

HENRY

Hydraulic Engineering Repository

Ein Service der Bundesanstalt für Wasserbau

Report, Published Version

Uliczka, Klemens; Kondziella, Bernhard; Jansch, Hanne
Schiffserzeugte langperiodische Belastung zur Bemessung
der Deckschichten von Strombauwerken an
Seeschiffahrtsstraßen. FuE-Abschlussbericht
B3955.02.04.70141

Verfügbar unter/Available at: <https://hdl.handle.net/20.500.11970/106565>

Vorgeschlagene Zitierweise/Suggested citation:

Bundesanstalt für Wasserbau (Hg.) (2018): Schiffserzeugte langperiodische Belastung zur Bemessung der Deckschichten von Strombauwerken an Seeschiffahrtsstraßen. FuE-Abschlussbericht B3955.02.04.70141. Karlsruhe: Bundesanstalt für Wasserbau.

Standardnutzungsbedingungen/Terms of Use:

Die Dokumente in HENRY stehen unter der Creative Commons Lizenz CC BY 4.0, sofern keine abweichenden Nutzungsbedingungen getroffen wurden. Damit ist sowohl die kommerzielle Nutzung als auch das Teilen, die Weiterbearbeitung und Speicherung erlaubt. Das Verwenden und das Bearbeiten stehen unter der Bedingung der Namensnennung. Im Einzelfall kann eine restriktivere Lizenz gelten; dann gelten abweichend von den obigen Nutzungsbedingungen die in der dort genannten Lizenz gewährten Nutzungsrechte.

Documents in HENRY are made available under the Creative Commons License CC BY 4.0, if no other license is applicable. Under CC BY 4.0 commercial use and sharing, remixing, transforming, and building upon the material of the work is permitted. In some cases a different, more restrictive license may apply; if applicable the terms of the restrictive license will be binding.

Verwertungsrechte: Alle Rechte vorbehalten

FuE-Abschlussbericht
Schiffserzeugte langperiodische
Belastung zu Bemessung der
Deckschichten von Strombauwerken an
Schiffahrtsstraßen

B3955.02.04.70141



Januar 2018

FuE-Abschlussbericht

Schiffserzeugte langperiodische Belastung zur Bemessung der Deckschichten von Strombauwerken an Seeschiffahrtsstraßen

Beginn des Vorhabens: August 2011

Auftrags-Nr.: BAW-Nr. B3955.02.04.40141

Aufgestellt von: Abteilung: Wasserbau im Küstenbereich
 Referat: Ästuarsysteme I (K2)
 Projektleiter: Dr.-Ing. Klemens Uliczka
 Bearbeiter: Dr.-Ing. Klemens Uliczka
 Dipl.-Ing. (FH) Bernhard Kondziella
 Dipl.-Ing. (FH) Hanne Jansch

Hamburg, Januar 2018

Der Bericht darf nur ungekürzt vervielfältigt werden. Die Vervielfältigung und eine Veröffentlichung bedürfen der schriftlichen Genehmigung der BAW.

Zusammenfassung

Die BAW mit Standort in Hamburg berät die für den Bereich der Küstenregionen zuständigen WSÄ u.a. hinsichtlich Funktion und Stabilität von Strombauwerken an den SeeSchStr. Schadensfälle an Leitwerken und Bühnen sowie an Deckwerken der Seeschiffsstraßen Außenweser und Unterelbe aufgrund schiffserzeugter Belastungen wurden in der letzten Dekade verstärkt festgestellt. Während bei den Lastfällen Seegangbelastung sowie kurzperiodische Schiffswellen auf langjährig anerkanntes Schrifttum zurückgegriffen werden konnte, waren für die Lastfälle aus langperiodischen schiffserzeugten Wellen- und Strömungsbelastungen an Leitdämmen und Bühnen fachwissenschaftlich abgesicherte Bemessungsansätze zu erarbeiten.

Nach Fachgesprächen mit universitären Partnern des Leichtweiß-Instituts (LWI) der TU Braunschweig und des Instituts für Wasserbau und Wasserwirtschaft (IWW) der RWTH Aachen wurde von den beiden Instituten ein Verbundvorhaben auf der Grundlage des FuE-Projektantrags der BAW ausgearbeitet. Für dieses Verbundprojekt waren folgende Arbeitspakete (AP) erforderlich:

- AP1: Schadensanalyse.
- AP2: Wissenstand-Analyse der beteiligten Belastungsprozesse.
- AP3: Parametrisierung der Schiffswellen.
- AP4: Kleinmaßstäbliche 3D- und 2D-Laboruntersuchungen (EFD).
- AP5: Numerische Untersuchungen mit einem gekoppeltem hydrodynamischen (CFD) und strukturdynamischen (CSD) Modell.
- AP6: Großmaßstäbliche Versuche zur hydraulischen Stabilität.
- AP7: Probabilistische Bemessungsansätze.

Als bisherige Ergebnisse des FuE-Projekts sind u.a. für die Belange der WSÄ an SeeSchStr festzuhalten, dass

- anhand der kleinmaßstäblichen 3D-Modellversuche der Nachweis der Gültigkeit von 2D-Stabilitätsuntersuchungen geführt wurde (AP4b),
- anhand der kleinmaßstäblichen 2D Modellversuche Bemessungsparameter für überströmte Bauwerke ermittelt wurden und aufgrund von Stabilitätstests der größere Widerstand von flacheren Bühnenböschungen und von einer größeren Steinklasse bei langperiodische schiffserzeugte Wellenbelastungen nachgewiesen wurde (AP4a),
- zudem anhand von Untersuchungen in der Natur die Stabilität bzw. der Widerstand eines innovativen „hinterströmten Strombauwerks“ gegen die langperiodischen schiffserzeugten Wellenbelastungen belegt wurde (AP1b),
- die in der Natur bisher verwendete Steinklasse CP90/250 den gemessenen schiffserzeugten langperiodischen Wellenbelastungen nachweislich trotz flacherer Bühnenböschungen nicht hinreichenden Widerstand entgegenbrachte (AP1b, AP4a),
- der Einsatz der nächst höheren Steinklasse LMB5/40 bei dem optimierten „hinterströmten Strombauwerk“ derzeit eine deutlich höhere Stabilität gegenüber dem Lastfall schiffserzeugte langperiodische Wellenbelastung (Überströmen) verspricht (AP1b) und
- die Stabilitätsuntersuchungen in der Natur mit der Steinklasse LMB5/40 für eine weitere Belastungsperiode fortzuführen sind, um die Datenbasis für die Entwicklung probabilistischer Bemessungsansätze zu vervollständigen.

Inhaltsverzeichnis		Seite
1	Hintergrund und Forschungsbedarf	1
2	Bedeutung für die WSV	3
3	Projektstruktur und Projektentwicklung	4
3.1	Projektstruktur der BAW	4
3.2	Konzeptentwicklung als Verbundprojekt	5
4	AP1 – Schadensanalyse	7
4.1	Schadensanalyse im Zuständigkeitsbereich der WSV (BAW 2012)	7
4.2	Schadensanalyse für die Delegationsstrecke Hamburg (HPA 2011)	13
5	AP1a – Monitoring der äußeren Belastung und der Schadensentwicklung in der Natur	14
5.1	Langperiodische Belastung des Leitdamms Langlütjen in der Außenweser (WSA Bremerhaven 2014)	14
5.2	Pilotversuch zur Stabilität von optimierten Strombauwerken im Unterelbeabschnitt Juellssand (BAW 2012 / 2016)	16
6	AP2 - Wissenstandanalyse der an der Wellen-Strombauwerk-Interaktion beteiligten Belastungsprozesse (IWW 2012)	24
7	AP3- Bestimmung der bemessungsrelevanten Parameter schiffserzeugter Wellen in Seeschiffahrtsstraßen (Parametrisierung der Schiffswellen, LWI 2013)	28
8	AP4a - Kleinmaßstäbliche Untersuchungen (2D) zur Erfassung der maßgebenden Prozesse und zur hydraulischen Stabilität (IWW 2013 / 2016)	33
9	AP4b - Kleinmaßstäbliche 3D-Untersuchungen zu alternativen Buhnensystemen (BAW 2015)	45
10	AP5 - Entwicklung eines 3D-CFD/CSD-Modells und numerische Stabilitätsuntersuchungen (Numerische Simulation, LWI 2014)	52
11	Arbeitspakete des FuE-Folgeprojekts	59
11.1	AP1b – Fortführung des Monitorings der Belastung und der Schadenentwicklung in der Natur	59
11.2	AP6 – Großmaßstäbliche Experimente zur hydraulischen Stabilität von Deckschichten bei Schiffswellenbelastung	59
11.3	AP7 – Entwicklung zuverlässigkeitsbasierter Bemessungsansätze zur hydraulischen Stabilität (Probabilistische Bemessungsansätze)	60
12	Erkenntnisse und weitere Forschungsbedarf	60
12.1	Zusammenfassung der bisherigen Erkenntnisse	60
12.2	Weiterer Forschungsbedarf	61

13	Berichte der Projektpartner	62
14	Publikationen der Projektpartner	64
15	Literaturverzeichnis	65
16	Glossar (BAW 2012)	66
16.1	Kenngrößen - Übersicht	66
16.2	Kenngrößen – Glossar	66

Bildverzeichnis	Seite
Bild 1: Zeitliche Abfolge der Belastung von Deckwerk und Strombühne an einer engen Seeschiffahrtsstraße bei Passage eines PPM-Containerschiffs mit etwa $v_{SDW} \approx 13$ kn (Fotos: BAW 2004; aus BAW 2011)	2
Bild 2: Grafische Darstellung der Struktur des FuE-Projekts der BAW (nach BAW 2011)	5
Bild 3: Arbeitspakete des vorgesehenen FuE-Verbundprojekts und deren Inhalte (aus: AP2 - Gier und Schüttrumpf 2012)	6
Bild 4: Überfallströmung und kennzeichnende Größen an einer Bühne infolge des langperiodischen schiffserzeugten Primärwellensystems (Absunk z_A und Primärwelle H_P ; Prinzipskizze; nach BAW, 2010, 2012a)	9
Bild 5: Entwicklungsstufen der Schäden an den Bühnen Juelssand (A: Erste Schäden in Lee, B: Kronennaher Durchbruch, C: Vollständiger Durchbruch, D: Aufweitung des Durchbruchs; nach BAW 2012a)	10
Bild 6: Ablauf der langperiodischen Wellen und Strömungsprozesse in Bühnenfeldern an einer Seeschiffahrtsstraße (BAW 2012a)	10
Bild 7: Neu profilierte Bühnenbauwerke in der Außenweser (WSA Bremerhaven 2011)	11
Bild 8: Fehlstelle an der Abdeckung eines Stacks am Nordufer der Unterelbe (aus: Staal 2011)	13
Bild 9: Überfallströmung an einem Leitdamm einer SeeSchStr infolge des langperiodischen schiffserzeugten Absunks (Prinzipskizze; BAW 2012)	15
Bild 10: Messkonfiguration am Leitdamm Langlütjen (nach Daten des WSA Bremerhaven)	16
Bild 11: Strombühnen Bn29 und Bn31 des Pilotprojekts Strombauwerke Juelssand, Übersicht (Grafik WSA Hamburg; Spezifizierung BAW 2012b)	18
Bild 12: Teil der Messinfrastruktur zur Erfassung der zeitlich und räumlichen Schadensentwicklung der Strombühne BN31 mit Pfahl und autarker Messplattform sowie Messprinzip bei Tnw inkl. Einmessung zu Fixpunkten (schematisch; nach Uliczka 2015)	19
Bild 13: Fotografische Dokumentation der unterschiedlichen Schadensentwicklungen der ertüchtigten Strombühnen 29 und 31 (Zeitraum 7/2015 bis 11/2016; Fotos: BAW)	20
Bild 14: Zeitliche und räumliche Darstellung der Schadensentwicklung von Strombühne Bn31 mittels terrestrischem 3D-Scan – Mittelwerte im 1x1m-Raster (Uliczka und Jansch 2017)	21
Bild 15: Häufigkeitsverteilung und Summenhäufigkeit der schiffserzeugten Primärwellenbelastung am stromauf liegenden Böschungsfuß der Strombauwerke Bn31 und Bn29 (Zeitraum 7/2015 bis 11/2016)	22
Bild 16: Häufigkeitsverteilung und Summenhäufigkeit der Schadensentwicklung eines Ausschnitts der ertüchtigten Strombauwerke auf Basis der 3D-Scans (erste Auswertungen, ohne Fehlerkorrektur; Zeitraum 7/2015 bis ca. 11/2016)	23
Bild 17: Vorgehensweise bei der Bearbeitung des Arbeitspakets 2 durch das IWW (nach Gier et al. 2012)	24
Bild 18: Lastfälle infolge der langperiodischen schiffserzeugten Primärwelle in Abhängigkeit des Freibord R_C (aus Gier et al. 2012)	25
Bild 19: Vorgehen bei der Bearbeitung des AP3 zur Parametrisierung der schiffserzeugten Wellen (aus Oumeraci und Brühl 2013)	29
Bild 20: Beispiel einer Schiffswellenzeitreihe aus Systemversuchen (oben) mit Ausschnitten des Fourier-Spektrums mit Tiefpassfilter $f = 0,067$ Hz (mittig) und mit Bandpassfilter von $0,067 \text{ H} < f < 1 \text{ Hz}$ (unten; nach Oumeraci und Brühl 2013)	30

Bild 21:	Höhe der Primärwelle als Funktion der spektralen Momente erster Ordnung für alle untersuchten Querschnittsverhältnisse (Oumeraci und Brühl 2013)	31
Bild 22:	Ablaufplan der kleinmaßstäblichen physikalischen Modellversuche des Arbeitspakets 4 (aus Wöffler et al. 2013)	34
Bild 23:	Modellaufbau (nicht maßstabsgetreu) während der Modellphase 2 im Wellenkanal des LWI (Wöffler et al. 2013)	36
Bild 24:	Wellenüberlauftrate bei brechenden regelmäßigen Wellen in der Variante 1 (glatte Oberfläche) und Variante 2 (raue Oberfläche; Wöffler et al. 2013)	37
Bild 25:	Ansicht der Kipprinne in der Versuchshalle des IWW (nach Oetjen et al. 2017)	39
Bild 26:	Darstellung des im kleinmaßstäblichen Versuch abgebildeten Bereiches des Primärwellensystems und Definition der „Freibordhöhe zum Absunk“ R_{CA} (aus Wöffler et al. 2015)	40
Bild 27:	Endgültiger Versuchsaufbau zur Modellphase 3 in der Kipprinne des IWW (schematisch $R_C = 0$; nach Oetjen et al. 2017)	41
Bild 28:	Mittelwerte der gesamten Überfallbeiwerte gemäß Variante 2 für alle Modellkörper und Freibordhöhen (nach Oetjen et al. 2017)	42
Bild 29:	Übersicht der Bewertungskategorien im Kategoriemittel für die untersuchten Deckschichtmaterialien und Freibordhöhen (nach Oetjen et al. 2017)	43
Bild 30:	Einordnung der Modellphase 3 für die Modellkörper 1 und 4 mit Beschränkung des Gültigkeitsbereichs am Beispiel der Wellenhöhe $H = 0,12$ m und $R_C = 0$ m (Oetjen et al. 2017).	44
Bild 31:	Buhneneinbauten im teilgefüllten Schiffswellenbecken der BAW (rechte Seite im Modellmaßstab 1:40; BAW 2015)	46
Bild 32:	Querprofil des Untersuchungsquerschnitts als Skizze mit der Vermaßung im Naturmaßstab bei Thw (unmaßstäblich; BAW 2015)	46
Bild 33:	Positionen der Sensoren mit Bezeichnungsmatrix A-E zu 1-6 sowie Detail der Messkonfiguration im Modell 1:40 (nach BAW 2015)	47
Bild 34:	Optischer Vergleich der Bühnenbauwerke: v.l.n.r. Varianten I bis III (unmaßstäblich; BAW 2015)	48
Bild 35:	Phasenabhängige Darstellung der Wasserspiegel- sowie Strömungsänderungen in Betrag und Richtung in einem Bühnenfeld bei Passage eines großen Containerschiffs (v. l. n. r.; nach BAW 2015)	48
Bild 36:	Maximaler, annähernd zweidimensionaler dynamischer Überströmungsprozess einer Strombühne infolge der schiffserzeugten, langperiodischen Primärwelle (3D-Maßstabsmodell 1:40; BAW 2015)	49
Bild 37:	Geschwindigkeitsabhängige Periode der Primärwelle im Bühnenfeld A1 - B2 bei Passagen des PPM55 ($l_{pp} = 352$ m; BAW 2015)	50
Bild 38:	Gliederung des Arbeitspaketes AP5 in die Teilprojekte AP5-1 bis AP5-5 (aus Oumeraci et al. 2014)	52
Bild 39:	Beispiele für die Darstellung der Animation-Files in L~davis: a) VOF-Funktion, b) Druckverteilung, c) horizontale Geschwindigkeit (jeweils als Farbkontour) und d) Strömungsgeschwindigkeit in Vektordarstellung (nach Oumeraci et al. 2014)	54
Bild 40:	Vergleich der Ergebnisse aus Modellversuchen und numerischer Simulation für den Modellkörper 2 (Böschung 1:4) bei glatter(oben) und rauer (unten) Bauwerksoberfläche (nach Oumeraci et al. 2014)	55
Bild 41:	Ausschnitt des Netzes des durchlässigen, rauen und lageinstabilen Bauwerks (Variante 3) mit einzelnen Deckwerkselementen und Darstellung der mit äußeren Kräften zu beaufschlagenden Knotenpunkte der beweglichen Deckwerkselemente in UDEC (nach Oumeraci et al. 2014)	57
Bild 42:	Position der Deckwerkselemente nach Abschluss der UDEC-Simulation mit 10-fach überhöhten Kräften(Oumeraci et al. 2014)	58

Bild 43: Schematische Darstellung einzelner Kenngrößen schiffserzeugter Wellen- und Strömungsbelastungen bei Revierfahrt 66

Tabellenverzeichnis	Seite
Tabelle 1: Zusammenfassung der funktionalen Abhängigkeiten des modifizierten Überfallbeiwerts für stationäre Strömungsbedingungen (aus Wöffler et al. 2013)	35
Tabelle 2: Zusammenfassung der Ergebnisse der Untersuchungen zur Wellenüberlaufrate in der Modellphase 2 mit u.a. mit Reduktionskoeffizient γ_r für die aufgebrachte raue Bauwerksoberfläche (nach Wöffler et al. 2013)	38
Tabelle 3: Geometrische Daten der Bauwerksvarianten I bis III (Naturwerte; aus BAW 2015)	47
Tabelle 4: Synoptische maximale schiffsinduzierte Wasserspiegelhöhen relativ zum Ruhewasserspiegel (RWS) bei maximaler Wasserspiegeldifferenz vor und hinter der Buhne (B und D) bzw. „Überfallhöhe“ über dem Bühnenkörper (C) im Vergleich der Variante I, Variante II und Variante III (Thw, Tmw, Tnw, bei max. v_S ; BAW 2015)	50

1 Hintergrund und Forschungsbedarf

Die Bundesanstalt für Wasserbau (BAW) mit Standort in Hamburg berät die für den Bereich der Küstenregionen zuständigen Wasserstraßen- und Schifffahrtsämter (WSÄ) der Wasserstraßen- und Schifffahrtsverwaltung (WSV) u.a. hinsichtlich Funktion und Stabilität von Strombauwerken an den Seeschiffahrtsstraßen (SeeSchStr) der Nord- und Ostsee sowie am Nord-Ostsee-Kanal (NOK).

Schadensfälle an Leitwerken und Buhnen sowie an Deckwerken der Seeschiffahrtsstraßen Außenweser und Unterelbe aufgrund schiffserzeugter Belastungen wurden in der letzten Dekade verstärkt festgestellt (u.a. Strombaulicher Bericht, WSA Bremerhaven 2009). Im Zuständigkeitsbereich des WSA Bremerhaven traten die Schäden nicht mehr in diesem Maße in den Bauwerksabschnitten auf, in denen probeweise ein geändertes, abgeflachtes Profil eingebaut wurde.

Die BAW wurde deshalb beauftragt, die Erkenntnisse aus der Praxis des WSA Bremerhaven in ein zu entwickelndes und nach Stand der Technik rechnerisch abgesichertes Konzept zur Sanierung und nachhaltigen Stabilisierung der Leitwerksysteme einfließen zu lassen, die Bemessungsgrößen für die Strombauwerke in der Außenweser in Abstimmung mit dem WSA festzulegen und das Bemessungskonzept gutachterlich zu bewerten.

Vom WSA wurden diesbezüglich Messungen zur Erfassung der Größenordnung der schiffserzeugten Belastungen an Leitdämme und Buhnen in der Außenweser beauftragt. Die BAW analysierte die Ergebnisse dieser Messungen und führte Untersuchungen zur Bemessung der betroffenen Bauwerke durch (BAW 2010).

In dem Gutachten der BAW (2010) wurde allerdings festgestellt, dass

- nach Stand von Technik und Wissenschaft für die Bemessung der Leitdämme und Buhnen keine bekannten Ansätze für die erfassten instationären, langperiodischen schiffserzeugten Wellenbelastungen vorliegen,
- für eine Abschätzung der hydrodynamischen Belastung als Basis für die Ermittlung der erforderlichen Steingrößen und -gewichte u.a. lediglich vorhandene theoretische, fachlich nicht exakt zutreffende und nur bedingt gültige Ansätze verwendet werden konnten,
- die Bewertung und Abwägung der behelfsmäßigen theoretischen Ermittlungen einerseits und der praktischen Erfahrungen des WSA Bremerhaven andererseits ergab, dass letztere eindeutig höher zu bewerten waren und
- für die fachliche Absicherung der Bemessungspraxis vor Ort von der BAW Forschungskonzepte zu entwickeln und entsprechende FuE-Teilprojekte einzurichten waren.

Während zum Lastfall Seegangbelastung wie auch für den Lastfall kurzperiodische Schiffswellen auf langjährig anerkanntes Schrifttum zurückgegriffen werden konnte (u.a. bei Hansen 1985; EAK 2002), waren für die Lastfälle aus langperiodischen schiffserzeugten Wellen- und Strömungsbelastungen an Leitdämmen und Buhnen fachwissenschaftlich abgesicherte Bemessungsansätze zu erarbeiten (vergl. BAW 2010).

Besonders extrem instationäre und hoch turbulente hydrodynamische - zudem in Tideästuaren wasserstandabhängige - langperiodische schiffserzeugte Belastungen, führten zu komplexen

Untersuchungsaufgaben mit einer hohen Zahl von zu erfassenden und physikalisch zu beschreibenden hydrodynamischen Parametern, verteilt über verschiedene zu bemessende Abschnitte von Leitdämmen und Buhnen. Eine zeitliche Abfolge der langperiodischen schiffserzeugten Belastung wurde beispielhaft für die enge SeeSchStr Maas bei Rotterdam, NL in Bild 1 zusammengestellt (Fotos: BAW 2004; aus BAW 2011).



Bild 1: Zeitliche Abfolge der Belastung von Deckwerk und Strombuhne an einer engen Seeschiffahrtsstraße bei Passage eines PPM-Containerschiffs mit etwa $v_{\text{Saw}} \approx 13 \text{ kn}$ (Fotos: BAW 2004; aus BAW 2011)

Im Rahmen des seit 2011 bewilligten FuE-Projekts der BAW mit dem Thema „Schiffserzeugte langperiodische Belastung zur Bemessung der Deckschichten von Strombauwerken an Seeschiffahrtsstraßen“ waren somit fundierte Unterlagen für den Bereich der SeeSchStr der WSV an Nord- und Ostsee sowie des Nord-Ostsee-Kanals zu erarbeiten, die eine fachlich abgesicherte

und nachhaltige Bemessung auf die langperiodischen, schiffserzeugten Lastfälle durch Wellen und Strömung bzw. Überströmen ermöglichen sollen (BAW 2011).

2 Bedeutung für die WSV

Die weiterhin zunehmende Größenentwicklung in der Containerschiffahrt mit der Inbetriebnahme von 14.000 TEU¹-Containerschiffen zur Zeit der Projektbeantragung in 2011 führte in 2017 zu Fahrzeugen mit einer Ladekapazität von rund 21.400 TEU bei Längen von ca. 400 m und Breiten von ca. 59 m. Damit erhielt die nachhaltige Bemessung der Deckschichten von Strombauwerken und Ufersicherungen an den Seeschiffahrtsstraßen der Tideästuare bei der Kenntnis der bemessungsrelevanten Parameter der schiffserzeugten Belastungen eine wachsende Bedeutung. Die Dringlichkeit des FuE-Projekts ergab sich u.a. aus der akut erforderlichen, fachgerechten und nachhaltigen Sanierung von Schadensfällen (z.B. Außenweser Langlütjen oder Unterelbe Juellssand).

Durch die Kooperation mit universitären Einrichtungen wurden wichtige Impulse für - über dieses Projekt hinausgehende - weitere Grundlagenforschungen erwartet, so dass dadurch ein zusätzlicher Mehrwert auf diesem WSV-relevanten Forschungsgebiet durch ebendiese Universitätsinstitute zu erwarten war.

Als bisherige Ergebnisse des FuE-Projekts sind u.a. für die Belange der WSÄ an SeeSchStr festzuhalten, dass

- anhand der kleinmaßstäblichen 3D-Modellversuche (M 1:40) der Nachweis der Gültigkeit von 2D-Stabilitätsuntersuchungen geführt wurde (AP4b),
- anhand der kleinmaßstäblichen 2D-Modellversuche (M 1:7,5) Bemessungsparameter für überströmte Bauwerke ermittelt wurden und aufgrund von Stabilitätstests der größere Widerstand von flacher geneigten Bühnenböschungen gegen langperiodische schiffserzeugte Wellenbelastungen nachgewiesen werden konnte (AP4a),
- zudem anhand von Untersuchungen in der Natur die Stabilität bzw. der Widerstand eines innovativen „hinterströmten Strombauwerks“ gegen die langperiodischen schiffserzeugten Wellenbelastungen nachgewiesen wurde (AP1b),
- die in der Natur bisher verwendete Steinklasse CP_{90/250} den gemessenen schiffserzeugten langperiodischen Wellenbelastungen nachweislich – trotz flacherer Bühnenböschungen - nicht hinreichenden Widerstand entgegenbrachte (AP1b, AP4a),
- der Einsatz der nächst höheren Steinklasse LMB_{5/40} bei dem optimierten „hinterströmten Strombauwerk“ derzeit eine deutlich höhere Stabilität gegenüber dem Lastfall schiffserzeugte langperiodische Wellenbelastung (Überströmen) verspricht (AP1b),
- die Stabilitätsuntersuchungen in der Natur mit der Steinklasse LMB_{5/40} für eine weitere Belastungsperiode fortzuführen sind, um die Datenbasis für die Entwicklung probabilistischer Bemessungsansätze zu vervollständigen.

¹ TEU: Twenty-foot Equivalent Unit = Standardcontainer

3 Projektstruktur und Projektentwicklung

3.1 Projektstruktur der BAW

In dem Projektantrag der BAW (2011) waren im Wesentlichen folgende Untersuchungsschwerpunkte als zielführend festgelegt worden:

- Grundsätzliche Erfassung der kurz- und langperiodischen schiffserzeugten Belastungen im Nahbereich von Leitdämmen und Buhnen.
- Ableitung analytischer Ansätze zur nachhaltigen Bemessung von Strombauwerken an Seeschiffsstraßen mit Bestimmung bemessungsrelevanter Parameter anhand der Analyse von Messdaten.
- Hydrodynamisch-numerische Simulation der schiffserzeugten Belastungssituationen an Strombauwerken von Seeschiffsstraßen.
- Aufbereitung von Messergebnissen zu abgesicherten Validierungsdaten für numerische Verfahren u.a. aus fachübergreifenden Forschungsgebieten der Geotechnik.
- Vergleichende Bewertung probabilistischer Bemessungsverfahren zur langfristigen Einsatz in der WSV.

Nach weitergehenden Schriftumsrecherchen waren im Rahmen des FuE-Projekts umfangreiche methodenübergreifende Untersuchungen an SeeSchStr zur langperiodischen schiffserzeugten Belastungen im Nahbereich von Leitdämmen und Buhnen vorgesehen:

- Erarbeitung und/oder Prüfen von vorhandenen empirisch-analytischen Ansätzen hinsichtlich der Anwendung für eine nachhaltige Bemessung.
- Messungen in der Natur an exponiert liegenden Strombauwerken ausgewählter SeeSchStr über repräsentative Zeiträume.
- Großmaßstäbliche Untersuchungen verschiedener einzelner physikalischer Prozesse der langperiodischen schiffserzeugten Lastfälle unter kontrollierten Bedingungen.
- Kleinmaßstäbliche, dreidimensionale Modellversuche zur Wirkung der Energiedissipation langperiodischer Wellen z.B. bei hinterströmten Buhnen im Schiffswellenbecken der BAW.
- Hydrodynamisch-numerische Simulation der relevanten Prozesse bei schiffserzeugten, vorübergehenden Bemessungssituationen.
- Anwendung der erarbeiteten Bemessungsregeln für in der Praxis erprobte Strombauprofile an SeeSchStr.
- Bearbeitung eines probabilistischen Bemessungsansatzes als weitere FuE-Komponente parallel zur deterministischen Bemessung.
- Datenanalyse von Monitoring-Projekten hinsichtlich der Nachhaltigkeit neuer Strombauwerke vor Ort.

Die vorgesehene Projektstruktur der BAW ist grafisch in Bild 2 dargestellt (nach BAW 2011). Vorgesehen, beantragt und genehmigt war eine Mindestlaufzeit des Forschungsprojekts von Mitte 2011 bis Ende 2016, ggf. mit einer Verlängerung bei Beratung und Analyse von Monitoring-Projekten mit der WSV.



Bild 2: Grafische Darstellung der Struktur des FuE-Projekts der BAW (nach BAW 2011)

3.2 Konzeptentwicklung als Verbundprojekt

Nach Fachgesprächen mit universitären Partnern des Leichtweiß-Instituts (LWI) der Technischen Universität Braunschweig, Prof. Dr.-Ing. H. Oumeraci und des Instituts für Wasserbau und Wasserwirtschaft (IWW) der Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule Aachen, Prof. Dr.-Ing. H. Schüttrumpf wurde von den beiden Instituten LWI und IWW ein erster Entwurf zur Vorbereitung eines längerfristigen Verbundvorhabens auf der Grundlage des FuE-Projektantrags der BAW (BAW 2011) sowie auf Basis der Ergebnisse der Arbeitstreffen ausgearbeitet (Oumeraci et al. 2011). Hauptziel dieses Entwurfs war es, einen ersten Vorschlag für eine genauere Spezifizierung der Arbeitspakete (AP) im Sinne des BAW-intern beantragten FuE-Vorhabens zu erstellen und so mögliche weitere Partner wie die Hamburg Port Authority (HPA) in das Verbundvorhaben einzubeziehen.

Für ein längerfristiges Verbundprojekt waren gemäß Entwurf von Oumeraci et al. (2011) nach dem damaligen Stand folgende Arbeitspakete (AP) erforderlich:

- AP1. Klassifikation der verschiedenen Typen und Geometrien der Strombauwerke aus Steinschüttmaterial und Analyse der bisherigen Schäden an Bühnen und Leitdämmen mit Deckschichten in Steinschütt-Bauweise an Seeschiffsstraßen (Schadensanalyse)
- AP2. Wissenstand-Analyse der an der Wellen-Strombauwerk Interaktion beteiligten Belastungsprozesse (Prozessanalyse)
- AP3. Bestimmung der bemessungsrelevanten Parameter der schiffserzeugten Wellen (Parametrisierung der Schiffswellen)

- AP4. Kleinmaßstäbliche 3D- und 2D Laboruntersuchungen (EFD²) zur Erfassung der maßgebenden Prozesse und zur Bestimmung der hydraulischen Stabilität der Deckschicht (Laborversuche im kleinen Maßstab)
- AP5. Numerische Untersuchungen mit einem gekoppeltem hydrodynamischen (CFD³) und strukturdynamischen (CSD⁴) Modell zur Bestimmung der hydraulischen Stabilität der Deck-schicht von Strombauwerken (Numerische CFD/CSD-Untersuchungen)
- AP6. Großmaßstäbliche Experimente zur hydraulischen Stabilität von Deckschichten bei Schiffswellenbelastung (Experimente im Großen Wellenkanal GWK)
- AP7. Entwicklung zuverlässigkeitsbasierter Bemessungsansätze zur hydraulischen Stabilität (Probabilistische Bemessungsansätze)

Alle AP 1-7 sollten im vorgesehenen Zeitraum von 6 Jahren problemlos bearbeitet werden können, wenn die entsprechenden Mittel (vor allem Personal) eingesetzt werden würde und eine entsprechend straffe und gut funktionierende Koordination der Forschungsaktivitäten der beteiligten Partner gewährleistet werden würde (nach Oumeraci et al. 2011). Die definierten Arbeitspakete sowie deren Zielsetzungen sind in Bild 3 zusammengestellt (aus: AP2 - Gier und Schüttrumpf 2012).



Bild 3: Arbeitspakete des vorgesehenen FuE-Verbundprojekts und deren Inhalte (aus: AP2 - Gier und Schüttrumpf 2012)

² EFD: Experimental Fluid Dynamics

³ CFD: Computational Fluid Dynamics

⁴ CSD: Computational Structural Dynamics

Nach Oumeraci et al. (2011) sollte bei der Ausarbeitung von AP1-6 berücksichtigt werden, dass die Unsicherheiten der Daten und der Berechnungsansätze stets erfasst, abgeschätzt und explizit angegeben werden, da sie eine der wichtigsten Grundlagen zur Bearbeitung von AP7 bilden würden. Schließlich wurde unterstrichen, dass zuverlässigkeitsbasierte Bemessungsansätze, wie sie in AP7 zu entwickeln wären, nicht das ultimative Ziel sein würden und längerfristig im Rahmen des o.g. FuE-Verbundvorhaben durch risikobasierte Verfahren erweitert werden würden (nach Oumeraci et al. 2011).

Ein weiteres Ziel der BAW mit der Einbeziehung der Universitäten in ein gemeinsames Verbundprojekt war, einen deutlichen Mehrwert der Forschung durch Doktoranden an den beteiligten Instituten auch über die Fragestellungen der WSV hinaus zu erarbeiten. Das Einwerben der entsprechenden zusätzlichen Mittel sowie die Betreuung der Arbeiten war durch die Universitäten vorgesehen.

Die zeitliche Umsetzung der konzipierten Arbeitspakete des Verbundprojekts konnte aufgrund von unerwarteten Personalwechseln in den Instituten und dann notwendiger Streckung der verschiedenen AP's nur bedingt verwirklicht werden. Des Weiteren war das umrissene Forschungsgebiet für Dritte so speziell, dass die Finanzierung der von den Instituten zu bearbeitenden AP's im Wesentlichen aus dem Forschungsetat der Ressortforschungsanstalt BAW erfolgte.

4 AP1 – Schadensanalyse

Das Arbeitspaket Schadensanalyse wurde aufgrund der jeweiligen Zuständigkeitsbereiche von der BAW (BAW 2012a) bearbeitet, anhand eines Beitrags der Hamburg Port Authority ergänzt (Staal 2011) und die jeweiligen Ergebnisse in den entsprechenden Unterkapiteln zusammengefasst.

4.1 Schadensanalyse im Zuständigkeitsbereich der WSV (BAW 2012)

Für die Bearbeitung des Arbeitspakets Schadensanalyse im Zuständigkeitsbereich der WSV waren folgende Teilarbeiten in Anlehnung an Oumeraci et al. (2011) als erforderlich angesehen:

- o Zusammenstellung typischer Bauwerksgeometrien
- o Klassifizierung der Strombauwerke (Buhnen und Leitdämme)
- o Schadensbilder von Deckschichten an Buhnen und Leitdämmen
- o Ermittlung der relevanten Versagensformen und Ursachen
- o Schlussfolgerungen für weitergehende Untersuchungen (AP's 2-7)

Im Wesentlichen erfolgte eine Konzentration auf die aktuellen lokalen Schadensfälle der WSV (z.B. Außenweser und Unterelbe) hinsichtlich der Überströmung von Buhnen und Leitdämmen durch langperiodische schiffserzeugte Belastungen. Darüber hinaus wurden soweit möglich weitere Randbedingungen (z.B. historische und aktuelle Bauwerksgeometrien) zusammengestellt.

Bei der Bearbeitung des AP1 wurde methodisch wie folgt vorgegangen:

- Aufbereitung der jüngsten Untersuchungen der BAW im Auftrag der WSV (u.a. BAW 2010)
- Abfrage und Analyse von Bauwerksarten, Schäden und Schadensformen bei den Küstendienststellen der WSV mittels erarbeiteten Fragenbogens
- Internationale Abfrage und Analyse von Belastungs- und Schadensformen bei bekannten europäischen und außereuropäischen Fachinstituten
- Ortsbegehung mit Dokumentation von relevanten Schadensfällen in bestimmten Abschnitten der Tideästuare
- Aufbereitung von typischen Bauwerksgeometrien (Buhnen und Leitdämme) der Küstenämter der WSV (soweit möglich)
- Aufbereitung und Analyse geometrischer Randbedingungen im Bereich der Strombauwerke an ausgewählten Seeschiffsstraßen (u.a. Bühnenfeld, Abstand zur Fahrinnenkante)

Anhand der zusammenfassenden Analyse der Abfragen der Küstenämter der WSV wird deutlich, welche Versagensformen und Versagensursachen vorwiegend aufgeführt wurden:

- Versagen infolge der Bauwerks (Bemessung oder Ausführung): Verockerung oder Unwirksamkeit des Filters, Schäden unterhalb von Verklammerungen, Überschreitung der Lebensdauer, Bauwerksgeometrie, Bühnenfeldgeometrie.
- Versagen infolge hydraulischer und äußerer Belastung: Schiffserzeugter Sog und Schwell, Überfallströmung, Eisgang.
- Versagen infolge Kolkentwicklung.
- Kein Versagen der Strombauwerke aufgrund des Baugrunds.

Die Bewertung der dargelegten Versagensursachen der Deckschichten von Buhnen und Leitdämmen durch die Ortsbehörden der WSV konzentrierte sich vornehmlich auf das Bauwerk selbst sowie auf die äußeren (langperiodischen schiffserzeugten) hydraulischen Belastungen an den SeeSchStr.

Die Auswertung der Reaktionen der u.a. angeschriebenen internationalen Institutionen aus Belgien, Frankreich, Großbritannien, den Niederlanden und den USA kam zu dem Ergebnis, dass die beschriebenen schiffserzeugten, langperiodischen Belastungen von Strombauwerken (Buhnen und Leitdämme) u.a. aufgrund von Restriktionen hinsichtlich der Schiffsgeschwindigkeit nicht (mehr?) auftraten und / oder durch entsprechende Bemessungsansätze für die Deckschicht - allerdings nicht für SeeSchStr - gelöst zu sein scheinen. Somit bestand nur ein begrenztes Interesse an weiteren Lösungsansätzen für die in dem FuE-Projekt der BAW aufgeworfenen Fragestellungen.

Das Gedankenmodell zum An- und Überströmen einer Buhne durch das langperiodische schiffserzeugte Primärwellensystem (Absunk z_A und Primärwelle H_P) mit den relevanten Parametern für eine dachförmig abgerundete Wehrkrone wird anhand der schematischen Prinzipskizze in Bild 4 verdeutlicht (BAW 2012a):

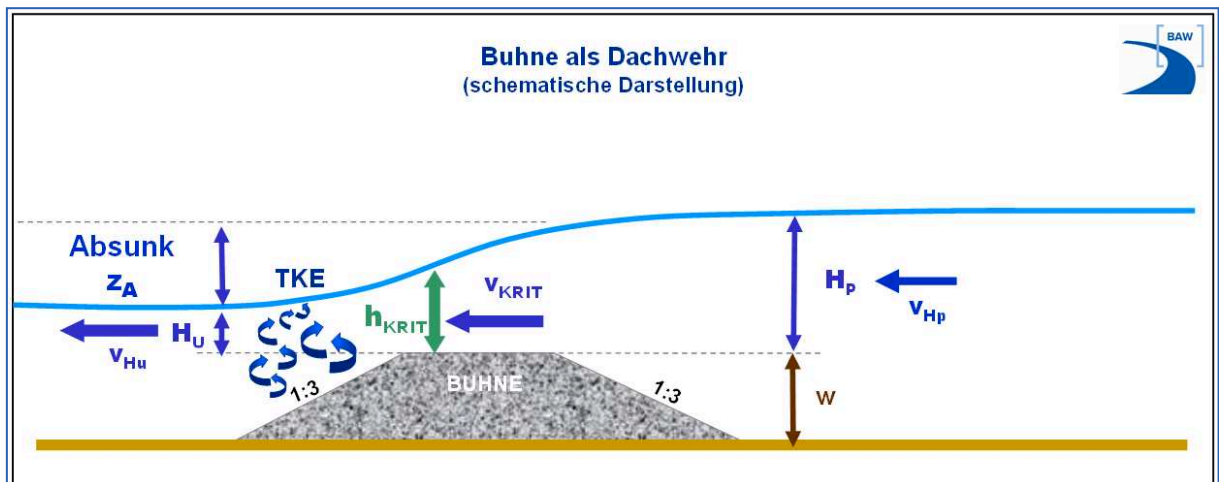


Bild 4: Überfallströmung und kennzeichnende Größen an einer Buhne infolge des langperiodischen schiffserzeugten Primärwellensystems (Absunk z_A und Primärwelle H_P ; Prinzipskizze; nach BAW, 2010, 2012a)

Die Strömungsgeschwindigkeiten über dem Strombauwerk bauen sich durch die Wasserspiegeldifferenz zwischen dem momentanen Tidewasserstand (hier z.B. ca. Thw) und dem schiffserzeugtem Absunk bis hin zum vollkommenen Überfall und zum Schießen über die Bauwerkskrone auf. Bei Annäherung der Primärwelle besteht vorerst weiterhin ein vollkommener Überfall an der Bauwerkskrone mit teilweiser Deckwalzenbildung im „Lee“ des Bauwerks.

Die an den SeeSchStr der WSV auffälligsten und schwersten Schadensfälle, die nachweisbar durch das schiffserzeugte, langperiodische Primärwellensystem verursacht wurden, traten im Zuständigkeitsbereich des WSA Hamburg im Abschnitt Juellssand (Elbe-km 651,2 bis 653,2) auf. Da die Uferzone seit einigen Jahren hinsichtlich naturnaher Umgestaltung überplant wurde, erfolgte keine Beseitigung der Anfangsschäden, so dass die Schadensentwicklung über mehrere Jahre verfolgt und dokumentiert werden konnte (u.a. durch das WSA Hamburg und die BAW).

Die Entstehung und Entwicklung der Schäden an der Buhnenwurzel durch das langperiodische Primärwellensystem wird anhand von Fotos deutlich (Bild 5; nach BAW 2012a):

- Erste Schäden an der Deckschicht im „Lee“ der Buhne (Bild 5, A)
- Kronennaher Durchbruch nahe der Buhnenwurzel (Bild 5, B)
- Vollständiger Durchbruch der Buhne in Bereich der Buhnenwurzel (Bild 5, C)
- Aufweitung des Durchbruchs, großräumige „Abpflasterung“ des Durchbruchs durch das Buhnenmaterial => „Hinterströmte Buhnen“ (Bild 5, D).



Bild 5: Entwicklungsstufen der Schäden an den Buhnen Juelssand (A: Erste Schäden in Lee, B: Kronennaher Durchbruch, C: Vollständiger Durchbruch, D: Aufweitung des Durchbruchs; nach BAW 2012a)

Der Ablauf des schiffsinduzierten langperiodischen Primärwellensystems mit Bugstau, Absunk (Sog), Rückströmung, Primärwelle (Schwell) und Schwellströmung im Buhnenfeld und über eine Buhne ist anhand der bearbeiteten Fotos in Bild 6 nachvollziehbar (BAW 2012a).



Bild 6: Ablauf der langperiodischen Wellen und Strömungsprozesse in Buhnenfeldern an einer Seeschiffahrtsstraße (BAW 2012a)

Diese Prozesse in den Buhnenfeldern und auf der Buhnenkrone sind mit Filmaufnahmen der BAW anschaulich dokumentiert unter <https://youtu.be/14sy0luQXXc> (BAW, November 2017).

Die Schadensfälle an Strombauwerken der Außenweser wurden im Strombaulichen Bericht des WSA Bremerhaven (WSA Bremerhaven 2009) aufbereitet und zudem im Gutachten der BAW zur „Bemessung der Strombauwerke in der Außenweser unter Berücksichtigung von Schiffswellenbelastungen“ (BAW 2010) behandelt. Im Gegensatz zu den Schäden an der Unterelbe bei Juelsand wurden die Leitdämme und Bühnen schon bei ersten Schadensfällen saniert, um deren Gebrauchstüchtigkeit zu gewährleisten. Somit waren vom WSA Bremerhaven in erster Linie Anfangsschäden sowie neu profilierte Bauwerke dokumentiert.

Das WSA Bremerhaven kam aufgrund des Schadensbilds an den Leitdämmen zu den Schlussfolgerungen, durch eine Abflachung der Böschungsneigungen von 1:2 auf 1:4 auf der Fahrwasserseite und z.B. 1:3 auf der Wattseite sowie durch eine Abrundung der Leitdammkrone die Belastung durch Wellenangriff und Überströmung zu reduzieren (WSA Bremerhaven 2009). Zudem wurde die Steingröße sowie die Rohdichte der Deckschicht erhöht. Im Gegensatz zu häufigen Sanierungsarbeiten am Leitdamm waren an dem neuen Bühnenprofil erst nach ca. 3 Jahren leichte Ausbesserungsarbeiten am Fuß der Leitdammflanke erforderlich (vergl. Bild 7), eine Neuprofilierung war auch nach 5 Jahren noch nicht erforderlich (WSA Bremerhaven 2009).

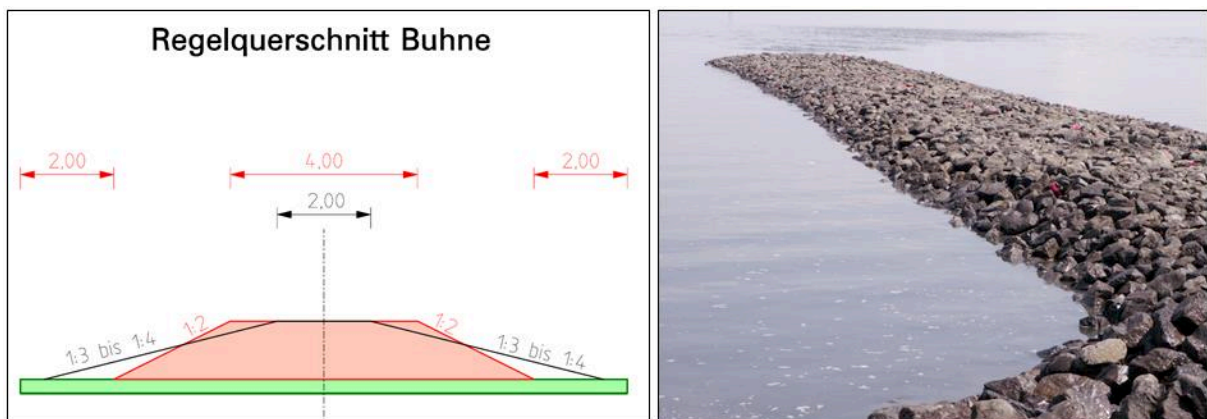


Bild 7: Neu profilierte Bühnenbauwerke in der Außenweser (WSA Bremerhaven 2011)

Standardvorgaben für alle Küstenämter für z.B. Bühnenbauwerke an SeeSchStr lagen bisher nicht vor, da aufgrund der lokal unterschiedlich dominierenden hydrodynamischen Belastungen und auch Erfahrungen vor Ort aus der Praxis die Bauart und die Bauausführung bestimmten. Somit waren auch keine eindeutigen Schlussfolgerungen zur Schadensursache aus der Analyse

Zusammenfassend wurde von der BAW (2012a) festgestellt, dass Bauwerksschäden an Strombauwerken der SeeSchStr der Tideästuare im Wesentlichen an den Deckschichten auf den „Lee-seiten“ von Bühnen und „Luvseiten“ von Leitdämmen ermittelt wurden (Versagensform).

Die herkömmlichen Böschungsneigungen von geschütteten Strombauwerken an SeeSchStr waren bei Belastungen aus dem - teils außergewöhnlich hohen - langperiodischen schiffserzeugten Primärwellensystem bei bestimmten Tidewasserständen zu steil (Versagensursache).

Die in der Schadensanalyse ausgewerteten Randbedingungen deuteten darauf hin, dass bei gleichen Querschnittsverhältnissen im Wesentlichen die Schiffsgeschwindigkeit tiefgangsrelevanter großer Fahrzeuge in Verbindung mit dem Abstand der Strombauwerke zur Fahrrinne als Versagensursache benannt werden konnte, wenn eine annähernd gleiche Bauweise vorausgesetzt war (Ursacheneingrenzung).

Praxislösungen durch beidseitiges Abflachen der Böschungsneigungen zeigten bisher deutlich weniger Schäden, wobei für einen entsprechenden rechnerischen Nachweis (Bemessung) hinsichtlich der schiffserzeugten langperiodischen Wellen- und Strömungsbelastungen entscheidende Parameter bisher nicht erfasst worden waren (Forschungsbedarf).

Aus den Untersuchungen des AP1 wurden von der BAW (2012a) für die geplanten Arbeitspakete AP2 ff. (siehe Oumeraci et al. 2011) folgende Empfehlungen abgeleitet:

- AP2: Konkretisierung der physikalischen Prozesse im Nahbereich der Bauwerke hinsichtlich der Versagensursache aus der Schadensanalyse (Wellenüberlauf und Überströmen, weniger maßgeblich ist der Wellenauflauf u.a. wegen der geringen Höhe der Strombauwerke).
- AP3: Parametrisierung des langperiodischen schiffserzeugten Primärwellensystems aus Modell und Naturmessungen hinsichtlich der maßgeblichen Einflussgrößen für eine rechnerische Bemessung der Strombauwerke an SeeSchStr.
- AP4: Kleinmaßstäbliche zweidimensionale Systemversuche zur Bestimmung der wasserstandsabhängigen Größenordnung der maßgeblichen „kritischen“ Parameter bei schiffserzeugtem Wellenüberlauf und absunkbedingter Überströmung auf Basis vorhandener Messungen in der Natur (Außenweser) für die Entwicklung einer vorläufigen „Stabilitätsformel“. Kleinmaßstäbliche dreidimensionale Modellversuche u.a. zur Funktionalität von hinterströmten Buhnen hinsichtlich einer Energiedissipation des langperiodischen schiffserzeugten Primärwellensystems in den Buhnenfeldern (Belastungsreduktion des Deckwerks im Bereich der Wurzel von Strombuhnen).
- AP5: Einsteuern der schadensrelevanten Parameter des langperiodischen schiffserzeugten Primärwellensystems in vorhandene oder weiter zu entwickelnde numerische Verfahren bei der Simulation von schadensanfälligen Bauwerken und bisher stabilen Bauweisen aus der Praxis (u.a. flachere Böschungsneigungen).
- AP6: Messungen in der Natur zur Bestimmung und Absicherung der Größenordnung der maßgeblichen Parameter bei schiffserzeugtem Wellenüberlauf und Überströmen. Überprüfung der in AP4 aus 2D-Systemversuchen ermittelten vorläufigen „Stabilitätsformel“ für den „kritischen“ wasserstandsabhängigen, langperiodischen schiffserzeugten Lastfall im Naturmaßstab.

- AP7: Entwicklung von probabilistischen Bemessungsansätzen hinsichtlich langperiodischer schiffserzeugter Wellenbelastung und Überströmen auf Basis der 2D-Systemversuche im Maßstabsmodell, der Untersuchungen im Naturmaßstab sowie der Messungen in Natur.

4.2 Schadensanalyse für die Delegationsstrecke Hamburg (HPA 2011)

Für den Zuständigkeitsbereich der Hamburg Port Authority (HPA) innerhalb der Hafengebietsgrenze Hamburg wurden von der Abteilung „Anlagen Management Ufer- und Hochwasserschutzanlagen“ aufgetretene Schadensfälle an Hamburger Stacks dokumentiert (Staal 2011). Dabei wurde u.a. auf den Regelaufbau der Stacks (Buhnen), auf Schadensfälle sowie auf mögliche Schadensursachen eingegangen.



Bild 8: Fehlstelle an der Abdeckung eines Stacks am Nordufer der Unterelbe (aus: Staal 2011)

Mit Bezug auf einen schematischen Ablauf der Schadensanalyse sind folgende Zuordnungen denkbar (u.a. Bild 8):

Versagen infolge Bauwerk selbst:

- Schäden an Gabionendeckel / -korb
 - Korrosion / Sandschliff
 - Fremdeinwirkung (Schifffahrt, Spaziergänger)

Versagen infolge hydraulischer und äußerer Belastung:

- o Welleninduzierte Belastung (an Andeckung, Stackwurzel)
- o Eisgang

Versagensursachen infolge morphologischer Veränderungen der Sohle (Kolke) oder infolge des Baugrunds waren nicht angegeben. Detailliertere Angaben, Grafiken und Fotos sind dem Bericht (Staal 2011) sowie deren Anlage zu entnehmen.

5 AP1a – Monitoring der äußeren Belastung und der Schadensentwicklung in der Natur

Die Projektstruktur des FuE-Projekts der BAW sah u.a. bauwerksnahe Feldmessungen sowohl an Leitdämmen als auch an Bühnenbauwerken von SeeSchStr vor, um die Ergebnisse der geplanten kleinmaßstäblichen zwei- und dreidimensionalen Systemversuche fachwissenschaftlich einordnen zu können (vergl. Kapitel 3.1). Des Weiteren galt es, die theoretischen Gedankenmodelle der ursächlichen physikalischen Prozesse, wie sie im Projektantrag der BAW (2011) schematisch dargestellt waren, anhand von Monitoringphasen vor Ort zu validieren.

Mit tatkräftiger Unterstützung der WSÄ Bremerhaven und Hamburg wurden zum Einen am Leitdamm Langlütjen in der Außenweser und zum Anderen im Abschnitt Juellssand an der Untereibe Feldmessungen zur langperiodischen schiffserzeugten Belastungen direkt an mehreren Bauwerkspositionen umgesetzt. Diese Messkampagnen werden in den folgenden Unterkapiteln zusammenfassend vorgestellt und die bisherigen Ergebnisse der Auswertungen diskutiert.

5.1 Langperiodische Belastung des Leitdamms Langlütjen in der Außenweser (WSA Bremerhaven 2014)

Das Gedankenmodell zur Schadensursache am Leitdamm Langlütjen wurde im Gutachten der BAW (2010) vorgestellt und im Rahmen des FuE-Projekts der BAW (2011, 2012) weiterentwickelt. Die Prinzipskizze der Überströmung eines Leitdamms an einer SeeSchStr, ausgelöst durch den schiffserzeugten langperiodischen Absenk eines Seeschiffs, ist mit den bestimmenden Parametern als Überfall über ein breitkroniges Wehr in der Grafik von Bild 9 schematisch dargestellt.

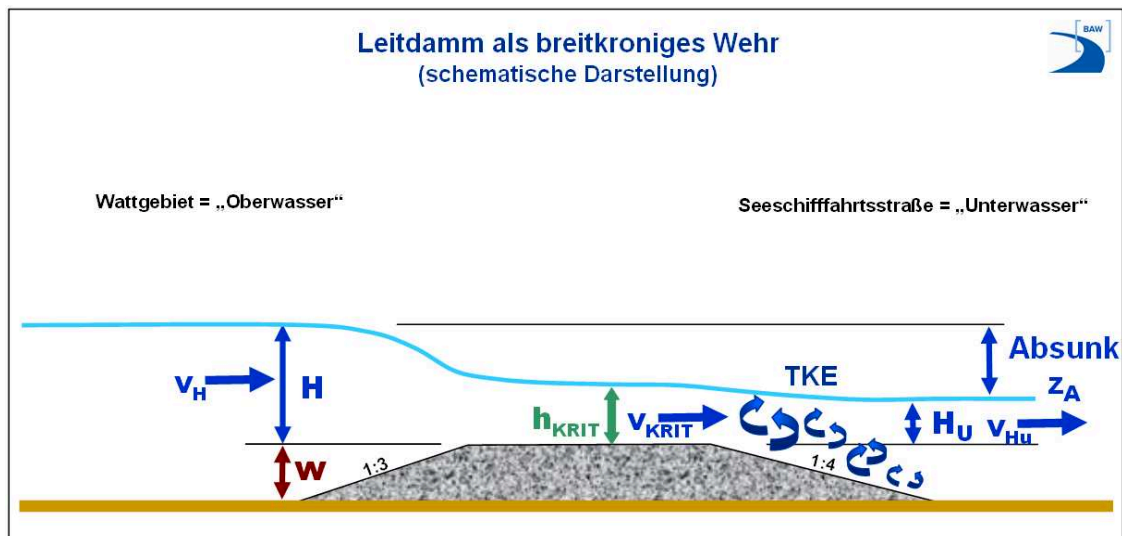


Bild 9: Überfallströmung an einem Leitdamm einer SeeSchStr infolge des langperiodischen schiffserzeugten Absunks (Prinzipskizze; BAW 2012)

Das Überströmen eines Leitdamms (oder einer Buhne) bei schiffserzeugten, absunkbedingten Wasserspiegeländerungen erklärt sich anhand folgender hydraulischer Prozesse (BAW 2012): Das dynamische Überströmen eines parallel zum Fahrwasser verlaufenden Leitdamms wird durch eine instationäre Wasserspiegeldifferenz infolge des fahrwasserseitigen schiffserzeugten Absunks zwischen dem „Wattgebiet“ und dem Fahrwasser erzeugt (*Bild 9*).

Zur Überprüfung der Größenordnung dieser schiffserzeugten Wasserspiegeländerungen auf dem Leitdamm infolge des fahrwasserseitigen Absunks waren Messungen in der Natur erforderlich. Dazu wurden vom WSA Bremerhaven im Rahmen der Aktualisierung der schiffserzeugten Belastung der Außenweser zusätzlich Analysen von Druckmessdaten am Leitdamm Langlütjen beauftragt. Die Bestückung des Leitdamms mit autark messenden Drucksonden und speziellen Halterungen der BAW sowie das regelmäßige Auswechseln und Auslesen der Drucksonden erfolgte durch Vertreter der Gewässerkunde des WSA Bremerhaven. Die Messpositionen sowie die geodätisch vermessene Sondenkonfiguration sind in *Bild 10* dargestellt.

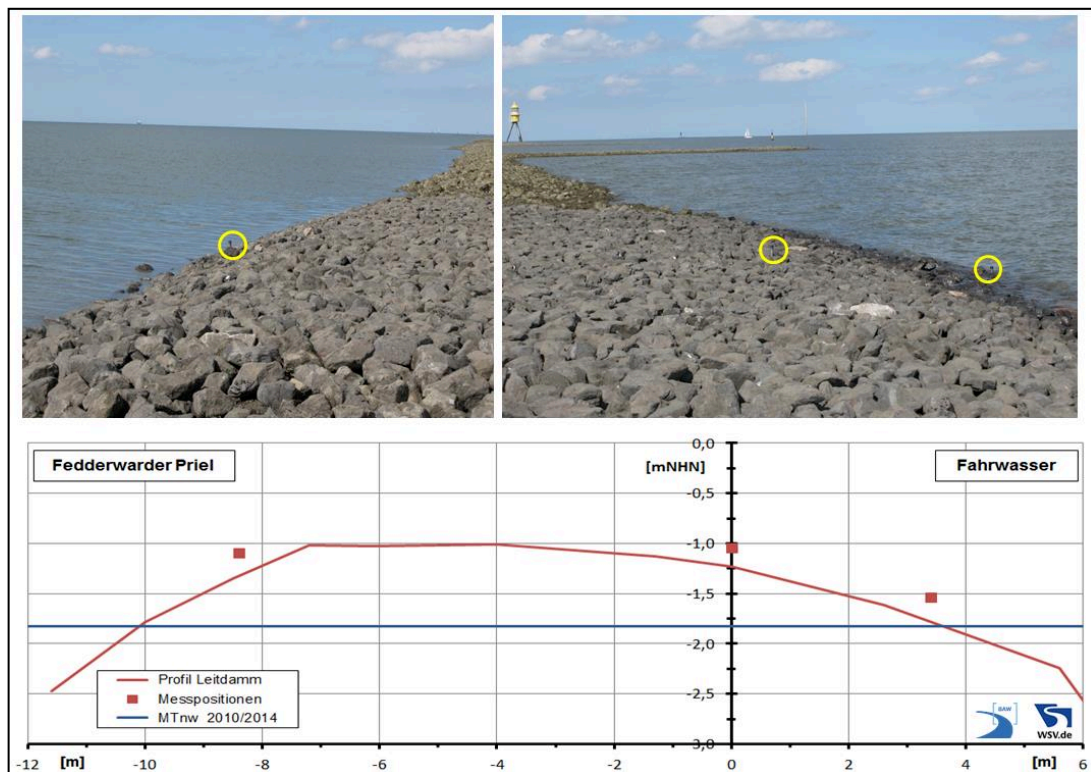


Bild 10: Messkonfiguration am Leitdamm Langlütjen (nach Daten des WSA Bremerhaven)

Vorauswertungen einzelner schiffsinduzierter Wasserspiegeldifferenzen auf dem Leitdamm etwa bei Tidemittelwasser ergaben absinkbedingte Differenzen zwischen der Fahrwasserseite des Leitdamms und der Wattseite (ca. 12 m) bis etwa $\Delta z_A \approx 0,6$ m Wassersäule, wobei die mittlere Drucksonde dabei nur einen geringen Wasserdruck anzeigte. Während dieses Ereignisses strömte das Wasser über den Leitdamm von der Wattseite in das Fahrwasser, was hohe Strömungsbelastungen der zum Fahrwasser geneigten Leitdammböschung und entsprechende Decksteinverlagerungen bewirkt haben sollte.

Weitergehende detailliertere Auswertungen u.a. des zeitlichen Versatzes der Wasserspiegeldifferenzen sowie eine Abschätzung der Deckwerks nahen Strömungsgrößen sind für das Folgeprojekt vorgesehen.

5.2 Pilotversuch zur Stabilität von optimierten Strombauwerken im Unterelbeabschnitt Juellssand (BAW 2012 / 2016)

Das WSA Hamburg und die BAW konzipierten im Unterelbeabschnitt Juellssand den Pilotversuch eines Stabilitätstests von optimierten Buhnenvarianten, die zukünftig einen geringen Unterhaltungsaufwand an den Strombauwerken erfordern sollten (BAW 2012b). In diesem Pilotprojekt waren die jüngsten Erkenntnisse aus bisherigen Erfahrungen der WSV sowie aus dem laufenden Forschungsprojekt der BAW zu berücksichtigen, indem zum Einen eine zerstörte Buhne mit neuer Geometrie und ausgerundetem Anschluss an das Deckwerk hergestellt wird, und zum Anderen eine weitere im Bereich der Buhnenwurzel vollständig zerstörte Buhne in ihren jetzi-

gen bestehenden Abmessungen als hinterströmte Bühne mit neuer Geometrie saniert wird. Diese beiden Sanierungsvarianten werden hinsichtlich der Stabilität der Deckschichten der Bühnen und Deckwerksanschlüsse sowie der Sohlsicherung durch ein zeitlich abgestuftes Monitoringprogramm begleitet.

Ziel des Projekt begleitenden Monitorings war die Erfassung von extremen Belastungsereignissen, sowie die zeitnahe Dokumentation und Zuordnung von - trotz weiterer Formoptimierung - auftretenden Bauwerksschäden infolge langperiodischer schiffserzeugter Wellenereignisse. Die Ergebnisse der Auftretenswahrscheinlichkeit der äußeren schiffserzeugten Belastungen sind zusammen mit der Verteilung der Schadensentwicklung u.a. als Datengrundlage für die Entwicklung eines probabilistischen Bemessungsverfahrens vorgesehen, das als Arbeitspaket AP7 geplant und im Rahmen des Folgeprojekts erarbeitet werden soll.

In Kooperation mit dem WSA Hamburg, SB2 und dessen Außenbezirk (Abz.) Wedel, der Firma ARGUS aus Ritterhude sowie dem Labor für Geomatik der HafenCity Universität Hamburg wurden die einzelnen Teilprojekte und Entwicklungsaufgaben abgestimmt und teils im Rahmen des übergeordneten FuE-Projekts der BAW beauftragt (u.a. BAW 2012b). Die ineinandergreifenden und teils parallel laufenden Arbeitsschritte waren:

- Erstellen und Abstimmen des Bearbeitungskonzepts der Pilotstudie im Untereelbeabschnitt Juelssand (BAW, WSA HH)
- Pilotstudie zur Machbarkeit von 3D-Laserscanning (HCU, BAW)
- Automatisierung der geodätischen 3D-Laseraufnahmen (HCU)
- Konzipierung der Messkonfiguration der äußeren Belastungen (BAW)
- Erstellen der Messinfrastruktur (WSA HH Abz. Wedel, BAW, ARGUS)
- Ertüchtigung der Strombuhnen Juelssand im Regiebetrieb (WSA HH Abz. Wedel)
- Regelmäßige Erfassung der Bathymetrie zwischen den Bühnenfeldern (WSA HH)
- Betrieb und Wartung der Messinfrastruktur (BAW, HCU, ARGUS)
- Aufbereitung und Analyse der Scan-Epochen (HCU, BAW)

Die Teilprojekte und deren Ergebnisse wurden anhand von einzelnen Berichten, Vorträgen und Veröffentlichungen dokumentiert (Uliczka 2012, Gätje und Uliczka 2014, Uliczka und Gätje 2015, Uliczka 2015, Tschirschwitz et al. 2016a, 2016b, 2016c, Uliczka und Jansch 2017).

Als Pilotobjekte wurden zwei Strombuhnen im Untersuchungsgebiet Juelssand an der Untereelbe zwischen Elbe-km 651,2 bis 653,2 gewählt (Bild 11 ; aus BAW 2012b). Im Rahmen des Pilotprojekts wurden die seinerzeit zerstörten Bühnen Bn29 und Bn31 sowie das Deckwerk im Nahbereich dieser Bauwerke vom Abz. Wedel im Regiebetrieb ertüchtigt. Beide Bühnen waren stark zerstört, was u.a. auf eine hohe schiffserzeugte langperiodische Wellenbelastung zurückzuführen war. Der Abstand der Bühnen zueinander mit einer vorhandenen, ebenso geschädigten Bühne dazwischen sollte eine gegenseitige Beeinflussung durch veränderte hydrodynamische Randbedingungen infolge der ertüchtigten Strombauwerke ausschließen.

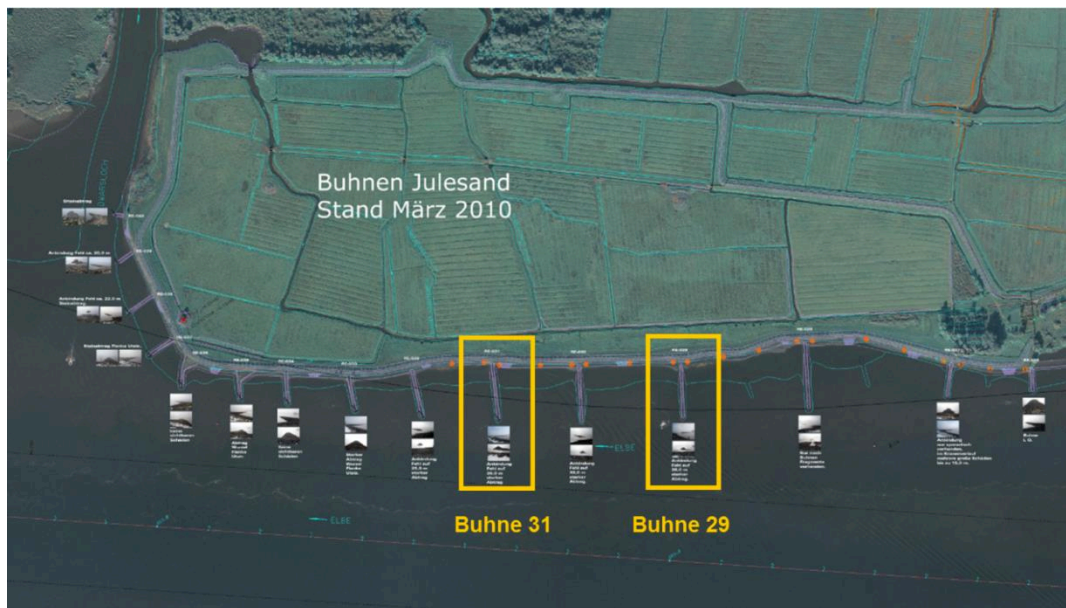


Bild 11: Strombuhnen Bn29 und Bn31 des Pilotprojekts Strombauwerke Juelsand, Übersicht (Grafik WSA Hamburg; Spezifizierung BAW 2012b)

Als Anhalt für die Geometrie der Pilotbauwerke wurde der vom WSA Bremerhaven aufgrund von Erfahrungen in der Außenweser entworfene, flachere Regelquerschnitt gewählt (vergl. Bild 7). Die erste Ertüchtigungsmaßnahme durch den Abz. Wedel des WSA Hamburg erfolgte von Juni bis September 2014 (Gätje und Uliczka 2014), das Aufmaß der Deckschicht sowie deren Veränderungen wurden in der Phase I mittels geodätischer Querprofilmessungen erfasst (Uliczka 2015). Nach Abschluss der Vorversuche mit einem terrestrischen 3D-Scannverfahren erfolgte für die Phase II eine erneute Profilierung beider Bauwerke wiederum mit der Steinklasse CP_{90/250} im Juni 2015. Die für die dreidimensionale Schadensentwicklung als Nullmessung erforderliche Referenzepoche der Buhnenoberfläche wurde abschließend am 07.07.2015 geodätisch aufgenommen.

Die Buhnenwurzel der Buhne Bn31 war mit einem Radius von über 20 m an das Deckwerk anzuschließen, die Seitenböschungen mit einer Neigung von 1:4 und der Buhnenkopf mit einer Neigung von 1:5 zu profilieren. Buhne Bn29 wurde als hinterströmtes Bauwerk mit einem ca. 30 m breiten, durch eine filterstabile Sohlbefestigung gesicherten, Durchströmungsbereich sowie den Böschungsneigungen 1:4 und einer Kopf- und Wurzelneigung von 1:5 erstellt. Um die alleinige Wirkung der veränderten Geometrie der Strombauwerke zu ermitteln, wurde vorerst auf das bisher bei den Buhnen Juelsand verwendete Deckschichtmaterial CP_{90/250} zurückgegriffen und nach Stand der Technik eingebaut. Auf eine zusätzliche Verklammerung der Deckwerkssteine wurde verzichtet.

Zur Erfassung des Einflusses des Steingewichts auf die Schadensentwicklung wurde die hinterströmte Buhne 29 für einen weiteren Stabilitätstest bei gleicher Formgebung im Herbst 2017 mit einer Deckschicht der nächst höheren Steinklasse LMB_{5/40} ertüchtigt.

Die äußeren hydrodynamischen Belastungen der Buhnen durch die langperiodischen schiffserzeugten Wellensysteme wurde mit autark messenden Drucksonden an ausgewählten Positionen entlang der Buhnenkrone und am stromauf liegenden Böschungsfuß bzw. im hinterströmten Sohlbereich gemessen.

Einen Teil der umfangreichen Infrastruktur zur Erfassung der 3D-Schadensentwicklung wurde in *Bild 12* zusammengestellt. Die aktuelle Verformung der Deckschicht wurde bei annähernd jedem Tideniedrigwasser von einem ca. 12 m hohen Messpfahl aus gescannt, die Daten über Richtfunk ca. 2 km zur Empfangsstation übertragen, zwischengespeichert zum Zugriff des Projektpartners HCU und über das Netz der WSV auf dem Server der BAW zur weiteren Sicherung abgelegt.



Bild 12: Teil der Messinfrastruktur zur Erfassung der zeitlich und räumlichen Schadensentwicklung der Strombuhne BN31 mit Pfahl und autarker Messplattform sowie Messprinzip bei Tnw inkl. Einmessung zu Fixpunkten (schematisch; nach Uliczka 2015)

Einen Eindruck der unterschiedlichen Schadensentwicklung bis hin zum Versagen der ertüchtigten Strombuhnen vermittelt eine fotografische Dokumentation (*Bild 13*), in der Aufnahmen unmittelbar nach der Fertigstellung im Juli 2015 mit denen vom November 2016 zusammengestellt wurden. Die wesentlichen langperiodischen schiffserzeugten Wellen- und Strömungsbelastungen wurden von abgehenden Schiffen aus Hamburg (hier in den Fotos von links kommend) verursacht:

- Die hinterströmte Buhne 29 zeigte nach 16 Monaten vorwiegend nur Schäden im Lee der Schiffswellenbelastung bis auf die ersten Anzeichen eines Durchbruchs nahe des Kopfbereichs. Die Buhnenkrone blieb annähernd auf dem profilierten Höhenniveau (*Bild 13*, links). Der befestigte hinterströmte Sohlbereich blieb bis auf geringe Steinverlagerungen stabil. Die wesentliche Energie der langperiodischen schiffserzeugten Heckwelle wurde durch den hinterströmten Buhnenabschnitt in das nächste Buhnenfeld geleitet und durch Überlagerungseffekte mit den dortigen Strömungsprozessen in Turbulenz umgewandelt.
- Die in einem Radius von ca. 25 m an das Deckwerk angeschlossene Buhne 31 widerstand zwar im Abschnitt der abgeflachten und verstärkten Wurzel der langperiodischen schiffserzeugten Wellenbelastung und Überströmung, allerdings verlagerten sich die beobachteten Schäden flächenhaft auf den mittleren und vorderen Buhnenabschnitt (*Bild 13*, rechts). Die Energiedissipation der langperiodischen schiffserzeugten Welle erfolgte jetzt durch nahezu

gleichzeitiges Überströmen der Bühnenkrone. Nachdem in Lee der Bühnenkrone erste Steinverlagerungen registriert waren, führten die weiteren Wellen- und Strömungsbelastungen zu lokalen Kolken und einer flächenhaften Umlagerung der Steine in das nächste Bühnenfeld. Die Folge war ein Abflachen der gesamten Strombühne mit späteren ausgeprägten Durchbrüchen entlang der Krone.

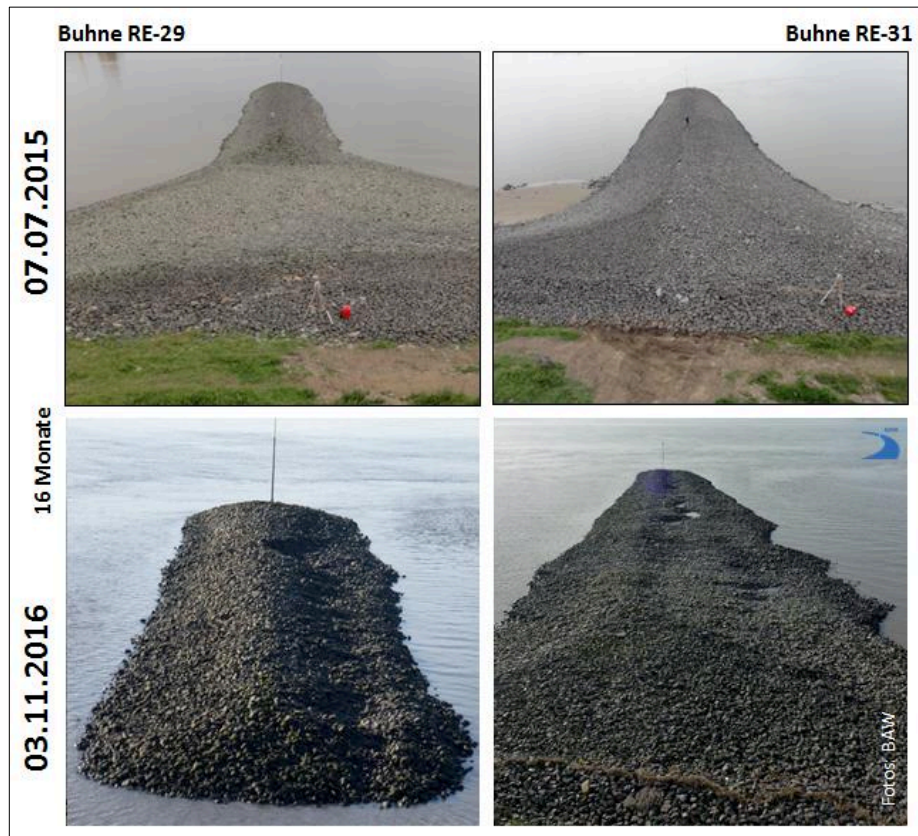


Bild 13: Fotografische Dokumentation der unterschiedlichen Schadensentwicklungen der ertüchtigten Strombühnen 29 und 31 (Zeitraum 7/2015 bis 11/2016; Fotos: BAW)

In *Bild 14* verdeutlichen zwei Beispiele, aufgenommen mittels terrestrischem 3D-Scan, die zeitliche und räumliche Darstellung der Schadensentwicklung der Strombühne 31. Dargestellt sind die aus den dreidimensionalen Scandaten berechneten Raster von 1x1 m für zwei jeweils bei Tnw aufgenommene Epochen (Uliczka und Jansch 2017). Der Ausgangszustand der Bühne 31 im oberen Teil des Bilds mit im Wesentlichen mittelgrünen Werten zeigt, dass bisher keine Oberflächenveränderungen zur Referenzepoche aufgetreten sind. Der im unteren Teil des Bilds dargestellte Zwischenzustand mit einer Epoche vom November 2016 zeigt die deutlichen flächenhaften Änderungen der Bühnenstruktur mit vertikalen Abträgen bis zu 2 m im Bereich der Bühnenkrone (*Bild 14*; dunkelblau) sowie teilweise vertikalem Auftrag in Lee bis zu etwa 0,8 m (*Bild 14*; gelb) aufgrund der äußeren langperiodischen schiffserzeugten Belastungen.

Diese bisher noch mit einzelnen nicht bereinigten Fehlmessungen behafteten Werte in einem 1x1m-Raster sind die Datenbasis für Vergleichsbetrachtungen zur Referenzepoche wie in *Bild 14*

sowie Berechnungen der Häufigkeitsverteilung von Verlagerungsvolumina zwischen den einzelnen Epochen.

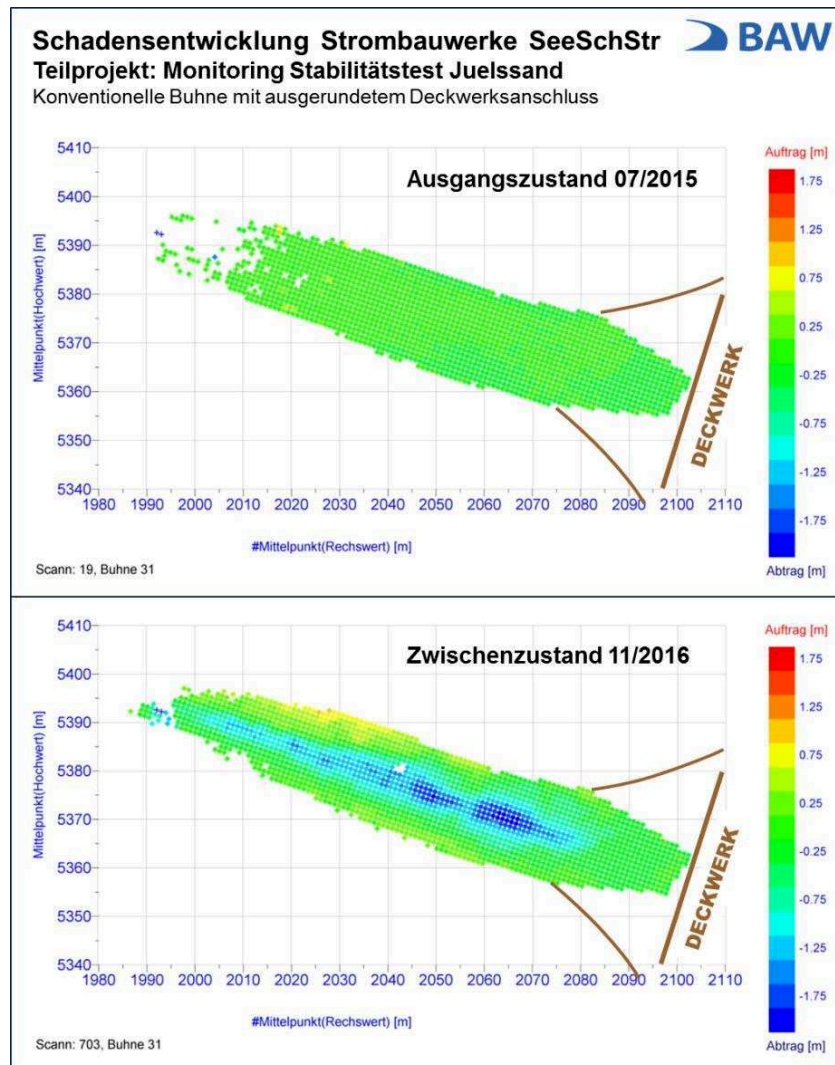


Bild 14: Zeitliche und räumliche Darstellung der Schadensentwicklung von Strombuhne Bn31 mittels terrestrischem 3D-Scan – Mittelwerte im 1x1m-Raster (Uliczka und Jansch 2017)

Die Zwischenergebnisse dieses Pilotprojekts zur Häufigkeitsverteilung der äußeren, langperiodischen schiffserzeugten Wellenbelastung sowie zu der zeitlich und räumlich erfassten Verformung der Deckschicht an den ertüchtigten Strombuhnen werden beispielhaft anhand von *Bild 15* und *Bild 16* vorgestellt.

Als vorläufiges Ergebnis aus dem bisherigen Untersuchungszeitraum ist festzuhalten: Die ca. 20 % höchsten Primärwellen (*Bild 15*; Summenhäufigkeit > 80 %) am stromauf liegenden Böschungsfuß lagen bei der hinterströmten Buhne (Bn29) in ihrer Summenhäufigkeit um 20 % bis 30 % unter der Häufigkeit der Wellenbelastung der konventionell angeschlossenen Buhne (Bn31). Dies ist fachlich nachvollziehbar, da sich die im Buhnenfeld umgeformte Heckwelle nicht vor der gesamten luvseitigen Buhnenböschung wie bei Bn31 aufstelte, sondern die wesentli-

che - auch am Deckwerk reflektierte - langperiodische Wellenenergie durch den hinterströmten Bühnenabschnitt in das nächste Bühnenfeld geleitet wurde. Damit war ebenso eine geringere Überströmungshäufigkeit mit entsprechenden Schäden zu erwarten.

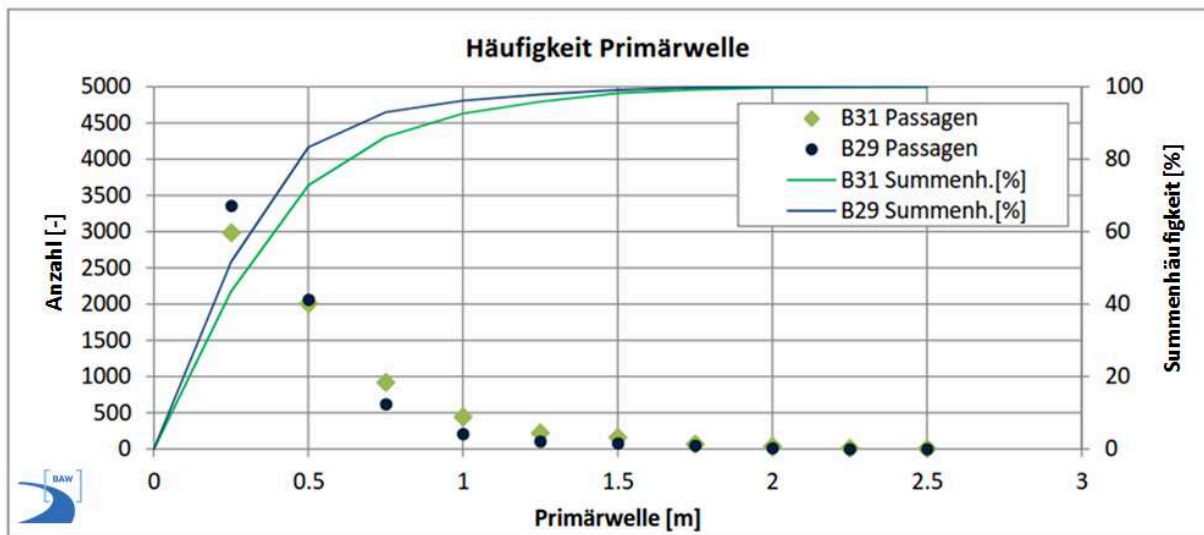


Bild 15: Häufigkeitsverteilung und Summenhäufigkeit der schiffserzeugten Primärwellenbelastung am stromauf liegenden Böschungsfuß der Strombauwerke Bn31 und Bn29 (Zeitraum 7/2015 bis 11/2016)

Die vertikalen Differenzen zwischen den jeweils bei T_{nw} gescannten Einzelepochen wurden als Mittelwerte des 1x1 m-Rasters berechnet und nach der Entfernung der Bühnenquerprofile vom Deckwerk zum Bühnenkopf bezeichnet. Erste Auswertungen der Querprofile 50 bis 70 betreffen somit den mittleren Abschnitt der jeweiligen Strombühnen von 50 m bis 70 m in Längsrichtung (ca. 400 m²; Bild 16). In diesem Abschnitt wurde auch die Häufigkeit der luvseitigen Eingangswelle ausgewertet wurde (Bild 15). Für die Bühne 29 sind 613 Messepochen vom 07.07.2015 bis zum 31.10.2016 ausgewertet worden. Für die Bühne 31 wurden 703 Messepochen bis zum 05.11.2016 ausgewertet. Als Absolutwert wird die Flächenbilanz der Querprofile 50 – 70 zwischen den jeweiligen Epochen bezeichnet, dabei wurden Abtrag und Auftrag miteinander in der Summe verrechnet und nicht separat betrachtet.

Die anhand der Fotoaufnahmen in Bild 13 und der geodätischen Auswertungen in Bild 14 beschriebenen unterschiedlichen Schadensentwicklungen und Schadensursachen werden nochmals anhand der Häufigkeitsverteilung und Summenhäufigkeit der Schadensentwicklung eines Ausschnitts der ertüchtigten Strombauwerke in Bild 16 deutlich.

Im Mittelabschnitt der Bühnen traten von Juli 2016 bis ca. November 2016 an der ans Deckwerk angeschlossenen Bühne 31 Umlagerungsvolumina von unter 1,0 m³/400 m² bei 70 % der erfassten Epochen auf. Bei 30 % der Epochen wurden Umlagerungen bis zum Maximalwert von etwa 7,0 m³/400 m² gemessen. An der hinterströmten Bühne 29 wurden während desselben Zeitraums bei 90 % der Epochen Verlagerungen unter 1 m³/400 m² gemessen, bei lediglich 10 % aller erfassten Epochen wurden Umlagerungsvolumina bis zum Maximum von rund

3,5 m³/400 m² berechnet. Die Zahlenwerte beinhalten noch einige Unsicherheiten im geodätischen Auswerteverfahren und sind derzeit noch als vorläufig zu bewerten und bedürfen durch die Weiterentwicklung des geodätischen Monitoringverfahrens einer Qualitätssicherung.

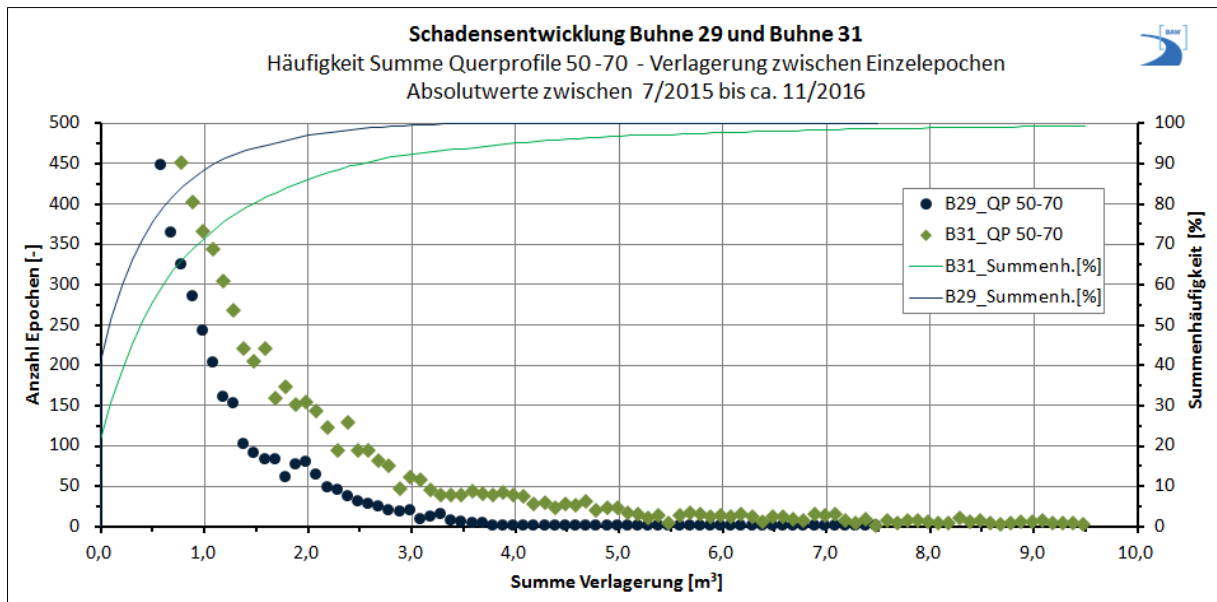


Bild 16: Häufigkeitsverteilung und Summenhäufigkeit der Schadensentwicklung eines Ausschnitts der ertüchtigten Strombauwerke auf Basis der 3D-Scans (erste Auswertungen, ohne Fehlerkorrektur; Zeitraum 7/2015 bis ca. 11/2016)

Dieser erste Vergleich der Summenhäufigkeiten der Umlagerungsvolumina zwischen den Epochen dokumentiert in Zahlenwerten die Stabilität bzw. den Widerstand dieses innovativen Strombauwerks „hinterströmte Buhne“ gegen die langperiodischen schiffserzeugten Wellenbelastungen.

Die in diesem Teilprojekt in Kooperation mit den Projektpartnern der WSV, der HCU und ARGUS kontinuierlich weiterentwickelte Zuverlässigkeit der Messinfrastruktur ermöglicht bei der erforderlichen Fortsetzung des laufenden Monitoringprojekts sowie der Weiterentwicklung des automatischen geodätischen Verfahrens eine weitergehende Bearbeitung des übergeordneten FuE-Projekts auf Basis einer abgesicherten Datengrundlage der Schadensentwicklung bei zukünftig dann drei in Formgebung oder Deckschichtgewicht unterschiedlichen Buhnensystemen.

Es ist davon auszugehen, dass somit mittelfristig abgesicherte Daten aus Messungen in der Natur auch zur Entwicklung probabilistischer Bemessungsverfahren für Deckschichten von Leitdämmen und Buhnen an SeeSchStr zur Verfügung gestellt werden können.

6 AP2 - Wissenstandanalyse der an der Wellen-Strombauwerk-Interaktion beteiligten Belastungsprozesse (IWW 2012)

Im Rahmen des FuE-Verbundprojekts „Schiffserzeugten langperiodischen Belastung zur Bemessung der Deckschichten von Strombauwerken an SeeSchStr“ bearbeitete das Institut für Wasserbau und Wasserwirtschaft (IWW) der RWTH Aachen das Arbeitspaket 2 „Wissenstandanalyse der an der Wellen-Strombauwerk-Interaktion beteiligten Belastungsprozesse“ (Gier et al. 2012).

Der abschließende Bericht von Gier et al. (2012) stellte das Ergebnis des Arbeitspakets 2 vor. Die im Bericht gewählte Vorgehensweise wurde in *Bild 17* skizziert.

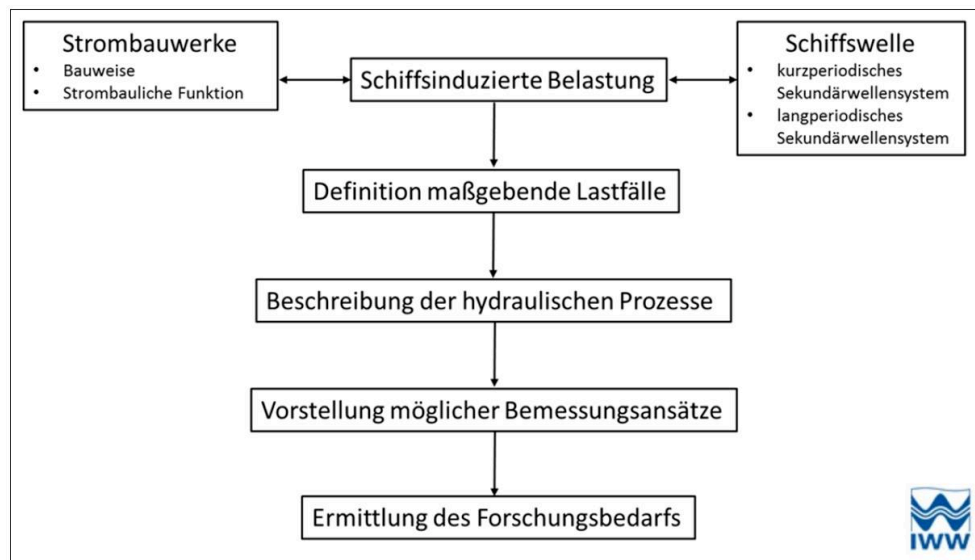


Bild 17: Vorgehensweise bei der Bearbeitung des Arbeitspakets 2 durch das IWW (nach Gier et al. 2012)

Nach der Beschreibung der Schiffswellensysteme sowie der Einflussgrößen auf Höhe und Perioden wurde in dem Bericht auf verschiedenen Ausführungsvarianten von Strombauwerken und deren strombauliche Funktion eingegangen.

Aus der Bewertung von Schadensanalysen und Lösungsvarianten der Praxispartner wurde festgestellt, dass die in der Praxis augenscheinlich ausreichende Widerstandsfähigkeit der neu gestalteten Bühnen bisher mit keinem fachlich abgesicherten Ansatz nachgewiesen werden konnte. Daraus wurde das Ziel des FuE-Verbundprojekts abgeleitet, genau diesen rechnerischen Nachweis der vorhandenen Widerstandsfähigkeit anhand von Bemessungsansätzen zu erbringen (nach Gier et al.).

Vor dem Hintergrund der Themenstellung des AP2 interessierten innerhalb dieses Kontext vor allem Quer- und Längsbauwerke. Da diese Bauwerke zumeist allein aus Wasserbausteinen errichtet werden, wurden die Regelwerke zur Klassifikation, die gestellten Anforderungen und eine mögliche geometrische Beschreibung der Wasserbausteine vorgestellt. Dabei war die geo-

metrische Beschreibung des Einzelsteins von besonderer Bedeutung, welche die Grundlage zur Parametrisierung der ungleichförmigen Steinform darstellt. Im Anschluss dazu wurde die Stabilität von Strombauwerken im Allgemeinen bearbeitet. Aufgrund des Materialeinsatzes und der Form könnten die in der Literatur vorhandenen Erkenntnisse über die Stabilität von Schüttsteindeckwerken direkt übertragen werden. Entscheidend für Stabilitätsaussagen war die Betrachtung der einwirkenden und widerstehenden Kräfte am Einzelstein. Die Betrachtung am Gesamtsystem könne aufgrund des homogenen Bauwerksaufbaus und der dadurch fehlenden Gleitfuge vernachlässigt werden. Der Ablaufprozess des Versagens als wurde vielschichtig und zunächst mit Umlagerungsprozessen einzelner Steine definiert. Diese ersten Umlagerungsprozesse wären jedoch nicht mit dem Erosionsbeginn zu verwechseln, sondern führten voerst das Bauwerk in eine stabilere Position über. Erst bei Überschreitung einer Belastungsgrenze würden Erosionsprozesse auftreten, die zum Versagen des Bauwerks führen (nach Gier et al. 2012).

Die vielfältigen Versagensmechanismen an Strombauwerken wurden al Folge unterschiedlicher Belastungen betrachtet. Vor dem Hintergrund der zu bearbeitenden Thematik stellen der kurzperiodische Sekundär- und der langperiodische Primärwellenangriff die zwei Hauptbelastungen dar. Zudem beeinflusst die vorhandene Freibordhöhe R_c , welche an den tidebeeinflussten Seeschiffahrtsstraßen mit dem Tidezyklus variiert, den auftretenden Versagensmechanismus maßgeblich. Dementsprechend wurden im Folgenden die Versagensmechanismen, die Ursachen und die resultierenden Schäden getrennt für die jeweilige Belastung in Abhängigkeit von der Freibordhöhe R_c dargestellt (nach Gier et al. 2012).

Die Belastungen und deren Auswirkungen wurden u.a. infolge der langperiodischen Primärwellen als Lastfälle in Abhängigkeit des Freibord R_c in dargestellt (aus Gier et al. 2012).


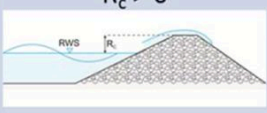
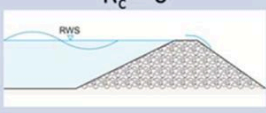
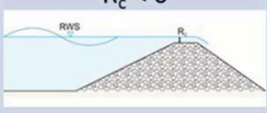
Primärwelle (langperiodisch) 			
	$R_c > 0$	$R_c = 0$	$R_c < 0$
Belastungsart			
Belastungsform	<ul style="list-style-type: none"> • Wellenauflauf • Überströmen • Wellenablauf • Wellenbrechen 	<ul style="list-style-type: none"> • Überströmen 	<ul style="list-style-type: none"> • Überströmen
Belastungsart	<ul style="list-style-type: none"> • instationär 	<ul style="list-style-type: none"> • instationär 	<ul style="list-style-type: none"> • instationär • quasistationär
Zu erwartende Schäden	<ul style="list-style-type: none"> • Verformungen • Zerstörung am Bühnenkopf • Kolkbildung • Zerstörung an der Lee-Seite 	<ul style="list-style-type: none"> • Verformungen • Zerstörung an der Lee-Seite 	<ul style="list-style-type: none"> • Verformungen • Zerstörung an der Lee-Seite

Bild 18: Lastfälle infolge der langperiodischen schiffserzeugten Primärwelle in Abhängigkeit des Freibord R_c (aus Gier et al. 2012)

Die in Bild 18 dargestellten Lastfälle bezogen sich stets auf den Ausgangszustand, d.h. zum Zeitpunkt bevor die hydraulischen Fließprozesse am Strombauwerk in Interaktion mit einem passierenden Schiff geraten. Des Weiteren musste eine Unterscheidung der Lastfälle hinsichtlich der Bauwerksart vorgenommen werden. Zunächst wurde die Belastung auf Querbauwerke in Abhängigkeit der Freibordhöhe dargestellt, anschließend die Auswirkungen des langperiodischen Wellensystems auf Längsbauwerke (nach Gier et al. 2012).

Ist die vorhandene Freibordhöhe R_c eines Küstenbauwerks (oder Strombauwerks) nicht ausreichend, kann während des Wellenaufbaus die Bauwerkskrone überspült werden. Dieser instationäre Überströmungsvorgang wird als Wellenüberlauf bezeichnet. In der Ausgangssituation des Wellenüberlaufs liegt eine positive Freibordhöhe vor. Negative Freibordhöhen hingegen führen zu einer stationären Überströmung, die gegebenenfalls durch instationäre Wellenbewegungen überlagert werden kann. Die Folgen des Wellenüberlaufs können schwere Schäden am Bauwerk, wie beispielsweise Deckwerksverwerfungen, sein (nach Gier et al. 2012).

Gier et al. (2012) kamen zu der Feststellung, dass die vorhandenen Bemessungsansätze zur Stabilität von Schüttsteinen für Küstenbauwerke für die Luvseite von Strombauwerken aufgrund der ähnlichen Wellenhöhe und -periode der kurzperiodischen Sekundärwellen von Schiffen eine ähnliche Belastungsstärke auf dem Deckwerk wie Windwellen verursachen. Die Belastungsintensität ist dagegen aufgrund der geringeren Wiederholungszahl von Schiffswellen im Vergleich zu Windwellen weitaus geringer. Des Weiteren wird in den Bemessungsansätzen für Küstenbauwerke davon ausgegangen, dass die Wellen aufgrund von Refraktionseffekten nahezu senkrecht auf den Wellenbrecher treffen. Sekundärwellen hingegen treffen zumeist schräg auf die Strombauwerksböschung. Infolge der genannten Gründe erfassen die vorgestellten Bemessungsansätze die zu untersuchende Belastungssituation nicht exakt, geben jedoch die Belastungssituation ausreichend genau wieder. Aufgrund der an Strombauwerken auftretenden geringeren Belastungsintensität ist womöglich mit einer Überdimensionierung des Bauwerks zu rechnen, wodurch die Baukosten eventuell ansteigen, jedoch die Stabilität des Bauwerks nicht negativ beeinflusst wird. Aus diesem Grund besteht derzeit kein erhöhter Forschungsbedarf bezüglich der Stabilität von Strombauwerken infolge des kurzperiodischen Sekundärwellenangriffs (nach Gier et al. 2012).

Bei den Stabilitätsuntersuchungen der Leeseite von Strombauwerken infolge des langperiodischen schiffserzeugten Primärwellenangriffs kamen Gier et al. (2012) zu der Schlussfolgerung, dass in Interaktion des Strombauwerks mit dem langperiodischen Primärwellensystem hochinstationäre Fließprozesse entstehen, die sich aus den Teilprozessen Bugstau, Absunk, Schwellströmung und deren Interferenzerscheinungen zusammensetzen. Diese Überströmungsvorgänge, die Folge des Absunks und der Schwellströmung sind, wären hauptverantwortlich für das Zustandekommen von Schäden. Die Schäden treten zumeist in Form von Deckschichtverwerfungen auf der Leeseite der Strombauwerke auf. Um Aussagen über die Stabilität der Leeseite von Strombauwerken treffen zu können, wurde zunächst die Ermittlung der vorhandenen Überfallmenge notwendig. Die Stabilität der Böschung selbst müsse im Anschluss anhand des Vergleichs zwischen der vorhandenen und der maximal zulässigen Überfallmenge bewertet werden.

Nach der Betrachtung verschiedener Berechnungsansätzen von Überfallmengen an unterschiedlichen Wehrformen gingen Gier et al. (2012) detaillierter auf vorhandene Ansätze zur Ermittlung der zulässigen Überströmmenge an Schüttsteindeckwerken ein.

Eine Bewertung der Übertragbarkeit der vorgestellten Ansätze zur Beurteilung der Stabilität von Strombauwerken infolge des langperiodischen Primärwellenangriffs erfolgte bei Gier et al. (2012) auf Grundlage eines Bemessungsbeispiels, anhand dessen im Nachgang die bereits vorhandenen Ansätze zu bewerten, Fehlstellen aufzuzeigen und diese in den notwendigen Forschungsbedarf umzusetzen waren. Am Beispiel der Ermittlung der vorhandenen Überfallmenge wurde in erster Näherung anhand eines Ansatzes am breitkronigen Wehr ermittelt. Da in der Literatur keine passende Ansätze zur Berücksichtigung des Überströmens infolge des langperiodischen Primärwellensystems vorhanden war, war diese Vorgehensweise als sinnvoll zu bewerten. Anhand der Vereinfachung der tatsächlich auftretenden Strömungssituation in den Ansätzen wurden die maßgebenden Punkte aufgezählt, die mit den betrachteten Ansätzen nicht berücksichtigt werden konnten und die gleichzeitig den notwendigen Forschungsbedarf darstellten:

- Vernachlässigung der Dynamik der Wellen,
- Vernachlässigung der Rauheit des Strombauwerks,
- Vernachlässigung der Porosität des Strombauwerks,
- Vernachlässigung der geometrischen Gestaltung des Strombauwerks und
- Vernachlässigung der teils schrägen Anströmungsrichtung.

Ein großer Nachteil war die Tatsache, dass die Instationarität der Welle bisher keine Berücksichtigung in den Ansätzen fand, so dass die Zu- und anschließende Abnahme der Überfallhöhe, -geschwindigkeit und -menge als charakteristisch bei der Belastung der Strombauwerke detailliert berücksichtigt werden musste (nach Gier et al. 2012).

Der Bericht zum AP2 hinsichtlich der „Wissenstandanalyse der an der Wellen-Strombauwerk-Interaktion beteiligten Belastungsprozesse“ kam zusammenfassend zu den folgenden wesentlichen Ergebnissen:

- Der kurzperiodische Sekundärwellenangriff kann mit vorhandenen Bemessungsansätzen mit ausreichender Genauigkeit erfasst werden.
- Die Bemessung von Strombauwerken auf den langperiodischen Anteil des Schiffswellensystems ist aufgrund der hochturbulenten, instationären Strömungsvorgänge mit den Ansätzen aus der Literatur nur schwer möglich.
- Um diese Strömungsprozesse trotzdem zugänglich für eine Bemessung zu machen, wurden beispielsweise die Strombauwerke mit einem breitkronigen Wehr verglichen und die Durchlässigkeit der Strombauwerke, deren Rauheit sowie die zumeist schräge Anströmungsrichtung genauso außer Acht gelassen wie die Instationarität des Überströmungsereignisses.

Eine zielführende Erfassung der Strömungsprozesse und deren Auswirkungen auf die Strombauwerke werden nur mit Hilfe von physikalischen Modellversuchen möglich sein (nach Gier et al. 2012).

7 AP3- Bestimmung der bemessungsrelevanten Parameter schiffserzeugter Wellen in Seeschiffahrtsstraßen (Parametrisierung der Schiffswellen, LWI 2013)

Im Rahmen des FuE-Verbundprojekts „Schiffserzeugten langperiodischen Belastung zur Bemessung der Deckschichten von Strombauwerken an SeeSchStr“ bearbeitete die Abteilung Hydromechanik und Küsteningenieurwesen des Leichtweiß-Instituts für Wasserbau (LWI) der Technischen Universität Braunschweig das Arbeitspaket 3 „Bestimmung der bemessungsrelevanten Parameter schiffserzeugter Wellen in Seeschiffahrtsstraßen - Parametrisierung der Schiffswellen“ (Oumeraci und Brühl 2013).

Schiffserzeugte Wellen sind hochgradig komplex und dreidimensional und weisen je nach Schiffparametern (u.a. Schiffstyp, -größe, -tiefgang und -geschwindigkeit, Uferabstand des fahrenden Schiffes), Parametern der SeeSchStr (u.a. Fahrwassertiefe und -breite, Unterwasserprofil) sowie anderen Rand- und Umweltbedingungen die unterschiedlichsten Formen auf, die in ihrer Gesamtheit durch einen Wellengenerator unter Laborbedingungen derzeit und in naher Zukunft unmöglich zu reproduzieren sind (Oumeraci und Brühl 2013).

Nach Oumeraci und Brühl (2013) wurden die folgenden Fragestellungen bislang nicht systematisch untersucht, obwohl sie für Bemessungszwecke und für deren vereinfachte Nachbildung im Labor von großer Wichtigkeit für Forschung und Praxis sind:

- Wie sind die Parameter der verschiedenen Wellentypen für verschiedene Wellenklassen zu definieren und wodurch werden sie bestimmt (relevanteste Einflussfaktoren)?
- Welche Parameter und deren statistische Kenngrößen sind je nach vorgegebener Fragestellung und zu untersuchender Prozesse (z.B. hier hydraulische Stabilität der Deckschicht) maßgebend?
- Welche sinnvollen (dimensionslose) Kennzahlen lassen sich je nach der jeweiligen Fragestellung daraus ableiten?
- Wie ist eine Bemessungswelle (maßgebender Parameter, statistische Kenngröße) für schiffsinduzierte Belastungen von Strombauwerken definiert und bestimmt?

Ziel des Arbeitspakets 3 (AP3) war nach Oumeraci und Brühl (2013) die Beantwortung dieser Fragen und damit die parametrisierte Beschreibung der relevanten Schiffswellen, die für eine Bemessung von Strombauwerken verwendet werden können. Die abschließende Beantwortung dieser Fragen sollte im Rahmen einer Dissertation erfolgen. Die im Rahmen des AP3 durchzuführen den Untersuchungen waren als vorbereitende Vorstudien für die Erstellung eines Forschungsantrags zur Einreichung bei der DFG oder anderen Institutionen einzustufen. In sind die als notwendig erachteten Schritte zur Parametrisierung der schiffinduzierten Wellen zusammengestellt sowie die beiden Vorstudien zur Wissens- und Felddatenanalyse im Rahmen des AP3 aufgeführt.

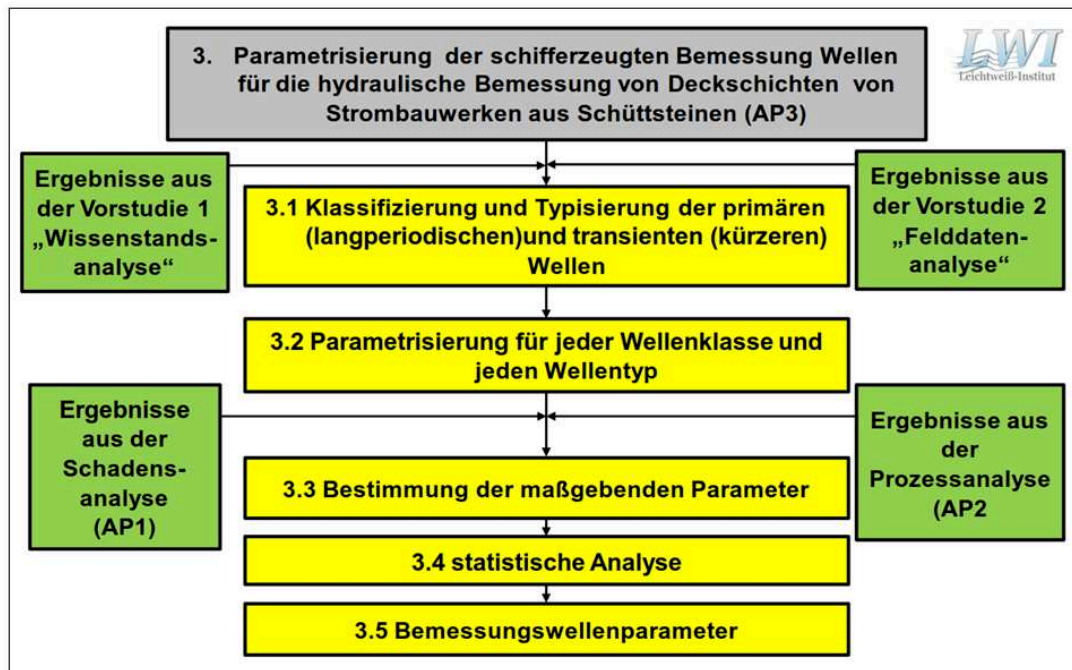


Bild 19: Vorgehen bei der Bearbeitung des AP3 zur Parametrisierung der schifferzeugten Wellen (aus Oumeraci und Brühl 2013)

Für die Bearbeitung des Arbeitspaketes AP3 wurden die von der BAW zur Verfügung gestellten Daten aus Modell- und Systemversuchen sowie Naturmessungen ausgewertet. Das Ziel war es, die in den vorliegenden Daten enthaltenen Schiffswellen zu klassifizieren und zu typisieren, so dass schließlich - im Idealfall - je nach Schiffstyp, Fahrgeschwindigkeit und Fahrstraßengeometrie eine Vorhersage der zu erwartenden charakteristischen Schiffswellenparameter möglich ist.

Von den durch die BAW übergebenen Daten lagen bereits ausführliche Auswertungen der Schiffswellen im Zeitbereich vor. Diese Verfahren waren bekannt und wurden erfolgreich angewendet. Oumeraci und Brühl (2013) gingen davon aus, dass diese Analysen in der Regel lediglich einzelne Gesichtspunkte einer Welle, ohne die der Entstehung, Ausbreitung und Verformung der Welle zugrunde liegenden physikalischen Prozesse berücksichtigen. Mit den durch die BAW übergebenen Daten lag jedoch ein ausreichend großer Datenbestand vor, der es erlaubte, diese Lücke zu schließen. Der Grundgedanke war hierbei, dass es bei Anwendung eines generellen Ansatzes möglich sein müsste, ausgehend von der Quelle der Schiffswellen, dem fahrenden Schiff, unter Berücksichtigung der entsprechenden Parameter wie Fahrgeschwindigkeit, Querschnittsverhältnisse und dem Fahrrinnenprofil die Entwicklung der Schiffswelle in der Wasserstraße ermitteln zu können. Mit numerischen Methoden sei dies bereits möglich, jedoch sollte durch einen analytischen Ansatz langfristig ein vereinfachtes Verfahren ermittelt werden (nach Oumeraci und Brühl 2013).

Im Rahmen des vorliegenden Abschlussberichtes wurde beschrieben, wie verschiedene Frequenz- und Zeit-Frequenz-Analysemethoden für die Aufbereitung, Filterung und Analyse der vorliegenden Schiffswellenmessungen angewendet wurden.

Nach einer Beschreibung der Versuchsaufbauten der Modellversuche, der Messpositionen aus den Naturmessungen sowie der übergebenen Daten folgten anschließend qualitative Vergleiche der an verschiedenen Pegeln gemessenen Zeitreihen. Dieser ersten Analysen waren nach Oumeraci und Brühl (2013) notwendig, um einen grundlegenden Überblick über die charakteristischen Eigenschaften und wichtige Einflussfaktoren der Schiffswellen zu erhalten.

Die Anwendung der schnellen Fourier-Transformation (FFT) auf die Schiffswellen wurde verwendet, um die Originalsignale zu filtern und in Primärwellensystem und Sekundärwellen aufzuteilen. Im Weiteren erfolgte die Anwendung der FFT zunächst mit dem Ziel, Abhängigkeiten zwischen den aus den Fourierspektren ermittelten spektralen Momenten verschiedener Ordnungen und den Zeitbereichsparametern zu ermitteln. Die Grafik in Bild 20 zeigt das Beispiel einer Schiffswellenzeitreihe (umgerechnet auf Naturwerte) aus Systemversuchen im hydraulischen Modell der BAW (oben) mit Ausschnitten des Fourier-Spektrums bei einem Tiefpassfilter von $f = 0,067$ Hz zur Selektion des langperiodischen Anteils (mittig) und bei einem Bandpassfilter von $0,067 \text{ Hz} < f < 1 \text{ Hz}$ zur Detektion der kurzperiodischen Anteile (unten; nach Oumeraci und Brühl 2013).

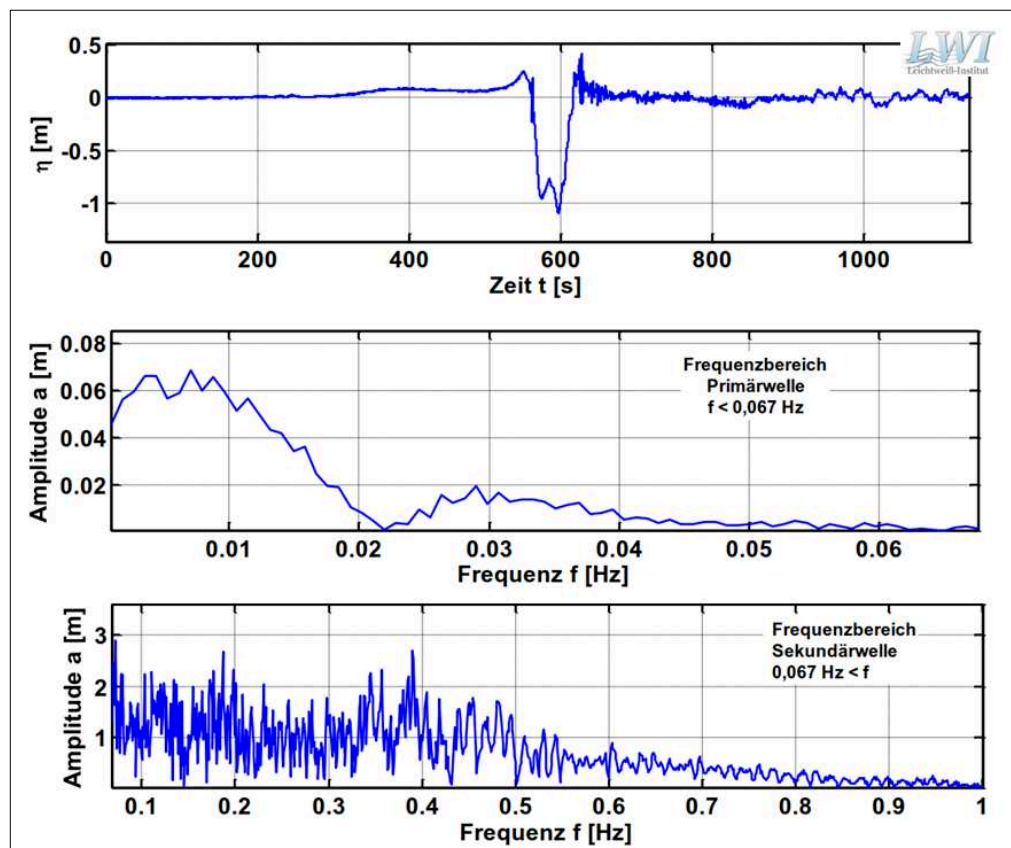


Bild 20: Beispiel einer Schiffswellenzeitreihe aus Systemversuchen (oben) mit Ausschnitten des Fourier-Spektrums mit Tiefpassfilter $f = 0,067$ Hz (mittig) und mit Bandpassfilter von $0,067 \text{ Hz} < f < 1 \text{ Hz}$ (unten; nach Oumeraci und Brühl 2013)

In einem weiteren Untersuchungsabschnitt wurden die spektralen Momente verschiedener Ordnungen berechnet und mit den vorliegenden Auswertungen im Zeitbereich verglichen. Das Ziel war, anhand der Ergebnisse der Spektralanalyse Bemessungsansätze für die Parametrisierung der Wellenparameter zu finden. Oumeraci und Brühl (2013) kamen nach der Analyse ausgewählter Systemversuche mit vier verschiedenen Fahrwassergeometrien, zwei verschiedenen Schiffstypen bei mittlerer Fahrt, zwei verschiedenen Wassertiefen und Kielfreiheiten je Schiffstyp sowie verschiedenen Schiffsgeschwindigkeiten zu dem Ergebnis, dass trotz dieser verschiedenen Einflüsse bereits eine sehr deutliche Abhängigkeit zwischen der Primärwellenhöhe und dem spektralen Moment m_1 besteht, wie in Bild 21 das Bestimmtheitsmaß von $R^2 = 0,962$ verdeutlicht. Diese gute Übereinstimmung zwischen den berechneten Daten und der Ausgleichsfunktion wurde bereits in einer kurzen Voruntersuchung ermittelt und gab den Ausschlag für die detailliertere Untersuchung dieses vielversprechenden Ansatzes über die spektralen Momente.

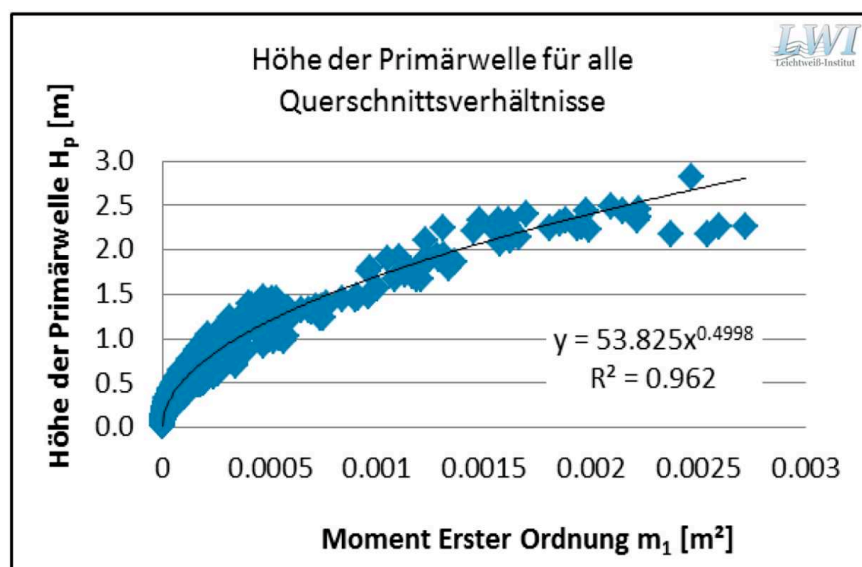


Bild 21: Höhe der Primärwelle als Funktion der spektralen Momente erster Ordnung für alle untersuchten Querschnittsverhältnisse (Oumeraci und Brühl 2013)

Bei einer weiteren Differenzierung nach Zeitreihen nur eines Schiffs mit nur einer Kielfreiheit (BAW-Serie 360160170) erhielten Oumeraci und Brühl (2013) die folgende Gleichung, die mit $R^2 = 0.9809$ ein sehr hohes Bestimmtheitsmaß aufwies und daher eine sehr gute Übereinstimmung zwischen den Daten und der Kurve lieferte:

$$H_p(m_1) = 83,798 \cdot m_1^{0.5273}$$

Eine genauere Betrachtung der Daten zeigte weiterhin, dass vor allem im Bereich niedriger Primärwellenhöhen und kleiner Momenten m_1 ist die Streuung der Messwerte sehr gering war. Für große Werte von H_p und m_1 lag die Ausgleichsfunktion trotz der größeren Streuung der Werte in diesem Bereich im sicheren Bereich.

In einem weiteren Abschnitt des AP3 wurden erste Ansätze zur Analyse von Schiffswellen mit der Hilbert-Huang-Transformation (HHT) vorgestellt. Hierbei wurde versucht, das Schiffswellensignal mittels der HHT in das Primärwellensystem und die Sekundärwellen aufzugliedern

und anschließend hieraus, analog zur Vorgehensweise bei der FFT, die jeweiligen spektralen Momente zu ermitteln. Die HHT wurde mit ihren theoretischen Grundlagen im Abschlussbericht des AP3 detailliert erläutert und anschließend versucht, entsprechende Abhängigkeiten zwischen den Momenten und den Zeitbereichsparametern zu ermitteln. Oumeraci und Brühl (2013) kamen nach umfangreichen Analysen von Randeffekten der HHT-Anwendung zu der Feststellung, dass aufgrund noch bestehender Probleme hinsichtlich der physikalischen Abhängigkeiten sowie der nicht einheitsgetreuen Terme die in den Voruntersuchungen ermittelte Ausgleichsfunktion noch nicht für die konkrete Anwendung geeignet waren. Durch eine starke Vergrößerung der Datengrundlage könnte allerdings die Qualität der Ergebnisse maßgeblich gesteigert werden.

Schließlich wurden die Schiffswellen mit einer am LWI implementierten innovativen Analyse-methode untersucht, der nichtlinearen Fourier-Transformation (NLFT). Diese Methode war nach Oumeraci und Brühl (2013) in der Lage, ein gemessenes Signal im Flachwasser in reale physikalische Basiskomponenten zu zerlegen, sogenannte cnoidale Wellen. Gleichzeitig wurden die nichtlinearen Wellen-Wellen-Interaktionen zwischen diesen Wellen berücksichtigt. Im Rahmen der AP3 wurde diese Methode erstmals auf Schiffswellen angewendet. Daher beschränkten sich die Analysen auf erste Machbarkeitsstudien. Aufgrund des gegenwärtigen Entwicklungsstandes der NLFT war die Methode noch nicht für die quantitative Analyse großer Datenmengen oder langer Signale geeignet, jedoch zeigten die derzeit möglichen Grundlagenanalysen bereits, dass sich durch die Anwendung der NLFT auf die Schiffswellendaten eine gänzlich andere Sichtweise auf die Wellen ergab.

Zusammenfassend waren nach Oumeraci und Brühl (2013) die im AP3 bearbeiteten Untersuchungen im Wesentlichen als Voruntersuchungen und Vorarbeiten für einen Forschungsantrag zu betrachten, der nach weiteren Zusatzuntersuchungen im Auftrag der BAW bei der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) eingereicht und im September 2016 unter dem Titel "Parametrisierung nichtlinearer schiffsinduzierter 3D-Wellenfelder für die hydraulische Bemessung von Schutzbauwerken an Seeschiffahrtsstraßen (Parameterisation of nonlinear ship-induced wave fields - PaNSiWa)" mit dem Förderkennzeichen BR 5289/2-1bewilligt wurde.

Abschließend wurde festgestellt, dass im Rahmen dieses Arbeitspakets erstmals Systemversuche mit Schiffswellen erfolgreich systematisch mit Frequenz- und Zeit-Frequenzanalysemethoden ausgewertet wurden. Hieraus ergaben sich für das geplante Vorgehen eine Reihe von neuen Ansätzen, Sichtweisen, Fragestellungen und Problemen, die in den nächsten Jahren untersucht, beantwortet und gelöst werden sollten (nach Oumeraci und Brühl 2013).

8 AP4a - Kleinmaßstäbliche Untersuchungen (2D) zur Erfassung der maßgebenden Prozesse und zur hydraulischen Stabilität (IWW 2013 / 2016)

Im Rahmen des FuE-Verbundprojekts „Schiffserzeugten langperiodischen Belastung zur Bemessung der Deckschichten von Strombauwerken an SeeSchStr“ bearbeitete das Institut für Wasserbau und Wasserwirtschaft (IWW) der RWTH Aachen das Arbeitspaket 4a „Kleinmaßstäbliche Untersuchungen zur Erfassung der maßgebenden Prozesse und zur hydraulischen Stabilität“ (Wöffler et al. 2013). Als maßgebender Prozess hinsichtlich der Stabilität eines Strombauwerks war die Überfallmenge detektiert worden.

Den im Arbeitspaket 2 nach Gier et al. (2012) ermittelten Forschungsbedarf galt es innerhalb des AP 4 zu klären. Da bisher eine analytische Beschreibung derartig komplexer hydraulischer Fließvorgänge, wie beispielsweise das Durchströmen poröser Strukturen, nicht möglich war, stellten physikalische Modellversuche ein geeignetes Werkzeug zu Klärung solcher Fragestellungen dar.

Der Einfluss der Dynamik der Welle auf die Überfallmenge sollte durch 3 Modellphasen bewertet werden, in denen zwar der Aufbau des zu testenden Modellkörpers unverändert bleibt, jedoch sich die Belastungen und dementsprechend die Versuchsprogramme grundlegend unterscheiden (Wöffler et al. 2013). Folgende Belastungsarten wurden in den 3 Modellphasen vorgesehen:

- Modellphase 1: stationäre Belastung
- Modellphase 2: kurzperiodische Belastung
- Modellphase 3: langperiodische Belastung

Der Einfluss der Geometrie des Bauwerkskörpers auf die Überfallmenge sollte durch 5 verschiedene Modellkörper bewertet werden. Der geometrische Aufbau der Modellkörper unterschied sich in Hinblick auf Kronenbreite und der Flankenneigung der Luv- und Leeseite. Die Höhe der Bauwerkskrone hingegen blieb stets unverändert. Es war vorerst vorgesehen, jeden Modellkörper in den einzelnen Modellphasen zu testen. Der Einfluss der Struktur des Strombauwerks, bewertet durch die Porosität und Rauheit auf die Überfallmenge, sollte durch 3 verschiedene Varianten getestet werden. Die 3 Varianten betrafen jeden der 5 Modellkörper und stellten sich folgendermaßen dar (Wöffler et al. 2013):

- Variante 1: glatt, undurchlässig und lagestabil
- Variante 2: rau, undurchlässig und lagestabil
- Variante 3: rau, durchlässig lagestabil und lageinstabil

Der für das kleinmaßstäbliche Modell skalierte, äquivalente Steindurchmesser D_{SM} der in der Natur verwendeten Wasserbausteine LMB_{5/40} und LMB_{10/60} (Mischungsverhältnis 1:1) betrug bei Rohdichten von 2,8 t/m³ (Kalkstein) bzw. 3,7 t/m³ (Eisensilikat) Werte zwischen $D_{SM_{min}} = 17$ mm und $D_{SM_{max}} = 39$ mm (nach Wöffler et al. 2013).

Wöffler et al. (2013) sahen zudem vor, die Untersuchungen bezüglich der Stabilität von Strombauwerken allein durch den Aufbau der Variante 3 vorzunehmen. Mit Hilfe der Variante 1 und 2 hingegen sollten Grundlagen des Verständnisses der hydraulischen Fließvorgänge gelegt werden. Allein der Einfluss durch die vornehmlich schräge Auflaufrichtung konnte innerhalb des

AP4 nicht berücksichtigt werden. In jeder der drei Modellphasen waren 5 Modellkörper mit jeweils 3 Varianten zu testen, was zu insgesamt 45 verschiedenen Modellaufbauten ergab.

In Bild 22 ist der geplante Ablauf der physikalischen Modellversuche des Arbeitspakets 4 nochmals graphisch dargestellt (aus Wöffler et al. 2013).

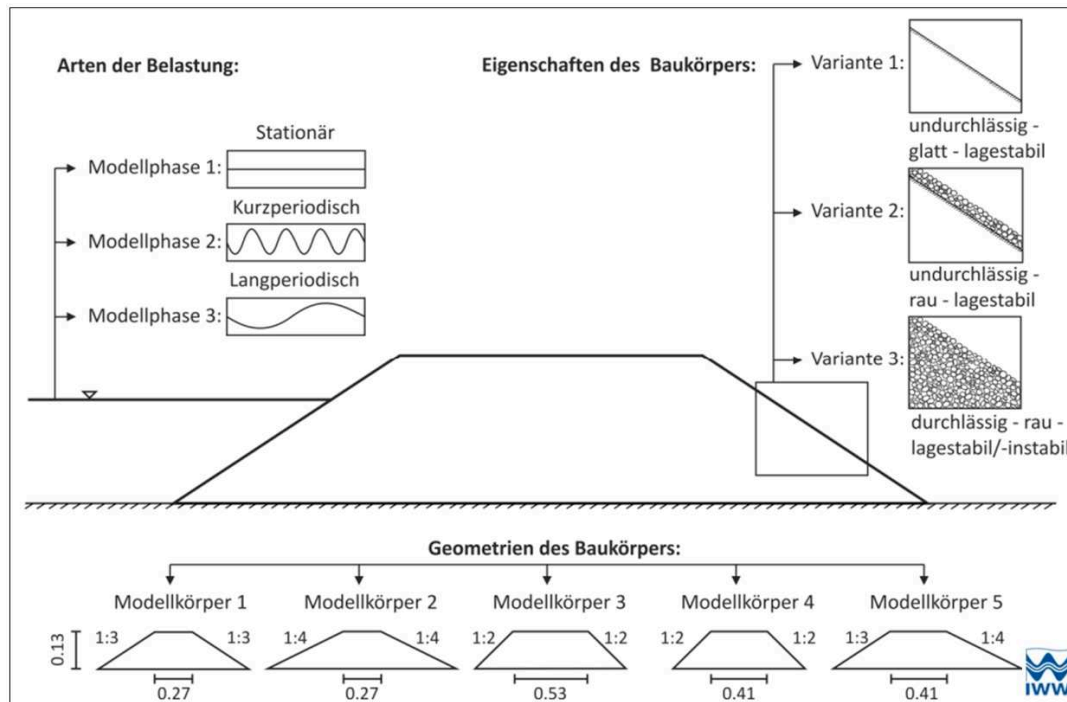


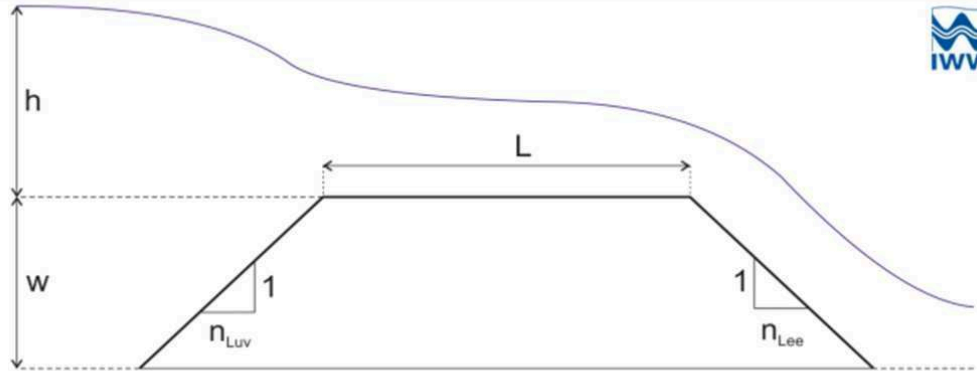
Bild 22: Ablaufplan der kleinmaßstäblichen physikalischen Modellversuche des Arbeitspakets 4 (aus Wöffler et al. 2013)

Auf Basis des FROUDE'schen Modellgesetzes sowie der Wahl des Maßstabsfaktors $\eta = 7,5$ wurden bei den kleinmaßstäblichen zweidimensionalen Modellversuchen die Ähnlichkeitsanforderungen und die Grenzbedingungen nach REYNOLDS und WEBER eingehalten. Detailliertere Angaben dazu sowie auch zur Wahl und zum Aufbau der Modellkörper finden sich in Wöffler et al. (2013).

Als Versuchsstand zum Test der **Modellphase 1** mit stationärer Belastung war die Kipprinne des IWW ausgewählt worden. Die Kipprinne weist eine Länge von 30 m bei einer Breite von 1 m auf. Betrieben wurde die Kipprinne von 3 Pumpen mit einem maximal möglichen Durchfluss von 600 l/s.

Der Einfluss der u.a. verschiedenen Bauwerksformen auf die Überfallmenge wurde von Wöffler et al. (2013) aus den Versuchsergebnissen mittels eines modifizierten Überfallbeiwerts der Wehr-Überfallformel nach POLENI ermittelt. Die funktionalen Zusammenhänge des modifizierten Überfallbeiwerts sind für stationäre Strömungsbedingungen in Tabelle 1 zusammengefasst (aus Wöffler et al. 2013):

spezifischer Wehrüberlauf:	$q = \frac{2}{3} \cdot \mu \cdot \sqrt{2 \cdot g} \cdot h^{\frac{3}{2}}$	[m ³ /(s*m)]	
modifizierter Überfallbeiwert:	$\mu = \mu_{ref} \cdot \gamma_h \cdot \gamma_R \cdot \frac{1}{\gamma_D} \cdot \gamma_L \cdot \gamma_{n,Luv} \cdot \gamma_{n,Lec}$	[-]	
Referenzbeiwert:	$\mu_{ref} = 0,70$	[-]	
Überfallhöhenbeiwert:	$\gamma_h = 0,70 \cdot \left(\frac{h}{w}\right)^{0,41}$	$\sigma = 0,019$	[-]
Oberflächenreibungsbeiwert:	$\gamma_R = 0,91 \cdot \left(\frac{h}{w}\right)^{0,03}$	$\sigma = 0,006$	[-]
Durchlässigkeitsbeiwert:	$\gamma_D = 0,88 \cdot \left(\frac{h}{w}\right)^{0,05}$	$\sigma = 0,006$	[-]
Kronenbreitenbeiwert:	$\gamma_L = 1 + 0,03 \cdot \left(\frac{0,27}{0,13} - \frac{L}{w}\right)$	$\sigma = 0,019$	[-]
Luvböschungsneigungsbeiwert:	$\gamma_{n,Luv} = 1 + 0,17 \cdot \left(\frac{1}{4} - \frac{1}{n_{Luv}}\right)$	$\sigma = 0,025$	[-]
Leebböschungsneigungsbeiwert:	$\gamma_{n,Lec} = 1 + 0,12 \cdot \left(\frac{1}{4} - \frac{1}{n_{Lec}}\right)$	$\sigma = 0,030$	[-]



Überlaufhöhe:	h	[m]
Bauwerkshöhe:	w	[m]
Kronenbreite:	L	[m]
Luvböschungsneigung:	1/n _{Luv}	[-]
Leebböschungsneigung:	1/n _{Lec}	[-]

Tabelle 1: Zusammenfassung der funktionalen Abhängigkeiten des modifizierten Überfallbeiwerts für stationäre Strömungsbedingungen (aus Wöffler et al. 2013)

Als Versuchsstandort für die **Modellphase 2** mit kurzperiodischer Belastung war der Wellenkanal des LWI gewählt worden. Bei einer Länge von 80 m, einer Breite von 1 m und einer Höhe von 1,15 m war es möglich, Wellen mit einer Höhe von bis zu 0,3 m bei einer Wellenperiode von 4,5 s zu erzeugen. Mit Hilfe dieser Untersuchungen wurden die mittleren Wellenüberlaufmengen bei Wellenperioden zwischen 0 und ca. 10 Sekunden ermittelt. Im Gegensatz dazu dienten die Untersuchungen in der Modellphase 1 der Ermittlung der Überfallmenge bei stationärem Überströmen, was mit dem Wellenüberlauf einer Welle, deren Wellenperiode gegen unendlich strebt, vergleichbar war.

Um die erforderlichen Wellenhöhen im Wellenkanal des LWI generieren zu können, mussten die in der Modellphase 1 genutzten Bauwerksmodelle während der Modellphase 2 auf eine Höhe von 50 cm aufgebockt werden. Aufgrund dieser Höhe wurde an der Luvseite des Modellkörpers eine Böschung mit einer Steigung von 1:20 aufgebaut. Diese Böschung endete am 0,5 m hohen und 1,4 m breiten Podest, auf das die Modellkörper der Strombauwerke jeweils am Fuß der Luv-Seite bündig an die Böschung anschließen. Der Modellaufbau ist in Bild 23 dargestellt (Wöffler et al. 2013).

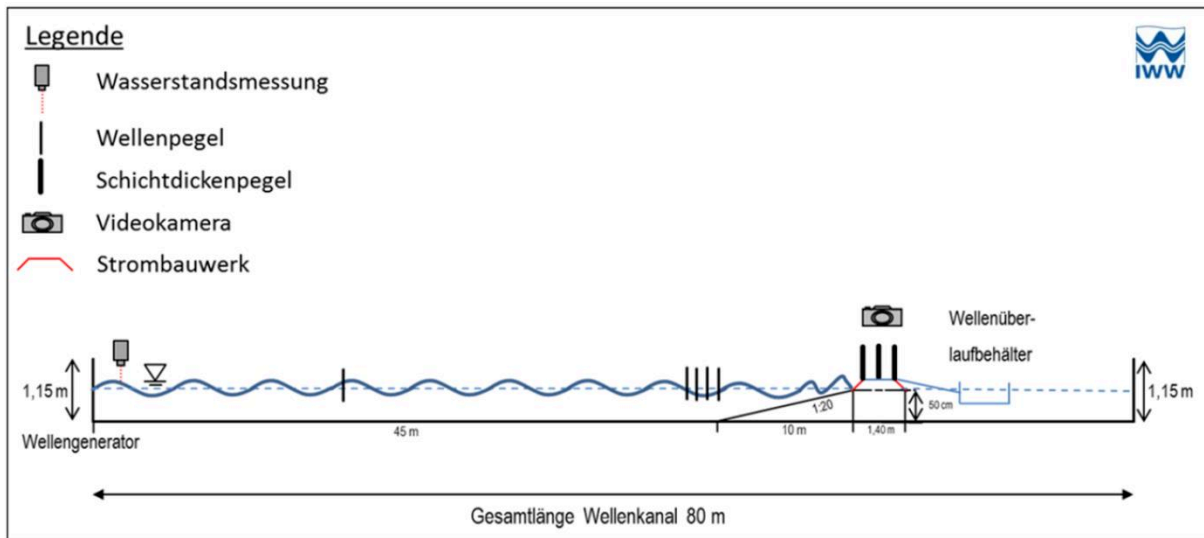


Bild 23: Modellaufbau (nicht maßstabsgetreu) während der Modellphase 2 im Wellenkanal des LWI (Wöffler et al. 2013)

Der Wellenkanal des LWI verfügte über einen Wellenüberlaufbehälter mit einem – vorab rechnerisch als hinreichend nachgewiesenen - Fassungsvermögen von $0,114 \text{ m}^3$, der auf einer Waage innerhalb einer Schutzwanne gelagert war, so dass die Überlaufmenge über das Gewicht ermittelt werden konnte. Weitere modelltechnische Randbedingungen (u.a. Berücksichtigung von Maßstabseffekten) sowie Modell- und Analysedetails sind bei Wöffler et al. (2013) beschrieben.

Wesentliches Ziel der Untersuchungen im Wellenkanal des LWI war die Ermittlung des Einflusses der Geometrie und der Rauheit auf den jeweiligen Wellenüberlauf, was auf Basis der Formeln des EurOtop-Manuals (EurOtop 2007) erfolgte, wozu bereits zahlreiche Untersuchungen zum Wellenüberlauf vorlagen. Folge dessen wurden lediglich drei Modellkörper in der Variante 1 (glatt, undurchlässig, lagestabil) und drei Modellkörper der Variante 2 (rau, undurchlässig, lagestabil) untersucht. Die Formel zur mittleren Überlaufquote beschreibt das Verhältnis der relativen Wellenüberlaufquote q^* und der relativen Freibordhöhe R^* und ermöglicht u.a. den Einfluss der Böschungsrauheit durch einen empirisch Beiwert zu ermitteln. Über das Verhältnis der Ergebnisse bei glatten und verschiedenen rauen Oberflächen konnte dann wiederum ein entsprechender Reduktionskoeffizient γ_f der Wellenüberfallrate bestimmt werden (nach Wöffler et al. 2013).

An einem ausgewählten Beispiel der sehr umfangreichen Ergebnisse wird der Einfluss der Rauheit für zwei Modellkörper mit unterschiedlichen Böschungsneigungen deutlich. Bei der Auftragung der dimensionslosen Wellenüberfallrate q^* zur relativen Freibordhöhe R^* in Bild 24 wur-

den anhand der Steigungen der Ausgleichsfunktionen die Differenzen zwischen den Ergebnissen bei einer glatten und einer rauen Bauwerks Oberfläche grafisch dargestellt (Wöffler et al. 2013).

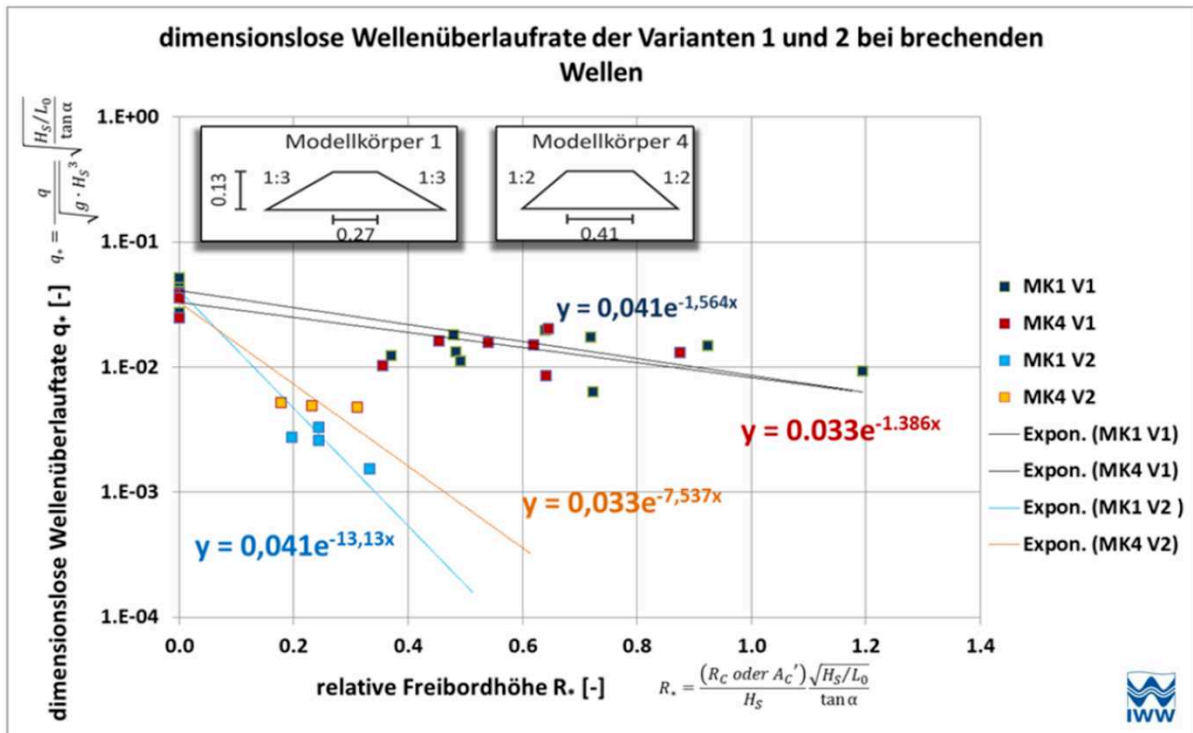


Bild 24: Wellenüberlaufrate bei brechenden regelmäßigen Wellen in der Variante 1 (glatte Oberfläche) und Variante 2 (raue Oberfläche; Wöffler et al. 2013)

Für die ausgewählten Modellkörper 1, 4 und 5 wurden die Ergebnisse der Untersuchungen zur Wellenüberlaufrate bei der Modellphase 2 (kurzperiodische Wellenbelastung; vergl. Bild 22) in Q_0 = dimensionslose Wellenüberlaufrate bei $R_c = 0$ [-]

b = dimensionsloser Koeffizient (mittlere Wellenüberlaufrate) [-]

γ_f = Reduktionskoeffizient für die aufgebrauchte Böschungsrauhheit [-]

Tabelle 2 zusammengestellt, wobei die bauwerksspezifischen Werte zur Berechnung der Wellenüberlaufrate q^* nach Wöffler et al. (2013) bei der gewählten rauen Oberfläche angegeben sind. Die Tabelle unterscheidet zudem Werte für regelmäßige Wellen und Wellenspektren in Abhängigkeit der Brecherkennzahl ξ [-].

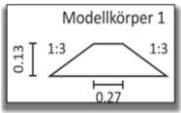
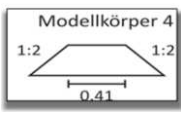
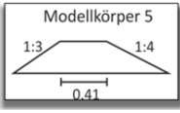
Zur Berechnung wird die auf Basis der vorgenommenen Untersuchungen spezifizierte, vorher allgemein gehaltene Formel nach EurOtop (2007) mit dem entsprechenden rauheits- und geometrieabhängigen Reduktionskoeffizienten empfohlen (Formel (8.17) aus Wöffler et al. 2013):

$$q^* = Q_0 \exp\left(\frac{-b}{\gamma_f} \cdot R^*\right)$$

mit:

- q^* = dimensionslose Wellenüberlaufrate [-]
- Q_0 = dimensionslose Wellenüberlaufrate für $R_c = 0$ [-]

- b = dimensionsloser Koeffizient (mittlere Wellenüberlaufrate) [-]
 γ_f = Reduktionskoeffizient für aufgebrauchte Böschungsrauhheit [-]
 R^* = dimensionslose Freibordhöhe [-].

Modellkörper	Luv- Nei- gung [-]	Kro- nen- breite [m]	Regelmäßige Wellen						Wellenspektren		
			$\xi > 2$			$\xi < 2$			$\xi < 2$		
			Q_0	b	γ_f	Q_0	b	γ_f	Q_0	b	γ_f
	1:3	0,27	0,123	0,833	0,057	0,041	1,564	0,12	-	-	-
	1:2	0,41	0,113	0,875	0,131	0,033	1,652	0,22	0,067	4,221	0,82
	1,4	0,41	-	-	-	-	-	-	0,067	5,849	0,87

Q_0 = dimensionslose Wellenüberlaufrate bei $R_c = 0$ [-]

b = dimensionsloser Koeffizient (mittlere Wellenüberlaufrate) [-]

γ_f = Reduktionskoeffizient für die aufgebrauchte Böschungsrauhheit [-]

Tabelle 2: Zusammenfassung der Ergebnisse der Untersuchungen zur Wellenüberlaufrate in der Modellphase 2 mit u.a. mit Reduktionskoeffizient γ_f für die aufgebrauchte raue Bauwerksoberfläche (nach Wöffler et al. 2013)

Zusätzlich wurden alle Modellkörper der Variante 3 (rau, durchlässig, lageinstabil) weiteren Versuchen zur Stabilität unterzogen.

Während bei den untersuchten regelmäßigen Wellen der jeweilige Modellkörper durch ca. 20 Wellen belastet wurde, waren es bei den untersuchten Wellenspektren ca. 1000 Wellen. Die im Modellmaßstab 1:7,5 untersuchten Wellenhöhen und Wellenperioden bei zusätzlichen Belastungstests der Variante 3 lagen zwischen $0,09 \text{ m} \leq H \leq 0,3 \text{ m}$ bzw. $2,4 \text{ s} \leq T \leq 10 \text{ s}$ (nach Wöffler et al. 2013).

Alle fünf Modellkörper wurden bei einer Freibordhöhe von $R_c = 0 \text{ m}$ mit regelmäßigen Wellen einer Höhe von $0,13 \text{ m}$ und einer Periode von $2,4 \text{ s}$ belastet. Dies entspricht im Naturmaßstab einer Wellenhöhe von $H = 0,98 \text{ m}$ und einer Periode von $T = 6,6 \text{ s}$. Die maximale Belastung hatte bei einer Wellenhöhe von $H = 0,30 \text{ m}$ und einer Periode von $T = 4,0 \text{ s}$ stattgefunden. Dies entspricht Werten in der Natur von $H = 2,25 \text{ m}$ und einer Wellenperiode von $T = 11,0 \text{ s}$.

Bei keinem der durchgeführten Versuche in der Variante 2 zur Untersuchung der Stabilität war es zu Erosionsvorgängen gekommen (nach Wöffler et al. 2013).

In der **Modellphase 3** der kleinmaßstäblichen 2D-Modelluntersuchungen (vergl. Bild 22) wurden die Strömungsprozesse und deren Auswirkungen von schiffsinduzierten langperiodischen Wellen auf Strombauwerke untersucht. Der Versuchsstandort der Modellphase 3 und das zugehörige Versuchsprogramm wurde auf Grundlage der Erfahrungen der Modellphasen 1 und 2 festgelegt. Die Entscheidung fiel nach zusätzlichen, umfangreichen numerischen sowie physikalischen Vorversuchen für die neu installierte Kipprinne in der großen Versuchshalle des IWW (Bild 25). Das Vorgehen wurde u.a. konzeptionell in Wöffler und Schüttrumpf (2013) diskutiert sowie nach entsprechenden numerischen Vorstudien (Krebs et al. 2015) und Vorversuchen (Wöffler et al. 2015) in der fachtechnischen Umsetzung von Oetjen et al. (2017) beschrieben.



Bild 25: Ansicht der Kipprinne in der Versuchshalle des IWW (nach Oetjen et al. 2017)

Auf Basis der Schadensanalyse in AP1 (BAW 2012) und der analysierten Belastungsprozesse der Strombauwerke wurde für die zweidimensionalen kleinmaßstäblichen Versuche das Primärwellensystem der langperiodischen Schiffswelle in die Anteile Absunk und Primärwelle zerlegt, der Wellenparameter Primärwelle als maßgebliche zu untersuchende Belastungsgröße festgelegt und in der Kipprinne als Schwallwelle simuliert (u.a. Wöffler et al. 2015; Krebs et al. 2015; Oetjen et al. 2017).

Der in numerischen und physikalischen Vorversuchen abgebildete Bereich des Primärwellensystems sowie die dann erforderliche Definition der untersuchten Freibordhöhe R_{CA} wurde schematisch in Bild 26 dargestellt (aus Wöffler et al. 2015). Die Freibordhöhe R_{CA} zum Absunk definierte sich über den Abstand zwischen Bauwerksoberkante und dem tiefsten Punkt des Absunks der langperiodischen Welle. Für die Vorversuche wurde der Parameter R_{CA} als Abgrenzung zum Freibord R_C eingeführt, der den Abstand zwischen Bauwerksoberkante und Ruhewasserspiegel bezeichnete. Die Definition des R_{CA} wurde vorerst notwendig, da in den numerischen und klein-

maßstäblichen Versuchen der Ruhewasserspiegel dem Wasserstand entsprach, welcher sich in der Natur als Absenk-Niveau darstellte (vergl. *Bild 26*). Im Weiteren wurde für diese Bedingungen ebenso R_C verwendet.

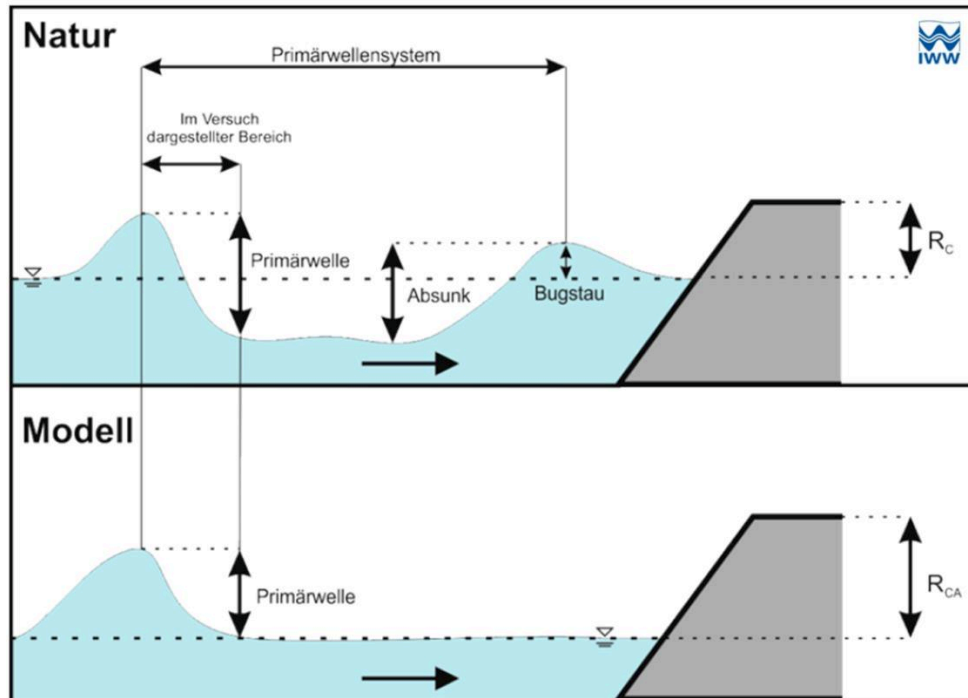


Bild 26: Darstellung des im kleinmaßstäblichen Versuch abgebildeten Bereiches des Primärwellensystems und Definition der „Freibordhöhe zum Absenk“ R_{CA} (aus Wöffler et al. 2015)

Der endgültige Aufbau des Versuchsstands in der Kipp Rinne des IWW wurde schematisch für die Freibordhöhe $R_C = 0$ in *Bild 27* dargestellt und hinsichtlich des Versuchsablaufs und der angewandten Modellgesetzte in Oetjen et al. (2017) beschrieben.

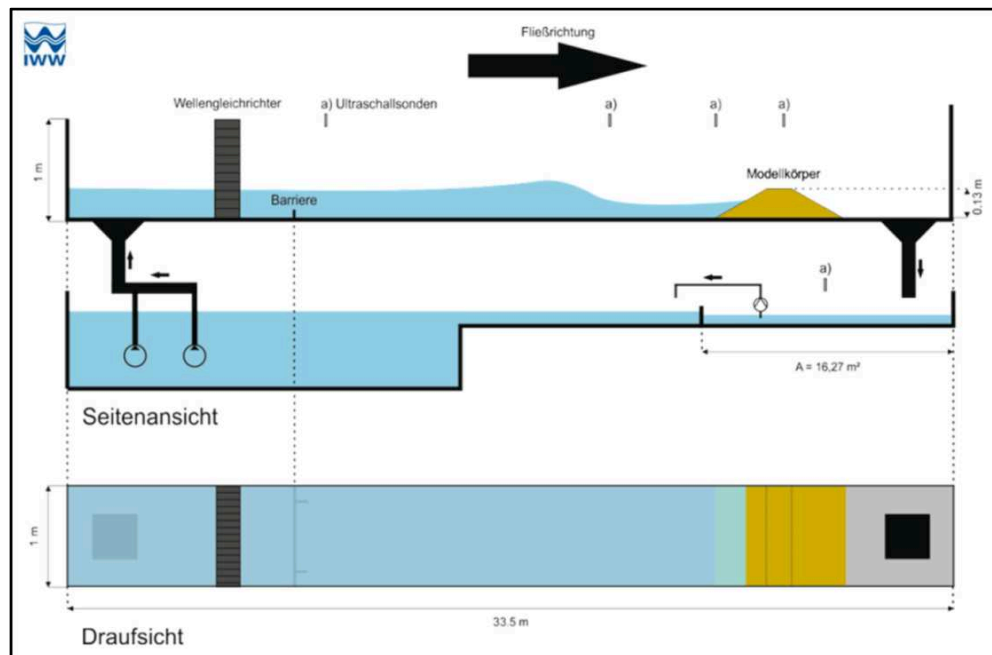


Bild 27: Endgültiger Versuchsaufbau zur Modellphase 3 in der Kipprinne des IWW (schematisch $R_c = 0$; nach Oetjen et al. 2017)

Die Ergebnisse der kleinmaßstäblichen Untersuchungen zur langperiodischen Belastung wurden gemäß Zielsetzung der jeweiligen Varianten unterschiedlich aufbereitet (vergl. Bild 22).

Für die Variante 1 (undurchlässig, glatt, lagestabil) wurde aus den Modellversuchen ein Gleichungssystem zur Bestimmung des Überfallbeiwerts der POLENI-Gleichung entwickelt, der modifiziert wurde als Grundwert der Wellenparameter, abhängig von der Wellenperiode und vier verschiedener Wellenkoeffizienten basierend auf dem Verhältnis von Wellen- zu Bauwerks- höhe. Der Grundwert wurde wiederum mit Abminderungsfaktoren in Abhängigkeit der Böschungsneigung, der Kronenlänge sowie des Freibords erweitert. Die Ableitung der Gleichungssysteme wurde bei Oetjen et al. (2017) detailliert beschrieben und zusätzlich anhand verschiedener Berechnungsschemata zur Ermittlung der Wellenkoeffizienten sowie der Abminderungsfaktoren erläutert.

Die Wirkweise der Strombauwerke der Variante 2 (undurchlässig, rau, lagestabil) wurde gezielt über das Maß des Überfallbeiwerts in Abhängigkeit von Bauwerksgeometrie, Schwallhöhe und Freibordhöhe ermittelt (Oetjen et al. 2017).

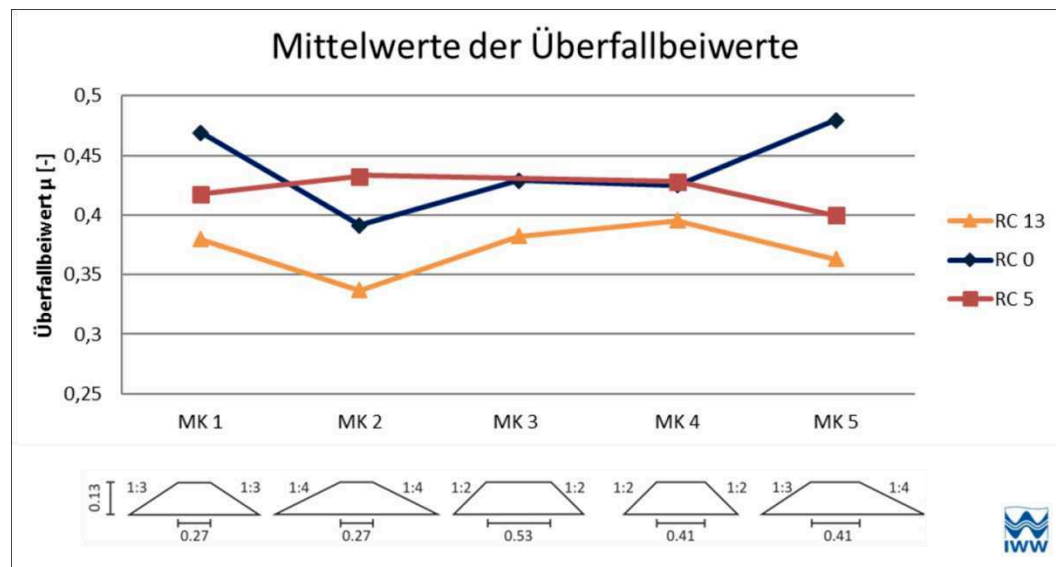


Bild 28: Mittelwerte der gesamten Überfallbeiwerte gemäß Variante 2 für alle Modellkörper und Freibordhöhen (nach Oetjen et al. 2017)

Betrachtet man die Mittelwerte der Überfallbeiwerte nach Modellkörper und Freibordhöhe R_c (hier: Schwallhöhe von Absunk bis Primärwellenhöhe, vergl. Bild 26) zeigten sich in Bild 28 für die fünf Bauwerkskörper bei R_c 13 und R_c 0 ein annähernd ähnlicher Verlauf, wobei im Mittel bei R_c 13 allerdings deutlich niedrigere Überfallbeiwerte ermittelt wurden (nach Oetjen et al. 2017). Die physikalischen Modellversuche zu Variante 2 deuteten bereits darauf hin, dass die Geometrie von Modellkörper 2 (Böschungsneigungen 1:4; Bild 28) im direkten Vergleich zu den übrigen Geometrien im Hinblick auf deren Stabilität vorteilhaft war, da die niedrigsten Überfallbeiwerte ermittelt wurden und der Reibungswiderstand der Bauwerksform somit am geringsten war. Die tabellarisch zusammengestellten Gesamtergebnisse lassen sich dem Untersuchungsbericht von Oetjen et al. (2017) entnehmen.

Für die Modellversuche der Variante 3 (durchlässig, rau, lageinstabil) wurden die verschiedenen Modellkörper vollständig mit Steinen nachgebildet und Kalksteine mit einer Dichte von $2,8 \text{ t/m}^3$ und Eisensilikatsteine mit einer Dichte von $3,7 \text{ t/m}^3$ nebeneinander in der Kipprinne verwendet. Um die jeweiligen Veränderungen zu kategorisieren, wurden verschiedene Bewertungskriterien definiert:

- Kategorie 0: keine Steinbewegung
- Kategorie 1: wenige, einzelne Steine bewegen sich
- Kategorie 2: einige Steine bewegen sich, teilweise auch kleinere Gruppen
- Kategorie 3: viele Steine bewegen sich, teilweise auch größere Gruppen
- Kategorie 4: Erosion der Luvflanke.

Die Randbedingungen sowie der Versuchsablauf wurde detailliert von Oetjen et al. (2017) beschrieben. Die Einzelergebnisse der Stabilitätsuntersuchungen wurden tabellarisch in Abhängigkeit der der Freibordhöhe, der Materialdichte, der Modellkörper sowie der Überfallhöhe zusammengestellt.

In der Analyse wurde zunächst deutlich, dass mit zunehmender Überfallhöhe auch der entstehende Schaden zunahm und damit eine höhere Kategoriestufe erreicht wurde. Dies führte zu einer Instabilität des jeweiligen Modellkörpers. Um die Divergenz der Kategorien von Kalk und Eisensilikat hervorzuheben, zeigt *Bild 29* den Mittelwert der Kategorien aller Modellkörper aus den Stabilitätsuntersuchungen (nach Oetjen et al. 2017).

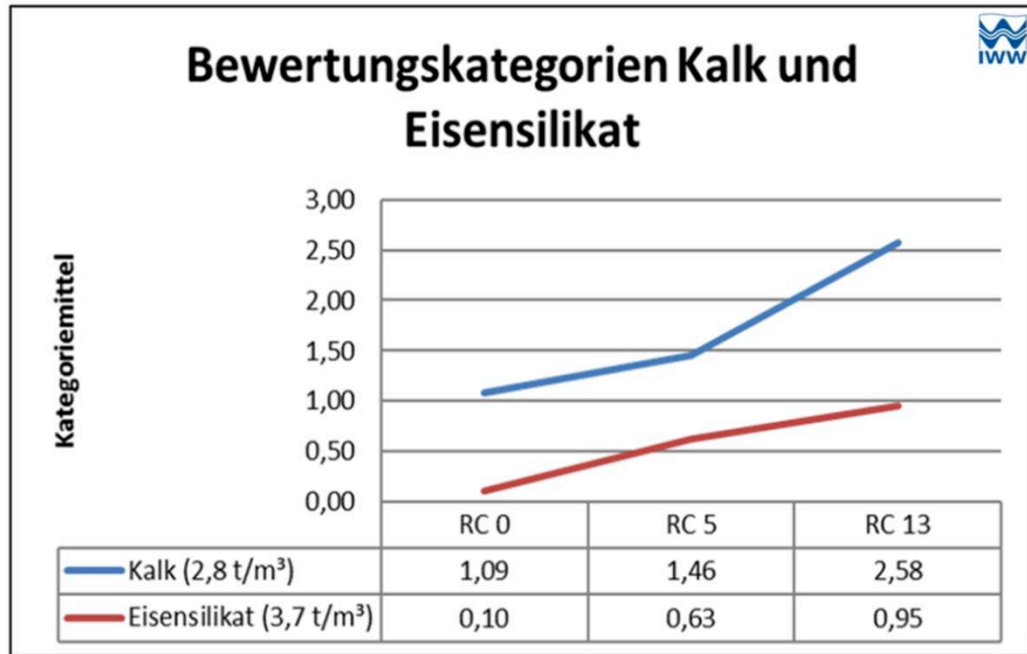


Bild 29: Übersicht der Bewertungskategorien im Kategoriemittel für die untersuchten Deckschichtmaterialien und Freibordhöhen (nach Oetjen et al. 2017)

Der Mittelwert für alle Modellkörper wurde dabei innerhalb der Freibordhöhen für Kalk und Eisensilikat angegeben. Für alle Freibordhöhen wurde deutlich, dass für Eisensilikat niedrigere Kategorien vorliegen und das Bauwerk somit während der Versuche stabiler gelagert war, da sich weniger oder gar keine Steine aus dem Modellkörper gelöst hatten. Es ergab sich durchgehend eine Differenz von ungefähr einer Kategoriestufe im Vergleich zu den Versuchsergebnissen mit Kalksteinen. Die Grafik verdeutlicht darüber hinaus, dass die Standfestigkeit der Bauwerke mit zunehmender Freibordhöhe abnahm. Die Instabilität war sowohl für Kalk als auch für Eisensilikat bei $R_c 13$ am höchsten, wie die Kategoriebewertung zeigt. Details sind der Arbeit von Oetjen et al. (2017) zu entnehmen.

Allgemein besaß der Modellkörper 2 aus Eisensilikat (Dichte $3,7 \text{ t/m}^3$, Böschungsneigung 1:4) die höchste Stabilität, da er für alle Freibordhöhen mit Kategorie 0 bewertet wurde.

Auffallend war nach Aussage von Oetjen et al. (2017) das von den vorherigen Modellversuchen der Phase 1 und 2 abweichende Schadensmuster. Unter langperiodischer Wellenbelastung waren Schäden hauptsächlich an der Leeseite der Modellkörper aufgetreten, unter stationärer und kurzperiodischer Belastung hingegen auf der Luvseite (nach Oetjen et al. 2017).

Diskussion der Ergebnisse des AP4a

Die Diskussion der Ergebnisse der kleinmaßstäblichen 2D-Modellversuche wurde anhand der mittleren Wellenüberlaufrate geführt (Oetjen et al. 2017).

Die mittleren Wellenüberlaufraten der im Rahmen der Modellphase 3 des Arbeitspakets AP4a untersuchten langperiodischen Wellenbelastung wurden, zunächst ohne Gültigkeitsbereich, in die drei Projektphasen gemäß Bild 30 eingeordnet. Die zunächst mit Hilfe der erstellten Gleichungen ermittelten mittleren Überlaufraten der Variante 1 überschritten ab einer Wellenperiode von $T = 30$ s die für die stationäre Belastung (Modellphase 1) ermittelten Überlaufraten. Im Laufe der physikalischen Versuche wurden Überfallhöhen von 0,12 m bis 0,195 m sowie Wellenperioden zwischen $T = 19$ s und $T = 49$ s untersucht. Letztendlich kann daher nach Oetjen et al. (2017) zunächst auch nur innerhalb dieser Parameter eine Gültigkeit gemäß Bild 30 beispielhaft für die Modellkörper 1 und 4 angenommen werden.

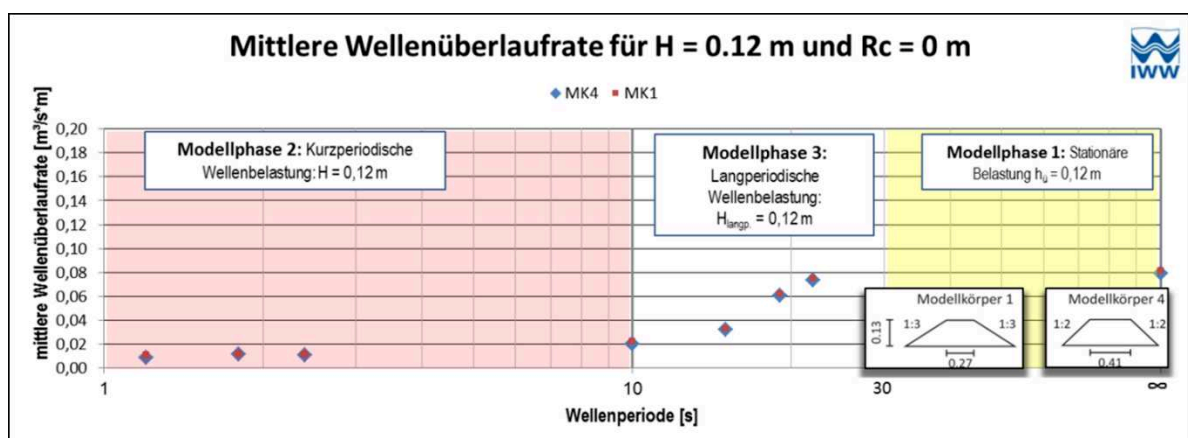


Bild 30: Einordnung der Modellphase 3 für die Modellkörper 1 und 4 mit Beschränkung des Gültigkeitsbereichs am Beispiel der Wellenhöhe $H = 0,12$ m und $R_c = 0$ m (Oetjen et al. 2017).

Zur Bestimmung genauerer und größere Bereiche abdeckender Gleichungen für den Überfallbeiwert bzw. der Wellenüberlaufrate könnten nach Oetjen et al. (2017) weitere großmaßstäbliche Versuche beitragen.

9 AP4b - Kleinmaßstäbliche 3D-Untersuchungen zu alternativen Buhnensystemen (BAW 2015)

Grundüberlegungen zur Neugestaltung der Buhnengeometrie an Seeschiffahrtsstraßen zur Anpassung an langperiodische schiffserzeugte Wellen- und Strömungsbelastungen erfolgten nach einer Begehung der Strombuhnen Juellstrand im Zuständigkeitsbereich des WSA Hamburg. Hierbei wurden erste Praxislösungen des WSA Bremerhaven aufgegriffen, die u.a. im Strombaulichen Bericht des Amtes erläutert (WSA Bremerhaven, 2009) sowie in einem Neubauprojekt des WSA Cuxhaven zum Teil umgesetzt wurden (WSA Cuxhaven, 2012).

Diese Praxislösungen beinhalteten u.a.:

- Abflachung der Böschungsneigungen von Leitdämmen und Buhnen,
- Verringerung der Kronenbreite,
- Ausrundung der Anschlüsse der Buhnenwurzeln an die Leitdämme.

Die im AP4b durchzuführenden kleinmaßstäblichen Modellversuche im Schiffswellenbecken der BAW waren erforderlich, um anhand von dreidimensionalen Systemversuchen die physikalischen Prozesse bei langperiodischen schiffserzeugten Belastungen in Buhnenfeldern sowie an den Buhnenbauwerken von SeeSchStr zu beschreiben. Dabei standen vornehmlich die wasserstands- und geschwindigkeitsabhängigen, langperiodischen Belastungen von konventionellen als auch alternativen Buhnensystemen unter folgenden Randbedingungen im Vordergrund:

- Änderung der Seiten- und Kopfneigungen sowie eine Hinterströmung der Buhnen
- Wellenamplituden, -umformung und -dynamik im Nahbereich der Buhnenbauwerke
- Dynamische Wellenausbreitung und Strömungsvorgänge in den Buhnenfeldern
- Wechselwirkung verschiedener Buhnenvarianten mit der Fahrwasserbelastung.

Die Naturähnlichkeit der Schiffswellenentstehung und der Wellenausbreitung im hydraulischen Modell war mit dem bei der BAW gewählten Maßstab von 1:40 hinsichtlich der hydrodynamischen Ähnlichkeitsbedingungen für das langperiodische Primärwellensystem sehr gut erfüllt (BAW 2015).

Für die Bauwerksuntersuchungen wurden allerdings physikalische Prozesse, deren Energie-dissipation u.a. durch Luftaufnahme (z.B. Wellenbrechen, turbulente Überströmung) bestimmt wird, infolge des gewählten Modellmaßstabs von 1:40 aufgrund der Oberflächenspannung des Versuchsmediums Wasser nur bedingt naturähnlich abgebildet. Aus diesen Gründen wurden im Modellmaßstab 1:40 z.B. keine Stabilitätsuntersuchungen der Deckschichten vorgenommen.

Einen Eindruck der Buhneneinbauten auf der 1:16 geneigten Uferböschung vermittelt ein Blick in das teilgefüllte Versuchsbecken der BAW (Länge 100m, Breite 35 m, max. Wassertiefe 0,7 m; *Bild 31*).

Das Querprofil des Untersuchungsquerschnitts war als Skizze mit der Vermaßung im Naturmaßstab bei Tidehochwasserbedingungen (Thw) unmaßstäblich in *Bild 32* dargestellt.

Die geschwindigkeitsabhängige Wellen und Strömungsbelastung im Modell wurde durch ein bei der BAW vorhandenes Maßstabsmodell (M 1:40) eines großen PostPanMax-Containerschiffs mit der Bezeichnung PPM55 und den Abmessungen Länge $l_{pp} = 352,0$ m, Breite $b = 55,0$ m, Tiefgang $t = 13,8$ m und einem Blockkoeffizienten von $c_B = 0,682$ erzeugt. Das Modellschiff wurde als

geführter, drehzahlgesteuerter Selbstfahrer mit Geschwindigkeitsstufen von rund $\Delta v_S \approx 2$ kn zwischen etwa $v_S \approx 8$ kn bis annähernd $v_S \approx 14$ kn (Naturwerte) gefahren⁵.

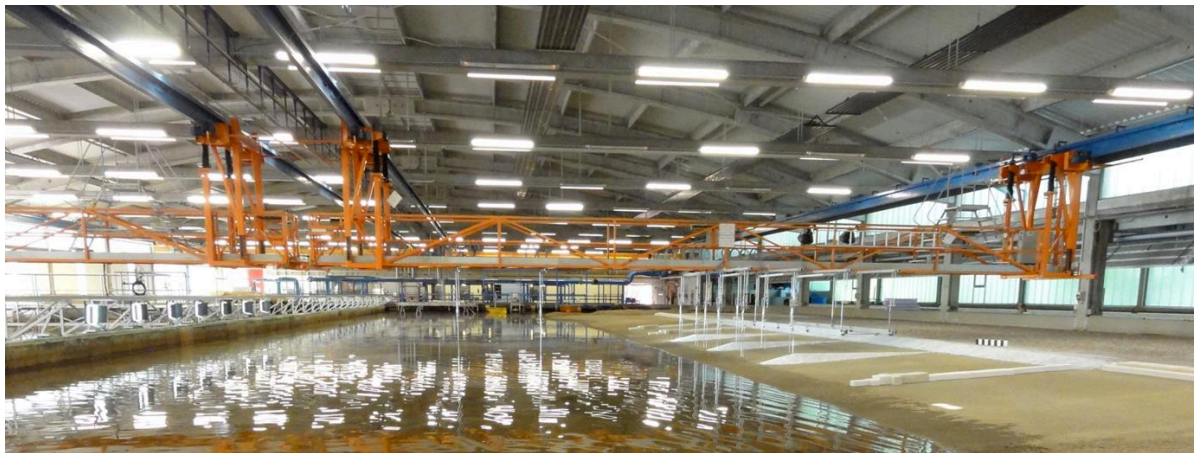


Bild 31: Bühneneinbauten im teilgefüllten Schiffswellenbecken der BAW (rechte Seite im Modellmaßstab 1:40; BAW 2015)

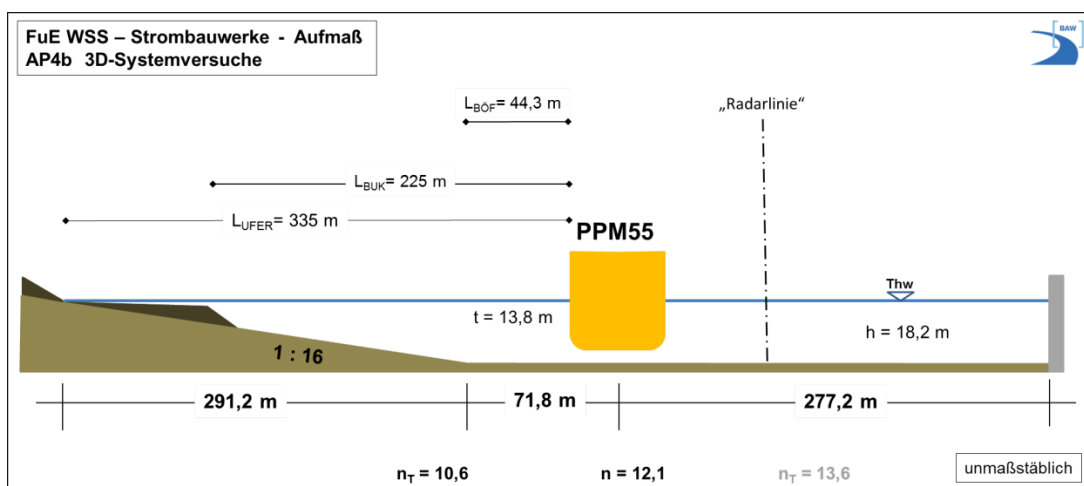


Bild 32: Querprofil des Untersuchungsquerschnitts als Skizze mit der Vermaßung im Naturmaßstab bei Thw (unmastablich; BAW 2015)

Weitere kennzeichnende Parameter wie z.B. die festgelegten Wasserstände bei Thw, Tmw und Tnw, die jeweilige Kielfreiheit (UKC_R), die Passierabstnde zum Böschungsfuß (L), das wasserstandabhngige Querschnittsverhältnis n ($n = A / A_S$) und die Teilquerschnittsverhltnisse n_T ($n_T = A_T / 0,5 A_S$) können dem Bericht zum AP4b entnommen werden (BAW 2015).

Zur Bestimmung der Wirkung der verschiedenen Buhnenvarianten hinsichtlich der Energiedissipation erfasste die gewählte Messgertekonfiguration die schiffserzeugte Wasserspiegeländerungen und Strömungen im Nahbereich der mittleren Buhne sowie in den Buhnenfeldern beidseits dieses Bauwerks.

⁵ Ein Knoten [kn] entspricht einer Seemeile pro Stunde: $1 \text{ kn} = 1,852 \text{ km/h} = 0,514 \text{ m/s}$.

Zur Bestimmung der Wirkung der verschiedenen Buhnenvarianten hinsichtlich der Energie-dissipation erfasste die gewählte Messgerätekonfiguration die schiffserzeugte Wasserspiegeländerungen und Strömungen im Nahbereich der mittleren Buhne sowie in den Buhnenfeldern beidseits dieses Bauwerks.

Die Positionen der Sensoren waren für die Varianten 1 bis 3 konstant und wurden beispielhaft für Variante I in *Bild 33* (links) als Draufsicht mit der Bezeichnungsmatrix in Längsrichtung: A - E bzw. in Querrichtung: 1 - 6 dargestellt (2 Rasterkästchen entsprechen 1 m im Modell). In *Bild 33* (rechts) wurde die Messkonfiguration bei der Variante I (Konventionelle Bauweise) mit den Drahtpegeln, den Ultraschallsensoren und den 2D-Strömungssonden abgebildet.

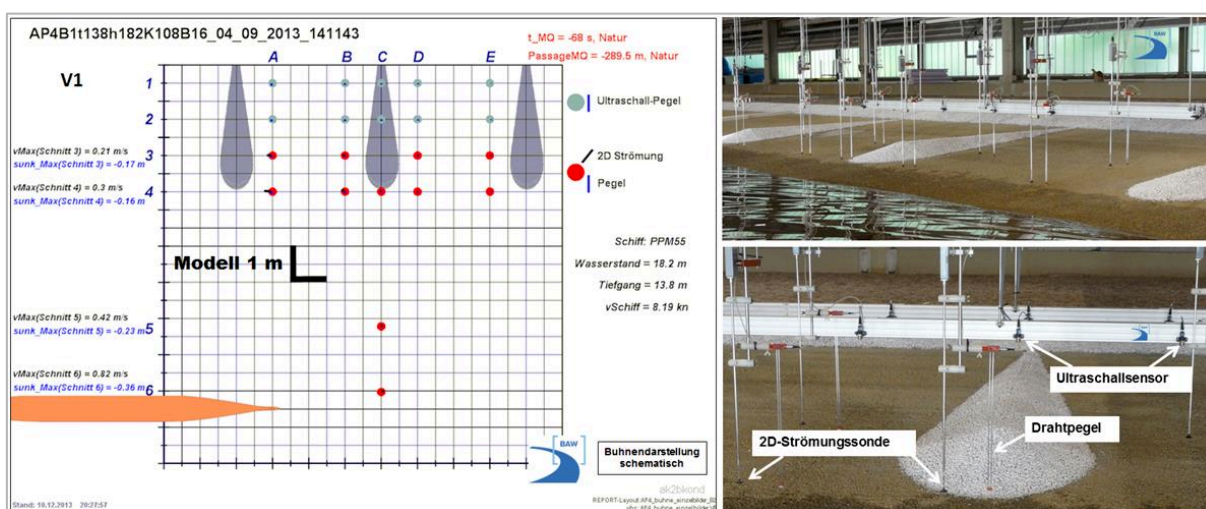


Bild 33: Positionen der Sensoren mit Bezeichnungsmatrix A-E zu 1-6 sowie Detail der Messkonfiguration im Modell 1:40 (nach BAW 2015)

Die geometrischen Besonderheiten der drei Buhnenvarianten sind in *Tabelle 3* (Maße Natur) zusammengestellt, weitere Details sind dem Bericht der BAW (2015) zu entnehmen..

Buhnenvarianten	Kronenbreite	Seitenböschung	Kopfböschung	Bemerkungen
Variante I	2 m Trapezprofil	1:3	1:3,4	Konventionelle Bauweise
Variante II	2 m abgeflacht	1:4	1:5	Ausrundung der Wurzel $r \approx 10$ m
Variante III	2 m abgeflacht	1:4	1:5	Durchbruchbreite 30 m Wurzelböschung 1:5

Tabelle 3: Geometrische Daten der Bauwerksvarianten I bis III (Naturwerte; aus BAW 2015)

Die im Maßstab 1:40 modellierten Buhnenbauwerke der Varianten I bis III sind zum optischen Vergleich in *Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.* abgebildet.

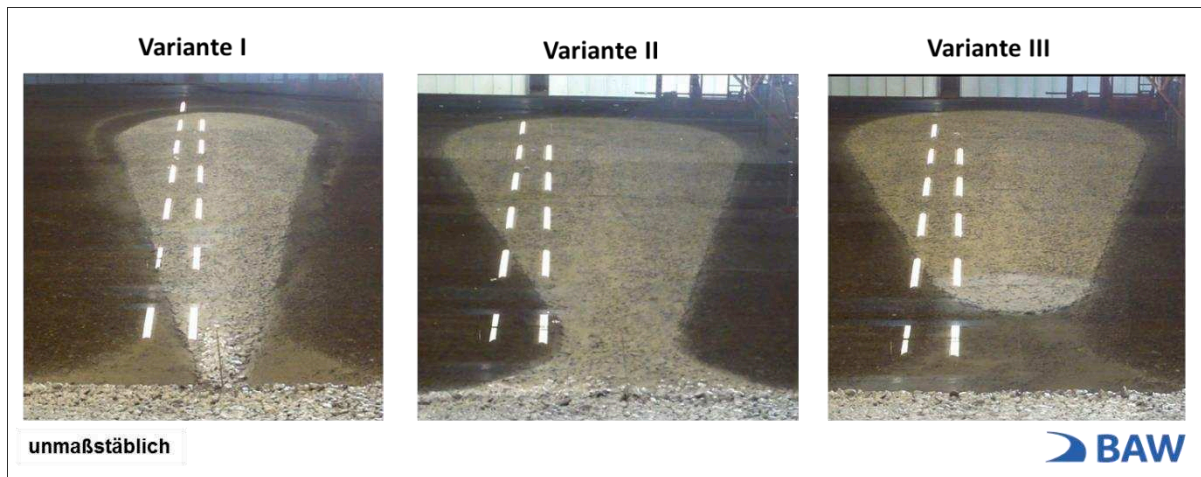


Bild 34: Optischer Vergleich der Buhnenbauwerke: v.l.n.r. Varianten I bis III (unmaßstäblich; BAW 2015)

Ausgewählte Beispiele von langperiodischen schiffserzeugten Wasserspiegel- und Strömungsänderungen in zwei Buhnenfeldern sowie im Nahbereich der Strombauwerke sind in drei Phasen (v. l. n. r.) in Bild 35 dargestellt ($v_s \approx 13,7$ kn; nach BAW 2015).

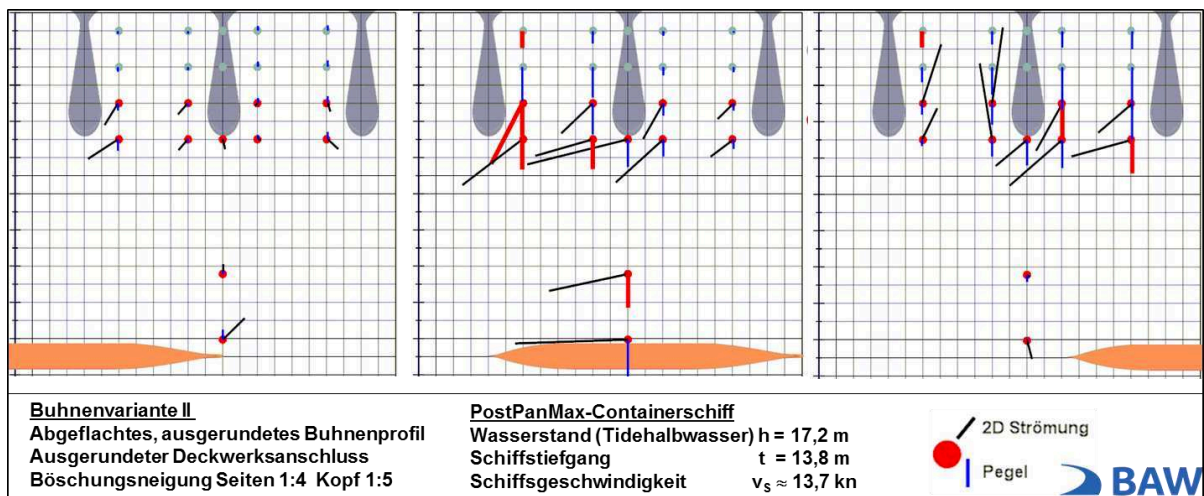


Bild 35: Phasenabhängige Darstellung der Wasserspiegel- sowie Strömungsänderungen in Betrag und Richtung in einem Buhnenfeld bei Passage eines großen Containerschiffs (v. l. n. r.; nach BAW 2015)

Der Maximalwert der Primärwelle im Nahbereich und über der Buhnenwurzel wurde bei diesem Versuch erst erreicht, als das Schiff mit dem Heck das übernächste Buhnenfeld passiert hatte. Zu diesem Zeitpunkt wurde der größte, kurzzeitig auftretende Wasserstandgradient über der Buhnenwurzel von Luv zu Lee gemessen, was in etwa mit einer maximalen (stationären) Überfallhöhe über einem Wehrbauwerk (ohne Wellendynamik) gleichzusetzen ist. Für die Bemessung der Deckschicht wurde diese Phase als ungünstigster Lastfall infolge des langperiodischen, dynamischen schiffserzeugten Wellensystems bewertet (Primärwelle über der Buhnenwurzel beim Absunk im nächsten Buhnenfeld). Der maximale, annähernd parallele Überströmungspro-

zess entlang der Bühnenkrone mit ausgeprägtem Wechselsprung in Lee wurde u.a. auf dem Foto in *Bild 36* deutlich und bestätigte damit die Gültigkeit von zweidimensionalen Stabilitätstests zur Deckschichtbemessung, wie sie im AP4a vorgenommen wurden (siehe Kapitel 8; Oetjen et al. 2017).



Bild 36: Maximaler, annähernd zweidimensionaler dynamischer Überströmungsprozess einer Strombuhne infolge der schifferzeugten, langperiodischen Primärwelle (3D-Maßstabsmodell 1:40; BAW 2015)

Als Maß der Dynamik der Primärwelle in Bauwerksnähe wurde die geschwindigkeitsabhängige Periode des Primärwellensystems T_{HP} ausgewertet und für das Bühnenfeld A1 – B2 in *Bild 37* aufgetragen. Grundsätzlich besteht aus Sicht der Wasserstraße eine Abhängigkeit der langperiodische Periode des Primärwellensystems (Bugstau – Absunk – Primärwelle, vgl. *Bild 43*) sowohl von der Schiffslänge als auch - orts-fest - von der Schiffsgeschwindigkeit ab. Anhand der Ergebnisse an der Messposition B2 wurde deutlich, dass bei einem linearen Zusammenhang der Perioden von rund $T_{HP} = 300$ s bei etwa $v_S = 8$ kn bis zu $T_{HP} = 50$ s bei etwa $v_S = 14$ kn als dynamische Belastung durch ein passierendes großes Containerschiff (hier: PPM55, lpp = 325 m) anzusetzen sind.

Des Weiteren wurde anhand der Untersuchungen nachdrücklich bestätigt, dass die schifferzeugte langperiodische Primärwellenperiode, somit die Dynamik der Primärwelle mit ihrer außerordentlichen Energie kaum durch verschiedene Bauwerksformen im Uferbereich beeinflusst werden konnte.

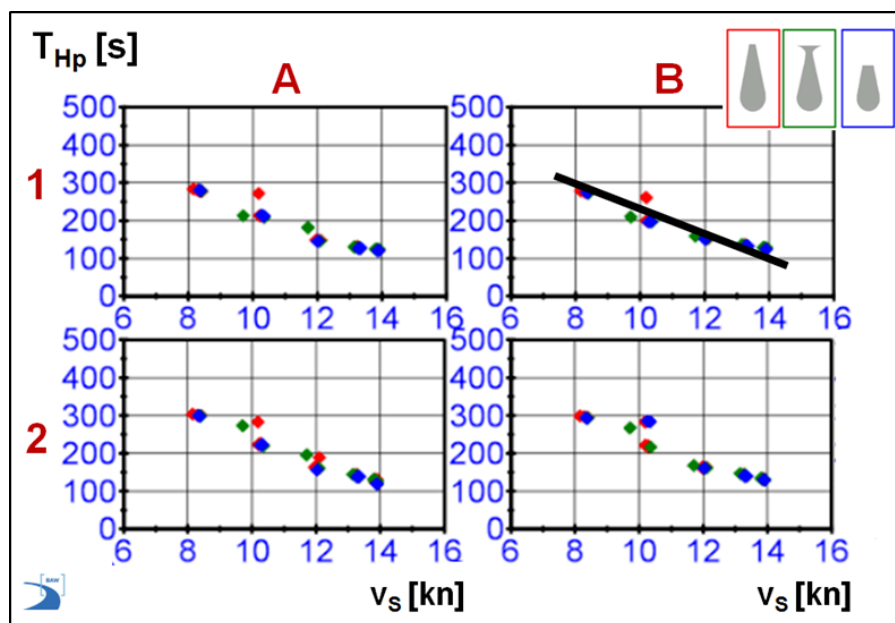


Bild 37: Geschwindigkeitsabhängige Periode der Primärwelle im Bühnenfeld A1 - B2 bei Passagen des PPM55 (lpp = 352 m; BAW 2015)

Ein besonderes Ziel der Untersuchungen war, anhand der Systemversuche die Größenordnung der synoptischen Wasserspiegeldifferenzen vor, auf und hinter den Bühnenbauwerken zu erfassen (BAW 2015). Die Ergebnisse der Auswertungen der wasserstandabhängigen Versuchsserien (Thw, Tmw, Tnw) hinsichtlich der synoptischen maximalen Wasserspiegeldifferenzen vor, auf und hinter den Bühnenvarianten im Bereich des ufernahen Bauwerks (B1-C1-D1; B2-C2-D2) sind in Tabellenform in *Tabelle 4* zusammengestellt und des Weiteren auch grafisch in BAW (2015) dokumentiert. Je nach Bühnenvariante wurden maximale Wasserspiegeldifferenzen an der Wurzel (B1-D1) bis $\Delta h_{\bar{0}} = 2,3$ m und in Bühnenmitte (B2-D2) bis $\Delta h_{\bar{0}} = 1,8$ m gemessen (*Tabelle 4*, rechte Spalten; BAW 2015).

	B1 [mRWS]			C1 „Überfallhöhe“			D1 [mRWS]			B1-D1 [m]		
	V. I	V. II	V. III	V. I	V. II	V. III	V. I	V. II	V. III	V. I	V. II	V. III
Thw	0,87	0,99	1,00	0,32	0,46	-0,29	-1,17	-1,31	-1,23	2,0	2,3	2,2
Tmw	1,33	1,51	1,50	0,44	0,52	0,69	-0,62	-0,58	-0,67	2,0	2,1	2,2
Tnw	0,76	0,76	0,93	0	0	0,63	0	0	0,01	0,8	0,8	0,9
	B2			C2			D2			B2-D2		
Thw	0,23	0,29	0,52	0,36	0,13	-0,01	-0,87	-0,93	-0,82	1,1	1,2	1,3
Tmw	0,27	0,32	0,83	0,09	0,01	0,07	-1,41	-1,49	-0,99	1,7	1,8	1,8
Tnw	0,33	0,39	0,42	0	0	0	-1,26	-1,38	-1,30	1,6	1,8	1,7

Tabelle 4: Synoptische maximale schiffsinduzierte Wasserspiegellhöhen relativ zum Ruhewasserspiegel (RWS) bei maximaler Wasserspiegeldifferenz vor und hinter der Bühne (B und D) bzw. „Überfallhöhe“ über dem Bühnenkörper (C) im Vergleich der Variante I, Variante II und Variante III (Thw, Tmw, Tnw, bei max. vs; BAW 2015)

Auf Basis der Einzel- und Vergleichsbetrachtungen im hydraulischen Maßstabsmodell wurden von der BAW (2015) die wesentlichen Beurteilungen zu den alternativen Bühnenbauwerken der Variante II und Variante III zusammengefasst:

- Anhand der Zeitreihen der Wasserspiegelauslenkungen waren im Modell keine flächenhaften Wirkungen der Bauwerksvarianten auf das schiffserzeugte langperiodische Wellenbild in den Bühnenfeldern außer auf der Bühnenkrone festzustellen.
- Die Bauwerksvarianten hatten offenkundig auch keine Wirkung auf die Primärwellenperiode und die Sunkzeit.
- Bei der Variante III erfolgte im Modell trotz der möglichen Hinterströmung keine deutlich erkennbare Energiedissipation des langperiodischen Primärwellensystems in den Bühnenfeldern.
- Die geschwindigkeitsabhängige Energie des schiffserzeugten langperiodischen Primärwellensystems war in der Wasserstraße so dominant, dass Strombauwerke im Flachwasserbereich einer Seeschiffahrtsstraße keinen wirksamen Einfluss auf das Wellenbild am Schiff, somit auch nicht auf die Fahrt eines großen Seeschiffs hatten.
- Keine der untersuchten Varianten beeinflussten im Modell die Dynamik der schiffserzeugten langperiodischen Wellenbelastung in den Bühnenfeldern oder im Fahrwasser.

Die Systemversuche verdeutlichten als Beitrag zum Prozessverständnis die verschiedenen Phasen der geschwindigkeitsabhängige schiffserzeugte Belastung von Strombauwerken bei der Passage eines außergewöhnlich großen Containerschiffs und bestätigten das zweidimensionale Untersuchungskonzept von Stabilitätsuntersuchungen in einem größeren Modellmaßstab.

Die vorgenommenen Systemversuche der BAW (2015; u.a. hohe Schiffsgeschwindigkeit, geringer Passierabstand) erarbeiteten Orientierungswerte für worst-case-Betrachtungen im Nahbereich der Bühnenbauwerke (u.a. Überfallhöhe, Wellendynamik, Wasserspiegelgefälle).

Auf Basis dieser dreidimensionalen Untersuchungen im Schiffswellenbecken der BAW (2015) wurde empfohlen,

- bei Stabilitätsuntersuchungen der Deckschicht von Bühnenbauwerken die Dynamik des schiffserzeugten Primärwellensystems (u.a. Wellenfortschrittsgeschwindigkeit) zu beachten,
- diese schiffserzeugte langperiodische Dynamik bei zukünftigen ingenieurwissenschaftlichen Bemessungsansätzen für Deckschichten an SeeSchStr zu parametrisieren, sowie
- bei numerischen Berechnungsverfahren zur Bemessung der Deckschicht von Längs- und Querbauwerken diesen schiffserzeugten hydrodynamischen Lastfall als naturähnliche Randbedingung einzusteuern.

Stabilitätsuntersuchungen zur Bemessung der Deckschicht von Bühnenbauwerken auf den Lastfall schiffserzeugte langperiodische Wellenbelastungen waren in einem hinreichend großen Modellmaßstab vorzunehmen und sollten anhand von großmaßstäblichen Untersuchungen (siehe AP6) und Monitoringprojekten in der Natur (siehe AP1b) abgesichert werden (BAW 2015).

10 AP5 - Entwicklung eines 3D-CFD⁶/CSD⁷-Modells und numerische Stabilitätsuntersuchungen (Numerische Simulation, LWI 2014)

Im Arbeitspaket AP5 waren numerische 2D- und 3D-Untersuchungen zur Stabilität der Deckschichtelemente an Strombauwerken vorgesehen, wobei die Ergebnisse aus den kleinmaßstäblichen Modellversuchen des AP4a für die Validierung des zu entwickelnden numerischen Modells verwendet werden sollten. Das Ziel der AP4 und AP5 war schließlich die Herleitung von Stabilitätsformeln für die von Schiffswellen belasteten Strombauwerke unter Berücksichtigung der gewonnenen Ergebnisse (Oumeraci et al. 2014).

Für die Durchführung des Arbeitspakets AP5 wurde dieses in fünf Teilprojekte unterteilt (Bild 38; aus Oumeraci et al. 2014). Diese Teilprojekte sollten in sich weitgehend abgeschlossen, aber aufeinander aufbauend sein. Details zu den einzelnen Teilprojekten sind dem Abschlussbericht von Oumeraci et al. (2014) zu entnehmen.

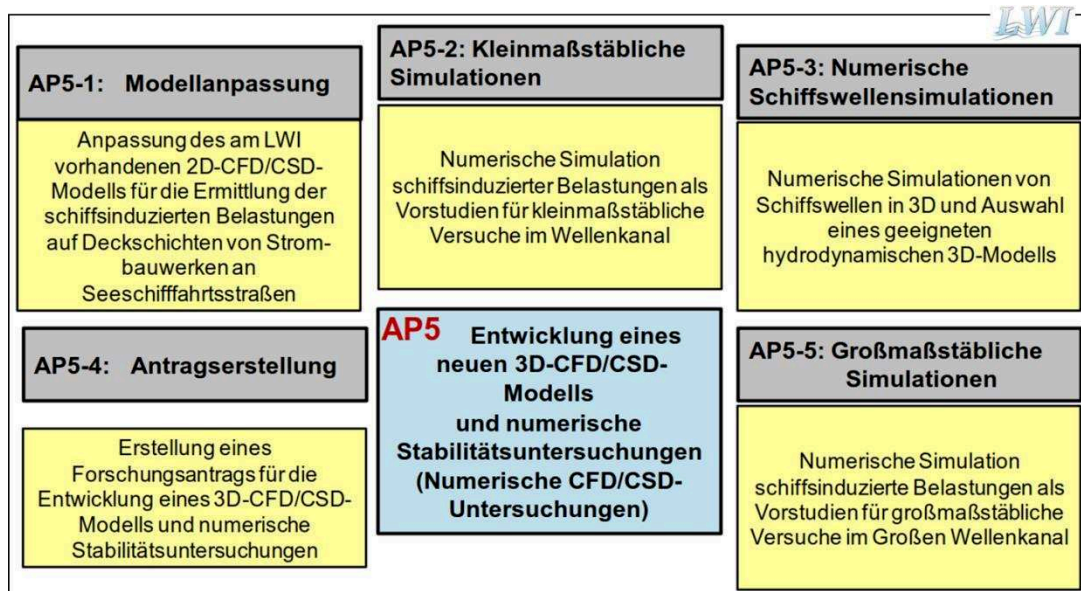


Bild 38: Gliederung des Arbeitspaketes AP5 in die Teilprojekte AP5-1 bis AP5-5 (aus Oumeraci et al. 2014)

Während das Ziel der kleinmaßstäblichen physikalischen Modellversuche im AP4a die Ermittlung der Belastung der Modellkörper sowie der Stabilität einzelner Deckschichtelemente unter stationärer Strömung und kurzperiodischer Wellenbelastung war und Vergleiche zwischen vorhandenen theoretischen und empirischen Ansätzen und den erzielten Versuchsergebnissen durchgeführt wurden, sollten im Rahmen der Arbeitspakete AP5-1 und AP5-2 diese physikalischen Modellaufbauten in numerische Modelle übertragen und ausgewählte Versuche aus dem durchgeführten Versuchsprogramm in numerischen Simulationen reproduziert und ausgewertet werden. Das Ziel war hierbei zunächst, das am LWI bereits vorhandene 2D-CFD/CSD-Modell an die Ermittlung der schiffsinduzierten Belastungen auf Deckschichten an Strombauwerken in

⁶ CFD: Computational Fluid Dynamics (Numerische Strömungsmechanik)

⁷ CSD: Computational Structural Dynamics (Numerische Strukturmechanik)

Seeschiffahrtsstraßen anzupassen. Anschließend sollten numerische Simulationen für ausgewählte Versuchsparameter zum Vergleich zwischen physikalischem und numerischem Modell durchgeführt werden. Darüber hinaus wurde im Verlauf der Bearbeitung des Arbeitspaketes beschlossen, zusätzlich auch ein am LWI vorhandenes und für andere Anwendungen eingesetztes 3D-CFD-Modell für die Aufgaben im Rahmen des AP5 anzupassen und zu verwenden (Oumeraci et al. 2014).

Um die numerischen Modellverfahren zu validieren, war es erforderlich, die im AP4a verwendeten Modellgeometrien, das Versuchsprogramm (d.h. die Strömungs- und Wellenparameter) sowie die weiteren maßgebenden Randbedingungen in die numerischen Modellverfahren zu übertragen, wobei diese Übertragung möglichst genau und umfassend vorzunehmen war.

Während im physikalischen Modell die losen Deckschichtelemente direkt durch die anstehende Strömung belastet wurden, war in den numerischen Modellen vorgesehen, die Simulation der Strömung (CFD) und die Simulation der Steinbewegung (CSD) mit unterschiedlichen Programmen zu berechnen. Daher war zu gewährleisten, dass die Ermittlung der Strömungskraft aus der hydrodynamischen Simulationen korrekt und die Übertragung der ermittelten Kräfte in das strukturdynamische Modell durch geeignete Schnittstellen und unter Verwendung geeigneter Ansätze erfolgte (nach Oumeraci et al. 2014).

Zur Simulation der zweidimensionalen Strömung wurde das CFD-Verfahren COBRAS-Modell (**C**ornell **B**reaking waves **a**nd **S**tructures) in der Version der Cornell University in Ithaka (USA) eingesetzt, zur zweidimensionalen Generierung verschiedener Wellenformen wurde das entsprechend modifizierte Verfahren COBRAS-UC der **U**niversity of **C**antabria (Santander, Spanien; Stand 2008) verwendet (Oumeraci et al. 2014). Eine detaillierte Beschreibung der in diesen Modellverfahren implementierten RANS-Gleichungen⁸, das verwendete Turbulenzmodell sowie die VOF-Methode⁹ zur Bestimmung der freien Oberfläche in einem Strömungsgebiet kann dem Bericht von Oumeraci et al. (2014) entnommen werden.

Als weiteres Softwarepaket zur Simulation der Überströmung eines Strombauwerks wurde das frei zugängliche Open-Source Modellverfahren OpenFOAM (**O**pen Source **F**ield **O**peration and **M**anipulation) der OpenFOAM Foundation (Version 2.1.1) eingesetzt, entsprechend an die Randbedingungen angepasst und zu Vergleichsbetrachtungen herangezogen (Oumeraci et al. 2014).

Die Darstellungen in Bild 39 (nach Oumeraci et al. 2014) zeigen Beispiele aus der Berechnung einer stationären Überströmung einer Buhne mit COBRAS-UC für eine VOF-Funktion, die den Füllungsgrad der Zellen angibt, die entsprechende Druckverteilung unterhalb der Strömung und die horizontale Strömungsgeschwindigkeit (jeweils in Farbkontourdarstellung) sowie das Strömungsfeld in Vektordarstellung. Die dargestellte Wasserspiegelauslenkung wurde mittels des institutseigenen Programms L~davis (**L**eichtweiß **~** **d**ata **a**nalysis and **v**isualization software) aus der Matrix für die VOF-Funktion für diesen Zeitschritt berechnet. Im Rahmen dieses Projekts wurde L~davis erstmals für die Darstellung von Simulationsergebnissen aus stationärer Überströmung von Buhnenquerschnitten verwendet. Daher waren die Darstellungen des Wasserspiegels besonders im hinteren Bereich der überströmten Buhne vor einer qualitativen oder

⁸ RANS-Gleichungen: Reynolds-averaged-Navier-Stokes-Gleichungen

⁹ VOF-Methode: Volume-of-Fluid-Methode

quantitativen Auswertung kritisch zu überprüfen. In der Berechnung erfolgte ein relativ steiler Abfall der Wasseroberfläche, die eventuell durch die für diesen speziellen Fall nicht angepassten Routinen nicht korrekt wiedergegeben wurde. Ein weiterer Aspekt für die Darstellung in Bild 39 war das grobe NetZRaster, das für die hier gezeigten Beispiele bewusst grob gewählt wurde und die Probleme verdeutlichte, die sich im Zusammenhang mit der Auswahl der Zellgröße ergaben. Für die Simulationen weitere Varianten musste eine feinere Auflösung gewählt werden, um die Umströmung der Deckschichtelemente ausreichend genau abbilden zu können. Schließlich ist zu berücksichtigen, dass der dargestellte Zeitschritt in Bild 39 lediglich der Anschauung dienete und noch nicht den endgültigen stationären Endzustand für die gegebene Überfallhöhe darstellte (Oumeraci et al. 2014).

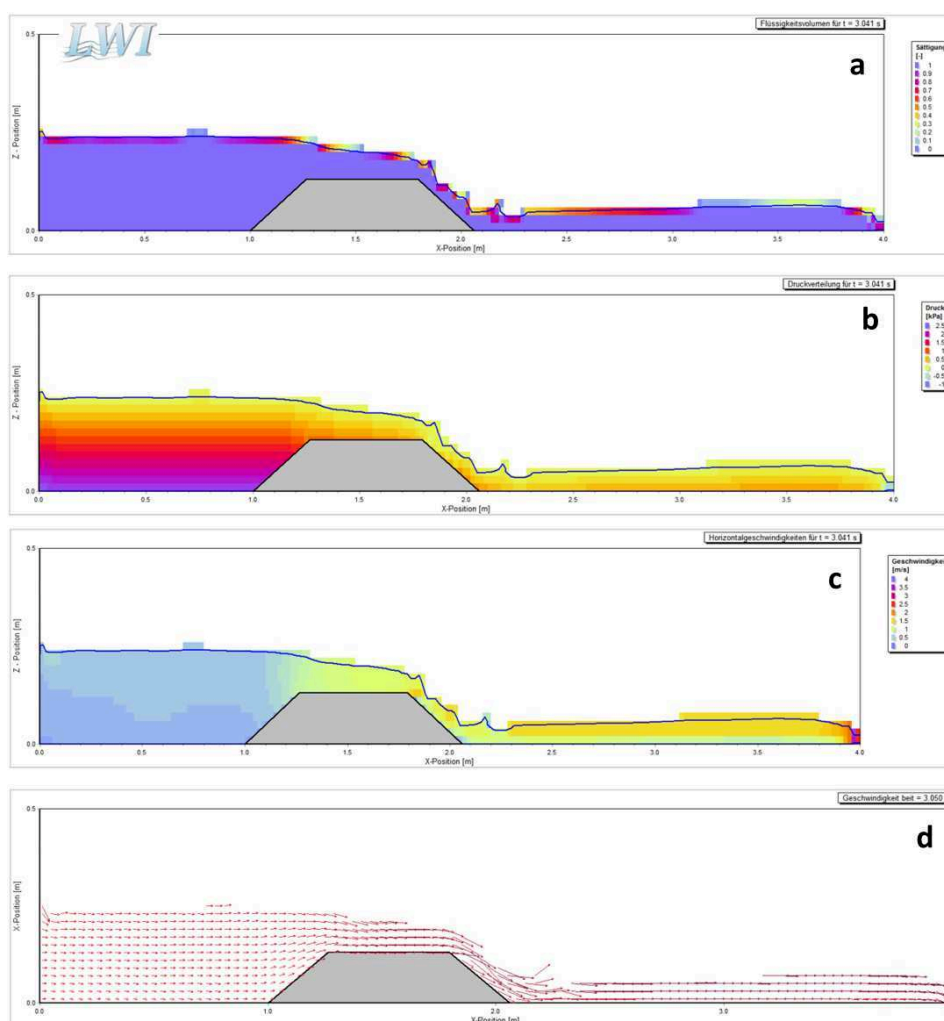


Bild 39: Beispiele für die Darstellung der Animation-Files in L~davis: a) VOF-Funktion, b) Druckverteilung, c) horizontale Geschwindigkeit (jeweils als Farbkontour) und d) Strömungsgeschwindigkeit in Vektordarstellung (nach Oumeraci et al. 2014)

Der Entwicklungsstand der Modellverfahren wurde anhand von Vergleichsbetrachtungen der Ergebnisse aus hydraulischen Modellversuchen (AP4a) und den numerischen Simulationen für die Modellphase „stationäre Überströmung“ bei Variante 1 (glatte Bauwerks Oberfläche) und Variante 2 (raue Bauwerks Oberfläche) aufgezeigt. Als Beispiele in Bild 40 wurden hier nach

Oumeraci et al. (2014) die Ergebnisgrafiken aus den Versuchen mit dem Modellkörper 2 gewählt, der mit den Böschungsneigungen 1:4 bei den Stabilitätsversuchen des AP4a die höchsten Widerstandeigenschaften zeigte (vergl. Kapitel 8).

Auffällig war, dass es generell große Differenzen zwischen den in den hydraulischen Modellversuchen gemessenen Durchflüssen und den Durchflüssen gab, die in den numerischen Simulationen eingestellt werden mussten. Die Gründe hierfür konnten innerhalb dieses Arbeitspaketes noch nicht abschließend ermittelt werden. Verschiedene Fehlerquellen wurden diskutiert und es wurde festgestellt, dass es sowohl in den numerischen Simulationen mit COBRAS-UC und mit OpenFOAM erforderlich war, höhere Durchflüsse anzusetzen, und dass die in beiden Programmen erforderlichen Durchflüsse sehr ähnlich sind. Es war es nach Oumeraci et al. (2014) daher unwahrscheinlich, dass das Problem durch einen programminternen Fehler in einem der beiden Simulationsprogramme verursacht wurde, sondern sich vielmehr um einen systematischen Fehler handelte, der im Rahmen der Bearbeitung des AP5 nicht gefunden werden konnte.

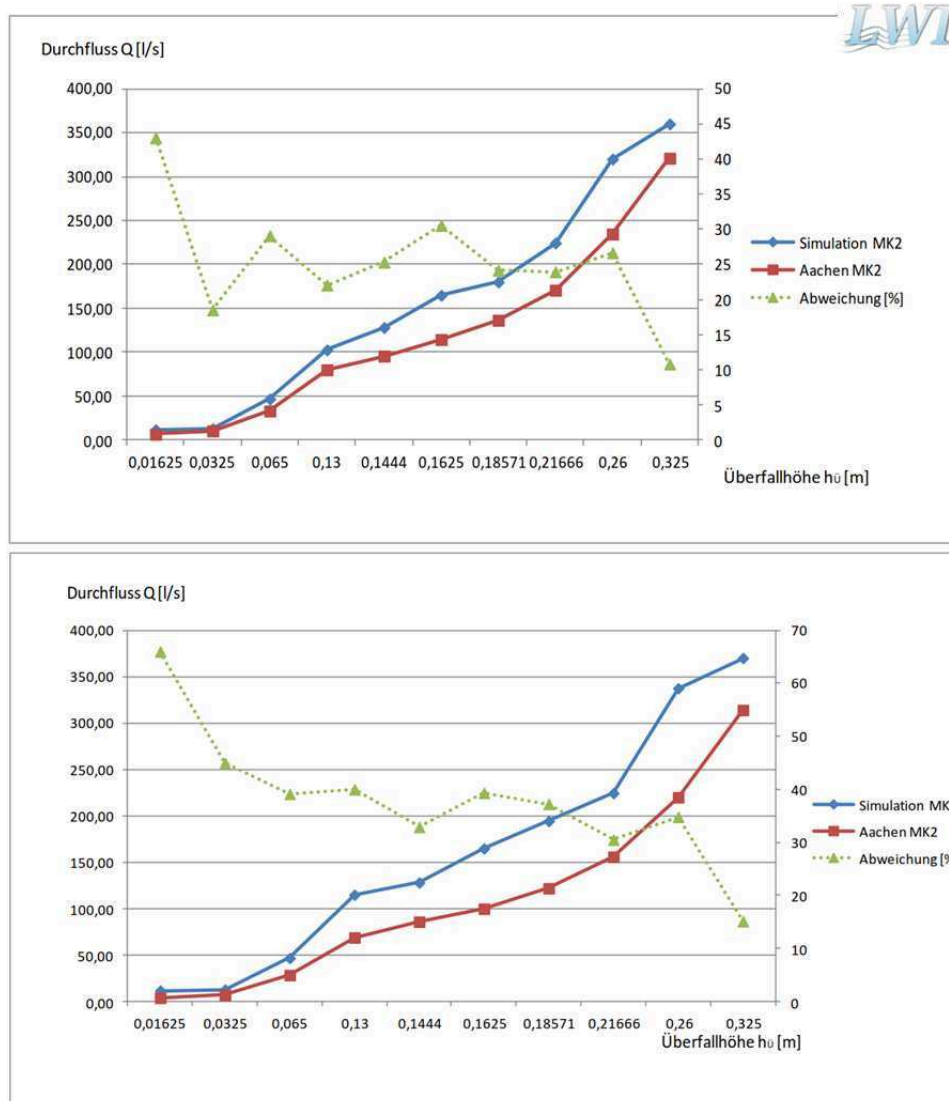


Bild 40: Vergleich der Ergebnisse aus Modellversuchen und numerischer Simulation für den Modellkörper 2 (Böschung 1:4) bei glatter(oben) und rauher (unten) Bauwerks Oberfläche (nach Oumeraci et al. 2014)

Zusammenfassend bewerteten Oumeraci et al. (2014) die bisher eingesetzten numerischen Verfahren wie folgt: Im Rahmen der Durchführung und Auswertung der numerischen Simulationen mit COBRAS-UC traten verschiedene Probleme auf, die nicht immer zufriedenstellend gelöst werden konnten und oft alternative Ansätze erforderlich machten. In einigen Fällen schien es möglich, dass mit einem feiner aufgelösten Berechnungsnetz exaktere Simulationsergebnisse zu erzielen wären. Solange die zwischen den Ergebnissen der Modellversuche und den Simulationen aufgetretenen Abweichungen von bis zu 40 % nicht erklärt und behoben wurden, erschien es jedoch nicht sinnvoll, den erhöhten Rechenaufwand für detaillierte Berechnungsgeometrien und -netze zu akzeptieren.

Basierend auf den am LWI bislang gesammelten Erfahrungen mit COBRAS-UC - in diesem sowie in anderen Projekten - erschien es fraglich, ob das Programm in der am LWI vorliegenden Form die wissenschaftlichen Ansprüche erfüllen konnte, die an numerischen Simulationsprogramme für die Untersuchung komplexer Fragestellung auf hohem Niveau gestellt wurden. Die vorliegenden Programmdateien erlaubten keinen Zugriff auf den Quellcode, weswegen auftretende Probleme nicht konkret nachvollzogen und bereits bekannte Mängel nicht behoben werden konnten. Die Erfahrungen am LWI mit dem Programmpaket OpenFOAM - wiederum in diesem sowie vor allem auch in anderen Projekten - zeigten, dass für die zukünftigen Anwendungen im Rahmen des Verbundprojektes OpenFOAM unbedingt der Vorzug gegenüber COBRAS-UC gegeben werden sollte. Mit den in diesem Arbeitspaket bereits durchgeführten Simulationen wurde daher bereits ein erster und richtiger Schritt in diese Richtung getan (Oumeraci et al. (2014)).

Allerdings führten die Simulationen in OpenFOAM zu der Erkenntnis, dass eine exakte Reproduktion der Ergebnisse der hydraulischen Modellversuche trotz intensiver Auseinandersetzung mit der Modellanpassung innerhalb des Zeitrahmens dieses Arbeitspakets nur teilweise möglich war. Die Geschwindigkeiten, die im numerischen Modell erforderlich waren um entsprechende Überfallhöhen zu generieren, überstiegen die in den hydraulischen Modellversuchen gemessenen Geschwindigkeiten auch bei einer Verwendung von Turbulenzmodellen, wobei sich die Geschwindigkeitsverläufe jedoch teilweise quantitativ vergleichbar waren.

Oumeraci et al. empfahlen, weitere Anpassungen des Modells OpenFOAM vorzunehmen, um die Ergebnisse genauer reproduzieren zu können. Es sollte auch daran gearbeitet werden, größere Überfallhöhen mit dem porösen Körper zu simulieren, da für diese detailliertere Vergleichswerte der hydraulischen Modellversuche vorliegen. Insgesamt jedoch war es gelungen, ein numerisches Modell der hydraulischen Modellversuche zu implementieren, das qualitativ zufriedenstellende Ergebnisse lieferte. Damit war nach Oumeraci et al. (2014) die Grundlage gelegt worden, um in Zukunft die Überströmung von Bühnenquerschnitten numerisch simulieren und die zu erwartenden Strömungskräfte auf die einzelnen Deckwerkselemente berechnen zu können.

Der folgende Bearbeitungsschritt war - neben der Erstellung des Gitternetzes eines durchlässigen, rauen und lageinstabilen Strombauwerks - die Anpassung der verwendeten 2D-CSD-Modells UDEC 5.0 an die Aufgabenstellung. Der **Universal Distinct Element Code** (UDEC) ist ein zweidimensionales Programm für die Diskontinuum-Modellierung auf Grundlage der Methode der distinkten (oder auch diskreten) Elemente. Verwendet wurde eine Demonstrationsversion der Software UDEC 5.0 der Firma Itasca Consulting Group Inc., Minneapolis, USA (www.itascacg.com), deren Einsatzmöglichkeiten in Oumeraci et al. (2014) beschrieben wurde.

Beispielhaft ist in Bild 41 (oben) der Ausschnitt des Netzes eines durchlässigen, rauhen und lageinstabilen Bauwerks (Variante 3) mit einzelnen Deckwerkselementen zur Simulation der Strömungskräfte in OpenFOAM dargestellt und als Ausschnitt in Bild 41 (unten) die entsprechende Geometrie der mit äußeren Kräften zu beaufschlagenden Knotenpunkte der beweglichen Deckwerkselemente in UDEC (nach Oumeraci et al. 2014).

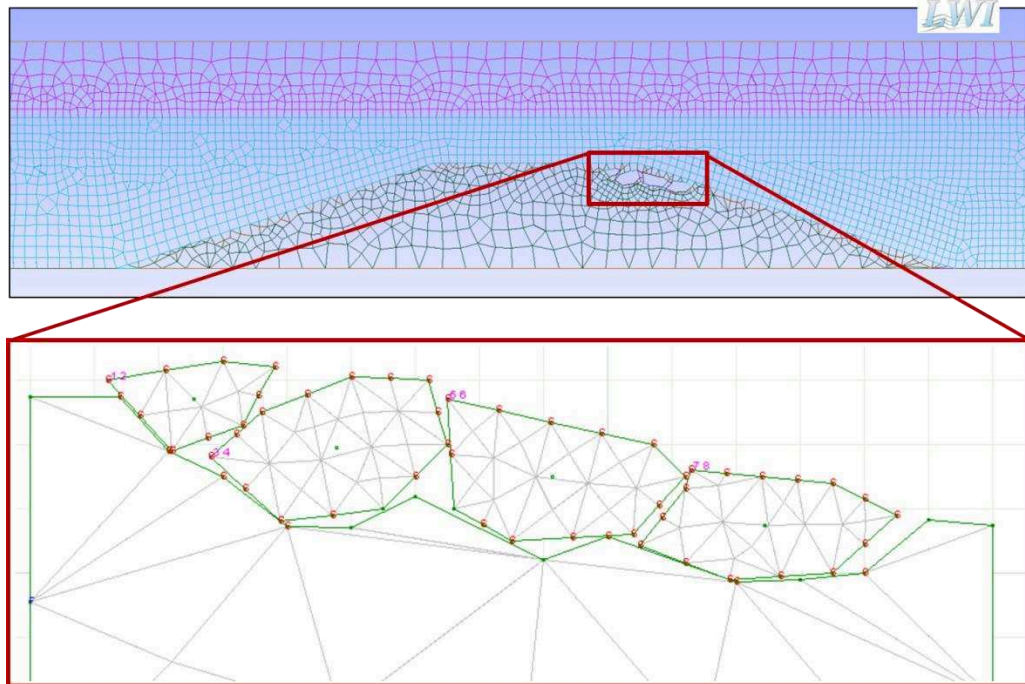


Bild 41: Ausschnitt des Netzes des durchlässigen, rauhen und lageinstabilen Bauwerks (Variante 3) mit einzelnen Deckwerkselementen und Darstellung der mit äußeren Kräften zu beaufschlagenden Knotenpunkte der beweglichen Deckwerkselemente in UDEC (nach Oumeraci et al. 2014)

Die vorgenommenen Simulationen, die mit OpenFOAM im AP5 beispielhaft durchgeführt werden konnten, simulierten nur geringe Überfallhöhen mit geringen Strömungskräften. Steinumlagerungen konnten aufgrund der geringen Strömungsbelastungen nicht festgestellt werden. Um einen systematischen Fehler in den Simulationen in UDEC auszuschließen (z.B. durch eine fehlerhafte Definition der Geometrien oder der Steineigenschaften) wurden die Kräfte eines Versuchs um den Faktor 10 erhöht und auf die Steine aufgebracht.

Das Ergebnis der UDEC-Simulationen mit den erhöhten Kräften ist in Bild 42 dargestellt. Die Deckwerkselemente 1 und 4 wiesen deutliche vertikale Verlagerungen auf, während die Deckwerkselemente 2 und 3 weiterhin auf dem Modellkörper auflagen (Nummerierung v.l.n.r.). Die Größenordnung der Bewegungen der Steine 1 und 4 belegte, dass für diese Steine eine Bewegung initiiert wurde und die Stabilitätsgrenze überschritten wurde. Das Deckwerkelement 1 wurden senkrecht angehoben und das Deckwerkelement 4 sowohl nach oben als auch nach rechts verlagert.

Die Schlussfolgerungen dieser CFD/CSD-Simulationen (OpenFOAM/UDEC) waren, dass im Rahmen der durchgeführten Simulationen nur sehr kurze Zeitabschnitte in UDEC simuliert werden konnten. Die betrachteten Deckwerkselemente mussten erst eine lagestabile Position einge-

nommen haben, bevor sie belastet werden konnten. Derzeit erfolgte die Setzung in der selben Simulation wie die Belastung mit den Kräften aus OpenFOAM.

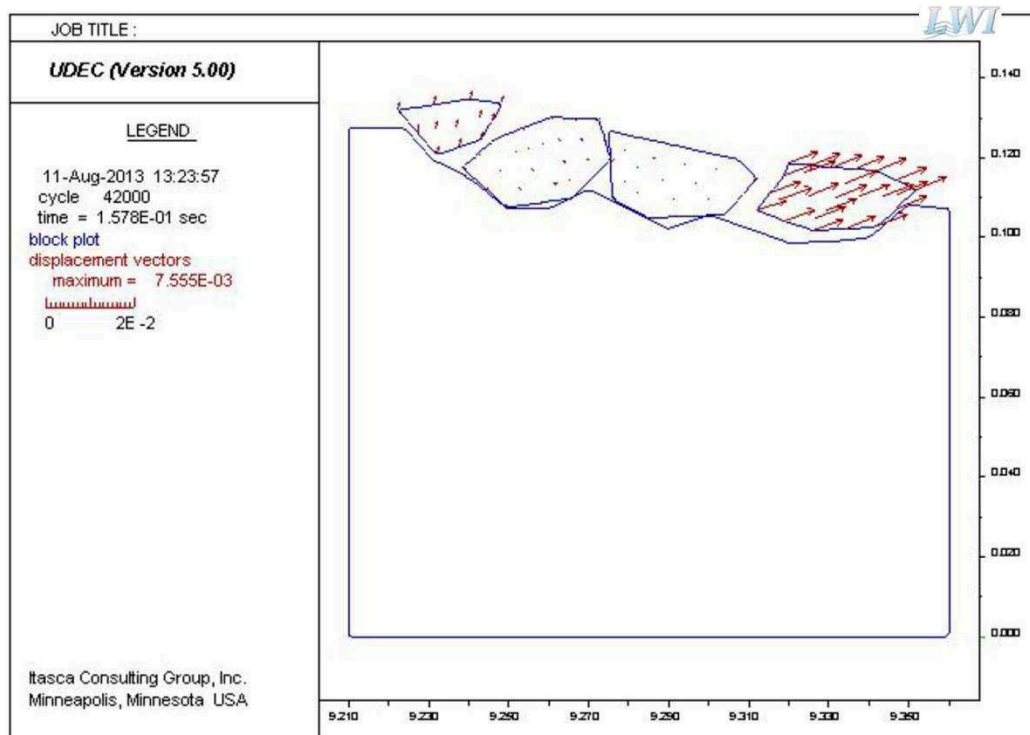


Bild 42: Position der Deckwerkelemente nach Abschluss der UDEC-Simulation mit 10-fach überhöhten Kräften(Oumeraci et al. 2014)

Eine Unterteilung der Simulation in zwei Simulationen, wobei in der ersten die Setzung und in der zweiten die Belastung simuliert wird, sollte zu längeren simulierbaren Zeitabschnitten führen, sodass eintretende Verlagerungen genauer untersucht werden können. Für die Simulationen mit UDEC sollte die Verlängerung des simulierbaren Zeitabschnitts im Vordergrund stehen, um die Verlagerungen der Deckwerkelemente genauer untersuchen zu können (Oumeraci et al. 2014).

Im Rahmen des AP5 wurde zudem die erste Simulation von Schiffswellen auf der Basis von OpenFOAM vorgenommen als auch Fragen zu Maßstabeffekten in der numerischen Simulation beim Einsatz von COBRAS-UC sowie von OpenFOAM mit UDEC bearbeitet.

Die zusammenfassende Bewertung des AP5 kam nach Oumeraci et al. (2014) zu dem Ergebnis, dass diese Untersuchungen mit COBRAS-UC, OpenFOAM als auch UDEC zu Maßstabeffekten mit Hilfe des eingesetzten Solvers in der vorliegenden Form und unter den angesetzten Randbedingungen für größere Maßstäbe derzeit noch nicht geeignet war. Die maßstäbliche Simulationen in UDEC konnten nur für feinkörniges Material und für kurze Zeiträume durchgeführt werden. Daher war auch eine Aussage über mögliche Maßstabeffekte in UDEC aufgrund der vorliegenden Simulationsergebnisse noch nicht möglich. Sowohl für die Kombinationen OpenFOAM-UDEC als auch für COBRAS-UC-UDEC besteht hier noch weiterer Untersuchungsbedarf, wobei die Hauptschwierigkeiten jedoch jeweils auf Seite der hydrodynamischen Eingangsparameter aus den CFD-Simulationen gesehen werden.

11 Arbeitspakete des FuE-Folgeprojekts

Die Nutzung probabilistischer Bemessungsansätze für Strombauwerke wie Leitdämme und Buhnen an SeeSchStr könnte zu einer wirtschaftlicheren Bauweise führen, wurde jedoch derzeit von der WSV wegen fehlender Grundlagen noch nicht umgesetzt. Für SeeSchStr sind in Abhängigkeit ihrer Lage zur offenen See verschiedene Bemessungssituationen maßgebend, die sich insbesondere aus langperiodischen Wellen ergeben. Für die WSV sind die langperiodischen schiffserzeugten Wellen an Leitdämmen und Buhnen die relevanten Lastfälle, für die fachwissenschaftlich abgesicherte Bemessungsansätze zu erarbeiten sind.

Eine nachhaltige Bemessung im Sinne eines später geringeren Unterhaltungsaufwands der Deckschichten von Strombauwerken und Ufersicherungen hat bei der derzeitigen Flottenstruktur an den SeeSchStr weiterhin eine erhebliche wirtschaftliche Bedeutung für die WSV.

Grundlage für die Entwicklung probabilistischer Bemessungsansätze war zunächst die Kenntnis der physikalischen Prozesse der äußeren Belastungen sowie die Schadensentwicklung an den Bauwerken selbst. Dazu sind die Messungen in der Natur (Bauwerksmonitoring, Erfassung der Belastung) fortzusetzen sowie zusätzlich ergänzende großmaßstäbliche Systemversuche vorzunehmen. Eine weiterhin parallele Entwicklung numerischer Verfahren sollte angestrebt, zumindest deren Erprobung und Anwendung anhand der vorliegenden Messdaten zur Modellvalidierung möglich sein.

Bei der Bearbeitung der noch offenen Arbeitspakete ist eine Abstimmung mit den Referaten Geotechnik Nord (K1) am Standort Hamburg-Rissen sowie Erdbau und Uferschutz (G4) am Standort Karlsruhe unerlässlich.

Nach Erarbeitung umfangreicher Grundlagen im vorangegangenen FuE-Projekt A39550270141, das Ende 2017 abzuschließen war, sind im vorgesehenen Folgeprojekt die noch offenen Arbeitspakete des Verbundprojekts zu erarbeiten.

11.1 AP1b – Fortführung des Monitorings der Belastung und der Schadensentwicklung in der Natur

Die Erfassung der schiffserzeugten Belastungen sowie die Schadensentwicklung der mit einer größeren Steinklasse erneut ertüchtigten hinterströmten Buhnenbauwerks bei Juelssand (SeeSchStr Elbe) ist fortzuführen, um die Datenbasis für das AP7 (Probabilistische Bemessungsansätze) hinsichtlich der Stabilität der Deckschicht zu erweitern. Darüber hinaus sind die am Leitdamm Langlütjen in der Außenweser erfassten Daten zur absunkbedingten Überströmung auszuwerten, zu analysieren und zu dokumentieren, um diese als Vergleichsfall für die Bemessung der Deckschichten hinzuziehen zu können.

11.2 AP6 – Großmaßstäbliche Experimente zur hydraulischen Stabilität von Deckschichten bei Schiffswellenbelastung

Die Messungen in der Natur zur langperiodischen Schiffswellenbelastung und zur Schadensentwicklung der Deckschichten sollten durch ausgewählte großmaßstäbliche Systemversuche z.B.

in der großen Umlaufrinne bei der BAW am Standort Hamburg-Rissen ergänzt werden, um die Ergebnisse aus den kleinmaßstäblichen 2D-Modellversuchen insbesondere hinsichtlich der Wirkung der Oberflächenrauheit sowie der Böschungsneigungen der Strombauwerke abzusichern.

11.3 AP7 – Entwicklung zuverlässigkeitsbasierter Bemessungsansätze zur hydraulischen Stabilität (Probabilistische Bemessungsansätze)

In Kooperation mit universitären Partnern ist auf Basis der in der Natur erfassten schiffserzeugten Belastungen und der entsprechenden Schadensentwicklung an den dokumentierten Strombauwerken ein probabilistisches Bemessungsverfahren zur Bewertung der Nachhaltigkeit der Bemessung zu entwickeln und für ausgewählte Beispiele anzuwenden und in der Praxis umzusetzen. Eine langfristige Beobachtung der Entwicklung der neu bemessenen Strombauwerke ist unerlässlich, um das probabilistische Bemessungsverfahren hinsichtlich seiner Gültigkeit zu verifizieren.

12 Erkenntnisse und weitere Forschungsbedarf

12.1 Zusammenfassung der bisherigen Erkenntnisse

Als bisherige Erkenntnisse aus dem FuE-Projekt sind für die Belange der WSÄ an SeeSchStr u.a. festzuhalten, dass

- anhand der kleinmaßstäblichen 3D-Modellversuche (M 1:40) der Nachweis der Gültigkeit von 2D-Stabilitätsuntersuchungen geführt wurde (AP4b),
- anhand der kleinmaßstäblichen 2D-Modellversuche (M 1:7,5) Bemessungsparameter für überströmte Bauwerke ermittelt wurden und aufgrund von Stabilitätstests der größere Widerstand von flacheren Bühnenböschungen und von einer größeren Steinklasse bei langperiodische schiffserzeugte Wellenbelastungen nachgewiesen wurde (AP4a),
- zudem anhand von Untersuchungen in der Natur die Stabilität bzw. der Widerstand eines innovativen „hinterströmten Strombauwerks“ gegen die langperiodischen schiffserzeugten Wellenbelastungen nachgewiesen wurde (AP1b),
- die in der Natur bisher verwendete Steinklasse $CP_{90/250}$ den gemessenen schiffserzeugten langperiodischen Wellenbelastungen nachweislich – trotz flacherer Bühnenböschungen - nicht hinreichenden Widerstand entgegenbrachte (AP1b, AP4a),
- der Einsatz der nächst höheren Steinklasse $LMB_{5/40}$ bei dem optimierten „hinterströmten Strombauwerk“ derzeit eine deutlich höhere Stabilität gegenüber dem Lastfall schiffserzeugte langperiodische Wellenbelastung (Überströmen) verspricht (AP1b),
- die Stabilitätsuntersuchungen in der Natur mit der Steinklasse $LMB_{5/40}$ für eine weitere Belastungsperiode fortzuführen sind, um die Datenbasis für die Entwicklung probabilistischer Bemessungsansätze zu vervollständigen.

12.2 Weiterer Forschungsbedarf

Weiterer Forschungsbedarf über die im Verbundprojekt vorgesehenen noch offenen Arbeitspakete AP1b (Fortsetzung), AP6 und AP7 hinaus wird in den Fachgebieten Parametrisierung der Schiffswellen (AP3) und Numerische Simulation (AP5) gesehen:

- Mit Bewilligung des im Rahmen des AP3 ausgearbeiteten Forschungsantrags "Parametrisierung nichtlinearer schiffsinduzierter 3D-Wellenfelder für die hydraulische Bemessung von Schutzbauwerken an Seeschiffahrtsstraßen (Parameterisation of nonlinear ship-induced wave fields - PaNSiWa)" durch die DFG mit Förderkennzeichen BR 5289/2-1 wird die Analyse räumlicher Schiffswellenfelder auf der Ebene der universitären Grundlagenforschung ab 2017 fortgesetzt (pers. Kommunikation Brühl 2016).
- Grundsätzlich kann OpenFOAM für die Simulation von Strömung und Wellen verwendet werden, da je nach Problemstellung verschiedene Solver zur Verfügung stehen, die an die speziellen Randbedingungen der WSV anzupassen sind. Bei der Entwicklung eines 3D-CFD/CSD-Modells besteht noch weiterer Untersuchungsbedarf, wobei nach Oumeraci et al. (2014) die Hauptschwierigkeiten jedoch auf Seite der hydrodynamischen Eingangsparameter aus den CFD-Simulationen gesehen werden.

Bundesanstalt für Wasserbau
Hamburg, Januar 2018

gez.
Dr.-Ing. Klemens Uliczka
Projektleiter

13 Berichte der Projektpartner

Projektplanung

BAW (2011): Schiffserzeugte langperiodische Belastung zur Bemessung der Deckschichten von Strombauwerken an Seeschiffahrtsstraßen (FuE-Projektantrag, A39550270141)

Oumeraci, H.; Schüttrumpf, H.; Kortenhaus, A. (2011): Entwurf für die Präzisierung der Arbeitspakete zum BAW-internen FuE-Antrag: Schiffserzeugte langperiodische Belastung zur Bemessung der Deckschichten von Strombauwerken an Schiffahrtsstraßen. LWI der TU Braunschweig und IWW der RWTH Aachen.

AP1

BAW (2012a): Schiffserzeugte langperiodische Belastung zur Bemessung der Deckschichten von Strombauwerken an Seeschiffahrtsstraßen – AP1 - Schadensanalyse. (BAW-Bericht, A39550270141).

BAW (2012b): Konzept für einen Pilotversuch zur Stabilität von optimierten Strombauwerken im Unterelbeabschnitt Juelssand. (BAW-Entwurf, A39550270141).

Staal, T. (2011): BAW-FuE-Projekt „Schiffserzeugte langperiodische Belastung zur Bemessung der Deckschichten an Seeschiffahrtsstraßen“ – Schadensfälle an Hamburger Stacks. HPA - AM Ufer- und Hochwasserschutzanlagen, Hamburg.

Kersten, T.; Mechelke, K. (2013): Einsatz von terrestrischen 3D-Laserscannern beim Monitoring von Strombauwerken – Pilotstudie. HafenCity Universität Hamburg, Labor für Geomatik.

Tschirschwitz, F.; Mechelke, K.; Kersten, T. (2017): Automatisiertes geodätisches Monitoring von Strombauwerken an der Tideelbe bei Juelssand im Zeitraum Februar 2015 bis Januar 2017. HafenCity Universität Hamburg, Labor für Geomatik.

WSA Bremerhaven (2009, 2011): Strombaulicher Bericht über den derzeitigen Stand der Bauwerksunterhaltung an den Bühnen und Leitwerken in der Außenweser. Bremerhaven, S. 6; mit Zusendung von digitalen Zeichnungen und Bildmaterial.

WSA Cuxhaven (2012): Strombaulicher Bericht zur Bauwerksunterhaltung und zum Ufersicherungskonzept am Niedersächsischen Ufer. Cuxhaven, S. 10.

AP2

Gier, F.; Schüttrumpf, H. (2012): Schiffserzeugte langperiodische Belastung zur Bemessung der Deckschichten von Strombauwerken an Seeschiffahrtsstraßen – Arbeitspaket 2: Wissenstandanalyse der an der Wellen-Strombauwerk-Interaktion beteiligten Belastungsprozesse. Lehrstuhl und Institut für Wasserbau und Wasserwirtschaft, Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen.

AP3

Oumeraci, H.; Brühl, M. (2013): Schiffserzeugte langperiodische Belastung zur Bemessung der Deckschichten von Strombauwerken an Seeschiffahrtsstraßen – Arbeitspaket AP3: Bestimmung der bemessungsrelevanten Parameter schiffserzeugter Wellen in Seeschiffahrtsstraßen (Parametrisierung der Schiffswellen). TU Braunschweig, Leichtweiß-Institut für Wasserbau, Abteilung Hydromechanik und Küstenwasserbau, Bericht Nr. 1016.

Oumeraci, H.; Brühl, M.; Tacke, S. (2014): Schiffserzeugte langperiodische Belastung zur Bemessung der Deckschichten von Strombauwerken an Seeschiffahrtsstraßen – Arbeitspaket AP3-Z: Bestimmung der bemessungsrelevanten Parameter schiffserzeugter Wellen in Seeschiffahrtsstraßen (Zusatzuntersuchungen zur Parametrisierung der Schiffswellen). TU Braunschweig, Leichtweiß-Institut für Wasserbau, Abteilung Hydromechanik und Küstenwasserbau, Bericht Nr. 1049.

AP4

Wöffler, T.; Gier, F.; Schüttrumpf, H. (2013): Schiffserzeugte langperiodische Belastung zur Bemessung der Deckschichten von Strombauwerken an Seeschiffahrtsstraßen – Projektskizze Arbeitspaket 4: Kleinmaßstäbliche Untersuchungen zur Erfassung der maßgebenden Prozesse und zur hydraulischen Stabilität. Lehrstuhl und Institut für Wasserbau und Wasserwirtschaft, Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen.

Wöffler, T.; Schüttrumpf, H. (2013): Schiffserzeugte langperiodische Belastung zur Bemessung der Deckschichten von Strombauwerken an Seeschiffahrtsstraßen – Projektskizze Arbeitspaket 4: Kleinmaßstäbliche Untersuchungen zur Erfassung der maßgebenden Prozesse und zur hydraulischen Stabilität – Planung der Modellphase 3. Lehrstuhl und Institut für Wasserbau und Wasserwirtschaft, Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen.

BAW (2015): Schiffserzeugte langperiodische Belastung zur Bemessung der Deckschichten von Strombauwerken an Seeschiffahrtsstraßen – Arbeitspaket 4b – Kleinmaßstäbliche 3D-Untersuchungen zu alternativen Buhnensystemen. (BAW-Bericht, A39550270141).

Wöffler, T.; Oetjen, J.; Krebs, V.; Schüttrumpf, H. (2015): Schiffserzeugte langperiodische Belastung zur Bemessung der Deckschichten von Strombauwerken an Seeschiffahrtsstraßen, AP4a – Vorversuche zur Modellphase 3. Lehrstuhl und Institut für Wasserbau und Wasserwirtschaft, Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen.

Oetjen, M.; Lechthaler, S.; Schüttrumpf, H. (2017): Schiffserzeugte langperiodische Belastung zur Bemessung der Deckschichten von Strombauwerken an Seeschiffahrtsstraßen – AP4-3 - Modellphase 3. Endbericht, Lehrstuhl und Institut für Wasserbau und Wasserwirtschaft, Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen.

AP5

Oumeraci, H.; Brühl, M.; Neuert, N. (2014): Schiffserzeugte langperiodische Belastung zur Bemessung der Deckschichten von Strombauwerken an Seeschiffahrtsstraßen – Arbeitspaket AP5: Entwicklung eines 3D-CFD/CSD-Modells und numerische Stabilitätsuntersuchungen (Numerische Simulation). TU Braunschweig, Leichtweiß-Institut für Wasserbau, Abteilung Hydromechanik und Küstenwasserbau, Bericht Nr. 1034.

14 Publikationen der Projektpartner

Gätje, B.; Uliczka, K.; (2014): Pilotversuch zur Stabilität von optimierten Strombauwerken im Unterelbeabschnitt Juellssand. Vortrag Kuratorium Naturschutzgebiet Haseldorfer Binnenelbe mit Elbvorland, Haseldorf.

Krebs, V.; Wöffler, T.; Uliczka, K.; Schüttrumpf, H. (2015): Numerische Simulation zur Erzeugung langperiodischer Wellen. In: Tagungsband HTG-Kongress 2015, Bremen, 09. - 11. September 2015, Hamburg: HTG. S. 101- 1010.

Krebs, V.; Wöffler, T.; Uliczka, K.; Schüttrumpf, H. (2016): Numerische Untersuchung eines Versuchsstandes zur Erzeugung langperiodischer Wellen - Simulation als zweidimensionales Zweiphasen-Strömungsproblem mithilfe der OpenFOAM-Software. In: Tagungsbeitrag 46. Internationales Wasserbau-Symposium Aachen (IWASA), S.: 14.

Tschirschwitz, F.; Mechelke, K.; Jansch, H.; Kersten, T. (2016a): Entwicklung und Betrieb eines automatisierten Laserscanning-Systems zum Monitoring von Bühnen an der Elbe. Vortrag 15. Oldenburger 3D-Tage, Februar 2016, Oldenburg: Jade Hochschule .

Tschirschwitz, F.; Mechelke, K.; Jansch, H.; Uliczka, K.; Kersten, T. (2016b): Ein automatisches Monitoringsystem für Bühnen an der Elbe durch terrestrisches Laserscanning. In: zfv – Zeitschrift für Geodäsie, Geoinformation und Landmanagement, Jg. 141, Heft 5, S. 297 – 305.

Tschirschwitz, F.; Mechelke, K.; Jansch, H.; Kersten, T (2016c): Ein automatisches Monitoringssystem für Bühnen an der Elbe durch TLS. Vortrag 8. Hamburger Forum für Geomatik, 18. – 19. Mai 2016, Hamburg: HCU, <http://www.geomatik-hamburg.de/geomatik/forum/2016/>

Uliczka, K. (2012): Schiffserzeugte langperiodische Belastung zur Bemessung der Deckschichten von Strombauwerken an Seeschiffahrtsstraßen. Vortrag BAW-Kolloquium: FuE-Projekte für aktuelle Fragestellungen an den Seeschiffahrtsstraßen, Hamburg.

Uliczka, K.; Gätje, B. (2015): Wechselwirkung von Seeschiff / Seeschiffahrtsstraße - Pilotprojekt zur Stabilität von optimierten Strombauwerken im Unterelbeabschnitt Juellssand. Vortrag BAW-Kolloquium: Projekte und Entwicklungen für aktuelle Fragestellungen im Küstenwasserbau, Hamburg.

Uliczka, K. (2015): Pilotversuch zur Stabilität von optimierten Strombauwerken im Unterelbeabschnitt Juellssand. Vortrag Kuratorium Naturschutzgebiet Haseldorfer Binnenelbe mit Elbvorland, Haseldorf.

Uliczka, K.; Jansch, H. (2017): Schiffserzeugte langperiodische Belastung zur Bemessung der Deckschichten von Strombauwerken an Seeschiffahrtsstraßen. BAW, Forschung Xpress (*eingereicht*).

Wöffler, T.; Schüttrumpf, H. (2013): Einfluss schiffsinduzierter Wellen auf die Stabilität von Bühnen - Kleinmaßstäbliche Untersuchungen zur Erfassung der maßgebenden Prozesse und hydraulischen Stabilität. Vortrag beim Sommerkolloquium der RWTH Aachen.

Wöffler, T.; Brühl, M.; Uliczka, K.; Schüttrumpf, H. (2014): Kleinmaßstäbliche Untersuchungen zur Erfassung der hydraulischen Stabilität von Strombauwerken. In: Tagungsband HTG-Kongress 2014, Berlin, 21. - 23. Mai 2014. Hamburg: HTG. S. 50-62.

Wöffler, T.; Kreyenschulte, M.; Oetjen, J.; Uliczka, K.; Schüttrumpf, H. (2016): Small-scale model tests on the hydraulic stability of structures in tidal waterways. In: Tagungsband 35. International Conference on Coastal Engineering ICCE'16, 17.–20. November 2016, Antalya, Turkey: ASCE. S.: 11.

15 Literaturverzeichnis

BAW (2010): Bemessung der Strombauwerke in der Außenweser unter Berücksichtigung von Schiffswellenbelastungen (BAW-Gutachten, A39550210120).

EAK (2002): Empfehlungen für die Ausführung von Küstenschutzwerken durch den Ausschuss für Küstenschutzwerke DGG und HTG. In: Die Küste, Heft 65, Hg. KFKI.

EurOtop (2007): EurOtop - Wave Overtopping of Sea Defences and Related Structures: Assessment Manual. In: Die Küste 73, Archiv für Forschung und Technik an der Nord- und Ostsee, Hrsg. Kuratorium für Forschung im Küsteningenieurwesen, S.178.

Hansen, U. A. (1985): Wasserbausteine im Deckwerksbau - Bemessung und Konstruktion. Westholsteinische Verlagsanstalt Boyens&Co, Heide (Holstein).

16 Glossar (BAW 2012)

16.1 Kenngrößen - Übersicht

Zum Verständnis der verwendeten Begriffe bezüglich der schiffserzeugten Belastungen an SeeSchStr wird eine Definition der Kenngrößen des - im Nahbereich des Ufers - auftretenden Wellen- und Strömungssystems gegeben (aus: BAW 2012a).

Die Schiffswellen- und Strömungssysteme sind gekennzeichnet durch

- die Schwallwelle als mit Wellenfortschrittsgeschwindigkeit vorauslaufende Ablösung des Bugstaus (auch: Kanalwelle, da auffällig bei kleinen Querschnittsverhältnissen)
- den Bugstau s_B direkt vor dem Schiffskörper,
- den Absunk z_A seitlich am Schiff,
- die Primärwelle H_P als Teil des durch Bugstau und Absunk angeregten langperiodischen Primärwellensystems,
- die kurzperiodischen Sekundärwellen H_S sowie
- die Rückströmung v_R in Wechselwirkung zum Absunk
- die durch die Primärwelle verursachte Schwellströmung v_{Hp} .

Die Wasserspiegeländerungen in tiefen- und seitenbegrenztem Fahrwasser, wie sich das Wellenbild für einen Betrachter am Ufer darstellt, sind in Bild 43 im Längsschnitt schematisch in erläutert.

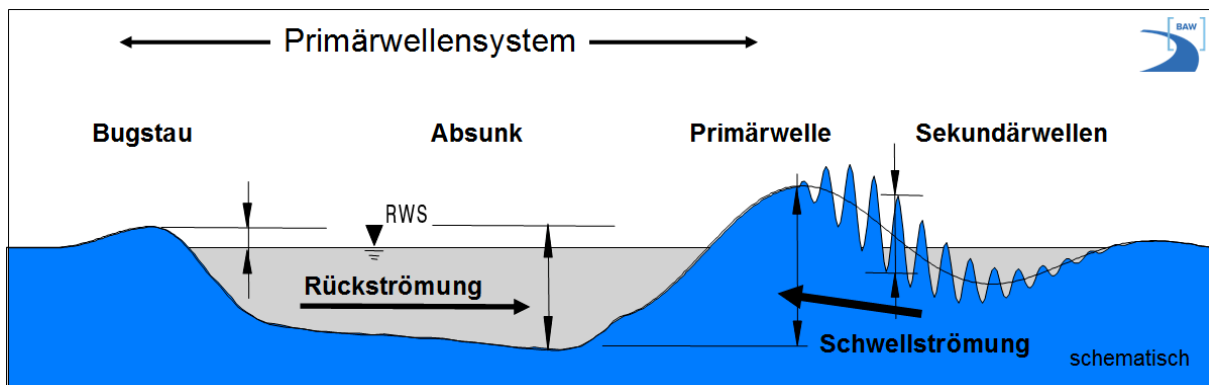


Bild 43: Schematische Darstellung einzelner Kenngrößen schiffserzeugter Wellen- und Strömungsbelastungen bei Revierfahrt

In ihrer zeitlichen Abfolge werden für einen am Ort stehenden Betrachter folgende Änderungen des Ruhewasserspiegels deutlich: Bugstau, Absunk als Differenz von Bugstau und maximalem Wasserspiegelabfall, Primärwelle (als Heckwelle) sowie das die ausschwingende Primärwelle überlagernde Sekundärwellensystem.

16.2 Kenngrößen - Glossar

Die ausgewählten Bezeichnungen und Definition der Kenngrößen schiffserzeugter Belastungen an Seeschiffahrtsstraßen (vergl. u.a. BAW 2012) können sich teilweise gegenüber denen an

Binnenwasserstraßen geläufigen Begriffen insoweit unterscheiden, als aufgrund der Breite und Inhomogenität der Seeschiffahrtsstraßen und dem korrektiven Einsatz von Strombauwerken (Strom- und Uferschutzbuhnen, Leitdämme) andere schiffserzeugte instationäre Belastungen u.a. für die Bemessung von Deckschichten maßgeblich werden.

Schwallwelle: Durch das fahrende Schiff ausgelöste, dem Schiff mit Wellenfortschritts- geschwindigkeit vorauslaufende Schwallwelle, die in engen Querschnitten wie Kanälen deutlich ausgeprägt ist (als Kanalwelle, vergl. Soliton), divergiert dagegen in breiteren, inhomogenen Schiffahrtsstraßen u.a. durch Wellenumformungsprozesse.

Bugstau: Langperiodische Wasserspiegelanhebung direkt vor dem Bug eines fahrenden Schiffs (Staupunkt) infolge der Querschnittseinengung und der Umlenkung der Stromlinien (annähernd vergleichbar zum Pfeilerstau), Teil des Primärwellensystems.

Absunk: Langperiodische Wasserspiegelabsenkung seitlich des fahrenden Schiffs, induziert durch die Verdrängungsströmung (BERNOULLI-Strömung; Energiebilanz = kinetische Energie + potentielle Energie; umgangssprachlich: Sog). Abhängig u.a. von Querschnittsverhältnis und Schiffsgeschwindigkeit, Hauptanteil des Primärwellensystems.

Primärwelle: Dynamischer, langperiodischer Wasserspiegelanstieg nach Passage eines fahrenden Schiffs (auch: Heckwelle, umgangssprachlich: Schwell), einhergehend mit Abnahme und schließlich Umkehrung der Verdrängungsströmung hin zur Schwellströmung. Teil des Primärwellensystems.

Primärwellensystem: Schiffserzeugtes, langperiodisches Wellensystem mit *Bugstau*, *Absunk* und *Primärwelle*. Wellenlänge direkt abhängig von der Schiffslänge, Periode abhängig von Schiffslänge und Schiffsgeschwindigkeit. Wellenfortschritts- geschwindigkeit gleich der Schiffsgeschwindigkeit. Abnahme und leichte Phasenverschiebung zum Ufer hin bei breiten, inhomogenen Wasserstraßen.

Sekundärwellen: Kurzperiodisches, schiffserzeugtes Wellensystem infolge der Unstetigkeitsstellen eines fahrenden Schiffs an Bug, vorderer und hinterer Schulter sowie Heck. Höhe abhängig von der Schiffsgeschwindigkeit und besonders der Schiffsform. Perioden und Wellenfortschritts- geschwindigkeit in der Größenordnung von Windwellen.

Rückströmung: Schiffserzeugte Verdrängungsströmung (BERNOULLI-Strömung) mit dominierender Richtungskomponente entgegen der Fahrtrichtung des Schiffs. In breiten inhomogenen Wasserstraßen ufernah (auch in Buhnenfeldern) teils deutliche orthogonale Richtungskomponente.

Schwellströmung: Die nach der Vorbeifahrt des Schiffs durch die auflaufende Primärwelle (umgangssprachlich: Schwell) induzierte instationäre Strömung mit uferorthogonalen und uferparallelen Richtungskomponenten.



Kußmaulstraße 17 · 76187 Karlsruhe
Tel. +49 (0) 721 97 26-0 · Fax +49 (0) 721 97 26-45 40

Wedeler Landstraße 157 · 22559 Hamburg
Tel. +49 (0) 40 81 908-0 · Fax +49 (0) 40 81 908-373

www.baw.de