

11 Zusammenfassung

Ziel der vorliegenden Arbeit war es, Auswirkungen der Hydraulik und fluvialen Sedimentologie auf die Morphologie in Buhnenfeldern zu erfassen und zu quantifizieren. Dabei galt es, wasserbauliche Einflüsse der Buhnen auf die Hydromorphologie in Buhnenfeldern (mikroskalig) von flussgebietsabhängigen (makro- bis mesoskaligen) Eigenschaften abzugrenzen. Aus dieser hydromorphologischen Auswertung ergaben sich Ansätze zur Charakterisierung von Lebensräumen und deren Verfügbarkeit für unterschiedliche Tiergruppen (Fische, Makrozoobenthos, Laufkäfer). Die Anwendung neuentwickelter und verbesserter Messmethoden der letzten Jahre und die Datenauswertung in einem Geografischen Informationssystem (GIS) ermöglichte eine umfassende Analyse von mit Buhnen verbauten Uferbereiche der unteren Mittelelbe.

Die Arbeit konzentrierte sich im Rahmen zweier Projekte auf Untersuchungen zur Hydromorphologie und Morphodynamik von Buhnenfeldern zwischen den El-km 418,2 und 453,1. Der Schwerpunkt lag auf dem Vergleich von drei Flussabschnitten (Mesoskala), die sich vor allem sedimentologisch unterschieden sowie auf der Analyse von Auswirkungen unterschiedlicher Buhnentypen und -erhaltungszustände auf Morphologie, Strömung und Substratverteilung in den Buhnenfeldern (Mikroskala). Über einen Zeitraum von 5 Jahren wurden regelmäßige Naturuntersuchungen (Aufnahmen der Sohltopografie, Strömungen und Substratverhältnisse) sowie Feldversuche zu Turbulenzen und Hydraulik bei nicht überströmten Buhnen durchgeführt. Die morphologischen und hydraulischen Daten wurden in einem GIS quantifiziert und die Korngrößenverteilungen kartografisch und anhand von Summenkurven ausgewählter Proben dargestellt.

Digitale Geländemodelle dienten der Erfassung morphologischer Eigenschaften der Buhnenfelder und der Beschreibung von Merkmalen wie Ausdehnungen, Lagen, Strukturen und Flächenverhältnissen. Mittels eines GIS erfolgte für Wasserstände von Niedrigwasser bis ausufernden Wasserstand die Quantifizierung von Wasserflächen, Verlandungsanteilen, Durchschnittstiefen und Uferlinienlängen sowie die Auswertung in Kurvendiagrammen. Anhand der Durchschnittstiefen wurden weiterhin die Sedimentationsmächtigkeiten in den Buhnenfeldern ermittelt. Dabei erfolgt die Berechnung über die Differenz zwischen dem durchschnittlichen Höhenniveau der flusseitigen äußeren Buhnenfeldbereiche und dem durchschnittlichen Höhenniveau der gesamten Buhnenfeldfläche.

Die Unterschiede der Sedimentationsmächtigkeiten waren, mit Ausnahme eines Buhnenfeldes mit besonders weiten Buhnenabständen, zwischen den drei Flussabschnitten größer

als zwischen beprobten Flächen innerhalb der Abschnitte, so dass auf mesoskalig prägende Randbedingungen geschlossen werden kann. Der Bereich von El-km 418,2 bis 423,4 wies die höchsten durchschnittlichen Mächtigkeiten der Auflagen von ca. 1,60 bis 1,80 m auf, für Bühnenfelder von El-km 443,5 bis 453,1 wurden Mächtigkeiten von ca. 1 bis 1,30 m errechnet und die geringsten Mächtigkeiten von ca. 0,60 bis 1 m bestanden, von der oben genannten Ausnahme abgesehen, in den untersuchten Bühnenfeldern von El-km 440,2 bis 441.

Die mikroskaligen Unterschiede zwischen den verschiedenen Bühnenfeldern ließen sich am besten durch den Uferlinienindex beschreiben, welcher die Länge der tatsächlichen Uferlinie zum Abstand der Bühnenköpfe und der Länge beider Bühnen (idealisierte Uferlinie) ins Verhältnis setzt. Insbesondere bei erhöhten Niedrigwasserständen gaben die Uferlinienindizes die morphologische Heterogenität, welche durch Buhnendurchbrüche gefördert wird, wieder. Da Buhnendurchbrüche zu kleinräumigen Erosionen führen, sind bei diesen Wasserständen Verlandungsformen oftmals von Uferbereichen abgetrennt und es bilden sich inselartige Strukturen heraus. Diesen Flächen und den sie umgebenden aquatischen Flachwasserzonen kommt eine besondere Bedeutung zu, da aufgrund der Entwicklung der Elbe zu einem relativ schmalen und tiefen Flusslauf wenige Inseln und kaum noch temporäre Sandbänke vorhanden sind. Bühnenfelder mit inselartigen Strukturen erreichen Uferlinienindizes von 1,4 bis 1,8 während die Indizes in strukturarmen Bühnenfeldern bei allen Pegelständen unter 1 liegen können.

Der Parameter Sedimentmächtigkeit und der Uferlinienindex waren gut geeignet mesoskalige bzw. mikroskalige Ausprägungen der Morphologie darzustellen. Demnach sind Unterschiede der Sedimentation überwiegend flussgebietsabhängig, d.h. von makro- und mesoskaligen Effekten gesteuert. Diese Verlandungen werden allerdings durch die Bühnenformen innerhalb der Bühnenfelder modifiziert. Damit bilden sich kleinräumige Strukturen heraus, die mittels des Uferlinienindex gut quantifiziert werden können.

Umfangreiche Untersuchungen fanden zur Hydraulik in Bühnenfeldern bei nicht überströmten, gering überströmten und um mehrere Meter überströmten Bühnen statt. Strömungen wurden in unterschiedlichen Tiefen mittels Ultraschallmessgeräten aufgezeichnet und die Werte anschließend in die Fläche interpoliert. Eine Plausibilisierung der Ergebnisse wurde über den Vergleich von interpolierten Vektoren mit Strömungsrosen durchgeführt. Bei nicht überströmten Bühnenfeldern wurde die zentrale Bühnenfeldwalze von der Form und Struktur der Bühnen, den Ausdehnungen der Bühnenfelder, den Lagen und der Morphologie beeinflusst. Diese Walze sowie Sekundärwalzen, Stillwasserbereiche und stärker durchströmte Bereiche waren mittels der interpolierten Strömungsverteilungen und kartografischen

Darstellung gut zu identifizieren. Anhand der hydraulischen Modelle konnten für die Bühnenfelder für unterschiedliche Wasserstände durchschnittliche Strömungsgeschwindigkeiten berechnet werden, die Abhängigkeiten von den genannten Randbedingungen gut wiedergaben. Bei überströmten Bühnen wirkten sich Ausrichtung, Form und Erhaltungszustand partiell auf die Strömungsmuster aus und führten zu Bündelungen und Veränderungen von Fließgeschwindigkeiten.

Bühnen verursachen eine unterschiedliche Verteilung von Strömungsgeschwindigkeiten im Flussquerschnitt. Während sich die Fließgeschwindigkeiten im Hauptstrom aufgrund der Querschnittsverengung erhöhen, sind die Strömungen in den modifizierten Uferbereichen reduziert. Die Fließgeschwindigkeiten im Hauptstrom übertreffen die Fließgeschwindigkeiten in den Bühnenfeldern bei Niedrigwasser und niedrigem Mittelwasser um das 3 bis 7-fache, bei überströmten Bühnen verringert sich die Differenz auf das 2 bis 3-fache. Dieser Unterschied im Querschnitt führt zu einer erhöhten Verlandungsneigung der Uferbereiche und aus ökologischer Sicht zu modifizierten und deutlich abgegrenzten Lebensraumbedingungen.

Für die Hydraulik in Bühnenfeldern konnten keine flussgebietsabhängigen Differenzen wie bei Sedimentationsmächtigkeiten und Korngrößenverteilungen festgestellt werden. Die Unterschiede waren mehr von den Lagen und den Bühnenstrukturen beeinflusst. Bei nicht überströmten Bühnen wurden in Bühnenfeldern mit durchbrochenen Bühnen höhere Fließgeschwindigkeiten als in Vergleichsbühnenfeldern gleicher Lagen mit intakten Bühnen gemessen. Der Einfluss von Bühnendurchbrüchen spiegelte sich auch in leicht erhöhten Durchschnittsgeschwindigkeiten des gesamten Bühnenfeldes wieder, dennoch waren die Unterschiede zwischen den Bühnenfeldern geringer als erwartet. Die Durchschnittsgeschwindigkeiten lagen bei Niedrig- und niedrigem Mittelwasserständen zwischen $10,2$ und $18,6 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$, bei gering überströmten Bühnen zwischen $19,8$ und $34,5 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$ und bei Hochwasser zwischen $62,2$ und $75,7 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$. Die Untersuchungen der Hydraulik bei unterschiedlichen Abflüssen bildeten auch die Grundlage für die Berechnungen von Sohlschubspannungen, um insbesondere bei Hochwasser potenzielle Erosions- und Akkumulationsbereiche identifizieren zu können.

Die hohe zeitliche Auflösung der eingesetzten Strömungsmessgeräte zeigte bei Wasserständen nicht überströmter Bühnen komplizierte Strömungsverhältnisse auf, die mit Richtungsänderungen und variierenden Fließgeschwindigkeiten in bestimmten Bereichen einhergingen. Gleichzeitig war ein ständiges Steigen und Fallen der Wasserspiegellagen um wenige Zentimeter zu beobachten. Die Zusammenhänge periodischer Wasserspiegelschwankungen und regelmäßiger Strömungsänderungen in Totwasserbereichen entlang von Rinnen waren

theoretisch und experimentell in Laboren bereits beschrieben worden. Auch regelmäßige Veränderungen physikalisch-chemischer Parameter in kurzen zeitlichen Abständen in Buhnenfeldern sind seit neuerem bekannt. Für die weitere Auswertung war es notwendig zu klären, inwiefern es sich auch in Buhnenfeldern um regelmäßige, stationäre oder um ungleichmäßige, instationäre Vorgänge handelt, die eine Interpolation von nicht repräsentativen Momentaufnahmen nicht gestattet hätten. In zwei unterschiedlich strukturierten Buhnenfeldern ergaben die Ergebnisse von Feldversuchen regelmäßige Zusammenhänge verschiedener Strömungsabläufe und Wasserspiegelschwankungen in einem ca. 4- bis 5-minütigen Rhythmus.

Die Wasseraustauschzeiten in Buhnenfeldern lagen je nach Wasserstand und Erhaltungszustand der Buhnen bei ca. 18 bis 67 Minuten. Auswirkungen des Schiffsverkehrs auf die Hydraulik in Buhnenfeldern waren in die Versuche integriert. Eine ca. einminütige Durchfahrt eines Güterschiffes kann aufgrund der einwirkenden Wellensysteme sowie von Sog und Schwall den Abfluss von einem Drittel des Wasservolumens verursachen, welches unter ungestörten Verhältnissen nach ca. 6 bis 22 Minuten ausgetauscht wird. In den ansonsten strömungsberuhigten Bereichen wurden dabei z.T. Fließgeschwindigkeiten von bis zu $50 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$ gemessen.

Korngrößenverteilungen wurden an den Probenahmestellen der Buhnenfeldern dargestellt. Interpolationen erfolgten nur beispielhaft im Zusammenhang mit ökologischen Fragestellungen für einzelne Fraktionen oder Durchschnittswerte. Weiterhin wurden für Querprofile von der Uferlinie zu den äußeren Bereichen der Buhnenfelder die Korngrößenverteilungen als Summenkurven veranschaulicht. Überwiegend konnten Zunahmen gröberer Fraktionen in Richtung des Flussschlauches sowie Einflüsse von Buhnen auf die kleinräumige Verteilung festgestellt werden.

Sämtliche Proben der jeweiligen Buhnenfelder, die in vergleichbaren Rastern entnommen worden waren, wurden weiterhin zusammengefasst, um für jedes Buhnenfeld eine charakterisierende Verteilung zu erhalten. Die mesoskaligen, von den Flussabschnitten abhängenden Einflüsse wurden so offensichtlich. Obwohl die Korngrößenverteilungen innerhalb der Buhnenfelder sehr heterogen sind und an vielen Stellen in bimodaler Verteilung vorliegen, ergeben sich bei den aggregierten Verteilungen relativ einheitliche Ausprägungen innerhalb und deutliche Unterschiede zwischen den drei untersuchten Flussabschnitten. Ein Vergleich mit den Korngrößen im Hauptstrom zwischen den Flussabschnitten bestätigte den Zusammenhang mit den wechselnden Verhältnissen. So spiegelt sich die sprunghafte Verschiebung von gröbereren zu feineren Fraktionen unterhalb der Havelmündung sowie die an-

schließende Entmischung und Abnahme der Feinanteile im weiteren Flussverlauf ebenso in den Verteilungen der Bühnenfelder wie denen des Hauptstroms wieder. Das mesoskalig beeinflusste Sedimentangebot des Flusses dominiert gegenüber den Einwirkungen unterschiedlicher Bühnentypen und –erhaltungszuständen, die lediglich modifizierend wirken.

Die Flächen von 9 Bühnenfeldern unterhalb von EI-km 440,2 wurden nach unterschiedlichen Abflussphasen, inklusive des Sommerhochwassers 2002 wiederholt eingemessen und in Geländemodellen verarbeitet um Sedimentationen zu lokalisieren und zu quantifizieren. Es erfolgten sowohl kartografische Darstellungen der Erosions- und Akkumulationsbereiche als auch eine Bilanzierung der Veränderungen der Oberflächen im GIS nach einzelnen und aggregierten Phasen. Für die beiden Hochwässer wurden in dem GIS die Sohlschubspannungen berechnet und die nach DIN 19661 kritischen Sohlschubspannungen für die relevanten Kornfraktionen dargestellt. Der Einfluss des Sommerhochwassers 2002, der im Gegensatz zum Winterhochwasser auch die inneren Bereiche der Bühnenfelder betraf, wurde verdeutlicht und korrespondierte mit den Sedimentationsbilanzen.

Die Bilanz der Mittel- und Niedrigwasserphase 2001 wies für alle ausgewerteten Bühnenfelder durchweg Sedimenteinträge auf. Das zwei- bis dreijährliche Winterhochwasser ergab für die Bühnenfelder keinen eindeutigen Trend, es kam in den unterschiedlichen Flächen sowohl zu Nettoeinträgen als auch –austrägen, während die Auswirkungen des extremen Sommerhochwasser 2002 einheitlicher waren und mit Ausnahme eines Bühnenfeldes zu Nettoausträgen von Sedimenten führten. Die Nettoausträge des Sommerhochwassers sowie die Gesamtbilanz über die drei Phasen führten zu einer ähnlichen Differenzierung der Bühnenfelder wie die Berechnung der langfristigen entstandenen Sedimentmächtigkeiten. Die höchsten Austräge fanden in den Bühnenfeldern des oberstrom gelegenen Abschnitts von EI-km 440,2 bis 441 statt, die auch überwiegend geringere Sedimentmächtigkeiten aufwiesen. In den unterstrom gelegenen Bühnenfeldern von EI-km 443,5 bis 443,9 traten geringere Austräge und in der Gesamtbilanz sogar eine Verlandungstendenz auf, was mit den höheren Sedimentmächtigkeiten korrespondiert. Die Ursachen liegen in den höheren Anteilen der Feinfraktion der oberstrom gelegenen Bühnenfelder. Dieses feinere Material wird schneller mobilisiert als die gröberen Substrate der unterstrom gelegenen Bühnenfelder.

Das Sommerhochwasser sowie die massiven Sedimentausträge dürfen als Ausnahmeereignisse für eine mittelfristige Prognose nicht überbewertet werden. Die Bilanz nach der jährlich auftretenden Mittel- und Niedrigwasserphase und dem zwei- bis dreijährlichen Winterhochwasser ergab in den Bühnenfeldern überwiegend Nettoeinträge und einen durchschnittlichen Eintrag von 200 m³ pro Bühnenfeld. Die Verlandungstendenz setzt sich dem-

nach auch in den bereits stark zusedimentierten Bühnenfeldern fort. Eine Hochrechnung dieses durchschnittlichen Eintrags für einen größeren Flussabschnitt und Vergleich mit Jahresfrachten des Sedimenttransports ergab, dass die Bühnenfelder bis zu 50 % der jährlichen Sedimentfracht aufnehmen.

Ein Aspekt der vorliegenden Arbeit ist die Verknüpfung der hydromorphologischen Analysen mit Habitatpräferenzen verschiedener Tiergruppen. Habitatpräferenzen wurden von mehreren Instituten im Rahmen von Verbundprojekten untersucht. Im Mittelpunkt stand das im Rahmen des BMBF-Verbundprojektes „Ökologische Zusammenhänge zwischen Fischgemeinschafts- und Lebensraumstrukturen der Elbe“ entwickelte Modulare Habitatmodell (MHM), welches anhand von drei Modulen zu Habitatpräferenzen, Hydromorphologie und Habitatbilanzierung diese Verknüpfung durchführt. Das MHM ist als fischökologisches Habitatmodell entwickelt worden und ermittelt für die Mittelelbe die Bedeutung unterschiedlicher Habitatfaktoren für einzelne Entwicklungsstadien dominierender Fischarten. Über die Verschneidung von Habitatfaktoren wie Wassertiefe, Fließgeschwindigkeit, Sohlneigung und Substrattyp mit den Ergebnissen des Präferenzmoduls erfolgt eine Bilanzierung der Habitat-eignung. Auf dieser Basis werden die Habitatverfügbarkeiten der einzelnen Bühnenfelder erfasst. Für bestimmte Entwicklungsstadien wurde das MHM für die Habitatfaktoren Morphologie und Fließgeschwindigkeit angewendet. Den von Fischbiologen zuvor im Präferenzmodul identifizierten Gruppen gleicher Habitatpräferenzen konnten präferierte Mikrohabitat-typen zugeordnet werden. Die Anwendung des Bilanzmoduls ergab, dass in den untersuchten Bühnenfeldern nur der Typ „flach auslaufende Uferzonen“ häufig vorkam. Defizitär vertreten waren die präferierten Mikrohabitat-typen „flache Stillwasserbereiche“, „stärker durchströmte Uferzonen“, „Steilufer“, „tiefere Bereiche“ und „moderate Uferneigung“.

Zusätzlich zu den fischbiologischen Auswertungen wurde das hydromorphologische Modul für Makrozoobenthos und Laufkäfer angewendet. Für diese Tiergruppen wurden auf der Basis von Habitatpräferenzen für ausgewählte Gattungen bzw. Arten ihre räumliche Verteilung in unterschiedlichen Bühnenfeldern und Flussabschnitten untersucht und prognostiziert. Der für die Fischarten gewählten Kombination der Habitatfaktoren Morphologie und Fließgeschwindigkeit folgten für Makrozoobenthos die Kombination Korngrößen und Fließgeschwindigkeiten und für Laufkäfer Korngrößen und Morphologie. Bei beiden Tiergruppen handelt es sich um bodenbewohnende Lebewesen, weshalb das Substrat einen limitierenden oder selektiven Faktor darstellt und flussgebietsabhängige Bedingungen gegenüber kleinräumigen Strukturen dominieren. Geeignete Flächen wurden z.B. für die das Benthos besiedelnden Gattungen *Rheotanytarsus* (Zuckmücken) und *Ostracoda* (Muschel-

krebse) nur oberhalb von El-km 425 bilanziert, da unterhalb in den untersuchten Buhnenfeldern keine ausreichenden Anteile gröberer Fraktionen vorhanden waren.

Die Eigenschaften von Laufkäferhabitaten wurden in Buhnenfeldern der beiden Flussabschnitte 440,2 bis 441 und 443,5 bis 443,9 untersucht. Wie gezeigt wurde, unterscheiden sich diese Gebiete hinsichtlich der Sedimentmächtigkeiten und der Substrate, die sich wiederum auf Verlandungsgrade und die Ausdehnung trockenfallender Flächen mit geringer Vegetationsbedeckung auswirken. Die Haveleinmündung und der Wechsel der Flussmorphologie unterhalb des Elbeknies bei El-km 427 führen somit zu unterschiedlichen Artengemeinschaften der beiden unterstromigen Bereiche. Die Buhnentypen haben einen geringeren Einfluss und wirken sich am deutlichsten unterhalb von Durchbrüchen aus, wo die Anteile an Feinsanden und Schluffen reduziert sind.

Die Verlandung der Buhnenfelder, welche dauerhaft zu einer Abnahme aquatischer und semiaquatischer Lebensräume führt, ist nach über einem Jahrhundert der Uferverbauung an der Elbe noch nicht abgeschlossen. Dieses Problem ist allgemein anerkannt, wird aber in der Abwägung von Ökonomie und Ökologie zur Zeit nicht im Sinne der Ökologie behandelt. Die Modifizierung von Buhnentypen als Voraussetzung für die Schaffung heterogener Strukturen, die Funktionen als Ersatzhabitate für verlorengegangene Habitate im Flussschlauch übernehmen, ist als Ansatz richtig. Morphologie und Verteilung von Sedimenten innerhalb der Buhnenfelder werden durchaus von den alternativen Buhnentypen verändert. Die Wirkungen dieser Maßnahmen, die sich aktuell im Versuchsstadium befinden, werden aber nach den Untersuchungen als nicht ausreichend eingeschätzt, da die voranschreitende Verlandung die kleinräumig begrenzten Effekte überlagert und neu entstehende Strukturen voraussichtlich nicht von Dauer sein werden.

Der erhebliche Einfluss von Regelbuhnen auf die Morphologie wird bei einem Vergleich von Elbe und Weichsel, einem hinsichtlich des Abflusses und der Substrate vergleichbaren Tieflandfluss, deutlich. Die Weichsel ist durch Deichbau hochwasser-, aber kaum mittelwasserreguliert. Laufverzweigungen und temporäre oder permanente Inseln sind noch in großer Anzahl vorhanden. Die Entwicklung der Elbe zu einem ähnlich naturnahen Fluss wäre nur über passive oder aktive Renaturierungen, also eine Aufgabe der Unterhaltungsmaßnahmen oder einen Rückbau der Verbauungen möglich. Möglicherweise wird die Elbe als Bundeswasserstrasse in Zukunft nach der Europäischen Wasserrahmenrichtlinie als erheblich verändertes Oberflächengewässer ausgewiesen und die Nutzung nicht geändert. Damit würden weniger strenge Umweltziele festgelegt. Angestrebt würde nicht der ökologisch gute Zustand sondern das höchste ökologische Potenzial, was allerdings eine Verschlechterung

verbietet und alle praktikablen Vorkehrungen zu deren Vermeidung vorschreibt. Auch die Ausweisung von FFH-Gebieten an der Elbe bedeutet ein Verschlechterungsverbot für zu schützende Lebensräume von Tier- und Pflanzenarten. Vor diesem Hintergrund sowie einer fortschreitenden Verlandung der Bühnenfelder werden an die Flussabschnitte angepasste Modifizierungen der Regulierungsbauwerke weit über den bisherigen Umfang hinaus sowie intensive Pflegemaßnahmen von Uferbereichen und dauerhaftes Monitoring von Referenzflächen empfohlen.