

Zur Sedimentationsdynamik in den tideoffenen Bremer Seehäfen

Von BASTIAN SCHUCHARDT und MICHAEL SCHIRMER

Inhalt

1. Einleitung	146
2. Untersuchungsgebiet	147
3. Material und Methoden	148
4. Ergebnisse	148
4.1 Zusammenhang Oberwasser – Schwebstoffkonzentration oberhalb der Häfen	156
4.2 Zusammenhang Schwebstoffkonzentration oberhalb der Häfen – Sedimentationsverlust	157
4.3 Zusammenhang Oberwasser – Sedimentationsverlust	160
4.4 Zusammenhang Wassertemperatur – Schwebstoffkonzentration oberhalb der Häfen	161
5. Diskussion	161
5.1 Zur Methode	161
5.2 Zur Sedimentationsdynamik	165
6. Danksagung	168
7. Schriftenverzeichnis	169

Zusammenfassung

Von 1984 bis 1987 wurden vom Wasserwirtschaftsamt Bremen 136 Meßfahrten im breemischen Bereich der Unterweser durchgeführt, in deren Verlauf u. a. die Schwebstoffkonzentrationen gemessen wurden. Bei einem Teil der Fahrten ist die Schwebstoffkonzentration im Bereich der breemischen Häfen im Vergleich mit der Situation stromauf signifikant vermindert. Dies wird auf die Sedimentation von Schwebstoff in den tideoffenen Häfen zurückgeführt. Durch die Berechnung der Differenz zwischen den mittleren Schwebstoffkonzentrationen oberhalb und unterhalb der Häfen jeder einzelnen Meßfahrt wird eine Beschreibung der Sedimentationsdynamik in den tideoffenen Häfen möglich.

Die statistische Analyse des Datensatzes zeigt, daß die Sedimentation vor allem von zwei Faktoren beeinflusst wird: Zum einen von der Schwebstoffkonzentration oberhalb der Häfen, die wiederum stark vom Oberwasser und seiner Dynamik geprägt wird, zum anderen direkt von der Oberwasserführung über eine Veränderung der hydrodynamischen Situation im Untersuchungsgebiet. Die Sedimentation nimmt entsprechend dem Anstieg der Schwebstoffkonzentration bis zu einem Oberwasser von $600 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ (ca. doppeltes MQ) stark zu, bei höherem Oberwasser wird der Zusammenhang negativ. Dies führt zu einer ausgeprägten saisonalen Dynamik der Sedimentation, aber auch zu deutlichen Unterschieden von Jahr zu Jahr. Die Abnahme der Sedimentation bei sehr hohem Oberwasser ist vermutlich vor allem auf die dann stark abnehmenden Flutstromgeschwindigkeiten und Austauschwassermengen in den Hafengebieten zurückzuführen.

Auf dem steigenden Scheitel einer Hochwasserwelle ist sowohl die Schwebstoffkonzentration wie die Sedimentation deutlich stärker als auf dem fallenden Scheitel.

Ein Einfluß der Temperatur zeigt sich in der Erhöhung der Schwebstoffkonzentration des Oberwassers im hydrologischen Sommerhalbjahr, die auf eine Veränderung der Schwebstofftextur zurückgeführt wird. Der in den Häfen sedimentierende Anteil des Eintrags verändert sich jedoch nicht.

Bei Unterschreitung bestimmter Grenzwerte von Oberwasser bzw. Schwebstoffkonzentration oberhalb der Häfen sind die Schwebstoffkonzentrationen unterhalb der Häfen höher als oberhalb. Als Ursachen werden Erosion, autochthone Produktion, anthropogene Einleitungen, Schwebstoffeintrag von Unterstrom sowie bodennahe Einträge von Oberstrom diskutiert.

Die hier angewendete Methodik ermöglicht die Beschreibung auch der kurzfristigen Sedimentationsdynamik in den tideoffenen Bremer Seehäfen und ergänzt somit sinnvoll die durch Sohlpeilungen gewonnenen Informationen.

Summary

Between 1984 and 1986 a total of 136 survey cruises were conducted by the Bremen Water Authorities, in the course of which suspended solids were measured. In most cases the concentration of suspended solids in the area of the Bremen Harbour is lower than that upstream. This is probably due to sedimentation processes. The calculation of the difference between the average concentration of suspended solids upstream and downstream of the harbour for each survey allows a description of the sedimentation.

The statistical analysis of the data shows that the sedimentation is mainly influenced by two factors: firstly, the suspended solids concentration upstream of the harbour which itself depends on the river discharge and its dynamics, and secondly by the river discharge directly which changes the hydrodynamic regime within the investigated area. The sedimentation increases strongly with increased concentration of suspended solids for a discharge of up to $600 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ (about double mean discharge), whereas for a further increase in discharge the correlation turns negative. This results in pronounced seasonal dynamics as well as in clear differences from year to year. The decreased sedimentation under very high discharge conditions is probably due to the strongly reduced velocities of the flood current and the associated reduction in the exchange of water volumes in the harbour basins.

The concentration of suspended solids and the sedimentation processes are much more pronounced during the rising portion of a flood water wave than during the recession phase.

A temperature influence was determined in that an increase of the river suspended solids concentration occurs during the hydrologic summer. This is explained as a result of the changed internal structure of the suspensoids. The percentage of settled material, however, remains the same. When the river discharge or the suspended solids load upstream of the harbour fall short of certain limiting values, the downstream concentration of suspended solids will be higher. As possible sources are discussed erosion, autochthonous production, anthropogenic discharges, input of suspended solids from downstream and the near-bottom transport of upstream material.

The methods employed here allow the description of short term sedimentation dynamics within the Bremen tidal harbour and thus complement the information gained from depth sounding.

1. Einleitung

In den Seehäfen der BRD fallen zur Zeit etwa $6 \times 10^6 \text{ m}^3 \text{ a}^{-1}$ Baggergut an (SCHENKEL, 1984), ca. $340\,000 \text{ m}^3 \text{ a}^{-1}$ sedimentieren seit 1982 in den tideoffenen Seehäfen der Stadt Bremen (HABAU, 1988). Die dadurch notwendige Unterhaltungsbaggerei führt vor allem bei der landseitigen Deponierung des Baggerguts zu erheblichen ökologischen Problemen und hohen Kosten. Es werden deshalb von verschiedenen Institutionen Anstrengungen unternommen, diese Probleme zu minimieren (CHRISTIANSEN, 1987; HABAU, 1988).

Eine wichtige Voraussetzung für problemminimierende Maßnahmen ist ein besseres Verständnis der Ursachen und des Verlaufs der Sedimentation von Schwebstoffen in tidebeeinflussten Häfen. Der Schlickanfall in den Seehäfen von Hamburg und Bremen wird z. Zt. durch die Registrierung der Sohlaufhöhung in den Hafenbecken erfaßt (SEEFELDT, 1989). Mit dieser Methode sind grundlegende Einsichten in den Ablauf der Sedimentation erreicht worden (s. CHRISTIANSEN, 1987); Grenzen sind ihr aber z. B. bei der Beschreibung der saisonalen Dynamik des Schlickanfalls gesetzt, da bei zu kurzen Zeitintervallen die Auflandungen zu gering sind und damit in den Bereich des Meßfehlers kommen.

Wir wollen hier Ergebnisse des Versuchs darstellen, die Dynamik des Schlickanfalls in den tideoffenen Bremer Häfen direkt durch eine Bilanzierung der Schwebstoffverluste in der Unterweser (UW) zu erfassen.

2. Untersuchungsgebiet

Die Bremer Seehäfen liegen im innersten Bereich des Weser-Ästuars, ca. 10 km unterhalb des Tidewehrs Bremen-Hemelingen (Abb. 1). Eine hydrographische und sedimentologische Beschreibung des Weser-Ästuars liefern LÜNEBURG et al. (1975) und WELLERSHAUS (1981); s. auch BUSCH et al. (1989), MÜLLER et al. (1990).

Der mittlere Tidehub beträgt im Untersuchungsgebiet 3,9 m. Seine Amplitude ist negativ mit dem Oberwasser korreliert. Nach NASNER & MESSER (1988) bewirkt eine Zunahme des Oberwassers um $100 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ in diesem Bereich eine Abnahme des Tidehubs um ca. 0,3 m. Das langjährige mittlere Oberwasser (MQ) bei Intschede (Weser-km 329,7) beträgt $323 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ (MNQ = 119; MHQ = $1170 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$).

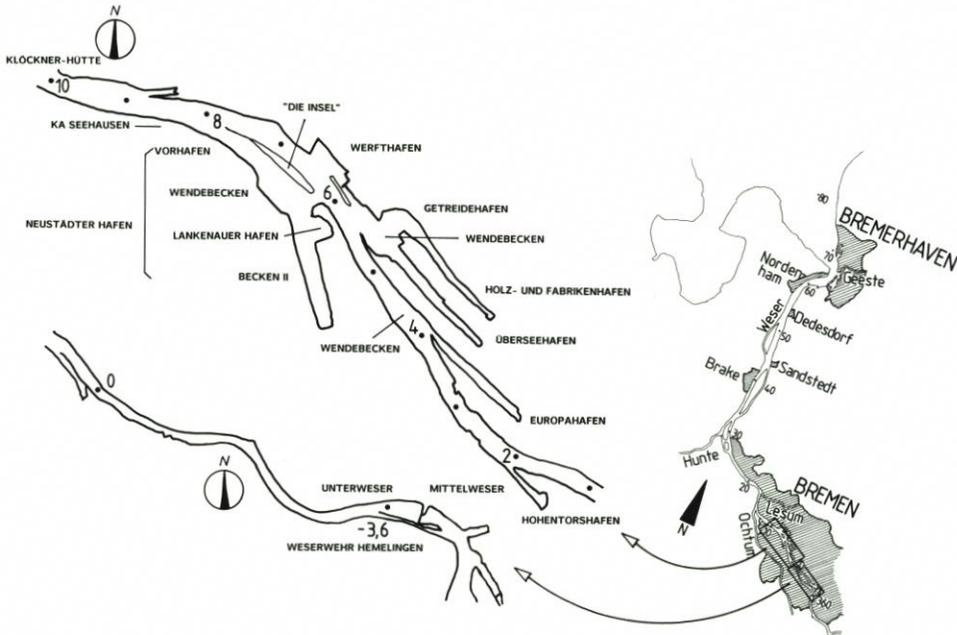


Abb. 1. Das Untersuchungsgebiet, die tideoffenen Bremer Seehäfen

Die tideoffenen Seehäfen haben bei MThw ein Wasservolumen von $22,1 \times 10^6 \text{ m}^3$. Das Volumen bei MTnw beträgt $15,0 \times 10^6 \text{ m}^3$ (gerechnet nach Angaben des Hafenaamtes Bremen), so daß sich pro Tide ein Wasseraustausch von $7,1 \times 10^6 \text{ m}^3$ ergibt. Diese Menge entspricht genau der bei einem mittleren Oberwasser von $323 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ in 6 h den Häfen von Oberstrom zugeführten Wassermenge ($7,1 \times 10^6 \text{ m}^3$). Die Häfen stellen also eine enorme Querschnittserweiterung dar, in der es sowohl durch den Tide- wie auch den Stromeffekt (CHRISTIANSEN et al., 1985; MÜLLER & SCHWARZE, 1988; HABAU, 1988; NASNER & MESSER, 1988) zu einer erheblichen Sedimentation von Schwebstoff kommt. Die langjährige mittlere Sedimentationsrate wird für die tideoffenen Häfen mit $0,23 \text{ m a}^{-1}$ angegeben (HABAU, 1988). Die mittlere Sedimentationsrate ist für die verschiedenen Hafengebiete sehr unterschiedlich (Min. = $0,03$; Max. = $0,63 \text{ m a}^{-1}$), aber auch innerhalb der einzelnen Hafengebiete variiert sie stark. So liegen z. B. im Wendebcken des Neustädter Hafens (s. Abb. 1) Bereiche mit Sedimentationsraten $\leq 0,2$ neben solchen mit Raten $\geq 2,0 \text{ m a}^{-1}$. Diese ungleichmäßige

Verteilung ist Ausdruck der in den verschiedenen Bereichen unterschiedlich starken Bedeutung der die Sedimentation beeinflussenden Faktoren wie Schwebstoffkonzentration, Oberwasser, flutstrominduzierte Wirbelbildung, Wirbelbildung im künstlichen Stromspaltungsgebiet Neustädter Hafen, Tidehub u. a., deren Einfluß weiter unten ausführlicher dargestellt wird.

3. Material und Methoden

Für die vorliegende Arbeit wurden wöchentliche Schwebstoffmessungen von 136 Fahrten des Meßschiffes „Weserluchs“ aus den Jahren 1984–87 ausgewertet, die im Rahmen des Meßprogramms Weser in Bremen (MEWEB) des WWA Bremen gewonnen wurden. Die Fahrten werden von UW-km 28 bis –3,6 (Weserwehr) gegen den voll entwickelten Ebbstrom durchgeführt. Die Proben werden aus der kontinuierlich arbeitenden Meßstrecke im Schiffslabor gezogen, die das Weserwasser in 1,3 m Tiefe entnimmt. Die Bestimmung der Schwebstoffkonzentration erfolgt im Abstand von 2 km gravimetrisch nach einer Unterdruckfiltration über Schleicher & Schüll-Nr. 6-GF-Filter (s. DEV). Die Entnahme von Parallelproben zeigte eine Standardabweichung von $\leq 5\%$ ($N = 10$).

Für die Beschreibung der Sedimentationsdynamik wurde für jeden Längsschnitt das arithmetische Mittel der Schwebstoffkonzentration von UW-km –3,6, 0 und 2 als Wert oberhalb der Häfen (*Eintrag*) und von UW-km 6, 8 und 10 als Wert unterhalb der Häfen (*Austrag*) gebildet. Die Differenz zwischen beiden beschreibt die Sedimentationsverluste (*Sverl*). Es wurden keine Einzelwerte in Beziehung gesetzt, um den Einfluß kleinräumiger Inhomogenitäten in der Schwebstoffverteilung zu minimieren. Als weitere Variable werden Abflußdaten von Intschede (ca. 30 km oberhalb des Weserwehres; Listen mit Tagesdaten des WSA Verden) und aus der gleichen Quelle die Wassertemperaturen bei Intschede verwendet.

Da die Meßfahrten gegen den voll entwickelten Ebbstrom durchgeführt werden, wenn die Wassersäule vertikal voll durchmischt ist (KÜHLE & MÜLLER 1989; SCHUCHARDT, unveröff.), können die ermittelten Schwebstoffkonzentrationen in erster Näherung als repräsentativ für die Wassersäule gelten.

Zusätzlich wurden am 23. 3. 1989 innerhalb eines vollen Tidezyklus 9 Meßfahrten mit der „Weserluchs“ zwischen UW-km 1 und 12 durchgeführt, bei denen im Abstand von einem km die Schwebstoffkonzentration gravimetrisch bestimmt wurde.

4. Ergebnisse

Abb. 2 zeigt eine Auswahl der Gradienten der Schwebstoffkonzentration verschiedener Meßfahrten zwischen UW-km 28 und –3,6. Sie zeigen eine erhebliche Variabilität sowohl der Konzentrationen, die von Oberstrom eingetragen werden, als auch der Verläufe. Deutlich wird, daß auf einer Reihe von Meßfahrten ein Abfall der Schwebstoffkonzentration im Bereich von UW-km 6 zu beobachten ist. Dies ist der Bereich der starken Querschnittserweiterung durch die bremischen Häfen (Abb. 1).

Durch mehrere Beobachtungen wird plausibel, daß dieser Gradient der Schwebstoffkonzentration Folge der Sedimentation in den Häfen ist:

- Während aller Meßfahrten, die einen Gradienten der Schwebstoffkonzentration zeigen, ist die Position dieses Abfalls identisch; immer liegt er im Bereich der Querschnittserweiterung.
- Die Meßfahrten der „Weserluchs“ werden immer zur gleichen Tidephase durchgeführt: das

SCHWEBSTOFF [mg/l]

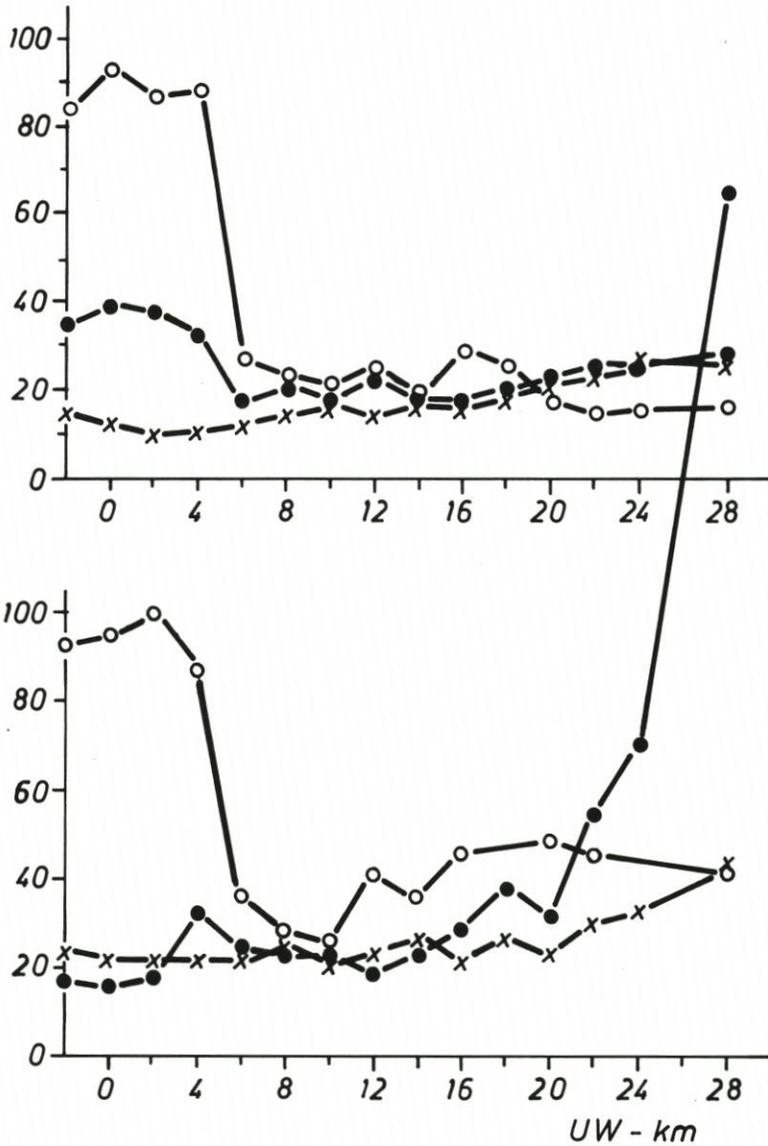


Abb. 2. Ausgewählte Gradienten der Schwebstoffkonzentration zwischen dem Bremer Weser-Wehr (UW-km -3,6) und Bremen-Farge (UW-km 28) im Jahre 1986.
 oben: heller Kreis 15.1.1986 unten: 11.6.1986
 Kreuz 27.2.1986 9.7.1986
 dunkler Kreis 5.5.1986 8.10.1986

Schiff fährt stromauf gegen den voll entwickelten Ebbstrom. Wir überprüften das Verhalten dieses Gradienten zu verschiedenen Tidesituationen durch 9 hintereinander während eines vollen Tydezyklus durchgeführte Fahrten zwischen UW-km 1 und 12. Abb.3 zeigt, daß

der Gradient am deutlichsten während des ablaufenden Wassers ausgeprägt ist. In dieser Phase ist das Weserwasser eine Mischung aus ablaufendem Oberwasser und den Austauschwassermengen aus den Häfen, deren Schwebstoffkonzentration durch die vorangegangenen Sedimentationsvorgänge vermindert ist. Der aus den Häfen stammende Anteil variiert je nach Ebbephase, Oberwasser und Tidehub. Während der Flutphase wird die Position der Abnahme der Schwebstoffkonzentration nur wenig nach stromauf verlagert, scheint also an den Ort der enormen Querschnittserweiterung gebunden. Der Gradient ist jedoch weniger ausgeprägt.

- Die Verminderung der Schwebstoffkonzentration im Bereich der Häfen ist mit einer Erhöhung des Anteils organischen Materials verbunden. Es werden also nicht alle Schwebstofffraktionen gleichmäßig reduziert, sondern der anorganische Anteil sedimentiert stärker. Dieser Zusammenhang wird auch durch den geringeren Anteil organischen Materials im Schlick (ca. 10 % Glühverlust; HABAU, 1987) im Vergleich mit den mittleren Werten im Schwebstoff (ca. 32 %; SCHUCHARDT, unveröff.) deutlich.
- Die Abschätzung der Schwebstoffverluste als Frachten aus den wöchentlichen Beobachtungen (Produktbildung aus den wöchentlichen Werten von Schwebstoffverlust bzw. -eintrag und den aus den Tageswerten ermittelten Wochenwerten des Oberwassers bei Intschede) ergibt für 1984-87 einen mittleren Schwebstoffverlust von $152\,000\text{ t a}^{-1}$ TG im Bereich der tideoffenen bremischen Häfen. Bei einem errechneten *Eintrag* von Oberstrom von $380\,000\text{ t a}^{-1}$ TG entspricht dies im mehrjährigen Mittel (1984-87) einem Frachtverlust von 40 %. Die Frachtverluste sind vor allem als Folge der verschiedenen Jahresmittel des Oberwassers in den einzelnen Jahren sehr unterschiedlich (Tab. 1). Für die Jahre 1981-86 ermittelte das Hafengebäudeamt Bremen durch Sohlpeilungen eine mittlere Sedimentation von $420\,000\text{ m}^3\text{ a}^{-1}$ in den stadtbremischen Häfen (HABAU, 1988). Bei Verwendung der bei CHRISTIANSEN (1987) angegebenen Umrechnungsfaktoren (ohne Abzug des Sandanteils) ergibt sich eine mittlere Sedimentationsmenge von $159\,000\text{ t a}^{-1}$ TG. Diese Menge liegt erstaunlich nahe an der über die Schwebstoffverluste, also mit einer völlig anderen Methode, errechneten Sedimentationsmenge.
- Ein möglicher „Stauereffekt“ von Schwebstoff und damit eine Erhöhung der Schwebstoffkonzentration unterhalb eines Tidewehrs, wie er in einigen Ästuaren beobachtet wird (LANG, pers. Mitt.), ist hier als Ursache des beobachteten Gradienten nicht wahrscheinlich, da oberhalb des Wehrs ähnliche Schwebstoffkonzentrationen gemessen werden (SCHUCHARDT, unveröff.).

Durch diese Beobachtungen wird plausibel, daß die Abnahme der Schwebstoffkonzentration Folge der Sedimentation in den Häfen ist.

Tabelle 1. Jahresmittel der aus der Differenz der Schwebstoffkonzentrationen ober- und unterhalb der bremischen Häfen errechneten Frachtverluste und die Jahresmittel des Oberwassers

Jahr	$\text{m}^3\text{ s}^{-1}$ Q	Schwebstoffverlust $\text{t} \times 10^3\text{ a}^{-1}$ TG
1984	363	170,3
1985	273	85,9
1986	335	139,7
1987	489	214,7

Lineare Regression:

$$\text{Schwebstoffverlust} (\text{t} \times 10^3\text{ a}^{-1}\text{ TG}) = 0,573\text{ Q} (\text{m}^3\text{ s}^{-1}) - 56,64 \quad (r = 0,96)$$

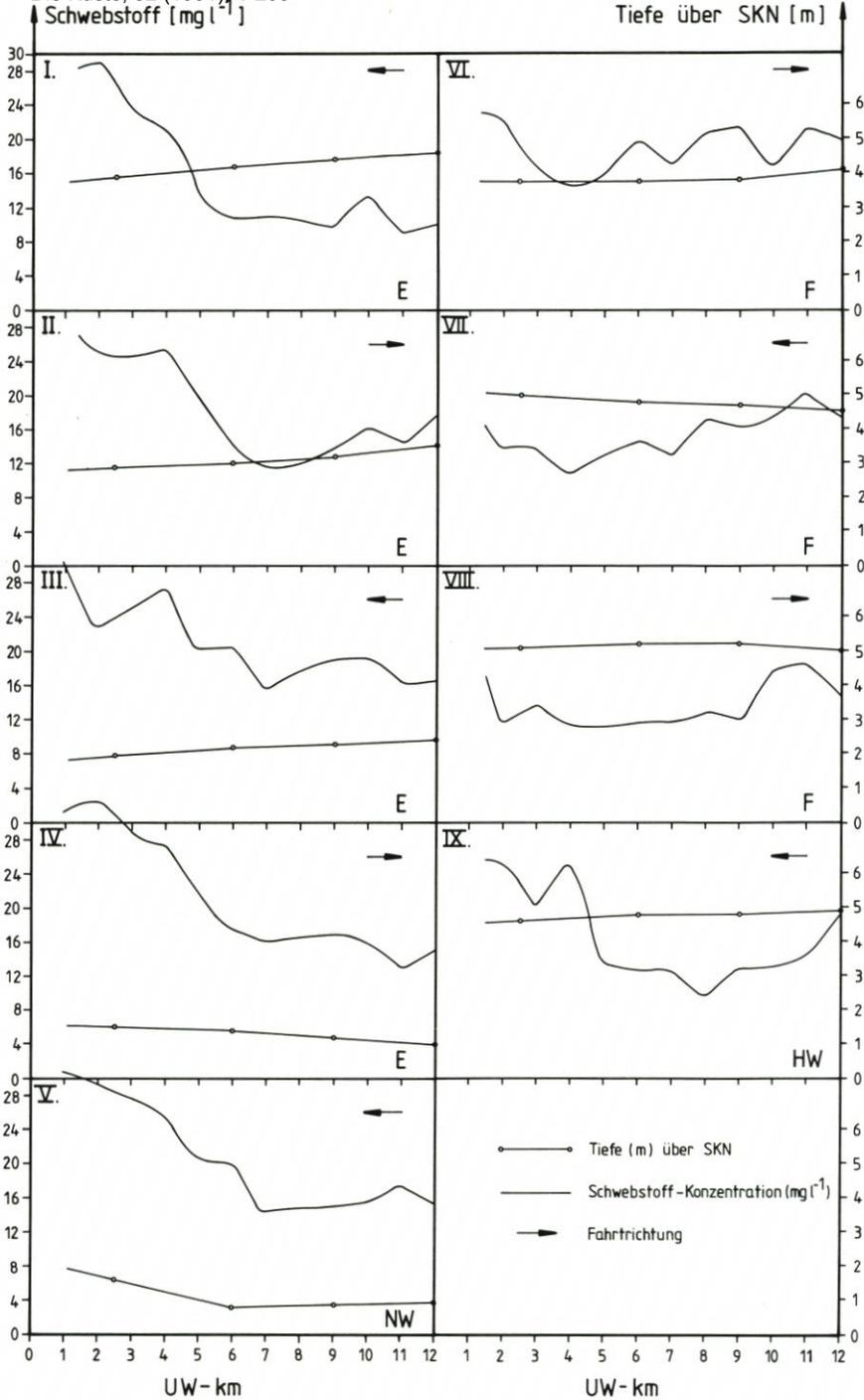
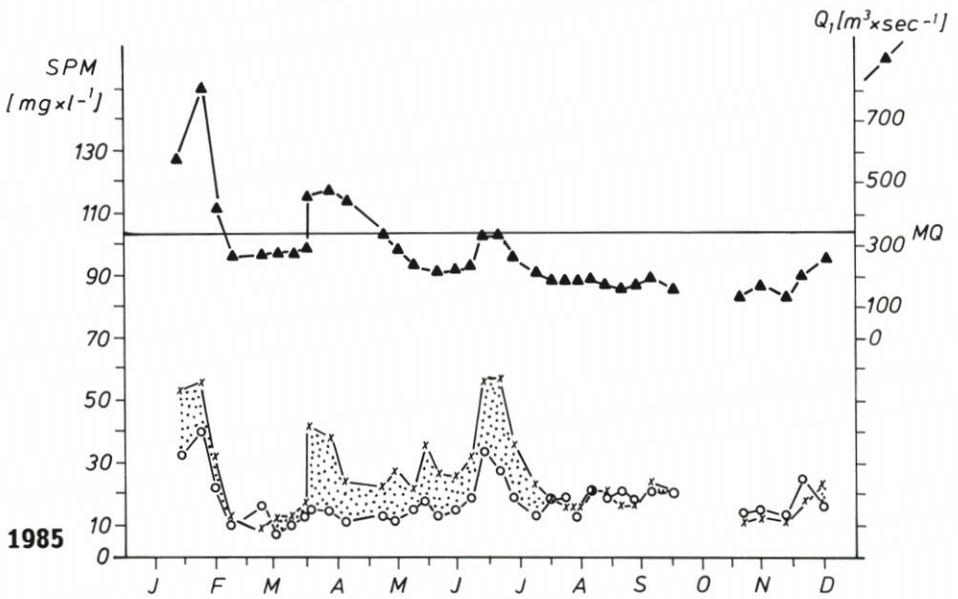
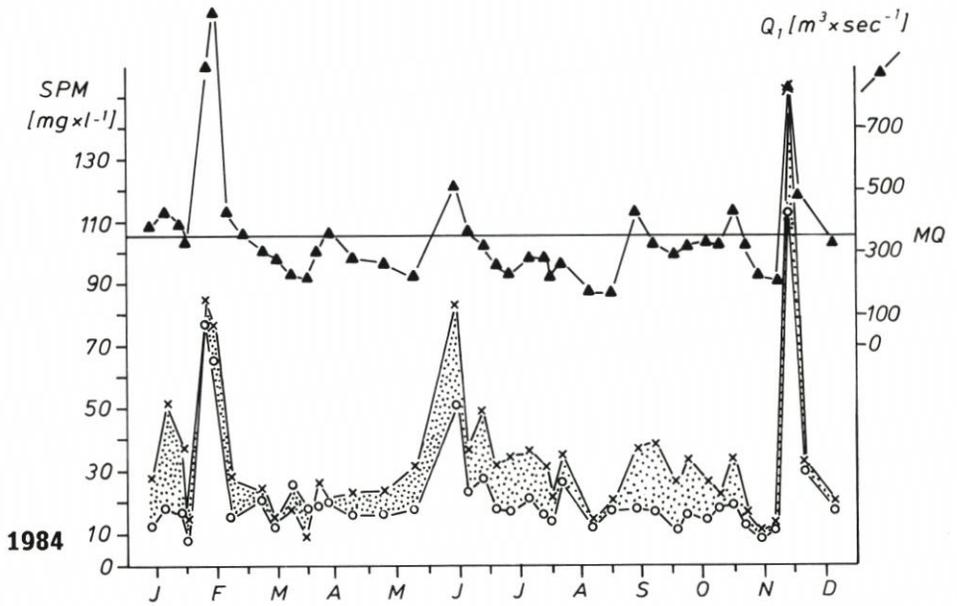


Abb. 3. Veränderung der Gradienten der Schwebstoffkonzentration zwischen UW-km 1 und 12 während eines Tidezyklus (23. 3. 1989). E = Ebbe, F = Flut, NW = Niedrigwasser, HW = Hochwasser

Abb. 4 zeigt den kompletten 4-Jahres-Datensatz der mittleren Schwebstoffkonzentration oberhalb und unterhalb der Häfen sowie des Oberwassers bei Intschede. Der gepunktete



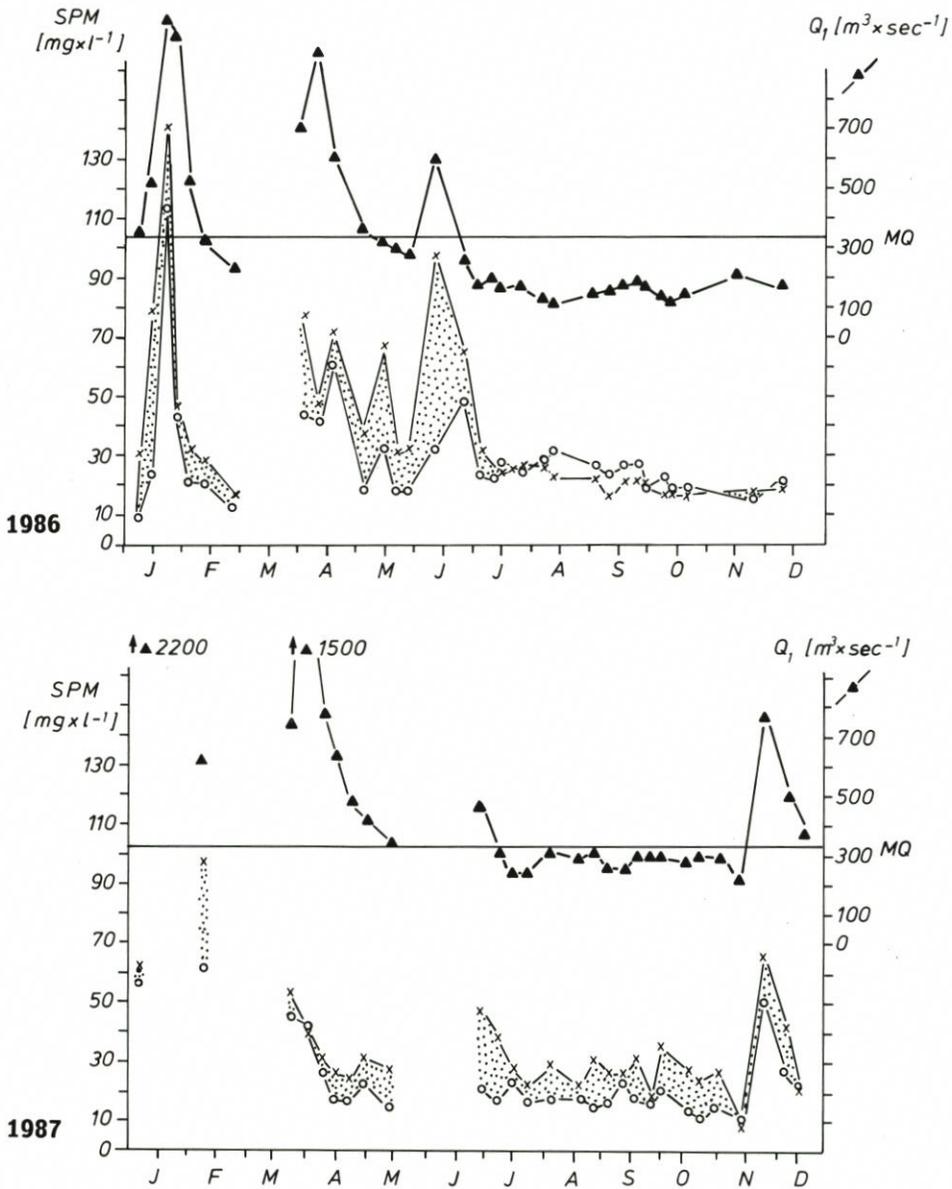


Abb. 4. Saisonale Dynamik (1984–87) der mittleren Schwebstoffkonzentrationen oberhalb (Kreuze) und unterhalb (offene Kreise) der tideoffenen Bremer Seehäfen. Der gepunktete Bereich bezeichnet die Sedimentationsverluste. Q_1 ist der Oberwasserabfluß bei Intschede am Tag vor der Meßfahrt, MQ das langjährige Mittel

Bereich markiert die Differenz zwischen den Schwebstoffkonzentrationen ober- und unterhalb der Häfen, d.h. die durch die Sedimentation in den bremischen Häfen verursachten Schwebstoffverluste.

Alle Parameter zeigen eine erhebliche Variabilität sowohl von Woche zu Woche wie auch saisonal geprägt, aber auch die Unterschiede zwischen den Jahren sind erheblich. Deutlich wird der enge Zusammenhang der Parameter Q_1 (Oberwasser bei Intschede am Tag vor der Meßfahrt), Schwebstoffkonzentration oberhalb der Häfen, Schwebstoffkonzentration unterhalb der Häfen und damit auch der Sedimentationsverluste. Ein positiver Zusammenhang zwischen Oberwasser und Schwebstoffkonzentration ist für viele Flüsse belegt (s. HINRICH, 1975); er wird auch aus dieser Abbildung deutlich. Der Sedimentationsverlust, die hier speziell interessierende Größe, scheint in bestimmten Grenzen von der Schwebstoffkonzentration oberhalb der Häfen und dem Oberwasser bestimmt zu werden.

Diese Zusammenhänge sollen im folgenden durch eine statistische Analyse im einzelnen untersucht werden, für die folgender Zusammenhang postuliert wird:

Die Sedimentation in den tideoffenen Bremer Seehäfen ist Resultat verschiedener Effekte, wie Stromeffekt (flutstrominduzierte Wirbelbildung im Hafeneingangsbereich), Tideeffekt (tiderhythmische Beladung mit schwebstoffreicherem Wasser) und Wirbelbildung im künstlichen Stromspaltungsgebiet Neustädter Hafen sowohl bei Ebbe wie bei Flut (CHRISTIANSEN et al., 1985; MÜLLER & SCHWARZE, 1988; HABAU, 1988; NASNER & MESSER, 1988). Diese Effekte werden durch verschiedene Faktoren, wie z. B. das Oberwasser, z. T. entgegengesetzt beeinflusst.

Mit der Differenzbildung zwischen Schwebstoffkonzentration ober- und unterhalb der Häfen wird quasi als „Summenparameter“ die Gesamtsedimentation in den Häfen als abhängige Variable erfaßt.

Hier soll vor allem der Einfluß der zwei Parameter Oberwasser und Schwebstoffkonzentration oberhalb der Häfen auf die Sedimentation untersucht werden.

Dabei soll zum einen der sich aus Abbildung 4 deutlich ergebende Zusammenhang Oberwasser-Schwebstoffkonzentration oberhalb der Häfensedimentation analysiert werden, zum anderen eine eventuell direkte, über eine Veränderung der hydrodynamischen Situation im Untersuchungsgebiet verursachte Wirkung Oberwasser-Sedimentation.

In die statistische Analyse gehen als Variable ein: das Oberwasser bei Intschede mit verschiedenen arithmetischen Mitteln der Zeit vor der Probenahme (Q_0 als Oberwasser am Tag der Probenahme bis Q_5 als mittleres Oberwasser der letzten 5 Tage vor der Probenahme; der Eintrag (Schwebstoffkonzentration oberhalb der Häfen); der *Austrag* (Schwebstoffkonzentration unterhalb der Häfen); die Differenz zwischen *Eintrag* und *Austrag* als Sedimentationsverlust (*Svert*); die mittlere Wassertemperatur bei Intschede während der letzten 5 Tage vor der Meßfahrt ($TEMP_5$) sowie verschiedene Oberwassersituationen. Bei diesen wird unterschieden, ob in den letzten 5 Tagen vor der Meßfahrt ein sehr starker Anstieg (HW1) oder Abfall (HW2) der Oberwassermenge (Differenz zwischen dem fünften und dem letzten Tag vor der Meßfahrt $\geq 30\%$) stattgefunden hat, während die Situationen mit einer geringeren Differenz (konstantes Oberwasser) als HW3 in die Analyse eingehen.

Für die statistische Analyse wurden der Pearson-Korrelationskoeffizient zum Auffinden linearer Zusammenhänge, der Korrelationskoeffizient nach Spearman zum Auffinden auch von nichtlinearen monotonen Zusammenhängen (Signifikanzangaben $p \geq 5\%$ n.s.; $p \leq 5\%*$; $p \leq 1\%**$; $p \leq 0,1\%***$) sowie einfache und multiple lineare und nichtlineare Regressionen verwendet (s. SAS, 1987; SACHS, 1974). Dabei gibt das r^2 der Regressionsgleichungen nach einer Multiplikation mit 100 jeweils an, wieviel Prozent der Variabilität der abhängigen Größe durch die Regressionsgleichung erklärt werden.

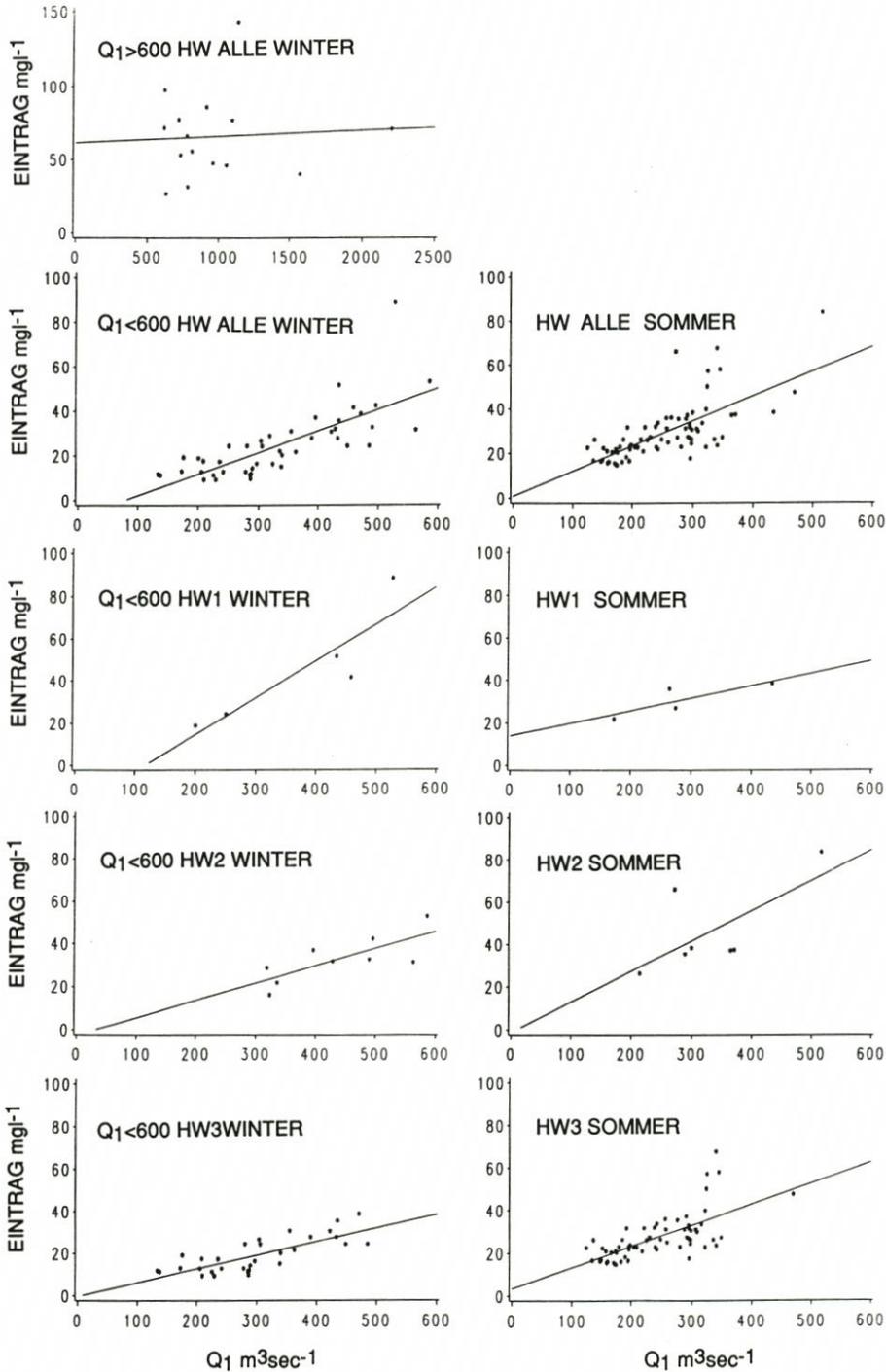


Abb. 5. Darstellung des Zusammenhangs zwischen dem Oberwasser bei Intschede am Tag vor der Meßfahrt (Q_1) und der Schwebstoffkonzentration oberstrom der Häfen (Eintrag für verschiedene Oberwassersituationen, getrennt für das hydrologische Winter- und Sommerhalbjahr (zur Erläuterung s. Text)

4.1 Zusammenhang Oberwasser – Schwebstoffkonzentration oberhalb der Häfen (Q und Eintrag)

Die Schwebstoffkonzentration oberhalb der Häfen (*Eintrag*) variiert im Untersuchungszeitraum zwischen 9,1 und 173,3 mg l⁻¹; das Mittel aller 136 Meßfahrten beträgt 33,2 ± 23,9 mg l⁻¹. Der *Eintrag* wird vor allem vom Oberwasser bestimmt (zu dieser und den weiteren Aussagen s. Abb. 5 und Tab. 2). Von verschiedenen geprüften Oberwassermitteln (Q₀–Q₅) zeigt Q₁, also der Abfluß bei Intschede am Tag vor der Meßfahrt, den engsten Zusammenhang (Spearman r = 0,71, N = 136). Nach KRAUSE (1981) beträgt die Laufzeit des Oberwassers von Intschede bis zum Tidewehr Hemelingen ca. 2 Tage, nach Klee (WWA

Tabelle 2. Korrelationskoeffizienten und Regressionsgleichungen zum Zusammenhang von Oberwasser (Q₁) und Schwebstoffeintrag von Oberstrom (EINTRAG)

Q	N	Halbjahr	HW	Pears.	Spearman		r ²
≥ 600	14	Winter	alle	-0,01 n.s.	-0,18 n.s.		
≥ 600	4	Winter	steigend	-0,47 n.s.	-0,40 n.s.		
	6		fallend	0,02 n.s.	0,20 n.s.		
	4		konstant	-0,20 n.s.	0,20 n.s.		
≤ 600	45	Winter	alle	0,75 ***	0,82 ***	EINTRAG = 0,09Q ₁ - 7,5	0,56
≤ 600	5	Winter	steigend	0,88 *	0,90 *	EINTRAG = 0,17Q ₁ - 20,2	0,78
	9		fallend	0,75 *	0,73 *	= 0,08Q ₁ - 2,5	0,57
	31		konstant	0,76 ***	0,74 ***	= 0,06Q ₁ - 0,4	0,59
≤ 600	74	Sommer	alle	0,70 ***	0,73 ***	EINTRAG = 0,11Q ₁ + 6,5	0,49
≤ 600	5	Sommer	steigend	0,91 *	0,90 *	EINTRAG = 0,16Q ₁ - 13,1	0,83
	7		fallend	0,67 n.s.	0,53 n.s.		
	63		konstant	0,66 ***	0,70 ***	= 0,09Q ₁ + 3,4	0,43

Bremen, pers. Mitt.) ca. einen Tag. Offensichtlich beschreibt der ± aktuelle Abfluß die Schwebstoffkonzentration oberhalb der Häfen am besten.

Der *Eintrag* zeigt im Bereich von Q₁ ca. 600 ein Maximum. Eine Unterteilung des Datensatzes in Q₁ ≤ 600 (nur hydrologisches Winterhalbjahr, da nur dann Abflüsse ≥ 600 aufgetreten sind) zeigt für Q₁ ≤ 600 einen engen Zusammenhang zwischen *Eintrag* und Q₁ (Spearman r = 0,82, N = 45). Für Q₁ ≥ 600 ist die Streuung der Meßwerte sehr hoch; sie sind nicht signifikant korreliert. Auch eine Unterteilung des Datensatzes Q₁ ≥ 600 in die drei verschiedenen Oberwassersituationen (HW1–3) ergibt keinen engeren Zusammenhang.

Eine Unterteilung des Datensatzes in die beiden hydrologischen Halbjahre Sommer

(Mai–Oktober) und Winter (November–April) zeigt, daß $Q_1 \geq 600$ im Untersuchungszeitraum nur im Winter aufgetreten ist.

Abb. 5 zeigt einen Vergleich der Situation in den beiden hydrologischen Halbjahren. Für diesen Vergleich werden nur die Winterwerte für $Q_1 \leq 600$ verwendet, um eine direkte Vergleichbarkeit mit der Sommersituation herzustellen. Die Steigung der Regressionsgeraden ist fast identisch, der *Eintrag* pro m^3 Oberwasser ist im Sommer jedoch signifikant höher.

Eine höhere Schwebstoffkonzentration pro m^3 Oberwasser läßt sich auch anhand der langfristigen Monatsmittel von Schwebstoffkonzentration und Oberwasser an der Meßstation Intschede zeigen (Abb. 6).

Bei Betrachtung der unterschiedlichen Oberwassersituationen zeigt sich, daß dieser Zusammenhang nur für HW2 und HW3 gilt; bei HW1, also dem steigenden Scheitel einer Hochwasserwelle, wird im Winterhalbjahr pro m^3 Oberwasser mehr Schwebstoff eingetragen.

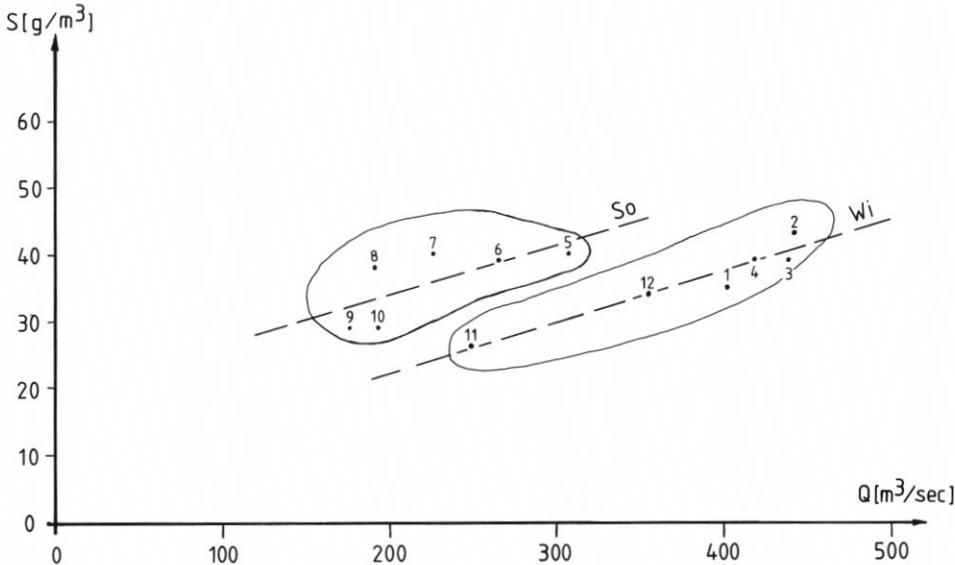


Abb. 6. Darstellung des Zusammenhangs zwischen der Schwebstoffkonzentration bei Intschede und dem Oberwasser bei Intschede (langjährige Monatsmittel), getrennt für das hydrologische Winterhalbjahr und das Sommerhalbjahr (Daten aus Gewässerkundliches Jahrbuch, 1987)

Die Regressionsgleichung für die Schwebstoffkonzentration im Sommer (S_s) und im Winter (S_w):

$$S_s = 6,74 + 0,07 Q \quad (r = 0,71; N = 6)$$

$$S_w = 19,12 + 0,07 Q \quad (r = 0,96; N = 6)$$

4.2 Zusammenhang Schwebstoffkonzentration oberhalb der Häfen – Sedimentationsverlust (*Eintrag* – *Sverl*)

Sverl variiert im Untersuchungszeitraum zwischen maximal $68,8 \text{ mg l}^{-1}$ und minimal $-9,7 \text{ mg l}^{-1}$, d. h., der *Austrag* kann größer als der *Eintrag* werden. Der mittlere *Sverl* liegt bei $9,9 \text{ mg l}^{-1}$ ($\pm 13,4$, $N = 136$). Das arithmetische Mittel des *Eintrags* liegt bei $33,2 \pm 23,9 \text{ mg l}^{-1}$, so daß sich die Konzentration der Schwebstoffe im Mittel (1984–87, $N = 136$) um 29,8 % verringert. Die Dynamik der Sedimentationsverluste (*Sverl*) wird von der Schwebstoffkonzentration oberhalb der Häfen (*Eintrag*) stark geprägt (Spearman $r = 0,80$, $N = 136$)

(zu dieser und den folgenden Aussagen s. Abb. 7 und Tab. 3), die, wie oben gezeigt wurde, vor allem Folge der Dynamik des Oberwassers ist. Eine Unterteilung in die beiden hydrologischen Halbjahre ergibt eine Verbesserung des Zusammenhangs für das Sommerhalbjahr. Die Steigung der Regressionsgeraden für das Winterhalbjahr ist flacher als die des Sommerhalbjahres. Dieser Unterschied zwischen den hydrologischen Halbjahren ist Folge der Beobachtungen mit $Q_1 \geq 600$. Bei Ausschluß dieser Werte und der Beobachtungen bei HW1/2 (Hochwasserwellen) ergibt sich für den Sommer die gleiche Steigung wie für den Winter. Unter diesen „normalisierten“ Bedingungen sedimentiert also im Sommer der gleiche Anteil des *Eintrags* in den Häfen wie im Winter.

Der Grenzwert für negative *Sverl*-Werte liegt für die beiden „normalisierten“ Geraden für den *Eintrag* bei einer Schwebstoffkonzentration von ca. 28 mg l⁻¹ im Sommer und ca. 23 mg l⁻¹ im Winter (Regressionsgerade für HW3, $Q_1 \leq 600$). Bei Unterschreitung dieser Schwebstoffkonzentration oberhalb der Häfen wird der *Austrag* aus den Häfen also höher als der *Eintrag*.

Für Abflüsse ≤ 600 zeigt sich ein interessanter Einfluß der Variablen HW: während die Regressionsgeraden für HW1 und HW3 nicht unterschiedlich sind, ist *Sverl* pro mg *Eintrag* bei HW2 deutlich geringer. Auf dem fallenden Scheitel der Hochwasserwelle sedimentiert also ein geringerer Anteil des *Eintrags* in den Häfen.

Tabelle 3. Korrelationskoeffizienten und Regressionsgleichungen zum Zusammenhang von Schwebstoffeintrag von Oberstrom (EINTRAG, hier IN) und Sedimentationsverlust (SVERL)

Q	N	Halbjahr	HW	Pears.	Spearman.		r ²
Alle	136	beide	alle	0,76 ***	0,80 ***	SVERL = 0,42IN - 4,3	0,58
	61	Winter		0,75 ***	0,79 ***	= 0,36IN - 4,4	0,57
	75	Sommer		0,86 ***	0,81 ***	= 0,68IN - 10,9	0,75
≥ 600	14	Winter	alle	0,65 *	0,67 *	SVERL = 0,52IN - 17,7	0,42
≥ 600	4	Winter	steigend	0,76 n.s.	0,20 n.s.		
	6		fallend	0,62 n.s.	0,77 n.s.		
	4		konstant	0,78 n.s.	0,40 n.s.		
≤ 600	5	Winter	steigend	0,98 **	0,99 **	SVERL = 0,95IN - 17,6	0,97
	9		fallend	0,82 **	0,76 *	= 0,56IN - 8,5	0,68
	31		konstant	0,84 ***	0,81 ***	= 0,82IN - 11,4	0,71
≤ 600	5	Sommer	steigend	0,98 **	0,90 *	SVERL = 0,89IN - 18,2	0,96
	7		fallend	0,78 *	0,85 ***	= 0,24IN + 6,8	0,61
	63		konstant	0,84 ***	0,84 ***	= 0,74IN - 12,5	0,70

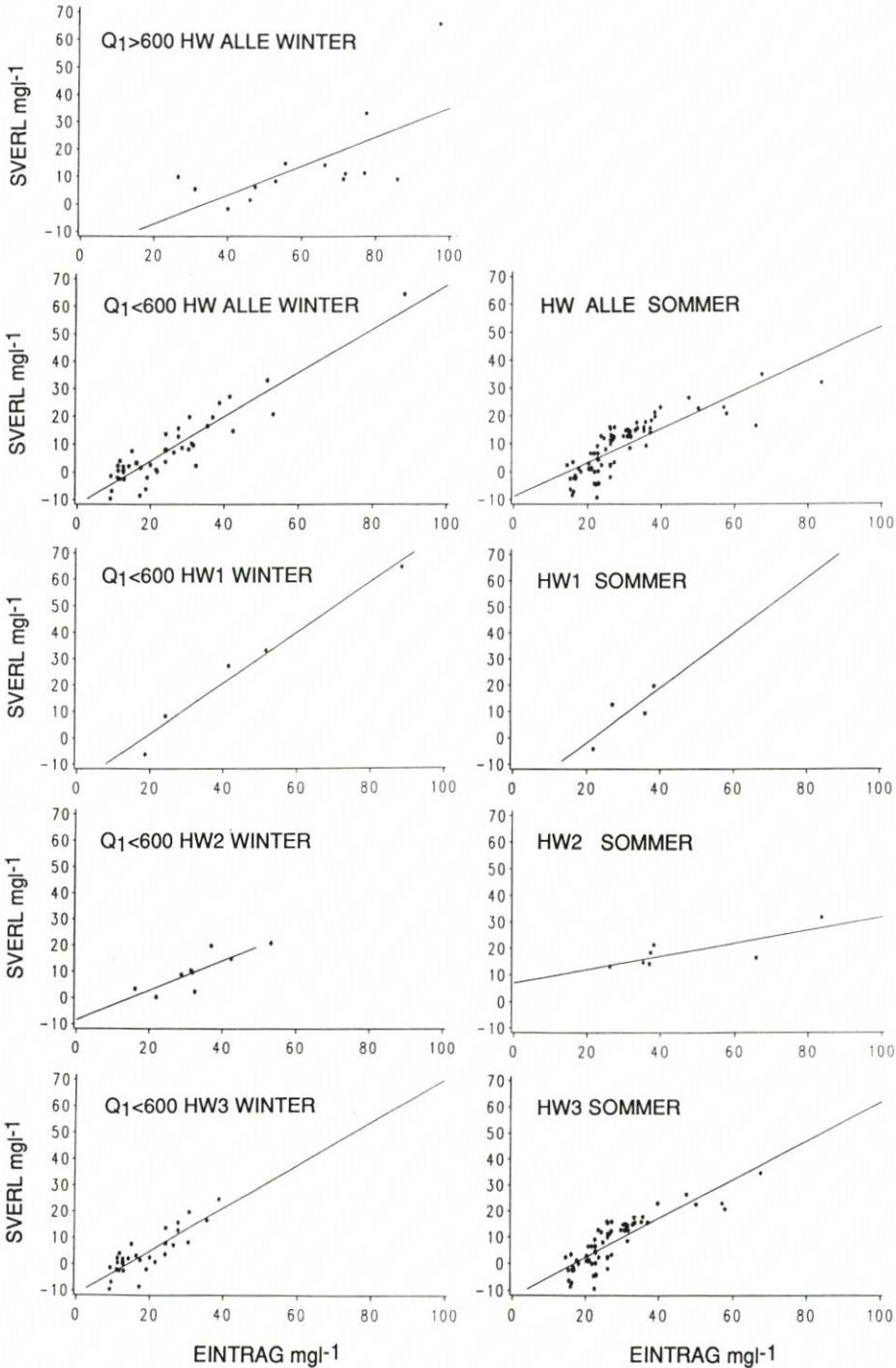


Abb. 7. Darstellung des Zusammenhangs zwischen der Schwebstoffkonzentration oberstrom der Häfen (Eintrag) und dem Sedimentationsverlust (Sverl) für verschiedene Oberwassersituationen, getrennt für das hydrologische Winter- und Sommerhalbjahr (zur Erläuterung s. Text)

Eine separate Betrachtung des Zusammenhangs zwischen *Sverl* und *Eintrag* für $Q_1 \geq 600$ (dies sind nur Winterwerte) zeigt eine erhebliche Streuung der Werte und eine geringere Sedimentationsrate pro mg *Eintrag* als bei $Q_1 \leq 600$.

4.3 Zusammenhang Oberwasser – Sedimentationsverlust ($Q - Sverl$)

Aus Abb. 4 und 8 sowie Tab. 4 wird der Einfluß des Oberwassers auf *Sverl* deutlich. Dieser wirkt zum einen, wie oben gezeigt, mittelbar über die Schwebstoffkonzentration oberhalb der Häfen auf die Sedimentation. Zusätzlich soll hier aber auch der Zusammenhang von Q und *Sverl* geprüft werden, da wir einen zusätzlichen direkten Einfluß über die Veränderung der hydrodynamischen Situation im Untersuchungsgebiet postuliert haben (s. o.), der sich verändernd auf den oben beschriebenen Zusammenhang $Q - Eintrag - Sverl$ auswirken müßte.

Den engsten Zusammenhang zwischen *Sverl* und den verschiedenen geprüften Mittelwerten des Oberwassers ($Q_0 - Q_5$) zeigt Q_1 , das Oberwasser am Tag vor der Meßfahrt (Pearson $r = 0,30$; Spearman $r = 0,63$, $N = 136$). Der höhere Spearman-Korrelationskoeffizient deutet einen nichtlinearen Zusammenhang zwischen den beiden Variablen an. Abb. 8 zeigt im Bereich von $600 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ ein Maximum für *Sverl*; sowohl bei größerem wie bei kleinerem

Tabelle 4. Korrelationskoeffizienten und Regressionsgleichungen zum Zusammenhang von Oberwasser (Q_1) und Sedimentationsverlust (SVERL)

Q	N	Halbjahr	HW	Pears.	Spearman.		r^2
≥ 600	14	Winter	alle	-0,35 n.s.	-0,52 n.s.		
≥ 600	4	Winter	steigend	-0,50 n.s.	-0,80 n.s.		
	6		fallend	-0,36 n.s.	0,02 n.s.		
	4		konstant	-0,60 n.s.	-0,80 n.s.		
≤ 600	45	Winter	alle	0,68 ***	0,81 ***	SVERL = $0,07Q_1 - 17,5$	0,46
≤ 600	5	Winter	steigend	0,93 *	0,90 *	SVERL = $0,17Q_1 - 20,1$	0,87
	9		fallend	0,50 n.s.	0,76 n.s.		
	31		konstant	0,76 ***	0,82 ***	= $0,06Q_1 - 14,5$	0,58
≤ 600	74	Sommer	alle	0,83 ***	0,81 ***	SVERL = $0,10Q_1 - 16,6$	0,69
≤ 600	5	Sommer	steigend	0,95 *	0,99 **	SVERL = $0,15Q_1 - 33,1$	0,91
	7		fallend	0,82 *	0,67 n.s.	= $0,05Q_1 - 0,1$	0,68
	63		konstant	0,82 ***	0,81 ***	= $0,10Q_1 - 18,6$	0,70

Oberwasser ist *Sverl* geringer. Eine Unterteilung des Datensatzes in die Gruppen $Q_1 \geq 600$ und ≤ 600 ergibt für die erste Gruppe einen negativen, für die zweite Gruppe einen positiven Zusammenhang. Dies gilt für alle HW-Situationen (Tab. 4, Abb. 8a). Bis zu einem Q_1 von 600 wächst *Sverl* linear mit dem Oberwasser, oberhalb dieser Grenze wird *Sverl* wieder kleiner, die Sedimentation nimmt ab (dieser Zusammenhang ist allerdings nicht signifikant [Tab. 4]).

Unterschiede im Zusammenhang zwischen *Sverl* und Q zwischen Sommer und Winter zeigt Abb. 8b. Dabei wurden für die Wintersituation nur die Werte $Q_1 \leq 600$ verwendet, um eine direkte Vergleichbarkeit mit der Sommersituation herzustellen. Die Regressionsgerade liegt für den Sommer signifikant über der des Winters; es sedimentiert im Sommer also mehr Schwebstoff pro m^3 als im Winter.

Wenn der Zusammenhang zwischen *Sverl* und Q_1 für verschiedene Oberwassersituationen getrennt untersucht wird (HW1: in den letzten 5 Tagen vor der Meßfahrt ein sehr starker Anstieg der Oberwassermenge; HW2: ein sehr starker Abfall; HW3: \pm konstantes Oberwasser), ergeben sich folgende Zusammenhänge (Abb. 8b): Für HW2, den fallenden Scheitel einer Hochwasserwelle, und besonders deutlich für HW3 (konstantes Oberwasser), ist *Sverl* im Sommer höher als im Winter; es besteht also der gleiche Zusammenhang wie bei der Betrachtung des gesamten Datensatzes (HW1-3). Für HW1, den steigenden Scheitel einer Hochwasserwelle, ergibt sich eine deutlich stärkere Steigung der Regressionsgeraden im Winter im Vergleich mit dem Sommer; in dieser speziellen Situation sedimentiert im Winter also mehr pro m^3 als im Sommer.

Sverl wird im Sommer bei etwa $175 m^3 s^{-1}$, im Winter bei etwa $230 m^3 s^{-1}$ negativ, d. h., der *Austrag* wird dann größer als der *Eintrag*.

4.4 Zusammenhang Wassertemperatur – Schwebstoffkonzentration oberhalb der Häfen (TEMP5 – *Eintrag*)

Der beschriebene Einfluß der Jahreszeit auf die Schwebstoffkonzentration oberhalb der Häfen (s. o.) zeigt sich nicht in einer direkten Korrelation zwischen *Eintrag* und Wassertemperatur. Erst wenn die Schwebstoffkonzentration durch die Division durch Q_1 standardisiert wird (sog. Schwebstoffabfluß-Quotient, s. HINRICH, 1975), ergibt sich ein Spearman-r von 0,63 (N = 136). Verdeutlichen läßt sich der Zusammenhang durch Elimination der durch Hochwasserwellen beeinflussten Beobachtungen (Spearman-r = 0,70, Pearson r = 0,68; N = 98).

Ob diese Korrelation allerdings tatsächlich Ausdruck einer Kausalbeziehung ist oder nur durch den korrelierten Jahresgang von Oberwasser und Temperatur verursacht wird, kann hier nicht entschieden werden.

5. Diskussion

5.1 Zur Methode

Die quantitative Erfassung von Sedimentationsvorgängen in Gewässern kann mit verschiedenen Methoden erfolgen, die jeweils spezifische Vor- und Nachteile haben:

- Schwebstofffallen werden vor allem in Gewässern mit geringen Strömungsgeschwindigkeiten eingesetzt (GARDNER, 1980). Sie fungieren gleichzeitig als Probenehmer und ermöglichen damit die Analyse der Sinkstoffe.
- Die durch die Sedimentation bedingte Aufhöhung der Gewässersohle kann durch Peilungen

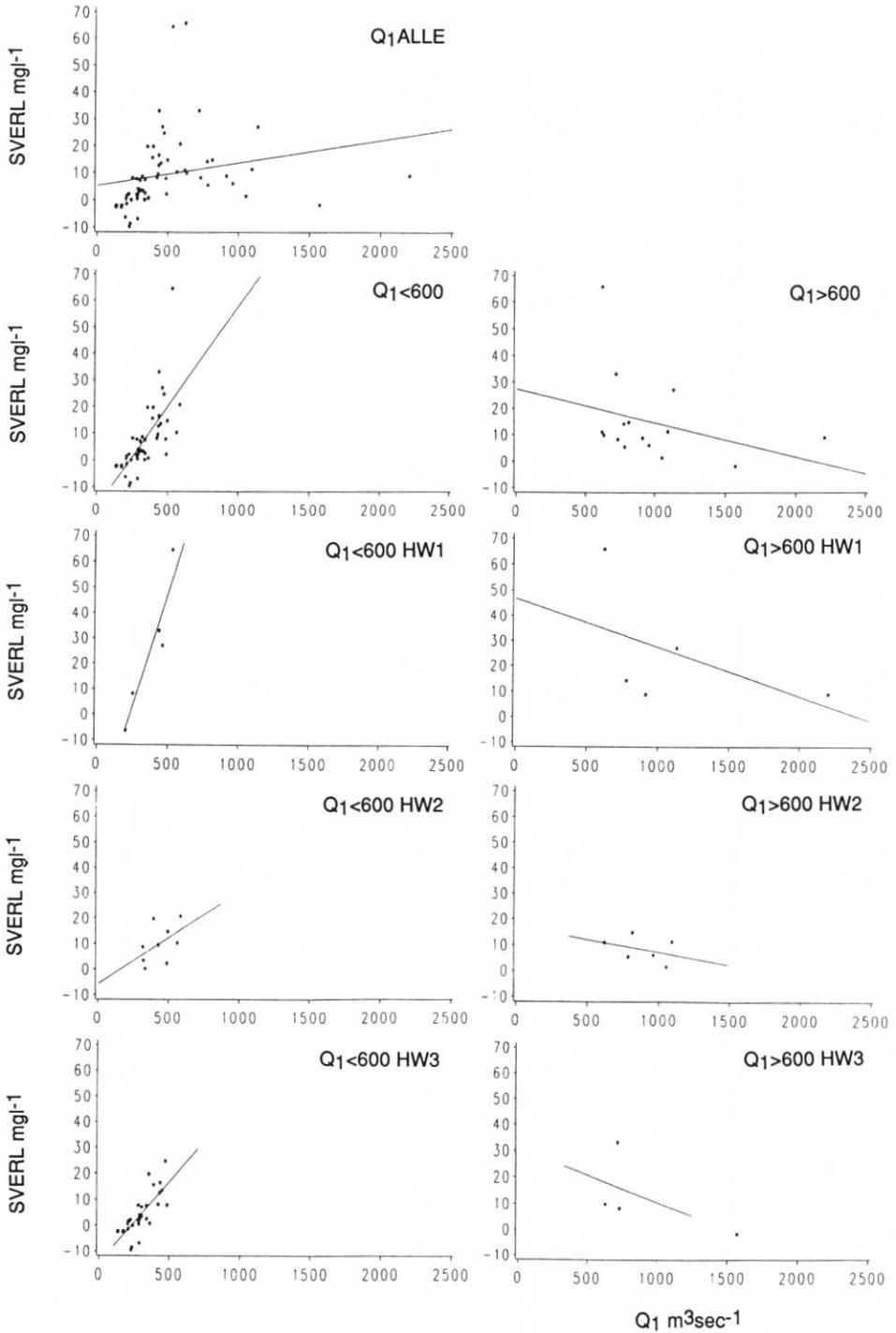


Abb. 8. Darstellung des Zusammenhangs zwischen Oberwasser (Q_1) und Sedimentationsverlust (Sverl) für verschiedene Oberwassersituationen (zur Erläuterung s. Text). Abb. 8a beschreibt das hydrologische Winterhalbjahr

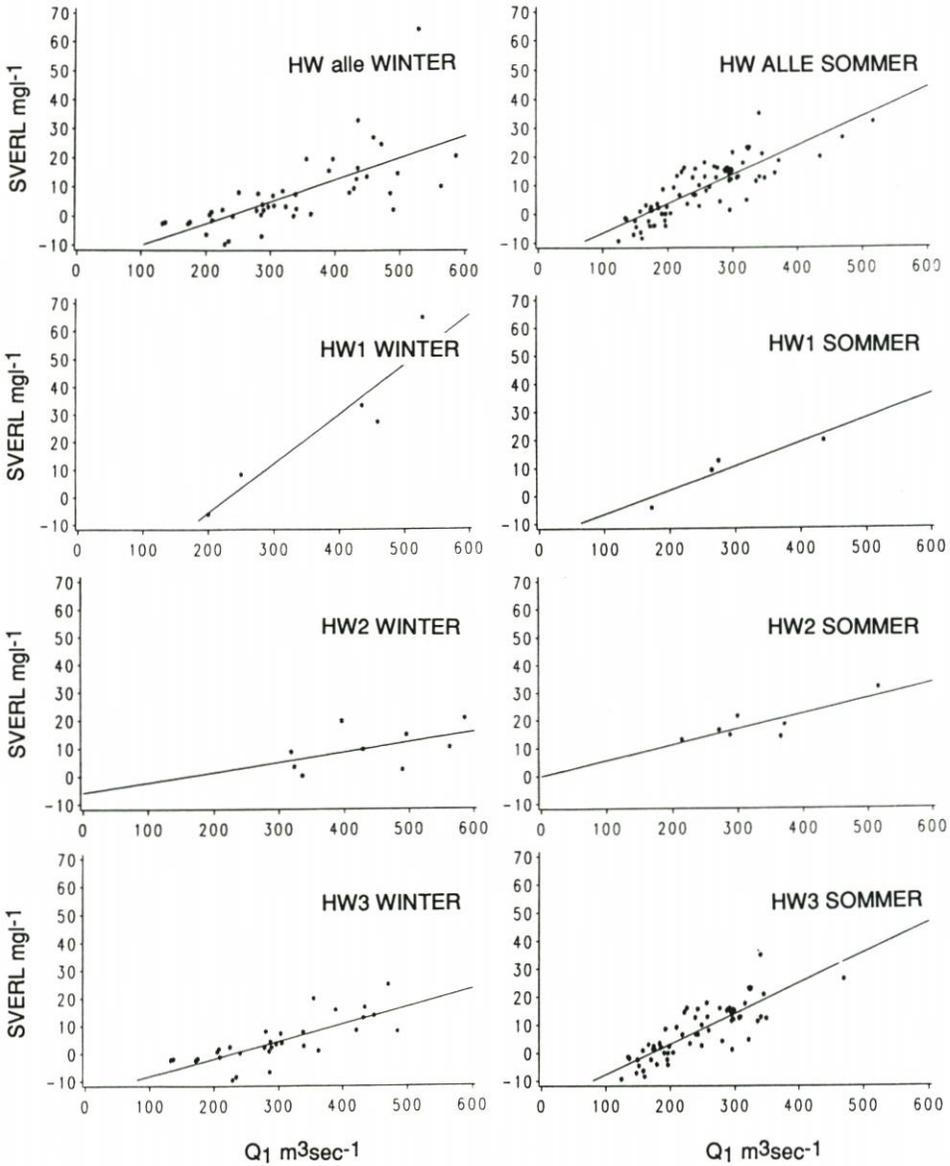


Abb. 8. Darstellung des Zusammenhangs zwischen Oberwasser (Q_1) und Sedimentationsverlust (Sverl) für verschiedene Oberwassersituationen (zur Erläuterung s. Text). Abb. 8b beschreibt das Sommer- und das Winterhalbjahr für $Q_1 \leq 600 m^3 s^{-1}$

erfaßt werden. Im Eulitoral kann dies durch das Ausbringen von Schlickpegeln erfolgen (BALE et al., 1985), im Sublitoral durch Peilungen mit akustischen oder anderen Signalen. Die Meßgrenzen der Verfahren ermöglichen ihren Einsatz allerdings nur in Gebieten mit starker Sedimentation bzw. in großen bis sehr großen Zeitintervallen. Problematisch ist diese Methode auch dort, wo Sedimentation und Erosion am gleichen Ort stattfinden können. NASNER & MESSER (1988) weisen auf die Schwierigkeiten hin, Auflandungsdaten aus Sohlpeilungen für eine Kausalanalyse der beeinflussenden Faktoren zu benutzen, da die Peilintervalle im allgemeinen zu groß sind.

- Die Analyse von Inhaltsstoffen des Sediments kann eine qualitative oder quantitative Beschreibung des Ablaufs der Sedimentation z. T. über historische Zeitabläufe ermöglichen (ZÜLLIG, 1982).
- Für fließende Gewässer ist grundsätzlich auch eine Differenzbildung von Schwebstoff-(und evtl. Geschiebe-)transport oberhalb und unterhalb des Sedimentationsraumes möglich (WESTRICH, 1981), wie dies z. B. für eine Stauhaltung des Mississippi gezeigt wurde (BHOWMIK & ADAMS, 1986). Die Verlandung von Stauräumen in Flachlandflüssen ist dabei zu mehr als 80 % auf den Transport von partikulärem Material in der suspendierten Phase zurückzuführen (WESTRICH, 1981). Wegen der starken Dynamik der Sedimentationsprozesse und des erheblichen Einflusses aperiodischer Ereignisse, wie starker Hochwässer, müssen dafür jedoch Zeitreihen über mehrere Jahre mit möglichst kontinuierlicher Erfassung der Parameter ober- und unterhalb des Sedimentationsraumes vorliegen. In Tidegewässern wird dies durch die periodisch wechselnde Strömungsrichtung weiter kompliziert, da sie entscheidenden Einfluß auf das Transportverhalten der suspendierten partikulären Substanz hat. So konnten FANGER et al. (1990) für die Elbe unterhalb des Hamburger Stromspaltungsgebietes zeigen, daß der tidengemittelte Transport von Schwebstoff (zumindest bei niedrigem Oberwasser) stromauf gerichtet sein kann. Auf die Bedeutung und die Schwierigkeiten einer repräsentativen Probenahme gerade für die Erfassung der Schwebstoffkonzentration haben u. a. NEUMANN (1985) und CHRISTIANSEN (1985) hingewiesen.

Der Ansatz der Differenzbildung wurde hier für die Beschreibung der Sedimentation in tideoffenen Häfen angewendet, um Einblicke in die saisonale Dynamik und die steuernden Prozesse zu ermöglichen. Dafür lag ein Datensatz über vier Jahre vor, der zwar den oben genannten methodischen Anforderungen nur bedingt genügt (keine isokinetische, vertikalintegrierende und tidengemittelte Probenahme), dessen Analyse jedoch neue Erkenntnisse über den Prozeß der Sedimentation liefert bzw. mit anderen Methoden gewonnene Erkenntnisse bestätigt.

Die mit dieser Methode ermittelten Sedimentationsmengen stimmen sehr gut mit den von HABAU (1988) über die Erhöhung der Sohle in den Hafenbecken errechneten Zahlen überein. Angesichts der Fehlermöglichkeiten beider Methoden (für Peilungen s. HABAU, 1987; für Schwebstoffverluste s. o.) ist diese Übereinstimmung befriedigend und zeigt, daß mit der Differenz zwischen *Eintrag* und *Austrag* tatsächlich im wesentlichen die in den Hafenbecken sedimentierenden Schwebstoffe erfaßt werden. Für einen derartigen Ansatz liegen die morphologischen Gegebenheiten in der Unterweser besonders günstig, da die Morphologie in der kanalisiertem Unterweser ober- und unterhalb der Häfen sehr ähnlich ist und die als Sedimentationsfallen wirkenden Häfen mit ihrer enormen Querschnittserweiterung konzentriert bei UW-km 6 liegen. Ein Vergleich mit der Situation des gut untersuchten Hamburger Hafens zeigt dies deutlich: in der Weser fehlen die große Stromspaltung, die sich über viele Flußkilometer hinziehende Querschnittserweiterung und die unter- und oberhalb des Stromspaltungsgebietes unterschiedliche Morphologie der Unterelbe.

5.2 Zur Sedimentationsdynamik

Die statistische Analyse des Datensatzes zeigt sehr deutlich, daß die Sedimentation im Untersuchungsgebiet vor allem von der Schwebstoffkonzentration oberhalb der Häfen abhängig ist. Dabei steigt die Sedimentationsrate bis zu einem Q_1 von etwa $600 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$, also etwa dem doppelten MQ ($323 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$), linear mit dem *Eintrag*. Bei größeren Abflüssen wird der Zusammenhang unsignifikant, tendenziell sedimentiert jedoch ein geringerer Prozentsatz des *Eintrags*. Zusätzlich wird der Zusammenhang zwischen *Sverl* und Oberwasser (Q_1) bei $Q_1 \geq 600$ jedoch negativ. Es scheint also noch ein zusätzlicher direkter Zusammenhang zwischen Q und *Sverl* wirksam zu sein. Dieser wird in dem Einfluß von Q auf Dauer und Stärke des Flutstroms vermutet.

Wie für den Hamburger Hafen gezeigt werden konnte (s. CHRISTIANSEN, 1987), wird die Walzensedimentation in den Hafeneinfahrten, die auch in den bremischen Häfen wesentlich zur Sedimentation beiträgt (HABAU, 1988), bei steigendem Oberwasser kleiner, verursacht durch den dann geringeren Flutstrom, der vor allem für die Walzenbildung verantwortlich ist. Abb. 9 zeigt mit dem eindimensionalen Modell *Fluss* der GKSS gerechnete Strömungsgeschwindigkeiten und -richtungen in der Unterweser im Bereich der tideoffenen Häfen für verschiedene Oberwassersituationen. Sie zeigt deutlich die bei steigendem Oberwasser abnehmenden Flutstromgeschwindigkeiten, die dann zu einer stark verminderten flutstrominduzierten Walzenbildung und damit Sedimentation führen sollten (nach diesen Daten wird der Hafbereich [UW-km 6] bei ca. $900 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ sogar zur Flutstromgrenze). Dies könnte den negativen Zusammenhang zwischen *Sverl* und Q_1 für $Q_1 \geq 600$ erklären. Bei steigendem Oberwasser wird zusätzlich der Tidenhub geringer, so daß sich auch die Austauschwassermengen und damit die Bedeutung des Tideeffekts verkleinern (NASNER & MESSER, 1988).

Einen erheblichen Einfluß auf die Variablen *Eintrag* und *Sverl* haben Hochwasserwellen. Dabei ist zum einen die absolute Größe wichtig, die bei Abflüssen über $600 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ zu deutlichen Veränderungen in der Relation zwischen *Eintrag* und Q_1 bzw. *Sverl* und Q_1 führt (s. o.). Zum anderen gibt es aber auch Unterschiede zwischen dem steigenden und dem fallenden Scheitel einer Hochwasserwelle: So zeigen besonders die Beobachtungen bei stark ansteigendem Oberwasser (HW1) im Winterhalbjahr eine starke Sedimentation. Diese ist vor allem auf die dann stark erhöhte Schwebstoffkonzentration im Oberwasser bei konstantem prozentualen Anteil sedimentierender Feststoffe zurückzuführen. Eine starke Erhöhung der Schwebstoffkonzentration besonders bei Frühjahrshochwässern (Winterhalbjahr) ist auch aus der Elbe dokumentiert. Ursache sind vor allem die großen Mengen während der vorangegangenen Perioden geringer Abflüsse in Staubereichen sedimentierten Materials, die dann erodiert werden (CHRISTIANSEN, 1987). Anders verhält es sich bei stark abnehmendem Oberwasser (HW2): Dann sedimentiert (sowohl im Sommer wie im Winter) ein geringerer Anteil des *Eintrags* in den bremischen Hafenbecken, vermutlich verursacht durch die dann veränderte Zusammensetzung des Schwebstoffs (GREISER, 1988).

Der Einfluß der Temperatur auf die Variablen *Eintrag* oder *Sverl* läßt sich nicht durch eine direkte Korrelation zwischen den Variablen feststellen. Eine Differenzierung des Datensatzes in die beiden hydrologischen Halbjahre ergibt jedoch einige deutliche Unterschiede. So ist die Schwebstoffkonzentration des Oberwassers im Sommerhalbjahr gegenüber dem Winter signifikant erhöht. Dies läßt sich sowohl an langfristigen Monatsmitteln der Schwebstoffkonzentration an der Station Intschede zeigen wie auch für den hier analysierten 4-Jahres-Datensatz am Parameter *Eintrag*. Diese erhöhte sommerliche Schwebstoffkonzentration kann auf den hohen Biomasseanteil in dieser Zeit und auf die Erhöhung der Schwebefähigkeit der Flocken als Folge mikrobieller Aktivitäten zurückgeführt werden (GREISER, 1988).

Der pro mg *Eintrag* sedimentierende Anteil ist jedoch im hydrologischen Sommerhalbjahr nicht von dem im Winterhalbjahr verschieden.

Im Gegensatz dazu ist die Sedimentationsrate pro m^3 Oberwasser im Sommer höher als im Winter; dies ist Folge der im Sommer gegenüber dem Winter erhöhten Schwebstoffkonzentration pro m^3 Oberwasser (s. o.).

Die Ergebnisse zeigen sowohl für Q_1 , wie für den *Eintrag* Grenzwerte auf, bei denen *Sverl* negativ wird, der *Austrag* aus den Häfen also höher als der *Eintrag* ist.

Diese Grenzen liegen bei einem Oberwasser von ca. $175 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ im Sommer und ca. $230 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ im Winter; für den *Eintrag* bei einer Schwebstoffkonzentration von ca. 28 mg l^{-1} im Sommer und ca. 23 mg l^{-1} im Winter (Oberwasser konstant, $\leq 600 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$). Die Differenzen zwischen den hydrologischen Halbjahren entsprechen den oben diskutierten Unterschieden.

Werden diese Grenzwerte von Oberwasser bzw. Schwebstoffkonzentration unterschritten, so wird der *Austrag* größer als der *Eintrag*. Als Ursache kommen fünf Möglichkeiten in Betracht:

- Erosion
- autochthone Produktion
- anthropogene Einleitungen
- bodennaher Eintrag von Oberstrom
- Schwebstoffeintrag von Unterstrom

Diese Prozesse könnten entweder nur während der ermittelten Perioden geringen Oberwassers wirksam oder aber permanent von Bedeutung sein, jedoch zu anderen Zeiten von der dann stattfindenden Sedimentation maskiert werden und somit als Fehler in die statistische Analyse eingehen.

Erosion

Das Ausmaß der Erosion von Sedimenten wird vor allem durch die Strömungsgeschwindigkeit und die Textur des Sediments bestimmt. Der Flutstrom setzt nach dem Kenterpunkt Ebbe im Weserästuar deutlich heftiger ein als der Ebbstrom und führt zu einer stärkeren Resuspendierung von sedimentiertem Material (WELLERSHAUS, 1981). Bei sinkendem Oberwasser wird die Strömungsgeschwindigkeit des in die Abflußrichtung des Oberwassers gerichteten Ebbstroms im Untersuchungsgebiet geringer; im Gegensatz dazu nimmt der Flutstrom bei sinkendem Oberwasser zu (s. Abb. 9). Dieses heftige Einsetzen des Flutstroms zeigt auch Abb. 9; es kann im Untersuchungsbereich zur Resuspendierung von Sediment führen (SCHUCHARDT u. SCHIRMER, 1991). Im künstlich geschaffenen „Stromspaltungsgebiet“ des Neustädter Hafens (Abb. 1) werden solche Strömungsgeschwindigkeiten erreicht. Sediment, das von seiner Textur her zur Resuspendierung geeignet ist, steht im Wendebcken zur Verfügung, so daß eine Erosion und damit Erhöhung der Schwebstoffkonzentration unterhalb der Häfen zu Zeiten niedrigen Oberwassers durchaus möglich erscheint.

Autochthone Produktion

Im Sommer und Herbst findet im Bereich der Meßpunkte für die Variable *Eintrag* eine erhebliche autochthone Biomasseproduktion vor allem durch die Kieselalge *Actinocyclus normanii* statt (SCHUCHARDT & SCHIRMER, 1990a). Da *Sverl* jedoch auch im Winter negativ werden kann, wenn eine autochthone Biomasseproduktion als Ursache nicht in Frage kommt, kann dies nicht der verursachende Faktor sein, sondern zu einer Erhöhung des *Austrags* allenfalls im Sommer beitragen.

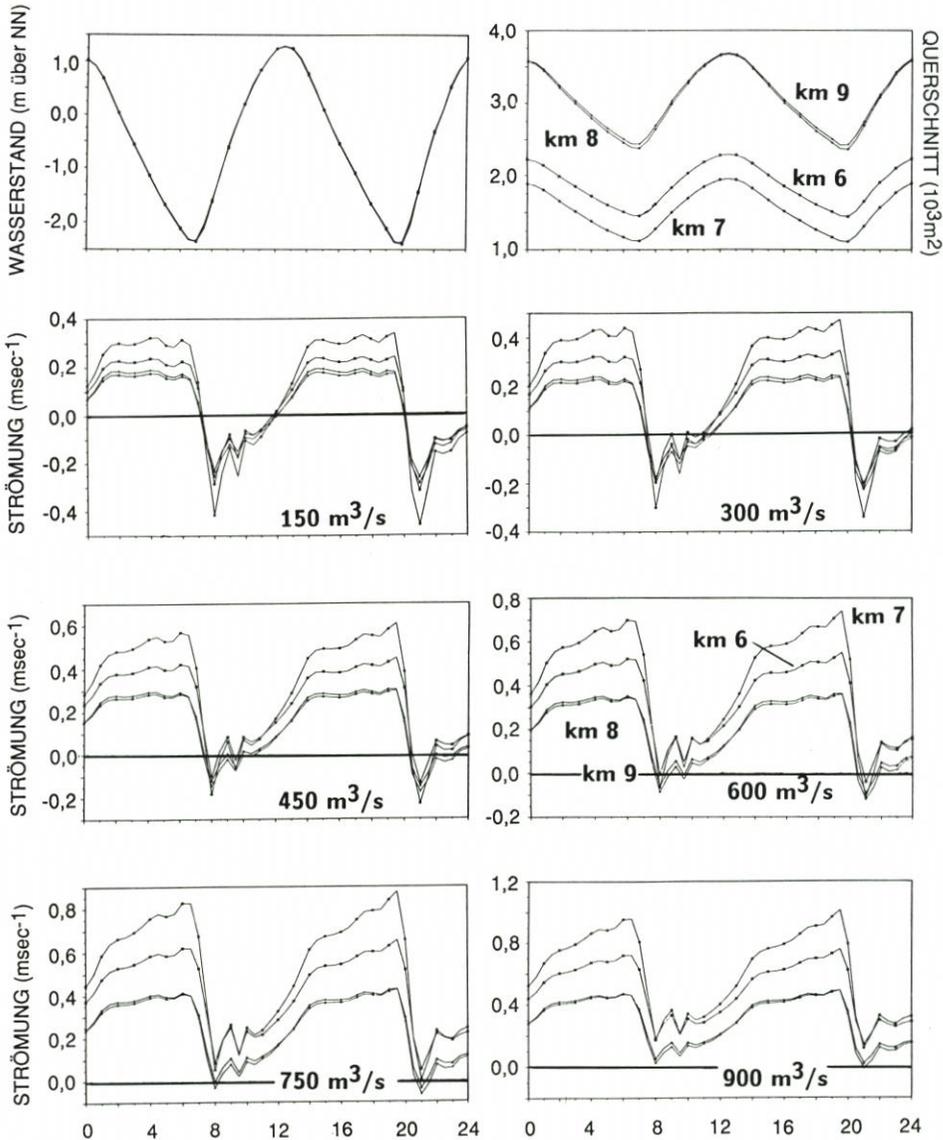


Abb. 9. Wasserstand und Querschnitte in der Unterweser bei UW-km 6, 7, 8 und 9 bei $150 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ und Strömungsgeschwindigkeiten bei verschiedenen Oberwasserabflüssen, gerechnet mit dem eindimensionalen Modell FLUSS der GKSS (MÜLLER et al., 1990). Positive Strömungswerte = Ebbstrom, negative Strömungswerte = Flutstrom. Die Skalierung der Abszisse sind Stunden

Einleitungen

Für eine Erhöhung der Schwebstoffkonzentration durch Einleitung von Abwasser kommt im Untersuchungsgebiet vor allem die kommunale Kläranlage (KA) Seehausen an der unteren Grenze des Hafensbereichs (UW-km 8,5) in Betracht, zusätzlich eventuell die Einleitungen der Klöckner-Hütte Bremen (UW-km 12,5). Die KA Seehausen ist 1985 durch die

Inbetriebnahme einer biologischen Stufe erweitert worden. Bis dahin hatte sie erhebliche Mengen von absetzbaren Stoffen eingeleitet. Diese Fracht ist durch die biologische Stufe um ca. 90 % reduziert worden (SCHUCHARDT et al., 1989). Er kann deshalb heute nur noch einen sehr geringen Anteil an der Sedimentation in den bremischen Häfen haben. Auch erfolgte und erfolgt die Einleitung konstant über das Jahr, so daß es die oberwasserabhängige Zunahme der Schwebstoffkonzentration unterhalb der Häfen kaum verursachen kann.

Bodennaher Eintrag von Oberstrom

Die Muster von Schwebstoffkonzentration und Sedimentation in den Hamburger Häfen werden u. a. durch einen bodennahen Eintrag von Schwebstoff zu bestimmten Oberwassersituationen erklärt, der mit der Staustufe Geesthacht im Zusammenhang steht (s. CHRISTIANSEN, 1987). Dieser Eintrag wird durch Schwebstoffmessungen in der Wassersäule nicht erfaßt. Ob solche Phänomene auch im Untersuchungsgebiet von Bedeutung sind, ist unklar.

Schwebstoffeintrag von Unterstrom

Aus verschiedenen Ästuaren ist ein stromauf gerichteter Transport von Schwebstoff dokumentiert (SALOMONS & MOOK, 1977; SALOMONS et al., 1988). Die Trübungszone, d. h. der Bereich der im Salzkeil akkumulierten Schwebstoffe, ist in ihrer Position stark vom Oberwasser geprägt (WELLERSHAUS, 1981). Ein stromauf gerichtetes Vordringen erhöhter Schwebstoffkonzentrationen, weit über den Bereich des Salzkeils hinaus, ist auch in der Unterweser zu beobachten. Dies führt bei niedrigem Oberwasser dazu, daß im Bereich Bremen-Farge (UW-km 28) und noch weiter stromauf sehr hohe Schwebstoffkonzentrationen gemessen werden können (s. Abb. 2). Dabei kommt es auch zu einem stromauf gerichteten Transport mariner Schwebstoffkomponenten, der bei niedrigem Oberwasser bis in den Bereich der Häfen reichen kann (SCHUCHARDT & SCHIRMER, 1990b). Es erscheint durchaus möglich, daß ein Teil dieses bei niedrigem Oberwasser von Unterstrom herantransportierten Materials zur Erhöhung der Schwebstoffkonzentration der Variablen *Austrag* beiträgt. So konnten FANGER et al. (1990) für die Unterelbe direkt unterhalb des Hafensbereichs bei niedrigem Oberwasser einen tidengemittelten, stromauf gerichteten Transport von Schwebstoff zeigen.

Welcher bzw. welche Faktoren zur beobachteten Zunahme der Schwebstoffkonzentration unterhalb der Häfen bei Situationen mit geringem Oberwasser führen, kann z. Zt. noch nicht entschieden werden.

Die hier beschriebene Verringerung der Schwebstoffkonzentration in der Unterweser als Folge von Sedimentationsvorgängen im Bereich der tideoffenen Häfen in Bremen hat auch eine Reihe gewässerökologischer Implikationen. So ist die Verbesserung des Lichtklimas für die lichtlimitierte planktische Primärproduktion sicherlich nicht ohne Folgen; die Sedimentation reduziert die in der Unterweser transportierte Schwermetallfracht (SCHIRMER et al., 1989) und damit auch den Eintrag in die Nordsee. Die Sedimentation reduziert ebenfalls den partikelgebundenen Anteil der Bakterienbiomasse. Die Darstellung dieser Zusammenhänge befindet sich in Vorbereitung.

6. Danksagung

Unveröffentlichte Daten wurden zur Verfügung gestellt von Herrn A. MÜLLER (GKSS Geesthacht). Ihm sei, ebenso wie den Herren A. BERGMANN (WSA Bremen), Prof. Dr. H. NASNER (HfT Bremen) und Dr. W. PULS (GKSS Geesthacht) für kritische Diskussionen, Herrn Dr. H.-P. WEIGEL (WWA Bremen) für die Förderung dieses Vorhabens und die

Überlassung der Daten und der Besetzung der „Weserluchs“ für ihre Unterstützung ganz herzlich gedankt.

7. Schriftenverzeichnis

- BALE, A. J., MORRIS, A. W. u. HOWLAND, R. J. M.: Seasonal sediment movement in the Tamar Estuary. *Oceanol. Acta* 8 (1), 1985.
- BHOWMIK, N. G. u. ADAMS, J. R.: The hydrologic environment of Pool 19 of the Mississippi River. *Hydrobiologia* 136, 1986.
- BUSCH, D., SCHIRMER, M., SCHUCHARDT, B. u. ULLRICH, P.: Historical changes of the River Weser. In: G. E. Petts; A. L. Roux & H. Möller (ed.) *Historical Change of Large Alluvial Rivers: Western Europe*. J. Wiley & Sons, Chichester, 1989.
- CHRISTIANSEN, H.: Erste Ergebnisse aus Schwebstoffmessungen mit dem CUX-Sampler in der Elbe. *Die Küste*, H. 42, 1985.
- CHRISTIANSEN, H.: Neue Erkenntnisse über Schlickbildungs- und Sedimentationsprozesse im Hamburger Hafen. *Jahrbuch der Hafenbautechnischen Gesellschaft* 42, 1987.
- CHRISTIANSEN, H., HAAR, S. u. RADTKE, G.: Zur Sedimentation in Hamburger Hafenbecken. *Gewässerkundliche Studie 1 (Strom- und Hafenbau Hamburg)*, 1985.
- DEV: Deutsche Einheitsverfahren zur Wasser-, Abwasser- und Schlammuntersuchung. – VCH Verlagsgesellschaft Weinheim, 1989.
- FANGER, H.-H., KAPPENBERG, J. u. MÄNNING, V.: A study on the transport of dissolved and particulate matter through the Hamburg Harbour. – In: W. Michaelis (ed.) *Estuarine Water Quality Management*. Springer-Verlag Berlin, 1990.
- GARDNER, W. D.: Field assessment of sediment traps. *J. of Mar. Res.* 38 (1), 1980.
- GREISER, N.: Zur Dynamik von Schwebstoffen und ihren biologischen Komponenten in der Elbe bei Hamburg. *Hamburger Küstenforsch.*, H. 45, 1988.
- HABAU: Sedimentationsverhältnisse in Bremer Hafenbecken. Bericht des Hafenbauamtes Bremen, unveröff., 1987.
- HABAU: Baggergutuntersuchungsprogramm – Sachstandsbericht. Bericht des Hafenbauamtes Bremen, unveröff., 1988.
- HINRICH, H.: Die Schwebstoffbelastung der Weser und der Vergleich mit Elbe und Ems. *DGM* 19, 1975.
- KRAUSE, G.: Physical processes in tidal estuaries in relation to the monitoring of water quality. *Ocean Management* 6, 1981.
- KÜHLE, H. u. MÜLLER, A.: Gutachten zur Beurteilung des Gewässergütezustandes der Unterweser. Teilbericht: Ergebnisse des Weserexperiments 1987. Gutachten im Auftrag des Wasserwirtschaftsamtes Bremen, unveröff., 1989.
- LÜNEBURG, H., SCHAUMANN, K. u. WELLERSHAUS, S.: Physiographie des Weser-Ästuars (Deutsche Bucht). *Veröff. Inst. Meeresforsch. Bremerhaven* 15, 1975.
- MÜLLER, A., GRODD, M. u. WEIGEL, H.-P.: Lower Weser monitoring and modelling. In: W. Michaelis (ed.) *Estuarine Water Quality Management*. Springer-Verlag Berlin, 1990.
- MÜLLER, K.-D. u. SCHWARZE, H.: Some studies to reduce sedimentation in a port on a tidal river. *Water Sci. Technol.* 20 (6/7), 1988.
- NASNER, H. u. MESSER, K.: Untersuchungen über die Sedimentation im Neustädter Hafen in Bremen. *Untersuchungsbericht im Auftrag des Hafenbauamtes Bremen*, unveröff., 1988.
- NEUMANN, L. J. R.: AMO – die automatische Meßstation Oortkaten. *Die Küste*, H. 42, 1985.
- SACHS, L.: *Angewandte Statistik*. Springer-Verlag Berlin, 1974.
- SALOMONS, W. u. MOOK, W. G.: Trace metal concentrations in estuarine sediments: mobilization, mixing or precipitation. *Neth. J. Sea Res.* 11 (2), 1977.
- SALOMONS, W., SCHWEDHELM, E., SCHOER, J. u. KNAUTH, H.: Natural tracers to determine the origin of sediments and suspended matter from the Elbe Estuary. *Wat. Sci. Tech.* 20 (6/7), 1988.
- SAS: *SAS user's guide: statistics*. SAS Institute Inc. North Carolina, 1985.
- SCHENKEL, W.: Baggergut in der Bundesrepublik Deutschland. Fachseminar Baggergut: Ergebnisse aus dem Baggergutuntersuchungsprogramm. Hamburg, 1984.
- SCHIRMER, M., JATHE, B., SCHUCHARDT, B. u. BUSCH, D.: Gutachten zur Beurteilung des Gewässergütezustandes der Unterweser. Teilbericht: Belastung der Unterweser mit

- Schwermetallen. Erstellt im Auftrag des Wasserwirtschaftsamtes Bremen (unveröff.), 1989.
- SCHUCHARDT, B., MÜLLER, M. u. SCHIRMER, M.: Veränderungen im Sauerstoff-Haushalt der Unterweser nach der Reduzierung kommunaler und industrieller Einleitungen. DGM 33 (3/4), 1989.
- SCHUCHARDT, B. u. SCHIRMER, M.: Seasonal and spatial patterns of *Actinocyclus normanii* (Bacillariophyceae) in the Weser Estuary in relation to environmental factors. In: W. Michaelis (ed.) Estuarine Water Quality Management. Springer-Verlag Berlin, 1990a.
- SCHUCHARDT, B. u. SCHIRMER, M.: Diatom frustules as natural tracers to determine the origin of suspended matter. Env. Tech. Lett. 1990b.
- SCHUCHARDT, B. u. SCHIRMER, M.: Intratidal variability of living and detrital seston components in the inner part of the Weser Estuary: vertical exchange and advective transport. Arch. Hydrobiol. 121 (1) 1991.
- SEEFELDT, D.: Das Peilwesen im Hamburger Hafen – Voraussetzung für ausreichende Wassertiefen. Hansa 1989 (4), 1989.
- WELLERSHAUS, S.: Turbidity maximum and mud shoaling in the Weser Estuary. Arch. Hydrobiol. 92, 1981.
- WESTRICH, B.: Verlandung von Flußstauhaltungen. Wasserwirtschaft 71, 1981.
- ZÜLLIG, H.: Untersuchungen über die Stratigraphie von Carotinoiden im geschichteten Sediment von 10 Schweizer Seen zur Erkundung früherer Phytoplankton-Entfaltungen. Schweiz. Zeitschr. Hydrol. 44 (1), 1982.