

Sedimentation in Hamburger Hafenbecken – Ursachen und Maßnahmen zur Verminderung –

Von HERMANN CHRISTIANSEN

Zusammenfassung

In allen Hafenbecken, Kanalabzweigungen oder anderen seitlichen Abzweigungen im Tidebereich sandiger Küsten oder Gewässer treten Sedimentationen auf. Zur Aufrechterhaltung der Schiffbarkeit müssen diese Ablagerungen unter teilweise hohen Kostenaufwendungen gebaggert und entsorgt werden. Am Beispiel der Hamburger Hafenbecken werden die Ursachen für die Sedimentablagerungen beschrieben und Möglichkeiten aufgezeigt, diese Sedimentationen zu vermindern. Die meisten der gewonnenen Erkenntnisse sind generell gültig und lassen sich daher auch auf andere Tidehäfen übertragen.

Schlagwörter

Hafenbecken, Tidebereich, Sedimentation, Sedimentationsursachen, Sedimentationsverminderung

Summary

Harbour basin, access channels or other bifurcations in sandy tidal areas suffer from sedimentation. Permanent dredging including dumping or land disposal at mostly high costs is necessary to safeguard ship manoeuvres. The situation in Hamburg Harbour is chosen to list up reasons for sedimentation and possibilities for its reduction. Most of the insights can be transferred to other tidal harbours world wide.

Keywords

Harbour basin, tidal area, sedimentation, reason of sedimentation, reduction of sedimentation

Inhalt

1. Einleitung	118
2. Geometrische Einflussgrößen	119
2.1 Allgemeines	119
2.2 Hafenbeckengröße	119
2.3 Einfahrtsbreite	120
2.4 Uferausbildung im Bereich Strom/Hafeneinfahrt	122
2.5 Sohlhöhendifferenz Strom/Hafenbecken	122
2.6 Strombereich vor der Hafeneinfahrt	123
2.7 Fazit Geometrie	124
3. Hydrologische Einflüsse	125
3.1 Allgemeines	125

3.2 Tidehub	125
3.3 Flutstromdauer	125
3.4 Flutstromgeschwindigkeit/Tideanstieg	125
4. Einfluss der Schwebstoffeigenschaften	126
4.1 Schwebstoffkonzentration	126
4.2 Absinkverhalten der Schwebstoffe	128
5. Einflüsse der Unterhaltungsmaßnahmen	129
5.1 Allgemeines	129
5.2 Baggerung und Unterbringung an Land	129
5.3 Baggerung und Umlagerung im Gewässer	130
5.4 Wasserinjektionsbaggerung	131
5.5 Bauliche Verminderungsmaßnahmen	132
6. Sonstige Einflussgrößen auf die Sedimentation	133
6.1 Schiffsverkehr	133
6.2 „Scheinbare“ Ursachen	133
7. Ergebnisse	134
8. Danksagung	134
9. Schriftenverzeichnis	134

1. Einleitung

Wie in allen Tidehäfen der Welt sind Baggerarbeiten zur Aufrechterhaltung der für die Schifffahrt erforderlichen Wassertiefen auch in Hamburg eine Daueraufgabe, die einen erheblichen Kostenfaktor darstellt. Dabei anfallendes, mit Schadstoffen aus dem großen Einzugsgebiet der Elbe belastetes Baggergut muss mit erheblichem Aufwand an Land behandelt und deponiert werden. Geringer belastete Sedimente werden seit einigen Jahren unter Beachtung ökologischer Erfordernisse jeweils im Winterhalbjahr in der Elbe innerhalb Hamburgs und seit Mitte 2005 in Teilmengen auch im Bereich der Nordsee (Tonne E3) umgelagert.

Ein wichtiger Beitrag zur Reduzierung der Kosten besteht darin, möglichst hohe Sedimentmengen in Suspension oder als Geschiebe im Strom zu belassen und die Ablagerungen in Seitenräumen, wie z.B. den Hafenbecken, auf ein Minimum zu beschränken. Der Strom verfügt wegen seiner turbulenten hydrodynamischen Eigenschaften über natürliche Fähigkeiten Sedimente immer wieder aufzuwirbeln, lange in Suspension zu halten und überschüssige Anteile bei hoher Oberwasserführung auch stromab zu transportieren. Unvermeidbare, meist sandige, unbelastete Restsedimentationen im Strom lassen sich dort baggertechnisch einfacher und weniger kostenaufwendig aufnehmen. Hafenbecken sind „relative“ Stillwasserzonen, aus denen einmal abgesetzte überwiegend schlickige Sedimente nicht durch natürliche Strömungskräfte wieder entfernt werden können. Die dann erforderlichen Baggerungen, ggf. notwendige Behandlung und Unterbringung der gebaggerten Sedimente, sind teuer und ökologisch problematischer.

Das Ziel der vorliegenden Untersuchung ist daher, die Wirkung aller nach heutigem Kenntnisstand maßgebenden Einflussgrößen auf die Sedimentation in den Hamburger Hafenbecken (siehe Abb. 1) zu beschreiben, um daraus Maßnahmen abzuleiten, diese Ablagerungsmengen so gering wie möglich zu halten. Die meisten der gewonnenen Erkenntnisse sind generell gültig und lassen sich daher auch auf andere Tidehäfen übertragen.

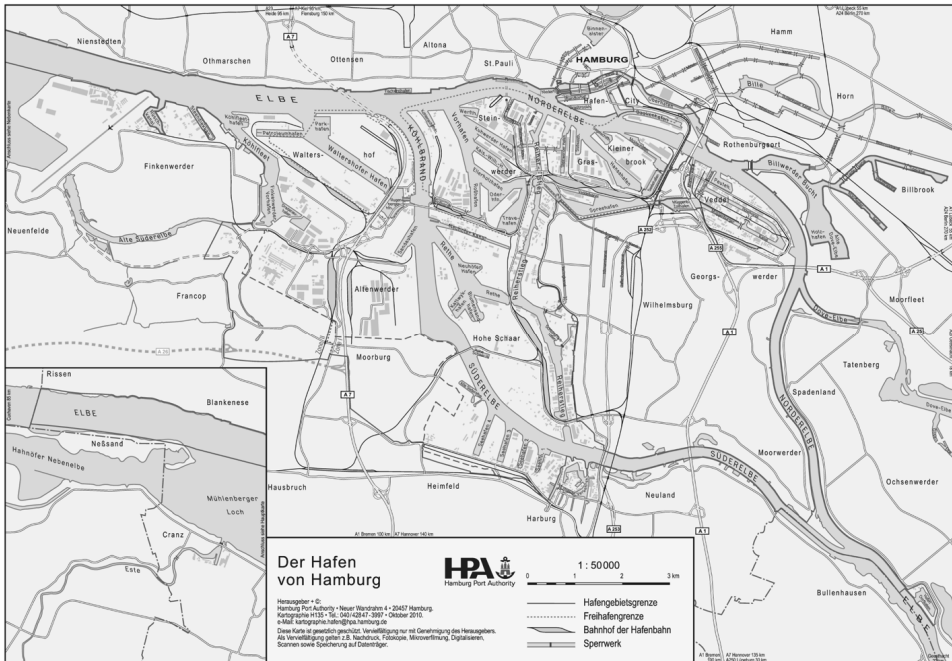


Abb. 1: Lageplan Hamburger Hafen

2. Geometrische Einflussgrößen

2.1 Allgemeines

Die Sedimentmenge, die sich in einem Hafenbecken absetzen kann (CHRISTIANSEN, 1996), ist abhängig von der:

- Flächengröße des Hafenbeckens,
- Einfahrtsbreite,
- Ausgestaltung der Ufer im Übergangsbereich Strom/Hafeneinfahrt,
- Sohlhöhenlage zwischen Strom und Hafenbecken,
- Formgebung des Strombereiches vor der Hafeneinfahrt.

2.2 Hafenbeckengröße

Mit zunehmender Hafenbeckengröße (siehe Abb. 2) nimmt die Sedimentationsmenge generell zu, weil das Potential absetzbarer Schwebstoffe mit dem Tidefüllvolumen (Hafenbeckenfläche $\times$ Tidehub) anwächst (siehe auch Abb. 5, Kap. 2.3).

Hafenbeckengröße

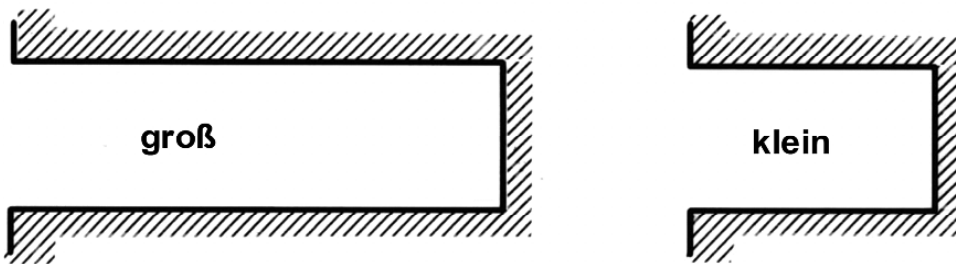


Abb. 2: Große oder kleine Hafenbecken

2.3 Einfahrtsbreite

Mit zunehmender Einfahrtsbreite (siehe Abb. 3) nimmt die Sedimentationsmenge zu. Über die vergrößerte Kontaktfläche zwischen Strom und Hafenbecken wird zum einen über Dichteausgleichsströmung mehr Schwebstoff aus dem Fluss in das Hafenbecken eingetragen (siehe Abb. 4). Grundsätzlich gilt dabei, dass dieser Austausch immer vom Niveau hoher Konzentrationen (Strom) zu dem geringerer Konzentrationen (Hafenbecken) abläuft.

Hafeneinfahrt

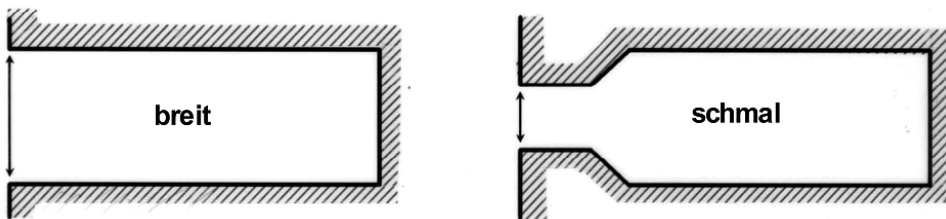


Abb. 3: Breite oder schmale Hafeneinfahrt

Zum anderen wird über die vergrößerte Kontaktfläche mehr Strömungsenergie auf den Wasserkörper in der Hafeneinfahrt übertragen. Dadurch kann sich eine größere und schneller drehende Strömungswalze ausbilden, die zu verstärkten Sedimentablagerungen führt. Der Effekt, der diese Ablagerungen bewirkt, wird auch als „Teetasseneffekt“ bezeichnet: versetzt man den Inhalt einer Teetasse in horizontale Rotation, so sammeln sich die Teeblätter am Boden im Zentrum der Drehbewegung.

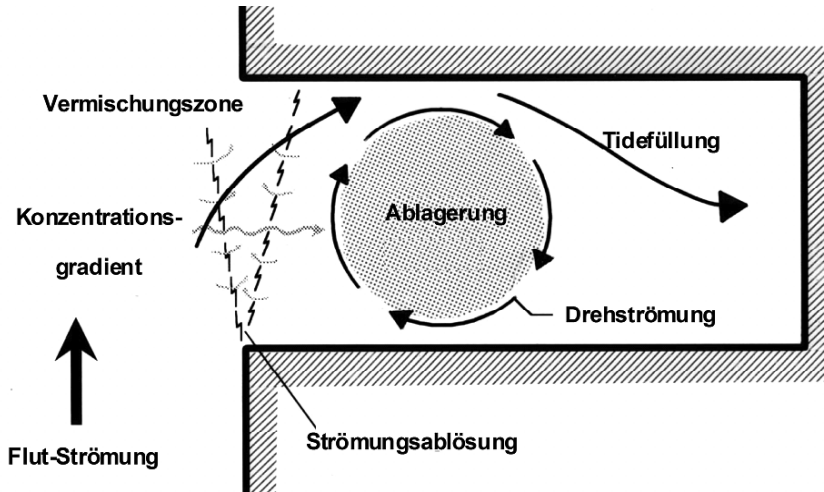


Abb. 4: Strömungs-, Sedimenttransport- und Ablagerungsprozesse in der Hafeneinfahrt

Bei ausreichender Hafenbeckengröße (siehe Kap. 2.2) treten Drehströmungen nur bei Flutstrom auf. Bei Ebbe wirkt das aus dem Hafenbecken ausströmende Wasser als „Störstrom“, mit dem die Ausbildung einer Ebbstromwalze unterbunden wird. Bei Hafenbecken mit großer Einfahrtsbreite und geringer Beckenlänge (Beispiel Sandauhafen) ist dagegen die Ausströmwirkung bei Ebbe so gering, dass sich auch bei Ebbe eine Walze ausbilden kann, die in entgegengesetzter Richtung dreht als die Walze bei Flut. Sie bewirkt ebenso wie die Drehströmung bei Flut eine zusätzliche Sedimentation. Dadurch erhöhen sich die Ablagerungen.

Basierend auf verfügbaren Daten bis 1995 kann aus der nachfolgenden generalisierten Darstellung abgelesen werden, in welcher Größenordnung die Hafeneinfahrtsbreite die Gesamtsedimentation in Hafenbecken beeinflusst (siehe Abb. 5).

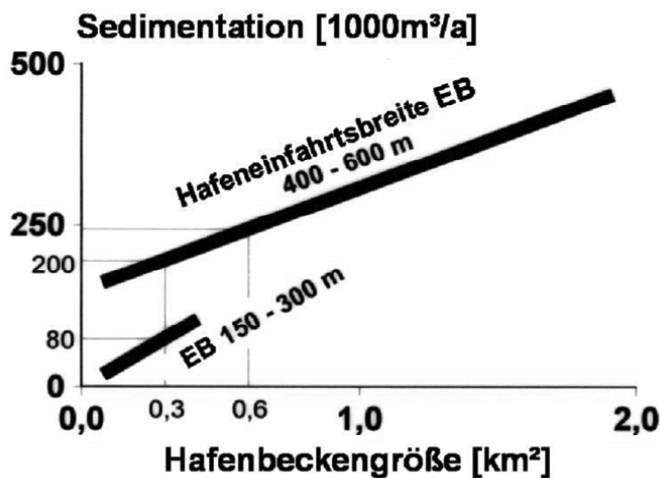


Abb. 5: Sedimentation in Hamburger Hafenbecken unterschiedlicher Größen und Einfahrtsbreiten (generalisiert nach Daten HPA bis 1995)

Aus dem Beispiel wird deutlich, dass bei gleicher Hafenbeckengröße (hier 0,3 km²) die Sedimentation bei Hafenbecken mit großer Einfahrtsbreite (400 m bis 600 m) um ein Vielfaches größer ist (200.000 m³/a statt 80.000 m³/a) als bei denen mit Einfahrtsbreiten von nur 150 m bis 300 m. Im Verhältnis dazu ergibt eine Verdoppelung der Hafenbeckengröße z.B. von 0,3 km² auf 0,6 km², bei unveränderter Einfahrtsbreite, „nur“ eine Sedimentationszunahme von 200.000 auf 250.000 m³/a.

2.4 Uferausbildung im Bereich Strom/Hafeneinfahrt

Eine steile und sehr raue Uferausbildung im Strombereich vor der Hafeneinfahrt (s. Abb. 6 (a)) erhöht die Sedimentation im Hafenbecken. Zum einen liegt bei steilen Ufern der Strom mit höheren Geschwindigkeiten unmittelbar an der Hafeneinfahrt und kann mit größerer Energie die Walzenströmung in erhöhte Rotation versetzen. Zum anderen verstärken größere Rauigkeiten die Turbulenzbildung in der Hafeneinfahrt. Dies trägt zu weiterer Intensitätserhöhung der Walzenbildung bei. Außerdem werden durch größere Turbulenzen mehr Schwebstoffe aufgewirbelt und über die Drehströmung und die Dichtenausgleichsströmung verstärkt in das Hafenbecken eingetragen.

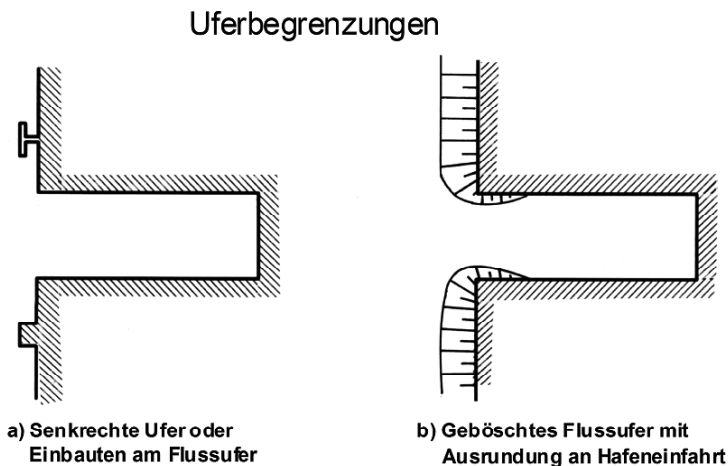


Abb. 6: Uferausbildung vor der Hafeneinfahrt

Diese nachteiligen Wirkungen reduzieren sich, wenn das Ufer im Strombereich geböschet, unverbaut und an der Hafeneinfahrt ausgerundet ist (siehe Abb. 6 b)

2.5 Sohlhöhendifferenz Strom/Hafenbecken

Je geringer die Höhendifferenz zwischen der Sohle von Hafenbecken und Gewässer ist oder wenn das Hafenbecken gar tiefer liegt als das Gewässer (Abb. 7 a), desto leichter können mit dem Flutstrom sohnah hohe Schwebstoffkonzentrationen, „fluid mud“ oder Geschiebe in das Hafenbecken eingetragen werden und dort sedimentieren. Je höher das Hafenbecken gegenüber der Flusssohle liegt (Abb. 7 b), umso geringer wird dieser Eintrag.

Sohlhöhen Fluss- Hafen

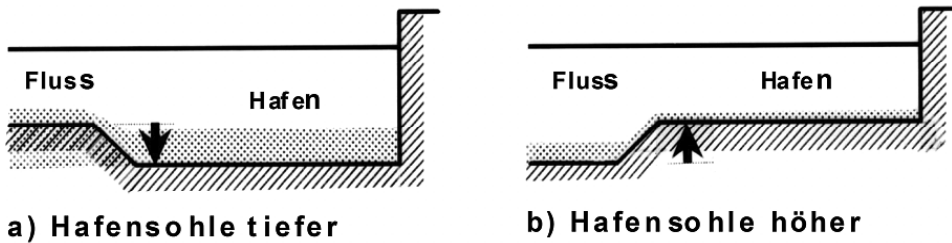


Abb. 7: Höhenlage Hafenbecken in Relation zur Flusssohle

2.6 Strombereich vor der Hafeneinfahrt

Aus mehreren Gründen ist es sinnvoll, den Gewässerquerschnitt vor einer Hafeneinfahrt seitlich und auch nach unten hin zu vergrößern (siehe Abb. 8):

- Mit einer Vertiefung vor der Hafeneinfahrt wird z.B. der in Kap. 2.5 beschriebene Vorteil erreicht, dass weniger Sedimente sohlnah in das Hafenbecken eingetragen werden, weil die Sohle des Gewässers tiefer liegt als die des Hafenbeckens.
- Durch eine Aufweitung (Vertiefung und zusätzliche Ausbuchtung am gegenüberliegenden Ufer) reduziert sich die Strömungsgeschwindigkeit im Strom, damit die Intensität der Walzenströmung in der Hafeneinfahrt und folglich die Sedimentation im Hafenbecken.
- Tiefgehende Schiffe, die vor der Hafeneinfahrt drehen, wirbeln durch die vergrößerte „under-keel clearance“ weniger Sedimente auf, wodurch der Eintrag dieser Sedimente in das Hafenbecken vermindert wird.

Mit einer Verbreiterung des Stromquerschnittes vor der Hafeneinfahrt werden letztlich auch die nautischen Bedingungen bei Drehmanövern großer Schiffe verbessert:

- Es steht mehr Raum für die Manöver zur Verfügung.
- Die vergrößerte Wassertiefe vermindert den Drehwiderstand der Schiffe und verbessert damit ihr Drehverhalten.
- Die Strömungsgeschwindigkeit vor der Hafeneinfahrt ist geringer und erleichtert somit die Ein- und Auslaufmanöver.

Das Ausmaß der Aufweitung kann nach hydrodynamisch-morphologisch sinnvoll erscheinenden Größenordnungen bzw. den nautischen Anforderungen vorgenommen werden. Ist die vorgenommene Aufweitung zu groß, wird sie sich nachfolgend durch natürliche Sedimentation auf das Maß verkleinern, das mit den hydrologischen Randbedingungen im dynamischen Gleichgewicht steht. Sieht dieser Gleichgewichtszustand eine völlige Wiederauffüllung der Aufweitung vor, werden regelmäßige Unterhaltungsbaggerungen dann im Aufweitungsbereich in dem Maße auszuführen sein, wie es die nautischen Bedingungen erfordern.

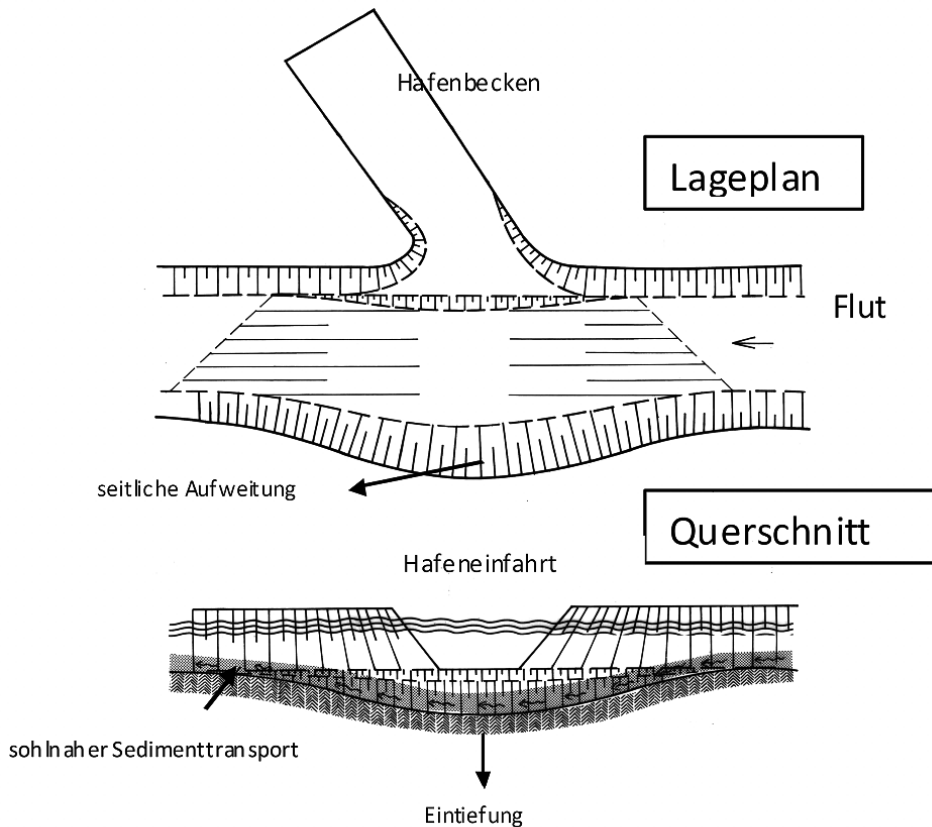


Abb. 8: Aufweitung des Gewässerquerschnitts vor einer Hafeneinfahrt

Durch regelmäßiges Monitoring der Sedimentationen im Strombereich und in den Hafenbecken lässt sich letztlich der Erfolg der Maßnahme ableiten. Bei Kosten-Nutzen-Betrachtungen der jeweiligen Mehr- oder Mindersedimentationen, sind dabei die einfacher durchzuführenden Maßnahmen mit entsprechend geringeren Kosten für die Unterhaltung im Strom- im Verhältnis zu den aufwendigeren Maßnahmen im Hafenbeckenbereich – zu berücksichtigen.

2.7 Fazit Geometrie

Für jedes Hafenbecken liegen mit der vorhandenen Geometrie und sonstigen natürlichen Randbedingungen die mittleren Sedimentationsmengen mehr oder weniger fest.

Besteht nun die Forderung, die Sedimentationen in Hafenbecken zu vermindern, muss zunächst geprüft werden, ob die geometrischen Verhältnisse optimiert werden können.

Eine erfolgreich getestete Maßnahme, bestehende geometrische Verhältnisse z.B. durch strömungsführende Leitwände in der Hafeneinfahrt zu verbessern, wird in Kap. 5.5 näher beschrieben.

3. Hydrologische Einflüsse

3.1 Allgemeines

Aus umfangreichen Messungen und auch aus den Erfahrungen der Baggerei ist bekannt, dass zwischen dem Oberwasserabfluss der Elbe und der Sedimentation im Hamburger Hafen ein enger Zusammenhang besteht. Bei geringem Oberwasserabfluss ist die Menge der zu baggernden Sedimente deutlich höher als bei hohem Oberwasserabfluss. Wenig Oberwasser bedeutet sinnbildlich vereinfacht „weniger Druck von oben“ und dadurch aus dem Tideeinfluss von der Nordsee her verstärkter flutstromorientierter Eintrag von Sedimenten in die Hafenbecken. Ein weiterer Effekt ist dabei auch die näher nach Hamburg verlagerte sog. „Trübungszone“ (siehe dazu Kap. 4.1). Dadurch erhöhen sich in starkem Maße die Schwebstoffkonzentrationen und in Folge dann die Sedimentationen in den Hafenbecken.

Bei hoher Oberwasserführung verstärken sich dagegen die ebbstromorientierten Wirkungen, d.h. mehr Sedimente werden, auch aus dem Hamburger Bereich, weiter stromab transportiert. Der Rücktransport bei der nachfolgenden weniger intensiven Flut (kürzere Dauer und geringere Strömung) reduziert sich und damit der Eintrag in die Hafenbecken. Die unmittelbare Folge unterschiedlicher Oberwasserabflüsse sind Änderungen physikalischer Parameter wie Tidehub, Flut- und Ebbstromdauer und damit der Strömungsverhältnisse, die als Variable den Feststofftransport im Strom und damit auch den Sedimenteintrag in die Hafenbecken steuern. Die Wirkung dieser hydrologischen Einflussgrößen wird nachfolgend beschrieben.

3.2 Tidehub

Eine Erhöhung des Tidehubes erhöht das Tidefüllvolumen in einem Hafenbecken und damit die Menge der in diesem Wasservolumen vorhandenen absetzbaren Schwebstoffe, d.h. die Sedimentation nimmt zu.

3.3 Flutstromdauer

Die Flutstromdauer ist die Zeitspanne, in der mit dem einströmenden Flutwasser sowohl Schwebstoffe als auch Geschiebe an der Flusssohle (Sand) und/oder sohnah hohe Konzentrationen an Schlick oder „fluid mud“ in das Hafenbecken gelangen und sich dort absetzen können. Die Flutstromdauer verlängert sich, wenn der Oberwasserabfluss in der Elbe gering ist und damit der „geringe Druck von oben“ einen verstärkten Einfluss der Tide-dynamik aus der Nordsee zulässt. Entsprechend umgekehrt sind die Verhältnisse bei hohem Oberwasser, wo z.B. von Oberstrom bis vor die Harburger Seehäfen überhaupt kein Flutstrom mehr auftritt. Bei geringem Oberwasser und verlängerter Flutstromdauer gelangt auch die Trübungszone weiter stromauf nach Hamburg und erhöht dort die Schwebstoffkonzentration (siehe auch Kap. 4.1).

3.4 Flutstromgeschwindigkeit/Tideanstieg

Die Flutstromgeschwindigkeit erhöht sich immer dann, wenn der Tideanstieg steiler wird (Verhältnis Tidehub zu Flutstromdauer). Diese Situationen treten z.B. im Winter bei

starken Ostwindlagen Abb. 9 a auf, wenn besonders im Hamburger Bereich die Wasserstände bei Tideniedrigwasser stärker abfallen als die bei Tidehochwasser.

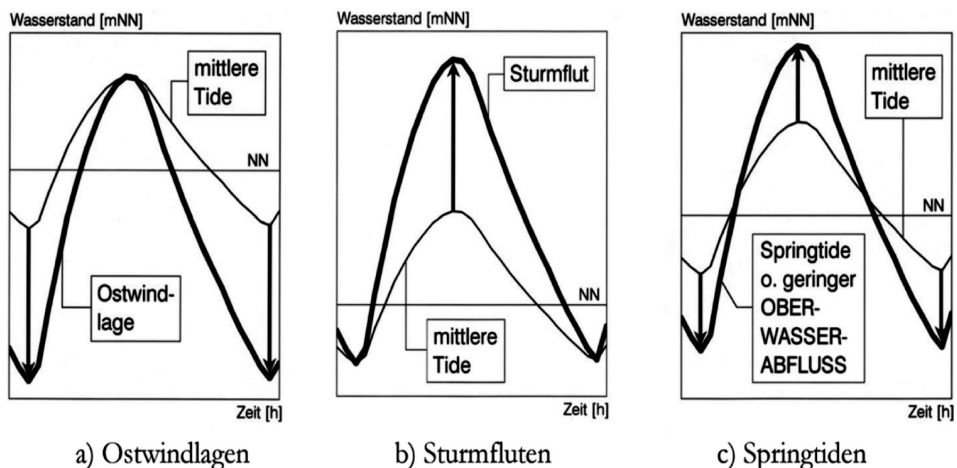


Abb. 9: Verstärkter Tideanstieg bei Ostwindlagen, Sturmfluten oder Springtiden

Diese besonderen Situationen treten ebenfalls auf, wenn sich nach normalen Tideniedrigwasserverhältnissen durch zunehmende starke Westwinde erhöhte Sturmflutwasserstände einstellen (Abb. 9 b). Daneben erhöht sich der Tidehub astronomisch bedingt bei Springtiden oder geringen Oberwasserabflüssen (Abb. 9 c).

Eine Erhöhung der Flutstromgeschwindigkeiten wirkt sich in zweierlei Weise aus. Zum einen verstärken sich dadurch die Kräfte, die die Walzenströmung antreiben, d.h. durch mehr Walzenumdrehungen eine erhöhte Sedimentablagerung bewirken. Zum anderen werden bei verstärkter Strömung auch mehr sohlennahe Sedimente erodiert und transportiert und in die Walzenströmung eingespeist und damit dem Potential absetzbarer Schwebstoffe im Tidefüllvolumen hinzugefügt.

Alle strombaulichen Maßnahmen, die geeignet sind den Tideanstieg und damit die Flutströmung zu reduzieren, tragen folglich zu einer Verminderung der Sedimentation in den Hafenbecken bei.

4. Einfluss der Schwebstoffeigenschaften

4.1 Schwebstoffkonzentration

Einer der Hauptfaktoren, der die Sedimentation in den Hafenbecken beeinflusst, ist die Schwebstoffkonzentration im Gewässer. Je höher das Potential an Schwebstoffen ist, das mit dem Flutstrom in das Hafenbecken gelangt, umso mehr nimmt die Sedimentation im Hafenbecken zu.

Abb. 10 zeigt, dass die mittleren Schwebstoffkonzentrationen beim Einlaufen der Flut in den Hamburger Hafenbereich (Referenzstation Nienstedten) bei Oberwasserabflüssen $< 500 \text{ m}^3/\text{s}$ erheblich höher sind (Mittelwert bei Flut: 73 g/m^3) als bei Abflusswerten $> 900 \text{ m}^3/\text{s}$ (Mittelwert bei Flut: 30 g/m^3).

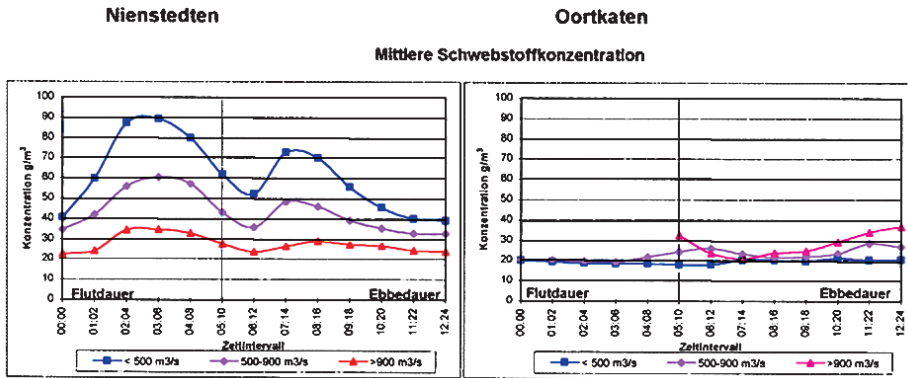


Abb. 10: Mittlere Schwebstoffkonzentrationen im Tideverlauf für verschiedene Oberwasserabflussklassen (Mittel aus 41 Messkampagnen bei Nienstedten (Strom-km 631) und 15 bei Oortkaten (Strom-km 608) von 1980 bis 1990)

Die Erhöhung der Schwebstoffkonzentrationen bei geringerem Oberwasser wird verursacht durch das verstärkte Vordringen der „Trübungswolke“ in den Hamburger Elbeabschnitt. Ursache dafür ist die bereits beschriebene stärker einwirkende Tidedynamik von der Nordsee her stromauf nach Hamburg. Bei geringen Oberwasserabflüssen werden zeitgleich von Oberstrom her (Referenzstation Oortkaten) mit dem Ebbstrom etwas geringere Konzentrationen von 20 g/m^3 (Mittelwert) in das Hamburger Stromspaltungsgebiet eingetragen als bei höheren Abflüssen (Mittelwert 28 g/m^3). Diese Differenz ist jedoch relativ gering und kompensiert bei weitem nicht die Konzentrationserhöhung von Unterstrom her.

Messungen der Wassergütestelle-Elbe (siehe Abb. 11), die seit 1979 regelmäßig monatlich bei vollem Ebbstrom durchgeführt wurden, belegen die vorgenannten Zusammenhänge.

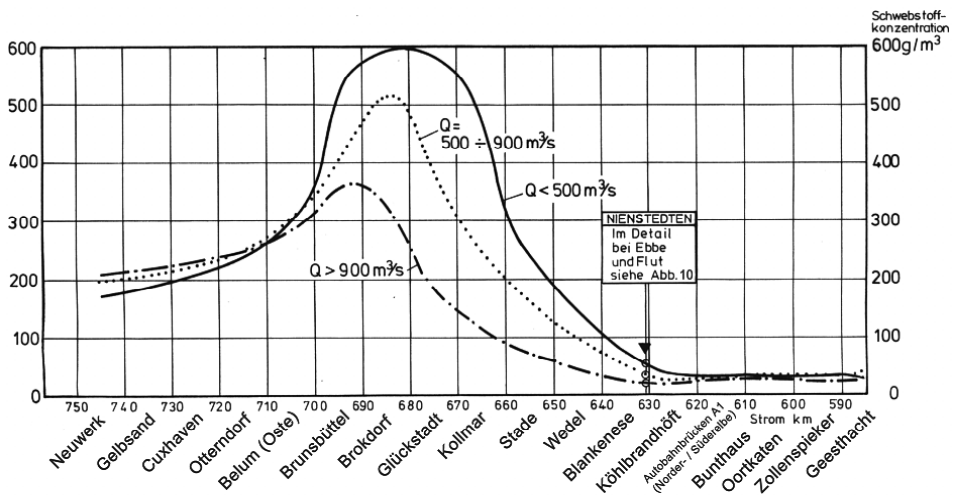


Abb. 11: Mittlere Schwebstoffkonzentrationen bei Ebbstrom für verschiedene Oberwasserabflussklassen Q (generalisiert dargestellt nach Daten der Wassergütestelle-Elbe von 1979 bis 1994)

Die in Abb. 11 dargestellten Ganglinien der Schwebstoffkonzentrationen zeigen die Verhältnisse im Elbeabschnitt von Cuxhaven bis Geesthacht bei vollem Ebbstrom. Die mittleren Schwebstoffkonzentrationen in Höhe Nienstedten (km 631) stimmen gut überein mit den von HPA gemessenen und auf Abb. 10 dargestellten Werten. Mit dem Flutstrom verlagert sich die Trübungswolke weiter stromauf, und die Schwebstoffkonzentrationen erhöhen sich entsprechend (s. Abb. 11). Der steile Anstieg der Schwebstoffkonzentrationen stromab von km 630 macht deutlich, dass eine Verlagerung der Trübungswolke weiter stromauf zwangsläufig zu höheren Sedimentationen im Hamburger Hafen führt. Dies erklärt für Hamburg die Dringlichkeit, bei allen strombaulichen Maßnahmen in der Elbe darauf zu achten, dass eine solche Verlagerung möglichst vermieden wird.

4.2 Absinkverhalten der Schwebstoffe

Das Absinkverhalten der Schwebstoffe ist eine weitere Größe, die Einfluss auf die Sedimentation hat. Je schneller Schwebstoffteilchen absinken, umso höher wird der Anteil der Schwebstoffe, die sich auf der Sohle eines Hafenbeckens absetzen können! Die messtechnische Bestimmung von Sinkgeschwindigkeiten des Schwebstoffes unter natürlichen turbulenten Strömungsverhältnissen im Gewässer ist bisher nicht gelungen. Aus Messmethoden im Labor, durch sog. Owenrohrmessungen oder mit dem INSSEV (IN-Situ Settling Velocity) Instrument nach MANNING und DYER (2002) im Feld (allerdings ohne die Möglichkeit, natürliches turbulentes Fließverhalten simulieren zu können) sind jedoch grundsätzliche Erkenntnisse abzuleiten. Danach erhöhen sich die Sinkgeschwindigkeiten, wenn:

- der mineralische Anteil hoch, d.h. gleichzeitig der organische Anteil (Glühverlust) gering ist,
- der Fraktionsanteil grober Schwebstoffpartikel hoch bzw. der der feineren Fraktionen (z.B. mit Korndurchmessern $< 63 \mu\text{m}$) entsprechend klein ist,
- die durch Bakterien und Algen bewirkte Bildung von Schleimstrukturen gering ist und somit nicht zum sog. Fallschirmeffekt der eingebundenen mineralischen Partikel führt (GREISER, 1988)
- durch Flockenbildung größere Aggregate entstehen,
- durch Erhöhung der Wassertemperatur die Viskosität des Wassers geringer wird.

Aus den bereits genannten Messungen von HPA ergibt sich, dass der mineralische Anteil der bei Nienstedten (Strom-km 631) mit der Flut eingetragenen Schwebstoffe mit 82 % deutlich höher liegt als der des bei Oortkaten (Strom-km 608) bei Ebbe zuströmenden Materials mit einem Anteil von nur rd. 70 %. Die Schwankung dieser Werte bei unterschiedlichen Oberwasserwerten ist relativ gering.

Messungen von HARMS und NEHLS aus 1993/94 (HARMS und NEHLS, 1995) weisen sogar noch größere Unterschiede auf. Danach betrug der Mineralkornanteil bei Nienstedten (Flut) 87 % bei geringem Oberwasserabfluss (350–500 m³/s) und nur 58 % bei hohem Oberwasser (1500 m³/s). Bei Oortkaten (Ebbe) lagen die Werte bei 58 % für geringen Abfluss und 44 % für hohen Abfluss. Auf Grund ihres höheren Mineralkornanteiles haben somit die Flutschwebstoffe generell höhere Sinkgeschwindigkeiten. Bei geringerem Oberwasser ist dieses Verhältnis stärker ausgeprägt als bei höherem Abfluss.

Der Korngrößenanteil der gröberen Fraktion ($> 63 \mu\text{m}$) unterscheidet sich bei Nienstedten im Flutstrom mit 19 % nur geringfügig von dem bei Oortkaten beim Ebbstrom mit 15 %.

Deutliche Unterschiede bei verschiedenen Oberwasserverhältnissen konnten bisher nicht festgestellt werden.

Der Aufbau von Biomasse durch Mikroorganismen ist abhängig vom „Nahrungsangebot“ an gelösten und partikelgebundenen Substanzen, d.h. damit auch von dem Anteil an organischer Schwebstoffsubstanz (Glühverlust). Er nimmt besonders stark zu bei den ersten Frühjahrshochwässern. Die Wassertemperaturen erreichen dann auch schon Werte, die für eine gute Entwicklung der Bakterien und Algen sorgen. Durch Wachstum der Mikroorganismen erfolgt im Frühjahr eine verstärkte Biomasse- und Schleimstrukturproduktion, wodurch der Glühverlust und die Schwebefähigkeit der Feststoffe ansteigen. Im Sommer dagegen geht die Biomassenentwicklung zurück, weil das Nahrungsangebot sinkt, so dass selbst wärmere Wassertemperaturen, die an sich einer mikrobiellen Entwicklung förderlich wären, keinen Wachstumseffekt bewirken können. Es entstehen kompaktere, biomasseärmere Schwebstoffe mit höheren Sinkgeschwindigkeiten.

Damit ist wiederum die Wirkungskette Oberwasser, Mikroorganismenwachstum, Glühverlust, Sinkgeschwindigkeit, Sedimentation geschlossen, d.h. wenig Oberwasser im Sommer führt wegen geringer Biomassenentwicklung zu höheren Sinkgeschwindigkeiten der Schwebstoffe und somit höherer Sedimentation. Im Winter, wenn praktisch keine Biomassenentwicklung auftritt, ist diese Einflussgröße auf die Sedimentation damit auch unabhängig vom Oberwasser. Bei einer Temperaturerhöhung, die z.B. durch die Einleitung von Kühlwasser entsteht, ist bei entsprechendem Nahrungsangebot damit zu rechnen, dass es im Einflussbereich der höheren Wassertemperaturen zu verstärkter Sedimentation durch schneller absinkende Schwebstoffe kommt.

5. Einflüsse der Unterhaltungsmaßnahmen

5.1 Allgemeines

Auch die Art bzw. Technik, mit der Unterhaltungsmaßnahmen durchgeführt werden, hat Einfluss auf die Sedimentation in den Hafenbecken. Die Unterhaltung der Hafenbecken wird in folgender Weise durchgeführt:

- Baggerung und Unterbringung an Land
- Baggerung und Umlagerung im Gewässer
- Wasserinjektionsbaggerung
- Bauliche Verminderungsmaßnahmen

5.2 Baggerung und Unterbringung an Land

Beim Baggern, z.B. mit Eimerkettenbaggern, wird je nach Eigenschaft des gebaggerten Materials, Füllgrad in den Eimern und Umlaufgeschwindigkeit der Eimerkette ein Anteil von bis zu 30 % des von der Sohle aufgenommenen Materials wieder aus den Eimern ausgeschwemmt. Ein Teil davon sinkt in unmittelbarer Nähe der Baggerstelle wieder zu Boden. Ein anderer Teil wird während der Ebbephase als Schwebstoff oder sohlnahe hochkonzentrierte Suspension („fluid mud“) in die Elbe verdriftet. Ein so mit Sedimenten angereicherter Wasserkörper erreicht bei der nachfolgenden Flutphase erneut angrenzende Hafenbecken. Welche Hafenbecken ein oder sogar mehrere Male von einem solchen mit Sedimenten ange-

reicherten Wasserkörper erreicht werden und einen zusätzlichen Sedimenteintrag bewirken, ist von der Lage der Hafenbecken und der Oberwasserführung abhängig. Am Parkhafen z.B. würden Anteile eines mit Schwebstoff angereicherten und in die Elbe austretenden Wasserkörpers noch bei 8 nachfolgenden Flutphasen erneut an der Parkhafen-Einfahrt vorbeiströmen, wenn der Oberwasserabfluss $300 \text{ m}^3/\text{s}$ beträgt. Bei Oberwasserabflüssen von $1000 \text{ m}^3/\text{s}$ wäre das nur noch 2-mal der Fall.

Im Verlaufe der Tiden wird der in den Strom eingetragene Schwebstoff wegen seiner erhöhten Sinkgeschwindigkeiten relativ schnell absinken und sich in den sohnahen Fluid Mud einfügen. Für diesen Fluid Mud gelten deutlich kürzere Transportwege bei Ebbe und Flut als zuvor für Schwebstoff beschrieben. Weiterhin muss davon ausgegangen werden, dass dieses Material wegen der im seeschiffstiefen Hamburger Elbeabschnitt herrschenden Flutstromdominanz für den Sedimenttransport Hamburg auch nicht stromab verlässt, sondern in diesem Strombereich verbleibt bzw. zurück in die Hafenbecken verfrachtet wird. Nur bei ausreichend hoher Oberwasserführung (ca. $> 1400 \text{ m}^3/\text{s}$) kann damit gerechnet werden, dass ein höherer Anteil von Sedimenten, die durch Baggerungen in einem Hafenbecken in den Strom ausgetragen werden, auch als Schwebstoff weiter stromab transportiert werden.

Beim Baggern mit Hopperbaggern sind inzwischen Saugtechniken entwickelt worden, bei denen das Baggergut nahezu mit „in situ“ Konsistenz und ohne Verluste dem Laderaum des Hoppers zugeführt werden kann. Beim Baggern und Unterbringen des Baggerguts an Land wird verständlicherweise diese Materialmenge vollständig dem Gewässer entzogen.

5.3 Baggerung und Umlagerung im Gewässer

Abb. 12 zeigt, dass bis 1987 die Baggermengen im Hamburger Hafen relativ konstant waren. Bis zum 12-m-Ausbau lagen sie knapp unter und nach dem 13,5-m-Ausbau bei etwas über 2 Mio. m^3/a . Das gesamte Baggergut wurde bis 1987 aus dem Gewässer entnommen.

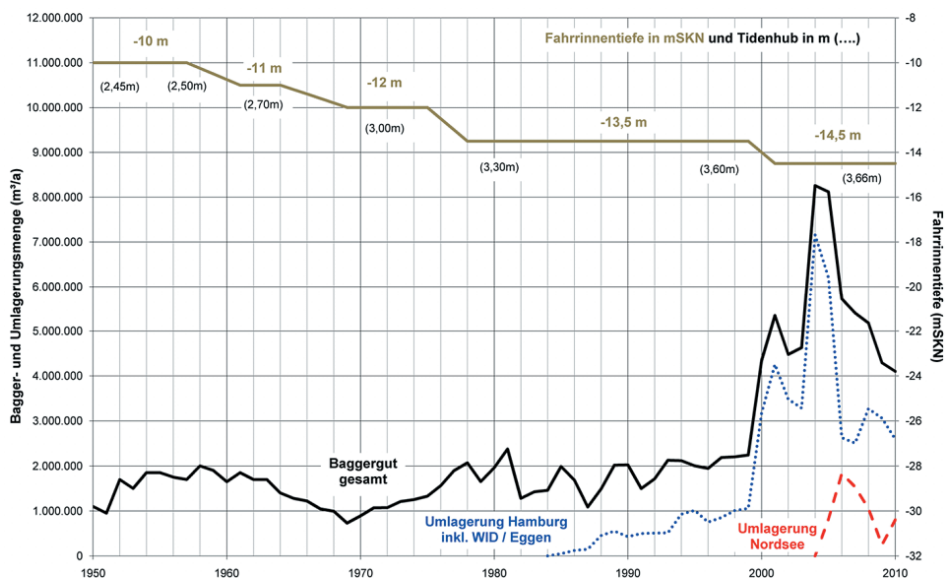


Abb. 12: Bagger- und Umlagermengen für den Hamburger Hafen seit 1950

Ab 1988 wurden erstmals Teilmengen des Baggergutaufkommens im Elbebereich durch Wasserinjektionen oder Eggen umgelagert. Ab 1996 wurden auch größere Mengen an Baggergut nach Neßsand an der Landesgrenze unterhalb von Hamburg umgelagert. Bis 1999 lagen die Umlagerungsmengen i.M. bei rd. 1 Mio. m³/a. In den Folgejahren mussten sie immer mehr gesteigert werden bis auf rd. 6 bis 7 Mio. m³ in 2004/2005. Rechnet man die Mengen, welche an Land behandelt und untergebracht wurden, hinzu, so ist folgende Entwicklung eingetreten:

Die Baggermengen von rd. 2 Mio. m³/a aus der Zeit vor Beginn der Umlagerungen sind nach den Umlagerungen auf 8 Mio. m³ bis 2005 angestiegen!

Die Zunahme erklärt sich dadurch, dass die Baggermengen, die durch „normale“ hydrologisch bedingte Absetzvorgänge entstehen, durch umgelagertes und rücktransportiertes Sediment immer wieder zusätzlich angereichert und dann erneut gebaggert und umgelagert werden mussten (Kreislaufbaggerung). Dabei wirkt ungünstig verstärkend, dass umgelagerte und durch turbulente Strömungen wieder aufgewirbelte Sedimente auf Grund des geringeren Organikanteiles sehr viel schneller wieder absinken als „natürlicher“ Schwebstoff. Beim Wiedereintreffen mit der Flut in Hamburg haben deshalb rücktransportierte Umlagerungen auch einen höheren Anteil an den Sedimentationsvorgängen im Hafen als „natürlicher“ Schwebstoff. Das unterschiedliche Absetzverhalten der Schwebstoffe ist für das Verständnis der Sedimentationsvorgänge in Hafenbecken ein äußerst wichtiges Kriterium!

Möglicherweise haben sich die dargestellten Verhältnisse durch den 14,5-m-Ausbau der Elbe weiter verstärkt. Es muss davon ausgegangen werden, dass der Stromaufwärts-Transport von Sedimenten, das sogenannte „tidal pumping“, zugenommen hat. Das Ausmaß des „tidal pumping“ ist oberwasserabhängig, d.h. es verstärkt sich, je geringer der Oberwasserabfluss ist. Die vorgenannten Verhältnisse machen deutlich, dass es dringend geboten war, die Umlagerung von Hamburger Baggergut an der Landesgrenze mengenmäßig zu reduzieren. Auf Abb. 12 wird deutlich, wie sich ab 2005/2006 durch Umlagerungen von Teilmengen des Hamburger Baggerguts in der Nordsee die Situation in Hamburg deutlich verändert hat.

Die Baggermengen haben sich von 2005 bis 2010 von 8 Mio. m³/a auf 4 Mio. m³/a wieder halbiert!

Der Wert von 4 Mio. m³/a ließe sich weiter reduzieren, wenn die Umlagerungen in Hamburg vermindert und die in größerer Entfernung stromab erhöht werden.

Die Abhängigkeiten von Baggermengen, Ort der Umlagerungen und Kosten zeigen die Notwendigkeit, eine Optimierungsstrategie weiter voranzutreiben, bei der das Gewässersystem als Ganzes betrachtet wird.

5.4 Wasserinjektionsbaggerung

Bei der Wasserinjektionsbaggerung werden die Ablagerungen an der Hafensohle so fluidisiert, dass sie selbst bei fehlendem Gefälle unter der Schwerkraft des Dichtestromes ins Fließen geraten. Besteht zwischen dem Hafenbecken und dem Strom ein entsprechendes Gefälle Richtung Strom, begünstigt dies noch den Abtransport der fluidisierten Sedimente zum Strom hin. Dies gilt jedoch vorrangig für feinen Schlick. Sandige Sedimente verbleiben zum größeren Anteil im Hafenbecken.

Von den schlackigen Hafensedimenten, die so als „fluid mud“ in den Strom zurückgeführt werden können, wird allerdings mit dem Flutstrom auch immer wieder ein Anteil zurückbefördert. Dieser Anteil ist deutlich höher als der aus der zuvor beschriebenen Rück-

fracht aus Umlagerungen an der Landesgrenze, weil Handlungsort und Hafenbecken näher beieinander liegen. Im Übrigen wird auf die Darstellungen in Kap. 5.2 und 5.3 verwiesen.

5.5 Bauliche Verminderungsmaßnahmen

Als derzeit einzige wirksame und erprobte bauliche Verminderungsmaßnahme soll hier kurz auf die sog. **Strömungsumlenkwand** hingewiesen werden. Die Wirkung dieser konstruktiven Maßnahme zielt darauf ab, den sohnah hohen Schwebstoff-, „fluid mud“- und Geschiebeeintrag durch einen Unterwasser-Damm in den Hauptstrom abzulenken und gleichzeitig die Walzenbildung in der Hafeneinfahrt und damit den „Teetasseneffekt“ abzubauen (siehe Abb. 13).

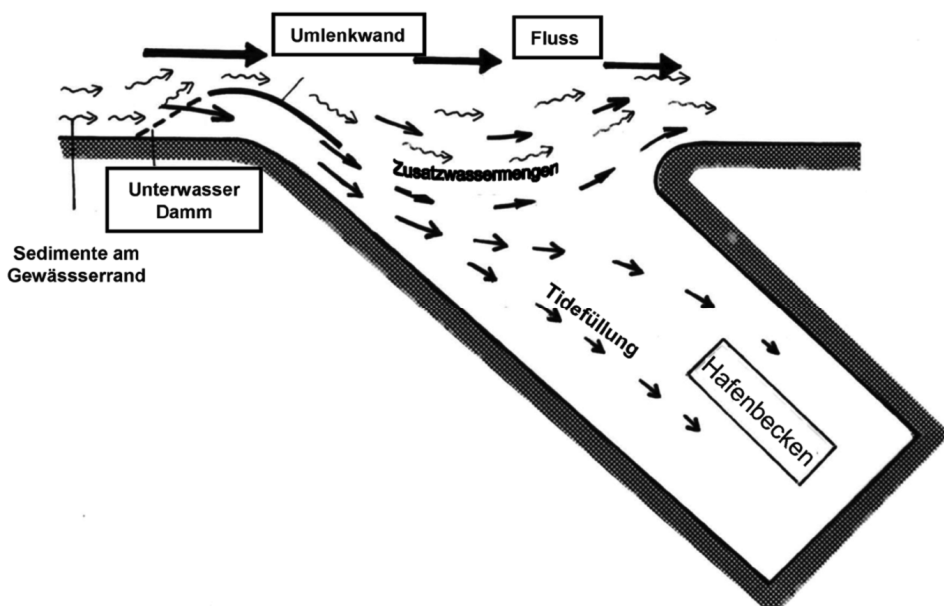


Abb. 13: Strömungs- und Sedimenttransportverhältnisse an einer Hafeneinfahrt mit Umlenkwand

Die Tidefüllung des Hafenbeckens erfolgt allein über den Kanal zwischen Umlenkwand und Ufer mit schwebstoffärmerem Wasser des Wasserkörpers oberhalb des Unterwasser-Dammes. Eine gleichfalls über den Kanal mit eingetragene Zusatzwassermenge strömt zurück in den Strom und verhindert dabei den unerwünschten Eintrag von Sedimenten in der Hafeneinfahrt.

Die Strömungsumlenkwand ist somit keine aktive Maßnahme der Unterhaltung im klassischen Sinne, sondern vielmehr ein passives Bauwerk, dessen Wirkung auf eine nachhaltige Verminderung der Unterhaltungsaufwendungen abzielt.

Die bisherigen Beobachtungen (CHRISTIANSEN, 1997) haben gezeigt, dass mit der Umlenkwand am Köhlfleet eine Sedimentationsverminderung von rd. 40 % erreicht werden konnte, ohne dass es in benachbarten Hafenbecken nachweislich zu entsprechenden Erhöhungen gekommen ist.

6. Sonstige Einflussgrößen auf die Sedimentation

6.1 Schiffsverkehr

In den letzten Jahren hat der Verkehr mit tiefgehenden Schiffen auf der Elbe stark zugenommen. Schiffe mit geringer Kielfreiheit wirbeln Sedimente auf, z.T. bis an die Wasseroberfläche. Dieses Material wird zum Teil im Nachlauf des Schiffes mitbewegt oder verlässt den Einflussbereich des Schiffes und wird dann von der Tideströmung weiterbefördert.

Die tideabhängige Fahrt tiefgehender Schiffe erfolgt im Bereich von Glückstadt bis Hamburg sowohl für einlaufende wie für auslaufende Schiffe immer bei auflaufendem Wasser. Dadurch kann aufgewirbeltes Sediment per „tidal pumping“ nach Hamburg transportiert werden und trägt dann auch zu erhöhter Sedimentation in den Hafenbecken bei. Bei geringem Oberwasserabfluss verstärkt sich dieser Effekt.

Es ist geplant, diesen sogenannten „residuellen Sedimenttransport durch Schiffe“ mit Hilfe von Messprogrammen quantitativ zu erfassen. 2006 durchgeführte Messungen waren nicht erfolgreich. Unter Verwendung dieser Erkenntnisse werden zurzeit von der Hamburg Port Authority (HPA) zusammen mit dem Danish Hydraulic Institute (dhi) und wissenschaftlichen Einrichtungen Untersuchungen zu schiffsinduzierten Sedimenttransporten durchgeführt. Hierbei werden mit verbesserten Messmethoden und unter Verwendung von zu entwickelnden hydro-numerischen Modellen Sensitivitätsanalysen zum „residuellen Sedimenttransport durch Schiffe“ vorgenommen.

Weiterhin stellen tiefgehende Schiffe, die im Hamburger Hafen überwiegend bei Flut in die Hafenbecken eindrehen oder auslaufen, mit dem zeitweilig ins Gewässer ragenden Schiffsteil einen „Störkörper“ für die Gewässerströmung dar. Durch die dabei entstehen sohnhaften Turbulenzen wird zusätzlich Sohlenmaterial aufgewirbelt und in das Hafenbecken eingetragen. Drehmanöver innerhalb der Hafeneinfahrt erzeugen ähnlich starke Materialaufwirbelungen. Bei Flutstrom setzt sich dann aufgewirbeltes Sediment wieder in der Linse unter der Strömungswalze ab, oder wird tiefer in das Hafenbecken hineinverfrachtet. Bei Ebbe kann ggf. ein geringer Teil des aufgewirbelten Materials in den Strom zurückverfrachtet werden.

Hafenbecken, in denen die Ein- und Auslaufmanöver überwiegend während der Flutphase stattfinden, werden somit zusätzlich durch Sedimentation beaufschlagt. Treten diese Schiffsverkehre weiterhin verstärkt im Sommer auf, d.h. in Zeiten mit überwiegend geringer Oberwasserführung, erhöht sich dieser Effekt.

6.2 „Scheinbare“ Ursachen

Grundsätzlich werden alle Aussagen zu Sedimentationen in Hafenbecken aus Vermessungsplänen abgeleitet. Berechnet werden die Sedimentationsmengen aus der Höhendifferenz der vermessenen Hafensohle über den Zeitraum der Vermessungen. Mengen, die wegen fehlender Vermessungsplanintervalle so nicht zu ermitteln sind, werden über Regressionsfunktionen aus der Beziehung Sedimentation zu Oberwasser eingerechnet. Dabei hat sich nun Folgendes gezeigt:

Werden Vermessungen z.B. nach Wasserinjektionsbaggerungen zu früh durchgeführt und diese Vermessungsdaten mit denen aus einer nachfolgenden Vermessung für Sedimentationsberechnungen verwendet, so ergeben sich rechnerisch zu geringe Sedimentationen oder bei kurzen Zeitintervallen sogar „scheinbare Erosionen“. Das liegt daran, dass die kurz nach Wasserinjektionsbaggerungen vermessene noch „weiche“ Sohle nachfolgend durch Konsolidierung stärker absinkt als durch Neusedimentation wieder anwächst, was rechnerisch den

Effekt einer Erosion vortäuscht. Zur Vermeidung dieser Fehleinschätzung sollten nur Vermessungspläne für Sedimentationsermittlungen verwendet werden, die später als ca. 2 Wochen nach Abschluss von Wasserinjektionsbaggerungen aufgenommen wurden.

7. Ergebnisse

In der vorliegenden Studie sind alle derzeit bekannten Parameter, die einen Einfluss auf die Sedimentation in den Hamburger Hafenbecken haben, aufgeführt und bewertet worden.

Darüber hinaus wird beschrieben, in welcher Weise sich die Wirkungen der Einflussgrößen bei unterschiedlichen Oberwasserabflüssen der Elbe verändern.

Bei den Überlegungen, die Baggermengen sinnvoll zu minimieren, zeichnen sich folgende Möglichkeiten mit nachhaltiger Wirkung ab:

- Konstruktive Maßnahmen, mit denen die Hafeneinfahrtsgeometrie und der Strombereich vor der Hafeneinfahrt strömungstechnisch optimal ausgebildet werden.
- Strombauliche Maßnahmen mit dem Ziel, den Tidehub bzw. Tideanstieg und damit das „tidal pumping“ zu dämpfen.
- Die Optimierung der Bagger- und Umlagerungsstrategie für das Gesamtsystem Tideelbe.

In der Rangfolge des jeweiligen Kosten-Nutzen-Grades sollten alle aufgeführten Möglichkeiten der Baggergutverminderung realisiert werden. Alternativen zu dieser Handlungsempfehlung sind derzeit nicht erkennbar.

8. Danksagung

Allen Besatzungsmitgliedern der Messschiffe Nige Wark und Reinhard Woltmann sowie den Mitarbeitern und Kollegen aus der Gewässerkunde des Strom- und Hafenbau Hamburg (heute Hamburg Port Authority) möchte ich für die aktive Mitarbeit bei der Erstellung und Auswertung der umfangreichen Datensätze danken.

Persönlich danke ich meinem ehemaligen Abteilungsleiter und stellvertretenden Amtsleiter beim Strom- und Hafenbau Herrn Dr.-Ing. Harald Göhren dafür, dass er mich trotz anfänglicher Skepsis am erfolgreichen Ergebnis stets darin gefördert hat, an der Entwicklung von Lösungen zur Verminderung der Sedimentation in Hafenbecken zu arbeiten.

Den Fachkollegen vom Kuratorium für Forschung im Küsteningenieurwesen (KFKI), vom Franzius-Institut in Hannover, vom Leichtweis-Institut in Braunschweig und des internationalen Expertenkreises der Estuary Study Group (ESG) möchte ich dafür danken, dass sie über drei Jahrzehnte durch umfangreiche Diskussionen und Anregungen der vorliegenden Arbeit einen gewissen Reifegrad verliehen haben.

9. Schriftenverzeichnis

- CHRISTIANSEN, H.: The main factors causing harbour siltation and measures for its reduction. Report of the Second Workshop on Dredging and Surveying, Leer, Germany, 1996.
- CHRISTIANSEN, H.: Erfahrungen mit der Strömungsumlenkung. *Hansa* 134, 70–73, 1997.
- GREISER, N.: Zur Dynamik von Schwebstoffen und ihren biologischen Komponenten in der Elbe bei Hamburg. Diss. *Hamburger Küstenforschung* 45, 1988.
- HARMS, H. und NEHLS, R.: Bestimmung der Sedimentherkunft im Hamburger Hafen aus stromabliegenden Elbabschnitten. Hamburg, 1995.
- MANNING, A. J. and DYER, K. R.: The use of optics for in-situ determination of flocculated mud characteristics. In: *J. Optics A: Pure and Applied Optics*, 4, 71–81, 2002.