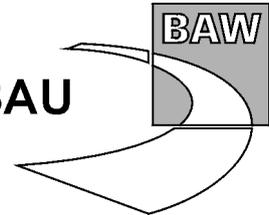




GUTACHTEN

**Wasserbauliche Systemanalysen
zur Vorhafengestaltung
der NOK-Schleusen Brunsbüttel
(Vorhafenerweiterung
für die 5. Schleusenkammer)**



**Wasserbauliche Systemanalysen zur
Vorhafengestaltung der NOK-Schleusen Brunsbüttel
(Vorhafenerweiterung für die 5. Schleusenkammer)**

Auftraggeber: Wasser- und Schifffahrtsamt
Alte Zentrale 4
25541 Brunsbüttel

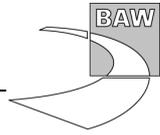
Auftrag vom: 06.12.2007, Az.: 2-231.2/1 PFS5510

Auftrags-Nr.: BAW-Nr. A 3955 02 10091

Aufgestellt von: Abteilung: Wasserbau im Küstenbereich
Referat: Ästuarsysteme I (K2)
Bearbeiter: Dr.-Ing. U. Vierfuß
Dipl.-Ing. (FH) H. Brand
Dipl.-Ing. (FH) S. Gärtner

Hamburg, im November 2008

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



Zusammenfassung

Der bauliche Zustand der Großen Schleusen in Brunsbüttel macht eine Grundinstandsetzung erforderlich. Um unter Beachtung der hohen Auslastung der Schleusenanlagen die erforderliche Schleusenkapazität während der Grundinstandsetzung der Großen Schleusen sicherzustellen, wird der Neubau einer zusätzlichen Schleusenkammer zwischen den vorhandenen Großen und Kleinen Schleusen angestrebt.

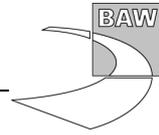
Im Rahmen des Neubaus ist der elbeseitige Ein- und Ausfahrtsbereich des Neuen Vorhafens einschließlich Lage und Form der Molen 2 und 3 neu zu gestalten. Das Wasser- und Schifffahrtsamt Brunsbüttel beauftragte deshalb die Bundesanstalt für Wasserbau, Dst. Hamburg, mit Schreiben vom 06.12.2007, unter den vorgegebenen Randbedingungen eine hinsichtlich der Unterhaltungsaufwendungen optimale Vorhafengestaltung und die ausbaubedingte Veränderung der Unterhaltungsbaggermengen zu ermitteln. Dazu waren die aus nautischer Sicht akzeptablen Varianten

- „Großer Versatz der Mole 3“ und
- „Lange Mole 2“

im Vergleich zum Ist-Zustand zu betrachten.

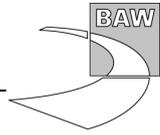
Im Rahmen des vorliegenden Gutachtens konnten die umfangreichen, bereits aus älteren Untersuchungen vorliegenden Ergebnisse für die neue Fragestellung genutzt und die verbleibenden Fragen mit einem sehr hoch aufgelösten 3D-HN-Modell beantwortet werden (Kantenlängen im Vorhafenbereich 2 bis 15 m):

- Die Baggermengen sind weitaus überwiegend von der Fläche und dem Volumen des Vorhafens abhängig, dessen Abmessungen wiederum durch den nautischen Flächenbedarf vorgegeben werden.
- In der Variante „Lange Mole 2“ ist im Neuen Vorhafen mit einem Anstieg der Baggermengen um 50 – 60% zu rechnen (Variante „Große Versetzung Mole 3“: 40 – 50%).
- Darin enthalten ist ein Anstieg der Baggermengen um 5 – 10 %, der durch den „Strömungseffekt“ verursacht wird. Nur dieser Teil ist durch eine Optimierung der Strömungsbedingungen beeinflussbar.
- Durch den Ausbau werden sich die Strömungsbedingungen im Vorhafen nicht grundsätzlich verändern. Daher kann analog zur BAW-Untersuchung von 1976 nur eine geringfügige Verbesserung durch eine Kürzung der Mittelmole und durch eine Verlegung der Mole 4 erreicht werden.



- Da Veränderungen an den Molen nur geringfügige Auswirkungen haben, besteht hinsichtlich der Neugestaltung des Mittelmolenbereichs ein entsprechender Gestaltungsspielraum (Abwägung nautischer, konstruktiver und wirtschaftlicher Gesichtspunkte).
- Auf der Binnenseite ist bei gleichbleibenden Schleusungszahlen mit keiner wesentlichen Veränderung der Baggermengen zu rechnen.

Wegen der starken Abhängigkeit der Baggermengen von der Größe des Außenvorhafens wird empfohlen, den tatsächlich genutzten nautischen Verkehrsflächenbedarf im Außenvorhafen durch langfristige Beobachtungen zu ermitteln und zu einem späteren Zeitpunkt erneut zu prüfen, ob es geeignete Bereiche für eine signifikante Reduzierung des Hafenvolumens und damit des Unterhaltungsumfangs gibt.



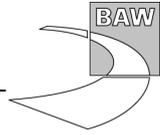
Inhaltsverzeichnis		Seite
1	Veranlassung und Aufgabenstellung	1
2	Arbeitsunterlagen und Daten	4
3	Bearbeitungskonzept	5
4	Bisherige Erkenntnisse über die physikalischen Prozesse	6
4.1	Strömung und Sedimentation im Neuen Vorhafen	6
4.2	Quantifizierung der einzelnen Effekte	9
4.3	Möglichkeiten zur Minimierung der Sedimentation	9
4.4	Anwendung der vorliegenden Erkenntnisse und Schlussfolgerungen	10
5	Modelluntersuchungen zur Beurteilung des Strömungseffekts	14
5.1	Untersuchungsmethode	14
5.2	Modellgebiet und Gitternetz	14
5.3	Modelltopographien	16
5.4	Modellsteuerung	17
5.5	Modellkalibrierung und -validierung	17
5.6	Ergebnisse der HN-Simulationen	18
6	Schlussfolgerungen	32
7	Literaturverzeichnis	34



Bildverzeichnis

Seite

Abb. 1:	Ausbauvariante 1: Erhalt der Mole 3 mit anschließender Aufweitung	2
Abb. 2:	Ausbauvariante 2: Kleiner Versatz der Mole 3	2
Abb. 3:	Ausbauvariante 3: Großer Versatz der Mole 3	3
Abb. 4:	Ausbauvariante 4: Lange Mole 2	3
Abb. 5:	Hauptursachen für die Sedimentation in tideoffenen Becken	7
Abb. 6:	Günstige Vorhafenvarianten (BAW, 1976)	9
Abb. 7:	Übersicht der Gebietsgrenzen des HN-Modells	15
Abb. 8:	HN-Modell im Bereich des Vorhafens und Ausschnittvergrößerung mit Berechnungsgitter	16
Abb. 9:	Simulationsergebnisse (Strömungsgeschwindigkeiten) für den Referenzzustand, Zeitpunkt: 1/3 Tidestieg	20
Abb. 10:	Simulationsergebnisse (Strömungsgeschwindigkeiten) für den Ausbauzustand „Lange Mole 2“, Zeitpunkt: 1/3 Tidestieg (vgl. Abb. 9)	21
Abb. 11:	Simulationsergebnisse (Strömungsgeschwindigkeiten) für den Referenzzustand, Zeitpunkt: 2/3 Tidestieg	22
Abb. 12:	Simulationsergebnisse (Strömungsgeschwindigkeiten) für den Ausbauzustand „Lange Mole 2“, Zeitpunkt: 2/3 Tidestieg (vgl. Abb. 11)	23
Abb. 13:	Simulationsergebnisse (Strömungsgeschwindigkeiten) für den Referenzzustand, Zeitpunkt: Tidehochwasser	24
Abb. 14:	Simulationsergebnisse (Strömungsgeschwindigkeiten) für den Ausbauzustand „Lange Mole 2“, Zeitpunkt: Tidehochwasser (vgl. Abb. 13)	25
Abb. 15:	Simulationsergebnisse (Strömungsgeschwindigkeiten) für den Referenzzustand, Zeitpunkt: 1/3 Tidefall	26
Abb. 16:	Simulationsergebnisse (Strömungsgeschwindigkeiten) für den Ausbauzustand „Lange Mole 2“, Zeitpunkt: 1/3 Tidefall (vgl. Abb. 15)	27
Abb. 17:	Simulationsergebnisse (Strömungsgeschwindigkeiten) für den Referenzzustand, Zeitpunkt: 2/3 Tidefall	28
Abb. 18:	Simulationsergebnisse (Strömungsgeschwindigkeiten) für den Ausbauzustand „Lange Mole 2“, Zeitpunkt: 2/3 Tidefall (vgl. Abb. 17)	29
Abb. 19:	Simulationsergebnisse (Strömungsgeschwindigkeiten) für den Referenzzustand, Zeitpunkt: Tideniedrigwasser	30
Abb. 20:	Simulationsergebnisse (Strömungsgeschwindigkeiten) für den Ausbauzustand „Lange Mole 2“, Zeitpunkt Tideniedrigwasser (vgl. Abb. 19)	31



1 Veranlassung und Aufgabenstellung

Der bauliche Zustand der Großen Schleusen in Brunsbüttel (Baujahr 1910-1914) macht eine Grundinstandsetzung erforderlich. Um unter Beachtung der hohen Auslastung der Schleusenanlagen die erforderliche Schleusenkapazität während der Grundinstandsetzung der Großen Schleusen sicherzustellen, wird der Neubau einer zusätzlichen Schleusenkammer zwischen den vorhandenen Großen und Kleinen Schleusen angestrebt (Erlass WS 12/52.06.1-NOK 00 vom 20.03.2007 des Bundesministeriums für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung).

Da der Neubau im Bereich der vorhandenen Schleuseninsel geplant wird, ist der elbeseitige Ein- und Ausfahrtsbereich des Neuen Vorhafens einschließlich Lage und Form der Molen 2 und 3 neu zu gestalten. Das Wasser- und Schifffahrtsamt Brunsbüttel (WSA) beauftragte deshalb die Bundesanstalt für Wasserbau, Dst. Hamburg, mit Schreiben vom 06.12.2007, unter den vorgegebenen Randbedingungen mit Hilfe wasserbaulicher Systemuntersuchungen eine hinsichtlich der Unterhaltungsaufwendungen optimale Vorhafengestaltung zu ermitteln.

Insgesamt wurden vom WSA Brunsbüttel vier mögliche Ausbauvarianten aufgestellt:

- Ausbauvariante 1: Erhalt der Mole 3 mit anschließender Aufweitung (Abb. 1)
- Ausbauvariante 2: Kleiner Versatz der Mole 3 (Abb. 2)
- Ausbauvariante 3: Großer Versatz der Mole 3 (Abb. 3)
- Ausbauvariante 4: Lange Mole 2 (Abb. 4)

Um bei der Optimierung der Vorhafengestaltung auch die nautischen Belange zu berücksichtigen, hat das WSA Brunsbüttel frühzeitig Untersuchungen im Schiffsführungssimulator der Hochschule Bremen durchführen lassen. Die dazu benötigten Strömungsdaten wurden in einem zweidimensionalen Modell der BAW ermittelt und für die nautischen Simulationen zur Verfügung gestellt (BAW, 2008). Auf Grund der Ergebnisse der nautischen Simulationen wurden die Ausbauvarianten 1 und 2 ausgeschlossen und die Variante 4 entwickelt.

Im Rahmen der vorliegenden wasserbaulichen Untersuchungen wurden daher die Varianten 3 und 4 auf der Grundlage des vorliegenden Schrifttums und mit Hilfe einer dreidimensionalen numerischen Modellierung analysiert und bewertet. Die folgenden Fragen waren zu beantworten:

- Wie wird die Unterhaltungssituation durch den Ausbau verändert?
- Welche Optimierungsmöglichkeiten können ggf. genutzt werden?

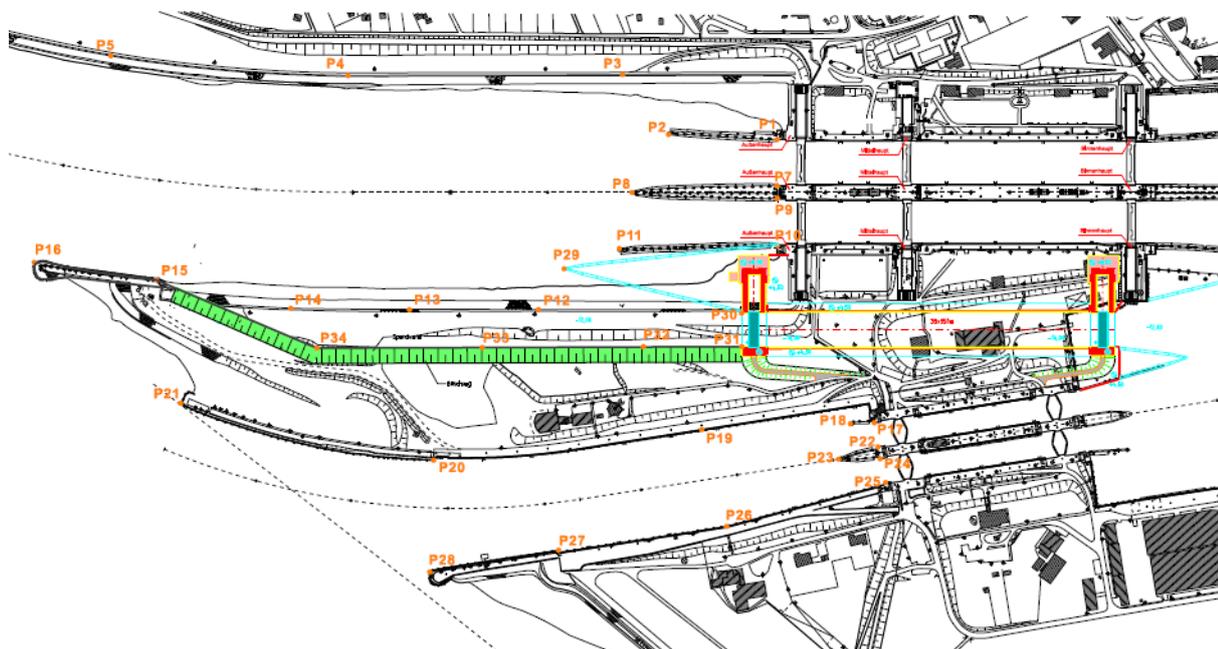


Abb. 1: Ausbauvariante 1: Erhalt der Mole 3 mit anschließender Aufweitung

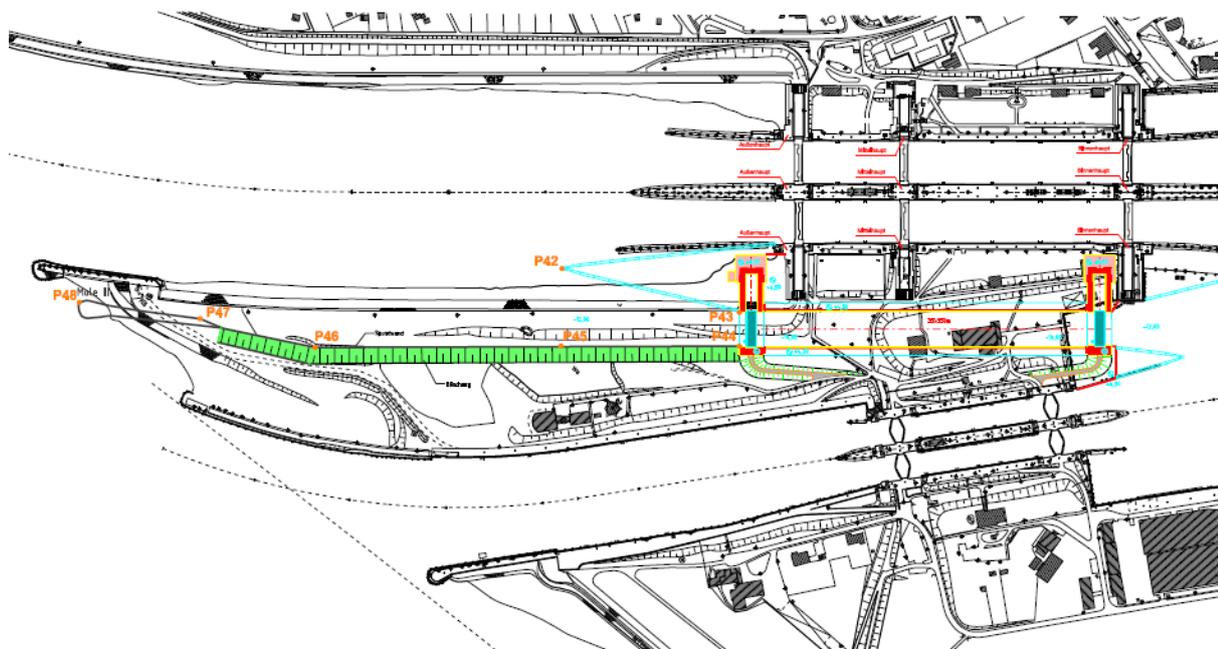


Abb. 2: Ausbauvariante 2: Kleiner Versatz der Mole 3

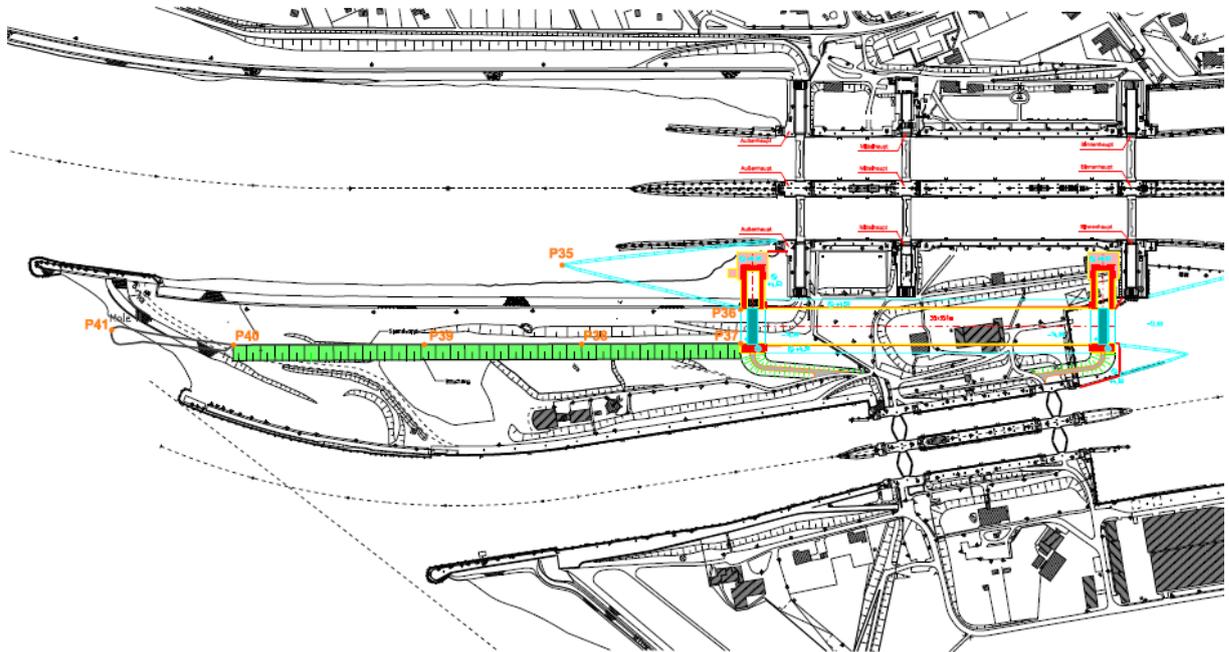


Abb. 3: Ausbauvariante 3: Großer Versatz der Mole 3

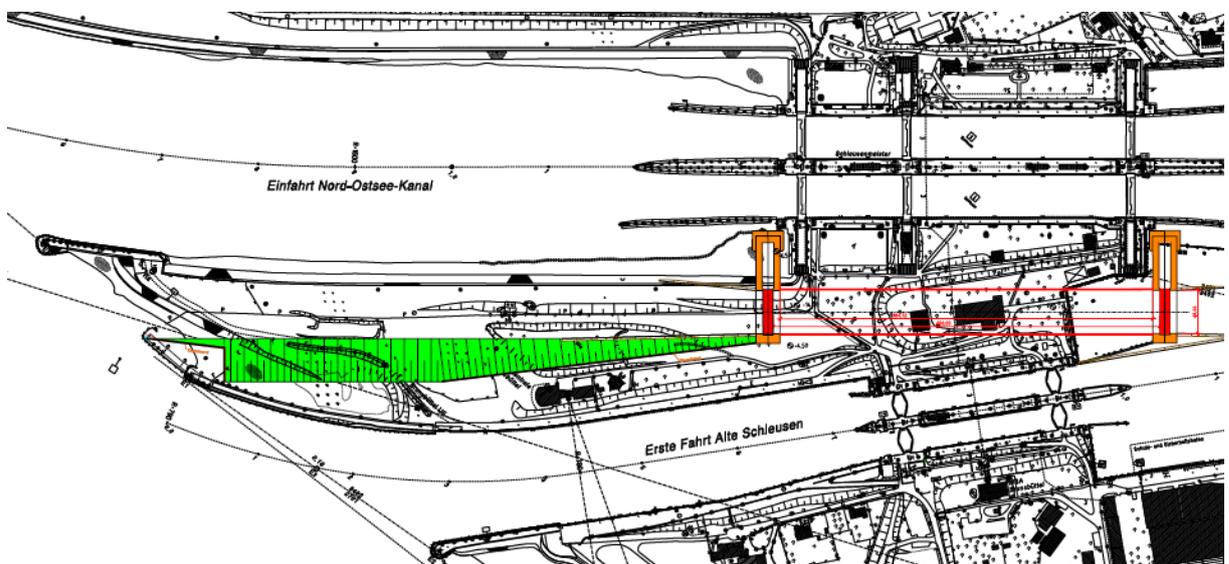
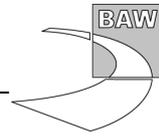


Abb. 4: Ausbauvariante 4: Lange Mole 2



2 Arbeitsunterlagen und Daten

a) Systemgeometrie der NOK-Schleusen Brunsbüttel

Die Abbildung der Systemgeometrie der NOK-Schleusen Brunsbüttel im Ist-Zustand in das numerische Elbe-Modell erfolgte nach den Vorgaben der Projektgruppe NOK-Schleusen des WSA Brunsbüttel. Die Vorgaben basierten auf aktuellen Peil-, Vermessungs- und Baubestandsplänen.

Bezeichnung	Ort	Quelle	Stand
Schiffsschleusenanlage Brunsbüttel: Lageplan mit Koordinaten	Elbe-Strom-km 695 bis 699	WSA Brunsbüttel	2007
NOK Vorhäfen außen: Baggerpeilung km -0,09 bis km 1,69, Plan-Nr. B7	Brunsbüttel	WSA Tönning	03.07.2007
NOK Vorhäfen außen: Baggerpeilung km -0,35 bis km 1,69, Plan-Nr. B11	Brunsbüttel	WSA Tönning	13.11.2007

b) Ausbauvarianten

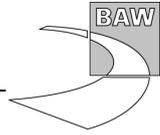
Für die beiden untersuchten Ausbauvarianten standen folgende Zeichnungen zur Verfügung:

Ausbauzustand „Neubau Mole 3, Große Versetzung“ (Abb. 3)

Zeichnung: Schiffsschleusenanlage Brunsbüttel, Vorhafengestaltung mit großer Versetzung der Mole 3, Lageplan mit Koordinaten, WSA Brunsbüttel, 02.07.2007

Ausbauzustand „Lange Mole 2“ (Abb. 4):

Zeichnung: Schiffsschleusenanlage Brunsbüttel, Lange Mole 2, Lageplan mit 5. Schleusenkammer, WSA Brunsbüttel, 20.12.2007



3 Bearbeitungskonzept

Für die Aufgabenstellung waren im Wesentlichen folgende Fragen zu behandeln:

- Welche physikalischen Prozesse sind an der Sedimentation im Vorhafen beteiligt?
- Welche Anteile an der Gesamt-Sedimentation haben sie?
- Wie werden sie durch den Ausbau verändert?
- Welche Optimierungsmöglichkeiten kommen in Betracht?

Zu den Ursachen der Sedimentation in den Schleusenvorhäfen von Brunsbüttel und zu den Möglichkeiten einer Optimierung lagen bereits umfangreiche Untersuchungen vor, insbesondere MAGENS (1958), BAW (1976). Im Rahmen des vorliegenden Gutachtens war die Literatur unter Berücksichtigung der veränderten Fragestellung erneut auszuwerten.

Diese Auswertungen ergaben, dass die Sedimentation zum überwiegenden Teil durch den Dichteeffekt verursacht wird. Damit hängt sie hauptsächlich von der Größe des Vorhafens ab und die ausbaubedingte Veränderung der Unterhaltungsmengen kann an Hand der geometrischen Abmessungen abgeschätzt werden (Abschn. 4).

An der Sedimentation ist der sog. Strömungseffekt mitbeteiligt. Da eine wesentliche, nachteilige Veränderung dieses Effekts nicht auszuschließen war, wurden ergänzende Untersuchungen mit Hilfe eines 3D-HN-Modells erforderlich. Zu diesem Zweck wurde ein vorhandenes Modell des Elbeästuars im Bereich Brunsbüttel so weit verfeinert, dass die Strömungsbedingungen in den elbeseitigen Vorhäfen und ihre Veränderungen detailliert untersucht werden konnten (Abschn. 5).



4 Bisherige Erkenntnisse über die physikalischen Prozesse

4.1 Strömung und Sedimentation im Neuen Vorhafen

Die Vorhäfen der Schleusenanlage Brunsbüttel (Neuer Vorhafen und Alter Vorhafen) liegen in der Brackwasserzone der Elbe. Die Austauschprozesse zwischen der Elbe und den elbseitigen Vorhäfen transportieren salz- und schwebstoffreiches Wasser in die Außenvorhäfen. Aufgrund der geringen Turbulenzen setzen sich die eingetragenen Schwebstoffe größtenteils vor den Schleusentoren als hochkonzentrierte Suspension ab. Durch Schleusungsvorgänge gelangt diese Suspension auch in den Binnenhafen, so dass auch hier Untiefen auftreten und in unregelmäßigen Abständen entfernt werden müssen.

Bedingt durch die verschiedenen hohen Strömungsgeschwindigkeiten im Elbestrom und in den Vorhäfen treten verstärkt in den Einfahrten der Schleusenvorhäfen Sedimentablagerungen auf und es kommt ausgehend von den Molenköpfen zu einer Barrenbildung. Zur Gewährleistung der erforderlichen Wassertiefen muss in der Einfahrt regelmäßig gebaggert werden.

Durch diese Bedingungen ist die Unterhaltung des Brunsbütteler Schleusenbereichs aufwändig. Im Zuge der Planungen für die fünfte Schleusenkammer stellte sich um so nachdrücklicher die Frage, welche Folgen die erforderliche Vorhafenanpassung für die Unterhaltung haben wird und wie sie evtl. gemildert werden können. Zur Beantwortung müssen zunächst die physikalischen Prozesse, die zur Sedimentation im Vorhafen führen, im Einzelnen betrachtet und die bereits vorliegenden Untersuchungsergebnisse ausgewertet werden

Als Hauptursachen der Sedimentation sind folgende Effekte zu unterscheiden (Abb. 5):

- Tideeffekt
- Strömungseffekt
- Dichteeffekt

Als weitere Ursachen mit untergeordneter Bedeutung kommen hinzu:

- Wind
- Wellen
- Schifffahrt (Verdrängung, Propeller)

Auf Grund dieser Effekte gelangen Sedimente aus der Elbe in Bereiche mit niedrigeren Strömungsgeschwindigkeiten, so dass sie sich absetzen und nachfolgend nicht in gleichem Maße resuspendiert und zurückbefördert werden.

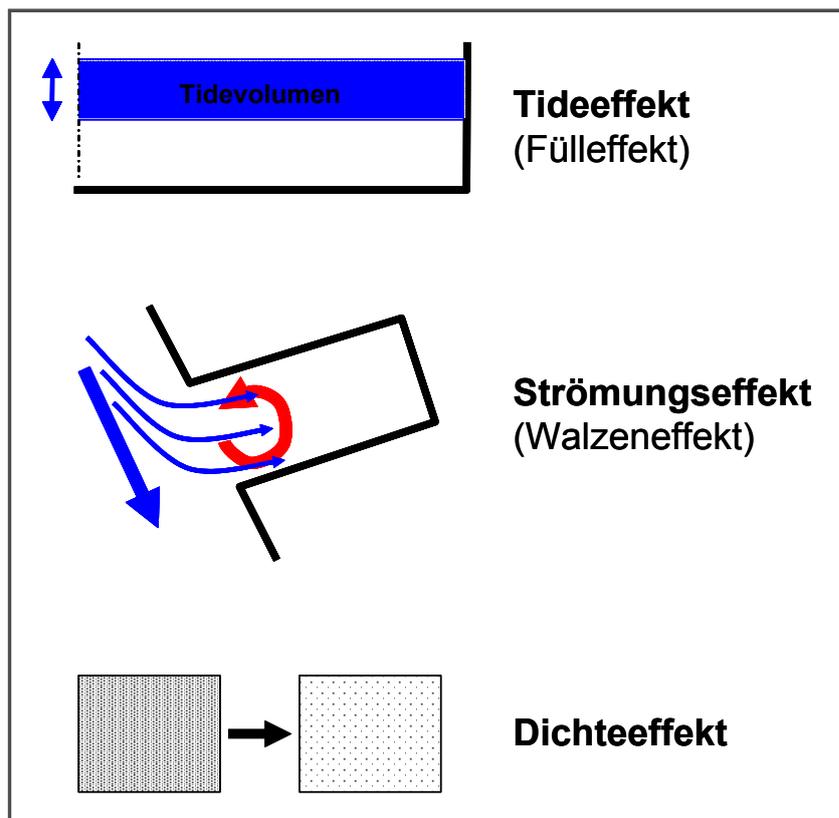


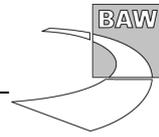
Abb. 5: Hauptursachen für die Sedimentation in tideoffenen Becken

4.1.1 Der Tideeffekt

Der Tideeffekt beruht darauf, dass im Vorhafen bei jeder Tide das Volumen zwischen Tide-niedrig- und -hochwasserstand gefüllt werden muss. Damit gelangen auch Feststoffe in den Vorhafen und können sich dort absetzen. Die Strömungsgeschwindigkeiten im Vorhafen während der Entleerungsphase reichen dann in der Regel nicht aus, um die Sedimente zu remobilisieren, so dass die Sedimente akkumulieren können.

4.1.2 Der Strömungseffekt

Durch die Hauptströmung (Elbe) wird im seitlichen halboffenen Becken (Vorhafen) eine Walzenströmung angeregt. (Je nach Geometrie des Beckens und Intensität der Walzenströmung können sich zusätzliche Sekundärwalzen bilden.) Die Walze überlagert sich mit der aus dem Tideeffekt resultierenden Strömung (dünne Pfeile in Abb. 5), die dadurch verstärkt (bei gleicher Richtung) bzw. verzögert wird. Durch die Walzenströmung werden zusätzliche sedimentbeladene Wassermengen aus der turbulenten Durchmischungszone



(Wirbelstraße zwischen Hauptströmung und Becken) in das Vorhafenbecken befördert; denn es strömt mehr Wasser ein, als für den Ausgleich der Wasserstände (Punkt 4.1.1) erforderlich ist. In der Walzenströmung bewegt sich Material spiralförmig nach innen, was zu den typischen Aufsedimentationen des feineren Materials im Walzenzentrum führt („Teetasseneffekt“). Dagegen setzt sich gröberes Material schon früher ab; hierauf ist die typische Barrenbildung in der Hafeneinfahrt zurückzuführen.

4.1.3 Der Dichteeffekt

Durch unterschiedliche Feststoff- und Salzkonzentrationen und die daraus resultierenden Dichteunterschiede zwischen Elbe und Vorhafen entstehen Ausgleichsströmungen. Elbeseitig werden sie durch die aktuelle Lage und Eigenschaften der Brackwasserzone beeinflusst (die wiederum tide-, oberwasser- und jahreszeitabhängig sind), vorhafenseitig vom Zusammenspiel der Tide- und Strömungseffekte mit dem aktuellen Stand des Dichteausgleichs.

Zur Berechnung des Dichteeffekts liegen verschiedene Ansätze vor (STOSCHEK und GEILS, 2003); nach der Gleichung von Schijf und Schönfeld beträgt die Austauschwassermenge:

$$V = \frac{1}{4} B_E h \sqrt{\varepsilon g h}$$

- mit
- V Austauschwassermenge [m³/s]
 - B_E Einfahrtsbreite [m]
 - h Wassertiefe [m]
 - ε relative Dichte [-]

Der Austausch hängt somit zunächst vom Einfahrtsquerschnitt ab. Jedoch ist der Dichteunterschied zwischen Fluss und Hafen variabel; er nimmt mit fortschreitender Ausgleichsströmung ab. Die Geschwindigkeit dieses Ausgleichs wird durch die Hafengröße beeinflusst; somit ist der Dichteeffekt auch vom Hafenvolumen abhängig.

4.2 Quantifizierung der einzelnen Effekte

Auf der Grundlage seiner umfangreichen Untersuchungen des Vorhafens Brunsbüttel (Naturmessungen, Modellversuche und theoretische Analysen) hat MAGENS (1958) die den einzelnen Effekten zuzuordnenden Baggermengen ermittelt. Daraus sind folgende Anteile an den Baggermengen anzuleiten:

- Dichteeffekt: 70 % der Gesamtwirkung
- Fülleffekt: 15 % der Gesamtwirkung
- Strömungseffekt: sehr geringer Anteil

Die Berechnungen gelten für mittlere Verhältnisse. Die von ihm nicht quantifizierten 15% der Gesamtwirkung ordnet MAGENS neben dem Strömungseffekt vor allem den Sturmfluten zu.

4.3 Möglichkeiten zur Minimierung der Sedimentation

Zu Beginn der 1970er Jahre waren die Mole 2 und 3 der Außenvorhäfen Brunsbüttel baufällig und bedurften einer Erneuerung. Aus diesem Anlass wurde die BAW beauftragt zu überprüfen, ob durch eine veränderte Gestaltung Vorteile hinsichtlich der Vorhafenunterhaltung zu erreichen wären. Dazu wurden insgesamt neun Vorhafenvarianten im physikalischen Modell untersucht.

Nur bei zwei der untersuchten Varianten wurde eine günstige Beeinflussung des Strömungseffekts festgestellt (Abb. 6):

- Var. F: Verlegung der Mole 4 (Molenkopf 4 wurde um 125 m in die Elbe verschoben)
- Var. H: Kürzung der Mittelmole (Mole 3 wurde um 100 m gekürzt)

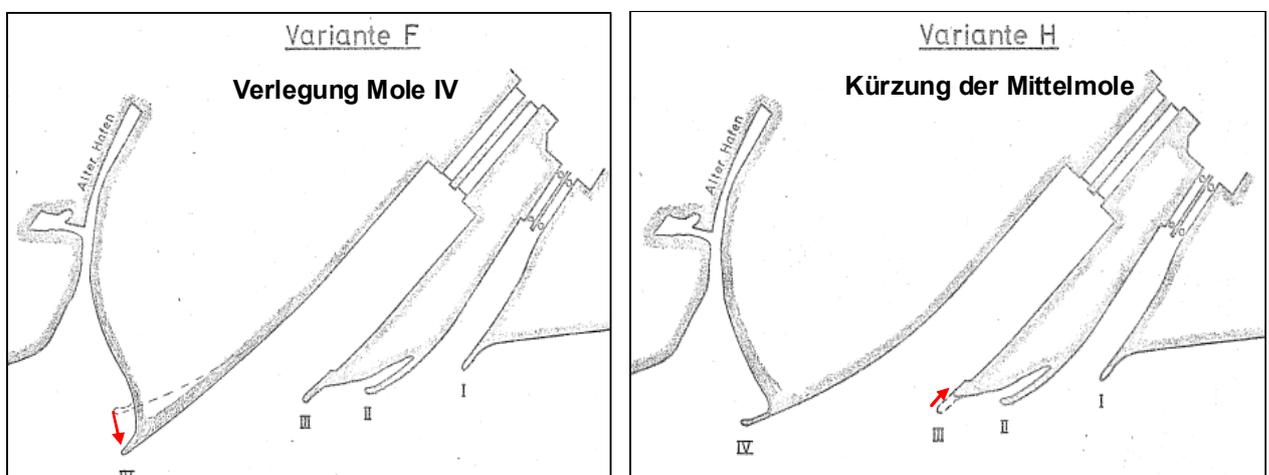
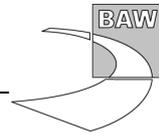


Abb. 6: Günstige Vorhafenvarianten (BAW, 1976)



Dabei war die Zielsetzung in Var. F, die Flutströmung von der Hafeneinfahrt so abzulenken, so dass die Stromlinien erst oberhalb des Neuen Vorhafens wieder in Ufernähe geraten. In Var. H sollte dem sog. Schöpfefeekt entgegengewirkt werden, der dazu führt, dass bei Flutstrom vorbeifließendes Wasser „abgeschöpft“ wird und die Walzenströmung (Strömungseffekt, Abschn. 4.1.2) verstärkt.

In beiden Varianten war die Beeinflussung des Strömungseffekts jedoch so gering, dass eine wesentliche Verminderung der Sedimentationsmengen nicht prognostiziert wurde.

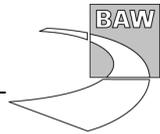
4.4 Anwendung der vorliegenden Erkenntnisse und Schlussfolgerungen

Um die Zufahrt in die fünften Schleusenkommer und insbesondere die Ausfahrt aus der Kommer mit der erforderlichen Sicherheit und Leichtigkeit zu gewährleisten, ist nach den durchgeführten nautischen Simulationen (von MORGENSTERN, 2008) eine Erweiterung des Neuen Vorhafens erforderlich (Verkleinerung der Schleuseninsel; Abb. 3 und Abb. 4). Im Vergleich zum Referenzzustand wird die Einfahrtsbreite, das Tidevolumen und das Gesamtvolumen des Vorhafens wesentlich vergrößert (Tab. 1).

Variante Parameter	Var. 3: Gr. Versatz der Mole 3	Var. 4: Lange Mole 2
Einfahrtsbreite	+25%	+40%
Gesamtvolumen	+35%	+45%
Tidevolumen	+75%	+90%

Tab. 1: Zunahme wichtiger Abmessungen im Vergleich zum Referenzzustand

Aus den erläuterten Forschungsergebnissen (4.1 und 4.2) geht hervor, dass die Sedimentation im Schleusenvorhafen Brunsbüttel zum weitaus überwiegenden Teil (rd. 85 %) auf den Dichte- und den Fülleffekt zurückzuführen sind. Um die Auswirkungen der Vorhafenvergrößerung auf die Baggermengen abzuschätzen, kann von folgenden Annahmen ausgegangen werden:



- Der **Dichteeffekt** hat einen Anteil von rund 70% an den Baggermengen.
 - Er hängt von der Einfahrtsbreite und dem veränderlichen Dichtegradienten zwischen Elbe und Vorhafen ab. Da der Dichteausgleich durch die Hafengröße beeinflusst wird, ist der Dichteeffekt letztendlich proportional zum Hafenvolumen.
 - Er kann durch die Molengestaltung nicht beeinflusst werden.
 - Da sich die geometrischen Verhältnisse (Wassertiefe, Beckenform, Verhältnis Becken-/Zufahrtsbreite) nach dem Ausbau nicht wesentlich ändern, kann eine lineare Zunahme mit dem Hafenvolumen angenommen werden.

- Dem **Fülleffekt** sind etwa 15% Anteil an den Baggermengen zuzuordnen.
 - Er hängt unter den vorliegenden Gegebenheiten ausschließlich vom Tidevolumen des Vorhafens ab (lineare Zunahme mit dem Tidevolumen).
 - Auch der Fülleffekt ist durch die Molengestaltung nicht zu beeinflussen.

- Der Anteil des **Strömungseffekts** liegt deutlich unter 15%; er kann nach den vorliegenden Angaben jedoch nicht genauer quantifiziert werden.

Die Auswirkungen der Vorhafenvergrößerung auf die Baggermengen können mit diesen Angaben abgeschätzt werden. Die Tab. 3 zeigt das Berechnungsschema. Dabei ist zu berücksichtigen, dass die o. g. Prozentzahlen keine exakten Werte sind. Mit Hilfe sinnvoller Annahmen für die Streuung der Zahlen können Wertebereiche für die ausbaubedingte Steigerung der Baggermengen ermittelt werden:

	Anteil an der Gesamt-Sedimentation	Änderung der Einzeleffekte
Tideeffekt	10 bis 30 % (15%)	Var. 3: +75 % Var. 4: +90 %
Strömungseffekt	5 bis 20 %	+10 bis +50 %
Dichteeffekt	50 bis 80 % (70%)	Var. 3: +25 bis + 35 % Var. 4: +40 bis +45 %

Tab. 2: Variation der Parameter (rote Zahlen: nach MAGENS, 1958)



Angaben in Prozent Parametersatz / -kombination	Anteil an der Gesamt- Sedimentation		Änderung des Einzeleffekts		Änderung der Baggermengen			
	-- A --	-- B --	-- a --	-- b --	-- A a --	-- A b --	-- B a --	-- B b --
Tideeffekt	15	30	75	90	11	14	23	27
Strömungseffekt	5	20	10	50	1	3	2	10
Dichteeffekt	80	50	35	45	28	36	18	23
Änderung gesamt					40	52	42	60
Änderung durch Strömungseffekt					1	3	2	10

Tab. 3: Beispiel einer Parametervariation zur Abschätzung der Baggermengenentwicklung

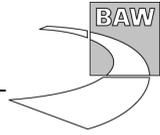
Auf dieser Basis kann für die beiden untersuchten Varianten von folgenden ausbaubedingten Änderungen des Unterhaltungsbedarfs ausgegangen werden:

- Variante „Großer Versatz der Mole 3“ (Var. 3):
 - insgesamt 40 - 50% Zunahme der Baggermengen,
 - darin enthalten sind ca. 5 - 10% Zunahme durch den Strömungseffekt

- Variante „Lange Mole 2“ (Var. 4):
 - insgesamt 50 - 60% Zunahme der Baggermengen,
 - darin enthalten sind ca. 5 - 10% Zunahme durch den Strömungseffekt

Auf der beschriebenen Grundlage kann die Größenordnung des Anstiegs der Baggermengen also trotz der zu berücksichtigenden Unsicherheiten gut prognostiziert werden. Auch bei einer aufwändigen morphodynamischen Modellierung wäre eine Prognoseunsicherheit zu beachten, so dass keine wesentlich höhere Aussageschärfe erwartet werden kann und eine Modellierung als zusätzlicher Nachweis nicht erforderlich ist.

In der Abschätzung der Baggermengenentwicklung ist auch hinsichtlich der Wichtung und der ausbaubedingten Veränderung des Strömungseffekts ein recht großer Spielraum berücksichtigt. Jedoch müssen die Annahmen in diesem Punkt unter dem Vorbehalt gesehen werden, dass sich die Strömungsbedingungen im Vorhafen durch den Ausbau des Vorhafens nicht wesentlich verändern. Da sich die für die Sedimentation verantwortlichen Effekte gegenseitig überlagern und beeinflussen können, kann diese Voraussetzung auch eine Bedeutung für den Dichte- und Fülleffekt und für das Gewicht der einzelnen Effekte haben. Sie war daher im Rahmen des vorliegenden Gutachtens zu überprüfen (Abschn. 5).

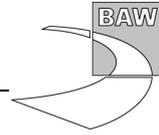


Eventuelle Optimierungsmaßnahmen an den Molenbauwerken können sich allein auf die ca. 5 bis 10% Baggermengenzunahme beziehen, die auf den Strömungseffekt zurückzuführen sind. Dabei ist auf Grund der vorliegenden Erfahrungen (Abschn. 4.3) davon auszugehen, dass nur ein kleiner Teil der genannten 5 – 10%igen Zunahme durch eine Optimierung der Molenbauwerke verhindert werden kann.

Die vorhabensbedingte Zunahme der Baggermengen könnte nur dann wesentlich reduziert werden, wenn - unter Berücksichtigung der nautischen Belange - eine geringere Vergrößerung des Vorhafens an der Mittelmole oder eine Kompensierung durch eine Vorhafenverkleinerung an der Westseite möglich wäre. Solche Maßnahmen würden sowohl den dominierenden Dichteeffekt, wie auch den Tideeffekt mildern.

Zusammengefasst hatten die beschriebenen Erkenntnisse folgende Konsequenzen für das weitere Vorgehen:

- a) Eine morphodynamische Modellierung war verzichtbar, da eine wesentliche Verbesserung der Aussageschärfe nicht zu erwarten war.
- b) Erforderlich war dagegen die Überprüfung der Strömungsbedingungen mit Hilfe eines 3D-HN-Modells. Falls sich dabei wesentliche Veränderungen der Strömungsbedingungen ergäben, wären die o. g. Voraussetzungen der Baggermengenabschätzungen nicht mehr erfüllt (veränderte Überlagerung der Sedimentationseffekte).
- c) Bei vorgegebenem Flächenbedarf im Vorhafen (incl. Einfahrtsbreite) sind von einer Optimierung der Molengeometrie keine wesentlichen Verbesserungen hinsichtlich der Unterhaltungsaufwendungen zu erwarten, so dass hierzu keine neuen Untersuchungen erforderlich sind (unter der Annahme, dass sich die Strömungsbedingungen nicht wesentlich ändern, s. Punkt b).



5 Modelluntersuchungen zur Beurteilung des Strömungseffekts

5.1 Untersuchungsmethode

Gemäß den Schlussfolgerungen in Abschn. 4.4 war eine Überprüfung der Strömungsbedingungen im Außenvorhafen der Schleusenanlage (Ausbauvarianten im Vergleich zum Referenzzustand) erforderlich, um die Annahmen hinsichtlich des Strömungseffekts auf die Baggermengenentwicklung zu überprüfen und um ggf. eine ungünstige Veränderung der Strömungsbedingungen zu erkennen. Dazu waren Untersuchungen in einem dreidimensionalen hydrodynamisch-numerischen Modell durchzuführen.

Modelliert wurde die Hydrodynamik einschl. Salztransport. Da das Untersuchungsziel gemäß Abschn. 4.4 die Beurteilung des Strömungseffekts war, konnte auf eine vollständige Nachbildung des Dichteeffekts verzichtet werden: Der durch Salzgehaltsgradienten bedingte Anteil des Dichteeffekts ist in der Simulation enthalten, nicht aber der durch Gradienten des Schwebstoffgehalts bedingte Anteil.

Als Modellverfahren wurde das dreidimensionale HN-Modellverfahren UNTRIM-3D verwendet. UNTRIM-3D ist ein Finite-Volumen-Verfahren für unstrukturierte Gitter zur Simulation stationärer und instationärer Strömungs- und Transportprozesse in Gewässern mit freier Wasseroberfläche. Eine detaillierte Beschreibung des Verfahrens wird auf den Internet-Seiten der BAW-DH gegeben.

(siehe <http://www.baw.de/vip/abteilungen/wbk/Methoden/hnm/hnm-de.html>)

5.2 Modellgebiet und Gitternetz

Im Rahmen der Fragestellung war der Bereich des Vorhafens Brunsbüttel zu betrachten, es war aber sicherzustellen, dass die Tide- und Strömungsbedingungen in der Elbe vor dem Vorhafen naturähnlich waren, da sie für die Füll- und Sekundärströmungen im Vorhafen verantwortlich sind. Von den UVU-Untersuchungen zur geplanten Fahrrinnenanpassung der Elbe (BAW 2006a und b) stand ein kalibriertes Ästuarmodell des gesamten Elbeästuars zur Verfügung, welches im Vorhafenbereich Brunsbüttel so verfeinert werden musste, dass die Strömungen hier detailliert berechnet werden konnten. Auf diese Weise konnten die Elbeströmung vor dem Vorhafen und die Strömung im Vorhafen mit der erforderlichen Genauigkeit und Naturähnlichkeit nachgebildet werden.

Die seeseitige Grenze des Modellgebiets (Abb. 7) lag auf der Linie Sahlenburg – Neuwerk – Nigehörn – Bake A – Blauortsand – Wesselburen. Die oberwasserseitige Grenze bildete das Wehr Geesthacht. Das Modellgitter wurde durch ein unregelmäßiges Drei- und Vierecksgitter

an die Topographie angepasst. Außerhalb des Vorhafenbereichs wurde das Modellgebiet durch rund 150 000 Gitterzellen aufgelöst, wobei die häufigsten Kantenlängen bei 20 m bis 80 m lagen.

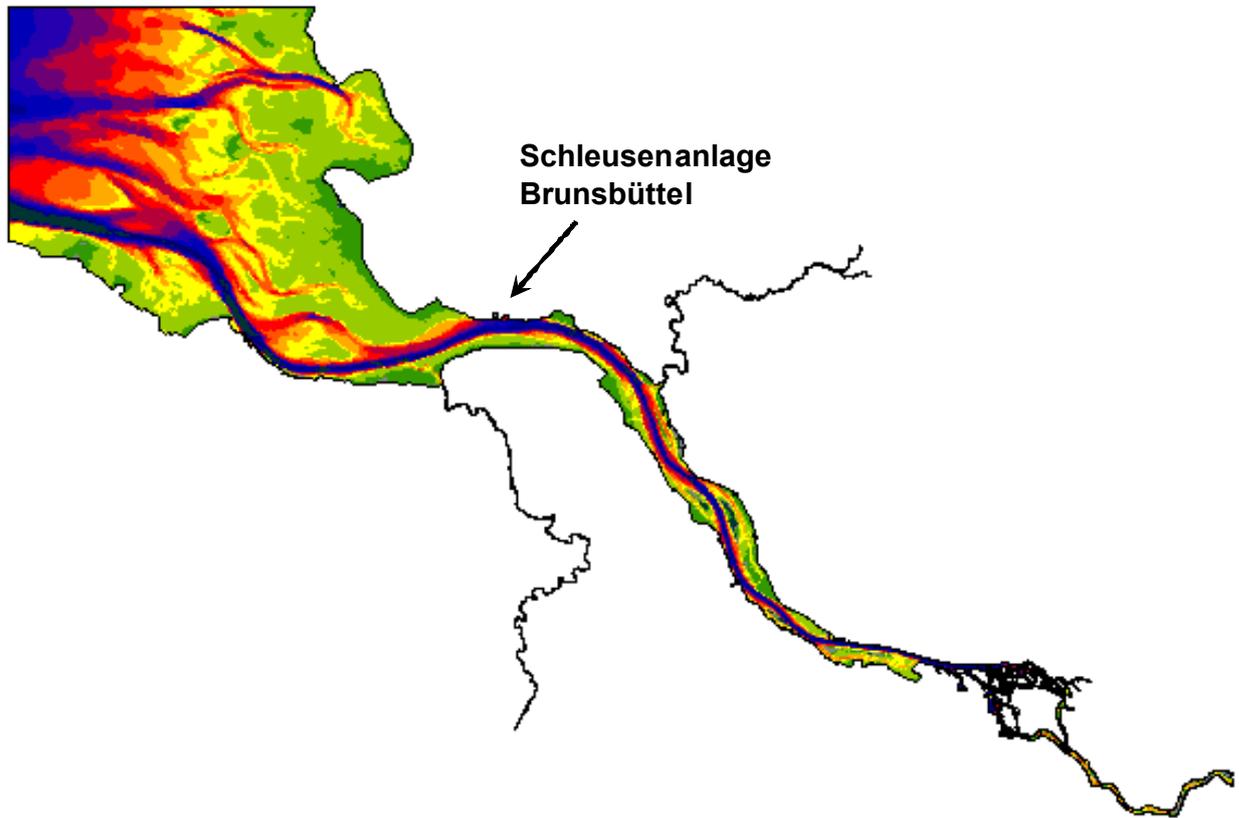


Abb. 7: Übersicht der Gebietsgrenzen des HN-Modells

Im Bereich des Vorhafens (Abb. 8) wurde das Modellgitter stark verfeinert. Die Kantenlängen wurden dort auf 2,0 bis maximal 15,0 m verkürzt.

Alle Simulationen wurden mit dreidimensionaler Auflösung durchgeführt. Die vertikale Auflösung betrug 0,50 m im Bereich $\text{NN} \pm 3,00 \text{ m}$, darunter 1,00 m.

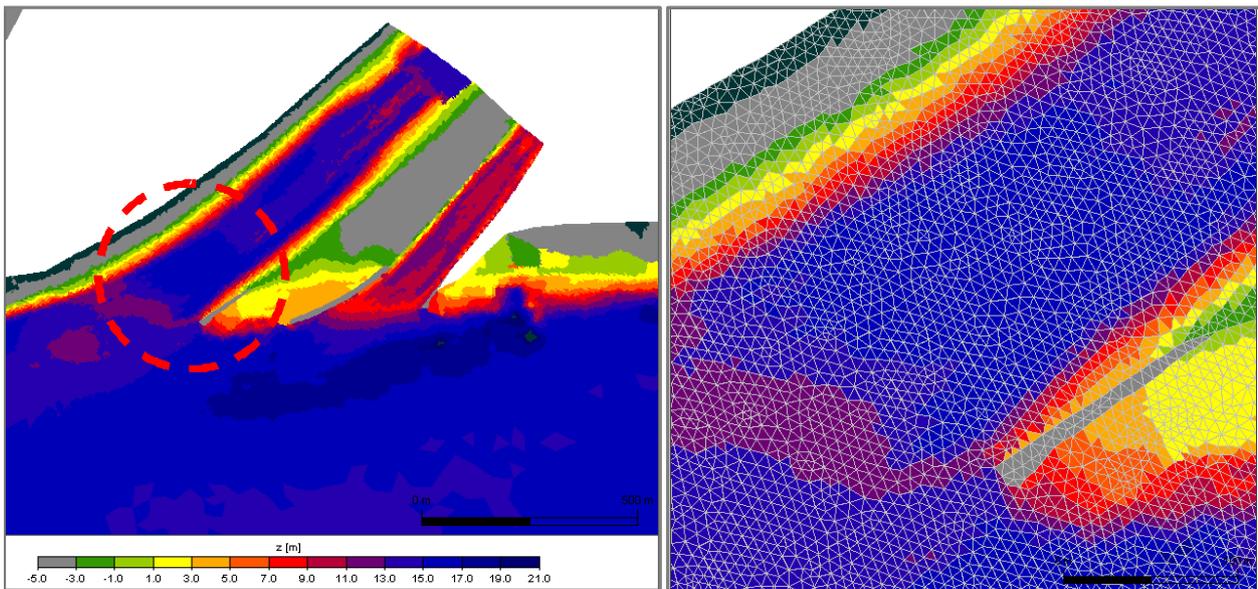


Abb. 8: HN-Modell im Bereich des Vorhafens und Ausschnittvergrößerung mit Berechnungsgitter

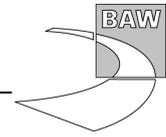
5.3 Modelltopographien

Als Grundlage wurde die Modelltopographie verwendet, die in den BAW-Untersuchungen zur aktuellen Fahrrinnenanpassung der Unter- und Außenelbe als Ausbautopographie erstellt wurde. Sie beruht auf den Peilungen des Jahres 2003 und schließt die geplante Fahrrinnenanpassung mit Unterwasserablagerungsflächen, Ufervorspülungen und sonstigen Ausgleichsmaßnahmen ein. Die im Rahmen der Fahrrinnenanpassung geplanten Maßnahmen wurden gem. Stand Juli 2007 aktualisiert. Dieser „planerische Ist-Zustand“ (PIZ) ist der Referenzzustand des vorliegenden Gutachtens.

Für den Referenzzustand wurden die heutige Geometrie des Neuen und Alten Vorhafens und ihre Bathymetrien gem. Abschn. 2a) verfeinert und überarbeitet.

Auf dieser Basis wurden die Ausbautzustände gem. Abschn. 2b) erzeugt:

- Ausbautzustand „Neubau Mole 3, Große Versetzung“ (Abb. 3)
- Ausbautzustand „Lange Mole 2“ (Abb. 4):



5.4 Modellsteuerung

Für Modellsimulationen wurden Randwerte aus dem Mai 2002 genutzt, weil auf Grund der damaligen umfangreichen Messkampagne der BAW und der beteiligten Wasser- und Schifffahrtsämter für die Steuerung und die Validierung hochwertige, homogene Datensätze zur Verfügung stehen.

Bei der Modellierung des Schleusenvorhafens Brunsbüttel wurde das Modell am offenen Nordseerand durch die gemessenen Wasserstandszeitreihen gesteuert. Bei den Analysen wurden eine repräsentative Normaltide (04./05.05.2002) und eine starke Tide (Springtide 12./13.05.2002) berücksichtigt.

Am oberstromigen Rand (Geesthacht) wurde der häufigste Oberwasserzufluss der Elbe eingesteuert. Er beträgt $350 \text{ m}^3/\text{s}$. Die Salzkonzentration am seeseitigen Rand wurde konstant mit 30 PSU angenommen.

5.5 Modellkalibrierung und -validierung

Die Kalibrierung und Validierung des Ästuarmodells der Elbe (Ursprungsmodell) im Hinblick auf die Wasserstände, Strömungsgeschwindigkeiten, Salzgehalte und den Sedimenttransport wurde in den BAW-Gutachten zur Fahrrinnenanpassung der Elbe (BAW 2006 a und b) ausführlich beschrieben.

Da der Vorhafenbereich Brunsbüttel gegenüber dem Ursprungsmodell stark verfeinert worden war, machten die kleineren Elementgrößen eine Verkürzung des Berechnungsschritts und Überprüfung der Modellkalibrierung erforderlich. Insbesondere wurde dadurch sichergestellt

- dass die Wasserstände bei Brunsbüttel naturähnlich berechnet wurden.
- dass das Tidevolumen oberhalb von Brunsbüttel und die Strömungen vor dem Vorhafen naturähnlich wiedergegeben wurden (entsprechend dem Bearbeitungskonzept jedoch ohne den schwebstoffbedingten Dichteeffekt).

Als zusätzliche Datengrundlage gegenüber den früheren Untersuchungen (BAW 2006a und b) standen ADCP-Messungen aus dem Schleusenvorhafen zur Verfügung (Zeiträume Juni/Juli 2005 und März/Juni 2007; NASNER 2007). Der Vergleich zwischen diesen Messungen und der Simulation zeigte deutliche, von der Tidephase abhängige Abweichungen. Sie sind zum Einen auf unterschiedliche hydrologische Bedingungen zurückzuführen, weil die Messzeiträume nicht dem Simulationszeitraum entsprachen. Andererseits war auf eine Modellierung des schwebstoffbedingten Anteils am Dichteeffekt verzichtet worden, da im Modell nur der Strömungseffekt untersucht werden sollte (Abschn. 5.1). Aus diesen Gründen konnten die ADCP-Messungen nicht zur Validierung des Modells herangezogen werden.



5.6 Ergebnisse der HN-Simulationen

Zur Beurteilung der Strömungsbedingungen im Referenzzustand und in den beiden Ausbauprodukten wurden die Strömungsgeschwindigkeiten in den verschiedenen Horizontalschichten und in Querprofilen dargestellt und miteinander verglichen.

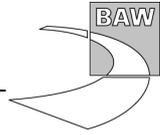
In den Abbildungen auf den folgenden sechs Doppelseiten (Abb. 9 ff) werden die Strömungsbedingungen in der Variante „Lange Mole 2“ im Vergleich zum Referenzzustand für eine Springtide dokumentiert. Diese Variante beinhaltet die größte Vorhafenerweiterung und die zu betrachtenden (Strömungs- und Füll-) Effekte sind bei Springtiden am deutlichsten. Für ausgewählte Zeitpunkte sind jeweils die Oberflächenströmung, die Strömung in der Schicht -5 bis -6 mNN und am Boden dargestellt.

Abb. 9 und Abb. 10 zeigen die Situation zu Beginn des Flutstroms in der Elbe. Im Referenzzustand konzentriert sich die Einströmung im Hafenbecken auf den linken Uferbereich und auf die oberen Wasserschichten. In Sohlhöhe ist ein deutlicher Ausstrom zu erkennen. Die Umlenkung der Elbeströmung an der Mittelmole (Mole 3) führt zu einem lokalen Anstieg der Strömungsgeschwindigkeit. Im Übrigen ist das Geschwindigkeitsniveau mit maximal 0,4 m/s recht niedrig. Im Ausbauzustand finden sich alle genannten Strömungsmuster wieder; sie sind lediglich wegen der größeren Beckenabmessungen in ihrer Ausdehnung und Intensität größer.

In einer späteren Phase des Flutstroms (Abb. 11 / Abb. 12) verlagert sich die Einströmung an der Oberfläche mehr zur Schleuseninsel und wird schwächer. In mittlerer Wassertiefe findet fast keine Strömung mehr statt und in Bodennähe ist Ausstrom festzustellen. Auch hier sind im Ausbauzustand die gleichen Muster zu beobachten.

Im Bereich des Hochwasserscheitels (Abb. 13 / Abb. 14) kehren sich die Strömungsverhältnisse um: An der Oberfläche ist Ausstrom, in Sohlhöhe Einstrom gegeben. Dazwischen ist eine Walzenströmung zu erkennen. Durch die Verstärkung der Effekte im Ausbauzustand ist dort insbesondere die sohlnahe Einströmung stärker ausgeprägt und reicht tiefer ins Hafenbecken hinein.

Die nächsten beiden Vergleiche zeigen die Situationen rd. 1,5 Stunden später bei Beginn der Ebbströmung in der Elbe (Abb. 15 / Abb. 16) und weitere rd. 1,5 Stunden später bei voll entwickelter Ebbströmung (Abb. 17 / Abb. 18). Dabei sind jeweils nur geringe Veränderungen der Strömungsmuster zu beobachten. Im Ausbauzustand ist aber die Walzenströmung an der linken Seite der Hafeneinfahrt stärker ausgeprägt und reicht tiefer in das Hafenbecken hinein als im Referenzzustand. Dies ist besonders auf Abb. 18 (Mitte) im Vergleich zu Abb. 17 (Mitte) zu erkennen.



Zum Zeitpunkt des Tideniedrigwassers (Abb. 19 / Abb. 20) sind die Strömungsbedingungen im Referenz- und Ausbaurzustand wieder sehr ähnlich.

Insgesamt ist festzustellen,

- dass sich die Strömungsbedingungen im Vorhafen durch den Ausbau nicht grundsätzlich verändern,
- dass die Strömungen (Ein-, Ausstrom, Walzen) entsprechend der Vorhafenvergrößerung intensiviert werden,
- dass eine leichte Tendenz zu einer stärkeren Sedimentation an der linken (westlichen) Seite der Hafeneinfahrt besteht,
- dass im Übrigen aus der Interpretation der Strömungsbilder keine Veränderung hinsichtlich einer ungünstigen, ungleichmäßigeren Verteilung der Sedimentation zu erwarten ist.

In der Variante „Große Versetzung Mole 3“ fällt die Vorhafenvergrößerung zwar geringer aus, jedoch sind die Unterschiede der Strömungsverhältnisse im Vergleich zur Variante „Lange Mole 2“ so gering, dass auf eine detaillierte Beschreibung verzichtet werden kann.

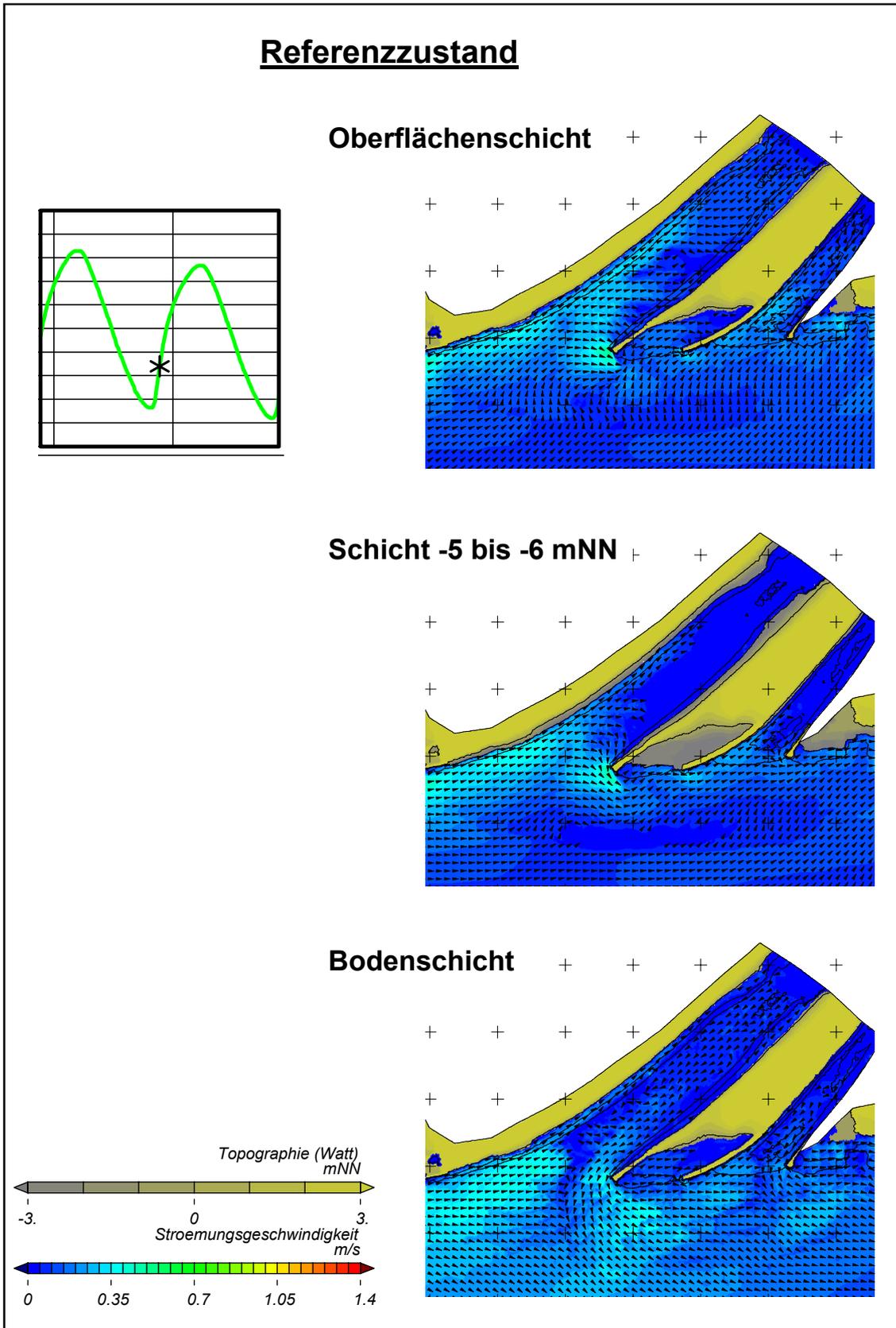


Abb. 9: Simulationsergebnisse (Strömungsgeschwindigkeiten) für den Referenzzustand, Zeitpunkt: 1/3 Tidestieg

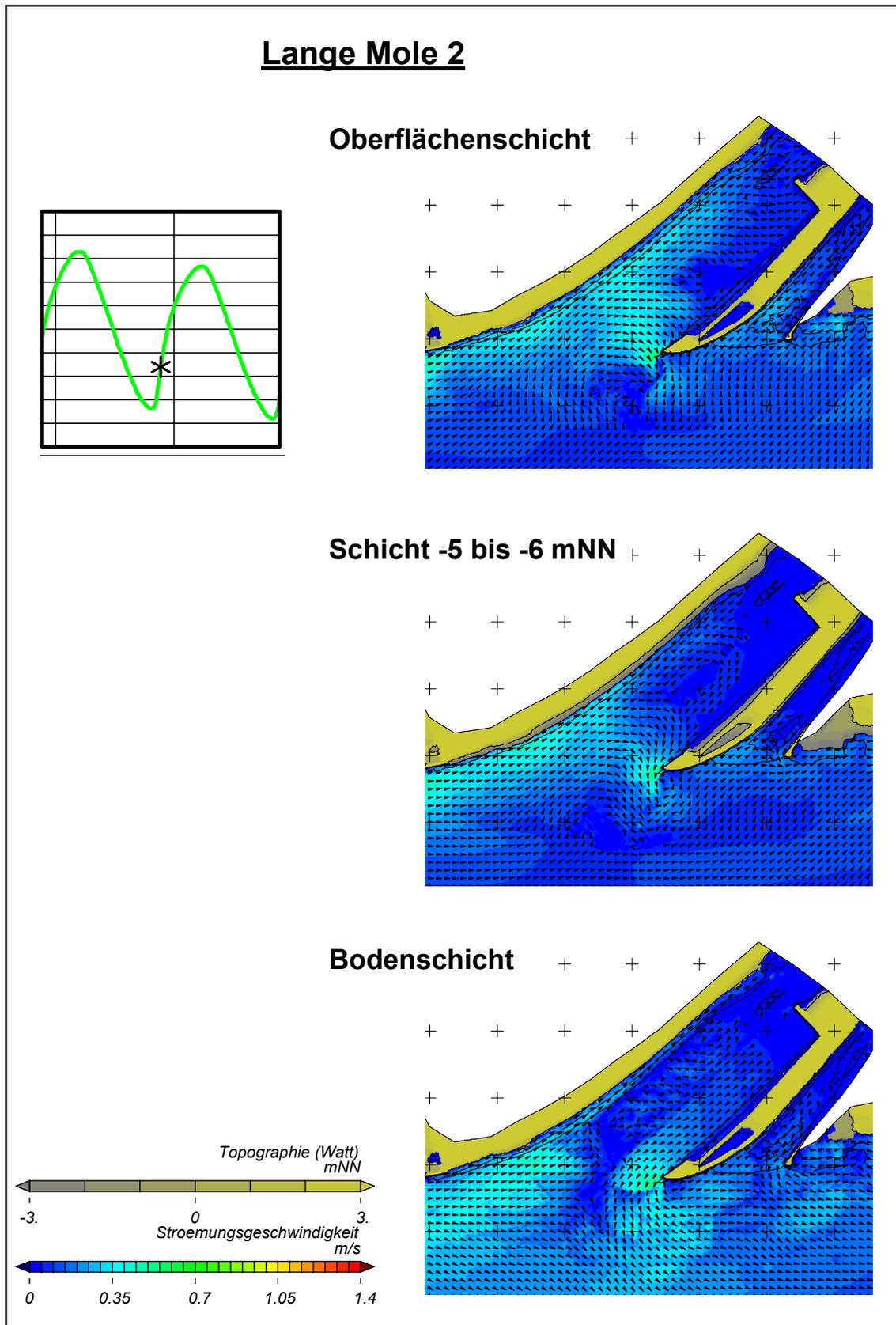


Abb. 10: Simulationsergebnisse (Strömungsgeschwindigkeiten) für den Ausbauzustand „Lange Mole 2“, Zeitpunkt: 1/3 Tidestieg (vgl. Abb. 9)

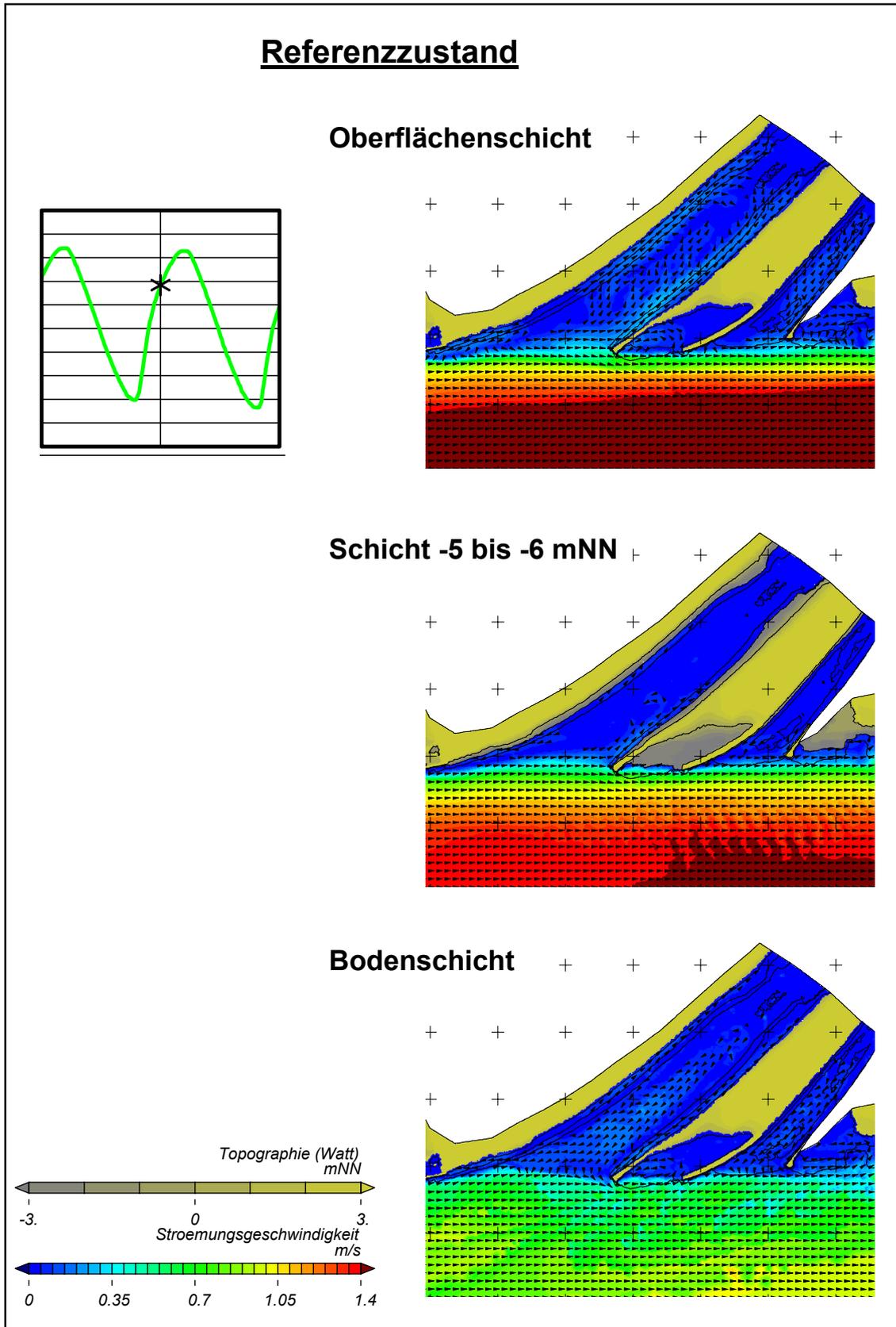


Abb. 11: Simulationsergebnisse (Strömungsgeschwindigkeiten) für den Referenzzustand, Zeitpunkt: 2/3 Tidestieg

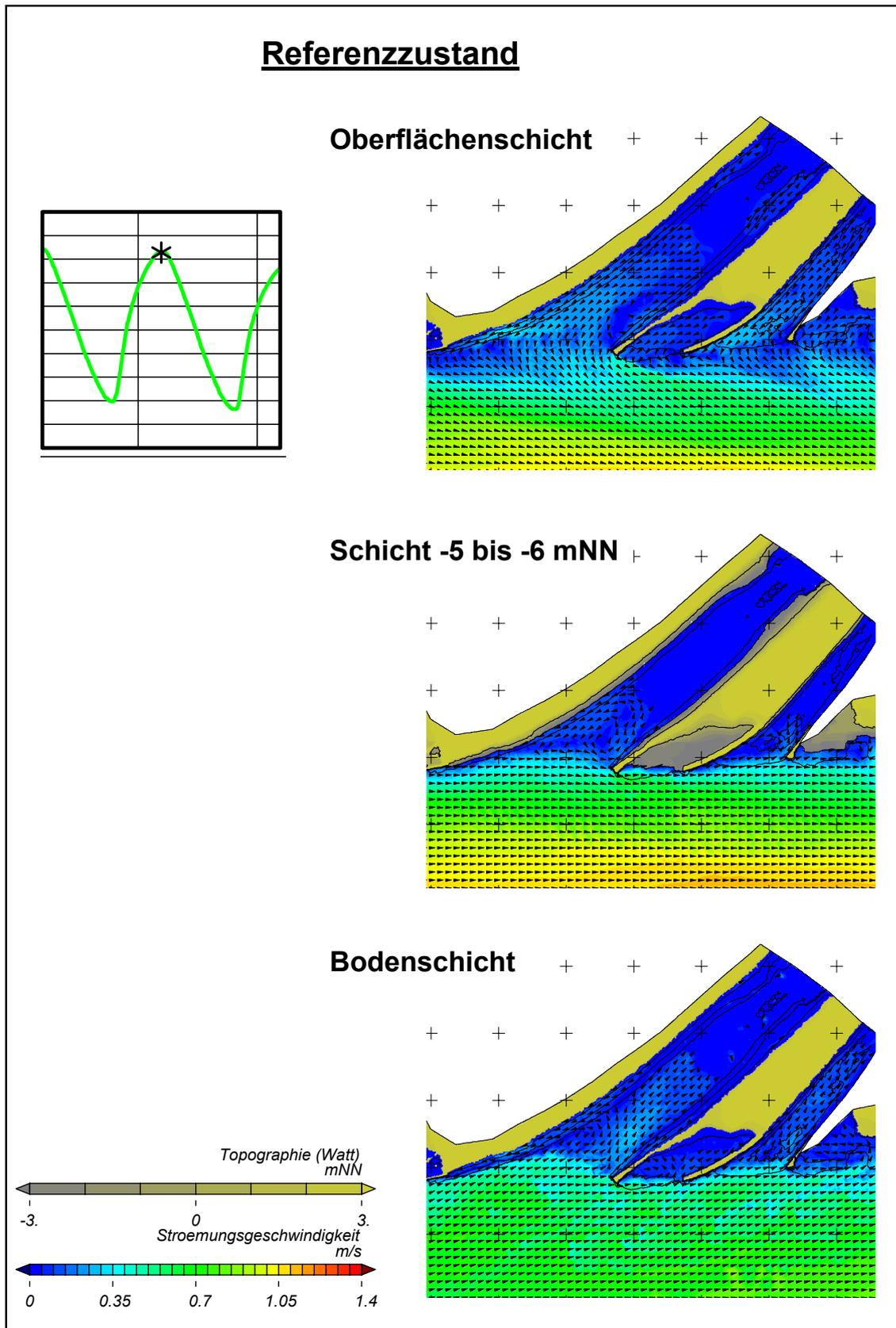


Abb. 13: Simulationsergebnisse (Strömungsgeschwindigkeiten) für den Referenzzustand, Zeitpunkt: Tidehochwasser

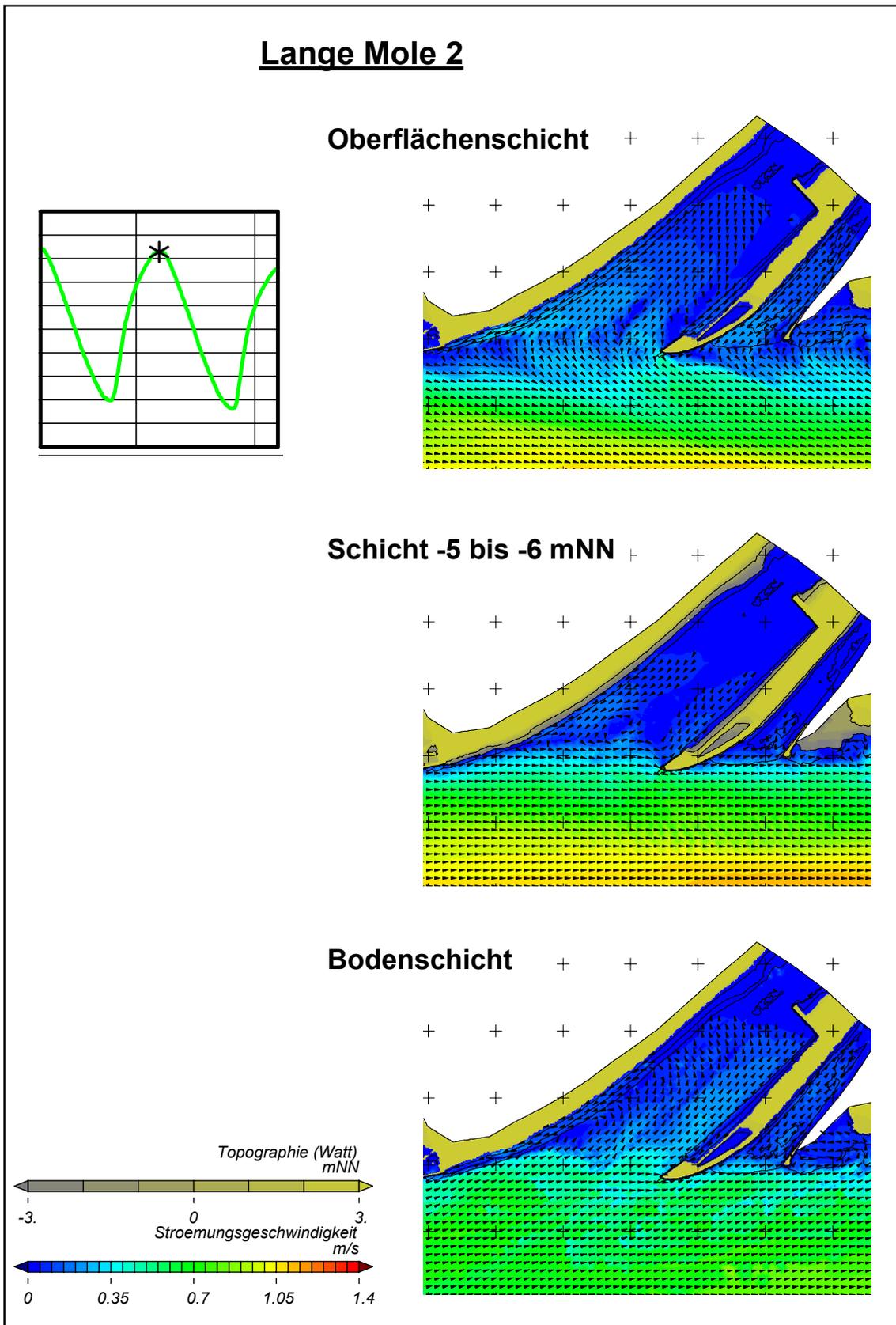


Abb. 14: Simulationsergebnisse (Strömungsgeschwindigkeiten) für den Ausbauzustand „Lange Mole 2“, Zeitpunkt: Tidehochwasser (vgl. Abb. 13)

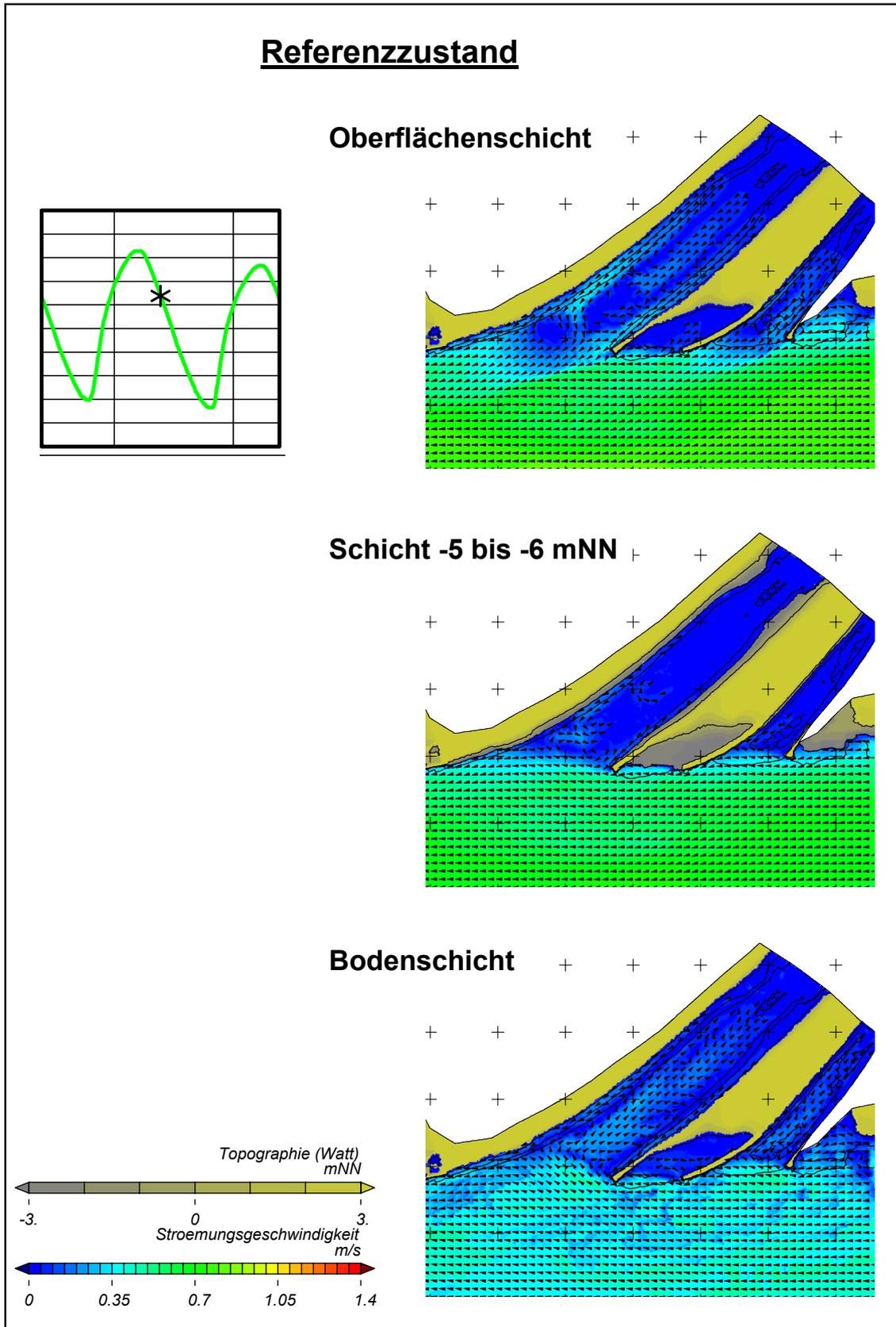


Abb. 15: Simulationsergebnisse (Strömungsgeschwindigkeiten) für den Referenzzustand, Zeitpunkt: 1/3 Tidefall

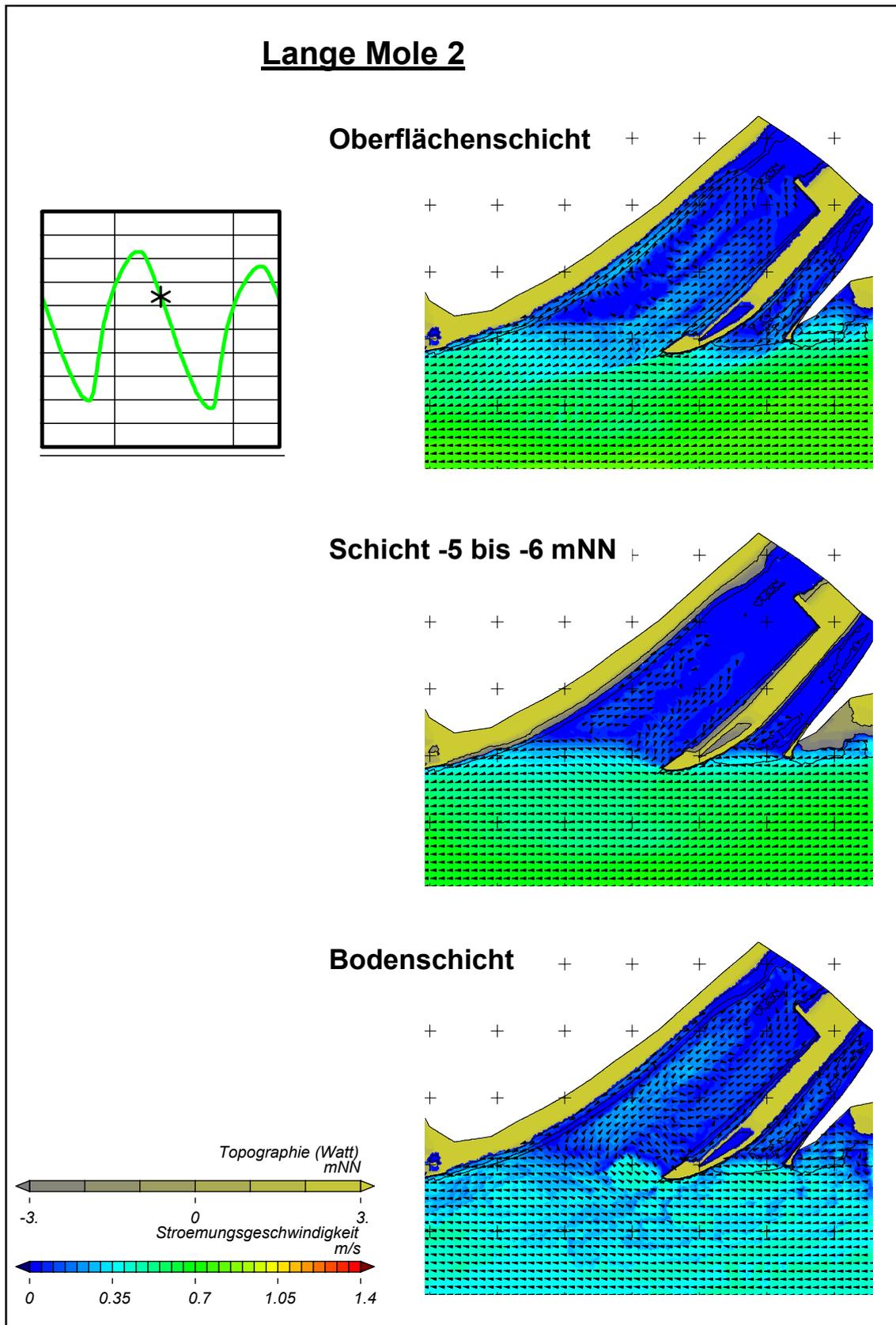


Abb. 16: Simulationsergebnisse (Strömungsgeschwindigkeiten) für den Ausbauzustand „Lange Mole 2“, Zeitpunkt: 1/3 Tidefall (vgl. Abb. 15)

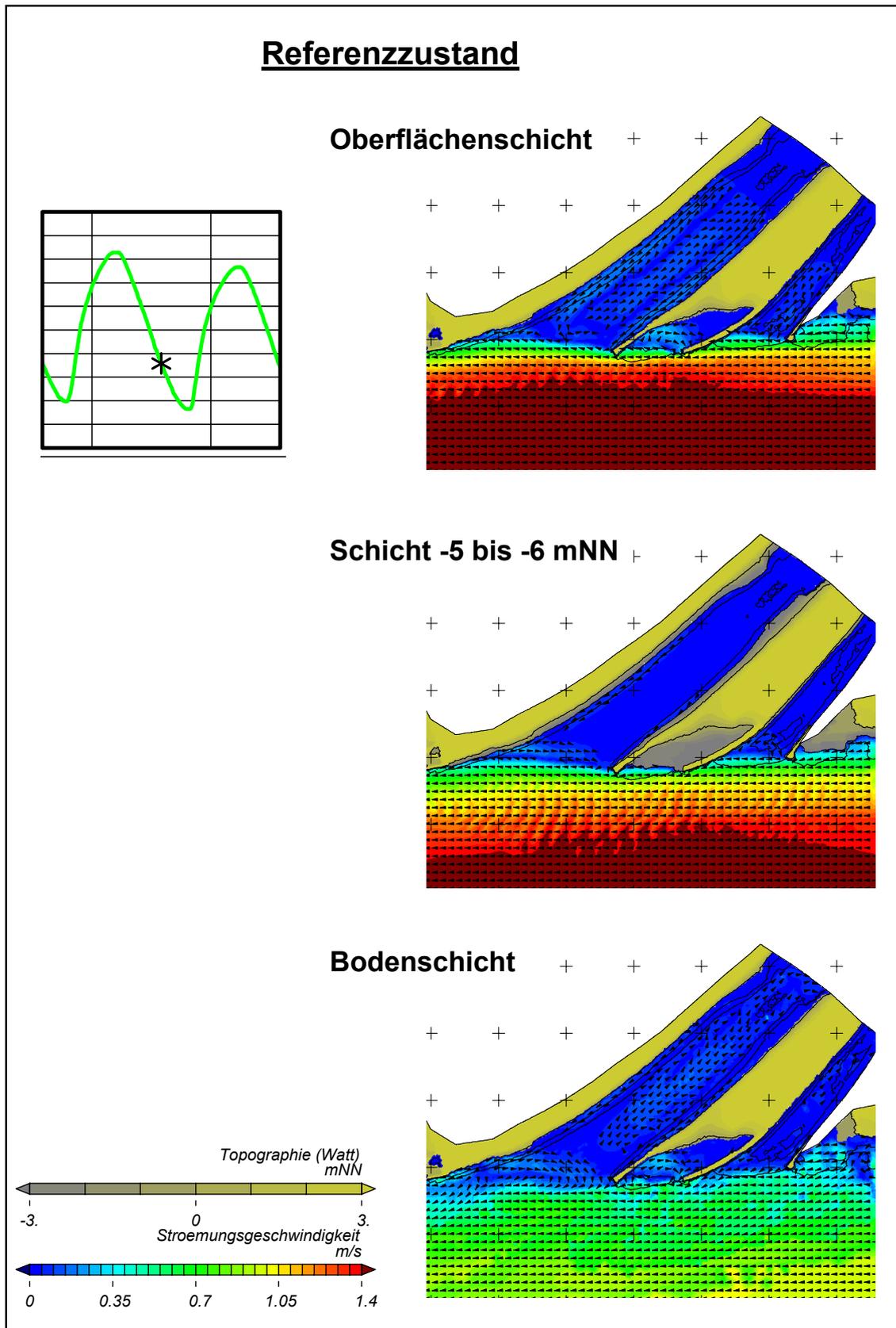


Abb. 17: Simulationsergebnisse (Strömungsgeschwindigkeiten) für den Referenzzustand, Zeitpunkt: 2/3 Tidefall

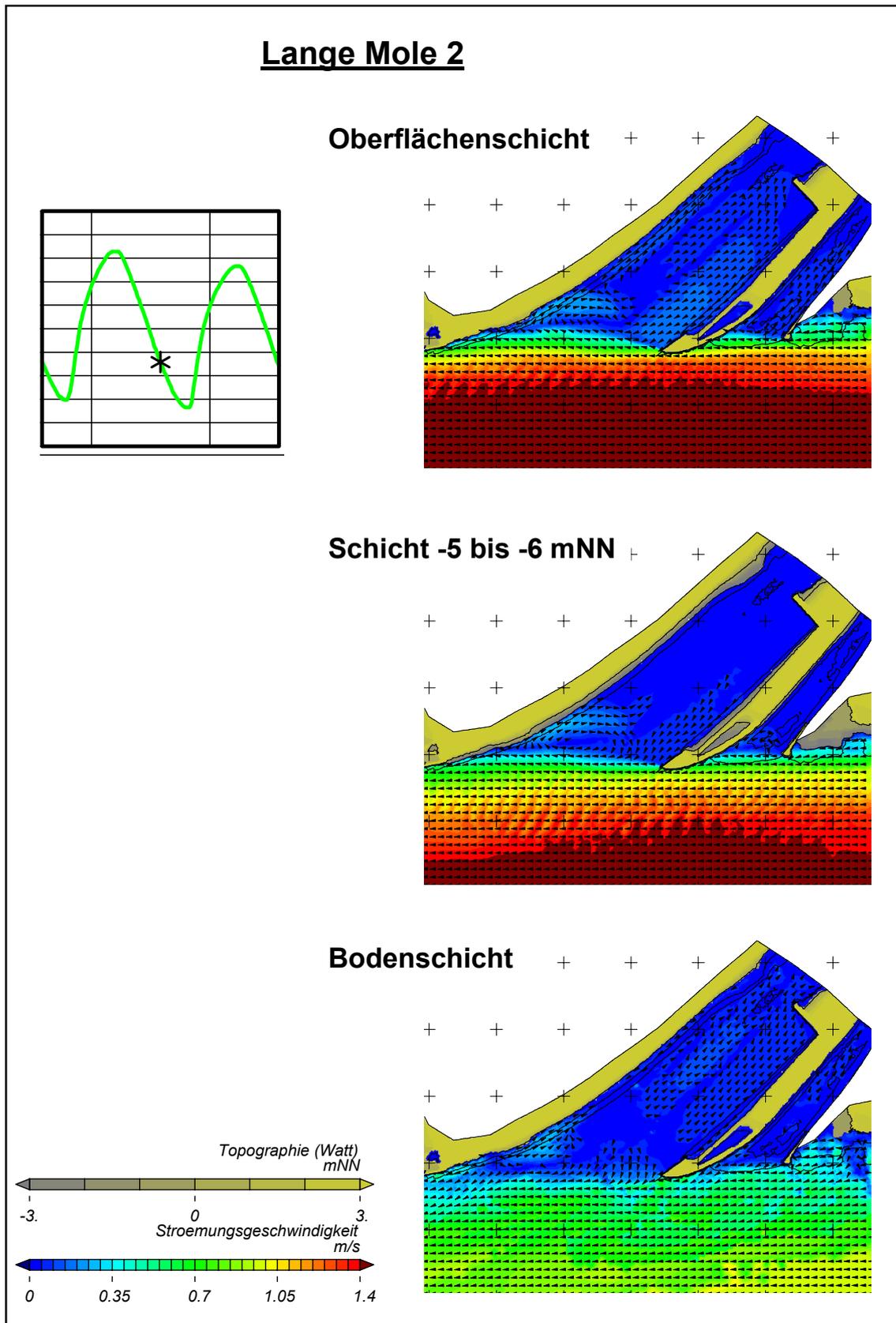


Abb. 18: Simulationsergebnisse (Strömungsgeschwindigkeiten) für den Ausbauzustand „Lange Mole 2“, Zeitpunkt: 2/3 Tidefall (vgl. Abb. 17)

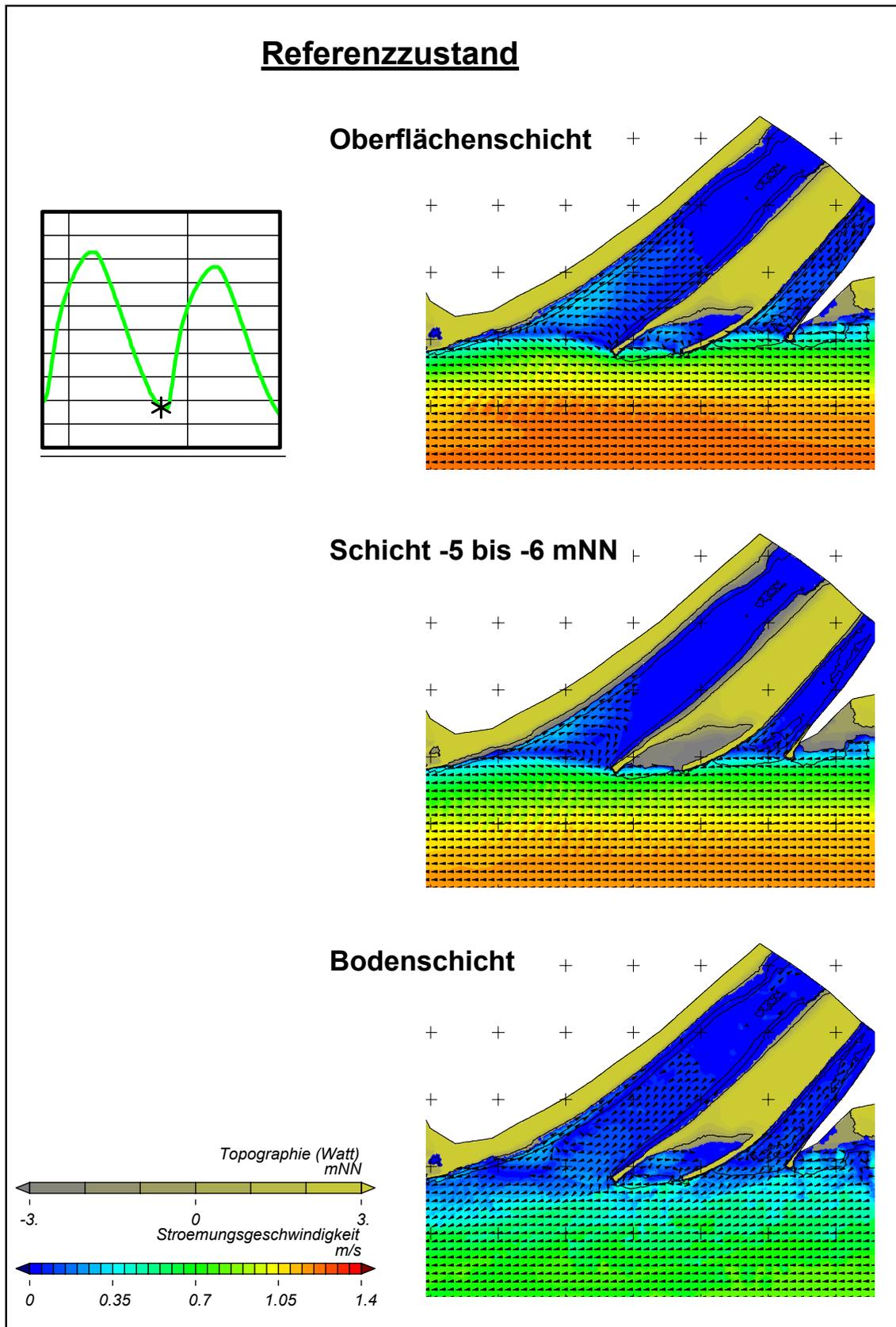


Abb. 19: Simulationsergebnisse (Strömungsgeschwindigkeiten) für den Referenzzustand, Zeitpunkt: Tideniedrigwasser

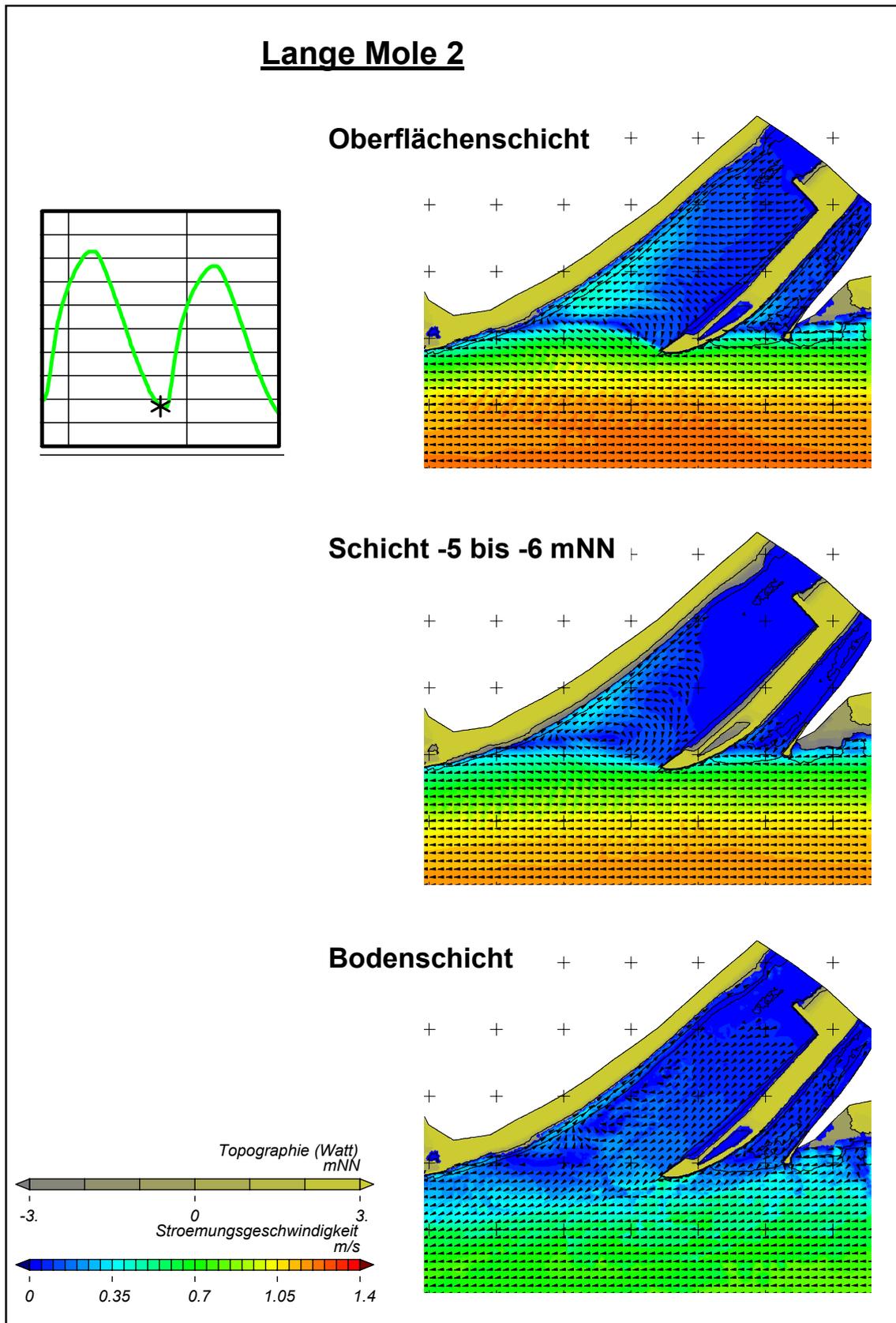


Abb. 20: Simulationsergebnisse (Strömungsgeschwindigkeiten) für den Ausbauzustand „Lange Mole 2“, Zeitpunkt Tideniedrigwasser (vgl. Abb. 19)



6 Schlussfolgerungen

Im Zusammenhang mit dem Bau der fünften Schleusenkammer wird eine Umgestaltung des äußeren Schleusenvorhafens erforderlich. Damit geht eine umfangreiche Vergrößerung des Vorhafens einher, und es ist ein erheblicher Anstieg des Unterhaltungsbedarfs zu erwarten (Abschn. 4.4).

Aus wasserbaulicher Sicht wäre eine Kompensation der neuen Hafentflächen (Teile der bisherigen Schleuseninsel) durch Uferverlegungen an der gegenüberliegenden Seite sinnvoll, um den Anstieg der Baggermengen zu vermeiden oder zu mildern. Dem stehen jedoch die nautischen Interessen, also die Sicherheit und Leichtigkeit des Schiffsverkehrs entgegen. Von kleineren Veränderungen (Länge und Position der Mittel- und Westmole) sind keine wesentlichen Verbesserungseffekte zu erwarten.

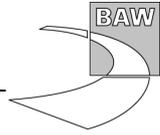
Im Abschnitt 4.4 konnten aus der Literatur vorliegende Angaben zur Abschätzung des zukünftigen Unterhaltungsbedarfs für den Schleusenvorhafen Brunsbüttel genutzt werden, da die Intensität der Sedimentation hauptsächlich von der Größe des Vorhafens abhängt. Im Abschnitt 5.6 wurde mit Hilfe von numerischen Modellsimulationen gezeigt, dass auch die Strömungen sich nicht grundsätzlich ändern, sondern lediglich ihre Intensität durch die Vergrößerung des Vorhafens zunimmt. Eine Veränderung sowohl des Anteils als auch der Intensität des Strömungseffektes wurde im Abschnitt 4.4 aber bereits berücksichtigt. Somit ist eine Korrektur oder weitere Überprüfung des geschätzten Anstiegs der Baggermengen nicht erforderlich, d. h. es müssen

- 40 - 50% Zunahme in der Variante „Großer Versatz der Mole 3“ bzw.
- 50 - 60% Zunahme in der Variante „Lange Mole 2“

angenommen werden.

Hinsichtlich der Verteilung der Sedimentation im Vorhafen waren den Simulationen nur schwache Hinweise auf Veränderungen zu entnehmen (etwas tieferes Vordringen der Füllströmung, kurzzeitig intensivere Walzenbildung). Es ist daher davon auszugehen, dass die erhöhten Sedimentationsmengen sich auf den vergrößerten Hafen in ähnlicher Weise verteilen werden wie bisher. Mit einem wesentlichen Anstieg der mittleren Schwebstoffkonzentrationen ist daher nicht zu rechnen.

Die Unterhaltung des Binnenvorhafens hängt davon ab, wieviel Schwebstoff durch Schleusungsvorgänge aus dem Außenvorhafen eingetragen wird. Da sich die mittleren Schwebstoffgehalte im Außenvorhafen nicht wesentlich ändern werden, ist die binnenseitige Baggermenge von der Anzahl der Schleusungen, und somit von der Zunahme des Schiffsverkehrs und der durchschnittlichen Schleusenbelegung abhängig. Nach Angaben des WSA



Brunsbüttel sind ca. 3% Zunahme des Schiffsverkehrs und etwa 3% größere Abmessungen der 5. Schleusenkammer zu berücksichtigen, so dass durch Schleusungsvorgänge etwa 3-5 % mehr Wasser und Schwebstoffe nach binnen gelangen werden.

Es wird empfohlen, den tatsächlich genutzten nautischen Verkehrsflächenbedarf im Außenvorhafen durch langfristige Beobachtungen zu ermitteln (unter Berücksichtigung nautischer Wechselwirkungen, *bank effect*). Zu einem späteren Zeitpunkt sollte erneut geprüft werden, ob es geeignete Bereiche für eine signifikante Reduzierung des Hafenvolumens und damit des Unterhaltungsumfangs gibt.

Bundesanstalt für Wasserbau – Dienststelle Hamburg
Hamburg, im November 2008

Im Auftrag

Bearbeiter

gez. Rahlf

gez. Vierfuß

Dipl.-Ing. H. Rahlf

Dr.-Ing. U. Vierfuß



7 Literaturverzeichnis

- BAW Versuch mit einer Luftschleieranlage (Pressluftsperr) zur Verminderung der Schlickeintreibung infolge des Dichteeffekts im Vorhafen der Alten Schleuse Brunsbüttelkoog. Gutachten, Sept. 1964
- BAW Vorhäfen Brunsbüttel (Modellversuche), Erläuterungsbericht, April 1976
- BAW Anpassung der Fahrrinne von Unter- und Außenelbe an die Containerschiffahrt: Gutachten zur ausbaubedingten Änderung von Hydrodynamik und Salztransport, BAW-Nr. A3955 03 10062, 2006a
- BAW Anpassung der Fahrrinne von Unter- und Außenelbe an die Containerschiffahrt: Gutachten zur ausbaubedingten Änderung der morphodynamischen Prozesse, BAW-Nr. A3955 03 10062, 2006b
- BAW Untersuchungen zum Hochwasserschutz für die NOK-Schleusen Brunsbüttel. Gutachten, BAW-Nr. A3955 03 10029, 2006c
- BAW Strömungsdaten für die nautische Simulation des Verkehrsflächenbedarfs im Neuen Vorhafen der NOK-Schleusen Brunsbüttel: Referenzzustand und Varianten, Bericht, BAW-Nr. A3955 02 10091, Juli 2008
- MAGENS, C.: Untersuchungen der Ursachen und des Vorgangs der Verschlickung der Schleusenvorhäfen zu Brunsbüttelkoog. Mitt. BAW, Heft 10, Jan. 1958
- von MORGENSTERN, H.: Simulationsstudie: Neubau fünfte Schleusenkammer im Bereich der NOK-Schleusen Brunsbüttel, Abschlussbericht, Projekt: 917 –WSA-2007, 30. Mai 2008
- NASNER, H.: Vorhafengestaltung Schleusen Brunsbüttel – Aufbereitung vorhandener Strömungsmessungen und Durchführung zusätzlicher Messungen in der Elbe für numerische und nautische Simulationen. Bericht erstellt für WSA Brunsbüttel, Bremen, Juli 2007.
- STOSCHEK, O. und GEILS, J.: Maßnahmen zur Minimierung der Sedimentation im Bereich brackwasserbeeinflusster Vorhäfen. BMBF Forschungsvorhaben 03KIS020, Endbericht. Franzius-Institut für Wasserbau und Küsteningenieurwesen, Bericht 649, Mai 2003