6 Hydraulik in Buhnenfeldern

Buhnenfelder sind durch den Buhnenbau verursachte künstliche Ausbuchtungen entlang der Ufer und stellen ein Phänomen dar, welches in dieser Gleichmäßigkeit und Durchgängigkeit natürlicherweise nicht vorkommt. Die Hydraulik des Flusses wird dabei auf verschiedenen Skalenebenen beeinflusst. Die mikroskalige Wirkungsweise von Buhnen auf Strömungen in Buhnenfeldern ist von Abflüssen und Wasserständen abhängig. Bei nicht überströmten Buhnen werden die Strömungen unterhalb der Buhnenköpfe von Wirbeln in der Scherzone und im Innern der Buhnenfelder von Walzen mit vertikaler Achse bestimmt (vgl. Abb. 3-14), während sich unterhalb von überströmten Buhnen Deckwalzen mit horizontaler Achse bilden, die die Feldwalzen beeinflussen und überprägen (NEGER 1932). Mit zunehmender Höhe der Überströmung verändern sich die hydraulischen Verhältnisse gegenüber denen bei nicht überströmten Buhnen aufgrund von abnehmendem Einfluss der Sohltopografie, größerem hydraulischen Radius und erhöhten Fließgeschwindigkeiten grundlegend. Dies wirkt sich weiterhin auf den Energieentzug aus dem Hauptstrom aus und mindert die Differenz der Fließgeschwindigkeiten der Buhnenfelder und des Flussschlauchs.

Die grundsätzlichen Einflüsse des Buhnenbaus auf die Morphodynamik sind seit längerem bekannt. Unterschiedliche Randbedingungen modifizieren jedoch die in Kapitel 3-14 schematisierten Verhältnisse und machen die Aufnahme der Hydraulik verschiedener Buhnenfelder bei Niedrig-, Mittel- und Hochwasser sowie eine qualitative Beschreibung und quantifizierende Auswertung notwendig. Die ermittelten Fließgeschwindigkeiten innerhalb der Buhnenfelder zu unterschiedlichen Wasserständen bilden die Voraussetzung für weitere Analysen morphologischer Merkmale sowie von Korngrößenverteilungen, Sohlschubspannungen und Habitatverfügbarkeit.

6.1 Räumliche Verteilung von Fließgeschwindigkeiten unterschiedlicher Abflusszustände

Flächeninterpolationen gemessener Werte dienen der Herstellung des Raumbezugs und der Gewichtung der Einzelwerte hinsichtlich des Abstandes zu benachbarten Messwerten. Die hydraulischen Modelle ermöglichen visuelle Erfassungen von Einflussfaktoren auf die Strömung und die Plausibilisierung der Ergebnisse und sind die Voraussetzung für die spätere Ermittlung von Kennwerten wie Perzentil- oder Durchschnittswerten der Fließgeschwindigkeiten in Buhnenfeldern unterschiedlicher Strukturen. Die Pegelangaben in den Abbildungsunterschriften stehen für die Pegel Wittenberge (WB) und Havelberg (HB).

6.1.1 Hydraulische Verhältnisse bei Hochwasser

Während des Winterhochwassers 2002 erfolgten am 6. und 7. Februar bei einem Pegelstand von 570 cm (Pegel Wittenberge) Messfahrten mit einem ADCP. Die Fließgeschwindigkeiten wurden in Vertikalprofilen von ca. 70 cm unterhalb der Oberfläche bis ca. 60 bis 80 cm über Grund gemessen. Abb. 6-1 stellt die oberflächennahen Fließgeschwindigkeiten in Klassen von 10 cm \cdot s⁻¹ an den einzelnen Positionen in den Knickbuhnenfeldern (El-km 440,2 bis 440,5) dar, die entlang der abgefahrenen Linien in Abständen von 2,5 m liegen. Die Fließgeschwindigkeiten über den Buhnen sind aufgrund der Querschnittsverengungen auf ca. 100 cm \cdot s⁻¹ erhöht und die hohen Fließgeschwindigkeiten im Hauptstrom liegen zwischen 140 bis 160 cm \cdot s⁻¹. Für eine flächendeckende Beschreibung und eine anschließende quantitative Flächenauswertung wurden die Messwerte in die Fläche interpoliert (Abb. 6-2).



Abb. 6-1: Messwerte oberflächennaher Fließgeschwindigkeiten (cm \cdot s⁻¹) der Knickbuhnenfelder El-km 440,2 bis 440,5 während des Winterhochwassers 2002; WB = 570 cm



Abb. 6-2: Interpolierte oberflächennahe Fließgeschwindigkeiten (cm \cdot s⁻¹) der Knickbuhnenfelder El-km 440,2 bis 440,5 des Winterhochwassers 2002, WB = 570 cm

In den Buhnenfeldern lassen sich unterschiedliche Strömungsbereiche abgrenzen. Strömungsberuhigte Flächen treten hinter den Buhnenköpfen der drei unteren Buhnenfelder und in Ufernähe (10 bis 30 cm \cdot s⁻¹) auf. In den zentralen Bereichen sind die Fließgeschwindigkeiten deutlich erhöht und erreichen Werte bis 90 cm \cdot s⁻¹. Der angestrebte Effekt einer mittigen Bündelung der Strömung des Knickbuhnentyps kann somit bestätigt werden (Abb. 6-2).



Abb. 6-3: Messwerte sohlennaher Fließgeschwindigkeiten (cm \cdot s⁻¹) der Knickbuhnenfelder El-km 440,2 bis 440,5 während des Winterhochwassers 2002, WB = 570 cm



Abb. 6-4: Interpolierte sohlennahe Fließgeschwindigkeiten (cm \cdot s⁻¹) der Knickbuhnenfelder El-km 440,2 bis 440,5 des Winterhochwassers 2002, WB = 570 cm

Abbildung 6-3 veranschaulicht zum Vergleich die oberhalb der Sohle gemessenen Werte. Die Fließgeschwindigkeiten sind reduziert und erreichen überwiegend nur noch bis zu 70 cm \cdot s⁻¹ in den zentralen und bis zu 20 cm \cdot s⁻¹ in den Eckbereichen unterhalb der Buhnenwurzeln und –köpfe. Über den Buhnen tritt aufgrund der Querschnittsverengung keine Reduzierung ein. Die Verteilung der Flächenanteile in den Buhnenfeldern ist ähnlich den oberflächennahen Verteilungen, wobei allerdings deutlich größere strömungsberuhigte Flächen zu verzeichnen sind (Abb.6-4). Unterschiede in den Verteilungsmustern oberflächen- und sohlnaher Strömungen bestehen vor allem am Buhnenkopf des obersten Buhnenfeldes 440,2. Hier herrschen an der Oberfläche hohe Geschwindigkeiten, die zur Sohle hin wesentlich stärker abnehmen, als in den übrigen Bereichen. Dies ist ein Anzeichen für ausgeprägte Verwirbelungen.



Abb. 6-5: Interpolierte oberflächennahe Fließgeschwindigkeiten (cm \cdot s⁻¹) der Regelbuhnenfelder El-km 440,9 und 441 des Winterhochwassers 2002, WB = 572 cm



Abb. 6-6: Interpolierte oberflächennahe Fließgeschwindigkeiten (cm - s⁻¹) der Absenkungsbuhnenfelder El-km 443,5 und 443,6 des Winterhochwassers 2002, WB = 572 cm



Die Abbildungen 6-5 und 6-7 stellen die interpolierten oberflächennahen Fließgeschwindigkeiten der Referenzbuhnenfelder dar. In den Buhnenfeldern bei El-km 440,9 und 441 sind die Fließgeschwindigkeiten in den zentralen Bereichen mit Werten von überwiegend unter 50 cm \cdot s⁻¹ als eher gering einzuordnen. In den äußeren Bereichen hingegen treten hohe Fließgeschwindigkeiten bis über 100 cm \cdot s⁻¹ auf. Eine leichte Erhöhung konnte auch über der inselartigen Erhöhung in Buhnenfeld 440,9 und unterhalb der Buhnen festgestellt werden, was mit Querschnittsverengungen zu erklären ist.

Das oberstromige Buhnenfeld der Absenkungsbuhnen bei El-km 443,5 und 443,6 weist von allen untersuchten Buhnenfeldern die meisten Flächenanteile mit erhöhten Fließgeschwindigkeiten auf (Abb. 6-6). Strömungsberuhigte Flächen befinden sich nur in Ufernähe. Der modifizierte, befestigte und hinsichtlich des Querschnitts verkleinerte vormalige Durchriss der oberen Buhne wirkt sich vor allem im oberen Bereich des Buhnenfeldes aus, was durch das abgelagerte Material im Leebereich der Absenkung noch verstärkt wird. Über dieser künstlichen Ablagerung wurden erhöhte Werte gemessen, während unterstromig die Werte abnehmen. In Buhnenfeld 443,6 sind die strömungsberuhigten Flächen deutlich ausgedehnter. Erhöhte Fließgeschwindigkeiten konnten im äußeren Bereich unterhalb der oberstromigen Buhne gemessen werden. Im unteren Teil des Buhnenfeldes nehmen auch hier die Werte auf unter 60 cm · s⁻¹ ab. Die Auswirkungen der Absenkungsbuhne fallen in diesem Buhnenfeld in Ufernähe deutlich auf. Das Referenzbuhnenfeld 443,9 (Abb. 6-7) ist bezüglich der Verteilung der strömungsberuhigten und stärker durchströmten Flächen mit den Buhnenfeldern 440,9 und 441 vergleichbar, welche ebenfalls zwischen inklinanten Regelbuhnen liegen. Stark durchströmt sind, mit Ausnahme einer strömungsberuhigten Fläche in Buhnenkopfnähe, die äußeren Bereiche sowie Flächen unterhalb der oberen Buhne.

6.1.2 Hydraulische Verhältnisse bei hohem Mittelwasser

Während des schwach ausgeprägten Frühjahrshochwasser 2001 wurden am 11. und 12. April bei Pegelständen von 380 und 372 cm (Pegel Wittenberge) Strömungsmessungen mit einem ADCP bei gering überströmten Buhnen (< 1m Überströmung) durchgeführt. Für die Knickbuhnenfelder (El-km 440,2 bis 440,5) werden zur Veranschaulichung der Ableitung der Fließgeschwindigkeitsdarstellungen erneut die gemessenen Werte an den jeweiligen Positionen oberflächen- und sohlennah dargestellt. Die Abstände zwischen den einzelnen punktuell dargestellten Messwerten liegen bei 5 m (Abb. 6-8 und Abb. 6-10). Die Zunahmen der Fließgeschwindigkeiten über den Buhnen betragen hier ca. 60 cm \cdot s⁻¹ und die Geschwindigkeiten im Hauptstrom liegen bei 80 bis 120 cm \cdot s⁻¹.



Abb. 6-8: Messwerte oberflächennaher Fließgeschwindigkeiten (cm \cdot s⁻¹) der Knickbuhnenfelder El-km 440,2 bis 440,5 bei hohem Mittelwasser 2001, WB = 380 cm



Abb. 6-9: Interpolierte oberflächennahe Fließgeschwindigkeiten (cm \cdot s⁻¹) der Knickbuhnenfelder El-km 440,2 bis 440,5 bei hohem Mittelwasser 2001, WB = 380 cm

In geringerem Maße als bei Hochwasserabflüssen sind auch bei diesen Wasserständen unterhalb der Knicke erhöhte Fließgeschwindigkeiten vorhanden. Diese sind oberflächennah (Abb. 6-9) deutlicher als sohlennah zu erkennen (Abb. 6-11). Die ruhigeren Strömungsbereiche überwiegen und es besteht ein scharfer Übergang zum Hauptstrom.



Abb. 6-10: Messwerte sohlennaher Fließgeschwindigkeiten (cm \cdot s⁻¹) der Knickbuhnenfelder El-km 440,2 bis 440,5 bei hohem Mittelwasser 2001, WB = 380 cm



Abb. 6-11: Interpolierte sohlennahe Fließgeschwindigkeiten (cm \cdot s⁻¹) der Knickbuhnenfelder El-km 440,2 bis 440,5 bei hohem Mittelwasser 2001, WB = 380 cm



Abb. 6-12: Interpolierte oberflächennahe Fließgeschwindigkeiten (cm \cdot s⁻¹) der Regelbuhnenfelder El-km 440,9 und 441 bei hohem Mittelwasser 2001, WB = 372 cm

Die Regelbuhnen (Referenzbuhnen) bei den El-km 440,9, 441 und 443,9 (Abb. 6-12 und 6-14) weisen wie bei Hochwasser ähnliche Strömungsmuster mit relativ homogenen Geschwindigkeiten in den Buhnenfeldern und deutlichen Übergängen zum Hauptstrom auf. Die Strömungsverteilungen sind den bei Hochwasser ermittelten Verteilungen vergleichbar. In Buhnenfeld 440,9 sind wie bei den höheren Wasserständen, die Geschwindigkeiten über der inselartigen Ablagerung erhöht und in Buhnenfeld 443,9 ist die strömungsberuhigte Zone in der Nähe des Buhnenkopfkolkes ebenfalls existent. Für dieses Buhnenfeld ist auch eine ausgedehnte strömungsberuhigte Zone nahe der unteren Buhnenwurzel auffällig. Buhnenfeld 441 ist bei hohem Mittelwasser im Uferbereich strömungsberuhigt, da dieser im Strömungsschatten des oberstromigen stark verlandeten Ufers von Buhnenfeld 440,9 liegt.

Die Buhnen bei El-km 443,5 und 443,6 waren zur Zeit dieser Strömungsmessungen im April 2001 noch nicht umgebaut, so dass die ursprünglichen Durchrisse der obersten und untersten Buhnen mit größeren Querschnitten und tieferen Schwellen und an der mittleren Buhne mit einem flacheren Durchriss als die späteren Absenkungsbereiche noch vorhanden waren (Abb. 6-13). Stärkere Strömungen sind unterhalb der Durchrisse gut erkennbar. Die strömungsberuhigten Bereiche liegen in beiden Buhnenfeldern zwischen den Durchrisssströmungen und dem Hauptstrom, sowie in Buhnenfeld 443,6 auch in Ufernähe.





Abb. 6-13: Interpolierte oberflächennahe Fließgeschwindigkeiten (cm · s⁻¹) der Absenkungsbuhnenfelder El-km 443,5 und 443,6 bei hohem Mittelwasser 2001, WB = 372 cm



6.1.3 Hydraulische Verhältnisse bei nicht überströmten Buhnen

Die Strömungen in Buhnenfeldern werden für mittlere und niedrige Abflüsse, bei nicht überströmten Buhnen, durch die zentrale Buhnenfeldwalze charakterisiert. Die Einströmung in das Buhnenfeld erfolgt vorwiegend am Buhnenkopf der unterstromigen Buhne. Von hier aus bildet sich eine Strömungsfahne entlang der Buhne und der Uferlinie bis zur oberstromigen Buhne. Die Strömung innerhalb des Buhnenfeldes verläuft also stromauf. Die Fließgeschwindigkeiten nehmen innerhalb dieser Walze von der Peripherie nach innen ab. In den Eckbereichen kommt es zur Ausbildung kleinerer Sekundärwalzen, deren Rotationsrichtung gegenläufig zur Hauptwalze verläuft. Weiterhin lässt sich die Scherzone abgrenzen, welche sich unterhalb des oberstromigen Buhnenkopfs aus den hier entstehenden Wirbeln bildet (vgl. Abb. 3-14). Die Scherzone verläuft tendenziell in Richtung der unterstromigen Buhnenmitte, es treten aber Pendelungen in kurzen mehrminütigen Abständen auf. Die Strömungsrichtung wechselt dabei teilweise in das Buhnenfeld und zeitweise außen am Buhnenfeld vorbei. Die Schwingungen wiederholen sich bei ungestörtem Zustand regelmäßig.

Diese Verhältnisse werden durch Morphologie und Lage der Buhnenfelder und die Anströmungen modifiziert. Da die Buhnenfelder an der mittleren Elbe alle mehr oder weniger ausgeprägten Verlandungen unterliegen, ist davon auch die Hydraulik beeinflusst. Spezielle Veränderungen ergeben sich durch Beschädigungen und Modifikationen der Buhnenkörper sowie durch Bau- und Unterhaltungsmaßnahmen, wie Ausbaggerungen und Umlagerung von Sand oder Schüttungsmaterial. Unterhalb von Durchrissen beschädigter Buhnen verläuft eine zur Buhnenfeldwalze entgegengesetzte Durchrissströmung, die in Ufernähe und an Verlandungsformen zu Erosionen führt.

Flächendeckende Untersuchungen der hydraulischen Verhältnisse fanden im Rahmen des ElFi-Projektes in vier Buhnenfeldern für niedrige Mittelwasser- und Niedrigwasserstände statt. Die Darstellungen niedriger Wasserstände der Versuchsbuhnenfelder des Projektes "Ökobuhne" sind deshalb um die vorangestellten Buhnenfelder des ElFi-Projektes erweitert. Bei Hochwasser wurden im ElFi-Projekt nur Einzelmessungen an bestimmten Stellen durchgeführt. Diese Ergebnisse werden in Kapitel 7 im Zusammenhang mit den Verteilungen unterschiedlicher Korngrößenfraktionen in Buhnenfeldern oberhalb von Havelberg dargestellt.





Darstellung der Strömungsrichtung und -geschwindigkeit in cm/s über Messzeiträume von 3 - 5 Minuten; Hilfsintervalle stehen für jeweils zunehmende 25 cm/s der Strömungsgeschwindigkeit;

Skaleneinteilung der Achsen in m

Wasserlinie zur Zeit der Messung

Abb. 6-15: Messwerte oberflächennaher Fließgeschwindigkeiten (cm - s⁻¹) des Buhnenfeldes El-km 418,2 bei niedrigem Mittelwasser 1997, HB = 230 cm

Die Strömung in Buhnenfeld El-km 418,2 (Abb. 6-15) weicht von dem oben beschriebenen allgemeinen Schema ab. Die normalerweise bei Mittel- und Niedrigwasser zu beobachtende Buhnenfeldwalze tritt nicht auf. Dies ist nicht nur durch die diagonal verlaufende Durchrissströmung bedingt. In dem Buhnenfeld bei El-km 421,8 gibt es beispielsweise trotz eines Buhnendurchrisses Ansätze einer solchen Walze (Abb. 6-21). Ausschlaggebend sind in Buhnenfeld 418,2 die unterschiedlichen Längen der beiden Buhnen und der Durchriss an der unterstromigen deutlich kürzeren Buhne. Die kurze Buhne, welche zudem teilweise im Strömungsschatten der oberen Buhne liegt, wird nicht ausreichend angeströmt, was die Bildung einer ausgeprägten Feldwalze verhindert. Der relativ kleine und flache Durchriss verhindert allerdings keinen Staueffekt, wie er auch in Buhnenfeld bei El-km 421,8 zu beobachten ist. Der Staueffekt, welcher für Buhnenfeld 421,8 in Kapitel 6.3 ausführlich beschrieben wird, tritt auch hier auf und führt im Zentrum des Buhnenfeldes zu wechselnden Strömungsrichtungen. Höhere Fließgeschwindigkeiten kommen in den stromseitigen Bereichen unterhalb des Durchrisses und an der unterhalb gelegenen Buhne vor. Die ufernahen Bereiche sind als strömungsberuhigt einzuordnen.



Abb. 6-16: Interpolierte oberflächennahe Fließgeschwindigkeiten (cm ⋅ s⁻¹) des Buhnenfeldes El-km 418,2 bei niedrigem Mittelwasser 1997, HB = 230 cm



Die in die Fläche interpolierten Mittelwerte der Fließgeschwindigkeiten, der in Abb. 6-15 an den einzelnen Messstellen veranschaulichten Strömungen, sind in Abb. 6-16 dargestellt. Entlang der unteren Buhne zieht sich eine Strömungsfahne bis zum Durchriss, die Durchrisssströmung der oberen Buhne verläuft diagonal im oberen Drittel in Richtung des Hauptstroms. Bei Niedrigwasserständen und Trockenfallen der Durchrisse herrschen nur noch in den

70 - 80

80 - 120

äußeren Bereichen erhöhte Fließgeschwindigkeiten und die ufernahen Bereiche sind weitestgehend strömungsberuhigt (Abb. 6-17). In den stromseitigen Bereichen der Buhnenfelder sind in den Abbildungen bei niedrigen Wasserständen höhere Werte als bei höheren Wasserständen vorhanden, da die trockenfallenden Buhnen dann weiter in den Hauptstrom hineinragen. Dies wurde bei späteren Quantifizierungen berücksichtigt.



Abb. 6-18: Messwerte oberflächennaher Fließgeschwindigkeiten (cm \cdot s⁻¹) des Buhnenfeldes El-km 421 bei niedrigem Mittelwasser 1999, HB = 250 cm







Die Strömung im Buhnenfeld bei El-km 421 (Abb. 6-18) wird überwiegend von einer gleichmäßigen Buhnenfeldwalze mit Geschwindigkeiten von 20 bis 30 cm \cdot s⁻¹ an der Peripherie und geringeren Werten im Zentrum dominiert. Deutlich ausgeprägt sind zwei Sekundärströmungen an der unterstromigen Buhnenwurzel und im Kolk an der oberstromigen Buhnenwurzel. Im Uferbereich überlagert sich ein Teil der Buhnenfeldwalze mit der Rotationsströmung innerhalb des Kolkes. Dieser Bereich wird mit sehr geringen Strömungsgeschwindigkeiten von maximal 5 bis 10 cm \cdot s⁻¹ von einer parallel zur stromauf gelegenen Buhne verlaufenden Einströmung und teilweise von der Feldwalze gespeist. Im Überlagerungsbereich von Feldwalze und Sekundärwalze des Kolkes kommt es in ca. drei- bis fünfminütigen Abständen zu einer Änderung der Richtung um 180 Grad. In diesem Rhythmus dominiert hier abwechselnd die Buhnenfeldwalze oder die Ausströmung aus dem Kolkbereich. Bei niedrigen Mittelwasserständen ist die Buhnenfeldwalze deutlich ausgeprägt und die Fließgeschwindigkeiten liegen bei > 20 cm \cdot s⁻¹ (Abb. 6-19). Bei Niedrigwasser sind die Fließgeschwindigkeiten stark reduziert, die Werte der Buhnenfeldwalze liegen unter 20 cm \cdot s⁻¹ und die Stillwasserzone ist ausgedehnter (Abb. 6-20).



Abb. 6-21: Messwerte oberflächennaher Fließgeschwindigkeiten (cm \cdot s⁻¹) des Buhnenfeldes El-km 421,8 bei niedrigem Mittelwasser 1999, HB = 250 cm

Die Abbildungen 6-21 und 6-22 stellen die Strömungsverhältnisse bei niedrigen Mittelwasserständen im Buhnenfeld bei El-km 421,8, mit durchrissener oberstromiger Buhne dar. Hervorzuheben sind die Richtungsänderungen der Strömung im zentralen Bereich, welche durch zwei sich überlagernde Hauptströmungen des Buhnenfeldes verursacht wird. Dieser Bereich wird abwechselnd von der Durchrissströmung und von der Feldwalze dominiert, was mit Schwankungen des Wasserstandes und der Wassermenge innerhalb des Buhnenfeldes zusammenhängt. Diese bedingen einen wechselhaften Verlauf der Einströmung durch den Durchriss und damit auch eine Ablenkung der Feldwalze. Richtungsänderungen im gleichen zeitlichen Rhythmus wie im zentralen Bereich sind ebenfalls am Buhnenkopf der unterstromigen Buhne sowie in der Scherzone vorhanden. Weiterhin wurden zwei kleinere Walzen an der Wurzel der unterstromigen Buhne und am äußeren Rand der stromauf gelegenen Sandbank identifiziert. Die unstete Eckwalze an der Buhnenwurzel weist zusätzlich auf wechselnde Ein- und Ausströmungen hin. Die komplexen und wechselhaften Strömungsverhältnisse dieser Buhnenfelder bei El-km 421,8 und 421 standen im Mittelpunkt von ergänzenden Feldversuchen (Kapitel 6.3).



Abb. 6-22: Interpolierte oberflächennahe Fließgeschwindigkeiten (cm + s⁻¹) des Buhnenfeldes El-km 421,8 bei niedrigem Mittelwasser 1999, HB: = 250 cm





Ein niedriger Wasserstand bedeutet in Buhnenfeld 421,8 drastisch veränderte hydraulische Bedingungen (Abb. 6-23). Der trockengefallene Durchriss speist nicht mehr das Buhnenfeld und aufgrund des hohen Verlandungsgrades sind nur noch die äußeren Bereiche benässt bzw. angebunden. Strömungsberuhigte Flächen befinden sich im Lee der oberstromigen Buhne und an der unterstromigen Buhnenwurzel.

In dem Buhnenfeld bei El-km 423,4 ist die zentrale Buhnenfeldwalze, welche für mittlere und niedrige Abflüsse in Buhnenfeldern charakteristisch ist, aufgrund der Prallhanglage das prägende Merkmal (Abb. 6-24). Die durchschnittlichen Fließgeschwindigkeiten des gesamten Buhnenfeldes sind deshalb bei niedrigem Mittelwasser und bei Niedrigwasser mit ca. 18 bis 24 cm \cdot s⁻¹ relativ hoch. Der strömungsberuhigte zentrale Bereich der Feldwalze ist bei niedri-

gem Mittelwasser (Abb. 6-24 und 6-25) ausgedehnter als bei Niedrigwasser (Abb. 6-26). Bei Niedrigwasser verkürzt sich die Walze und es bildet sich an der oberstromigen Buhne ein zusammenhängender Bereich mit geringen Fließgeschwindigkeiten.



Abb. 6-24: Messwerte oberflächennaher Fließgeschwindigkeiten (cm + s⁻¹) des Buhnenfeldes El-km 423,4 bei Mittelwasser 1998, HB = 308 cm





Abb. 6-25: Interpolierte oberflächennahe Fließgeschwindigkeiten (cm - s⁻¹) des Buhnenfeldes El-km 423,4 bei Mittelwasser 1998, HB = 308 cm



Die Strömungsverhältnisse in den Buhnenfeldern nicht überströmter Knickbuhnen, werden durch zentrale Feldwalzen dominiert (Abb. 6-27) und sind denen inklinanter Regelbuhnen vergleichbar. Die höchsten Fließgeschwindigkeiten treten im Einströmungsbereich an den unterstromigen Buhnen auf. Im oberen Teil der Buhnenfelder, in der Nähe des oberstromigen Buhnenkopfes reduzieren sich die Fließgeschwindigkeiten ebenso, wie im Zentrum der Feldwalzen. Strömungsberuhigte Flächen befinden sich weiterhin vor allem in den Sekundärwalzen in Ufernähe, die in Abbildung 6-28 gut zu erkennen sind. Eine Ausnahme stellt das unterstrom gelegene Buhnenfeld 440,5 dar. Aufgrund der Kombination von Knickbuhne und inklinanter Buhne bildet sich die Walze nur in den äußeren Bereichen heraus, während der überwiegende Teil des Buhnenfeldes strömungsberuhigt ist (Abb. 5-41). Diese strömungsberuhigte Fläche wird von einer großen Sekundärwalze bestimmt, die rechtsdrehend umgekehrt zur eigentlichen Feldwalze verläuft (Abb. 6-27).



Abb. 6-27: Messwerte oberflächennaher Fließgeschwindigkeiten (cm \cdot s⁻¹) der Knickbuhnenfelder El-km 440,2 bis 440,5 bei niedrigem Mittelwasser 2001, WB = 215 cm



Abb. 6-28: Interpolierte oberflächennahe Fließgeschwindigkeiten (cm \cdot s⁻¹) der Knickbuhnenfelder El-km 440,2 bis 440,9 bei niedrigem Mittelwasser 2001, WB = 215 cm

Die Regelbuhnenfelder mit inklinaten Buhnen bei El-km 440,9 und 441 zeichnen sich durch ausgeprägte Feldwalzen, mit größeren Flächenanteilen höherer Fließgeschwindigkeiten als

die Knickbuhnenfelder aus (Abb. 6-30). In dem oberen Buhnenfeld 440,9 teilt sich die Feldwalze an der inselartigen Verlandung, was zu höheren Werten in den äußeren Bereichen und geringeren Werten im Lee der Insel führt (Abb. 6-29 und 6-30). An der oberstromigen Buhnenwurzel bildet sich eine relativ große Sekundärwalze mit geringeren Geschwindigkeiten aus. Im unteren Buhnenfeld 441 ist die Feldwalze ohne Störung entwickelt, mit höheren Geschwindigkeiten in der Peripherie und niedrigen Werten im Zentrum (Abb. 6-30).



Abb. 6-29: Messwerte oberflächennaher Fließgeschwindigkeiten (cm \star s⁻¹) der Regelbuhnenfelder El-km 440,9 und 441 bei niedrigem Mittelwasser 2001, WB = 213 cm



Abb. 6-30: Interpolierte oberflächennahe Fließgeschwindigkeiten (cm \cdot s⁻¹) der Regelbuhnenfelder El-km 440,9 und 441 bei niedrigem Mittelwasser 2001, WB = 213 cm

Die Buhnenfelder der Absenkungsbuhnen bei El-km 443,5 und 443,6 weisen höhere Fließgeschwindigkeiten als die übrigen Buhnenfelder auf. Die künstlichen Durchrisse speisen die oberstromigen Bereiche der Buhnenfelder, die bei intakten Buhnen eher strömungsberuhigt sind. Es sind zwei relevante Einströmungen vorhanden, die in beiden Buhnenfeldern zu Strömungsfahnen führen (Abb. 6-32). Zwischen diesen Strömungsbereichen liegen in den Zentren Flächen mit leicht reduzierten Geschwindigkeiten. Die Eckwalzen der Sekundärströmungen und die Flächen mit geringeren Werten direkt unterhalb der oberstromigen Buhnen sind ebenfalls vorhanden (Abb. 6-31).



Abb. 6-31: Messwerte oberflächennaher Fließgeschwindigkeiten (cm + s⁻¹) der Absenkungsbuhnenfelder El-km 443,5 und 443,6 bei niedrigem Mittelwasser 2001, WB = 287 cm



Abb. 6-32: Interpolierte oberflächennahe Fließgeschwindigkeiten (cm ⋅ s⁻¹) der Absenkungsbuhnenfelder El-km 443,5 und 443,6 bei niedrigem Mittelwasser 2001, WB = 287 cm

Das zum Vergleich mit den Absenkungsbuhnenfeldern untersuchte Regelbuhnenfeld bei El-km 443,9 zeichnet sich vor allem durch eine stark verkürzte Feldwalze aus, die auf die unteren 2/3 der Buhnenfeldfläche beschränkt ist. Im restlichen Bereich herrschen geringere Fließgeschwindigkeiten von unter 10 cm \cdot s⁻¹.



Abb. 6-33: Messwerte oberflächennaher Fließgeschwindigkeiten (cm \cdot s⁻¹) des Regelbuhnenfeldes El-km 443,9 bei niedrigem Mittelwasser 2001, WB = 286 cm



Abb. 6-34: Interpolierte oberflächennahe Fließgeschwindigkeiten (cm \cdot s⁻¹) des Regelbuhnenfeldes El-km 443,9 bei niedrigem Mittelwasser 2001, WB = 286 cm

6.2 Bilanzierung und Vergleich von Fließgeschwindigkeitsverteilungen unterschiedlicher Abflusszustände

Die morphodynamischen Prozesse an der unteren Mittelelbe unterliegen im Jahresverlauf unterschiedlichen Abflüssen und wechselnden hydraulischen Bedingungen. Eine Auswertung der Tageswerte des Pegels Havelberg der Jahre 1997 bis 1999 ergab für Niedrigwasserphasen (NWP) von 160 bis 180 cm 7,67 % (Q \approx 221 bis 240 m³), für niedrige Mittelwasserphasen (NMWP) von 180 cm bis 300 cm 49,58% (Q \approx 240 bis 440 m³), für hohe Mittelwasserphasen (MWP) von 300 cm bis 370 cm 18,81% (Q \approx 440 bis 665 m³), für Mittlere Hochwasserphasen (MHWP) von 370 cm bis 529 cm 21,64 % (Q \approx 665 bis 1600 m³), und für hohe Hochwasserphasen (HHWP) von mehr als 529 cm 2,3 % (Q > ca. 1600 m³) der Tage. Die Phasen der Wasserstände wurden unter Berücksichtigung der Hauptwerte Niedrigste Wasserstände (NW = 161 cm), Mittelwasserstände (MW = 298 cm) und Mittlere Hochwasserstände (MHW = 529 cm) festgelegt, die vom Wasser- und Schifffahrtsamt Magdeburg für den Zeitraum von 1991 bis 2000 berechnet worden waren. In der vorliegenden Arbeit werden Wasserstände mit den oben definierten Phasen gleichgesetzt.

Niedrigwasser- und niedrige Mittelwasserphasen, für die im Rahmen des ElFi-Projektes Strömungsmessungen in den untersuchten Buhnenfeldern durchgeführt wurden, decken über 57 % des Untersuchungszeitraums ab. Die Auswertungen der durchschnittlichen Fließgeschwindigkeiten in den Buhnenfeldern von El-km 418,2 bis 423,4 (Abb. 6-35 bis 6-38) enthalten nicht die äußeren von der Scherzone berührten Bereiche der Buhnenfelder. Die turbulenten und wechselnden Strömungsverhältnisse sowie das eingesetzte ADP-Messgerät mit niedriger zeitlicher Auflösung würden hier zu schwer abzugrenzenden Ergebnissen führen und die Berechnung von durchschnittlichen Fließgeschwindigkeiten verzerren. Im Rahmen des Projektes Ökobuhne wurden von El-km 440,2 bis 443,9 Strömungsmessungen in neun Buhnenfeldern mit Knickbuhnen, Absenkungsbuhnen und Regelbuhnen bei Hoch-, Mittel- und Niedrigwasser durchgeführt (Tab. 4-2). Die Auswertungen beziehen sich auf oberflächennahe Fließgeschwindigkeiten mit Tiefen von ca. 80 cm für überströmte Buhnen für und auf Tiefen von 10 cm für nichtüberströmte Buhnen.

Die vier Buhnenfelder 418,2, 421, 421,8 und 423,4 sind sowohl hinsichtlich der Verteilungen der Fließgeschwindigkeiten (Abb. 6-35 bis 6-38) als auch der errechneten Durchschnittsgeschwindigkeiten (Tab. 6-1) struktur- und lagebedingt unterschiedlich ausgeprägt. Die beiden Buhnenfelder mit durchrissenen Buhnen bei El-km 418,2 und 421,8 (Abb. 6-35 und 6-37) weisen für Niedrigwasser größere Übereinstimmungen auf. Bei niedrigem Mittelwasser sind die Anteile zwischen strömungsberuhigten und stärker durchströmten Teilflächen ungleichmäßiger verteilt. In Buhnenfeld 421 herrschen andere Verhältnisse. Dies ist auf das Fehlen einer Durchrissströmung, die vorhandene kontinuierlichen Walze und morphologische Unterschiede zurückzuführen. Aufgrund der relativ steilen Ufer fehlen trotz des hohen Verlandungsgrades flache und mit geringen Geschwindigkeiten überströmte Flächen, wie sie in den beiden anderen Buhnenfeldern vorhanden sind (Abb. 5-16). Bei Niedrigwasser, nicht durchströmten Buhnen und trockengefallenen Uferstrukturen sind die durchschnittlichen Geschwindigkeiten in den Buhnenfeldern 418,2 und 421,8 fast identisch und in 421 deutlich reduziert (Tab. 6-1), was vor allem auf den ausgedehnten Stillwasserbereich zurückzuführen ist.



Abb. 6-35: Häufigkeitsverteilung oberflächennaher Fließgeschwindigkeiten in Buhnenfeld El-km 418,2; HB: Niedrigwasser (180 cm) und niedriges Mittelwasser (230 cm)



Abb. 6-36: Häufigkeitsverteilung oberflächennaher Fließgeschwindigkeiten in Buhnenfeld El-km 421; HB: Niedrigwasser (160 cm) und niedriges Mittelwasser (250 cm)



Abb. 6-37: Häufigkeitsverteilung oberflächennaher Fließgeschwindigkeiten in Buhnenfeld El-km 421,8; HB: Niedrigwasser (160 cm) und niedriges Mittelwasser (250 cm)



Abb. 6-38: Häufigkeitsverteilung oberflächennaher Fließgeschwindigkeiten in Buhnenfeld El-km 423,4; HB: Niedrigwasser (180 cm) und niedriges Mittelwasser (308 cm)

Die aufgrund der Buhnendurchrisse erhöhten Fließgeschwindigkeiten von 40 bis 70 cm $_{*}$ s⁻¹ betreffen in den Buhnenfelder 418,2 und 421,8 ca.1 bis 4,5 % der Gesamtflächen. Bei niedrigem Mittelwasser sind die Durchrisse außerdem bezüglich der Veränderung von Strömungsrichtungen und besonders in Buhnenfeld 421,8 bezüglich der Ausbildung von Strömungsfahnen wirksam. In Buhnenfeld 421,8 herrschen bei niedrigem Mittelwasser deshalb mit 18,24 cm $_{*}$ s⁻¹ deutlich höhere Fließgeschwindigkeiten als in den Buhnenfeldern 418,2 und 421.

Tab. 6-1:	Durchschnittliche oberflächennahe Fließgeschwindigkeiten in den Buhnenfeldern von
	El-km 418,2 bis 423,4; für Pegelstände der jeweiligen Messungen vgl. Abbildungsunter-
	schriften 6-35 bis 6-38

El-km	Niedrigwasser (NWP) (cm ₊ s⁻¹)	Rang der Fließge- schwindig- keit bei Niedrig- wasser	Niedriges Mittelwasser (Pegelstand um 60 cm erhöht *) (NMWP) (cm · s ⁻¹)	Rang der Fließge- schwindig- keit bei niedrigem Mittelwasser	Lage	Buhnen- zustand
418,2	12,4	3	13,2	3	gerade Fließstrecke	durch- rissen
421	7,5	4	12,6	4	Gleithang	repariert
421,8	12,6	2	18,2	2	Gleithang	durch- rissen
423,4	18,6	1	23,9*)	1	Prallhang	erneuert

Das an einem Prallhang gelegene Buhnenfeld mit erneuerten Buhnen bei El-km 423,4 weist bei beiden Wasserständen deutlich erhöhte Fließgeschwindigkeiten auf (Abb. 6-38 und Tab. 6.1), wobei der Pegelstand bei den Messungen bei niedrigem Mittelwasserstand mit 308 cm etwas höher als in den übrigen Buhnenfeldern lag. Die größten Flächenanteile liegen bei Niedrigwasser mit über 40 % in der Klasse der Strömungsgeschwindigkeiten von 20 bis 30 cm \cdot s⁻¹. Bei niedrigem Mittelwasser treten in ca. 60 % der Fläche Geschwindigkeiten von 20 bis 40 cm \cdot s⁻¹ und in 4,2 % der Fläche sogar von 40 bis 50 cm \cdot s ⁻¹ auf. Diese Bereiche befinden sich überwiegend in der ausgeprägten Buhnenfeldwalze (Abb. 6-25 und 6-26).

Ein Vergleich der durchschnittlichen Fließgeschwindigkeiten der vier Buhnenfelder (Tab. 6-1) zeigt, dass sich neben den Buhnenzuständen auch die Prallhanglage auswirkt. Die Reihenfolgen sind beiden Wasserständen gleich. Nach dem Prallhangbuhnenfeld bei 423,4 weisen für Niedrigwasser die nur noch in den äußeren Bereichen durchströmten Buhnenfelder 418,2 und 421,8 ähnlich hohe Fließgeschwindigkeiten auf. Bei niedrigem Mittelwasser macht sich in Buhnenfeld 421,8 der Durchriss stärker bemerkbar als in Buhnenfeld 418,2. Das von tiefen Stillwasserbereichen geprägte Buhnenfeld 421 weist bei beiden Wasserständen die geringsten Durchschnittsgeschwindigkeiten auf.

Für die Buhnenfelder des Projektes Ökobuhne von El-km 440,2 bis 443,9 wurden Strömungsmessungen bei niedrigem Mittelwasser, bei Übergang von hohem Mittelwasser zu niedrigem Hochwasser, das hier noch als hohes Mittelwasser bezeichnet wird, und bei Hochwasser durchgeführt. Erfassungen von Niedrigwasser- und Vergleiche mit den niedrigen Mittelwasserverhältnissen erfolgten nicht, weshalb eine ausführliche Differenzierung bei nicht überströmten Buhnen wie in Tabelle 6-1 nicht notwendig ist.



Abb. 6-39: Häufigkeitsverteilung oberflächennaher Fließgeschwindigkeiten in Buhnenfeld El-km 440,2, WB: niedriges Mittelwasser (215 cm), hohes Mittelwasser (380 cm), Hochwasser (570 cm)



Abb. 6-40: Häufigkeitsverteilung oberflächennaher Fließgeschwindigkeiten in Buhnenfeld El-km 440,3, WB: niedriges Mittelwasser (215 cm), hohes Mittelwasser (380 cm), Hochwasser (570 cm)

Die Strömungsverteilungen (Abb. 6-39 bis 6-47) und die durchschnittlichen Fließgeschwindigkeiten bei niedrigem Mittelwasser (Tab. 6-2) sind mit Ausnahme der Buhnenfelder 440,5 und 443,6 denen der Buhnenfelder des ElFi-Projektes (Tab. 6-1) vergleichbar und bewegen sich zwischen 10,19 und 12,99 cm \cdot s⁻¹. Lediglich in dem von einer Knickbuhne und einer Regelbuhne begrenzten Buhnenfeld 440,5 herrschen überwiegend strömungsberuhigte Bereiche vor (Abb. 6-42). Das Buhnenfeld 443,6, welches zwischen zwei Absenkungsbuhnen liegt, weist mit knapp 30 % die höchsten Anteile an Fließgeschwindigkeiten in der Klasse von 20 bis 30 cm \cdot s⁻¹ auf (Abb. 6-46). In dem oberstromigen Absenkungsbuhnenfeld 443,5 sind mit 20 % die zweithöchsten Anteile dieser Klasse vorhanden (Abb. 6-45).



Abb.6-41: Häufigkeitsverteilung oberflächennaher Fließgeschwindigkeiten in Buhnenfeld El-km 440,4, WB: niedriges Mittelwasser (215 cm), hohes Mittelwasser (380 cm), Hochwasser (570 cm)





Abb. 6-42: Häufigkeitsverteilung oberflächennaher Fließgeschwindigkeiten in Buhnenfeld El-km 440,5, WB: niedriges Mittelwasser (215 cm), hohes Mittelwasser (380 cm), Hochwasser (570 cm)



Abb. 6-43: Häufigkeitsverteilung oberflächennaher Fließgeschwindigkeiten in Buhnenfeld El-km 440,9, WB: niedriges Mittelwasser (213 cm), hohes Mittelwasser (372 cm), Hochwasser (572 cm)



Abb. 6-44: Häufigkeitsverteilung oberflächennaher Fließgeschwindigkeiten in Buhnenfeld El-km 441, WB: niedriges Mittelwasser (213 cm), hohes Mittelwasser (372 cm), Hochwasser (572 cm)

Bei hohem Mittelwasser treten die höchsten durchschnittlichen Fließgeschwindigkeiten in den Knickbuhnenfeldern von El-km 440,2 bis 440,5 auf (Tab. 6-2). Die erhöhten Geschwindigkeiten im Zentrum der Buhnenfelder hebt diese Buhnentypen von den Regelbuhnen und den Absenkungsbuhnen ab. Die durchschnittlichen Fließgeschwindigkeiten für hohes Mittelwasser sind in den Regel- und Absenkungsbuhnenfeldern, mit Ausnahme von Buhnenfeld 441, mit 24,4 bis 26,08 cm \cdot s⁻¹ ähnlich. Buhnenfeld 441 ist bei hohem Mittel-

wasser von dem oberstromigen Buhnenfeld 440,9 beeinflusst, dessen verlandeter und vegetationsreicher Uferbereich (Abb. 5-8, 5-9, 6-12 und 6-44) Strömungen entlang des Ufers bremst. Bei Hochwasser sind diese und weitere morphologische Einflussgrößen weitestgehend aufgehoben, so dass ein tendenzieller Unterschied der durchschnittlichen Fließgeschwindigkeiten zwischen den Buhnenfeldern nicht mehr festgestellt werden kann (Tab. 6-2).



Abb. 6-45: Häufigkeitsverteilung oberflächennaher Fließgeschwindigkeiten in Buhnenfeld El-km 443,5, WB: niedriges Mittelwasser (287 cm), hohes Mittelwasser (372 cm), Hochwasser (572 cm)



Abb. 6-46: Häufigkeitsverteilung oberflächennaher Fließgeschwindigkeiten in Buhnenfeld El-km 443,6, WB: niedriges Mittelwasser (287 cm), hohes Mittelwasser (372 cm), Hochwasser (572 cm)



Abb. 6-47: Häufigkeitsverteilung von Fließgeschwindigkeiten in Buhnenfeld El-km 443,9, WB: niedriges Mittelwasser (286 cm), hohes Mittelwasser (372 cm), Hochwasser (572 cm)

Tab. 6-2:Durchschnittliche Fließgeschwindigkeiten in den Buhnenfeldern von El-km 440,2 bis
443,9, für Pegelstände der jeweiligen Messphasen vgl. Abbildungsunterschriften 6-39
bis 6-47

El-km	Niedriges Mittelwasser (cm - s ⁻¹)	Hohes Mittelwasser (cm ₊ s⁻¹)	Hochwasser (cm ₊ s⁻¹)
440,2	12,8	30,2	64,8
440,3	10,2	27,4	62,2
440,4	10,8	34,5	72
440,5	5,8	26,6	69,7
440,9	12,1	24,4	64,4
441	12,7	19,8	66,9
443,5	13	26,1	75,7
443,6	15,9	25	64,4
443,9	11,6	25,1	68,5

Die Häufigkeitsverteilung der Fließgeschwindigkeiten bei Hochwasser weisen vor allem auf Ähnlichkeiten benachbarter Buhnenfelder hin (6-48). Die beiden Knickbuhnenfelder 440,2 und 440,3 (Abb. 6-39 und 6-40) zeigen einen ähnlichen Verlauf, wenn auch mit etwas unterschiedlichen Anteilen in den verschiedenen Klassen. Eine wesentlich höhere Ähnlichkeit besteht zwischen den Regelbuhnenfeldern bei El-km 440,9 und 441 (Abb. 6-43 und 6-44), die eine fast identische Strömungsverteilung aufweisen, und dem zweiten Absenkungsbuhnenfeld 443,6 (Abb. 6-46). Auch das dritte Regelbuhnenfeld 443,9 zeigt einen vergleich-

baren Verlauf der Anteile bei insgesamt erhöhten Fließgeschwindigkeiten (Abb. 6-47). Die meisten Flächenanteile erhöhter Fließgeschwindigkeiten kommen in den Buhnenfeldern 443,5 und 440,4 vor, die auch die höchsten durchschnittlichen Fließgeschwindigkeiten aufweisen. Einen zusammenfassenden Überblick über die Strömungsgeschwindigkeiten der Buhnenfelder von El-km 440,2 bis 443,9 bei unterschiedlichen Abflüssen geben die Perzentil-Werte in Abbildung 6-48.



Median; Box: 25%, 75%; Whisker: Minimum, Maximum (ohne Ausreißerwerte)

Abb. 6-48: Perzentilwerte und Spannweite der Minima und Maxima oberflächennaher Fließgeschwindigkeiten der Buhnenfelder bei El-km 440,2 bis 443,9 bei unterschiedlichen Abflüssen

Erkennbar ist, dass sich die für durchschnittliche Fließgeschwindigkeiten bei hohem Mittelund Hochwasser gezeigten Verhältnisse auch bei Betrachtung der 25- bis 75-Perzentil-Boxen und der Mediane annähernd parallel verlaufend darstellen. Die Abweichungen bei hohem Mittelwasser betreffen die Buhnenfelder 440,5 und 441 und sind wie beschrieben morphologisch bedingt. Die relativ höheren Fließgeschwindigkeiten in den Knickbuhnenfeldern 440,2 bis 440,4 sind bei hohem Mittelwasser ebenfalls eindeutig.

6.3 Parallel- und Tracerversuche in Buhnenfeldern mit durchrissenen und reparierten Buhnen bei nicht überströmten Buhnen

Durchgeführte Messungen im Rahmen der Feldarbeiten des ElFi-Projektes hatten die Komplexität von Strömungsverhältnissen verdeutlicht, welche in Buhnenfeldern unterschiedlicher Struktur, Lage und Größe vorkommen. Die im zentralen Bereich vorkommende Buhnenfeldwalze war nicht konstant und wurde durch ständige Veränderungen von Strömungsrichtungen und -geschwindigkeiten modifiziert. Unterhalb der Buhnenköpfe wanderten die Scherzonen abwechselnd von den inneren Bereichen in die äußeren Bereiche der Buhnenfelder und zurück. Gleichzeitig fiel entlang der Wasserlinie eine Oszillation der Wasserspiegellage im mehrminütigen Rhythmus auf. Da aber die Einzelpunktmessungen während der Messkampagnen zeitlich versetzt und nacheinander erfolgt waren, konnte ein möglicher Zusammenhang zwischen einzelnen Strömungspendelungen einerseits und zwischen Strömungen, Scherzone und Wasserspiegellagenänderungen andererseits nur angenommen werden.

Instationaritäten in entlang von Rinnen gelegenen Becken sind bekannt und wurden mehrfach beschrieben. Nicht bekannt sind allerdings Feldversuche zu diesem Thema. Die umfangreichen Untersuchungen, die im Vorfeld stattgefunden hatten, legten deshalb nahe, für zwei Buhnenfelder mit unterschiedlichen Strukturen Feldversuche durchzuführen. In einem der beiden Buhnenfelder, das einen Buhnendurchriss an der oberstromigen Buhne aufwies, waren die Schwankungen besonders prägnant. Dies war auf die zweite zusätzliche Einströmung durch diesen Durchriss zurückzuführen, welche die Pendelungen innerhalb des Buhnenfeldes verstärkte. Grundsätzlich konnten die variierenden Fließgeschwindigkeiten und Wasserspiegellagen in anderen Buhnenfeldern ebenfalls beobachtet werden.

KIMURA und HOSODA (1997) untersuchten Schwankungen von Wasserspiegellagen in rechtwinkligen Totwasserzonen entlang einer Laborrinne anhand von Laborversuchen und mathematischen Modellen. Sie sprechen in diesem Zusammenhang von "seiches", in Anlehnung an die durch Wind und Veränderungen atmosphärischen Drucks ausgelösten Wasserstandsschwankungen von Seen. Ihre Tests und Berechnungen bezogen ebenfalls die gleichmäßigen Richtungsänderungen der Scherzone mit ein. Die Laborversuche wurden u.a. für 15 · 15 cm große Totwasserzonen mit 1 cm Wassertiefe entlang einer 10 cm breiten Rinne durchgeführt. Es ergaben sich bei einer Fließgeschwindigkeit von 20 cm · s⁻¹ für die Oszillationen der Wasserstände kurze Intervalle von 0,891 Sekunde Dauer. Diese kurzfristigen Schwankungen wiederholten sich regelmäßig. Auch für die wechselnden Fließgeschwindigkeiten entlang der Scherzone ermittelten KIMURA und HOSODA (1997) Wiederholungs-intervalle von ungefähr einer Sekunde. Auffallend war, dass der Kurvenverlauf der Fließge-

schwindigkeiten in Abhängigkeit von der Zeit neben den einsekündlichen Perioden noch kurzfristige 0,3 bis 0,5 Sekunden andauernde Ausschläge mit geringerer Amplitude enthielt. Die Richtungsänderungen verliefen also unruhig aber regelmäßig. Ziel des Naturversuches war es, ähnliche Regelmäßigkeiten zwischen Wasserstandsschwankungen und Strömungsänderungen auch in den Buhnenfeldern nachzuweisen.

SPATARU (1971) und TÖDTEN (1975) beschrieben turbulente und veränderliche Strömungsbedingungen über mathematische Ansätze. SPATARU (1971) hebt die Bedeutung von Turbulenzen für Wasserbauten, wie z. B. für die Strömungen in Absatzbecken, hervor und betont die Notwendigkeit experimenteller Arbeiten zu Turbulenzen als Ergänzung theoretischer Ergebnisse. Bei einem Gradienten der mittleren Strömung, wie er für die Buhnenfeldströmungen nachzuweisen gilt, werden Turbulenzen als Schubspannungsturbulenzen bezeichnet, wenn diese von festen Begrenzungen beeinflusst sind. Querschnittsverengungen, wie Buhnen, fördern Turbulenzen und es wäre eine bestimmte Länge eines unbeeinflussten Gerinnes notwendig, um wieder die normale Intensität zu erreichen. Da solche Abschnitte in Bereichen regelmäßiger Buhnenverbauung nicht vorhanden sind, werden die turbulenten Strömungen immer wieder neu verstärkt.

TÖDTEN (1975) untersuchte theoretisch Ablösewirbel an Buhnenköpfen und Turbulenzen in Buhnenfeldern und beschreibt die Buhnenfeldwalze ebenfalls als nicht stabil. Er merkt allerdings an, dass eine relative Stabilität bei geringen Einschnürungen des Querschnitts möglich ist. Die zentrale Feldwalze neigt nach seinen Beobachtungen dazu, von einer elliptischen in eine kreisförmige Form überzugehen, was zu den Abspaltungen kleinerer Sekundärströmungen und einer Verkürzung der Walze führt, wie sie auch eigene Anschauungen bestätigten.

Strömungen eines Ortes werden als stationär angesehen, wenn sich Tiefe und Fließgeschwindigkeit innerhalb eines bestimmten Zeitintervalls nicht verändern. Passieren Wellen oder Wirbel diesen Ort und verändern die Wasserspiegellage oder die Fließgeschwindigkeiten, handelt es sich um instationäre Strömungen (GORDON et al 1992). Nach SMITH (1975) können Strömungen jedoch als stationär betrachtet werden, wenn sich die Fluktuationen gleichmäßig um einen konstanten Wert bewegen. Für eine Charakterisierung von unterschiedlichen Strömungsmustern und –bereichen war es deshalb notwendig festzustellen, ob es sich bei den gemessenen Veränderungen pro Zeiteinheit um die Aufzeichnungen ungleichmäßiger und instationärer Ereignisse oder um periodische und somit stationäre Vorgänge handelt. Bei instationären Strömungen wäre ein Flächeninterpolation der Messwerte und eine anschließende statistische Auswertung der hydraulischen Verhältnisse in Buhnenfeldern nicht zulässig gewesen. Dieser Nachweis sollte für unterschiedliche Wasserstände und dementsprechend wechselnde Rahmenbedingungen erfolgen um eine allgemeingültige und reproduzierbare Aussage zu erhalten.

6.3.1 Versuchsplanung

Die Ergebnisse von Strömungsmessungen in den Buhnenfeldern 421 und 421,8 sind in Strömungsrosen in den Abbildungen 6-18 und 6-21 verdeutlicht. Eine Abgrenzung verschiedener Strömungsbereiche in den Buhnenfeldern erfolgte mittels eines Geografischen Informationssystems (GIS) und in die Fläche interpolierter statistischer Parameter der Punktmessungen. Dabei wurden nicht nur die Fließgeschwindigkeiten, sondern auch die Varianzen und Standardabweichungen der Richtungen und Geschwindigkeiten zur Identifizierung von Flächen mit stark variierenden hydraulischen Verhältnissen analysiert. Die Abbildungen 6-49 bis 6-52 verdeutlichen die Bereiche mit stetigen Strömungen und mit wechselnden Strömungen für die beiden Buhnenfelder.

Die Buhnenfelder bei El-km 421 und 421,8 wurden aufgrund vergleichbarer Ausdehnung und Lage (Gleithang) als Versuchsflächen ausgewählt. In beiden Buhnenfeldern waren 1999 umfassende Messungen erfolgt, um Auswirkungen durchrissener und nicht durchrissener Buhnen zu vergleichen. Die sich in kurzen Zeitabständen wiederholenden Strömungsänderungen hatten zu der Annahme abwechselnd steigender und fallender Wasserspiegellagen bei nicht überströmten Buhnen geführt, welche die Durchflussbedingungen in den Buhnenfeldern beeinflussen und Instationaritäten verursachen.

Um eine Klärung dieser Zusammenhänge zu ermöglichen und die bereits stattgefundenen Messungen besser einordnen zu können fanden im Frühjahr und Spätsommer 2000 zweitägige Parallelversuche mit gleichzeitig aufzeichnenden Ultraschallströmungsmessgeräten, sekündlich aufzeichnenden Pegelschreibern und Wellenschreibern statt. Als Standorte wurden Messpunkte gewählt, die die höchsten Variabilitäten an Strömungsrichtungen und -geschwindigkeiten aufgewiesen hatten. Von einem heliumgefüllten bodengesteuerten Wetterballon aus wurden mittels einer fernausgelösten Digitalkamera Luftbilder aufgenommen, um die Verteilung von an verschiedenen Stellen des Buhnenfeldes ausgebrachten Tracern zu dokumentieren. Uranintracerversuche und Analysen der Konzentrationen wurden vom Institut für Gewässerökologie und Binnenfischerei (IGB) durchgeführt. Zusätzlich wurden Hobelspäne eingesetzt, um die Vermischung von Wasserkörpern zu veranschaulichen.



Abb. 6-49: In die Fläche interpolierte Richtungsänderungen von Strömungen in Messintervallen von ca. 5 Minuten in Buhnenfeld 421, links



Abb. 6-50: In die Fläche interpolierte Richtungsänderungen von Strömungen in Messintervallen von ca. 5 Minuten in Buhnenfeld 421,8, links



Abb. 6-51: In die Fläche interpolierte Varianzen von Strömungsgeschwindigkeiten in Messintervallen von ca. 5 Minuten in Buhnenfeld 421, links



Abb. 6-52: In die Fläche interpolierte Varianzen von Strömungsgeschwindigkeiten in Messintervallen von ca. 5 Minuten in Buhnenfeld 421,8, links

Der Versuch sollte folgende Hypothesen klären:

- Innerhalb der Buhnenfelder kommt es in bestimmten Zeitabständen, deren Ausdehnung im wesentlichen vom Fassungsvermögen (Volumen) der Buhnenfelder und der Fließgeschwindigkeiten im Hauptsstrom abhängt zu steigenden und fallenden Wasserspiegellagen im Bereich von wenigen Zentimetern
- Die veränderten Wasserspiegellagen beeinflussen die Strömungsbedingungen innerhalb der Buhnenfelder. Es kommt abwechselnd zu Ein- und Ausströmungen. Bestehen mehrere Einströmungsbereiche, z. B. im Bereich des unterstromigen Buhnenkopfes und an einem Durchriss einer oberstromigen Buhne erhöht dies den Wasseraustausch.
- Die Buhnenfelder lassen sich in Bereiche mit unterschiedlichen Strömungsverhältnissen und Wasseraustausch unterteilen.
- Die Scherzone hinter dem Buhnenkopf pendelt im gleichen Maße wie die Ein- und Ausströmungen und wird innerhalb der Zeitabschnitte, in denen es zu einer Pendelung kommt, in das Buhnenfeld oder aus dem Buhnenfeld gelenkt. Dies ermöglicht ebenfalls die Bestimmung von Ein- und Ausstromperioden.

6.3.2 Erster Parallel- und Tracerversuch bei niedrigem Mittelwasser

6.3.2.1 Versuchsablauf des ersten Versuches

Der erste zweitägige Versuch fand am 30.05.2000 in dem Buhnenfeld bei El-km 421,8 bei einem Wasserstand von 237 cm (Pegel Havelberg) und am 31.05.2000 in dem Buhnenfeld bei El-km 421 statt (Wasserstand: 234 cm). Diese Pegel entsprechen den niedrigen Mittelwasserständen von Mai und Juni 1999, bei denen die Punktmessungen dieser Flächen nacheinander stattgefunden hatten.

Während der mehrstündigen Messungen am 30. und 31.05.2000 kamen an beiden Tagen vier mit 25 Hertz punktuell in 50 cm Tiefe messende ADV-Ultraschallströmungsmessgeräte zum Einsatz. Unterhalb des Buhnenkopfes wurde ein zweidimensional messender in Richtung der Scherzone horizontal ausgerichteter ADP-Profilströmungsmesser eingebaut, um Pendelungen der Scherzone aufzuzeichnen.

Für die Erfassung der Wasserspiegellagen wurde ein im Millimeterbereich hochauflösender sekündlich messender elektronischer Pegel sowie 3 ebenfalls sekündlich im Millimeter-

bereich messende Wellenschreiber der Versuchsanstalt für Wasserbau und Schiffbau, Berlin verwendet. Das Institut für Gewässerökologie und Binnenfischerei (IGB) setzte zwei Fluorimeter zur Messung von Uraninkonzentrationen ein. Die Ballonaufnahmen wurden an den beiden Tagen des ersten Versuches durchgeführt. Nach Auswertungen der pro Tag ca. 230 Luftbilder wurden aufgrund der wechselhaften Witterungsverhältnisse und instabilen Lage der Kamera des ersten Tages nur die Aufnahmen des zweiten Tages in die Auswertung einbezogen. Diese Aufnahmen decken den zentralen Teil des Buhnenfeldes 421 ab und dokumentieren die komplizierten Verhältnisse zwischen Buhnenfeldwalze und Stillwasserbereich.



6.3.2.2. Auswertung des ersten Versuchstages im Buhnenfeld bei El-km 421,8

Abb. 6-53: Versuchsanordnung in Buhnenfeld bei El-km 421,8, links, am 30.05.2000 bei niedrigem Mittelwasser

Die Positionen der Messstationen ergeben sich aus Abbildung 6-53. Da vor allem die Periodizität der Richtungsänderungen von Bedeutung ist, wurden in Abbildung 6-55, die Strömungsrichtungen der Messstellen von ADV 2 und ADV 4 mit 180° addiert um eine Schwankung der Strömungsrichtung um den Nullpunkt aus Gründen der Anschaulichkeit zu vermeiden.



Abb. 6-54: Darstellung von Strömungsgeschwindigkeiten an den einzelnen Messtationen des ersten Versuches bei niedrigem Mittelwasser in Buhnenfeld 421,8, links



Abb. 6-55: Darstellung von Strömungsrichtungen an den einzelnen Messtationen des ersten Versuches bei niedrigem Mittelwasser in Buhnenfeld 421,8, links

Die vermuteten Zusammenhänge zwischen den Strömungsrichtungsänderungen insbesondere im zentralen Bereich (ADV 3) und im Einströmungsbereich am Buhnenkopf (ADV 4) werden deutlich. Ein Zusammenhang besteht ebenfalls mit den Wasserständen am Pegel im Bereich der unterstromigen Buhnenwurzel. Die Pendelung der Strömungsrichtung des zentralen Punktes (ADV 3) beträgt innerhalb von ca. 5 Minuten 360°, die Pendelung an Punkt ADV 4 im gleichen Zeitraum ca. 180°. Bis zum Erreichen eines hohen Pegelstandes strömt es an der Messstelle von ADV 3 in Richtung 270°, d.h. die Durchrissströmung dominiert diesen Bereich. Am Buhnenkopf findet hingegen zur gleichen Zeit eine Ausströmung in Richtung 90° statt. Ab dem Punkt des höchsten Pegelstandes kommt es zu einem plötzlichen Wechsel der Strömungsrichtungen innerhalb von Sekunden. Die zentrale Strömung bei ADV 3 verläuft nun in Richtung 90°, d.h. das Buhnenfeld läuft "leer", wobei sich die Wasserspiegeländerung allerdings nur um ca. 4 Zentimeter reduziert. Bei Erreichen des niedrigsten Pegelstandes dreht sich nun am Buhnenkopf die Strömungsrichtung und wechselt von der Ausströmung in Richtung einer Einströmung bis zum Erreichen des erneuten Maximum des Pegelstandes. Wird der hohe Pegelstand erreicht, verändert sich die Strömungsrichtung 90°. Im zentralen Bereich hingegen pendelt die Richtung entgegen dem Uhrzeigersinn im gleichen Zeitraum einmal um die ganze Achse und erreicht wieder 270°. Der Pegelhöchststand wird erneut erreicht und der gesamte Vorgang wiederholt sich.

In dieses System passen auch die Messergebnisse der beiden übrigen Punkte. Innerhalb der Durchrissströmung pendeln allerdings weniger die Richtungen als die Geschwindigkeiten (Abb.6-54) und die Periodizität ist kürzer. Dies liegt an Staueffekten, die durch die oben beschriebenen Pendelungen ausgelöst werden. Die Richtungsänderungen um ca. 180° von ADV 2 belegen die Pendelung des gesamten Strömungssystems.

Die Auswertungen der aufgezeichneten Daten der Scherzone unterhalb des Buhnenkopfes, zeigen ebenfalls Pendelungen auf, welche sich im Zeitraum von 3 – 5 Minuten abspielen. Die Abbildungen 6-56 und 6-60 veranschaulichen dies für beide Buhnenfelder.

Da der in einer horizontalen Ebene messende ADP direkt am Buhnenkopf befestigt wurde, können die Anströmwinkel unterschiedlich ausfallen. Eine kleinräumige Veränderung der Position ändert in diesem Bereich diesen Winkel schon erheblich. Die absoluten Werte der Strömungsrichtung sind hier allerdings, anders als die Periodizität der Strömungsrichtungsänderungen, vernachlässigbar. Besonders gleichmäßig stellt sich die Wiederholungsrate für das Buhnenfeld 421,8 (Abb. 6-56) dar. Auch die von KIMURA und HOSODA (1997) beschriebenen kurzfristigen und geringeren Schwankungen sind neben den größeren ca. fünfminütigen Intervallen zu erkennen. Dieses Buhnenfeld weist auch schon an den übrigen Messpositionen, für die Wasserspiegellagenänderungen und die Fließgeschwindigkeitsänderungen die spezifischen fünfminütigen Schwankungen auf (Abb. 6-54 und 6-55). Somit ist zu folgern, das auch die Strömungen und die Pendelungen der Scherzone durch die Änderungen der Volumina im Innern des Buhnenfeldes beeinflusst sind.



Abb. 6-56: Darstellung von Strömungsrichtungen (ADP) am oberstromigen Buhnenkopf während des ersten Versuches bei niedrigem Mittelwasser in Buhnenfeld 421,8, links

Auswertungen des parallel zu den Strömungsmessungen vorgenommen Tracertest durch das IGB unter Verwendung von Uranin ergaben für Buhnenfeld 421,8, dass die Strömungen anders als im intakten Buhnenfeld 421 verlaufen, weil ein großer Teil des Wassers durch den Durchriss an der oberen Buhnenwurzel strömt. Die Ausspülungseffekte waren deutlich schneller und die Tracerkuven sehr unregelmäßig, was auch daran liegen könnte, dass sich die Tracerwolke hauptsächlich außerhalb der Messpunkte bewegt hat. Die mittlere Aufenthaltszeit lag bei 40 Minuten und die Umlaufzeiten betrugen für das gesamte Buhnenfeld nur 17 Minuten und 15 Minuten im Bereich des Sekundärwirbels (Totzone) an der unteren Buhnenwurzel. Die Totzone im Bereich des Sekundärwirbels an der unterstromigen Buhne schien nicht der hauptsächliche Speicher für den Farbstoff gewesen zu sein, denn nach einer Pause zwischen der 35. und 65. Minute stieg die Uraninkonzentration hier wieder von 0,1 auf 0,6 µg/l an. Die vom IGB festgestellte mittlere Aufenthaltszeit lag bei nur 33 Minuten. Der Buhnendurchriss reduziert demnach die Retentionswirkung.

Die Ergebnisse decken sich für dieses Buhnenfeld nicht mit den eigenen Berechnungen. Bei einem Pegelstand von 237 cm enthält das Buhnenfeld 421,8 ein Volumen von 7.500 m³. Die mittleren Fließgeschwindigkeiten, die nun als zulässig verwendet werden können, ergeben für den Durchriss einen Wert von 71,65 cm \cdot s⁻¹ und für den Bereich der Einströmung an der unterstromigen Buhne von 13 cm \cdot s⁻¹. Bei einem benässten Querschnitt von ca. 7,5 m³ des Durchrisses ergibt sich ein Durchfluss von ca. 5,4 m³ \cdot s⁻¹. Der Einstrombereich am Buhnenkopf ist nur grob abzugrenzen und wird für beide Buhnenfelder mit einem Querschnitt von 10 m² angenommen. Damit besteht für das Buhnenfeld 421,8 am Buhnenkopf ein Einstrom von ca. 1,3 m³ ·s⁻¹ und insgesamt ein Einstrom von 6,7 m³ ·s⁻¹. Das Gesamtvolumen würde demnach nach 18 Minuten und 39 Sekunden erreicht werden, was einer mittleren Aufenthaltszeit gleichzusetzen wäre. Die unterschiedlichen Austauschzeiten von knapp 19 und den vom IGB ermittelten 40 Minuten können nur über getrennte Wasserkörper erklärt werden, die unterschiedlich durchströmt werden. Die Probenahmestandorte des Uranintracer (Fluorimeterstandorte, Abb. 6-53) an zwei Stellen des Buhnenfeldes im unteren Bereich waren nicht repräsentativ. Der Wasseraustausch im oberstromigen von dem Durchriss beeinflussten Abschnitt des Buhnenfeldes ist wesentlich größer als angenommen. Zudem strömt ein Teil der Wasserpartikel aufgrund der Richtungsänderung im Zentrum wieder in Richtung des oberen Buhnenkopfes und vermischt sich nicht mit dem unteren Bereich des Buhnenfeldes.

6.3.2.3 Auswertung des zweiten Versuchstages im Buhnenfeld bei El-km 421



Abb. 6-57: Versuchsanordnung in Buhnenfeld bei El-km 421, links am 31.05.2000 bei niedrigem Mittelwasser

Die Positionen der Messstationen sind in Abbildung 6-57 dargestellt. Zu Beginn und gegen Ende der Messungen fuhren in geringem Abstand zu den Buhnen ein Güterschiff in Richtung stromauf und ein Passagierschiff stromab vorbei, so dass zwei Durchfahrten dokumentiert sind.



Abb. 6-58: Darstellung von Strömungsgeschwindigkeiten an den einzelnen Messtationen des ersten Versuches bei niedrigem Mittelwasser in Buhnenfeld 421, links



Abb. 6-59: Darstellung von Strömungsrichtungen an den einzelnen Messtationen des ersten Versuches bei niedrigem Mittelwasser in Buhnenfeld 421, links

Auch in diesem Buhnenfeld mit einer reparierten oberstromigen Buhne kommt es zu regelmäßigen Pendelungen im ca. vier- bis fünfminütigen Rhythmus mit allerdings geringeren Pegelschwankungen von ca. 2-3 mm (Abb. 6-59). Die Richtungen des Messpunktes ADV 2 wurden aus Gründen der Anschaulichkeit ebenfalls um 180° addiert. Im zentralen Bereich (Messstationen ADV 2 und 3) kommt es aufgrund wechselhafter Überlagerungen zweier Walzen zu ständigen Strömungsänderungen. Eine Sekundärwalze bewegt sich im Kolkbereich hinter dem ehemaligen Durchriss der stromaufgelegenen Buhne mit geringen Fließgeschwindigkeiten von 2 – 5 cm \cdot s⁻¹. Die Feldwalze hingegen beeinflusst den Großteil des Buhnenfeldes. Die Walzensströmung wird von der Sekundärwalze beeinflusst, da es hier aufgrund abwechselnd steigender und fallender Wasserspiegellagen zu einer Ausdehnung bzw. Verringerung der Wassermenge und einer abwechselnden Ein- und Ausströmung kommt. Diese Zusammenhänge werden durch die Pegeldaten aus dem Kolkbereich bestätigt (Abb. 6-58).

Die Richtungsänderungen der Scherzone (Abb. 6-60) fallen hier wie die Strömungen im Buhnenfeld unregelmäßiger aus. Insgesamt handelt es sich um eine weniger dynamisches System mit geringeren Durchflussmengen als in Buhnenfeld 421,8. Die Schwankungen der Wasserspiegellage und der Strömungen treten auch in einem ca. 3 bis 5-minütigen Rhythmus mit allerdings unterschiedlichen Intensitäten auf.



Abb. 6-60: Darstellung von Strömungsrichtungen (ADP) am oberstromigen Buhnenkopf während des ersten Versuches bei niedrigem Mittelwasser in Buhnenfeld 421, links

Die Uraninversuche des IGB bestätigen die Ergebnisse für das Buhnenfeld 421. Das intakte Buhnenfeld weist eine sehr markante Totzone unterhalb der oberen Buhne auf, in die das angefärbte Wasser mit hoher Konzentration (siehe auch die Ballonfotoserie) eindringt und relativ lange verbleibt. Die Konzentration ist in der Regel höher als am Ausfluss des Buhnenfeldes. Die Austauschrate zwischen Buhnenfeld und Hauptstrom berechnet sich zu 0,021 min⁻¹ und damit die mittlere Aufenthaltszeit zu 48 Minuten. Nach 2,4 Stunden waren 95 % des zugegebenen Tracers aus der Zirkulationsströmung abgegeben, deren Umlaufzeit im Mittel 26 Minuten beträgt. Der von dieser Zirkulation angetriebene Sekundärwirbel in der Totzone hat mit 23 Minuten eine erwartungsgemäß kürzere Umlaufzeit. Die Aufenthaltszeit und die Austauschrate lassen sich von der des gesamten Buhnenfeldes nicht unterscheiden.

Die Ergebnisse des Uraninversuchs und eigene Berechnungen stimmen in diesem Buhnenfeld bei El-km 421 besser als in dem Buhnenfeld bei El-km 421,8 überein. Das Gesamtvolumen betrug am Versuchstag 6.410 m³. Die mittlere Fließgeschwindigkeit lag im einzigen Einströmungsbereich am unterstromigen Buhnenkopf bei 25,78 cm · s⁻¹. Dies bedeutet bei Annahme eines ebenfalls ca. 10 m² betragenden Querschnitts des Einstrombereiches eine Einströmung von ca. 2,58 m³ · s⁻¹. Das Gesamtvolumen ist somit nach 41 Minuten und 24 Sekunden erreicht. Dies entspricht annähernd der mittels des Tracerversuchs erhaltenen Austauschzeit von 48 Minuten. Die Abweichungen können messtechnisch, aber auch durch die Unsicherheiten zur Größe des Einstrombereichs und vor allem hinsichtlich des Einflusses der Scherzone bedingt sein. Die Verwirbelungen und die periodische Wanderung der Scherzone beeinflussen den Austausch ebenfalls und lassen sich nur schwer quantifizieren.

Die Austauschvorgänge betreffen auch den Teil der Sekundärwalze im Kolkbereich. Lage und Ausdehnung des Einstroms lassen sich unter Einbeziehung nachfolgend ausführlich besprochener Luftbilder eindeutig identifizieren und abgrenzen. Die Eindrift erfolgt entlang der oberstromigen Buhne mit einer geringen durchschnittlichen Fließgeschwindigkeit von $3,5 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$, wie Auswertungen im GIS (Abb. 6-19) für diesen Bereich ergeben. Das Volumen des Kolkbereiches betrug bei dem Versuchswasserstand ca. 1200 m³. Der Einstrombereich weist einen Querschnitt von ungefähr 12 m² auf. Demnach ergeben sich 47 Minuten und 37 Sekunden für einen Austausch des Wasserkörpers dieses Bereiches, was die mittels der Tracerauswertungen berechneten Austauschzeiten von 48 Minuten bestätigt. Die Austauschzeiten von Kolk und restlichem Buhnenfelde sind somit ähnlich, obwohl der Kolk nur ca. 18 % der Fläche des gesamten Buhnenfeldes umfasst. Dies und die geringen durchschnittlichen Fließgeschwindigkeiten von ca. 3,5 cm \cdot s⁻¹ im Vergleich zu den mittleren Fließgeschwindigkeiten von 12,55 cm \cdot s⁻¹ des gesamten Buhnenfeldes (Tabelle 6-1) veranschaulichen die Bedeutung des Kolkes als Retentionsraum für eindriftende Schwebfracht.

Die Luftbilder wurden für diesen Überlagerungsbereich mittels einer fernauslösenden Digitalkamera von einem Fesselballon aus aufgenommen. Im Zentrum der Bilder befinden sich die ADV-Messgeräte 2 und 3 sowie die Wellenschreiber. Der Verlauf der Strömungen wurde mittels zwei verschiedener Oberflächentracer, Uranin (grün) und der Hobelspäne visualisiert. Die Aufnahmen erfolgten zeitgleich mit den Parallelmessungen. Luftbild 1 (LB 1, 6-61) verdeutlicht einen Ausschnitt der Versuchsanordnung wie sie in Abbildung 6-57 dargestellt ist. Auf LB 2 werden um 10:06:18 Uhr die Tracer vom Boot und vom Ufer aus ins Wasser gegeben. Eine weitere von der unterstromigen Buhne aus erfolgte Zugabe ist fotografisch nicht erfasst. Allerdings wird auf nachfolgenden Bildern (ab LB 15, 6-63) die Drift dieser Tracerwolke erkennbar. Die Konzentrationen des Uranin wurden an zwei Stellen, im Bereich des Kolkes sowie im Bereich der Buhnenfeldwalze (Abb. 6-57) über mehrere Stunden gemessen.

Ab Luftbild 6 (Abb. 6-61) wird die Vermischung der beiden Tracerwolken (Uranin und Hobelspäne) erkennbar. Beide Wolken bilden in diesem Überlagerungsbereich eine Vermischungszone und driften mit der Buhnenfeldwalze weiter in Richtung der oberstromigen Buhne. Auf LB 9 (Abb. 6-62) und den folgenden Bildern ist am oberen Bildrand zu sehen, dass der Kolk selber nicht von Eindriftungen betroffen ist. Dies geschieht erst durch langsame Einströmungen, die entlang der oberstromigen Buhne mit langsamen Fließgeschwindigkeiten und in entgegengesetzter Richtung zur Buhnenfeldwalze erfolgen (auf den Bildern nicht zu erkennen). Von dort kommt es zu einer langsamen aber kontinuierlichen Eindrift, so dass sich hier die Tracerwolken kontinuierlich akkumulieren (sichtbar ab den Luftbildern 13, Abb. 6-62). Ab LB 18 ist fast der gesamte Kolkbereich von Tracerwolken bedeckt.

Durchmischungen zwischen den Wasserkörpern des Kolkes und der Buhnenfeldwalze finden kaum statt. Lediglich der Grenzbereich scheint sich, in Abhängigkeit der Druckverhältnisse, abwechselnd in die eine oder andere Richtung zu verschieben. Diese Pendelung ist auch durch die Pegelschwankungen dokumentiert. Der Ausstrom aus dem Kolk erfolgt entlang des Grenzbereiches in Richtung des äußeren Buhnenabschnitts. Diese Ablenkung wird auch an der Wirbelform der Luftbilder 23 und 24 (Abb. 6-64) deutlich. LB 24 verdeutlicht ebenfalls eine scharfe Abgrenzung der beiden Wasserkörper. Tracerbestandteile sind nun, nach Durchlauf der Tracer, im Bereich der Buhnenfeldwalze nur noch in geringer und kaum noch erkennbarer Konzentration vorhanden. Eine erneute Eindrift aus dem Kolk in den Bereich der Buhnenfeldwalze findet also nicht statt.

Abbildung 6-65 veranschaulicht zusammenfassend Lage und Ausdehnung der Tracer während des Versuches anhand einiger ausgewählter Luftbilder (4, 6, 17, 23). Anhand der georeferenzierten Pixeldarstellungen ist es möglich die genaue Lage der einzelnen Bildausschnitte zu bestimmen. Da nicht das ganze Buhnenfeld und jeweils nur Teile der Tracerwolken fotografisch erfasst wurde, ist eine Quantifizierung darüber hinaus nicht möglich.





09:56:19 Uhr



Luftbild 2

10:06:18 Uhr



Luftbild 3

10:07:15 Uhr



Luftbild 4

10:07:44 Uhr



Legende: Aufnahmedatum: 31.05.2000 +_{1,2,3} Strömungsgeräte (ADV) X Wellenschreiber O Pegelschreiber O Fluorimeter

Abb. 6-61 Erste Sequenz der während des Parallel- und Tracerversuches aufgenommenen Luftbilder in Buhnenfeld 421, links



Luftbild 7

10:09:48 Uhr



Luftbild 8

10:10:28 Uhr



Luftbild 9

10:11:53 Uhr

Luftbild 10





Abb. 6-62: Zweite Sequenz der während des Parallel- und Tracerversuches aufgenommenen Luftbilder in Buhnenfeld 421, links





Abb. 6-63: Dritte Sequenz der während des Parallel- und Tracerversuches aufgenommenen Luftbilder in Buhnenfeld 421, links



Abb. 6-64: Vierte Sequenz der während des Parallel- und Tracerversuches aufgenommenen Luftbilder in Buhnenfeld 421, links





Abb. 6-65: Räumliche Lage und Flächenquantifizierung der während des Parallel- und Tracerversuches aufgenommenen Luftbilder in Buhnenfeld 421, links; Darstellungen beginnend von oben links: Luftbild 4, 6, 17, 23 (unten rechts)

6.3.3 Zweiter Parallelversuch bei Niedrigwasser

6.3.3.1 Versuchsablauf des zweiten Versuches

Der zweite Versuch wurde an zwei Versuchstagen am 28. 9. 2000 und 29. 9. 2000 durchgeführt. Da bei den Niedrigwasserständen von 175 cm und 171 cm (Pegel Havelberg) weite Bereiche nicht mehr benässt waren, wurden an beiden Tagen nur noch 2 ADV-Messgeräte, ein elektronischer Pegelschreiber, und der dreidimensional vertikal messende ADP eingesetzt. Die Versuchsdauer betrug jeweils ungefähr 2 Stunden. Die Standorte der Messgeräte können den Abbildungen 6-66 und 6-70 entnommen werden.

6.3.3.2 Auswertung des dritten Versuchstages im Buhnenfeld bei El-km 421



Abb. 6-66: Versuchsanordnung in Buhnenfeld bei El-km 421, links, am 28.09.2000 bei Niedrigwasser

Die im Vergleich zum ersten Versuch um ca. 65 cm niedrigere Wasserspiegellage hatte in Buhnenfeld 421, anders als in Buhnenfeld 421,8, aufgrund der intakten Buhnen und geringeren Verlandung geringere Auswirkungen auf die Strömungsverhältnisse. Die Fließgeschwindigkeiten der Einströmung am oberstromigen Buhnenkopf waren mit Schwankungen von 30 bis 50 cm \cdot s⁻¹ während des zweiten Versuches denen des ersten vergleichbar. Auch die Perioden der Zu- und Abnahme der Geschwindigkeiten lagen im Bereich von ca. 5 Minuten, was ein Hinweis auf relativ gleichbleibende Bedingungen ist. Ebenfalls vergleichbar sind die Richtungsänderungen des zentralen Punktes bei ADV 2 (Abb. 6-69), sowie die ca. 4 – 5 minütigen Schwankungen der Pegelwerte im Bereich von 2-3 Millimetern. Die Strömungsverhältnisse am Buhnenkopf, welche diesmal mit einem vertikal ausgerichteten ADP aufgezeichnet wurden, waren denen des ersten Versuches ebenfalls hinsichtlich Strömungsrichtung und Periodizitäten der Strömungsrichtungsänderungen vergleichbar. Auch hier macht sich der niedrigere Wasserstand nicht bemerkbar.



Abb. 6-67: Darstellung von Strömungsgeschwindigkeiten an den einzelnen Messtationen des zweiten Versuches bei Niedrigwasser in Buhnenfeld 421, links



Abb. 6-68: Darstellung von Strömungsrichtungen an den einzelnen Messtationen des zweiten Versuches bei Niedrigwasser in Buhnenfeld 421, links



Abb. 6-69: Darstellung von oberflächennahenStrömungsrichtungen (ADP) am oberstromigen Buhnenkopf während des zweiten Versuches bei Niedrigwasser in Buhnenfeld 421, links

Auch für die Niedrigwasserstände wurden die Austauschzeiten berechnet. Der Querschnitt des einzigen Einstrombereiches am unteren Buhnenkopf wird entsprechend des niedrigen Wasserstandes mit ca. 7,5 m² angenommen. Die durchschnittliche Fließgeschwindigkeit betrug hier 27,8 cm \cdot s⁻¹, was einen Einstrom von insgesamt 2 m³ \cdot s⁻¹ bedeutet. Das Fassungsvolumen erreichte 4280 m³. Die durchschnittliche Austauschzeit des Wasserkörpers lag somit für diesen Niedrigwasserstand bei 35 Minuten und 29 Sekunden und um ca. 6 Minuten unter der Austauschzeit bei niedrigem Mittelwasser. Unterschiede bestehen im wesentlichen im niedrigeren Wasserstand und geringeren Fassungsvermögen. Bei höherem Wasserstand ist die Einstromgeschwindigkeit ähnlich der Fließgeschwindigkeit (25,58 cm \cdot s⁻¹). Eine weitere Differenzierung unterschiedlicher Wasserkörper innerhalb des Buhnenfeldes erfolgte nicht.

6.3.3.3 Auswertung des vierten Versuchstages im Buhnenfeld bei El-km 421,8

In Buhnenfeld 421,8 kam es im Vergleich zum ersten Versuch zu veränderten Ergebnissen. Dies ist sowohl auf den reduzierten Durchfluss des Buhnendurchrisses, als auch auf das wesentlich geringere Fassungsvermögen im unterstromigen Teil und die veränderte Einströmung am Buhnenkopf zurückzuführen.



Abb. 6-70: Versuchsanordnung in Buhnenfeld bei El-km 421,8, links am 29.09.2000 bei Niedrigwasser



Abb. 6-71: Darstellung von Strömungsgeschwindigkeiten an den einzelnen Messtationen des zweiten Versuches bei Niedrigwasser in Buhnenfeld 421,8 links

Die Schwankungen des Wasserstandes sind sichtbar, doch weniger signifikant. Der Bereich der Buhnenwurzel wird nur von der Durchrissströmung gespeist. Diese Strömung pendelt wie bei dem höherem Wasserstand um 360°. Die Strömung im Bereich des Buhnenkopfes

hingegen pendelt überwiegend zwischen 0° und 180° (Abb. 6-72). Es kommt hier nur zu geringen Einströmungen und vorwiegend zu Ausströmungen, wenn aufgrund des Staueffektes im Bereich der Buhnenwurzel Einströmungen durch den Durchriss nicht mehr möglich sind. Da die Strömungen reduziert sind und ein geringerer Druck aufgebaut wird, verringern sich auch die Wasserspiegelschwankungen (Abb. 6-71 und 6-72).



Abb. 6-72: Darstellung von Strömungsrichtungen an den einzelnen Messtationen des zweiten Versuches bei Niedrigwasser in Buhnenfeld 421,8 links



Abb. 6-73: Darstellung von oberflächennahen Strömungsrichtungen (ADP) am oberstromigen Buhnenkopf während des zweiten Versuches bei Niedrigwasser in Buhnenfeld 421,8, links, maximale Richtungsänderungen bis 345°

Im Bereich der Scherzone am Buhnenkopf der oberstromigen Buhne kommt es ebenfalls nicht mehr zu den während des ersten Versuches bei höherem Wasserstand und durchströmtem Durchriss festgestellten regelmäßigen Pendelungen der Strömungsrichtung (Abb. 6-73). Die Einflüsse des Buhnenfeldes mit stark verringertem Wasservolumen und reduziertem Durchfluss durch den Durchriss sind wesentlich geringer und modifizieren die Scherzone nur unregelmäßig.

Da der Durchriss bei dem zweiten Versuches noch durchströmt war, waren wiederum zwei Einstrombereiche vorhanden. Am unteren Buhnenkopf wird der durchströmte Querschnitt wie in Buhnenfeld 421 auf ca. 7,5 m² geschätzt. Bei einer durchschnittliche Fließgeschwindigkeit von 7,92 cm \cdot s⁻¹, ergab sich ein Einstrom von 0,6 m³ \cdot s⁻¹. Die ermittelte Fließgeschwindigkeit des zweiten Einstrombereiches unterhalb der Durchrissströmung betrug 7,12 cm \cdot s⁻¹ und der Querschnitt ca. 5 m², was einen Einstrom von 0,35 m³ \cdot s⁻¹ bedeutet. Das Fassungsvermögen des Buhnenfeldes lag bei 3838 m³. Als durchschnittliche Austauschzeit des Wasserkörpers errechnen sich 67 Minuten und 20 Sekunden. Die starken Schwankungen von Strömungsrichtung und –geschwindigkeit am unteren Buhnenkopf sowie die geringe Durchrissströmung bei Niedrigwasser sind ausschlaggebend für einen stark reduzierten Wasseraustausch im Vergleich zu Buhnenfeld 421, welches aufgrund einer wasserstandsunabhängigen und homogeneren Morphologie (Abb. 5-14, 5-16, 5-18 und 5-20) stetigere und gleichbleibende Strömungen aufweist.

6.4 Einfluss der Schifffahrt auf Strömungen und Wasserspiegellagen in Buhnenfeldern

Von Schiffen verursachte und in flachen Gerinnen auf Ufer und Sohle einwirkende Kräfte und Wellensysteme wurden von OEBIUS (2000) ausführlich beschrieben. Die hydrodynamischen Wechselwirkungen zwischen Schiff und Fahrwasser sind vor allem induziert durch:

- eine Verdrängungsströmung des während des Vortriebs um das Schiff herumgelenkten Wasserkörpers
- die für den Vortrieb erforderliche Schubströmung
- die besonders in flachen und begrenzten Gewässern, also im Prinzip in allen Binnenwasserstrassen, nahe des Schiffskörpers vorhandenen Gewässersohlen, Uferzonen und künstlichen Befestigungen

Die erste Komponente, welche für den Vortrieb notwendig ist, führt in Kombination mit der dritten Komponente, also beispielsweise einem begrenzten Querschnitt und geringem Ab-

stand von Sohle zu Schiffkörper zu verstärkten Umströmungen, so dass Schäden an Sohle und Ufer auftreten können. Gesteigert wird dies durch den Flachwassereffekt, der an der Mittelelbe während der meisten Zeit des Jahres die Hauptursache für Sohlen- und Seitenerosion darstellt. Da mit abnehmender Wassertiefe die Öffnung zwischen Schiffsboden und Sohle und somit der durchströmte Querschnitt geringer wird, erhöhen sich die Umströmungsgeschwindigkeiten und können in Abhängigkeit von der Fließgeschwindigkeit und der geringen Tiefe bei Steigerung dieser Faktoren vom strömenden in den schießenden Zustand übergehen und zu Erosionen führen. Weitere Schäden an der Gewässersohle werden durch Verwirbelungen des Propulsionsorgans (Schiffsschraube) hervorgerufen. Da sich diese Auswirkungen aber nur auf die Gewässersohle beziehen und die Buhnenfelder und Uferzonen nicht direkt berühren, konzentrieren sich die weiteren Ausführungen auf die primären und sekundären Wellensysteme, welche durch die Vorwärtsbewegung des Schiffskörpers und die Umströmung hervorgerufen werden.

Im ungestörten Fahrwasser, welches hier vorausgesetzt wird, wird vor dem Schiff mittels der Bugwelle ein Gefälle aufgebaut, bis das Wasser unter und am Schiff vorbei nach hinten strömt. Das primäre Wellensystem verursacht aufgrund der Verdrängung die Umströmung des Schiffkörpers und hinter dem Heck des Schiffes ein Tal, in welches nach der Vorwärtsbewegung des Schiffes von diesem Ort wieder Wasser nachströmt und in der Umgebung den "Sunk", eine kurzfristige Absenkung des Wasserspiegels, verursacht. Der Wiederanstieg des Wasserspiegels auf den Normalzustand durch die Rückströmung und das damit zusammenhängende transversale Wellensystem am Heck wird als Energierückgewinnung bezeichnet. Dieser Effekt wirkt sich teilweise enorm auf die Wasserspiegellagen innerhalb der Buhnenfelder aus, die während des Vorganges, bei niedrigen Wasserständen, bis zu einem Drittel der Fläche leer laufen können. Dieses Ereignis wurde messtechnisch erfasst.

Das sekundäre Wellensystem, die Bug- und Schulterwellen eines Schiffes, hat isoliert betrachtet im Vergleich zum primären Wellensystem geringere Auswirkungen. Erosionen können auftreten, wenn die Ausbreitung des sekundären Wellensystems mit dem transversalen primären Wellensystem im Uferbereich zusammenfällt und es zu sogenannten Rollbrechern kommt. Im Verhältnis zum primären Wellensystem sind die Auswirkungen des sekundären Wellensystems auf die Uferberandung weniger gravierend. Die vom Schiffskörper direkt verursachten Bug und Schulterwellen breiten sich vom Schiff in Richtung der Ufer mit der Fortschrittsgeschwindigkeit des Schiffes aus. Der Winkel der divergenten Wellen zur Schiffsachse steigt von ca. 19° bei langsamer und mittlerer Fahrt bis auf 90° bei schneller Fahrt. Danach beginnt die Gleitfahrt, bei welcher das Schiff auf der Bugwelle reitet und die divergenten Wellen hinter sich lässt. Diese breiten sich dann wieder in einem Winkel von 19° aus. Gleitfahrten sind nur im Zusammenhang mit der Sportschifffahrt von Interesse, für die Güterschifffahrt spielen sie keine Rolle. Der Widerstand und die Bugwellenhöhe des sekundären Wellensystems nehmen mit abnehmender Wassertiefe ebenfalls zu.

Die Wellen des primären Wellensystems, der Hub und Sunk des Wasserspiegels laufen mit der Fortschrittgeschwindigkeit des Schiffes entlang des Ufers. Die Energierückgewinnung der Heckwelle verursacht weiterhin eine Strömung in der Fortschrittsrichtung des Schiffes und führt in Verbindung mit den Wellen des sekundären Wellensystem zu Wirbeln, welche ein zusätzliches Erosionspotential bedeuten.

Die Untersuchungen des Einflusses von Schiffsbewegungen und der beschriebenen Kräfte auf die Strömungen in Buhnenfeldern waren in den Parallelversuch (Kapitel 6.3) integriert. Folgende Fragen standen im Mittelpunkt:

- Welche Dauer und Intensität besitzen die von vorbeifahrenden Schiffen ausgeübten primären und sekundären Wellensysteme und nach welcher Zeit haben sich die ungestörten Verhältnisse wieder eingestellt?
- Welcher Art sind die kurzfristigen unmittelbar nach der Durchfahrt folgenden Auswirkungen?
- Betreffen die Störungen die gesamten Buhnenfelder oder nur bestimmte Bereiche?

Der oben beschriebene Flachwassereffekt bedeutet, dass die Auswirkungen der Wellensysteme insbesondere in Zeiten niedriger Wasserstände gravierend sind. Die Auswirkungen werden in Anlehnung an die Pegelstände der Versuchstage in Tabelle 6-3 für zwei verschiedene Wasserstände dargestellt.

Während der Versuchstage konnte der maximale Sunk mit 30 cm aufgezeichnet werden. Die Anzahl relevanter Durchfahrten größerer Schiffe war allerdings stark beschränkt. Insofern ist, auch nach den Beobachtungen während der übrigen Messkampagnen davon auszugehen, dass deutlichere Absenkungen des Wasserspiegels auftreten können. Für die hier beispielhaft verwendeten Berechnungen der Auswirkungen auf die Flächen und das Wasservolumen sowie den davon abhängenden Wasseraustausch, wird dennoch ein Sunk von 30 cm verwendet. Die GIS-gestützten Berechnungen erfolgten für die Wasserstände von 180 cm und 250 cm (bezogen auf den Pegel Havelberg). Tabelle 6-3 enthält ausgesuchte Buhnenfelder, den jeweiligen Pegelstand bezogen auf Pegel Havelberg, die Wasservolumina der Buhnenfelder zu diesem Pegelstand, den Verlust an Wasservolumina während eines schiffsinduzierten Sunks von 30 cm, den Verlandungsgrad (Anteil der trockenen Fläche an der Grundfläche im ungestörten Zustand), die zusätzlich temporär trockenfallende Fläche während

eines schiffsinduzierten Sunks von 30 cm (bezogen auf die Grundfläche des Buhnenfeldes), und die durchschnittliche Tiefe der Buhnenfelder (bezogen auf den Pegelstand).

Buhnenfeld/ Pegelstand Havelberg (cm)	Durchschnitts- tiefe (m)	Ungestörtes Wasser- volumen (m ³)	Schiffsinduzierte Wasservolumen- abnahme (m ³) (%)		Verlandungs- grad (%)	Zusätzlich trockenfallende Fläche bei Schiffsdurchfahrt (%)
418,2 / 180	0,51	3.901	1.388	35,6	33,2	13,1
418,2 / 250	1,03	7.784	1.738	22,3	20,6	5,6
421,0 / 180	0,76	4.400	961	21,8	42	4,9
421,0 / 250	1,21	6.974	1.163	16,7	30	5,6
421,8 / 180	0,55	4.313	1.344	31,2	38	10,5
421,8 / 250	1,04	8.196	1.770	21,6	22,5	4,7
423,4 / 180	0,8	15.263	3.606	23,6	32,7	11,6
423,4 / 250	1,3	24.804	4.217	19,3	24,4	3,4
452,9 / 180	0,51	2.968	647	21,8	60,4	4,7
452,9 / 250	0,83	4.834	875	18,1	45,3	8,4

Tab. 6-3:	Berechnete	schiffsinduzierte	Veränderungen	von	Wasservolumina	und	benässten
	Flächen in a	usgewählten Buhn	enfeldern für eine	n Su	nk des Wasserspie	gels v	on 30 cm

Die Abbildungen 6-74 und 6-75 stellen zwei während des ersten Versuches in Buhnenfeld 421 aufgezeichnete Durchfahrten dar. Abbildung 6-74 verdeutlicht Auswirkungen eines in Nähe des Buhnenfeldes stromauf fahrenden Güterschiffes (Ladekapazität 2000 Tonnen) und Abbildung 6-75 die in der Strommitte in Richtung stromab erfolgte Durchfahrt eines Passagierschiffes. Aufgeführt sind die Wasserspiegellagenveränderungen (Pegelschreiber: grüne Kurve, Wellenschreiber: braune Kurve) in Zentimetern sowie die Veränderungen der Fließgeschwindigkeiten der einzelnen Messpunkte in cm \cdot s⁻¹. Die Werte des Pegels und des Wellenschreibers sind relativ zu betrachten, d.h. der absolute Wert der Angabe ist unerheblich.

Die Auswirkungen des Frachters sind wirksamer und länger anhaltend als die des Passagierschiffes. Im ersten Fall lassen sich vertikale Schwankungen noch bis zu 15 Minuten nach der Durchfahrt nachweisen. Im zweiten Fall haben sich die Verhältnisse nach ca. 5 Minuten wieder normalisiert. Erkennbar wird, dass die maximale Differenz zwischen dem Absinken des Wasserspiegels um 30 cm und dem Ansteigen des Wasserspiegel um 15 cm gegenüber dem normalen Pegelstand 50 cm betragen. Die von dem Passagierschiff ausgelösten Wasserstandsschwankungen liegen im Bereich von 8 cm.



Abb. 6-74: Auswirkungen von Schiffsbewegungen eines Güterschiffes in Buhnenfeld 421, Messpositionen sind in Abbildung 6-57 dargestellt



Abb. 6-75: Auswirkungen von Schiffsbewegungen eines Passagierschiffes in Buhnenfeld 421, Messpositionen sind in Abbildung 6-57 dargestellt

Die durch Sunk verursachten kurzfristigen Reduzierungen von Wasservolumina liegen für die in Tabelle 6-3 aufgeführten Buhnenfelder in Abhängigkeit von den Morphologien und den Pegelständen zwischen ca. 17 % und 35 %, d.h. diese Wassermengen werden während einer relevanten Schiffspassage ausgetauscht. Die Parallelversuche (Kapitel 6.3) ergaben zum Vergleich bei einem Pegelstand von ca. 235 cm (Pegel Havelberg) für ungestörte Zustände für Buhnenfeld 421 eine Wasseraustauschzeit von ca. 40 Minuten und für das Buhnenfeld mit durchrissener Buhne bei El-km 421,8 eine Austauschzeit von ca. 19 Minuten. Für eine Wassermenge von 25 % des Fassungsvermögens wäre dementsprechend bei ungestörtem Zustand für BF 421 eine Austauschzeit von 10 Minuten und für BF 421,8 eine Austauschzeit von knapp 4 Minuten zu nötig. Die veränderten Bedingungen während des Sunks sind für das Buhnenfeld 418,2 in Abbildung 6-76 beispielhaft dargestellt.

Die durch den Schiffsverkehr deutlich erhöhten Austauschraten sind für einige biologische Prozesse, wie z. B. die Reproduktion von Plankton unerheblich, da die Reproduktionszeiten von mehreren Tagen sowohl deutlich über den ungestörten als auch den beeinflussten Austauschzeiten liegen (HOLST et al. 2002). Deutlichere Auswirkungen dürfte der plötzliche Anstieg an Fließgeschwindigkeiten in den verschiedenen Bereichen des Buhnenfeldes auf die Verdriftung von Fischlarven sowie auf die Resuspension von Sedimenten und organischem Material haben. Die Fließgeschwindigkeiten erhöhen sich z.T. erheblich und erreichen während des aufgezeichneten Ereignisses (Abb. 6-74) in den äußeren Bereichen $62 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$ und im zentralen Bereich $48 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$ und damit im Vergleich zum ungestörten Zustand eine annähernde Verdopplung. Da sich auch die Strömungsrichtung verändert, kann es zusätzlich zum oben beschriebenen Wasseraustausch innerhalb des Buhnenfeldes zu Verdriftungen aus strömungsberuhigten in stärker durchströmte Bereiche und anschließend zu Verdriftungen in den Hauptstrom oder in benachbarte Buhnenfelder kommen. Auf bodenbewohnende Lebewesen (Benthosarten) hat das schiffsinduzierte pulsartige hydraulische Störungsregime aufgrund der Resuspension von Sanden und abgelagertem organischen Material eine limitierende Wirkung, wie BRUNKE et. al. (2002b) und ENGELHARDT et al. (2002) zeigen.

Der eigentliche Wellenschlag des sekundären Wellensystems hat abgesehen von den oben beschriebenen Rollbrechern nur eine nachrangige Bedeutung. Besonders Sportboote verursachen bei Fahrten mit hohen Geschwindigkeiten höhere Wellen, die sich allerdings teilweise an den Buhnen brechen und deren Auswirkungen nur von kurzer Dauer sind. Der Hub und Sunk, welcher von größeren Schiffen der Binnenschifffahrt hervorgerufen wird, tritt bei Sportbooten nicht oder kaum wahrnehmbar auf.



Abb. 6-76: Veränderung der Wasserspiegellage in Buhnenfeld 418,2, rechts bei schiffsinduiziertem Sunk von 30 cm

Die dokumentierten Höhen der Wellen waren innerhalb von Buhnenfeld 421 unterschiedlich. In dem Totwasserbereich über dem relativ tiefen Kolk wurde ein maximaler Sunk von 18 cm und eine Wellenhöhe während der Energierückgewinnung von 13 cm über dem durchschnittlichen Wasserstand gemessen. Im zentralen Bereich entlang der Uferlinie (Messung mit Wellenschreibern) lag der Sunk bei 30 cm und die Wellenhöhe erreichte 23 cm über dem mittleren Wasserstand. Dieser Bereich war also stärker von den Auswirkungen des primären Wellensystems betroffen als der Kolkbereich. Zumindest die Wellenhöhe ist mit der flacheren Steigung und dem verstärkten Auflaufen zu erklären. Inwiefern die Unterschiede der Sunkhöhe durch die unterschiedlichen Volumina von tieferem Kolk und Flachwasserbereich oder durch die Lage zu den Buhnen verursacht sind, konnte in diesem Test nicht geklärt werden.

Zusammenfassend können für ein Ereignis folgende Auswirkungen beschrieben werden:

 Das durch den Sunk ausgelöste kurzfristige Ablaufen von Teilen des Wasserkörpers im Buhnenfeld und das damit verbundene Absinken des Wasserspiegels verursachen Trockenfallen flacher Verlandungsflächen, Reduzierung des Wasservolumens und einen erhöhten Wasseraustausch.

- 2. Die Wellenhöhen sind in verschiedenen Bereichen des Buhnenfeldes unterschiedlich ausgeprägt. In flachen Bereichen laufen die Wellen verstärkt auf und brechen sich.
- Sog und Schwall können in strömungsberuhigten Bereichen kurzfristig eine deutliche Zunahme der Fließgeschwindigkeiten verursachen und innerhalb des Buhnenfeldes zur Durchmischung der verschiedener Wasserkörper sowie zur Ausdrift von Fischlarven und Resuspension von Sedimenten führen.

6.4 Resümee

Hydrodynamische Kräfte sind für die Entstehung flussgebietstypischer Morphologien und von Substratverteilungen ausschlaggebend. Fließgeschwindigkeiten begrenzen auch die Ausdehnungen von Habitaten, da aquatische Organismen über ihre morphologischen Voraussetzungen und ihr Verhalten an bestimmte Bedingungen angepasst sind. Die Fließgeschwindigkeitsverteilungen dienen zudem im weiteren Verlauf der Arbeit der Berechnung von Sohlschubspannungen, um für Hochwasserverhältnisse die unterschiedlichen Sedimentationsund Erosionsbereiche zu identifizieren und gehen in die Quantifizierung von geeigneten Habitatflächen verschiedener Tiergruppen ein.

Als Grundlage der Auswertungen dienen in die Fläche interpolierte Messwerte von Fließgeschwindigkeiten bei unterschiedlichen Wasserständen. Die Ergebnisse lassen qualitative und quantitative Aussagen zu. Eine ausführliche Beschreibung hydraulischer Verhältnisse in unterschiedlich strukturierten Buhnenfeldern erfolgte, um anschließende vereinfachende und quantifizierende Aussagen zu ergänzen. Die unterschiedlichen Ausprägungen der Buhnenfeldströmungen und Modifikationen der allgemeinen Buhnenfeldwalze konnten überwiegend auf morphologische Ursachen oder die unterschiedlichen Buhnentypen zurückgeführt werden. Die Lokalisierungen und Identifizierung von Strömungsbereichen und deren Ausdehnungen sind insbesondere Voraussetzungen für die späteren Habitatbilanzen.

Quantitative Flächenauswertungen der hydraulischen Modelle erfolgten für verschiedene Wasserstände. Die Auswertungen der Flächenanteile verschiedener Fließgeschwindigkeiten sowie von Durchschnittsgeschwindigkeiten ergab anders als für Korngrößenverteilungen und Sedimentationsmächtigkeiten keine flussgebietsabhängigen Unterschiede. Die Unterschiede waren entweder von den Hanglagen oder den Buhnenstrukturen beeinflusst (Abb. 6-48). Die Differenzen waren allerdings nicht bedeutend, so dass sich bei überströmten Buhnen keine wesentlichen Unterschiedungskriterien ergaben. Bei nicht überströmten Buhnen hingegen

wurden in Buhnenfeldern mit durchrissenen Buhnen höhere Fließgeschwindigkeiten als in Vergleichsbuhnenfeldern gleicher Lagen gemessen.

Buhnenfelder sind strömungsberuhigte Zonen, die im Vergleich zu natürlichen unverbauten Verhältnissen eine Verstärkung der Differenz zwischen Flussschlauch und ufernahen Bereichen bewirken. Bei Niedrigwasser und niedrigen Mittelwasserständen liegen die Fließgeschwindigkeiten im Hauptstrom um den Faktor 3 – 7 über den Fließgeschwindigkeiten der Buhnenfelder. Bei überströmten Buhnen (Mittelwasser bis Hochwasser) liegt dieser Faktor noch bei 2 bis 3. Dies verdeutlicht die Ursachen der hohen Verlandungsneigungen der an der Elbe fast durchgängig verbauten Uferbereiche.

Insbesondere bei nichtüberströmten Buhne bestehen in den Buhnenfeldern komplexe Zusammenhänge unterschiedlicher Walzensysteme und Turbulenzbereiche. Die ständigen Veränderungen und Schwankungen von Fliessgeschwindigkeiten und -richtungen stellten zu Beginn der Untersuchungen die Zulässigkeit von verallgemeinernden Aussagen zu durchschnittlichen Fließgeschwindigkeiten, Wasseraustausch und Abgrenzungen bestimmter Bereiche sowie die Interpolation von Strömungen in Frage. Instationaritäten hätten bedeutet, dass die jeweiligen Messungen nur Momentaufnahmen ohne weitere Aussagefähigkeit und ein Gesamtbild der Strömungsverhältnisse aufgrund nacheinander aufgenommener Messungen nicht möglich gewesen wäre. Im Gegensatz dazu standen Beobachtungen und erste Auswertungen, die eine permanente Wiederholung von Wasserspiegelschwankungen und variierenden Strömungen als Vermutung nahegelegten. Dies stimmte mit den regelmäßigen Wasserspiegel- und Strömungsänderungen überein, die von verschiedenen Autoren, u.a. KIMURA und HOSODA (1997) für Stillwasserbereiche entlang von Rinnen anhand von Laborexperimenten und mathematischen Modellen beschrieben worden waren. Aus diesen Gründen wurden Parallelversuche bei niedrigem Mittelwasser und bei Niedrigwasser in zwei Buhnenfeldern mit reparierten bzw. einer oberstromig durchrissenen Buhnen durchgeführt. Die Ergebnisse bestätigten die Regelmäßigkeit von Wasserstandsschwankungen, Richtungsänderungen der Strömungen sowie periodischen Ein- und Ausströmungen. Es handelt sich aufgrund regelmäßiger Periodizitäten um stationäre Abläufe, die die Berechnungen von Mittelwerten und weitere statistische Auswertungen ermöglichen. Diese Vorgänge wirken sich auch auf andere Parameter aus. BRUNKE et al. (2003) wiesen zeitliche Schwankungen des Gehalts von gelöstem Sauerstoff und von Temperaturen nach. Sie konnten in Buhnenfeldern der mittleren Elbe Veränderlichkeiten dieser physikalisch-chemischen Variabeln und des Wasserstandes in gleichen ca. fünfminütigen Intervallen feststellen.

Als weiteres Ergebnis der Parallelversuche konnten die Austauschzeiten für beide Buhnenfelder mit unterschiedlichen Erhaltungszuständen der Buhnen ermittelt werden. In dem Buhnenfeld mit durchrissener oberstromiger Buhne lag die Austauschzeit bei höheren Wasserstand und stark durchströmtem Durchriss, trotz eines etwas größeren Volumens, bei der Hälfte der Austauschzeit des reparierten Buhnenfeldes. Bei niedrigem Wasserstand und kaum noch durchströmtem Durchriss hingegen spielten andere Faktoren eine Rolle und die Austauschzeit diese Buhnenfeldes war wesentlich höher als die des intakten Buhnenfeldes. Diese Beobachtungen wurden mittels der Versuche quantifiziert. Die Erkenntnisse zu den wechselnden Strömungsverhältnissen bedeuten für zukünftige Untersuchungen ein vereinfachtes Probenahmedesign mit geringerem Messaufwand und eine verbesserte Parametrisierung zu erhebender Daten.

Die Versuche wurden um die Aufzeichnung von Schiffsdurchfahrten bei niedrigen Wasserständen erweitert um die Wirkungen auf Strömungen und Wasseraustausch bewerten zu können. Relevante Schiffsbewegungen von Großmotorgüterschiffen führen in Buhnenfeldern aufgrund von Sog- und Schwall zu erheblichen kurzfristigen Wasserstandssenkungen, die mit einem hohen Wasseraustausch einhergehen. Dies kann innerhalb von ca. 30 Sekunden bis zu einem Drittel des Wasservolumens betreffen und bedeutet ein kurzfristiges Trockenfallen weiter Uferbereiche sowie eine Durchmischung des Wasserkörpers. Die Fließgeschwindigkeiten, der bei ungestörtem Zustand strömungsberuhigten Flächen, verdreifachen sich in einigen Abschnitten und können so zu erheblichen Verdriftungen von Kleinlebewesen wie Fischlarven oder zur Resuspension von Sedimenten führen.