

**ENTWICKLUNG VON UNTERWASSERSTRUKTUREN
ZUR VERMINDERUNG VON SEDIMENTATION UND
BAGGERMENGEN AM LIEGEPLATZ EINES
SEGELSCHIFFES IN EINEM TIDEFLUSS**

***UNDERWATER STRUCTURES AGAINST SEDIMENTATION
IN THE BERTH OF A LARGE SAIL SHIP IN A TIDAL RIVER***

von

Oliver STOSCHEK

Andreas MATHEJA

Claus ZMMERMANN

ABSTRACT

Siltation is a permanent problem in harbours at tidal rivers and in estuaries causing continuous maintenance dredging to guarantee safe navigation. Sedimentation near a deep draft ship berth at a tidal river cannot be avoided due to tidal currents and turbulent processes. But reductions in sedimentation can significantly decrease maintenance dredging costs.

Simulations for a technical solution (sheet pile wall), minimizing sedimentation near the berth of a deep drafted sail ship in a tidal river to secure manoeuvrability, are presented.

The hydrodynamic situation at the tidal part of a river was simulated, using RMA2 and MIKE3 hydrodynamic models. Relevant physical processes of sediment transport, erosion and deposition were modelled using SED2D. Reduction of sedimentation was verified using MIKE3 HD.

To understand the process of sedimentation around the ship the dynamic behaviour of the tidal environment and resulting hydrodynamics, also influenced by varying discharges from the upstream non-tidal part of the river system was simulated.

It is shown that near bed sand transport can be guided. However, the structure described above act as a sediment trap for suspended material. Applicability and sensitivity of the different models is compared. Apart from technical aspects of the construction to be modelled it is pointed out which modelling capabilities are necessary to find critical flux conditions and how they affect the overall design of the structure.

The results of the simulations and the possibilities application for the ship berth are discussed. Finally, the results of a subsequent monitoring are compared with the numerical results.

ZUSAMMENFASSUNG

Sedimentation ist ein ständiges Problem in tidebeeinflussten Hafengebieten an Flüssen. Die notwendige Wassertiefe für den Schiffsverkehr kann meist nur durch regelmäßige Unterhaltungsbaggerungen aufrecht erhalten werden. Insbesondere eine Liegewanne für einen Kajenplatz an einem Tidefluss sedimentiert schnell zu. Der Eintrag von Sedimenten in eine Liegewanne kann nicht vermieden werden, eine Reduktion des Eintrages kann aber die Unterhaltungskosten deutlich senken.

Eine Möglichkeit die Unterhaltungskosten einer Liegewanne zu senken, ist der Einbau einer Unterwasserspundwand. Für das Segelschiff DEUTSCHLAND in der Lesum bei Vegesack (Bremen) wurde u.a. eine Spundwand um das Schiff herum konzipiert und der Einfluss auf Strömungen und den Sedimenttransport untersucht.

Die Hydrodynamik wurde instationär mit dem Programmsystemen RMA2 (2-dimensional) und MIKE3 (3-dimensional) numerisch ermittelt. Der Sedimenttransport wurde mit dem Programmpaket SED2D berechnet. Durch die Betrachtung der Hydrodynamik im Bereich der Unterwasserspundwand konnte der Sedimenttransport verifiziert werden.

Um die Sedimentationsprozesse im Bereich des Liegeplatzes des Segelschiffes bestimmen zu können, ist es notwendig, die Dynamik der Tide im Fluss und die daraus resultierenden Strömungen mit hoher Genauigkeit wiederzugeben. Die Hydrodynamik wird dabei von dem Oberwasser der Lesum und der Weser beeinflusst.

Aus den Ergebnissen der numerischen Modelle ergibt sich, dass der sohlnahe Sedimenttransport durch die Unterwasserspundwand um die Liegewanne herum geführt werden kann. Die Liegewanne ist aber zugleich eine Sedimentfalle für Schwebstoffe, die in der Lesum transportiert werden.

Die Ergebnisse der Simulationen und eine mögliche Ausführung der Spundwand werden vorgestellt. Diese aus den numerischen Modellen gewonnenen Erkenntnisse werden abschließend mit den Ergebnissen aus einem Monitoring Programm verglichen.

INHALT

1	EINLEITUNG	28
2	ALLGEMEINE PROBLEMLÖSUNG	28
3	METHODIK UND VORGEHEN	29
4	VERWENDETE MODELLE	30
4.1	Auswahl des verwendeten Programmsystems	30
4.2	Hydrodynamik	30
4.2.1	RMA2	30
4.2.2	MIKE3	31
4.2.3	Grundlagen des Sedimenttransportmodells (SED2D)	34
5	AUFBAU DER NUMERISCHEN MODELLE	36
5.1	Räumliche Abgrenzung des Modellgebietes	36
5.2	Modellparameter	36
5.3	Randbedingungen	38
5.4	Kalibrierung des hydrodynamischen Modells	38
5.4.1	Auswahl des Kontrollzeitraumes und Randbedingungen	38
5.4.2	Ergebnisse der Kalibrierung	39
5.5	Kalibrierung des Sedimenttransportmodells	40
6	SIMULATION VON MAßNAHMEN	44
6.1	Vorgehensweise	44
6.2	Ursprünglicher Zustand	48
6.2.1	Strömungen in der Lesummündung	48
6.2.2	Sedimentation in der Lesummündung	48
6.3	Ausgangszustand mit Liegewanne und Segelschiff	48
6.3.1	Strömungen in der Lesummündung	48
6.3.2	Sedimentation in der Lesummündung	49
6.4	Ausbauzustand mit Liegewanne und umgebender Spundwand	54
6.4.1	Strömungen in der Lesummündung	54
6.4.2	Sedimentation in der Lesummündung	58
6.4.3	Ergebnisse	59
7	VERGLEICH MIT DER NATUR	60
8	ZUSAMMENFASSUNG	62
9	SCHRIFTTUM	62

ABBILDUNGSVERZEICHNIS

Abb. 1-1: Lage des Liegeplatzes des Segelschiffes	28
Abb. 1-2: Wassertiefen am Liegeplatz des Segelschiffes a) April 1998, b) Mai 1999	28
Abb. 2-1: Leitungssystem für Luft- oder Wasserstrahlerzeugung	29
Abb. 2-2: Eindocken eines Liegeplatzes	29
Abb. 5-1: Modellgebiete und Lage der Modellränder: FE-Gitter (RMA2/SED2D) mit kombiniertem triangularem und quadratischem Gitter, Elementgrößen von 2-12000m ² , 7235 Elemente und FD-Gitter (MIKE3) mit 167X90 Gitterzellen bei einer Gitterweite von dx=dy=18m, 6m,2m (nested) und dz=0,5m, Rotation von 41°	37
Abb. 5-2: Gewässertopographie im Modellgebiet [mNN]	37
Abb. 5-3: Randbedingungen für die hydrodynamische Simulation (Durchfluss: +=Ebbestrom, -=Flutstrom)	39
Abb. 5-4: Vergleich der gemessenen mit den berechneten Wasserständen	40
Abb. 5-5: Gemessene Flutstromgeschwindigkeiten in der Hafeneinfahrt Vegesack (Franzius-Institut, 1952)	41
Abb. 5-6: Berechnete Strömungsrichtungen und -geschwindigkeiten zum Zeitpunkt der maximalen Flutströmung im Vegesacker Hafen (24.02.1997, 01:15 Uhr; 2 Std. 35 Min. nach Tnw)	41
Abb. 5-7: Gemessene Ebbestromgeschwindigkeiten in der Hafeneinfahrt Vegesack (Franzius-Institut, 1952)	42
Abb. 5-8: Berechnete Strömungsrichtungen und -geschwindigkeiten zum Zeitpunkt der maximalen Ebbestromung im Vegesacker Hafen (24.02.1997, 07:45 Uhr; 3 Std. 45 Min. nach Thw)	42
Abb. 5-9: Körnungslinie einer Mischprobe im Bereich des Liegeplatzes des Segelschiffes Deutschland (LIMNOLOGISCHES INSTITUT DR. NOWAK, 1999)	43
Abb. 5-10: Körnungslinie einer Mischprobe im Bereich des neuen Fahrgastanlegers stromaufwärts vom Liegeplatz des Segelschiffes Deutschland in der Lesum (LIMNOLOGISCHES INSTITUT DR. NOWAK, 1999)	43
Abb. 6-1: Verwendetes FE-Netz im Bereich der Liegewanne	45
Abb. 6-2: Bathymetrie im ursprünglichen Zustand der Lesum	45
Abb. 6-3: Bathymetrie im Ausgangszustand mit integriertem Segelschiff	46
Abb. 6-4: Bathymetrie im Ausbauzustand mit integriertem Segelschiff	46
Abb. 6-5: Abmessungen der Spundwand	47
Abb. 6-6: Schnitt A-A	47
Abb. 6-7: Lage der ausgewerteten Querschnitte	48
Abb. 6-8: Berechnete Strömungsgeschwindigkeiten in der Lesummündung für einen hohen Oberwasserabfluss in der Lesum von 20 m ³ /s bei Flutstrom, 3 Std. 50 Min. nach Tnw (T2), für a) ursprünglicher Zustand (1985) und b) Ausgangszustand mit Liegewanne und Segelschiff	50
Abb. 6-9: Berechnete Strömungsgeschwindigkeiten in der Lesummündung für einen hohen Oberwasserabfluss in der Lesum von 20 m ³ /s bei Ebbestrom, Tnw (T4), für a) ursprünglicher Zustand (1985) und b) Ausgangszustand mit Liegewanne und Segelschiff	51
Abb. 6-10: Querschnitt durch die Lesum und die Liegewanne des Segelschiffes im numerischen Modell (Peilung WSA Bremen, 1985, 1999)	52
Abb. 6-11: Strömungsgeschwindigkeiten im Schnitt 3 im ursprünglichen Zustand der Lesum (1985), im Ausgangszustand mit Segelschiff und im Ausbauzustand mit geplanter Spundwand (Flutstrom 3 Std. 50 Min. nach Tnw, T2)	52
Abb. 6-12: Strömungsgeschwindigkeiten im Schnitt 3 im ursprünglichen Zustand (1985) und im Ausgangszustand mit Segelschiff (Ebbestrom bei Tideniedrigwasser; 24.02.97, 11:00 Uhr)	53

Abb. 6-13: Kritische Strömungsgeschwindigkeiten für den Bewegungsbeginn von Sedimenten über einer ebenen Sohle (van Rijn, 1993)	53
Abb. 6-14: Berechnete Sedimentationshöhen in der Lesummündung für einen hohen Oberwasserabfluss in der Lesum von 20 m ³ /s am Ende der Ebbestromphase für den Ausgangszustand mit Liegewanne und Segelschiff	54
Abb. 6-15: Berechnete Strömungsgeschwindigkeiten in der Lesummündung für einen hohen Oberwasserabfluss in der Lesum von 20 m ³ /s bei Flutstrom, 3 Std. 50 Min. nach Tnw (T2), für a) Ausgangszustand mit Liegewanne und Segelschiff und b) Ausbauzustand mit Spundwand um das Segelschiff	55
Abb. 6-16: Berechnete Strömungsgeschwindigkeiten in der Lesummündung für einen hohen Oberwasserabfluss in der Lesum von 20 m ³ /s bei Ebbestrom, Tnw (T4), für a) Ausgangszustand mit Liegewanne und Segelschiff und b) Ausbauzustand mit Spundwand um das Segelschiff	56
Abb. 6-17: Position des Vertikalschnittes durch die Lesum und Lage der sohlnahen Ebene oberhalb der Spundwand um das Segelschiff (SCHLENZ, 2002)	57
Abb. 6-18: Strömungsgeschwindigkeiten in einem Vertikalschnitt senkrecht zur Kaimauer oberhalb der Spundwand	58
Abb. 6-19: Berechnete Sedimentationshöhen in der Lesummündung für einen hohen Oberwasserabfluss in der Lesum von 20 m ³ /s am Ende der Ebbestromphase für den Ausbauzustand mit Liegewanne, Segelschiff und Spundwand	59
Abb. 7-1: Sedimentation (+) und Erosion (-) nach 1 Monat (in m) (Dezember 2002 – November 2002)	60
Abb. 7-2: Sedimentation (+) und Erosion (-) nach 4 Monaten (in m) (März 2003 – November 2002)	61
Abb. 7-3: Lage der Messpunkte	61

TAFELVERZEICHNIS

Tafel 4-1: Wahl empirischer Parameter für das gemischte k-ε-Modell nach Rodi (1980) in der Vertikalen und den Ansatz von Smagorinsky (1963) in der Horizontalen	34
Tafel 5-1: Randbedingungen für die Berechnung des stationären Eichzustandes	38
Tafel 5-2: Durch Kalibrierung ermittelte Modellparameter für Sohlrauigkeit und Pecletzahl (RMA2)	40
Tafel 5-3: Sedimenteintrag der Sandfraktion an den Modellrändern.	44
Tafel 7-1: Wassertiefen an verschiedenen Messpunkten um das Segelschiff im März 2003 und den drei folgenden Monaten sowie im Oktober 2003	61
Tafel 7-2: Wassertiefen an verschiedenen Messpunkten um das Segelschiff im März 2003 und die Änderungen in den drei folgenden Monaten sowie im Oktober 2003	62

SYMBOLVERZEICHNIS

B_e	=	Effektive Breite des Einzelbauwerks [m]	S	=	Inhaltsstoff (z.B. Salz) [kg/m ³]
c	=	Sedimentkonzentration [kg/m ³]	S_{II}	=	Quellen- und Senkenterm für die Impulserhaltung
$c_{1\varepsilon}, c_{2\varepsilon}, c_{3\varepsilon}$	=	empirische Parameter (Diffusionsparameter, vgl. Tafel 4-1) [m ² /s]	S_{QQ}	=	Quellen- und Senkenterm innerhalb der Massenbilanz
c_c	=	kritische Konzentration [mg/l] (hier: $c_c = 300\text{mg/l}$)	t	=	Zeit [s]
C_d	=	Depositionskoeffizient [-]	t_c	=	charakteristische Zeitdauer des Sedimenteintrages [s]
C_D	=	Widerstandsbeiwert der Sohle [-]	Δt	=	Zeitschritt der Iteration [s]
C_e	=	Erosionskoeffizient [-]	T_L	=	Dicke der zu erodierenden Schicht [m]
c_s	=	Schallgeschwindigkeit in Wasser [m/s]	u^*	=	Schubspannungsgeschwindigkeit [m/s]
C_W	=	Widerstandsbeiwert für Wind [-]	u, v	=	horizontale Strömungsgeschwindigkeiten in x- und y-Richtung [m/s]
D	=	Wassertiefe [m]	u_i	=	Strömungsgeschwindigkeit in x_i -Richtung [m/s]
d	=	Korndurchmesser [m]	\bar{v}	=	mittlere Strömungsgeschwindigkeit [m/s]
dx	=	Elementlänge der Zelle in Strömungsrichtung [m]	V_a	=	Windgeschwindigkeit [m/s]
D_x, D_y	=	Diffusionskoeffizienten [m ² /s]	v_s, w_s	=	Sinkgeschwindigkeit [m/s]
$E_{x,y}$	=	Wirbelviskosität [Ns]	v_x, v_y, v_z	=	Geschwindigkeitskomponenten (kartesisch) [m/s]
F	=	Schubkraft auf das Bauwerk [N]	W	=	Windgeschwindigkeit in einer Höhe von 10m über dem Wasserspiegel [m/s]
g	=	Erdbeschleunigung [m/s ²]	x, y	=	Kartesische Koordinaten [-]
G_A	=	Produktionsterm infolge Auftrieb	z_b	=	Höhe über der Gewässersohle [m/s]
g_i	=	Gravitationsfeld [m/s ²]	z_m	=	Höhe über der Gewässersohle in welcher das nach dem SMAGORINKY Ansatz berechnete Geschwindigkeitsprofil gleich dem logarithmischen Geschwindigkeitsprofil ist [m]
h	=	Wassertiefe [m]	α	=	empirischer Parameter [-]
H_e	=	Höhe des Einzelbauwerks [m]	ν_t	=	Wirbelviskosität [m ² /s]
I	=	Energieliniengefälle [‰]	ρ_L	=	Dichte der zu erodierenden Schicht [kg/m ³]
k	=	turbulente kinetische Energie [m ² /s ²]	ρ	=	Dichte des Fluids [kg/m ³]
k_s	=	Sandrauheit [m]	ρ_s	=	Dichte des Sedimentes [kg/m ³]
l	=	Längenmaßstab nach SMAGORINSKY (1963) [-]	ζ	=	empirischer Windreibungskoeffizient [-]
n	=	Anzahl der innerhalb der zu betrachtenden Zelle zu berücksichtigten Einzelbauwerke [-]	ϕ	=	geographische Breite [°]
n	=	MANNING-Beiwert [s/m ^{1/3}]	ν	=	kinematische Viskosität des Wassers [m ² /s]
p	=	Druckfeld [kN/m ²]	$\delta_{x,y}$	=	Kronecker Delta (mit $\delta_{i,j}=1$ für $i=j$, $\delta_{i,j}=0$ für $i \neq j$) [-]
P	=	Erosionsrate kohäsiver Sedimente [m ² /s]			
Pe	=	Pecletzahl [-]			
P_s	=	Produktionsterm infolge Schubspannungen aus Strömung			
r_{hy}	=	mittlerer hydraulischer Radius [m]			
Ri	=	Richardson-Zahl [-]			
s	=	Relative Dichte [-] (ρ_s / ρ_w)			

τ	=	Sohlschubspannung [kN/m ²]
ψ	=	Windrichtung [°]
ν_T	=	Wirbelviskosität [m ² /s]
β	=	empirischer Parameter [-]
ϕ	=	Geographische Breite [°]
λ	=	Geographische Länge [°]
κ	=	KARMAN Konstante ($\kappa=0,4$) [-]
α	=	Sohllage [m]
ω	=	Winkelgeschwindigkeit der Erde $\omega=2\pi/86164s$ [1/s]
τ_d	=	kritische Schubspannung für Deposition [N/m ²]
τ_e	=	kritische Schubspannung für Erosion [N/m ²]
ρ_{Fluid}	=	Dichte des Fluids [kg/m ³]
Ω_{ij}	=	Coriolis-Kraft [N]
ρ_{Luft}	=	Dichte von Luft [kg/m ³]
τ_p	=	Equivalente Schubspannung infolge des Bauwerkes [N/m ²]
τ_s	=	Grenzwert der Sohlschubspannung für das Einsetzen einer Massenerosion [N/m ²]
σ_T	=	Prandtl-Zahl (vgl. Tafel B.1-3) [m ² /s]
ν_{t0}	=	nicht gedämpfte Wirbelviskosität [m ² /s]

1 Einleitung

Im Jahr 1995 wurde im Mündungsbereich der Lesum zur Weser eine Liegewanne für einen permanenten Liegeplatz eines Segelschiffes ausgebaggert (Abb. 1-1). Die Sohle der Liegewanne befindet sich ca. 5 m unter der planfestgestellten Sohle der Lesum und versandete innerhalb von etwa 2 Jahren soweit, dass das Segelschiff bei Tnw Grundberührung erfuhr. Nach einem Saugbaggereinsatz im Jahre 1997 und der darauf folgenden Räumung im März 1998 (Abb. 1-2a) wurden im März 1999 wiederum Versandungen festgestellt, zuletzt ebenfalls wieder verbunden mit einer Grundberührung des Segelschiffes (Abb. 1-2b).

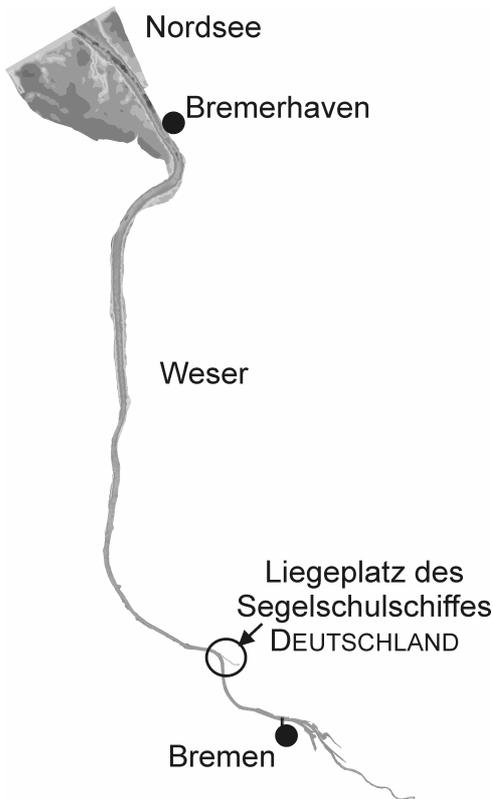


Abb. 1-1: Lage des Liegeplatzes des Segelschiffes

Die Ursachen für die Baggerungen liegen in den in der Lesum mitgeführten Sedimenten, die einerseits durch die vorhandene Tidebewegung transportiert und andererseits durch die Lesum von oberstrom, besonders bei Hochwasser, aus dem gesamten Einzugsgebiet über die Wümme herangeführt werden. Bei Unterhaltungsmaßnahmen in der Liegewanne des Segelschiffes in der Lesummündung wurden vorrangig Mittel- und Grobsande gebaggert, die einen Hinweis auf das in der Lesum transportierte Material geben. Zum Teil werden diese Sedimente auf Grund der Aufweitung des Lesumquerschnittes durch den Liegeplatz und der damit verbundenen Reduzierung der Strömungsgeschwindigkeiten in den Liegeplatz an der Lesum eingetragen und setzen sich dort ab.

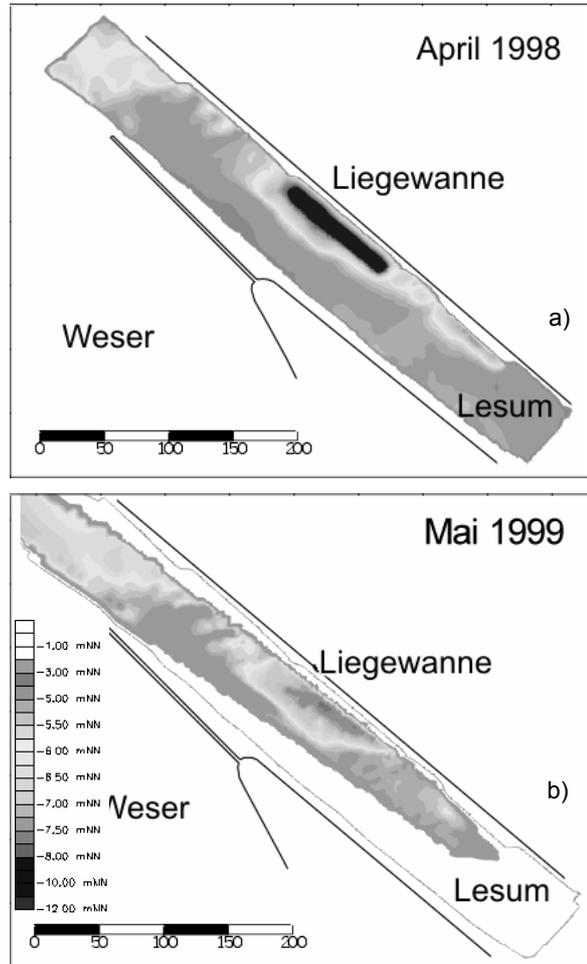


Abb. 1-2: Wassertiefen am Liegeplatz des Segelschiffes a) April 1998, b) Mai 1999

2 Allgemeine Problemlösung

In einem Fluss ist grundsätzlich zwischen einem Transport in Suspension (Schwebstofftransport, *Suspended Load*) und sohnnahem Transport (*Bed Load*) zu unterscheiden. Zwischen beiden Transportarten gibt es Übergänge, die von der Sedimentkorngröße, der Sedimentdichte, der Strömungsgeschwindigkeit und vom Turbulenzgrad der Strömung (Geschwindigkeit, Zähigkeit, Sohlenrauheit) abhängen. Dies bedeutet, dass sohnnahes Material bei hohen Geschwindigkeiten in Suspension geht und suspendiertes Material bei abnehmender Strömungsgeschwindigkeit zu *Bed Load* wird oder sich ablagert (Sedimentation).

In einem Tidefluss treten während einer Tide alle Phasen des Sedimenttransportes auf. Im Mittel stellt sich jedoch für jeden Querschnitt ein Gleichgewicht zwischen Erosion, Transport und Sedimentation ein. Dieses Gleichgewicht wird durch Veränderung der Oberwasserabflüsse, die in der Regel mit steigendem Abfluss auch mit erhöhten Sedimenttransport verbunden sind, verschoben. Hinzu kommt in einem Ästuar wie der Unterweser der hohe Anteil von Schwebstoff-

fen mit langen Absetzzeiten bzw. geringen Sinkgeschwindigkeiten ($v_s < 0,1 \text{ cm/s}$), die sich nur bei längeren Stillstandszeiten oder in Strömungswalzen und Ablösezonen mit dauerhaft geringen Strömungsgeschwindigkeiten ablageren.

Der Bau einer Liegewanne, wie im Fall des Segel-schiffes DEUTSCHLAND in der Lesum, bedeutet eine lokale Querschnittsaufweitung mit entsprechenden Verminderungen der örtlichen Strömungsgeschwindigkeiten sowie einer Veränderung der Strömungsfelder. Sohlnahes Sediment wird in die Liegewanne eingetragen und bleibt auch bei hohen Strömungsgeschwindigkeiten z.B. während Flut- oder Ebbestrom, liegen. Gleiches geschieht mit Teilen der in Suspension befindlichen Sedimente. Die durch das Schiff erzeugten lokalen Erhöhungen der Strömungsgeschwindigkeiten reichen für einen flächenhaften Weitertransport in der Regel nicht aus.

Eine Lösung des Problems wäre mithin, neben laufenden Baggerungen, die Erzeugung lokal erhöhter Strömungsgeschwindigkeiten im Bereich des genannten Liegeplatzes, z.B. durch Wasserstrahlen oder Luftblasen (Abb. 2-1). Das Laufen lassen einer Schiffsschraube führt nur im Bereich des Hecks zu reduzierten Ablagerungen und wäre keine Gesamtlösung für den Liegeplatz.

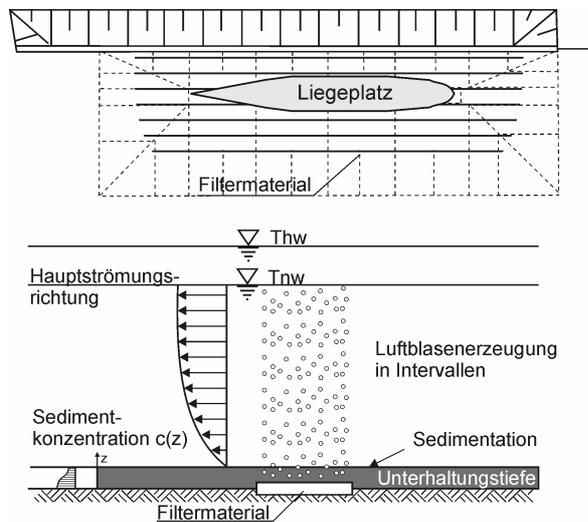


Abb. 2-1: Leitungssystem für Luft- oder Wasserstrahlerzeugung

Diese Lösung ist extrem aufwendig im Bau und Betrieb (Pumpen / Kompressoren, Leitungen, Energiekosten, Wartung, Betrieb usw.).

Eine erfolgsversprechende Lösung ist die weitgehende Wiederherstellung der ursprünglichen Querschnitte. Dies kann in Form einer Wand im Fluss mit Landanschluss erfolgen, deren Abstand sich nach der Querschnittsaufweitung richtet (Docklösung, Abb. 2-2).

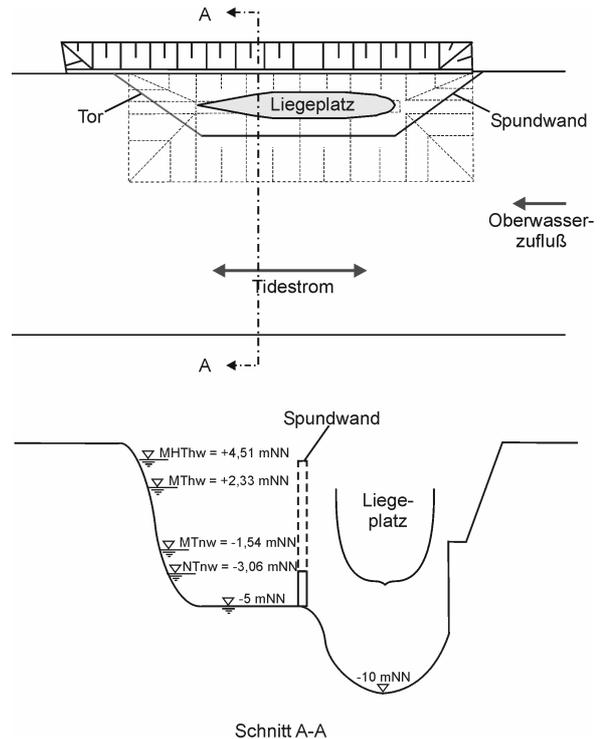


Abb. 2-2: Eindocken eines Liegeplatzes

Wird die Wand über den höchsten Wasserstand (MThw bzw. HThw) gezogen, entsteht eine hinsichtlich der Sedimente unterhaltungsfreie Lösung. Sie erfordert für das Ein- und Ausdocken des Schiffes jedoch ein Tor. Während Niedrigwasser ist zudem der Blick über den Fluss unterbrochen.

Für den Fall überwiegend sohlnahen Sedimenttransportes, wie im vorliegenden Fall der Lesum, kann eine Schwellenlösung zu einer weitergehenden Lösung des Problems beitragen. Bei entsprechender Höhe eines Landanschlusses (bevorzugt unterstrom) kann eine Ausdockung des Schiffes bei Thw erfolgen (das Schiff hat keinen eigenen Antrieb und ist i.A. permanent am Liegeplatz), ohne Tore oder mobile Teile vorsehen zu müssen. Gleichwohl ist bei dieser Lösung mit einem Resteintrag von Schwebstoffen zu rechnen. Er richtet sich nach der Konzentrationsverteilung über die Tiefe und ist sehr variabel mit dem Tidewasserstand und dem Oberwasserzufluss.

Weitere denkbare Lösungsansätze wie Sedimentfallen oder Vorratsbaggerungen wurden wegen zu hoher Unterhaltungskosten nicht näher betrachtet.

3 Methodik und Vorgehen

Strategien und Maßnahmen zur Reduzierung der Sedimentation im Bereich des Liegeplatzes des Segel-schiffes wurden im FRANZIUS-INSTITUT anhand verfügbarer numerischer Modelle studiert.

Die Strömungsvorgänge in der Lesummündung wurden mit Hilfe hydrodynamischer 2D und 3D-Modelle nachgebildet. Das 2D-Modell diente zur regionalen Visualisierung der Strömungen in der Lesum. Das 3D-Modell hatte die Aufgabe die Strömungen im Bereich um die Spundwand nachzubilden.

Aufbauend auf diesem berechneten Strömungsfeld sind die Sedimentationsmengen innerhalb des Modellgebietes bestimmt worden, um Aussagen über die Effektivität der eingebauten Spundwand zu treffen und die Auswirkungen auf den Nahbereich in der Lesum abzuschätzen.

4 Verwendete Modelle

4.1 Auswahl des verwendeten Programmsystems

Die Vielzahl der abhängigen und unabhängigen Parameter bei der Beschreibung von Strömungs- und Sedimentationsvorgängen in tidebeeinflussten Flüssen und angeschlossenen Hafengebieten lässt eine Simulation der Vorgänge und Variation der Parameter in physikalischen Modellen nur mit unverhältnismäßigem Aufwand zu. Erst recht lassen sich die nach den Gesetzen von Zufall und Wahrscheinlichkeit in der Natur auftretenden Anfangs- und Randbedingungen nur ausschnittsweise durch Messungen einzelner Parameter in der Natur verifizieren.

Die Qualität der inzwischen verfügbaren numerischen Modelle im Zusammenspiel mit leistungsfähigen Rechenanlagen ermöglicht die Simulation auch in der Natur nur selten auftretender Extremfälle bzw. die Prognose der sich einstellenden Strömungszustände und Sedimentations- und Erosionsraten unter geänderten Randbedingungen (Umgestaltung von Hafengebieten, veränderte hydrologische Randbedingungen etc.). Modellierbar sind heute vor allem Sedimentations- und Erosionsvorgänge, die aus Kosten- und/oder Zeitgründen weder im physikalischen Modell durchzuführen sind, noch in der Natur durch Messungen zu verfolgen sind.

Die Zuverlässigkeit eines Modells kann anhand von Messwerten (Sollfunktion der Wasserstände und Strömungsgeschwindigkeiten für die Kalibrierung der numerischen Modelle) aus dem Modellgebiet und seiner Umgebung beurteilt werden. Weitere Messwerte dienen der Beurteilung (Validierung) der innerhalb der Kalibrierung festgelegten Eichparameter (hier: Sohlrauheiten und Turbulenzparameter).

Für die numerischen Simulationen wurde hier das Programmsystem SMS (Surfacewater Modelling System, BOSS INTERNATIONAL, 1997) mit den Rechenalgorithmen RMA2 (Resource Management Associates, instationäres hydrodynamisches Modell, US ARMY

CORPS OF ENGINEERS, 1997) bzw. SED2D (Sedimenttransportmodell, ROIG, 1998) sowie das 3-dimensionale Programmsystem MIKE3 des Danish Hydraulic Institute (1999) ausgewählt. Da Ergebnisse grundsätzlich zu den zum Einsatz gekommenen Verfahren einzuordnen sind, werden die theoretischen Grundlagen der einzelnen Modelle in den folgenden Abschnitten beschrieben.

4.2 Hydrodynamik

4.2.1 RMA2

Sowohl die Strömungs- als auch die Transportgleichungen sind bis auf wenige, einfache Ausnahmefälle analytisch bisher nicht oder nur mit unverhältnismäßig hohem Aufwand zu lösen. In der Regel ist die exakte Lösung der zugrunde liegenden Differentialgleichung unbekannt. Sie wird daher mit numerischen Berechnungsverfahren approximiert. Für die Lösung der Differentialgleichungssysteme wird hier ein Finites-Elemente-Verfahren (FEM) angewendet. Das FE-Netz kann dabei verschiedene Arten von Vielecken beinhalten.

Für das Pre- und Postprocessing, sowie die Erstellung der Steuerdateien für das hydrodynamische Modell und das Sedimenttransportmodell wird das Programmsystem SMS mit seiner graphischen Oberfläche verwendet.

Das hydrodynamische Modell RMA2 wird sowohl für die stationäre als auch für die instationäre Berechnung von Wasserständen und zweidimensionalen Strömungszuständen in Binnenflüssen, Ästuaren und Küstengewässern (Wasserkörper mit freier Oberfläche) eingesetzt. Es dient somit als Grundlage für die auf diesen Parametern bzw. einem berechneten Geschwindigkeitsfeld aufbauenden Modelle zur Berechnung des Sedimenttransports. Die vertikalen Komponenten werden integrativ gemittelt. Die Flüssigkeit wird als vertikal homogen angenommen. Das Modell berücksichtigt Windeinfluss, Quellen und Senken, Turbulenzeffekte und den Einfluss der Erdrotation (Coriolis-Kraft).

Die Navier-Stokes-Gleichungen für eine turbulente Strömung (Gl. 4-1 bis Gl. 4-3) werden auf dem Berechnungsgitter für vorgegebene Rand- und Anfangsbedingungen iterativ gelöst.

Die dynamische Zähigkeit (η) wird dabei durch den Turbulenzansatz von Reynolds berücksichtigt.

Reibung an der Gewässersohle wird durch die bekannten Ansätze nach MANNING bzw. CHEZY berücksichtigt und zur Bestimmung der Turbulenzparameter herangezogen. Die Sohlreibung kann alternativ durch die MANNING-Zahl (n -Wert) berücksichtigt werden (Gl.

4-4). Sie liegt erfahrungsgemäß zwischen 20 und 40 m^{1/3}/s.

$$\begin{aligned}
 & \underbrace{h \frac{\partial v_x}{\partial t}}_{\text{zeitl. Änderungsrate}} + \underbrace{h \cdot v_x \frac{\partial v_x}{\partial x} + h \cdot v_y \frac{\partial v_x}{\partial y}}_{\text{konvektiver Impulstransport}} \\
 & - \underbrace{\frac{h}{\rho} \left(E_{xx} \frac{\partial^2 v_x}{\partial x^2} + E_{xy} \frac{\partial^2 v_x}{\partial y^2} \right)}_{\text{diffuser Impulstransport}} + \underbrace{g \cdot h \left(\frac{\partial \alpha}{\partial x} + \frac{\partial h}{\partial x} \right)}_{\text{Druck}} \\
 & + \underbrace{\frac{g \cdot v_x \cdot n^2}{h^{1/3}} + (v_x^2 + v_y^2)^{1/2}}_{\text{Sohlschubspannung}} - \underbrace{\zeta \cdot V_a^2 \cos \psi}_{\text{Wind}} \\
 & - \underbrace{2 \cdot h \cdot \omega \cdot v \cdot \sin \phi}_{\text{Erdrotation}} = 0
 \end{aligned} \quad \text{Gl. 4-1}$$

$$\begin{aligned}
 & h \frac{\partial v_y}{\partial t} + h \cdot v_x \frac{\partial v_y}{\partial x} + h \cdot v_y \frac{\partial v_y}{\partial y} \\
 & - \frac{h}{\rho} \left(E_{yx} \frac{\partial^2 v_y}{\partial x^2} + E_{yy} \frac{\partial^2 v_y}{\partial y^2} \right) + g \cdot h \left(\frac{\partial \alpha}{\partial y} + \frac{\partial h}{\partial y} \right) \\
 & + \frac{g \cdot v_y \cdot n^2}{h^{1/3}} + (v_x^2 + v_y^2)^{1/2} - \underbrace{\zeta \cdot V_a^2 \sin \psi}_{\text{Wind}} + \\
 & \underbrace{2 \cdot h \cdot \omega \cdot v \cdot \sin \phi}_{\text{Erdrotation}} = 0
 \end{aligned} \quad \text{Gl. 4-2}$$

$$\frac{\partial h}{\partial t} + h \left(\frac{\partial v_x}{\partial x} + \frac{\partial v_y}{\partial y} \right) + v_x \frac{\partial h}{\partial x} + v_y \frac{\partial h}{\partial y} = 0 \quad \text{Gl. 4-3}$$

$$n = \frac{r_{hy}^{2/3} \cdot I^{1/2}}{v}, \quad v = \sqrt{v_x^2 + v_y^2} \quad \text{Gl. 4-4}$$

Über die Beziehung $\tau = \rho \cdot g \cdot r_{hy} \cdot I$ für die Schubspannung an der Sohle und unter der Annahme, dass für breite Gerinne der mittlere hydraulische Radius r_{hy} etwa der Tiefe des Gerinnes entspricht, erhält man für die Komponenten der Sohlschubspannung die Gleichungen:

$$\tau_x = \rho \cdot g \cdot n^2 \frac{v_x \sqrt{v_x^2 + v_y^2}}{h^{1/3}} \quad \text{Gl. 4-5}$$

$$\tau_y = \rho \cdot g \cdot n^2 \frac{v_y \sqrt{v_x^2 + v_y^2}}{h^{1/3}} \quad \text{Gl. 4-6}$$

Für die Beschreibung von turbulenten Geschwindigkeitsschwankungen ist in der Gleichung für den diffusen Impulstransport (Gl. 4-1/4-2) ein Ansatz zur Wirbelviskosität E eingebunden ($E = \rho \cdot \nu_T$). Analog zu den viskosen Schubspannungen einer Flüssigkeit basiert die Beschreibung von turbulenten Geschwindigkeitsschwankungen auf der Annahme, dass die Reynoldsspannungen proportional zum Gradienten der mittleren Fließgeschwindigkeit sind (Gl. 4-7):

$$-\overline{v'_x v'_y} = \nu_T \left(\frac{\partial v_x}{\partial x_y} + \frac{\partial v_y}{\partial x_x} \right) - \frac{2}{3} k \delta_{x,y} \quad \text{Gl. 4-7}$$

Der Faktor ν_T ist im Gegensatz zur kinematischen Viskosität ν keine Stoffgröße, sondern abhängig vom jeweiligen Strömungszustand und damit eine Funktion des Ortes und der Zeit. RMA2 verwendet für die Berücksichtigung des turbulenten Terms eine konstante Wirbelviskosität. Die Turbulenz wird in den Erhaltungsgleichungen durch eine Wirbelviskosität (E) entweder global für das gesamte Modellgebiet vorgegeben oder für jede einzelne Zelle spezifiziert. Die Wirbelviskosität (E) kann auch durch die Vorgabe der Peclet-Zahl (Pe) definiert werden (Gl. 4-8), die i.a. zwischen 15 und 40 gewählt wird.

$$Pe = \frac{\rho \cdot v_x \cdot dx}{E} \quad \text{Gl. 4-8}$$

4.2.2 MIKE3

Das Programmsystem MIKE3^{®1} wurde speziell für die Modellierung von dreidimensionalen, dichteabhängigen, instationären Strömungszuständen (NEWTONsche Fluide) und Sedimenttransportprozessen modular konzipiert. Diese Ausrichtung spiegelt sich sowohl in der allgemeinen Konzeption der verschiedenen Module (einheitlicher Koordinatenbezug für verschiedene Projektionen und gleiche Diskretisierung des Modellgebietes), als auch in der Kopplung der verschiedenen Module wieder (einheitliche Behandlung von Randbedingungen und gleiches Lösungsverfahren für die Lösung der approximierten Differentialgleichungssysteme mit Hilfe eines Finite-Differenzen Schemas).

Das hydrodynamische Modell (HD-Modul) basiert auf einem dreidimensionalen Ansatz (vertikal inhomogenes Fluid, d.h. Geschwindigkeits- und Dichtegradienten in der Vertikalen sind nicht vernachlässigbar), der auch die Betrachtung dichtegeschichteter Fluide erlaubt. Massenerhaltung (Gl.4-9) und Impulserhaltung (*Reynolds-Averaged Navier Stokes Equations - RANSE*, Gl. 4-10) werden in dem zugrundeliegenden Ansatz erfasst.

Massenerhaltung:

$$\frac{1}{\rho c_s^2} \frac{\partial p}{\partial t} + \frac{\partial u_i}{\partial x_i} = S_{QQ} \quad \text{Gl. 4-9}$$

Impulserhaltung:

$$\begin{aligned}
 & \frac{\partial u_i}{\partial t} + \frac{\partial (u_i u_j)}{\partial x_j} + 2\Omega_j u_j = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i} + g \\
 & + \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\nu_t \left\{ \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right\} - \frac{2}{3} \delta_{ij} k \right) + u_i S_{Ii}
 \end{aligned} \quad \text{Gl. 4-10}$$

Der Druck ist über Zustandsgleichungen an die lokalen Dichteverhältnisse gekoppelt. Diese Beziehung ist

¹ Danish Hydraulic Institute, Horsholm, Dänemark

für einen Temperaturbereich von -2,1 bis 40°C gültig.. Für Strömungszustände mit hohen Dichtegradienten existieren spezielle Anpassungen des Lösungsalgorithmus (hier: QUICKEST/SHARP, getrennte Berechnung der Advektion, Diffusion und Dispersion). Sind die durch Dichteunterschiede zu erwartenden Veränderungen des Strömungszustandes gering, kann alternativ der QUICKEST/ULTIMATE Algorithmus verwendet (Advektion, Diffusion und Dispersion werden zusammen berechnet) werden.

Die vertikale Druckverteilung wird nach den Ansätzen von CHORIN (1967) und RASMUSSEN (1993) approximiert.

Für die Lösung der Zustandsgleichungen wird das ADI-Verfahren ("Alternating Direction Implicit Procedure") angewendet. Für die Minimierung der numerischen Dispersion wird auch hier ein "Double Sweep" Algorithmus eingesetzt. Detaillierte Angaben zur Wahl der verschiedenen Zeitebenen ("time centering") für die Zustandsgrößen p , u , v und w innerhalb des x-, y- und z-sweep finden sich in DHI (1998a). Generell gilt, dass Massen- und Impulsbilanz in x-Richtung die Druckverteilung von Zeitschritt $n-1/6$ auf $n+1/2$ und u von n auf $n+1$ bringen. Zusammen mit der Massenbilanz in y- und z-Richtung sind diese Gleichungen um $n+1/2$ zentriert. Beispielhaft ist in Gleichung 4-11 die Diskretisierung für die Massenbilanz in x-Richtung dargestellt.

Massenbilanz

$$S_{QQx_{j,k,l}} = \frac{1}{\rho_{j,k,l} C_s^2} \left(\frac{p^{n+\frac{1}{2}} - p^{n-\frac{1}{6}}}{\frac{2}{3} \Delta t} \right)_{j,k,l} + \frac{1}{2} \left\{ \left(\frac{u_j - u_{j-1}}{\Delta x} \right)^{n+1} + \left(\frac{u_j - u_{j-1}}{\Delta x} \right)^n \right\}_{k,l} + \frac{1}{2} \left\{ \left(\frac{v_k - v_{k-1}}{\Delta y} \right)^{n+\frac{1}{3}} + \left(\frac{v_k - v_{k-1}}{\Delta y} \right)^{n-\frac{2}{3}} \right\}_{j,l} + \frac{1}{2} \left\{ \left(\frac{w_l - w_{l-1}}{\Delta z} \right)^{n+\frac{2}{3}} + \left(\frac{w_l - w_{l-1}}{\Delta z} \right)^{n-\frac{1}{3}} \right\}_{j,k}$$

Gl. 4-11

Impulsbilanz

Für die Diskretisierung der Impulsbilanz wird für die x-Richtung in Gleichung 4-12 dargestellt:

$$\frac{\partial u}{\partial t} + \frac{\partial(u^2)}{\partial x} + \frac{\partial(uv)}{\partial y} + \frac{\partial(uw)}{\partial z} + 2\omega(v \sin \phi - w \cos \phi \sin \lambda) + \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} - \frac{\partial}{\partial x} \left(2\nu_t \frac{\partial u}{\partial x} \right) - \frac{\partial}{\partial y} \left(\nu_t \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) \right) - \frac{\partial}{\partial z} \left(\nu_t \left(\frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} \right) \right) + \frac{2}{3} \frac{\partial k}{\partial x} - u S_{II} = 0$$

Gl. 4-12

Die einzelnen Terme in Gleichung 4-13 werden getrennt betrachtet. Für die Ableitungen nach der Zeit ergibt sich nach Taylorreihenentwicklung zweiter Ordnung:

$$\frac{\partial u}{\partial t} \approx \left(\frac{u^{n+1} - u^n}{\Delta t} \right)_{j,k,l} - \frac{\Delta t^2}{24} \frac{\partial^3 u}{\partial t^3}$$

Gl. 4-13

Die konvektiven Terme (hier dargestellt für die x-Richtung) werden ebenfalls durch eine Taylorreihenentwicklung approximiert:

$$\frac{\partial u^2}{\partial t} \approx \frac{(u^{n+1} - u^n)_{j+1,k,l} - (u^{n+1} - u^n)_{j-1,k,l}}{2\Delta x} - u \left(\frac{\Delta x^2}{3} \frac{\partial^3 u}{\partial x^3} + \Delta t^2 \frac{\partial^3 u}{\partial x \partial t^2} \right)$$

Gl. 4-14

$$\frac{\partial(uv)}{\partial y} \approx \frac{1}{\Delta y} \left((u_{k+1}^a + u_k^b)_{j,l} v_{j+1/2,k,l}^{n+1/2} - \left(\frac{u_k^a + u_{k-1}^b}{2} \right)_{j,l} v_{j+1/2,k-1,l}^{n+1/2} \right) + u \frac{\Delta t}{6} \frac{\partial^2 v}{\partial y \partial t} \pm \frac{1}{2} \Delta t v \frac{\partial^2 u}{\partial y \partial t}$$

Gl. 4-15

$$v_{j+1/2,k,l}^{n+1/2} = \frac{1}{2} (v_j + v_{j+1})_{k,l}^{n+\frac{1}{3}}$$

Gl. 4-16

$$v_{j+1/2,k-1,l}^{n+1/2} = \frac{1}{2} (v_j + v_{j+1})_{k-1,l}^{n+\frac{1}{3}}$$

$$\frac{\partial(uw)}{\partial z} \approx \frac{1}{\Delta z} \left((u_{l+1}^a + u_l^b)_{j,k} w_{j+1/2,k,l}^{n+1/2} - \left(\frac{u_l^a + u_{l-1}^b}{2} \right)_{j,k} w_{j+1/2,k,l-1}^{n+1/2} \right) \pm \frac{1}{2} \Delta t w \frac{\partial^2 u}{\partial z \partial t}$$

Gl. 4-17

$$w_{j+1/2,k,l}^{n+1/2} = \frac{5}{6} \frac{(w_j + w_{j+1})_{k,l}^{n+\frac{2}{3}}}{2} + \frac{1}{6} \frac{(w_j + w_{j+1})_{k,l}^{n-\frac{1}{3}}}{2}$$

Gl. 4-18

$$w_{j+1/2,k,l-1}^{n+1/2} = \frac{5}{6} (w_j + w_{j+1})_{k,l-1}^{n+\frac{2}{3}} + \frac{1}{6} \frac{(w_j + w_{j+1})_{k,l-1}^{n-\frac{1}{3}}}{2}$$

Mit $a=n+1$, $b=n$ für den „down sweep“ bzw. $a=n$, $b=n+1$ für den „up sweep“. Das Vorzeichen für den letzten Term der rechten Seite ist für einen "down sweep" positiv bzw. negativ für den "up sweep".

Coriolis Term

Der Einfluss der Corioliskraft (hier für die x-Richtung dargestellt) ergibt sich zu:

$$\Omega_x = 2\omega(v^* \sin \phi - w^* \cos \phi \sin \lambda) \quad \text{Gl. 4-19}$$

$$v^* = \frac{1}{4}(v_{j,k} + v_{j,k-1} + v_{j+1,k} + v_{j+1,k-1})^{n+\frac{1}{3}} + \frac{\Delta t}{6} \frac{\partial v}{\partial t} - \frac{1}{2} \left(\left(\frac{\Delta x}{2} \right)^2 \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \left(\frac{\Delta y}{2} \right)^2 \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \left(\frac{\Delta t}{6} \right)^2 \frac{\partial^2 v}{\partial t^2} \right) \quad \text{Gl. 4-20}$$

$$w^* = \frac{5}{6} \frac{1}{4} (w_{j,l} + w_{j,l-1} + w_{j+1,l} + w_{j+1,l-1})_k^{n+\frac{2}{3}} + \frac{1}{6} \frac{1}{4} (w_{j,l} + w_{j,l-1} + w_{j+1,l} + w_{j+1,l-1})_k^{n-\frac{1}{3}} - \frac{1}{2} \left(\left(\frac{\Delta x}{2} \right)^2 \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \left(\frac{\Delta z}{2} \right)^2 \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} + 5 \left(\frac{\Delta t}{6} \right)^2 \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} \right) \quad \text{Gl. 4-21}$$

Wie für den konvektiven Term ist auch hier die v-Komponente um $\Delta t/6$ zentriert und differiert für den up sweep und down sweep.

Druckterm

Der Druckterm ergibt sich nach Anwendung zentraler Differenzen im Raum:

$$\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} = \frac{1}{2} \frac{1}{(p_{j+1,k,l} + p_{j,k,l})} \left(\frac{p_{j+1,k,l} - p_{j,k,l}}{\Delta x} \right)^{n+\frac{1}{2}} \quad \text{Gl. 4-22}$$

Schubspannungsterm

Die viskosen Kräfte infolge innerer Reibung werden wie folgt beschrieben:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(2v_t \frac{\partial u}{\partial x} \right) = \left(\frac{(u_{j+1} - u_j)_{k,l}^{n+1} + (u_{j+1} - u_j)_{k,l}^n}{(\Delta x)^2} v_{t,j+1,k,l} \right) - \left(\frac{(u_j - u_{j-1})_{k,l}^{n+1} + (u_j - u_{j-1})_{k,l}^n}{(\Delta x)^2} v_{t,j,k,l} \right) - \left(\frac{\Delta x}{2} \right)^2 \frac{\partial^2 v_t}{\partial x^2} \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} - \frac{1}{3} \Delta x^2 \frac{\partial v_t}{\partial x} \frac{\partial^3 u}{\partial x^3} - \left(\frac{\Delta t}{2} \right)^2 \frac{\partial^2 v_t}{\partial x} \frac{\partial^3 u}{\partial x \partial t^2} - \frac{2}{3} \Delta x^2 \frac{\partial^3 v_t}{\partial x^3} \frac{\partial u}{\partial x} \quad \text{Gl. 4-23}$$

$$\frac{\partial}{\partial y} \left(v_t \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) \right) = \left(\frac{(u_{k+1}^a - u_k^b)_{j,l}}{\Delta y} v_{t,j,k+1/2,l}^* - \frac{(u_k^a - u_k^b)_{j,l}}{\Delta y} v_{t,j,k-1/2,l}^* \right) \frac{1}{\Delta y} + \left(\frac{(v_{j+1} - v_j)_{k,l}^{n+\frac{1}{3}}}{\Delta x} v_{t,j,k+1/2,l}^{**} - \frac{(v_{j+1} - v_j)_{k-1,l}^{n+\frac{1}{3}}}{\Delta x} v_{t,j,k-1/2,l}^{**} \right) \frac{1}{\Delta y} \quad \text{Gl. 4-24}$$

$$\frac{\partial}{\partial z} \left(v_t \left(\frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} \right) \right) = \left(\frac{(u_{l+1}^a - u_l^b)_{j,k}}{\Delta z} v_{t,j,k,l+1/2}^* - \frac{(u_l^a - u_l^b)_{j,k}}{\Delta z} v_{t,j,k,l-1/2}^* \right) \frac{1}{\Delta z} + \left(\frac{\frac{5}{6} (w_{j+1} - w_j)_{k,l}^{n+\frac{2}{3}} + \frac{1}{6} (w_{j+1} - w_j)_{k,l}^{n-\frac{1}{3}}}{\Delta x} v_{t,j,k,l-1/2}^{**} - \frac{\frac{5}{6} (w_{j+1} - w_j)_{k,l-1}^{n+\frac{2}{3}} + \frac{1}{6} (w_{j+1} - w_j)_{k,l-1}^{n-\frac{1}{3}}}{\Delta x} v_{t,j,k,l-1/2}^{**} \right) \frac{1}{\Delta z}$$

Gl. 4-25

Auf die Darstellung der sich aus Taylorreihenentwicklung ergebenden Terme höherer Ordnung wird hier verzichtet.

Turbulente Wirbelviskosität

Die Wirbelviskosität v_t kann als konstanter Wert, als zeitveränderliche Funktion der lokalen Gradienten der Strömungsgeschwindigkeiten (Ansatz nach SMAGORINSKY), als Lösung eines eindimensionalen k-Modells (Lösung einer zusätzlichen Gleichung für den Transport der turbulenten kinetischen Energie), als Lösung eines k-ε Modells (Lösung von zwei zusätzlichen Transportgleichungen) oder als Ergebnis eines hier verwendeten gemischten k-ε Modells (1D k-ε-Modell in der Vertikalen) und des SMAGORINSKY Ansatzes in der Horizontalen ermittelt werden.

Bei der Anwendung des gemischten k-ε Modells (1D k-ε-Modell in der Vertikalen) in Verbindung mit dem SMAGORINSKY Ansatz in der Horizontalen werden in der vertikalen Richtung ebenfalls zwei Transportgleichungen gelöst:

$$\frac{\partial k}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left(v_T \frac{\partial k}{\partial z} \right) + P + G - \varepsilon \quad \text{Gl. 4-26}$$

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{v_T}{\sigma_\varepsilon} \frac{\partial \varepsilon}{\partial z} \right) + c_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} (P + c_{3\varepsilon} G) - c_{2\varepsilon} \frac{\varepsilon^2}{k} \quad \text{Gl. 4-27}$$

wobei

$$P_S = v_t \left(\left(\frac{\partial u}{\partial z} \right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial z} \right)^2 \right) \quad \text{Gl. 4-28}$$

$$G_A = \frac{g}{\rho} \frac{v_T}{\sigma_T} \frac{\partial \rho}{\partial z} \quad \text{Gl. 4-29}$$

c_{μ} [m ² /s]	$c_{1\varepsilon}$ [m ² /s]	$c_{2\varepsilon}$ [m ² /s]	σ_k [-]	σ_ε [-]
0,09	1,44	1,92	1,0	1,3

Tafel 4-1: Wahl empirischer Parameter für das gemischte k-ε-Modell nach Rodi (1980) in der Vertikalen und den Ansatz von Smagorinsky (1963) in der Horizontalen

Der Parameter $c_{3\varepsilon}$ ist nicht konstant, wird jedoch hier für den Fall einer stabilen Schichtung ($G < 0$) zu "0" angenommen bzw. konstant für den Fall einer instabilen Schichtung ($G > 0$) angesetzt. Für die Ermittlung der Randbedingungen für k und ε an der Gewässersohle und der Wasseroberfläche wird jeweils, unter Ansatz eines logarithmischen Geschwindigkeitsprofils, ein lokales Gleichgewicht zwischen Energieproduktion und Energiedissipation angenommen.

Im Falle von Dichtegradienten wird die Diffusion gedämpft. Der traditionelle SMAGORINSKY Ansatz löst dieses Problem durch Einbeziehung der empirischen Gleichung von MUNK & ANDERSON (Gl. 4-30). Innerhalb der verschiedenen k-ε-Modelle wird die PRANDTL ZAHL modifiziert (Gl. 4-31).

$$\frac{v_t}{v_{t0}} = (1 + \beta Ri)^{-\alpha} \quad \text{Gl. 4-30}$$

$$\sigma_T = \left(\frac{\left(1 + \frac{10}{3} Ri \right)^3}{1 + 10 Ri} \right)^{\frac{1}{2}} \quad \text{Gl. 4-31}$$

$$Ri = - \frac{g}{\rho} \frac{\partial \rho}{\partial z} \left(\left(\frac{\partial u}{\partial z} \right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial z} \right)^2 \right)^{-1} \quad \text{Gl. 4-32}$$

Schubspannungsansatz für die Gewässeroberfläche

Als Randbedingung an der freien Oberfläche können Schubspannungen infolge Windeinwirkung angebracht werden, die eine Randbedingung für den vertikalen Term der viskosen Kräfte infolge innerer Reibung bilden.

$$\frac{\tau_{xz}}{\rho} = v_t \frac{\partial u}{\partial z} = C_W W^2 \frac{\rho_{Luft}}{\rho_{Fluid}} \quad \text{Gl. 4-33}$$

Der Widerstandsbeiwert für Wind wird nach SMITH & BANKE (1975) bestimmt:

$$C_W = \begin{cases} C_{W0} & \text{für } W < W_0 \\ C_{W0} + \frac{W - W_0}{W_1 - W_0} (C_{W1} - C_{W0}) & \text{für } W_0 \leq W \leq W_1 \\ C_{W1} & \text{für } W > W_1 \end{cases}$$

wobei

$$C_{W0} = 0,0013, W_0 = 0 \text{ m/s}$$

$$C_{W1} = 0,0026, W_1 = 24 \text{ m/s}$$

Gl. 4-34

Schubspannungsansatz für die Gewässersohle

Ähnlich der Schubspannungen an der freien Oberfläche infolge Windeinwirkung, werden Sohlschubspannungen an der Gewässersohle als Randbedingung für den vertikalen Term der viskosen Kräfte angenommen. Im Falle des gemischten k-ε Modells (1D in der Vertikalen)/SMAGORINSKY Ansatzes (2D in der Horizontalen) berechnet sich der Widerstandsbeiwert wie in Gl. 4-35 dargestellt.

$$\frac{\tau_{xz}}{\rho} = \frac{\tau_{\text{Gewässersohle}}}{\rho} = v_t \frac{\partial u}{\partial z} = C_D u^2 = \left(\frac{k \left(1 - \frac{k_s}{30z_b} \right)}{\log \left(\frac{30z_b}{k_s} \right) - \left(1 - \frac{k_s}{30z_b} \right)} \right)^{-2} U(z_b) u(z_b) \quad \text{Gl. 4-35}$$

4.2.3 Grundlagen des Sedimenttransportmodells (SED2D)

SED2D ist ein Programmsystem zur zweidimensionalen tiefengemittelten Simulation des Sedimenttransports in offenen Gerinnen. Es berechnet die Sedimentation, Erosion und den Transport für Sand-, Schluff- und Tonböden mit Hilfe eines tiefengemittelten Strömungsfeldes und setzt damit unmittelbar auf den Ausgabedaten von RMA2 auf. Eingangsparameter sind Korngröße, Dichte und Mächtigkeit des Sedimentes an der Gewässersohle, Sinkgeschwindigkeit des Sedimentes, Anfangskonzentration, Diffusionskoeffizienten bzw. kritische Sohlschubspannungen am Boden für Erosion und Deposition.

Bei den Eingangsparametern muss zwischen einem kohäsiven Material (Schluff, Ton) und einem nicht kohäsiven Material (Sand, Kies) unterschieden werden. Für ein nicht kohäsives Sedimentmaterial sind Korngröße, Formfaktor, effektive Korngröße für die Rauigkeit und Bett Dicke vorzugeben. Ein kohäsives Bett kann aus bis zu zehn Schichten unterschiedlicher Dicke bestehen, die jeweils verschiedene Charakteristika aufweisen können. Spezifisch hierbei sind der Konsolidierungskoeffizient, die Trockendichte und das Alter der Schicht (in Jahren). Für alle Schichten müs-

sen die kritischen Sohlschubspannungen für Deposition und Erosion sowie die entsprechenden Raten vorgegeben werden bzw. bekannt sein. Flockulationsprozesse kohäsiver Sedimente werden durch SED2D nicht erfasst. Es wird vorausgesetzt, dass das mitgeführte Sediment, aber auch Erosion und Deposition, das Strömungsfeld nicht beeinflussen. Innerhalb des Sedimenttransportmodells SED2 werden die folgenden Annahmen getroffen:

- Die maßgebenden Prozesse sind Erosion, Re-suspension, Deposition und Transport.
- Die Strömung kann diese Prozesse auslösen und aufrechterhalten, unabhängig davon, ob sie Sediment enthält oder nicht.
- Das abgelagerte Sediment verbleibt so lange auf der Gewässersohle, bis die Strömungsenergie ausreicht, eine Sohlschubspannung zu erzeugen, die über der kritischen Sohlschubspannung für Erosion liegt.
- Auch nach erfolgter Erosion ändert sich die Struktur (Höhenlage) der Gewässersohle nicht. Bei starken Veränderungen der Gewässersohle besteht die Möglichkeit, die Berechnungen nach einer zu spezifizierenden Veränderung der Sohlage zu unterbrechen, um die Sohltopographie entsprechend anzupassen.
- Erodierete Teilchen lagern sich nur dann ab, wenn die kritische Sohlschubspannung für Deposition unterschritten wird.
- Es wird davon ausgegangen, dass zu jedem Zeitpunkt der Simulation der Hauptanteil des freien Sediments vornehmlich in Bodennähe in Suspension ist.

Diese Annahmen werden in den grundlegenden Gleichungen für die Sedimentkonzentration, Sohlschubspannung, Erosions- und Depositionsrate bzw. den Aufbau des Bettmodells berücksichtigt.

Sedimentkonzentration in Suspension

Die Sedimentkonzentration wird durch die zweidimensionale Konvektions-Diffusions-Gleichung (ARIATHURAI, R., ET AL., 1977) ausgedrückt:

$$\frac{\partial c}{\partial t} + v_x \frac{\partial c}{\partial x} + v_y \frac{\partial c}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial x} \left(D_x \frac{\partial c}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(D_y \frac{\partial c}{\partial y} \right) + \alpha_1 c + \alpha_2 \quad \text{Gl. 4-36}$$

Sohlschubspannungen

Für die Sohlschubspannungen $\tau = \rho \cdot (u^*)^2$ mit der Dichte des Wassers ρ und der Schergeschwindigkeit

(Schubspannungsgeschwindigkeit) u^* , existieren verschiedene Ansätze:

1. Sohlschubspannungen an glatten Wänden unter Annahme eines logarithmischen Geschwindigkeitsprofils:

$$\frac{\bar{v}}{u^*} = 5,75 \cdot \log \left(3,32 \frac{u^* h}{v} \right) \quad \text{Gl. 4-37}$$

Die Formel ist gültig für die bodennahen 15 % des Profils, unter der Voraussetzung, dass:

$$u^* \cdot h / v > 30. \quad \text{Gl. 4-38}$$

2. Sohlschubspannungen im Bereich der Gewässersohle nach MANNING:

$$u^* = \frac{\sqrt{g \cdot \bar{v} \cdot n}}{h^{1/6}} \quad \text{Gl. 4-39}$$

Erosions- und Depositionsrate

Deposition und Erosion gehen in Form des Quellterms $S = \alpha_1 \cdot c + \alpha_2$ in die Konvektions-Diffusions-Gleichung (4-36) ein. Im Falle des Sandtransportes ist der Quellterm eine Funktion der Gleichgewichtskonzentration c_{eq} (auch Transportpotential genannt) und der Konzentration des in Lösung befindlichen Sediments in der Wassersäule (ACKERS-WHITE, 1973):

$$S = (c_{eq} - c) / t_c \quad \text{Gl. 4-40}$$

Die charakteristische Zeit t_c beschreibt die Zeitdauer für den Ausgleich zwischen Konzentration in Suspension und Gleichgewichtskonzentration:

- (a) Charakteristische Zeit t_c für Deposition:

$$t_c = \max \left\{ \frac{C_d h}{v_s}; \Delta t \right\} \quad \text{Gl. 4-41}$$

- b) Charakteristische Zeit für Erosion:

$$t_c = \max \left\{ \frac{C_e h}{v}; \Delta t \right\} \quad \text{Gl. 4-42}$$

Für die Depositionsrate beim Transport kohäsiver Sedimente wird für die Bestimmung des Quellterms der Ansatz nach KRONE (1962) verwendet:

$$S = \begin{cases} \frac{2V_s}{h} c \left(1 - \frac{\tau}{\tau_d} \right) & \text{für } c < c_c \\ \frac{2V_k}{h} c^{5/3} \left(1 - \frac{\tau}{\tau_d} \right) & \text{für } c > c_c \end{cases} \quad \text{Gl. 4-43}$$

Erosionsraten werden mit Hilfe des Ansatzes von PARTHENIADES (in: ROIG, ET AL., 1998) bestimmt. Der Quellterm ergibt sich dann zu:

$$S = \frac{P}{h} \left(\frac{\tau}{\tau_e} - 1 \right) \quad \text{Gl. 4-44}$$

Grundsätzlich wird innerhalb der implementierten Ansätze zwischen dem Herauslösen einzelner Partikel aus der Gewässersohle und einer sogenannten Massenerosion unterschieden. Diese tritt auf, wenn die Sohlschubspannungen über einem zu spezifizierenden Grenzwert liegen. Der Quellterm ergibt sich in diesem Fall zu:

$$S = \frac{T_L \rho_L}{h \Delta t} \quad \text{für } \tau > \tau_s \quad \text{Gl. 4-45}$$

Generell gilt, dass der Quellterm mit jeweils umgekehrten Vorzeichen in die Grundgleichung (4-36) eingeht, da eine Zunahme der Sedimentkonzentration an der Gewässersohle zu einer Abnahme der Konzentration des freien Sediments in Suspension führt, und umgekehrt. Die Quelle ist auf Grund der Massenerhaltung im jeweils komplementären Modellbereich eine Senke.

Charakteristische Parameter des Bettmodells

Eine aus nicht kohäsivem Material aufgebaute Gewässersohle wird hier als Sedimentreservoir mit vorgegebener Dicke betrachtet. Unter dieser Schicht befindet sich eine erosionsfeste Schicht. Sedimenteinzug und -austrag werden durch Betrag und Vorzeichen des Quellterms definiert. Der Massenzuwachs bzw. -verlust der Gewässersohle wird über den Porositätsparameter als Volumenänderung berücksichtigt.

Wird die Gewässersohle durch kohäsive Sedimente gebildet, so kann ihre mehrschichtige Struktur berücksichtigt werden. Für jede Schicht werden die Charakteristika Alter, Dicke, Dichte und Materialtyp angegeben. Aus dem Materialtyp wiederum ergeben sich die Werte für kritische Scherspannung für Erosion, Erosionsrate, Anfangsdichte und -scherwiderstand, jährliche Änderung der beiden vorgenannten Werte, Konsolidierungskoeffizient und den Schichttyp (kohäsiv oder nicht kohäsiv).

Die Depositionsrate wird zu einem Volumenzuwachs über die spezifische Dichte des abgelagerten Sediments umgerechnet, die Erosionsrate auf gleiche Weise zu einer Volumenreduktion, so dass als Modellergebnis die Sedimentationshöhe dargestellt werden kann.

5 Aufbau der numerischen Modelle

5.1 Räumliche Abgrenzung des Modellgebietes

Zur Beschreibung der Strömungs- und Sedimentationsvorgänge im Untersuchungsgebiet der Lesum-

mündung wurde ein umgebendes Modellgebiet definiert, um Einflüsse durch die Ränder zu vermeiden (Abb. 5-1).

Die den Simulationen zugrundeliegenden Randbedingungen (Wasserstände, Durchflüsse) sind aus Naturmessungen abgeleitet worden. Die zur Simulation notwendigen Modellparameter wurden mit Hilfe der Kalibrierung des hydrodynamischen Modells bestimmt.

Das Modellgebiet umfasst den Bereich der Unterweser vom Flugzeugwerk Lemwerder (UW-km 16) bis zum Gelände der ehemaligen Vulkan-Werft (UW-km 20) sowie die Lesum vom Lesumsperrwerk (Lesum-km 8) bis zur Mündung (Lesum-km 10), den Sportboothafen Grohn, den Yachthafen in Lemwerder und den Vegesacker Hafen (Abb. 5-1).

Der obere Rand (Q-Rand, Durchflüsse als RB) des Modellgebietes liegt im Bereich des Flugzeugwerkes Lemwerder bei Unterweser-km 16. Der untere Rand (h-Rand, Wasserstand als RB) des Modellgebietes liegt im Bereich des Geländes der ehemaligen Vulkan-Werft bei Unterweser-km 20. Die seitliche Umrandung des Modellgebietes wird durch die Hochwasserschutzwände, Kaimauern bzw. Deichoberkanten der Hochwasserschutzdeiche gebildet.

Die innerhalb der genannten Modellgrenzen liegenden stromteilenden Bauwerke, Hafenflächen im Bereich des Vegesacker Hafens, des Yachthafens in Lemwerder und dem Grohner Sportboothafen, zwischen Hochwasserschutzwänden (äußere Abgrenzung des Hafens) und Oberkante Kaimauer wurden nicht in das Modellgebiet eingebunden, da davon ausgegangen werden konnte, daß für die hier untersuchten Abflüsse und Wasserstände eine Überströmung dieser Bereiche ausgeschlossen ist. Bei entsprechenden Wasserständen wäre es jedoch optional möglich, die Gebiete für eine eventuelle Überströmung, z.B. für Nachweise zur Hochwasserneutralität von Baumaßnahmen, wieder in das Modell zu integrieren.

5.2 Modellparameter

In Abb. 5.1 ist das Modellgebiet mit dem FE-Netz (RMA2/SED2D) und die Lage des FD-Gitters (MIKE3) dargestellt. Das FE-Netz besteht aus rd. 7200 Elementen mit einer Größe von 2-12000m². Das FD-Gitter besteht aus quadratischen Elementen mit einer horizontalen Auflösung von dx=dy=18m und vertikal mit dz=0,5m. Im Bereich um den Liegeplatz und die Lesummündung ist das Gitter bis auf dx=dy=2m verfeinert worden. Das Modellgebiet für MIKE3 ist zusätzlich um 41° gedreht worden.

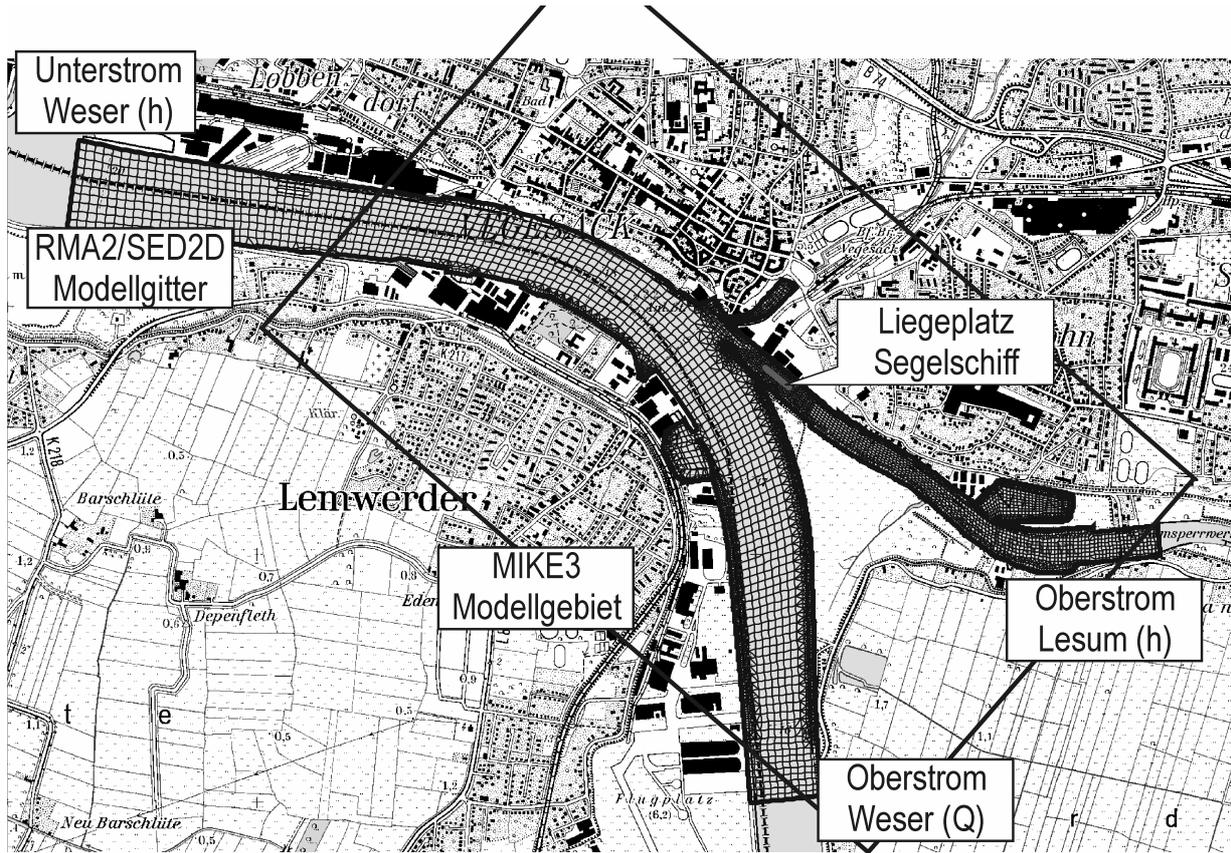


Abb. 5-1: Modellgebiete und Lage der Modellränder: FE-Gitter (RMA2/SED2D) mit kombiniertem triangularem und quadratischem Gitter, Elementgrößen von 2-12000m², 7235 Elemente und FD-Gitter (MIKE3) mit 167X90 Gitterzellen bei einer Gitterweite von dx=dy=18m, 6m,2m (nested) und dz=0,5m, Rotation von 41°

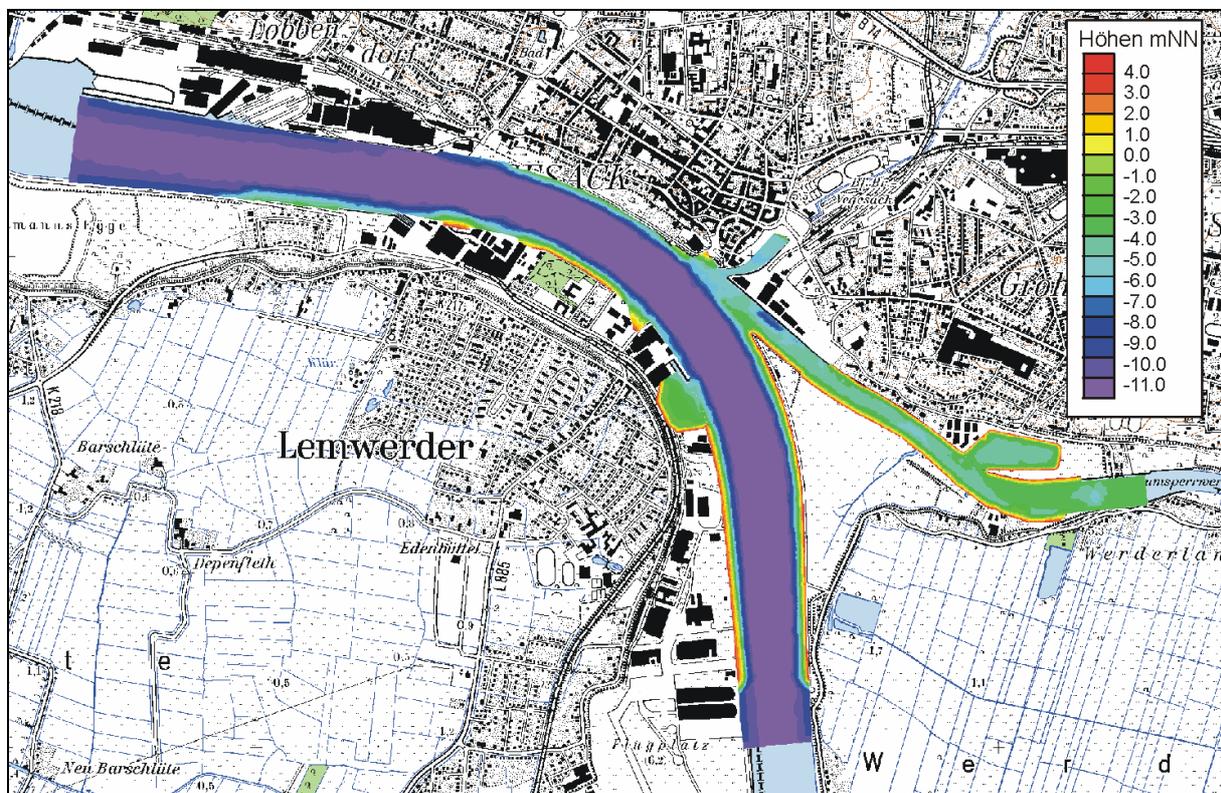


Abb. 5-2: Gewässertopographie im Modellgebiet [mNN]

Die Gewässertopographie der Weser und Lesum wurde aus Peilungen des HAFENAMTES BREMEN und des WSA BREMEN ermittelt (Abb. 5-2).

5.3 Randbedingungen

Den Zufluss aus der Weser in das Untersuchungsgebiet bilden die Abflüsse am Referenzpegel Intschede. Die am Pegel Intschede gemessenen Abflüsse bilden den Eingangswert für die Berechnung der Randbedingungen in einem Regionalmodell. Sie wurden für das zwischen Intschede und oberem Modellrand gelegene Einzugsgebiet nicht durch weitere Zuflüsse beaufschlagt. Aus dem Regionalmodell ließen sich die für die obere Modellgrenze (Q-Rand, Abb. 5-1) des numerischen Modells erforderlichen Durchflüsse ermitteln.

Die Verteilung des Oberwasserzuflusses über den Abflussquerschnitt erfolgte tiefenabhängig und steht damit in direktem Zusammenhang mit den natürlichen Gegebenheiten, da im Bereich des oberen Modellrandes eine uferparallele Einströmung (keine Beeinflussung der Einströmung durch einen Kurvenbereich) vorausgesetzt werden kann.

Die Randbedingung an der unteren Begrenzung des Modellgebietes (Wasserstandssteuerung, h-Rand, Abb. 5-1) wurde aus Tidekurven am Pegel Vegesack und am Pegel Farge durch lineare Interpolation bestimmt und über den gesamten Modellrand in Ansatz gebracht. Der Modellrand in der Lesum (h-Rand) wurde aus Tidekurven am Pegel Lesumsperrwerk ermittelt (Abb. 5-3).

Die Lage und Gestaltung von Sonderbauwerken (weserseitiger Einfahrtbereich des Yachthafens Lemwerder, lesumseitiger Einfahrtbereich des Grohner Sportboothafens, Spundwände etc.) und die Lage und Gestaltung von Leitwerken wurden aus digitalen topographischen Karten im Maßstab 1:5000 entnommen (Genauigkeit der Digitalisierung bei ca. +/- 1,0 m in der Horizontalen).

5.4 Kalibrierung des hydrodynamischen Modells

5.4.1 Auswahl des Kontrollzeitraumes und Randbedingungen

In früheren Untersuchungen des FRANZIUS INSTITUTES (1972) hat sich gezeigt, dass bei hohen Oberwasserabflüssen in Wümme und Hamme verstärkt Sedimente durch die Lesum transportiert werden. Für die weiteren Berechnungen wurde daher eine Tide ausgewählt, in deren zeitlichen Bereich ein hoher Oberwasserabfluss der Lesum fällt. Die ausgewählte Tide aus dem Frühjahr 1997 sollte den Bereich des höchsten Jahresoberwasserabflusses ($HQ_{1997} = 23,3\text{m}^3/\text{s}$) in

der Wümme beinhalten. Im langjährigen Mittel wird dieser Abfluss an 21 Tagen im Jahr erreicht oder überschritten.

Zur Kalibrierung der Sohlrauheiten wurden die Wasserstände im Modellgebiet mit einer Tide aus dem Februar 1997 berechnet. Die gemessenen Wasserstände von 1997 wurden am Pegel Vegesack mit den berechneten Wasserständen aus dem numerischen Modell verglichen.

Als Grundlage der Kalibrierung von Strömungsgeschwindigkeiten (Richtung und Größe) sowie der Lage und Größe der Walzen dienten die Versuche des FRANZIUS-INSTITUTES von 1952. Die physikalischen Modellversuche sind mit einem stationär betriebenen Modell durchgeführt worden. In diesem Modell sind die maximalen Strömungsgeschwindigkeiten in einer Tide bei mittleren Flut- und Ebbwasserständen mit mittleren Flut- und Ebbwassermengen untersucht worden. Dieses physikalische Modell des FRANZIUS-INSTITUTES ist im Bereich der Lesum in der Bathymetrie mit den heutigen Zuständen vergleichbar. Die Weser hingegen ist mehrfach vertieft und ausgebaut worden. Die Zeitpunkte der maximalen Strömungsgeschwindigkeiten in der Lesum wurden daher aus dem numerischen Modell des FRANZIUS-INSTITUTES von 1989 neu ermittelt.

Die Grundlage zur Eichung der Wasserstände am Pegel Vegesack bilden zwei Tiden vom 23.02.1997 16⁰⁰ Uhr bis zum 24.02.1997 23³⁰ Uhr (Abb. 5-3).

Die zur Eichung der Walzengrößen und zum Vergleich der Strömungsgeschwindigkeiten mit dem physikalischen Modell von 1952 benötigten Zeitpunkte der maximalen Flutströmung (24.02.1997, 01¹⁵ Uhr) und der maximalen Ebbströmung (24.02.1997, 07⁴⁵ Uhr) sind mit Hilfe des numerischen Modells der Hamme, Wümme und Lesum (FRANZIUS-INSTITUT, 1989) bestimmt worden. Daraus ergaben sich für den Zeitpunkt der maximalen Flut- und Ebbströmung die in Tafel 5-1 zusammengefassten Wasserstände und Durchflüsse an den Modellrändern. Die Oberwassermenge der Weser am Pegel Intschede betrug ca. 650 m³/s und in der Wümme am Pegel Hellwege Schleuse ca. 20 m³/s.

	Untere Modellgrenze Wasserstand [mNN]	Lesumsperrwerk Wasserstand [mNN]	Obere Modellgrenze Durchfluss [m ³ /s]
Flutstrom	1,05	0,85	1708
Ebbestrom	0,24	0,45	1798

Tafel 5-1: Randbedingungen für die Berechnung des stationären Eichzustandes

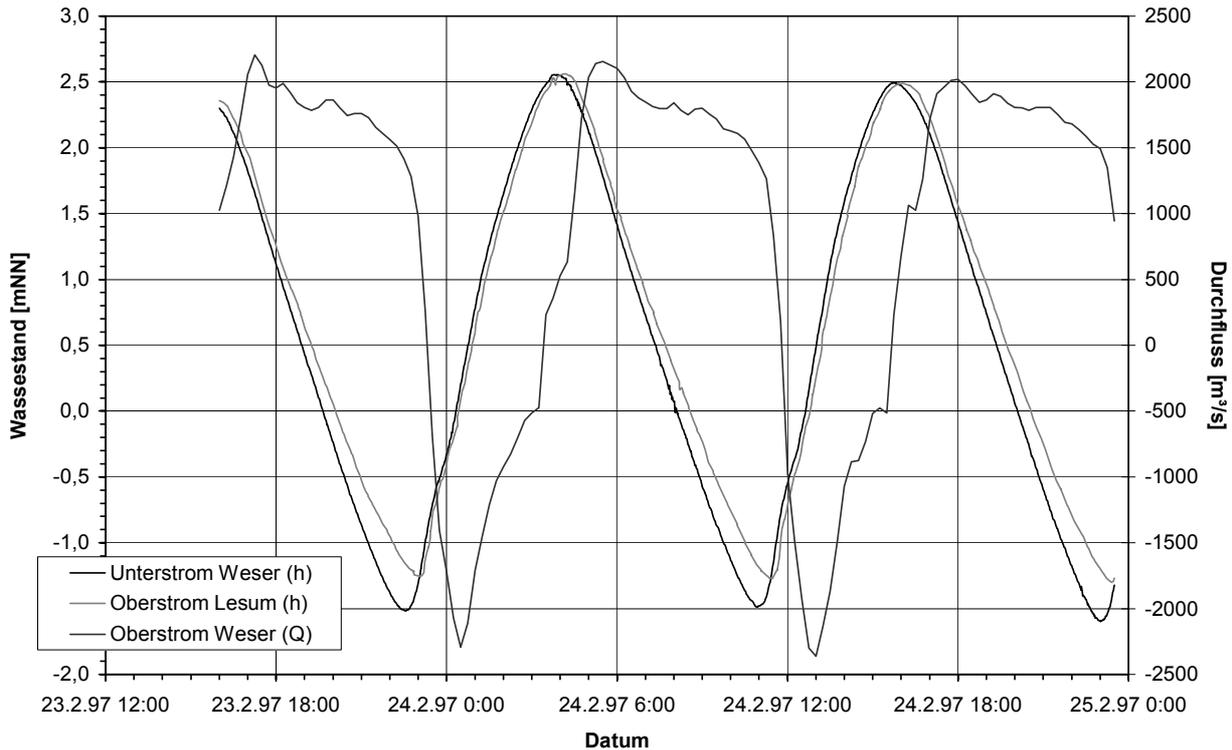


Abb. 5-3: Randbedingungen für die hydrodynamische Simulation (Durchfluss: +=Ebbestrom, -=Flutstrom)

5.4.2 Ergebnisse der Kalibrierung

Die Kalibrierung des hydrodynamischen Modells im Hinblick auf einen natürlichen Tideablauf erfolgte nach den Tidewasserständen, den Eintrittszeiten der Scheitelwerte der Tiden und den gemessenen Strömungsgeschwindigkeiten bzw. -richtungen. Dies beinhaltet ebenfalls eine Vergleichbarkeit der im numerischen Modell auftretenden Walzen mit den in der Natur auftretenden Walzen.

Um im numerischen Modell dem o.a. Sollzustand nahe zu kommen, mussten schrittweise folgende Veränderungen vorgenommen werden, damit im Untersuchungsgebiet eine hinreichende Übereinstimmung (Abweichung bis rd. +/- 5 cm) zwischen den vorgegebenen Wasserständen am Pegel Vegesack und den in der Modellrechnung bestimmten Wasserständen erreicht werden konnte:

1. Veränderung der Rauigkeiten in verschiedenen Wassertiefen (tiefenabhängige Annahmen) und
2. Modifizierung der Wirbelviskositäten (Turbulenzmodellierung).

Nach schrittweisem Verändern der Rauigkeiten konnten die vorgegebenen Pegelwerte der Tidewasserstände im hydrodynamischen Modell mit der notwendigen Genauigkeit reproduziert werden (Abb. 5-4).

Für die Kalibrierung des Modells standen zudem aus dem physikalischen Modell von 1952 Schwimmermessungen mit Strömungsgeschwindigkeiten in Be-

trag und Richtung zur Verfügung (Abb. 5-6 und 5-8). Um auch hier die Naturähnlichkeit des Modellaufes zu überprüfen, wurden die Beträge der Strömungsgeschwindigkeiten und deren Richtung zwischen Sollzustand und Modellzustand nach Beendigung der Eichung in der Lesummündung verglichen (Abb. 5-5 und Abb. 5-7; Die Pfeile geben nur die Richtung wieder, die Geschwindigkeiten ergeben sich aus den Farbbereichen). Dargestellt sind die Strömungszustände im Vegesacker Hafen und in der Lesummündung bei maximalem Flut- und Ebbestrom des physikalischen Modells (Abb. 5-6 und 5-8) und die des numerischen Modells (Abb. 5-5 und 5-7).

Die berechneten Strömungsgeschwindigkeiten zum Zeitpunkt der maximalen Flutströmung weichen nur in wenigen Bereichen von den im physikalischen Modell gemessenen Geschwindigkeiten ab. Zum Zeitpunkt der maximalen Ebbestromung verschieben sich die Isokonturlinien gleicher Geschwindigkeiten bei den berechneten Strömungsgeschwindigkeiten in die Hafeneinfahrt. Diese Abweichungen in eng begrenzten Bereichen sind vorwiegend auf Messungenauigkeiten im physikalischen Modell und die im numerischen Modell angepasste Bathymetrie (Zustand 1997) zurückzuführen.

Die Qualität der Modellierung lässt sich anhand von Walzen ebenfalls aus dem Vergleich mit den am FRANZIUS-INSTITUT durchgeführten Untersuchungen im physikalischen Modell (1952) ableiten (Abb. 5-5 und 5-7). Bei im physikalischen Modell leicht abweichenden

den Randbedingungen sind hier ähnliche Walzenstrukturen und -größen wiederzuerkennen. Lediglich beim Ebbestrom ist die berechnete Walze in die Hafeneinfahrt verschoben, zeigt aber ähnliche Abmessungen.

Die berechneten Strömungsgeschwindigkeiten, -richtungen und Wasserstände stellen eine gute Näherung an die tatsächlichen Strömungsverhältnisse in der Lesummündung dar.

Im Rahmen der Kalibrierung wurden die für die weiteren Untersuchungen zugrundegelegten Eichparameter Sohlrauigkeit (MANNING-Beiwerte) und Pecletzahlen (Beschreibung des Turbulenzzustandes) bestimmt. Die ermittelten Werte sind in Tafel 5-2 für die verwendeten gebietstypischen Strukturelemente dargestellt.

Gebiet	Pecletzahl [-]	MANNING - Zahl [s/m ^{1/3}]
Fluss	20	0,035
Hafen	20	0,025

Tafel 5-2: Durch Kalibrierung ermittelte Modellparameter für Sohlrauigkeit und Pecletzahl (RMA2)

5.5 Kalibrierung des Sedimenttransportmodells

Im Rahmen einer Baggermaßnahme vom Juli 1999 wurden zwei Sedimentproben am Liegeplatz des Se-

gelschiffes DEUTSCHLAND und stromauf am neuen Fahrgastanleger in der Lesum ausgewertet (Abb. 5-9, Abb. 5-10). Das Material besteht überwiegend aus Mittel- bis Grobsand (d = 0,2 bis 2 mm). Aufgrund der hohen Strömungsgeschwindigkeiten in der Lesum kann sich hier kein kohäsives Material absetzen. Die weiteren Betrachtungen wurden daher auf den Sandtransport beschränkt.

In früheren Untersuchungen des FRANZIUS-INSTITUTES an der Wümme, Hamme und Lesum (1972) wurden bei Hochwasser starke Sedimentbewegungen im Bereich der Wümme beobachtet. Die im Fluss vorhandenen Sandbänke wurden umgelagert oder abgetragen und flussabwärts transportiert. Weitere Informationen über das sohnah transportierte Material in der Lesum liegen nicht vor. Aus der Weser können keine maßgeblichen Sandmengen auf Grund des Sohl-sprunges von ca. 5 m von der Weser zur Lesum eingetragen werden (Abb. 5-2).

Grundlage für die Berechnungen der Sedimentationsmengen in der Lesummündung waren die berechneten Strömungsgeschwindigkeiten und -richtungen der Tiden vom 23.02.1997 bis zum 24.02.1997 (Kap. 5.4). Aufbauend auf diesen Ergebnissen der hydrodynamischen Simulation der Strömungsverhältnisse wurde der Sedimenttransport im Modellgebiet ermittelt.

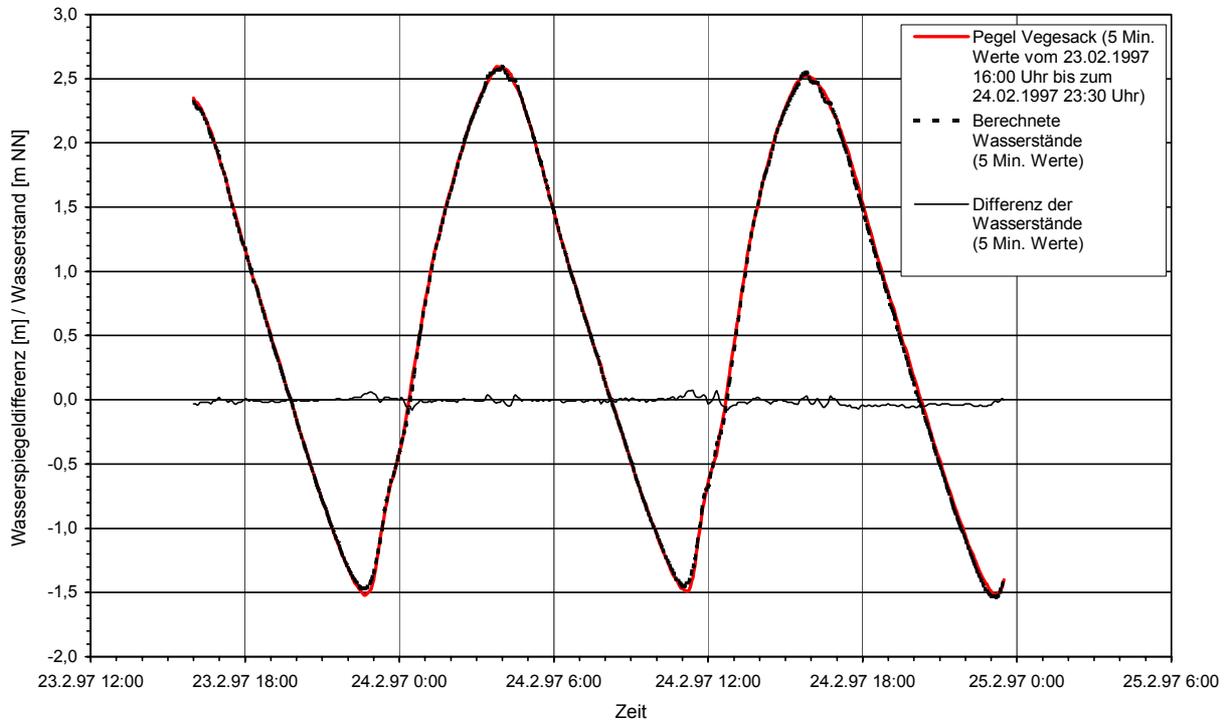


Abb. 5-4: Vergleich der gemessenen mit den berechneten Wasserständen

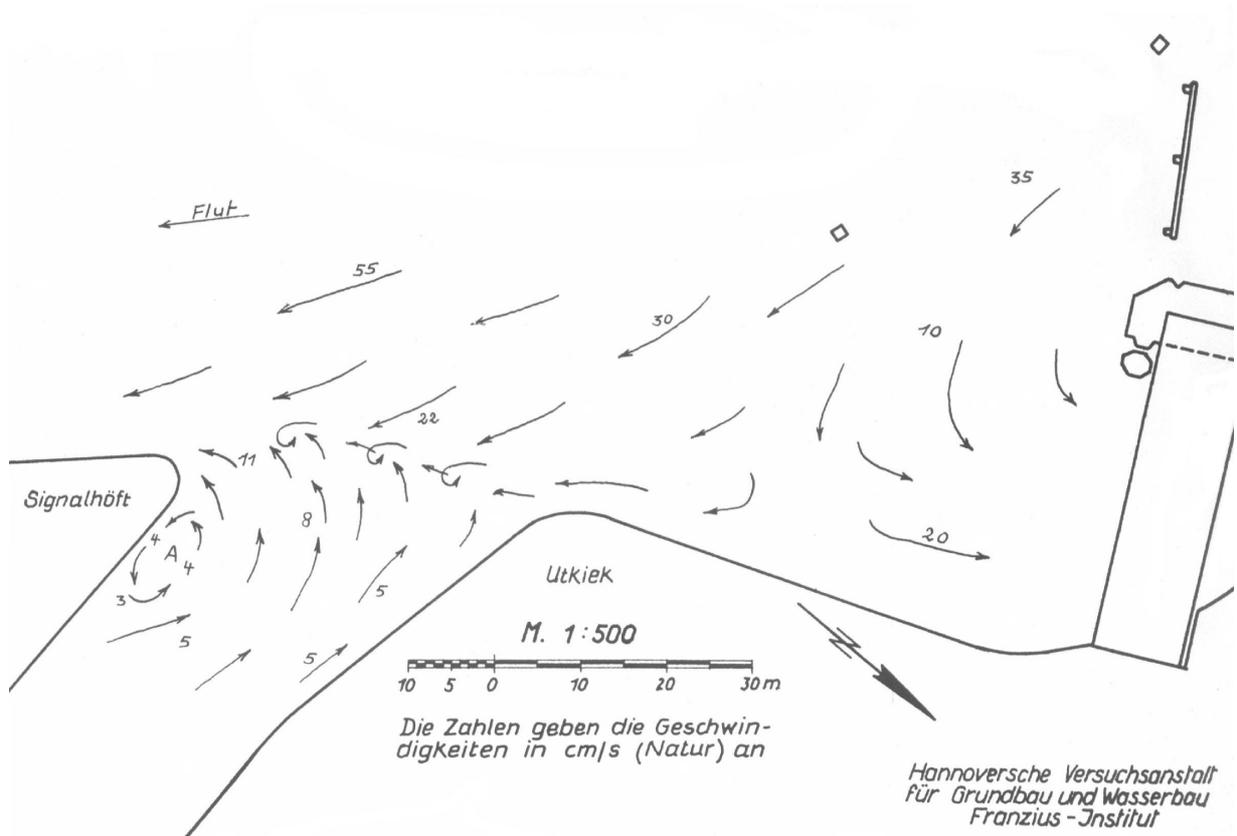


Abb. 5-5: Gemessene Flutstromgeschwindigkeiten in der Hafeneinfahrt Veegesack (Franzius-Institut, 1952)

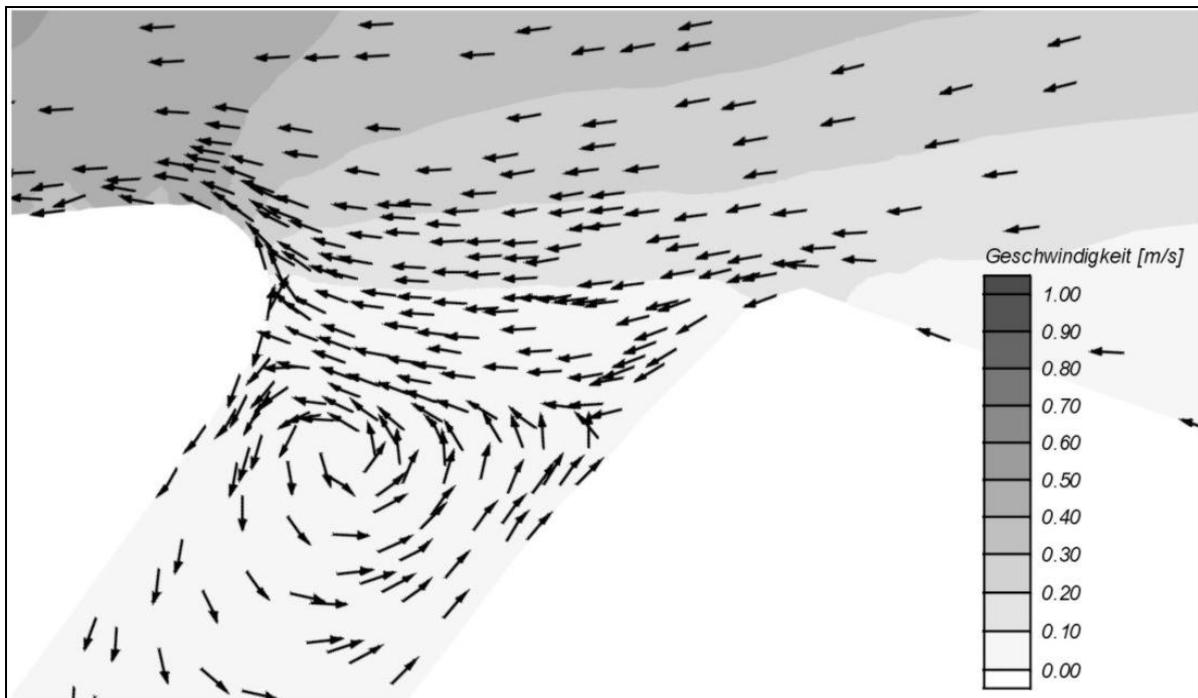


Abb. 5-6: Berechnete Strömungsrichtungen und -geschwindigkeiten² zum Zeitpunkt der maximalen Flutströmung im Veegesacker Hafen (24.02.1997, 01:15 Uhr; 2 Std. 35 Min. nach Tnw)

² Die Pfeile geben nur die Richtung wieder, die Geschwindigkeiten ergeben sich aus den Farbbereichen

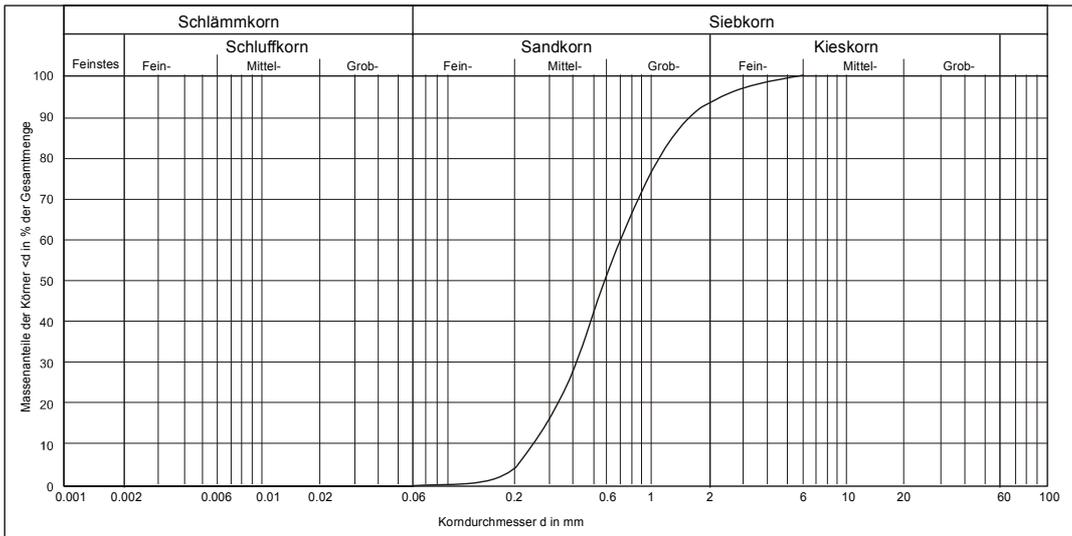


Abb. 5-9: Körnungslinie einer Mischprobe im Bereich des Liegeplatzes des Segelschiffes Deutschland (LIMNOLOGISCHES INSTITUT DR. NOWAK, 1999)

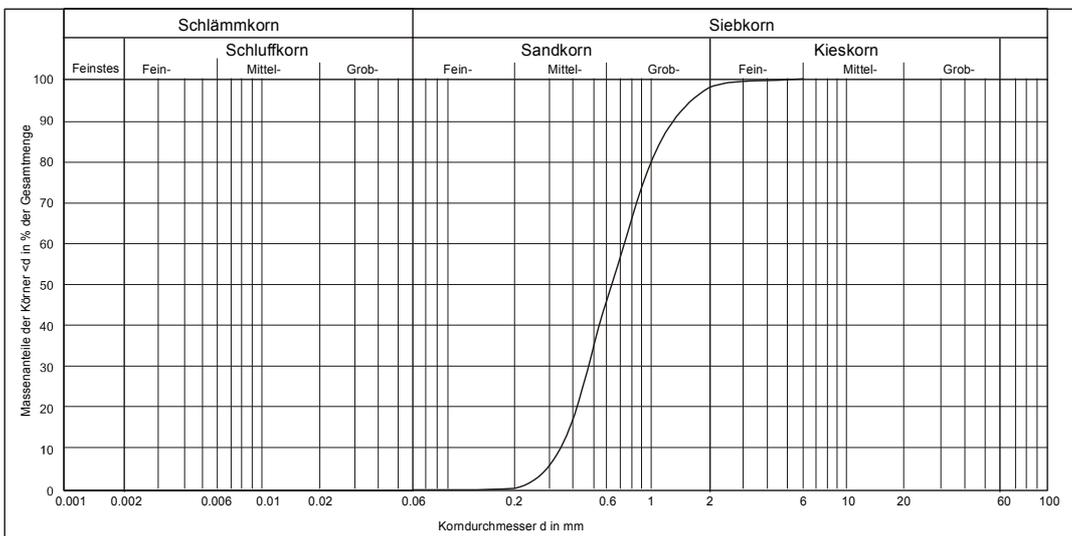


Abb. 5-10: Körnungslinie einer Mischprobe im Bereich des neuen Fahrgastanlegers stromaufwärts vom Liegeplatz des Segelschiffes Deutschland in der Lesum (LIMNOLOGISCHES INSTITUT DR. NOWAK, 1999)

Über die Zusammensetzung der Sedimente, ihre jahreszeitliche Verteilung und Bewegung zu verschiedenen Tidezyklen der Weser und der Lesum, sowie die zugehörigen strömungsmechanischen Zusammenhänge liegen bisher keine Untersuchungsergebnisse vor. Aus Langzeitbetrachtungen von NASNER (1997) lässt sich nur begrenzt ein Zusammenhang der Feststofffracht in der Unterweser mit dem Oberwasserabfluss erkennen. Höhere Abflüsse vergrößern die Feststofffracht und somit auch die Sedimentationsmengen.

In der Lesum und am Liegeplatz des Segelschiffes wurde stellvertretend für den gesamten sohlnahen Sedimenttransport ein Mittelsand mit einem Korndurchmesser von $d_{50} = 0,6 \text{ mm}$ betrachtet. Die Sedimentkonzentrationen wurden aus dem numerischen Modell für das Hafengebiet Bremen (FRANZIUS INSTI-

TUT, 1999) übernommen und in Tafel 5-3 zusammengefasst. Die Sinkgeschwindigkeiten der einzelnen Sedimente (Tafel 5-3) wurden in Abhängigkeit von der Korngröße mit Hilfe der Stokes-Gleichung (Gl. 5-1) und einem empirischen Ansatz des U.S. Inter-Agency Committee on Water Resources (Gl. 5-2) für ungleichförmige Partikel berechnet (VAN RIJN, 1993). In dieser Untersuchung ist es nicht notwendig, eine Beeinflussung der Sinkgeschwindigkeit durch die Sedimentkonzentration bzw. durch die Salinität zu berücksichtigen.

$$w_s = \frac{(s-1)gd^2}{18\nu} \text{ für: } 1 < d \leq 100 \mu\text{m} \quad (5-1)$$

$$w_s = \frac{10v}{d} \left[\left(1 + \frac{0,01(s-1)gd^3}{v^2} \right)^{0,5} - 1 \right]$$

für: $100 < d < 1000 \mu\text{m}$ (5-2)

Mittlerer Korndurchmesser d_{50} [mm]	Sedimenteintrag c_s [kg/m ³]	Sinkgeschwindigkeiten [m/s]
Sand: 0,6	0,016	0,09

Tafel 5-3: Sedimenteintrag der Sandfraktion an den Modellrändern.

Für den Betrieb des Sedimenttransportmodells mussten auf Grund der vorhandenen Datengrundlage verschiedene Annahmen getroffen werden:

- Auswahl von entsprechenden Naturtiden als repräsentative Wasserstandsrandbedingung am unteren- und am Lesum-Modellrand für den als charakteristisch angenommenen Oberwasserzufluss,
- Auswahl von maßgebenden Korngrößen als repräsentative Korngrößen für Kornfraktionen,
- Annahme, dass die Sohle aus einer Korngröße besteht (dies kann zu Erosionen in Bereichen mit befestigter Sohle oder größeren Kornfraktionen führen),
- Ableitung des von oberstrom zugeführten Sedimenteintrages auf der Grundlage von nicht fraktionsspezifischen Messungen zur Schwebstoffkonzentration in der Weser,
- Ableitung des von oberstrom zugeführten Sedimenteintrages in der Lesum auf der Grundlage von Messungen in der Weser,
- keine Berücksichtigung von Sedimentumlagerungen durch Schiffsbewegungen,
- keine Berücksichtigung von Sedimentum- und Ablagerungen durch das lokale Strömungsfeld des Segelschiffes DEUTSCHLAND

6 Simulation von Maßnahmen

6.1 Vorgehensweise

Für die Erarbeitung von Alternativen zur Reduzierung der Sedimentation am Liegeplatz wurden flussbauliche Maßnahmen simuliert und mit dem Ausgangszustand in der Lesum (1985) verglichen.

Die nachfolgend diskutierten Maßnahmen bzw. Alternativen wurden auf Grund von stationären Voruntersuchungen mit dem hier eingesetzten 2D-Modell ausgewählt. Diskutiert wurden die Strömungsverhältnisse

und ihre Veränderungen bei einem Hochwasserabfluss in der Lesum ($Q_{\text{Hellwege-Schleuse}} = 20 \text{ m}^3/\text{s}$) mit dem korrespondierenden Oberwasserabfluss von $Q_{\text{Intschede}} = 650 \text{ m}^3/\text{s}$ in der Weser als ein für die Sedimentation in der Lesum maßgebender Abfluss. Die Randbedingungen an den Modellgrenzen bilden die bereits für die Kalibrierung verwendeten zwei Tiden vom 23.02.1997, 16⁰⁰ Uhr bis zum 24.02.1997, 23³⁰ Uhr (Kap. 5.4.1).

Aufbauend auf Informationen des WSA BREMENS über das Profil der Lesum vor dem Einbau der Liegewanne eines Schiffes (Stand: 1985) wurde das Modell dem ursprünglichen Zustand der Lesum angepasst (Abb. 6-1 und 6-2, ursprünglicher Zustand). Die Ergebnisse aus dieser Berechnung wurden mit den Ergebnissen aus der Berechnung des aktuellen Zustandes in der Lesum (mit Segelschiff und Liegewanne, Abb. 6-3) verglichen, um den Einfluss des Segelschiffes auf die Strömungen und Sedimentation in der Lesum zu bestimmen (vgl. Kap. 6.2).

In einem zweiten Schritt wurden die Ergebnisse aus den Berechnungen der Strömungsgeschwindigkeiten und des Sedimenttransportes unter Berücksichtigung des Schiffes (Ausgangszustand mit Segelschiff) mit Ergebnissen aus den Berechnungen mit einer geplanten Spundwand um das Segelschiff verglichen (Ausbauzustand, Liegeplatz mit umgebender Spundwand, Abb. 6-4), um Veränderungen in der Lesum aufgrund der geplanten Maßnahmen zu ermitteln (vgl. Kap. 6.3).

Die Spundwand in der Lesum wurde zur Verminderung der Sedimentablagerungen in der Liegewanne um das Segelschiff angeordnet (Abb. 6-5). Ein 1. Teil der Spundwand zweigt südwestlich des Segelschiffes in einem Winkel von 35° von der Uferwand ab und hat eine Höhenlage der Oberkante von -3,0 mNN (Abb. 6-5, Abb. 6-6). Der uferparallele 2. Teil der Spundwand verläuft 25 m vom Ufer entfernt und somit 6 m südöstlich des Segelschiffes DEUTSCHLAND auf der gleichen Höhenlage. Der anschließende 3. Teil nordöstlich des Segelschiffes führt wieder in einem Winkel von 35° auf die Uferwand zurück. Die Oberkante dieses 3. Teils liegt auf -4 mNN, um bei Tidehochwasser ein Verholen des Segelschiffes zu ermöglichen.

Die Oberkante im 3. Teil von -4 mNN berechnet sich aus dem mittleren Tidehochwasser des Jahres 1997 ($M_{\text{Thw}} = 2,35 \text{ mNN}$), dem Tiefgang des Segelschiffes DEUTSCHLAND von 5,40 m und einem vertikalen Sicherheitsabstand zur Spundwand von 0,9 m. Daraus ergibt sich eine Mindestwassertiefe zum Verholen des Schiffes von -3,95 mNN. Dieser Verlauf der Spundwand ergab sich aus Voruntersuchungen des FRANZISUS-INSTITUTES.

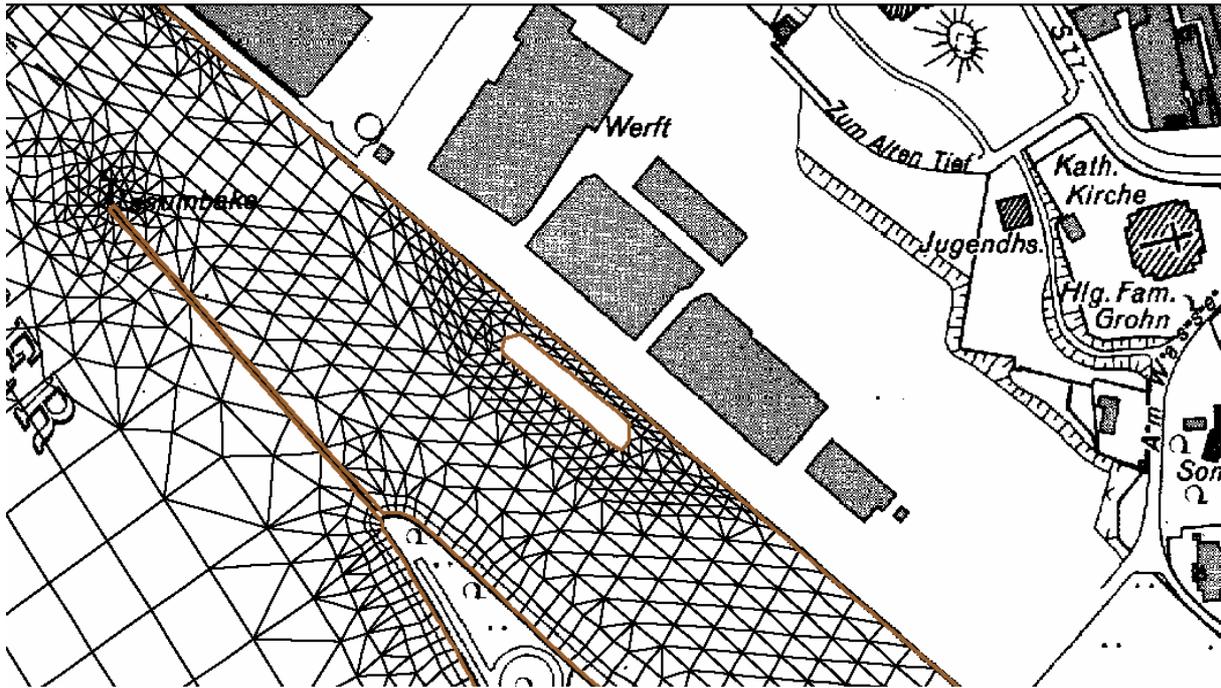


Abb. 6-1: Verwendetes FE-Netz im Bereich der Liegewanne

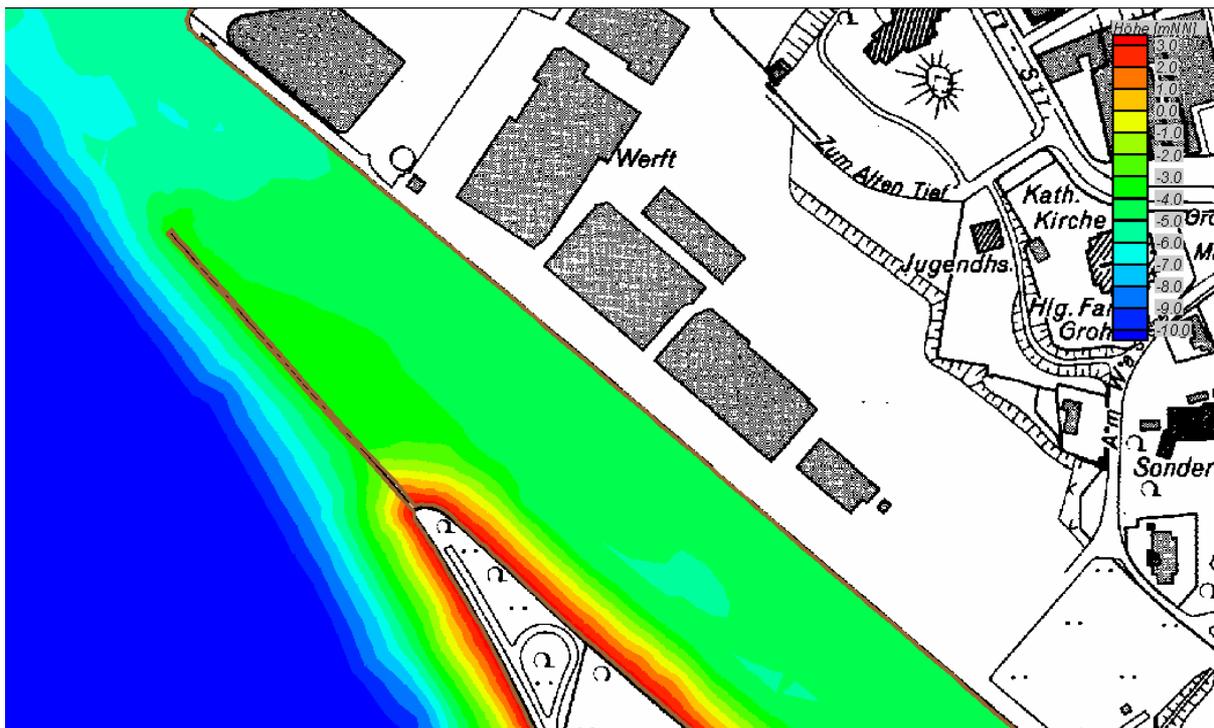


Abb. 6-2: Bathymetrie im ursprünglichen Zustand der Lesum

Für die Beschreibung der Änderungen der Strömungen im Bereich des Segelschiffes wurden vier maßgebende Strömungsphasen ausgewählt. Die Strömungsphasen haben eine unterschiedliche zeitliche Gewichtung und sind repräsentativ für die beschriebene Teiltide. Zu Beginn der Flutstromphase stellt sich für ca. 2 Stunden ein gleichförmiger Füllstrom ein (T1). Mit zunehmender Intensität des Flut-

stromes stellt sich für rd. 3 Stunden der Zustand T2 ein, der anschließend in die Strömungskenterung übergeht. Der einsetzende Ebbestrom wird mit dem Zustand T3 beschrieben (¼ Stunde). Dieser Ebbestrom wird verstärkt und geht in den voll ausgebildeten Ebbestrom über (ca. 7 Stunden, T4).

Die Auswertung der Strömungsgeschwindigkeiten erfolgte zusätzlich zur 2D-Darstellung in den in Abb.

6-7 dargestellten Schnitten. Die Blickrichtung ist stromabwärts. Die Profile beginnen bei 0mNN mit

der Koordinate 0m. Spundwände sind in den Schnitten mit einer senkrechten Linie gekennzeichnet.

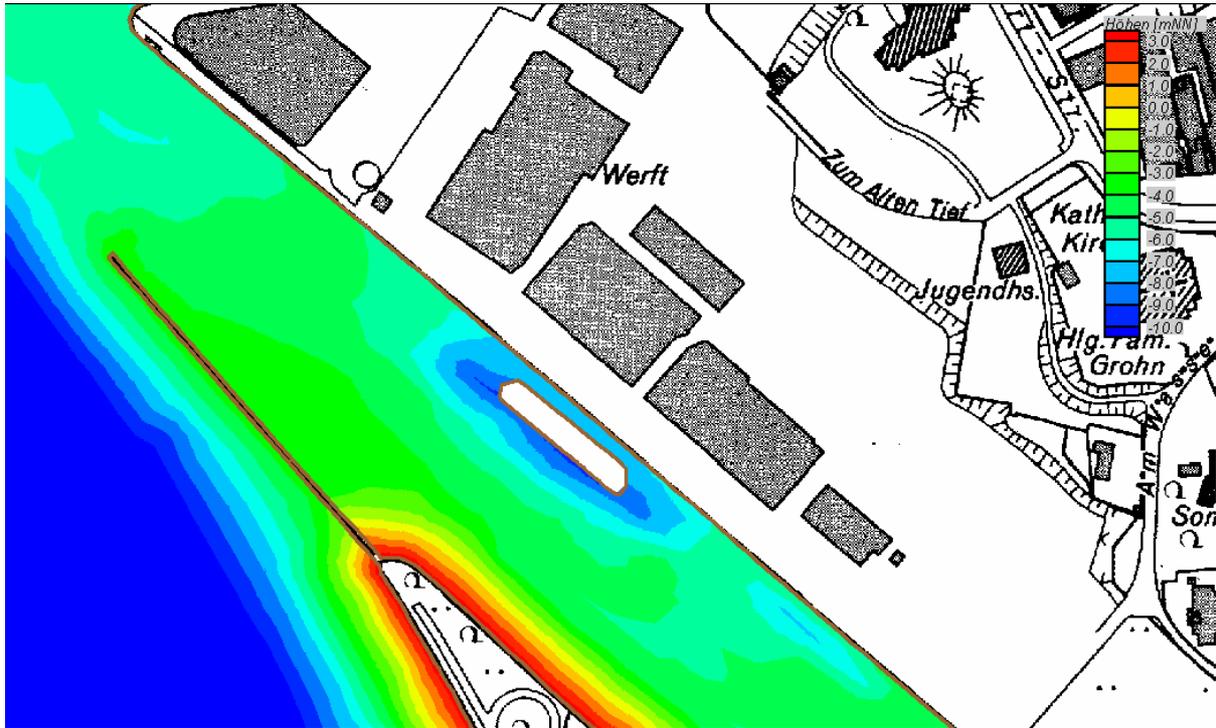


Abb. 6-3: Bathymetrie im Ausgangszustand mit integriertem Segelschiff

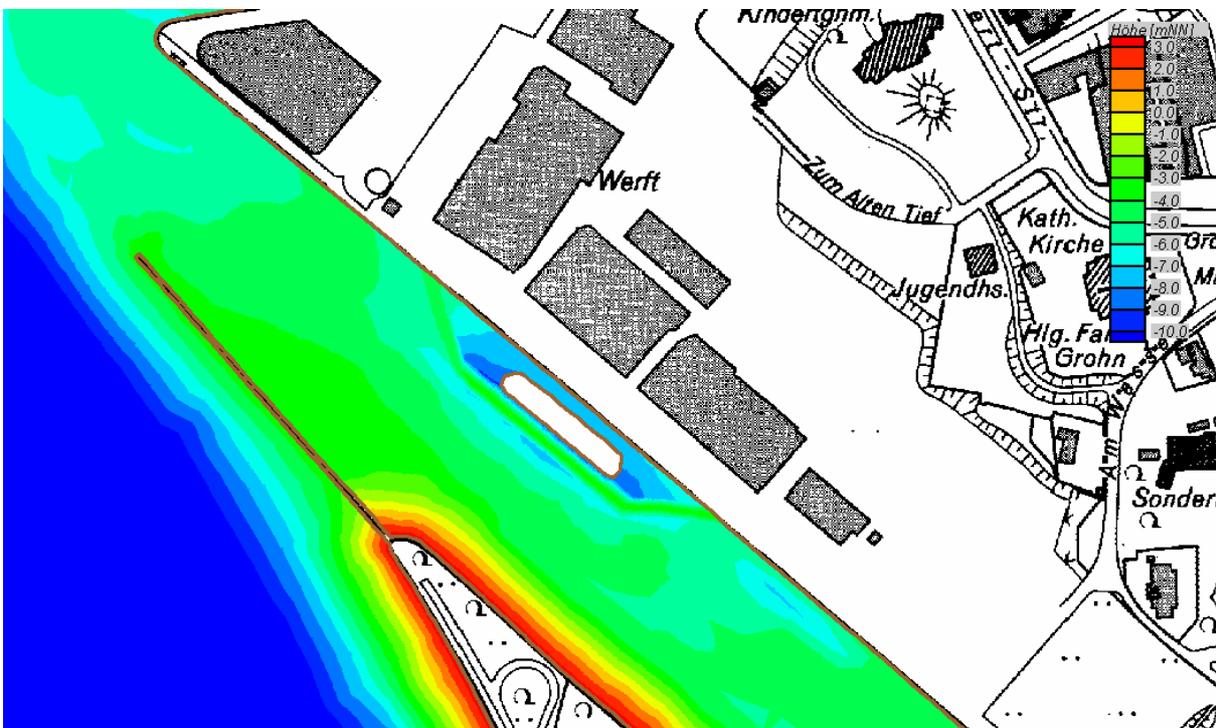


Abb. 6-4: Bathymetrie im Ausbauzustand mit integriertem Segelschiff

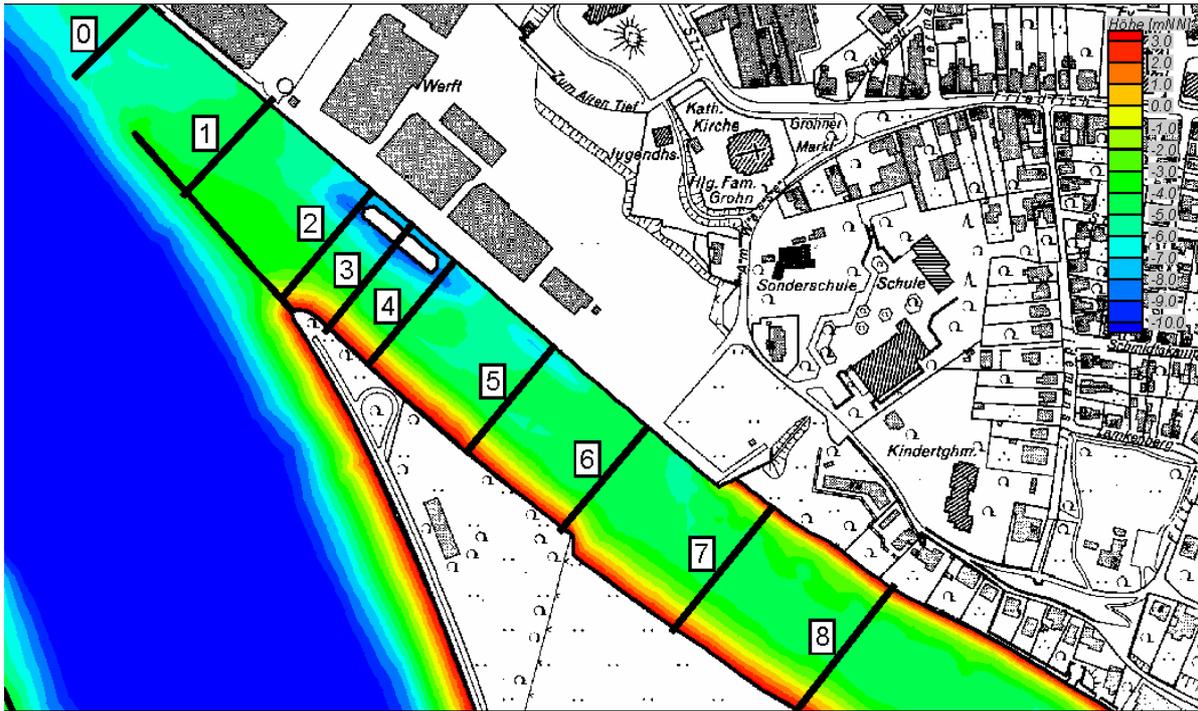


Abb. 6-7: Lage der ausgewerteten Querschnitte

6.2 Ursprünglicher Zustand

6.2.1 Strömungen in der Lesummündung

Im Bereich des Liegeplatzes des Segelschiffes in der Lesummündung stellt sich zu Beginn der Flutstromphase für ca. 2,0 Stunden ein gleichförmiger Flutstrom ein (T1). Mit weiter steigender Flutstromintensität und höheren Geschwindigkeiten stellt sich in der Lesum entlang der Trennwand zur Weser eine langgestreckte Walze ein (Abb. 6-8a, T2). Diese Walze wird durch die Ablösung des Flutstromes von der Trennwand zur Weser induziert. Die Strömungsgeschwindigkeiten nehmen auf Grund der zusätzlichen Verengung der Lesummündung durch die langgestreckte Walze zu (Abb. 6-8a). Nach weiteren 3,0 Stunden findet die Strömungskenterung in der Lesum statt. Unmittelbar nach der Strömungskenterung stellt sich ein gleichförmiger Ebbestrom ein (T3). Die Ebbestromintensität steigt innerhalb kurzer Zeit auf den in Abbildung 6-9a dargestellten Zustand (T4) an und bleibt ca. 7 Stunden lang nahezu konstant.

6.2.2 Sedimentation in der Lesummündung

Sedimentation und Erosion halten sich im ursprünglichen Zustand in der Lesum im Gleichgewicht. Der Fluss ist in diesem Bereich nahezu unterhaltungsfrei.

6.3 Ausgangszustand mit Liegewanne und Segelschiff

6.3.1 Strömungen in der Lesummündung

Die Verteilung der Strömungsgeschwindigkeiten in der Lesum ist von der Querschnittsverbauung durch das Segelschiff DEUTSCHLAND bzw. die umgebende Spundwand abhängig. Diese führt zu einer Erhöhung der Fließgeschwindigkeiten und beim Erreichen einer kritischen Geschwindigkeit v_{krit} zu verstärkter Erosion.

Durch den Einbau der Liegewanne wurde, unter Berücksichtigung des Segelschiffes DEUTSCHLAND, der Querschnitt bei MTnw um ca. 14% aufgeweitet. Bei MThw hat sich keine signifikante Änderung ergeben (Abb. 6-10).

In den Abbildungen 6-8 und 6-9 ist eine Verringerung der Strömungsgeschwindigkeiten parallel zum Liegeplatz und eine Verlagerung der Strömungsmaxima in die Lesummitte zu erkennen. In der ersten Flutstromphase zeigt sich eine Verminderung der Strömungsgeschwindigkeiten am Vegesacker Ufer aufgrund des durch das Segelschiff verminderten Querschnittes auf der Vegesacker Seite. Bei fortlaufender Tide verlagert sich das Strömungsmaximum zur Flussmitte hin. Die Strömungsgeschwindigkeiten parallel zum Segelschiff sind im ursprünglichen Zustand (Stand 1985) geringer, als im aktuellen Ausgangszustand (Abb. 6-8). Die Flutstromwalze an der Trennwand zur Weser ändert ihre Größe und Form nicht signifikant. Im Abströmbereich des Segelschiffes (Lesumaufwärts) verringern sich die Strömungsgeschwindigkeiten. Nach der Strömungsumkehr zu Beginn der Ebbestromphase erhöhen sich die Strömungsgeschwindigkeiten im Bereich vor und hinter dem Liegeplatz des Segelschiffes. Nach Intensivierung der Ebbestromung (Abb. 6-

9) zeigt sich, wie bereits beim Flutstrom zu erkennen, eine Verlagerung des Strömungsmaximums vom Segelschiff zur Strommitte hin. Dabei verringern sich mit abnehmendem Wasserstand die Geschwindigkeiten am weserseitigen Ufer und im An- und Abströmbebereich des Segelschiffes im Vergleich zum ursprünglichen Zustand (Stand 1985).

Der Einfluss des Segelschiffes auf die Strömung lässt sich anhand der in Abb. 6-11 und 6-12 dargestellten Querschnitte (vgl. Abb. 6-7) beschreiben.

Der Einfluss des Segelschiffes Deutschland und der Liegewanne ist während der Ebbestromphase in den Querschnitten 0 bis 5 zu erkennen. Während der Flutstromphase ist der Einfluss des Segelschiffes auf die Querschnitte 2 bis 7 beschränkt. Im Querschnitt 8 zeigen sich nur geringe Änderungen in den Strömungsgeschwindigkeiten. In den Querschnitten, in denen die Geschwindigkeitsverteilungen durch das Segelschiff Deutschland beeinflusst werden, zeigt sich eine Verlagerung des Geschwindigkeitsmaximums zur Lesummitte hin. Am Vegesacker Ufer werden aufgrund der Aufweitung der Lesum durch die Liegewanne bei Ebbestrom die Strömungen um bis zu 50 cm/s auf ein Minimum von 17 cm/s und bei Flutstrom um bis zu 49 cm/s auf 29 cm/s reduziert. Da bei niedrigen Wasserständen die maximale Aufweitung der Lesum durch die Liegewanne erreicht wird, ist besonders gegen Ende des Ebbestromes eine Abnahme der Strömungsgeschwindigkeiten über die gesamte Lesumbreite zu erkennen (Abb. 6-12). Bei Flutstrom nehmen mit steigendem Wasserstand die maximalen Strömungsgeschwindigkeiten im Bereich parallel zum Segelschiff im aktuellen Ausgangszustand gegenüber dem Zustand von 1985 um bis zu 8 cm/s zu (Abb. 6-11).

6.3.2 Sedimentation in der Lesummündung

Durch das Segelschiff wurde der Querschnitt der Lesum im Bereich des Liegeplatzes eingeengt. Diese Querschnittseinengung wurde durch die vorgehaltene Liegewanne teilweise wieder kompensiert. Daher waren die bis zum heutigen Tage hieraus resultierenden Veränderungen der Strömungsgeschwindigkeiten begrenzt, was die dargestellten Untersuchungsergebnisse bestätigt haben.

Die im Bereich des Liegeplatzes auftretenden maximalen Strömungsgeschwindigkeiten lagen schon vor Einrichtung des Liegeplatzes bereichsweise höher als die kritische Strömungsgeschwindigkeit für Erosionsbeginn ($d_{50} = 0,6 \text{ mm}$, $v_{\text{krit}} \approx 0,7 \text{ m/s}$, vgl. Kap. 6.3.1, Abb. 6-13). Trotzdem blieb die Sohle der Lesum auch nach Einrichtung des Liegeplatzes stabil, was durch die Auswertung der verfügbaren Peilpläne bestätigt wurde.

Dies legt nahe, dass die örtlich und zeitlich begrenzten Überschreitungen der kritischen Strömungsgeschwindigkeit und die hieraus abgeleiteten Erosionen durch die langfristig auftretenden morphodynamischen Prozesse wieder ausgeglichen wurden.

Das Segelschiff verursacht deutliche Änderungen der Strömungszustände in der Lesum. Durch die Betrachtung der Sedimentationshöhen (Abb. 6-14) werden die Änderungen deutlich sichtbar. Im Ausgangszustand unter Berücksichtigung des Segelschiffes findet sich vor dem Liegeplatz in Richtung Weser in der Flutstromphase eine Erosionsfläche. Bei Flut-, als auch bei Ebbestrom lagern sich zudem größere Mengen an Sediment in der Liegewanne ab. Am Ende der Ebbestromphase sind im Ausgangszustand unter Berücksichtigung des Segelschiffes die während des Flutstromes in der Lesum parallel zum Liegeplatz entstandenen Erosionsflächen wieder zusedimentiert (Abb. 6-14).

Die Erosions- und Sedimentationsbereiche sind hier für ein mittleres Sandkorn mit einem $d_{50}=0,6 \text{ mm}^4$ berechnet, und können daher nur als ein Indikator für mögliche Erosionsbereiche angesehen werden.

⁴ Die sedimentologischen Parameter des im Bereich des Liegeplatzes des Segelschiffes Deutschland anstehenden Sohlmaterials wurden durch drei neuerliche Sedimentproben im August 2001 bestätigt. Die Proben wurden längs des Liegeplatzes (Anfang, Mitte und Ende des Liegeplatzes) in Lesummitte entnommen.

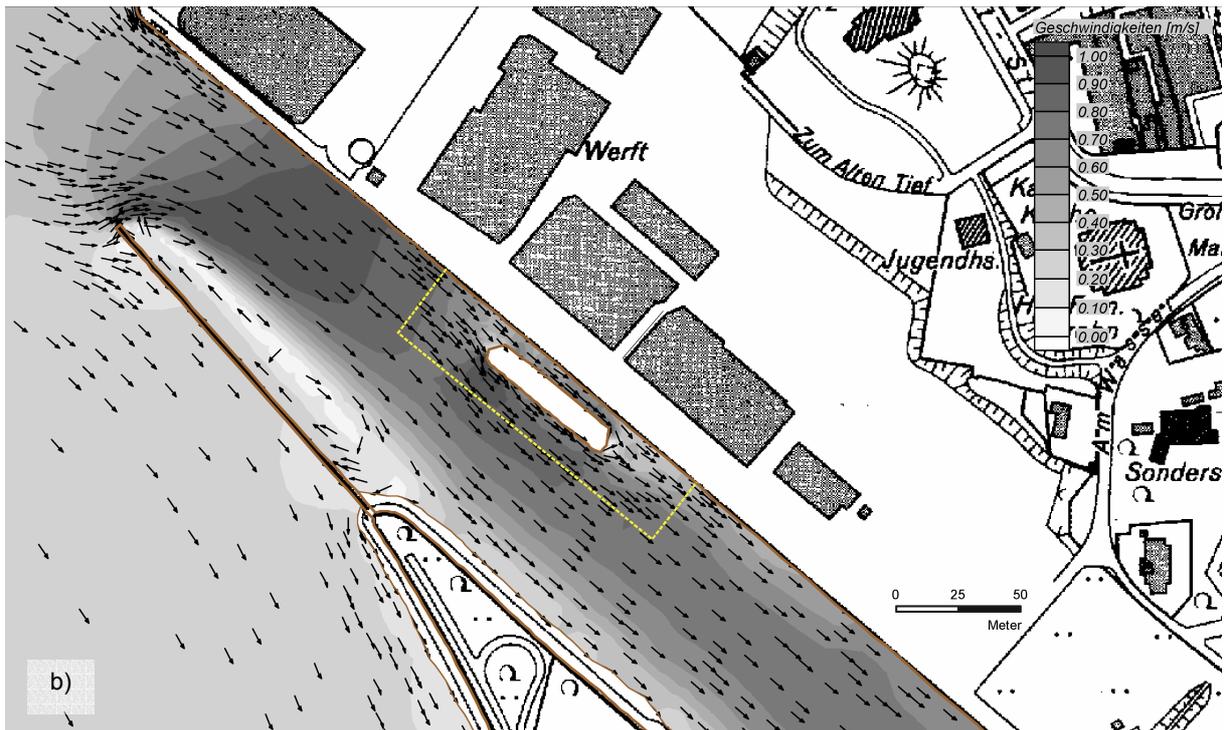
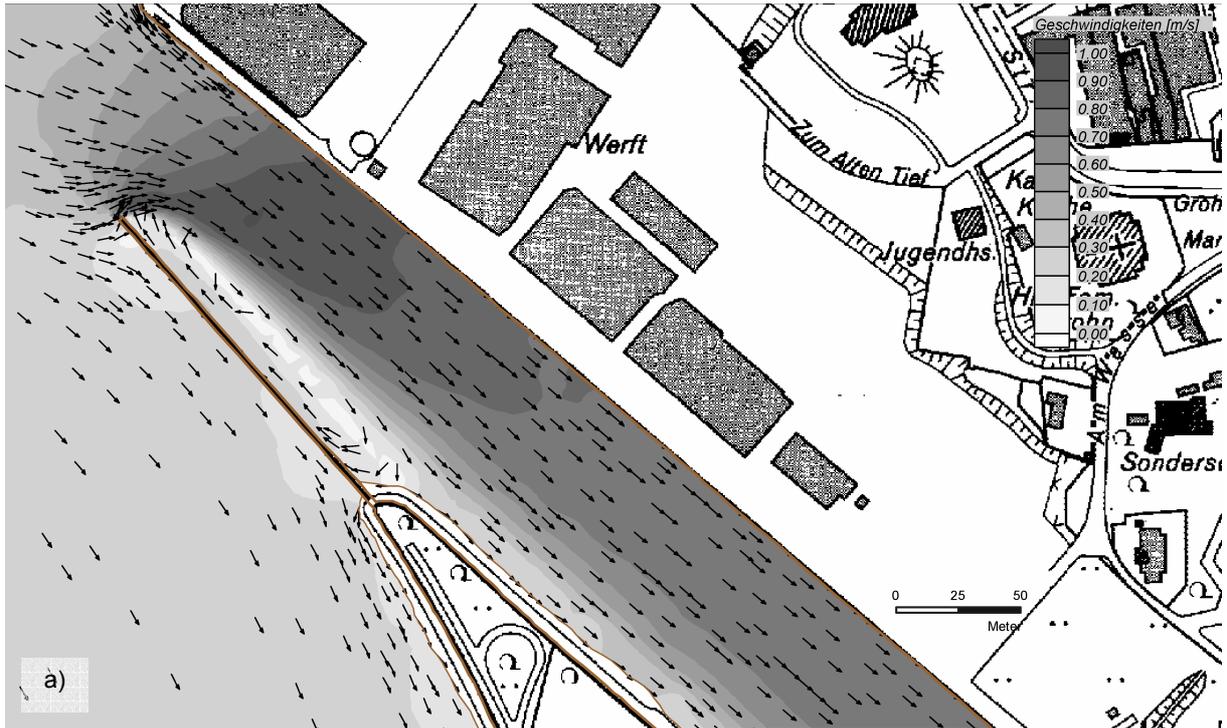


Abb. 6-8: Berechnete Strömungsgeschwindigkeiten⁵ in der Lesummündung für einen hohen Oberwasserabfluss in der Lesum von 20 m³/s bei Flutstrom, 3 Std. 50 Min. nach Tnw (T2), für a) ursprünglicher Zustand (1985) und b) Ausgangszustand mit Liegewanne und Segelschiff

⁵ Die Pfeile geben nur die Richtung wieder, die Geschwindigkeiten ergeben sich aus den Farbbereichen

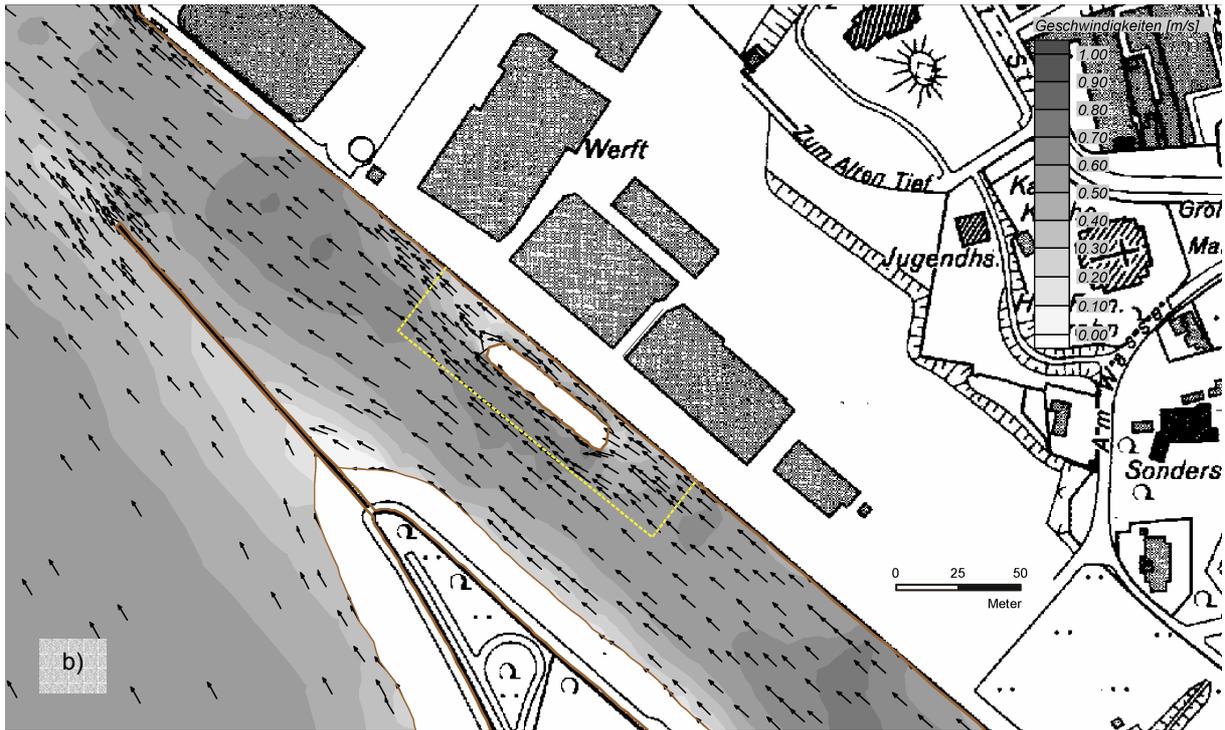
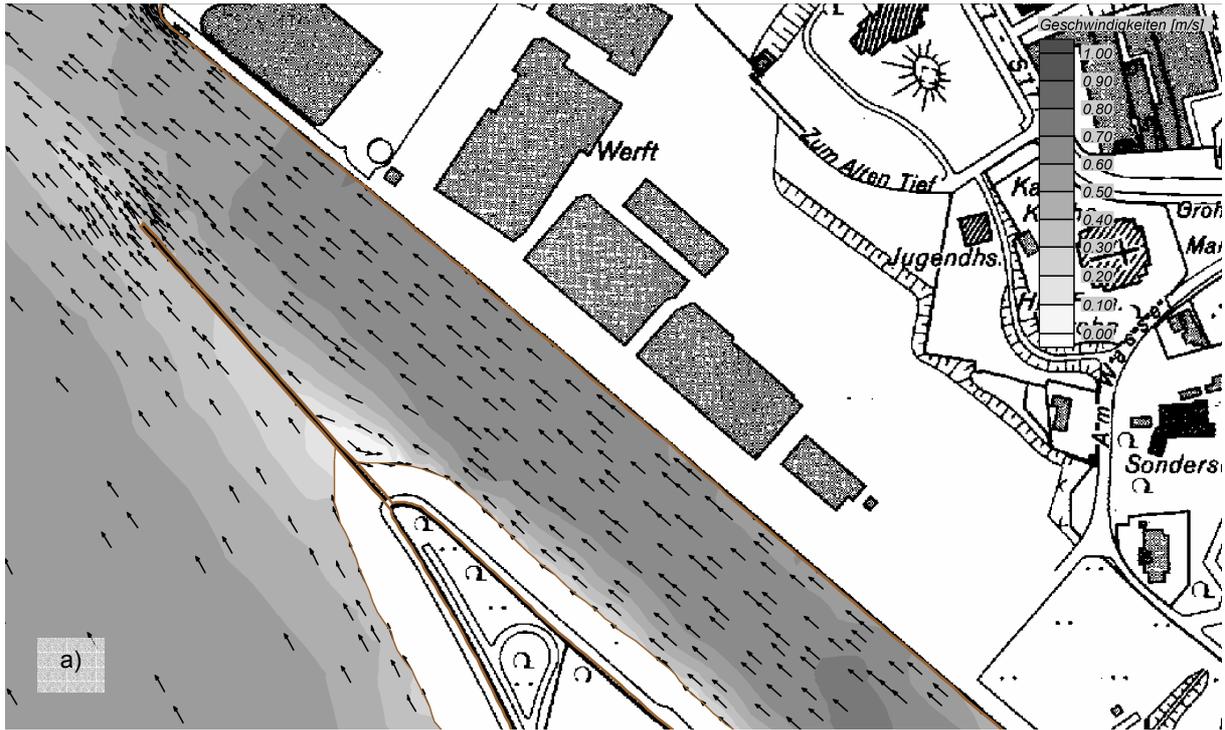


Abb. 6-9: Berechnete Strömungsgeschwindigkeiten⁶ in der Lesummündung für einen hohen Oberwasserabfluss in der Lesum von 20 m³/s bei Ebbestrom, Tnw (T4), für a) ursprünglicher Zustand (1985) und b) Ausgangszustand mit Liegewanne und Segelschiff

⁶ Die Pfeile geben nur die Richtung wieder, die Geschwindigkeiten ergeben sich aus den Farbbereichen

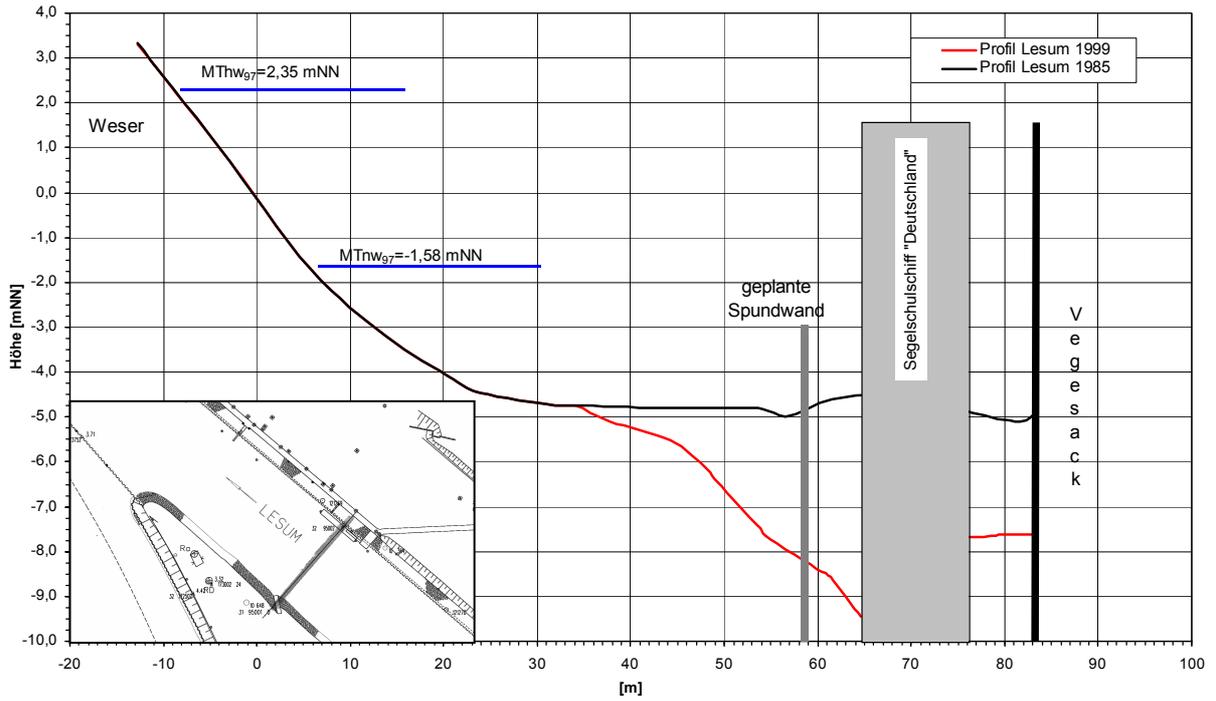


Abb. 6-10: Querschnitt durch die Lesum und die Liegewanne des Segelschiffes im numerischen Modell (Peilung WSA Bremen, 1985, 1999)

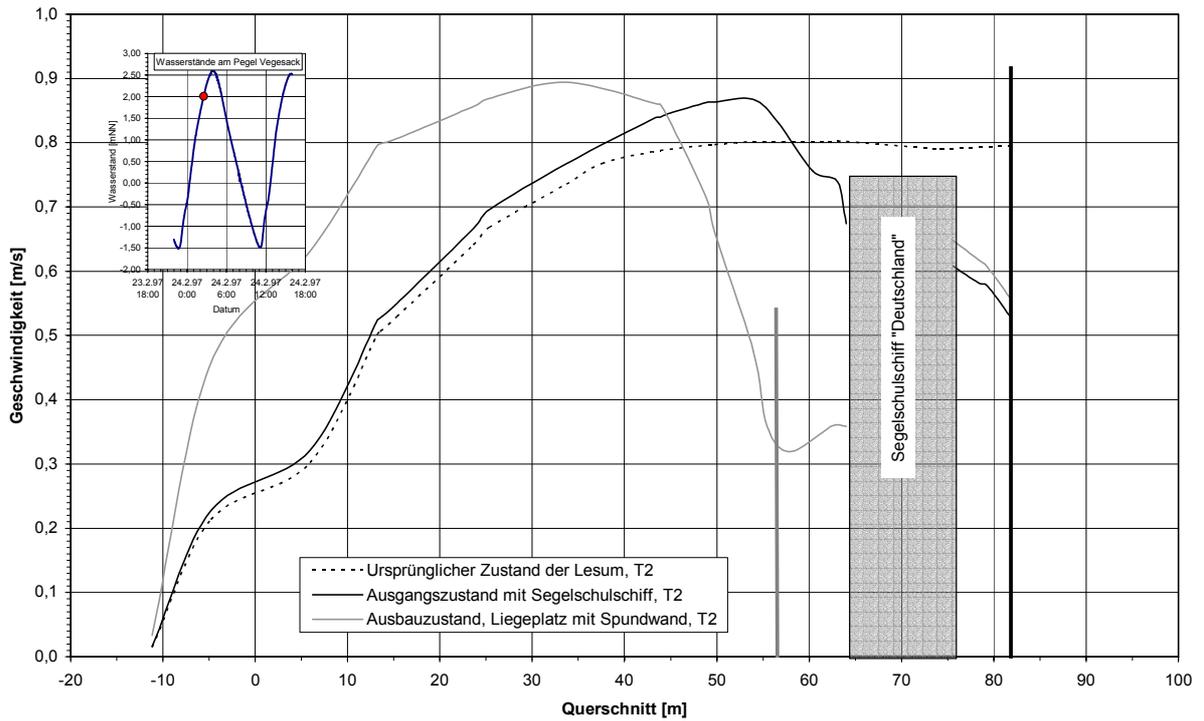


Abb. 6-11: Strömungsgeschwindigkeiten im Schnitt 3 im ursprünglichen Zustand der Lesum (1985), im Ausgangszustand mit Segelschiff und im Ausbauzustand mit geplanter Spundwand (Flutstrom 3 Std. 50 Min. nach Trnw, T2)

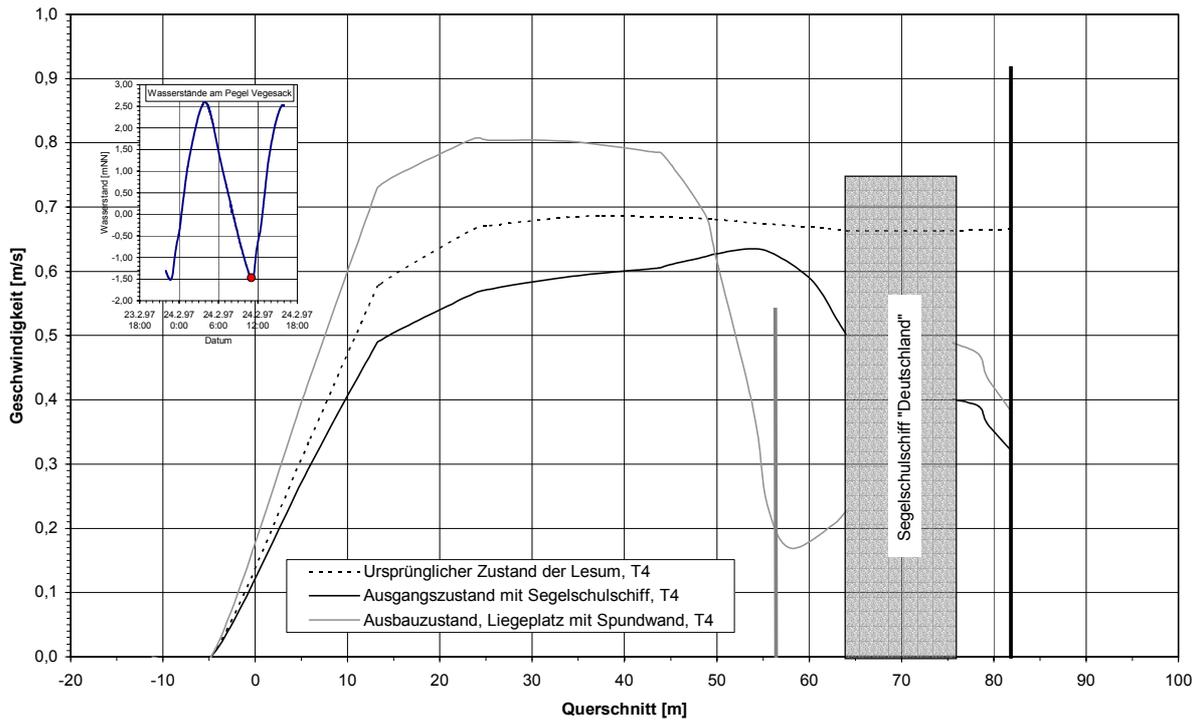


Abb. 6-12: Strömungsgeschwindigkeiten im Schnitt 3 im ursprünglichen Zustand (1985) und im Ausgangszustand mit Segelschiff (Ebbestrom bei Tideniedrigwasser; 24.02.97, 11:00 Uhr)

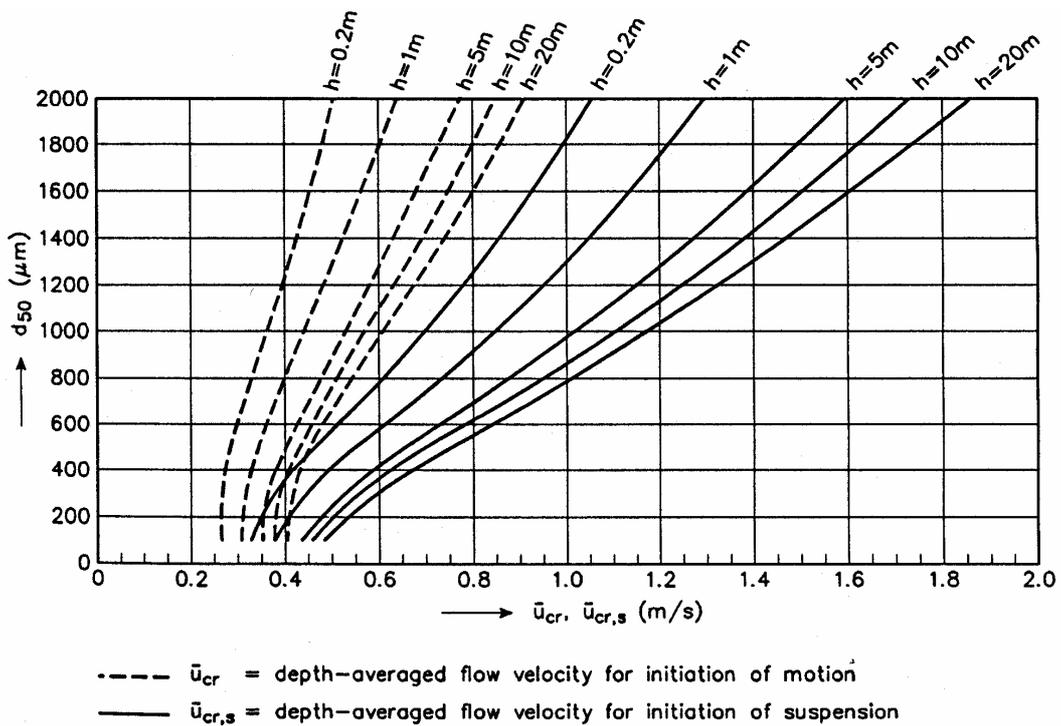


Abb. 6-13: Kritische Strömungsgeschwindigkeiten für den Bewegungsbeginn von Sedimenten über einer ebenen Sohle (van Rijn, 1993)

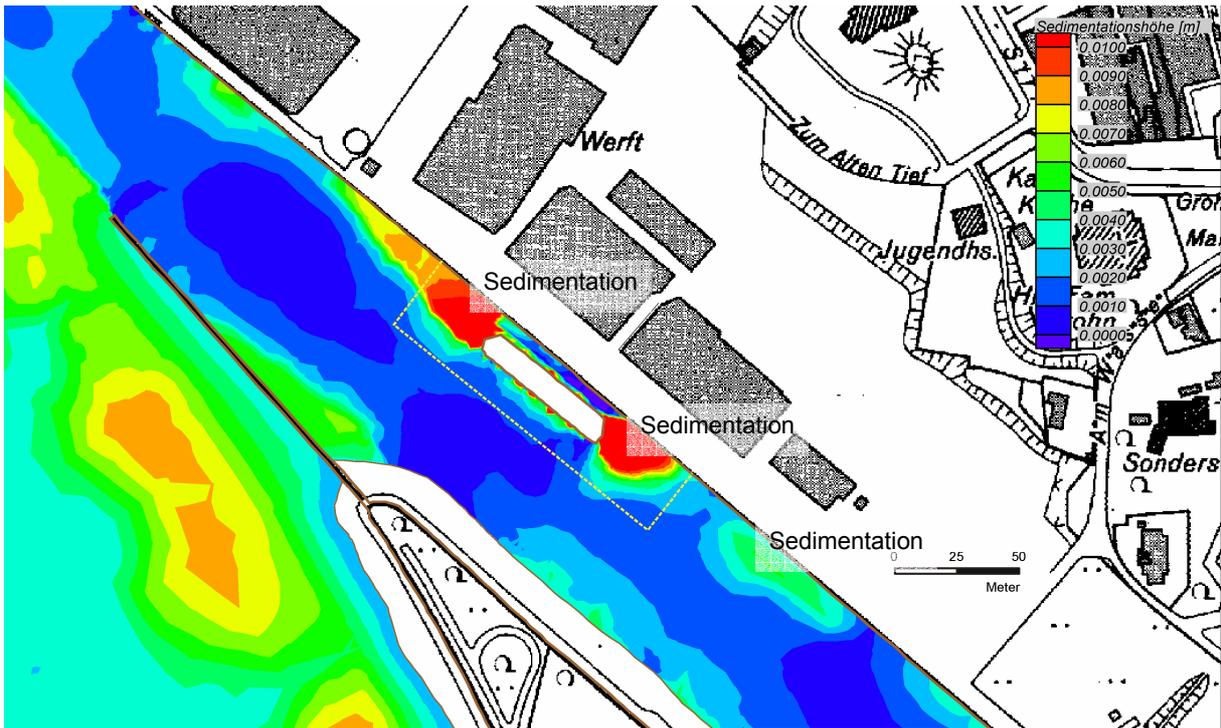


Abb. 6-14: Berechnete Sedimentationshöhen in der Lesummündung für einen hohen Oberwasserabfluss in der Lesum von $20 \text{ m}^3/\text{s}$ am Ende der Ebbestromphase für den Ausgangszustand mit Liegewanne und Segelschiff

6.4 Ausbauzustand mit Liegewanne und umgebender Spundwand

6.4.1 Strömungen in der Lesummündung

Zur Verminderung der Sedimentationsmengen wurde um das Segelschiff eine Spundwand mit einem Abstand von 25m vom Vegesacker Ufer in das Modell eingesetzt (Abb. 6-5 und 6-6). Durch den zusätzlichen Einbau dieser Spundwand wird der Querschnitt um bis zu 23% (MTnw) bzw. 11% (MThw) eingengt (Abb. 6-10).

Durch den Einbau der Spundwand um das Segelschiff DEUTSCHLAND werden die Strömungsmaxima weiter in Richtung des weseitigen Ufers verlagert. Diese Verlagerung ist im wesentlichen auf die Querschnittseingengung zurückzuführen. Eine Erhöhung der Strömungsgeschwindigkeiten ist in den Abb. 6-11 und 6-12 erkennbar.

Zu Beginn der Flutstromphase erhöhen sich die Strömungsgeschwindigkeiten zwischen dem weseitigen Ufer und der geplanten Spundwand. Das Strömungsmaximum verlagert sich mit fortlaufender Tide zur Strommitte hin (Abb. 6-15). Die Flutstromwalze an der Trennwand zur Weser verliert dabei weiter an Intensität und Größe. Im Abströmbereich des Segelschiffes (Lesumaufwärts) verringern sich die Strömungsgeschwindigkeiten. Bei einsetzender Ebbestromung nehmen parallel zur geplanten Spundwand die Geschwindigkeiten in der Mitte der Lesum zu. Mit zunehmender Ebbestromdauer zeigt sich eine Intensivierung und eine Verlagerung der Strömung

vom Segelschiff zum weseitigen Ufer hin (Abb. 6-16). Im Abströmbereich (Lesumabwärts) des Segelschiffes ist eine deutliche Reduzierung der Strömungsgeschwindigkeiten zu erkennen.

Bei einsetzendem Flutstrom ist in den Querschnitten 0, 1, 7 und 8 nahezu kein Einfluss vorhanden. In den Querschnitten, in denen die Geschwindigkeitsverteilungen durch den Einbau der Spundwand beeinflusst werden, zeigt sich eine Verlagerung des Geschwindigkeitsmaximums zum weseitigen Ufer hin. Für den voll ausgebildeten Flutstrom lässt sich in allen Querschnitten der Einfluss der Spundwand erkennen.

Der Ebbestrom ist zu Beginn in den Querschnitten 1 bis 4 zu erkennen (Abb. 6-11 und 6-12). Nach der Intensivierung des Ebbestromes ist in allen Querschnitten der Einfluss der Spundwand erkennbar. Zwischen Querschnitt 5 und Querschnitt 8 ist eine gleichmäßige Absenkung der Geschwindigkeitsprofile um 2-5 cm/s vorhanden.

Im Anströmbereich direkt vor dem Segelschiff (Querschnitt 1 bei Flut und Querschnitt 5 bei Ebbe) sind bei beginnender Flut / Ebbe geringe Änderungen (bis zu 2 cm/s) der Strömungsgeschwindigkeiten vorhanden. Bei zunehmendem Flutstrom nimmt die Strömungsgeschwindigkeit am Vegesacker Ufer um 12 cm/s und während des Ebbestromes um rd. 3 cm/s ab.

Im Abströmbereich hinter dem Segelschiff zeigt sich bei beginnender Flut- bzw. Ebbestromung eine Verminderung der Strömungsgeschwindigkeiten im Bereich hinter der geplanten Spundwand und ein An-

stieg der Geschwindigkeiten in der Fahrrinne. Mit fortschreitender Flut- bzw. Ebbestromdauer verstärkt sich die Reduzierung der Strömungsgeschwindigkei-

ten hinter der geplanten Spundwand um bis zu 27 cm/s und es ist eine verstärkte Verlagerung des Strömungsmaximums zur Flussmitte hin erkennbar.

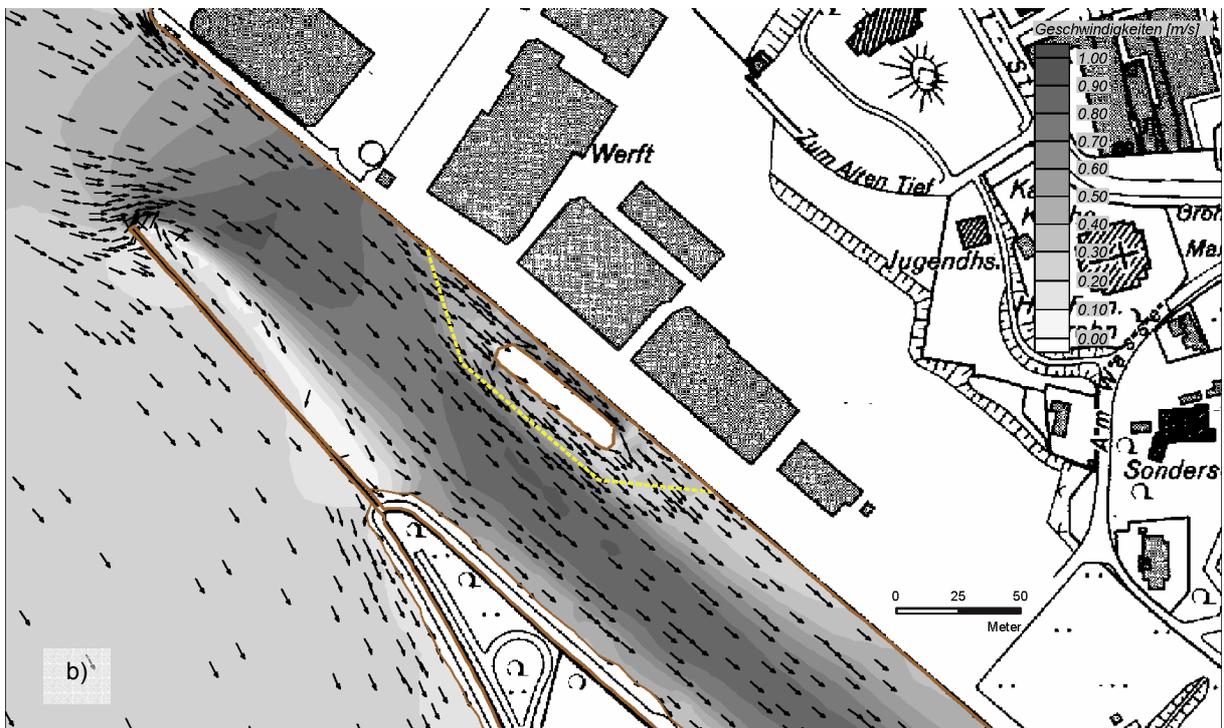
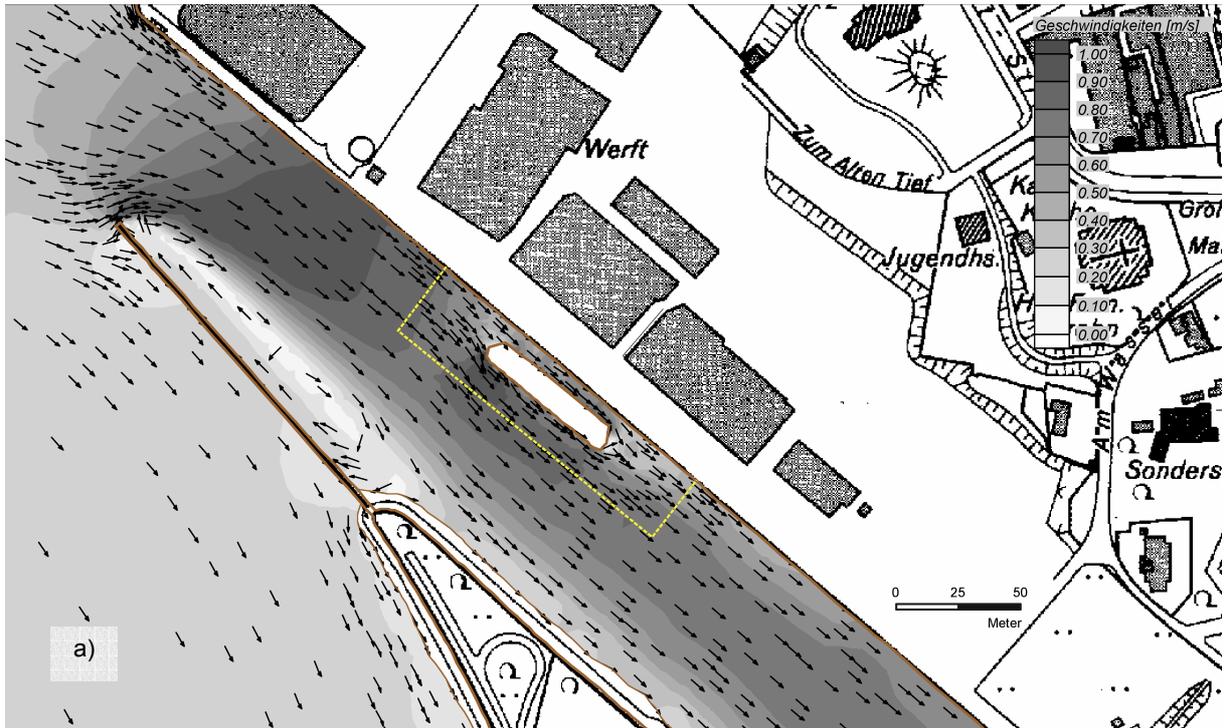


Abb. 6-15: Berechnete Strömungsgeschwindigkeiten⁷ in der Lesummündung für einen hohen Oberwasserabfluss in der Lesum von 20 m³/s bei Flutstrom, 3 Std. 50 Min. nach Tnw (T2), für a) Ausgangszustand mit Liegewanne und Segelschiff und b) Ausbauzustand mit Spundwand um das Segelschiff

⁷ Die Pfeile geben nur die Richtung wieder, die Geschwindigkeiten ergeben sich aus den Farbbereichen

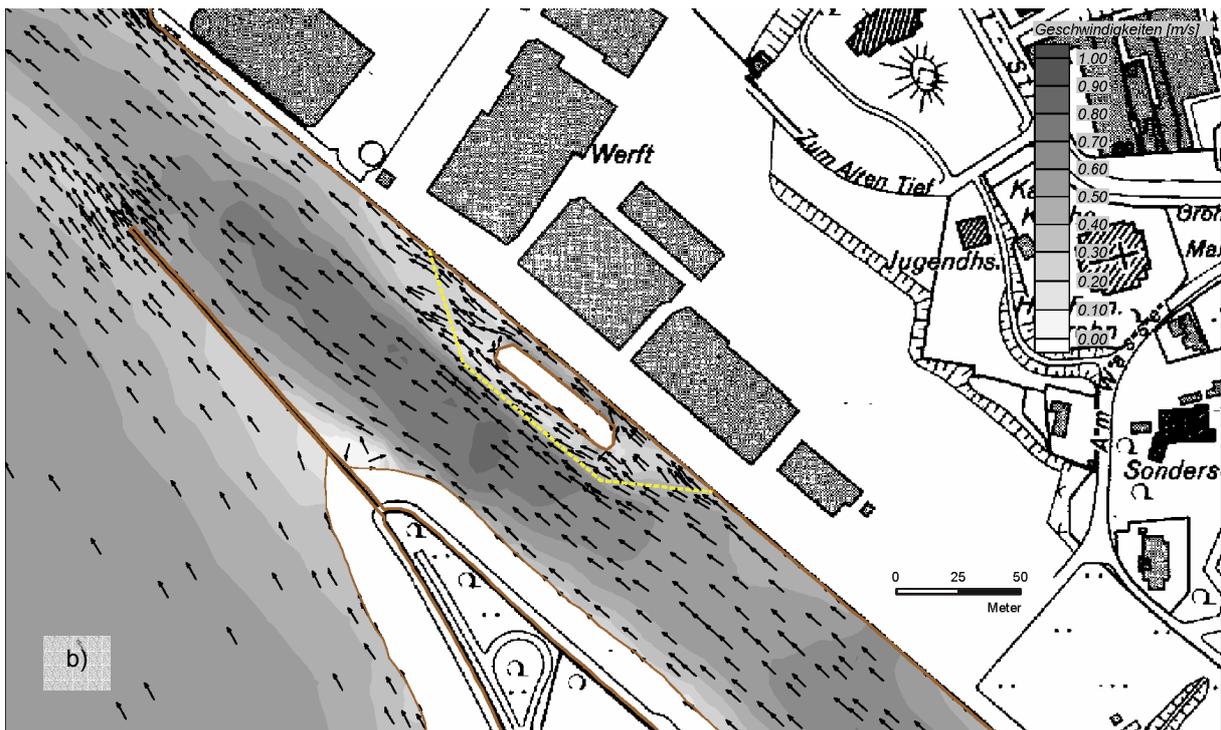
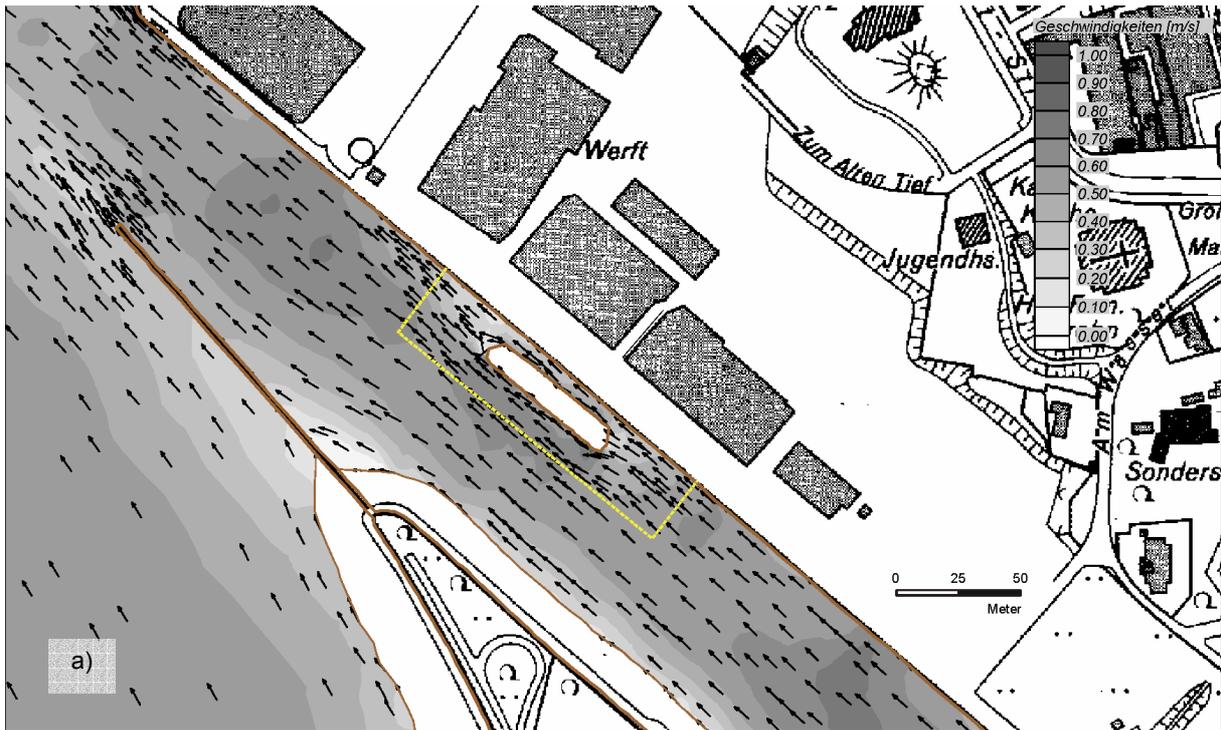


Abb. 6-16: Berechnete Strömungsgeschwindigkeiten⁸ in der Lesummündung für einen hohen Oberwasserabfluss in der Lesum von 20 m³/s bei Ebbestrom, Tnw (T4), für a) Ausgangszustand mit Liegewanne und Segelschiff und b) Ausbauzustand mit Spundwand um das Segelschiff

Im Bereich um das Segelschiff (Schnitte 2-4) tritt durch den Bau der umgebenden Spundwand eine Verlagerung des Strömungsmaximums zur Flussmitte ein (Abb. 6-11 und 6-12).

Die maximale Strömungsgeschwindigkeit bei Flutstrom beträgt 97 cm/s im Querschnitt 1 (Ausgangszustand). Die maximale Erhöhung der Strömungsgeschwindigkeiten durch den Einbau der Spundwand

⁸ Die Pfeile geben nur die Richtung wieder, die Geschwindigkeiten ergeben sich aus den Farbbereichen

von 11 cm/s tritt im Querschnitt 4 auf, womit das in Querschnitt 1 vorhandene Geschwindigkeitsniveau vor Einbau der Spundwand fast erreicht wird.

Die maximale Strömungsgeschwindigkeit bei Ebbestrom beträgt 81cm/s, was einer Erhöhung von 17 cm/s zu dem bisherigen Maximalwert (Ausgangszustand mit Segelschiff) in diesem Querschnitt entspricht. Die maximale Differenz der Strömungsmaxima von ca. 22 cm/s ist in Schnitt 2 bei Ebbestrom vorhanden.

Vor Einbau der Spundwand erreichen die Strömungsgeschwindigkeiten im Bereich des Segelschiffes DEUTSCHLAND Maximalwerte von bis zu 97 cm/s, die nach Einbau der Spundwand nicht mehr erreicht werden. Es ist festzuhalten, dass auch im Ausgangszustand die Strömungsgeschwindigkeiten im Bereich des Liegeplatzes des Segelschiffes DEUTSCHLAND ein hohes Niveau erreichen (97 cm/s).

Mit Hilfe des 3D-Programms wurde detailliert die Umströmung der Spundwand (für den Zeitschritt T4: Ebbe, voll ausgebildet) ermittelt (SCHLENZ, 2002). Um die Vertikalgeschwindigkeiten vor der Spundwand bestimmen zu können sind 2 Ansichten vor der Spundwand ausgewählt worden (Fig. 12). Ein Verti-

kalschnitt durch die Lesum in dem Bereich, in dem die Spundwand an das Ufer angeschlossen wird und eine Betrachtung der sohlnahen Geschwindigkeiten im Bereich vor der Spundwand.

An der Oberkante der Spundwand treten Vertikal-komponenten der Geschwindigkeiten von $v_z = 0,3-0,35$ m/s auf (Abb. 6-18, P1).

Die Vertikalkomponente der Strömungen in der Lesum ist in Sohlhöhe auf rd. 10 cm/s begrenzt. Rd. 1 m über der Sohle überschreiten die vertikalen Geschwindigkeiten die Sinkgeschwindigkeit des untersuchten Sedimentes ($w_s = 0,09$ m/s).

Sedimenttransport über die Spundwand ist somit aufgrund der hohen Vertikalgeschwindigkeiten vor der Wand nicht auszuschließen ($v_z > w_s$).

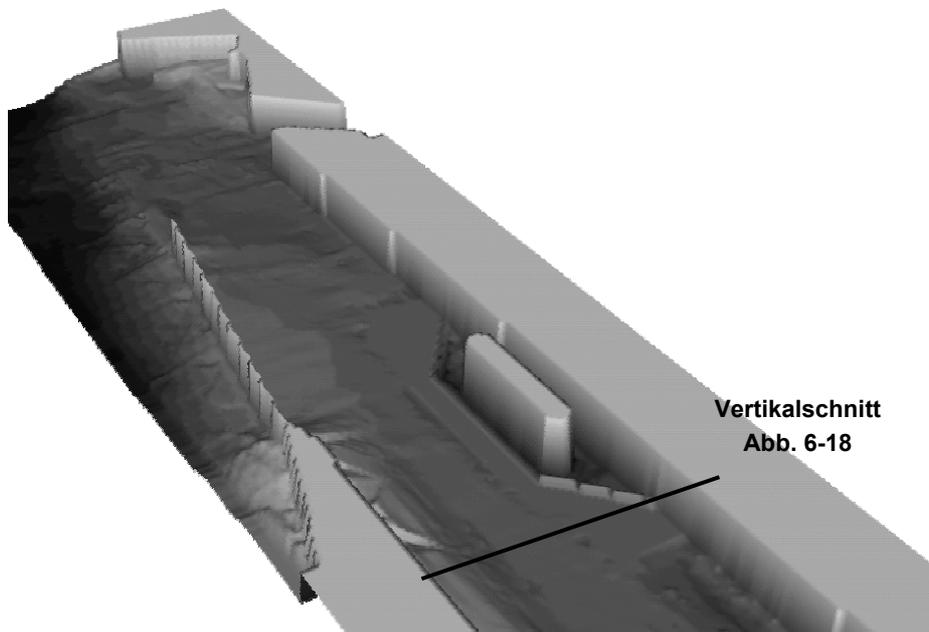


Abb. 6-17: Position des Vertikalschnittes durch die Lesum und Lage der sohlnahen Ebene oberhalb der Spundwand um das Segelschiff (SCHLENZ, 2002)

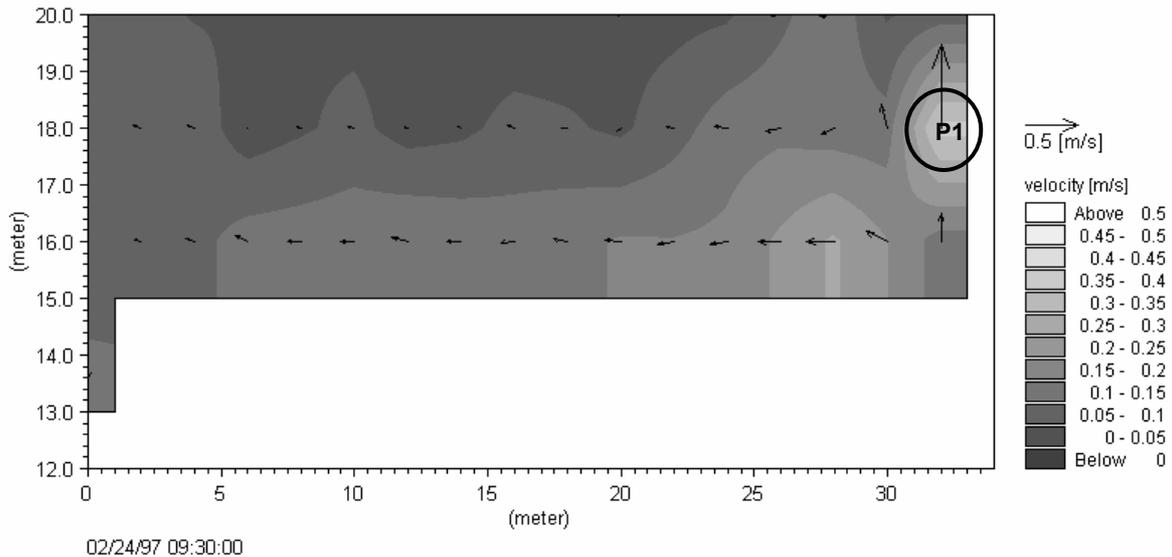


Abb. 6-18: Strömungsgeschwindigkeiten in einem Vertikalschnitt senkrecht zur Kaimauer oberhalb der Spundwand

6.4.2 Sedimentation in der Lesummündung

Das Segelschiff verursacht deutliche Änderungen der Strömungszustände in der Lesum. Zusätzlich zeigen sich durch den Einbau einer umgebenden Spundwand im jeweiligen Anströmbereich des Segelschiffes DEUTSCHLAND geringe Änderungen der Strömungsgeschwindigkeiten. Der Abströmbereich hinter der Spundwand weist geringere Geschwindigkeiten am Vegesacker Ufer auf. Eine Zunahme der Strömungsgeschwindigkeiten ist auf den verengten Bereich parallel zur Spundwand begrenzt. In diesem Bereich wird die Strömung außerhalb der Spundwand in der Lesummitte konzentriert. Zum weserseitigen Ufer hin nehmen die Strömungsgeschwindigkeiten ab. Eine kritische Zunahme der Strömungsgeschwindigkeiten über einen signifikanten Zeitraum ist im Querschnitt 4 während der Flutstromphase und Querschnitt 2 während der Ebbestromphase zu erkennen. Die kritischen Strömungsgeschwindigkeiten werden hier überschritten (Abb. 6-13), so dass in diesem Bereich parallel zur Spundwand mit Erosion zu rechnen ist.

Dies wird durch die Betrachtung der Sedimentationshöhen (Abb. 6-19) bestätigt. Im Ausgangszustand unter Berücksichtigung des Segelschiffes findet sich vor dem Liegeplatz in der Flutstromphase eine Erosionsfläche. Dieser Erosionsbereich verkleinert sich im Ausbauzustand unter Berücksichtigung des Segelschiffes. Im Bereich parallel zum Liegeplatz entsteht ein neuer Erosionsbereich. Hinter dem Liegeplatz stromauf in der Lesum lagern sich in der Flutstromphase verstärkt Sedimente ab.

Am Ende der Ebbestromphase sind im Ausgangszustand keine Erosionsflächen vorhanden (Abb. 6-14). Durch den Einbau der Spundwand verringert sich die Sedimentation stromauf des Liegeplatzes (E-S1, Abb. 6-19) gleichzeitig bildet sich parallel zum Liegeplatz eine Erosionsfläche aus (E-E1). Im Bereich stromab des Segelschiffes sedimentiert verstärkt Material (E-S2).

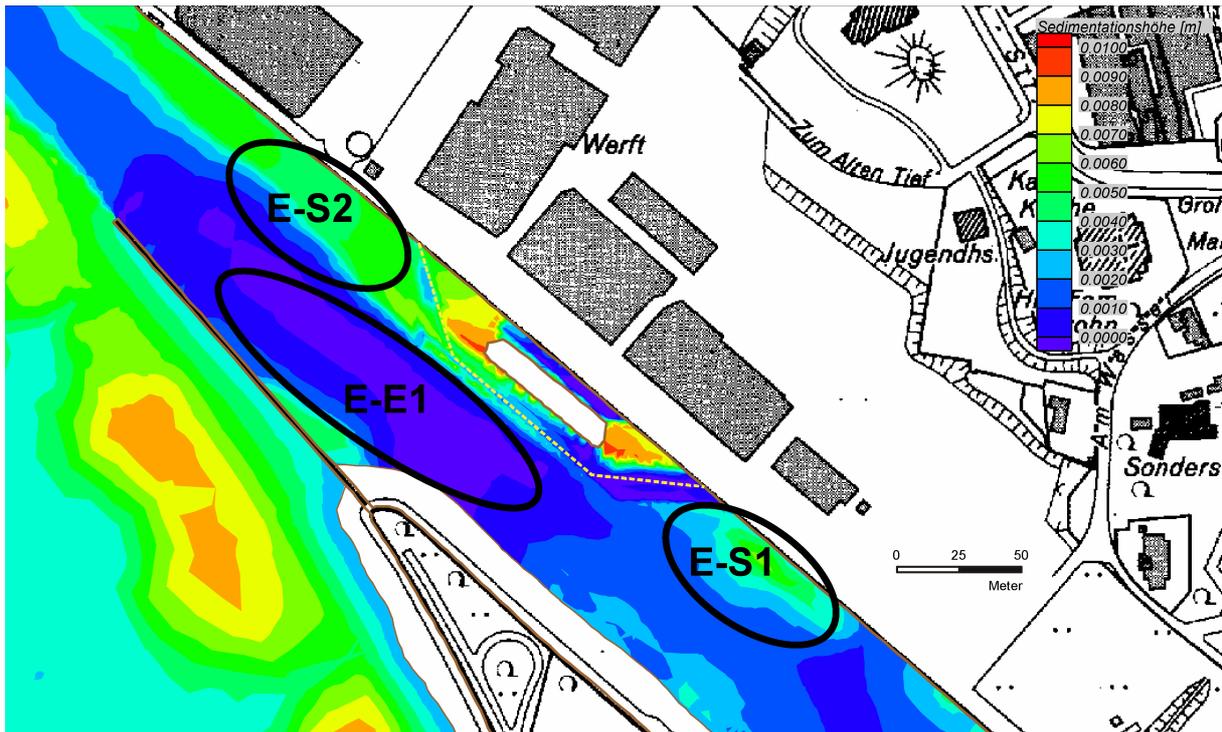


Abb. 6-19: Berechnete Sedimentationshöhen in der Lesummündung für einen hohen Oberwasserabfluss in der Lesum von $20 \text{ m}^3/\text{s}$ am Ende der Ebbestromphase für den Ausbautzustand mit Liegewanne, Segelschiff und Spundwand

6.4.3 Ergebnisse

Der Liegeplatz des Segelschiffes an der Lesum bot, auf Grund der Übertiefe der Lesum von ca. 2,2 m unter der planfestgestellten Sohle von $-2,8 \text{ mNN}$, Möglichkeiten zur effektiven Verminderung der Versandung mit Hilfe einer Unterwasserspundwand (Abb. 6-5 und 6-6).

Die Vorteile dieser Lösung liegen zum einen darin, dass die DEUTSCHLAND bei Tidehochwasser immer ausgedockt werden kann. Zum anderen ist durch die auch bei niedrigsten Wasserständen gegebene Wasserüberdeckung keine Beeinträchtigung des Landschaftsbildes gegeben. Es werden zudem keine Betriebs- oder Unterhaltungskosten für dieses Bauwerk anfallen. Die vorbeiführende Schifffahrt wird kaum beeinträchtigt.

Unter Ansatz der allen Untersuchungen zugrunde gelegten hydrologischen Randbedingungen (FRANZIUS-INSTITUT, 2000) ergeben sich im ursprünglichen Zustand im Bereich des heutigen Liegeplatzes maximale Strömungsgeschwindigkeiten von bis zu 96 cm/s (Schnitt 0: 58 cm/s , Schnitt 1: 98 cm/s , etc.).

Da nach Auswertung der verfügbaren Peilpläne die Sohle der Lesum vor und nach Einrichtung des Liegeplatzes stabil war, sich jedoch schon für diese Zustände (ursprünglicher Zustand bzw. Ausgangszustand) bei Ansatz der o.g. Randbedingungen Maxima der Strömungsgeschwindigkeiten im kritischen Grenzbereich zeigten, kann davon ausgegangen

werden, dass die im ursprünglichen Zustand (ohne Segelschiff und Liegewanne) und im Ausgangszustand (mit Segelschiff und Liegewanne) auftretenden Erosionen durch nachlaufende Sedimentationen von oberstrom wieder ausgeglichen wurden.

Die Untersuchungen haben gezeigt, dass durch den Einbau einer den Liegeplatz des Segelschiffes Deutschland umgebenden Spundwand die Strömungsgeschwindigkeiten in der Lesum parallel zur Spundwand weiter angehoben werden. Für die untersuchten hydrologischen Randbedingungen sind daher Erosionen parallel zur Spundwand zu erwarten. Das erodierte Material wird bei Ebbe direkt in die Weser abgeführt bzw. im ufernahen Bereich unterhalb des Liegeplatzes abgelagert.

In der Liegewanne des Segelschiffes lagerten sich überwiegend Sande ab, die aus der Lesum stammen. Die Liegewanne sandet ungleichmäßig von Lesum aufwärts her zu und gefährdet so das Segelschiff. Durch den Einbau der ca. 2 m über die heutige Lesumsohle herausstehenden Unterwasserspundwand um den Liegeplatz des Segelschiffes kann der Sandeintrag in die Liegewanne bei Hochwasser ($Q > 20 \text{ m}^3/\text{s}$ am Wümme-Pegel Hellwege Schleuse) deutlich minimiert werden. Bei niedrigen Abflüssen ist praktisch kein Sandeintrag zu erwarten.

Der Eintrag von Schwebstoffen (Feinstsedimenten) kann durch diese Lösung nicht verhindert werden. Das wäre nur durch eine bis über Thw reichende

Wand möglich (Volldock). Jedoch ist aufgrund der im oberen Bereich abnehmenden Schwebstoffkonzentrationen nur mit geringen Schwebstoffeinträgen zu rechnen. Zudem bleiben die Schwebstoffe durch erhöhte Turbulenz überwiegend in Schwebelage.

7 Vergleich mit der Natur

Es bestand die Gelegenheit, diese Studien am angeführten Beispiel zu überprüfen.

Die Strömungsgeschwindigkeiten in der Lesum werden sich nach dem Einbau der Spundwand erhöhen. Eine Eintiefung der Lesum im Bereich um das Segelschiff kann nicht ausgeschlossen werden. Hierzu wurde ein Untersuchungsprogramm im Anschluss an den Bau der Spundwand im Juni 2002 gestartet.

Die Bathymetrie der Lesum wurde mit Echolotpeilungen regelmäßig (1xMonat) aufgenommen. Zusätzlich wurde die Entwicklung der Tiefe der Liegewanne von der Besatzung des Segelschiffes mit einem Handlot verfolgt, um die Wirksamkeit der Spundwand zu prüfen.

In Abb. 7-1 ist die Änderung der Sohlhöhe nach 1 Monat dargestellt. Parallel zur Liegewanne ist in der Lesummitte Material erodiert. Vor und hinter der Spundwand hat sich Material abgelagert.

In der Abb. 7-2 sind die Änderungen in der Lesum nach 4 Monaten dargestellt. Parallel zur Spundwand erodiert Material, während vor und hinter der Spundwand Material sedimentiert. Im Vergleich zu den Änderungen nach einem Monat ist insgesamt weniger erodiert und sedimentiert. Eine Gefährdung des Ufers

gegenüber der Liegewanne infolge Eintiefung der Lesum scheint nicht gegeben zu sein.

Im Bereich des Segelschiffes in der Liegewanne wurden an 27 Stellen um das Schiff herum einmal im Monat Handlotungen vorgenommen (Abb. 7-3). Die gemessenen Wassertiefen sind in Tafel 7-1 dargestellt. In Tafel 7-2 sind die Wassertiefen vom März 2003 und die Abweichungen in den darauf folgenden 3 Monaten sowie im Oktober 2003 dargestellt.

Auf der Flusseite (a) tritt im mittleren Bereich (Pos. 6-8) Erosion auf. Diese resultiert aus Umlagerungen von Sedimenteinträgen infolge eines vorhergegangenen extremen Lesum Hochwassers.

Der Sedimenteintrag im Bug- und Heckbereich ist im numerischen Modell anhand der berechneten Vertikalgeschwindigkeiten von $v_z > w_z$ vorhergesagt worden. Besonders im Heckbereich ist eine kontinuierliche Aufhöhung zu erkennen.

Auf der Landseite (b) sedimentiert weniger Material, als auf der Flusseite. Die hier vorhergesagte Durchströmung des Bereiches zwischen Schiff und Ufer verhindert größere Ablagerungen. Im Bereich des Hecks findet zudem Erosion statt (Taf. 7-2, Pos. 11 und 12).

Der starke Sedimenteintrag in die Liegewanne des Segelschiffes wird durch die Spundwand weitgehend unterbunden, d.h. die hier angewendeten Modelle liefern zuverlässige Ergebnisse.

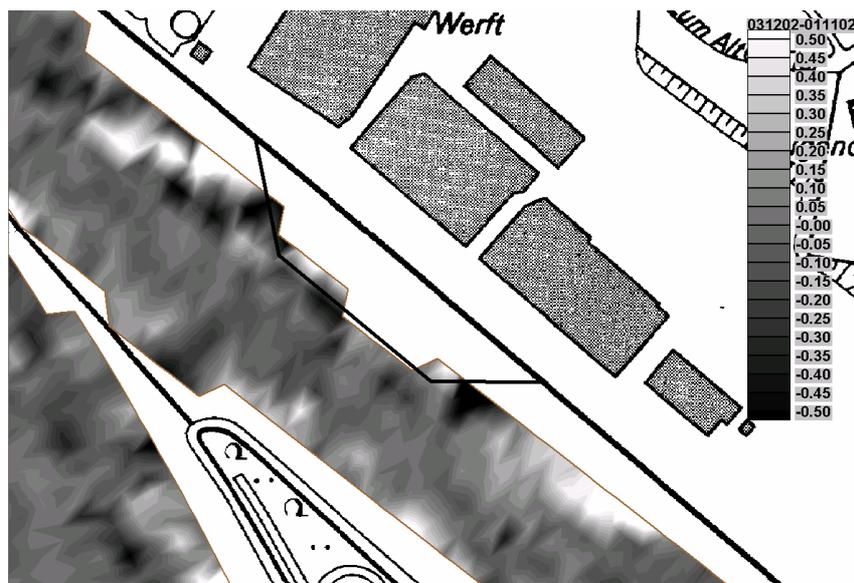


Abb. 7-1: Sedimentation (+) und Erosion (-) nach 1 Monat (in m) (Dezember 2002 – November 2002)

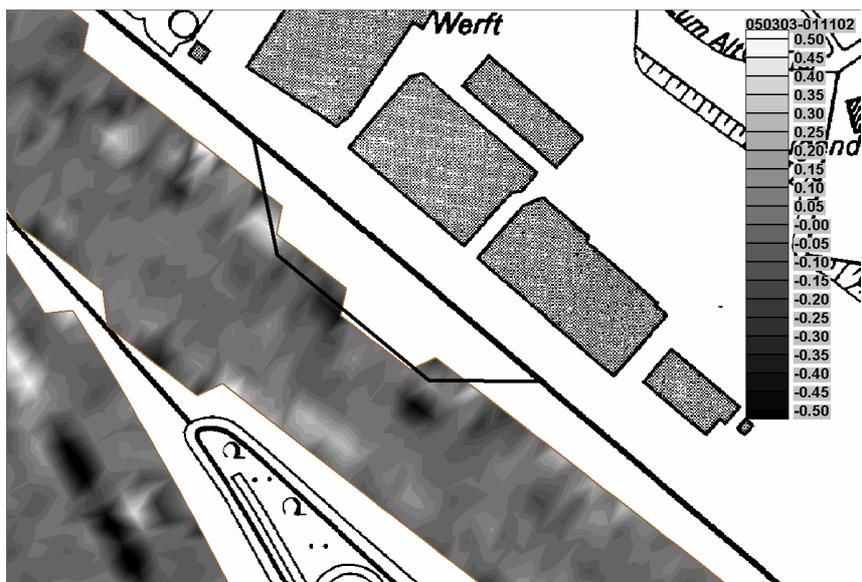


Abb. 7-2: Sedimentation (+) und Erosion (-) nach 4 Monaten (in m) (März 2003 – November 2002)

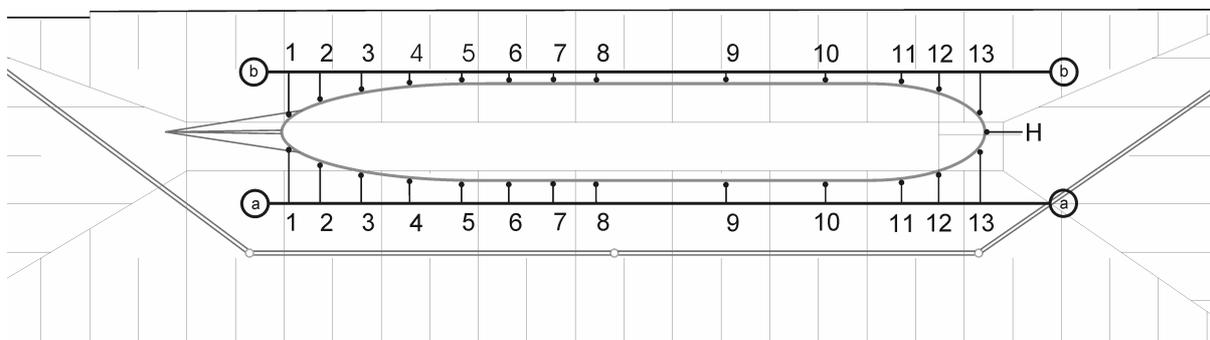


Abb. 7-3: Lage der Messpunkte

Segelschiff "Deutschland", Handlotung vom 19.03.2003/10.40 Uhr		Segelschiff "Deutschland", Handlotung vom 30.04.2003/10.10 Uhr		Segelschiff "Deutschland", Handlotung vom 28.05.2003/08.55 Uhr		Segelschiff "Deutschland", Handlotung vom 26.06.2003/07.50 Uhr		Segelschiff "Deutschland", Handlotung vom 23.10.2003/08.25 Uhr											
1a	-9,40	1b	-9,80	1a	-9,50	1b	-9,80	1a	-9,42	1b	-9,82	1a	-9,53	1b	-9,73	1a	-9,71	1b	-9,81
2a	-9,30	2b	-9,30	2a	-8,70	2b	-9,40	2a	-8,72	2b	-9,02	2a	-8,63	2b	-9,13	2a	-9,61	2b	-9,31
3a	-9,50	3b	-8,90	3a	-8,90	3b	-8,80	3a	-8,82	3b	-8,72	3a	-9,43	3b	-8,63	3a	-9,71	3b	-8,71
4a	-9,70	4b	-7,90	4a	-9,50	4b	-8,10	4a	-9,42	4b	-7,82	4a	-9,43	4b	-8,13	4a	-9,41	4b	-8,01
5a	-9,70	5b	-7,80	5a	-9,70	5b	-7,80	5a	-9,62	5b	-7,82	5a	-9,53	5b	-7,63	5a	-9,71	5b	-7,91
6a	-9,10	6b	-7,80	6a	-9,70	6b	-7,70	6a	-9,32	6b	-7,72	6a	-9,63	6b	-7,73	6a	-9,81	6b	-7,81
7a	-8,90	7b	-7,80	7a	-9,60	7b	-7,70	7a	-9,72	7b	-7,72	7a	-9,83	7b	-7,73	7a	-9,61	7b	-7,71
8a	-9,10	8b	-7,90	8a	-9,50	8b	-7,80	8a	-9,62	8b	-7,82	8a	-9,63	8b	-7,73	8a	-9,81	8b	-7,81
9a	-9,10	9b	-7,90	9a	-8,90	9b	-7,80	9a	-8,92	9b	-7,92	9a	-9,13	9b	-7,83	9a	-8,91	9b	-7,91
10a	-9,00	10b	-7,70	10a	-9,00	10b	-7,60	10a	-8,82	10b	-7,72	10a	-9,03	10b	-7,63	10a	-8,71	10b	-7,61
11a	-8,30	11b	-8,00	11a	-7,90	11b	-7,90	11a	-7,92	11b	-8,52	11a	-7,73	11b	-8,33	11a	-8,01	11b	-8,51
12a	-7,50	12b	-8,50	12a	-7,50	12b	-8,40	12a	-7,62	12b	-8,52	12a	-7,43	12b	-8,83	12a	-7,71	12b	-8,01
13a	-7,70	13b	-8,80	13a	-7,30	13b	-8,70	13a	-7,62	13b	-8,72	13a	-7,33	13b	-8,53	13a	-7,81	13b	-8,71
H		-8,60	H		-8,40	H		-8,02	H		-7,73	H		-7,81	H		-7,81		

Tafel 7-1: Wassertiefen an verschiedenen Messpunkten um das Segelschiff im März 2003 und den drei folgenden Monaten sowie im Oktober 2003

Segelschiff "Deutschland", Handlotung vom 19.03.2003/10.40 Uhr			Segelschiff "Deutschland", Differenz vom 19.03.03 zum 30.04.03 [m]			Segelschiff "Deutschland", Differenz vom 19.03.03 zum 28.05.03 [m]			Segelschiff "Deutschland", Differenz vom 19.03.03 zum 26.06.03 [m]			Segelschiff "Deutschland", Differenz vom 19.03.03 zum 23.10.03 [m]							
1a	-9,40	1b	-9,80	1a	-0,10	1b	0,00	1a	-0,02	1b	-0,02	1a	-0,13	1b	0,07	1a	-0,31	1b	-0,01
2a	-9,30	2b	-9,30	2a	0,60	2b	-0,10	2a	0,58	2b	0,28	2a	0,67	2b	0,17	2a	-0,31	2b	-0,01
3a	-9,50	3b	-8,90	3a	0,60	3b	0,10	3a	0,68	3b	0,18	3a	0,07	3b	0,27	3a	-0,21	3b	0,19
4a	-9,70	4b	-7,90	4a	0,20	4b	-0,20	4a	0,28	4b	0,08	4a	0,27	4b	-0,23	4a	0,29	4b	-0,11
5a	-9,70	5b	-7,80	5a	0,00	5b	0,00	5a	0,08	5b	-0,02	5a	0,17	5b	0,17	5a	-0,01	5b	-0,11
6a	-9,10	6b	-7,80	6a	-0,60	6b	0,10	6a	-0,22	6b	0,08	6a	-0,53	6b	0,07	6a	-0,71	6b	-0,01
7a	-8,90	7b	-7,80	7a	-0,70	7b	0,10	7a	-0,82	7b	0,08	7a	-0,93	7b	0,07	7a	-0,71	7b	0,09
8a	-9,10	8b	-7,90	8a	-0,40	8b	0,10	8a	-0,52	8b	0,08	8a	-0,53	8b	0,17	8a	-0,71	8b	0,09
9a	-9,10	9b	-7,90	9a	0,20	9b	0,10	9a	0,18	9b	-0,02	9a	-0,03	9b	0,07	9a	0,19	9b	-0,01
10a	-9,00	10b	-7,70	10a	0,00	10b	0,10	10a	0,18	10b	-0,02	10a	-0,03	10b	0,07	10a	0,29	10b	0,09
11a	-8,30	11b	-8,00	11a	0,40	11b	0,10	11a	0,38	11b	-0,52	11a	0,57	11b	-0,33	11a	0,29	11b	-0,51
12a	-7,50	12b	-8,50	12a	0,00	12b	0,10	12a	-0,12	12b	-0,02	12a	0,07	12b	-0,33	12a	-0,21	12b	0,49
13a	-7,70	13b	-8,80	13a	0,40	13b	0,10	13a	0,08	13b	0,08	13a	0,37	13b	0,27	13a	-0,11	13b	0,09
H			-8,60	H			0,20	H			0,58	H			0,87	H			0,79
			$\Delta h_{\text{mittel}} = 0,05$			$\Delta h_{\text{mittel}} = 0,04$			$\Delta h_{\text{mittel}} = 0,02$			$\Delta h_{\text{mittel}} = -0,08$							

Tafel 7-2: Wassertiefen an verschiedenen Messpunkten um das Segelschiff im März 2003 und die Änderungen in den drei folgenden Monaten sowie im Oktober 2003

8 Zusammenfassung

Die hier vorgestellte technische Maßnahme zur Verminderung der Sedimentation in einer Liegewanne an einem stark Sediment führenden Fluss bewirkt eine deutliche Reduzierung des Sedimenteintrages.

Die hier verwendeten 2D und 3D-Modelle wurden als Werkzeuge zur Ermittlung eines optimalen Designs der Spundwand eingesetzt. Mit dem 2D-Modell konnten die Auswirkungen der Spundwand auf die Lesum ermittelt werden. Das 3D-Modell ermöglichte die Darstellung der Strömungen im Bereich um die Spundwand. Die berechneten Vertikalgeschwindigkeiten sollten möglichst kleiner als die Sinkgeschwindigkeiten des transportierten Materials sein. Nur so konnte ein kontinuierlicher Sedimenteintrag in die Liegewanne ausgeschlossen werden.

Die Wirksamkeit und die Auswirkungen der Spundwand wurden in einem langfristig angelegten Messprogramm überprüft. Die bislang zu erkennenden Effekte sind bereits durch die Berechnungen vorhergesagt worden. Die Sedimentation in der Liegewanne konnte auf ein Minimum reduziert werden.

9 Schrifttum

Boss International: Surface Modelling System, User's Manual. Brigham Young university, Madison, WI, USA, 1997

Danish Hydraulic Institute: User Guide and Reference Manual. Horsholm, Dänemark, 1999

Franzius-Institut: Modellversuch für die Hafeneinfahrt Vegesack. Bericht, unveröffentlicht, 1952

Franzius-Institut: Modellversuche für die Lesum, Hamme, Wümme. Bericht, unveröffentlicht, 1972

Franzius-Institut: Auswirkungen von Dremplerhöhen im Lesumsperrwerk auf die Hydrologie in

Lesum, Hamme und Wümme. Bericht, unveröffentlicht, 1989

Franzius-Institut: Maßnahmen zur Reduzierung von Sedimentation und Baggermengen im Neustädter Hafen der stadtbremischen Häfen. Bericht, unveröffentlicht, 1999

Franzius-Institut: Untersuchungen zur Reduzierung von Sedimentation und Baggermengen am Liegeplatz des Segelschulschiffes "Deutschland" in der Lesum und der Einfahrt zum Hafen Vegesack. Bericht, unveröffentlicht, 2000

Limnologisches Institut Dr. Nowak: Ultraschallsiebung einer Mischprobe in Vegesack (Schulschiff Deutschland temporärer Liegeplatz, permanenter Liegeplatz). 1999

Nasner, H.: Sedimentation in Tidehäfen, Phase 2. Die Küste, Heft 59, 1997

Roig, L.C., Donnell, B.P., Thomas, W.A., McAnally, W.H., Adamec, S.A. jr: A Users Manual for SED2D-WES, A Generalized Computer Program for Two Dimensional, Vertical Averaged Sediment Transport. US Army Corps of Engineers, Waterways Experiment Station, Hydraulics Laboratory, Vicksburg, Miss., 1998

Schlenz, B.: Anwendung des numerischen Modells MIKE3 zur Untersuchung von 3D-Strömungen im Bereich des Liegeplatzes des Segelschulschiffes Deutschland. Studienarbeit, Franzius-Institut, unveröffentlicht, 2002

US Army Corps of Engineers: Users Guide to RMA2 / SED2D. Waterway Experiment Station, Vicksburg, Miss., 1997

Van Rijn, L.C.: Principles of Sediment Transport in Rivers, Estuaries and Coastal Seas. Aqua Publications, Amsterdam, 1993