empfohlene Kolkschutz ist sowohl für den lokalen Kolk als auch für den globalen Kolk stabil.

Der Pfeiler 50 (befindet sich an Land) und bedarf keines Kolkschutzes vorausgesetzt die Bodenbeschaffenheiten sind wie in Kapitel 6.3 aufgeführt gegeben.

Kapitel 7 gibt Empfehlungen zur Installation und zum Monitoring des Kolkschutzes.

2 Einleitung und Vorgehen

Die DEGES Deutsche Einheit hat DHI WASY beauftragt, ein Kolkgutachten für den Ersatzneubau der A1-Süderelbbrücke an der Elbe in Hamburg zu erstellen. Die geplante Brücke wird an gleicher Stelle wie die bestehende A1-Süderelbbrücke entstehen, siehe Abbildung 2.1. Die bestehende Brücke ist Teil der BAB A1, die Bremen mit Lübeck verbindet. Im Zuge des Ausbaus der BAB A1 wird an gleicher Stelle eine breitere Brücke über die Elbe errichtet. Während des Baus der geplanten Brücke wird die bestehende Brücke schrittweise rückgebaut. Die neue Brücke wird im Bau- und Endzustand vier Pfeiler in der Elbe aufweisen, die der Kolkbildung ausgesetzt sind. Während der Bauphase werden vier Spundwandkästen um die Brückenpfeiler installiert.

In diesem Bericht wird das Kolkpotenzial für die vier neuen Brückenpfeiler während des Bauzustands und im Endzustand bewertet. Für jeden Brückenpfeiler wird ein Kolkschutzkonzept für den Bauzustand und für den Endzustand vorgeschlagen.

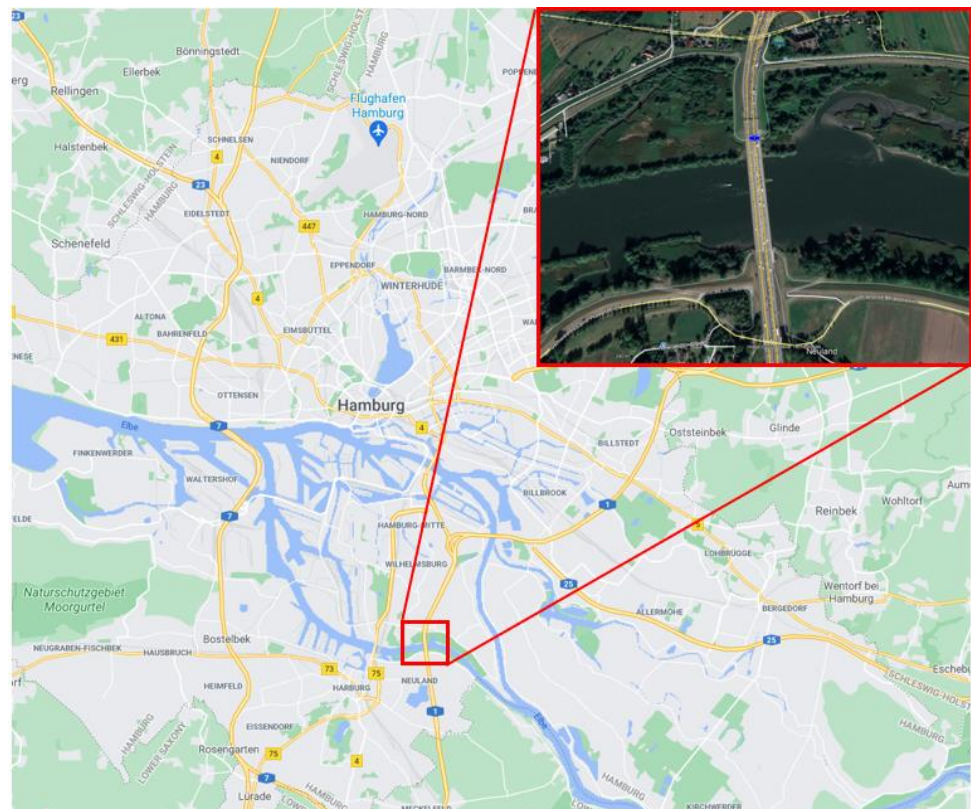


Abbildung 2.1: Lage der A1-Süderelbbrücke in Hamburg

3 Datengrundlagen

Die in diesem Bericht dargestellte Kolkprognose und der Entwurf des Kolkschutzes basieren auf folgenden Zeichnungen der neuen und bestehenden Brücke:

- 2020-11-27 - Blatt 1 - Uebersicht.dwg
- 2020-11-25 - Blatt 2 - Regelquerschnitte 01.dwg
- 2020-12-14 - Blatt 6 - BA-Lageplan.dwg

Informationen zu den Baugrundverhältnissen wurden folgenden Daten entnommen:

- Sedimentdaten des TideelbePortal
- 2020-11-27 - Blatt 1 - Uebersicht.dwg

Für das geotechnische Gutachten wurden folgende Daten von 1964, übermittelt von Schüßler Plan, verwendet:

- SP-TPL-0484_-P_D-RE010-2131-01-Vorzugsvariante_Blatt_1
- SP-TPL-0484_-P_D-RE010-2132-01-Vorzugsvariante_Blatt_2
- Bestandspläne BW484: 484-003.tif, 484-043.tif, 484-044.tif, 484-158.tif

Die Strömungen und hydraulischen Kennwerte stammen aus simulierten Modellergebnissen, siehe DHI (2021):

- MNQ-Modell mit niedrigem Abfluss
- HW2013-Modell mit hohem Abfluss
- Sturmflutmodell der höchsten gemessenen Bemessungssturmflut SFBEMFQ2600 (1976).

Planerische Vorgaben seitens der HPA wurden aus Dokumenten der HPA entnommen:

- Solltiefe der Fahrrinne aus dem Hafenbestandsplan
- Hafenkarte mit Bauzonen
- Musterprofil Durchlässiges Schüttsteindeckwerk Bauzone II (Musterprofil SD-KF 2016 Bauzone II)
- Die Solltiefe gemäß der Vorgabe der HPA (Hafenbestandsdaten) liegt bei -4,22 mNHN im Bereich der Fahrrinne, die zwischen Pfeiler 30 und 40 liegt. Diese Solltiefe ist nicht maßgebend für die Pfeiler 20 und 50. In der Fahrrinne ist zusätzlich eine Baggertoleranz von 50 cm zu beachten und eine maximale Oberkante des Kolkschutzes von 70 cm unter der Sollsohle.

4 Bemessungsgrundlagen

In diesem Abschnitt wird die Bemessungsgrundlage für die folgenden Teile beschrieben:

- i) Brückenpfeiler während des Bauzustands und des Endzustands,
- ii) geotechnische Bedingungen am Standort,
- iii) Strömungsbedingungen

Die Planzeichnung der geplanten Brücke ist in Abbildung 4.1 dargestellt. Die geplante Brücke wird an gleicher Stelle wie die bestehende Brücke errichtet. Der Bau wird in verschiedenen Phasen durchgeführt, so dass der Verkehr über die Brücke während der gesamten Bauphase nicht unterbrochen wird. Die vorhandenen Brückenpfeiler bleiben während der gesamten Bauphase bestehen und werden erst nach Fertigstellung der neuen Brücke (Endzustand) zurückgebaut.

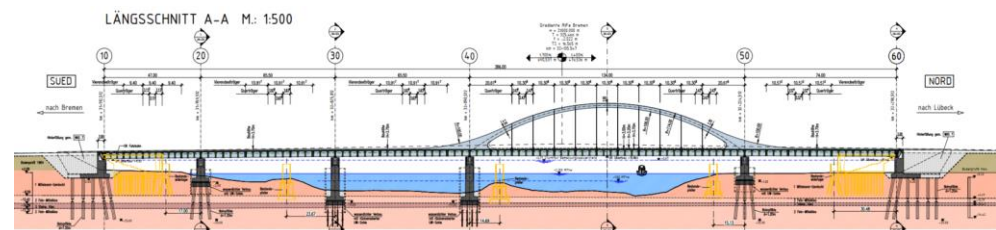


Abbildung 4.1: Übersichtsplan der neuen Brücke. Schwarze Brückenpfeiler (Planung), gelbe Brückenpfeiler (Ist-Zustand)

4.1 Brückenpfeiler während des Bauzustands

Die Brückenpfeiler werden in rechteckigen Baugruben, die mit Spundwänden gesichert sind, errichtet. Während des ersten Teils der Bauphase (Phase 1 – 4) werden Spundwände mit den Abmessungen 10,3 m x 27,5 m (Breite x Länge) errichtet. Während der Bauphase 5 – 8 wird die Länge der Spundwände von 27,5 m auf 75,5 m erweitert. Die Abmessungen der in diesem Bericht verwendeten Spundwände sind in Tabelle 4.1 dargestellt. Abbildung 4.2 und Abbildung 4.3 zeigen die Anordnung der Spundwände mit den Brückenpfeilern während der Bauphase 1 bzw. 5.

Tabelle 4.1: Abmessung der Spundwände für jeden der vier Brückenpfeiler

| Brückenpfeiler | Bauphase | Länge [m] | Breite [m] |
|----------------|----------|-----------|------------|
| 20, 30, 40, 50 | 1 – 4 | 27.5 | 10.3 |
| 20, 30, 40, 50 | 5 – 8 | 75.5 | 10.3 |

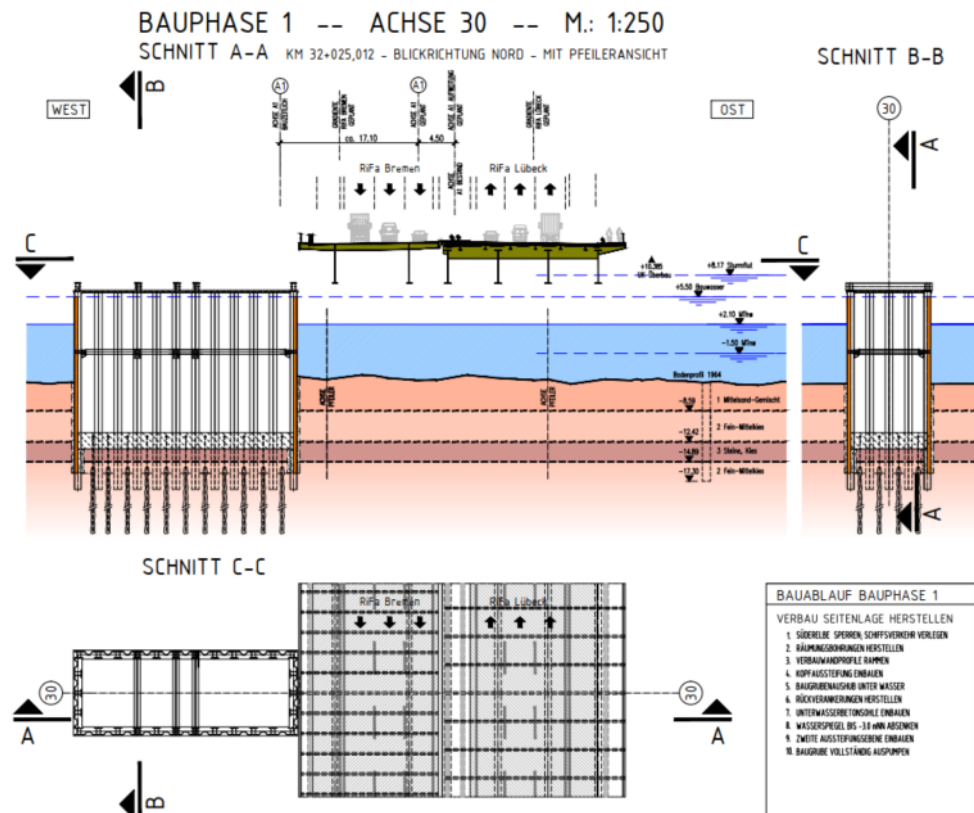


Abbildung 4.2: Zeichnung des Brückenpfeiler 30 in Bauphase 1

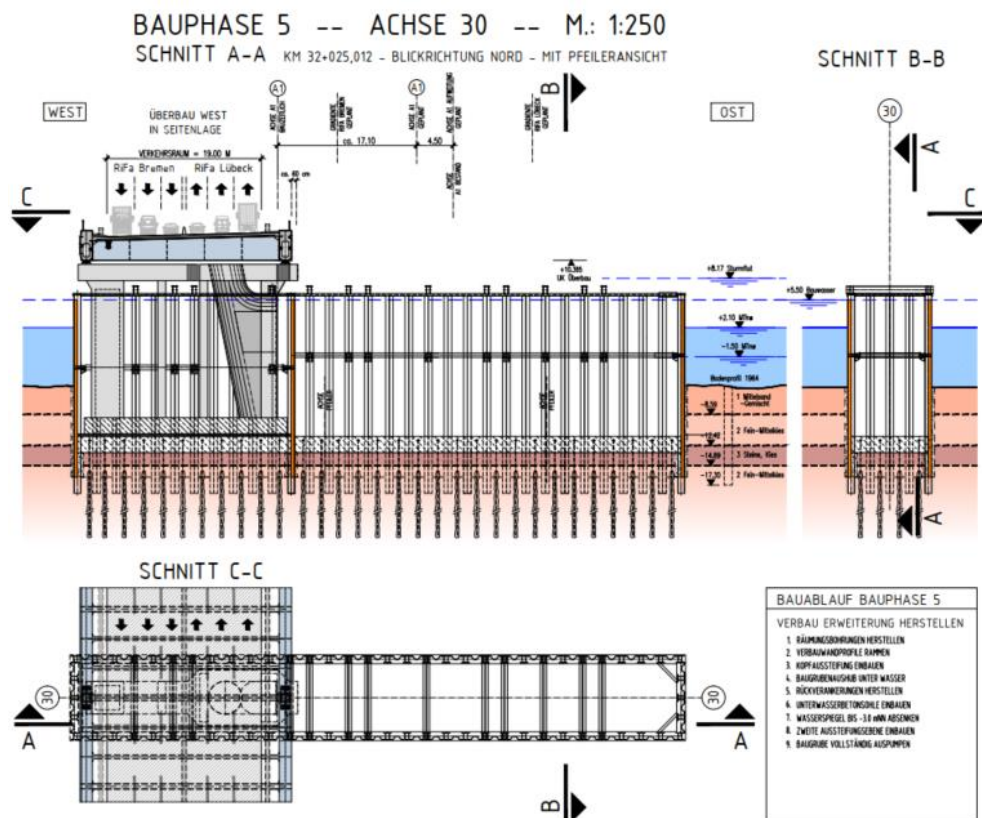


Abbildung 4.3: Zeichnung des Brückenpfeiler 30 in Bauphase 5

4.2 Brückenpfeiler im Endzustand

Der Brückenpfeiler wird mit einem Fundament mit integrierter Pfahlgruppe gebaut. In der letzten Bauphase werden die Spundwände auf Flusssohlniveau zurückgebaut. Die Form der Pfeilerköpfe ist rund, die Hauptabmessungen der Pfeiler sind in Tabelle 4.2 zusammengefasst. Abbildung 4.4 und Abbildung 4.5 zeigen die Brückenpfeiler 20 bzw. 30 im Endzustand.

Zu beachten sind planerische Vorgaben der HPA für Bauwerke in der Elbe. Dementsprechend sind die Steingrößen gemäß des Musterprofils SD-GF 2016 (Bauzone 2) zu wählen, wenn die Höhenlage des Kolkschutzes im Böschungsbereich liegt und über -3 m NHN einnimmt. Dies ist hier nicht der Fall.

Tabelle 4.2: Abmessungen der neuen Brückenpfeiler

| | Pfeiler 20 | Pfeiler 30 | Pfeiler 40 | Pfeiler 50 |
|--|------------|------------|------------|------------|
| Breite des Pfeilerfußes [m] | 9,0 | 9,0 | 9,0 | 9,0 |
| Höhe des Pfeilerfußes [m] | 4,1 | 4,1 | 4,1 | 4,1 |
| Länge des Pfeilerfußes [m] | 72,7 | 74,3 | 74,3 | 72,7 |
| Höhenniveau der Pfahlfußsohle [mNHN] | -4,3 | -13,3 | -13,3 | -3,3 |
| Höhenniveau der Flusssohle am Pfeiler [mNHN] | 0,95 | -6,1 | -6,9 | 2,13 |
| Pfeilerbreite [m] | 4,0 | 4,0 | 4,0 | 4,0 |
| Pfeilerlänge [m] | 52,0 | 48,2 | 48,2 | 52,4 |

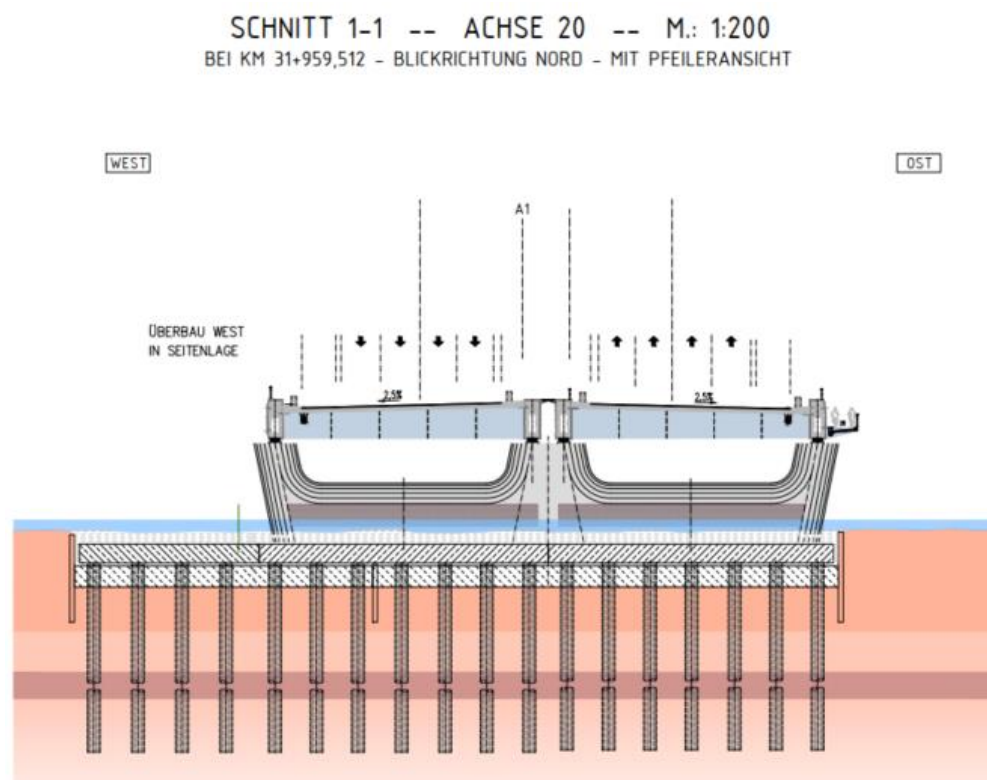


Abbildung 4.4: Planungszeichnung des Brückenpfeilers 20 im Endzustand

SCHNITT 2-2 -- ACHSE 30 -- M.: 1:200
BEI KM 32+025,012 – BLICKRICHTUNG NORD – MIT PFEILERANSICHT

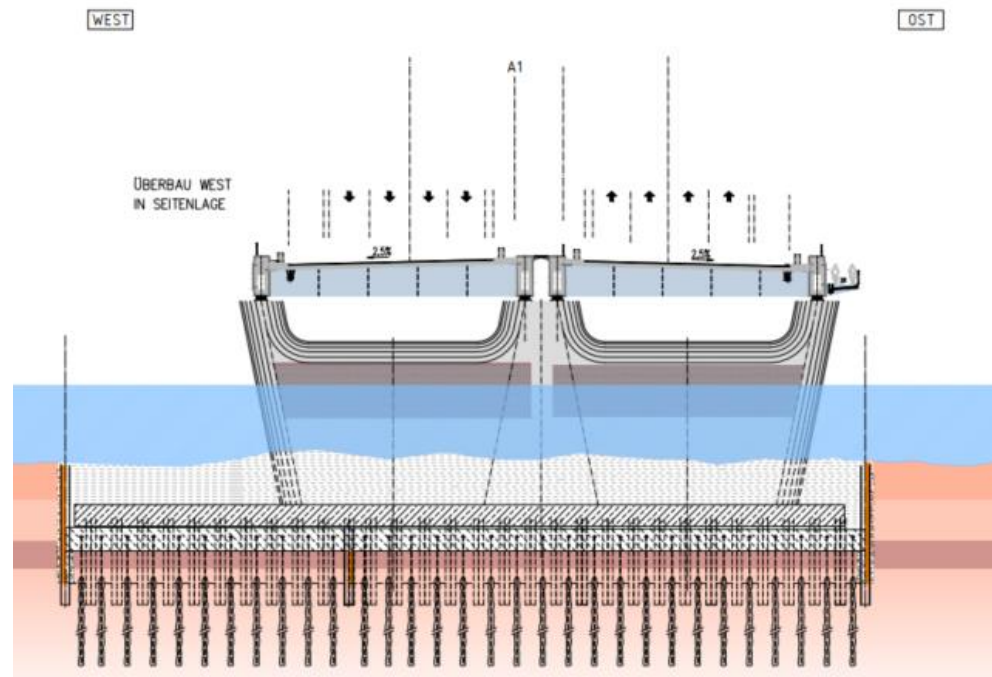


Abbildung 4.5: Planungszeichnung des Brückenpfeilers 30 im Endzustand

4.3 Geotechnische Bodenbeschaffenheit

Die für die Kolkstudie angesetzte Bodenzusammensetzung am Standort der Brücke basiert auf geotechnischen Untersuchungen aus dem Jahr 1964 (vgl. Kapitel 3). Die Parameter der verschiedenen Bodenschichten im Bereich der Brücke sind in Tabelle 4.3 zusammengetragen. Der angegebene d_{50} (mittlere Korngröße) ist der Wert, der bei der Kolkprognose verwendet wird. Der d_{50} -Wert für die Bodenschicht 1 basiert auf Bodenproben aus dem Sedimentkataster der Elbe (WSV, 2021). Der d_{50} -Wert für die übrigen Bodenschichten ist nicht bekannt und wird daher auf Grundlage des Korngrößenbereichs der Bodenart angenommen. Für die Bodenschicht 2, 3 und 4 wurde als d_{50} die Korngröße gewählt, die den Schnittpunkt zwischen den beiden Bodenarten darstellt.

Die Bodendicke der Schicht 1 bis 3 an jedem Brückenpfeiler ist in Tabelle 4.4 dargestellt.

Tabelle 4.3 Bodenverhältnisse der verschiedenen Bodenschichten im Bereich der Brücke

| Schicht | Höheniveau der Bodenschicht [mNHN] | Bodenart | Korngrößenbereich [mm] | d_{50} [mm] |
|---------|------------------------------------|----------------------|------------------------|---------------|
| 1 | 2,6 bis -8,59 | Mittelsand | 0,2 – 0,63 | 0,50 |
| 2 | -8,59 bis -12,42 | Fein- bis Mittelkies | 2,0 – 20 | 6,3 |
| 3 | -12,42 bis -14,89 | Steine und Kies | 2 – 200 | 63 |

| Schicht | Höheniveau der Bodenschicht [mNHN] | Bodenart | Korngrößenbereich [mm] | d ₅₀ [mm] |
|---------|------------------------------------|----------------------|------------------------|----------------------|
| 4 | < -14,89 | Fein- bis Mittelkies | 2,0 – 20 | 6,3 |

Tabelle 4.4: Mächtigkeit der Schicht 1 bis 3 im Bereich der Brückenpfeiler

| Schicht | Pfeiler 20 [m] | Pfeiler 30 [m] | Pfeiler 40 [m] | Pfeiler 50 [m] |
|---------|----------------|----------------|----------------|----------------|
| 1 | 9,54 | 2,49 | 1,69 | 10,72 |
| 2 | 3,83 | 3,83 | 3,83 | 3,83 |
| 3 | 2,47 | 2,47 | 2,47 | 2,47 |

4.4 Strömungsverhältnisse

Die Strömung in der Elbe wurde in DHI (2021) mit einem 3D-Modell für verschiedene Zustände und Szenarien simuliert. Abbildung 4.6 zeigt die Lage der Brücke während des Bau- und Endzustands. Die Strömungen wurden für folgende drei Zustände modelliert:

- i) den aktuellen Zustand, in dem nur die bestehenden Brückenpfeiler enthalten sind,
- ii) dem Bauzustand mit Spundwänden wie in Phase 5 – 8
- iii) dem Endzustand, in dem nur die neuen Brückenpfeiler vorhanden sind.

Die Strömungsverhältnisse an der Brücke werden durch den Abfluss und die Tide geprägt.

Es wurden die folgenden drei Szenarien für jeden der drei zuvor genannten Zustände simuliert:

- MNQ-Ereignis mit niedrigem Abfluss für den Zeitraum vom 14.09.2017 bis 01.10.2017 mit einem Simulationszeitschritt von 5 min.
- HW2013-Ereignis mit hohem Abfluss für den Zeitraum vom 04.06.2013 bis zum 27.06.2017 mit einem Simulationszeitschritt von 5 min.
- Sturmflut-Ereignis mit der Bemessungsturmflut für die Deiche in Hamburg vom 01.01.1976 bis zum 04.01.1976 mit einem Zeitschritt von 5 min.

Die Strömungen wurden aus den Simulationsergebnissen in der Nähe der Brückenpfeiler extrahiert. Diese Daten bilden die Grundlage für die Kolkprognose. Abbildung 4.7 zeigt ein Datenbeispiel aus einem der extrahierten Punkte. In der Abbildung sind die über die Tiefe gemittelte Strömungsgeschwindigkeit und die zugehörige Wassertiefe für jeden der drei Strömungsfälle, HW2013, MNQ und Sturmflut für einen Punkt stromaufwärts (östlich) des Brückenpfeilers 40 aufgetragen. Die Abbildung vermittelt einen Eindruck von der Größenordnung der Strömungsgeschwindigkeiten und der Wassertiefenvariationen während der drei verschiedenen Strömungsfälle. Die Abbildungen zeigen, dass die maximale tiefengemittelte Strömungsgeschwindigkeit während des HW2013-Ereignisses auftritt. Abbildung 4.8 zeigt die Verteilung der tiefengemittelten

Strömungsgeschwindigkeiten während des HW2013-Ereignisses östlich der vier Brückenpfeiler.

Die maximale tiefengemittelte Strömungsgeschwindigkeit stromaufwärts jedes Pfeilers während der Flutphase und während der Ebbphase ist jeweils in Tabelle 4.5 und Tabelle 4.6 dargestellt.



Abbildung 4.6: Lage und Nummerierung der Brückenpfeiler für die Bauphase 5 – 8 mit einbezogenen Spundwänden und bestehenden Brückenpfeilern (links), sowie für den Endzustand (rechts).

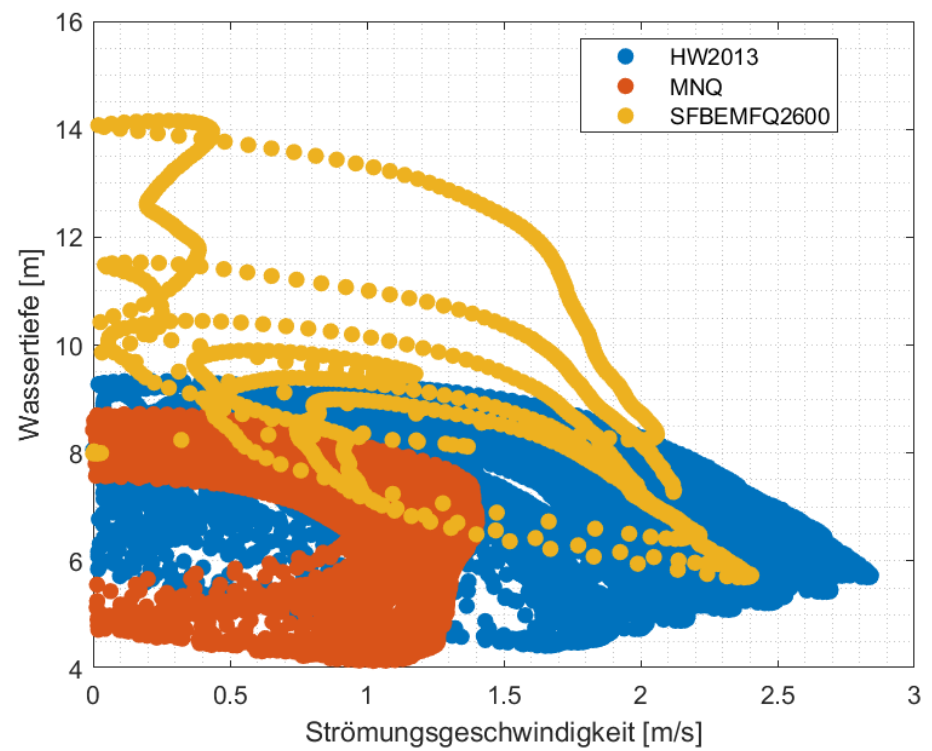


Abbildung 4.7: Tiefengemittelte Strömungsgeschwindigkeit in m/s (x-Achse) mit entsprechender Wassertiefe in m (y-Achse) an einem Punkt oberhalb (östlich) des Brückenpfeilers 40

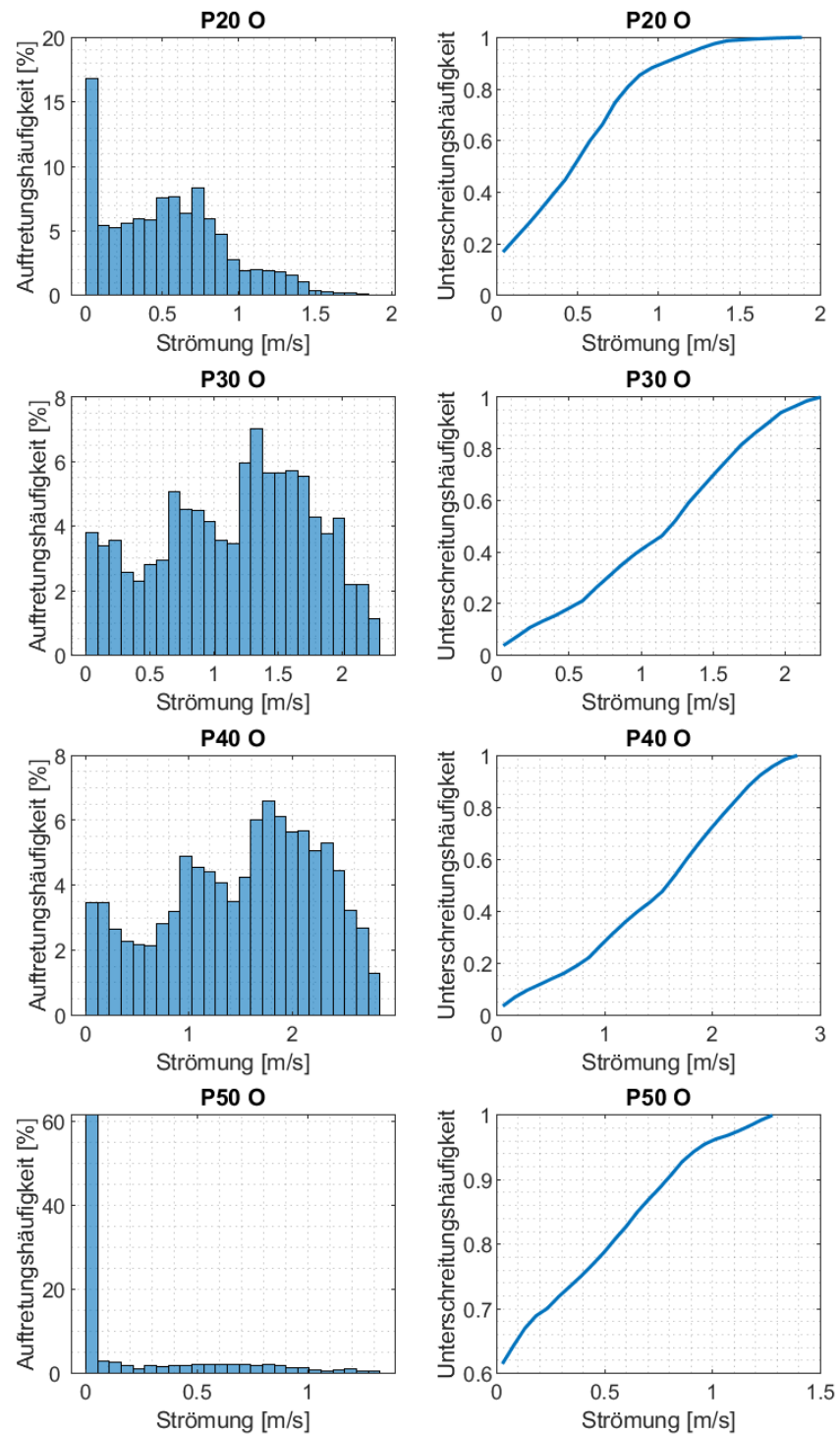


Abbildung 4.8: Verteilung der tiefengemittelten Strömungsgeschwindigkeiten während des HW2013-Ereignisses oberhalb (östlich) der Brückenpfeiler 20, 30, 40 und 50

Tabelle 4.5: Maximale tiefengemittelte Strömungsgeschwindigkeit während der Flutphase stromaufwärts (Westseite) von jedem Brückenpfeiler

| Ereignis | P20W [m/s] | P30W [m/s] | P40W [m/s] | P50W [m/s] |
|-----------|---------------|---------------|---------------|---------------|
| HW2013 | 0,37 | 0,34 | 0,41 | 0,27 |
| MNQ | 1,10 | 0,93 | 1,30 | 0,87 |
| Sturmflut | 0,50 | 0,37 | 0,43 | 0,34 |

Tabelle 4.6: Maximale tiefengemittelte Strömungsgeschwindigkeit stromaufwärts jedes Brückenpfeilers (Ostseite) während der Ebbphase

| Ereignis | P20 O [m/s] | P30 O [m/s] | P40 O [m/s] | P50 O [m/s] |
|-----------|----------------|----------------|----------------|----------------|
| HW2013 | 1,92 | 2,29 | 2,85 | 1,38 |
| MNQ | 0,94 | 1,10 | 1,40 | 0,72 |
| Sturmflut | 1,45 | 2,04 | 2,40 | 1,62 |

5 Kolkprognose

Im Folgenden wird für jeden Brückenpfeiler während des Bau- und des Endzustands eine Kolkprognose durchgeführt. Die Kolkprognose wird auf Grundlage der Strömungsbedingungen durchgeführt, die aus den Simulationsergebnissen für die Ereignisse HW2013, MNQ und Sturmflut extrahiert wurden. Die extrahierten Wassertiefen und Strömungsgeschwindigkeiten stehen dabei immer im Zusammenhang.

5.1 Kolkregime

Die Kolkbildung in nicht-kohäsiven Sedimentschichten, wie in Sanden, kann in zwei unterschiedlichen Regimen erfolgen, in einem Regime ohne zusätzlichen großskaligen Sedimenttransport (Clear-Water-Regime) oder über einer beweglichen Sohle mit zusätzlichem Sedimenttransport im Kolkbereich (Live-Bed-Regime). Wird die Kolkbildung nicht von einem zusätzlichen Sedimenttransport überlagert, so bewegt sich das Sediment ausschließlich lokal an der Brückenstruktur infolge der Kolkbildung. Es gibt keinen großskaligen Sedimenttransport außerhalb der Brückenstruktur. Bei der Kolkbildung auf beweglicher Sohle findet großskaliger Sedimenttransport über das gesamte Flussbett sowohl in der Nähe als auch weiter entfernt von der Brückenstruktur statt. Die Bestimmung des vorherrschenden Kolkregimes ist äußerst relevant, da je nach Regime die Kolktiefe und die Zeitskala unterschiedlich ausfallen.

Um das Kolkregime zu bestimmen, muss die dimensionslose Sohlschubspannung, der Shields-Parameter θ , bekannt sein. Wenn θ einen kritischen Wert von θ_{cr} überschreitet, gilt die Sohle als beweglich (mit großskaligem Sedimenttransport). Wenn θ unterhalb von θ_{cr} bleibt, erfolgt die Kolkbildung Regime ohne zusätzlichen Sedimenttransport.

Der Shields-Parameter θ ist definiert durch:

$$\theta = \frac{\tau_b}{\rho g d (s-1)} \quad (\text{Gl. 1})$$

wobei τ_b die Sohlschubspannung ist, d der mittlere Korndurchmesser, g die Beschleunigung durch Gravitation ($9,81 \text{ m/s}^2$) und s die relative Dichte des Sandes im Flussbett, hier zu angenommen 2,65, ist.

Die kritische Sohlschubspannung θ_{cr} , die den Grenzwert für den Beginn des Sedimenttransports über dem Gewässerbett darstellt, kann gemäß Soulsby (1997) folgendermaßen bestimmt werden:

$$\theta_{cr} = \frac{0.3}{1+1,2D_*} + 0,055[1 - \exp(-0,02D_*)] \quad (\text{Gl. 2})$$

wobei:

$$D_* = \left[\frac{g(s-1)}{v^2} \right]^{1/3} d \quad (\text{Gl. 3})$$

mit v ist die kinematische Viskosität ($1,0 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$).

Auf Basis von Gl. 2 wurde $\theta_{cr} = 0,03$ für die obere Bodenschicht mit $d = 0,5 \text{ mm}$ bestimmt.

Abbildung 5.1 zeigt das Kolkregime für die drei Ereignisse HW2013, MNQ und Sturmflut für jeden der Brückenpfeilerstandorte. In der Abbildung ist die Strömung während der Flut- und der Ebbphase unterteilt. Während der Flutphase liegen die stromaufwärts gelegenen Extraktionspunkte an der Westseite des Pfeilers, während der Ebbphase an der Ostseite der Pfeiler. Der stromaufwärts gelegene Teil des Bauwerks ist am stärksten der Kolkbildung ausgesetzt, daher ist es wichtig, das Kolkregime vor den Pfeilern für beide Strömungsrichtungen zu kennen. Die Strömungsverhältnisse in der Elbe können größtenteils den beiden Ereignissen MNQ und HW2013 und selten der Sturmflut zugeordnet werden. Die Abbildung zeigt, dass die Kolkbildung um die Pfeiler 20 bis 40 während der Ebbphase größtenteils im Live-Bed-Regime mit zusätzlichem Sedimenttransport stattfinden wird, während an Pfeiler 50 größtenteils keine Kolkbildung ($\theta < 0,25\theta_c$) auftreten wird. Wenn aber Kolkbildung auftritt, wird sie auch im Live-Bed-Regime stattfinden. Während der Flutphase wird der Kolk im MNQ-Ereignis, wo die Strömung am stärksten ausgeprägt ist, an Pfeiler 30 und 40 größtenteils im Live-Bed-Regime mit zusätzlichem Sedimenttransport auftreten und während einer kurzen Periode auch an Pfeiler 20 und 50.

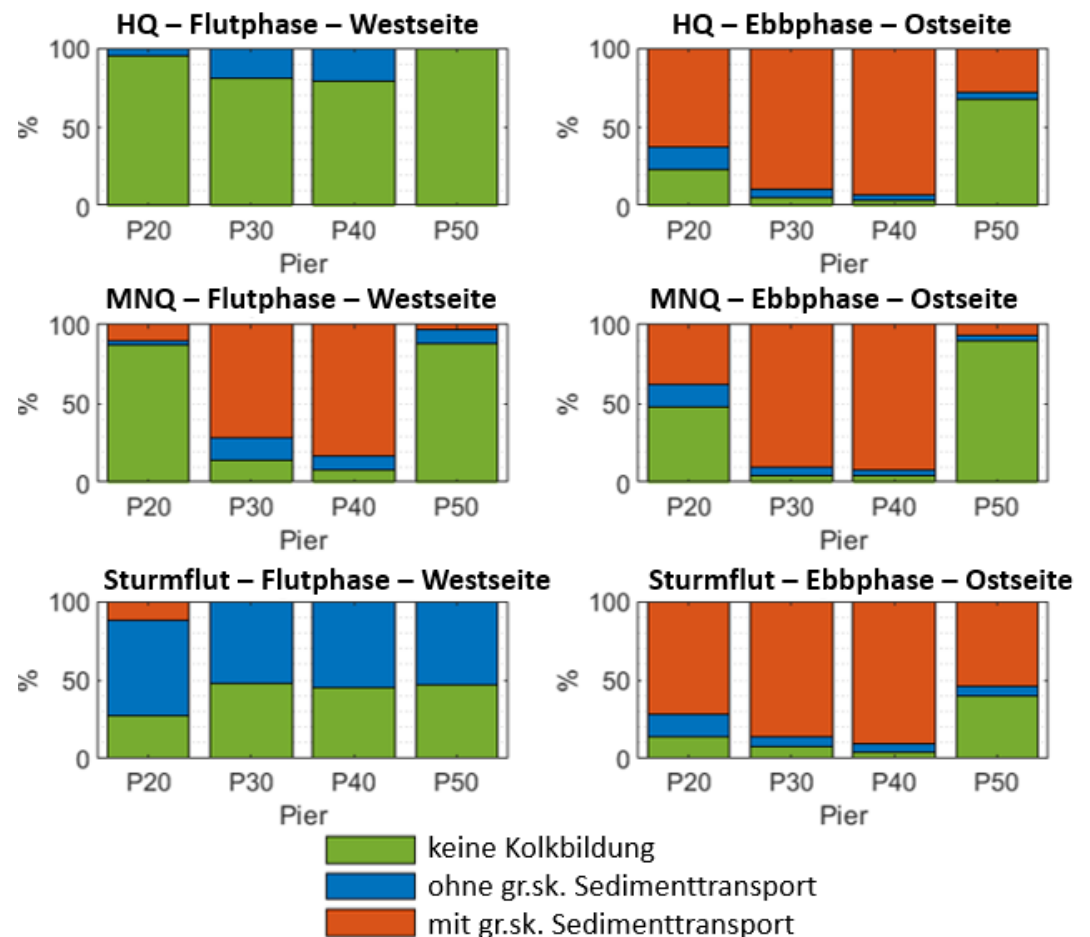


Abbildung 5.1: Kolkregime und -dauer für die Ereignisse HW2013, MNQ und Sturmflut während der Flutphase (Westseite) und der Ebbphase (Ostseite)

5.2 Kolkbildung an Brückenpfeilern in nicht-kohäsivem Boden

In Fließgewässern wird die maximale potenzielle Kolkentiefe in nicht-kohäsivem Boden an Brückenpfeilern häufig mit der HEC-18 Kolkgleichung (HEC-18, 2012) berechnet. Die Gleichung kann sowohl für Kolkbildungen an einer Sohle ohne großskaligen Sedimenttransport als auch an einer beweglichen Sohle mit großskaligen Sedimenttransport genutzt werden. Die HEC-18 Kolkgleichung lautet:

$$\frac{S}{B} = 2,0 K_1 K_\alpha K_{sh} K_w \left(\frac{h}{B}\right)^{0,35} \left(\frac{V}{\sqrt{gh}}\right)^{0,43} \quad (\text{Gl. 4})$$

Dabei ist v die mittlere Strömungsgeschwindigkeit, B die Pfeilerbreite, h die Wassertiefe und g die Beschleunigung durch Gravitation. K_1 ist ein Korrekturfaktor für die Flussbettbedingungen, der ohne großskaligen Sedimenttransport auf $K_1=1,1$ und mit großskaligen Sedimenttransport auf $K_1=1$ gesetzt wurde. K_α ist ein Korrekturfaktor für den Anströmwinkel, K_{sh} ein Korrekturfaktor für die Pfeilerform (1,1 für quadratische Formen, 1 für kreisförmige Formen), und K_w ein Korrekturfaktor für Flachwasserbereiche (Bereiche, in denen die Wasserbewegung von der Sohle beeinflusst werden, ca. 100 bis 300 m Wassertiefe), der folgendermaßen lautet:

$$K_w = 2,58 \left(\frac{h}{B}\right)^{0,34} \left(\frac{V}{\sqrt{gh}}\right)^{0,65} \quad \text{für } \frac{h}{B} < 0,8 \text{ und } \frac{V}{V_c} < 1 \quad (\text{Gl. 5a})$$

$$K_w = 2,58 \left(\frac{h}{B}\right)^{0,13} \left(\frac{V}{\sqrt{gh}}\right)^{0,25} \quad \text{für } \frac{h}{B} < 0,8 \text{ und } \frac{V}{V_c} \geq 1 \quad (\text{Gl. 5b})$$

Die HEC-18 Kolkgleichung zeigt eine schwache Abhängigkeit der Kolkentiefe S von der Strömungsgeschwindigkeit v und Wassertiefe h . Die HEC-18 Kolkgleichung wurde weltweit für Kolkauswertungen und Bemessungen zahlreicher Brücken angewendet und schneidet im Vergleich zu anderen Gleichungen für Kolk an Brücken sehr gut ab. Eine Alternative zur HEC-18 Kolkgleichung, die in Vergleichstests in Ettema et al. (2011) mindestens ebenso gut abschneidet, ist die FDOT Kolkgleichung von Sheppard und Miller (2006). Die FDOT Kolkgleichung erlaubt eine Abschätzung der maximalen potenziellen Kolkentiefe in Abhängigkeit vom Kolkregime.

Die FDOT Kolkgleichung lautet (FDOT, 2005):

für Regime ohne großskaligem Sedimenttransport:

$$\frac{S}{a^*} = 2,5 f_1 f_2 f_3 \quad \text{für } 0,4 \leq \frac{V}{V_c} < 1 \quad (\text{Gl. 6})$$

und für Regime mit großskaligem Sedimenttransport:

$$\frac{S}{a^*} = f_1 \left[2,2 \left(\frac{\frac{V}{V_c} - 1}{\frac{V_{lp}}{V_c} - 1} \right) + 2,5 f_3 \left(\frac{\frac{V_{lp}}{V_c} \frac{V}{V_c}}{\frac{V_{lp}}{V_c} - 1} \right) \right] \quad \text{für } 1 \leq \frac{V}{V_c} < \frac{V_{lp}}{V_c} \quad (\text{Gl. 7})$$

$$\frac{S}{a^*} = 2,2 f_1 \quad \text{für } \frac{V}{V_c} > \frac{V_{lp}}{V_c} \quad (\text{Gl. 8})$$

$$f_1 = \tanh \left[\left(\frac{h}{a^*} \right)^{0,4} \right] \quad (\text{Gl. 9})$$

$$f_2 = \left\{ 1 - 1,2 \left[\ln \left(\frac{V}{V_c} \right) \right]^2 \right\} \quad (\text{Gl.10})$$

$$f_3 = \left[\frac{\left(\frac{a^*}{d_{50}} \right)^{1,13}}{10,6 + 0,4 \left(\frac{a^*}{d_{50}} \right)^{1,33}} \right] \quad (\text{Gl.11})$$

Dabei ist a^* die effektive Pfeilerbreite, d_{50} die mittlere Korngröße, V_c die kritische Strömungsgeschwindigkeit für den Bewegungsbeginn für d_{50} , V_{lp} die Strömungsgeschwindigkeit für maximalen Kolk über beweglicher Sohle (mit großskaligem Sedimenttransport) und v die tiefengemittelte Strömungsgeschwindigkeit am Pfeiler. Die Faktoren V_{lp} , V_c und a^* werden folgendermaßen berechnet:

$$V_{lp} = \max\{5V_c, 0,6\sqrt{gh}\} \quad (\text{Gl.12})$$

$$V_c = 5,75u_c^* \log \left(5,53 \frac{h}{d_{50}} \right) \quad (\text{Gl.13})$$

$$u_c^* = 0,3048 * \left(0,0377 + 0,041d_{50}^{1,4} \right) \quad \text{für } 0,1 \text{ mm} < d_{50} \leq 1 \text{ mm} \quad (\text{Gl. 14})$$

$$u_c^* = 0,3048 * \left(0,1d_{50}^{0,5} - \frac{0,0213}{d_{50}} \right) \quad \text{für } 1 \text{ mm} < d_{50} \leq 100 \text{ mm} \quad (\text{Gl. 15})$$

Die effektive Pfeilerbreite lautet:

$$a^* = K_{sh1} a_{proj} \quad (\text{Gl.16})$$

mit dem Formfaktor:

$$K_{sh1} = \begin{cases} 1 & (\text{für runde Stützenköpfe}) \\ 0,86 + 0,97 \left(\left[\frac{\pi\theta}{180} - \frac{\pi}{4} \right] \right)^4 & (\text{für quadratische Stützenköpfe}) \end{cases} \quad (\text{Gl. 17})$$

wobei θ der Anströmwinkel ist. Die projizierte Breite des Pfeilers errechnet sich aus der Breite B und der Länge L des Pfeilers.

$$a_{proj} = B \cos \theta + L \sin \theta \quad (\text{Gl.18})$$

Wenn die Pfeilerbreite mehr als das 0,8-fache der Wassertiefe beträgt, muss die Flachwasserkorrektur K_w (Gl. 5) auf die FDOT-Gleichungen angewendet werden.

5.3 Maximale potenzielle Kolkentiefe während des Bauzustands

Die lokalen maximalen potenziellen Kolkiefen um die Spundwände der vier Brückenpfeiler während des Bauzustands wurden auf Grundlage der HEC-18- und der FDOT-Kolkgleichung, die in Kapitel 5.2 vorgestellt wurden, abgeschätzt. Die für die Analyse verwendeten Strömungsdaten sind die Simulationsergebnisse aus den HW2013-, MNQ- und Sturmflutereignissen.

Die Methodik zur Bestimmung der maximalen Kolkentiefe an jeder Brückenpfeiler-Spundwand ist wie folgt beschrieben:

1. Berechnung der maximalen Kolkentiefe unter der Annahme, dass der gesamte Boden gemäß der Bodenschicht 1 vorliegt.
2. Wenn die geschätzte maximale Kolkentiefe größer ist als die tatsächliche Mächtigkeit der Bodenschicht 1, dann ist die Bodenschicht 2 der Strömung ausgesetzt und es kann auch in der Bodenschicht 2 zu

Kolkbildung kommen. Um herauszufinden, ob es in der Bodenschicht 2 zu einer Kolkbildung kommt, wurde die maximale Kolkentiefe unter der Annahme berechnet, dass der gesamte Boden der Bodenschicht 2 entspricht.

3. Wenn es in der Bodenschicht 2 zu einer Kolkbildung kommt und die Kolkentiefe groß genug ist, um auch die erste und zweite Bodenschicht zu durchdringen, wird für die übrigen Bodenschichten das gleiche Verfahren wie oben beschrieben durchgeführt.

Die maximalen Kolkiefen für jeden Brückenpfeiler, die auf der obigen Methodik basieren, sind in den Tabellen Tabelle 5.1 bis Tabelle 5.4 für jedes Abflussereignis sowohl für Flutphase als auch für die Ebbphase dargestellt. Die Ergebnisse sind sowohl für die HEC-18- als auch für die FDOT-Kolkgleichungen angegeben. Die maximale Kolkentiefe wird für die Bauphasen 1 bis 8 angegeben, da sich herausstellte, dass die maximalen Kolkiefen für die Bauphasen 1 bis 4 bzw. 5 bis 8 identisch waren. Aus den Tabellen ist ersichtlich, dass die Ostseite der Pfeiler am stärksten dem Kolk ausgesetzt ist. Die geschätzten maximalen Kolkiefen, basierend auf der HEC-18- und der FDOT-Kolkgleichungen, unterscheiden sich für die Abflussereignisse nur gering. Es gibt einige wenige Fälle für die westliche Pfeilerseite, in denen die Kolkiefen aus den Kolkgleichungen nicht übereinstimmen (z.B. Pfeiler 40 für die Sturmflut). Diese Unstimmigkeit zwischen den beiden Kolkformeln ist hauptsächlich darauf zurückzuführen, dass die FDOT-Gleichungen von viel mehr Parametern abhängen als die HEC-18-Gleichung, was nicht bedeutet, dass die FDOT-Gleichung genauer ist als die HEC-18-Gleichung.

Wird die geschätzte maximale potenzielle Kolkentiefe an den Spundwänden danach geordnet, welcher Standort am stärksten der Kolkbildung ausgesetzt ist, dann ergibt sich folgende Reihenfolge:

- Pfeiler 40 mit einer potenziellen maximalen Kolkentiefe von bis zu 13,7 m.
- Pfeiler 30 mit einer potenziellen maximalen Kolkentiefe von bis zu 10,2 m.
- Pfeiler 20 mit einer potenziellen maximalen Kolkentiefe von bis zu 7,2 m.
- Pfeiler 50 mit einer potenziellen maximalen Kolkentiefe von bis zu 5,5 m.

Die größte potenzielle Kolkentiefe tritt am den beiden äußeren Pfeilern (P20 und P50) während des HW2013-Ereignisses, an den beiden inneren Pfeilern (P30 und P40) während des Sturmflutereignisses auf. Das geschätzte maximale Kolkpotenzial des MNQ-Ereignisses gibt eine Vorstellung davon, welche Kolkiefen mindestens zu erwarten sind.

Der Kolk um einen Spundwandkasten beginnt an den Ecken und entwickelt sich schließlich um die Ecken herum, um eine Kolkvertiefung an der gesamten stromaufwärts gelegenen Fläche des Bauwerks zu bilden. Die maximale Kolkentiefe wird an den stromaufwärts gelegenen Ecken und an der Stirnseite des Bauwerks auftreten. Die Ausdehnung der Kolkvertiefung während des Bauzustands an den Pfeilern ist in Abbildung 5.2 dargestellt. Bei den Spundwänden, die den vorhandenen Brückenpfeilern am nächsten liegen, kann es aufgrund der Einschnürung der Strömung zu erhöhten Sohlschubspannungen zwischen dem vorhandenen Pfeiler und der Spundwand sowie zu einer zusätzlichen Kolkbildung entlang der Seite der Spundwand kommen. Die Kolkentiefe durch diese Einschnürung der Strömung wird im Vergleich zu den stromaufwärts gelegenen Kolkiefen an der Spundwand gering sein. Es ist nicht klar, ob die Ausdehnung des Kolkschutzes

von den bestehenden Pfeilern bis zu den Spundwänden der Pfeiler 40 und 50 reicht. Wenn dies der Fall ist, wird sich an diesen Stellen kein Kolk bilden. Es dauert einige Zeit, bis sich ein Kolk am Spundwandkasten entwickelt. Die Entwicklung der Kolkentiefe hängt stark von der Strömungsgeschwindigkeit (und damit von θ) und von den Abmessungen des Kolklochs ab. Die Zeitskala T ist definiert als die Zeit, die benötigt wird, um eine Kolkentiefe von etwa 65 % der maximalen potenziellen Kolkentiefe zu entwickeln. Die Zeitskala der Kolkbildung an einem kreisförmigen Pfeiler bei konstanter, einseitiger Strömung für eine bewegliche Sohle mit großskaligem Sedimenttransport ist gegeben durch (Sumer et al., 2002):

$$T^* = \frac{1}{2000} \frac{h}{D} \theta^{-2,2} \quad (\text{Gl. 19})$$

wobei T^* eine dimensionslose Zeitskala, bezogen auf die Zeitskala T , ist durch:

$$T = \frac{D^2}{\sqrt{g(s-1)d_{50}^3}} T^* \quad (\text{Gl. 20})$$

wobei D der Durchmesser des Pfahls, h die Wassertiefe und d_{50} der mittlere Korndurchmesser ist.

Durch das Ersetzen von D in Gl. 19 und 20 durch die Breite des Brückenpfeilers B kann eine ungefähre Zeitskala für die Kolkbildung während des Bauzustands an den Pfeilern berechnet werden. Tabelle 5.1 bis Tabelle 5.4 beinhaltet die Zeitskala für die maximal mögliche Kolkentiefe an der Ostseite der Pfeiler. Es ist zu beachten, dass die in Tabelle 5.1 bis Tabelle 5.4 dargestellten Zeitskalen nur dann gültig sind, wenn die Strömungsgeschwindigkeit über den gesamten Zeitraum der Zeitskala konstant gehalten wird. Wenn die Strömungsgeschwindigkeit abnimmt, erhöht sich die Zeit im Vergleich zu den in Tabelle 5.1 bis Tabelle 5.4 angegebenen Werten.

Tabelle 5.1: Maximale potenzielle Kolkentiefe am Brückenpfeiler 20 während der Bauphase 1 – 8, an der westlichen und östlichen Seite des Brückenpfeilers

| Abfluss- ereignis | Westseite | | Ostseite | | Zeitskala [h] |
|----------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|------------------|
| | HEC-18 | FDOT | HEC-18 | FDOT | |
| | Kolkentiefe [m] | Kolkentiefe [m] | Kolkentiefe [m] | Kolkentiefe [m] | |
| HW2013 | 1,2 | 0,5 | 4,4 | 4,1 | 0,1 |
| MNQ | 2,1 | 1,7 | 2,7 | 2,6 | 11,4 |
| Sturmflut | 2,5 | 2,8 | 6,0 | 7,2 | 332,4 |

Tabelle 5.2: Maximale potenzielle Kolkentiefe am Brückenpfeiler 30 während der Bauphase 1 – 8, an der westlichen und östlichen Seite des Brückenpfeilers

| Abfluss- ereignis | Westseite | | Ostseite | | Zeitskala [h] |
|----------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|------------------|
| | HEC-18 | FDOT | HEC-18 | HEC-18 | |
| | Kolkentiefe [m] | Kolkentiefe [m] | Kolkentiefe [m] | Kolkentiefe [m] | |
| HW2013 | 3,3 | 2,5 | 7,2 | 10,2 | 0,3 |
| MNQ | 4,0 | 3,4 | 4,7 | 5,2 | 7,8 |

| Abfluss- ereignis | Westseite | | Ostseite | | |
|----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------|
| | HEC-18 | FDOT | HEC-18 | HEC-18 | Zeitskala |
| | Kolk- tiefe [m] | Kolk- tiefe [m] | Kolk- tiefe [m] | Kolk- tiefe [m] | [h] |
| Sturmflut | 5,7 | 2,5 | 9,9 | 8,6 | 4,3 |

Tabelle 5.3: Maximale potenzielle Kolk-
tiefe am Brückenpfeiler 40 während der
Bauphase 1 – 8, an der westlichen und östlichen Seite des
Brückenpfeilers

| Abfluss- ereignis | Westseite | | Ostseite | | |
|----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------|
| | HEC-18 | FDOT | HEC-18 | FDOT | Zeitskala |
| | Kolk- tiefe [m] | Kolk- tiefe [m] | Kolk- tiefe [m] | Kolk- tiefe [m] | [h] |
| HW2013 | 4,9 | 1,7 | 13,7 | 12,2 | 0,7 |
| MNQ | 8,7 | 5,5 | 7,6 | 5,5 | 63,9 |
| Sturmflut | 6,1 | 1,7 | 11,4 | 12,9 | 6,2 |

Tabelle 5.4: Maximale potenzielle Kolk-
tiefe am Brückenpfeiler 50 während der
Bauphase 1 – 8, an der westlichen und östlichen Seite des
Brückenpfeilers

| Abfluss- ereignis | Westseite | | Ostseite | | |
|----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------|
| | HEC-18 | FDOT | HEC-18 | FDOT | Zeitskala |
| | Kolk- tiefe [m] | Kolk- tiefe [m] | Kolk- tiefe [m] | Kolk- tiefe [m] | [h] |
| HW2013 | 0,5 | 0,3 | 4,3 | 4,4 | 0,8 |
| MNQ | 1,7 | 1,0 | 2,5 | 2,3 | 4,7 |
| Sturmflut | 2,1 | 1,7 | 5,4 | 5,5 | 2,4 |

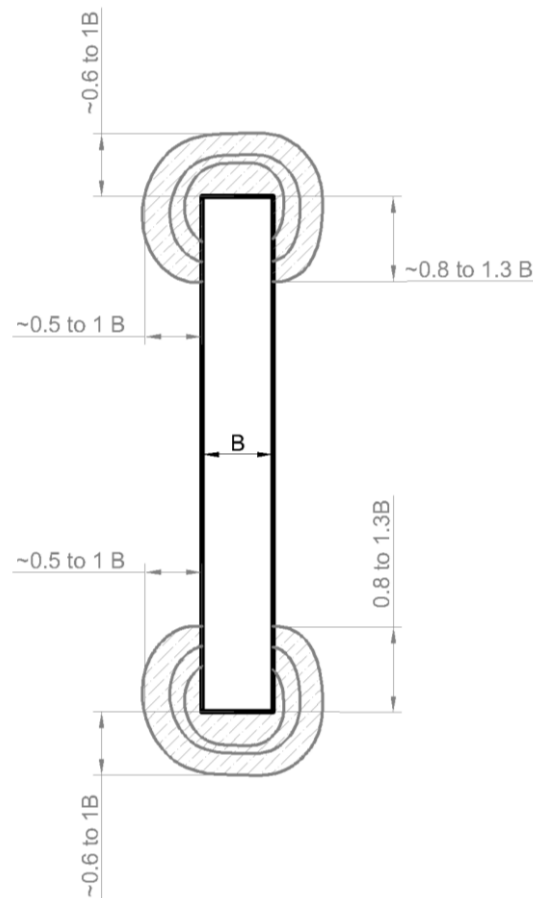


Abbildung 5.2: Kolkaußdehnung mit deren ungefähren Abmessungen um eine rechteckige Spundwand während des Bauzustands. Im Laufe der Zeit kann sich der Kolk auch stromabwärts an den Seiten der Spundwand entwickeln.

5.4 Maximale potenzielle Kolkentiefe im Endzustand

In der letzten Bauphase werden die Spundwände zurückgebaut, indem die Spundbohlen gekürzt werden. Aus der Planzeichnung geht hervor, dass die Spundbohlen bis auf eine Höhe nahe der Gewässersohle gekürzt werden. In der folgenden Kolkanalyse wurde angenommen, dass die Spundbohlen an der Oberkante des Fundamentes statt auf Sohlenniveau gekürzt werden, da in der Literatur keine Informationen über solche geringen Hindernisse im Gewässerboden gefunden wurden. Es wird davon ausgegangen, dass die Auswirkung solcher Hindernisse (bestehend aus Teilen der Spundwand, die über das Pfeilerfundament hinausragen) die Kolkentiefe im Vergleich zu dem Fall, dass sie bis auf das Pfeilerfundament gekürzt werden, reduziert. Diese Annahme basiert darauf, dass diese Barriere einen der wichtigsten Mechanismen (die Bildung des Hufeisenwirbels, der stromaufwärts des Pfeilers entsteht) stört. Daher ist die in diesem Abschnitt ermittelte Kolkentiefe als konservativ anzusehen.

Der maximal mögliche Kolk um die Brückenpfeiler im Endzustand wird auf der Grundlage der HEC-18- sowie der FDOT-Kolkgleichungen, die in Kapitel 5.2 vorgestellt wurden, berechnet. Die für die Analyse verwendeten Strömungsdaten sind aus den Simulationsergebnissen des HW2013-, MNQ- und des Sturmflutereignisses extrahiert. Die Methodik zur Bestimmung der

maximalen Kolkentiefe an jedem Brückenpfeiler im Endzustand ist die gleiche wie während des Bauzustands, siehe Kapitel 5.3.

Die Anordnung der Brückenpfeiler im Endzustand ist eine sogenannte komplexe Pfeilerkonstruktion (ein Pfeilerfundament mit aufgesetztem Pfeiler). Die Pfeilerbreite B einer komplexen Konstruktion wird durch die äquivalente Breite der Konstruktion bestimmt. Die äquivalente Pfeilerbreite kann mit dem folgenden, von Melville und Coleman (2000) vorgeschlagenen Ausdruck berechnet werden:

$$B_e = B \left(\frac{h+Y}{h+B_{pc}} \right) + B_{pc} \left(\frac{B_{pc}-Y}{B_{pc}+h} \right) \quad (\text{Gl.21})$$

Dabei ist Y die Höhe der Pfeilerfußspitze im Vergleich zum Flussbett (positiver Wert unter der Sohle), h ist die Wassertiefe; B_{cp} ist die Breite des Pfeilerfußes und B ist die Breite des Pfeilers über dem Fuß.

Durch Substitution der Pfeilerbreite B in Kapitel 5.2 mit B_{cp} kann eine Berechnung der maximalen potenziellen Kolkentiefe im Endzustand mit Hilfe der in Kapitel 5.2 angegebenen HEC18- und FDOT-Kolkgleichungen vorgenommen werden. Die Ergebnisse aus dieser Berechnung sind in Tabelle 5.5 für die Strömungsbedingungen des HW2013, MNQ und Sturmflutereignisses dargestellt. Die entsprechenden Zeitskalen sind in Tabelle 5.6 zusammengefasst. Zu beachten ist, dass die in der Tabelle dargestellten Zeitskalen nur gültig sind, solange die Strömungsbedingungen (Strömungsgeschwindigkeit und Wassertiefe) während des gesamten Zeitskalenzeitraums konstant gehalten werden. Verringert sich die Strömungsgeschwindigkeit, vergrößert sich die Zeitskala.

Die im Endzustand am stärksten kolkgefährdeten Brückenpfeiler sind im Folgenden in der Rangfolge nach maximaler potenzieller Kolkentiefe angegeben. Wobei die maximale Kolkentiefe an der östlichen Pfeilerseite (stromaufwärts) auftritt:

- Pfeiler 40 mit einer potenziellen maximalen Kolkentiefe von bis zu 10 m
- Pfeiler 30 mit einer potenziellen maximalen Kolkentiefe von bis zu 8,9 m
- Pfeiler 50 mit einer potenziellen maximalen Kolkentiefe von bis zu 5,7 m
- Pfeiler 20 mit einer potenziellen maximalen Kolkentiefe von bis zu 5,6 m

Tabelle 5.5: Maximale potenzielle Kolkentiefe an jedem Brückenpfeiler während des Endzustands für die Abflussbedingungen HW2013, MNQ und Sturmflut. Die Kolkentiefe wird auf der Grundlage der HEC-18- sowie FDOT-Kolkgleichungen berechnet

| Abflussereignis | Kolk Gleichung | P20 Kolkentiefe [m] | P30 Kolkentiefe [m] | P40 Kolkentiefe [m] | P50 Kolkentiefe [m] |
|-----------------|----------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|
| HW2013 | HEC-18 | 3,5 | 6,6 | 8,0 | 3,3 |
| HW2013 | FDOT | 3,2 | 8,9 | 10,0 | 3,4 |
| MNQ | HEC-18 | 2,2 | 5,0 | 6,0 | 2,0 |
| MNQ | FDOT | 2,1 | 6,3 | 5,5 | 1,9 |
| Sturmflut | HEC-18 | 5,6 | 6,3 | 6,0 | 5,7 |
| Sturmflut | FDOT | 5,6 | 6,9 | 8,4 | 4,5 |

Tabelle 5.6: Zeitskala für die maximal potenzielle Kolkentiefe

| Abfluss- ereignis | P20 [h] | P30 [h] | P40 [h] | P50 [h] |
|----------------------|------------|------------|------------|------------|
| HW2013 | 0,1 | 0,2 | 0,1 | 0,3 |
| MNQ | 8,5 | 8,3 | 3,9 | 4,7 |
| Sturmflut | 5,4 | 0,3 | 0,3 | 2,3 |

5.5 Globale Kolkentwicklung

Ein globaler Kolk, der auch Kontraktionskolk genannt wird, kann durch Einschnürung und Verbauung des Fließquerschnittes entstehen. Die Verengung des Fließquerschnittes führt zu erhöhten Strömungsgeschwindigkeiten und damit auch zu einer erhöhten Sohlschubspannung, die wiederum zu einem erhöhten Sedimenttransport an den von der Verengung betroffenen Stellen führt. Der Grad der Kontraktion kann aus dem Kontraktionsverhältnis β ermittelt werden (HEC-18, 2012):

$$\beta = \frac{W_1}{W_2} \quad (\text{Gl. 22})$$

Dabei ist W_1 die stromaufwärts gelegene Flussbreite (ohne Kontraktion) und W_2 die Breite des Gewässerteils mit Kontraktionen. Das Kontraktionsverhältnis für den Ist-, Bau- und Endzustand ist in Tabelle 5.7 angegeben. Das Kontraktionsverhältnis für die bestehende Brücke und die neue Brücke im Endzustand ist gleich. Daher ist im Endzustand kein globaler Kolk zu erwarten, da dieser bereits während der Zeit der bestehenden Brücke aufgetreten ist. Während des Bauzustands ist das Kontraktionsverhältnis größer als bei der bestehenden Brücke, was bedeutet, dass ein globaler Kolk zwischen den Brückenpfeilern auftreten kann. Das Ausmaß des globalen Kolks kann mit Hilfe der folgenden Gleichung berechnet werden. Diese gilt für globale Kolke auf beweglicher Sohle (Live-Bed-Regime) mit zusätzlichem Sedimenttransport im Kolkbereich (HEC-18, 2012):

$$\frac{h_2}{h_1} = \left(\frac{Q_2}{Q_1}\right)^{6/7} \left(\frac{W_1}{W_2}\right)^{0,59} \quad (\text{Gl.23})$$

Dabei ist h_1 die gemittelte Tiefe stromaufwärts, h_2 die gemittelte Tiefe im Bereich mit Kontraktionen, Q_1 und Q_2 der Abfluss stromaufwärts und im Bereich mit Kontraktionen, W_1 und W_2 die Bodenbreite stromaufwärts und im Bereich mit Kontraktionen, in dem Sedimenttransport stattfindet. Durch Anwendung von Gl. 23 kann die globale Kolkentiefe zwischen den Brückenpfeilern in dem Bauzustand bis zu ca. 0,8 m betragen. Die Entwicklung dieses Kolks ist ein langsamer Prozess und wird die maximale Tiefe von 0,8 m durch die Zeitbeschränkung des Bauzustands wahrscheinlich nicht erreichen. Im Endzustand der geplanten Brückenpfeiler ergibt sich der gleiche globale Kolk wie bei den bestehenden Brückenpfeilern.

Tabelle 5.7: Das Kontraktionsverhältnis für den Ist-, den Bau- und den Endzustand, mit $W_I = 258\text{m}$

| Bestehende Brücke | Bauzustand | Endzustand |
|-------------------|------------|------------|
| 1,05 | 1,19 | 1,05 |

6 Kolkchutzkonzept

Wie in den vorherigen Abschnitten aufgezeigt, sind die Brückenpfeiler während des Bau- und in des Endzustands der Kolkbildung ausgesetzt. Um dem Kolk entgegenzuwirken, wird nachfolgend ein Konzept zum Kolkchutz vorgestellt, das um die Spundwand und im Endzustand um die Brückenpfeiler herum aufgebracht werden kann.

6.1 Stabilität von Decksteinen

DHI empfiehlt, den Kolkchutz auf Basis von Decksteinen herzustellen. Der erforderliche Mindestkorndurchmesser bzw. das Mindestgewicht der Steine, die bei den vorliegenden Strömungsverhältnissen (Tabelle 4.6) stabil bleiben, wurde auf der Grundlage eines Shields-Ansatzes abgeschätzt.

Beim Shields-Ansatz definiert der Shields-Parameter (siehe Gl. 1, Abschnitt 5.1) anhand der Überschreitung des kritischen Shield-Parameter den Zeitpunkt ab dem ein Stein von der Strömungskraft in Bewegung versetzt (siehe Gl. 2). Das Vorhandensein einer Spundwand wirkt sich verstärkend auf die Strömungs- und Sohlschubspannungen in der unmittelbaren Umgebung der Spundwand aus. Die Verstärkung der Sohlschubspannung ist gegeben durch:

$$\alpha = \frac{\tau}{\tau_{\infty}} \quad (\text{Gl. 24})$$

Dabei entspricht τ der Sohlschubspannung in der Nähe der Spundwand und τ_{∞} der ungestörten Sohlschubspannung in größerer Entfernung zur Spundwand.

Der Verstärkungsfaktor für ein quadratisches Bauwerk wie das der Spundwandkästen, beträgt nach experimentellen Daten etwa 3-4, siehe Hjort (1974). Für einen Brückenpfeiler kann der Verstärkungsfaktor bis zu 11 betragen, siehe Hjort (1974), wobei der Bereich um den Pfeiler, in dem der Verstärkungsfaktor größer 5 beträgt, stark begrenzt ist und nur einige Steindurchmesser umfasst. Daher wird für die Pfeiler im Shields-Ansatz ein Verstärkungsfaktor von 5 angesetzt.

Für den Brückenpfeiler 20 konnte der Shields-Ansatz nicht angewendet werden, da die Wassertiefe und die Steingröße bei der schlechtesten Strömungsbedingung gleich groß waren. Daher wurden die minimalen Steingrößen am Brückenpfeiler 20 auf der Grundlage der Richardson und Davis (1995) Formeln für Steinschüttungen (Melville & Coleman (2000)) abgeschätzt:

$$D_{50} = \frac{0,346 * f_1^2 * f_2^2}{(S-1)} * Fr^2 * h \quad (\text{Gl.25})$$

Dabei definiert f_1 den Formfaktor für die Bauwerksform (1,5 für halbkreisförmig abgerundete und 1,7 für rechteckige Pfeilerformen), f_2 berücksichtigt den Abstand vom Pfeiler zum Ufer ist (während des Bauzustands $f_2=0,9$ und $f_2=1,1$ für den Endzustand), Fr bezeichnet die Froude-Zahl $(V/(g*h)^{0,5})$ und h die Wassertiefe.

Der mittlere Mindestkorndurchmesser D_{50} und das mittlere Mindestgewicht M_{50} , für Steine, die für die in Tabelle 4.6 angegebenen Strömungsverhältnisse

gerade noch stabil sind, sind für den Bauzustand mit Spundwandkästen sowie für die Endzustand in Tabelle 6.1 abgebildet. Für die Abschätzung der Steingröße im Endzustand wird davon ausgegangen, dass die vorhandenen Brückenpfeiler entfernt wurden und das Flussbett auf das umgebende Niveau eingeebnet wurde.

Tabelle 6.1: Mittlerer erforderlicher Mindestkorndurchmesser (D_{50}) und mittleres erforderliches Mindestgewicht (M_{50}) der Decksteine, die während des Bauzustands und Endzustands stabil gegenüber den in Tabelle 4.6 aufgezeigten Strömungsverhältnissen sind

| | Pfeiler 20 | Pfeiler 30 | Pfeiler 40 | Pfeiler 50 |
|-------------------|------------|------------|------------|------------|
| Bauzustand | | | | |
| D_{50} [m] | 0,19 | 0,17 | 0,25 | 0,06 |
| M_{50} [kg] | 9,95 | 7,26 | 23,76 | 0,28 |
| Endzustand | | | | |
| D_{50} [m] | 0,22 | 0,30 | 0,48 | 0,10 |
| M_{50} [kg] | 15,65 | 41,44 | 170,68 | 1,59 |

6.2 Kolkschutzlayout für die Pfeiler 20, 30 und 40

Als Kolkschutz an den Brückenpfeilern werden Decksteine ohne Verwendung von Filterschichten oder Geotextilen vorgeschlagen. Der Kolkschutz sollte in zwei Stufen eingebaut werden. In der ersten Stufe sollten die Decksteine nach dem Einbau der Spundwandkästen installiert werden. Es wird empfohlen, die Decksteine einige Tage nach der Einbringung der Spundwände einzubauen, um eine gewisse Kolkbildung um die Spundwände herum zu ermöglichen. In der zweiten Phase, nachdem die Spundwände entfernt wurde, sollten Decksteine in dem Bereich der Innenseite der Spundwand angebracht werden. Die Steine, die während des Bauzustands (um die Spundwände herum) eingebracht wurden, sollten erhalten bleiben, da sie Teil des Kolkschutzsystems für die letzte Phase sind.

Der vorgeschlagene Kolkschutz verzichtet auf die Filterschicht unter den Decksteinen. Es wird empfohlen, eine breite Abstufung der Decksteine zu verwenden. Die Abstufung während des Bauzustands sollte bei $D_{85}/D_{15} > 2,5$ liegen, um das Eindringen von Sohlsediment in den Kolkschutz zu reduzieren.

Für die im Endzustand verwendeten Decksteine wäre eine Abstufung von $D_{85}/D_{15} > 1,5$ oder $M_{85}/M_{15} > 2,7$ ausreichend. Die Dicke des Kolkschutzes sollte 2,5 bis 3,5 * D_{50} betragen. Die Ausdehnung des Kolkschutzes sollte wie in Abbildung 6.1 für den Bauzustand (A) und in Abbildung 6.1 für den Endzustand (B) ausgebildet sein. Die Oberkante der in dem Endzustand verlegten Decksteine (innerhalb d der Spundwände) sollte auf gleicher Höhe oder oberhalb (maximal über einer D_{50} Schicht) der um die Spundwände verlegten Decksteine liegen. Wenn eine solche Höhe nicht durch die Dicke der Decksteine selbst erzielt werden kann, kann Kies mit der Größe $D_{50} > 70$ mm unter die Decksteine geschüttet werden, um die erforderliche Höhe der Decksteine zu erzielen. Der empfohlene Kolkschutz ist sowohl für den lokalen Kolk als auch für den globalen Kolk stabil.

Der in Abbildung 6.1 rote Kasten kennzeichnet den 6 m vom Pfeilerkopf entfernten Bereich, in dem die Kolksteinsteine so gewählt werden können, wie sie für den Bau- oder Endzustand spezifiziert wurden.

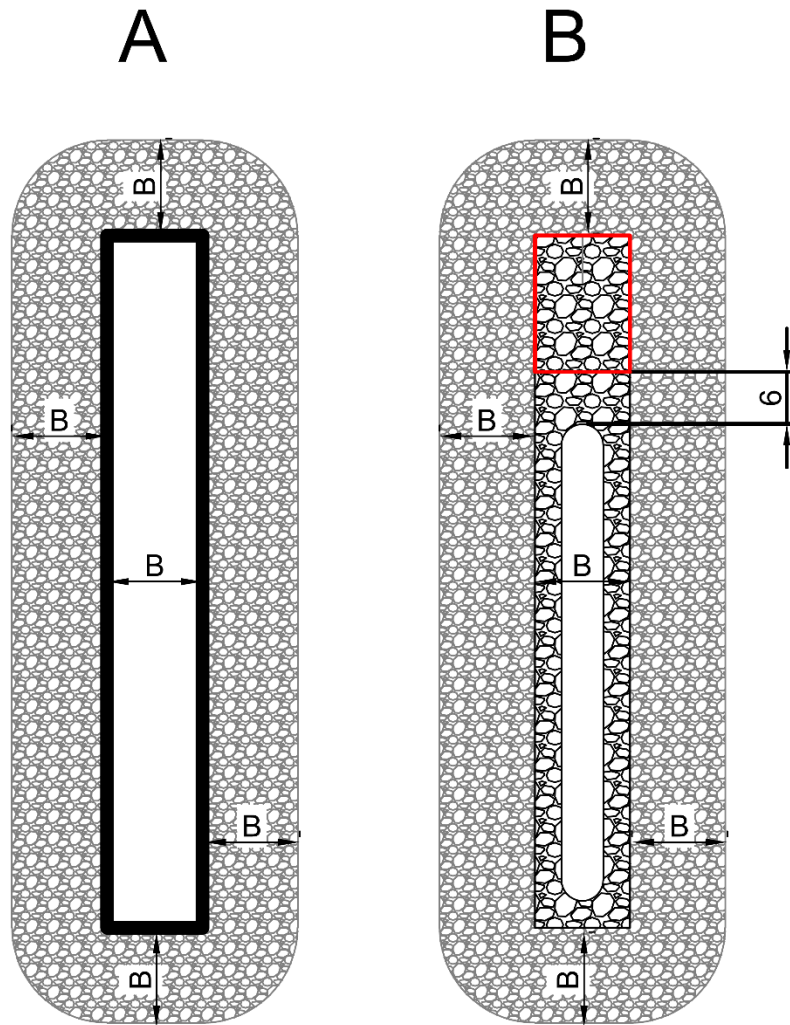


Abbildung 6.1: Konzept des Kolkshutzes während des Bauzustands (A) und während des Endzustands (B). Das Layout gilt für die Pfeiler 20, 30 und 40. Die Ausdehnung ist in der Draufsicht dargestellt. Der rote Kasten in (B) kennzeichnet den Bereich, in dem die Kolksteinsteine so gewählt werden können, wie sie für den Bau- oder Endzustand spezifiziert wurden.

Es werden die nachfolgenden Steingrößen und Schichtdicken für den Kolkshutz für den Bau- und Endzustand empfohlen:

Tabelle 6.2: Kolkenschutzkonzept für die Pfeiler 20, 30 und 40 während des Bau- und Endzustands. Die angegebenen Werte sind die anzusetzenden Mindestwerte.

| Kolkenschutzdetails | Pfeiler 20 | Pfeiler 30 | Pfeiler 40 | | Pfeiler 20 | Pfeiler 30 | Pfeiler 40 | |
|---|--------------------------------------|-----------------------|-----------------------|--|---|------------|------------|--|
| Bauzustand | | | | | Endzustand | | | |
| erforderliches Mindestgewicht des M_{50} mit einer Dichte von 2650 kg/m^3 | 9,95kg | | 23,7 kg | | 15,7kg | 41,4kg | 170,7kg | |
| erforderlicher Minstdurchmesser des D_{50} mit einer Dichte von 2650 kg/m^3 | 190 mm | 170 mm | 25 mm | | 220 mm | 300 mm | 480 mm | |
| Abstufung der Körnung der Deckschicht | $M_{85}/M_{15} > 2,7$ | $D_{85}/D_{15} > 2,5$ | $M_{85}/M_{15} > 2,7$ | | $M_{85}/M_{15} > 2,7$ | | | |
| Schichtdicke des Kolkschutzes | $2,5-3,5 \times D_{50}$ | | | | $2,5-3,5 \times D_{50}$ | | | |
| Ausdehnung des Kolkschutzes | Aufgezeigt in Abbildung 6.1 A | | | | Die Innenfläche der Spundwand, aufgezeigt in Abbildung 6.1 B | | | |

| Kolkschutzdetails | Pfeiler 20 | Pfeiler 30 | Pfeiler 40 | | Pfeiler 20 | Pfeiler 30 | Pfeiler 40 | |
|--|---|--|--|--|--|--|--|--|
| Vorgeschlagene Standardabstufung nach EN 13383, die die Anforderungen oben erfüllt | LMA5/40 M ₅₀ =10-20 kg M ₈₅ /M ₁₅ =8 | L 90/250 D ₅₀ =170 mm D ₈₅ /D ₁₅ =2,8 | LMA10/60 ¹ M ₅₀ =20-35 kg M ₈₅ /M ₁₅ =6 Bzw. LMA15/120 M ₅₀ =35-60 kg M ₈₅ /M ₁₅ =8 | | LMA5/40 ² M ₅₀ =10-20 kg M ₈₅ /M ₁₅ =8 Bzw. LMA10/60 M ₅₀ =20-35 kg M ₈₅ /M ₁₅ =6 | LMA15/120 ³ M ₅₀ =35-60 kg M ₈₅ /M ₁₅ =8 | LMA60/300 ⁴ M ₅₀ =120-300 kg M ₈₅ /M ₁₅ =5 | |

¹ Bei der Verwendung der Abstufung LMA10/60 sollte M₅₀ größer 23,7 kg gewählt werden, ansonsten kann die Abstufung LMA 15/120 angesetzt werden.

² Bei Verwendung der Abstufung LMA5/40 sollte M₅₀ größer 16 kg gewählt werden, ansonsten kann die Abstufung LMA10/60 angesetzt werden.

³ Bei Verwendung der Abstufung LMA15/120 sollte M₅₀ größer 41,4 kg betragen.

⁴ Bei Verwendung der Abstufung LMA60/300 sollte M₅₀ größer 170,7 kg betragen.

6.3 Kolkchutzlayout für den Pfeiler 50

In Kapitel 5 wird die Kolkentiefe am Pfeiler 50 auf Grundlage der in Kapitel 4.3 angegebenen Bodenbeschaffenheiten berechnet. Demnach besteht der Boden an Pfeiler 50 in der obersten Schicht aus Mittelsand. Der Pfeiler 50 liegt an Land und der Bereich um den Pfeiler ist hin und wieder überflutet. Der Auftraggeber hat einige Bilder vom vorhandenen Brückenpfeiler zur Verfügung gestellt, welcher sich an der gleichen Stelle befindet, an der der Pfeiler 50 errichtet werden soll (s. Abbildung 6.2). Nach Abbildung 6.2 ist es offensichtlich, dass es sich bezüglich der Bodenbeschaffenheit im Bereich des Pfeilers 50 nicht um Mittelsand, sondern es sich stattdessen um einen kohäsiven Boden mit viel unterschiedlicher Vegetation handelt. Die Vegetation reduziert die Bodenschubspannungen, die auf den Oberboden wirken, wenn das Gebiet überflutet wird und schützt den Boden so vor Auskolkung. Darüber hinaus tragen die Wurzeln der Vegetation dazu bei, den Boden vor Erosion zu schützen und schließlich ist ein kohäsiver Boden selbst widerstandsfähiger vor einer Auskolkung. Die Abbildung 6.3 zeigt Fotos von oben und von der Seite vom bestehenden Brückenpfeiler. Es ist zu erkennen, dass der bestehende Brückenpfeiler über keinen errichteten Kolkchutz verfügt, und es sind keine Anzeichen zu erkennen, dass sich am bestehenden Brückenpfeiler Kolk ausgebildet oder sich ausgebildet hat. Dies ist eine wichtige Erkenntnis, die zeigt, dass der Boden an diesem Standort aufgrund der Vegetation und des kohäsiven Bodens nicht zu einer Kolkbildung neigt.

Basierend auf den oben beschriebenen Ergebnissen empfiehlt DHI für die Bauphase (Kofferdamm) und die Endphase (Fundament) an Pfeiler 50 Folgendes:

- An Pfeiler 50 ist kein Kolkchutz erforderlich, solange der Boden um den Kofferdamm und das Fundament wie in Abbildung 6.2 und Abbildung 6.3 dargestellt beschaffen ist. Darüber hinaus ist es wichtig, dass die Deckwerkesteine (die Neigung zur Elbe hin) erhalten bleiben, wie es auf dem oberen Foto in Abbildung 6.3 zu sehen ist.
- Falls der Boden am Kopf des Kofferdamms/ Fundaments gestört ist (nur Boden ohne Vegetation) können Steine mit einer Größe von 0,1 m (wie in Tabelle 6.2 angegeben) an den steinfreien vegetationslosen Stellen um den Kopf des Kofferdamms/Fundaments platziert werden. Die Schichtdicke dieser Steine sollte 1-2 Steine betragen und die Ausdehnung sollte bis zu 4 m vom Kopf des Kofferdammes/Fundamentes betragen. Es wird davon ausgegangen, dass die Steine mit der Zeit von der Vegetation bedeckt werden.
- Es wird empfohlen, den Pfeiler 50 (Kofferdamm/Fundament) nach der ersten Überflutung zu untersuchen, um festzustellen, ob sich Kolk gebildet hat. Wird Kolk beobachtet, sollten Steine mit einer Größe von 0,1 m in das Kolkloch gelegt werden. Weitere Informationen zur Untersuchung des Pfeilers 50 finden Sie in Abschnitt 7.2.



Abbildung 6.2: Foto vom Bereich, in dem der Pfeiler 50 errichtet werden soll, und vom bestehenden Brückenpfeiler. Das obere Foto ist vom bestehenden Pfeiler aus gesehen und das untere Foto ist vom Baum (abgebildet im oberen Foto) aus gesehen in Richtung des bestehenden Brückenpfeilers.



Abbildung 6.3 Das Foto zeigt den bestehenden Brückenpfeiler an der Stelle, an der der Pfeiler 50 errichtet werden soll.

7 Einbau und Monitoring

7.1 Installationsverfahren

Es wird empfohlen, den Kolkschutz mit einem Tieflöffelbagger oder mittels eines Fallrohrs einzubauen. Dies gewährleistet eine hohe Genauigkeit beim Einbau und minimiert das Risiko einer Entmischung des Gesteins beim Durchgang durch die Wassersäule. Der Umgang mit dem Material bis zum und während des Einbaus muss entsprechend der einschlägigen technischen Regeln erfolgen, um eine Entmischung des Materials zu verhindern.

7.2 Monitoring

Während und nach dem Einbau des Kolkschutzes müssen sowohl im Bau- als auch im Endzustand ausreichend viele Vermessungen zum Monitoring durchgeführt werden. Die folgenden Vermessungen werden für die Pfeiler 20, 30 und 40 empfohlen:

- Vor dem Einbau von Kolkschutzmaßnahmen um die Spundwände
- Nach dem Einbau der Kolkschutzmaßnahmen um die Spundwände
- Nach Fertigstellung der Brückenpfeiler - wenn die Spundwände entfernt sind.
- Nach dem Einbau der Deckschicht im Endzustand.

Für den Pfeiler 50 (Pfeiler an Land) werden folgende Vermessungen empfohlen:

- Nach der ersten Überflutung nach Einbau des Kofferdamms. Bei Anzeichen von Kolkbildung sollten Steine mit einer Größe von 0,1 m (s. Kapitel 6.3) an der von Kolkbildung betroffenen Bereichen gelegt werden.
- Nach der ersten Überflutung, bei der das Fundament überflutet wird. Bei Anzeichen von Kolkbildung sollten Steine mit einer Größe von 0,1 m (s. Kapitel 6.3) an der von Kolkbildung betroffenen Bereichen gelegt werden.
- Nach jeder Sturmflut oder jedem extremen Abfluss mit einem Wiederkehrintervall von mehr als 5 Jahren, bei der der Boden um den Pfeiler 50 überflutet wurde.

Dauert die Bauphase der Brückenpfeiler länger als ein Jahr an, so werden jährliche Vermessungen empfohlen. Zusätzliche Vermessungen sind nach extremen Abflüssen (Wiederkehrintervall größer 10 Jahren) oder Sturmfluten für alle Pfeiler durchzuführen. Außerdem wird empfohlen, das Monitoring auf Grundlage der Vermessungsergebnisse zu evaluieren und, falls nötig, zu überarbeiten.

8 Literatur

- /1/ DHI (2021). Strömungsgutachten für den Neubau der A1-Süderelbbrücke. BAB A1 – 8-streifige Erweiterung, AD Süderelbe und AS Harburg.
- /2/ Ettema, R. Constantinescu, G. Melville, B. (2011). NCHRP -175. Evaluation of Bridge scour Research: Pier scour Process and Predictions.
- /3/ FDOT (2005). Bridge scour manual. State of Florida Department of Transportation.
- /4/ HEC-18 (2012). Evaluating scour at bridges. Fifth Ed. (April 2012), Hydr. Engrg. Circular No. 18 (HEC-18), Rep. No. FHWA-HIF-12-003, Federal Highway Administration, Washington, D.C.
- /5/ Hjort, P. (1974). Lokal Erosion kring bropelare och rörledningar. Institution för vattenbyggnad Teknisk Högskolan i Lund. Bulletin Serie A Nr 30. Lund 1974.
- /6/ Melville, B. W., Coleman, S. E., (2000). Bridge scour. Water Resources publications, LLC. ISBN number: 1-887 201-18-1.
- /7/ Richardson, E.V., and Davis, S.R. (1995). Evaluating scour at bridges. 3d ed.: U.S. Department of Transportation, Federal Highway Administration Hydraulic Engineering Circular 18, Publication FHWA-IP-90-017, 204 p.
- /8/ Sheppard, D. M., and Miller, W. (2006). Live-bed local pier scour experiments. Journal of Hydraulic Engineering-ASCE, 132(7), 635-642.
- /9/ Soulsby, R. (1997). Dynamic of marine sands – A manual for practical applications. Thomas Telford.
- /10/ Sumer, B. Mutlu, and Jørgen Fredsøe (2002). The mechanics of scour in the marine environment. World Scientific.
- /11/ WSV (Küstendaten Portal, 2021). Sedimentkataster der Elbe inkl. der Nebengewässer und Parametersatz für Sedimentdaten der Bundesanstalt für Gewässerkunde (BfG), Stand: 2002 bis 2012

