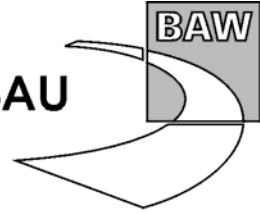


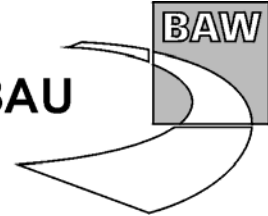


BUNDESANSTALT FÜR WASSERBAU
Karlsruhe · Hamburg · Ilmenau



Fahrrinnenanpassung der Unter- und Außenelbe an die Containerschifffahrt

**- Untersuchung ausbaubedingter Veränderungen
für die Deichsicherheit im Altenbrucher Bogen -**



**Fahrrinnenanpassung der Unter- und Außenelbe an
die Containerschifffahrt**

- Untersuchung ausbaubedingter Veränderungen für die
Deichsicherheit im Altenbrucher Bogen -

Auftraggeber: Projektbüro „Fahrrinnenanpassung von Unter- und Außenelbe“
beim Wasser- und Schifffahrtsamt Hamburg
Moorweidenstr. 14
20148 Hamburg

Auftrag vom: 5.10.2004

Auftrags-Nr.: BAW-Nr. A39550310062

Aufgestellt von: Abteilung: Wasserbau im Küstenbereich
Referat: Ästuarsysteme I (K2)
Geotechnik Nord (K1)
Bearbeiter: Dr.-Ing. H. Schüttrumpf
Dr.-Ing. M. Pohl

Hamburg, 17.07.2006

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



Zusammenfassung

Im Altenbrucher Bogen wurden in den vergangenen Jahren Deichsetzungen, Deckwerksschäden und Vorstranderosion festgestellt, die vom verantwortlichen Deich- und Uferverband teilweise auf eine Zunahme der schiffsinduzierten Belastungen zurückgeführt werden. Um die maßgebenden Wirkungszusammenhänge zwischen hydraulischen (Wasserstände, Strömungen, Seegang) und schiffsinduzierten Belastungen und dem Deich im Altenbrucher Bogen und der geplanten Fahrrinnenanpassung der Elbe zu klären, wurde die Bundesanstalt für Wasserbau – Dienststelle Hamburg – vom Projektbüro „Fahrrinnenanpassung von Unter- und Außenelbe“ beim Wasser- und Schifffahrtsamt Hamburg beauftragt, entsprechende Untersuchungen durchzuführen.

Dazu wurde von der Bundesanstalt für Wasserbau ein zweiphasiges Untersuchungskonzept aufgestellt. Im Rahmen der ersten Phase wurden die Wirkungszusammenhänge zwischen schiffserzeugten Belastungen und Deichsicherheit für den Ist-Zustand untersucht. Das BAW-Gutachten zur ersten Phase kommt zu folgendem Ergebnis:

Aufgrund der komplexen Wirkungszusammenhänge wird empfohlen, ein Gesamtkonzept zur Sanierung des Uferabschnitts aufzustellen, da sich z.B. durch das Vorspülen eines Verschleißkörpers sowohl Wirkungen auf die Wellenbelastung des Deckwerks als auch auf die Tidedynamik der Elbe ergeben.

Im Rahmen der zweiten Phase war die Wirkung der geplanten Fahrrinnenanpassung der Elbe auf die Deichsicherheit im Bereich Altenbruch zu untersuchen. Die Ergebnisse können wie folgt - unterteilt in die einzelnen Bereiche - zusammengefasst werden:

Vorstrand: Auf der Grundlage einer Seegangssimulation wurde gezeigt, dass sich ausbaubedingte Änderungen des Seegangs am Fahrrinnenrand bei Sturmflut bis zum Deichfuß fortsetzen.

Deckwerk: Auf der Grundlage von Stabilitätsuntersuchungen wurde gezeigt, dass sich ausbaubedingte Änderungen der Schiffswellen- und Windwellenbelastung nur geringfügig auf das erforderliche Schüttsteingewicht auswirken. Da der heutige Deckwerksaufbau bereichsweise nicht den Anforderungen nach dem Stand der Technik entspricht, werden in diesen Bereichen auch in Zukunft Schäden auftreten. Die Untersuchungen zeigen, dass das Deckwerk für heutige und ausbaubedingte Belastungen keine ausreichende Stabilität gegen Schüttsteinerosion bei Wind- oder Schiffswellenbelastung für Schüttsteine der Klasse II hat und dass bei einer Überlagerung von Schiffs- und Windwellen auch Schüttsteine der Klasse III keine ausreichende Lagestabilität besitzen.



Um die Wellenbelastung des Deckwerks zu reduzieren, wird empfohlen, z.B. durch das Vorspülen eines Verschleißkörpers auf die Wellenumformung (insbesondere das Wellenbrechen) einzuwirken. Weiterhin wird eine Ertüchtigung des Deckwerks entsprechend dem Stand der Technik empfohlen. Diese Deckwerksertüchtigung ist unabhängig von der geplanten Fahrrinnenanpassung durchzuführen.

Deichkörper: Die Untersuchungen der ausbaubedingten Änderungen der hydraulischen und schiffserzeugten Belastungen auf die geotechnische Deichstandsicherheit und –gebrauchstauglichkeit haben ergeben, dass gegenüber dem Ist-Zustand **keine** Beeinflussung zu erwarten ist.

In der numerischen Simulation zur geotechnischen Standsicherheit wurde eine homogene Kleidecke mit einer ausreichenden Mächtigkeit der Deichabdeckung angesetzt. Da in natura die Qualität der Deichabdeckung derzeit nicht dem Simulationsstand und dem Stand der Technik entspricht, d.h. die Mächtigkeit und die Qualität sind lokal geringer, ist für eine ausreichende Sicherheit des Deichkörpers – insbesondere im Sturmflutfall – die Deichabdeckung gemäß der EAK (2002) zu ertüchtigen und eine Deichdränage einzubauen.

Aufgrund lokaler ausbaubedingter Änderungen des Seegangs bei Sturmflut wurde eine Erhöhung der Wellenaufbauhöhe von einigen Zentimetern abgeschätzt. Aufgrund der auf der sicheren Seite liegenden Abschätzung der ausbaubedingten Änderungen der Wellenaufbauhöhe hat dies keine Auswirkungen auf das Deichbestick.

Inhaltsverzeichnis

Seite

1	Veranlassung und Aufgabenstellung	1
2	Verwendete Unterlagen	3
3	Definition der Deichsicherheit aus technischer Sicht	4
4	Wirkungszusammenhänge zwischen Fahrrinnenanpassung und Deichsicherheit	6
5	Wirkung ausbaubedingter Änderungen hydraulischer und schiffserzeugter Belastungen auf die Deichsicherheit	10
5.1	Zusammenstellung der ausbaubedingten Änderungen hydraulischer und schiffserzeugter Belastungen	10
5.2	Ausbaubedingte Änderungen der Deichsicherheit	14
5.2.1	Deckwerksstabilität	14
5.3	Geotechnische Deichstandsicherheit und –gebrauchstauglichkeit	15
5.3.1	Schiffserzeugte Schwingungen des Deichkörpers	15
5.3.2	Schiffserzeugte Porenwasserdruckschwankungen im Deichkörper und im Deichuntergrund	16
5.3.3	Geotechnische Standsicherheit bei Niedrigwasser	16
5.3.4	Geotechnische Standsicherheit bei Sturmflutwasserständen	17
5.4	Seegangsbelastung im Sturmflutfall	18
6	Schlussfolgerungen und Empfehlungen	23
7	Schrifttum	25

Bildverzeichnis

Seite

Abb. 1.	Lage des Untersuchungsgebiets	2
Abb. 2.	Deich im Untersuchungsquerschnitt (bei der Langzeitmessstation LZ3)	2
Abb. 3.	Wirkung einer Fahrrinnenanpassung auf die Deichsicherheit	7
Abb. 4.	Schematische Darstellung eines Deichquerschnitts in einem Ästuar	7
Abb. 5.	Hydraulische Einflüsse auf den Deichkörper, das Deckwerk und den Vorstrand	8
Abb. 6.	Schiffsinduzierte Einflüsse auf den Deichkörper, das Deckwerk und den Vorstrand	10
Abb. 7.	Scherdehnungen im Deichkörper mit Aufsättigung und ohne Deichdränage	18
Abb. 8.	Untersuchungsprofil (Querschnitt bei LZ3)	20
Abb. 9.	Definition der Wellenangriffsrichtung	20
Abb. 10.	Ausbaubedingte Änderungen der signifikanten Wellenhöhe H_S , der mittleren Wellenperiode T_m und der Wellenangriffsrichtung θ auf dem Vorstrand und dem Vorland	22

1 Veranlassung und Aufgabenstellung

Die Wasser- und Schifffahrtsverwaltung des Bundes und die Freie und Hansestadt Hamburg planen – vertreten durch das Projektbüro „Fahrrinnenanpassung von Unter- und Außenelbe“ beim Wasser- und Schifffahrtsamt Hamburg - eine weitere Anpassung der Fahrrinne von Unter- und Außenelbe an die Erfordernisse der Containerschifffahrt [U1]. Die Bundesanstalt für Wasserbau – Dienststelle Hamburg – (BAW-DH) wurde in diesem Zusammenhang mit Schreiben vom 5.10.2004 vom Projektbüro beauftragt, dieses in den aktuellen Fragen der Deichsicherheit zu beraten. In diesem Zusammenhang sollte auch die Wirkung ausbaubedingter Änderungen der hydraulischen (Wasserstände, Strömungen, Seegang) und schiffserzeugten Belastungen auf den Deich im Altenbrucher Bogen (Abb. 1) untersucht werden.

Der Deich im Altenbrucher Bogen wurde ausgewählt, da

- (i) der Altenbrucher Bogen aufgrund seiner exponierten Lage im Prallhang der Elbe verhältnismäßig großen Strömungs- und Seegangsbelastungen ausgesetzt ist,
- (ii) die Fahrrinne in einem Abstand von rd. 500m Entfernung zum Deckwerk verläuft und somit höhere schiffserzeugte Belastungen auftreten als in anderen Abschnitten der Tideelbe und
- (iii) in der Vergangenheit Deichsackungen und Deckwerksschäden auftraten, für die vom zuständigen Deich- und Uferbauverband schiffsinduzierte Belastungen verantwortlich gemacht werden.

Die Wirkungszusammenhänge zwischen schiffserzeugten Belastungen und Deichsicherheit wurden für den **Ist-Zustand** im Rahmen des BAW-Gutachtens „Untersuchung der Deichsicherheit am Beispiel des Altenbrucher Bogens unter besonderer Berücksichtigung schiffserzeugter Belastungen“ (BAW, 2006a) untersucht.

Aufgabe dieses Gutachtens ist es, die Wirkung der **geplanten Fahrrinnenanpassung** auf die Deichsicherheit im Bereich Altenbruch zu untersuchen.

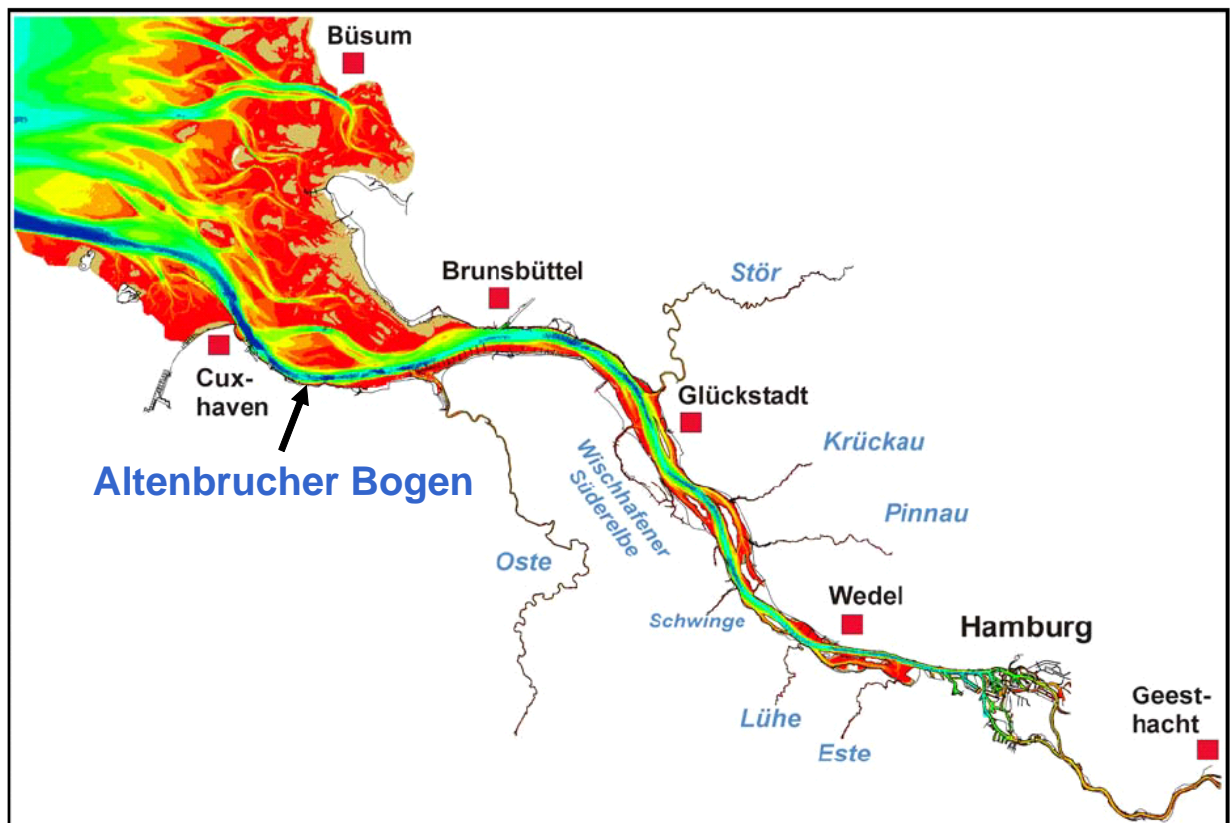


Abb. 1. Lage des Untersuchungsgebiets



Abb. 2. Deich im Untersuchungsquerschnitt (bei der Langzeitmessstation LZ3)



2 **Verwendete Unterlagen**

- [U1] Anpassung der Fahrrinne von Unter- und Außenelbe an die Containerschifffahrt. Planfeststellungsunterlage Teil B. Erläuterungsbericht, Teil 2. Beschreibung des Vorhabens (Technische Planung). Stand 23.06.2006. Projektbüro Fahrrinnenanpassung von Unter- und Außenelbe beim Wasser- und Schifffahrtsamt Hamburg

3 Definition der Deichsicherheit aus technischer Sicht

Der Begriff der Deichsicherheit ist weder im Niedersächsischen Deichgesetz (NDG) noch im Wassergesetz des Landes Schleswig-Holstein (LWG) ausdrücklich definiert. Dennoch können beiden Gesetzen einige Definitionen anderer Begriffe entnommen werden, die für die Definition des Begriffes „Deichsicherheit“ erforderlich sind. Im LWG §64 (2) wird der Begriff des Deiches definiert:

Deiche sind künstliche, wallartige Erdaufschüttungen mit befestigten Böschungen, die zum Schutz von Ländereien gegen Überschwemmungen errichtet werden. (LWG §64 (2))

Im NDG §2(1) ist die Funktion des Hauptdeiches definiert, die in etwa der Definition eines Landesschutzdeiches in Schleswig-Holstein (LWG §64 (2)) entspricht:

Hauptdeiche sind Deiche, die dem Schutz eines Gebietes vor Sturmflut zu dienen bestimmt sind. (NDG §2 (1))

Die Abmessungen und Bestandteile eines Deiches sind im NDG §4 (3) (Abmessungen und Bestandteile des Deiches) bzw. im LWG §65 (1) beschrieben:

Zum Deich gehören neben dem Deichkörper auch die Sicherungswerke wie Fußbermen, Deichgräben, Fuß- und Böschungssicherungen (NDG §4 (3))

Weiterhin ist auch die Erhaltung des Vorlandes im NDG §21 (1) definiert:

Die zwischen Hauptdeich und Uferlinie (mittleres Tidehochwasser) liegende unbedeichte oder bedeichte Fläche (Deichvorland) muss als Deichschutz vom Träger der Deicherhaltung in der von der oberen Deichbehörde zu bestimmenden Breite erhalten werden NDG §21 (1).

Reicht das im Abbruch liegende Deichvorland als Deichschutz nicht mehr aus, so hat der Träger der Deicherhaltung Schutzwerke zu errichten und zu erhalten NDG §21 (2).

Hieraus folgt, dass der Begriff der Deichsicherheit alle Deichelemente umfasst, die gemäß dem NDG bzw. dem LWG zum Deich gehören.

Der Vorstrand vor dem Deckwerk, der unterhalb des mittleren Tidehochwassers liegt, gehört somit nicht zum Deich, kann jedoch bei einer geringen Vorlandbreite von weniger als 200 m als Sicherungstreifen mit bis zu 500 m Breite vor der Uferlinie zum Teil des Deiches werden (NDG §23).



Im Folgenden soll aufgezeigt werden, wie die Deichsicherheit zu quantifizieren ist. Im Rahmen einer deterministischen Bemessung kann die Deichsicherheit durch einen Sicherheitsbeiwert η quantifiziert werden, der das Verhältnis der angreifenden Kräfte S zu den widerstehenden Kräften R bezeichnet.

$$\eta = \frac{R}{S}$$

Sind die angreifenden Kräfte größer als die widerstehenden Kräfte, so tritt das Versagen eines Bauwerksteils bzw. des Bauwerks ein. Die Deichsicherheit ist nicht mehr gegeben.

Im Rahmen einer probabilistischen Bemessung wird Sicherheit durch Zuverlässigkeit (reliability) ersetzt. Zuverlässigkeit ist die Eigenschaft eines Bauwerks, eine bestimmte Funktion unter vorgegebenen Bedingungen während eines bestimmten Zeitraumes mit einer vorgegebenen Wahrscheinlichkeit zu erfüllen. Die Zuverlässigkeit Z ist definiert als:

$$Z = 1 - P_f$$

Mit P_f = Versagenswahrscheinlichkeit

Beiden Definitionen ist gemeinsam, dass die Sicherheit bzw. Zuverlässigkeit sinkt, wenn die angreifenden Kräfte zunehmen bzw. wenn die widerstehenden Kräfte abnehmen. Bei der Definition der Deichsicherheit ist somit immer eine Berücksichtigung der einwirkenden und der widerstehenden Kräfte erforderlich.

Dies bedeutet streng genommen, dass die Deichsicherheit nicht mehr gewährleistet ist, wenn ein Element des Deiches (z.B. Deckwerk) versagt. Dies ist aber nicht gleichzusetzen mit einem nicht ausreichendem Schutz des Gebietes vor Sturmfluten. Schäden am Deckwerk bzw. dessen Versagen verursachen nicht zwangsläufig ein Versagen des Deichkörpers bei Sturmflut, da sowohl das Vorland als auch der Deich weiterhin den angreifenden Kräften widerstehen und deren Widerstand erst aufzubrechen ist. Aufgrund der Schutzfunktion des Deiches vor Sturmfluten und der mit einem Bauteil-, Element- oder Bauwerksversagen verbundenen mittelbaren oder unmittelbaren Gefährdung des Hinterlandes ist daher eine Unterscheidung in eine direkte und eine indirekte Deichsicherheit erforderlich. Die direkte Deichsicherheit umfasst alle direkt mit der Schutzfunktion des Deiches verbundenen Nachweise für das Bemessungsereignis (Sicherheit gegen Wellenüberlauf, geotechnische Standsicherheit und -gebrauchstauglichkeit). Die Ermittlung der Deichhöhe bzw. des Deichbesticks (NDG §4 (2) bzw. LWG §65 (2)), die häufig irrtümlich mit Deichsicherheit gleichgesetzt wird, ist somit nur ein Aspekt bei der Ermittlung der Deichsicherheit.

Die indirekte Deichsicherheit berücksichtigt den Unterhaltungszustand des Deiches und seiner Bestandteile (Zustand der Grasnarbe, des Deckwerks, etc.). Dies wird im LWG §69 (1) wie folgt definiert:

Die Unterhaltung umfasst die Pflicht, den Deich in seinem Bestand und in seinen Abmessungen so zu erhalten, dass er seinen Schutzzweck jederzeit erfüllen kann.

Eine ähnliche Definition findet sich unter dem Begriff Deicherhaltung im NDG §5 (1). Zur Unterhaltung gehören die Pflege der Grasnarbe, die Beseitigung von Beschädigungen des Deiches und der Grasnarbe sowie die Bekämpfung schädlicher Tiere (LWG §69 (2)). Der ordnungsgemäße Zustand ist im Rahmen einer regelmäßigen Deichschau festzulegen (LWG §71, NDG §18).

Abschließend sollte noch erwähnt werden, dass auch die Deichverteidigung zur Deichsicherheit gezählt werden sollte (NDG §27).

Hieraus kann zusammenfassend die folgende Definition der Deichsicherheit aus technischer Sicht gegeben werden:

Definition der Deichsicherheit

Als Deichsicherheit wird die Eigenschaft eines Deichkörpers mit seinen Sicherungs- und Schutzwerken einschließlich der Deichschuttfunktion des Vorlandes definiert, den angreifenden Kräften aus allen festzulegenden Belastungsgrößen (Seegang, Wasserstände, Schiffswellen, etc.) einen ausreichenden Widerstand gegenüberzustellen und den Deich in seiner festgelegten Konstruktion, in einem gepflegten Unterhaltungszustand und ggf. mit Mitteln der Deichverteidigung zu erhalten.

4 Wirkungszusammenhänge zwischen Fahrrinnenanpassung und Deichsicherheit

Um die Wirkungszusammenhänge zwischen Fahrrinnenanpassung und Deichsicherheit zu beschreiben, sind zwei Fälle zu unterscheiden, die im Folgenden genauer beschrieben werden (Abb. 3):

- die Wirkung ausbaubedingter Änderungen der hydraulischen Belastungen (Wasserstände, Wellen, Strömungen) auf die Deichsicherheit
- die Wirkung ausbaubedingter Änderungen schiffserzeugter Belastungen auf die Deichsicherheit

Die Beschreibung der Wirkungszusammenhänge wird im Folgenden in allgemeiner Form für beide Fälle durchgeführt und ist nicht nur auf die Fahrrinnenanpassung der Elbe und den Altenbrucher Bogen beschränkt.

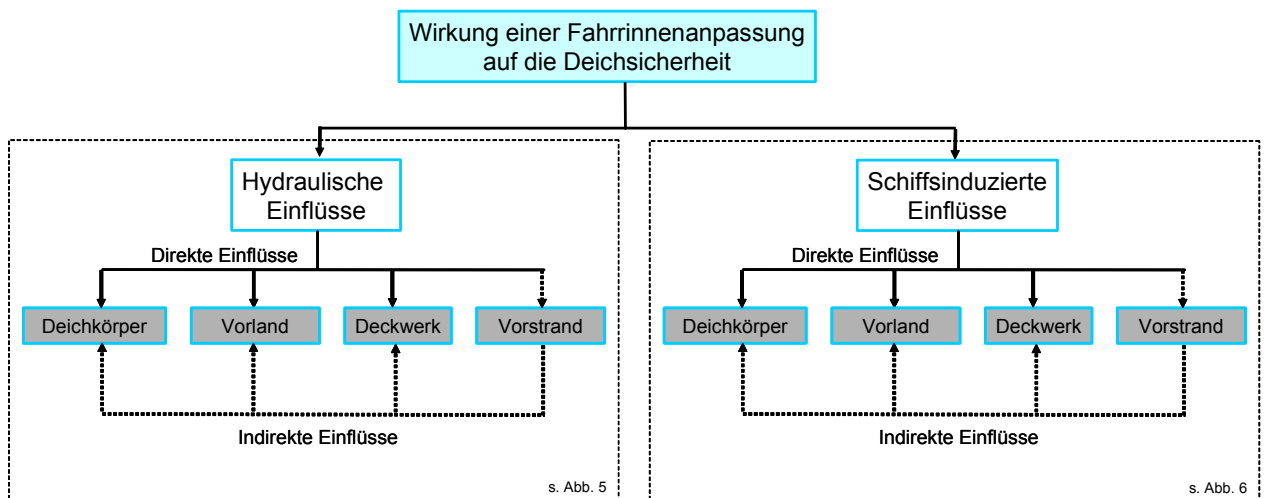


Abb. 3. Wirkung einer Fahrrinnenanpassung auf die Deichsicherheit

Der Vorstrand gehört definitionsgemäß nicht zum Deich und somit nicht zur Deichsicherheit. Eine Erosion des Vorstrandes führt jedoch zu einer veränderten hydraulischen Belastung des Deckwerks und des Deiches, die sich somit indirekt auf die Deichsicherheit auswirkt. Daher wird in direkte Einflüsse auf den Deich und indirekte Einflüsse unterschieden. Eine schematische Darstellung eines typischen Deichquerschnitts in einem Ästuar ist in Abb. 4 gegeben.

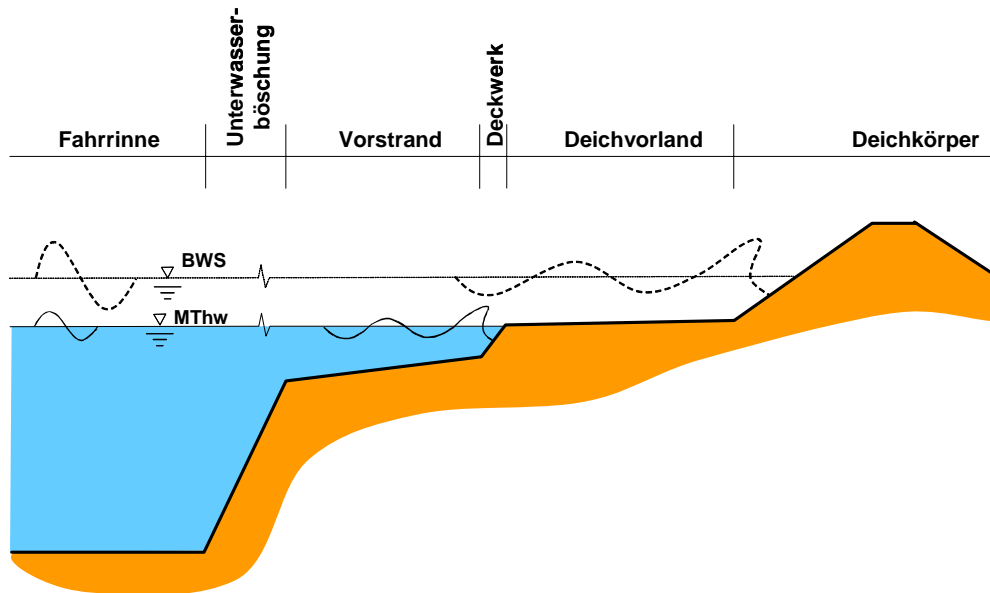


Abb. 4. Schematische Darstellung eines Deichquerschnitts in einem Ästuar

a) Wirkung hydraulischer Belastungen auf die Deichsicherheit

Die prinzipiellen Wirkungszusammenhänge zwischen den hydraulischen Prozessen (Wasserstände, Seegang, Strömungen) und der Deichsicherheit sind in Abb. 5 dargestellt.

Seegang und Tidesströmungen treffen zuerst auf den **Vorstrand**. Der Seegang wird auf dem Vorstrand durch die bekannten Flachwassereffekte (Refraktion, Shoaling, Wellenbrechen) transformiert. Zusätzlich leisten seegangsinduzierte und tideinduzierte Strömungen auf dem Vorstrand einen Beitrag zur Vorstrandentwicklung (Erosion bzw. Aufsedimentation). Für die Ermittlung der Belastungsgrößen des Deckwerks und des Deiches ist die Transformation des Seegangs auf dem Vorstrand wie auch die Interaktion der Vorstrandentwicklung mit der Seegangstransformation zu beachten

Seegang, Wasserstände und Strömungen führen anschließend zu einer Belastung des Deckwerks und weiterhin zu einer Beeinflussung der **Deckwerksstabilität** und sind im Rahmen entsprechender Untersuchungen zu berücksichtigen. Neben den angreifenden Kräften aus Seegang und Strömungen sind die widerstehenden Kräfte zu berücksichtigen, die sich aus den Abmessungen und dem Aufbau des Deckwerks ergeben.

Über dem **Vorland** werden die einlaufenden Wellen aufgrund der relativ geringen Änderungen der Vorlandhöhe nur geringfügig in Höhe und Richtung bei erhöhten Wasserständen transformiert.

Tidewasserstände und Sturmflutwasserstände interagieren mit dem anstehenden Grundwasser im Deichuntergrund sowie bei erhöhten Wasserständen mit dem Wasser im Deichkern. Die Wasserstände vor dem Deich (bei Niedrigwasser, Normalwasserständen und Sturmflutwasserständen) sind daher im Rahmen geotechnischer Untersuchungen und Nachweise zur Standsicherheit und Gebrauchstauglichkeit relevant und erfordern eine genaue Kenntnis der bodenmechanischen Eigenschaften des anstehenden Bodens. Andererseits sind die Wasserstände zusammen mit dem Seegang vor dem Deich für die Wellenauflauf- und Wellenüberlaufbelastung des **Deichkörpers** von Bedeutung.

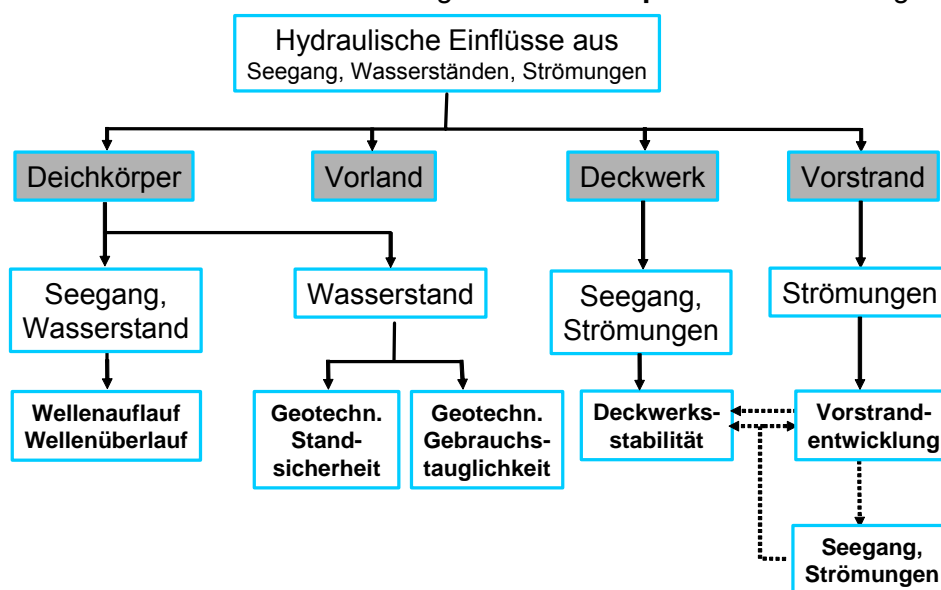


Abb. 5. Hydraulische Einflüsse auf den Deichkörper, das Deckwerk und den Vorstrand



Eine Fahrrinnenanpassung wirkt sich auf die hydraulischen Prozesse (Seegang, Wasserstand, Strömung) aus. Die ausbaubedingten Änderungen in den maßgebenden Kennwerten für diese hydraulischen Prozesse sind bei den verschiedenen Sicherheitsnachweisen zu berücksichtigen. Zusätzlich ist der Einfluss von Veränderungen des Vorstrandes (Erosion bzw. Aufsedimentation) auf die hydraulischen Prozesse zu beachten.

b) Wirkung schiffserzeugter Belastungen auf die Deichsicherheit

Die Wirkungszusammenhänge zwischen Schiffswelldynamik und Deich wurden im BAW-Gutachten „Untersuchung der Deichsicherheit am Beispiel des Altenbrucher Bogens unter besonderer Berücksichtigung schiffserzeugter Belastungen“ (BAW, 2006a) aufgezeigt.

Schiffswellen treffen zuerst auf den **Vorstrand** und werden hier durch die bekannten Flachwassereffekte (Refraktion, Shoaling, Wellenbrechen) transformiert. Auf dem Vorstrand leisten schiffswelleninduzierte Strömungen einen Beitrag zur Vorstranderosion, die sich wiederum auf die Flachwassereffekte und damit auf die Wellenparameter am Deckwerk und am Deichfuß auswirkt.

Anschließend treffen die Schiffswellen – wie auch die Windwellen, die den gleichen physikalischen Transformationsprozessen unterliegen – auf das **Deckwerk** und beeinflussen die Deckwerksstabilität. Der Widerstand des Deckwerks hängt im wesentlichen von den Abmessungen (z.B. Deckwerksneigung) und vom Aufbau des Deckwerks (Steingrößen und –dichte, Schichtenaufbau, Verklammerung, etc.) ab.

Bei Wasserständen unterhalb der Kronenhöhe des Deckwerkes erreichen die Schiffswellen das **Vorland** nicht.

Schiffs- und Windwellen breiten sich nach ihrem Auftreffen auf das Deckwerk als Porenwasserdruckänderungen im Deichuntergrund bis zum **Deichkörper** aus. Zu unterscheiden ist in diesem Zusammenhang die Wirkung von Schiffswellen auf Porenwasserdruckänderungen im Deichuntergrund von der Übertragung schiffsinduzierter Schwingungen und deren Folgen für die Deichstandsicherheit und die Verformung des Deiches.

Grundlage für die Beurteilung der Ausbreitung schiffsinduzierter Porenwasserdruckänderungen und Schwingungen im Deich und im Deichuntergrund und deren Wirkung auf Deichstandsicherheit und – gebrauchstauglichkeit ist eine genaue Kenntnis des anstehenden Bodens.

Veranlassung einer Fahrrinnenanpassung sind Änderungen in den Schiffsabmessungen, insbesondere im Schiffstiefgang aber auch in der Schiffsbreite, der Schiffslänge, der Schiffsform und ggf. der Schiffsgeschwindigkeit. Diese Änderungen führen zu

ausbaubedingten Änderungen der Schiffswellendynamik (Absunk, Primärwelle, Sekundärwelle, Rückströmung, etc.) und damit zu ausbaubedingten Änderungen der Schiffswellenbelastung des Deiches. Hieraus ergibt sich der Untersuchungsbedarf entsprechend der schiffserzeugten Einflüsse auf den Deichkörper, das Deckwerk und den Vorstrand.

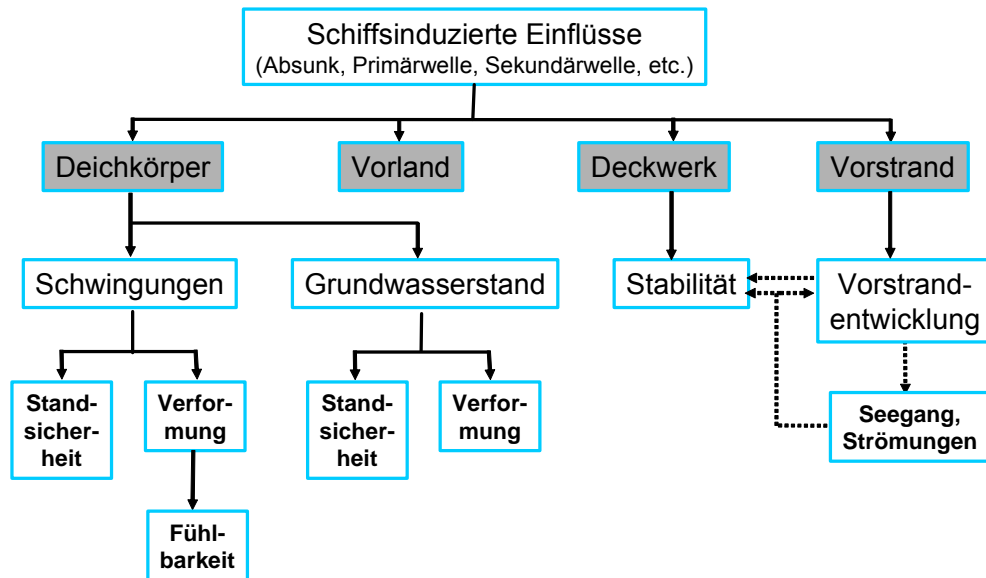


Abb. 6. Schiffsinduzierte Einflüsse auf den Deichkörper, das Deckwerk und den Vorstrand

5 Wirkung ausbaubedingter Änderungen hydraulischer und schiffserzeugter Belastungen auf die Deichsicherheit

5.1 Zusammenstellung der ausbaubedingten Änderungen hydraulischer und schiffserzeugter Belastungen

Im Folgenden sollen die Ergebnisse zu den ausbaubedingten Änderungen hydraulischer und schiffserzeugter Belastungen für den Bereich Altenbruch zusammengefasst werden. Die Ergebnisse wurden den BAW-Gutachten zur Fahrrinnenanpassung der Unter- und Außenelbe an die Containerschiffahrt (BAW, 2006 b bis e) entnommen. Eine Beschreibung der jeweiligen untersuchten Untersuchungsvarianten und Untersuchungsrandbedingungen wird an dieser Stelle nicht vorgenommen und findet sich in den jeweiligen BAW-Gutachten.

a) Tidedynamik

Ausbaubedingte Änderungen der Tidedynamik für den Bereich Altenbruch können dem BAW-Gutachten „Fahrrinnenanpassung von Unter- und Außenelbe – Gutachten zur ausbaubedingten Änderung von Hydrodynamik und Salztransport“ (BAW, 2006d) entnommen werden. Auf der Grundlage einer Tidemodellierung mit Untrim 3D ergaben

sich die folgenden ausbaubedingten Änderungen der Wasserstandskenngrößen im Bereich Altenbruch:

- Tidehochwasser $\Delta(\text{Thw})$: Abnahme max. -0,02 m
- Tideniedrigwasser $\Delta(\text{Tnw})$: Abnahme max. -0,05 m
- Tidehub: $\Delta(\text{Thb}) < \pm 0,04$ m
- Tidemittelwasser: $\Delta(\text{Tmw}) < \pm 0,02$ m
- Ebbedauer: $\Delta(\text{Ebbedauer}) < \pm 5$ min
- Flutdauer: $\Delta(\text{Flutdauer}) < \pm 5$ min
- Überflutungsdauer: $\Delta(\text{Überflutungsdauer}) < \pm 5$ min

Für die Strömungskenngrößen konnten die folgenden maximalen Werte ermittelt werden:

(a) westlich (stromab) Glameyer Stack

- Flutstromgeschwindigkeit: $\Delta(v_f) < + 0,125$ m/s (Zunahme)
- Ebbestromgeschwindigkeit: $\Delta(v_e) < + 0,075$ m/s (Zunahme)

(b) östlich (stromauf) Glameyer Stack

- Flutstromgeschwindigkeit: $\Delta(v_f) < + 0,075$ m/s (Zunahme)
- Ebbestromgeschwindigkeit: $\Delta(v_f) < + 0,125$ m/s (Zunahme)

b) Sturmflutdynamik

Ausbaubedingte Änderungen der Sturmflutdynamik für den Bereich Altenbruch können dem BAW-Gutachten „Anpassung der Fahrrinne von Unter- und Außenelbe an die Containerschiffahrt – Ausbaubedingte Änderungen der Sturmflutkenngrößen“ (BAW, 2006c) entnommen werden. Auf der Grundlage einer Sturmflutmodellierung mit Untrim 2D/3D ergaben sich die folgenden ausbaubedingten Änderungen der Sturmflutkenngrößen im Bereich Altenbruch für alle untersuchten Sturmflutszenarien und Oberwasserzuflüsse:

- Scheitelwasserstände: $\Delta(\text{Hochwasserstand HW})$ Abnahme max. -0,02 m
- Eintrittszeit des Sturmflutscheitelwasserstandes: $\Delta(\text{Hochwasserzeit}) < \pm 5$ min
- Hochwasserdauer: $\Delta(\text{Hochwasserdauer}) < \pm 5$ min
- Max. Flutstromgeschwindigkeit: $\Delta(\text{max. Flutstromgeschwin.}) < \pm 10$ cm/s
- Mit. Flutstromgeschwindigkeit: $\Delta(\text{mit. Flutstromgeschwin.}) < \pm 10$ cm/s
- Max. Ebbestromgeschwindigkeit: $\Delta(\text{max. Ebbestromgeschwin.}) < \pm 10$ cm/s
- Mit. Ebbestromgeschwindigkeit: $\Delta(\text{mit. Ebbestromgeschwin.}) < \pm 10$ cm/s

Betrachtet wurden hier die querschnittsintegrierten Strömungsgeschwindigkeiten.

Das BAW-Gutachten „Anpassung der Fahrrinne von Unter- und Außenelbe an die Containerschiffahrt – Ausbaubedingte Änderungen der Sturmflutkenngrößen“ kommt zu dem Schluss, dass die geplante Fahrrinnenanpassung von Unter- und Außenelbe das Hochwasserschutzniveau bei extremen Sturmfluten und hohen Oberwasserzuflüssen



nicht verändert und dass die geplante Fahrrinnenanpassung daher als hochwasserneutral bewertet werden kann.

c) Morphodynamik

Die Ermittlung ausbaubedingter Änderungen der Morphodynamik sowie der Feststoff-Transportprozesse im Untersuchungsgebiet wurde unter Verwendung 2D und 3D hydrodynamischer, morphodynamischer Modelle (HMN-Modelle) durchgeführt. Zusätzlich zu den Berechnungen für einen Nipp-Spring-Zyklus wurden auch morphologische Langzeitsimulationen berücksichtigt. Auf dieser Grundlage wurden im BAW-Gutachten „Fahrrinnenanpassung von Unter- und Außenelbe an die Containerschifffahrt – Gutachten zur ausbaubedingten Änderung der morphodynamischen Prozesse“ (BAW, 2006e) die folgenden Aussagen für die morphologische Entwicklung des Altenbrucher Bogens durch prozessorientierte Analysen für morphologische Einheiten hergeleitet.

Aufgrund der Zunahme der maximalen Ebbeströmungen und der damit verbundenen Zunahme des Geschiebetransports für den ca. 2km langen Abschnitt direkt oberhalb von Glameyer Stack muss davon ausgegangen werden, dass die überwiegenden Sedimentationen, die sich nach dem jüngsten Ausbau in diesem Abschnitt südlich der Fahrrinne eingestellt haben, nach einem weiteren Ausbau nicht mehr auftreten. Für die Fahrrinne selber wird aufgrund der Strömungszunahme eine Aufweitung in Tiefe und Breite im Bereich oberhalb von Glameyer Stack erfolgen.

Für den Bereich zwischen Fahrrinne und Ufer unterhalb von Glameyer Stack (d.h. seewärts) werden im BAW-Gutachten keine ausbaubedingten Änderungen der Morphologie prognostiziert.

d) Seegang

Seeganguntersuchungen wurden unter Verwendung eines spektralen Seegangmodells mit nichtlinearer Dissipation (K-Modell) für verschiedene Seegangsrandbedingungen und Windszenarien durchgeführt. Die Analyseergebnisse am Fahrrinnenrand für den Bereich des Altenbrucher Bogens sind in Tab. 1 zusammengestellt. Für Normalwasserstände ergeben sich maximale lokale ausbaubedingte Änderungen der maximalen signifikanten Wellenhöhe H_S von 7 %, für Sturmflutwasserstände von 1,5 %. Die ausbaubedingte Änderung der Peakperiode T_P für die untersuchten Sturmflutverhältnisse beträgt lokal maximal 0,1 s.

Die detaillierten Seeganguntersuchungen sind in der Anlage 3 zum BAW-Gutachten „Fahrrinnenanpassung von Unter- und Außenelbe an die Containerschifffahrt – Gutachten zur ausbaubedingten Änderung der morphodynamischen Prozesse“ beschrieben.

Tab. 1. Ausbaubedingte Änderungen des Seegangs im Altenbrucher Bogen

Szenario	Analysezeitraum	Windgeschwindigkeit [m/s]	Windrichtung	Wellenhöhe $H_{S,max}$ [m]	$\Delta H_{S,max}$ [m]	$\Delta H_{S,max}$ [%]
1	14.5.2002 06:00 bis 16.5.2002 00:00	3 bis 16	West bis Südwest	0,7÷0,8	0,03 ÷ 0,05	4 ÷ 7
2	20.5.2002 12:00 bis 23.5.2002 00:00	4 bis 14	Ost bis Südost	0,4÷0,5	< 0,01	< 2,5
3	27.1.1994 00:00 bis 29.1.1994 00:00	10 bis 23	West bis Nordwest	2,0÷2,20	0,01÷0,03	<1,5

e) Schiffrerzeugte Belastungen

Ausbaubedingte Änderungen der schiffrerzeugten Belastungen für den Bereich Altenbruch können dem BAW-Gutachten „Anpassung der Fahrrinne von Unter- und Außenelbe an die Containerschifffahrt – Ausbaubedingte Änderungen der schiffrerzeugten Belastungen“ (BAW, 2006b) entnommen werden. Für die aufkommenden, tideunabhängig verkehrenden großen Containerschiffe, die die maximale Belastung in der Fahrrinne bewirken, wird sich trotz Fahrrinnenvertiefung vor Altenbruch im Vergleich zum Ist-Zustand (PPM43, $t = 12,8$ m, T_{nw}) das Teilquerschnittsverhältnis zum Südufer hin um etwa $\Delta n_T \approx -2$ bis -3 auf $n_T \approx 18$ bis 23 reduzieren (PPM46, $t = 13,8$ m, T_{nw}), wobei bei Einhalten der Bemessungsgeschwindigkeit von $v_S = 12$ kn (tideunabhängig) an der südlichen Fahrrinnenkante eine schiffrerzeugte Belastungserhöhung von $\Delta z_A \approx \Delta H_P < +0,1$ m bzw. $\Delta v_R < +0,1$ m/s erwartet wird (mit: z_A = Absunkhöhe, H_P = Primärwellenhöhe, v_R = Rückstromgeschwindigkeit). Im Vergleich zum PM32 wird die schiffrerzeugte Belastung an der südlichen Fahrrinnenkante mit $\Delta z_A \approx \Delta H_P \leq +0,1$ m bzw. $\Delta v_R \approx +0,15$ m/s ($\Delta n_T \approx -8$ bis -10 ; ca. -29 bis -31 %) zunehmen. Werden die Belastungsänderungen an den Fahrrinnenkanten auf der sichern Seite liegend auf das südliche Ufer übertragen, wird es zu Änderungen der Deckwerks- und Deichfußbelastungen kommen, wobei die Größenordnung wesentlich durch die Schiffsgeschwindigkeit und den Passierabstand bestimmt wird. Nur eine Geschwindigkeitsreduzierung kann eine annähernd gleich bleibende Belastung der Unterwasserböschungen, des Unterwasserstrandes sowie der Deckwerke gewährleisten.

Für die Beurteilung der Deichsicherheit werden die maximalen ausbaubedingten Änderungen berücksichtigt, die Wirkung einer Änderung der Bemessungsgeschwindigkeit wird nicht weiter betrachtet.

Für kurzperiodische Sekundärwellen ist in Abhängigkeit der Schiffsgeschwindigkeit ($v_S > 14$ kn) und den Änderungen der langperiodischen Belastung (z.B.: $\Delta z_A \approx +0,2$ m) maximal von ausbaubedingten Änderungen von $\Delta H_S \approx +0,1$ m auszugehen.

5.2 Ausbaubedingte Änderungen der Deichsicherheit

5.2.1 Deckwerksstabilität

Für die Deckwerksstabilität im Bereich des Altenbrucher Bogens sind die kurzperiodische Sekundärwellenbelastung infolge Schiffswellen sowie die Seegangsbelastung von Bedeutung. Auf der Grundlage von Messungen in der Natur wurden im BAW-Gutachten (2006a) die maßgebenden Wellenhöhen und erforderlichen Schüttsteindurchmesser $D_{n,50,erf}$ ermittelt, die in Tab. 2 zusammengestellt sind.

Tab. 2. Maßgebende Wellenhöhe und erforderlicher Schüttsteindurchmesser $D_{n,50,erf}$ in Abhängigkeit des Wiederkehrintervalls T_R für den Ist-Zustand

Wiederkehrintervall T_R [Jahren]	Windwellen		Sekundärwellen	
	H_S [m]	$D_{n,50,erf}$ [m]	H_{Sek} [m]	$D_{n,50,erf}$ [m]
1	0,84	0,211	1,37	0,168
5	0,95	0,231	1,45	0,175
Gemessenes Maximalereignis	1,02	0,244	1,43	0,173

Im Rahmen von Seegangsuntersuchungen wurden maximale ausbaubedingte Änderungen der signifikanten Wellenhöhe H_S von 7% ermittelt. Im BAW-Gutachten „Weitere Fahrrinnenanpassung der Unter- und Außenelbe – Ausbaubedingte Änderungen der schiffserzeugten Belastungen“ (BAW, 2006b) wird die ausbaubedingte Änderung der Sekundärwellenhöhe am Fahrrinnenrand mit $\Delta H_{Sek} \approx +0,1$ m angegeben. Die ausbaubedingten Änderungen des erforderlichen Schüttsteindurchmessers $D_{n,50,erf}$ werden durch Addition von $\Delta H_{Sek} \approx +0,1$ m zu den maßgebenden Sekundärwellenhöhen in Tab. 2 und Neuberechnung des erforderlichen Schüttsteindurchmessers ermittelt. Für windinduzierten Seegang wird eine Zunahme der signifikanten Wellenhöhe von 7% berücksichtigt. Es wird davon ausgegangen, dass keine Wellentransformation zwischen Fahrrinnenrand und der Messposition LZ3 (s. BAW, 2006a) stattfindet, an der die Wellenmessungen zur Ermittlung von Eingangsparametern für die Berechnung der Deckwerksstabilität vom Ingenieurbüro Fittschen (Fittschen, 2006) durchgeführt wurden. Eine Wellentransformation zwischen Messposition LZ3 und Deckwerksfuß wird berücksichtigt. Die Berechnungen des erforderlichen Schüttsteindurchmessers werden entsprechend den Ausführungen im BAW-Gutachten (BAW, 2006a) durchgeführt. Auf dieser

Grundlage konnten die erforderlichen Schüttsteingewichte in Tab. 3 ermittelt werden. Die ausbaubedingte Änderung des erforderlichen Schüttsteindurchmesser beträgt $\Delta D_{n50,erf} \approx 1 \text{ cm}$.

Tab. 3. Maßgebende Wellenhöhe und erforderlicher Schüttsteindurchmesser $D_{n50,erf}$ in Abhängigkeit des Wiederkehrintervalls T_R für den Ausbauzustand

Wiederkehrintervall T_R [Jahren]	Windwellen		Sekundärwellen	
	H_s [m]	$D_{n50,erf}$ [m]	H_{Sek} [m]	$D_{n50,erf}$ [m]
1	0,90	0,222	1,47	0,176
5	1,02	0,244	1,55	0,184
Gemessenes Maximalereignis	1,09	0,256	1,53	0,182

Die vorhandenen Schüttsteine der Klasse II haben einen Schüttsteindurchmesser $D_{n,50,vorh} = 0,162 \text{ m}$ und die Schüttsteine der Klasse III einen Schüttsteindurchmesser $D_{n,50,vorh} = 0,292 \text{ m}$. Dies bedeutet, dass die Deckwerksstabilität wie auch für den Ist-Zustand für Schüttsteine der Klasse II nicht gewährleistet ist, während Schüttsteine der Klasse III einen ausreichenden Widerstand gegen Schiffswellenbelastung besitzen (Hinweis: Der Überlagerungsfall Windwellen und Schiffswellen wird hier nicht untersucht.). Eine Ermittlung der Versagenswahrscheinlichkeit auf probabilistischer Grundlage findet hier nicht statt, da in der Schiffswellenstatistik für die Position LZ3 (BAW, 2006a) alle im Messzeitraum passierenden Schiffe enthalten sind und eine Erhöhung des gesamten Datenkollektivs um $\Delta H_{Sek} \approx +0,1 \text{ m}$ für Schiffswellen alle Schiffe betreffen würde und damit unrealistische Ergebnisse geben würde.

5.3 Geotechnische Deichstandsicherheit und –gebrauchstauglichkeit

5.3.1 Schiffserzeugte Schwingungen des Deichkörpers

Im Rahmen von Naturmessungen im Bereich Altenbruch (BAW, 2006a) wurden die größten schiffserzeugten Schwingungen zu $v_{Rmax} \leq 0,0471 \text{ mm/s}$ ermittelt (im Mittel: $v_{Rmittel} \leq 0,0189 \text{ mm/s}$). Das Größtereignis wurde in einem Zeitraum registriert, als die am Messort passierende Schifffahrt angewiesen war, mit der größtmöglichen Geschwindigkeit zu fahren. Kornumlagerungen im Deichkörper finden bei Schwingungen des gesamten Deiches von rd. $1,5 \text{ mm/s}$ statt. Insofern ist die Sicherheit bis zum Erreichen der kritischen Schwinggeschwindigkeit sehr groß.

Durch ausbaubedingte Änderungen können z.B. durch höhere Schiffsgeschwindigkeiten marginal größere Schwingungen als im Ist-Zustand erwartet werden, die jedoch weit unterhalb der kritischen Schwinggeschwindigkeit liegen werden. Insofern haben

ausbaubedingte Änderungen schiffserzeugter Schwingungen im Deichkörper **keine** Wirkung auf die Deichstandsicherheit und –gebrauchstauglichkeit.

5.3.2 Schiffserzeugte Porenwasserdruckschwankungen im Deichkörper und im Deichuntergrund

Die ausbaubedingten Änderungen führen zu schiffserzeugten Belastungserhöhungen von $\Delta z_A \approx \Delta H_P \leq +0,1$ m. Die Ausbreitung von Schiffswellen im Untergrund wurde im BAW-Gutachten (BAW, 2006a) auf der Grundlage von Naturmessungen beschrieben. Bei deren Auswertung für die Deichstandsicherheit und –gebrauchstauglichkeit wurden – auf der sicheren Seite liegend - die aus unterschiedlichen Schiffseignissen resultierenden Größtereignisse den jeweiligen Porenwasserdruckaufnehmern zugeordnet. Hierbei ergab sich, dass der Absenk - durch den anstehenden Boden - vom freien Elbwasser bis in den oberen Grundwasserleiter unterhalb der Deichachse mindestens um das 26-fache, die Primärwelle mindestens um das 40-fache, gedämpft wird. Eine ausbaubedingte Erhöhung des Absenks bzw. der Primärwellenhöhe um 10 cm resultiert entsprechend in zusätzlichen Porenwasserdruckschwankungen im oberen Grundwasserleiter unterhalb des Deichkörpers von maximal 0,4 cm für den Absenk bzw. 0,25 cm für die Primärwellenhöhe.

In der numerischen Simulation der schiffserzeugten Porenwasserdruckschwankungen wurden - wiederum auf der sicheren Seite liegend - die charakteristischen Porenwasserdruckänderungen im Deichuntergrund zeitgleich simuliert (BAW, 2006a). Als Ergebnis wurde gezeigt, dass die schiffserzeugten Porenwasserdruckschwankungen keinen Einfluss auf die Deichstandsicherheit und –gebrauchstauglichkeit haben. Da die ausbaubedingten zusätzlichen schiffsinduzierten Porenwasserdruckschwankungen gegenüber den bisherigen Porenwasserdruckschwankungen marginal sind, ist **kein** Einfluss des Ausbaus auf die Deichstandsicherheit und –gebrauchstauglichkeit zu erwarten.

Für die tideabhängigen Wasserstände in der Elbe ergeben sich ausbaubedingt geringfügig niedrigere Tidehochwasserstände ($\Delta Thw < -0,02$ m) und Tideniedrigwasserstände ($\Delta Tnw < -0,05$ m) als im Ist-Zustand, der Tidehub ($\Delta(Thb) < \pm 0,04$ m) bleibt ebenfalls nahezu unverändert. Diese Änderungen haben **keinen** Einfluss auf die geotechnische Deichstandsicherheit und –gebrauchstauglichkeit, insbesondere weil im Deichuntergrund die tidebedingten Porenwasserdruckschwankungen durch den anstehenden Boden gedämpft werden.

5.3.3 Geotechnische Standsicherheit bei Niedrigwasser

Ergänzend zu der Simulation im BAW-Gutachten (BAW, 2006a), in dem der größte messtechnisch erfasste Tidehub in der Elbe für die Standsicherheitsuntersuchung des Deiches verwendet wurde (mit $Tnw = NN -1,53$ m) und den entsprechenden korrespondierenden Grundwasserständen im Deichuntergrund, wird nun das



NNTnw = NN -3,90 m als Niedrigwasserlastfall simuliert (IMS, 2004). Die Grundwasserstände im oberen Grundwasserleiter werden für den Fall des NNTnw in Anlehnung an die erfassten Porenwasserdruckabhängigkeiten im BAW-Gutachten (BAW, 2006a) mit NN -1,9 m unterhalb des Deichkörpers und NN -2,4 m am Deichfuß sowie im Vorland angenommen. Bei der Simulation ohne Dränage herrscht im Deichkern ein Wasseraufstau bis NN +3,20 m.

Der Deich ist im Ist-Zustand für den Niedrigwasserlastfall mit einer Sicherheit von $\eta = 3,0$ standsicher. Die sich in der Simulation entwickelnde Scherfuge ist durch einen binnenseitigen Böschungsbruch gekennzeichnet, so dass folglich niedrige Grundwasserstände ($< \text{NN} \pm 0,0 \text{ m}$) keinen Einfluss auf die Standsicherheit des Deiches gegen Versagen haben. Diese Simulation bildet den Ist-Zustand und den Ausbauzustand ab. Eine homogene Kleidecke und eine ausreichend mächtige Deichabdeckung wurden in der Simulation angesetzt. Aufgrund der zusammengefassten Untersuchungen zum Zustand des Deiches im BAW-Gutachten (BAW, 2006a) ist jedoch davon auszugehen, dass die Deichstandsicherheit - aufgrund eines örtlich heterogenen Aufbaus der Kleidecke (zweischichtig, Sandeinschlüsse) sowie einer geringen Kleimächtigkeit - lokal geringer ist.

Die ausbaubedingten Änderungen resultieren in einem geringfügig niedrigerem Tideniedrigwasserstand ($\Delta(\text{Tnw}) < -0,05 \text{ m}$) in der Elbe als im Ist-Zustand. Durch den anstehenden Boden wird der Tideeinfluss gedämpft, so dass unterhalb des Deichkörpers mit einem marginal niedrigeren Grundwasserstand zu rechnen ist als für das derzeitige NNTnw. Die Änderungen haben aus den o.g. Gründen **keinen** Einfluss auf die Deichstandsicherheit und -gebrauchstauglichkeit.

5.3.4 Geotechnische Standsicherheit bei Sturmflutwasserständen

Die ausbaubedingten Änderungen führen im Bereich Altenbruch zu geringfügig niedrigeren Sturmflutwasserständen ($\Delta(\text{Hochwasserstand HW}) < -0,02 \text{ m}$), geringfügig geänderten Hochwasserdauern ($\Delta(\text{Hochwasserdauer}) < \pm 5 \text{ min}$) und Eintrittszeiten ($\Delta(\text{Hochwasserzeit}) < \pm 5 \text{ min}$).

In der numerischen Simulation wird daher unverändert die Bemessungsturmflut mit einem Wasserstand von NN +5,90 m im Modell angesetzt. Hierfür werden die Tidewasserstände vom 03.01.1976 bis zum Erreichen des Sturmflutwasserstandes nachgefahren. Der Sturmflutwasserstand vom 03.01.1976 wird dabei auf den Bemessungswasserstand erhöht. Die korrespondierenden Grundwasserstände in den Grundwasserleitern entwickeln sich in Abhängigkeit des Sturmflutwasserstandes frei.

Eine Simulation wurde ohne Deichdränage und mit natürlicher Aufsättigung des Deichkerns (bis etwa NN +3,4 m) durchgeführt. Dieses Szenario spiegelt den aktuellen Zustand des Deiches wieder, da eine Deichdränage fehlt und die Deichabdeckung durch lokale

Sandeinschlüsse und eine geringe Mächtigkeit eine Durchsickerung und somit eine Aufsättigung im Deichkern erlaubt. Eine weitere Simulation wurde mit Deichdrainage und einer dem Stand der Technik (EAK (2002)) entsprechenden Deichabdeckung durchgeführt.

Die Simulation ohne Deichdrainage und mit Aufsättigung des Deichkerns ergibt **keine** ausreichende Sicherheit gegen Versagen ($\eta = 1,1$). Diese Simulation bildet sowohl den Ist-Zustand als auch den Ausbauzustand ab. Es entsteht eine Scherfuge an der binnenseitigen Böschung zwischen dem Klei und dem Sandkern, die zu einem binnenseitigen Böschungsbruch führt (Abb. 7).

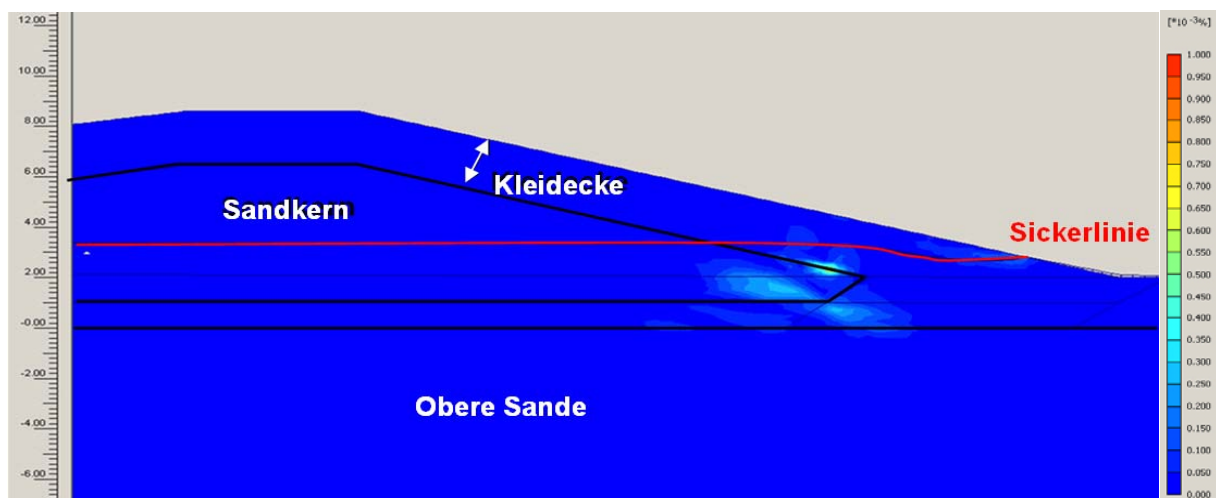


Abb. 7. Scherdehnungen im Deichkörper mit Aufsättigung und ohne Deichdrainage

Die Simulation mit Deichdrainage ergibt hingegen sowohl für den Ist-Zustand als auch für den Ausbauzustand eine Sicherheit gegen Versagen von $\eta = 2,7$. Hierbei ist jedoch zu berücksichtigen, dass in der numerischen Simulation eine homogene Deichabdeckung mit ausreichender Mächtigkeit angenommen wurde. Um die rechnerischen Sicherheiten gegen Versagen zu gewährleisten, ist folglich die Deichabdeckung gemäß der EAK (2002) zu ertüchtigen und eine Deichdrainage zwingend einzubauen.

5.4 Seegangbelastung im Sturmflutfall

Untersuchungen zur Sturmflutdynamik im numerischen Modell haben gezeigt (BAW, 2006c), dass die Sturmflutscheitelwasserstände im Altenbrucher Bogen tendenziell abnehmen:

$$\Delta(\text{Hochwasserstand HW}) < -0,02 \text{ m}$$

Der Sturmflutseegang im Bereich des Altenbrucher Bogens nimmt in der Größenordnung von 1,5 % für die signifikante Wellenhöhe H_S und 0,1 s für die Peakperiode T_P zu. Diese Ergebnisse werden auf die Untersuchungen zur Wellentransformation auf dem Vorstrand und auf dem Vorland unter Verwendung des spektralen Seegangsmodells SWAN (Version 40.41A) übertragen, um die ausbaubedingten Änderungen der Seegangbelastung am Deichfuß im Sturmflutfall entsprechend den Untersuchungen, dem beschriebenen Modell

und dem verwendeten Modellaufbau im BAW-Gutachten „Untersuchung der Deichsicherheit am Beispiel des Altenbrucher Bogens unter besonderer Berücksichtigung schiffserzeugter Belastungen“ (BAW, 2006a) zu ermitteln. Untersucht wird im Folgenden nur die Wirkung ausbaubedingter Änderungen der Seegangsbelastung im Sturmflutfall (Tab. 4). Eine Abnahme des Sturmflutscitelwasserstandes von 2,0 cm wird nicht berücksichtigt, um eine auf der sicheren Seite liegende Abschätzung der ausbaubedingten Änderungen der Seegangsparameter am Deichfuß zu geben. Wellenangriffsrichtung θ und Spreading σ werden unverändert gelassen. Auf die Berücksichtigung von Wind- und Strömungseffekten wurde aus Gründen der Kleinräumigkeit des Untersuchungsgebietes sowohl für den Ist-Zustand als auch für den Ausbau-Zustand verzichtet. Die Untersuchungen werden für den Untersuchungsquerschnitt an der Langzeitmessstation LZ3 durchgeführt (Abb. 8).

Tab. 4. Eingangparameter für die Detailuntersuchungen

	BWS (Ist-Zustand)	BWS (Ausbau-Zustand)
Wasserstand	5,9 mNN	5,9 mNN
Wellenhöhe H_S	2,05 m	2,08 m
Wellenperiode T_p	5,74 s	5,84 s
Wellenangriffsrichtung θ	326,3 °	326,3 °
Spreading s [-]	25,27	25,27
Windgeschwindigkeit U_{10} *)	keine	keine
Windrichtung θ_{10} *)	keine	keine
Strömung	keine	keine

*) Auf die Berücksichtigung von Wind- und Strömungseffekten wurde aus Gründen der Kleinräumigkeit des Untersuchungsquerschnitts verzichtet.

Es kann gezeigt werden, dass sich die ausbaubedingten Änderungen der Wellenhöhe H_S und der Wellenperiode T_p bis zum Deichfuß nahezu unverändert fortsetzen und somit mit einer Zunahme der Seegangsbelastung am Deichfuß von $\Delta H_S \approx 2$ cm und $\Delta T_p \approx 0,1$ s zu rechnen ist (Abb. 10). Die ausbaubedingten Änderungen der Wellenangriffsrichtung aufgrund der veränderten Wellenrefraktion betragen $\Delta\theta \approx 0,2^\circ$ (Abb. 9, Abb. 10).

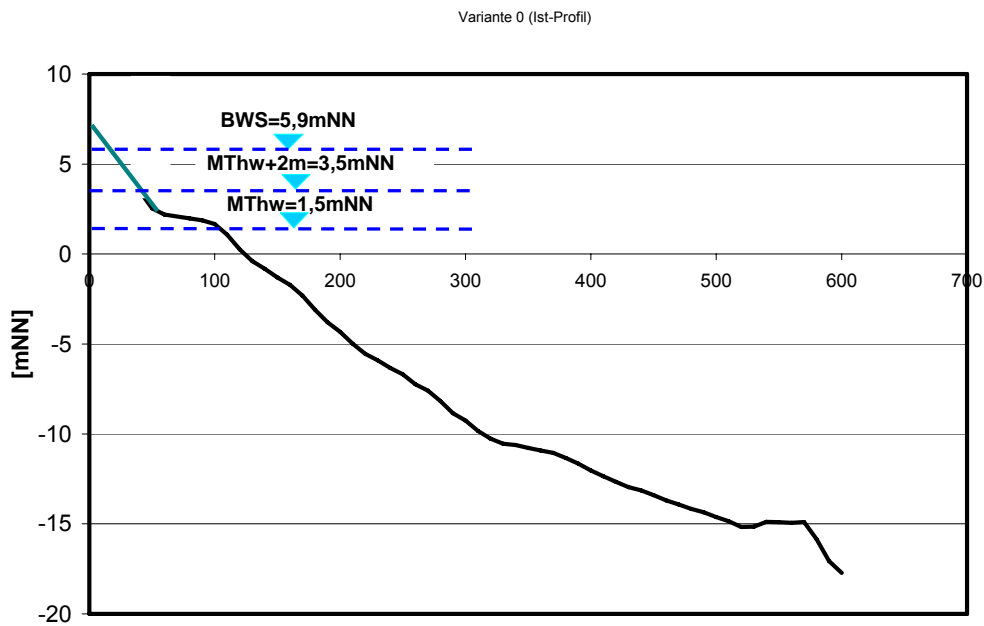


Abb. 8. Untersuchungsprofil (Querschnitt bei LZ3)

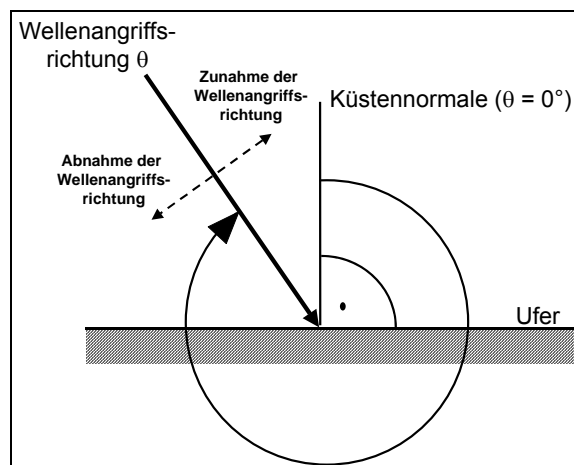


Abb. 9. Definition der Wellenangriffsrichtung

Eine Abschätzung der Wellenauflaufhöhe für den Deich im Untersuchungsquerschnitt unter Vernachlässigung des Einflusses der Wellenangriffsrichtung (Annahme: küstennormaler Wellenangriff) entsprechend den Empfehlungen für Küstenschutzwerke (EAK, 2002) führt zu den ausbaubedingten Änderungen der Wellenauflaufhöhe in Tab. 5.

$$z_{98} = 1,6 \cdot \sqrt{\frac{g}{2\pi}} \cdot \sqrt{H_S} \cdot T_p \cdot \tan \alpha$$

5.1

mit:

z_{98} = Wellenaufbauhöhe, die von 2% aller ankommenden Wellen überschritten wird

g = Erdbeschleunigung

H_S = signifikante Wellenhöhe

T_p = Peakperiode [s]

α = Winkel der Deichaußenböschung [°]

Tab. 5. Ausbaubedingte Änderungen in der Wellenaufbauhöhe für den Bemessungswasserstand (Wellenparameter am Deichfuß)

	Ist-Zustand	Ausbau-Zustand	Δ (Ausbau-Ist)
H_S [m]	1,68	1,70	0,02
T_p [s]	5,74	5,84	0,10
$\tan \alpha$ [-]	1/6	1/6	0
z_{98} [m]	2,48	2,54	0,06

Die ausbaubedingten Änderungen der Wellenaufbauhöhe in Tab. 5 wurden auf der sicheren Seite liegend abgeschätzt, da

- maximale ausbaubedingte Änderungen von Wellenhöhe und Wellenperiode am gleichen Ort angesetzt wurden und
- ausbaubedingte Abnahmen des Sturmflutscheitelwasserstands nicht in der Detailmodellierung des Seegangs berücksichtigt wurden sowie
- der Einfluss der geplanten Fahrrinnenanpassung auf den Seegang mit zunehmendem Wasserstand abnimmt (Ausbaubedingte Änderungen des Seegangs wurden für die Sturmflut vom Januar 2006 prognostiziert und auf den Bemessungswasserstand übertragen)

Daher werden die ausbaubedingten Änderungen der Wellenaufbauhöhe nach einem Fahrrinnen Ausbau geringer als hier für das Untersuchungsprofil prognostiziert ausfallen.

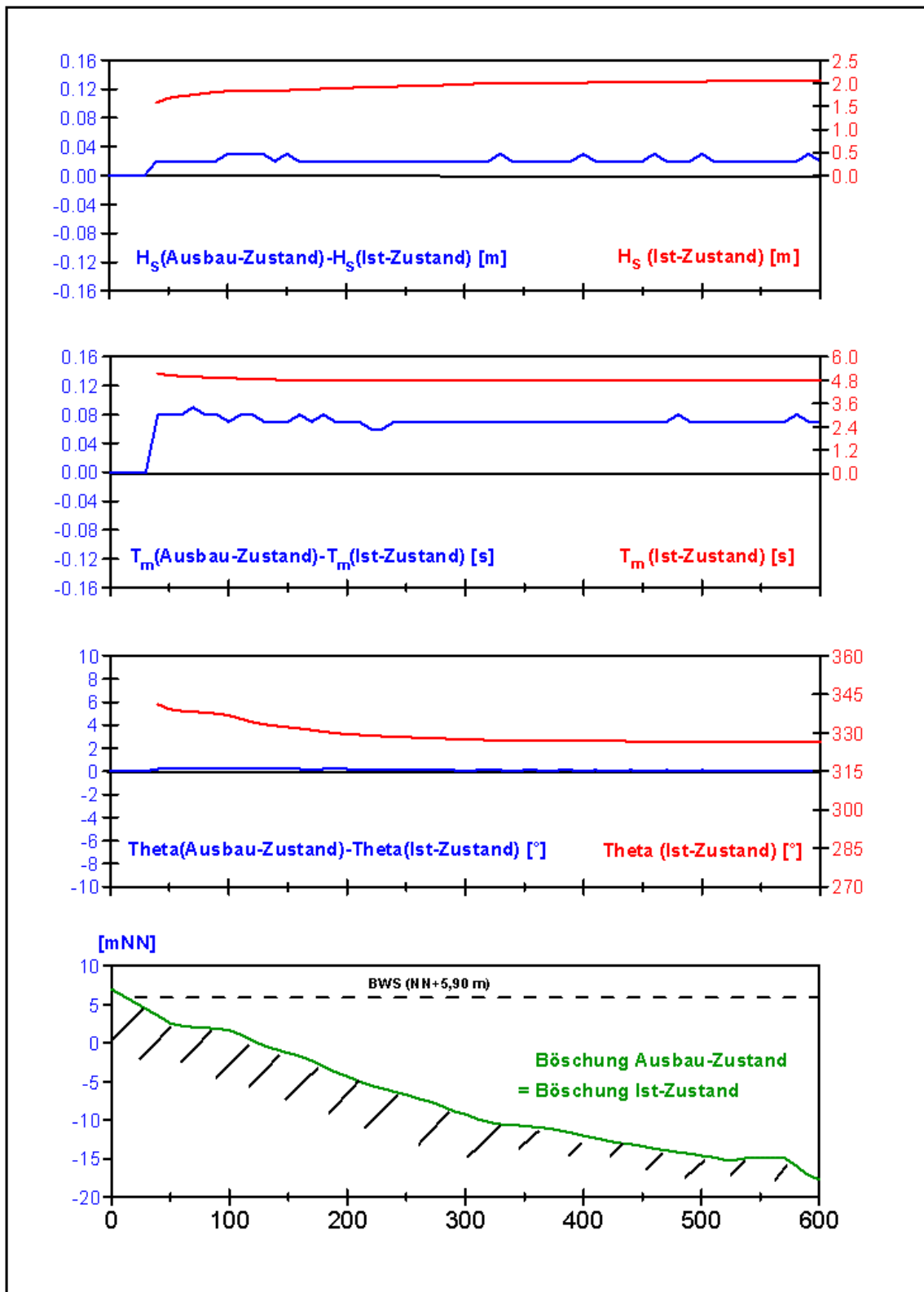


Abb. 10. Ausbaubedingte Änderungen der signifikanten Wellenhöhe H_s , der mittleren Wellenperiode T_m und der Wellenangriffsrichtung θ auf dem Vorstrand und dem Vorland

6 Schlussfolgerungen und Empfehlungen

Im Altenbrucher Bogen wurden in den vergangenen Jahren Deichsetzungen, Deckwerksschäden und Vorstranderosion festgestellt, die vom verantwortlichen Deich- und Uferverband teilweise auf eine Zunahme der schiffsinduzierten Belastungen zurückgeführt werden. Um die maßgebenden Wirkungszusammenhänge zwischen hydraulischen (Wasserstände, Strömungen, Seegang) und schiffsinduzierten Belastungen und dem Deich im Altenbrucher Bogen und der geplanten Fahrrinnenanpassung der Elbe zu klären, wurde die Bundesanstalt für Wasserbau – Dienststelle Hamburg – vom Projektbüro „Fahrrinnenanpassung von Unter- und Außenelbe“ beim Wasser- und Schifffahrtsamt Hamburg beauftragt, entsprechende Untersuchungen durchzuführen.

Dazu wurde von der Bundesanstalt für Wasserbau ein zweiphasiges Untersuchungskonzept aufgestellt. Im Rahmen der ersten Phase wurden die Wirkungszusammenhänge zwischen schiffserzeugten Belastungen und Deichsicherheit für den Ist-Zustand untersucht. Das BAW-Gutachten zur ersten Phase kommt zu folgendem Ergebnis:

Aufgrund der komplexen Wirkungszusammenhänge wird empfohlen, ein Gesamtkonzept zur Sanierung des Uferabschnitts aufzustellen, da sich z.B. durch das Vorspülen eines Verschleißkörpers sowohl Wirkungen auf die Wellenbelastung des Deckwerks als auch auf die Tidedynamik der Elbe ergeben.

Im Rahmen der zweiten Phase war die Wirkung der geplanten Fahrrinnenanpassung der Elbe auf die Deichsicherheit im Bereich Altenbruch zu untersuchen. Die Ergebnisse können wie folgt - unterteilt in die einzelnen Bereiche - zusammengefasst werden:

Vorstrand: Auf der Grundlage einer Seegangssimulation wurde gezeigt, dass sich ausbaubedingte Änderungen des Seegangs am Fahrrinnenrand bei Sturmflut bis zum Deichfuß fortsetzen.

Deckwerk: Auf der Grundlage von Stabilitätsuntersuchungen wurde gezeigt, dass sich ausbaubedingte Änderungen der Schiffswellen- und Windwellenbelastung nur geringfügig auf das erforderliche Schüttsteingewicht auswirken. Da der heutige Deckwerksaufbau bereichsweise nicht den Anforderungen nach dem Stand der Technik entspricht, werden in diesen Bereichen auch in Zukunft Schäden auftreten. Die Untersuchungen zeigen, dass das Deckwerk für heutige und ausbaubedingte Belastungen keine ausreichende Stabilität gegen Schüttsteinerosion bei Wind- oder Schiffswellenbelastung für Schüttsteine der Klasse II hat und dass bei einer Überlagerung von Schiffs- und Windwellen auch Schüttsteine der Klasse III keine ausreichende Lagestabilität besitzen.



Um die Wellenbelastung des Deckwerks zu reduzieren, wird empfohlen, z.B. durch das Vorspülen eines Verschleißkörpers auf die Wellenumformung (insbesondere das Wellenbrechen) einzuwirken. Weiterhin wird eine Ertüchtigung des Deckwerks entsprechend dem Stand der Technik empfohlen. Diese Deckwerksertüchtigung ist unabhängig von der geplanten Fahrrinnenanpassung durchzuführen.

Deichkörper: Die Untersuchungen der ausbaubedingten Änderungen der hydraulischen und schiffserzeugten Belastungen auf die geotechnische Deichstandsicherheit und –gebrauchstauglichkeit haben ergeben, dass gegenüber dem Ist-Zustand **keine** Beeinflussung zu erwarten ist.

In der numerischen Simulation zur geotechnischen Standsicherheit wurde eine homogene Kleidecke mit einer ausreichenden Mächtigkeit der Deichabdeckung angesetzt. Da in natura die Qualität der Deichabdeckung derzeit nicht dem Simulationsstand und dem Stand der Technik entspricht, d.h. die Mächtigkeit und die Qualität sind lokal geringer, ist für eine ausreichende Sicherheit des Deichkörpers – insbesondere im Sturmflutfall – die Deichabdeckung gemäß der EAK (2002) zu ertüchtigen und eine Deichdränage einzubauen.

Aufgrund lokaler ausbaubedingter Änderungen des Seegangs bei Sturmflut wurde eine Erhöhung der Wellenaufbauhöhe von einigen Zentimetern abgeschätzt. Aufgrund der auf der sicheren Seite liegenden Abschätzung der ausbaubedingten Änderungen der Wellenaufbauhöhe hat dies keine Auswirkungen auf das Deichbestick.

Bundesanstalt für Wasserbau
Hamburg, 17.07.2006

Im Auftrag

(Bearbeiter)

Dipl.-Ing. H. Rahlf

Dr.-Ing. H. Schüttrumpf

Dipl.-Ing. F. Eißfeldt

Dr.-Ing. M. Pohl



7 Schrifttum

- BAW (2006a) Untersuchung der Deichsicherheit am Beispiel des Altenbrucher Bogens unter besonderer Berücksichtigung schiffserzeugter Belastungen – Zusammenfassendes Gutachten. BAW-Gutachten
- BAW (2006b) Anpassung der Fahrrinne von Unter- und Außenelbe an die Containerschifffahrt – Ausbaubedingte Änderungen der schiffserzeugten Belastungen. BAW-Gutachten
- BAW (2006c) Anpassung der Fahrrinne von Unter- und Außenelbe an die Containerschifffahrt – Gutachten zu ausbaubedingten Änderungen der Sturmflutkenngößen. BAW-Gutachten
- BAW (2006d) Fahrrinnenanpassung von Unter- und Außenelbe – Gutachten zur ausbaubedingten Änderung von Hydrodynamik und Salztransport. BAW-Gutachten
- BAW (2006e) Fahrrinnenanpassung von Unter- und Außenelbe an die Containerschifffahrt – Gutachten zur ausbaubedingten Änderung der morphodynamischen Prozesse. BAW-Gutachten
- EAK (2002) Empfehlungen für Küstenschutzwerke. Die Küste Heft 65. Herausgeber: Kuratorium für Forschung im Küsteningenieurwesen
- Fittschen, T. (2006) Naturmessungen im Altenbrucher Bogen - Auswertungen schiffserzeugter Belastungen des Vorstrands und des Deichuntergrunds (Wellen, Strömungen, Trübungen und Porenwasserdrücke)
- IMS (2004) Gutachten zur Deichverformung im Bereich des Hadelner Deich- und Uferbauverbandes. Untersuchungen zur Standsicherheit im Bereich Altenbruch und Glameyer Stack. Bericht Nr. 9073-01 (Vorabzug). IMS-Ingenieurgesellschaft. Hamburg