

## **REDUKTION DER SEDIMENTATION IN HAFENZUFAHRTEN VON TIDE- HÄFEN – ANWENDUNGSBEISPIEL BREMEN -**

von

Oliver Stoschek<sup>1</sup>  
Jan Geils<sup>2</sup>  
Andreas Matheja<sup>3</sup>  
Claus Zimmermann<sup>4</sup>

### **ABSTRACT**

Sedimentation in harbours at a tidal river cannot be avoided due to tidal effects. But even limited reductions can reduce maintenance dredging costs and in case of contamination also save costs for deposition or processing to avoid environmental hazards. For the main basin (Neustadt Harbour) of the Port of Bremen at the tidal part of the Weser River the hydrodynamic situation was simulated, using the 2D RMA2 model. Exchange of sediment laden water entering the harbour basin could be significantly reduced in critical navigation areas with flow guiding installations or bathymetric changes. Reduction of sedimentation could be verified using the sedimentation module SED2D.

### **1. EINLEITUNG**

Viele Häfen und Anlegestellen befinden sich an Tideflüssen, an denen der Sedimenttransport und die Ablagerungen kohäsiver Feinstdimente und größerer Sandsedimente eine Hauptursache für hohe Unterhaltungskosten darstellen. Ablagerungen von Sedimenten in Häfen können nicht vermieden werden, jedoch durch eine Optimierung der Hafengeometrie, insbesondere im Einfahrtbereich, lassen sich die Sedimentationsraten reduzieren.

---

<sup>1</sup> Dipl.-Ing., FRANZIUS-INSTITUT FÜR WASSERBAU UND KÜSTENINGENIEURWESEN DER UNIVERSITÄT HANNOVER, Nienburger Straße 4, 30167 Hannover

<sup>2</sup> Dipl.-Ing., FRANZIUS-INSTITUT FÜR WASSERBAU UND KÜSTENINGENIEURWESEN DER UNIVERSITÄT HANNOVER, Nienburger Straße 4, 30167 Hannover

<sup>3</sup> Dr.-Ing., FRANZIUS-INSTITUT FÜR WASSERBAU UND KÜSTENINGENIEURWESEN DER UNIVERSITÄT HANNOVER, Nienburger Straße 4, 30167 Hannover

<sup>4</sup> Prof. Dr.-Ing., FRANZIUS-INSTITUT FÜR WASSERBAU UND KÜSTENINGENIEURWESEN DER UNIVERSITÄT HANNOVER, Nienburger Straße 4, 30167 Hannover

Die Unterhaltungsbaggerungen im Neustädter Hafen machen ca. 30% des in den stadtbremischen Häfen sedimentierten Materials aus. Das Baggergut wird seit 1994 auf der Baggergutdeponie Seehausen gelagert. Die Untersuchungen wurden vom Hansestadt Bremischen Hafenamts beauftragt und erlauben eine Beurteilung der Effizienz verschiedener Baumaßnahmen im Einfahrtbereich des Neustädter Hafens (Abb. 1).

Eine Minimierung der Sedimentationsmengen soll durch eine „aktive“ Beeinflussung der Strömungsverhältnisse erreicht werden. Beispielhaft werden in diesem Beitrag daher zwei Handlungsalternativen ausführlicher dargestellt.

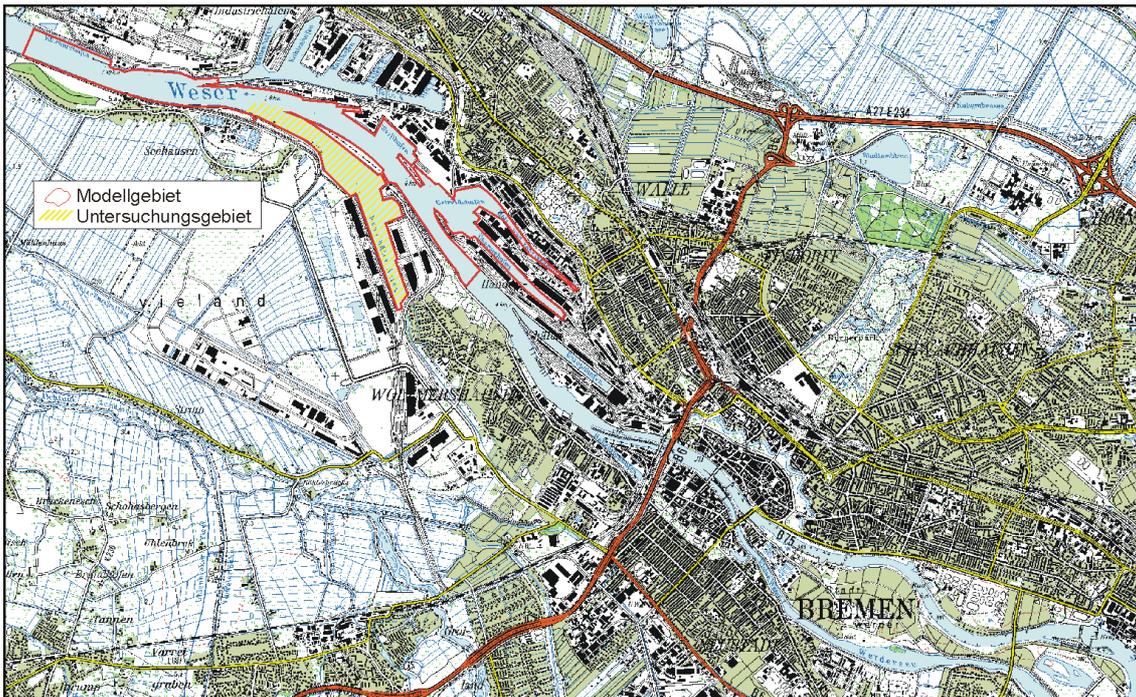


Abb. 1: Stadtbremische Häfen – Neustädter Hafen (HAFENAMT BREMEN, 1996)

## 2. PROBLEMANALYSE FÜR DAS ANWENDUNGSBEISPIEL „HAFENGRUPPE BREMEN STADT“

Die Ursachen für die großen Baggermengen in den tidebeeinflussten stadtbremischen Häfen liegen in den in der Weser mitgeführten Sedimenten, die einerseits durch die vorhandene Tidebewegung bzw. die im Einfahrtbereich sich ausbildenden strömungsinduzierten Walzen eingetragen werden und sich dort absetzen (Abb. 2).

Im Neustädter Hafen lagern sich im Jahr bis zu 350.000 m<sup>3</sup> Sediment ab. Die Sedimentablagerungen sind unterschiedlich über die Fläche des Neustädter Hafens verteilt und erreichen eine maximale Höhe von rd. 200 cm/a (Abb. 6). Im markierten Bereich liegen die Sedimentationshöhen zwischen 50 cm und 150 cm pro Jahr.

Zur Beschreibung der Strömungs- und Sedimentationsvorgänge im Untersuchungsgebiet Neustädter Hafen wurde ein umgebendes Modellgebiet definiert (Abb. 1, Abb. 2). Die den Simulationen zugrundeliegenden Randbedingungen (Abb. 3) sind aus Natur-

messungen (Wasserstände, Durchflüsse, Sedimentationsraten, sedimentologische Parameter) abgeleitet worden.

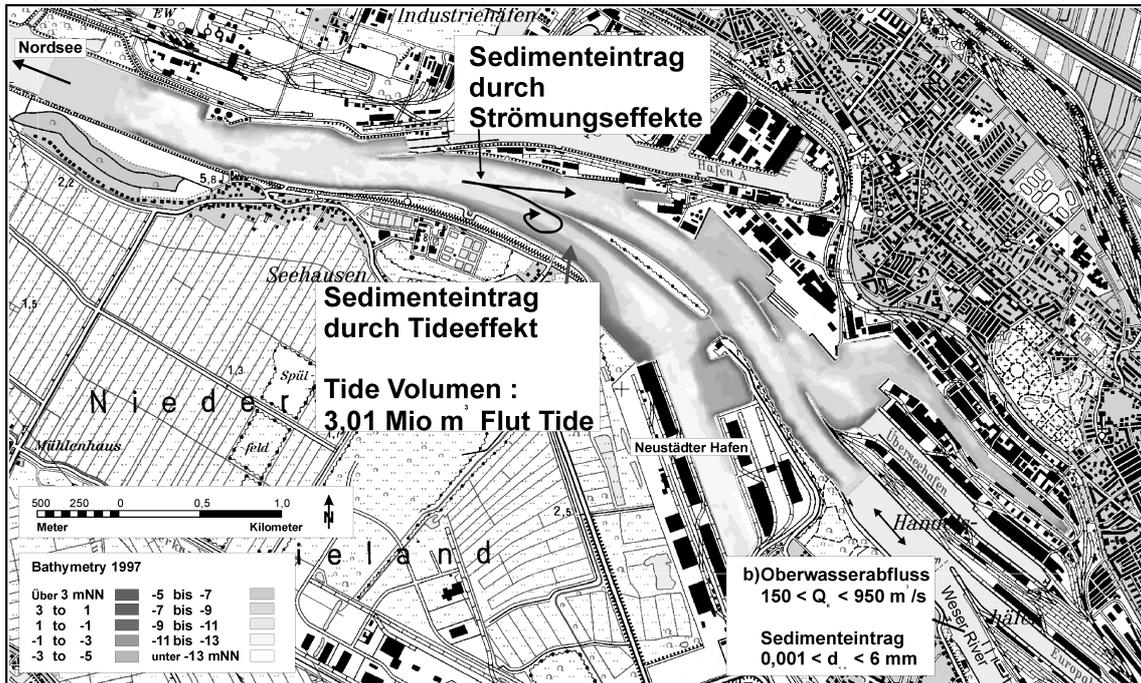


Abb. 2: Modellbathymetrie des Neustädter Hafens

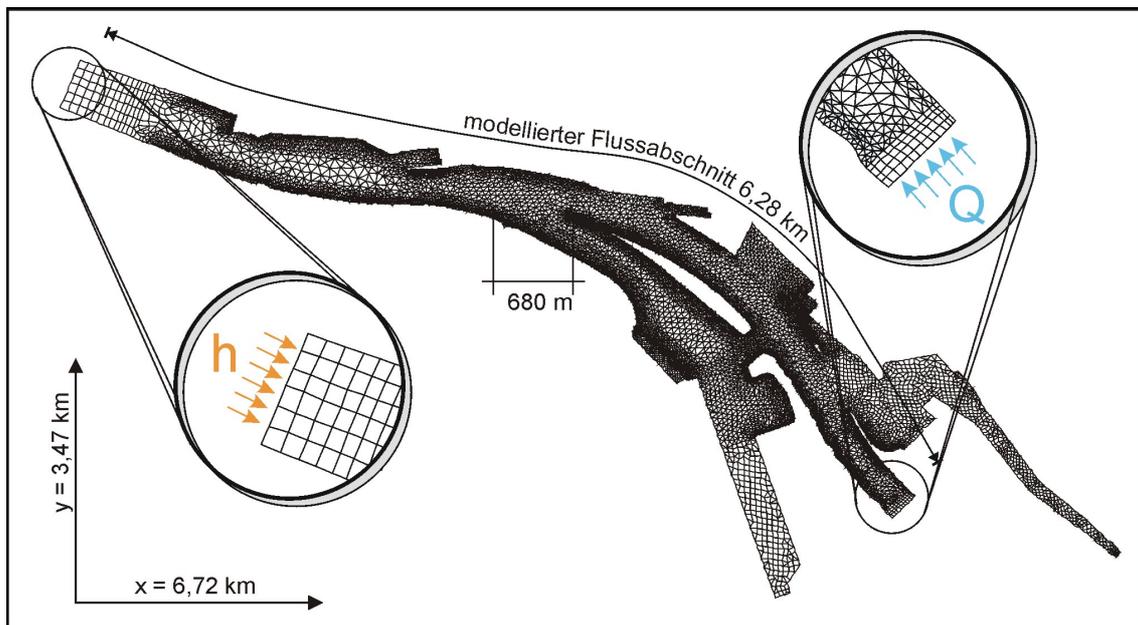


Abb. 3: Netztopologie, Randbedingungen und Modellabmessungen

### 3. KALIBRIERUNG UND VALIDIERUNG DER NUMERISCHEN MODELLE

Für die Kalibrierung des hydrodynamischen Modells wurden Pegelaufzeichnungen des Pegels Oslebshausen (Unterweser-km 8,4) und Strömungsmessungen in der Weser (Wasserstände und Strömungsgeschwindigkeiten in Betrag und Richtung im Zeitraum

17.03.1990 6<sup>00</sup> Uhr bis 18.03.1990 15<sup>00</sup> Uhr) verwendet. Während des Kontrollzeitraumes lag der Oberwasserabfluss der Weser (Pegel Intschede) bei  $Q = 485$  bis  $535 \text{ m}^3/\text{s}$  und damit im Bereich von  $WiMQ_{(1941-1990)} = 426 \text{ m}^3/\text{s}$  (Mittelwasser-Kalibrierung).

Die Kalibrierung des hydrodynamischen Modells im Hinblick auf einen naturähnlichen Tideablauf erfolgte nach den Tidewasserständen, den Eintrittszeiten der Scheitelwerte der Tiden und den gemessenen Strömungsgeschwindigkeiten bzw. -richtungen. Um im numerischen Modell dem o.a. Sollzustand nahe zu kommen, mussten schrittweise eine Veränderung der Rauigkeiten für verschiedene Wassertiefen und eine Modifizierung der Peclet-Zahl (Turbulenzmodellierung) vorgenommen werden, um eine hinreichende Übereinstimmung (Abweichung bis rd.  $\pm 2 \text{ cm}$ ) zu erreichen. Um die Naturähnlichkeit des Ein- und Ausschwingens der Tidewelle zu überprüfen, wurden die Differenzen der Pegelstände zwischen Sollzustand und Modellzustand am Pegel Oslebshausen verglichen (Abb. 4). Abweichungen über  $\pm 2 \text{ cm}$  lassen sich nur im Bereich der steil ansteigenden Flutäste erkennen (17.03.90 13<sup>45</sup> -15<sup>00</sup> und 18.03.90 02<sup>15</sup>-02<sup>45</sup> :  $\pm 5 \text{ cm}$ ), was auf Differenzen beim Digitalisieren der Tidekurven zurückzuführen ist. Die Scheitelwerte der Tiden sind mit einer Genauigkeit von weniger als  $\pm 1 \text{ cm}$  berechnet worden. Eine Verschiebung der Eintrittszeiten der Scheitelwasserstände ist nicht erkennbar. Die im Modell ermittelten Wasserstände bilden die am Pegel Oslebshausen aufgetretenen natürlichen Verhältnisse sehr gut ab.

Außerdem standen zwei Punktmessungen (Unterweser-km 5,75 und 7,5) mit Strömungsgeschwindigkeiten in Betrag und Richtung zur Verfügung. Um auch hier die Naturähnlichkeit des Ein- und Ausschwingens der Tidewelle zu überprüfen, wurden die Eintrittszeiten der Geschwindigkeitsänderungen, die Beträge der Strömungsgeschwindigkeiten und deren Richtung verglichen. Die Geschwindigkeitsdifferenzen an den Messstellen bewegen sich innerhalb von  $\pm 5 \text{ cm/s}$ . Nur bei sehr niedrigen Geschwindigkeiten lassen sich größere Abweichungen feststellen, die auf Messungenauigkeiten und in geringem Maße auf numerische Inkonsistenzen zurückzuführen sind. Die Strömungsrichtungen weichen während kurzer Tidephasen von den gemessenen Richtungen ab, da bei niedrigen Strömungsgeschwindigkeiten die Trägheit der eingesetzten Messgeräte die Messung der Strömungsrichtungen beeinflusst.

Im Rahmen der Kalibrierung sind für die Eichparameter Sohlrauigkeit (tiefenabhängige MANNING-Beiwerte) und Pecletzahl (Beschreibung des Turbulenzzustandes) die in Tab. 1 dargestellten Werte bestimmt worden.

| Gebiet   | Pecletzahl [-] | Manning-Zahl für $h < 2 \text{ m}$ [-] | Manning-Zahl für $h > 2 \text{ m}$ [-] |
|----------|----------------|--|--|
| Fluss    | 20             | 0,030                                  | 0,030                                  |
| Hafen    | 20             | 0,030                                  | 0,025                                  |
| Böschung | 20             | 0,040                                  | 0,035                                  |

Tab. 1: Ermittelte Modellparameter für Sohlrauheit und Pecletzahl

Die Verifizierung der Strömungsgeschwindigkeiten erfolgte über den Vergleich mit Ergebnissen eines physikalischen Modells mit den korrespondierenden Zeitschritten des numerischen Modells (beispielhaft in Abb. 5). Bei im physikalischen Modell leicht abweichenden Bathymetrien sind hier ähnliche Walzenstrukturen in gleichen Tidephasen wiederzuerkennen.

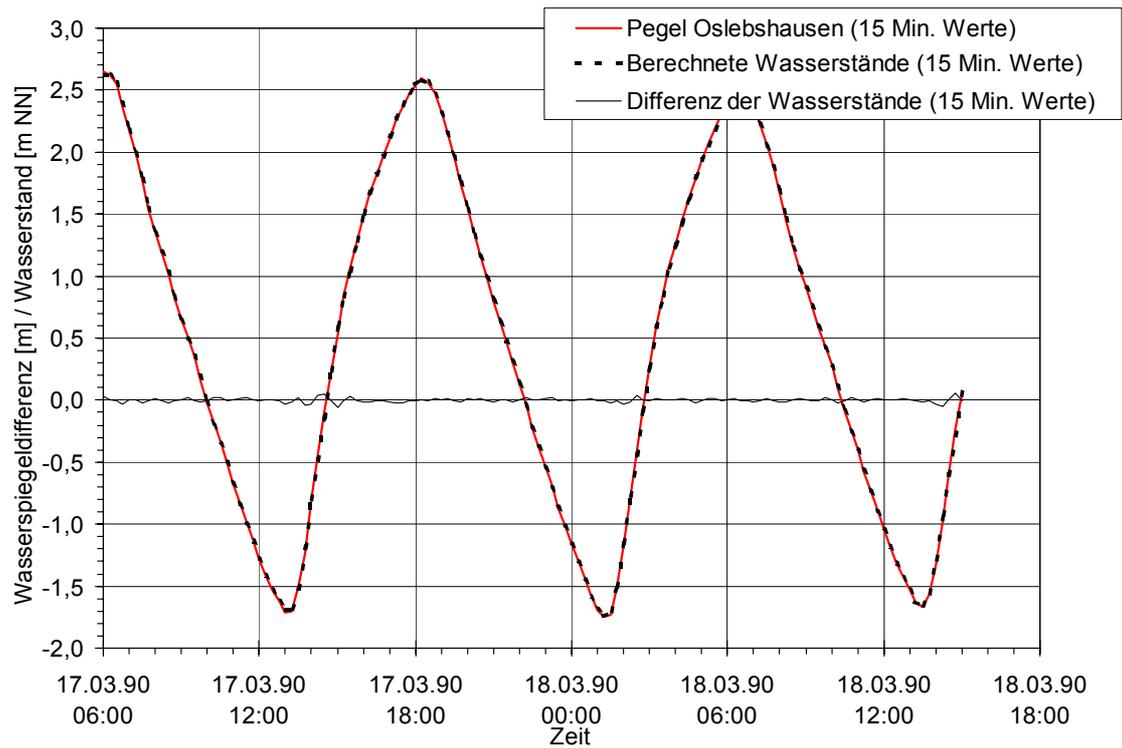


Abb. 4: Differenz zwischen den gemessenen und berechneten Wasserständen am Pegel Oslebshausen im Kalibrierzeitraum

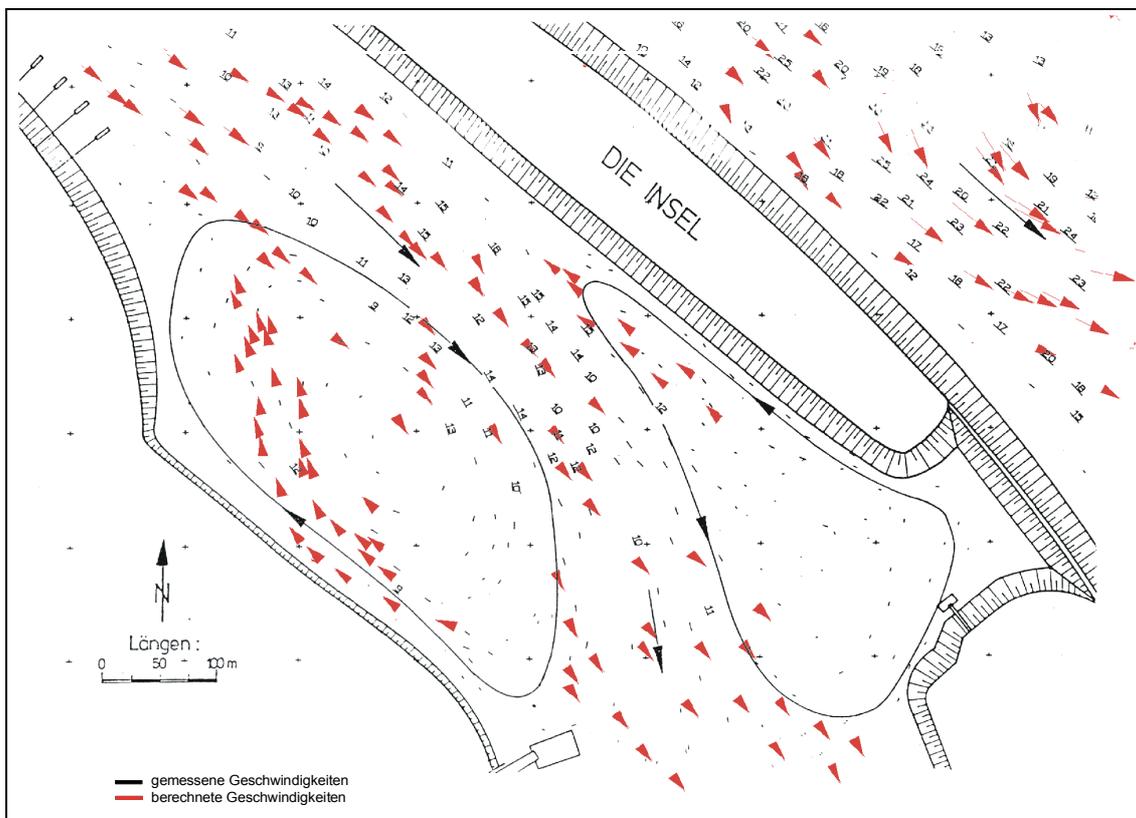


Abb. 5: Vergleich der Strömungsrichtungen mit einem physikalischen Modell (nach 3,0 h Modelltide 1989) [FRANZIUS – INSTITUT, 1989]

Für das Sedimenttransportmodell wurden die Untersuchungen von NASNER [1992, 1997] ausgewertet (beispielhaft in Abb. 6). Die Kalibrierung und Validierung des Sedimenttransportmodells ist in STOSCHEK & MATHEJA [2001] beschrieben.

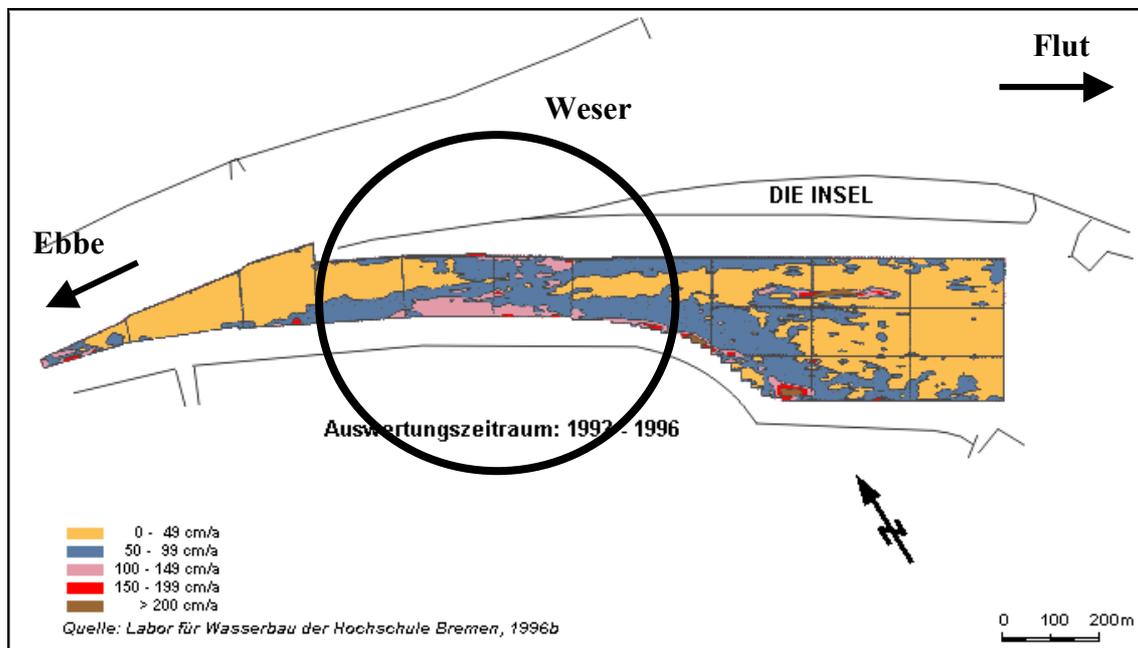


Abb. 6: Sedimentationshöhen im Neustädter Hafen [NASNER, 1997]

#### 4. UNTERSUCHUNG VON STRÖMUNGSZUSTÄNDEN FÜR AUSGANGSZUSTAND UND HANDLUNGALTERNATIVEN

Für die Untersuchung der Sedimentationsverhältnisse wurde die im langjährigen Mittel auftretende Abflussganglinie am Pegel Intschede analysiert und in vier Abschnitte mit unterschiedlichen Durchflüssen (Abschnitt IV: 0-200 m<sup>3</sup>/s, Abschnitt III: 200-500 m<sup>3</sup>/s, Abschnitt II: 500-800 m<sup>3</sup>/s, Abschnitt I: 800-1200 m<sup>3</sup>/s) unterteilt. Innerhalb dieser Abschnitte wurden charakteristische Abflüsse ( $Q_{IV}=150$  m<sup>3</sup>/s,  $Q_{III}=350$  m<sup>3</sup>/s,  $Q_{II}=650$  m<sup>3</sup>/s,  $Q_I=950$  m<sup>3</sup>/s) definiert. Durch Ansatz der maßgeblichen Abflüsse mit ihren im langjährigen Mittel auftretenden Widerkehrintervallen können die zu untersuchenden Handlungsalternativen bzgl. der zu erwartenden Sedimentationsraten in ihrer Größenordnung nachvollzogen werden.

Für die Erarbeitung von Maßnahmen wurden verschiedene Handlungsalternativen (beispielhaft in Abb. 7) untersucht und mit dem Ausgangszustand (Stand 1997) verglichen.

Die sich im Ausgangszustand einstellenden Strömungsverhältnisse (beispielhaft für Ebbestrom nach 4h Simulationszeit und Flutstrom nach 9,5h Simulationszeit in Abb. 8) zeigen deutlich den sich bei Ebbestrom einstellenden gleichförmigen Strömungszustand, der während der gesamten Ebbestromphase nur wenig variiert.

Während des Flutstroms wird die Strömung durch die an die „Insel“ angrenzende Spundwand teilweise in den Neustädter Hafen umgeleitet, wodurch im Einfahrtsbereich eine langgestreckte Walzenströmung induziert wird. Bei steigendem Tidewasserstand (Abnahme der Flutstromintensität) verkleinert sich diese Walze.

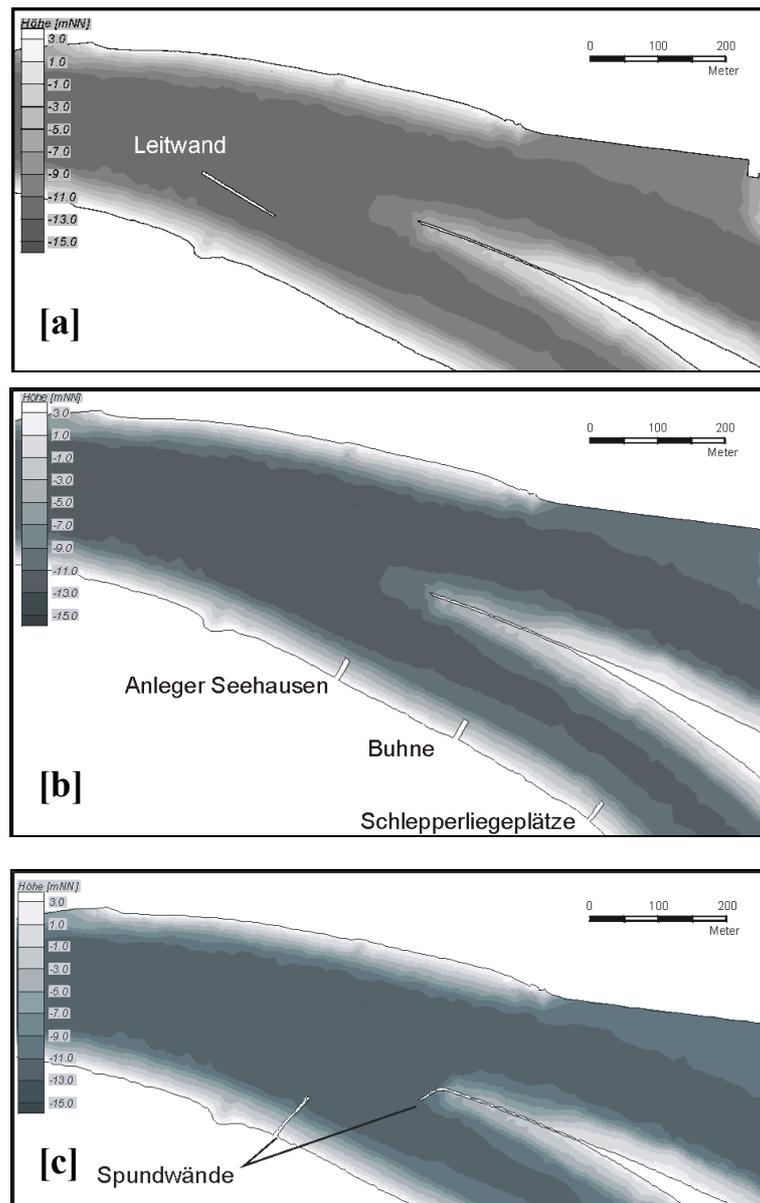


Abb. 7: Handlungsalternativen für die Reduzierung von Sedimentationen im Neustädter Hafen ([a] Leitwand in der Einfahrt, [b] Bühnen am Südufer, [c] Verengte Hafeneinfahrt)

Bei der Handlungsalternative „Bühnen am Südufer“ (Abb. 9) wird die Strömung während der Ebbestromphase stärker auf die Fahrrinnenmitte konzentriert. Dies führt in Fahrrinnenmitte zu einer Erhöhung der Strömungsgeschwindigkeiten um ca. 0,1 m/s. Zwischen den am Seehausener Ufer angeordneten Bühnen kommt es zu einer Beruhigung, was langfristig zu einer Aufhöhung dieser Bereiche führen würde.

Zu Beginn der Flutstromphase stellt sich die auch im Ausgangszustand sichtbare Primärwalze in der Hafeneinfahrt ein. Durch die Bühnen wird die Walze zwischen dem Anleger der Kläranlage Seehausen und der Bühne am Seehausener Ufer fixiert. Die Rückströmungsgeschwindigkeiten am Seehausener Ufer fallen von ca. 0,25 m/s im Ausgangszustand auf ca. 0,1 m/s ab. Nach 10 h (Simulationszeit) ist die Walze nicht

mehr sichtbar. Zwischen den Buhnen am Seehausener Ufer entsteht eine Stillwasserzone in der verstärkt Sedimentationen auftreten würden.

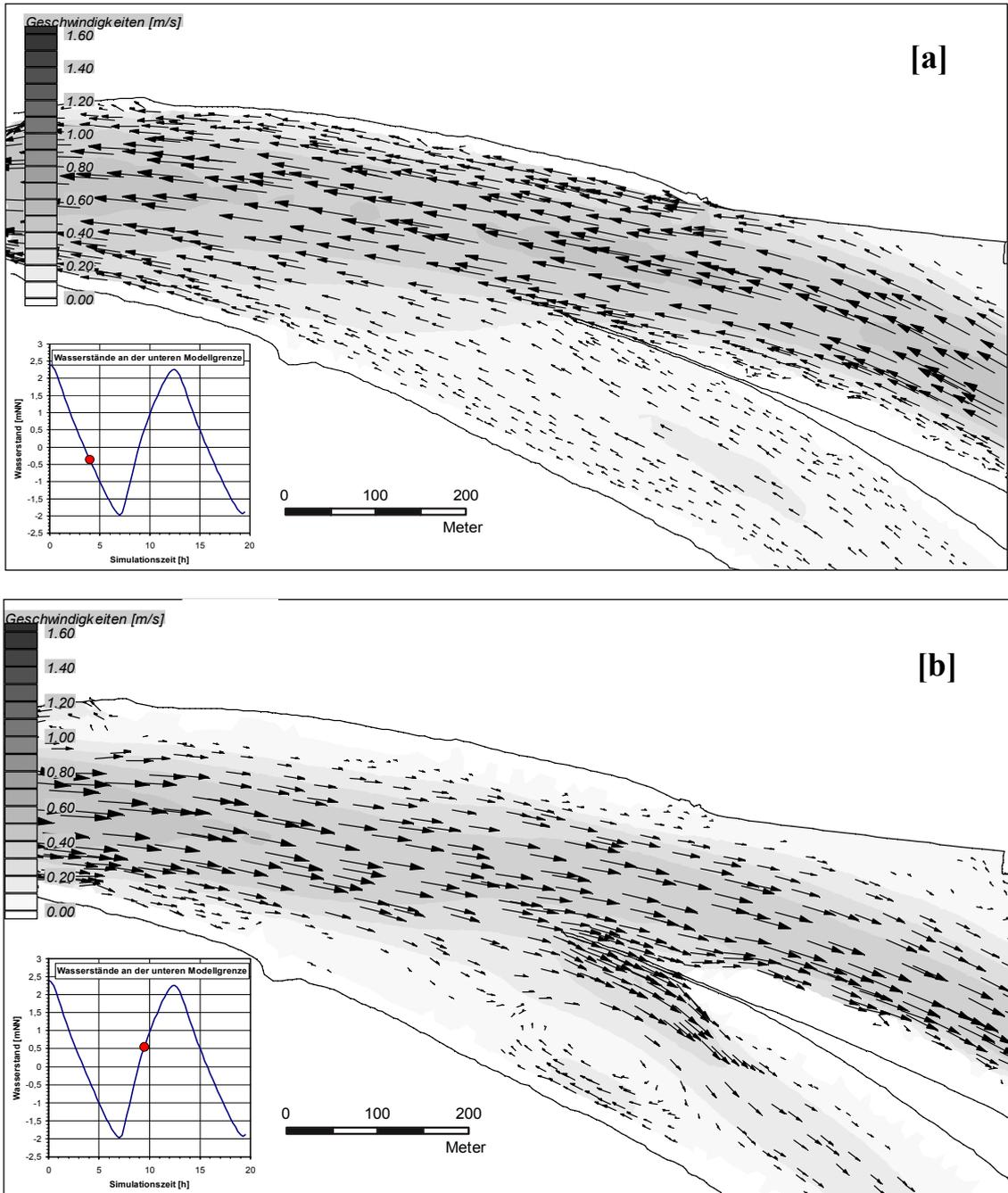


Abb. 8: Strömungsgeschwindigkeiten im Ausgangszustand ( $Q_I=150\text{m}^3/\text{s}$ )  
([a]Ebbestrom nach 4h Simulationszeit, [b]Flutstrom nach 9,5h Simulationszeit)

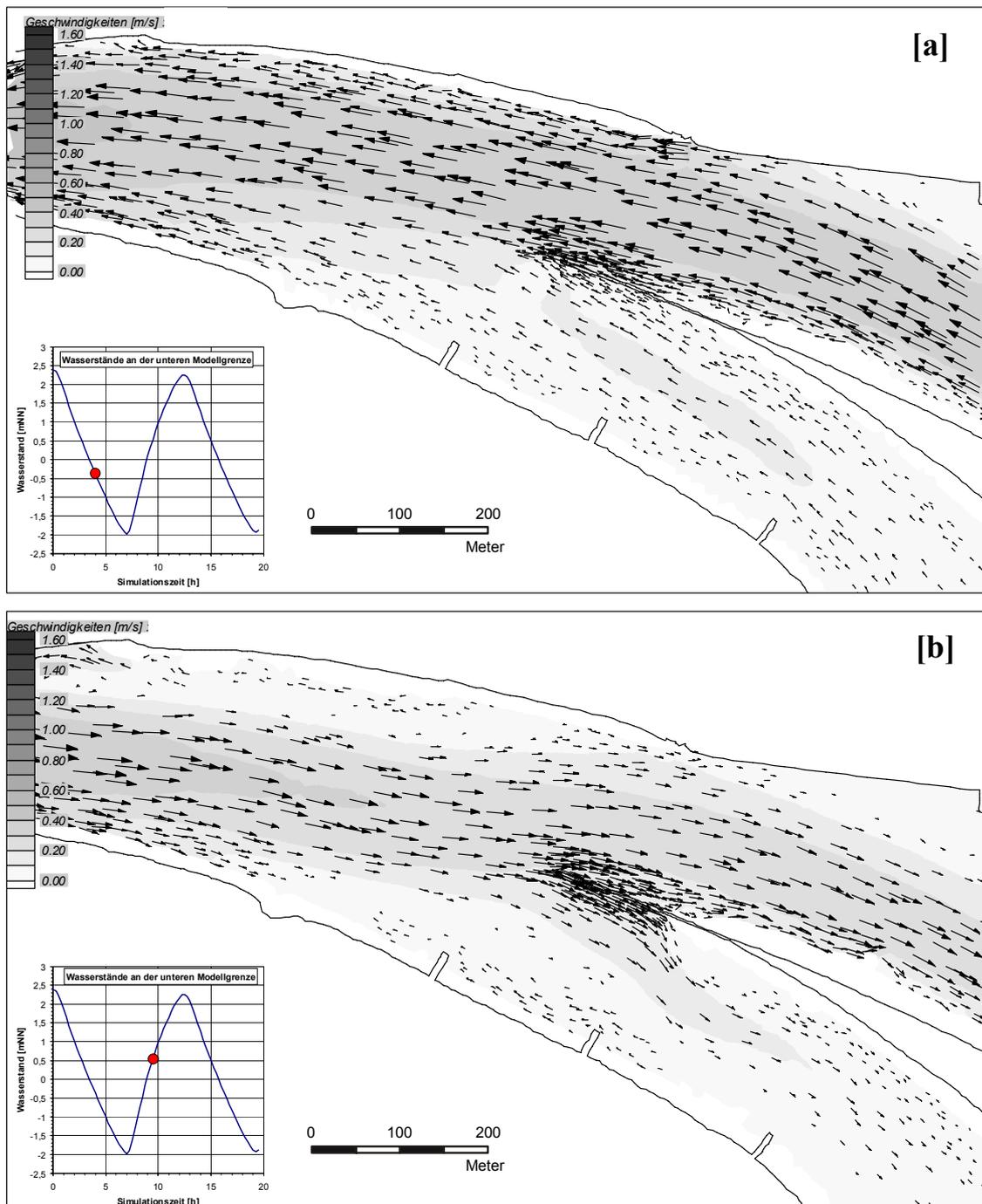


Abb. 9: Strömungsgeschwindigkeiten in der Alternative „Buhnen am Südufer“  
 ( $Q_I=150\text{m}^3/\text{s}$ ) ([a]Ebbestrom nach 4h Simulationszeit, [b]Flutstrom nach 9,5h Simulationszeit)

Die Ebbeströmung aus dem Neustädter Hafen wird aus der Handlungsalternative „Verengte Hafeneinfahrt“ (Abb. 10) zwischen der Spundwand am Seehausener Ufer und der Spundwand an der Insel eingengt. Dabei entwickelt sich eine kleine Walzenströmung vor der Spundwand am Rand des Weserfahrwassers. Die notwendige Leerung des Neustädter Hafens während der Ebbestromphase wird nicht wesentlich durch die vorgesehene Einengung der Hafenzufahrt behindert.

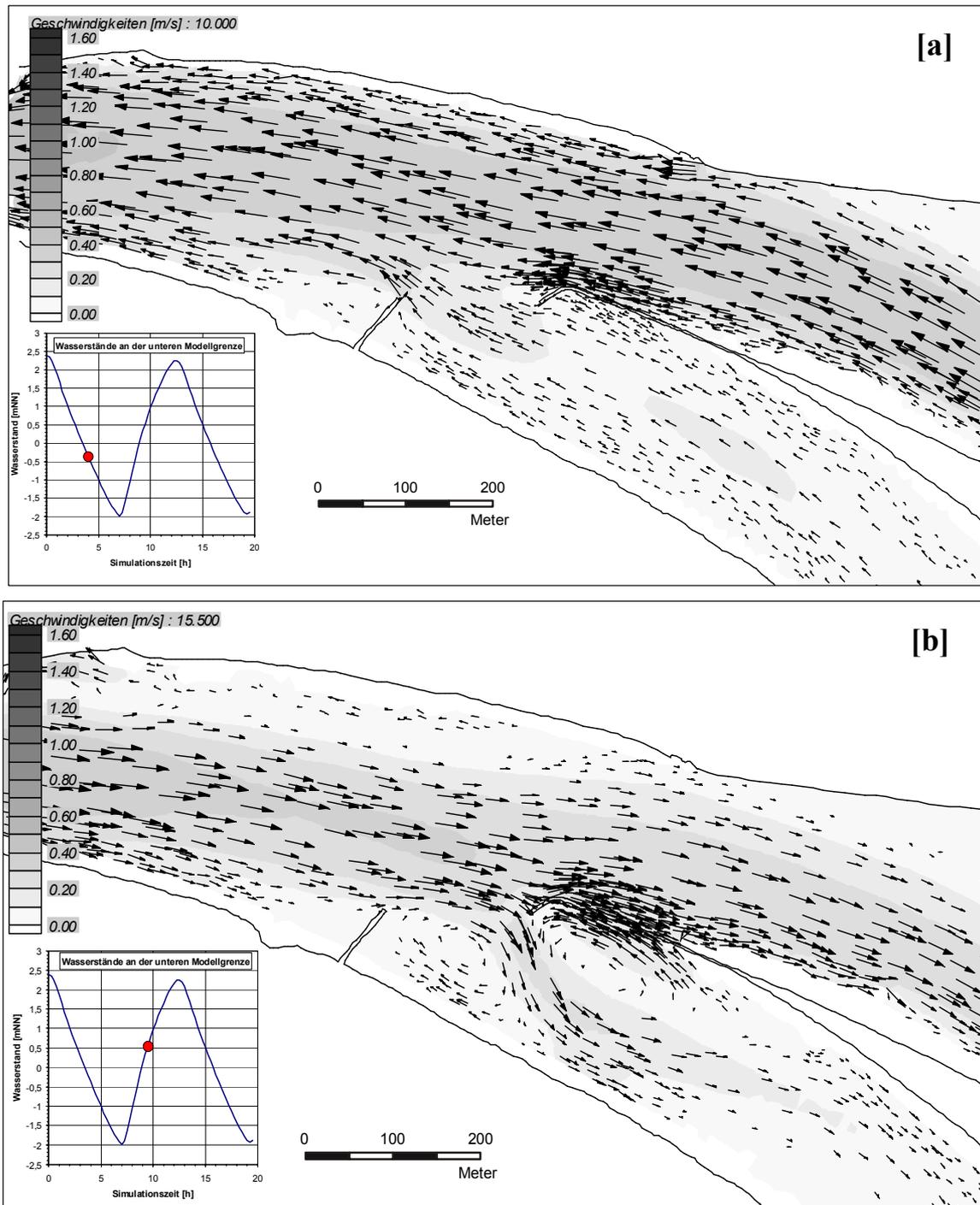


Abb.10: Strömungsgeschwindigkeiten in der Alternative „Verengte Hafeneinfahrt“ ( $Q_I=150\text{m}^3/\text{s}$ ) ([a]Ebbestrom nach 4h Simulationszeit, [b]Flutstrom nach 9,5h Simulationszeit)

Nach der Strömungsumkehrung bilden sich zunächst Walzen am Seehausener Ufer beiderseits der Spundwand und an der Insel entlang der Spundwand aus. Mit zunehmender Flutdauer wird die Walze vor der Spundwand am Seehausener Ufer am Rand der Weser aufgelöst (Abb. 10).

## 5. UNTERSUCHUNGEN ZUM SEDIMENTTRANSPORT FÜR AUSGANGSZUSTAND UND HANDLUNGALTERNATIVEN

Die Korngrößen und -verteilungen im Modellgebiet wurden aus Bodendreiecken (NASNER, 1997), Körnungslinien und Siebkornanalysen der Fahrwassersohle ermittelt. Dabei lässt sich eine deutliche Trennung in Schluff (Schwebstoff) und Sand erkennen. Damit lassen sich im Bereich der stadtbremischen Häfen die Transportmechanismen Sandtransport (Fraktion 1: Feinsand mit  $d_{\text{Sand}} = 0,1 \text{ mm}$ ) und Schwebstofftransport (Fraktion 2: Grobschluff mit  $d_{\text{Schluff}} = 0,018 \text{ mm}$ ) identifizieren (Tab. 2).

Tab. 2: Sedimenteintrag für Fraktion 1 und Fraktion 2 am oberen Modellrand in Abhängigkeit vom Oberwasserzufluss

| d <sub>50</sub><br>[mm] | Sedimenteintrag c <sub>s</sub> [kg/m <sup>3</sup> ]<br>(abhängig vom Oberwasserzufluss) |                       |                       |                       | d <sub>50</sub><br>[mm] | Sedimenteintrag c <sub>s</sub> [kg/m <sup>3</sup> ]<br>(50% des Gesamtschwebstoffanteils) |                       |                       |                       |
|-------------------------|---|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-------------------------|---|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
|                         | 150 m <sup>3</sup> /s   | 350 m <sup>3</sup> /s | 650 m <sup>3</sup> /s | 950 m <sup>3</sup> /s |                         | 150 m <sup>3</sup> /s   | 350 m <sup>3</sup> /s | 650 m <sup>3</sup> /s | 950 m <sup>3</sup> /s |
| 0,100                   | 0,008   | 0,011                 | 0,016                 | 0,020                 | 0,018                   | 0,01  | 0,02                  | 0,04                  | 0,06                  |

Für die charakteristischen Kornfraktionen wurden mit Hilfe der maßgebenden Abflüsse die Sedimentationsraten für die im jeweiligen Fall anzusetzende Modelltide berechnet. Für die weiteren Untersuchungen und zur Beurteilung der Wirksamkeit der Maßnahmen wurde das Gebiet des Neustädter Hafens in drei Bereiche unterteilt (Abb. 11).

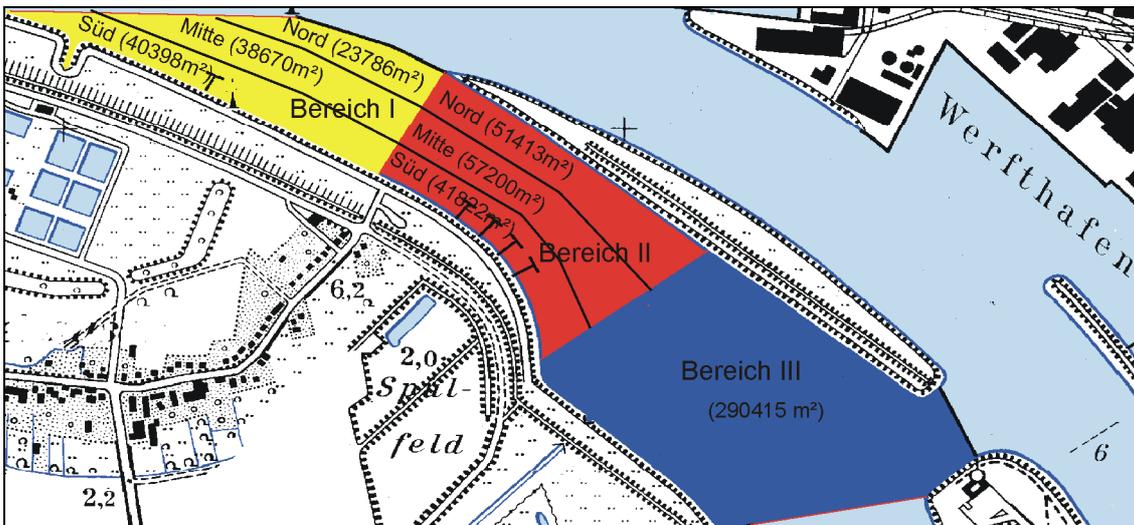


Abb.11: Bereichseinteilung im Untersuchungsgebiet für die Sedimentationsanalyse

Für den Ausgangszustand wurden die berechneten Volumenänderungen zu 100% angenommen (Tab. 3). Zu erkennen ist die Abnahme der Sandsedimentationsmengen in der Hafenzufahrt nach einer Tide bei steigenden Durchflussmengen und somit bei steigenden Randkonzentrationen. Die kürzere und weniger intensive Flutstromphase bei höheren Abflüssen hat somit einen stärkeren Einfluss auf die Sedimentationsmengen als die erhöhten Sandkonzentrationen infolge des erhöhten Oberwassers. Die größten Mengen befinden sich im Bereich I in der Mitte der Zufahrt zum Neustädter Hafen und an den Böschungen. Im Bereich III befindet sich nur sehr wenig Sand. Die Fraktion 2 (Schluff)

sedimentiert verstärkt im Hafenkanal. Die Sedimentationsmengen nach einer Tide für die Fraktion 2 nehmen mit steigendem Oberwasserabfluss zu.

Tab. 3: Berechnete Sedimentationshöhen und –mengen nach Ablauf des Untersuchungsjahres im Ausgangszustand

| Bereich |       | Höhe [m/Tide] |         | Volumen [m <sup>3</sup> /Tide] |         |
|---------|-------|---------------|---------|--------------------------------|---------|
|         |       | Sand          | Schluff | Sand                           | Schluff |
| I       | Nord  | 0,12765       | 0,50478 | 3036                           | 12007   |
|         | Mitte | 0,14013       | 0,66019 | 5419                           | 25529   |
|         | Süd   | 0,04402       | 0,57967 | 1778                           | 23417   |
| II      | Nord  | 0,01478       | 0,55146 | 760                            | 28352   |
|         | Mitte | 0,02822       | 0,62560 | 1614                           | 35784   |
|         | Süd   | 0,00969       | 0,54820 | 405                            | 22927   |
| III     |       | 0,00553       | 0,36127 | 1606                           | 104918  |
| Summe:  |       |               |         | 14618                          | 252935  |

Maßgebenden Einfluss auf diesen Anstieg hat die zunehmende Schwebstoffkonzentration und somit auch die zunehmende Schwebstofffracht. Das erhöhte Wasservolumen vergrößert aufgrund der erhöhten Wasserstände ebenfalls das Sedimentationsvolumen. Die größten Sedimentationsmengen befinden sich im Bereich der Fahrrinne in der Zufahrt zum Neustädter Hafen. Im Bereich III (Wendebecken) findet sich das größte sedimentierte Volumen der Fraktion 2. Die Sedimentationshöhe der Fraktion 2 im Bereich III ist jedoch gering.

Die Ergebnisse nach dem Bau von „Buhnen am Südufer“ sind in Tab. 4 zusammengefasst. Änderungen der Sedimentationsraten, die zu einer Verminderung der Sedimentation führen, sind in den Tafeln negativ dargestellt. Für die Fraktion 1 zeigte sich nahezu keine Veränderung der Sedimentationsraten. Im Rahmen der getroffenen Annahmen und Vereinfachungen ist daher davon auszugehen, dass diese Handlungsalternative keine Veränderungen nach sich ziehen wird, sofern die ufernahen Bereiche zwischen den einzelnen Buhnen auch langfristig abflusswirksam bleiben. Ein Sandeintrag in den Vorhafenbereich findet aufgrund der vorhandenen Strömungsgeschwindigkeiten nicht oder nur in geringem Maße statt. Die kritische Geschwindigkeit der Fraktion 1, überschläglich ermittelt aus der „Hjulström“-Kurve, liegt bei ca. 0,16 m/s. Die mittlere Geschwindigkeit in der Fahrrinnenmitte im Bereich der Zufahrt zum Neustädter Hafen bzw. im Bereich des Vorhafens liegt bei 0,1 m/s und damit deutlich unterhalb der kritischen Geschwindigkeit. Nur während kurzer Tidephasen übersteigt die Strömungsgeschwindigkeit den kritischen Wert. Ein Sandeintrag durch den Vorhafenbereich in das Wendebecken des Neustädter Hafens ist daher nahezu ausgeschlossen, was durch die im Zuge der Unterhaltungsmaßnahmen gemachten Beobachtungen bestätigt wird. Die Hauptsedimentationsbereiche befinden sich, wie bereits im Ausgangszustand beschrieben, in der Mitte und an den Seiten des Bereiches I (Einfahrt). Diese Handlungsalternative konnte daher im Falle der Fraktion 1 zu keiner „messbaren“ Minimierung der Sedimentationen beitragen, da a priori nur minimale Mengen dieser Fraktion in den Bereich des Vorhafens bzw. in das dahinterliegende Wendebecken gelangen können. Für die Fraktion 2 ergibt sich am nördlichen Rand des Bereiches I eine Verminderung der Sedimentationsraten von ca. 8 % bei niedrigen Abflüssen. Am südlichen Rand des Be-

reiches I findet aufgrund der eingebauten Buhnen eine erhöhte Sedimentation statt. Diese verstärkte Ablagerung findet hauptsächlich vor der ersten Buhne (Anleger Schlammladeanlage Seehausen) statt. Die Erhöhung der Sedimentationsmenge im Bereich der Buhnen nimmt bei steigendem Oberwasserabfluss weiter zu. Eine Abnahme der Sedimentationsmengen im Bereich II findet ebenfalls hauptsächlich am nördlichen Fahrwasserrand des Vorhafens statt und verstärkt sich bei hohen Oberwasserabflüssen. Auch hier zeigt sich eine Zunahme der Sedimentationsmengen am Seehausener Ufer im Bereich der Buhne (geschlossener Anleger der Schlepperliegeplätze. Auch lässt sich keine signifikante Verbesserung der Sedimentationsverhältnisse im Fahrwasser (Teilbereich „Mitte“) erkennen. Das sedimentierte Volumen der Fraktion 2 (Schluff) erhöht sich bei steigenden Oberwasserabflüssen von 219 m<sup>3</sup>/Tide auf 1131 m<sup>3</sup>/Tide.

*Tab. 4: Effizienz der Handlungsalternative „Buhnen am Südufer“ für die Fraktion 1 und Fraktion 2 nach Ablauf eines Untersuchungsjahres*

| Bereich | Höhe [m/a] |         | Volumen [m <sup>3</sup> /a] |         | Änderung der Sedimentationsraten für Material 1 (Sand d: 0,1 mm) [%] |        | Änderung der Sedimentationsraten für Material 2 (Schluff d: 0,018 mm) [%] |          |      |
|---------|------------|---------|-----------------------------|---------|--|--------|---|----------|------|
|         | Sand       | Schluff | Sand                        | Schluff | [m <sup>3</sup> /a]  | [%]    | [m <sup>3</sup> /a]   | [%]      |      |
| I       | Nord       | 0,12789 | 0,46535                     | 3042    | 11069  | 5,73   | 0,2   | -938,04  | -7,8 |
|         | Mitte      | 0,14201 | 0,64528                     | 5492    | 24953  | 72,93  | 1,3   | -576,57  | -2,3 |
|         | Süd        | 0,04515 | 0,64874                     | 1824    | 26208  | 45,69  | 2,6   | 2790,57  | 11,9 |
| II      | Nord       | 0,01478 | 0,52196                     | 760     | 26836  | 0,26   | 0,0   | -1516,50 | -5,3 |
|         | Mitte      | 0,02812 | 0,60662                     | 1608    | 34699  | -5,61  | -0,3  | -1085,51 | -3,0 |
|         | Süd        | 0,00950 | 0,54702                     | 397     | 22877  | -7,99  | -2,0  | -49,33   | -0,2 |
| III     |            | 0,00553 | 0,34177                     | 1605    | 99255  | -0,87  | -0,1  | -5663,09 | -5,4 |
| Summe:  |            |         |                             | 14729   | 245896   | 110,15 | 0,8   | -7038,47 | -2,8 |

In zusätzlichen Untersuchungen wurde die Effizienz einer weiteren Handlungsalternative verifiziert (Tab. 5), in der durch die „Begrenzung der Fahrrinne in der Zufahrt“ auf ca. 70 m ein ein 110 m breiter Streifen der Fahrrinne aufsedimentieren kann (Abb. 12).

*Tab. 5: Effizienz der Handlungsalternative „Begrenzung der Fahrrinne in der Zufahrt“ für die Fraktion 1 und Fraktion 2 nach Ablauf eines Untersuchungsjahres*

| Bereich | Höhe [m/a] |         | Volumen [m <sup>3</sup> /a] |         | Änderung der Sedimentationsraten für Material 1 (Sand d: 0,1 mm) |         | Änderung der Sedimentationsraten für Material 2 (Schluff d: 0,018 mm) |          |       |
|---------|------------|---------|-----------------------------|---------|--|---------|---|----------|-------|
|         | Sand       | Schluff | Sand                        | Schluff | [m <sup>3</sup> /a]  | [%]     | [m <sup>3</sup> /a]   | [%]      |       |
| I       | Nord       | 0,13192 | 0,46684                     | 3138    | 11104  | 101,53  | 3,3   | -902,58  | -7,5  |
|         | Mitte      | 0,13259 | 0,56605                     | 5127    | 21889  | -291,60 | -5,4  | -3640,24 | -14,3 |
|         | Süd        | 0,04221 | 0,56226                     | 1705    | 22714  | -72,75  | -4,1  | -703,13  | -3,0  |
| II      | Nord       | 0,01410 | 0,54262                     | 725     | 27898  | -34,86  | -4,6  | -454,23  | -1,6  |
|         | Mitte      | 0,02568 | 0,53252                     | 1469    | 30460  | -144,90 | -9,0  | -5324,10 | -14,9 |
|         | Süd        | 0,00856 | 0,52337                     | 358     | 21889  | -47,19  | -11,6   | -1038,11 | -4,5  |
| III     |            | 0,00539 | 0,37209                     | 1565    | 108062   | -41,50  | -2,6  | 3143,60  | 3,0   |
| Summe:  |            |         |                             | 14087   | 244016   | -531,26 | -3,6  | -8918,79 | -3,5  |

Die Sedimentationshöhen der Fraktion 2 (Schluff) im Untersuchungsjahr verringern sich im Untersuchungsgebiet um rd. 3,5%. Im Bereich der Fahrrinne vermindern sich die Sedimentationshöhen um bis zu 15% (rd. 9000m<sup>3</sup>/a) im Vergleich zum Ausgangszustand. Die Verringerung der Sedimentation in der Mitte der Hafenzufahrt verringert den Unterhaltungsaufwand erheblich. Die Sedimentationsraten im Wendebassin nehmen im Untersuchungsjahr um ca. 3% (rd. 3000m<sup>3</sup>/a) im Vergleich zum Ausgangszustand zu. Durch die leicht erhöhten Strömungen wird verstärkt Sediment in den hinteren Hafenbe-

reich eingetragen. Der Vorteil, der sich aus der Verminderung der Sedimentation in der Zufahrt zum Neustädter Hafen ergibt, ist jedoch größer, als der Nachteil durch die Erhöhung der Sedimentation im Wendebecken.

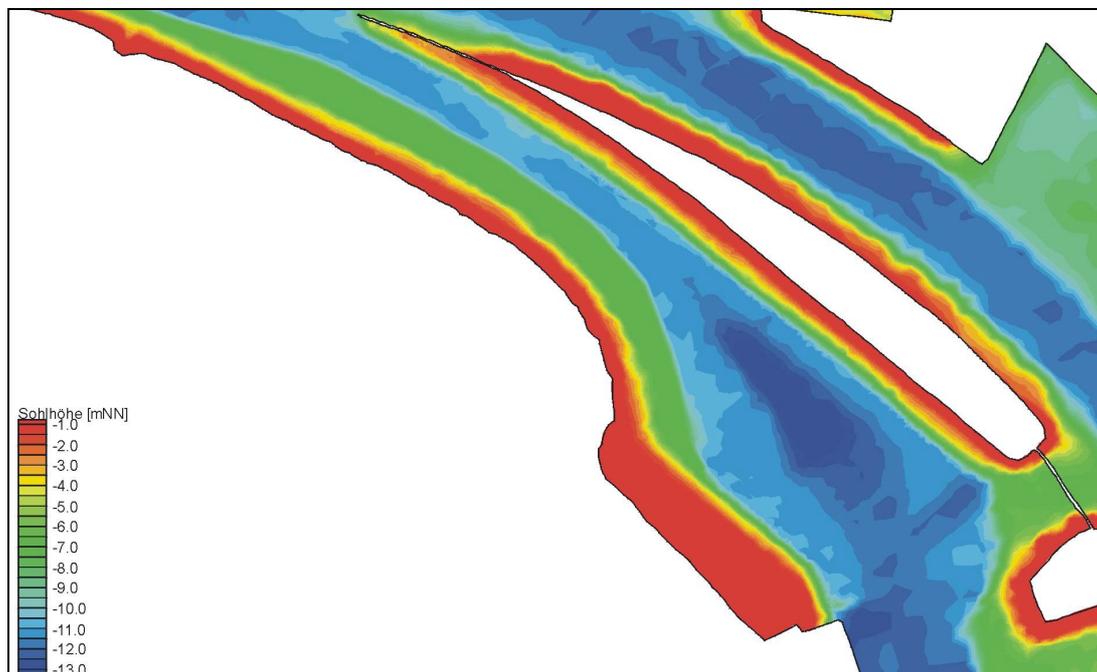


Abb.12: Handlungsalternative „Begrenzung der Fahrrinne in der Zufahrt“

## 6. ZUSAMMENFASSUNG

In den Ergebnissen der numerischen Berechnung der Sedimentationsmengen zeigt sich deutlich der Tideeffekt (die Austauschwassermenge im Hafenbecken ist unabhängig von der Grundrissform und der Tiefe). Der Wasseraustausch im Untersuchungsgebiet hat den größten Einfluss auf die Sedimentmengen im Neustädter Hafen. Die Handlungsalternativen bewirken vorrangig lokale Umlagerungen des Sedimentes aus der Strommitte in die Randbereiche. Die Effizienz der Handlungsalternative „Buhnen am Südufer“ bei der Verminderung der Gesamtsedimentationsmenge im Gebiet des Neustädter Hafens ist nur gering (2,8 % oder ca. 7.000 m<sup>3</sup>/a).

Eine effektive Verminderung der Sedimentationsmengen kann nur im Einfahrtsbereich durch einen weitergehenden Eingriff in die Öffnungsweite und Form erreicht werden. Gestützt durch Umlagerungen aus der Fahrinnenmitte in die Seitenbereiche könnte die Solltiefe in der Fahrrinne über einen längeren Zeitraum als bisher erhalten bleiben. Ein Beispiel für eine Änderung der Hafeneinfahrt ist in der Handlungsalternative „Eingengte Hafeneinfahrt“ dargestellt. Diese Handlungsalternative bewirkt durch die verminderte Öffnungsbreite der Einfahrt zum Neustädter Hafen eine Verminderung der eingetragenen Sedimente (4,7 % oder ca. 12.000 m<sup>3</sup>/a) und zusätzlich eine Umlagerung der Sedimente aus der Fahrrinne in die Seitenbereiche des Vorhafens.

Eine Verminderung der Sedimentationsmengen kann insbesondere durch eine „Begrenzung der Fahrrinne in der Zufahrt“ erreicht werden.

## 7. SCHRIFTTUM

- FRANZIUS-INSTITUT: Hydraulische Modellversuche zur Reduzierung des Schlickfalls im Neustädter Hafen in Bremen. Versuchbericht unveröffentlicht, Hannover, 1989.
- FRANZIUS-INSTITUT: Maßnahmen zur Reduzierung von Sedimentation und Baggermengen im Neustädter Hafen in der Hafengruppe Bremen-Stadt. Versuchbericht unveröffentlicht, Hannover, 1999.
- HANSESTADT BREMISCHES HAFENAMT: Integrierte Baggergutentsorgung Seehausen. Prospektmaterial, Bremen, 1996.
- NASNER, H.: Sedimentation in Tidehäfen. Die Küste, Heft 53, 1992.
- NASNER, H.: Sedimentation in Tidehäfen, Phase 2. Die Küste, Heft 59, 1997.
- STOSCHEK, O., MATHEJA, A.: Simulation von Sedimenttransportprozessen in tidebeeinflussten Hafengebieten. Mitteilungen des Franzius-Instituts für Wasserbau und Küsteningenieurwesen der Universität Hannover, Heft 86, 2001.
- VAN RIJN, L.C.: Principles of sediment transport in rivers, estuaries and coastal seas. Aqua Publications, Amsterdam, Niederlande, 1993.
- ZIMMERMANN, C., MATHEJA, A., STOSCHEK, O.: Reduction of Harbor Sedimentation at a Tidal River. Proceedings of the 2nd International Conference on Port Development and Coastal Environment (PDCE), Varna, 2000.