

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

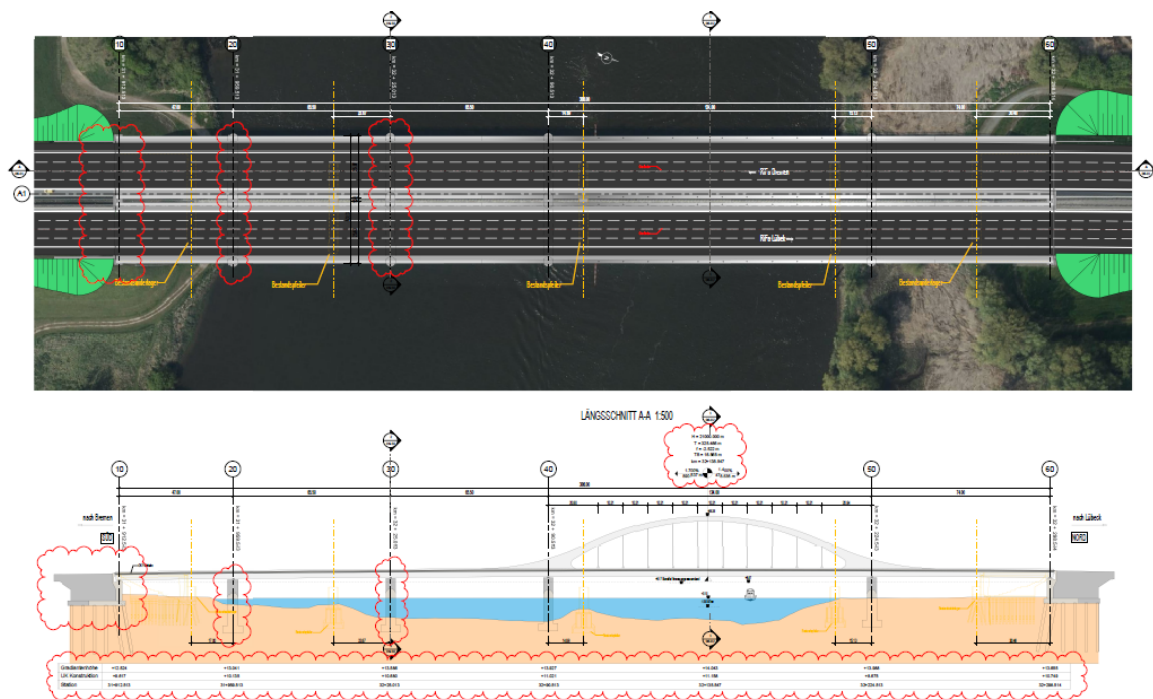
FESTSTELLUNGSENTWURF

- Strömungsgutachten -

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

Strömungsgutachten für den Neubau der A1-Süderelbbrücke

BAB A1 – 8-streifige Erweiterung, AD Süderelbe
und AS Harburg



DEGES Deutsche Einheit

Bericht

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



Erstellt von
Oliver von Hoegen/ Monika Donner/
Hisham Elsafti / Janett Brandt



Genehmigt von
Marcus Richter

22.09.2021

X

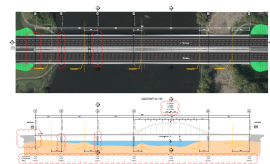


Signed by: Marcus Richter

Strömungsgutachten für den Neubau der A1-Süderelbbrücke

BAB A1 – 8-streifige Erweiterung, AD Süderelbe
und AS Harburg

Erstellt für DEGES Deutsche Einheit
Vertreten durch Herr Jörg Hampel



Quelle: DEGES – Vorzugsvariante
Aufsicht und Schnitt

Projektmanager	Janett Brandt
Projektbearbeitung	Oliver von Hoegen, Marion Dziengel, Monika Donner, Uwe Stöber, Martin Dixen, Clemens Cremer, Hisham Elsafti
Projektnummer	14805534
Revision	2.0
Einstufung	Vertraulich

INHALT

1	Einleitung.....	1
1.1	Hintergrund	1
1.2	Vorgehen.....	1
2	Grundlagen für das Strömungsgutachten.....	2
2.1	Verwendete Datengrundlagen	2
2.2	Wahl des hydraulisch relevanten Bauzustandes	4
2.3	Hochwasserereignisse der Elbe.....	6
2.4	Eisbildung, Eisstau auf der Elbe und Eisstauberechnungen (Literatur)	7
2.5	Berechnung und Beobachtungen von Eisdicken	11
3	Numerisches 3D-Modell zur Elbe	15
3.1	Modellaufbau.....	15
3.1.1	Berücksichtigung der Dalben im Modell.....	1
3.2	Modellsoftware zur Hydrodynamik (HD)	3
4	Modellzeiträume und Randwerte	4
4.1	Hydrologische Randbedingungen	4
4.2	Temperatur & Salzgehalt	7
4.3	Wind	7
4.4	Sohlrauheiten und Turbulenz	8
5	Nachweis der Modellgüte	11
5.1	Datengrundlage und angewandte Gütekriterien	11
5.2	Mittlere Tide und mittlerer Abfluss (MNQ).....	13
5.3	Hochwasserereignis HW2013.....	15
5.4	Bemessungssturmflut SFBEMFQ2600	17
5.5	Fazit zur Modellgenauigkeit	19
6	Vergleich der bauzeitlichen Brückenzustände	20
6.1	Mittlere Tide und mittlerer Abfluss (MNQ).....	20
6.2	Hochwasserereignis HW2013.....	27
6.3	Bemessungssturmflut SFBEMFQ2600	32
6.4	Erosionsneigung an den Böschungen	36
6.5	Auswertungen für die Standorte des Schierlings-Wasserfenchels	41
6.5.1	Standorte des Schierlings-Wasserfenchels unter dem mittleren Ereignis MNQ	42
6.5.2	Standorte des Schierlings-Wasserfenchels unter dem Hochwasserereignis HW2013	43
6.5.3	Standorte des Schierlings-Wasserfenchels unter der Bemessungssturmflut SFBEMFQ2600	44
6.6	Eisstau und -abfluss.....	45
6.6.1	Eisstau im Lichtraum.....	46
6.6.2	Eisstau zwischen Pfeilern	47
6.7	Kolkbildung und -schutz	51

7	Lokales Modell des Pfeilerstaus.....	52
8	Zusammenfassung	58
9	Literatur	61

ABBILDUNGEN

Abbildung 1.1: Untersuchungskonzept und Vorgehen im Strömungsgutachten Süderelbe für die Themen, Kolk, Eisstau, Strömungen, Pfeilerstau und Erosionen an den Böschungen	2
Abbildung 2.1: Bauzustand 01 und 02, die mit Blick auf den Verbauungsgrad relevant sind....	4
Abbildung 2.2 Pfeilerformbeiwerte aus Literaturquellen zusammengetragen. Pfeilerformbeiwerte oben rechts (Bolrich, 2013), Pfeilerformbeiwerte oben links (Zanke, 2002) und Pfeilerformbeiwerte unten nach Rehbock mit einem Verhältnis Breite: Länge ~ 1:7 (Schröder, 1994).....	5
Abbildung 2.3: Bauzeitliche Aufschüttung auf +2,85 mNHN am südlichen Widerlager zwischen Widerlager und Pfeiler 20.....	6
Abbildung 2.4: Gemessene Abflussganglinie bei Neu Darchau zum Hochwasser aus Juni 2013	6
Abbildung 2.5: Klassifizierung der Eisprozesse, entnommen aus Carstensen (2008)	8
Abbildung 2.6: Kennwerte der Schollenzusammensetzungen, entnommen aus Alexy (1998) .	9
Abbildung 2.7: Untersuchte Varianten und deren relative Stauzeit. Je größer die Stauzeit, desto ungünstiger ist die Variante, entnommen aus Alexy (1998).....	10
Abbildung 2.8: Herleitung der vereinfachten Formel zur Ermittlung des Eisstaus zwischen den Pfeilern gemäß Alexy (1998).....	11
Abbildung 2.9: Mittlere und maximale Eisdicken (1961 bis 2010) in verschiedenen Bereichen der deutschen Nordseeküste, entnommen aus Schmelzer et al. (2015)	12
Abbildung 2.10: Häufigkeit des Auftretens der verschiedenen Eisformen (1961 bis 2010) (übereinander geschobenes Eis, zusammengeschobenes Eis, festgestampftes Eis, aufgedrücktes Eis, Eisblock) im Bereich der deutschen Nordseeküste mit Angaben der maximalen Höhe in m, entnommen aus Schmelzer et al. (2015)	12
Abbildung 2.11: Häufigkeiten der berechneten Eisdicken in der Elbe für die Winter 1970 bis 2018 nach Plagemann (1988, links) und Stefan (1889, rechts).....	14
Abbildung 3.1: Ausdehnung und Bathymetrie des 3D-Modells zur Tideelbe von Stadersand bis Geesthacht	15
Abbildung 3.2: Einbindung der Prielstrukturen für die Naturschutzgebiete in das Modellgitter 16	
Abbildung 3.3: Räumliche Modellausdehnungen für die Modelle MNQ und HW2013 (oben) und Bemessungssturmflut (unten)	17
Abbildung 3.4: Modelldiskretisierung in der Elbe und im Bereich der Brücke	18
Abbildung 3.5: Vergleich der Modellgitter mit zugehöriger Bathymetrie im Bereich der A1-Brücke für die Modellzustände Ist-, Bau- und Endzustand mit den zugehörigen Brückenpfeilern	1
Abbildung 3.6: Vertikale Modellauflösung als Querschnitt durch die Elbe in der A1-Süderelbbrücke	1
Abbildung 3.7: Einfluss der Froudezahl auf das Widerstandsverhalten C_w von Pfeilerbauten in Gerinneströmungen nach Naudascher (1992), Definitionsskizze (rechts) für den Einfluss der Anströmrichtung nach DHI (2014a).....	2
Abbildung 3.8: Ausschnitt zur Lage der Dalben (rote Punkte) im Modellgitter	2
Abbildung 4.1: Wasserstands- und Abfluss-Randbedingungen für MNQ (oben), HQ (Mitte) und die Bemessungssturmflut (unten).	6
Abbildung 4.2: Zeitliche Entwicklung der Windgeschwindigkeit (unten) und -richtung (oben) über der Elbe bei Scharhörn (schwarz), Cuxhaven (rot) und Hamburg St.Pauli (grün) während der Sturmflut 3. Januar 1976, von der BAW verwendet für die Sturmflutszenarien SFREFQ2600 und SFBEMQ2600 modelliert vom DAD mit MKW, entnommen aus BAW (2018).....	7
Abbildung 4.3: Windgeschwindigkeit und -richtung für das Sturmflutmodell zur Untersuchung der Süderelbbrücke.....	8
Abbildung 4.4: Karten der Sohlrauheiten für die betrachteten Szenarien MNQ (oben), HW2013 (Mitte) und SFBEMFQ2600 (unten).	9

Abbildung 4.5:	Karten der Smagorinsky-Faktoren für MNQ (oben) und HW2013 (unten)	10
Abbildung 5.1:	Gegenüberstellung von gemessenen und simulierten Wasserständen (linke Y-Achse) sowie die daraus resultierende Differenz (linke Y-Achse) für das MNQ-Szenario.....	14
Abbildung 5.2:	Gegenüberstellung von gemessenen und simulierten Wasserständen (linke Y-Achse) sowie die daraus resultierende Differenz (linke Y-Achse) für das HQ-Szenario.....	16
Abbildung 5.3:	Gegenüberstellung gemessener mit simulierten Wasserständen (linke Y-Achse) sowie die daraus resultierende Differenz (linke Y-Achse) für das SF-Szenario.....	18
Abbildung 5.4:	Vergleich der Modellergebnisse DHI (oben) vs. BAW (2018, unten) im Bereich Hamburger Hafen zum Sturmflutscheitelwasserstand der SFBEMQ2600 im Teilgebiet Hamburg zwischen Schulau und Bunthaus.....	19
Abbildung 6.1:	Vorausgehende Erläuterung und Verortung von Details in den nachfolgenden Darstellungen am Beispiel des Ebbstromvergleichs aus dem MNQ-Ereignis.	20
Abbildung 6.2:	Zeitreihe der Strömungsgeschwindigkeit und des Wasserstandes an Messpunkten im Ober- (OW) und Unterwasser (UW) in Pfeilernähe im Vergleich der bauzeitlichen Zustände (Ist, Bau, End) für das MNQ-Ereignis.	22
Abbildung 6.3:	Strömungsgeschwindigkeiten der Zustände während des Ebbstroms für das MNQ-Ereignis. Der Darstellungszeitpunkt ist in Abbildung 6.2 aufgezeigt.	23
Abbildung 6.4:	Strömungsgeschwindigkeiten der Zustände während des Flutstroms für das MNQ-Ereignis. Der Darstellungszeitpunkt ist in Abbildung 6.2 aufgezeigt.	24
Abbildung 6.5:	Wasserstände der Zustände während Tidehochwasser für das MNQ-Ereignis. Der Darstellungszeitpunkt ist in Abbildung 6.2 aufgezeigt.....	25
Abbildung 6.6:	Wasserstände der Zustände während Tideniedrigwasser für das MNQ-Ereignis. Der Darstellungszeitpunkt ist in Abbildung 6.2 aufgezeigt.....	26
Abbildung 6.7:	Zeitreihe der Strömungsgeschwindigkeit und des Wasserstandes an Messpunkten im Ober- (OW) und Unterwasser (UW) in Pfeilernähe im Vergleich der bauzeitlichen Zustände (Ist, Bau, End) für das HW2013-Ereignis.....	28
Abbildung 6.8:	Strömungsgeschwindigkeiten der Zustände während Ebbstrom für das HW2013-Ereignis. Der Darstellungszeitpunkt ist in Abbildung 6.7 aufgezeigt.....	29
Abbildung 6.9:	Wasserstände der Zustände während Tidehochwasser für das HW2013-Ereignis. Der Darstellungszeitpunkt ist in Abbildung 6.7 aufgezeigt.....	30
Abbildung 6.10:	Wasserstände der Zustände während Tideniedrigwasser für das HW2013-Ereignis. Der Darstellungszeitpunkt ist in Abbildung 6.7 aufgezeigt.....	31
Abbildung 6.11:	Zeitreihe der Strömungsgeschwindigkeit und des Wasserstandes an Messpunkten im Ober- (OW) und Unterwasser (UW) in Pfeilernähe im Vergleich der bauzeitlichen Zustände (Ist, Bau, End) für das Ereignis Bemessungsturmflut (SFBEMFQ2600).	32
Abbildung 6.12:	Strömungsgeschwindigkeiten der Zustände während Ebbstrom für das Sturmflut-Ereignis (SFBEMFQ2600). Der Darstellungszeitpunkt ist in Abbildung 6.11 aufgezeigt.....	33
Abbildung 6.13:	Wasserstände der Zustände während des Sturmflutscheitels für das Sturmflut-Ereignis (SFBEMFQ2600). Der Darstellungszeitpunkt ist in Abbildung 6.11 aufgezeigt.....	34
Abbildung 6.14:	Wasserstände der Zustände während des Sturmflutscheitels für das Sturmflut-Ereignis (SFBEMFQ2600). Der Darstellungszeitpunkt ist in Abbildung 6.11 aufgezeigt.....	35
Abbildung 6.15:	Maximale (links) und mittlere Sohlschubspannung (rechts) im Vergleich der Zustände (Ist-, Bau- und Endzustand) für das MNQ-Szenario.	38
Abbildung 6.16:	Maximale (links) und mittlere Sohlschubspannung (rechts) im Vergleich der Zustände (Ist-, Bau- und Endzustand) für das HW2013-Szenario.....	39
Abbildung 6.17:	Maximale (links) und mittlere Sohlschubspannung (rechts) im Vergleich der Zustände (Ist-, Bau- und Endzustand) für das SFBEMFQ2600-Szenario.	40
Abbildung 6.18:	Lokal nachgewiesene Standorte (grüner Punkt) des endemisch in der Tide-Elbe beheimateten Schierling-Wasserfenchels sowie Untersuchungsbereiche für Wasserstand und Fließgeschwindigkeit.....	41

Abbildung 6.19:	Statistische Auswertung des Wasserstandes im Istzustand und der Strömungen an den Standorten des Schierling-Wasserfenchels für das MNQ-Ereignis und den Ist-, Bau- und Endzustand	42
Abbildung 6.20:	Statistische Auswertung des Wasserstandes im Istzustand und Strömungen an den Standorten des Schierling-Wasserfenchels für das HW2013-Ereignis und den Ist-, Bau- und Endzustand.....	44
Abbildung 6.21:	Statistische Auswertung des Wasserstandes im Istzustand und Strömungen an den Standorten des Schierling-Wasserfenchels für das SFBEMFQ2600-Ereignis und den Ist-, Bau- und Endzustand	45
Abbildung 6.22:	Brückenparameter zur Abschätzung einer möglichen Eisversetzung, entnommen aus Plagemann (1988).....	46
Abbildung 6.23:	Mögliche Eisaufschiebung in Abhängigkeit der mittleren Fließgeschwindigkeit und der Wassertiefe (links) nach Plagemann (1988), entnommen aus Schuh (2011).....	47
Abbildung 6.24:	Maße der Pfeileranordnung im Endzustand (rechts) und der Pfeileranordnung im Bauzustand (links) an der Süderelbbrücke.....	48
Abbildung 6.25:	Eisstau Abschätzung in Abhängigkeit von Eisschollengröße, -konzentration und lichter Weite einer Brücke (Carstensen, 2010)	49
Abbildung 6.26:	Auswertung eines möglichen Eisstaus und einer Eisaufschiebung an der Süderelbbrücke im Bauzustand, Details siehe Tabelle 6.2.....	50
Abbildung 6.27:	Auswertung eines möglichen Eisstaus und einer Eisaufschiebung an der Süderelbbrücke im Endzustand, Details siehe Tabelle 6.3.....	50
Abbildung 7.1:	Lokales CFD-Modell für den Pfeilerstau am Pfeiler Nr. 40: (a) Lage des Pfeilers Nr. 40 und (b) die Ränder des Bereiches für das CFD-Modells	52
Abbildung 7.2:	Das numerische Netz des CFD-Modells: (a) eine Draufsicht des Netzes mit der Verfeinerung und Schichtung am Rand des Pfeilers mit den Dimensionen des Bereiches von 445,2 x 114,3 m, (b) eine 3D-Ansicht der Ränder des Modells	53
Abbildung 7.3:	Eine Skizze des CFD-Modells: Dimensionen, Koordinaten und Anfangsbedingungen (Mittelwert der Strömungsgeschwindigkeiten am Rand wird hier gegeben, die maximale Strömungsgeschwindigkeit am Rand beträgt 2,9 m/s)	53
Abbildung 7.4:	3D-Ansicht der Wasseroberfläche.....	54
Abbildung 7.5:	Der Pfeilerstau der CFD-Simulation: (a) und (b) die Querschnitte A-A, B-B und C-C. Die roten Pfeiler zeigen die Blickrichtung der Querschnittsprofile an.....	55
Abbildung 7.6:	Ein Querschnitt der Strömungsgeschwindigkeit (auf Höhe -1,00 m) und die Nachlaufströmung des Pfeilers. Die Strömung ist wegen der Bathymetrie und die unsymmetrisch. Die Dimension der Box des Untersuchungsbereiches a) beträgt 445,2 x 114,3 m.	56

TABELLEN

Tabelle 2.1:	Verwendete Datengrundlagen Süderelbbrücke	2
Tabelle 2.2:	Ausschnitt aus den im amtlichen Anzeiger Nr. 63 (2013) angegebenen Bemessungswasserstände für die öffentlichen Hochwasserschutzanlagen.....	4
Tabelle 2.3:	Scheitelwerte und -abflüsse an ausgewählten Pegeln beim Hochwasser Juni 2013, entnommen aus IKSE (2014).....	7
Tabelle 2.4:	Wiederkehrintervalle und zugehörige Durchflüsse für ausgewählte Pegel, Bezugsperiode 1890 bis 2013, entnommen aus IKSE (2014), (* = Minderung durch Deichbrüche).....	7
Tabelle 2.5:	Berechnete Eisdicken in der Elbe für die Winter 1970 bis 2018 nach Plagemann (1988) und Stefan (1889).....	13
Tabelle 4.1:	Szenarien mit ihren Simulationszeiträumen, Randbedingungen und Auswertungen	4
Tabelle 4.2:	Vertikale und horizontale Wirbelkoeffizienten v_t des k- ϵ Modells.	11

Tabelle 5.1: Verwendete Pegel zur Modellkalibrierung der Szenarien MNQ, HW2013 und Bemessungssturmflut SFBEMFQ2600 für den Istzustand.	12
Tabelle 5.2: Statistische Parameter der Differenzen aus gemessenen und simulierten Wasserständen für die untersuchten Pegel im Szenario MNQ.....	13
Tabelle 5.3: Statistische Parameter der Differenzen aus gemessenen und simulierten Wasserständen für die untersuchten Pegel im Szenario HW2013	15
Tabelle 5.4: Statistische Parameter der Differenzen aus simulierten Wasserständen der BAW (2018) und simulierten Wasserständen von DHI für die untersuchten Pegel im Sturmflutszenario	17
Tabelle 6.1: Prüfung eines möglichen Eisstaues anhand der Wasserstände, Wassertiefen und lichten Höhen während der untersuchten Szenarien, (*) Bemessungswert gemäß amtlicher Anzeiger Nr. 63, 2013). Grün markiert = Wert bleibt unter dem Grenzwert, gelb markiert = Wert nahe dem Grenzwert, rot markiert = Wert über dem Grenzwert.....	46
Tabelle 6.2: Auswertung des Eisstaues und der Eisaufschiebung im Bauzustand	49
Tabelle 6.3: Auswertung des Eisstaues und der Eisaufschiebung im Endzustand	50

1 Einleitung

1.1 Hintergrund

Die DEGES plant die 8-streifige Erweiterung der A1 innerhalb der Freien und Hansestadt Hamburg zwischen dem vorhandenen AD-Südost und der AS HH-Harburg. Seit dem Herbst 2019 unterstützt die DHI WASY GmbH die DEGES mit Strömungsgutachten und Beratungen zu hydrodynamischen Themen am Ersatzneubau der Norderelbbrücke. Am 04.06.2020 wurde die DHI WASY seitens der DEGES auch zur Begutachtung des Ersatzneubaus der Süderelbbrücke in Analogie zum nördlichen Abschnitt in Form eines Nachtrags angefragt und im Weiteren beauftragt.

Für den Ersatzneubau der Süderelbbrücke erfolgt eine Erweiterung des Bestandsbauwerkes in Richtung Westen. Die östliche Bauwerkskante der zukünftigen A1-Brücke über die Süderelbe wird etwa der heutigen Brücke entsprechen. Das neue Bauwerk wird vier lange Strompfeiler in der Süderelbe erhalten.

Wasserstände, Strömungen und kritischen hydraulischen Zustände werden im vorgelegten Gutachten in Anlehnung an die Vorgehensweise im Strömungsgutachten an der Norderelbbrücke (DHI WASY, 2020) ermittelt und ausgewiesen. Die Wirkung des geplanten Brückenbauwerkes wurde im End- und im Bauzustand auf die Themen nautische Passierbarkeit, schadlose Eisabfuhr und Hochwasserabfuhr, Kolkbildung und ggf. Kolkssicherung und erosive Einwirkung auf die Böschung untersucht.

1.2 Vorgehen

Im Fokus des vorgelegten Strömungsgutachtens für die Erweiterung der A1-Süderelbbrücke steht die hydrodynamische Betrachtung der Bauphasen: i) Bestand, ii) bauzeitlicher Zustand und iii) Endzustand unter Berücksichtigung nachfolgender Themen: Eisstau, Kolkbildung, Strömung und Wasserstände, Erosionen an den Böschungen, schadlose Hochwasserabfuhr und u.a. nautische Aspekte.

Grundlage zur Untersuchung bildete ein hydronumerisches 3D-Modell zur Tideelbe. In den Ausdehnungen wurden die bereits für das Strömungsgutachten der A1-Brücke an der Norderelbe genutzten numerischen 3D-Modelle in ihrer Ausdehnung übernommen. Für den aktuellen Anwendungsfall wurde im Fokusbereich der Süderelbe verfeinert, angepasst und mit Fokus auf die Süderelbe nachkalibriert.

Mit den hydronumerischen 3D-Modellen wurde ein mittleres Abfluss- und Tideereignis, ein Hochwasserereignis und die Bemessungssturmflut berechnet (Abbildung 1.1), um daraus Wasserstände, Strömungsverhältnisse und Schubspannungen am Standort der Süderelbbrücke zu bestimmen. Aus den berechneten Strömungen und Wasserständen wurden Analysen zum schadlosen Eisabfluss, zum schadlosen Hochwasserabfluss, zu Erosionen an den Böschungen sowie eine gesondert vorgelegte Studie zur Kolkentwicklung und -tiefe vorgenommen (Abbildung 1.1).

Ausgehend vom Istzustand, bestehend aus drei Brückenpfeilern sowie den Widerlagern der Brücke, wurden für den Bauzustand zusätzlich die vier Spundwände einschließlich des rückzubauenden Teils und die neuen Widerlager eingebunden. Der Endzustand berücksichtigt die vier Brückenpfeiler der neu geplanten A1-Brücke sowie die Widerlager.

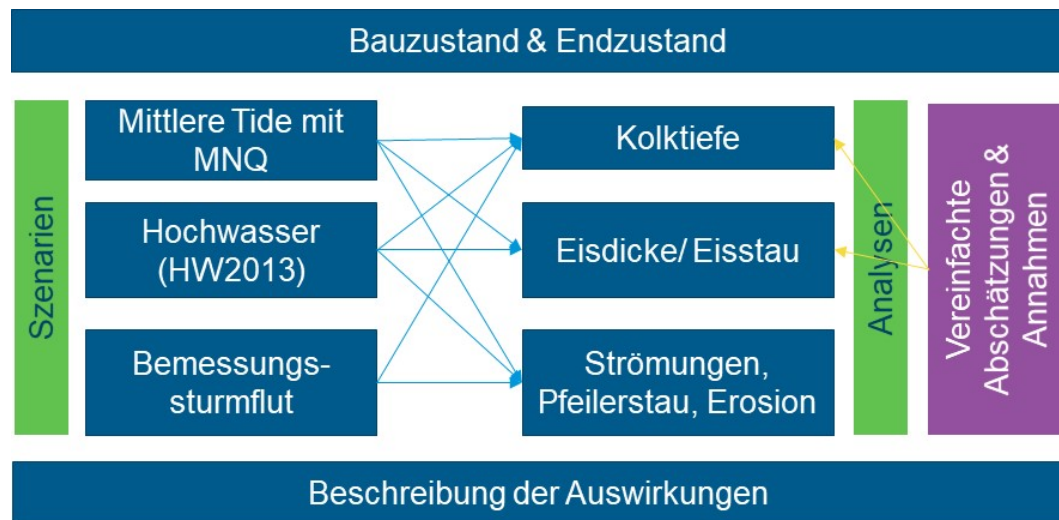


Abbildung 1.1: Untersuchungskonzept und Vorgehen im Strömungsgutachten Süderelbe für die Themen, Kolk, Eisstau, Strömungen, Pfeilerstau und Erosionen an den Böschungen

2 Grundlagen für das Strömungsgutachten

2.1 Verwendete Datengrundlagen

Folgende Daten (Tabelle 2.1) wurden den numerischen Modellen und der vorgelegten Auswertung zugrunde gelegt. Die Literaturquellen sind in Kap. 9 angeführt.

Tabelle 2.1: Verwendete Datengrundlagen Süderelbbrücke

Quelle/ bereitgestellt durch	Datenbeschreibung
DEGES Berlin (2020)	Planungsdaten für die Süderelbbrücke, vom 10.06.2020
Schüssler Plan (2020 bis 2021)	Planunterlagen zur Brücke, zu den Pfeilerpositionen, Stand vom 10.08.2020, vom 09.09.2020, vom 13.01.2021 und vom 02.03.2021.
HPA Hamburg (2019)	Peildaten vom Juli 2019 im Planungsraum (übermittelt am 14.09.2020) im 1x1 m Raster
Schüssler Plan (2020)	Peildaten im Planungsraum (übermittelt am 10.08.2020)
Portal Tideelbe (2016)	DGM-W Unterelbe 2016, Datendownload über das Portal Tideelbe im 1x1 m Raster (https://www.kuestendaten.de/Tideelbe/DE/Startseite/Startseite_Portal_Tideelbe_node.html)
Portal Tideelbe (2019)	Randwerte zum Abfluss bei Neu Darchau, Wasserstand bei Stadersand und an den Pegeln Schulau, Seemannshöft, St.Pauli und Schöpfstelle, (https://www.kuestendaten.de/Tideelbe/DE/Startseite/Startseite_Portal_Tideelbe_node.html)

Quelle/ bereitgestellt durch	Datenbeschreibung
HPA Hamburg (2019)	Peildaten 2019 von Bleckede bis Geesthacht, HK5 und HK50 nautisch
Portal Tideelbe (2019)	Sedimentkataster 2006, Datendownload möglich über (https://www.kuestendaten.de/Tideelbe/DE/Startseite/Startseite_Portal_Tideelbe_node.html)
HPA Hamburg (2004-2010)	Sedimentdaten und Siebdaten aus 2004-2010 im Bereich der geplanten Brücke
Schüssler Plan (2020)	Bestandsunterlagen zur bestehenden A1-Brücke u.a. Querschnitten, Plänen und mit Bodenprofilen (Bestandspläne BW 484)
HPA Hamburg	Dokumentation zur Eisdicke und Eisbekämpfung (2012, 2013), Eintrittswahrscheinlichkeiten von Wasserständen (2.04.2020)
BAW Hamburg (2019)	Sturmflut Gutachten 2018, Pegel Wasserstand Zeitreihen 1976, Datenübergabe per Mail am 26.11.2019
LSBG Hamburg (2013)	Deich Planungsunterlagen, Deichhöhen inkl. Bemessungswasserstand Hamburg aus dem amtlichen Anzeiger Nr. 63 vom 09.09.2013, Datenübergabe per Mail am 13.12.2019
LSBG Hamburg (2019)	Deichlinien des öffentlichen Hochwasserschutzes im Raum Hamburg
BAW Hamburg (2020)	Modellrand aus BAW-Sturmflutmodell, Datenübergabe per Mail am 15.01.2020
HPA Hamburg (2020)	Dalben und Standortdaten im Bereich Süderelbbrücke
Metaver (2020)	Biotopkataster Hamburg, WMS-Kartendienst (2020) zur Ableitung der Naturschutzgebiete an der Süderelbe (http://geodienste.hamburg.de/HH_WMS_Biotopkataster)
Plan T (2021)	Lage und Standorte des Wasserschieflingsfenchel (übermittelt am 26.04.2021)
HPA Hamburg (2021)	Hafenbestandsplan und Solltiefen im Hamburger Hafen (übermittelt am 17.03.2021)
HPA Hamburg (2021)	Vorgaben zur Böschungssicherung an den Standort Norder- und Süderelbe, auch gültig für den Kolkschutz in der Wasserwechselzone (übermittelt am 31.05.2021)
DWD (20119)	Temperaturdaten aus Freiburg an der Elbe, Datendownload vom DWD (https://cdc.dwd.de/portal/)

Die Bemessungswasserstände für die Sturmflutdeiche wurden im amtlichen Anzeiger Nr. 63 (2013) in Tabelle 2.2 für ausgewählte Orte angegeben. Für die A1-Süderelbbrücke ergibt sich aus dieser Unterlage ein Bemessungswasserstand von +8,1 mNHN.

Tabelle 2.2: Ausschnitt aus den im amtlichen Anzeiger Nr. 63 (2013) angegebenen Bemessungswasserstände für die öffentlichen Hochwasserschutzanlagen

Bereich	Zu erwartender Wasserstand in [mNHN]
Schulau	7,8
Blankenese	7,9
St. Pauli (Norderelbe)	8,1
Harburg (Süderelbe)	8,1
Sperrwerk Billwerder Bucht (Norderelbe)	8,2
Spadenland (Norderelbe)	8,2
Bunthaus	8,2
Geesthacht	8,6

2.2 Wahl des hydraulisch relevanten Bauzustandes

Neben dem Ist- und Endzustand wird es auch Bauzustände geben, die über mehrere Monate bzw. z.T. Jahre, je nach Baufortschritt, andauern. Im vorliegenden Strömungsgutachten wurde der Bauzustand ausgewählt, der aus den zu bewertenden Kriterien (siehe Abbildung 1.1) den kritischsten Bauzustand darstellt.

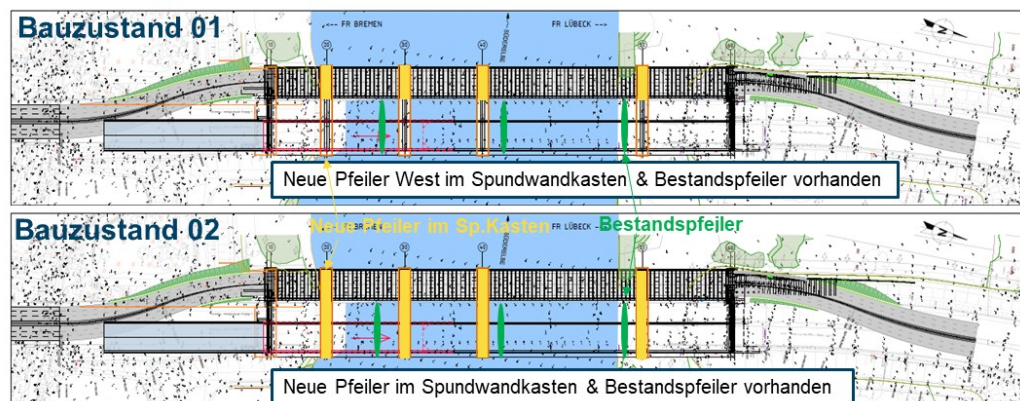


Abbildung 2.1: Bauzustand 01 und 02, die mit Blick auf den Verbauungsgrad relevant sind.

Die Wirkung einer Brücke auf den Wasserstand und die Strömung wird geprägt durch den Verbauungsgrad und die Pfeilerform.

Der Verbauungsgrad ist das Maß des verbauten Querschnittes gegenüber dem sonst freien Fließquerschnitt. Die verbaute Fläche wird definiert über die lichte Breite senkrecht zur Strömungsrichtung und die Wassertiefe an allen Bauteilen, die die Fließquerschnittfläche verbauen. Der Verbauungsgrad ist der Quotient aus verbauter Fläche zu unverbaute Querschnittsfläche. Grundsätzlich gilt: Je größer der Verbauungsgrad, desto größer die Wirkung der Brücke auf den Wasserstand und die Strömung.

Auf Basis dieser Prämisse des maximalen Verbauungsgrad ergeben sich die in Abbildung 2.1 dargestellten Zustände 01 und 02, die im Bauablauf mit Phase 1 bis 4 und Phase 5 bis 8 gekennzeichnet sind.

Neben dem Verbauungsgrad nimmt auch die Pfeilerform und die Pfeilerlänge Einfluss auf den Fließwiderstand der Brücke. Bei der Pfeilerform gilt, je geringer der Pfeilerformbeiwert, desto geringer ist die stauende Wirkung und desto fluiddynamischer ist der Pfeiler. Aus Abbildung 2.2 ist zu erkennen, dass neben der Form auch die Länge der Pfeiler in Fließrichtung eine Rolle spielt.

Während die größere Länge der umpundeten Pfeiler in Fließrichtung für die Navigation und den Eisstau nicht unmittelbar relevant ist, ist die die größere Länge aus dem Bauzustand 02 für den Hochwasserabfluss, die Sturmflut und den Kolk hydrodynamisch kritischer. Folglich wurde der Bauzustand 02 als für des Strömungsgutachten maßgeblich Bauzustand definiert. Der Bauzustand beinhaltet neben den umpundeten Pfeilern auch eine bauzeitliche Aufschüttung am südlichen Ufer zwischen dem Widerlager und der Pfeiler 20 auf +2,85 mNHN (Abbildung 2.3).

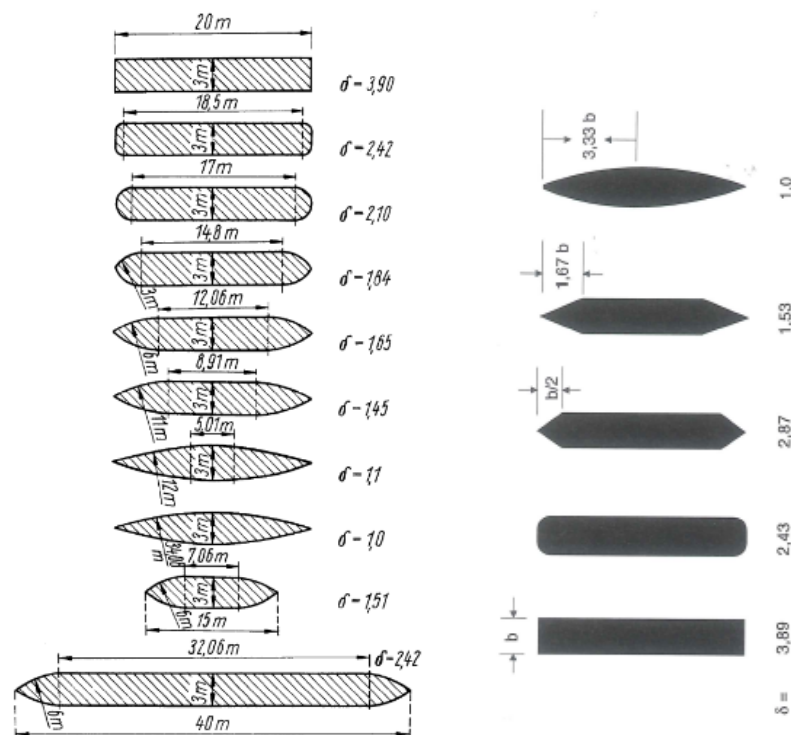


Abbildung 2.2

Pfeilerformbeiwerte aus Literaturquellen zusammengetragen. Pfeilerformbeiwerte oben rechts (Bollrich, 2013), Pfeilerformbeiwerte oben links (Zanke, 2002) und Pfeilerformbeiwerte unten nach Rehbock mit einem Verhältnis Breite: Länge ~ 1:7 (Schröder, 1994)

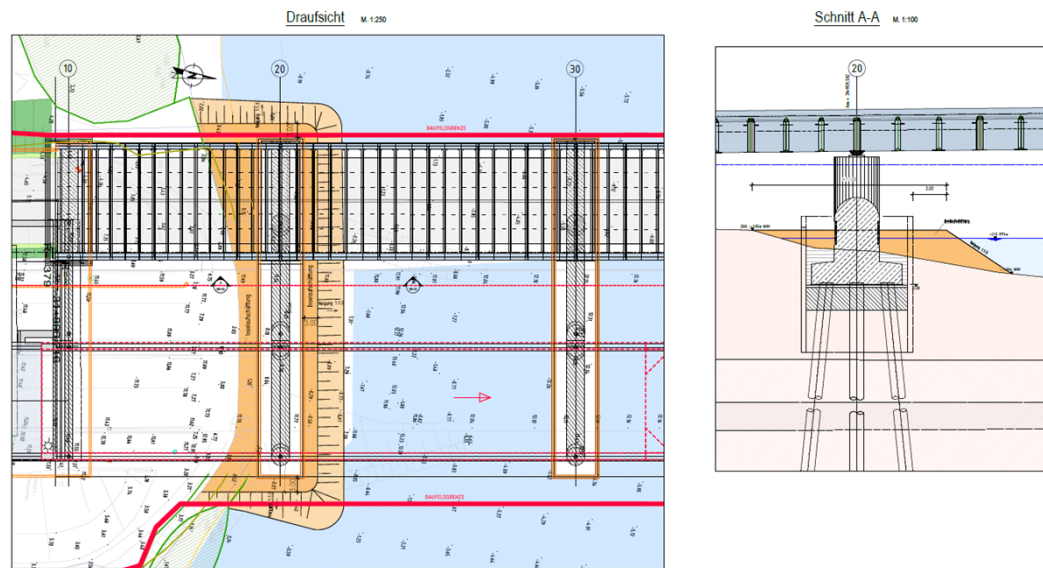


Abbildung 2.3: Bauzeitliche Aufschüttung auf +2,85 mNHN am südlichen Widerlager zwischen Widerlager und Pfeiler 20.

2.3 Hochwasserereignisse der Elbe

Der vorliegende Abschnitt wurde bereits in DHI WASY (2020) angeführt und wurde entsprechend übernommen, da er gleichermaßen für die Süderelbe gültig ist.

Das für den Nachweis der schadlosen Hochwasserabfuhr gewählte Ereignis stammt aus dem Juni 2013 mit einem Scheitelwert von 4071 m³/s am Pegel Neu Darchau (Abbildung 2.4). Die statistische Einordnung des Ereignisses aus dem Juni 2013 ergab die Zuordnung zu einem HQ₅₀ am Pegel Neu Darchau. Diese Hochwasserwelle berücksichtigt Deichbrüche im Oberwasser und mindert so den Scheitelwert bereits ab (Tabelle 2.3). Statistisch maßgeblich wäre die Hochwasserwelle ohne Minderungseffekte (Deichbruch) mit einem Scheitelwert von 4780 m³/s, wie die IKSE (2014) erläutert. Im Weiteren wurde das Hochwasserereignis HW2013 wie gemessen und wie tatsächlich aufgetreten in 2013 mit den Minderungseffekten angesetzt.

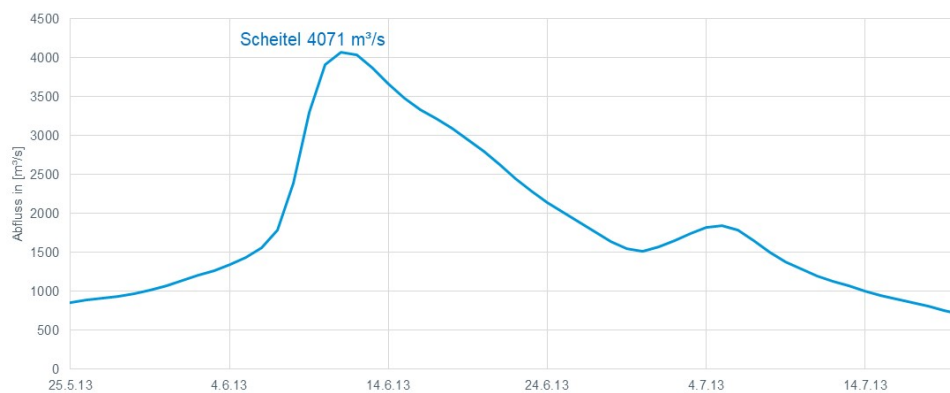


Abbildung 2.4: Gemessene Abflussganglinie bei Neu Darchau zum Hochwasser aus Juni 2013

Tabelle 2.3: Scheitelwerte und -abflüsse an ausgewählten Pegeln beim Hochwasser Juni 2013, entnommen aus IKSE (2014)

Gewässer	Pegel	Einzugs- gebiet*	Hochwasser 06/2013				
			Datum	Uhrzeit	Wasser- stand	Abfluss	Jährlich- keit
				MESZ	[cm]	[m ³ /s]	[Jahre]
Elbe	Wittenberge	123 532	09.06.	15:43	785	4 330 ⁴	100–200 ⁶
	Neu Darchau	131 950	11.06.	14:00	792	4 080 ⁴	100–200 ⁶

⁴ Originalwert (nach Kappung des Elbescheitels durch Deichbrüche und Flutung der Havelniederung)

⁵ nach Kappung des Elbescheitels und Flutung der Havelniederung

⁶ zur statistischen Einordnung nicht auf den durch eingetretene Retentionseffekte verzerrten beobachteten Wert in der Spalte „Abfluss“ bezogen, sondern auf den homogenisierten HQ-Wert ohne Retention; der homogenisierte HQ 2013 beträgt am Pegel Wittenberge 4 950 m³/s und am Pegel Neu Darchau 4 780 m³/s

Tabelle 2.4: Wiederkehrintervalle und zugehörige Durchflüsse für ausgewählte Pegel, Bezugsperiode 1890 bis 2013, entnommen aus IKSE (2014), (* = Minderung durch Deichbrüche)

Pegel	HQ ₁₀	HQ ₂₀	HQ ₅₀	HQ ₁₀₀	HQ ₂₀₀
	[m ³ /s]				
Dresden	2 540	3 050	3 790	4 400	5 070
Torgau	2 540	3 060	3 790	4 380	5 010
Barby	3 480	3 960	4 530	4 920	5 280
Wittenberge	3 280	3 710	4 230*	4 600*	5 000*
Neu Darchau	3 190	3 610	4 120*	4 580*	4 900*

2.4 Eisbildung, Eisstau auf der Elbe und Eisstauberechnungen (Literatur)

Eisbildungsprozesse und Grundlagen zum Eisstau wurden aus der Literatur und nach Rücksprache mit dem Eisbrecherkapitän der HPA am 28.11.2019 bereits im Rahmen des Strömungsgutachtens an der Norderehlbrücke (DHI WASY, 2020) zusammengetragen und wird hier übernommen:

Grundlagen zur Eisbildung, wie in Abbildung 2.5, sind u.a. in Carstensen (2008) und Schuh (2011) zu finden. Hierin werden auch die Prozesse der Eisbildung beschrieben. Auf Flüssen führen Strömungsturbulenzen dazu, dass ein Fluss an der gleichen Stelle nicht immer auf dieselbe Weise zufriert.

Durch Eisschollen kann es zu einem Eisstau mit Eisversetzungen (Eisschollen, die verkeilen) kommen. Gemäß Carstensen (2008) kann ein Eisstau durch eine lokal ausgebildete geschlossene Eisdecke, durch Querschnittseinengung oder zusätzliche Eiszuführung (Einmündung Nebenfluss) stattfinden. Eisversetzungen können sich durch über- und untereinander geschobene Eisschollen zu einer Stärke von bis zu 2,50 m auftürmen.

Durch den Tideeinfluss in der Elbe schiebt sich das Eis durch Flut- und Ebbstrom ineinander und friert zu Packeis oder Presseis zusammen. Im Oberlauf bleiben Eisschollen z.T. an der Staustufe Geesthacht bei Elbe-km 585,90 hängen und treiben über das Wehr bei Geesthacht.

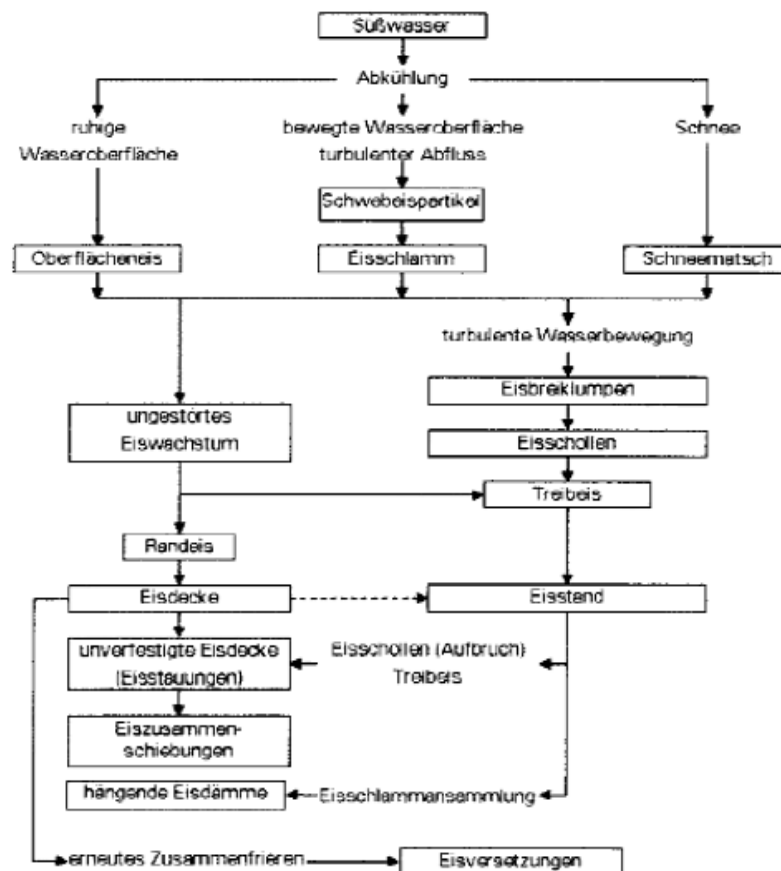


Abbildung 2.5: Klassifizierung der Eisprozesse, entnommen aus Carstensen (2008)

An der Elbe gibt es drei typische Teilbereiche, an denen sich ein Eisstau bilden kann: im Tidebereich, im Staubeereich der Staustufe Geesthacht und in der frei fließenden Strecke (Voss, 1998). Im Tidebereich lässt sich der Eisstaubereich auf Elbe-km 599 und 620 eingrenzen. Bei einem Oberwasserabfluss von 400 bis 800 m³/s ist ein Eisstau bis ca. Elbe-km 599 zu erwarten. Bei Oberwasserabflüssen über 1.500 m³/s reicht der Eisstau bis ca. Elbe-km 620.

Gemäß Angaben des Eisbrecherkapitäns der HPA erfolgen Eisbrecher-Einsätze in der Tideelbe flussabwärtig in Richtung Mündung der Elbe und bis zur Säureverladestation der Raffinerie (südliches Ende der Eisbrecherstrecke). Als jüngste Eiswinter wurden Januar 2010, Februar 2012 (z.T. Durchfrieren bis zur Sohle) und der Winter 2017 angeführt. Erfahrungsgemäß liegt die Schollendicke in der Tideelbe bei 15 bis 20 cm.

Die Vermeidung des Eisstaus ist die Aufgabe des Eisdienstes. Aus diesem Grund muss der Querschnitt zwischen den Pfeilern und Bauwerken der geplanten Brücke breit genug für die Eisbrecher der Elbe sein, um Eis aufzubrechen. Wobei vorrangig die Hauptöffnung maßgebend ist.

Die Pfeiler einer Brücke und ebenso die Umspundungen im Bauzustand müssen hierzu auf die Eislast bemessen werden.

Alexy (1998) untersuchte in einer umfangreichen Studie die Eisabführung an Brücken. Zur Modellierung der Eisschollen wurden Kunststoffschollen (Polyäthlylen) und Holzschollen verwendet (Abbildung 2.6). Holzschollen waren dabei aufgrund ihrer geringeren Dichte nicht so anfällig fürs Untertauchen und den damit einhergehenden Versetzungen. Für die Versuche wurden Schollen mittels Gitter vor der Brücke aufgestaut. An Pfeilerköpfen wurden zusätzlich Schollen angebracht, um natürliche

Einfrierungs- und Verkeilungseffekte zu simulieren. Für die Auswertung der Eisabführung wurde die Entstehung von Eisstau für jede Variante mittels der relativen Stauzeit bemessen. Diese ermittelten sich aus dem mittleren Wert von 5 Messungen pro Variante, welche ins Verhältnis zur Gesamtmesszeit gesetzt wurde (250 s).

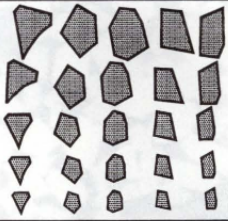

Material	Dichte [g/cm ³]	Seitenlänge [m]	Dicke [m]	Anteil [%]	Schollenformen
Polyäthylen	0,90	4,00	0,200	34,6	
Polyäthylen	0,90	3,25	0,200	22,3	
Polyäthylen	0,90	2,50	0,125	27,4	
Polyäthylen	0,90	2,00	0,125	10,3	
Polyäthylen	0,90	1,50	0,125	5,4	
Mischung		2,75		100,0	
Holz	0,78	4,25	0,250	100,0	
Holz	0,78	3,00	0,250	100,0	

Abbildung 2.6: Kennwerte der Schollenzusammensetzungen, entnommen aus Alexy (1998)

In seinen Versuchen (Abbildung 2.7) und durch Messung der Stauzeit fand Alexy (1998) folgende Eigenschaften heraus:

- Eine Vergrößerung der Pfeilerspannweite begünstigt eine geringere Stauneigung, jedoch können Eisversetzung nicht vollständig ausgeschlossen werden.
- Für um 15° in Strömungsrichtung gedrehte Pfeiler und Widerlager tritt aufgrund der verringerten Pfeilerspannweite keine verbesserte Eisabführung auf.
- Der Anschluss der Widerlager an die Böschung mittels Spundwände reduziert das Anfrieren und Verkeilen der Schollen und somit das Ausbilden eines Staubogens. Die relative Stauzeit lag bei 61 %.
- Die Verschiebung der Brücke nach Westen verbesserte die Schollenabführung auf eine relative Stauzeit von 75 %.






Variante	relative Stauzeit [%]
Grundvariante 	83
Pfeiler um 15° gedreht 	90
Pfeiler und Widerlager gedreht 	87
Grundvariante mit Spundwänden 	61
Grundvariante mit einem Pfeiler 	9

Abbildung 2.7: Untersuchte Varianten und deren relative Stauzeit. Je größer die Stauzeit, desto ungünstiger ist die Variante, entnommen aus Alexy (1998).

Die Schlussfolgerungen von Alexy (1998, in Abbildung 2.8 illustriert) besagten, dass eine modellbasierte Ermittlung von Eisversetzung nicht möglich ist. Daher erfolgte eine Ähnlichkeitsbetrachtung. Diese vereinfachte die Einflussfaktoren des Eisstaus auf die maßgebenden Faktoren Schollenkonzentration C , Schollengröße L_s und lichte Weite w_L im Brückenbereich. Unter Annahme von $C = 0,92$, ergab sich für die Untersuchung von Alexy (1998) somit $L_s/w_L = 0,13$ (Abbildung 2.8). Unter der Annahme der Schollengröße $L_s = 1$ m resultiert die lichte Weite $w_L = 7,7$ m. Somit liegt die lichte Weite der von Alexy untersuchten Brücke (s.o. Basisvariante) mit 16,3 m auf der sicheren Seite und Eisstau sollte nicht auftreten, so schlussfolgerte Alexy (1998).

Die Gleichung in Abbildung 2.8 wurde im Weiteren auch unter Carstensen (2008) veröffentlicht.

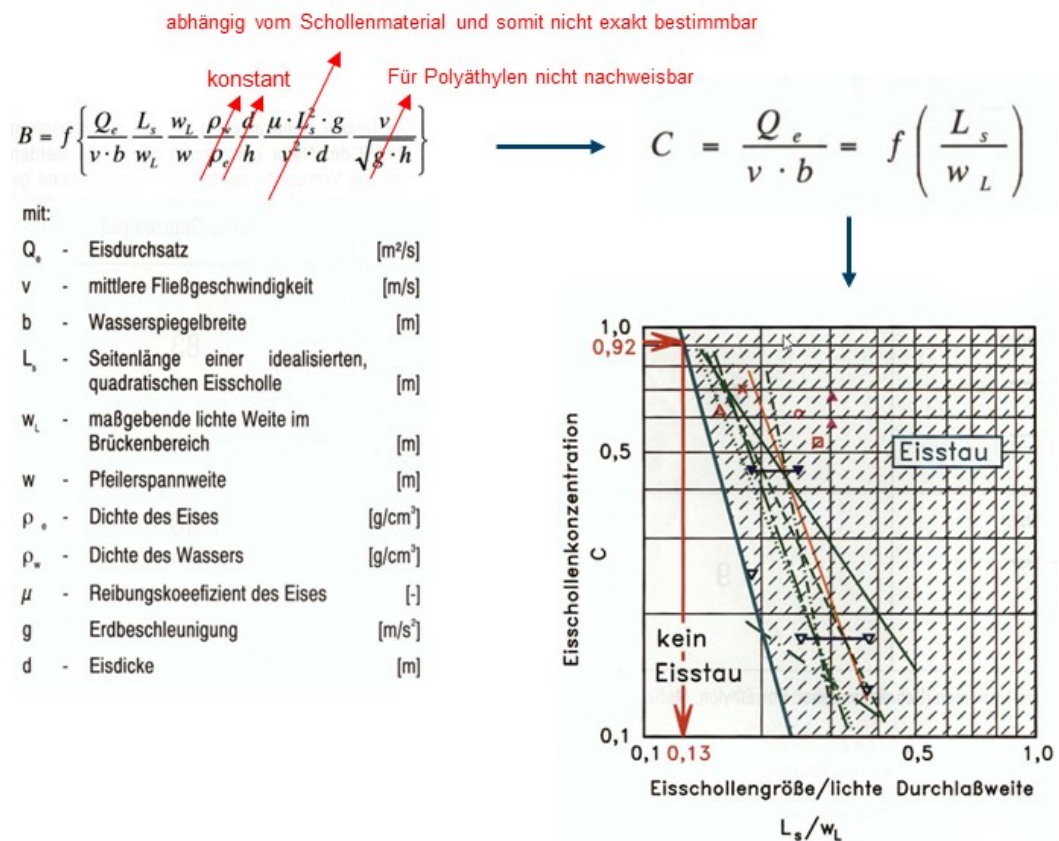


Abbildung 2.8: Herleitung der vereinfachten Formel zur Ermittlung des Eisstaus zwischen den Pfeilern gemäß Alexy (1998)

2.5 Berechnung und Beobachtungen von Eisdicken

Der vorliegende Abschnitt wurde bereits in DHI WASY (2020) angeführt und hier entsprechend übernommen, da er gleichermaßen für die Süderelbe gültig ist.

Beobachtungen und Messungen zu Eisdicken in der Tideelbe geben umfangreiche Dokumentationen des BSH in Form von Eisberichten und im Eisatlas (Schmelzer et al., 2015). Aus dem Zeitraum 1961 bis 2010 wurden so vom BSH die Eisdicken in Abbildung 2.9 und Abbildung 2.10 ermittelt. In Abbildung 2.9 wird die maximale Eisdicke mit 50 cm an den Landungsbrücken angegeben. Dieser Wert deckt sich mit der Angabe aus Abbildung 2.10, der zusätzlich die Häufigkeit und Konsistenz des Eises miterfasst. So wurde die Eisdicke von 50 cm an den Landungsbrücken in 7 % der Fälle erreicht.

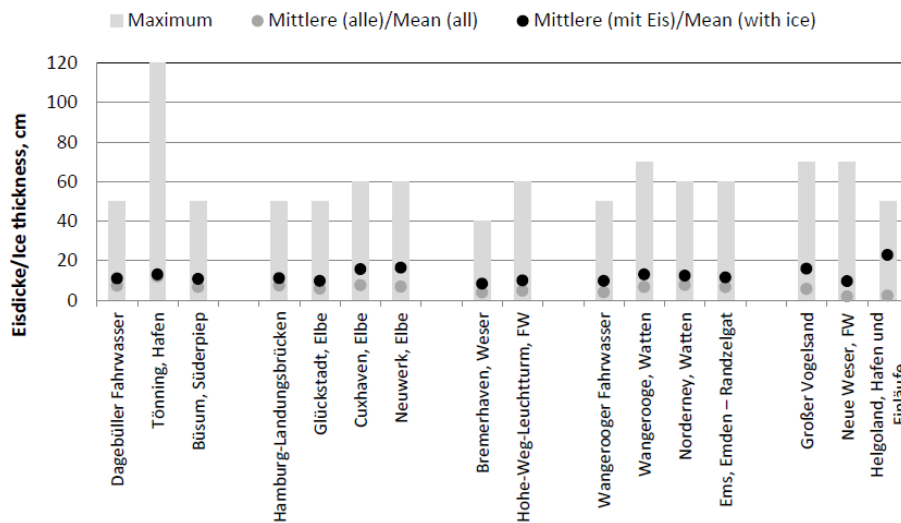


Abbildung 2.9: Mittlere und maximale Eisdicken (1961 bis 2010) in verschiedenen Bereichen der deutschen Nordseeküste, entnommen aus Schmelzer et al. (2015)

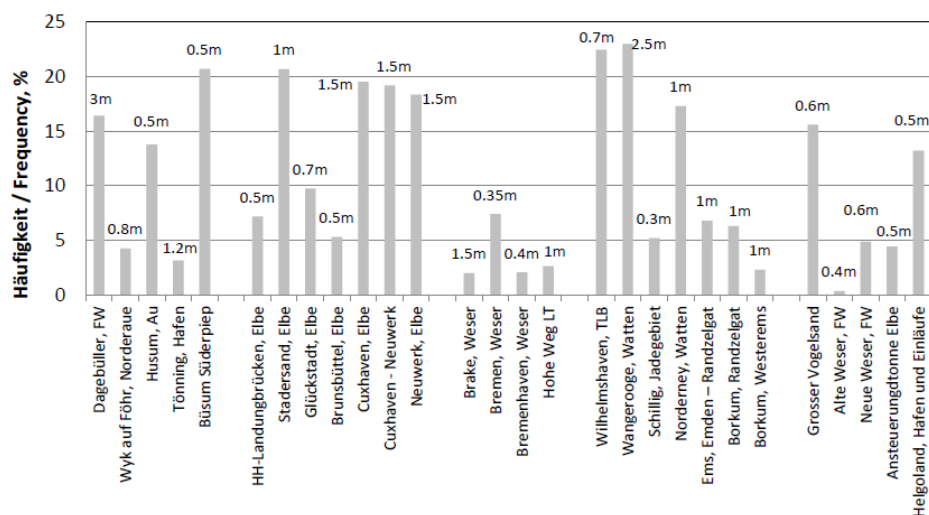


Abbildung 2.10: Häufigkeit des Auftretens der verschiedenen Eisformen (1961 bis 2010) (übereinander geschobenes Eis, zusammengeschobenes Eis, festgestampftes Eis, aufgepresstes Eis, Eisblock) im Bereich der deutschen Nordseeküste mit Angaben der maximalen Höhe in m, entnommen aus Schmelzer et al. (2015)

Gemäß der Eisberichte der BSH wurde der letzte mäßig strenge Winter 1995/96 aufgezeichnet. Kleine (1990) gibt ca. 25 cm Eisdicke für den mäßig strengen Winter 1986/87, der etwas weiter zurücklag, an. Jüngere Beobachtungen zu Eisdicken seitens des BSH von 2005 bis 2018 dokumentieren Eisdicken von 0 bis 30 cm in der Tideelbe.

Die Berechnung der Eisdicke erfolgte nach Plagemann (1988). Danach kann die Eisdicke näherungsweise über die Lufttemperatur und die sogenannte Kältesumme berechnet werden:

$$h_E = C \times \sqrt[3]{\sum -^\circ C}$$

mit:

h_E = Dicke des Eises in cm

$\Sigma -^{\circ}C$ = Kältesumme

$C = 5,0$ allgemein (für Strömungen $> 0,8$ m/s)

$C = 7,5$ für langsam fließende Gewässer (für Strömungen $> 0,2$ m/s)

Ergänzend wurde die Gleichung von Stefan (1889) zur Bestimmung der Eisdicke ebenfalls aus der Kältesumme herangezogen:

$$h_E = \alpha \times 3,5 \times \sqrt{S} = \alpha \times 3,5 \times \sqrt{\sum (-Ta) \times \Delta t}$$

mit:

h_E = Dicke des Eises in cm

S = Gradtagessumme

Ta = Tagesmittel der Lufttemperatur in $^{\circ}C$

Δt = Zeitintervall (=1d)

α = Konstante = hier 0,6 (berücksichtigt die klimatischen und hydraulischen Bedingungen und liegt im Bereich 0,6 bis 0,8)

Die aufgeführten Formeln sind für Zeitspannen mit negativen Tagesmitteltemperaturen konzipiert. Wird die Zeitreihe mit negativen Tagesgradsummen durch positive Tagesgradsummen unterbrochen, gilt die Gleichung aufgrund einer positiven Strahlungsbilanz bzw. Tauprozesse nicht mehr (Schuh, 2012). Vor diesem Hintergrund stellen die in Tabelle 2.5 errechneten Werte konservative Werte für eine maximal mögliche Eisdicke in der Elbe dar. Die Tatsache, dass in den betrachteten Wintern wiederholt positive Tagesmittel auftraten, wurde vernachlässigt.

Mit Hilfe der Temperaturdaten aus Freiburg an der Elbe wurden für die Tideelbe die Kältesummen von 1970 bis 2018 berechnet. Es ergaben sich Eisdicken mit bis zu 30 cm (Tabelle 2.5 und Abbildung 2.11), die mit den Beobachtungen der BSH gut übereinstimmen.

Tabelle 2.5: Berechnete Eisdicken in der Elbe für die Winter 1970 bis 2018 nach Plagemann (1988) und Stefan (1889)

Winter 1970 bis 2018	Eisdicke nach Stefan (1889) mit $\alpha = 0,6^1$	Eisdicke nach Plagemann (1988) mit $C = 5$
Minimale Eisdicke [cm]	5	9
Minimale Eisdicke [cm]	14	17
Minimale Eisdicke [cm]	27	27

¹ Typische Werte für α liegen im Bereich 0,6 bis 0,8 (Ashton 1986).

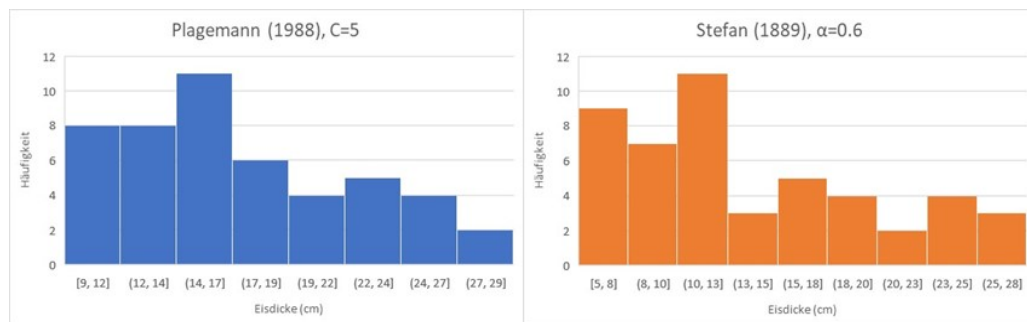


Abbildung 2.11: Häufigkeiten der berechneten Eisdicken in der Elbe für die Winter 1970 bis 2018 nach Plagemann (1988, links) und Stefan (1889, rechts).

Für die weiteren Analysen wird der Ansatz einer Eisdicke von 30 cm empfohlen. Für die Aufschiebung des Eises kann der langjährige Maximalwert des BSH mit 50 cm herangezogen werden.

3 Numerisches 3D-Modell zur Elbe

Für die Berechnung der Strömungen und Wasserstände wurden die hydronumerischen 3D-Modelle der Tideelbe aus dem Jahr 2019 (DHI WASY, 2020), die an der A1-Brücke der Norderelbe bereits genutzt wurden, als Grundlagen verwendet und die Ausdehnungen übernommen.

Die Längenausdehnungen von Stadersand bis Geesthacht sind für alle 3D-Modelle gleich. Sie unterscheiden sich jedoch je nach hydraulischem Ereignis in der seitlichen Ausdehnung. Das 3D-Modell für die Ereignisse MNQ und HW2013 (vgl. Tabelle 4.1) erfasst die Topografie bis zur Deichlinie bzw. Höhenbereiche, die nicht mehr benetzt werden. Das 3D-Modell für die Bemessungsturmflut erfasst den Bereich bis Krone der Sturmflutdeichlinie. Zusätzlich ist je nach Zustand (Ist-, Bau- und Endzustand) lokal die Brückengeometrie der Süderelbbrücke enthalten.

3.1 Modellaufbau

Zur Berechnung der genauen Strömungssituation an der neu geplanten A1-Brücke wurden die hydronumerischen 3D-Modelle, welche auf einem sogenannten unstrukturierten Berechnungsnetz beruhen, von Geesthacht bis Stadersand aus dem Jahr 2019 verwendet (Abbildung 3.1). Die 3D-Modelle nutzten alle die Höhendaten des DGM-W 2016 (vgl. Tabelle 2.1) im Gesamtmodell und sowie zusätzlich einen lokalen Peilungsdatensatz aus dem Juli 2019 im Bereich der Süderelbbrücke (vgl. Tabelle 2.1, HPA, 2020). Beide Peildaten lagen jeweils im 1x1 m Raster vor.

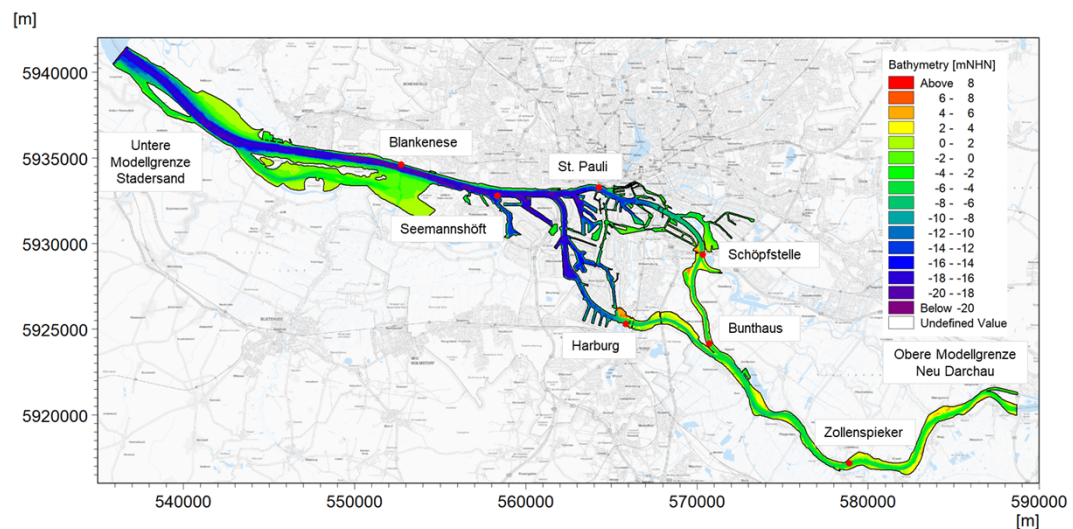


Abbildung 3.1: Ausdehnung und Bathymetrie des 3D-Modells zur Tideelbe von Stadersand bis Geesthacht

Die Modelle wurde für den unmittelbaren Brückenbereich der A1-Süderelbbrücke verfeinert, Strukturen der Brücke erfasst und hydraulisch relevante Strukturen auf dem Vorland insbesondere im Bereich des Naturschutzgebietes Heuckenlock und Schweensand eingebunden. Hierzu wurde die Biotoptypenkartierung aus 2017 (Tabelle 2.1) zur Ableitung der Naturschutzgebiete an der Süderelbe herangezogen und digitalisiert. Die Prielstrukturen wurden hochauflösend erfasst, um das Benetzen und Trockenfallen der Bereiche gut wiederzugeben.

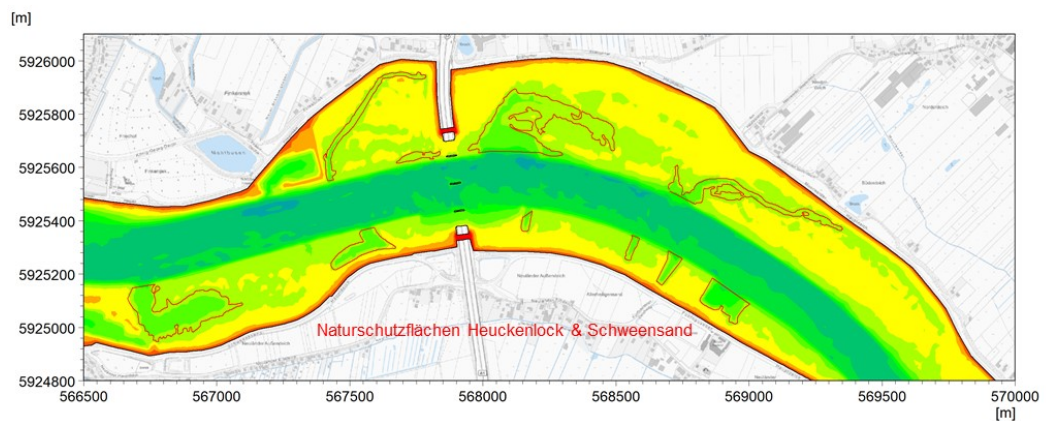


Abbildung 3.2: Einbindung der Prielstrukturen für die Naturschutzgebiete in das Modellgitter

Die Modellausdehnung unterschied sich für die untersuchten hydrologischen Szenarien (Kap. 4.1) wie in Abbildung 3.3 dargestellt. Das Modell für das Hochwasserereignis wurde im geplanten Brückenbereich erweitert (Abbildung 3.3, oben). Für das Sturmflutmodell wurden alle seitlichen Modellränder auf die Lage der Sturmflutdeiche nach Norden und Süden hin erweitert (Abbildung 3.3, unten). Für die Erweiterung der Modellränder bis zur Lage der Deichkronen wurden Modellränder der BAW, Kenntnisse zum privaten Hochwasserschutz und Vorgaben der LSBG zu den Sturmflutdeichlinien (Kap. 2.1) berücksichtigt. Die Billwerder Bucht und alle Nebengewässer wurde am Sperrwerk abgetrennt.

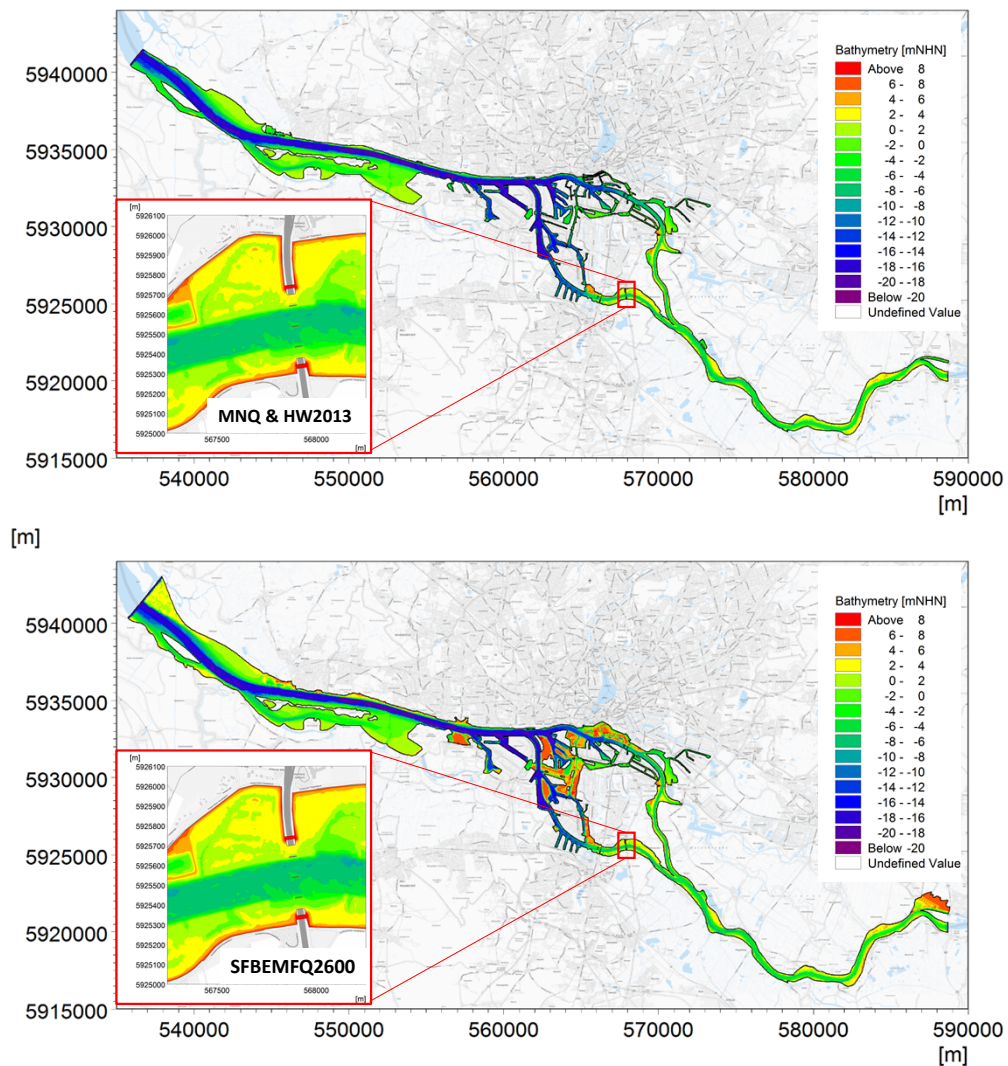


Abbildung 3.3: Räumliche Modellausdehnungen für die Modelle MNQ und HW2013 (oben) und Bemessungsturmflut (unten)

Während sich die Ausdehnung zwischen den hydrologischen Szenarien (Kap. 4.1) unterschied, war jedoch die Modellauflösung für alle Varianten identisch. Im benetzten Bereich des geplanten Bauwerks wurden das Modellgitter verfeinert und triangulare Elemente gewählt, um die alten und neuen Pfeilerstrukturen bestmöglich einzubinden. Die Größe der Elemente war dort mit maximal 70 m² am feinsten. In der Elbe wurden quadrangulare Elemente mit unterschiedlichen Elementweiten gewählt. Ober- und unterhalb der geplanten Brücke schlossen Elementgrößen von maximal 20 x 10 m an. Im Uferbereich der Elbe wurden triangulare Modellelemente gewählt (siehe Abbildung 3.4).

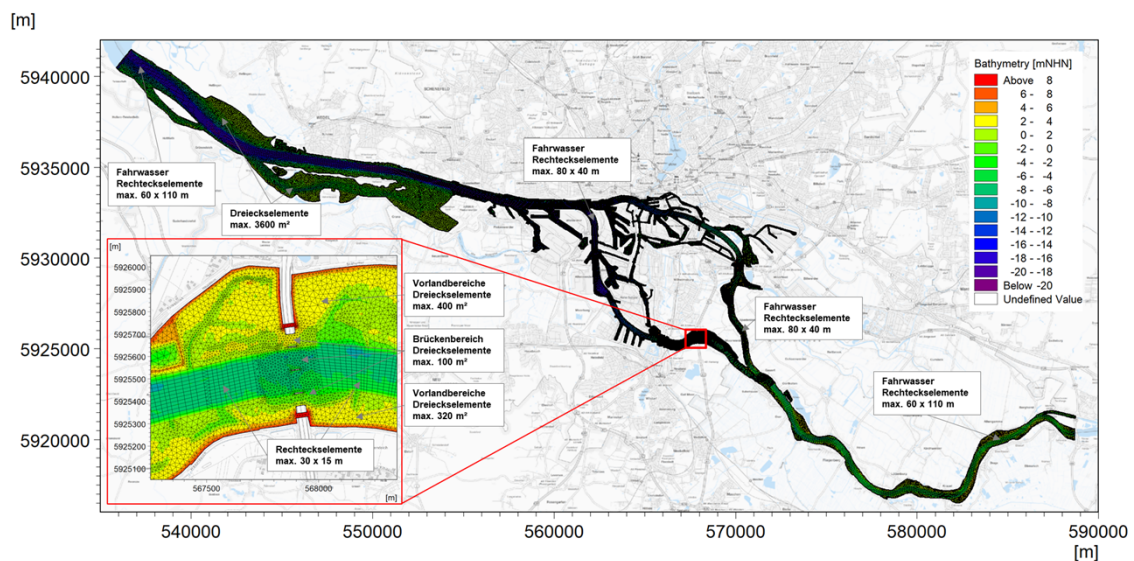


Abbildung 3.4: Modelldiskretisierung in der Elbe und im Bereich der Brücke

Die alten und neuen Pfeiler der Brücke wurden für die Bauzustände mit Spundwänden aus dem Modellgitter ausgestanzt. Diese Einbindung über ein Ausstanzen hat den Vorteil einer genauen Abbildung bei hoher räumlicher Auflösung des numerischen Modellgitters. Die Pfeiler sind zusätzlich direkt im Strömungsbild erkennbar.

Folgende Varianten wurden in den hydronumerischen 3D-Modellen erfasst:

- Istzustand: drei rechteckige Brückenpfeiler, Pfeilerenden halbkreisförmig ausgerundet sowie zwei Widerlager
- Bauzustand: drei bestehende Pfeiler und Widerlager des Istzustands sowie zusätzlich vier umspundete rechteckige Pfeiler über die volle Brückenbreite (Kap. 2.2) und zwei Widerlager.
- Endzustand: Vier rechteckige Brückenpfeiler, Pfeilerenden halbkreisförmig ausgerundet und zwei Widerlager.

Die Modellgitter der unterschiedlichen Zustände (Istzustand, Bauzustand & Endzustand) und die jeweilige Modellausdehnung im Brückenbereich sind in Abbildung 3.5 veranschaulicht.

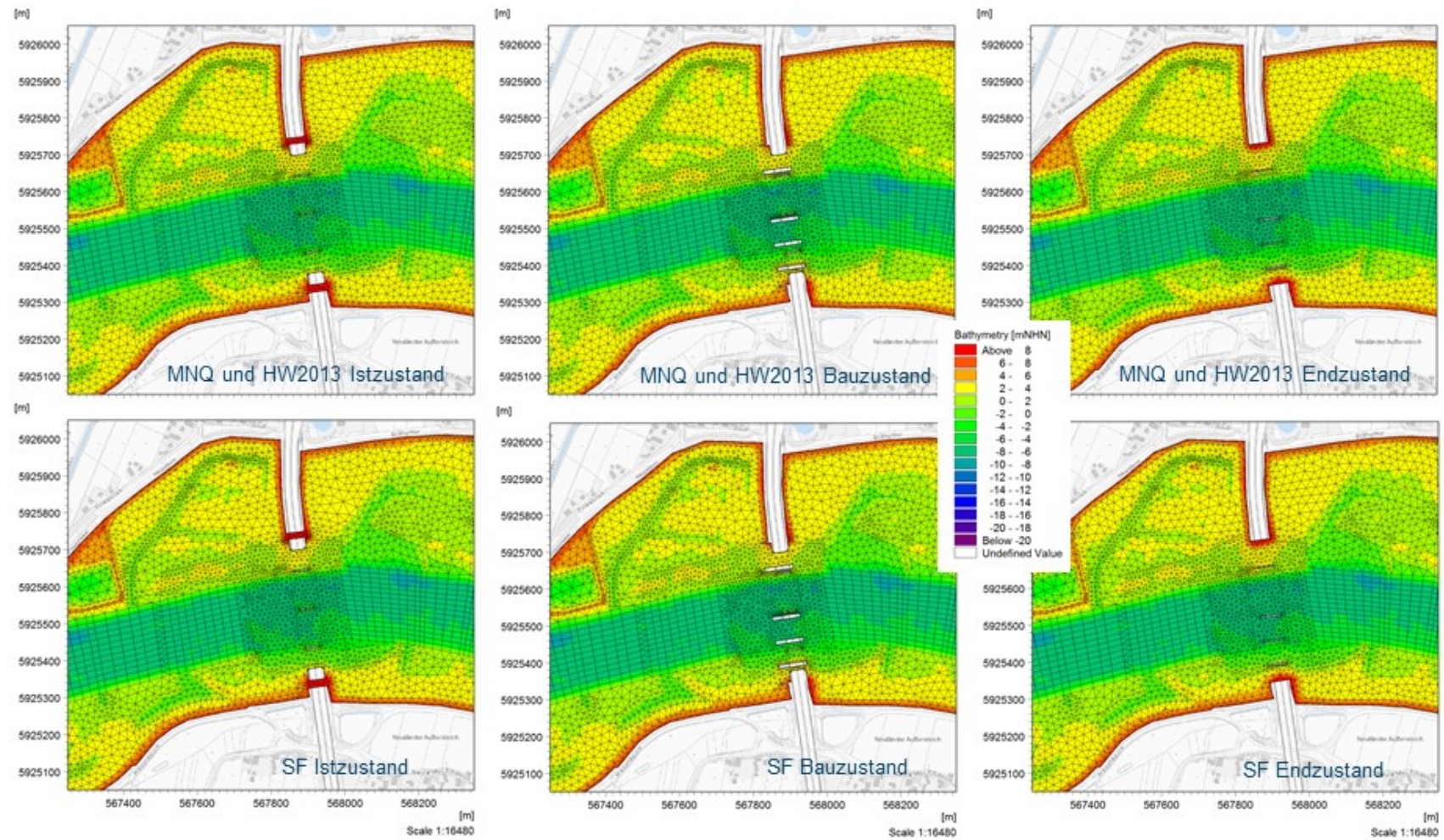


Abbildung 3.5: Vergleich der Modellgitter mit zugehöriger Bathymetrie im Bereich der A1-Brücke für die Modellzustände Ist-, Bau- und Endzustand mit den zugehörigen Brückenpfeilern

Die vertikale Auflösung wurde als Sigma-Schichten berücksichtigt (Abbildung 3.6). Es handelt sich hierbei um Schichten, die sich variabel dem Wasserstand und der Bathymetrie anpassen und untereinander den gleichen Abstand haben. Für die Elbe wurden zehn Schichten gewählt, die unter Berücksichtigung der freien Oberfläche dieselbe Mächtigkeit zueinander aufweisen.

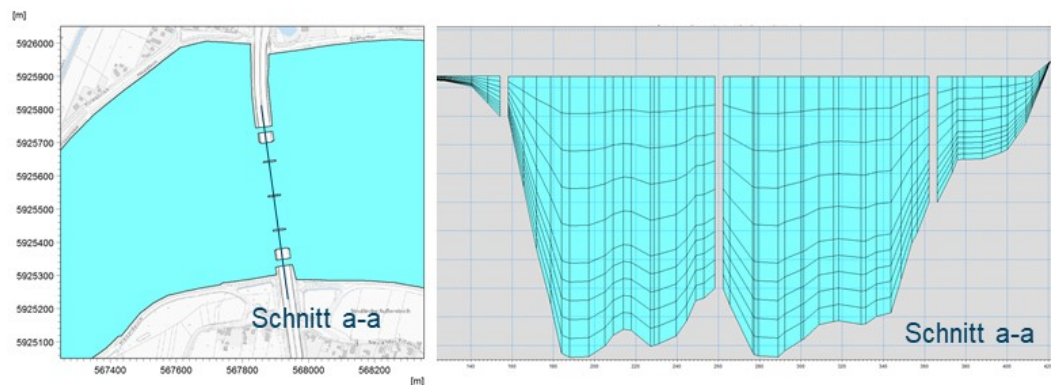


Abbildung 3.6: Vertikale Modellauflösung als Querschnitt durch die Elbe in der A1-Süderelbrücke

3.1.1 Berücksichtigung der Dalben im Modell

Südlich und nördlich der Brücke wurden 290 bestehende Dalben vorrangig am Nordufer bei den Berechnungen berücksichtigt (Abbildung 3.8). Die Dalben wurden im numerischen Modell über einen Sub-Grid Ansatz, dem sogenannten „Pier“ Modul in MIKE3 FM erfasst. Die Pfahlstrukturen werden dabei durch ihren hydraulischen Fließwiderstand beschrieben.

Durch den Ansatz kann vermieden werden, dass kleine Strukturen wie einzelne Pfähle direkt im Rechenetz einzeln aufgelöst werden müssen. Dieser Ansatz liefert außerhalb des direkten Umfelds der betrachteten Struktur naturnahe Ergebnisse des Strömungsgeschehens und verkürzt dabei die Rechenzeit der Strömungssimulationen erheblich. Hierbei wird der Anströmverlust infolge Staudruck der runden Pfähle berücksichtigt.

$$F = \frac{1}{2} \rho_w \cdot \gamma \cdot c_D \cdot A_e \cdot v^2 \quad (\text{Gl. 1})$$

mit:

F	Anströmverlust
ρ_w	Wasserdichte [kg/m³]
γ	Anströmfaktor [-]
c_D	Widerstandsbeiwert [-]
A_e	Anströmfläche [m²]
v	Strömungsgeschwindigkeit [m/s]

Bei diesem Ansatz fasst der Widerstandsbeiwert den Einfluss infolge Körperrauheit und Geometrie des Pfeilers zusammen, während der Anströmfaktor den Zusammenhang zwischen Pfeilerwiderstandsbeiwert und der Froudezahl wiedergibt. Der Gesamtbeiwert C_w aus Anströmfaktor und Widerstandsbeiwert variiert je nach Verbaugrad zwischen 1 und 1,5. Gemäß der zuvor aus dem Ausgangszustand bestimmten Kennwerte zur Froudezahl und der Form und benetzten Wassertiefe der Pfähle ergab sich ein nahezu

konstanter Widerstandsbeiwert von 1,02. Dieser wurde mit der genauen Lage des Pfahles im Element und dem zugehörigen Durchmesser (hier 0,9 m) überlagert und so der Anströmverlust berücksichtigt.

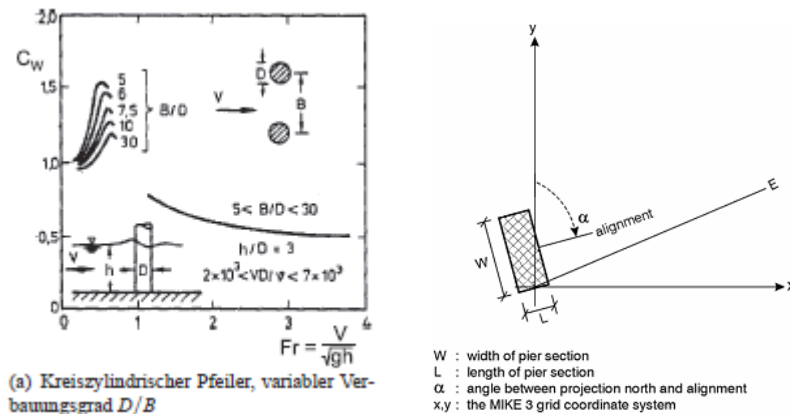


Abbildung 3.7: Einfluss der Froudezahl auf das Widerstandsverhalten C_w von Pfeilerbauten in Gerinneströmungen nach Naudascher (1992), Definitionsskizze (rechts) für den Einfluss der Anströmrichtung nach DHI (2014a)

Die Anzahl der Pfähle inkl. deren Durchmesser (hier ausschließlich runde Pfeiler) und Anströmverlust je Element wurde folglich entsprechend als zusätzlicher Verlust je Element mitberücksichtigt. Je dichter bzw. je größer die Pfähle, desto höher auch der Energieverlust infolge Anströmung. Miterfasst wurde in diesem Ansatz auch die großskalige Wirkung auf die Turbulenz durch den hier genutzten Mischwegansatz nach Smagorinsky. Der gewählte Pieransatz (z.B. BWK Merkblatt 1 (2009), Naudascher (1992)) ist ein herkömmliches Verfahren, um durch Pfeiler bedingte Verlusthöhen in Strömungen zu berücksichtigen.

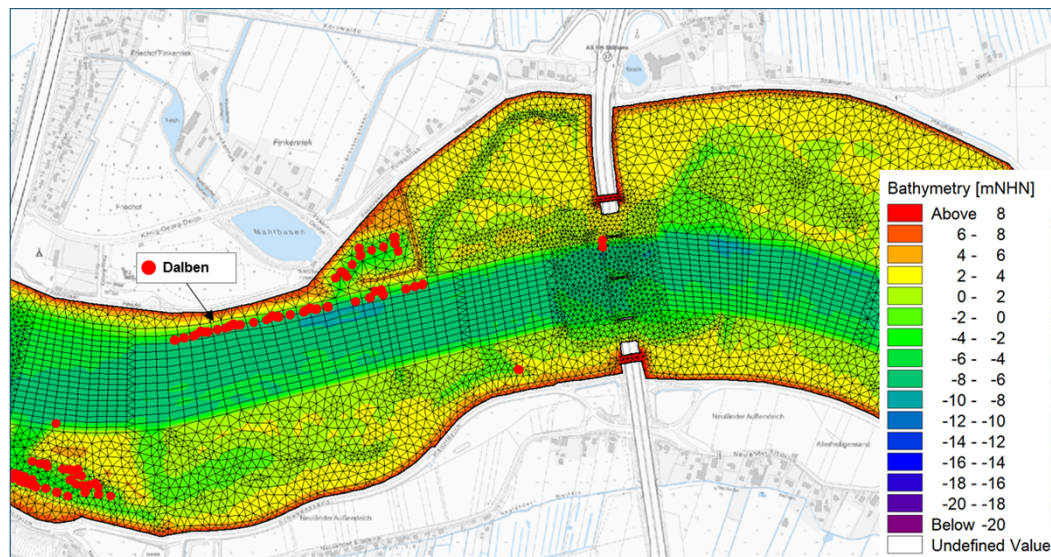


Abbildung 3.8: Ausschnitt zur Lage der Dalben (rote Punkte) im Modellgitter

Über den hier zugrunde liegenden Modellansatz (finite Volumen) können keine kleinskaligen 3D-Entwicklung von Turbulenzen oder Kolken im jeweiligen Strömungsschatten bzw. innerhalb des Pfahlrotes erfasst werden. Ebenso ist die Gruppenwirkung der Pfeiler nur im Hinblick auf eine sich einstellende Nachlaufströmung berücksichtigt. Auch über ein Ausstanzen der Pfeiler aus dem finite Volumen Modell können beide Phänomene nicht berücksichtigt werden.

Hierzu wäre ein Upgrade auf eine deutlich aufwendigere CFD-Simulation erforderlich, die jedoch vorrangig auf Basis einer Plausibilisierung mit physikalischen Modellversuchen empfohlen wird. Vergleichbare Untersuchungen (MIKE 3, CFD-Modelle und physikalische Versuche) wurden für die feste Fehmarnbeltquerung durchgeführt. Die Ergebnisse aus dieser einmaligen und sehr umfangreichen Kombination von Untersuchungen sind als Erfahrungswerte in diesem Gutachten in den Modellaufbau mit eingeflossen.

3.2 Modellsoftware zur Hydrodynamik (HD)

Die hydrodynamische Modellsoftware MIKE 3 FM HD für freie Oberflächengewässer basiert auf einem dreidimensionalen Ansatz mit einem vertikal inhomogenen Fluid. In der Vertikalen wird der Geschwindigkeits- und Dichtegradient in diskretisierter Form berücksichtigt, was auch die Betrachtung dichtegeschichteter Fluide erlaubt.

Für die Abbildung des Fließwiderstandes an der Sohle wird der empirische Ansatz der Nikuradse Rauheit k_n (mit einer äquivalenten Rauheitshöhe in [m]) genutzt. Die Wirbelviskositäten ν_t können als konstanter Wert, als zeitveränderliche Funktion der lokalen Gradienten der Strömungsgeschwindigkeiten (Ansatz nach Smagorinsky) oder als Ergebnis eines gemischten k - ϵ Modells (1D- k - ϵ -Modell in der Vertikalen) und des Smagorinsky-Ansatzes in der Horizontalen angegeben werden. In allen vorliegenden hydromorphologischen Untersuchungen wurde ein gemischten k - ϵ Modells in der Vertikalen und ein Smagorinsky-Ansatz in der Horizontalen genutzt.

Teil des hydrodynamischen Moduls ist auch die Erfassung des passiven Transportes von Temperatur und Salzgehalt auf Basis der dreidimensionalen Advektions-Diffusions-Gleichung. Beide Prozesse wurden in dieser Studie nicht mitberücksichtigt, da sie für die Zielstellung der Studie keine Relevanz haben.

Zur Berechnung der hydrodynamischen Prozesse für die Elbe wurden folgende Einflüsse berücksichtigt:

- Gezeitenströmungen
- Einfluss von Auftrieb und Schichtung auf Grund unterschiedlicher Dichten (hier nicht relevant)
- Turbulente Diffusion, Advektion und Dispersion
- Corioliskraft
- Überflutung und Trockenfallen
- Sohlrauheit nach Nikuradse (Modellparameter zur Kalibrierung)
- Turbulenz mit einem gemischten k - ϵ Modells im Vertikalen und einen Smagorinsky-Ansatz in der Horizontalen
- Wirkung von Wind

4 Modellzeiträume und Randwerte

Je nach Zielstellung der Untersuchung (z.B. Kolk oder Navigation) waren unterschiedliche Einwirkungen aus Tide und Abfluss am Brückenbauwerk maßgebend, welche im hydronumerischen Modell untersucht wurden. Um eine Bandbreite der unterschiedlichen Strömungsverhältnisse zu untersuchen, wurden drei relevante Ereignisse ausgewählt:

- eine mittlere Tide und ein mittlerer Abfluss zur Untersuchung der Strömungen, Wasserstände und der Wirkung auf die Morphologie und Unterwasserböschungen
- das Bemessungsturmflutszenario (z.B. SFBEMFQ2600 gemäß BAW, 2018) für die Kolkstudie, erosiven Einwirkung, die schadlose Eisabfuhr und Hochwasserabfuhr
- ein Binnenhochwasser für die Kolkstudie, schadlose Eisabfuhr und Hochwasserabfuhr, erosiven Einwirkung auf die Böschung

4.1 Hydrologische Randbedingungen

Für alle drei Ereignisse wurde ein gemessenes oder fest definiertes Bemessungsereignis (siehe Sturmflut) zu Grunde gelegt. Der Simulationszeitraum für mittlere Tideverhältnisse umfasste einen Nipp-Spring-Zyklus aus aktueller Datengrundlage (14.9.2017 bis 1.10.2017). Für das Hochwasserereignis wurde ein gemessenes Hochwasser aus dem Juni 2013 gewählt. Das Bemessungsturmflutszenario für die Stadt Hamburg basierte auf der Springtide des 03.01.1976 und bindet den modifizierten Windstau und einen Abfluss im Oberwasser von 2600 m³/s (BAW, 2018) ein. Wobei das Sturmflutmodell am oberen Rand nicht weiter in Richtung Bleckede ausgedehnt wurde und daher Wasserstände der BAW (Kap. 2.1) für den oberen und unteren Modellrand angesetzt wurden.

Die Ereignisse sind in Tabelle 4.1 mit den zugehörigen Zeiträumen, Randwerten und Auswertungen zusammengefasst.

Tabelle 4.1: Szenarien mit ihren Simulationszeiträumen, Randbedingungen und Auswertungen

Szenario	mittlere Tide und mittlerer Abfluss (MNQ)	Binnenhochwasser HW2013	Bemessungssturmflutszenario SFBEMFQ2600
Simulationszeitraum	18 Tage 14.9.2017 – 1.10.2017	24 Tage 4.6.2013 – 27.6.2013	4 Tage 1.1.1976 – 4.1.1976
Randbedingungen	Unterer Modellrand – Stadersand: gemessene Wasserstandsganglinie mit zeitlichem Versatz und Korrektur Oberer Modellrand – Neu Darchau: gemessene Abflussganglinie mit einer zeitlichen Verschiebung	Unterer Modellrand – Stadersand: gemessene Wasserstandsganglinie mit zeitlichem Versatz und Korrektur Oberer Modellrand – Neu Darchau: gemessene Abflussganglinie mit einer zeitlichen Verschiebung	Unterer Modellrand - Stadersand: Wasserstandsganglinie der BAW bei Stadersand Oberer Modellrand - Geestacht: Wasserstandsganglinie der BAW bei Geestacht
Auswertungen	Nautische Beurteilung, Erosionsbelastung der Böschung, Kolk, Eisabfuhr, Optimierung der Pfeilerausrichtung	Eis- und Hochwasserabfuhr, Kolk, Erosionsbelastung der Böschung, Optimierung der Pfeilerausrichtung	Eis- und Hochwasserabfuhr, Kolk, Erosionsbelastung der Böschung, Optimierung der Pfeilerausrichtung

Der Zufluss bei Geesthacht wurde über den Ansatz des Abflusses bei Neu Darchau und einer zeitlichen Verschiebung der Zuflussganglinie um einen Tag vorgenommen (MNQ und HQ in Abbildung 4.1). Dieses Vorgehen hat sich in zurückliegenden Projekten sowohl als realistische Annahme als auch zur Steigerung der Abbildungsqualität des Modells bewährt. Für die Untersuchung an der Autobahnbrücke wurde kein zusätzlicher Zufluss an der Dove Elbe berücksichtigt.

Am unterstromigen Modellrand bei Stadersand wurde der gemessene Wasserstand ebenfalls mit einem zeitlichen Versatz von plus 3 Minuten aufgebracht. Zusätzlich zu dem zeitlichen Versatz wurde der auf den Modellrand aufgebrachte Wasserstand durch einen Faktor von 1,032 erhöht (MNQ und HQ in Abbildung 4.1). Die Ermittlung dieser Werte erfolgte auf Basis einer Multipegel-Korrelation und wurde ebenfalls in Projekten für die HPA entwickelt. Die Werte führten dort zu einer Verbesserung der Modellgüte und wurden daher fortgeführt.

Diese Anpassungen und zeitlichen Verschiebungen erfolgten nicht für die Bemessungsturmflutwasserstände der BAW (Abbildung 4.1), die bereits aus einem Modellauf der BAW genau an der benannten Stelle stammten.

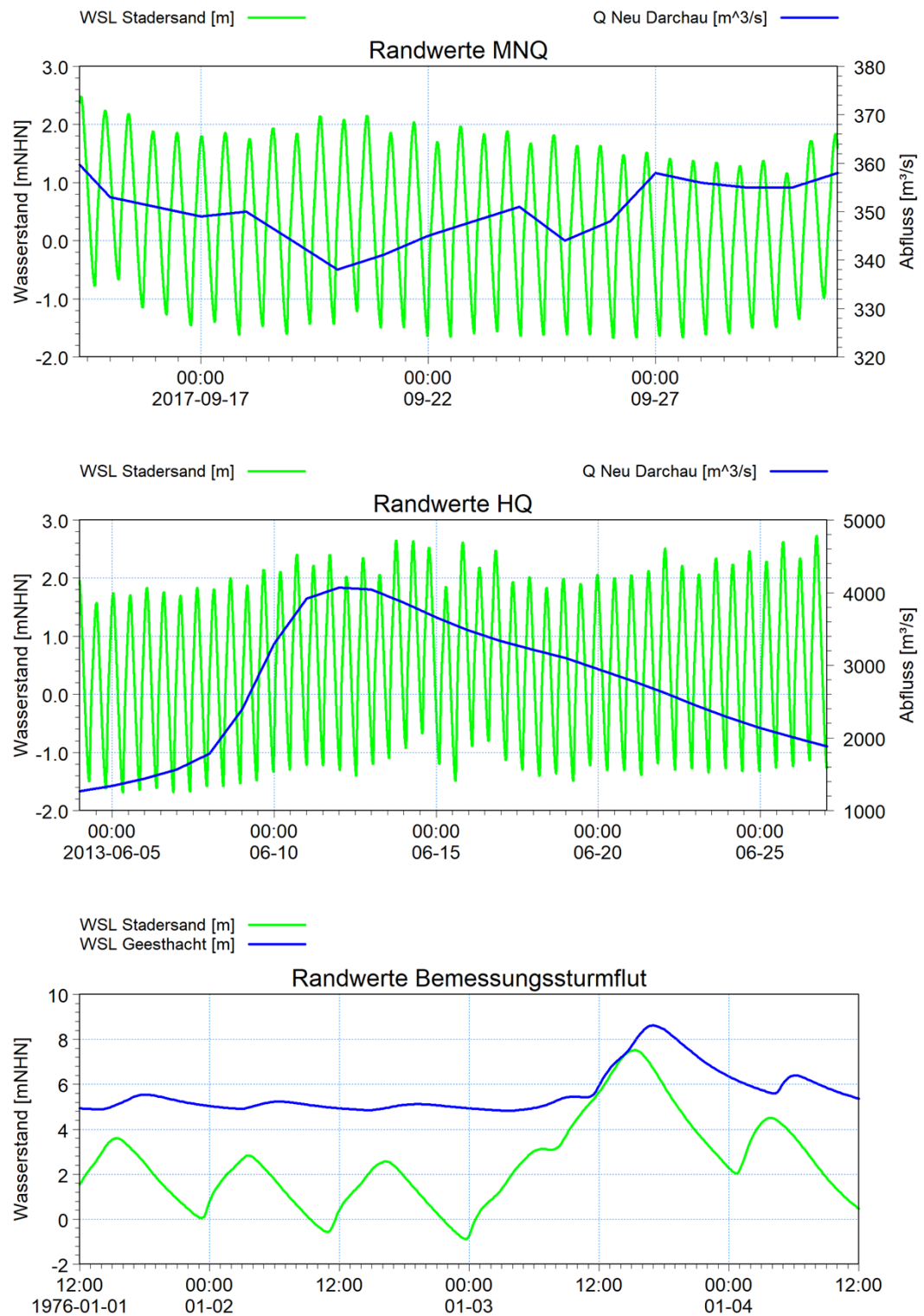


Abbildung 4.1: Wasserstands- und Abfluss-Randbedingungen für MNQ (oben), HQ (Mitte) und die Bemessungssturmflut (unten).

4.2 Temperatur & Salzgehalt

Änderungen der Wassertemperaturen waren für die vorliegende Untersuchung ohne Bedeutung, da sie zu keiner signifikanten Änderung der Wasserdichte führten. Ein Austausch mit der Atmosphäre wurde daher nicht im Modell berücksichtigt. Da auch keine anderen temperaturändernden Faktoren im Untersuchungsgebiet bekannt waren, konnte somit auf die Berücksichtigung der Wassertemperatur im Modell vollständig verzichtet werden.

Der Salzgehalt spielt in diesem Bereich der Elbe keine Rolle und liegt bei konstant 0,05 PSU.

4.3 Wind

Für das Sturmflutszenario wurde in Anlehnung an die BAW (2018) ein flächiges, aber räumlich konstantes Windfeld bei St. Pauli berücksichtigt. Abbildung 4.2 zeigt die Windparameter, die für das Sturmflut-Gutachten der BAW (2018) verwendet wurden.

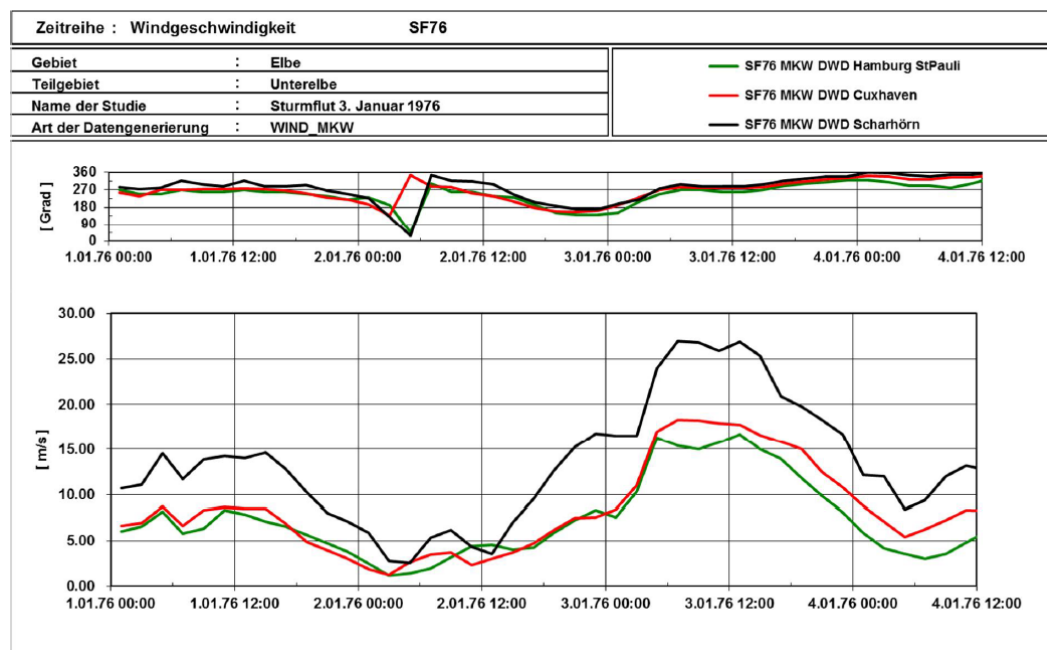


Abbildung 4.2: Zeitliche Entwicklung der Windgeschwindigkeit (unten) und -richtung (oben) über der Elbe bei Scharhörn (schwarz), Cuxhaven (rot) und Hamburg St.Pauli (grün) während der Sturmflut 3. Januar 1976, von der BAW verwendet für die Sturmflutszenarien SFREFQ2600 und SFBEMQ2600 modelliert vom DAD mit MKW, entnommen aus BAW (2018)

Abbildung 4.3 zeigt den zeitlichen Verlauf der Parameter, die in die Sturmflutmodellierung der vorliegenden Untersuchung eingehen.

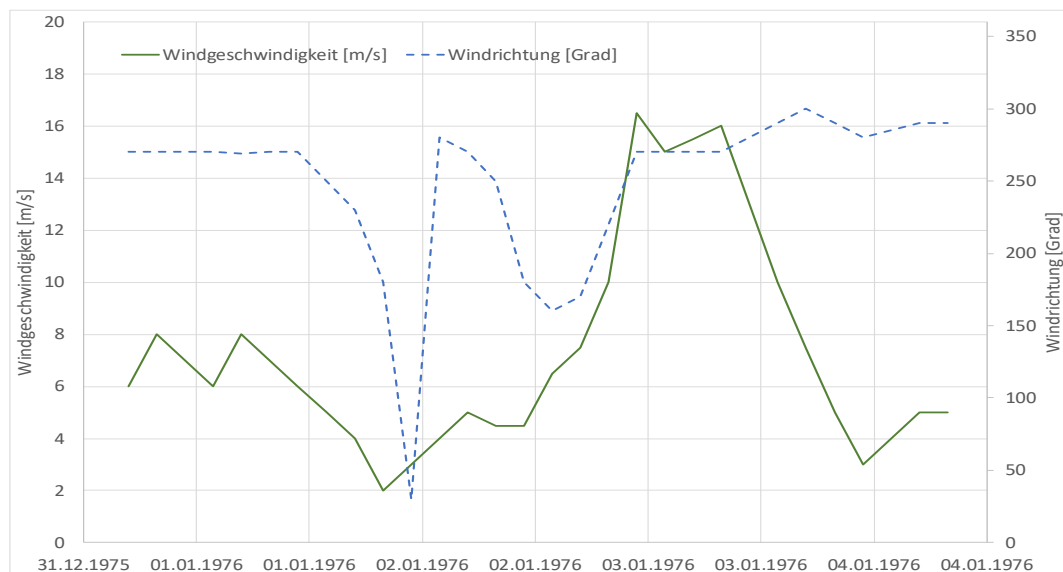


Abbildung 4.3: Windgeschwindigkeit und -richtung für das Sturmflutmodell zur Untersuchung der Süderelbbrücke

4.4 Sohlrauheiten und Turbulenz

Die Modellparameter Sohlrauheit und Turbulenz sind empirische Modellparameter und dienen zur Kalibrierung der Modellgüte (Kap. 5). Hierzu werden die Parameter in physikalisch sinnvollen Bereichen variiert, um die Modellgenauigkeit zu verbessern und eine möglichst optimale Übereinstimmung zwischen Messungen und Simulation zu erreichen.

Die Sohlrauheit k_n wurde nach dem Fließgesetz von Nikuradse abgebildet. Die hydrodynamischen Verhältnisse im Modell reagierten in geringem Maße (z.B. Änderung der Wasserstände im Zentimeterbereich) sensitiv auf Änderungen der Rauheit der Sohle sowie Änderungen der Turbulenzparameter. Ausgehend von den in DHI WASY (2020) kalibrierten Rauheiten der Tideelbe, wurde insbesondere der Bereich der Süderelbe bis Geesthacht für die jeweiligen Ereignisse nachkalibriert. In Abbildung 4.4 sind die final kalibrierten Rauheiten gezeigt.

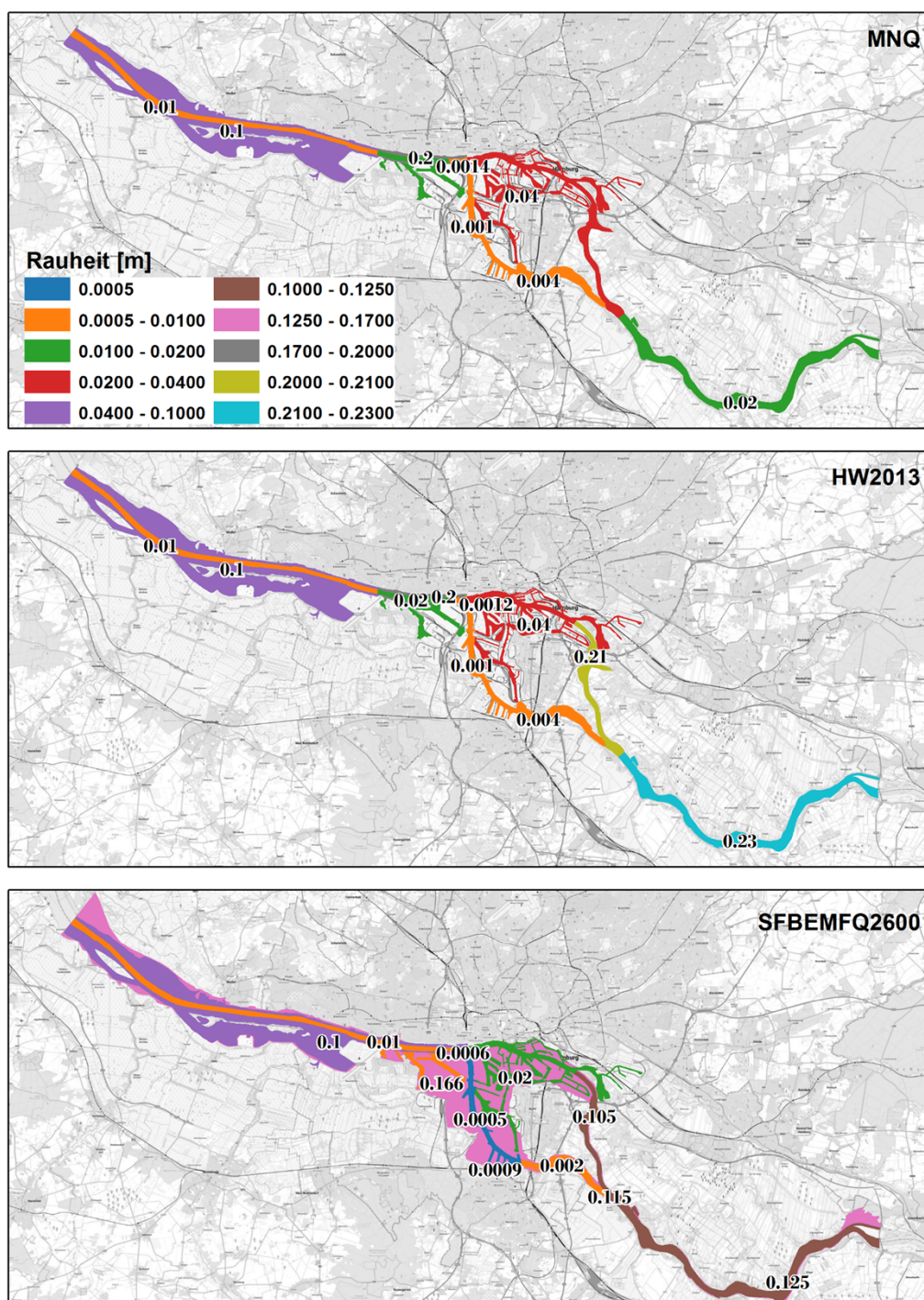


Abbildung 4.4: Karten der Sohlrauheiten für die betrachteten Szenarien MNQ (oben), HW2013 (Mitte) und SFBEMFQ2600 (unten).

In allen hydrodynamischen Untersuchungen wurde ein gemischtes $k-\epsilon$ Turbulenzmodell in der Vertikalen und ein Smagorinsky-Ansatz in der Horizontalen genutzt. Für die Turbulenzparameter sind die Einstellungen der Koeffizienten in der Horizontalen und in der Vertikalen zu differenzieren. In der Ebene wurde ein Mischweglängenansatz nach Smagorinsky (1963) genutzt, der unter anderem die Gradienten der Fließgeschwindigkeiten in der Ebene, die Elementgröße und einen konstanten Faktor (Smagorinsky-Faktor) verknüpft. Dieser Faktor liegt laut Literatur zwischen ca. 0,07 (Piomelli et al., 1987) und 0,28 (voreingestellter Wert in der Software MIKE). Für das MNQ sowie das HW2013 Szenario sind die angesetzten Smagorinsky-Faktoren für das Modellgebiet in Abbildung 4.5 aufgezeigt. Dabei unterscheiden sich die angesetzten Smagorinsky-Faktoren für das HW2013 anhand höher definierter Beiwerte für die Nordereibe im Bereich der Billwerder Bucht bis Bunthaus sowie ebenfalls erhöhte Werte in der oberen Elbe von Bunthaus bis Geesthacht. Für die Bemessungssturmflut wurde der Smagorinsky-Faktor konstant zu 0,28 angesetzt.

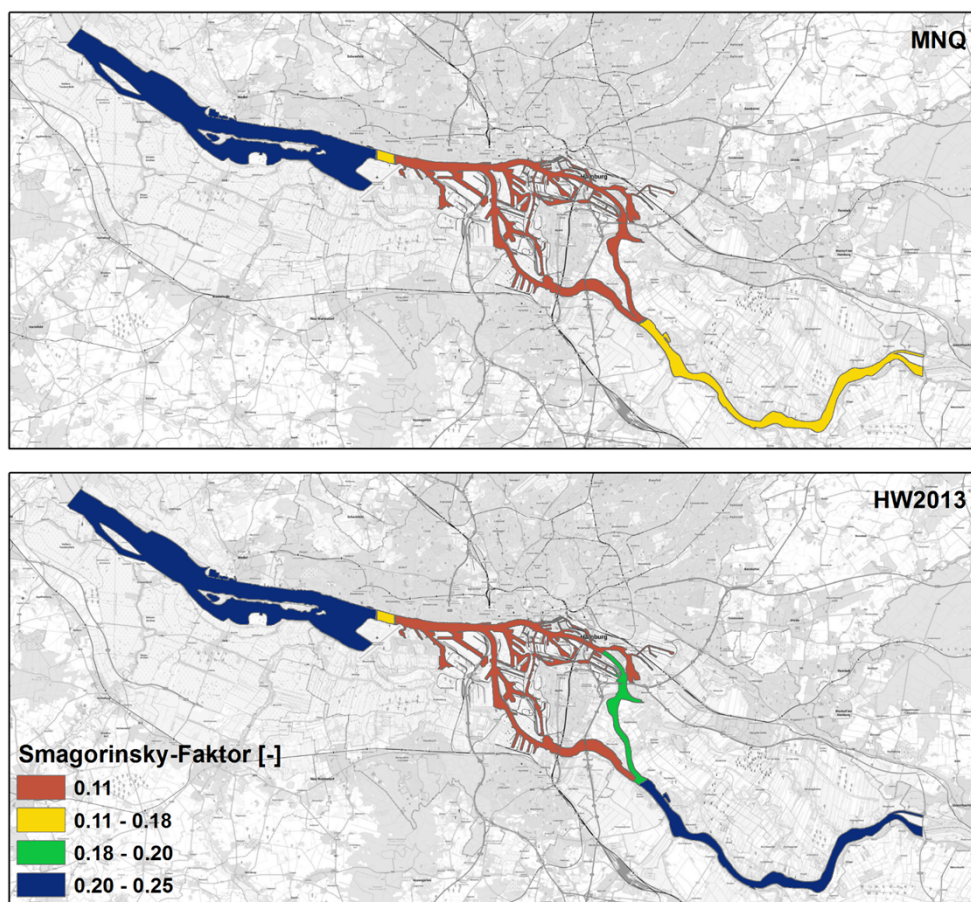


Abbildung 4.5: Karten der Smagorinsky-Faktoren für MNQ (oben) und HW2013 (unten)

Die Einstellung für die vertikalen Turbulenzparameter für das verwendete $k-\epsilon$ Turbulenzmodell ist in Tabelle 4.2 dokumentiert. Die hier gewählten Einstellungen wurden, nach festgestellter Kalibrierungsgüte, aus den hydromorphologischen DHI-Studien in der Elbe und Este übernommen.

Tabelle 4.2: Vertikale und horizontale Wirbelkoeffizienten ν_t des k- ϵ Modells.

Parameter im k- ϵ Modell	n_t [-]
Dispersionsparameter für die turbulente kinetische Energie – horizontale Prandtl Zahl	0,8
Dispersionsparameter für die turbulente kinetische Energie – vertikale Prandtl Zahl	0,8
Dispersionsparameter für die Dissipation der turbulenten kinetischen Energie – horizontale Prandtl Zahl	1,1
Dispersionsparameter für die Dissipation der turbulenten kinetischen Energie – vertikale Prandtl Zahl	0,9
Grenzwerte der turbulenten kinetischen Energie - Untergrenze und Obergrenze [m^2/s^2]	10^{-7} bis 10^{10}
Grenzwerte der Dissipation der turbulenten kinetischen Energie - Untergrenze und Obergrenze [m^2/s^3]	5×10^{-10} bis 10^{10}
Empirische Konstanten im k- ϵ Modell gemäß Rodi (1980) mit:	
c1e	1,44
c2e	1,92
c3e	0
Prandtlzahl	0,9
cmy	0,09

5 Nachweis der Modellgüte

Zur Ableitung robuste Aussagen im Strömungsgutachten, werden die hydrodynamischen Modelle für drei definierten Szenarien MNQ, HW2013 und die Bemessungsturmflut (Tabelle 4.1) für den Istzustand nachkalibriert. Die dazu verwendeten Datengrundlagen und berücksichtigten Gütekriterien zur Verifizierung der Modellgüte sowie die dabei erzielten Ergebnisse sind nachfolgend aufgeführt.

5.1 Datengrundlage und angewandte Gütekriterien

Die Modellgüte wurde für einen Kalibrierungszeitraum über zwei Tidephase des jeweiligen Simulationszeitraums (siehe Tabelle 4.1) ausgewertet. Im Rahmen der Kalibrierung wurden jeweils gemessene Wasserstände und Strömungen in der Elbe im Bereich von Neu Darchau bis Stadersand bzw. bis Geesthacht (Sturmflut) den simulierten Größen gegenübergestellt.

Die drei untersuchten Szenarien unterscheiden sich dahingehend, dass den Szenarien MNQ und HW2013 reale Ereignisse zugrunde liegen und gemessene Wasserstände zur Kalibrierung berücksichtigt wurden. Die Bemessungsturmflut ist demgegenüber ein synthetisches Ereignis basierend auf Randwerten der BAW (2018). Hier erfolgt der Abgleich des vorliegenden Modells mit den Ergebnissen der BAW-Simulation. Für die Kalibrierung sind die in Tabelle 5.1 gelisteten Pegel für die jeweiligen Szenarien verwendet worden.

Tabelle 5.1: Verwendete Pegel zur Modellkalibrierung der Szenarien MNQ, HW2013 und Bemessungsturmflut SFBEMFQ2600 für den Istzustand.

Pegel	MNQ	HW2013	Sturmflut SFBEMFQ2600
Schulau			X
Blankenese	X		
Seemannshöft	X		
St. Pauli	X		X
Harburg	X		
Schöpfstelle	X		
Bunthaus	X		X

Die Kalibrierungsergebnisse werden diskutiert und ggf. auftretende Abweichungen interpretiert.

Die Analyse der Kalibrierungsgüte wurde durch eine statistische Auswertung der Differenz zwischen der observierten Messung OBS und der Simulation SIM gestützt, in der die Parameter mittlere Abweichung, mittlere absolute und mittlere quadratische Abweichung, die Standardabweichung der Differenzen und der Korrelationskoeffizient ausgewertet wurden.

Diese Parameter werden über folgende Gleichungen beschrieben:

$$ME = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (OBS_i - SIM_i) = \overline{OBS} - \overline{SIM} \quad \text{Gl. 1}$$

$$MAE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |OBS_i - SIM_i| \quad \text{Gl. 2}$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (OBS_i - SIM_i)^2} \quad \text{Gl. 3}$$

$$STD = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (OBS_i - SIM_i - (\overline{OBS} - \overline{SIM}))^2} \quad \text{Gl. 4}$$

$$R^2 = \frac{\left[\sum_{i=1}^N (OBS_i - \overline{OBS})(SIM_i - \overline{SIM}) \right]^2}{\sum_{i=1}^N (OBS_i - \overline{OBS})^2 \sum_{i=1}^N (SIM_i - \overline{SIM})^2} \quad \text{Gl. 5}$$

wobei ME die mittlere Abweichung, MAE die mittlere absolute Abweichung, RMSE die mittlere quadratische Abweichung, STD die Standardabweichung der Differenzen und R der Korrelationskoeffizient ist. OBS steht für die observierten gemessenen Werte und SIM für die simulierten Werte. N ist die Anzahl der Werte der Zeitreihe.

Idealerweise, bei optimaler Übereinstimmung zwischen simulierten und gemessenen Werten, liegen die Kennwerte der Abweichungen (ME, MAE, RMSE und STD) bei Null und der Korrelationskoeffizient bei 1. Fällt die Abweichung ME negativ aus, überschätzt die Simulation den Messwert, fällt die Abweichung ME positiv aus, unterschätzt die Simulation den Messwert.

5.2 Mittlere Tide und mittlerer Abfluss (MNQ)

Das Modell wurde für mittleren Tiden und einem gemessenen Abfluss von ca. 350 m³/s bei Neu Darchau, was ca. einem MNQ entspricht, an den Pegeln Seemannshöft, St. Pauli, Schöpfstelle, Bunthaus, Blankenese und Harburg kalibriert. Abbildung 5.1 zeigt die gemessenen und simulierten Tidewasserstände an den Stationen entlang der Elbe. Hierin ist eine gute Übereinstimmung der gemessenen und simulierten Tiden sowohl in den Amplituden als auch in den Phasen zu erkennen. Abweichungen an den Scheitelwerten liegen im Bereich weniger Zentimeter und erreichen im Bereich des Tidefalls und Tideanstiegs vor bzw. nach dem Tideniedrigwasser maximale Abweichungen von ca. 20 cm (Abbildung 5.1). Diese Abweichungen sind vorrangig auf einen leichten zeitlichen Versatz zwischen den numerisch modellierten Wasserständen und den gemessenen Wasserständen rund um das Tnw zurückzuführen.

In Tabelle 5.2 sind die statistischen Parameter aus der Differenz zwischen gemessenen und simulierten Wasserständen für die untersuchten Pegel aufgelistet. Die Abweichungen lagen bei allen untersuchten Pegeln im ähnlichen Bereich. Der Pegel Blankenese zeigte die geringsten, der Pegel Bunthaus die größten Abweichungen. Im Mittel blieben alle Abweichungen unter 10 cm.

Der Pegel Harburg liegt der Süderelbbrücke am nächsten und gibt dort die lokale Modellgüte am besten wieder. Am Pegel Harburg lagen die mittleren Abweichungen bei 5 cm (Tabelle 5.2). Die maximalen Abweichungen wurden bei Tidestieg kurz nach dem Tnw erzielt und begründen sich in einem leichten zeitlichen Versatz von ca. 10 min, der zu temporären Abweichungen von 20 cm führt. Daher wurde die Modellgüte als gut eingestuft.

Tabelle 5.2: Statistische Parameter der Differenzen aus gemessenen und simulierten Wasserständen für die untersuchten Pegel im Szenario MNQ

Ereignis	MNQ					
Pegel	Blankenes e	Seemanns- höft	St. Pauli	Schöpf- stelle	Har- burg	Bunt- haus
mittlere Differenz [m]	-0,03	-0,05	-0,07	-0,01	-0,05	0,02
mittlere absolute Abweichung [m]	0,04	0,06	0,07	0,07	0,06	0,09
mittlere quadratische Abweichung [m]	0,04	0,07	0,08	0,08	0,07	0,11
Standardabweichung [m]	0,03	0,04	0,05	0,08	0,05	0,11
Bestimmtheitsmaß [-]	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
Effizienz Koeffizient [-]	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	0,99
Übereinstimmungsmaß [-]	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00

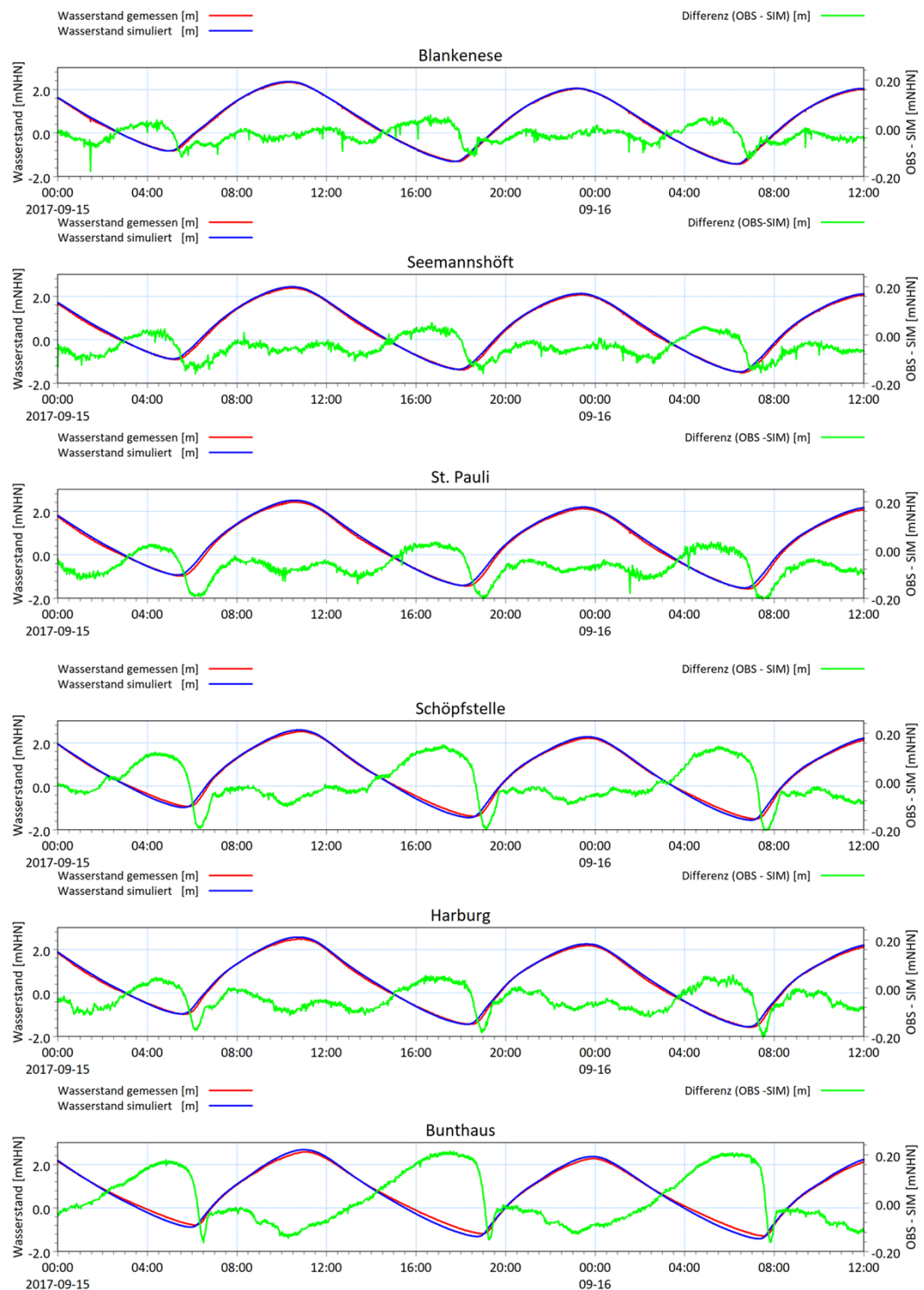


Abbildung 5.1: Gegenüberstellung von gemessenen und simulierten Wasserständen (linke Y-Achse) sowie die daraus resultierende Differenz (linke Y-Achse) für das MNQ-Szenario.

5.3 Hochwasserereignis HW2013

Das Modell wurde für ein Hochwasserereignis aus dem Juni 2013 mit einem Scheitelabfluss von 4071 m³/s bei Neu Darchau jeweils an den Pegeln Seemannshöft, St. Pauli, Schöpfstelle und Bunthaus kalibriert. Abbildung 5.2 zeigt die gemessenen und simulierten Tidewasserstände an den Stationen entlang der Elbe.

In der Hochwassersimulation HW2013 wurde bereits in DHI WASY (2020) das Tnw an den Pegeln Schöpfstelle und Bunthaus vom Modell unterschätzt. Auch unter der Nachkalibrierung für die Süderelbe bleibt die mittlere Unterschätzung von ca. 20 cm erhalten. Die Tidehochwasser am Pegel Schöpfstelle und auch die Wasserstände an den umliegenden Pegel stimmten sehr gut überein und wichen nur wenige Zentimeter (ca. 2 bis -5 cm) von den Messungen ab. Am Pegel Bunthaus lagen die mittlere Abweichung bei Tnw bei einer Unterschätzung von bis zu -9 cm.

Der Pegel Harburg liegt der Süderelbbrücke am nächsten und gibt dort die lokale Modellgüte am besten wieder. Die Abweichung am Pegel Harburg liegt im Mittel bei Null (Tabelle 5.3). Aus dem Vergleich über die Zeitreihen zeigen sich jedoch temporär Abweichungen von ca. ±15 cm im Bereich des Tidefalls und des Tidesiegs rundum das Tnw, was auf einen leichten zeitlichen Versatz des Tnws zurückzuführen ist.

Die Modellgüte wurde durch die höheren Abweichungen am Pegel Schöpfstelle bei Tnw als mäßig und für den Pegel Schöpfstelle bei Thw und alle anderen Bereiche als gut eingestuft.

In Tabelle 5.3 sind die statistischen Parameter aus den Differenzen zwischen gemessenen und simulierten Wasserständen für die Pegel aufgelistet. Die größten Abweichungen lagen am Pegel Schöpfstelle. Ursächlich für die großen und lokal begrenzten Abweichungen könnte auch eine Versandung des Pegels im Hochwasserfall sein. Hierzu lagen aber keine bestätigenden Kenntnisse vor.

Tabelle 5.3: Statistische Parameter der Differenzen aus gemessenen und simulierten Wasserständen für die untersuchten Pegel im Szenario HW2013

Ereignis	HW2013					
Pegel	Blanke- nese	Seemanns- höft	St. Pauli	Schöpf- stelle	Har- burg	Bunt- haus
mittlere Differenz [m]	0,00	0,02	-0,01	0,18	0,00	-0,06
mittlere absolute Abweichung [m]	0,06	0,08	0,08	0,19	0,06	0,09
mittlere quadratische Abweichung [m]	0,07	0,09	0,09	0,26	0,07	0,12
Standardabweichung [m]	0,07	0,09	0,09	0,19	0,07	0,10
Bestimmtheitsmaß [-]	1,00	1,00	1,00	0,99	1,00	1,00
Effizienz Koeffizient [-]	1,00	1,00	0,99	0,95	1,00	0,96
Übereinstimmungsmaß [-]	1,00	1,00	1,00	0,99	1,00	0,99

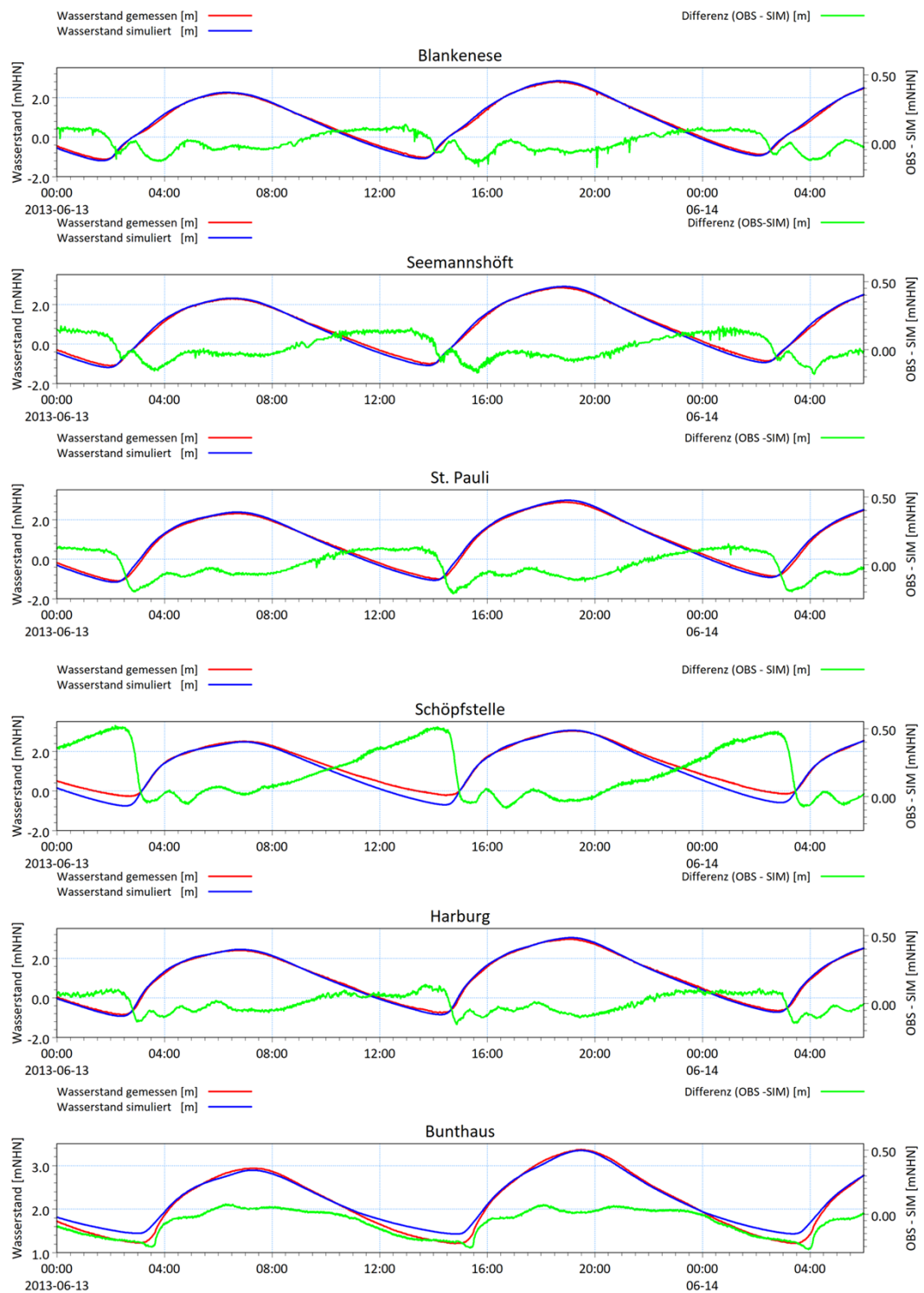


Abbildung 5.2: Gegenüberstellung von gemessenen und simulierten Wasserständen (linke Y-Achse) sowie die daraus resultierende Differenz (linke Y-Achse) für das HQ-Szenario.

5.4 Bemessungssturmflut SFBEMFQ2600

Für die Bemessungssturmflut SFBEMFQ2600 wurden die simulierten Ergebnisse zur Bemessungssturmflut der BAW (2018) an den Pegeln Schulau, St.Pauli sowie Bunthaus herangezogen und den hier simulierten Wasserständen gegenübergestellt. Abbildung 5.3 zeigt die simulierten Tidewasserstände der BAW („gemessen“) und von DHI an den Stationen Schulau, St.Pauli und Bunthaus entlang der Elbe. Die Kalibrierung des Sturmflutszenarios ergab eine gute Übereinstimmung der Dynamik.

Durch eine Nachkalibrierung über den Windstaufaktor konnte eine leichte Verbesserung der Modellqualität gegenüber der in DHI WASY (2020) erzielt werden. Der Sturmflutscheitel wird im numerischen Modell um -5 bis -7 cm im Abgleich mit den Modelldaten der BAW unterschätzt.

Da die Modelldaten der BAW gleichzeitig die Basis des DHI-Modells in Form von Randwerten bilden, sind die Abweichungen entweder auf einen stärkeren Windstau im Modell der BAW, dass sich großräumig von der Deutschen Bucht bis ins Oberwasser von Geesthacht zog, oder abweichende Rauheiten zurückzuführen. Bedingt durch die sehr großen Wassertiefen von über 20 m wird der Wirkung der Sohlrauheit nur ein marginales Gewicht in der Ausformung der Wassertiefen einnehmen. Der Einfluss des Windstaus über die breite und lange Wasserfläche von der Nordsee bis Geesthacht ist jedoch nicht zu vernachlässigen und wurde vermutlich in dem hier verwendeten kleinen lokalen Modell unterschätzt.

In Tabelle 5.4 sind die statistischen Parameter der Differenzen zwischen gemessenen und simulierten Wasserständen für ausgewählte Pegel aufgelistet. Die größten Abweichungen lagen am Pegel Bunthaus, also dem flussaufwärtigsten Pegel im Modell, was die Theorie des unterschätzten Windstaus im Modell bekräftigt.

Tabelle 5.4: Statistische Parameter der Differenzen aus simulierten Wasserständen der BAW (2018) und simulierten Wasserständen von DHI für die untersuchten Pegel im Sturmflutszenario

Ereignis	SFBEMFQ2600		
	Schulau	St. Pauli	Bunthaus
mittlere Differenz [m]	0,05	0,05	0,03
mittlere absolute Abweichung [m]	0,06	0,08	0,08
mittlere quadratische Abweichung [m]	0,08	0,10	0,11
Standardabweichung [m]	0,06	0,09	0,10
Bestimmtheitsmaß [-]	1,00	1,00	1,00
Effizienz Koeffizient [-]	1,00	1,00	1,00
Übereinstimmungsmaß [-]	1,00	1,00	1,00

Die Modellgüte der Bemessungssturmflut-Wasserstände wurde als gut bewertet. Für Nachweise, in denen die Bemessungswasserstände anzusetzen sind, wird unabhängig von der hier erzielt Modellgüte immer die Nutzung des amtlichen Bemessungswasserstandes aus Tabelle 2.2 empfohlen. In den Untersuchungen der Strömungen, der Kolkbildung und der Sohl Schubspannung zeigte sich im Weiteren (Kap.6), dass der Scheitel der Bemessungssturmflut wenig Relevanz für die Belastung

der Sohle, der Böschungen und des Bauwerks aus hydraulischer Sicht hat. Daher wurde die Abweichung im Scheitel bei den weiteren Analysen und Auswertungen als wenig kritisch eingestuft.

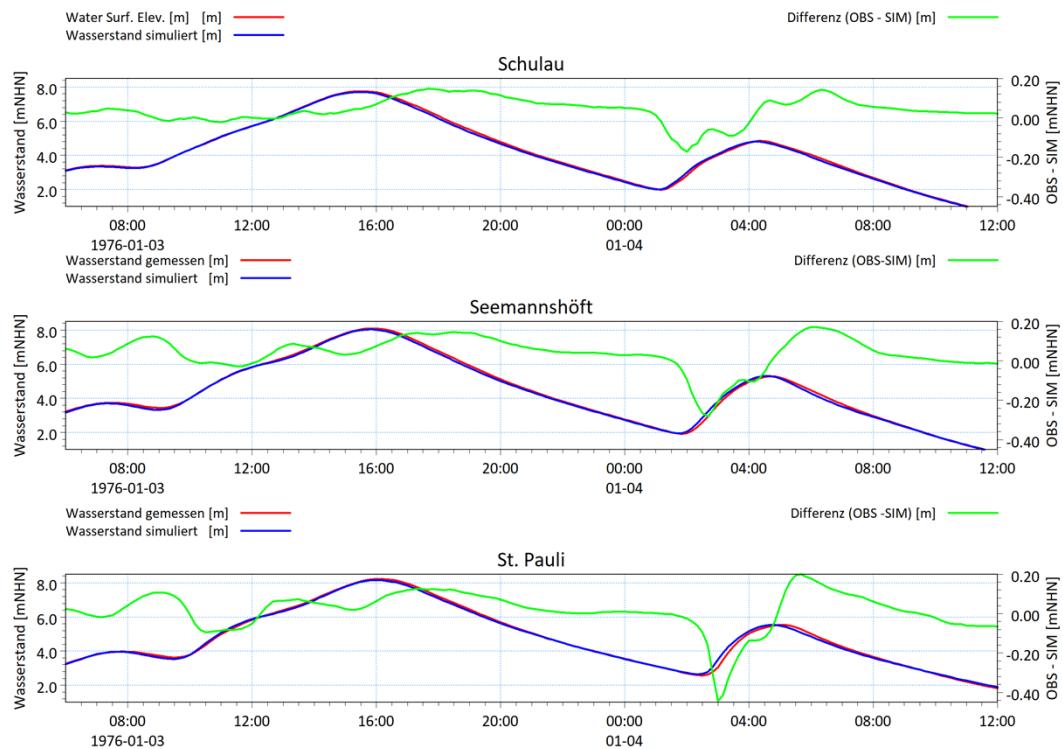


Abbildung 5.3: Gegenüberstellung gemessener mit simulierten Wasserständen (linke Y-Achse) sowie die daraus resultierende Differenz (linke Y-Achse) für das SF-Szenario.

Abbildung 5.4 zeigt einen Vergleich der Modellergebnisse in der Fläche aus dem Sturmflutmodell der BAW (2018) und den numerischen Modellierungen für das vorliegende Gutachten. Darin ist die Unterschätzung des Wasserstandes seitens DHI mit ca. -5 bis -7 cm erkennbar.

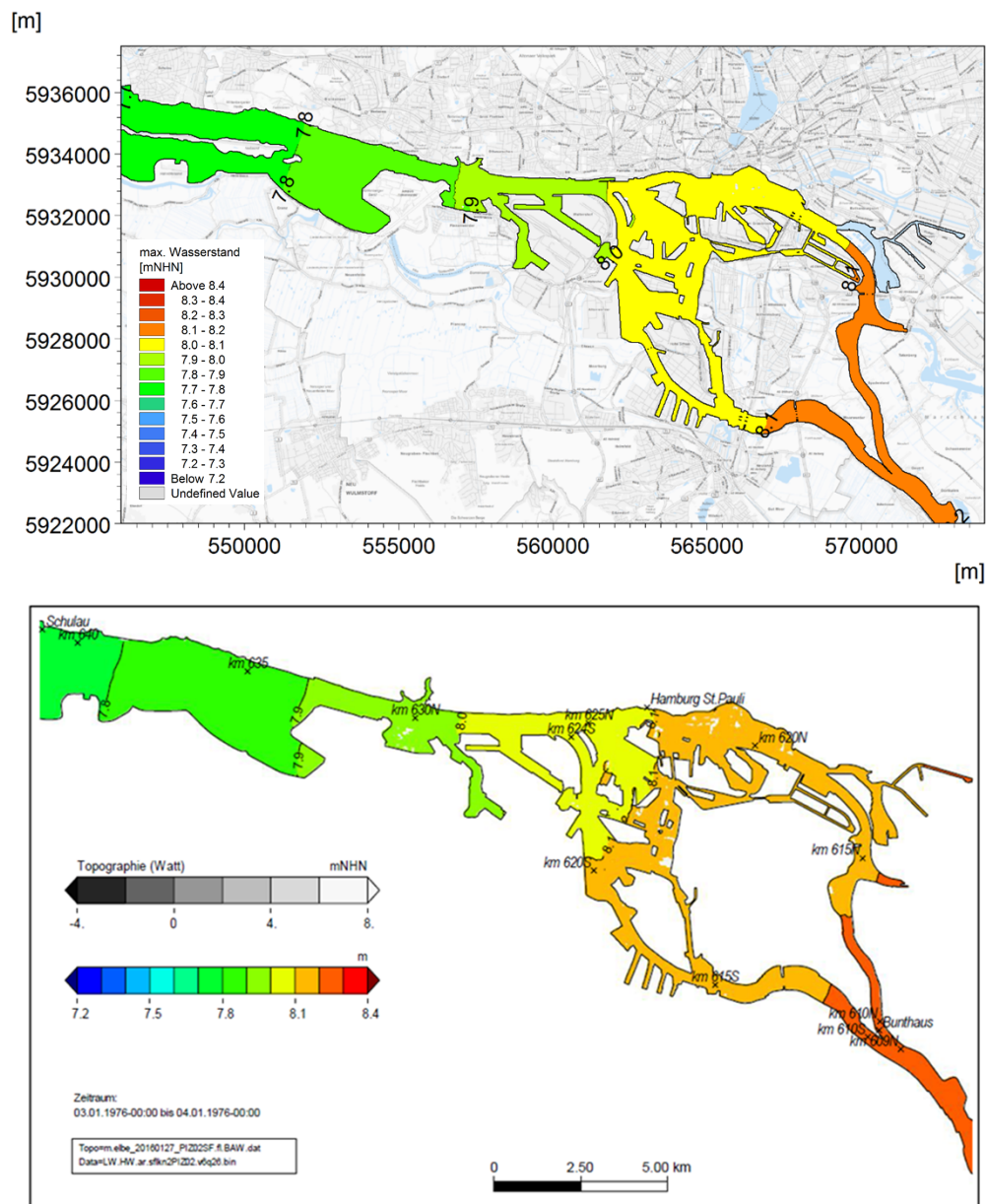


Abbildung 5.4: Vergleich der Modellergebnisse DHI (oben) vs. BAW (2018, unten) im Bereich Hamburger Hafen zum Sturmflutscheitelwasserstand der SFBEMQ2600 im Teilgebiet Hamburg zwischen Schulau und Bunthaus.

5.5 Fazit zur Modellgenauigkeit

Zur hydrodynamischen Kalibrierung können folgende Schlussfolgerungen festgehalten werden: Das MNQ-Ereignis zeigte gute Übereinstimmungen in den Scheitelwerten und in der Dynamik der gemessenen und simulierten Tidewasserstände. Die Modellgüte für das MNQ-Ereignis wurde daher als gut eingestuft.

Das Hochwasserereignis HW2013 zeigte vor allem im Tideniedrigwasser am Pegel Schöpfstelle hohe Abweichungen. An allen übrigen Pegeln und insbesondere den für die Süderelbe maßgebenden Pegel Harburg waren die Abweichungen zwischen Messung und Simulation, so dass hierfür die Modellgüte als gut eingestuft wurde.

Der Abgleich des Sturmflutszenarios mit den Berechnungen der BAW ergab eine gute Übereinstimmung der Dynamik, aber eine leichte Unterschätzung im Sturmflutscheitel mit ca. -5 bis -7 cm an den Pegeln St. Pauli und Bunthaus. Da der Scheitelwert nur als Wert des Bemessungswasserstandes eine Rolle spielt, wird empfohlen diesen (unabhängig von der Modellgüte) aus den Vorgaben des amtlichen Bemessungswasserstandes aus Tabelle 2.2 abzugreifen. In den weiteren Untersuchungen (Kap.6) zeigte sich, dass der Scheitel der Bemessungsturmflut wenig Relevanz für die Belastung der Sohle, der Böschungen und des Bauwerks aus hydraulischer Sicht hat. Daher wurde die Abweichung im Scheitel bei den weiteren Analysen als wenig kritisch eingestuft.

6 Vergleich der bauzeitlichen Brückenzustände

Die Bewertung der hydraulischen Wirkung der Brücke hinsichtlich der Navigation, des Hochwasserabflusses, des Eisstaus, der Erosionen und der Kolkbildung wurde für drei Zustände (Ist-, Bau- und Endzustand) und für drei Szenarien (MNQ, HW2013 und SFBEMFQ2600) durchgeführt. Hierzu sind die jeweiligen hydraulischen Parameter je Szenario für die drei Zustände untereinander im direkten Vergleich abgebildet.

Zusätzlich werden die Wirkungen der Brücke gegenüber dem Istzustand bezüglich geänderter Strömungsverhältnisse bzw. Wasserstände für nachgewiesene Bereiche des Schierlings-Wasserfenchels, eine endemisch in der Tideelbe beheimatete Pflanzenart, welche im angrenzenden Naturschutzgebiet Heuckenlock vorkommt, betrachtet.

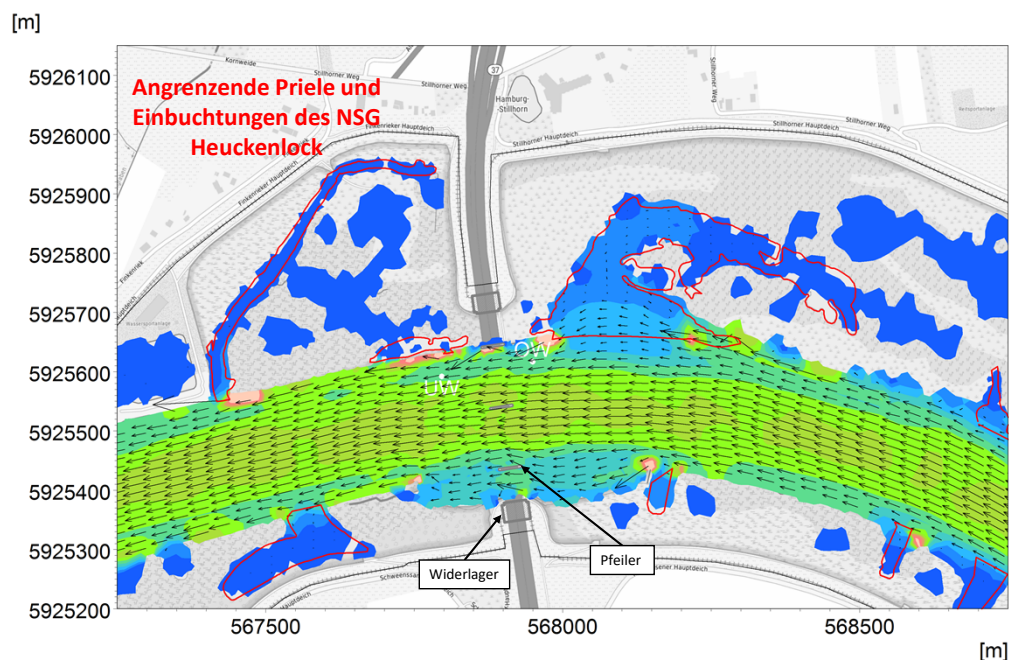


Abbildung 6.1: Vorausgehende Erläuterung und Verortung von Details in den nachfolgenden Darstellungen am Beispiel des Ebbstromvergleichs aus dem MNQ-Ereignis.

6.1 Mittlere Tide und mittlerer Abfluss (MNQ)

Das Ereignis für die mittleren Tiden und einen mittleren Abfluss (14.9.2017 bis 1.10.2017) lieferte die hydrodynamische Grundlage für die nautische Beurteilung, Erosionsbelastung der Böschung, Kolk und die Eisabfuhr. Im vorliegenden Abschnitt wird auf die Strömungsgeschwindigkeiten und Wasserstände eingegangen.

Die Änderungen für das MNQ-Szenario verdeutlichen Abbildung 6.3 für den Ebbstrom sowie Abbildung 6.4 für den Flutstrom. Änderungen der Strömungsgeschwindigkeit treten vorwiegend im mittleren Bereich der Fahrrinne während des Bauzustands auf. Für den Ist- bzw. Endzustand ergeben sich im Bereich der Fahrrinne in der Ebbphase Strömungsgeschwindigkeiten im Wertebereich von 1 bis 1,4 m/s, für die Flutphase im Bereich von 1 bis 1,4 m/s (Istzustand) bzw. 1 bis 1,3 m/s (Endzustand). Demgegenüber treten im Bauzustand für den Fahrrinnenbereich Strömungsgeschwindigkeiten von 1 bis 1,7 m/s für die Ebbphase bzw. 1 bis 1,6 m/s für die Flutphase auf.

Für die Priele und Einbuchtungen des NSG Heuckenlock lassen sich weder in der Ebbphase noch in der Flutphase während des MNQ-Szenarios Strömungsdifferenzen über die Bauphasen beobachten. Durch die geringen Wasserstände sind ein Großteil der Prielflächen nicht direkt an den Hauptstrom angeschlossen. Hier liegen die Strömungsgeschwindigkeiten im Bereich bis maximal 0,05 m/s. Für die nordöstliche Einbuchtung des NSG Heuckenlock treten Strömungsgeschwindigkeiten bis 0,15 m/s auf.

Die erhöhte Verbauung bewirkt während des Bauzustands im Bereich der mittleren Pfeiler einen Strömungsschatten im Hauptströmungsfeld, welcher sich abhängig von der Strömungsrichtung (Ebbstrom stromabwärts, Flutstrom stromaufwärts) ausprägt.

Die hohen Strömungsgeschwindigkeiten am nördlichen Uferbereich sind modelltechnisch bedingt durch das Trockenfallen und Wiederbenetzen in den Berechnungselemente in diesem Bereich bedingt. Da diese Bereiche um das Tideniedrigwasser trockenfallen bzw. nur noch mit wenigen cm Wasserstand benetzt sind (siehe Abbildung 6.6), setzt der Algorithmus des „Trockenfallens und Wiederbenetzens“ im numerischen Modell an. Dieser Ansatz bildet sehr vereinfacht ausgedrückt Strömungen im Porenwasser ab und dient in hydronumerischen Modellen der Stabilisierung von Strömungsprozesse beim Trockenfallen und Wiederbenetzen der Geländeoberfläche. Durch diesen Ansatz werden bei geringen Wasserständen hohe Strömungsgeschwindigkeiten dargestellt, die aber in der Realität nicht zu erwarten sind.

Querströmungen, die die Schifffahrt in der Fahrrinne im Bereich der Brücke gefährden, sind nicht zu erkennen.

Die Betrachtung der Wasserstände (Thw und Tnw) zeigt während Tidehochwasser (Abbildung 6.5) keine nennenswerte Änderung über die bauzeitlichen Zustände. Im Tideniedrigwasser (Abbildung 6.6) ergeben sich im Bereich des mittleren Pfeilers geringfügige Wasserstandsdifferenzen. Bei Thw liegt der lokale Pfeilerstau für alle Bauphasen bei < 1 cm, während Tnw beträgt der lokale Pfeilerstau für Ist- bzw. Endzustand 1 bis 2 cm, für den Bauzustand 1 bis 3 cm.

Für das NSG Heuckenlock ergeben sich keine nennenswerten Wasserstandsdifferenzen über die einzelnen Bauphasen. Bei Tnw sind die Flächen auf beiden Uferseiten hydraulisch nicht an den Hauptstrom angeschlossen, während Thw ergibt sich für den nord-östlichen Uferbereich eine geringfügige Differenz von < 1 cm.

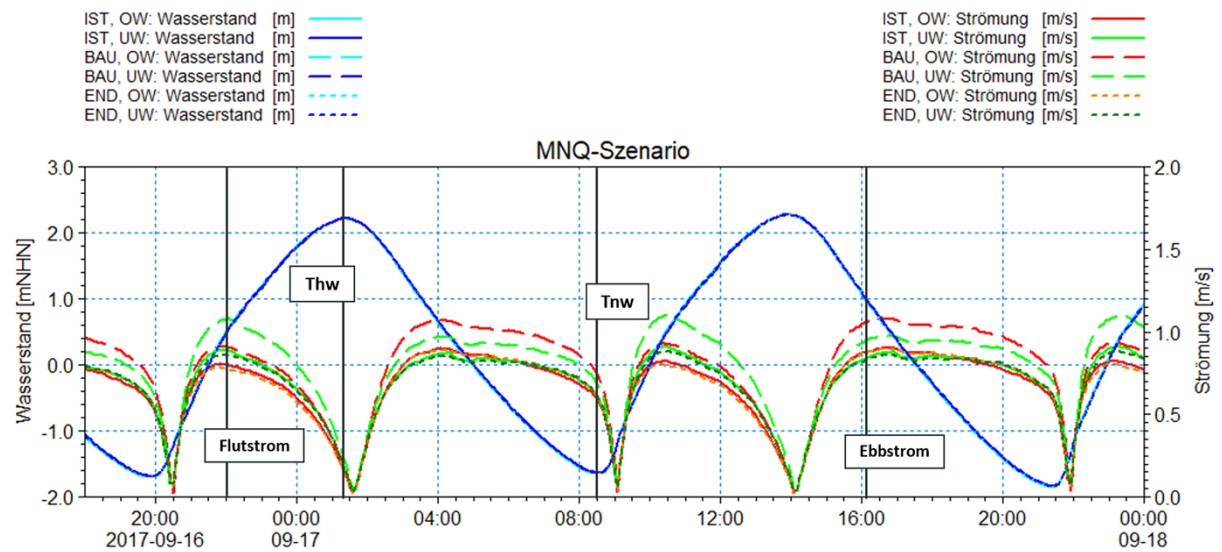


Abbildung 6.2: Zeitreihe der Strömungsgeschwindigkeit und des Wasserstandes an Messpunkten im Ober- (OW) und Unterwasser (UW) in Pfeilernähe im Vergleich der bauzeitlichen Zustände (Ist, Bau, End) für das MNQ-Ereignis.

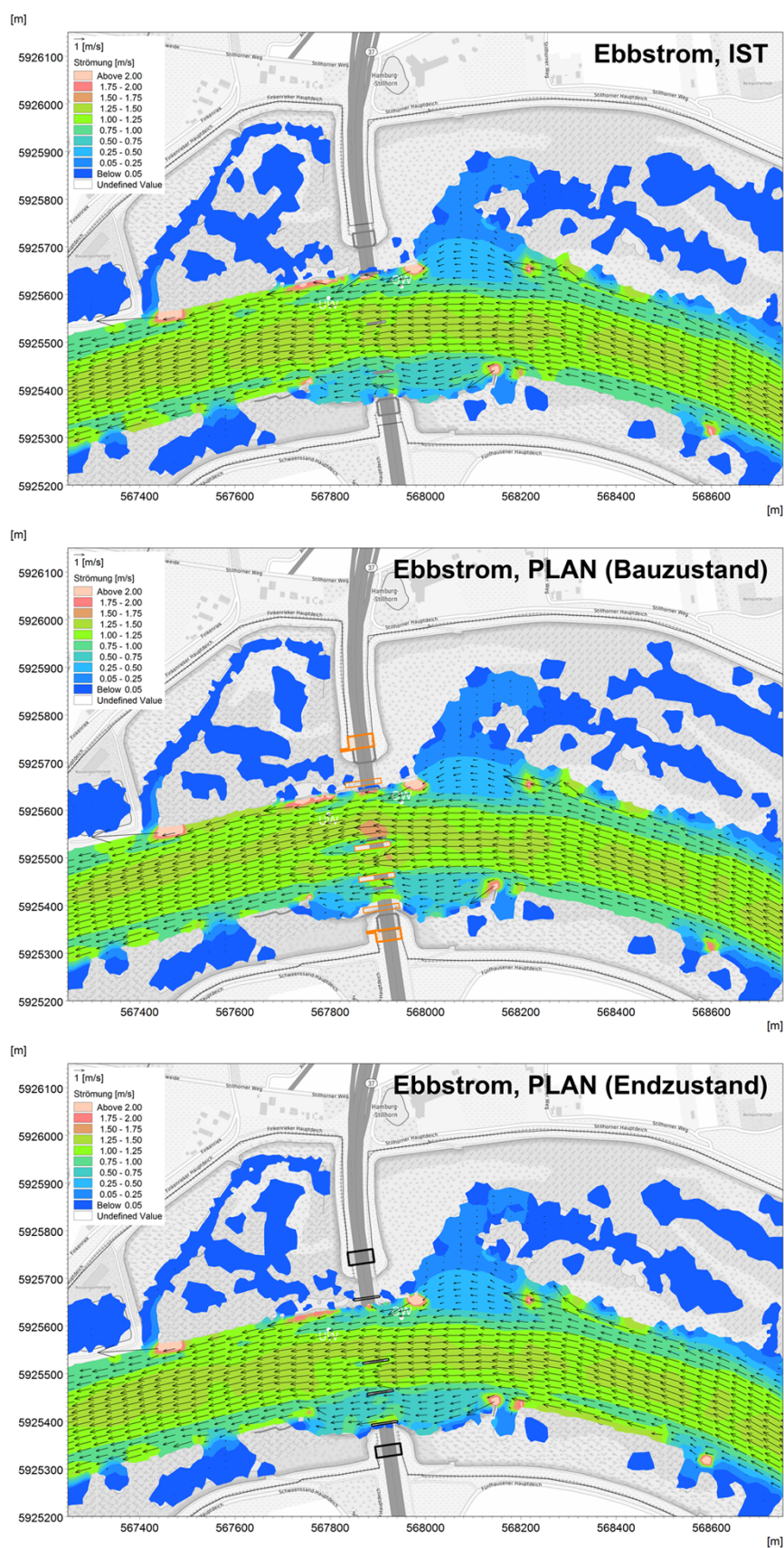


Abbildung 6.3: Strömungsgeschwindigkeiten der Zustände während des Ebbstroms für das MNQ-Ereignis. Der Darstellungszeitpunkt ist in Abbildung 6.2 aufgezeigt.

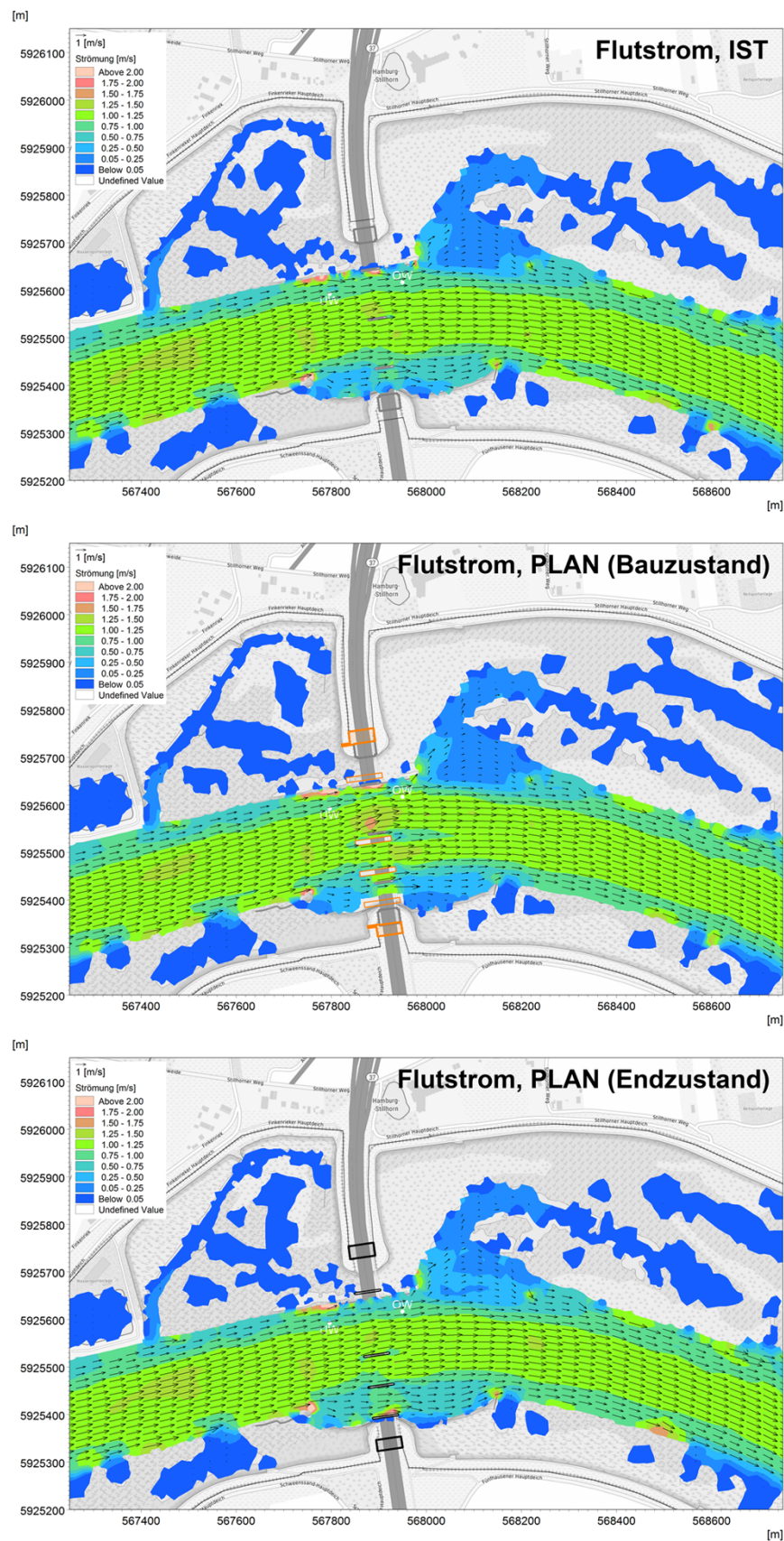


Abbildung 6.4: Strömungsgeschwindigkeiten der Zustände während des Flutstroms für das MNQ-Ereignis. Der Darstellungszeitpunkt ist in Abbildung 6.2 aufgezeigt.

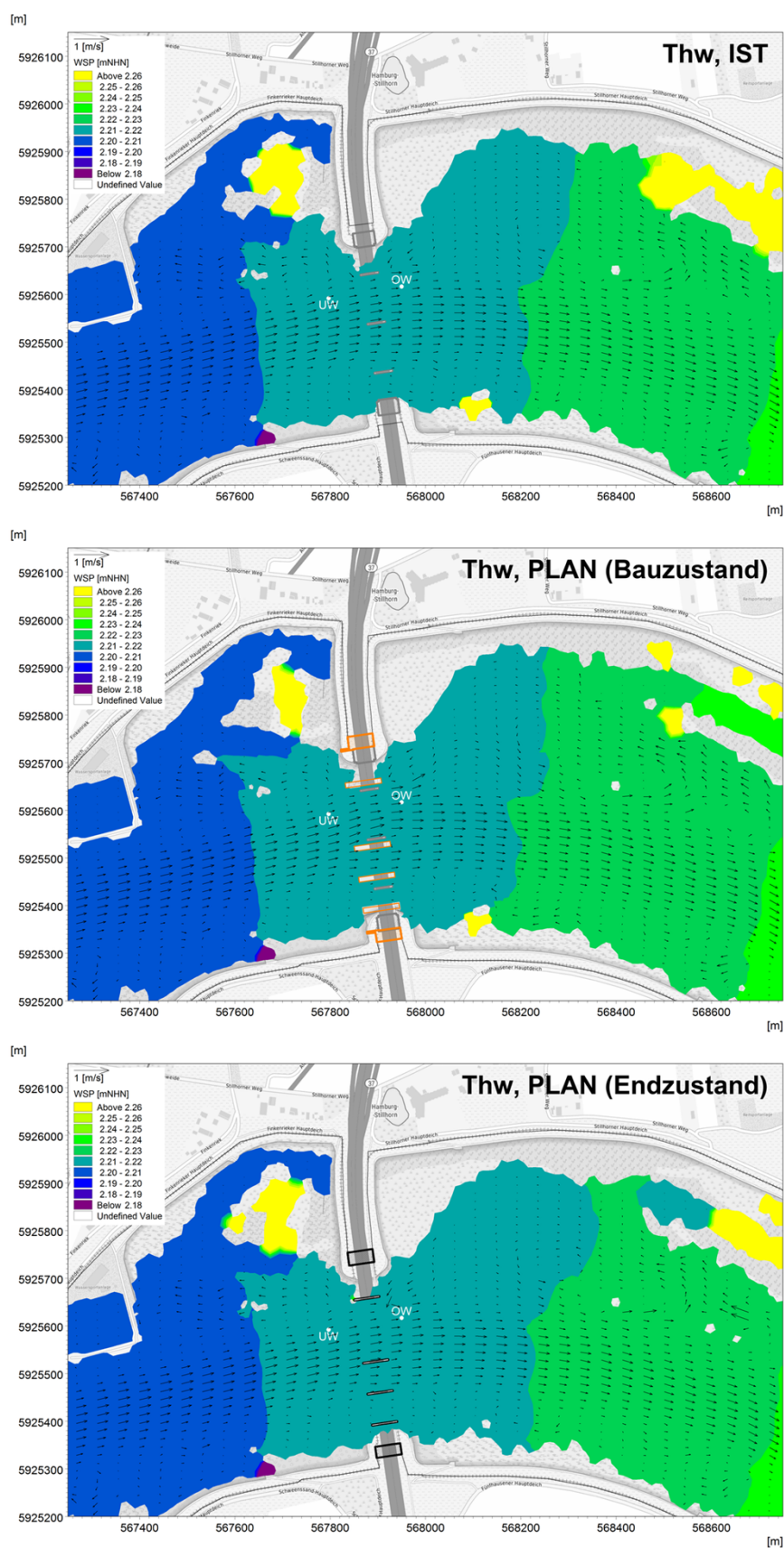


Abbildung 6.5: Wasserstände der Zustände während Tidehochwasser für das MNQ-Ereignis. Der Darstellungszeitpunkt ist in Abbildung 6.2 aufgezeigt.

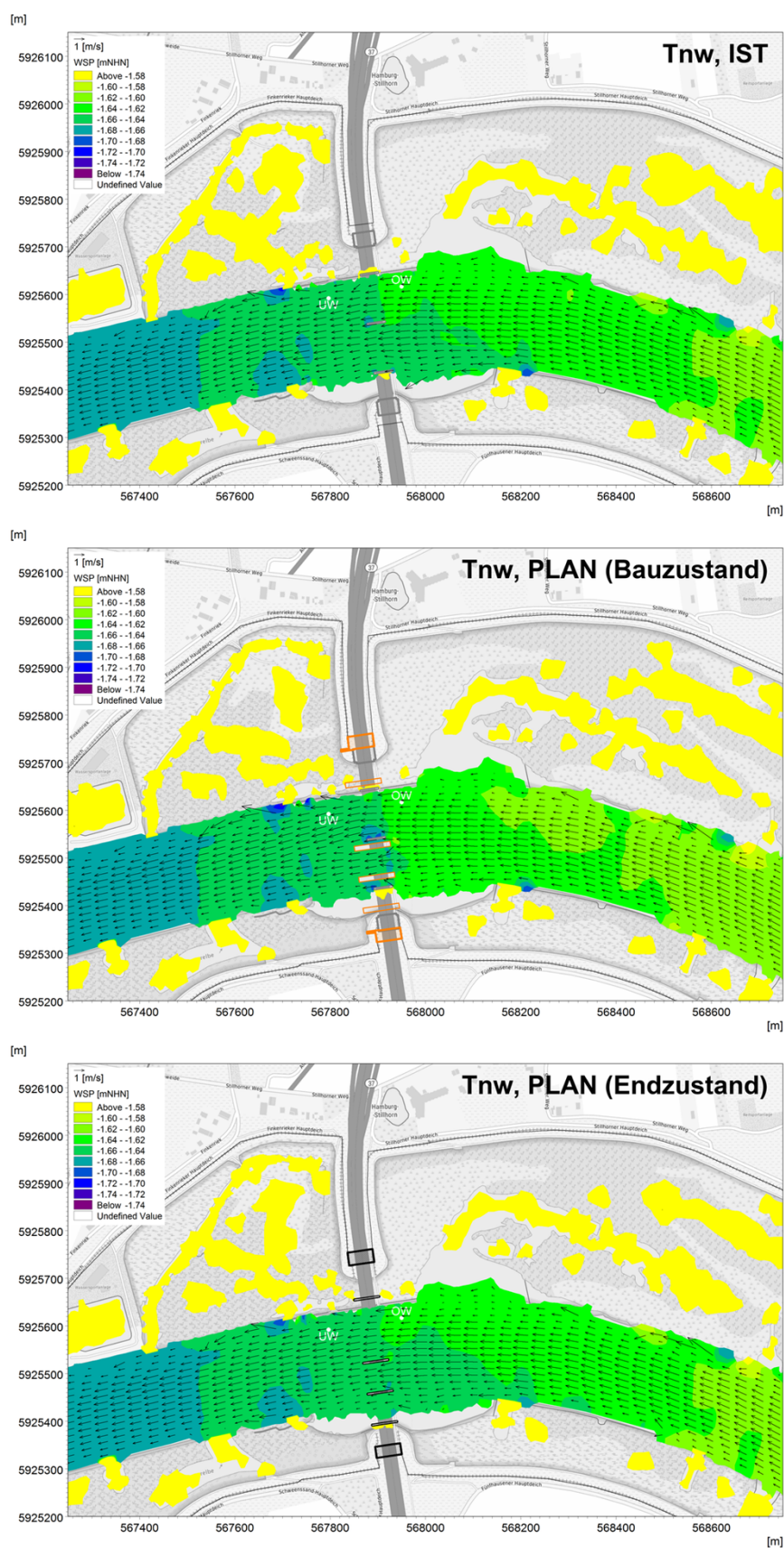


Abbildung 6.6: Wasserstände der Zustände während Tideniedrigwasser für das MNQ-Ereignis. Der Darstellungszeitpunkt ist in Abbildung 6.2 aufgezeigt.

6.2 Hochwasserereignis HW2013

Für das Hochwasserereignis im Jahr 2013 vom 4.6.2013 bis zum 27.6.2013, dass ca. einem HQ50 zu zuordnen ist (vgl. Kap. 2.3), wurden ebenfalls die Strömungen und Wasserstände ausgewertet. Durch den hohen Oberwasserabfluss von 4071 m³/s kentert die Strömung über die Tide nicht mehr, so dass im Hochwasserzeitraum ausschließlich Ebbströmungen auftreten. Im Tideanstieg wurden die Ebbströmungen lediglich reduziert.

Wie Abbildung 6.8 aufzeigt, tritt über die Bauphasen im HW2013 Szenario ebenfalls die höchste Änderung bei den Strömungsgeschwindigkeiten im mittleren Bereich der Fahrrinne während des Bauzustands auf. Hierbei betragen die Strömungsgeschwindigkeiten für die Fahrrinne 2 bis 3,6 m/s, während diese für den Istzustand im Bereich von 2 bis 3,1 m/s bzw. im Wertebereich von 2 bis 2,9 m/s für den Endzustand auf niedrigerem Niveau liegen.

Strömungsdifferenzen für Prielflächen des NSG Heuckenlock sind nicht erkennbar. Während der Ebbphase ergeben sich für die Priele und Einbuchtungen auf beiden Uferseiten großflächig nur geringe Strömungen im Bereich bis maximal 0,05 m/s. Aufgrund des zu diesem Zeitpunkt geringen Wasserstands, Ebbphase unmittelbar vor Tnw (Abbildung 6.8), sind nur die unmittelbar an den Hauptstrom angeschlossenen Flächen überströmt.

Bedingt durch die erhöhte Verbauung im Hauptströmungsfeld, überlagert mit den generell höher auftretenden Strömungsgeschwindigkeiten im HW2013 Szenario gegenüber denen des MNQ-Ereignisses, prägt sich ein stärkerer Strömungsschatten im Bereich des mittleren Pfeilers aus. Lokal ergeben sich erhöhte Strömungen im Zwischenbereich der zwei mittleren Spundwände. Die lokal uferseitig auftretenden hohen Strömungen sind durch das Trockenfallen und Wiederbenetzen in diesem Bereich verursacht.

Die Auswertung der Wasserstände (Thw und Tnw) zeigt kleinere Differenzen, die sowohl für das Tidehochwasser (Abbildung 6.9) sowie das Tideniedrigwasser (Abbildung 6.10) während des bauzeitlichen Zustands für die Fahrrinne im Bereich der mittleren Pfeiler auftreten. Bei Thw liegt der lokale Pfeilerstau für den Ist- bzw. Endzustand bei 3 bis 4 cm, während des Bauzustands liegt dieser im Bereich von 6 bis 7 cm. Höherer Pfeilerstau ergibt sich während Tnw. Dieser liegt während des Ist- bzw. Endzustands bei 3 bis 10 cm, für den Bauzustand bei 10 bis 25 cm.

Auf das angrenzende NSG Heuckenlock bewirken die Bauphasen weder im nördlichen noch im südlichen Bereich Wasserstandsdifferenzen für die Prielflächen. Während bei Thw die NSG-Flächen an beiden Uferseiten großflächig überströmt sind, liegt der Wasserstand bei Tnw auf einem niedrigen Niveau (-0,25 bis 0,05 mNHN), welches nur die unmittelbar angeschlossenen NSG-Flächen benetzt.

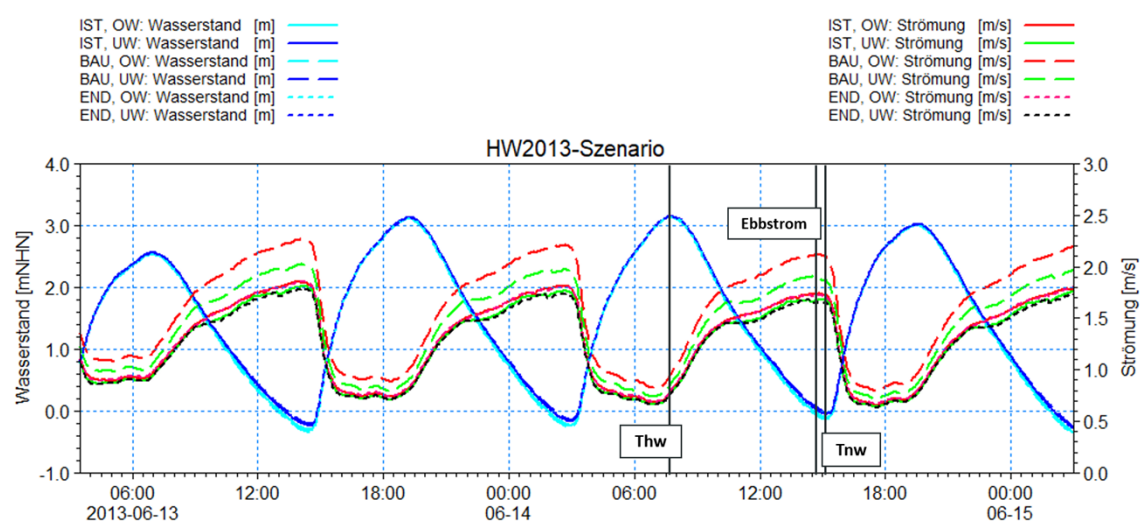


Abbildung 6.7: Zeitreihe der Strömungsgeschwindigkeit und des Wasserstandes an Messpunkten im Ober- (OW) und Unterwasser (UW) in Pfeilernähe im Vergleich der bauzeitlichen Zustände (Ist, Bau, End) für das HW2013-Ereignis.

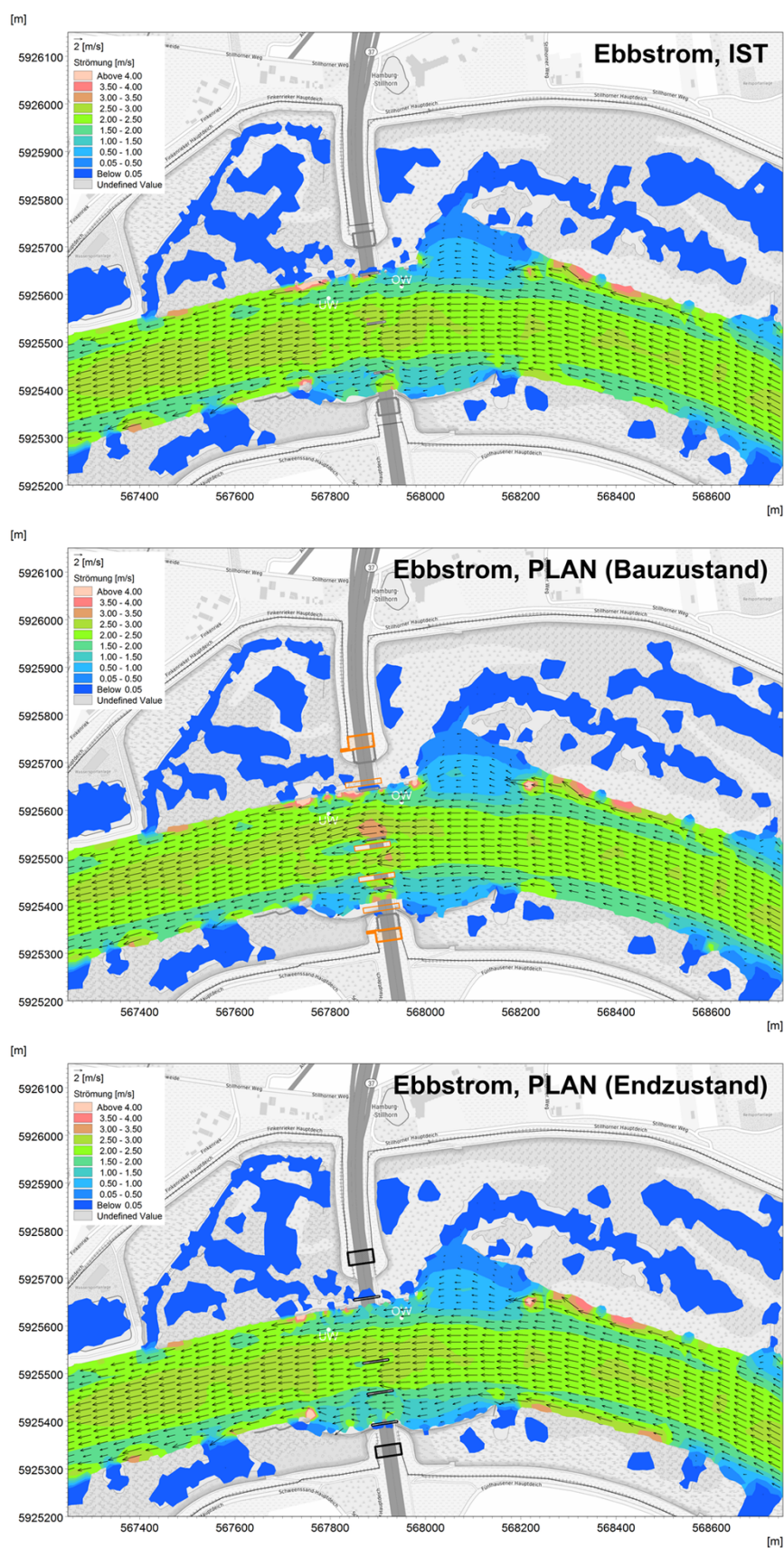


Abbildung 6.8: Strömungsgeschwindigkeiten der Zustände während Ebbstrom für das HW2013-Ereignis. Der Darstellungszeitpunkt ist in Abbildung 6.7 aufgezeigt.

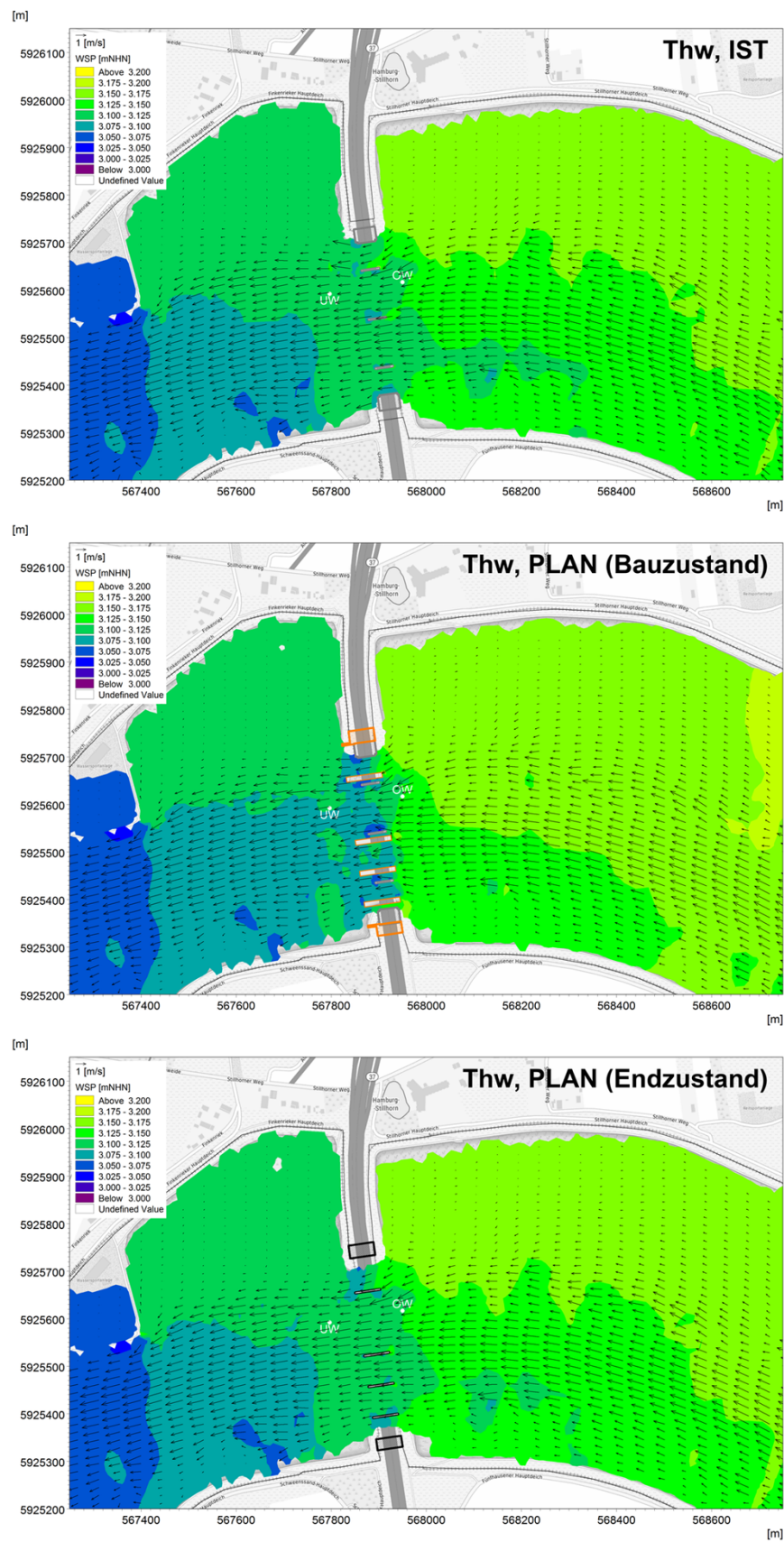


Abbildung 6.9: Wasserstände der Zustände während Tidehochwasser für das HW2013-Ereignis. Der Darstellungszeitpunkt ist in Abbildung 6.7 aufgezeigt.

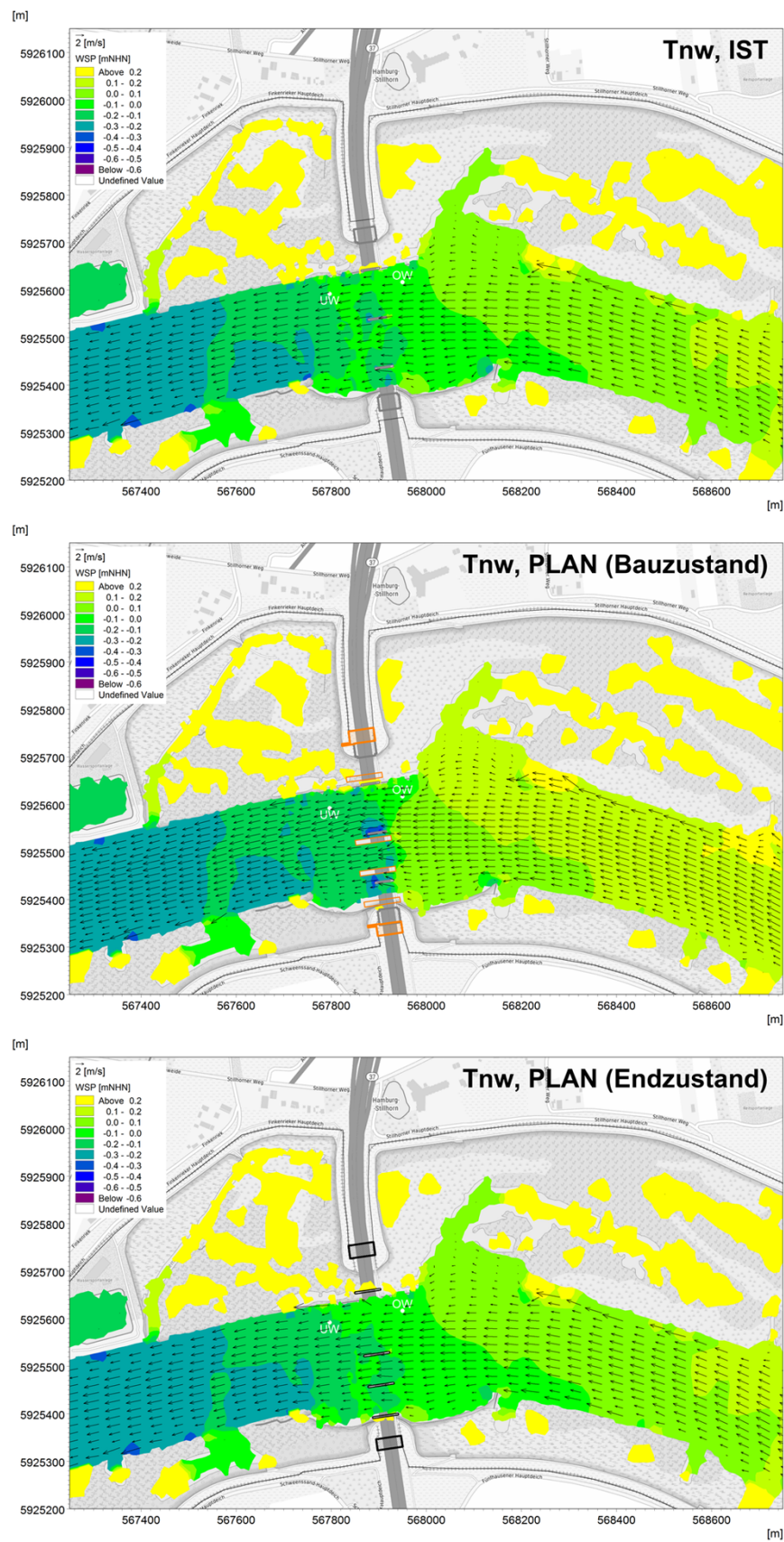


Abbildung 6.10: Wasserstände der Zustände während Tideniedrigwasser für das HW2013-Ereignis. Der Darstellungszeitpunkt ist in Abbildung 6.7 aufgezeigt.

6.3 Bemessungsturmflut SFBEMFQ2600

Für die Bemessungsturmflut (SFBEMFQ2600) ergeben sich bei Betrachtung der Strömungsgeschwindigkeiten für die Ebbphase nach dem Sturmflutscheitel (Abbildung 6.12) abermals die maximalen Strömungsgeschwindigkeitsänderung für die Phase des Bauzustands im Fahrrinnenbereich der mittleren Pfeiler. Während hier die Strömungen für den Bauzustand im Wertebereich von 2 bis 3 m/s liegen, treten für den Ist- bzw. den Endzustand niedrigere Strömungsgeschwindigkeiten im Bereich von 1,5 bis 2,3 m/s auf.

Im direkten Vergleich zum vorher betrachteten Binnenhochwasserszenario verdeutlicht sich, dass die maximalen Strömungsgeschwindigkeiten während der Bemessungsturmflut auf einem deutlich niedrigeren Niveau liegen.

Die angrenzenden Priele und Einbuchtungen des NSG Heuckenlock werden in der Ebbphase großflächig überströmt. Über die drei Bauphasen ergeben sich dabei keine nennenswerten Differenzen der Strömungsgeschwindigkeiten. Am nördlichen Ufer liegen die Strömungsgeschwindigkeiten im nordwestlich gelegenen Priel „Gemeinschaftliche Wettern“ bei 0,05 bis 0,2 m/s, die nordöstliche Einbuchtung verzeichnet Strömungsgeschwindigkeiten von 0,1 bis 0,3 m/s. Am südlichen Ufer in der südwestlich gelegenen Einbuchtung betragen die Strömungsgeschwindigkeiten 0,1 bis 0,6 m/s.

Für die Auswertung der Wasserstände aufgezeigt in Abbildung 6.13 für den Sturmflutauflauf und in Abbildung 6.14 für den Sturmflutscheitel zeigt sich analog zu den vorherigen Szenarien, dass sich Wasserstandsunterschiede auf die Fahrrinne im Bereich der mittleren Pfeiler während des Bauzustands konzentrieren.

Der Sturmflutscheitel wird durch den Bauzustand marginal verändert und liegt unter 2 mm im Bauzustand, im Endzustand bei 0 mm.

Der lokale Pfeilerstau während des Sturmflutauflaufs liegt für den Ist- und Endzustand bei < 1 cm, im Bauzustand bei 1 bis 2 cm. Während des Sturmflutscheitels beläuft sich der Pfeilerstau für alle Bauphase auf < 1 cm.

Für das angrenzende NSG Heuckenlock bewirken die Bauphasen weder im nördlichen noch im südlichen Bereich Wasserstandsunterschiede in den Prielen und Einbuchtungen.

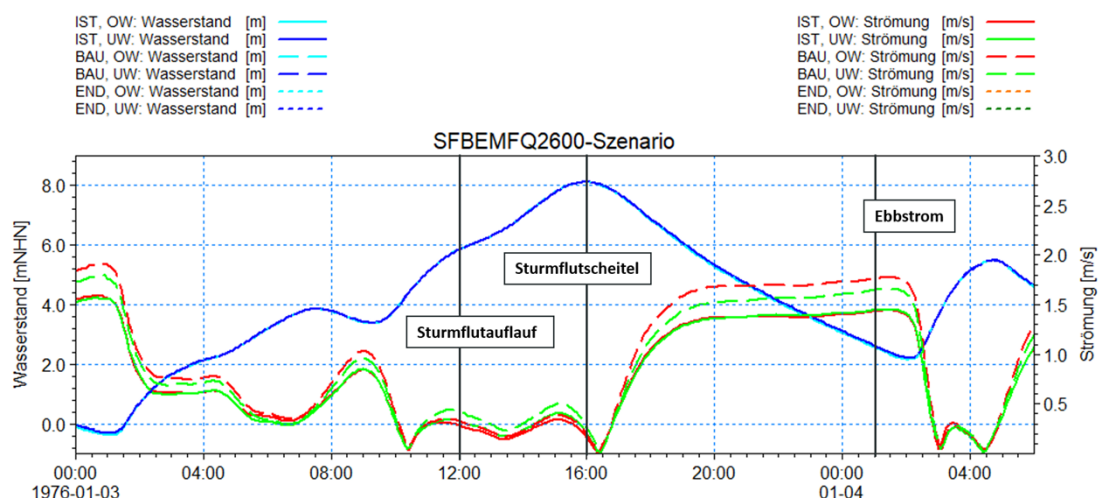


Abbildung 6.11: Zeitreihe der Strömungsgeschwindigkeit und des Wasserstandes an Messpunkten im Ober- (OW) und Unterwasser (UW) in Pfeilernähe im Vergleich der bauezeitlichen Zustände (Ist, Bau, End) für das Ereignis Bemessungsturmflut (SFBEMFQ2600).

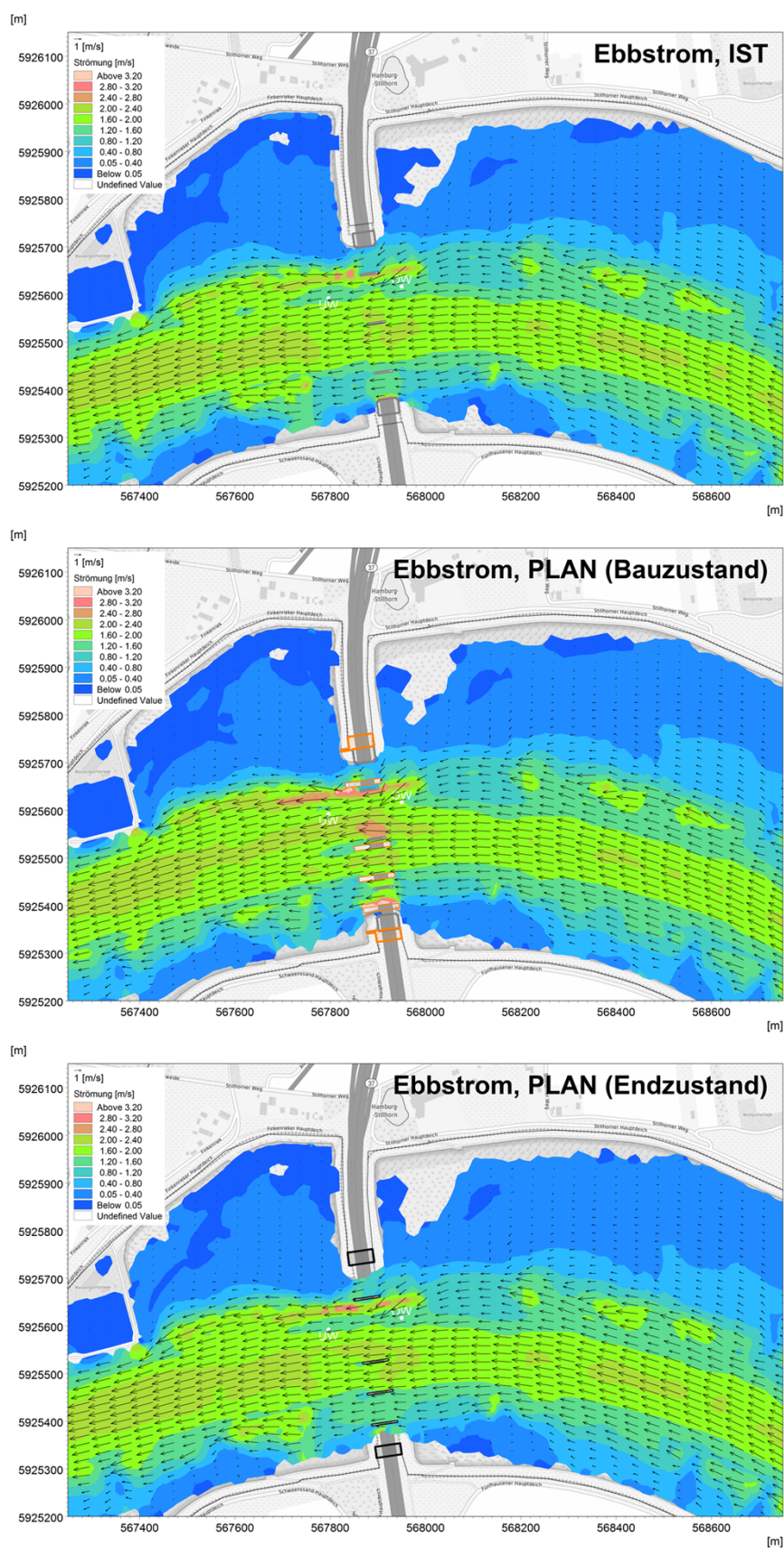


Abbildung 6.12: Strömungsgeschwindigkeiten der Zustände während Ebbstrom für das Sturmflut-Ereignis (SFBEMFQ2600). Der Darstellungszeitpunkt ist in Abbildung 6.11 aufgezeigt.

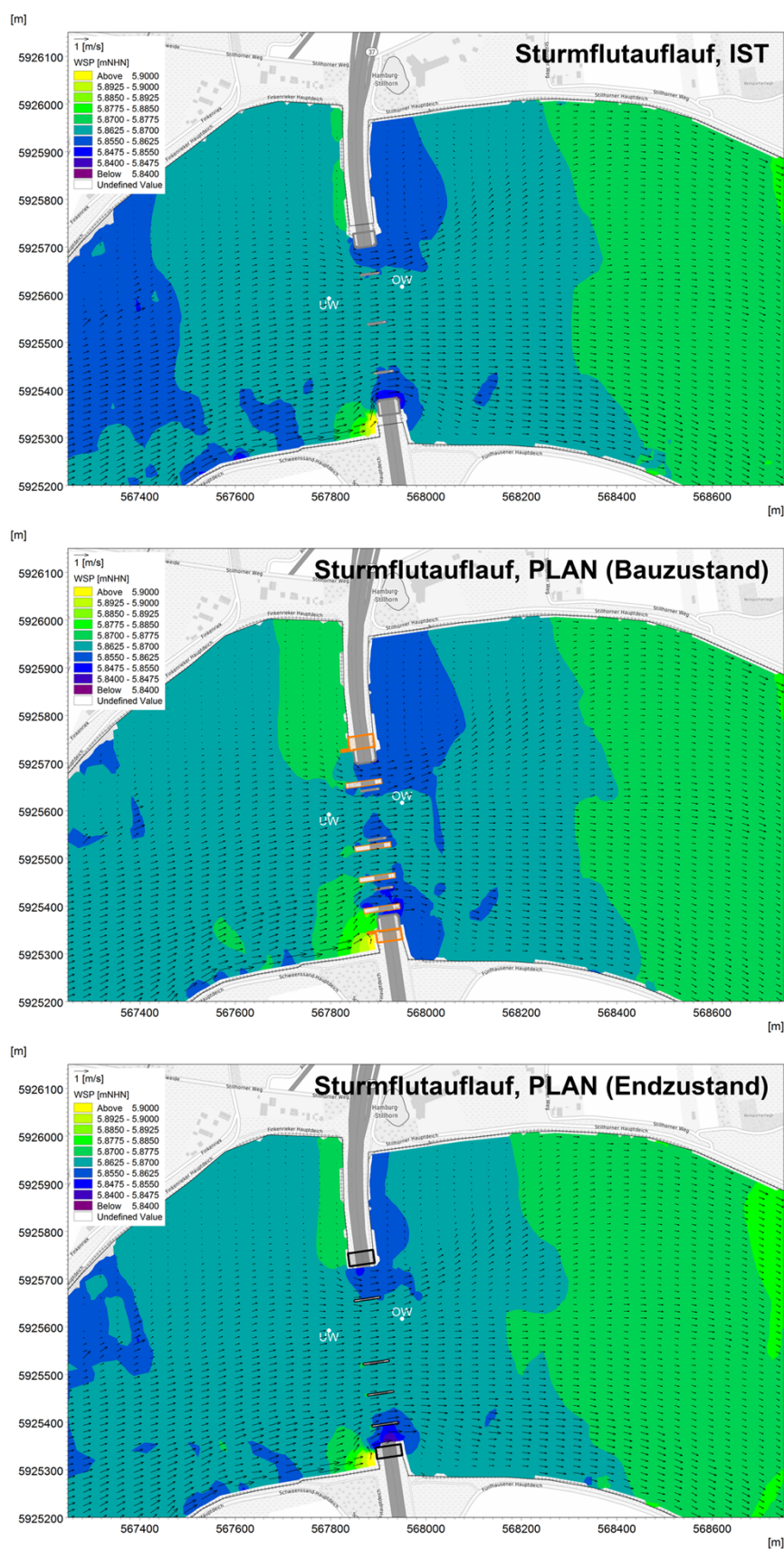


Abbildung 6.13: Wasserstände der Zustände während des Sturmflutscheitels für das Sturmflut-Ereignis (SFBEMFQ2600). Der Darstellungszeitpunkt ist in Abbildung 6.11 aufgezeigt.

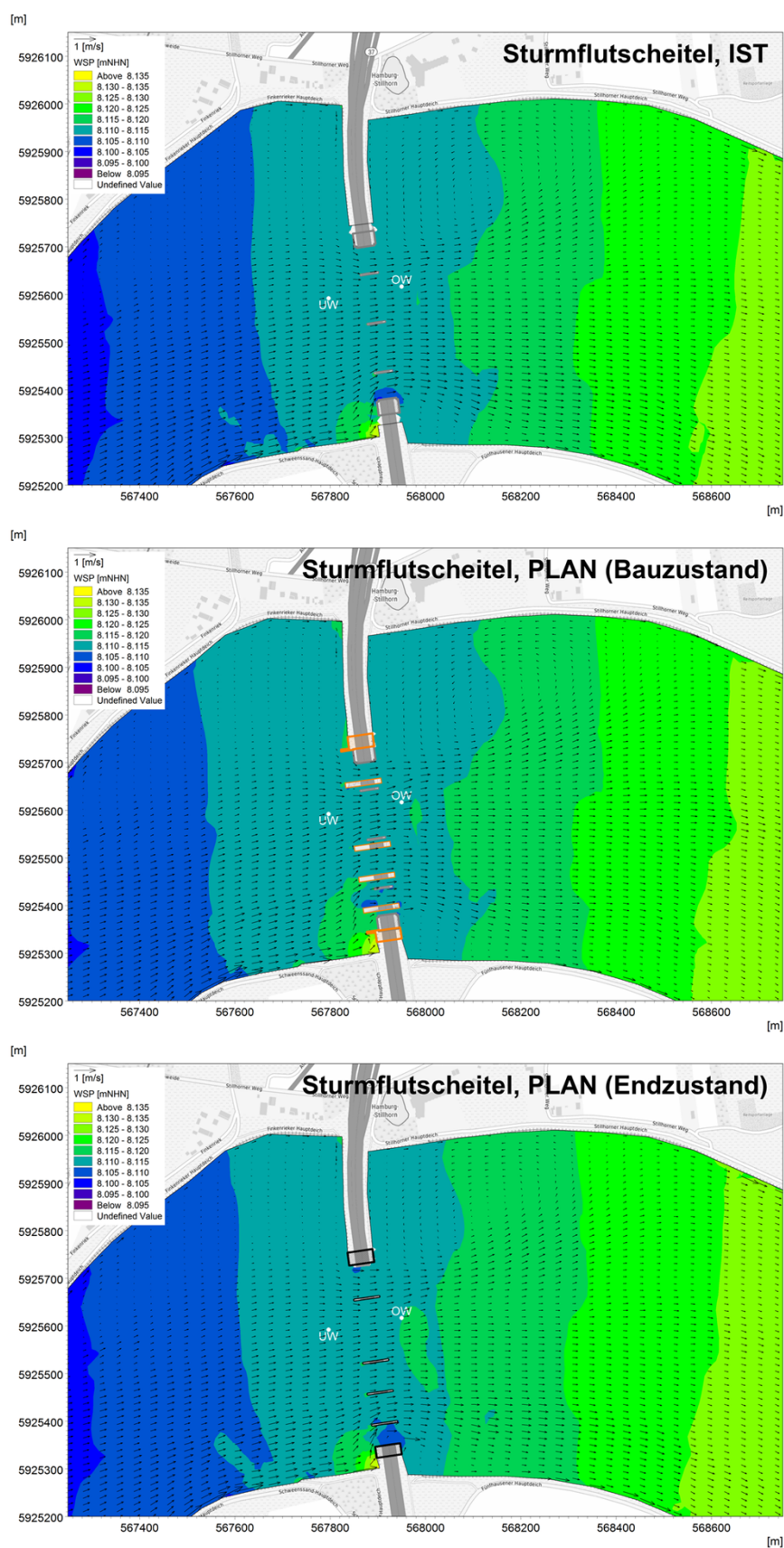


Abbildung 6.14: Wasserstände der Zustände während des Sturmflutscheitels für das Sturmflut-Ereignis (SFBEMFQ2600). Der Darstellungszeitpunkt ist in Abbildung 6.11 aufgezeigt.

6.4 Erosionsneigung an den Böschungen

Auf Basis mittlerer Tiden und eines mittleren Abflusses, aber auch auf Basis der Extremereignisse wurde die Belastung der Unterwasserböschung hinsichtlich Erosionen ausgewertet. Die Auswertung erfolgte über die Analyse und flächige Darstellung der Sohlschubspannungen an der Unterwasserböschung mittels Betrachtung der sich über den gesamten Modellzeitraum ergebenden mittleren und maximalen Sohlschubspannungen.

Bei den hier anstehenden Sanden ist ein Bewegungsbeginn der Sedimente ab ca. 0,3 bis 0,5 m/s Strömungsgeschwindigkeit möglich. Entsprechend wurde die Legende zur Darstellung der Sohlschubspannungen gewählt. Dieser Bewegungsbeginn führte zu einem ersten sohlnahen Sedimenttransport als Geschiebe. An den Böschungen schützen Steinschüttungen, auf dem Vorland der Bewuchs die Oberfläche vor einer raschen Erosion. Je nach Größe der Steinschüttung und je nach Bewuchs ist die Böschung standsicher gegen hohe Strömungsbelastungen und somit gegen eine Erosion.

Bei der nachfolgenden Auswertung wurde insbesondere auf eine lokale Zunahme der Sohlschubspannung in der Fahrrinne bzw. an den Böschungen im Vergleich des Bau- bzw. Endzustands gegenüber dem Istzustand zum angrenzenden Ober- und Unterwasserbereich geachtet. Eine Zunahme der Sohlschubspannung in der Fahrrinne würde auf einen Kontraktionskolk, dem sogenannten globalen Kolk hinweisen, während eine Zunahme der Sohlschubspannung im Böschungsbereich auf eine erhöhte Strömungsbelastung und folglich Erosionsneigung andeuten würde.

Im MNQ-Szenario (Abbildung 6.15) zeigt sich im Bauzustand eine Zunahme der lokalen Sohlschubspannungen und folglich eine leichte Erosionstendenz in der Fahrrinne, welche sich primär im Bereich der Brückenöffnungen bedingen durch die Einengung des Fließquerschnitts, lokalisieren. Im Bereich der Böschungen unmittelbar hinter bzw. vor den Pfeilern und Spundwänden reduzieren sich die Sohlschubspannungen, so dass hier Sedimentationsprozesse zu erwarten sind. Im Endzustand zeigen sich ähnlich wie im Istzustand vorwiegend natürliche Sohllagenänderungen im Bereich der Fahrrinne. Zusätzlich lassen sich leicht erhöhte lokale Sohlschubspannungen und folglich eine leichte Erosionstendenz am südlichen Ufer erkennen, die sich durch die weitere Öffnung der zwei uferseitigen Pfeiler bedingen.

Im HW2013-Szenario (Abbildung 6.16) lassen sich im Bauzustand durch die erhöhten Strömungsgeschwindigkeiten lokale Zunahmen der Sohlschubspannungen im Bereich der Brückenöffnungen erkennen, welche Geschiebetransport bedingen und ggf. auch eine leichte Erosionstendenz. Gleichzeitig bewirkt der erhöhte Verbauungsgrad eine reduzierte Sohlschubspannung im südlichen Böschungsbereich, also eine Abnahme der Erosionsneigung oder eine Zunahme der Sedimentation dort. Im Endzustand zeigen sich leicht erhöhte lokale Sohlschubspannungen am südlichen Ufer, bedingt durch die weitere Öffnung der zwei uferseitigen Pfeiler. Dort wird weiterhin eine Böschungssicherung empfohlen.

Im Bemessungsturmflutszenario (Abbildung 6.17) zeigen sich im Bauzustand im Bereich der Fahrrinne lokale Zunahmen der Sohlschubspannungen im unmittelbaren Bereich der Pfeiler und Spundwände durch die Einengung des Fließquerschnitts und folglich eine leichte Erosionstendenz. Im Bereich der südlichen Böschung kommt es großflächig zu erhöhten lokalen Sohlschubspannungen. Im Endzustand zeigt sich durch die reduzierte Verbauung eine Abnahme der Sohlschubspannung im Fahrinnenbereich. Zugleich nehmen die lokalen Sohlschubspannungen im südlichen Uferbereich zu, so dass hier ggf. eine Sicherung der Böschungen benötigt wird.

Für die Prielflächen des NSG Heuckenlock zeigen sich über die drei betrachteten Szenarien für das nördliche Ufer nur lokale Zunahmen der maximalen

Sohlschubspannungen, hier überwiegen weiterhin Sedimentationsprozesse. Für die südlichen Flächen im unmittelbaren Brückenbereich zeigen sich lokale erhöhte Sohlschubspannungen in den mittleren und maximalen Sohlschubspannungen, so dass eine Neigung zu Geschiebetransport und ggf. leichte Erosionen zu erwarten sind.

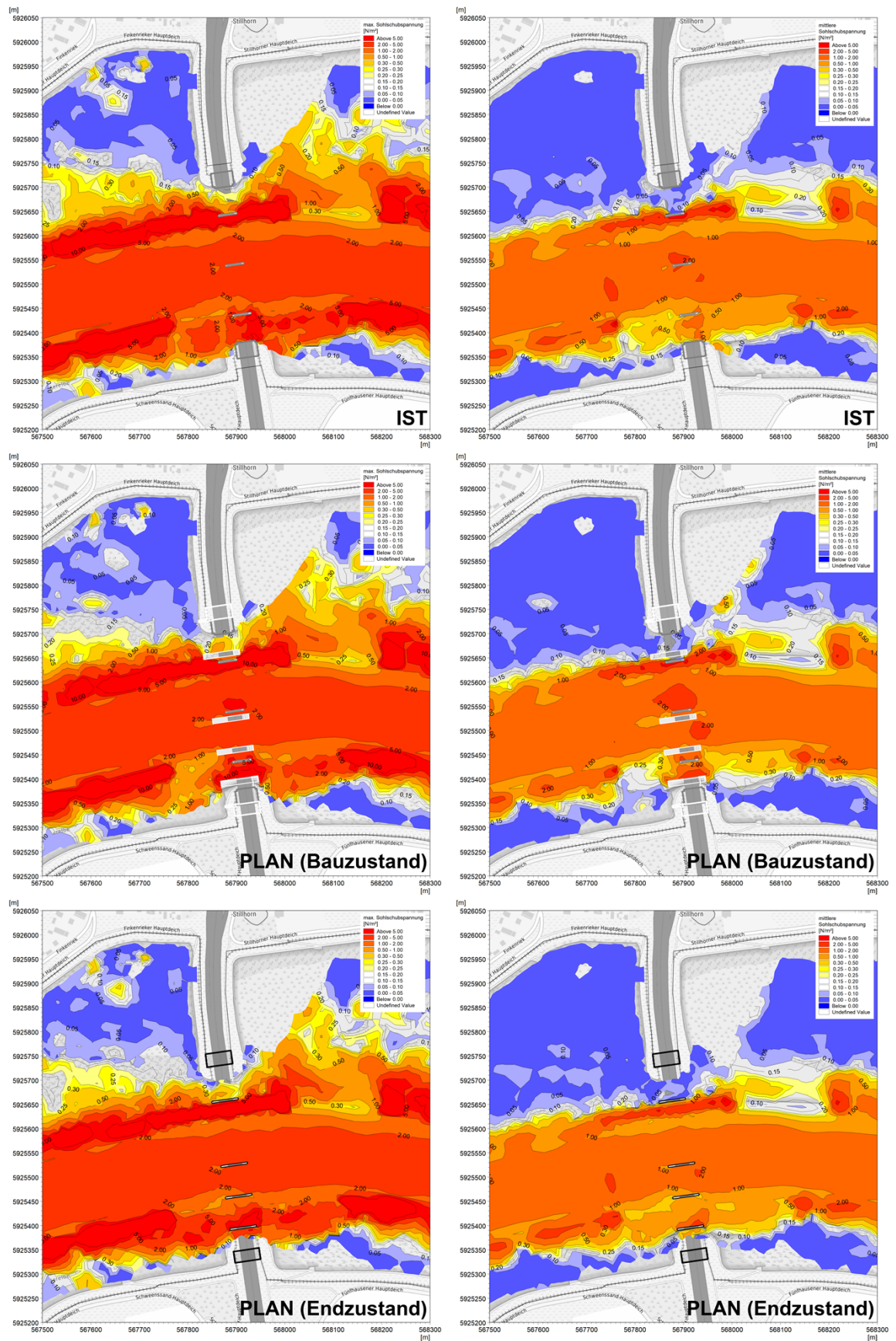


Abbildung 6.15: Maximale (links) und mittlere Sohl Schubspannung (rechts) im Vergleich der Zustände (Ist-, Bau- und Endzustand) für das MNQ-Szenario.

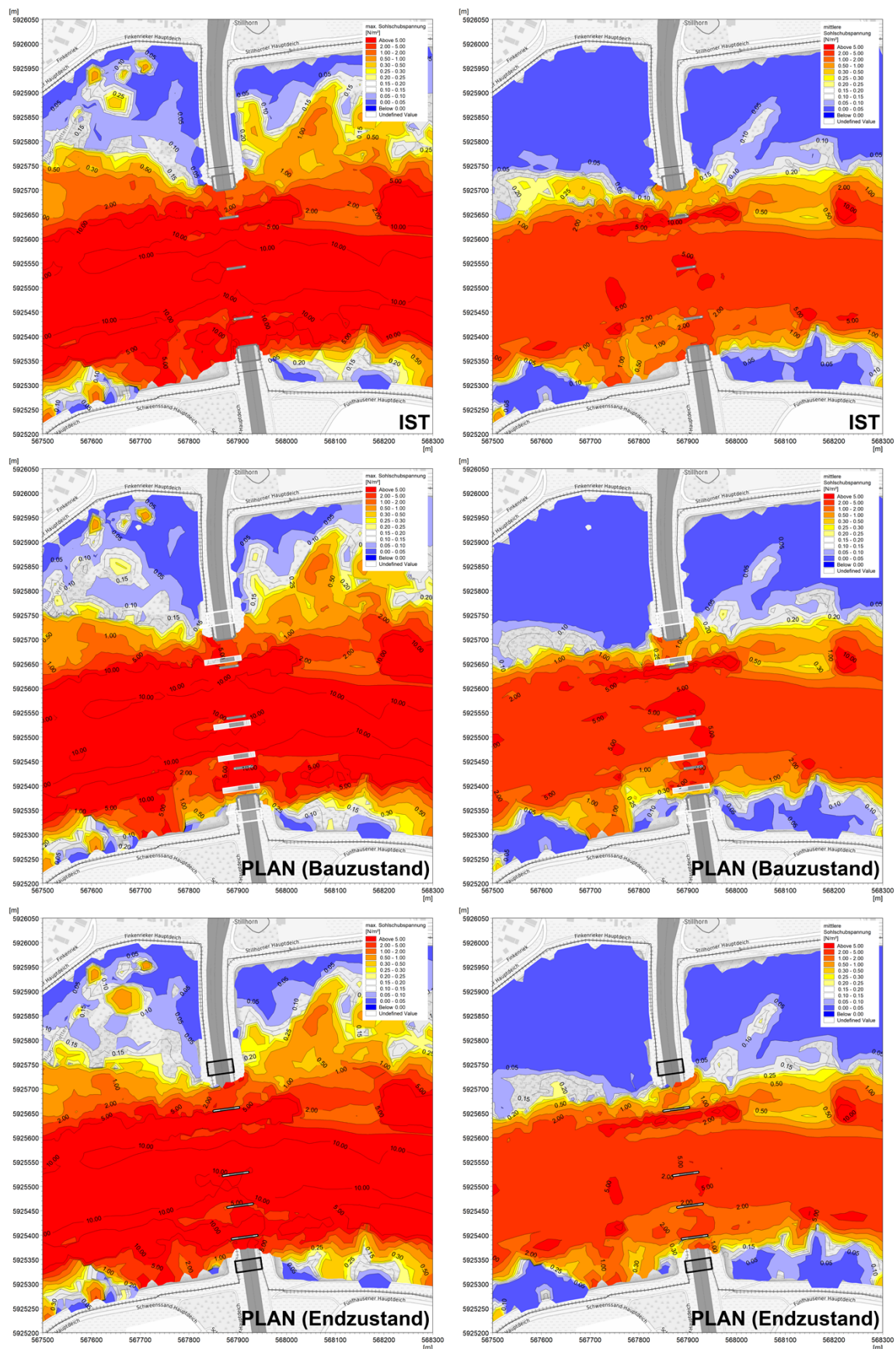


Abbildung 6.16: Maximale (links) und mittlere Sohlschubspannung (rechts) im Vergleich der Zustände (Ist-, Bau- und Endzustand) für das HW2013-Szenario.

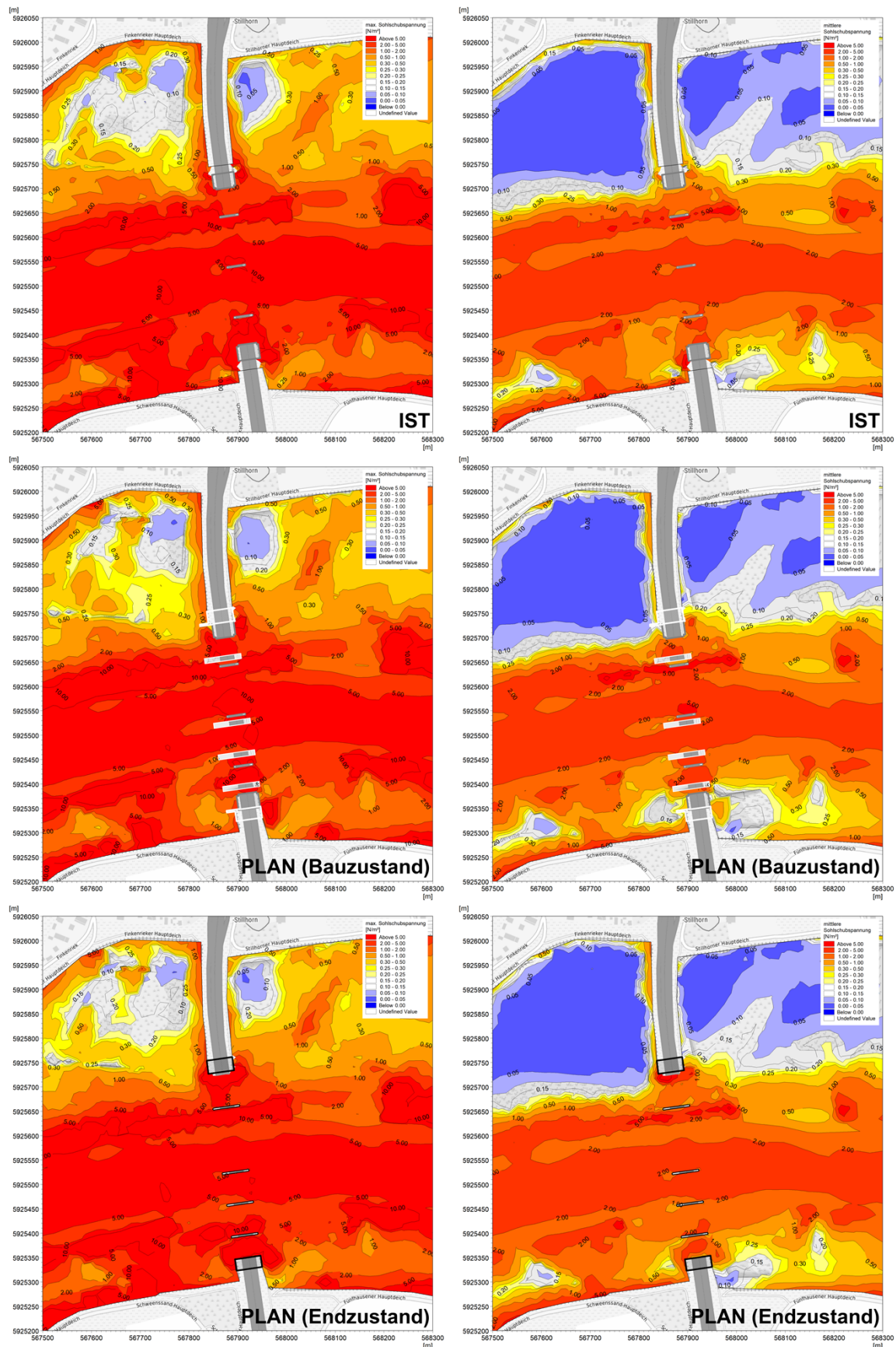


Abbildung 6.17: Maximale (links) und mittlere Sohlschubspannung (rechts) im Vergleich der Zustände (Ist-, Bau- und Endzustand) für das SFBEMFQ2600-Szenario.

6.5 Auswertungen für die Standorte des Schierlings-Wasserfenchels

Im unmittelbar an die Süderelbbrücke anschließenden Naturschutzgebiet Heuckenlock ist die endemisch in der Tide-Elbe beheimatete Pflanzenart Schierling-Wasserfenchel an verschiedenen Punkten nachgewiesen (Abbildung 6.18). Um Auswirkungen der Bauphasen auf das lokale Vorkommen der Pflanzenart zu bewerten, sind die Änderungen der Strömungsverhältnisse und Wasserstände für die drei aufgezeigten Lagen über alle betrachteten Szenarien nachfolgend aufgeführt.

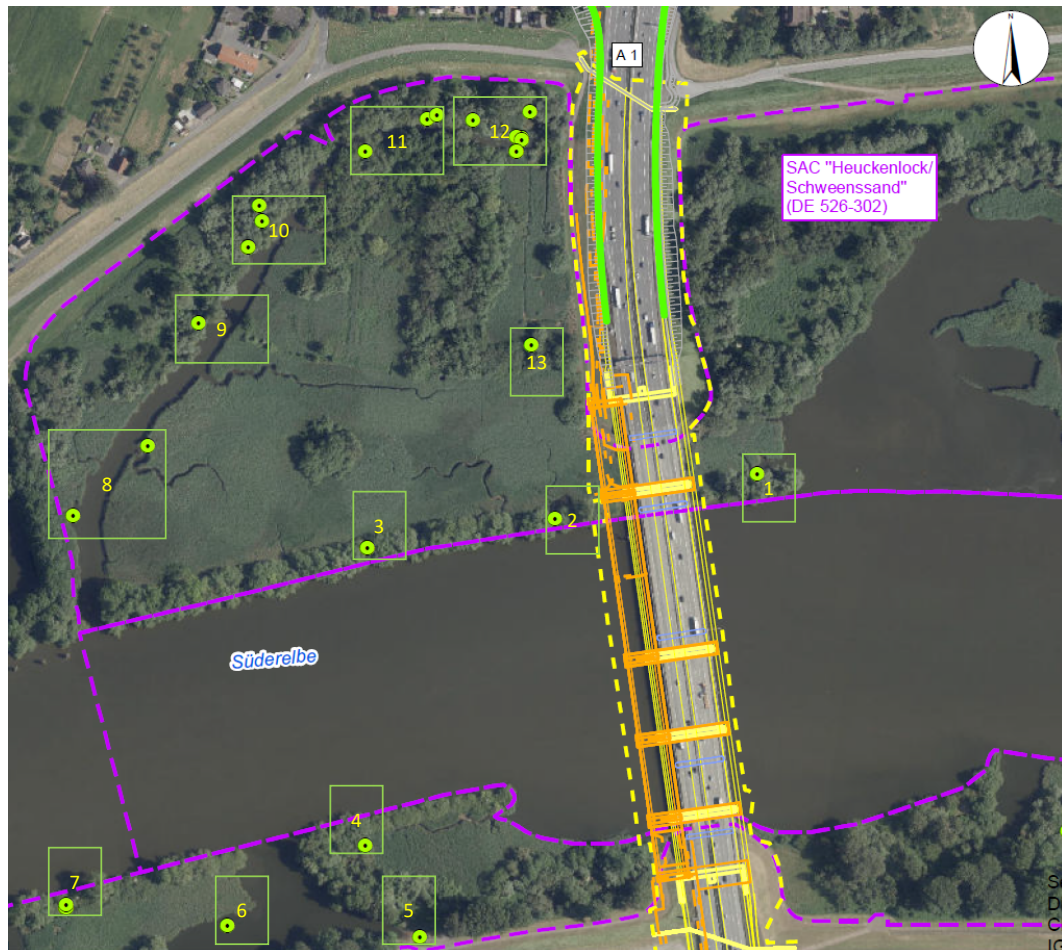


Abbildung 6.18: Lokal nachgewiesene Standorte (grüner Punkt) des endemisch in der Tide-Elbe beheimateten Schierling-Wasserfenchels sowie Untersuchungsbereiche für Wasserstand und Fließgeschwindigkeit

Die in der Abbildung 6.18 gezeigten Untersuchungsbereiche wurden über Zeitreihen des Wasserstandes und der Fließgeschwindigkeit aus den Ereignissen MNQ, HW2013 und für die Bemessungsturmflut für die jeweiligen Zustände (Ist-, Bau- und Planzustand) extrahiert.

Für die Tidezeitreihen der untersuchten Bereiche wurden die statistischen Parameter Maximalwerte, Minimalwerte, Mittelwerte und Standardabweichung je Zustand ausgewertet und gegenübergestellt.

6.5.1 Standorte des Schierlings-Wasserfenchels unter dem mittleren Ereignis MNQ

Im MNQ-Ereignis ergeben sich sowohl im Hauptstrom der Süderelbe als auch in den Nebengewässern keine nennenswerten Änderungen der maximalen Wasserstände rund um das Thw (Abbildung 6.19).

Die Bereiche 5, 9 und 13 fallen in allen Zuständen trocken. Die minimalen Wasserstände rund um das Tnw verringern sich vom Ist- zum Endzustand am Hauptstrom der Elbe um maximal -1 cm, in den Prielen um maximal -2 cm. In allen anderen Bereichen verändern sich die Streuung um den mittleren Wasserstand nicht.

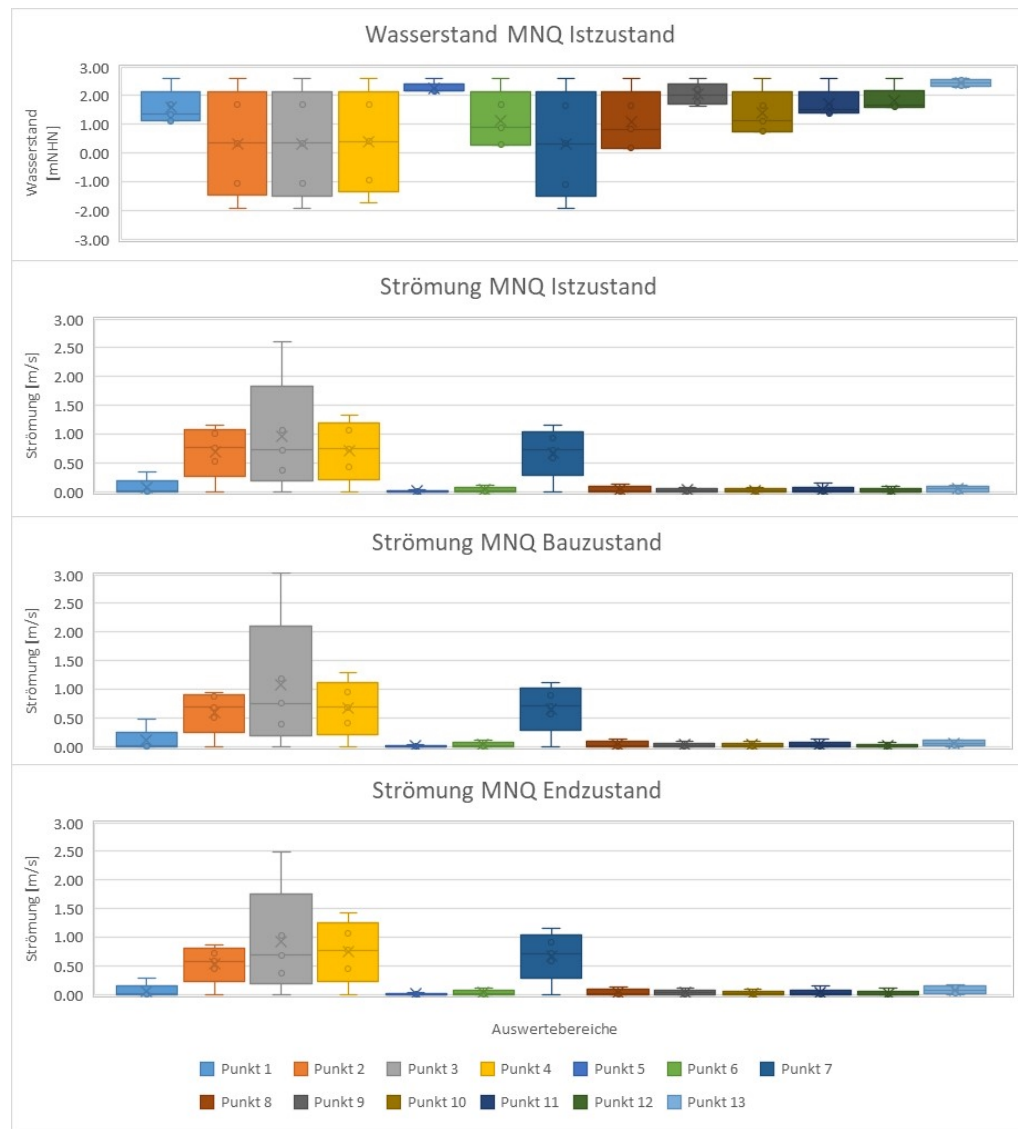


Abbildung 6.19: Statistische Auswertung des Wasserstandes im Istzustand und der Strömungen an den Standorten des Schierling-Wasserfenchels für das MNQ-Ereignis und den Ist-, Bau- und Endzustand

Die maximalen Strömungsgeschwindigkeiten verändern sich am Hauptstrom der Elbe zwischen Ist- und Bauzustand um -0,2 (Punkt 2) bis 0,4 m/s (Punkt 3) und zwischen Ist- und Endzustand um -0,3 (Punkt 2) bis 0,1 m/s (Punkt 4). Am Hauptstrom der Elbe verschieben sich die Streuung um die mittlere Strömungsgeschwindigkeit um -0,05 (Punkt 2) bis 0,05 m/s (Punkt 3) im Bauzustand und zwischen -0,09 (Punkt 2) bis 0,01 m/s (Punkt 4) im Endzustand (Abbildung 6.19).

In den Prielen ändern sich die maximalen Strömungen um -0,02 (Punkt 11) bis 0,01 m/s (Punkt 8) zwischen Bau- und Istzustand und zwischen 0,0 und 0,05 m/s (Punkt 13) zwischen End- und Istzustand. Die Streuung um die mittlere Strömungsgeschwindigkeit ändert sich in den Prielen nicht oder nur marginal (Abbildung 6.19).

Folglich erfahren insbesondere am Hauptstrom der Elbe gelegene Standorte des Wasserfenchels unter normalen Tiden und mittleren Abflüssen durch eine Veränderung der Strömungen. Am Punkt 2 ist das vorrangig eine Abnahme der Strömungen mit kleineren Streubreiten, am Punkt 3 und 4 eine Zunahme der Strömungen mit größeren Streubreiten. Die Wasserstände ändern sich nicht bzw. nur marginal am Hauptstrom der Elbe und den Prielen der Elbe und sinken bei Tnw etwas weiter ab.

6.5.2 Standorte des Schierlings-Wasserfenchels unter dem Hochwasserereignis HW2013

Für das Hochwasserereignis ergeben sich sowohl am Hauptstrom der Süderelbe als auch in den Prielen keine nennenswerten Änderungen der maximalen Wasserstände rund um das Thw.

Die Bereiche 5, 10 und 13 fallen in allen Zuständen trocken. Die minimalen Wasserstände rund um das Tnw verringern sich zum Bau- und zum Endzustand am Hauptstrom der Elbe um -1 bis 1 cm, in den Prielen um maximal -2 cm. In allen anderen Bereichen verändern sich Streuung um den mittleren Wasserstand nicht (Abbildung 6.20).

Die maximalen Strömungsgeschwindigkeiten verändern sich am Hauptstrom der Elbe zwischen Ist- und Bauzustand um -0,3 (Punkt 2) bis 0,17 m/s (Punkt 3), zwischen Ist- und Planzustand um -0,66 (Punkt 2) bis 0,01 m/s (Punkt 1). Die Streuung um die mittlere Strömungsgeschwindigkeit ändert sich am Hauptstrom um -0,08 (Punkt 2) bis 0,02 m/s (Punkt 3) im Bauzustand und -0,17 (Punkt 2) und 0,0 m/s im Planzustand (Abbildung 6.20).

In den Prielen ändern sich die maximalen Strömungen um -0,04 (Punkt 13) bis 0,01 m/s (Punkt 12) zwischen Bau- und Istzustand und zwischen -0,04 (Punkt 8) und 0,04 m/s (Punkt 9) zwischen Plan- und Istzustand. Die Streuung um die mittlere Strömungsgeschwindigkeit ändert sich in den Prielen nicht nennenswert.

Auch bei Hochwasser erfahren vorrangig die am Hauptstrom der Elbe gelegene Standorte des Wasserfenchels durch eine Veränderung der Strömungen. Am Punkt 2 ist das vorrangig eine Abnahme der Strömungen mit kleineren Streubreiten, am Punkt 3 und 1 eine Zunahme der Strömungen mit größeren Streubreiten. Die Wasserstände ändern sich nicht bzw. nur marginal am Hauptstrom der Elbe und den Prielen der Elbe und sinken bei Tnw etwas weiter ab.

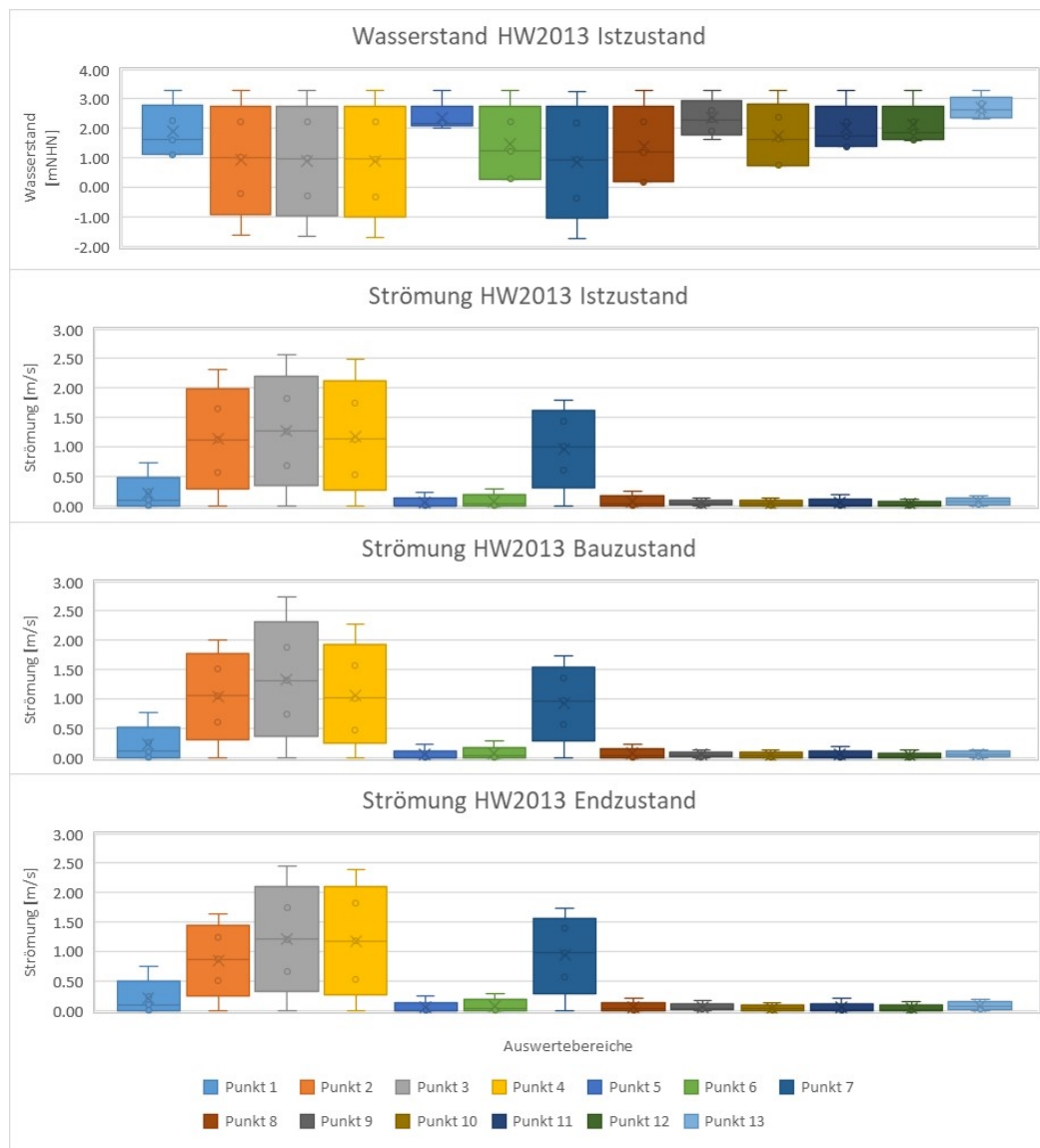


Abbildung 6.20: Statistische Auswertung des Wasserstandes im Istzustand und Strömungen an den Standorten des Schierling-Wasserfenchels für das HW2013-Ereignis und den Ist-, Bau- und Endzustand

6.5.3 Standorte des Schierlings-Wasserfenchels unter der Bemessungsturmflut SFBEMFQ2600

Unter der Bemessungsturmflut SFBEMFQ2600 ergeben sich zum Bau- und Endzustand sowohl am Hauptstrom der Süderelbe als auch in den Prielen keine Änderungen der maximalen Sturmflutscheitelwasserstände.

Die maximalen Strömungsgeschwindigkeiten am Hauptstrom der Elbe verändern sich zwischen Ist- und Bauzustand um -0,07 (Punkt 7) bis 0,37 m/s (Punkt 3), zwischen Ist- und Endzustand um -0,21 (Punkt 3) bis 0,02 m/s (Punkt 1). Die Streuung um die mittlere Strömungsgeschwindigkeit ändern sich am Hauptstrom um -0,03 bis 0,12 m/s im Bauzustand und -0,02 und 0,01 m/s im Endzustand.

In den Prielen ändern sich die maximalen Strömungen um -0,16 (Punkt 5) bis 0,07 m/s (Punkt 9) zwischen Bau- und Istzustand und zwischen 0,0 und 0,09 m/s (Punkt 13) zwischen End- und Istzustand. Die Streuung um die mittlere Strömungsgeschwindigkeit

ändert sich in den Prielen um -0,03 bis 0,01 m/s im Bauzustand und um 0,0 bis 0,01 m/s im Endzustand.

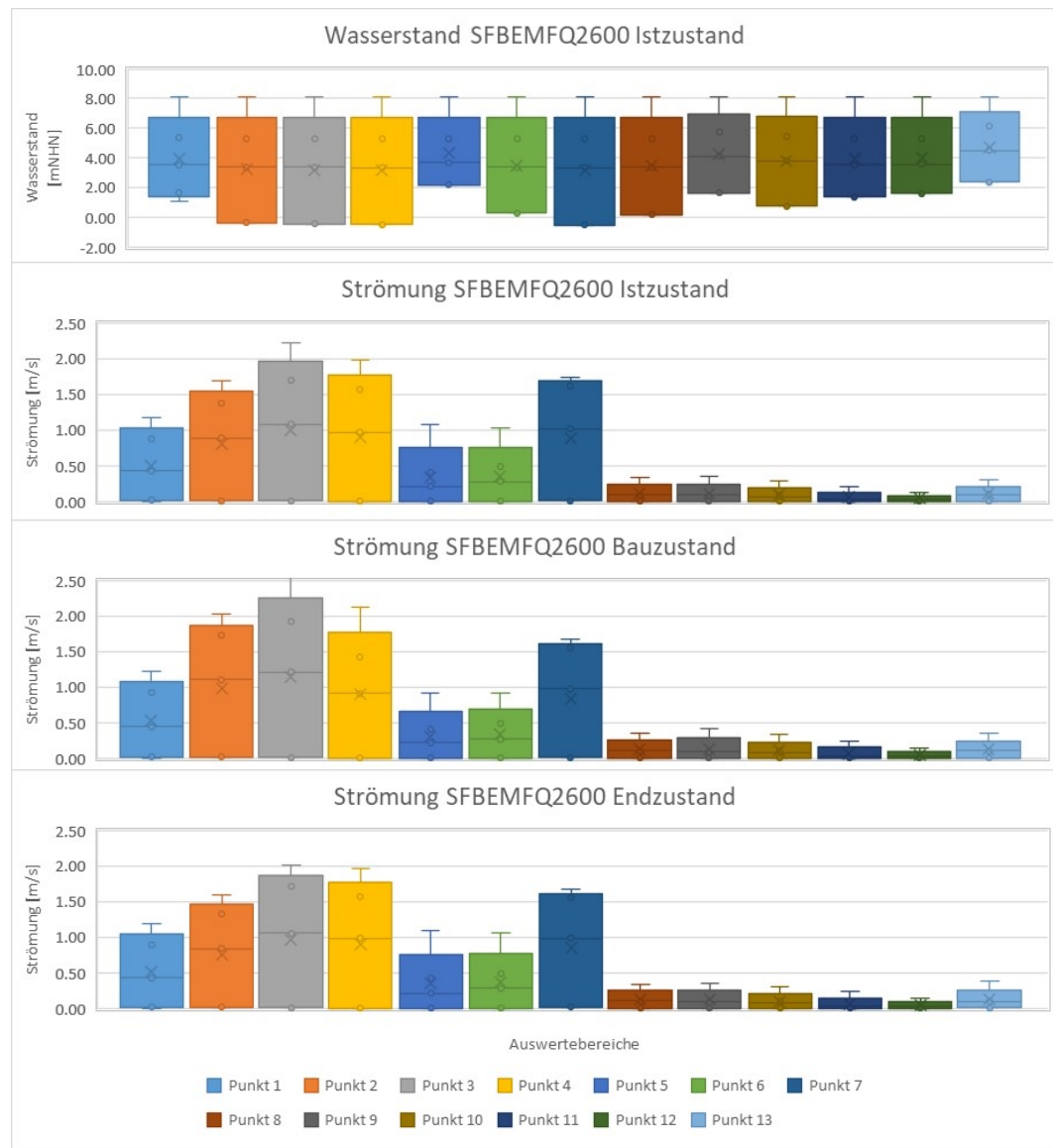


Abbildung 6.21: Statistische Auswertung des Wasserstandes im Istzustand und Strömungen an den Standorten des Schierling-Wasserfenchels für das SFBEMFQ2600-Ereignis und den Ist-, Bau- und Endzustand

Änderungen unter der Bemessungsturmflut treten nicht nur an Standorten des Wasserfenchels am Hauptstrom der Elbe mit einer Zunahme im Bauzustand und einer Abnahme im Endzustand (Punkt 2 und 3), sondern auch an Standorten in den Prielen (Punkt 5) auf. Die Sturmflutscheitelwasserstände ändern sich nicht.

6.6 Eisstau und -abfluss

In Kap. 2.4 und 2.5 wurden die Grundlagen zur Eisbildung in der Elbe zur Bestimmung der Eisdicke dargelegt. Im vorliegenden Abschnitt werden für die Brücke jeweils die Gefährdungen infolge Eisstaus untersucht. Bei dem Nachweis des Eisstaus werden zwei Eisversetzungen untersucht:

- Der Eisstau zwischen der Wasserspiegellage und der Brückenunterkante im sogenannten Lichtraum (Kap. 6.6.1).
- Der Eisstau zwischen zwei vertikalen Baustrukturen z.B. zwischen zwei Pfeilern (Kap. 6.6.2)

6.6.1 Eisstau im Lichtraum

Nach Plagemann (1988) können Eisversetzungen des gesamten Lichtraumquerschnittes erwartet werden, wenn folgende Formel gilt:

$$h \leq \frac{2}{3} \cdot t \text{ bzw. } \frac{(h + H)}{2} \quad (\text{Gl. 2})$$

mit den zu berücksichtigenden Parametern t als Wassertiefe, h und H als lichte Höhe gemäß Abbildung 6.22.

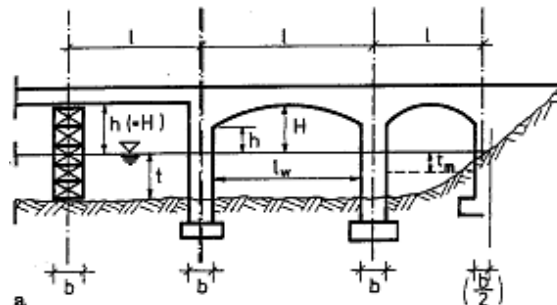


Abbildung 6.22: Brückenparameter zur Abschätzung einer möglichen Eisversetzung, entnommen aus Plagemann (1988)

Diese Prüfung wurde in Tabelle 6.1 für die Abmessungen der Süderelbbrücke und den Wassertiefen der untersuchten Ereignisse durchgeführt. In der Prüfung wurde von einer mittleren Sohlentiefe in der Brücke von -7 mNHN und einer Brückenunterkante bei +10,86 mNHN ausgegangen.

Tabelle 6.1: Prüfung eines möglichen Eisstaues anhand der Wasserstände, Wassertiefen und lichten Höhen während der untersuchten Szenarien, (*) Bemessungswert gemäß amtlicher Anzeiger Nr. 63, 2013). Grün markiert = Wert bleibt unter dem Grenzwert, gelb markiert = Wert nahe dem Grenzwert, rot markiert = Wert über dem Grenzwert.

Szenario	Wasserstand [mNHN]	Wassertiefe t [m]	Lichte Höhe h [m]	Prüfung $h \leq 2/3 t$
MThw (Planungsunterlagen, Schüssler Plan, 2020)	2,10	9,1	8,8	6,1
Hochwasserereignis HW2013	3,08	10,1	7,8	6,7
Bemessungssturmflut SFBEMFQ2600	8,17	15,2	2,7	10,1

Eine Kombination aus dem Bemessungssturmflutereignis mit Eisabfluss ist gemäß Tabelle 6.1 kritisch für einen möglichen Eisstau zwischen der Wasseroberfläche und der Fahrbahnplatte, aber statistisch eher unwahrscheinlich. Hochwasserereignisse ab einem HQ50 (was ca. dem HW2013 entspricht) und seltener sind in Kombination mit Eisabfluss noch nicht als kritisch für einen möglichen Eisstau zwischen der Wasseroberfläche und der Fahrbahnplatte einzustufen. Auch ein MNQ-Abfluss und das MThw ist in Kombination mit einem Eisabfluss für die Süderelbbrücke unkritisch.

Erst ab Wasserständen über +3,75 mNHN an der Süderelbbrücke ist mit einer Gefährdung zu rechnen. Eine Verhinderung des Eisstaus durch ein Aufbrechen durch die Eisbrecher der HPA ist in diesem Fall notwendig.

Eine mögliche Eisaufschiebung an Bauwerken ist zudem mithilfe der Abbildung 6.23 nach Plagemann (1988) unter Verwendung der Wassertiefen und mittleren Fließgeschwindigkeiten möglich. In Bezug auf die Hydrodynamik an der Süderelbbrücke ist eine Eisaufschiebung aufgrund der vorherrschenden Strömungen von 1,0 bis 2,5 m/s und der Wassertiefen von 9,1 bis 15,2 m als „wahrscheinlich möglich“ (markierter Bereich in Abbildung 6.23) zu beschreiben. Allerdings liegen die vorherrschenden Wassertiefen der Elbe außerhalb des Diagrammes, so dass eine Aussage nur begrenzt möglich ist.

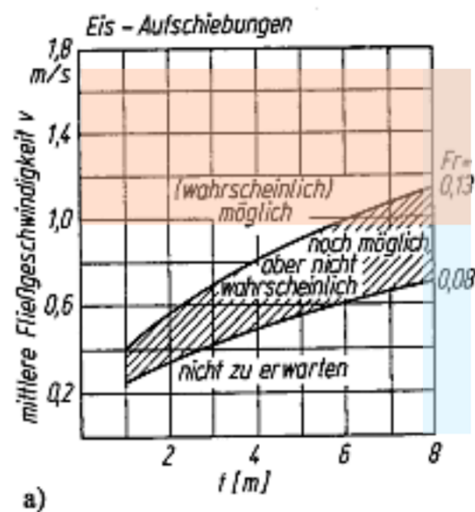


Abbildung 6.23: Mögliche Eisaufschiebung in Abhängigkeit der mittleren Fließgeschwindigkeit und der Wassertiefe (links) nach Plagemann (1988), entnommen aus Schuh (2011).

6.6.2 Eisstau zwischen Pfeilern

Die entwickelte Berechnung des Eisstaus von Alexy (1998), vgl. Kap. 2.4, kann analog zu DHI WASY (2020) auch für die Süderelbbrücke angesetzt werden. Dem Bau- und Endzustand lagen die Abmessungen in Abbildung 6.24 zugrunde.



Abbildung 6.24: Maße der Pfeileranordnung im Endzustand (rechts) und der Pfeileranordnung im Bauzustand (links) an der Süderelbbrücke.

Die Eisstauberechnung erfolgte mit der Formel nach Alexy (1998) bzw. Carstensen (2008).

$$C = \frac{Q_E}{v \cdot b} = f\left(\frac{L_S}{w_L}\right) \quad (\text{Gl. 2})$$

mit:

C	Schollenkonzentration	[-]
Q_E	Eisdurchsatz	[m ² /s]
v	Mittlere Fließgeschwindigkeit	[m/s]
b	Wasserspiegelbreite zwischen den Pfeilern	[m]
L_S	Seitenlänge einer idealisierten, quadratischen Eisscholle	[m]
w_L	Maßgebende lichte Weite im Brückenbereich	[m]

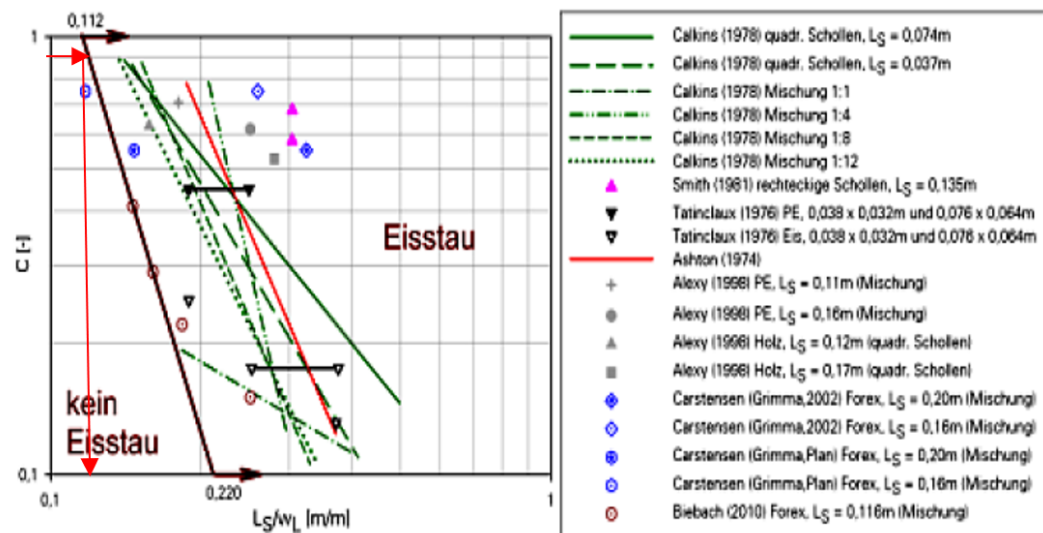


Abbildung 6.25: Eisstau Abschätzung in Abhängigkeit von Eisschollengröße, -konzentration und lichter Weite einer Brücke (Carstensen, 2010)

Für die Süderelbbrücke ergab sich nach Annahme der Schollengröße $L_S = 1$ m und nach Auslesen des Verhältnisses L_S/w_L je Schollenkonzentration C aus Abbildung 6.25 eine lichte Weite von 4,5 m bei Schollenkonzentration $C = 0,1$ bis 8,9 m bei Schollenkonzentration $C = 1$. Fällt die lichte Weite größer als 8,9 m aus, ist also kein Eisstau zu erwarten. Liegt die lichte Weite unter 4,5 m, ist mit Sicherheit von einem Eisstau auszugehen.

Während der Bauphase könnte somit gemäß Carstensen (2010) mit der Schollengröße $L_S = 1$ m im Bereich zwischen den alten Pfeilern und den Spundwandkästen im nördlichen und im mittleren Bereich (lichte Weite = 7,81 m und 7,53 m) Eisstau auftreten (Tabelle 6.2, vorletzte Spalte). Auch gemäß der Kriterien nach Plagemann (1988) (Tabelle 6.2, letzte Spalte) ergeben sich Eisaufschiebungen, die vor allem in den schmalen Zwischenbereichen des Bauzustandes infolge großer Pfeilerbreite und kleiner lichter Weite entstehen.

Tabelle 6.2: Auswertung des Eisstaus und der Eisaufschiebung im Bauzustand

Bereiche im Bauzustand	Pfeilerbreite d [m]	Pfeilerabstand w_L [m]	Schollengröße L_S/w_L [m] (*)	Grenzwerte d/L [-] (**)
Bereich zw. Pfeiler 60-50	10.5	36.85	0.05	0.28
Bereich Pfeiler 50 - alter Pfeiler Nord	10.5	7.81	0.13	1.34
Bereich alter Pfeiler Nord - alter Pfeiler Mitte	4.0	100.18	0.01	0.04
Bereich alter Pfeiler Mitte - Pfeiler 40	4.0	7.53	0.13	0.53
Bereich 40-30	10.5	55.0	0.02	0.19
Bereich Pfeiler 30 - alter Pfeiler Süd	4.0	16.43	0.06	0.24
Bereich alter Pfeiler Süd - Pfeiler 20	10.5	34.58	0.03	0.30
Bereich 20-10	10.5	9.84	0.10	1.07

Kriterien für (*) nach Carstensen (2010), Schollgröße $L_S = 1$ m angenommen

= Eisstau aufgrund der großen lichten Weite für $L_S/w_L < 0,112$ nicht möglich

= Eisstau aufgrund der lichten Weite für $0,112 < L_S/w_L < 0,22$ möglich

= Eisstau aufgrund der lichten Weite mit $L_S/w_L > 0,22$ möglich

Kriterien für (**) nach Plagemann (1988)

= Eisaufschiebung aufgrund des kleinen d/L Verhältnisses $< 0,1$ und der großen Wassertiefe nicht möglich

= Eisaufschiebung aufgrund des $0,1 < d/L < 0,3$ Verhältnisses und je nach Wassertiefe möglich

= Eisaufschiebung aufgrund des großen d/L über 0,3 Verhältnisses möglich



Abbildung 6.26: Auswertung eines möglichen Eisstaus und einer Eisaufschiebung an der Süderelbbrücke im Bauzustand, Details siehe Tabelle 6.2.

Der Endzustand ist sowohl gemäß Carstensen (2010) mit der Schollengröße $L_s = 1$ m als auch gemäß der Kriterien nach Plagemann (1988) nicht durch Eisaufschiebungen oder Eisstau gefährdet. Ursächlich sind hierfür nicht nur die größeren lichten Weiten, sondern auch der geringere Pfeilerdurchmesser (Tabelle 6.3).

Tabelle 6.3: Auswertung des Eisstaus und der Eisaufschiebung im Endzustand

Bereiche im Endzustand	Pfeilerbreite d [m]	Pfeilerabstand w_L [m]	Schollengröße L_s/w_L [m] (*)	Grenzwerte d/L [-] (**)
Bereich zw. Pfeiler 60-50	4.0	71.13	0.03	0.06
Bereich zw. Pfeiler 50-40	4.0	130.00	0.01	0.03
Bereich zw. Pfeiler 40-30	4.0	61.5	0.02	0.07
Bereich zw. Pfeiler 30-20	4.0	61.51	0.02	0.07
Bereich zw. Pfeiler 20-10	4.0	44.10	0.02	0.09

Kriterien für (*) nach Carstensen (2010), Schollengröße $L_s = 1$ m angenommen

= Eisstau aufgrund der großen lichten Weite für $L_s/w_L < 0,112$ nicht möglich

= Eisstau aufgrund der lichten Weite für $0,112 < L_s/w_L < 0,22$ möglich

= Eisstau aufgrund der lichten Weite mit $L_s/w_L > 0,22$ möglich

Kriterien für (**) nach Plagemann (1988)

= Eisaufschiebung aufgrund des kleinen d/l Verhältnisses $< 0,1$ und der großen Wassertiefe nicht möglich

= Eisaufschiebung aufgrund des $0,1 < d/l < 0,3$ Verhältnisses und je nach Wassertiefe möglich

= Eisaufschiebung aufgrund des großen d/l über $0,3$ Verhältnisses möglich



Abbildung 6.27: Auswertung eines möglichen Eisstaus und einer Eisaufschiebung an der Süderelbbrücke im Endzustand, Details siehe Tabelle 6.3

6.7 Kolkbildung und -schutz

Folgt im Endbericht

7 Lokales Modell des Pfeilerstaus

Ein 3D CFD-Modell (numerische Strömungsmechanik, Computational Fluid Dynamics) wurde für die genaue Berechnung des Pfeilerstaus in unmittelbarer Umgebung des Pfeilers angewendet. Der Pfeilerstau wurde am Pfeiler Nr. 40 simuliert (Abbildung 7.1), wo die Anströmung am größten ist. Das CFD-Modell wurde mit der OpenFOAM-Software Version 20.12 (www.openfoam.com) zur Steady-State-Modellierung der Ebbströmung mit den Navier-Stokes Gleichungen aufgebaut. Im Unterschied zum regionalen Modell basiert das CFD-Modell auf einer volldynamischen Druckverteilung unter Einbeziehung der hydrodynamischen Effekte.

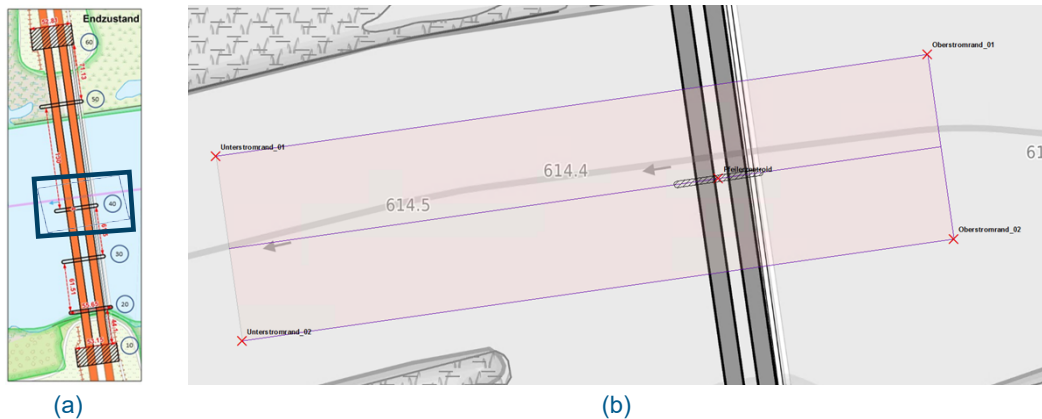
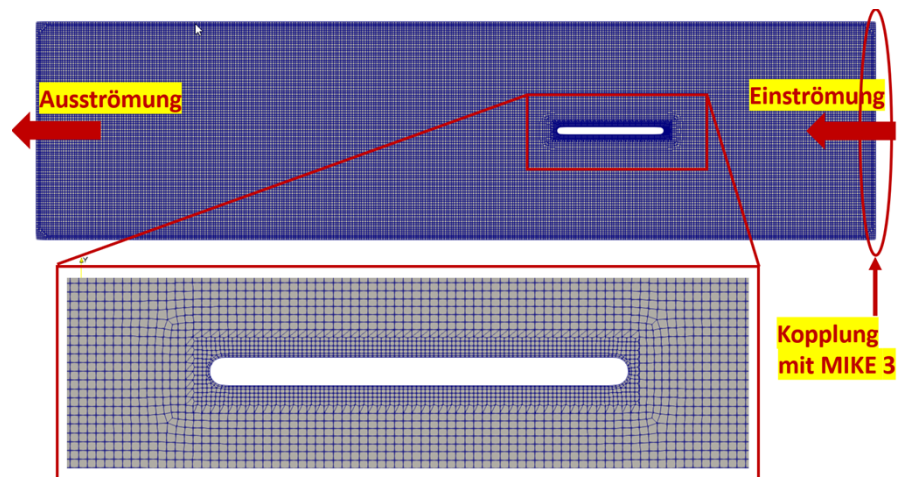


Abbildung 7.1: Lokales CFD-Modell für den Pfeilerstau am Pfeiler Nr. 40: (a) Lage des Pfeilers Nr. 40 und (b) die Ränder des Bereiches für das CFD-Modells

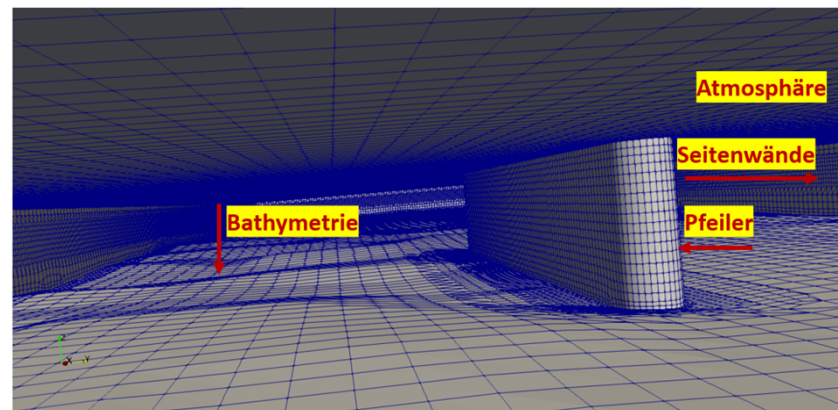
Das numerische Netz des CFD-Modells wurde in OpenFOAM mit *cfMesh* erstellt (Abbildung 7.2). Der Boden wurde von der vorliegenden Bathymetrie als STL-Datei vorbereitet. Die Boden-STL-Datei bildete den unteren Rand des numerischen Bereichs. Die numerischen Zellen (maximale Größe von ~0,84 m) wurden um den Pfeiler verfeinert (maximale Größe von ~0,42 m), um die Geometrie des Pfeilers besser abzubilden und um die Strömung um den Pfeil genauer zu simulieren. Darüber hinaus wurden Grenzschichten zwischen Pfeiler und Wasser am Pfeilerrand betrachtet, um die Genauigkeit der Grenzschichtströmung zu erhöhen.

Die freie Oberfläche wurde mit der VoF-Methode (Volume-of-Fluid) modelliert, dadurch wurde der Volumenanteil einer Phase (Luft oder Wasser) numerischer Zellen mit Werten zwischen 0 (voller Luft) und 1 (voller Wasser) bezeichnet.

Die Dimensionen, Koordinaten und Anfangsbedingungen werden in der Abbildung 7.3 gezeigt. Das CFD-Modell umfasst einen Bereich um den Pfeiler von ca. 445,2 x 114,3 m. Das CFD-Modell wurde am rechten Rand mit dem hydrodynamischen MIKE3-Modell gekoppelt. Das heißt, die berechneten Strömungsgeschwindigkeiten und die Wassertiefe im MIKE3-Modell am rechten Rand (Ebbströmungseingang) wurden als Randbedingungen für das CFD-Modell interpoliert und gesetzt, wobei die maximale Strömungsgeschwindigkeit am Rand 2,9 m/s beträgt.

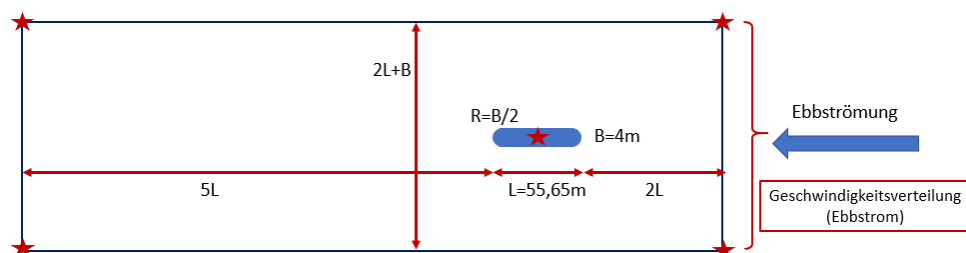


(a)



(b)

Abbildung 7.2: Das numerische Netz des CFD-Modells: (a) eine Draufsicht des Netzes mit der Verfeinerung und Schichtung am Rand des Pfeilers mit den Dimensionen des Bereiches von 445,2 x 114,3 m, (b) eine 3D-Ansicht der Ränder des Modells



Parameter	Wert
Pfeilerzentroid	567895.606 5925525.354
Oberstromrand_01	568025.159 5925602.136
Oberstromrand_02	568041.497 5925488.000
Unterstromrand_01	567600.789 5925424.915
Unterstromrand_02	567584.451 5925539.051
Wasserstand zum Ebbstromzeitpunkt	-0.003m beim Hochwasserereignis (14.06.2013 14:35 Uhr)
Strömungsgeschwindigkeit	$U = -2.23591 \text{ m/s}$, $V = 0.18 \text{ m/s}$ (Anfangsbedingungen)
Turbulenzmodell	k-omega Shear Stress Transport (SST) mit Rautiefe von Beton = 0,005m

Abbildung 7.3: Eine Skizze des CFD-Modells: Dimensionen, Koordinaten und Anfangsbedingungen (Mittelwert der Strömungsgeschwindigkeiten am Rand wird hier gegeben, die maximale Strömungsgeschwindigkeit am Rand beträgt 2,9 m/s)

Das simulierte Szenario war eine Ebbströmung mit einer sehr hohen maximalen Strömungsgeschwindigkeit von 2,9 m/s aus dem Zeitraum des HW2013 am 14.06.2013 um 14:35 Uhr kurz vor dem Tnw (15:10 Uhr). Der Pfeilerstau wurde als der Wasserhöhenunterschied zwischen flussaufwärts und flussabwärts definiert (Abbildung 7.4). Der Wasserstand flussaufwärts wurde ca. 1-2 m vor dem Pfeiler der Wasserstand flussabwärts ca. 1-2 m hinter dem Pfeiler extrahiert (Abbildung 7.5). Der berechnete Pfeilerstau erreichte einen Betrag von 0,53 m. Die Reynolds-Zahl der Simulation ist sehr hoch, deswegen erreichte die Simulation keinen Steady-State. Steady-State bezeichnet eine stationäre Simulation, bei der eine Lösung berechnet wird, die sich im Laufe der Zeit nicht ändert.

$$Re = \frac{UL}{\nu} = \frac{2,243 \times 55,65}{10^{-6}} = 1,24 \times 10^8$$

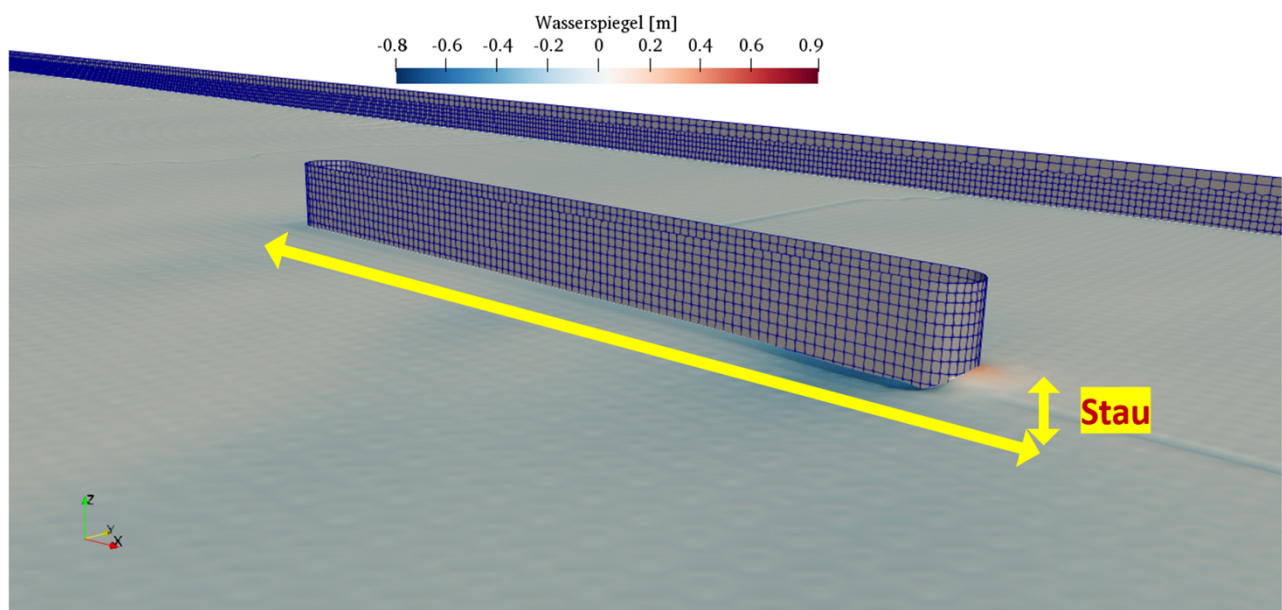


Abbildung 7.4: 3D-Ansicht der Wasseroberfläche.

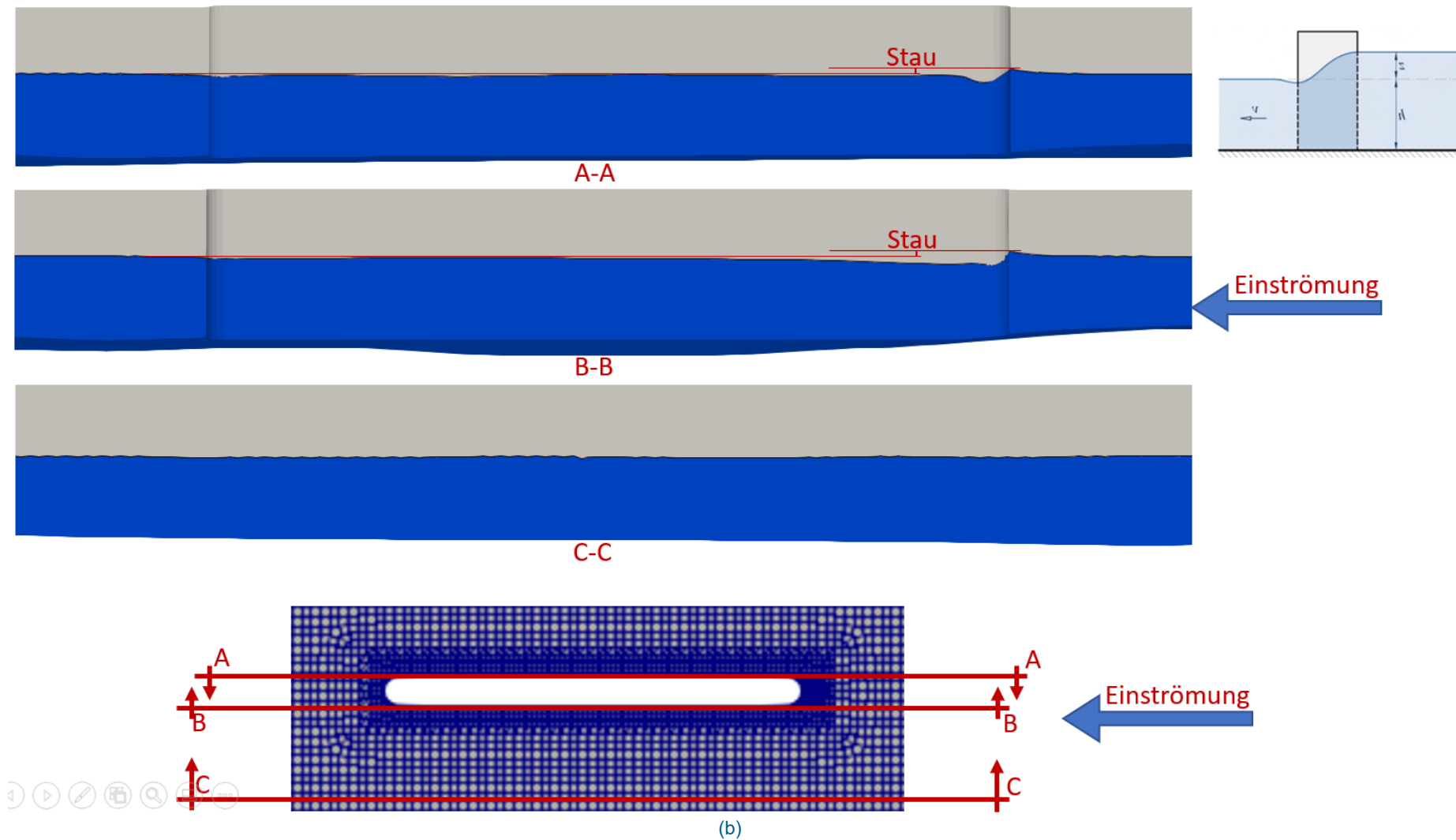
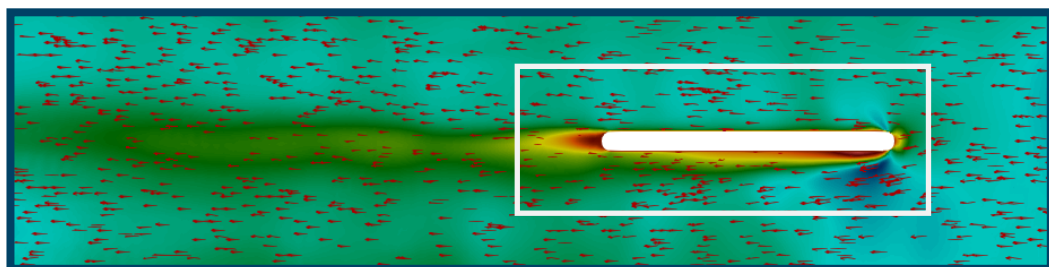


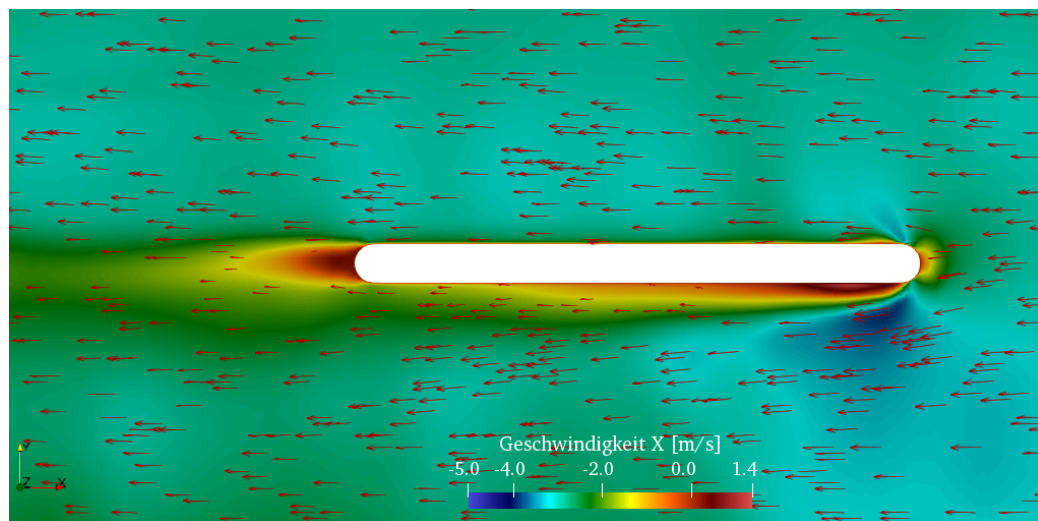
Abbildung 7.5: Der Pfeilerstau der CFD-Simulation: (a) und (b) die Querschnitte A-A, B-B und C-C. Die roten Pfeile zeigen die Blickrichtung der Querschnittsprofile an.

Der lokale Pfeilerstau am 14.06.2013 um 14:35 Uhr (Ebbstrom) wurde von diesem CFD-Modell als 0,53 m berechnet.

Ein Querschnitt der Strömungsgeschwindigkeit und die Nachlaufströmung des Pfeilers zeigt ein unsymmetrisches Strömungsfeld im direkten Umfeld des angeströmten Pfeilers (Abbildung 7.6). Die unsymmetrische Strömung entsteht aufgrund der Bathymetrie und der variablen Verteilung der Eingangsgeschwindigkeit in das CFD-Modell. Nördlich des Pfeilers sind Strömungsgeschwindigkeiten von ca. 2 bis 3 m/s zu beobachten, südlich des Pfeilers sind niedrigere Strömungsgeschwindigkeiten von 0 bis 2 m/s zu beobachten. Westlich hinter dem angeströmten Pfeiler ist ein deutlicher Strömungsschatten (ca. 20 m lang) zu erkennen. Wesentliche Querströmungen zur Fahrrinne sind nicht zu erkennen.



(a)



(b)

Abbildung 7.6: Ein Querschnitt der Strömungsgeschwindigkeit (auf Höhe -1,00 m) und die Nachlaufströmung des Pfeilers. Die Strömung ist wegen der Bathymetrie und die unsymmetrisch. Die Dimension der Box des Untersuchungsgebietes a) beträgt 445,2 x 114,3 m.

Die Ergebnisse der CFD-Studie zum Pfeilerstau wiesen einen höheren Pfeilerstau aus, als mit dem MIKE3-Modell berechnet wurde. Dieser Unterschied lag zum einen an Modellansatz, -größe und -auflösung. Das MIKE3-Modell ist räumlich wie zeitlich gröber aufgelöst, der berechnete Pfeilerstau daher eine Mittelung aus mehreren Zeitschritten (20 Sek) und einer räumlichen Fläche (ca. 25-36 m²). Der extrahierte Wasserstand zur Berechnung des Pfeilerstaus im MIKE3-Modell ist ein Mittelwert, der für die Zellgröße von ca. 25-36 m² und für den Abstand bis ca. 6 m vor und ca. 10 m hinter dem Pfeiler gültig ist. Die Mittelung des Wasserstands und der größere Abstand zum Pfeiler führen zu einem Durchschnittswert des Pfeilerstaus über diese Flächen. Das CFD-Modell hingegen

berechnet den Wasserstand für einen einzigen Zeitschritt in einem räumlich höher aufgelösten Modell (Zellengröße von 0,84 m). Dadurch ist eine genauere, jedoch nur für diesen Zeitpunkt und sehr lokal am Pfeiler gültige Berechnung des Pfeilerstaus möglich.

Die Ergebnisse der CFD-Studie zur Strömung bestätigten die Ergebnisse des MIKE3-Modells in Bezug auf den Strömungsschatten hinter dem Pfeiler mit einer Länge von ca. 20 m bei Ebbstrom im HW2013. Ebenso zeigte das CFD-Modell keine wesentlichen Querströmungen zu den Pfeilern. Da das Strömungsfeld im Allgemeinen in beiden Modellen ähnlich abgebildet wurde, konnte davon ausgegangen werden, dass die allgemeine Hydrodynamik im MIKE3-Modell auch in Pfeilernähe korrekt abgebildet wurde. Relevante Ungenauigkeiten durch das Ausstanzen der Brückenpfeiler im MIKE3-Modell werden nicht angenommen, da die grundlegenden Erkenntnisse zur Strömung bestätigt wurden und lediglich sehr lokal begrenzte Abweichungen zu erwarten sind. Eine Anpassung der Erkenntnisse aus dem MIKE3-Modell musste daher nicht erfolgen.

8 Zusammenfassung

Im Fokus des Strömungsgutachtens für die Süderelbbrücke stand die Fragestellung: Welche Wirkungen ergeben sich durch die geplante Brücke auf die Themen Eisstau, Kolkbildung, Strömungen und Wasserstände, Erosionen an den Böschungen, schadlose Hochwasserabfuhr und u.a. nautische Aspekte.

Die numerische Grundlage zur Untersuchung bildete ein hydronumerisches 3D-Modell zur Tideelbe. Für den aktuellen Anwendungsfall wurde auf Basis der Modelle aus DHI WASY (2020) dieses im Fokusbereich aktualisiert, verfeinert und lokale Strukturen eingebunden.

Das Strömungsgutachten wurde auf Grundlage von drei Ereignissen erstellt: ein MNQ-Szenario mit mittleren Tideverhältnissen aus dem September 2017, ein Binnenhochwasserereignis aus dem Juni 2013 (HW2013) und das Bemessungsturmflutszenario (SFBEMFQ2600). Das Bemessungsturmflutszenario für die Stadt Hamburg basiert auf der Springtide des 03.01.1976 und bindet den modifizierten Windstau und einen Abfluss im Oberwasser von 2600 m³/s (BAW, 2018) ein.

Vor Analyse der hydrodynamischen Wirkung der Brücke erfolgte die Kalibrierung der numerischen Modelle. Für die Kalibrierung standen gemessene bzw. von der BAW simulierte Wasserstände u.a. an den Pegeln Schulau, St.Pauli, Harburg und Bunthaus zur Verfügung.

Als Fazit zur Kalibrierung wurde festgehalten, dass das MNQ-Ereignis gute Übereinstimmungen in den Scheitelwerten und in der Dynamik der gemessenen und simulierten Tidewasserstände zeigte. Die Modellgüte für das MNQ-Ereignis wurde daher als gut eingestuft. Das Hochwasserereignis HW2013 zeigte im Tideniedrigwasser merkliche Abweichungen am Pegel Schöpfstelle (Norderelbe, vgl. DHI WASY 2020). Die Modellgüte am Pegel Harburg, der hier maßgebender ist für die Analysen in der Süderelbe, war für alle Wasserstände, wie auch an den anderen Elbpegeln, gut. Die Modellgüte wurde aufgrund der höheren Abweichungen bei Tnw am Pegel Schöpfstelle als mäßig und für alle anderen Pegel als gut eingestuft.

Die Kalibrierung des Sturmflutszenarios ergab eine gute Übereinstimmung der Dynamik, aber eine Unterschätzung im Sturmflutscitel mit ca. -6 cm an den Pegeln St.Pauli und Bunthaus. Es wird empfohlen den Bemessungswasserstand aus den Vorgaben des amtlichen Bemessungswasserstandes aus Tabelle 2.2 zu benutzen.

Der Auswirkungsprognose für die Themen Eisstau, Kolkbildung, Strömungen und Wasserstände, Erosionen an den Böschungen, schadlose Hochwasserabfuhr und u.a. nautische Aspekte kann wie folgt zusammengefasst werden.

Aus nautischer Sicht ist vor allem die Änderung der Durchfahrtsbreiten und Änderungen in den Strömungen bzw. der Wasserstände in dieser Öffnung maßgebend.

Für den Bauzustand bleibt die heutige Durchfahrtsbreiten zwischen den Pfeilern bei ca. 100 m erhalten. Im Endzustand vergrößert sich die Durchfahrtsbreite sogar auf 130 m.

Für mittlere Tiden und Abflüsse kommt es im Bauzustand durch den stärkeren Verbau im Brückenbereich zur Erhöhung der Strömungsgeschwindigkeit bei Ebbstrom um +0,3 m/s und bei Flutstrom um +0,3 m/s. Im Endzustand ändert sich bei Ebbstrom die Strömungsgeschwindigkeit kaum, bei Flutstrom nimmt sie um ca. -0,1 m/s ab, da das Querprofil sich etwas weiter öffnet. Querströmungen, die die Schifffahrt in der Fahrrinne im Bereich der Brücke gefährden, wurden nicht identifiziert. Die Änderungen der Tidewasserstände bleiben gering und vor allem lokal begrenzt auf den Pfeilerstau. Dieser

fällt bei Tnw merklicher aus und beträgt im Endzustand 1 bis 2 cm, für den Bauzustand 1 bis 3 cm.

Für den Binnenhochwasserfall, hier untersucht am HW2013 (entspricht ca. einem HQ50), blieb die Flutströmung aus. Die baubedingte Erhöhung der Ebbströmung fällt durch die höhere Intensität von ca. 2 bis 3,6 m/s ebenfalls höher aus. Die Erhöhung der Strömungsgeschwindigkeit bei Ebbstrom liegt im Bauzustand bei +0,5 m/s. Im Endzustand nimmt die Ebbströmungsgeschwindigkeit leicht um ca. -0,2 m/s ab, da das Querprofil sich weiter öffnet. Auch hier sind keine Querströmungen, die die Schifffahrt in der Fahrrinne im Bereich der Brücke gefährden, zu erwarten. Die Änderungen der Tidewasserstände bleiben gering und lokal begrenzt auf den Pfeilerstau. Dieser fällt bei Tnw merklicher aus und liegt im Endzustand bei 3 bis 10 cm, für den Bauzustand bei 10 bis 25 cm.

Die Bemessungsturmflut SFBEMQ2600 wird im Scheitelablauf von hohen Ebbströmungen von 1,5 bis 2,3 m/s (Istzustand) geprägt. Für den Bauzustand erhöhen sich die Strömungen im Brückenbereich um bis zu 0,7 m/s. Im Endzustand bleiben die Ebbströmungen auf dem Niveau des Istzustandes. Der Sturmflutscheitel wird durch den Bauzustand marginal erhöht. Der Sturmflutscheitel wird durch den Bauzustand marginal verändert und liegen unter 2 mm im Bauzustand, im Endzustand bei 0 mm. Der lokale Pfeilerstau während des Sturmflutauflaufs liegt für den Ist- und Endzustand bei < 1 cm, im Bauzustand bei 1 bis 2 cm. Während des Sturmflutscheitels beläuft sich der Pfeilerstau für alle Bauphasen auf < 1 cm.

Mit einem lokalen CFD-Modell des Pfeiler 40 wurden die Berechnungen der Strömung und des Wasserstands an diesem Pfeiler im Endzustand für den maximalen Ebbstrom (2,9 m/s) im HW2013 durchgeführt. Die Ergebnisse der CFD-Studie bestätigen die Ergebnisse des MIKE3-Modells in Bezug auf den Strömungsschatten hinter dem Pfeiler mit einer Länge von 20 m bei Ebbstrom im HW2013. Ebenso zeigt das CFD-Modell keine wesentlichen Querströmungen zu den Pfeilern. Der aus dem CFD-Modell berechnete Pfeilerstau für den Zeitpunkt der maximalen Ebbströmung beträgt lokal 0,53 m. Der vom CFD-Modell berechnete Pfeilerstau gilt nur sehr lokal an dem Pfeiler und nur für den Zeitpunkt der Auswertung.

Relevante Ungenauigkeiten durch das Ausstanzen der Brückenpfeiler im MIKE3-Modell werden nicht angenommen, da die grundlegenden Erkenntnisse zur Strömung bestätigt wurden und lediglich sehr lokal begrenzte Abweichungen zu erwarten sind. Eine Anpassung der Erkenntnisse aus dem MIKE3-Modell muss daher nicht erfolgen.

Wie sich bereits aus den Änderungen der Strömungen ableiten lässt, wird insbesondere der nördliche Brückenbereich im Bauzustand von einer erhöhten Sohlschubspannungen und folglich einem erhöhten Erosionsdruck auf die Sohle und auch auf die Böschungen geprägt. In diesem Bereich sind von einer Zunahme des Geschiebetransports und ggf. auch eine leichte erhöhten Erosionstendenz auszugehen. Gleichzeitig bewirkt der erhöhte Verbauungsgrad eine reduzierte Sohlschubspannung im südlichen Böschungsbereich, also eine Abnahme der Erosionsneigung dort. Der Erosionsdruck im Brückenquerschnitt lässt im Endzustand wieder nach und erreicht dann wieder das Niveau des Istzustandes. Im Mittel bleibt die Erosionsneigung in der Elbe durch die Öffnung des Querschnitts sogar leicht unter der des Istzustandes, so dass im Endzustand keine zusätzlichen Böschungssicherungen zu den heutigen notwendig werden.

Die Eisstauberechnung erfolgte nach zwei Ansätzen in die die Pfeilerabstände, Fließgeschwindigkeiten und Wassertiefe einbezogen wurden. Nach Plagemann (1988) können Eisversetzungen des gesamten Lichtraum-Querschnittes unter einer Kombination aus dem Bemessungsturmflutereignis mit Eis auf der Elbe auftreten. Hochwasserereignisse bis zu einem HQ₅₀, können in Kombination mit Eisgang nicht zu einem Eisstau im Lichtraum führen. Gemäß Carstensen (2010, Annahme Schollengröße

1 m) kann während der Bauphase zwischen den alten Pfeilern und den Spundwandkästen im nördlichen und im mittleren Bereich (lichte Weite = 7,81 m und 7,53 m) Eisstau auftreten. Auch gemäß der Kriterien nach Plagemann (1988) ergeben sich Eisaufschiebungen, die vor allem in den schmalen Zwischenbereichen des Bauzustandes infolge großer Pfeilerbreite und kleiner lichter Weite entstehen. Der Endzustand ist sowohl gemäß Carstensen (2010) als auch gemäß der Kriterien nach Plagemann (1988) nicht gegen Eisaufschiebungen oder Eisstau gefährdet. Ursächlich sind hierfür nicht nur die größeren lichten Weiten, sondern auch der geringere Pfeilerdurchmesser.

Ein Eisstau kann folglich nur im Bauzustand kritisch werden. Hier ist eine Bemessung auf Eisstau bzw. eine Sicherung vor einem Eisstau zwischen dem neuen und bestehenden Pfeiler notwendig.

Besonderes Augenmerk wurde auch auf die angrenzenden Flachwasserbereiche, das NSG Heuckenlock und die Standorte des Schierlings-Wasserfenchels gelegt. Aus der Analyse der Wasserstände und Strömungen in diesen Bereich ergaben sich folgende grundlegende Ergebnisse:

Bei mittleren Ereignissen (MNQ) und bei Hochwasser erfahren vorrangig die am Hauptstrom der Elbe gelegene Standorte des Wasserfenchels eine Veränderung der Strömungen. Am Punkt 2 ist das vorrangig eine Abnahme der Strömungen mit kleineren Streubreiten, am Punkt 1, 3 und 4 eine Zunahme der Strömungen mit größeren Streubreiten. Die Wasserstände ändern sich nicht bzw. nur marginal am Hauptstrom der Elbe und den Prielen der Elbe und sinken bei Tnw etwas weiter ab.

Änderungen unter der Bemessungsturmflut treten nicht nur an Standorten des Wasserfenchels am Hauptstrom der Elbe mit einer Zunahme im Bauzustand und einer Abnahme im Endzustand (Punkt 2 und 3), sondern auch an Standorten in den Prielen (Punkt 5) auf. Die Sturmflutscheitelwasserstände ändern sich nicht.

Zusammenfassend verursacht vor allem der Bauzustand Zunahmen in den Strömungen, erhöhten Erosionsdruck und Eisstau kann auftreten. Der Endzustand ist in Summe vergleichbar mit dem heutigen Istzustand auf hydraulischer Sicht und führt zusätzlich zu einer leichten Abnahme der Strömungen und des Erosionsdruckes durch die etwas weitere Öffnung des Querschnittes.

9 Literatur

- /1/ Alexy M. (1998): Optimierung der Eisabfuhr an Brücken in Mitteilungsblatt der Bundesanstalt für Wasserbau Nr. 79 (1988), S. 97-103.
- /2/ Amtlicher Anzeiger Nr. 63 (2013), Teil II des Hamburgischen Gesetz- und Verordnungsblattes, 9.08.2013, Ausschnitt vom 23.07.2013 zu den Wasserständen für die Planung öffentlicher Hochwasserschutz.
- /3/ BAW (2018): Modellierung von Sturmflutwasserständen in der Tideelbe, Bericht B3955.03.06.10006, Im Auftrag des Landesbetriebes für Küstenschutz, Nationalpark und Meeresschutz Schleswig-Holstein, Stand 12.04.2018
- /4/ BSH: Eisberichte der BSH von 2004 bis 2019: Download unter:
https://www.bsh.de/DE/DATEN/Eisberichte-und-Eiskarten/eisberichte-und-eiskarten_node.html
- /5/ Bollrich G. (2013): Technische Hydromechanik 1: Grundlagen. Verlag Beuth Wissen.
- /6/ BWK Merkblatt 1, 2009: Hydraulische Berechnung von naturnahen Fließgewässern, 3.Auflage, Mai 2009
- /7/ Carstensen D. (2008): Eis im Wasserbau – Theorie, Erscheinungen, Bemessungsgrößen, Heft 39 der Dresdner Wasserbaulichen Mitteilungen des Institutes für Wasserbau und Technische Hydromechanik der TU Dresden 2008
- /8/ Carstensen D. (2010): A laboratory investigation of the hydraulics and mechanics of model mechanics of model ice floes at bridge piers, in Proceedings of the Chinese-German Joint Symposium on Hydraulic and Ocean Engineering, 21 – 27.09.2010, TianJin, China, pp. 457-462
- /9/ DHI WASY (2020): Strömungsgutachten für den Neubau der A1-Norderelbbrücke: BAB A1 – 8 Steifige Erweiterung in der Freien und Hansestadt Hamburg, westlich AD HH-Südost und AS Harburg, Stand Juni 2020
- /10/ IKSE, 2014: Hydrologische Auswertung des Hochwassers vom Juni 2013 im Einzugsgebiet der Elbe, Kap. 4 „Hydrologische Bewertung des Hochwassers“
- /11/ Kleine E. (1990): Eisbekämpfung am Beispiel der Elbe in: PIANC (Permanent International Navigation Association) 27.Kongress 1990 in Osaka, S. 26-26 unter URL: http://www.wsv.de/pianc/aktuelles/deutsche_bereichte/1990/index.html
- /12/ Naudascher, 1992: Hydraulik der Gerinne und Gerinnebauwerke, Springer Verlag
- /13/ Schmelzer N., Holfort J, und Loewe P. (2015): Klimatologischer Eisatlas für die Deutsche Bucht (mit Limfjord), 1961 bis 2010, Digitaler Anhang: Eisverhältnisse in 30-jährigen Zeiträumen 1961-1990, 1971-2000, 1981-2010. Eisverhältnisse in mäßigen und starken Eiswintern. Veröffentlichung der BSH
- /14/ Schröder R.C.M. (1994): Technische Hydraulik: Kompendium für den Wasserbau.
- /15/ Schuh A. (2011): Eishochwasser an Oder und Elbe aus historischen und meteorologischen Gesichtspunkten und im Hinblick aus möglichen Gefährdungen, Dissertation der TU Cottbus, 23.11.2011
- /16/ Smagorinsky, J. (1963) General Circulation Experiments with the Primitive Equations: I. the Basic Equations. Monthly Weather Review, 91, 99-164.

- /17/ Stefan, J. (1889): Über die Theorie der Eisbildung, insbesondere über die Eisbildung im Polarmeer, Akademie der Wissenschaften Wiens, Sitzungsberichte der math.-naturw. Classe Bd. CXVIII, Abth. II a
- /18/ Piomelli U., Ferziger, J.H. and Moin, P. (1987): Models for Large Eddy simulations of turbulent channel flows including transpiration, Dept. Mech. Engng., Stanford University, Rep. TF-32
- /19/ Plagemann W. (1988): Vorschlag zum Ansatz von Eisbelastungen auf Bauwerke, Bauingenieur, Jahrgang 63, 1988, S.543-549, Springer-Verlag.
- /20/ Voss D. (1998): Eisbildung und Eisaufbruch auf Binnenwasserstraßen der WSD Ost, in: Mitteilungsblatt Nr. 79 der Bundesanstalt für Wasserbau, Karlsruhe, S. 41-51.
- /21/ Zanke U. (2002): Hydromechanik der Gerinne und Küstengewässer: für Bauingenieure, Umwelt und Geowissenschaftler, Parey Verlag.

