8 Morphodynamik bei Hoch-, Mittel- und Niedrigwasser

Die regelmäßigen Aufnahmen der Sohlenhöhen von Buhnenfeldern zwischen El-km 440,2 und 443,9 nach verschiedenen Abflussphasen ermöglichte die Verschneidung der Topografien und eine anschließende Bilanzierung von Akkumulation und Erosion. Lage und Ausmaß der Veränderungen werden in Kapitel 8-2 dargestellt. Die Berechnung der Ein- und Austräge erfolgt in Kapitel 8-3. Zusätzlich zu den Aufnahmen bei regelmäßig wiederkehrenden Abflüssen bot das Sommerhochwasser 2002 die Möglichkeit Auswirkungen von Extremereignissen auf Buhnenfelder und Hauptstrom zu untersuchen, was eingangs beschrieben wird.

8.1 Morphodynamik im Hauptstrom bei Wittenberge während des Sommerhochwassers 2002



Abb. 8-1: Hochwassersituation am 20. August 2002 bei Wittenberge (El-km 455)

Unterstützend zu den Aufnahmen der Auswirkungen des Sommerhochwassers 2002 auf die Sohlentopografie in den Buhnenfeldern erfolgten Untersuchungen im Raum Wittenberge von El-km 453 bis 455. Vier Tage vor dem Scheiteldurchgang der Hochwasserwelle am 17.08.2002 und 13 Tage nach Durchlauf am 02.09.2002 wurden Querprofile mit kombiniertem Echolot- und GPS-Einsatz aufgezeichnet. Die Veränderungen der Topografie geben Aufschluss über die Dynamik während dieses Ereignisses in der Flusssohle und ermöglichen den Vergleich mit Veränderungen in den Buhnenfeldern. Weiterhin wurden am Tag des Scheiteldurchlaufs (20.08.2002) Strömungs- und Abflussmessungen unter Einsatz eines ADCP in dem gleichen Gebiet durchgeführt (Abb. 8-1). Diese Messungen waren in den 10 bis 13 Kilometer stromaufgelegenen Versuchsbuhnenfeldern aus genehmigungsrechtlichen Gründen nicht möglich. Am 21.08.2002, einen Tag nach Durchlauf des Scheitels, wurde vom Institut für Weltraumforschung der Freien Universität Berlin eine Luftbildbefliegung dieses Gebietes gemacht. Die überlassenen Luftbilder wurden zusammengefügt, georeferenziert und mit der von der Wasser- und Schifffahrtsdirektion Ost zur Verfügung gestellten Digitalen Bundeswasserstraßen-Karte (DBWK) unterlegt. Diese Kartengrundlage dient zur Veranschaulichung der Hochwassersituation und der Lage der durchgeführten Messfahrten. Deutlich erkennbar ist auch die unterschiedliche Verteilung transportierter Schwebfracht im Hauptstrom und in strömungsberuhigten ufernahen Bereichen sowie im Hafen Wittenberge.

Die Strömungsgeschwindigkeiten erreichten im Thalweg Werte bis zu 250 cm \star s⁻¹. Der Abfluss belief sich auf ca. 3400 m³ \star s⁻¹. Sowohl in den Buhnenfeldern als auch in Uferbereichen ohne Buhnenverbauung wurden Fließgeschwindigkeiten von 80 – 150 cm \star s⁻¹ (Abb. 8-2) gemessen, womit diese Werte keine weiteren Hinweise auf eine reduzierte Hochwasserneutralität der Buhnen geben.



Abb. 8-2: Messwerte tiefengemittelter Fließgeschwindigkeiten (cm + s⁻¹) in Regelbuhnenfeldern zwischen El-km 453 und 455 während des Sommerhochwassers 2002

Die aufgenommenen Querprofile sind in Abbildung 8-3 dargestellt. Der Vergleich der Sohlenhöhen vor und nach dem Ereignis zeigt deutliche Veränderungen auf. Dabei kommt es sowohl zu Erosionen als auch zu Akkumulationen und damit zu Umlagerungen im Flussschlauch. Die Höhenänderungen betragen teilweise bis zu 1,5 m. Die vor dem Hochwasser am 17. 8. 2002 aufgenommenen Querprofile verlaufen gleichmäßiger und stetiger als die nach dem Hochwasser aufgenommenen Profile, die eine wesentlich höhere Reliefenergie veranschaulichen. Dies ist bedingt durch den Sedimenttransport in Form von Transportkörpern, wie er unterhalb der Havelmündungen stattfindet (ROHDE 1971, HENTSCHEL 1998). Die bei Niedrig- und Mittelwasser größeren zusammenhängenden Transportkörper werden bei höheren Abflüssen in kleinere Körper zerlegt. Die Höhe und Steilheit dieser kleineren Transportkörper nehmen mit steigendem Abfluss zu wie WANG et al. (1999, 2002) anhand von Laborversuchen zeigen konnten und flachen nach Ablauf der Hochwasserwellen mit zeitlicher Verzögerung wieder ab. Die Zu- und Abnahmen der Sohltopografie bei instationären Strömungen verlaufen im Hauptstrom anders als in Buhnenfeldern, die als strömungsberuhigte Bereiche bei Niedrigwasser eine geringere Dynamik aufweisen. Bei Hochwasser entstandene Änderungen sind deshalb in Buhnenfeldern von geringerem aber dauerhafterem Ausmaß.



Abb. 8-3: Veränderung der Sohlenhöhen im Hauptstrom vor und nach dem Sommerhochwasser 2002 zwischen El-km 452 und 455; Lagen der Profile sind in Abbildung 8-1 abgebildet

8.2 Morphodynamik untersuchter Buhnenfelder während der Mittel- und Niedrigwasserphase 2001 und der Winter- und Sommerhochwasserphasen 2002

Die dargestellten morphologischen Veränderungen beziehen sich auf den Zeitraum von Frühjahr 2001 bis Oktober 2002. In diesem Abschnitt wurden vier umfassende Einmessungen der Sohlentopografie durchgeführt. Die erste Aufnahme nach Umbau der Knickbuhnen Ende 2000 erfolgte in den Monaten Mai und Juni 2001. Die zweite Aufnahme fand im Januar 2002 nach einer langen Mittel- und Niedrigwasserperiode statt. In diesen Zeitraum fiel der Umbau der Absenkungsbuhnen (Oktober 2001). Aufnahme 2 dokumentiert die morphologischen Veränderungen bei Mittel- und Niedrigwasser und zusätzlich für die Buhnenfelder 443,5 und 443,6 die baulichen Modifikationen. Anschließend an Aufnahme 2 begann das ca. dreimonatige ausgedehnte Winterhochwasser 2002, dessen Auswirkungen auf die Morphologien in den Monaten Mai und Juni 2002 untersucht wurden (Aufnahme 3). Das im August 2002 aufgetretene Jahrhunderthochwasser bot die Gelegenheit, die Folgen von Extremabflüssen für die Buhnenfelder zu erfassen (Aufnahme 4) und mit denen des zwei- bis dreijährigen Winterhochwassers zu vergleichen. Die Morphodynamik ist somit für den Zeitraum von 18 Monaten für drei unterschiedliche Abflussphasen dokumentiert.



Abb. 8-4: Sohlenmorphologie der Knickbuhnenfelder 440,2 bis 440,5 im Juni 2001

Abbildung 8-4 stellt die Morphologie nach Aufnahme 1 dar. Hervorzuheben sind vor allem die vorhandenen Ablagerungen des Aushubmaterials infolge von Umbauarbeiten. Dieses Material wurde durch das kurzfristige und geringe Hochwasser im Winter 2001 nicht mobilisiert. Abbildung 8-5 enthält die Veränderung der Sohlenhöhe zwischen den Aufnahme 1 und 2. Die türkisen bis blauen Töne verdeutlichen Abnahmen, die grünen bis gelben und roten Töne Zunahmen der Sohlenhöhe in Klassen mit Weiten von 20 cm. Die weißen Bereiche enthalten aufgrund unzureichender Datendichten keine Verschneidung der Morphologien. Im Innern der Buhnenfelder sind keine wesentlichen Veränderungen festzustellen. Kleinere

Modifikationen befinden sich weitestgehend in Bereichen mit steilen Neigungen. Etwas deutlichere Änderungen treten in den äußeren Bereichen, im Übergangsbereich zum Hauptstrom auf. Hier kommt es teilweise zu Umlagerungen von transportierten Sedimenten in die strömungsberuhigten Buhnenfelder.



Abb. 8-5: Änderungen der Sohlenhöhen (m) der Buhnenfelder 440,2 bis 440,5 von Juni 2001 bis Januar 2002, der Abstand der Isolinien (Farbabstufungen) beträgt 0,2 m

Abbildung 8-5 zeigt, dass sich die Morphologie nach der Niedrigwasserperiode, einschließlich der exponierten künstlichen Ablagerungen (Abb. 8-6), kaum verändert hat. Insgesamt überwiegt eine Tendenz zur Zunahme der Sohlenhöhe.



Abb. 8-6: Sohlenmorphologie der Knickbuhnenfelder 440,2 bis 440,5 im Januar 2002

Deutliche Veränderungen der Sohlenhöhen traten nach dem Winterhochwasser 2002 auf (Abb. 8-7). Sowohl die Ablagerungen als auch die Übergangsbereiche der künstlichen Ausbaggerungen im Lee der Buhnen zu den mittigen Akkumulationsflächen wurden stark erodiert. In den äußeren Bereichen kam es in den Buhnenfeldern 440,3 und 440,4 zu Erosionen in den Kolken. Lediglich das unterste Buhnenfeld 440,5 weist geringe Erosions-

raten auf. Deutliche Ablagerungen erfolgten zumeist im Strömungsschatten der Buhnen in den künstlich ausgehobenen Rinnen. Auffallend ist der oberstrom gelegene Buhnenkopf in Buhnenfeld 440,2 und der Knick in Buhnenfeld 440,5. Außerdem wurde im Übergangsbereich von Buhnenfeld 440,5 zum Hauptstrom Material deponiert. In allen Buhnenfeldern ist in der oberstromigen Hälfte eine Tendenz zu Erosion und in der unterstromigen Hälfte eine Tendenz zu Akkumulationen vorhanden.



Abb. 8-7: Änderungen der Sohlenhöhen (m) der Buhnenfelder 440,2 bis 440,5 von Januar bis Juni 2002, der Abstand der Isolinien (Farbabstufungen) beträgt 0,2 m

Die morphologischen Veränderungen sind nach dem Winterhochwasser 2002 vor allem an den künstlichen Strukturen auffällig (Abb. 8-8). Die exponierten und steilen Bereiche (Kanten) sind besonders betroffen. Das Aushubmaterial wurde deutlich reduziert und ist in Buhnenfeld 440,3 kaum noch vorhanden. Es besteht eine Tendenz zum Ausgleich von Neigungsunterschieden.



Abb. 8-8: Sohlenmorphologie der Knickbuhnenfelder 440,2 bis 440,5 im Juni 2002

Das Hochwasser im August 2002 (Abb.8-9) verursachte trotz der Dauer von nur wenigen Tagen stärkere Veränderungen der Morphologie als das vorangegangene Winterhochwasser (Abb. 8-7). Abgesehen von den Vertiefungen direkt unterhalb der Buhnen kam es kaum zu Ablagerungen, sondern überwiegend zur Eintiefung der Sohle (Abb. 8-9). Dabei waren, wie bereits während des Winterhochwassers, in den drei oberen Buhnenfeldern 440,2 bis 440,4 zumeist die Bereiche unterhalb der Buhnenknicke von verstärkter Erosion betroffen. Im zentralen Bereich des Buhnenfeldes 440,4 waren die Erosionen am wirksamsten. Die Sohle des untersten Buhnenfeldes 440,5 tiefte sich, im Gegensatz zum Winterhochwasser, vor allem in den äußeren Bereichen deutlich ein. Die meisten Ablagerungen in den vier Buhnenfeldern erfolgten unterhalb der Buhnen.



Abb. 8-9: Änderungen der Sohlenhöhen (m) der Buhnenfelder 440,2 bis 440,5 von Juni bis Oktober 2002, der Abstand der Isolinien (Farbabstufungen) beträgt 0,2 m





Die deutlichsten Veränderungen, erkennbar am Verlauf der Höhenlinie 20,4 m, traten im Buhnenfeld 440,4 auf (Abb. 8-10). Auffallend ist die Eintiefung der äußeren Kolke der beiden Buhnenfelder 440,4 und 440,5. In Buhnenfeld 440,3 kam es neben der Erosionen auch zu kleinräumigen Umlagerungen in Richtung der Uferbereiche. Insgesamt wird erkennbar, dass die um ca. 1,5 m erhöhten Wasserstände gegenüber dem dreimonatigen Winterhochwasser (zwei- bis dreijährliches Hochwasser) wesentlich Veränderungen bedeuteten.



Abb. 8-11: Sohlenmorphologie der Regelbuhnenfelder 440,9 und 441 im Juni 2001



Abb. 8-12: Änderungen der Sohlenhöhen (m) der Buhnenfelder 440,9 und 441 von Juni 2001 bis Januar 2002, der Abstand der Isolinien (Farbabstufungen) beträgt 0,2 m

Die Darstellung morphologischer Veränderungen der Regelbuhnenfelder bei El-km 440,9 und 441 sowie der Buhnenfelder bei den El-km 443,5, 443,6 und 443,9 erfolgt analog zu den Knickbuhnen für die gleichen Aufnahmen. In Buhnenfeld 440,9 sind für die erste Aufnahme die inselartige Akkumulation im Zentrum sowie die Ablagerung mittig unterhalb der Buhne signifikant (Abb. 8-11). Der stark verlandete Uferbereich ist aufgrund starken krautigen Bewuchses unruhig ausgestaltet. Das zweite Buhnenfeld 441 ist gekennzeichnet durch eine künstliche Eintiefung und diagonal verlaufende leichte Erosionsrinne mit relativ gleichförmiger Akkumulationsfläche. Die Veränderungen zwischen den Aufnahmen 1 und 2 sind in den Buhnenfeldern gering (Abb. 8-12). Änderungen lassen sich nur in den steileren und in den äußeren Bereichen feststellen, wo es unterhalb der Buhnenköpfe zu Auskolkungen und Materialumlagerungen kommt.



Abb. 8-13: Sohlenmorphologie der Regelbuhnenfelder 440,9 und 441 im Januar 2002

Entsprechend der geringen Veränderungen während der langanhaltenden Niedrigwasserperiode zwischen den Aufnahmen 1 und 2 weisen die Buhnenfelder 440,9 und 441 in Aufnahme 2 keine wesentlichen Veränderungen auf (Abb. 8-13).



Abb. 8-14: Änderungen der Sohlenhöhen (m) der Buhnenfelder 440,9 und 441 von Januar bis Juni 2002, der Abstand der Isolinien (Farbabstufungen) beträgt 0,2 m

Stärkere Modifikationen traten nach dem Winterhochwasser 2002 ebenfalls in den steileren und äußeren Abschnitten auf (Abb. 8-14). In Buhnenfeld 440,9 kam es vor allem an der zentralen inselartigen Verlandung, unterhalb der Buhne und unterhalb des Buhnenkopfes zu Abtragungen. Ablagerungen lassen sich in der Nähe des Buhnenkopfkolkes, im Lee der Buhnen, oberhalb des Buhnenkopfes der mittleren Buhne sowie im Übergangsbereich zum Hauptstrom feststellen. Erosions- und Akkumulationsbereiche liegen hier dicht beieinander, was auf kleinräumige Umlagerungen schließen lässt. In Buhnenfeld 441 ist für den Großteil der Fläche im unteren Abschnitt eine gleichmäßige leichte Erosionstendenz zu beobachten. Eine höhere Dynamik ist auch hier vor allem in den Außenbereichen und an den Rändern der Ausbaggerung in Buhnennähe vorhanden.

Die Morphologie nach dem Winterhochwasser 2002 weist signifikante Modifikationen besonders für die inselartige Verlandung in Buhnenfeld 440,9 und eine leichte Erhöhung in Buhnenfeld 441 auf (Abb. 8-15). Dieses Material ist vermutlich aus dem Kolk zwischen den Buhnenköpfen eingetragen worden.



Abb. 8-15: Sohlenmorphologie der Regelbuhnenfelder 440,9 und 441 im Juni 2002

Das Sommerhochwasser 2002 führte mit Ausnahme von einigen Bereichen unterhalb der Buhnen des Buhnenfeldes 440,9 und oberhalb der unterstrom gelegenen Buhnenköpfe in beiden Buhnenfeldern flächendeckend zu Erosionen (Abb. 8-16). Diese traten verstärkt in den äußeren und reduziert in ufernahen Abschnitten auf. Akkumuliertes Material des Winterhochwassers wurde dabei größtenteils wieder mobilisiert, was insbesondere in den äußeren Bereichen auf eine hohe Dynamik hinweist. Die deutlichsten Merkmale nach dem Sommerhochwasser sind eine weitere Abflachung der zentralen Ablagerung und eine Umlagerung des Materials (Abb. 8-17). Die in den Aufnahmen 1 und 2 noch deutlich ausgeprägte Rinne zwischen der inselartigen Verlandung und dem Ufer wurde somit stetig verringert, so dass ebenso wie beim Aushubmaterial insgesamt eine Tendenz zum Ausgleich von Höhenunterschieden vorhanden ist. Auch die vorher vorhandene leichte Akkumulation in Buhnenfeld 441 wurde erodiert. Unterhalb der obersten Buhne in Buhnenfeld 440,9 erfolgte mittig erneut eine leichte Ablagerung, die während des Winterhochwassers verschwunden war.



Abb. 8-16: Änderungen der Sohlenhöhen (m) der Buhnenfelder 440,9 und 441 von Juni bis Oktober 2002, der Abstand der Isolinien (Farbabstufungen) beträgt 0,2 m



Abb. 8-17: Sohlenmorphologie der Regelbuhnenfelder 440,9 und 441 im Oktober 2002

Abbildung 8-18 stellt die durchrissenen Buhnen bei El-km 443,5 und 443, 6 vor dem Umbau zu Absenkungsbuhnen dar. Die oberen und unteren Buhnen waren in Ufernähe stark beschädigt, während die mittlere Buhne leichte Absenkungen aufwies und vermutlich schon einmal instandgesetzt worden war. In Buhnenfeld 443,5 sind die Erosionsrinne entlang der Uferlinie, der Kolk unterhalb des Buhnenkopfes und die dreieckige Akkumulationsform unterhalb der oberen Buhne weitgehend ungestört von Bauarbeiten entstanden. In dem unteren Buhnenfeld 443,6 hingegen scheinen, wahrscheinlich im Zusammenhang mit Instandsetzungsarbeiten, entlang der oberen Buhne Abgrabungen stattgefunden zu haben, weshalb die Morphologie hier modifiziert ist.



Abb. 8-18: Sohlenmorphologie der durchrissenen Buhnenfelder 443,5 und 443,6 im Juni 2001 Abb. 8-19: Änderungen der Sohlenhöhen (m) der Buhnenfelder 443,5 und 443,6 von Juni 2001 bis Januar 2002, der Abstand der Isolinien (Farbabstufunggen) beträgt 0,2 m

Die Umbauarbeiten fielen in die Niedrigwasserphase zwischen der ersten und zweiten Aufnahme. Die Veränderungen der Sohlenhöhe in der Nähe der Buhnen und der Buhnenkörper sind auf die Eingriffe (Ausbaggerungen, Ablagerungen von Aushub, Veränderungen der Durchrisse) zurückzuführen (Abb. 8-19 und 8-20). Das Ergebnis der Umbauarbeiten ist in Abbildung 8-20 veranschaulicht. Die Aufnahme erfolgte ca. drei Monate nach Beendigung der Arbeiten. Lediglich in den äußeren Übergangsbereichen zum Hauptstrom handelt es sich um die natürliche Dynamik. Eine Unterscheidung zwischen natürlichen und künstlichen Auswirkungen ist kaum möglich. Das dreimonatige Winterhochwasser von Januar bis April 2002 verursachte besonders in Buhnenfeld 443,5 erhebliche Veränderungen an den künstlichen Strukturen (Abb. 8-21). Die Ablagerungen hinter der Absenkung der oberen Buhne wurden erodiert und die beiden Abgrabungsbereiche direkt an der Buhne sowie im zentralen Bereich verfüllt. Teilweise wurde Material in den unterstrom gelegenen Bereich des Buhnenfeldes verfrachtet. Der von den Umbauarbeiten unberührte Abschnitt hingegen weist keine wesentlichen Änderungen der Sohltopografie auf. In Buhnenfeld 443,6 ist eine ähnliche Tendenz zur Verfüllung des Abgrabungsbereiches unterhalb der Buhne erkennbar. Die Veränderungen sind allerdings außerhalb dieses Bereiches aufgrund geringerer Eingriffe reduzierter. Auffallend ist die Vertiefung und Streckung des äußeren Kolkes.



Abb. 8-20: Sohlenmorphologie der Absenkungsbuhnenfelder 443,5 und 443,6 im Januar 2002



Abbildung 8-22 enthält die Morphologie nach dem Winterhochwasser. In Buhnenfeld 443,5 führen die beschriebenen Prozesse im oberen Bereich zu einem Ausgleich der künstlich veränderten Morphologie. In Buhnenfeld 443,6 ist im unteren Bereich eine leichte Erosionsrinne in Richtung des Durchrisses erkennbar.

Während des Sommerhochwassers 2002 erfolgten in Buhnenfeld 443,5 Ablagerungen unterhalb des während des Winterhochwassers buhnennah akkumulierten Materials (Abb. 8-23). Weitere Auflandungen können für die ufernahen Bereiche dokumentiert werden. Das vorher umgelagerte Material im zentralen Bereich sowie der Übergangsbereich zur Akkumulationsfläche der unteren Hälfte hingegen wurden stark erodiert. Ähnlich verlief der Prozess im Buhnenfeld 443,6. Starken Auflandungen unterhalb der oberstrom gelegenen Buhne, die die Abgrabungsrinne verfüllten, folgten Erosionen im zentralen Bereich des Buhnenfeldes. Hier wurde die Abbruchkante der Akkumulationsfläche, die bereits vor den Umbaumaßnahmen vorhanden war, zurückgesetzt. Die ufernahe Fläche war kaum von Veränderungen berührt.



Abb. 8-22: Sohlenmorphologie der Absenkungsbuhnenfelder 443,5 und 443,6 im Juni 2002





Abb. 8-24: Sohlenmorphologie der Absenkungsbuhnenfelder 443,5 und 443,6 im Oktober 2002

2.6 - -2.4

1,4 - 1,2

1,2 - 1,4

2.4 - 2.6

<u>-0,2 - 0</u> 0 - 2

Die beiden Hochwasserereignisse 2002 haben in Buhnenfeld 443,5 einen Großteil der künstlichen Strukturen wieder verfüllt bzw. abgetragen (Abb. 8-24). Die vor den Baumaßnahmen bestehende dreieckige Verlandungsform unterhalb der oberstrom gelegenen Buhne ist verkürzt bereits wieder vorhanden. Auch der unterhalb der Absenkung zu erwartende Kolk ist wieder angelegt. Vergleichbare Verlandungsformen bilden sich in Buhnenfeld 443,6 heraus. Die künstlichen Abgrabungsrinnen sind größtenteils verfüllt und die Verlaufsform der Kante der Akkumulationsfläche ist geglättet.



Abb. 8-25: Sohlenmorphologie des Regelbuhnenfeldes 443,9 im Juni 2001



Das Buhnenfeld bei El-km 443,9 (Abb. 8-25) weist über die beobachteten 18 Monate die geringsten Modifikationen auf. Die Verlaufsformen der Uferlinien und die Sohlenhöhen veränderten sich kaum. Wesentliche Veränderungen konnten in der Niedrigwasserperiode zwischen Aufnahme 1 und 2 nur im Übergangsbereich zum Hauptstrom festgestellt werden (Abb. 8-26 und 8-27).

Auch nach dem Winterhochwasser 2002 wurden kaum Modifikationen der Topografie der inneren Bereiche aufgezeichnet (Abb. 8-28 und 8-29). Signifikante Veränderungen konnten in wenigen Abschnitten lediglich nach dem Sommerhochwasser 2002 festgestellt werden (Abb. 8-30 und 8-31). Deutliche Auflandungen fanden unterhalb der oberstrom gelegenen Buhne im stromseitigen Teil statt, in dem auch in den übrigen Buhnenfeldern eine Verlandungsneigung besteht. Dies hängt vermutlich mit dem erodierten Material des Buhnen-kopfkolkes, Verwirbelungen und der Walzenbildung hinter der Buhne bei Überströmung

zusammen. Weiter stromab kam es in den Außenbereichen des Buhnenfeldes zu verstärkten Auskolkungen. Parzellenartig verteilte Erosionsflächen befinden sich vor allem in Abschnitten mit steileren Neigungen (Abb. 8-30 und 8-31).



Abb. 8-27: Sohlenmorphologie des Regelbuhnenfeldes 443,9 im Januar 2002



Abb. 8-28: Änderungen der Sohlenhöhen (m) in Buhnenfeld 443,9 von Januar 2002 bis Juni 2002, der Abstand der Isolinien (Farbabstufungen) beträgt 0,2 m



Abstand der Höhenlinien: 0,2 m

Abb. 8-29: Sohlenmorphologie des Regelbuhnenfeldes 443,9 im Juni 2002



Abb. 8-30: Änderungen der Sohlenhöhen (m) des Buhnenfeldes 443,9 von Juni bis Oktober 2002, der Abstand der Isolinien (Farbabstufungen) beträgt 0,2 m





8.3 Sohlhöhenänderungen und Sedimentationsbilanzen nach Hoch-, Mittel- und Niedrigwasserphasen inklusive des Sommerhochwassers 2002

Für eine Bilanzierung von Akkumulationen und Erosionen in den untersuchten Buhnenfeldern von El-km 440,2 bis 443,9 nach den unterschiedlichen Abflussphasen von Juni 2001 bis Januar 2002 (Mittel- und Niedrigwasser), Januar bis Juni 2002 (überwiegend winterhochwasserbeeinflusst) und Juni bis Oktober 2002 (überwiegend sommerhochwasserbeeinflusst) wurden die in Kapitel 8.2 dargestellten Verrechnungen von Topografien ausgewertet. Sohlhöhenveränderungen unter 5 cm wurden nicht berücksichtigt, um die Einbeziehung von Messungenauigkeiten zu vermeiden (Tab. 8-1 und Abb. 8-32). Die durchschnittlichen Erhöhungen oder Eintiefungen der Sohlenhöhen wurden mit der ausgewerteten Fläche multipliziert und so die Gesamtmenge der veränderten Materialmenge in Kubikmetern ermittelt.

Durchgängig Nettoeinträge wurden für die Mittel- und Niedrigwasserphase 2001 (NMWP) ermittelt. Die Daten der Absenkungsbuhnenfelder 443,5 und 443,6 in NMWP wurden nicht quantifiziert, da die Umbaumaßnahmen (Folgen u.a.: Abgrabungen und Ablagerungen) in diese Messphase fielen und die Morphologie stark modifizierten (Abb. 8-19). Während des Winterhochwassers 2002 (WHW) kam es in vier Buhnenfeldern zu einer Nettoabnahme und in fünf Buhnenfeldern zu einer Nettozunahme des abgelagerten Materials (Tabelle 8-1). Beim Sommerhochwasser 2002 (SHW) überwog mit Ausnahme von Buhnenfeld 443,6 der Austrag. Auch für die beiden übrigen Buhnenfelder dieses Abschnitts 443,5 und 443,9 fallen die Austräge in dieser Phase im Vergleich zu den oberstromigen Flächen nur gering aus.

Tabelle 8-1:Sedimentationsbilanzen nach Mittel- und Niedrigwasserphase 2001 (NMWP), sowie
Winterhochwasser 2002 (WHW) und Sommerhochwasser 2002 (SHW) untersuchter
Buhnenfelder von El-km 440,2 bis 443,9

Buhnen- feld (El-km)	Fläche (m²)	Durch- schnittl. Verän- derung der Sohlen- höhe nach NMWP 2001 (m)	Sedi- men- tation nach NMWP (m ³)	Durch- schnittl. Verän- derung der Sohlen- höhe (m) nach WHW 2002	Sedi- men- tation nach WHW (m ³)	Sedi- men- tations- bilanz nach NMWP und WHW (m ³)	Durch- schnittl. Verän- derung der Sohlen- höhe nach SHW 2002 (m)	Sedi- men- tation nach SHW (m ³)	Sedi- men- tations- bilanz nach NMWP, WHW und SHW * ¹ (m ³)
440,2	9.780	0,048	469,4	0,034	332,5	802,0	-0,097	-948,7	-146,7
440,3	8.864	0,06	531,8	-0,094	-833,2	-301,4	-0,05	-443,2	-744,6
440,4	7.496	0,027	202,4	-0,012	-90,0	112,4	-0,084	-629,7	-517,2
440,5	6.252	0,03	187,6	0,062	387,6	575,2	-0,078	-487,7	87,5
440,9	14.680	0,014	205,5	0,003	44,0	249,6	-0,09	-1.321,2	-1.071,6
441	12.324	0,032	394,4	-0,053	-653,2	-258,8	-0,1	-1.232,4	-1.491,2
443,5	5.472			0,071	388,5		-0,016	-87,6	301,0
443,6	6.492			-0,028	-181,8		0,047	305,1	123,3
443,9	7.975	0,02	159,5	0,008	63,8	223,3	-0,014	-111,7	111,6

*) Bilanz für die Buhnenfelder 443,5 und 443,6 basiert nur auf WHW und SHW

Die Bilanz der Mittel- und Niedrigwasserphase 2001 und des anschließenden Winterhochwassers von Januar bis Juni 2002 (Spalte 7) deckt ein Jahr mit typischen Abflusszuständen ab (ausgedehnte Niedrigwasserphase, zweijährliches Hochwasser). Dabei traten unterschiedliche Veränderungen auf, von Einträgen über 800 m³ in Buhnenfeld 440,2 bis zu Austrägen von über 300 m³ im benachbarten Buhnenfeld 440,3. Ein einheitlicher Trend zu Verlandungen kann nicht nachgewiesen werden, wenn auch die Verlandungen deutlich überwiegen, wie der Mittelwert von 200 m³ für alle Buhnenfelder (ohne Einbeziehung der Absenkungsbuhnenfelder) zeigt (Tab. 8-2, Abb. 8-32). Ein eindeutige Aussage lässt sich allerdings bei einer Gesamtbilanz aller drei Abflussphasen treffen. Die beiden Abschnitte des Ökobuhne-Projektes können erneut voneinander abgegrenzt werden. Mit Ausnahme des Buhnenfeldes bei El-km 440,5, welches aufgrund der schmalen Öffnung zwischen Knickund Regelbuhne eine Besonderheit darstellt, kam es in den oberstromigen Flächen zu erheblichen Sedimentausträgen. Die zwei unterstromigen Absenkungsbuhnenfelder (El-km 443,5 und 443,6) und das Referenzbuhnenfeld (El-km 443,9) weisen hingegen positive Bilanzen auf, was auch mit den in Kapitel 5 ermittelten höheren Sedimentationsmächtigkeiten korrespondiert. Für die Absenkungsbuhnenfelder wurde die akkumulationsfördernde Mittel- und Niedrigwasserphase nicht mit herangezogen. Der bei WHW und SHW gegenläufige Verlauf von Einträgen in diese drei Buhnenfelder lässt in diesem Bereich auf abwechselnde Mobilisierungen und Demobilisierungen schließen.



^{*)} die Bilanz für die Buhnenfelder 443,5 und 443,6 basiert nur auf WHW und SHW

	Mittel- und Niedrig- wasserphase 2001		Winterhoch- wasser 2002		Sommerhoch- wasser 2002		Bilanz aller 3 Phasen * ⁾
--	--	--	----------------------------	--	----------------------------	--	---

- Abb. 8-32: Sohlhöhenveränderungen nach unterschiedlichen Abflussphasen in Buhnenfeldern zwischen El-km 440,2 und 443,9
- Tabelle 8-2:GemittelteSedimentationsbilanzennachMittel-undNiedrigwasserphase2001(NMWP), sowieWinterhochwasser2002 (WHW)undSommerhochwasser(SHW)2002 für Buhnenfelder von El-km440,2 bis441, und für443,9 (keine Berücksichtigung
der durch Bauarbeiten stark modifizierten Buhnenfelder El-km443,5 und443,6)

Mittlere Buhnen- feld- größe (m ²)	Durchschnittl. Sedimentation pro Buhnen- feld nach NMWP 2001 (m ³)	Durchschnittl. Sedimentation pro Buhnen- feld nach WHW 2002 (m ³)	Durchschnittl. Sedimentationsbilanz pro Buhnenfeld nach NMWP und WHW (m ³)	Durchschnittl. Sedimentation pro Buhnen- feld nach SHW 2002 (m ³)	Durchschnittliche Sedimentationsbilanz pro Buhnenfeld nach NMWP, WHW und SHW (m ³)
9.624	307	-107	200	-739	-539

Die für die Mittel- und Niedrigwasserphase 2001 und das Winterhochwasser 2002 bilanzierte durchschnittliche Sedimentation von 200 m³ pro durchschnittlicher Buhnenfeldgröße (Tab. 8-2) wurde als Basis für ein Upscaling verwendet. Für den gewählten Zuständigkeitsbereich des Wasser- und Schifffahrtsamtes Magdeburg (El-km 290,7 bis 502,2) erfolgte eine grobe Abschätzung der Bedeutung der Buhnenfelder für die Sedimentfracht. In diesem Abschnitt existieren 2966 Buhnenfelder. Eine Hochrechnung der mittleren sedimentierten Menge von 200 m³ auf alle Buhnenfelder ergäbe somit eine Gesamtmenge von 593.200 m³ für die Zeit von Juni 2001 bis Juni 2002. Unter Berücksichtigung der Jahresschwebfracht der Elbe von ca. 500.000 bis 1.000.000 Tonnen und einer geschätzten Geschiebefracht von ca. 100.000 Tonnen (SCHMIDT, DRÖGE 1999) im Bereich des Untersuchungsgebietes wird verständlich, dass die berechnete Menge von annähernd 948.000 Tonnen (593.000 m³ * 1,6 g/cm³, spezifische Dichte von Sand) für den gesamten Abschnitt des WSA Magdeburg zu hoch ausfällt. Dies ist mit den relativ großen Flächen der untersuchten Buhnenfelder zu erklären, welche unter Umständen die Ausdehnung durchschnittlicher Buhnenfelder des gesamten Streckenabschnitts übertreffen. Da die Erosions- und Akkumulationsverhältnisse entlang des Elbeverlaufs, wie auch innerhalb des Untersuchungsgebietes, in Abhängigkeit von verschiedenen Randbedingungen (Kapitel 3.1.3, 5.2.3) wechseln, ist zudem eine Übertragung mesoskaliger Ergebnisse auf einen größeren Flussabschnitt nur mit Einschränkungen möglich.

SCHWARTZ & KOZERSKI (2003) verwendeten einen anderen Ansatz für die Berechnung großräumiger Sedimentationsraten. Sie ermittelten in einem 4.800 m² großen Buhnenfeld bei El-km 420,9 links aus drei Sedimentfallen einen täglichen Schwebstoffeintrag von 151 kg und errechneten daraus für einen Flussabschnitt von El-km 465 bis 523 für alle 1366 Buhnenfelder eine jährliche Menge von 75.000 Tonnen. Unter Berücksichtigung der unterschiedlichen von ihnen gewählten mittleren Buhnenfeldgrößen von 4.800 m² (SCHWARTZ & KOZERSKI 2003) und den eigenen im Untersuchungsgebiet berechneten durchschnittlichen Größen von 9.624 m² sowie der Hochrechnung auf eine geringere Anzahl an Buhnenfeldern lassen sich die Ergebnisse vergleichen. Bei einer Übertragung der mittels Schwebstofffallen ermittelten eingedrifteten Schwebfracht auf die Randbedingungen der eigenen Ergebnissen ergeben sich Werte von 325.699 t/a gegenüber den oben berechneten 948.000 t/a. Die von SCHWARTZ & KOZERSKI (2003) berechnete Fracht enthält allerdings noch nicht die suspendierte bettbildende Bettfracht, die bei höheren Abflüssen die Sandspülfracht übersteigen kann (SAUER & SCHMIDT 1999) und insbesondere in Buhnenfeldern zu Ablage kommt. Neben den unzureichenden Kenntnissen der wechselnden Verhältnisse der Streckenabschnitte bestehen für eine sichere Übertragung von Messungen in einzelnen Buhnenfeldern auf größere Abschnitte somit auch Unsicherheiten bezüglich der Buhnenfeldgrößen. Eine Abschätzung und ein Vergleich mit den Jahresfrachten der Elbe ist dagegen möglich und verdeutlicht die Bedeutung der Buhnenfelder für den Rückhalt der Sedimentfracht sowie für die zunehmende Verlandung der Uferregionen.

Die Betrachtung der Auswirkungen des extremen Sommerhochwassers 2002 macht deutlich, dass in der Bilanz für alle Buhnenfelder ein durchschnittlicher Austrag von 539 m³ stattfand (Tab. 8-2). Die hohen Werte sind neben den extremen hydraulischen Einflussgrößen wie erhöhter Fließgeschwindigkeiten und Sohlschubspannungen auch auf die relativ geringe Schwebfracht während des Ereignisses zurückzuführen. Die BFG (2002) stellte in der Zeit vom 12.08.2002 bis 01.09.2002 eine Schwebstoffkonzentration von 20 mg/l fest, die deutlich unter den für 1995 und 1998 berechneten mittleren Jahreswerten von 41 mg/l liegen. Bei dem Sommerhochwasser 2002 handelte es sich um ein 50 bis 100-jährliches Hochwasser. Die stattgefundenen hohen Sedimentausträge aus den Buhnenfeldern sind somit untypisch und nur selten zu erwarten. Deshalb muss im Durchschnitt mit Einträgen gerechnet werden, die bei Niedrigwasser auftreten und die geringeren und nicht durchgängigen Austräge durchschnittlicher Winterhochwasserereignisse übertreffen.

Neben den absoluten Sedimentfrachten ist besonders die korrespondierende Erhöhung der Sohle von Bedeutung. Hier wurden für das Jahr von Juni 2001 bis Juni 2002 Werte von 0,082 m (Buhnenfeld 440,2) bis -0,034 m (Buhnenfeld 440,3) berechnet. Dies unterstreicht den oben bereits erwähnten uneinheitlichen Trend auch in benachbarten Buhnenfeldern. Im Mittel ergab sich für die 7 ausgewerteten Buhnenfelder (ohne Absenkungsbuhnenfelder) eine Sohlerhöhung von 0,025 m. Dieser Wert übertrifft die von SCHWARTZ & KOZERSKI (2002b) beschriebenen Auflandungen von 0,015 m/a in den strömungsberuhigten zentralen Bereichen des untersuchten Buhnenfeldes bei El-km 420,9 um 40 %. Bei diesen handelt es sich um die Betrachtung frischer schwebstoffbürtiger Feinsedimente mit einer relativ geringen Dichte von 1,15 g/m³. Insbesondere die Auflandungen von Mittelsanden können diesen Wert überschreiten.

Die Häufigkeitsverteilungen 8-33 bis 8-41 enthalten für die einzelnen Buhnefelder von El-km 440,2 bis 444,9 die in den jeweiligen Abflussphasen aufgetretenen Sohlhöhenveränderungen. Die überwiegend positiv exzessiven Typen der Verteilungen zeigen die Bedeutung moderater flächiger Sohlerhöhungen gegenüber extremeren Verfüllungen oder Erosionen für die Gesamtbilanz auf.



Abb. 8-33: Veränderungen der Sohlhöhe nach Hochwasserphasen sowie Mittel- und Niedrigwasserphase in Buhnenfeld El-km 440,2



Abb. 8-34: Veränderungen der Sohlhöhe nach Hochwasserphasen sowie Mittel- und Niedrigwasserphase in Buhnenfeld El-km 440,3

August 2002



Januar - April 2002

April 2001 - Januar 2002

Abb. 8-35: Veränderungen der Sohlhöhe nach Hochwasserphasen sowie Mittel- und Niedrigwasserphase in Buhnenfeld El-km 440,4



Abb. 8-36: Veränderungen der Sohlhöhe nach Hochwasserphasen sowie Mittel- und Niedrigwasserphase in Buhnenfeld El-km 440,5



Abb. 8-37: Veränderungen der Sohlhöhe nach Hochwasserphasen sowie Mittel- und Niedrigwasserphase in Buhnenfeld El-km 440,9



Abb. 8-38: Veränderungen der Sohlhöhe nach Hochwasserphasen sowie Mittel- und Niedrigwasserphase in Buhnenfeld El-km 441



Abb. 8-39: Veränderungen der Sohlhöhe nach Hochwasserphasen in Buhnenfeld El-km 443,5



Abb. 8-40: Veränderungen der Sohlhöhe nach Hochwasserphasen in Buhnenfeld El-km 443,6



Abb. 8-41: Veränderungen der Sohlhöhe nach Hochwasserphasen sowie Mittel- und Niedrigwasserphase in Buhnenfeld El-km 443,9

8.4 Sohlschubspannungen während der Winter- und Sommerhochwasserereignisse 2002

Ergänzend zu den aufgezeichneten Sohlenhöhenänderungen während der Winter- und Sommerhochwasserphasen 2002 und den daraus ermittelten Sedimentationsbilanzen wurden unter Berücksichtigung der Korngrößen, Wasserspiegellagen und Fließgeschwindigkeiten die Sohlschubspannungen berechnet (Abb. 8-42 bis 8-49).

Die Sohlschubspannungen für das WHW (Abb. 8-42, 8-44, 8-46 und 8-48) wurden unter Verwendung der über die in unterschiedlichen Tiefen einer Wassersäule gemessenen und gemittelten Fließgeschwindigkeiten, die Wassertiefen und der anhand der in die Fläche interpolierten d50-Werte berechneten Sohlrauhigkeit (k_s-Wert, Gl. 8-1) für die gesamten Buhnenfelder ermittelt.

GI. 8-1 $k_s = 2.5 \cdot d50$ (nach MERTENS 1996)

Unter Anwendung von Gleichung 8-2 wurde die Sohlschubspannungsgeschwindigkeit (v*) nach dem logarithmischen Wandgesetz ermittelt und anschließend die Sohlschubspannung für alle Zellen innerhalb des GIS nach Gleichung 8-3 berechnet.

GI. 8-2:
$$\frac{v_m}{v^*} = 2.5 \cdot (\ln \frac{h}{k_s} -1)$$

GI. 8-3:
$$T_0 = V^{*2} \cdot 1000$$

Die Ableitung der Fließgeschwindigkeiten der Buhnenfelder von El-km 440 bis 444 für das SHW (Abb. 8-43, 8-45, 8-47 und 8-49) erfolgte durch Multiplikation der Fließgeschwindigkeiten des WHW mit dem Faktor 1,5. Dieser Faktor wurde durch Übertragung von Fließgeschwindigkeiten des SHW im Hauptstrom und in Buhnenfeldern bei Wittenberge (Abb. 8-1 und 8-2) und den Vergleich mit üblichen Fließgeschwindigkeiten während ein- bis zweijährlicher Winterhochwässer berechnet und stellt eine vorsichtige Abschätzung dar. Weiterhin wurde der gegenüber dem WHW um ca. 1,6 m erhöhte Wasserstand einbezogen.

Die für das WHW berechneten Sohlschubspannungen überschreiten im Wesentlichen nicht die für die jeweiligen Korngrößenfraktionen innerhalb der Buhnenfelder kritischen Sohlschubspannungen. Mittelsand ist fast überall die dominierende Fraktion mit Anteilen von teilweise über 90 %, da die kritische Sohlschubspannung für Mittelsand von 2 N/m² nur in den äußeren Bereichen erreicht wird. Dies erklärt auch die geringen Erosionsraten (Abb. 8-7, 8-14, 8-21, 8-28).

Während des SHW hingegen treten in allen Buhnenfeldern Sohlschubspannungen auf, die die kritische Sohlschubspannung für Fein- und Mittelsand nach DIN 19661 überschreiten. Dies korrespondiert mit den hohen Erosionsraten, die anhand der Sohlhöhenänderungen von Juni bis Oktober 2002 festgestellt wurden (Abb. 8-9, 8-16, 8-23 und 8-30).

Eine über die qualitativen Beschreibungen hinausgehende Quantifizierung der Sohlschubspannungen wird nicht durchgeführt. Für eine ausführliche und exakte Berechnung müssten weitere Parameter wie Anteile verschiedener Fraktionen, Sohlneigungen, Ausrichtung der angeströmten Flächen zur Hauptströmung, Dauer bestimmter Abflusszustände während der Hochwasserereignisse, Instationaritäten der Strömungen sowie Sekundär- und Vertikalströmungen berücksichtigt werden. Aus diesen Gründen ist auch ein Vergleich von tatsächlich aufgezeichneten Veränderungen der Sohlhöhen mit der örtlichen Verteilung berechneter Sohlschubspannungen innerhalb der Buhnenfelder nicht sinnvoll.



Abb. 8-42: Berechnete Sohlschubspannung T_0 (N/m²) in den Buhnenfeldern 440,2 bis 440,5 für das Winterhochwasser am 6.2.2002



Abb. 8-43: Berechnete Sohlschubspannung T_0 (N/m²) in den Buhnenfeldern 440,2 bis 440,5 für das Sommerhochwasser am 20.8.2002



Abb. 8-44: Berechnete Sohlschubspannung T_0 (N/m²) in den Buhnenfeldern 440,9 und 441 für das Winterhochwasser am 7.2.2002



Abb. 8-45: Berechnete Sohlschubspannung T_0 (N/m²) in den Buhnenfeldern 440,9 bis 441 für das Sommerhochwasser am 20.8.2002

Die Sohlschubspannungen der Flussabschnitte unterscheiden sich ebenso wie die Fließgeschwindigkeiten (Abb. 6-48) nicht wesentlich. Das gesamte Untersuchungsgebiet von El-km 440,2 bis 443,9 stellt sich einheitlich dar und erklärt nicht die hinsichtlich Sedimentationsmächtigkeiten und Korngrößenverteilungen (Kapitel 5 und 7) festgestellten Unterschiede. Die von den Buhnenzuständen und –formen abhängenden kleinräumigen Ausprägungen werden dagegen gut abgebildet.





Abb. 8-47: Berechnete Sohlschubspannung T_0 (N/m²) in den Buhnenfeldern 443,5 und 443,6 für das Sommerhochwasser am 20.8.2002



Abb. 8-48: Berechnete Sohlschubspannung T_0 (N/m²) in Buhnenfeld 443,9 für das Winterhochwasser am 7.2.2002

Abb. 8-49: Berechnete Sohlschubspannung T_0 (N/m²) in Buhnenfeld 443,9 für das Sommerhoch wasser am 20.8.2002

Zur Überprüfung der unter Verwendung tiefengemittelter Messdaten des Sommerhochwassers 2002 berechneten Sohlschubspannungen wurde für den Abschnitt des Hauptstroms bei El-km 453, in welchem die Messungen während des Sommerhochwassers stattgefunden hatten, eine parallele Vorgehensweise angewendet und die Ergebnisse verglichen. Das für die Abbildungen 8-42 bis 8-49 genutzte logarithmische Wandgesetz wurde nach den Gleichungen 8-2 und 8-3 für die am 20.8.2002 gemessenen Fließgeschwindigkeiten (vgl. Abb. 8-1) verwendet. Alternativ erfolgte eine Berechnung der Schubspannung nach Gleichung 8-4 für Gerinne mit großem Breiten-Tiefen- Verhältnis.

GI. 8-4:
$$\tau_0 = \rho \cdot g \cdot h \cdot I_E$$

Für eine tiefengemittelte Fließgeschwindigkeit (v_m) von 2,5 m \cdot s⁻¹, eine Wassertiefe (h) von 10 m und einen d50 Wert von 1,04 mm bei El-km 453 ergibt sich nach einsetzen der ermittelten Sohlschubspannungsgeschwindigkeit v^{*} in Gleichung 8-3 eine Sohlschubspannung (τ_0) von 19 N/m².

Nach Gleichung 8-4 treten bei einem mittleren Gefälle (I_E) von 0,2 ‰ des Elbeabschnitts während des Sommerhochwassers und einer Wassertiefe (h) von 10 m Schubspannungen (τ_0) von 19,6 N/m² auf. Die beiden Vorgehensweisen erbringen somit gleiche Ergebnisse, was die Messwerte und Berechnungen bestätigt.

8.5 Resümee

Als Grundlage für eine Quantifizierung von Auswirkungen morphodynamischer Prozesse in Buhnenfeldern wurden Sohltopografien miteinander verrechnet und kartografisch dargestellt. Die qualitative Beschreibung morphologischer Veränderungen nach unterschiedlichen Abflussphasen dient der Identifizierungen und Lokalisierung von Akkumulations- und Erosionsbereichen in den untersuchten Buhnenfeldern. Insbesondere die angestrebte Aufwertung von Buhnenfeldern im Rahmen des Projektes Ökobuhne, die die Schaffung von ökologisch wertvollen Strukturen zum Ziel hat, kann über flächenhafte Darstellungen evaluiert werden. Die Entwicklungsstadien der jeweiligen Phasen werden über die Oberflächenverschneidungen veranschaulicht. Kleinstrukturen und ihre Entwicklungen, wie z. B. Erosionsrinnen, Ablagerungen von Schluffmudden oder Verlagerungen von Akkumulationsflächen können dabei weitestgehend den spezifischen Einwirkungen der variierenden Buhnenformen zugeordnet werden. Die anschließende Berechnung von Sedimentationsraten anhand durchschnittlicher Sohlenhöhenänderungen nach bestimmten Ereignissen bezog sich auf die gesamten Flächen der jeweiligen Buhnenfelder. Eine Quantifizierung der Sedimentationsmengen erfolgte durch Multiplikation dieser Werte mit den Flächengrößen der Buhnenfelder. Für die Mittel- und Niedrigwasserphase 2001 ergab sich eine positive Bilanz. Die Absenkungsbuhnenfelder wurden aufgrund von Baumaßnahmen in dieser Phase nicht ausgewertet. Die beiden aufgenommenen Hochwasserphasen wirkten sich uneinheitlich aus. Während des Winterhochwassers (WHW) traten in benachbarten Buhnenfeldern z. T. gegenläufige Trends auf. Die abwechselnden Mobilisierungen und Ablagerungen von Sedimenten können auf den Einfluss von Transportkörper im Hauptstrom zurückzuführen sein, die unterschiedliche Ein- oder Austräge in den nächstgelegenen Buhnenfeldern verursachen. Die Gegenläufigkeit konnte auch für einige Buhnenfelder im Vergleich von WHW und Sommerhochwasser 2002 (SHW) beobachtet werden. Das SHW verursachte mit Ausnahme eines Buhnenfeldes durchgängig Nettoausträge.

Eine eindeutige Aussage ergibt sich bei der Aufstellung einer Gesamtbilanz aller drei Phasen. Dabei wird die in den Kapiteln 5.2.3 und 7.2 erfolgte Abgrenzung zwischen den Flussabschnitten von El-km 440.2 bis 441 und von 443.5 bis 443.9 des Ökobuhne-Projektes bestätigt. Nach Verrechnung aller Ein- und Austräge ergibt sich für die drei unterstromigen Buhnenfelder sowie für das aufgrund einer schmalen Einströmöffnung von Verlandungen stärker betroffene Buhnenfeld 440,5 eine positive Nettobilanz. Die übrigen oberstromigen Buhnenfelder weisen negative Bilanzen auf, d.h. hier überwogen von Juni 2001 bis Oktober 2002 die Austräge. Das Sommerhochwasser hebt aufgrund der immensen Einwirkungen Tendenzen hervor und bietet einen Vergleich mit langfristigen Abläufen. Andererseits handelt es sich um ein 50- bis 100-jährliches Ereignis, welches für eine kurzfristige Prognose nicht überbewertet werden darf. Die häufiger zu erwartenden 2- bis 3-jährlichen Winterhochwasserphasen sind stärker zu gewichten. Für alle ausgewerteten Buhnenfelder ergab sich eine durchschnittliche Verlandung von 200 m³ nach dem WHW und ein Austrag von 539 m³ nach dem SHW. Vor allem der Eintrag nach dem WHW bestätigt eine weiter anhaltende Entwicklung zur Verlandung, wie sie anhand der Auflagemächtigkeiten (vgl. Kapitel 5.3) auch für längere Zeiträume identifiziert werden konnte.

Der Betrag der durchschnittlichen Auflandung des WHW sowie die durchschnittliche Buhnenfeldgröße dienten einer Extrapolation der Ergebnisse auf einen größeren Flussabschnitt. Das Resultat wurde mit Sedimentationsbilanzen für den Hauptstrom von SCHMIDT und DRÖGE (1999) sowie für Buhnenfelder von SCHWARTZ und KOZERSKI (2003) verglichen. Die Unterschiede zwischen den eigenen Ergebnissen und den Berechnungen von SCHWARTZ und KOZERSKI (2003) sind auf verschiedene Ansätze zurückzuführen. Eine genaue Übertragung von Sedimentationsraten auf größere Flächen ist zudem aufgrund unzureichender Kenntnisse der Ausdehnungen der extrapolierten Buhnenfeldflächen und wechselnder Randbedingungen nicht möglich. Dennoch ergab eine Grobabschätzung, dass die Buhnenfelder einen Anteil von bis zu 50 % einer Jahresfracht aufnehmen und insofern für den Sedimenttransport von erheblicher Bedeutung sind.

Die ermittelten Sohlschubspannungen für die Winter- und Sommerhochwasserphasen 2002 geben einen Eindruck von den Erosions- und Akkumulationsprozessen sowie deren Lagen. Ein Vergleich mit den festgestellten Sohlhöhenveränderungen ist nur im Überblick möglich, da für eine detaillierte Analyse weitere Parameter berücksichtigt werden müssten. Auffallend ist, dass bei WHW für die überwiegende Korngröße Mittelsand die nach DIN 19661-2 kritischen Sohlschubspannungen vor allem in den äußeren Bereichen der Buhnenfelder überschritten werden, in denen auch die Sohleintiefungen stattfanden. Bei SHW treten auch in den inneren Bereichen kritische Sohlschubspannungen auf, was ebenfalls mit den Sohleintiefungen korrespondiert. Die Ergebnisse sind insofern plausibel. Überprüfungen fanden auch über Vergleiche mit alternativen Berechnungen statt. Allerdings erklären die Sohlschubspannungen wie die Fließgeschwindigkeiten (Abb. 6-48) nicht die Differenzen zwischen den Flussabschnitten. Diese Unterschiede der Sedimentationsbilanzen hängen vor allem mit den Substratverteilungen im Hauptstrom zusammen und sind damit mesoskalig beeinflusst.