

Hans-Peter KOZERSKI

## **Sedimentation und Resuspension in Flachgewässern – zwei weiterhin schwer fassbare Größen?**

**Sedimentation and resuspension in shallow waters – two difficult ascertainable fluxes?**

### **Abstract**

Starting from the necessity to get information for mathematical modelling of shallow water ecosystems, the possibilities are surveyed for the quantification of sedimentation and resuspension. Initially, some general problems of the determination of mass fluxes by means of direct measurements and mass balance calculations are discussed. There have been no methods for direct measurement of resuspension from lake sediments. Estimations of rates from the increase of seston concentration in a lake during storm events include much error regarding the determination of the decisive bottom area and period of time and are interfered by parallel processes. The possibilities for the determination of sedimentation rates are much better. Cylindrical sediment traps measure accurate in still waters but in moving waters (sea, shallow lakes, rivers) a multiplicity of theoretical and practical problems are not solved sufficiently. Progress has been reached by the development of plate sediment traps which collect settling particles under the influence of both, gravitation and natural shear stress. Examples are given for successful application of this new trap. It can be concluded that resuspension is a difficult ascertainable flux in shallow waters. In many cases, suitable sedimentation rates can be determined with acceptable effort.

**Keywords:** Traps, plate sediment trap, settling, erosion, deposition, river, lake

### **1 Einleitung**

Ausgangspunkt für die wissenschaftliche Arbeit zur Sedimentation und Resuspension war die Erarbeitung eines „biokybernetischen Modells“ für die ostdeutsche Boddenkette südlich des Darß und des Zingst. Dieses Ökosystemmodell (SCHELLENBERGER et al. 1974) bildet die Wechselwirkungen zwischen Phosphat, Phytoplankton, Zooplankton, Detritus, Bakterien, suspendierten anorganischen P-Verbindungen im Freiwasser und den dazu gehörigen Kompartimenten im Sediment ab. Als Bindeglieder zwischen Wasser und Sediment galt es, die Sedimentation, die P-Rücklösung sowie die Resuspension möglichst mit ihren wahren Steuergrößen mathematisch zu fassen und parallel dazu realistische Angaben zu den notwendigen

Parametern zu beschaffen. Soweit der Literatur entnommen werden konnte, waren in dieser Kette flacher Küstengewässer (Gesamtlänge ca. 55 km) die Austauschprozesse mit dem Sediment von besonders großer Bedeutung. Bereits 1975 wurden entsprechenden Messungen im Rahmen einer von Werner Schnese geleiteten Forschungskooperationsgemeinschaft zwischen den Universitäten in Rostock, Greifswald und Leipzig, der Akademie der Wissenschaften der DDR sowie der Wasserwirtschaft (SCHNESE 1973) durchgeführt. Bei der Analyse der mit Hilfe von Trichtern und kleinen Zylindern gesammelten Materialmengen zeigte sich, dass die Partikel nicht nur durch Sedimentations-, sondern auch durch Resuspensionsprozesse in diese Fallen gelangen. Die Nutzung der erhobenen Daten war deshalb mit vielen Schwierigkeiten und Unsicherheiten verbunden.

BLOESCH formulierte zu diesen Schwierigkeiten bei einer diesbezüglichen Diskussion 1997 in Berlin: „Wir können die reellen vertikalen Fluxe nicht messen. Wir können nur mit sinnvollen Geräten Näherungen finden.“

Ziel dieses Beitrags ist es daher, folgende Fragen zu beantworten:

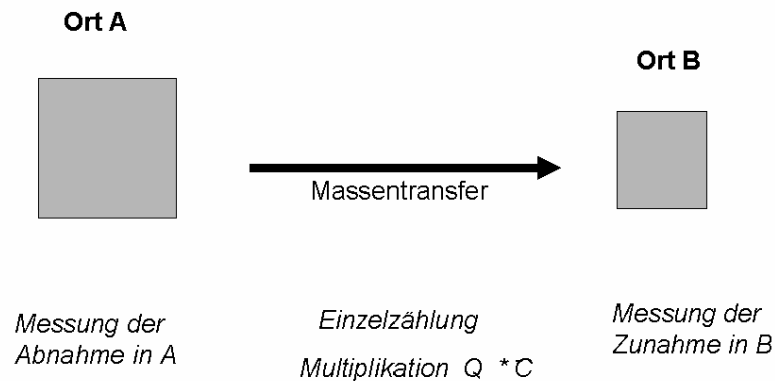
- Welche Geräte und Methoden sind entwickelt worden?
- Welche Möglichkeiten ergeben sich daraus hinsichtlich der Bestimmung von Resuspension und Sedimentation in Flachgewässern?

## **2 Grundsätzliche Anmerkungen zur Messung von Masseflüssen**

Den Massefluss von Kohle zwischen einzelnen Regionen kann man beispielsweise sehr einfach erfassen, in dem man die damit beladenen Waggons eines Eisenbahnzuges zählt. Man kennt bei solchen Zählungen Ort, Zeit und Richtung und findet so leicht ein befriedigendes Ergebnis. Ein anderes Beispiel einer Direktmessung ist die Abflussbestimmung in einem Fluss. Hier misst man die Fließgeschwindigkeiten an mehreren Punkten, integriert über den Querschnitt und erhält den Abfluss  $Q$ . Misst man gleichzeitig die Konzentration verschiedener Stoffe, dann können diese Stoffströme recht exakt berechnet werden. Bei der Resuspension dagegen ist es aufgrund der großflächigen Ausdehnung des Partikelstromes vom Sediment ins Freiwasser und des hohen Aufwands für die Erfassung der sich bewegenden Partikel nicht möglich, diesen Naturvorgang direkt zu messen.

Man muss auf die Bilanzmethode ausweichen, die z. B. auch benutzt wird, einen Getränkeverbrauch zu ermitteln. Man zählt die geleerten Flaschen und erhält die Liter, die verbraucht sind. Bei der Resuspension betrachtet man vorzugsweise den Empfangsort, der in diesem Fall der Wasserkörper eines Sees ist und in Abb. 1 allgemein mit B bezeichnet wurde. Ort A ist in diesem Beispiel der Seeboden, den man praktisch nicht bilanzieren kann, denn auf ihm lagern in der Regel sehr große Mengen von Material, von denen meist nur ein winziger Anteil während eines Resuspensionsereignisses aufgewirbelt wird. Außerdem ist es kaum möglich, die Schichtdicke der Sedimentauflage, die innerhalb eines Zeitraumes von wenigen Stunden bzw. einigen Tagen verloren gegangen ist, genau genug zu ermitteln. Im Wasser dagegen reichen wenige Schöpfproben, die Zunahme an suspendiertem Material relativ genau zu ermitteln. Ein spezielles Problem der

Resuspensionsmessungen ist es, die zur Berechnung einer Rate notwendigen Angaben zur Zeitdauer eines Ereignisses und vor allen zu der Größe der Gewässerbodenfläche zu erhalten, von der das partikuläre Material resuspendiert worden ist. Wo sich diese Fläche befindet und wie weit sie sich ausdehnt, ist von einer ganzen Reihe von Einflussfaktoren (siehe Abschnitt 3) wie z. B. der Wellenhöhe und der Tiefe in den verschiedenen Bereichen eines Gewässers abhängig und zeitlich variabel.



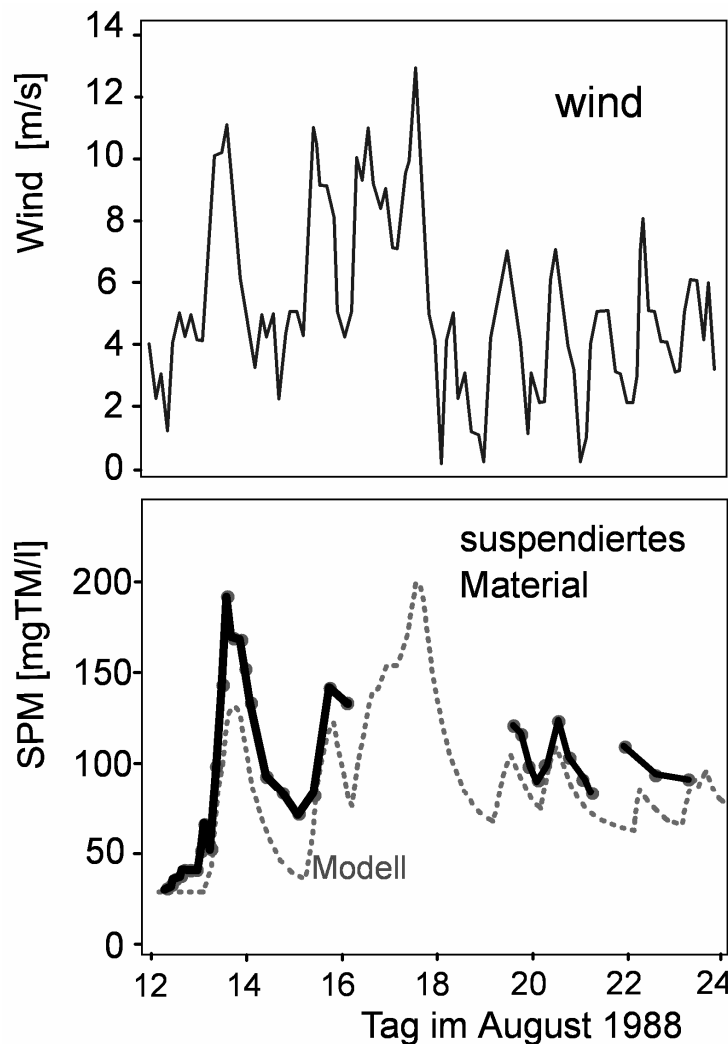
**Abb. 1** Schema eines Stoffflusses und einiger Möglichkeiten seiner Bestimmung

Problem bei Bilanzierungen jeglicher Art sind parallele Ströme oder Prozesse, die zu einer Zu- oder Abnahme des Bestandes am entsprechenden Ort führen. Im Pelagial findet parallel zu Resuspension auch Partikelproduktion, Destruktion, Grazing, Metabolismus und selbstverständlich auch Sedimentation statt. Brauchbar ist die Bilanzmethode deshalb nur, wenn derartige „Störungen“ parallel mitgemessen werden oder der Hauptprozess (in unserem Beispiel die Resuspension) absolut dominant ist. Die Ergebnisse vieler Bilanzrechnungen sind, weil diese Vorbedingungen oft nicht erfüllt sind, mit beträchtlichen Fehlern behaftet bzw. nur als sehr grobe Schätzungen zu betrachten.

### 3 Messung der Resuspension

Ein klassisches Beispiel für eine gelungene Resuspensionsuntersuchung ist die Arbeit von KRISTENSEN et al. (1992). In einem zentralen Punkt des bis zu 5,5 m tiefen und 41 km<sup>2</sup> großen Sees Arreso erfolgte alle 2 bis 8 Stunden eine automatische Probenahme, die bei Windgeschwindigkeiten zwischen 2 bis 12 m/s Erhöhungen der Konzentration suspendierten Materials bis zu 180 g/m<sup>3</sup> Trockenmasse zeigten (Abb. 2). Bei dieser Untersuchung konnte die Häufigkeit von Resuspensionserscheinungen ermittelt und die Abhängigkeit der Konzentration suspendierten Materials von der Windstärke modelliert werden. Es wurde festgestellt, dass über einen längeren Zeitraum eine erhebliche Verringerung der Sichttiefe eintrat und große Teile des Seebodens kein Licht erhielten. Angaben zur mittleren

Resuspensionsrate wurden gegeben, aber keine Aussagen zu den einbezogenen Flächen und Zeiten. Eigene Nachrechnungen deuten darauf hin, dass fast die gesamte Seefläche und nur Zeiten des Anstiegs der Konzentration in die Rechnungen einbezogen worden sind. Dies könnte im Detail nicht völlig zutreffend sein. Die Bedingungen für diese recht aussagekräftige Untersuchung waren hier sehr günstig: Das feine organische Sediment mit einem Wassergehalt von weit über 90 % war auf einem sehr homogenen Seeboden verteilt, der Wind hatte in seiner Hauptrichtung gute Angriffsmöglichkeiten und mit einer einzigen Messstation konnte der Hauptteil des Resuspensionsereignisses erfasst werden.



**Abb. 2**  
Ergebnisse der Resuspensionsmessung von KRISTENSEN et al. (1992) im Arreso-See

Beim Beispiel des Berliner Müggelsee (HOEG & SCHELLENBERGER 1968) befand sich eine kontinuierlich arbeitende Extinktionsmesssonde in weniger als 40 m Entfernung zum Nordufer. Andere Teile des Sees wurden nicht beprobt. Kurzzeitig konnten hier in den 1960er Jahren, als das Litoral noch von üppigen submersen Makrophytenbeständen dominiert war, extrem schnelle Zu- und Abnahmen der Schwebstoffkonzentrationen bei Windgeschwindigkeiten bis zu 7 m/s festgestellt werden. Die Tiefe, in der die Intensität des Lichtes nur noch 5 % des

Oberflächenwertes besitzt, sank während solcher Ereignisse auf 0,3 m. Eine Abschätzung von Resuspensionsraten war hier aber nicht möglich. Man kennt zwar die Zeitdauer des Resuspensionsereignisses durch die kontinuierliche analoge Aufzeichnung sehr genau, hat es aber an der Messstelle nicht mit einem still liegenden, sondern mit einem driftenden Wasserkörper zu tun und kann die Größe der Bodenfläche oder der Makrophytenbestände, aus denen das durch die Messung erfasste suspendierte Material stammt, nicht abschätzen.

Seit ca. 15 Jahren wird am Müggelsee ein anderes Messprinzip angewandt, das den Vorteil hat, störendes Zooplankton nicht durch das Dauerlicht der Extinktionsmesssonde anzulocken. Es arbeitet mit zwei sphärischen LiCor-Sensoren, die die Intensität des Sonnenlichtes in unterschiedlichen Wassertiefen messen. Aus der Differenz zwischen beiden Intensitäten und dem vertikalen Abstand lässt sich die Lichtschwächung durch das reine Wasser mit seinen gelösten und suspendierten Beimengungen berechnen. Diese ständig laufende Messung hat zwei Nachteile: Erstens gibt es nachts keine Informationen und zweitens wirkt sich ein im Tagesverlauf wechselnder Sonnenstand (Einfallswinkel des Lichtes) stark störend auf den berechneten Attenuationskoeffizienten aus. Dennoch war es möglich, mit den um die Mittagszeit gewonnenen Daten der Frage nachzugehen, wie groß der Anteil von Resuspensionsereignissen an der Schwächung des mittleren Lichtangebotes für die Unterwasserpflanzen ist, die sich in einer bestimmten Tiefe des Sees (hier 1 m) befinden (KOZERSKI et al. 2004). Es wurden die Tage herausextrahiert, an denen der tägliche Windweg größer als 36 km/d und eine deutliche Erhöhung des Niveaus der Attenuation gegenüber dem Vortag vorhanden war. Für diese Tage wurde der prozentuale Lichtverlust gegenüber den von Wolken und Wind unbeeinflussten Tagen ermittelt. Er liegt unter 4 % und ist somit viel geringer als der Verlust an Sonnenenergie, der durch die Bewölkung und durch die Trübung verursacht wird, die aus der jahreszeitlich schwankenden algenbürtigen Sestonkonzentration resultiert. Selbst wenn diese Abschätzung einen Fehler von 200 % aufweist, bedeutet dies, dass die Resuspension gegenwärtig in diesem See für das Lichtklima eine nur sehr geringe Rolle spielt. Sie kann nicht, wie zum Teil vermutet worden war für das Ausbleiben einer üppigen Wiederbesiedlung durch Unterwasserpflanzen verantwortlich gemacht werden. Diese Einschätzung deckt sich mit den breit angelegten statistischen Untersuchungen von JEPPESEN et al. (2005) in dänischen Seen zur Wirkung der Resuspension auf den trophischen Zustand.

Dennoch ist die Resuspension für die Stoffflüsse im Ökosystem nicht unwichtig. Bilanzbetrachtungen zum Phosphorhaushalt (KOZERSKI & KLEEBERG 1998) zeigten, dass die oft sehr erheblichen täglichen Änderungsraten der P-Menge im Wasserkörper zu einem großen Teil den partikulären Anteil betreffen, so dass vermutet werden muss, dass nicht nur die Freisetzung gelöster Phosphate, sondern auch die Resuspension P-reicher Partikel eine nicht zu vernachlässigende Rolle spielt.

MOTHES et al. (1986) versuchten eine Abschätzung von Resuspensionsraten im Müggelsee anhand aufeinander folgender Messungen mit Sedimentfallen. Auf der Grundlage der Hypothese, dass sich die chemische Zusammensetzung des in den Fallen gesammelten Materials aus der Mischung von frischem autochthonen Material (mit einem hohen Gehalt an P oder C) und älterem aufgewirbeltem Sediment ergibt, wurden beide Materialströme rechnerisch von einander getrennt. Es wurden

Resuspensionsraten berechnet, die zwar eine Größenordnung vermitteln, aber auch sehr große Fehler beinhalten. Diese Fehler resultieren aus den in weiten Grenzen schwankenden Angaben zum P-Gehalt des Sedimentmaterials und der keineswegs vorhandenen Gleichzeitigkeit und Gleichräumigkeit von Sedimentation und Resuspension. KOZERSKI (1986) konnte auf der Grundlage dieser Raten und eines so genannten Lamellenmodells Berechnungen zu den umfangreichen Materialumlagerungen (mehr als 200 t Trockenmasse) innerhalb einer Woche von den flachen in die tieferen Sedimentbereiche des Müggelsees nach kräftigen Winden im Herbst durchführen. Die Unsicherheiten solcher Modellaussagen sind aufgrund der Fehler in den Resuspensionsraten entsprechend groß. Das trifft auch für die Auswertung der Daten (KOZERSKI & SCHLUNGBAUM 1978) aus den ersten Sedimentationsmessungen an der Boddenkette (STENGL 1976) zu, die ebenfalls unter Anwendung einer Mischungsformel erfolgte. Bei dieser Untersuchung sind Modellaussagen zum P-Austausch zwischen Sediment und Freiwasser abgeleitet worden.

Man erkennt aus den letztgenannten Arbeiten, dass die Anstrengungen (siehe z. B. BLOESCH 1994) zur Gewinnung zuverlässiger Resuspensionsraten überaus notwendig sind. Schaut man sich die große Liste von Prozessen und Abhängigkeiten an, die bei einer exakten Beschreibung der Resuspension zu berücksichtigen sind, dann wird der Aufwand erkennbar, der bis zur Erstellung eines befriedigenden Modells zu bewältigen ist. Zu betrachten sind (1) das Material, das aufgewirbelt werden kann, (2) die aktiven Kräfte im Wasser und im Sediment sowie (3) die Prozesse, die das aufgewirbelte Material hinweg transportieren und wenig beladenes Wasser an die Resuspensionsorte heranbringen. Wichtige Material-Parameter sind dabei Menge, Körnung, Dichte, chemische Zusammensetzung, Kohäsivität, Besiedlung, Alter und Schichtung des Sedimentmaterials. Bei den aktiven Kräften in der meist hoch turbulenten Grenzschicht zwischen Wasser und Sediment sind die Scherkräfte aus Wellen und Strömungen, Gasblasen und Bioturbation zu berücksichtigen. Beim Transportmedium Wasser hat die Tragfähigkeit Einfluss, die wiederum von der Turbulenz und der bereits vorhandenen Partikelbeladung abhängt ist. All diese Dinge sind in ihrer räumlichen Heterogenität und zeitlichen Variabilität zu erfassen, was den Aufwand an experimentellen Untersuchungen noch einmal potenziert.

Es ist somit leicht einzusehen, dass die Entwicklung von Methoden zur Erfassung der Resuspension nur ein sehr langwieriger und aufwändiger Prozess sein kann. Aus den Betrachtungen zur (hier untergeordneten) Rolle der Resuspension beim Lichtklima des Müggelsees ist andererseits aber auch abzuleiten, dass die Forderung nach möglichst perfekten Erfassungen von Raten nicht in jedem Falle zu rechtfertigen ist. Der Aufwand muss in einem sinnvollen Verhältnis zum Nutzen stehen.

In den letzten Jahrzehnten wurden insbesondere Fortschritte bei den Techniken erreicht, die sich mit der Quantifizierung der Erosion an speziellen Sedimenten unter der Wirkung genau dosierter Kräfte beschäftigen, wobei einschränkend angemerkt werden muss, dass Teile des erodierten Materials (insbesondere grobkörnige) auch als Geschiebe (engl.: bed load) und nicht in suspendierter Form abtransportiert wird, d. h. nichts mit Resuspension zu tun haben. Ohne umfangreiche Literaturangaben hierzu geben zu wollen, sollen einige wichtige Techniken genannt werden:

Seit den 1960er Jahren sind große Kreisrinnen (mehr als 1 m Durchmesser) in Gebrauch (z. B. auch an der RWTH Aachen), in die kohäsives Sedimentmaterial eingebracht und auf sein zeitlich veränderliches Verhalten bei der Einwirkung gut definierter Scherspannungen untersucht wird (FUKUDA & LICK 1980, LAU 1994). Das Prozessverständnis und die Charakterisierung ganz bestimmter Sedimente stehen im Vordergrund bei diesen sehr aufwändigen Untersuchungen.

Wesentlich kleiner sind die Geräte, die vorwiegend der Bestimmung von kritischen Scherspannungen und erzielbaren Resuspensionsraten bei definierten Kräften dienen. Wie auch bei den Rundrinnen ist die Simulation ähnlicher hydrodynamischer Bedingungen, wie sie im Gewässer herrschen, Problem beladen und nie vollständig zu erreichen (GUST & MÜLLER 1997). Mit einem Drehzahl gesteuerten Propeller über der ausgestochenen Sedimentprobe (Durchmesser 10 cm) wird in dem von der GKSS Geesthacht entwickelten Gerät EroMes (SCHÜNEMANN & KÜHL 1991) im Labor die kritische Bodenschubspannung ermittelt. Man erhält damit Informationen über die Scherfestigkeit verschiedener Sedimente und an einem bestimmten Probeort über die Eigenschaften in verschiedenen Tiefen. In der Universität Stuttgart werden ausgestochene Sedimentproben in die Sohle einer Fließrinne eingebaut und in der Höhe nachführbar der turbulenten Rinnenströmung ausgesetzt. Unter hydrodynamischen Bedingungen, die denen im Fluss sehr ähnlich sind, werden auch hier kritische Schubspannungen ermittelt. Diese Entwicklung setzt sich mit dem Bau von mobilen Geräten fort, die vom Schiff aus auf den Gewässergrund abgesetzt werden. Das ungestörte Sediment wird unter einer Öffnung des künstlichen Unterwasser-Strömungskanals kritischen Belastungen ausgesetzt (SCHMID et al. 2004, KRISHNAPPAN & DROPO 2005).

Ein Gerät, das man aufgrund seiner relativ hohen Präzision bei der Simulation der hydrodynamischen Bedingungen (Kombination rotierender Scheiben mit Pumpwasserströmungen) auch zur Untersuchung von Sedimentationsprozessen einsetzen kann, ist der Mikrokosmos von Gust (GUST & MÜLLER 1997). Dieses Gerät mit einem zylindrischen Untersuchungsraum (Durchmesser ca. 20 cm) kann wie das in Aachen entwickelte Gerät EROSIMESS (PROCHNOW et al. 2002) auch *in-situ* eingesetzt werden.

Die Entwicklung derartiger Messgeräte wurde durch die Notwendigkeit angetrieben, die Gefahrenpotenziale einzuschätzen, die von kontaminierten Feinsedimenten ausgehen, die in den Flüssen, Seen und Häfen abgelagert sind und dann, wenn die Erosionsfestigkeit durch Schiffsantriebe und Hochwasser überschritten wird, frei werden. Es werden dabei sehr wertvolle Angaben zu den konkreten Lagerstätten gewonnen. Eine Vermessung tatsächlich ablaufender Resuspensionsprozesse ermöglichen diese Messgeräte aber nicht. Man kann die gewonnenen Informationen selbstverständlich auch zur Ableitung von Prognosen verwenden, muss aber damit rechnen, dass deren Zuverlässigkeit noch deutlich unter der von Wettervorhersagen liegt.

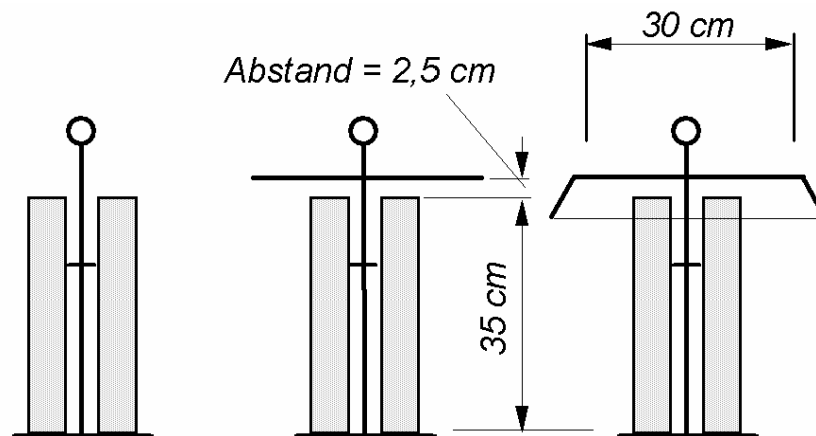
Ein Weg zur Quantifizierung natürlicher Resuspensionsprozesse könnte darin bestehen, sehr komplexe mathematische Modelle anzuwenden, in die neben vielen anderen Parameter auch solche zur Erosionsstabilität der Ablagerungen eingehen. Dass solche zukünftigen Modelle sehr komplex sein müssen, kann man aus der oben erfolgten Aufzählung von Einflussfaktoren und Prozessen ableiten.

In vielen Fällen, und das trifft auch für die Ökosystemmodellierung zu, wird man sich auch in naher Zukunft noch mit sehr stark vereinfachenden black-box-Modellen und verbalen Beschreibungen der Erscheinungsformen und Wirkungen von Resuspensionsprozessen begnügen müssen. Die Resuspension ist somit auch weiterhin eine schwer fassbare Größe in Flachgewässern.

## 4 Messung der Sedimentation

### 4.1 Der Weg zur Zylinderfalle

Wesentlich günstiger als bei der Resuspension liegen die Dinge bei der Sedimentation, denn erstens dominiert mit der Gravitation eine gut bekannte Kraft, zweitens ist das zu betrachtende Material, die suspendierten Partikel, relativ homogen im Wasserkörper verteilt und drittens gibt es seit langem Erfahrungen damit, von oben zu Boden fallende Dinge wie z. B. Regenwasser aufzufangen und zu quantifizieren. In einem historischen Überblick zitiert BLOESCH (1996) eine Arbeit von HEIM (1900), die den frühen Beginn entsprechender Quantifizierungsversuche in Seen belegt. Wie Regenmesser wurden die verschiedensten Flaschen, Trichter, Schüsseln und Zylinder viele Jahrzehnte lang in den Gewässern verwendet, jedoch konnte man auf diese Weise nicht die volle Wahrheit erfahren, wie durch einfachste Versuche gezeigt werden kann.



**Abb. 3** Versuchsanordnung zur Untersuchung der Wirkung von Abdeckungen (Platte, umgekehrte Fotoschale) auf das Fangergebnis von Zylinderfallen.

Stellt man einen Regenmesser unter ein Dach, dann bleibt das Auffanggefäß leer. Überdeckt man dagegen eine ähnlich gebaute Sedimentfalle unter Wasser mit einer Platte, dann findet man sowohl in einem eutrophen Flachsee als auch in einem schwach fließenden Fluss-Altarm nach kurzer Zeit gut messbare Mengen partikulären Materials. Gegenüber der offenen Falle treten keine Unterschiede bei der Menge gefangener Partikel auf (KOZERSKI 1994a, 2003). Selbst wenn man eine



umgedrehte Schale so über dem Zylinder anordnet, dass sich der Rand unterhalb der Fallenöffnung befindet (siehe Abb.3), ergeben sich annähernd gleiche Ergebnisse (siehe Tab. 1).

**Tab. 1** Parameter und Ergebnisse von Sedimentfallenvergleichen mit und ohne Abdeckung.

	Müggelsee	Altarm Freienbrink
Datum	1. bis 2. 9. 1994	30.8. bis 1.9.1994
Expositionsdauer [h]	41,8	19,5
Schwebstoffkonzentration [mg/l]	2,12	9,56
Trappingraten in den Zylinderfallen [g/m <sup>2</sup> /d]		
offen (jeweils n= 4)	8,51 ± 0,73	56,7 ± 6,0
Abdeckung mit einer Platte	7,80 ± 0,82	61,3 ± 4,0
Abdeckung mit einer Schale	7,68 ± 0,23	56,2 ± 2,4

Daraus ist zu schlussfolgern, dass die Schwebstoffpartikel im Wasser nicht wie Regentropfen in der Luft mehr oder weniger senkrecht fallend zum Boden transportiert, sondern von kleinen Wasserballen in die Sedimentfallen getragen werden, die sich turbulent im Fluss und auch im See auf und ab und in sehr starkem Maße auch horizontal bewegen. Die vertikale Sinkgeschwindigkeit, die nach BLOESCH & BURNS (1980) mindestens zwei Größenordnungen unter den horizontalen Transportgeschwindigkeiten liegt, spielt somit nur in der Grenzschicht zwischen Wasser und Sediment eine Rolle, und diese befindet sich bei den meisten Sedimentfallen in den tiefen Ruhezonon des Auffanggefäßes.

Es liegt daher nahe, dass die Quantifizierung von Sedimentationsprozessen in der Natur ebenso wie in technischen Anlagen davon abhängt, wie groß die Ähnlichkeiten dieser Grenzschichten und die Zuführung partikelreichen Wassers zu diese Orten zwischen Messgerät und den tatsächlichen in-situ Bedingungen sind.

Umfangreiche Untersuchungen (siehe u.a. BLOESCH 1996) fanden Ende der 1970er Jahre statt, als man feststellen musste, dass die Ergebnisse aufwändiger Messungen mit unterschiedlich geformten Sedimentauffanggefäßen nicht reproduzierbar waren. GARDNER (1980) führte dazu mehrere Vergleichsmessungen in einer 6 m langen, 17 cm breiten und 15 cm tiefen Fließrinne bei Geschwindigkeiten von 4 bis 9,5 cm/s mit den verschiedensten Fallentypen durch. Vertreten waren die in der Meeresforschung wegen ihrer großen Auffangfläche besonders oft verwendeten Trichter, Flaschen mit engem und weitem Hals, oben offene Kästchen, eine 10,2 x 14,5 cm große Platte und Zylinder unterschiedlicher Höhe und Durchmesser. Ein Zylinder lag dabei flach und hatte als Öffnung oben nur einen langen Schlitz in der Zylinderwandung. Ein weiteres Experiment fand in einem Fischtank statt, in dem ruhige Bedingungen vorhanden waren. Als suspendiertes

Material fand gesiebte Mudde ( $d < 63 \mu\text{m}$ ) Verwendung. Verglichen und als Effizienz bezeichnet, wurde die je Flächeneinheit der Öffnung und je Zeiteinheit gefangene Muddemenge in den Fallen mit der während des Versuches verloren gegangenen Menge suspendierten Materials bezogen auf die Grundfläche der Rinne.

Mit Hilfe von Tracerbeobachtungen wurde die An-, Um- und Durchströmung der einzelnen Fallen analysiert und Aufenthaltszeiten in den Fallen bestimmt. Dabei zeigte sich meist eine sehr intensive Durchströmung der Fallen. Das Wasser drang durch die Öffnung an der strömungsabgewandten Seite in die Sedimentfallen ein und an der strömungszugewandten Seite wieder aus. Die Intensität war von der Reynoldszahl abhängig. Die Aufenthaltszeiten des Wassers lagen allgemein zwischen 0,8 und 12 Minuten. Nur die Gefäße mit großem Volumen und kleiner Öffnung wiesen Werte bis zu einigen Stunden auf. Für diese Gefäße fand man aufgrund der kleinen Öffnungsfläche und der idealen Sedimentationsbedingungen die höchsten Fallen-Effizienzen (bis fast 1000 %). Bei den Zylindern lag der Mittelwert der Effizienz bei 100 %, woraus gefolgert wurde, dass die Zylinder die Sedimentationsrate, die sich für das gesamte Fließrinnensystem ergibt, am besten messen können.

Die Zylinderfallen wurden zum Standardmessgerät. Mit einem empfohlenen Durchmesser von mindestens 5 cm und einem Höhen-Durchmesser-Verhältnis von über 5 haben sich diese einfachen Zylinderfallen auch in vielen Fällen als sehr zweckmäßig erwiesen (BLOESCH 1996). So wurde im geschichteten Arendsee eine sehr gute Übereinstimmung mit den Sedimentationsraten festgestellt, die sich aus der Lamellierung der Sedimente und  $^{137}\text{Cs}$ -Bestimmungen ergaben (HUPFER & LEWANDOWSKI 2005).

Die trichterförmigen Sedimentfallen haben die tatsächlichen Verluste im Experiment von GARDNER (1980) systematisch unterschätzt (Effizienz 60-65 %), weil die Sedimentation auf den schrägen Flächen des Trichters nicht unter idealen Bedingungen stattfand und Wirbel in die Trichter hineinreichten, die bereits angesammeltes Material wieder aus der breiten Öffnung hinausbeförderten.

Die Trichter spielen aber in der Meeresforschung, wo man es mit äußerst geringen Schwebstoffkonzentrationen zu tun hat, eine große Rolle. Bei den Messungen in den Meeren geht es u. a. auch darum, ein sehr wichtiges Glied der globalen Kohlenstoffbilanz zu quantifizieren. Hier benutzt man zum Teil mannshohe Geräte mit automatischer Abfüllung des gesammelten Materials zu bestimmten Zeitpunkten. Es wird daran gearbeitet, Korrekturverfahren für Messergebnisse aus trichterförmigen Sedimentfallen zu entwickeln (GUST, pers. Mitt.). Dabei sind insbesondere die Abhängigkeiten zu berücksichtigen, die von den Sinkeigenschaften der suspendierten Partikel und von den hydrodynamischen Einflüssen ausgehen, welche z. B. bei verankerten Sedimentfallen in Meeresströmungen sehr beträchtlich sind. Dazu gibt es eine ganze Reihe von Arbeiten und Vorschläge (siehe z. B. GUST & KOZERSKI 2000).

Resümierend kann man feststellen, dass durch die sehr intensiven Untersuchungen um das Jahr 1980 herum gute Möglichkeiten geschaffen worden sind, reproduzierbare Sedimentationsmessungen durchzuführen und mit deren Ergebnissen sinnvoll und genügend kritisch umzugehen. Das trifft insbesondere für die tiefen und wenig bewegten Gewässer zu, wo man mit den Standard-

Zylinderfallen sehr plausible Messwerte gewinnt. Man misst mit Ihnen in erster Näherung die Sedimentation unter Ruhebedingungen (KOZERSKI 1994b).

Verwendet man diese Fallen in einem Fluss, dann sind die Messwerte falsch, und oft so hoch, dass Widersprüche zu Massenbilanzen offensichtlich werden. Ursache dafür ist, dass bei genügend starker Strömung viele Partikel in-situ nicht abgelagert werden können. Sie reichern sich in der stark turbulenten Strömung im Wasser an und kommen erst dann zur Ablagerung, wenn der Fluss mündet oder eine Ruhezone erreicht. Eine im Fluss exponierten Zylinderfalle ist eine solche Ruhezone. Hier kann man auf einer sehr kleinen Fläche, die auf den Fluss selbst keine messbaren Rückwirkungen hat, maximal möglich Sedimentationsraten messen. Solch hohe Raten sind für den Fluss praktisch nicht realistisch. Sie sind nur für einen sehr kurzen Zeitraum theoretisch für den völlig unrealisierbaren Fall, dass der Fluss plötzlich angehalten wird, denkbar. Die unter Fließbedingungen tatsächlich auftretende Sedimentation auf dem Flussbett kann man mit Zylinderfallen somit nicht quantifizieren.

Verwendet man die Zylinderfallen in einem flachen See, dann kann man beobachten (MOTHES et al. 1986), dass die höchsten Sedimentationsraten dann gemessen, wenn starke Winde blasen, also die Wellen und Strömungen so stark sind, dass größere Mengen von Sedimentmaterial resuspendiert werden. In diesen Fällen sedimentieren die Partikel unter idealen Bedingungen in der Falle, obwohl am gleichen Standort anstelle von Ablagerung Resuspension stattfindet. Die dringend für die Charakterisierung von Ökosystemen benötigten Raten für den Transfer von im See gebildeten Partikeln zum Sediment kann man in einem Flachsee deshalb nur in Ausnahmesituationen (kein Wind) mit Zylinderfallen ermitteln.

## 4.2 Entwicklung der Tellerfalle

Um unter den Bedingungen von Strömungen und Wellenbewegungen realistische Sedimentationswerte ermitteln zu können ist eine Tellerfalle (Abb. 4) entwickelt und patentiert worden (KOZERSKI & LEUSCHNER 1999, 2000). Theoretischer Hintergrund ist die Gleichung von KRONE (1962), nach der die Sedimentationsrate nicht nur von der Konzentration (C) und der Sinkgeschwindigkeit des suspendierten Materials ( $W_s$ ), sondern auch von der Scherspannung ( $\tau$ ) abhängig ist, die auf der Sedimentationsfläche herrscht.

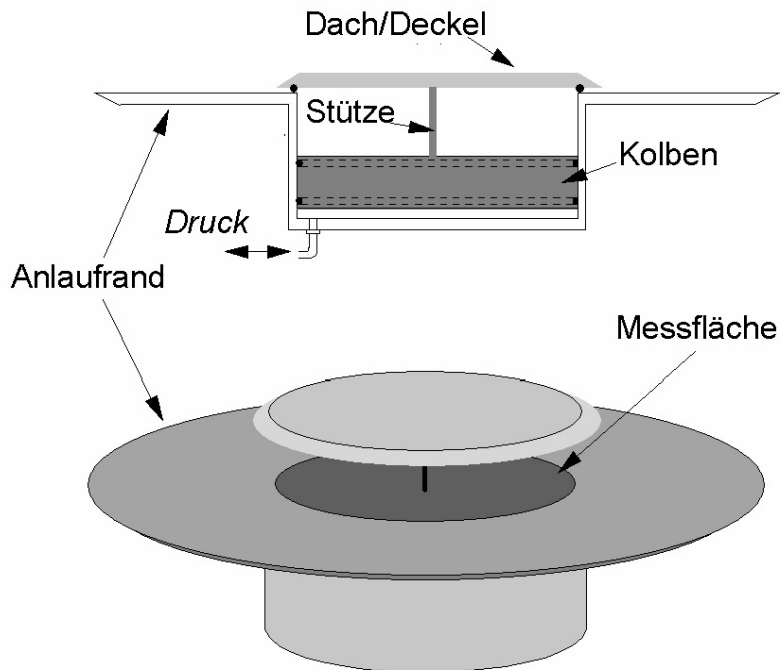
$$\text{sed} = C * W_s * (1 - \tau/\tau_{\text{crit}})$$

Ist die Scherspannung größer als ein kritischer Wert ( $\tau > \tau_{\text{crit}}$ ), dann findet keine Sedimentation statt. Bei sehr kleinem  $\tau$  gilt praktisch die traditionelle Gleichung

$$\text{sed} = C * W_s$$

und zwischen  $\tau = 0$  und  $\tau_{\text{crit}}$  nimmt die Sedimentationsrate linear mit  $\tau$  ab.

Entsprechend dieses Konzeptes war es somit notwendig, die Scherspannung am Gewässergrund während der Messung auch auf der Falle mindernd wirksam werden zu lassen.



**Abb. 4** Tellerfalle nach LEUSCHNER & KOZERSKI (1998) in Querschnitt (geschlossen) und Ansicht (offen).

Realisiert wurde dies durch eine runde Plexiglasscheibe, die horizontal über dem Gewässergrund exponiert wird und keinerlei Umwandung (keine Wand) besitzt. Entsprechend der Strömung bildet sich eine Grenzschicht aus, in der ähnliche Scherspannungsverhältnisse herrschen wie auf dem Grund des Gewässers. Um Randeffekte bei der Ausbildung der Grenzschicht auszuschließen, wurde in der Ebene der Messfläche ein 10 cm breiter Ring, der sogenannte Anlaufrand angeordnet. Dieser bewirkt eine weitestgehend homogene Sedimentation auf der gesamten Plexiglasscheibe (LEUSCHNER & KOZERSKI 1998). Ein grundsätzliches, bereits bei GARDNER (1980) benanntes Problem flacher Sedimentfallen ist, dass das gefangene Material beim Herausheben der Falle aus dem Wasser hinweg gespült wird. Um diesen Verlust zu vermeiden, wurde die Plexiglasscheibe als Kolben ausgebildet, der hydraulisch in einen Zylinder abgesenkt und damit umwandelt wird bevor man die Tellerfalle aus dem Wasser herausholt. Aus der Kenntnis heraus, dass der Sedimentationsvorgang nicht durch eine Überdachung gestört wird, wurde ein Deckel angeordnet, der den Zylinder mit dem gefangenen Material nach oben hin so fest abschließt, dass die Falle auch bei Wellengang geborgen und anschließend

in diesem Zustand transportiert werden kann. Die Funktion dieser Falle ist in den angegebenen Publikationen detailliert beschrieben und vielfach getestet worden.

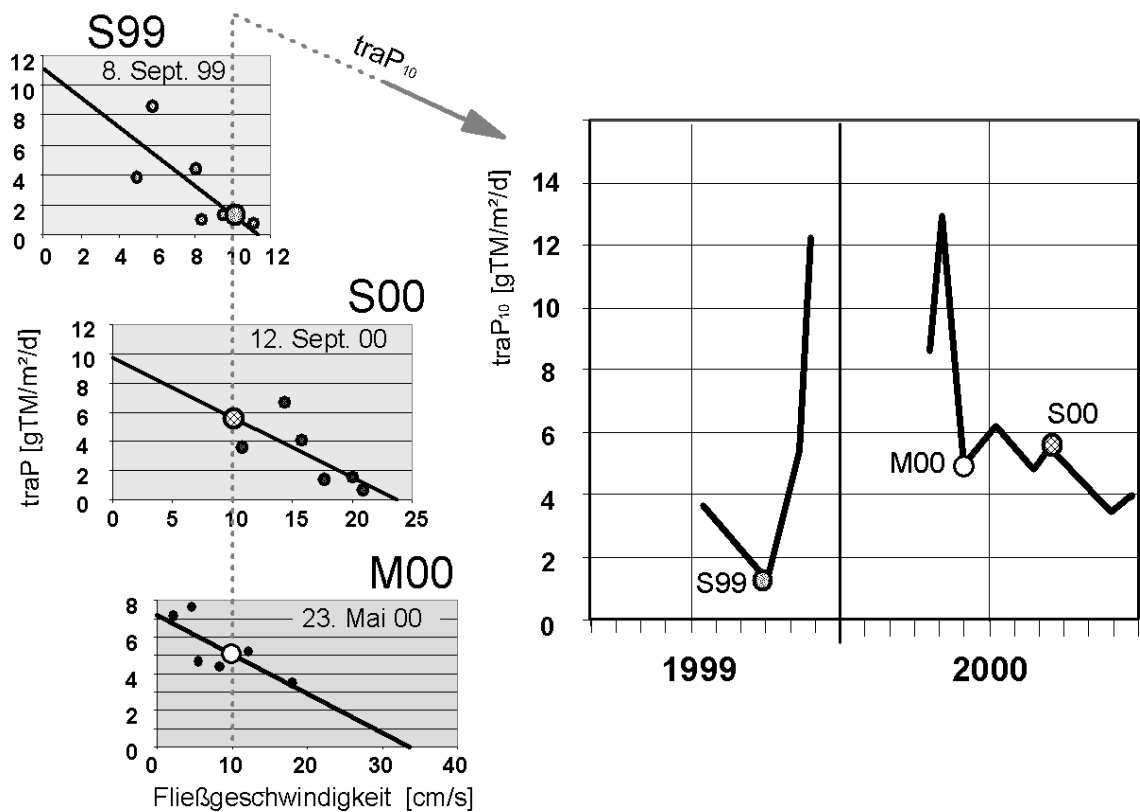
Mit Hilfe von Lycopodiumsporen konnte in einem Experiment im Mühlengraben in Fürstenwalde/Spree nachgewiesen werden, dass die Falle in der richtigen Größe misst. Aus der Massenbilanz ergab sich ein Partikelverlust im Gewässer von 0,54 Mio Sporen je  $m^2$ , während auf den Tellerfallen 0,36 Mio Sporen je  $m^2$  gefangen worden sind. Es fand auch ein erfolgreicher Vergleich unter Nutzung der natürlichen Schwebstoffe mit dem Mikrokosmos von GUST & MÜLLER (1997) in diesem Seitenarm der Spree statt. G. GUST konnte dabei die auf der Tellerfalle gemessene Scherspannung im Mikrokosmos genau nachsimulieren und fand eine mittlere Sedimentationsrate von 6,6  $gTM/m^2/d$ , während bei den Tellerfallen im Mittel 6,7  $gTM/m^2/d$  gemessen worden sind (GUST & KOZERSKI 2000).

### 4.3 Anwendungen der Tellerfalle

Obwohl der Ausgangspunkt dieses Artikels die flachen Standgewässer sind, soll in diesem Abschnitt zunächst auf ihre Anwendung in Fließgewässern eingegangen werden, weil hier erstens viele Phänomene besonders deutlich werden, zweitens diese Falle insbesondere für diese Gewässer entwickelt worden ist und drittens unsere Flüsse ebenfalls stark durchmischte Flachgewässer sind.

In der Spree, einem 400 km langen Fluss, der von Süden kommend in Berlin in die Havel mündet (für weitere Angaben ist das Buch von KÖHLER et al. (2002) zu empfehlen) sind, mehrere umfangreiche Untersuchungen durchgeführt worden, bei denen Tellerfallen zum Einsatz kamen (PUSCH et al. 2001, KOZERSKI 2003a).

Durch 14-tägige und monatliche Messungen an der Feldstation Freienbrink wurde versucht, den jahreszeitlichen Gang der Sedimentation in diesem hier frei fließenden eutrophen Flachlandfluss zu analysieren (Abb. 5). Dazu wurden jeweils 6 Fallen im Strömungsgradienten vom Ufer (geringe Strömungsgeschwindigkeit) bis zum Ende eines Steges ( $V$  bis 36  $cm/s$ ) für jeweils etwa 3 Stunden exponiert. Es ergaben sich klare Abhängigkeiten der Trappingrate (so wird die Sedimentationsrate auf und in den Fallen auch bezeichnet) von der Anströmgeschwindigkeit des Wassers in Höhe der Messfläche. Auf eine Bestimmung von Scherspannungen wurde der Einfachheit wegen verzichtet. Diese Abhängigkeit wurde in Anlehnung an KRONE (1962) durch eine maximale Sinkgeschwindigkeit in Ruhe  $W_s$  und eine kritische Fließgeschwindigkeit  $V_{crit}$  sowie die aktuelle Schwebstoffkonzentration  $C$  beschrieben. Es zeigten sich folgende in KOZERSKI (2003a oder b) näher diskutierte Besonderheiten: Im Jahresgang ändern sich alle drei Parameter. Im Sommer und zum Teil auch im Herbst findet man gegenüber den Winter- und Frühjahrswerten deutlich höhere maximale Sinkgeschwindigkeiten  $W_s$  (bis 6  $m/d$  gegenüber Werten unter 1  $m/d$ ). Die kritische Fließgeschwindigkeit  $V_{crit}$  liegt meist in der Größenordnung zwischen 15 und 40  $cm/s$ . Zeitweise kann sie aber auch darunter oder sehr weit darüber liegen, was darauf hinweist, dass die rückhaltenden Kräfte in der entscheidenden Grenzschicht zwischen Wasser und der Ablagerungsfläche extremen Schwankungen unterliegen und keinesfalls wie es z. B. von SUKHODOLOV (2003) erwartet wurde, mit  $W_s$  parallel laufen (KOZERSKI 2003 b).



**Abb. 5** Ergebnisse einzelner Messserien (Sept. 1999, Sept. 2000 und Mai 2000) mit der Tellerfalle in der Spree bei Freienbrink und der daraus abgeleitete zeitliche Verlauf der Sedimentationsrate bei einer Fließgeschwindigkeit von 10 cm/s.

Anhand der Konzentrationen und der gemessenen Fließgeschwindigkeiten im Flussquerprofil konnte die räumliche Verteilung der Sedimentationsraten zu verschiedenen Zeitpunkten berechnet werden. Es zeigte sich erwartungsgemäß, dass die Sedimentation in einem Fluss hauptsächlich in den ufernahen Bereichen stattfindet. Es gibt aber auch Zeiten, in denen trotz hoher Fließgeschwindigkeiten die gesamte Sohlfäche wirksam wird, weil  $V_{crit}$  sehr hoch ist.

Für die komplexen Untersuchungen an dem 21 km langen Abschnitt der Spree zwischen Neuendorfer See und Schwielochsee (Krumme Spree) wurden Sedimentationsverlusten für das Phytoplankton und Seston gemessen, die gut mit Werten übereinstimmten, die sich aus der Ökosystembilanz ableiten ließen (KÖHLER et al. 2000). In der Hessischen Kinzig wurden Messungen durchgeführt (KOZERSKI et al. 2003), um die Auswirkungen von Schlämmen, die bei der Entleerung einer Talsperre resuspendiert werden, auf die Laichhabitate von Fischen zu ermitteln. Mit Hilfe der Tellerfallen wurden Sedimentationsraten in Abhängigkeit von der Strömungsgeschwindigkeit gemessen und anhand der räumlichen Geschwindigkeitsverteilung die Längsausdehnung der Schlammwolke und die

Menge an feinputikulärem Material, die zur Kolmation der Flusssohle an den verschiedenen Querschnitten führen kann, berechnet.

Ein wichtiger Parameter bei derartigen Berechnungen ist die Sedimentationsgeschwindigkeit, d. h. der Quotient aus Sedimentationsrate und Schwebstoffkonzentration. Dieser Materialparameter gibt an, wie schnell sich die jeweils suspendierten Partikel in den Sedimentfallen sammeln bzw. im Gewässer sedimentieren. Mit den Tellerfallen bestimmt man einen Parameter, der von der aktuellen Fließgeschwindigkeit abhängt und mit den Zylinderfallen den Maximalwert der Sedimentationsgeschwindigkeit für Ruhebedingungen. Für diesen Zweck sind Zylinderfallenmessungen auch im bewegten Wasser sehr sinnvoll, denn man erhält auf relativ einfache Weise einen summarischen und universellen Parameter für das suspendierte Material, der für Vergleichszwecke sehr brauchbar ist. In der Spree lagen die Sedimentationsgeschwindigkeiten in den Zylinderfallen meist zwischen 5 und 25 m/d. Für das aus der Kinzigalsperre ausgetragene Sediment wurden Werte in Zylindern bis zu 64 m/d ermittelt, denn es handelt sich hier um ein über längere Zeit abgelagertes Material mit hohem Mineralgehalt. Zu beachten ist bei solchen Werten aber, dass es sich um den Mittelwert für alle gefangenen Partikel handelt, nicht um den Mittelwert für das im Wasser suspendierte Material und schon gar nicht um die Sinkgeschwindigkeit jedes einzelnen Partikels, denn das im Gewässer suspendierte Material ist eine Mischung sehr unterschiedlicher Partikel. Angaben zur Verteilung der Sinkgeschwindigkeit der einzelnen Partikel erhält man nur aus der Analyse des Sinkgeschwindigkeitsspektrums, die in parallelen und zeitlich unterschiedlich langen Sedimentationsversuchen unter Ruhebedingungen (KOZERSKI & KERN 1999) durchgeführt wird.

Da die Sedimentationsrate in Zylindern nicht völlig unabhängig von der Anströmgeschwindigkeit ist (GUST et al. 1996), handelt es sich bei den o.g. Werten nur um erste Näherungen. Bei den Tellerfallen liegen die Sedimentationsgeschwindigkeiten meist im Bereich zwischen 0,1 und 5 m/d. Ist aufgewirbeltes Material, wie z. B. in der Kinzig beteiligt, dann reichen diese in Einzelfällen auch bis 36 m/d.

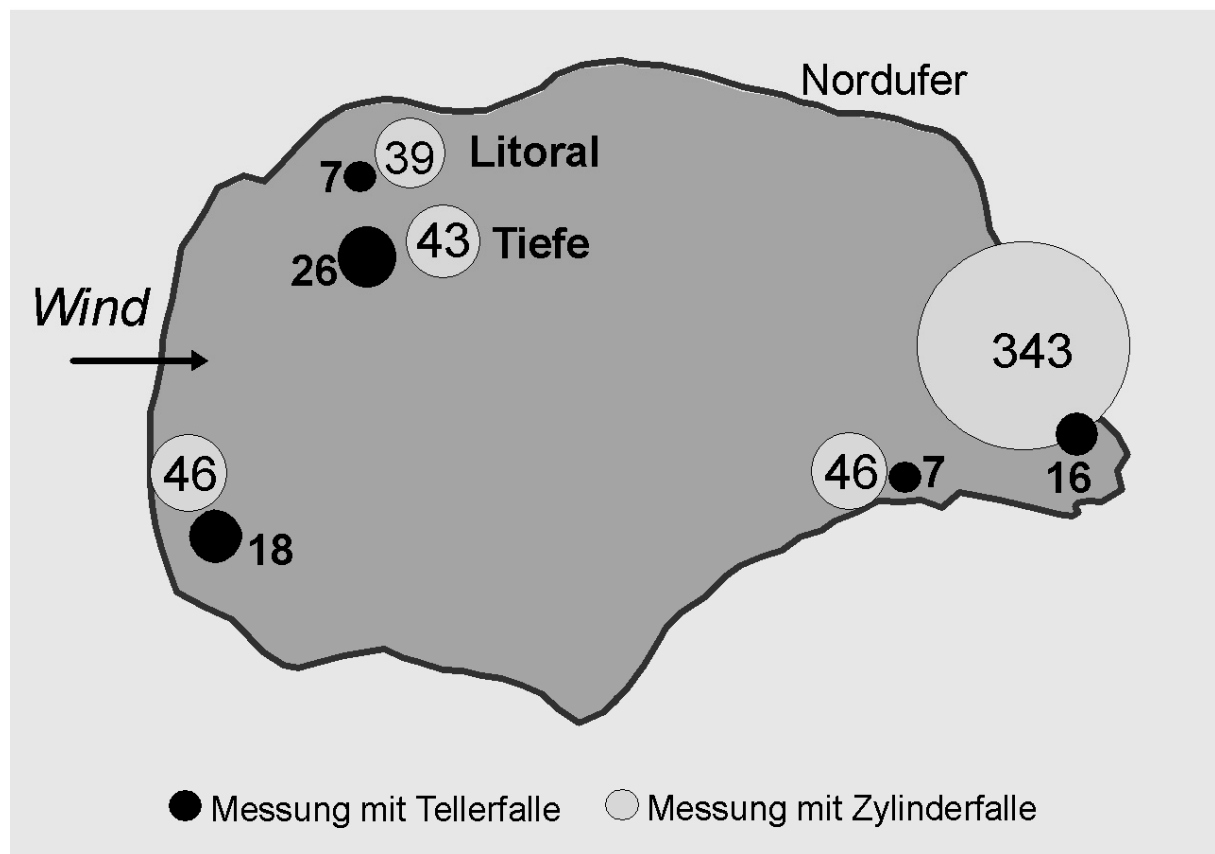
Besonders interessant waren die Untersuchungen in den seitlichen Totzonen der Elbe, die sich zwischen den fast 7000 Bühnenbauwerken befinden. Angetrieben durch die Hauptströmung zirkuliert das Wasser in diesen Bühnenfeldern mit Geschwindigkeiten bis zu etwa 20 cm/s. Mit den Tellerfallen fanden wir sehr unterschiedliche Trappingraten, die geringsten von nur wenigen Gramm Trockenmasse je m<sup>2</sup> und Tag im Bereich der stärksten Zirkulationsströmungen und die höchsten in Ufernähe und im Mittelpunkt der Zirkulation, wo Trappingraten bis zu 1000 g/m<sup>2</sup>/d keine Seltenheit waren. Hier herrschten nahezu ideale Sedimentationsbedingungen, nämlich sehr geringe Scherspannungen und eine ständige Nachlieferung von schnell sinkendem Material aus dem Hauptstrom der Elbe. In einigen Fällen wurden hier so hohe Trappingraten gemessen, wie in den Zylinderfallen, wobei die Zylinderfallen überall nahezu gleich hohe Werte lieferten (SCHWARTZ & KOZERSKI 2003).

Eindrucksvoll ist der Vergleich der flächenhaften Verteilung der Tellerfallenwerte mit dem Muster der in den Bühnenfeldern vorgefundenen Muddeablagerungen, die mit Hilfe der Stabpenetrometrie (KOZERSKI et al. 2001)

erfasst worden sind. Es zeigte sich, dass dort, wo die primäre Sedimentation stark ist, auch Material in größeren Mengen bis zu einer Dicke von 1 m dauerhaft abgelagert wird (SCHWARTZ & KOZERSKI 2003). Es sind folglich nicht morphodynamische Prozesse am Grund während der Totalüberflutung der Buhnen, die das Muster der zum Teil viele Jahrzehnte alten Muddeablagerungen prägen, sondern die primären Sedimentationsprozesse.

Nachteilig bei den Tellerfallenuntersuchungen wirkte sich an der Elbe der Schiffsverkehr aus, denn durch den Sog und die Wellen der Schiffe werden so starke Strömungen erzeugt, dass das bereits gefangene Material nahezu vollständig von den Fallen gespült wird. Man muss daher die Messungen auf den Zeitraum zwischen zwei (nur noch seltenen) Schiffspassagen beschränken und kann somit nur 2 bis 3 Stunden lang oder in nächtlichen Schifffahrtspausen exponieren.

Diese hier nachteilige Eigenschaft der Tellerfalle ist andererseits aber auch sehr positiv zu bewerten, denn sie zeigt den Wechsel von Sedimentation zur Resuspension beim Partikeltransport zwischen Wasser und Sediment an. Der Prozess der Sedimentation wird dann für kurze Zeit umgekehrt um sich danach hier oder an anderer Stelle um so stärker fortzusetzen.



**Abb. 6** Sedimentationsraten [ $\text{g TM m}^{-2} \text{d}^{-1}$ ] im Berliner Müggelsee bei vorherrschenden westlichen Winden. Werte aus Zylinderfallen zu hoch.



Dieses Verhalten der Tellerfalle ist für Messungen in Flachgewässern von entscheidender Bedeutung. Bei starken Winden werden mit der Tellerfalle Nullwerte gemessen, die klar aussagen, dass in dem betrachteten Zeitraum keine Sedimentation stattfand, sondern eher Resuspension. Geringe Werte können bedeuten, dass vor kurzem Resuspension auf der Messfläche stattfand oder dass die Sedimentation unter dem Einfluss der Wasserbewegungen gemindert war.

Wie das Beispiel des Müggelsees zeigt (Abb.6), treten in den flachen und von den Windwellen stark beeinflussten Bereichen geringere Raten auf als an den tiefen und windgeschützten Stellen. Extrem hohe Sedimentationsraten wurden dagegen an den windexponierten Ufern mit den Zylindern gefunden (PLUNTKE & KOZERSKI 2003).

Wir können somit schlussfolgern, dass mit der Tellerfalle Möglichkeiten geschaffen worden sind, unter dem Einfluss von Wasserbewegungen sinnvolle Angaben zur Partikelsedimentation in flachen Seen und Flüssen zu gewinnen.

## **5 Diskussion und Schlussfolgerungen**

Die Palette der angeschnittenen Fragen ist viel größer als in diesem Beitrag Platz zur Diskussion zur Verfügung steht. Man kann aber resümieren, dass die Sedimentation im Gegensatz zur Resuspension ein in zahlreichen Fällen bereits recht gut fassbarer Prozess ist. Die seit etlichen Jahren zum Teil sehr intensiven Entwicklungen werden voraussichtlich in den kommenden Jahrzehnten auch zu in allen Fällen befriedigenden Bestimmungsmethoden für die Sedimentation führen, wobei zu vermuten ist, dass der Aufwand bezüglich der Geräte als auch zur Erfassung der zeitlichen und räumlichen Differenzierung groß sein wird, wenn man den Prozess im Detail quantifizieren und vor allem verstehen will. Die natürlichen hydrodynamischen Bedingungen und die Grenzflächen dürften dabei eine Hauptrolle spielen. Das trifft insbesondere auf die flachen Sedimentfallen zu, von denen wir wissen, dass glatte Plexiglasflächen bereits brauchbare Näherungen liefern, aber raue Flächen zu höheren Sedimentationsraten führen können. Die dabei zu bewältigende Vielfalt wird den Aufwand deutlich erhöhen.

Eine wichtige Fragestellung ist der Einfluss der Unterwasservegetation auf die Sedimentation in den Gewässern, zu der erste Arbeiten vorliegen (SAND-JENSEN 1998, PLUNTKE & KOZERSKI 2003). Ein weiters mit den Sedimentations- und Resuspensionsprozessen verbundenes Forschungsfeld ist die Bildung und der Zerfall von gut sedimentationsfähigen Aggregaten im Wasser und die adhäsive Wirkung von Biofilmen auf den Sedimentationsflächen (KNOBLOCH 2005).

Ungeklärt sind noch eine Reihe von Phänomenen. Ein Beispiel dafür ist die Feststellung von GARDNER (1980), dass bei bereits deutlicher Wasserbewegung in seiner Fließrinne die beste Übereinstimmung mit dem Rückhalt auf dem Rinnenboden nicht mit den randlosen Platten erreicht worden ist, sondern mit den Zylindern. Dieser Befund stimmt mit unseren Untersuchungen nicht überein. Ein zweites Beispiel betrifft einen Großversuch zur Sedimentation mit Lycopodiumsporen in der Spree. Hier haben die Zylinderfallenmessungen eine zumindest genau so gute Näherung für die Gesamtverluste erbracht wie die Tellerfallen (WANNER, pers. Mitteilung). Zu fragen ist in diesem Fall, ob die Makrophytenbestände oder die

kleinen Totzonen an der Flusssohle (Rippeln) Ruhebedingungen für die Sedimentation wie in der Zylinderfalle geboten haben?

Abschließend kann man die im Titel genannte Frage dahingehend beantworten, dass Sedimentation und Resuspension in Flachgewässern zwei weiterhin schwer fassbare Größen sind. Bei vertretbarem Aufwand können heute aber durchaus brauchbare Daten für die Sedimentation gewonnen werden.

## 6 Zusammenfassung

Ausgehend von der Notwendigkeit, Informationen für die mathematische Modellierung von Flachwasserökosystemen zu erhalten, werden die Möglichkeiten geprüft, Sedimentation und Resuspension zu quantifizieren. Als erstes werden einige generelle Probleme der Bestimmung von Masseflüssen durch direkte Messungen und aus Bilanzbetrachtungen diskutiert. Es gibt zurzeit keine Methode, die tatsächliche Resuspension vom Gewässerboden zu messen. Abschätzungen von Resuspensionsraten aus der Konzentrationszunahme des Sestons im Verlaufe von Sturmereignissen sind meist stark fehlerbehaftet. Das betrifft die Bestimmung der tatsächlich wirksamen Bodenflächen und Zeiträume und störende parallel laufende biologische und andere Prozesse. Die Möglichkeiten zur Bestimmung der Sedimentation sind besser. Zylinderfallen sind in der Lage, in stehenden Gewässern präzise zu messen. Im bewegten Wasser (Meer, Flachsee, Fluss) sind zahlreiche theoretische und praktische Probleme noch nicht zufrieden stellend gelöst. Ein Fortschritt ist die Entwicklung der Tellerfallen, auf der das suspendierte Material unter der Wirkung von Gravitation und natürlichen Bodenschubspannungen sedimentiert. Die erfolgreiche Anwendung dieser neuen Falle konnte an Fallbeispielen gezeigt werden. Einige Fragen bleiben aber weiterhin ungeklärt. Es kann geschlussfolgert werden, dass die Resuspension ein weiterhin schwer erfassbarer Stofffluss in Flachgewässern bleibt. Die Sedimentation kann dagegen in zahlreichen Fällen bereits mit tragbarem Aufwand in brauchbarer Näherung bestimmt werden.

### Danksagung

Dank geht an alle, die Fragen und Forderungen zur Messung der Sedimentation gestellt, mit konstruiert und gebaut, gemessen und ausgewertet sowie kritisiert haben. Bedanken möchten wir uns für die Förderung durch das BMBF, die DFG, das IGB und die Forschungskooperationsgemeinschaften in Rostock und Berlin. Gedankt sei auch Frau Dr. Susanne Wanner für die Unterstützung der Fallentests durch den Einsatz von Lycopodiumsporen.

### Literatur

- BLOESCH, J. & BURNS, N. M. (1980): A critical review of sediment trap technique. – Schweizerische Zeitschrift für Hydrologie, 42: 15-56.  
BLOESCH, J. (1994): A review of methods used to measure sediment resuspension. – Hydrobiologia, 284: 13-18.

- BLOESCH, J. (1996): Towards a new generation of sediment traps and a better measurement/understanding of settling particle flux in lakes and oceans: A hydrodynamical protocol. – *Aquatic Sciences*, 58: 283-296.
- FUKUDA, M. K. & LICK, W. (1980): The entrainment of cohesive sediments in freshwater. – *Journal of Geophysical Research*, 85: 2813-2824.
- GARDNER, W. D. (1980): Sediment trap dynamics and calibration: a laboratory evaluation. – *Journal of Marine Research*, 38: 17-39.
- GUST, G.; BOWLES, W.; IORDANO, S. G.; & HÜTTEL, M. (1996): Particle accumulation in a cylindrical sediment trap under laminar and turbulent steady flow: An experimental approach. – *Aquatic Sciences*, 58: 297-326.
- GUST, G. & MÜLLER, V. (1997): Interfacial hydrodynamics and entrainment functions of currently used erosion devices. – [In:] BURT, N.; PARKER, R. & WATTS, J. (Hrsg.): *Cohesive Sediments*. John Wiley & Sons, 149-174.
- GUST, G. & KOZERSKI, H. P. (2000): In-situ sinking-particle fluxes from collection rates of cylindrical traps. – *Marine Ecology Progress Series*, 208: 93-106.
- HOEG, S. & SCHELLENBERGER, G. (1968): Über Änderungen der Lichtextinktion in einem eutrophen See und ihre Ursachen. – *Acta Hydrophysica*, 13: 11-60.
- HUPFER, M. & LEWANDOWSKI, J. (2005): Retention and early diagenetic transformation of phosphorus in Lake Arendsee (Germany) – consequences for management strategies. – *Archiv für Hydrobiologie*, 164: 143-167.
- JEPPESEN, E.; JENSEN, J. P.; SONDERGAARD, M.; HANSEN, K. S.; MOLLER, P. H.; RASMUSSEN, H. U.; NORBY, V.; & LARSEN, S. E. (2005): Does resuspension prevent a shift to a clear state in shallow lakes during reoligotrophication? – *Limnology Oceanography*, 48: 1913-1919.
- KNOBLOCH, C. (2005): Einfluss von Biofilmen auf die Partikelretention in strömendem Wasser. – Diplomarbeit, Fachhochschule Bingen, Fachrichtung 1, Studiengang Umweltschutz, 58 S.
- KÖHLER, J.; OCKENFELD, K.; WANNER, S.; KOZERSKI, H. P.; PUSCH, M.; & HOFFMANN, A. (2000): Production and retention of suspended particles in a lowland river (Krumme Spree, Germany) at two discharge levels. – *Berichte des IGB*, 10: 59-68.
- KÖHLER, J.; GELBRECHT, J. & PUSCH, M. (2002): Die Spree – Zustand, Probleme, Entwicklungsmöglichkeiten. – Schweitzerbartsche Verlagsbuchhandlung, Stuttgart: 379 S.
- KOZERSKI, H. P. & SCHLUNGBAUM, G. (1978): Sedimentchemische Untersuchungen in den Küstengewässern der DDR – IV. Ein Versuch zur Anwendung eines mathematischen Modells für die Berechnung des Phosphoraustausches zwischen Sediment und Freiwasser in der Darß-Zingster Boddenkette. – *Wissenschaftliche Zeitschrift der Wilhelm-Pieck- Universität Rostock, Mathematisch-Naturwissenschaftliche Reihe*, 27: 399-403.
- KOZERSKI, H. P. (1986): The lamella model – A simple mathematical model for estimating sediment transport within a lake. – *Acta Hydrophysica*, Berlin, 30: 73-89.
- KOZERSKI, H. P. (1994a): Entwicklung brauchbarer Methoden zur Messung der Sedimentation in Gewässern. – *Erweiterte Zusammenfassungen der Jahrestagung der DGL in Hamburg*, Krefeld: 734-738.
- KOZERSKI, H. P. (1994b): Possibilities and limitations of sediment traps to measure sedimentation and resuspension. – *Hydrobiologia*, 284: 93-100.
- KOZERSKI, H. P. & KLEEBERG, A. (1998): The sediments and benthic-pelagic exchange in the shallow lake Müggelsee (Berlin, Germany). – *Internationale Revue der gesamten Hydrobiologie*, 83: 77-112.
- KOZERSKI, H. P. & LEUSCHNER, K. (1999): Plate sediment traps for slowly moving waters. – *Water Research*, 33: 2913-2922.
- KOZERSKI, H. P. & KERN, U. (1999): Modifizierte Pipettenmethode zur Ermittlung der Sinkgeschwindigkeit. – [In:] KERN, U. & WESTRICH, B. (Hrsg.): *Methoden zur Erkundung, Untersuchung und Bewertung von Sedimentablagerungen und Schwebstoffen in Gewässern*. DVWK: 369-371.
- KOZERSKI, H. P. & LEUSCHNER, K. (2000): A new plate sediment trap: Design and first experiences. – *Verhandlungen der Internationalen Vereinigung für angewandte und theoretische Limnologie*, 27: 242-245.
- KOZERSKI, H. P.; KUHN, T. & TOTSCHKE, O. (2001): In-situ Messungen der Sedimentationsraten partikulären Materials in Bühnenfeldern der Elbe. – *Erweiterte Zusammenfassungen der Jahrestagung der DGL in Magdeburg*, Tutzing: 121-126.

- KOZERSKI, H. P. (2003a): Seston Sedimentation in a lowland river (River, Germany): Their spatial and temporal variation and controlling factors. – [In:] KRONVANG, B. (Hrsg.): The interactions between sediments and water. Kluwer Academic Publisher: 51-55.
- KOZERSKI, H. P. (2003b): More about plate sediment trap measurements – Reply to the comment of Sukhodolov et al.. – *Water Research*, 37: 2796-2801.
- KOZERSKI, H. P.; Bobbe, T.; Pilz, G. R.; Kiergassner, B. (2003): Stausee-Entleerung in die Kinzig (Hessen): I. Mobilisierte Schlämme und deren Sedimentation in einem Mittelgebirgsfluss. – Deutsche Gesellschaft für Limnologie, Jahrestagung in Köln, Werder: 178-192.
- KOZERSKI, H. P.; HINTZE, T.; PLUNTKE, T. & SIEGEMUND, A. (2004): Does resuspension control the light climate in the shallow lake Müggelsee (Berlin, Germany)? – XXIX SIL Congress, Lahti, Finland, 8.-14. August 2004.
- KRISHNAPPAN, B. G. & DROPPA, I.G. (2005): Use of an in-situ erosion flume for measuring stability of sediment deposits in Hamilton Harbour, Canada. – 10th IASWS-Symposium, Bled/Slovenia, 29.8.–2.9. 2005.
- KRISTENSEN, P.; SONDERGAARD, M. & JEPPESEN, E. (1992): Resuspension in a shallow eutrophic lake. – *Hydrobiologia*, 228: 101-109.
- KRONE, R.B. (1962): Flume studies of the transport of sediment in estuarial shoaling processes. – Final report, Hydraulic Engineering Laboratory and Sanitary Engineering Research Laboratory, Berkeley, Univ. of California
- LAU, Y.L. (1994): Modelling cohesive sediment settling. – *Regulated rivers: Research & Management*: 147-156.
- LEUSCHNER, K. & KOZERSKI, H. P. (1998): Entwicklung von Methoden zur Messung der Partikelsedimentation in Gewässern unter der Wirkung der Bodenschubspannung. – Projektbericht BMBF, IGB Berlin: 70 S.
- MOTHES, G.; DOLLAN, L.; HOFFMANN, I.; KOZERSKI, H. P. & STEINMANN, J. (1986): Der Phosphoraustausch zwischen Sediment und Pelagial im Grossen Müggelsee. – *Acta Hydrophysica*, 30: 91-137.
- PLUNTKE, T. & KOZERSKI, H. P. (2003): Particle trapping on leaves and on the bottom in simulated submerged plant stands. – *Hydrobiologia*, 506-509: 575-581.
- PROCHNOW, J. V.; GUYMER I.; WEST J. & SCHLAEGER, F. (2002): Monitoring von sedimentabhängigen Gewässergüteparametern mit einem in situ Erosionsmessgerät. – *Wasser und Boden*, 54: 39-43.
- PUSCH, M.; KÖHLER, J.; WANNER, S.; OCKENFELD, K.; HOFFMANN, A.; BRUNKE, M.; GRÜNERT, U. & KOZERSKI, H. P. (2001): Ökologisch begründetes Bewirtschaftungskonzept für die Spree unter dem Aspekt der bergbaubedingten Durchflussreduktion. – *Berichte des IGB*, 11: 1-244.
- SAND-JENSEN, K. (1998): Influence of submerged macrophytes on sediment composition and near-bed flow in lowland streams. – *Freshwater Biology*, 39: 663-679.
- SCELLENBERGER, G.; KOZERSKI, H. P. & HOEG, S. (1974): Verbesserte Fassung des rechenbaren biokybernetischen Modells der Boddenkette West bei der Erfüllung der wasserwirtschaftlichen Versorgungsaufgaben. – Forschungsbericht, VD 730-4/74, Akademie der Wissenschaften der DDR, Institut für Meereskunde, Bereich III, Berlin: 1-181.
- SCHMID, G.; WESTRICH, B. & JANCKE, T. (2004): Entwicklung und Einsatz eines mobilen Gerätes zur in-situ Bestimmung der Erosionsstabilität kontaminierter Feinsedimente. – Technischer Bericht Nr. VA 49, 1. 2004. Institut für Wasserbau, Universität Stuttgart.
- SCHNESE, W.; SCHLUNGBAUM, G. & MIEHLKE, O. (1973): Zu Aspekten der Küstenforschung der DDR unter besonderer Berücksichtigung der Aufgaben der Sektion Biologie der Universität Rostock und ihrem Zusammenwirken mit den Kooperationspartnern. – *Wissenschaftliche Zeitschrift der Wilhelm-Pieck- Universität Rostock, Mathematisch-Naturwissenschaftliche Reihe*, 12: 1057-1065.
- SCHWARTZ, R. & KOZERSKI, H. P. (2003): Entry and deposits of suspended particulate matter in groyne fields of the middle Elbe and its ecological relevance. – *Acta hydrochimica et hydrobiologica*, 31: 391-399.
- STENGL, M. (1976): Untersuchungen zur Sedimentation als Beitrag zur Aufstellung einer Energie- und Stoffbilanz im Ökosystem der Darß-Zingster-Boddenkette. – Diplomarbeit, Universität Rostock.
- SCHÜNEMANN, M. & KÜHL, H. (1991): A device for erosion-measurements on naturally formed, muddy sediments: The EROMES-System. – *GKSS-Forschungszentrum Geeshacht*, 91/E/18: 1-28.

SUKHODOLOV, A.; BUNGARTZ, H. & ENGELHARDT, C. (2003): Comment on determination of areal sedimentation rates in rivers by using plate sediment trap measurements and flow velocity - settling flux relationship by Hans-Peter Kozerski. – Water Research, 37: 2795.

**Autor**

Dr.-Ing. Hans-Peter Kozerski  
Leibniz-Institut für Gewässerökologie und Binnenfischerei Berlin  
Müggelseedamm 301  
D-12587 Berlin

E-mail: kozerski@igb-berlin