

3 Regulierung der Elbe

3.1 Hydrologische und hydromorphologische Charakterisierung der Elbe

3.1.1 Gliederungsansätze für die Elbe und ihr Einzugsgebiet

Das 148.268 km² große Einzugsgebiet der Elbe umfasst Böhmen, d.h. große Teile der Tschechischen Republik (50.176 km²; 33,84 %) und in der Bundesrepublik Deutschland Teile der Länder Sachsen, Sachsen-Anhalt, Brandenburg, Niedersachsen, Mecklenburg-Vorpommern und Hamburg (96.932 km², 65,38 %). Zusätzlich entfallen noch 920 km² (0,62 %) auf Österreich und 240 km² (0,16 %) auf Polen. Die Länge der Elbe beträgt 364,52 km in der Tschechischen Republik und 726,95 km in der Bundesrepublik Deutschland, die Gesamtlänge ergibt 1091,47 km (IKSE 1995a). Die Quellen der Elbe liegen im Riesengebirge (Weiße Elbe) und im Böhmerwald (Moldau). Nach dem Durchfließen des antezedent angelegten Durchbruchstals in der Sächsischen Schweiz erreicht die Elbe bei Torgau das norddeutsche Tiefland. Sie mündet in einem Binnendelta in Hamburg und erreicht über ihr Ästuar bei Cuxhaven die Nordsee.

Die Internationale Kommission zum Schutz der Elbe (IKSE 1995b) gliedert die Elbe geomorphologisch von der Quelle bis El-km 96,0 auf deutschem Gebiet in die Obere Elbe, von El-km 96,0 bis zum Wehr Geesthacht bei El-km 585,9 in die Mittlere Elbe und von El-km 585,9 bis El-km 727,7 an der Seegrenze bei Cuxhaven-Kugelbake in die Untere Elbe oder Tideelbe. Eine hydrographische Gliederung entwickelte ROHDE (1971). Demnach verläuft die Grenze zwischen der Oberelbe und der Mittelelbe bei El-km 198,5 an der Einmündung der Schwarzen Elster. Unterhalb von El-km 585,9 beginnt die Tideelbe, die inklusive der Außenelbe wesentlich weiter gefasst ist, als die Unterelbe in der Einteilung der IKSE (1995b). Die Tideelbe wird nach ROHDE (1971) weiter unterteilt in die obere Tideelbe (El-km 585,9 bis 609,0), das Hamburger Stromspaltungsgebiet (El-km 609,0 bis 625,6), die Unterelbe (El-km 625,6 bis 727,7) und die Außenelbe (El-km 727,7 bis 764,9). Die Bundesanstalt für Gewässerkunde (BFG) verwendet in Abhängigkeit unterschiedlicher Fragestellungen für die Elbe beide Systeme gleichberechtigt, unterteilt aber das Elbeeinzugsgebiet nach Höhen in die drei Abschnitte des Mittelgebirges vom Riesengebirge bis zum Harz zwischen 300 bis 1500 m über NN, des Böhmisches Beckens zwischen 150 bis 300 m über NN und des Mittel- und Norddeutschen Tieflandes unter 150 m über NN (BFG 2002). Eine ökologische Klassifizierung stellt die Einteilung in Fischregionen dar, wie sie auch für andere Flüsse angewendet wird. Die Oberläufe bestehen aus Forellen- und Äschenregion, der Mittellauf aus Barben- und Brassenregion und der Unterlauf aus der Kaulbarsch- und Flunderregion. Insbesondere Staustufen und andere Veränderungen der natürlichen Abflüsse wie Kanalisierungen modi-



Untersuchungsgebiete von EI-km 418,2 bis 425 und bei EI-km 453 des Projektes „EIFi“ und von EI-km 440,2 bis 443,9 des Projektes „Ökobühne“

- Einzugsgebiet Elbe
- - - Staatsgrenze
- - - Bundesländergrenze
- Fließgewässer > 1700 km²
- Kanal
- See
- Städte > 1000000 Einwohner
- Städte > 90000 Einwohner
- Kilometrierung

Abb. 3-1: Politische Gliederung des Elbeinzugsgebietes und Lage der Untersuchungsgebiete (Karte aus SIMON 2000, verändert), Datenquellen: BFG-Koblenz, CHMU-Prag, IKSE-Magdeburg. Siehe auch Detailkarte zu Untersuchungsgebieten (Abb. 4-1)

fizieren abschnittsweise diese Unterteilung im Vergleich zu den ursprünglichen Verhältnissen (ARGE-Elbe 1995).

30% des Elbeeinzugsgebietes liegen in den Mittelgebirgen Tschechiens und Deutschlands. Die meteorologischen und hydrologischen Verhältnisse dieser Naturräume prägen die Abflussganglinie der Elbe wesentlich. Die entscheidenden Faktoren sind sowohl Niederschläge als auch Schneespeicherung und Schneeschmelze. Das Abflussregime der Elbe wird deswegen als pluvio-nival (Regen-Schnee-Typ) bezeichnet (IKSE 1995 b). Die mittleren Jahresabflüsse steigen im Längsverlauf der Elbe von $102 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ an der Einmündung der Moldau über $315 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ an der Staatsgrenze auf $720 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ bei Neu-Darchau (El-km 536,4) und schließlich auf $877 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ an der Seegrenze bei Cuxhaven-Kugelbake (El-km 727,7).

In der Reihenfolge abnehmender mittlerer Abflussmengen sind die wichtigsten Nebenflüsse der Elbe die Moldau in Tschechien (Einzugsgebiet 28.090 km^2 / Abfluss $150 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$) und die Havel (Einzugsgebiet 24.096 km^2 / Abfluss $115 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$), die Saale (Einzugsgebiet 24.079 km^2 / Abfluss $115 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$), die Vereinigte Mulde (Einzugsgebiet 7.400 km^2 / Abfluss $73 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$) und die Schwarze Elster (Einzugsgebiet 5.705 km^2 / Abfluss $28 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$) in Deutschland (ATV-DVWK 2000). Die Abflussganglinien der Nebenflüsse verhalten sich, abgesehen von Extremereignissen, gemäßigt (BFG 2002). Der Abfluss wird von der Menge der Niederschläge der höhergelegenen Teileinzugsgebiete nur unwesentlich beeinflusst. Im Bereich der Quelle der Elbe auf einer Höhe von 1390 m über NN im Riesengebirge liegt die mittlere Niederschlags Höhe der Jahresreihe 1931 bis 1980 bei 858 mm, nimmt aber bis zur Einmündung der Moldau auf einer Höhe von 155 m über NN für das Niederschlagseinzugsgebiet bereits auf 656 mm ab. Ab der Staatsgrenze (119 m über NN) pendeln die mittleren Jahresniederschläge zwischen 571 mm an der unteren Mittel-elbe und dem maximalen Wert von 780 mm an der aus dem Erzgebirge kommenden Mulde. Der zweithöchste Wert liegt mit 692 mm bereits deutlich niedriger, so dass insgesamt ausgeglichene und moderate Niederschlagsverhältnisse herrschen (ROHDE 1971).

Bis zur Einmündung der Moldau entwässern die rechten Nebenflüssen der Elbe mit Teilen der das Böhmisches Becken im Norden begrenzenden Lausitzer Gebirge, Riesengebirge, Rabengebirge, Heuscheuergebirge und Adlergebirge ein Gesamtgebiet von 13.700 km^2 . Die Moldau führt den Abfluss der nördlichen Bereiche des Oberpfälzerwaldes und des Böhmerwaldes heran. Mit einem tiefen Einschnitt durch das Elbsandsteingebirge verlässt die Elbe das Böhmisches Becken, durchfließt das vorgelagerte Bergland und tritt in das norddeutsche Tiefland und das nach-saaleeiszeitliche Breslau-Bremer Urstromtal ein. Die oberhalb von Wittenberg von rechts Teile der Oberlausitz entwässernde Schwarze Elster (Mündung El-km

198,5) und die unterhalb von Wittenberg von links einmündenden Hauptnebenflüsse Mulde (El-km 259,6) und Saale (El-km 290,7) erhöhen den Abfluss der Elbe beträchtlich. Die Mulde führt die Abflüsse aus dem Erzgebirge, dem vorgelagerten Bergland und des Bördelandes heran, die Saale entspringt im Fichtelgebirge und entwässert Teile von Erzgebirge, Frankenwald, Thüringerwald, Thüringer Becken, Harz und des Bördelandes (ROHDE 1971). Ab Magdeburg wechselt die Elbe in das nach-weichseleiszeitliche Glogau-Baruther Urstromtal. Die Havel, welche große Teile der Abflüsse der Mark Brandenburg und über die Spree Teile der Ober- und Niederlausitz heranzuführt, mündet als letzter großer Nebenfluss zwischen Havelberg und Wittenberge ein (El-km 438,0). Die Breite des Einzugsgebietes, die bis hier 250 bis 300 km betrug, verringert sich nun auf nur noch 100 km. Die bis Hamburg einmündenden wichtigsten Nebenflüsse Aland, Jeetzel, Ilmenau, Seeve sowie Stepenitz, Elde und Dude sind dementsprechend eher unbedeutend. Die Abnahme der Einzugsgebietsbreite fällt auch bei einer Betrachtung der Abflusszunahme im Längsverlauf auf. Während von der Einmündung der Moldau bis zum Pegel Neu-Darchau auf einer Strecke von ca. 640 km der mittlere Abfluss von 102 auf 720 $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ zunimmt, erhöht sich der Abfluss der letzten rund 200 km nur noch um 157 $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ (ROHDE 1971).

3.1.2 Abflussverhältnisse unter Berücksichtigung von Stauhaltung und Hochwasserschutzmaßnahmen

Unterhalb der Staatsgrenze besteht an der Elbe nur eine Staustufe bei Geesthacht. In den größeren Nebenflüssen hingegen sowie im tschechischen Teil der Elbe sind die Abflüsse über Talsperren oder Wehre reguliert. Insgesamt bestehen in Tschechien entlang der Elbe 93 Querbauwerke (2 Talsperren, 24 Staustufen mit Schifffahrtsschleusen und 67 Wehre und Sohlschwellen) (IKSE 1996). Im Einzugsgebiet der Elbe inklusive der Nebenflüsse in Tschechien befinden sich 116 Talsperren mit einem maximalen Stauraum von 2.532 Mio. m^3 , von denen 238 Mio. m^3 als Hochwasserschutzraum vorgesehen sind. Im deutschen Einzugsgebiet existieren 149 Talsperren mit einem Stauvolumen von 1.414 Mio. m^3 , von denen 253 Mio. m^3 als Hochwasserschutzraum gelten. Die Gesamtvolumina belaufen sich für die Stauräume auf 3.946 Mio. m^3 und für die Hochwasserschutzräume auf 492 Mio. m^3 . Die größten Stauräume an Nebenflüssen bestehen an der Moldau mit 1.870 Mio. m^3 und an der Saale mit 929 Mio. m^3 . In Tschechien sind somit ca. 9 % und in Deutschland ca. 18 % des Gesamtvolumens der Talsperren für den Hochwasserschutz vorgesehen. Weitere Nutzungen sind außerdem Energieerzeugung, Trinkwasserversorgung, Niedrigwassererhöhung, Brauchwasserversorgung, Beregnung/Bewässerung, fischereiliche Nutzung und Naherholung (IKSE 1995b).

Die Bedeutung der Hochwasserschutzräume ist insbesondere im Zusammenhang mit dem durch Deichbau verlorengegangenen Retentionsraum der letzten Jahrhunderte zu sehen. Die heutigen Deiche stammen aus der 2. Hälfte des 19. Jahrhunderts und sind entlang des deutschen Abschnitts ab El-km 97,7 bis zur Nordsee fast durchgängig vorhanden. Von ursprünglich 6172 km² Retentionsfläche vor Beginn des Deichbaus sind nur noch 838 km² (13,6 %) vorhanden. Das reduzierte Rückhaltevolumen ist allerdings nur für mindestens 10-jährliche Hochwässer von besonderer Bedeutung. Bei niedrigeren Wasserständen fließen lediglich 10 % des Durchflusses über die noch angeschlossenen Bereiche der Aue ab. Wird für eine Ermittlung des eigentlichen Verlustes an Retentionsvolumen die verlorengegangene Fläche mit einer geschätzten Überflutungshöhe von 30 - 50 cm verrechnet, so ergibt sich eine Minderung von ca. 2,3 Mrd. m³ (BFG 2002). Umgekehrt bedeutet dies für die heute vorhandene Fläche zwischen den Deichen inklusive des Hauptstroms im Falle eines ausgeprägten Hochwassers eine Erhöhung des Wasserspiegels um ca. 3 m. Das Verhältnis der Kapazitäten der gesamten Hochwasserschutzräume von 492 Mio. m³ zu den nicht mehr zur Verfügung stehenden Rückhaltevolumina von 2,3 Mrd. m³ liegt bei 21,4 %. Dennoch sind durch den Einsatz der künstlichen Hochwasserschutzvolumina sehr wirksame Scheitelreduzierungen für Abflüsse mit Wiederkehrintervallen bis 50 Jahre möglich. Darüber hinaus nimmt die Wirksamkeit deutlich ab (BFG 2002), wie das Augushochwasser 2002 aufzeigte.

Hochwässer treten nach Auswertungen von Aufzeichnungen des Pegels Neu-Darchau (IKSE 1996) überwiegend in den Frühjahrsmonaten März bis Mai zur Zeit der Schneeschmelze in Erzgebirge und Riesengebirge auf. Die niedrigsten Wasserstände werden in den Monaten August bis Oktober erreicht. Auswertungen von Hochwassereignissen von 1895 bis 1994 am Pegel Barby (EL-km 296) zeigen, dass 86 % der Hochwässer in den Monaten Dezember bis April mit der größten Häufigkeit im März auftreten und somit als Winterhochwässer einzuordnen sind (IKSE 1995b). Diese Ganglinien der Abflüsse werden stromabwärts durch die Zuflüsse der Nebenflüsse nicht wesentlich verändert, so dass die Verlaufsformen dieser Linien sowohl in Dresden auch in Neu-Darchau zu finden sind (Abb. 3-2) (BFG 2002). Leichte Abweichungen ergeben sich lediglich durch den stärkeren Einfluss des Mittelgebirges auf den Pegel Dresden, da hier erhöhte Wasserstände noch im August auftreten können, während in Neu-Darchau ab Juli schon die abflussarme Phase eingetreten ist.

Die Abflussganglinien haben sich im 20. Jahrhundert verändert. In Deutschland nehmen seit den 1950er Jahren die jährlichen Niedrig- (NQ) und Mittelwasserabflüsse (MQ) aufgrund veränderter Stauhaltungen in Tschechien zu, die einen Mindestabfluss der Elbe gewährleisten sollen. Auswertungen verschiedener Pegeldata von 1901 bis 2002 ergaben allerdings für die einzelnen Monate unterschiedliche Entwicklungen. Die mittleren Abflüsse für die Monate

März, April und Juli haben abgenommen, für die Monate September und Oktober ergaben sich keine Veränderungen und für die übrige Zeit des Jahres ist eine Zunahme der Abflüsse zu verzeichnen (BFG 2002).

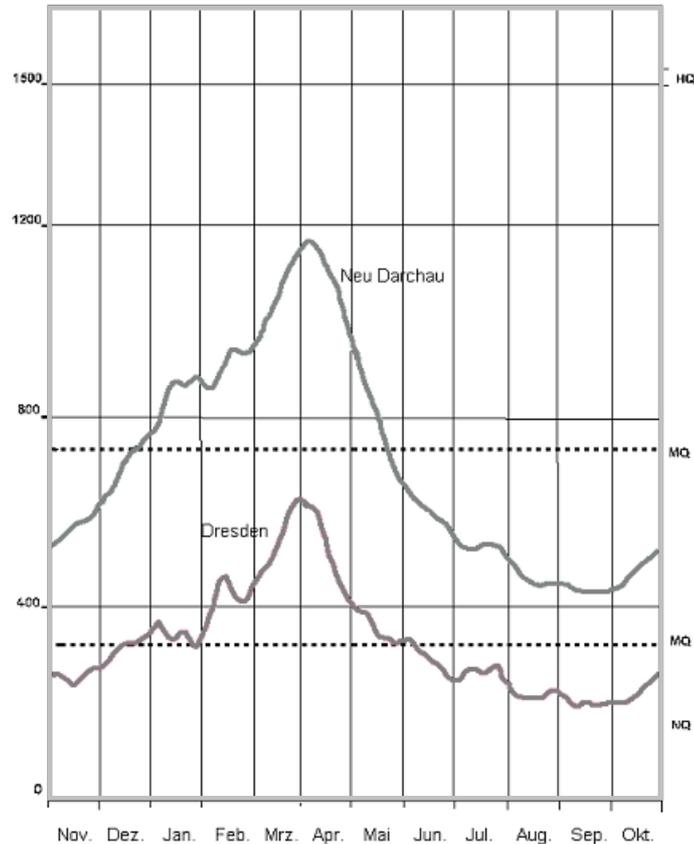


Abb. 3-2: Vergleich mittlerer Jahresganglinien der Abflüsse ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$) an den Pegeln Neu-Darchau und Dresden (BFG 2002)

Die Verläufe der Abflüsse stellt Abbildung 3-3 im Zeitraum von 1977 bis 2000 dar. MQ 1977/2000 steht für das arithmetische Mittel des Abflusses aller Tageswerte gleichartiger Zeitabschnitte der betrachteten Zeitspanne von 1977 bis 2000, MNQ 1977/2000 steht für das arithmetische Mittel der niedrigsten Werte gleichartiger Zeitabschnitte der einzelnen Jahre in der gleichen Zeitspanne (DEUTSCHES GEWÄSSERKUNDLICHES JAHRBUCH 1998).

In Abbildung 3-3 werden die hohen Schwankungen der Extremwerte der Abflüsse deutlich. Dies zeigt auch eine Auswertung für den Pegel Barby und ein Vergleich der Daten mit dem Pegel Kaub am Rhein durch die IKSE (1995b), welche eine Spanne zwischen den monatlichen Mindestabflüssen und den monatlichen Höchstabflüssen von 1:21 für die Elbe und von 1:7,5 für den Rhein ergaben. Der Rhein verfügt über ein komplexes Regime 2. Grades, d.h.

es treten zwei unterschiedlich stark ausgeprägte Maxima auf, die glazialen Ursprungs im Sommer und nivalen Ursprungs in den Monaten Dezember bis April sind.

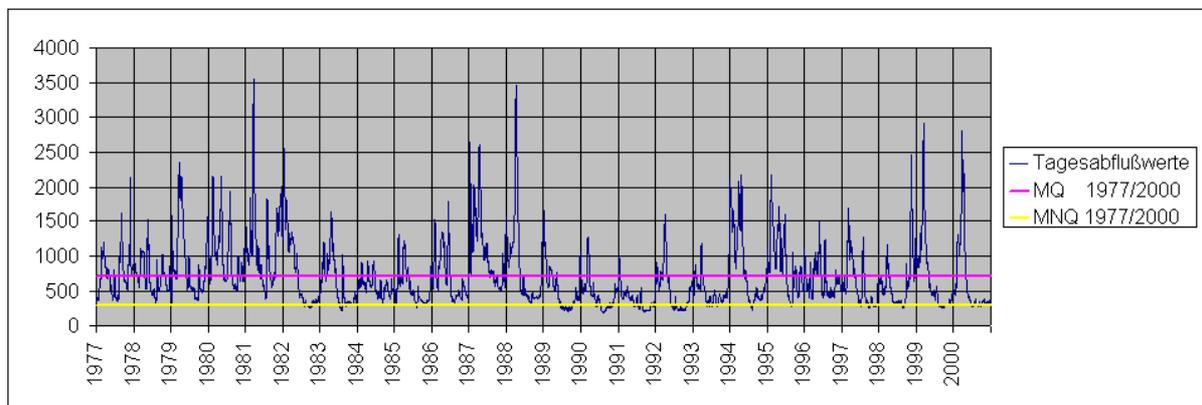


Abb. 3-3: Tagesabflußwerte von 1977 bis 2000 am Pegel Neu-Darchau ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$), El-km 536,4 (Daten ARGE-Elbe)

Am Niederrhein bei Rees ist zwar nur noch dieses zweite Maximum deutlich erkennbar, dennoch kommen wesentlich geringere Abflussschwankungen als an Flüssen mit einem komplexen Regime 1. Grades vor (AHNERT 1996). Die Elbe ist als mittelgebirgsbeeinflusster Fluss mit nur einem Maximum hinsichtlich der Wasserführung deutlich benachteiligt. Insbesondere in Perioden geringer Niederschläge kommt es in den Spätsommermonaten zu ausgedehnten Niedrigwasserphasen. Im Jahr 1991, mit dem viertgeringsten Abfluss seit Beginn der Durchflussmessungen am Pegel Barby, sank der mittlere Abfluss des Jahres auf 57 % des langjährigen Mittels bzw. auf 53 % am Pegel Neu-Darchau (Abb. 3-3). Am Pegel Kaub am Rhein ist seit 1989 auch in Trockenjahren kein Absinken eines mittleren Jahresabflusses unter 85 % des langjährigen Mittels aufgetreten (IKSE 1995). In den Jahren 1977 bis 2000 lag an der Elbe der niedrigste am Pegel Neu-Darchau gemessene Tageswert NQ 1977/2000 bei $181 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ (1990) und der höchste gemessene Tageswert HQ 1977/2000 bei $3550 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ (1981).

Die Elbe verfügt mit den Mittel- und Unterläufen über einen ausgedehnten Potamal, also einen Tieflandfluss mit relativ geringen Fließgeschwindigkeiten und feinkörnigen Sedimenten. Die durchschnittlichen Fließgeschwindigkeiten verändern sich im Längsverlauf von der Quelle bis zur Einmündung in die Nordsee stetig, wobei die Fließgeschwindigkeit im deutschen Abschnitt vorwiegend von den Gefälleverhältnissen und Querschnittsbreiten des Flusses bestimmt werden. In Tschechien werden die Abflüsse zusätzlich durch Stauhaltungen beeinflusst. Hinsichtlich der Darstellungen der Fließgeschwindigkeiten ist zwischen den Strömungen im Hauptstrom und den auf den gesamten Querschnitt bezogenen Geschwindigkeiten zu unterscheiden. Tabelle 3-1 enthält die querschnittsgemittelten

Fließgeschwindigkeiten ab der Moldaumündung und das mittlere Gefälle für die jeweiligen Flussabschnitte. Die Daten entstammen dem Bericht 0840 der BFG (1994), die Tabelle ist von der IKSE (1995b) verändert übernommen. Die Kilometrierung in Tschechien beginnt an der Staatsgrenze bei El-km 0 und verläuft stromauf, also umgekehrt zu der deutschen Kilometrierung. Angaben oberhalb der Moldaumündung sind in der Tabelle nicht erfasst. Das Gefälle von der Quelle bei El-km 369,9 nimmt hier entsprechend der gebirgigen Verhältnisse drastisch ab von 67,3 ‰ auf den ersten 9 km bis auf 16,9 ‰ auf den folgenden 12 km. 46 – 73,1 km unterhalb der Quelle liegt das mittlere Gefälle bei 2,2 ‰ und im letzten 103 km langen Abschnitt vor der Moldaumündung bei nur noch 0,44 ‰.

Tab. 3-1: Mittleres Gefälle und querschnittsgemittelte Fließgeschwindigkeiten unterschiedlicher Wasserstände der Elbe (nach IKSE 1995b, verändert)

Flussabschnitt	El-km	Flussabschnitts-Länge (km)	Mittleres Gefälle (‰)	Fließgeschwindigkeiten ($m \cdot s^{-1}$)		
				MNW	MW	MHW
Moldaumündung – Usti nad Labem	109,3 – 38,7	70,6	0,30	1,15	1,63	1,96
Usti nad Labem – Staatsgrenze	38,7 – 0,0	38,7	0,35	1,07	1,54	2,68
Staatsgrenze – Dresden	0,0 – 55,6	55,6	0,26	0,96	1,10	1,19
Dresden – Torgau	55,6 – 154,6	99,0	0,25	0,76	1,05	1,44
Torgau – Wittenberg	154,6 – 214,1	59,5	0,23	0,66	0,91	1,37
Wittenberg – Barby	214,1 – 295,5	81,4	0,21	0,75	0,8	1,25
Barby – Magdeburg	295,5 – 326,6	31,1	0,22	0,61	1,07	1,44
Magdeburg – Tangermünde	326,6 – 388,2	61,6	0,18	0,61	0,85	1,43
Tangermünde – Wittenberge	388,2 – 454,8	66,6	0,14	0,61	0,77	1,32
Wittenberge – Neu-Darchau	454,8 – 536,4	81,6	0,13	0,68	0,75	1,33
Neu-Darchau – Geesthacht	536,4 – 585,9	49,5	0,12	0,5	0,55	1,05

Die Fließgeschwindigkeiten nehmen ähnlich dem Gefälle ab. Diskontinuitäten sind, wie erwähnt, durch morphologische Variabilitäten zu erklären. So treten z. B. im Raum Wittenberge bei MHW aufgrund der breiten vorhandenen rezenten Aue geringere Fließgeschwindigkeiten auf als in den stromauf oder stromab gelegenen Abschnitten.

Die auf den Hauptstrom bezogenen Fließgeschwindigkeiten fallen bei Mittel- und Hochwässern wesentlich höher aus, als die querschnittsgemittelten Geschwindigkeiten, da im Uferbereich und in den Bühnenfeldern die Strömungen reduziert sind. Die höchsten Werte treten im Bereich der Erosionsstrecke (El-km 120 bis 230) auf; bei 20-jährigen Hochwässern

können hier bis zu $3,5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ erreicht werden, während oberhalb von Geesthacht ca. $1,3 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ vorkommen. Auch bei Mittelwasser liegen die Werte über denen anderer Abschnitte der Elbe. Insgesamt liegen die Mittelwasserfließgeschwindigkeiten zwischen $1,5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ in der Erosionsstrecke und ca. $0,8$ bis $0,9 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ oberhalb von Geesthacht.

3.1.3 Morphodynamik im Längsverlauf des deutschen Elbeabschnitts

Die Abbildungen 3-4 bis 3-6 und 3-8 bis 3-10 zu hydromorphologisch wirksamen Parametern wurden dem Elbe Informationssystems ElbeInKa entnommen, welches von der Universität Karlsruhe im Rahmen des BMBF-Verbundprojektes „Morphodynamik der Elbe“ entwickelt wurde (NESTMANN & BÜCHELE 2002). Als Grundlage für die Korngrößenverteilungen dienten von der Bundesanstalt für Gewässerkunde 1994 veröffentlichte Daten zur Kornzusammensetzung der Elbesohle (BFG 1994).

Vier Teilstrecken sind im deutschen Abschnitt der Elbe morphologisch besonders veränderlich. Von Bedeutung sind insbesondere die Erosionsstrecke von El-km 120 bis 230, die auch aktuell von großräumigen Sohleintiefungen betroffen ist und die Strecke zwischen Havelmündung und Gorleben (El-km 438 – 495), die durch starke Transportkörperbildung (Unterswasserdünen) bei gleichbleibender mittlerer Sohlenhöhe gekennzeichnet ist (FAULHABER 1999a). Hervorzuheben sind auch die Verhältnisse unterhalb der Magdeburger Stadtstrecke ab El-km 329 sowie die noch nicht verbaute Reststrecke (El-km 504 – 525).

Für die Erosionsstrecke der Elbe ist im Vergleich mit Erosionsbereichen anderer Flüsse besonders charakteristisch, dass auf einer Strecke von über 100 km lokale Erosionen und Ablagerungen ohne den Einfluss einer Staustufe auftreten, weshalb hier, wie beispielsweise auch am Oberrhein, Geschiebezugaben stattfinden. Alternative Maßnahmen, wie eine Erhöhung des Sohlwiderstandes durch den Einbau von Schwellen mit und ohne lokale Kolkverbauung und die Vergrößerung der abflusswirksamen Flächen der Vorländer, beispielsweise durch Deichrückverlegungen oder Altarmanschlüsse, werden geprüft (FAULHABER 1999b).

Die Abbildungen 3-4 und 3-5 enthalten die hohen Fließgeschwindigkeiten, die in diesem Bereich im Vergleich mit unterstrom gelegenen Abschnitten bei Hochwässern auftreten und die dadurch verursachten Sohlschubspannungen von bis zu 60 N/m^2 . Des Weiteren kommt es auf einer relativ kurzen Strecke zu einer Abnahme der mittleren Korngröße von $33,79 \text{ mm}$ (El-km 135) auf $7,7 \text{ mm}$ bei El-km 200 (Abb. 3-7). Danach steigt die mittlere Korngröße kurzfristig wieder auf über 20 mm , nimmt dann aber deutlich auf $3,3 \text{ mm}$ ab (El-km 250).

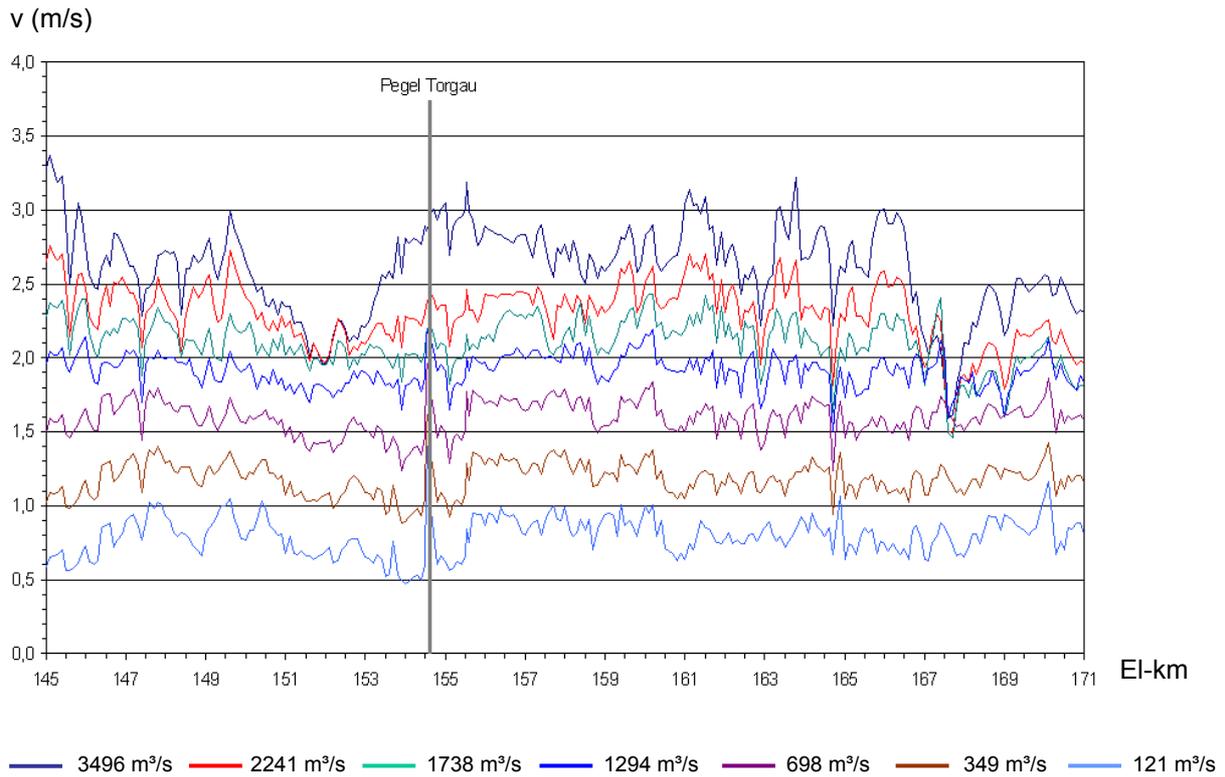


Abb. 3-4: Mittlere Fließgeschwindigkeiten im Flusshauptschlauch bei unterschiedlichen Abflüssen, El-km 145 - 171, Bereich Torgau, Erosionsstrecke (Grafik aus ElbeInKa)

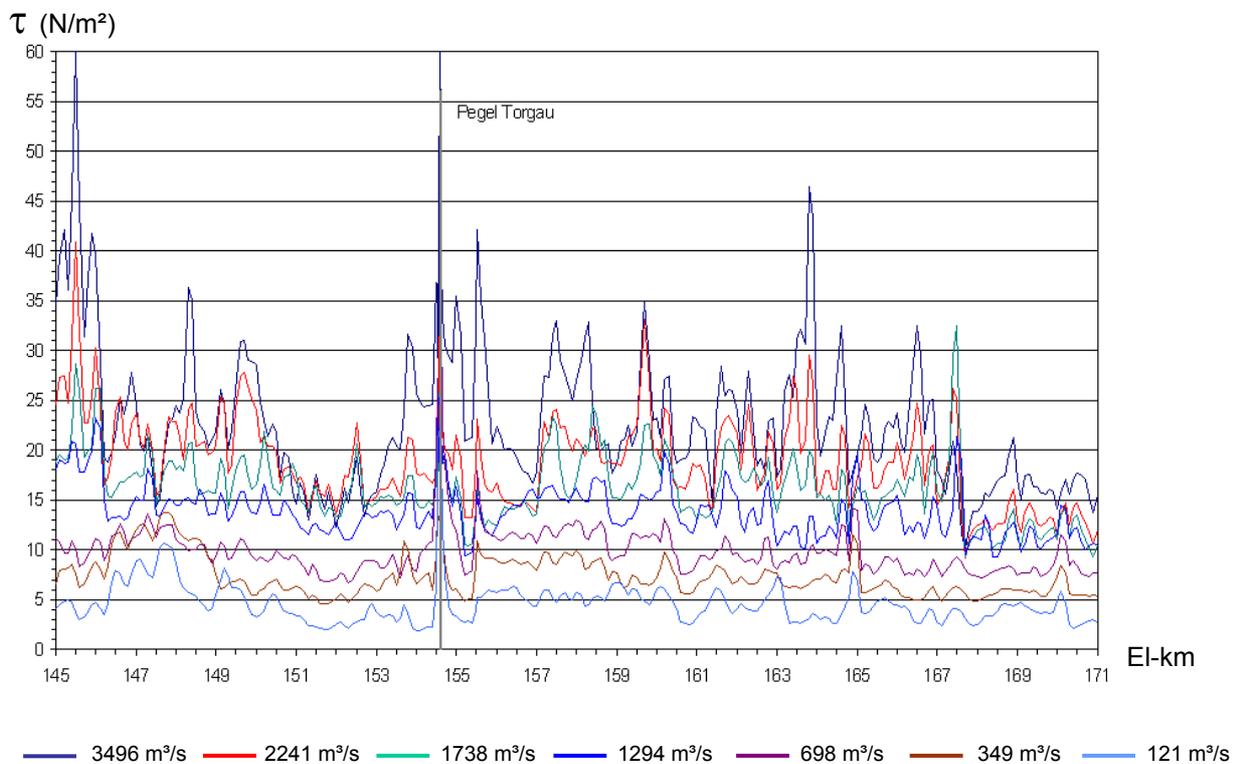


Abb. 3-5: Mittlere Schubspannungen im Flussmittlenbereich bei unterschiedlichen Abflüssen, El-km 145 - 171, Bereich Torgau, Erosionsstrecke (Grafik aus ElbeInKa)

Bei Betrachtung der Summenkurven der Korngrößenverteilung für El-km 135 bis 260 (Abb. 3-6) wird die enorme Abnahme größerer Fraktionen erkennbar. Liegen bei El-km 135 noch über 5 % Steine und über 50 % Grobkies vor, so dominieren bei El-km 180 bereits die Mittel- und Feinkiese und bei El-km 260 die Feinkiese und Grobsande.

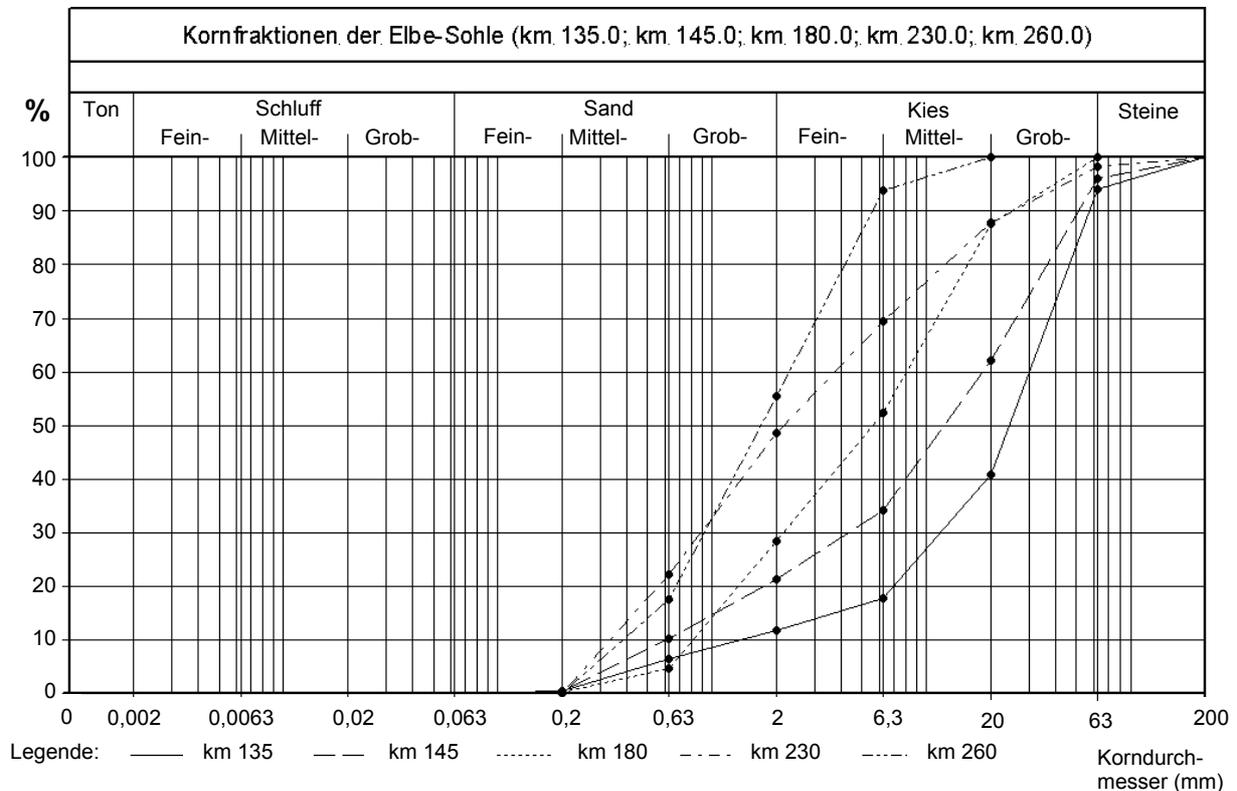


Abb. 3-6: Summenkurven ausgesuchter über den gesamten deutschen Abschnitt verteilter Kornfraktionen der Elbesohle bei El-km 135,0; 145,0; 230,0 und 260,0 (Grafik aus ElbeInKa)

Weitere Ursachen für die Erosionserscheinungen sind die Festlegung des Flusses im Hochwasserbett durch Deichbau, Gefällezunahme aufgrund von Durchstichen, Verringerung des Abflussquerschnitts durch Buhnen und Parallelwerke sowie eine Verringerung des Geschiebeeintrags aus den Nebenflüssen als Folge von Staustufen und einer oberhalb gelegenen, abgepflasterten, nicht erodierbaren Sohle (ALEXY 1996). Die geringen Flussbreiten, auch bei Hochwässern, von 130 bis 500 m herrschen bis El-km 166 vor (Abb. 3-11).

Im Zusammenhang mit Sohleintiefungen von bis zu 160 cm seit 1888 und von ca. 60 cm seit 1959 im zentralen Bereich der Erosionsstrecke zwischen El-km 150 und 180, kam es zu einer entsprechenden Abnahme der Wasserspiegellage. Dadurch tritt die Elbe bei Hochwässern später als vor dem Beginn der Eintiefung über die Ufer. Aufgrund der höheren Wassersäule und den zugenommenen Fließgeschwindigkeiten steigen die Sohlschubspannungen an und es kommt zu weiteren Erosionsprozessen, die kurzfristig nur über künstliche Maßnahmen gemindert werden können (FAULHABER 1999b).

Für die Erosionsstrecke unterhalb von Magdeburg erreichen die Eintiefungen von 1888 bis in die 1990er Jahre ebenfalls 160 cm. Die Eintiefung hielt allerdings vor allem bis 1959 an und hat seitdem nachgelassen (FAULHABER 2000). Für diese Strecke lassen sich, zumindest im Bereich der verschärft regulierten Strecke von EI-km 333 bis 344 ähnliche morphologische Bedingungen wie für die oberhalb gelegene Erosionsstrecke feststellen. Auch hier reduzieren sich die mittleren Korngrößen unterhalb von EI-km 329 deutlich und es kommt zu einer rapiden Verengung des Hochwasserbettes von annähernd 3500 m auf 900 m (Abb. 3-11) mit den Folgen zunehmender Fließgeschwindigkeiten und Sohlschubspannungen.

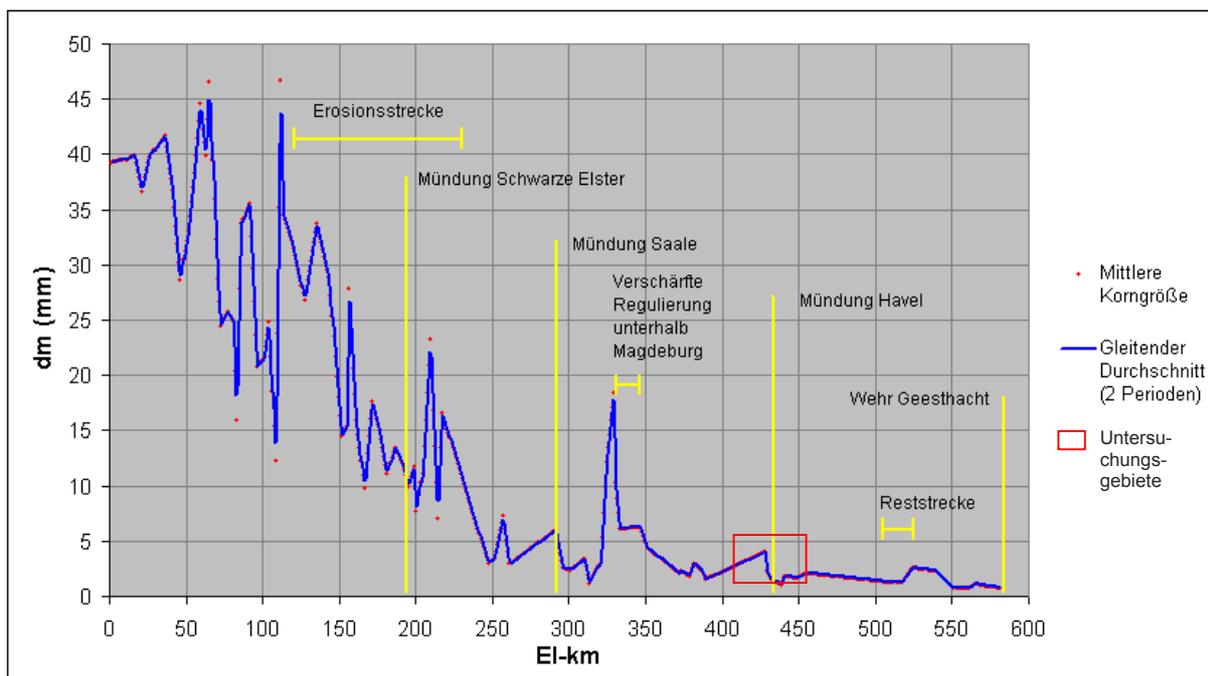


Abb. 3-7: Mittlere Korngrößen (dm) der Sohle des deutschen Abschnitts der Elbe bis Geesthacht (Daten BFG 1994), berechnet nach Meyer-Peter/Müller:

$$\text{Gl. 3-1:} \quad d_m = \frac{\sum (d_i \cdot p_i)}{100 \%} \quad \text{mit} \quad \begin{array}{l} d_i = \text{Mitte einer Kornfraktion (mm)} \\ p_i = \text{Anteiligkeit der Fraktion (\%)} \end{array}$$

Grundsätzlich andere Verhältnisse herrschen unterhalb der Havelmündung. Das Gefälle halbiert sich von EI-km 150 bis 438 nahezu auf die Hälfte von 24 ‰ auf 13 ‰. Der bei Hochwasser hydraulisch wirksame Querschnitt liegt im Mittel zwischen EI-km 438 und 495 bei 990 m und stellt sich durchgängig ausgeglichener ohne viele Verengungen dar (Abb. 3-11). Die Fließgeschwindigkeiten bei Hochwasser erreichen nur im Prallhangbereich bei EI-km 438 bis zu $2,2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ (Abb. 3-8) und liegen ansonsten auch bei Extremhochwässern deutlich unter $2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$. Entsprechend fallen auch die Sohlschubspannungen mit Maximalwerten von 14 N/m^2 wesentlich geringer aus (Abb. 3-9). Schwankung der Schubspannungen bei Hochwasser zwischen 8 und 14 N/m^2 werden durch Krümmungen des Flussschlauchs verursacht. Bei niedrigsten Abflüssen unterscheiden sich die Fließgeschwindigkeiten und

Schubspannungen in diesem unteren Elbeabschnitt nur in geringem Maße von den Werten der Erosionsstrecke, welche sich auf ähnlich niedrigem Niveau befinden.

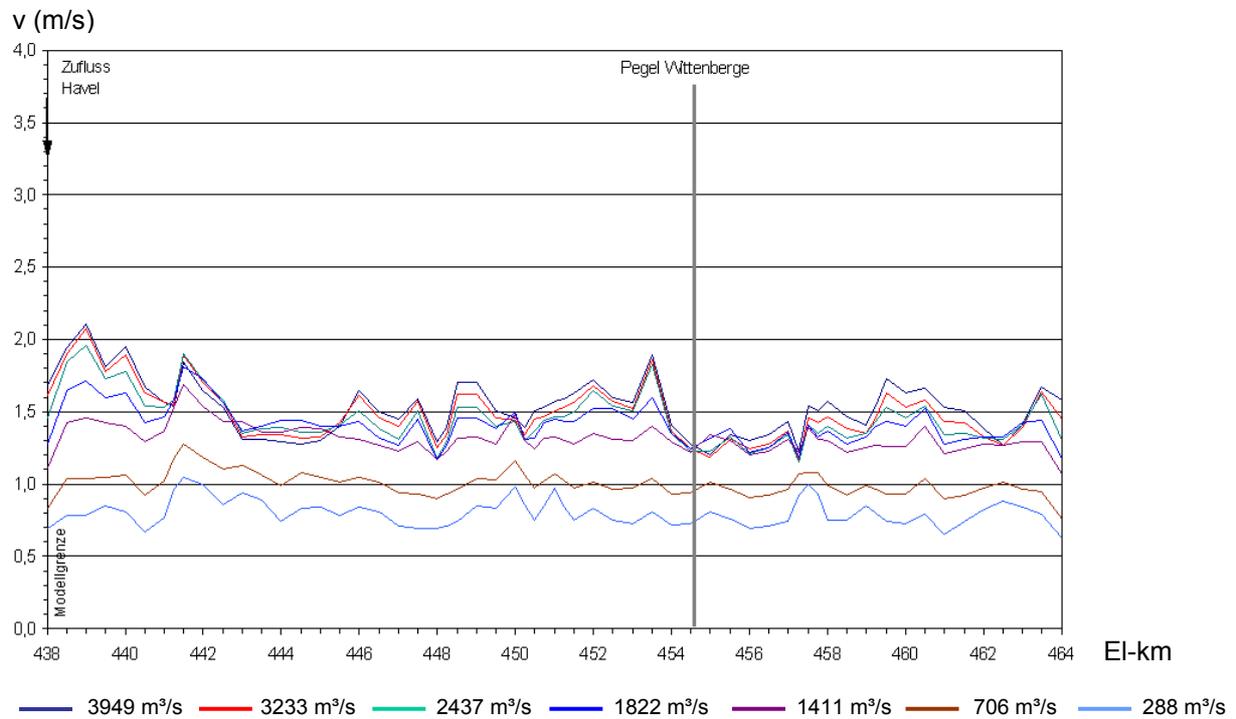


Abb. 3-8: Mittlere Fließgeschwindigkeiten im Flusshauptschlauch bei unterschiedlichen Abflüssen, EI-km 438 – 464, Bereich Gnevsdorf – Wittenberge (Grafik aus ElbeInKa)

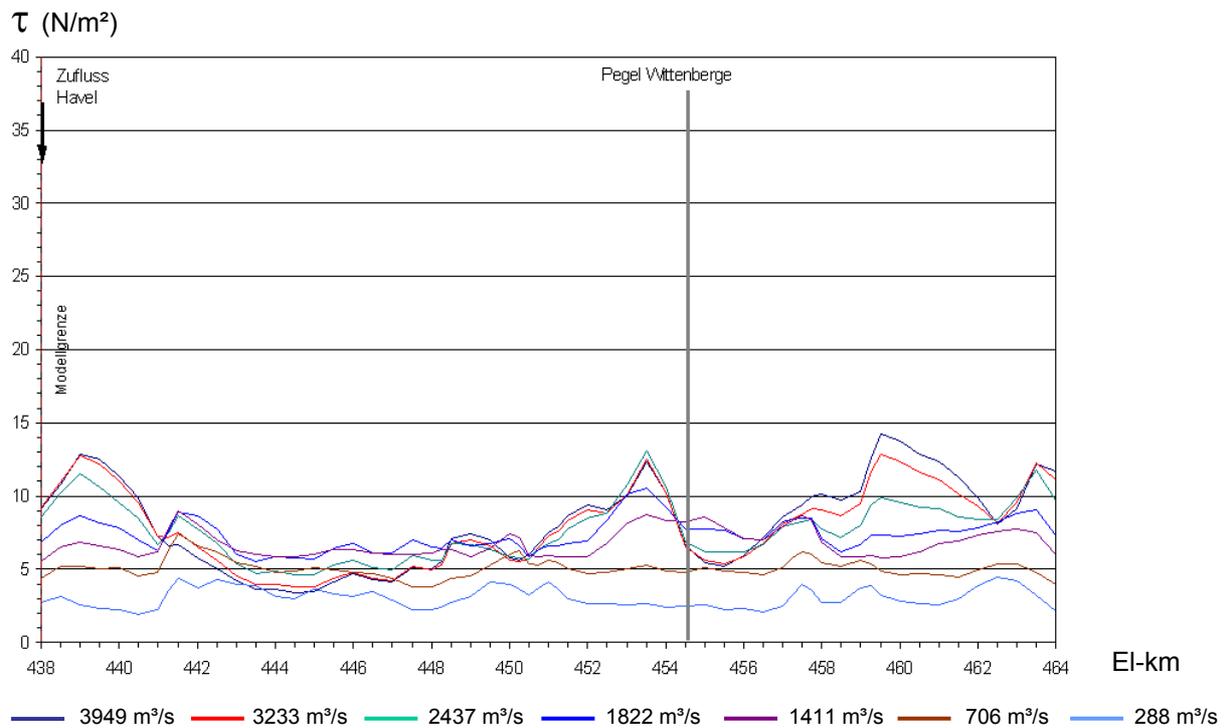


Abb. 3-9: Mittlere Schubspannungen im Flussmittbereich bei unterschiedlichen Abflüssen, EI-km 438-464, Bereich Gnevsdorf – Wittenberge (Grafik aus ElbeInKa)

Für den Flussabschnitt unterhalb der Havelmündung sind Feinsedimente prägend. Eine signifikante Änderung der Körnung tritt ab El-km 425 auf (Abb. 3-7). Die mittlere Korngröße nimmt zwischen El-km 425 bis 438 von 3,93 mm auf 1,45 mm ab. Innerhalb weniger Kilometer verschieben sich die dominierenden Fraktionsanteile deutlich vom kiesigen in den sandigen Bereich (Abb. 3-10). Bei El-km 425 beträgt der Anteil der Kiesfraktionen 54 %, bei El-km 438 nur noch 11%. Die Tendenz setzt sich stromab fort, mit Ausnahme leichter Erhöhungen der mittleren Korngrößen zwischen El-km 520 bis 540 (Abb. 3-7). In der Nähe des Wehres bei Geesthacht betragen die Sandanteile schließlich 95 %, Mittelsand stellt mit einem Anteil von 78 % die stärkste Fraktion dar und Mittelkiesanteile sind kaum noch vorhanden.

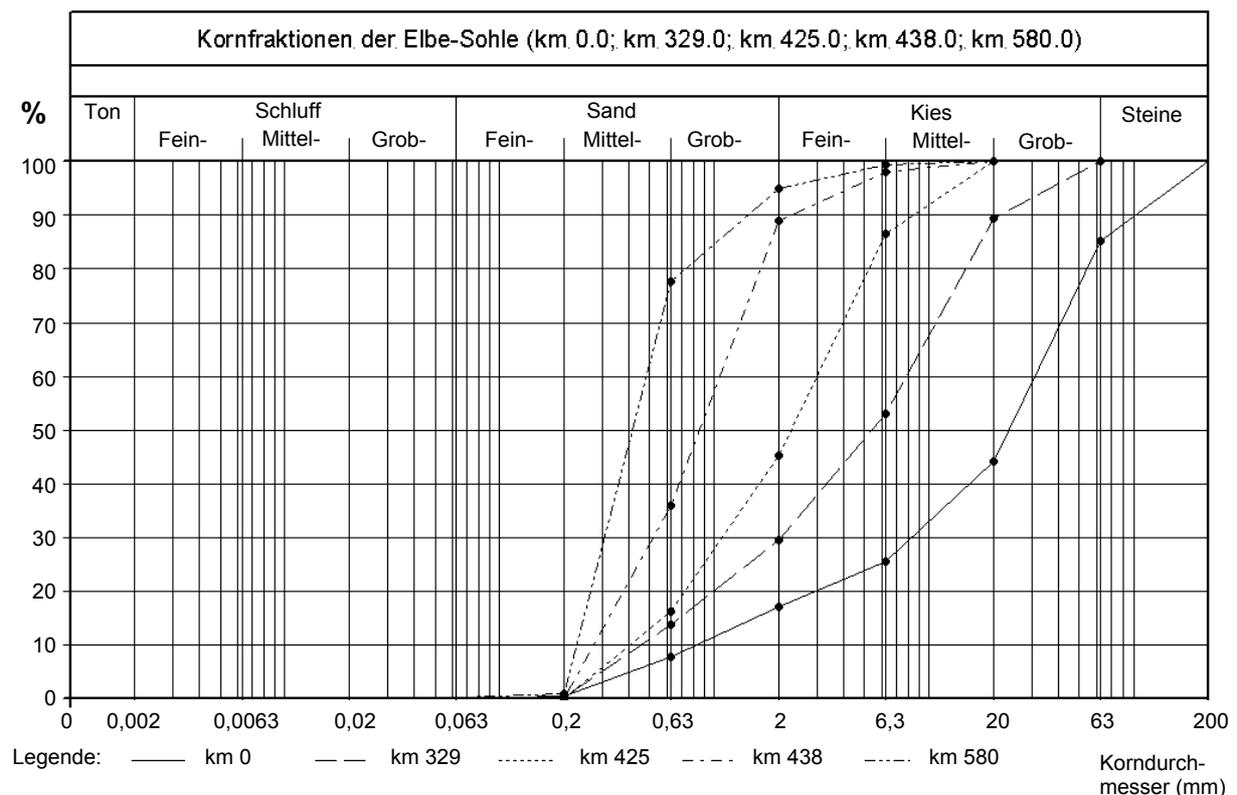


Abb. 3-10: Summenkurven ausgesuchter über den gesamten deutschen Abschnitt verteilter Kornfraktionen der Elbesohle, Staatsgrenze bei El-km 0,0; Magdeburger Stadtstrecke bei El-km 329,0; oberhalb der Havelmündung bei El-km 425,0; an Havelmündung bei El-km 438,0; oberhalb von Geesthacht bei El-km 580,0 (Grafik aus ElbeInKa)

Der Feststofftransport an der Elbe vollzieht sich als Geschiebebewegung, Schwebstofftransport oder in der Bewegung großer Transportkörper wie Dünen oder kleinerer wie Rippeln (ROHDE 1971). Nach FÜHRBÖTER (1967) ist der Transport in Dünen ein Nahtransport, da es sich um lokale Umlagerungen mit wesentlich geringeren Geschwindigkeiten als die der umgebenden Strömung handelt. Der Schwebstoff wird dagegen ferntransportiert und hängt stark von der Fließgeschwindigkeit des Wassers ab. Der Schwebstofftransport ist oberhalb der Sohle am höchsten und betrifft im Gegensatz zum Geschiebetransport nur die feineren Korngrößen. Der Geschiebetransport hängt ebenfalls von der Strömungs-

geschwindigkeit ab. Bei der Umlagerung von Transportkörpern treten zusätzlich an der Oberfläche auch Geschiebetransport und teilweise kleinere Transportkörper wie Rippeln auf. Der Ferntransport von Sand ist nach FÜHRBÖTER (1967) beim Auftreten von Transportkörpern geringer als bei glatten Sohlen, da der Großteil der Energie des Stromes für die lokalen Umlagerungen verwendet wird. Es tritt insofern eine Verzögerung des Ferntransportes und eine Stabilisierung der Sohle ein.

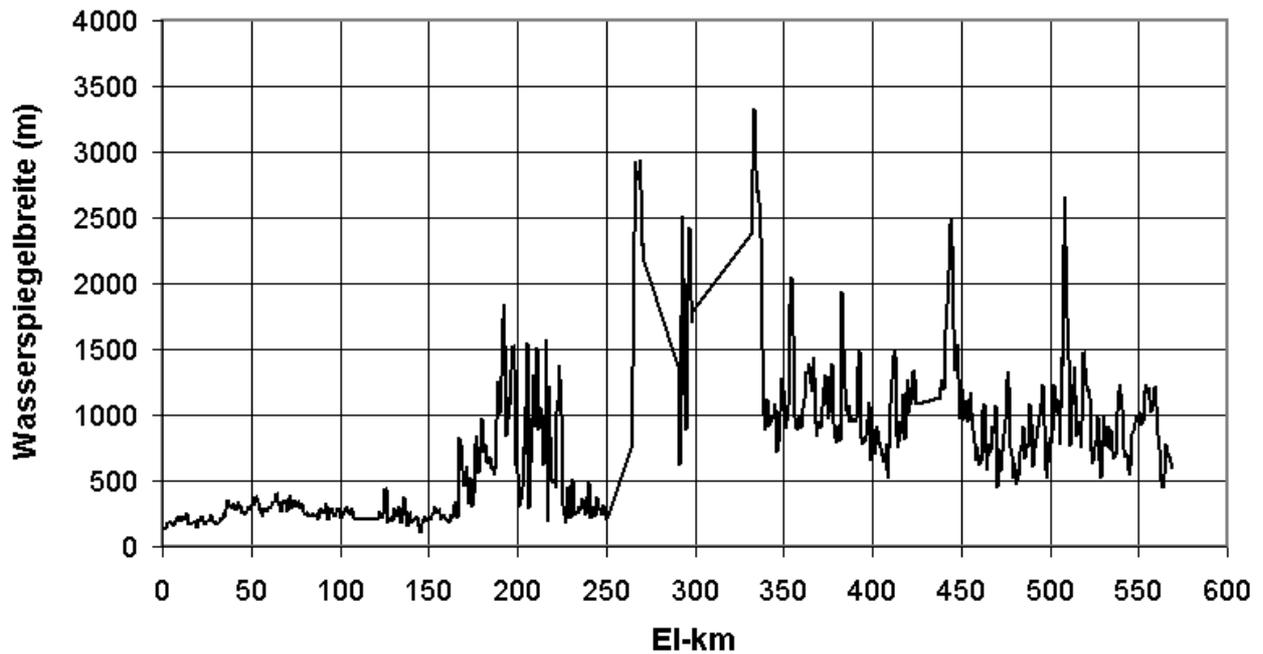


Abb. 3-11: Hydraulisch wirksame Wasserspiegelbreite für den deutschen Abschnitt der Elbe bei Hochwasserständen

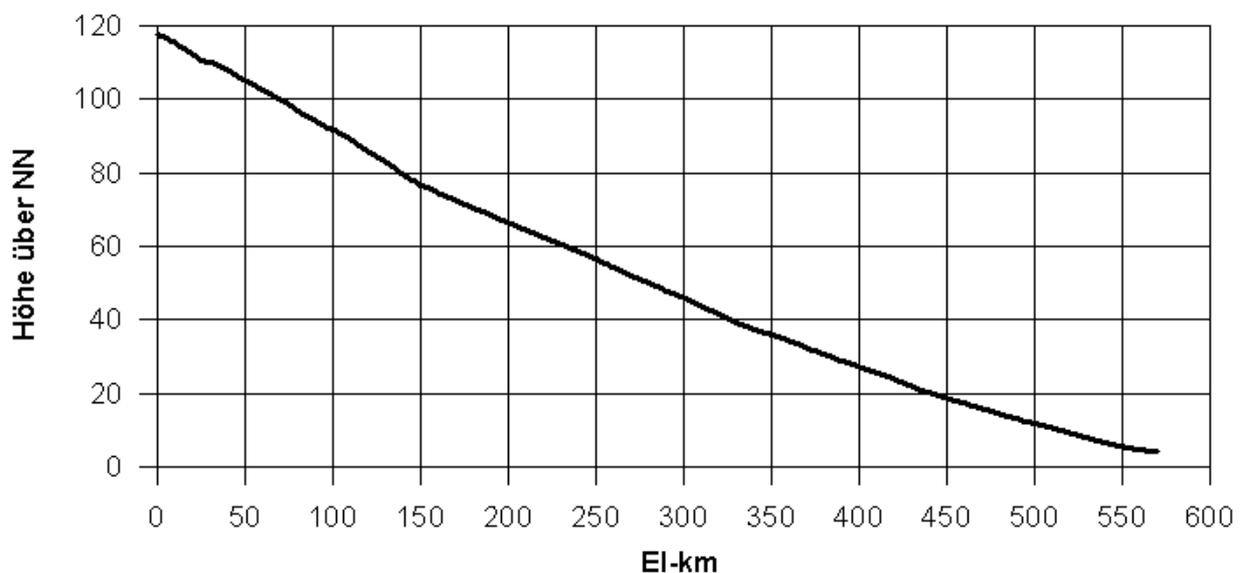


Abb. 3-12: Wasserspiegelhöhe bezogen auf Niedrigwasser für den deutschen Abschnitt der Elbe

Seit 1993 führt die BfG in unregelmäßigen Abständen, abhängig von hydrologischen und technischen Randbedingungen, Geschiebe- und Schwebstoffvielpunktmessungen am deutschen Elbeabschnitt durch. Die Geschiebemessungen dienen der Abschätzung des an der Sohle transportierten Anteils an der Feststofffracht. Mithilfe der Schwebstoffvielpunktmessungen werden die in Abhängigkeit von den hydraulischen Bedingungen zeitweilig in Suspension transportierten Sandanteile (Fraktionen $> 63 \mu\text{m}$) sowie die dauerhaft in Schwebelag befindlichen Feinstoffanteile (Fraktionen $< 63 \mu\text{m}$) ermittelt. Die insgesamt an 28 Querschnitten durchgeführten Messungen erfolgten schwerpunktmäßig in der Erosionsstrecke (EI-km 126 - 275), in der Stadtstrecke Magdeburg (EI-km 300 - 350) und in der Elbereststrecke von EI-km 508 - 521 (SCHMIDT & DRÖGE 1999; BFG 1994 und 2002).

Auswertungen der Messdaten ergaben den Beginn eines relevanten Geschiebetransportes ab EI-km 120 bei Mühlberg. Dieser Bereich ist, wie oben beschrieben, von einer deutlichen Veränderung der Korngrößenverteilung in der Flusssohle von steinig und grobkiesig zu feinkiesig und sandig bestimmt (Abb. 3-7). Den abwechselnd ausgeglichenen und von Erosion betroffenen Abschnitten bis EI-km 390 folgt bis EI-km 460 ein Bereich mit geringen Auflandungen und unterhalb von EI-km 460 mit geringer Erosionstendenz. Der Bereich unterhalb der Havelmündung wird von ausgeprägten Transportkörperbewegungen gekennzeichnet, deren Transportrate nur grob zu quantifizieren ist. Insgesamt lassen sich im Längsverlauf bis Magdeburg Zunahmen mittlerer jährlicher Geschiebefrachtraten von 10.000 Tonnen bei EI-km 150 über 50.000 Tonnen bei EI-km 200, 60.000 Tonnen bei EI-km 250 bis auf 125.000 Tonnen bei Magdeburg (EI-km 325) schätzen (SCHMIDT & DRÖGE 1999). Unterhalb von Magdeburg werden Quantifizierungen, auch aufgrund der zunehmenden Transportkörperbildungen schwieriger, weshalb hierfür keine Angaben erfolgen.

Die Schwebfrachtraten übertreffen die Geschiebefrachtraten in der Elbe um ein mehrfaches bis zum Faktor 10. Allerdings unterliegen die Schwebfrachtraten starken jährlichen Schwankungen, die abschnittsweise bis zu 250 % ausmachen können. So betragen bei EI-km 30 die Jahresmittelwerte 1993 ca. 200.000 Tonnen und 1994 ca. 550.000 Tonnen und bei EI-km 530 am Ende der Messstrecke 1993 ca. 400.000 und 1994 ca. 900.000 Tonnen. Unterhalb der Saaleeinemündung bei EI-km 290,7 wurden mit ca. 510.000 Tonnen 1993 und ca. 1.110.000 Tonnen 1994 in beiden Jahren die höchsten Werte im Elbeverlauf erreicht. Die Saale hat einen enormen Einfluss auf die Schwebstofffracht und kann zu Verdopplungen der Mengen in der Elbe führen. Die Frachtraten der Saale schwanken jedoch ebenfalls signifikant in Abhängigkeit der hydrologischen Verhältnisse im Einzugsgebiet. Dies wird bei einem Vergleich der absoluten Schwebstofffrachtraten mit den –konzentrationen deutlich.

Die Varianzen der jährlichen Konzentrationen sind sowohl für den gesamten Elbeabschnitt als auch für die Einmündung der Saale wesentlich geringer und liegen zwischen Werten von ca. 23 g/m^3 und 50 g/m^3 , was Differenzen von ungefähr 100 % bedeutet. Die unterschiedlichen Abflussmengen der untersuchten Jahre wirken sich somit auf die Gesamtfrachten stärker als auf die Konzentrationen aus (SCHMIDT & DRÖGE 1999).

Sandanteile machen unterhalb von El-km 230, mit Ausnahme von Abschnitten im Bereich Magdeburg, mehr als 50 % des Sohlenmaterials aus und nehmen bis zum Wehr Geesthacht auf bis zu 95 % zu (Abb. 3-6, 3-7, 3-10). Dies betrifft allerdings nur die Grob- und Mittelsandfraktionen, Feinsand ist im Bett des Hauptstrom kaum vorhanden und insofern für bettbildende Prozesse nicht relevant. Untersuchungen von suspendiertem Sand durch die BFG ergaben, dass die Feinsandfraktion in der Vertikalsäule aufgrund des turbulenten Fließens gleichmäßig verteilt ist. Der Feinsand stammt überwiegend aus Oberflächeneinträgen und Nebengewässern, wird von der Strömung gleichmäßig über längere Abschnitte verteilt und als Sandspülfracht bezeichnet. Grob- und Mittelsande hingegen treten wegen der größeren Sinkgeschwindigkeit nicht in den oberen Bereichen der Wassersäule auf und werden vorwiegend sohlennah in Suspension transportiert sowie bei nachlassenden Fließgeschwindigkeiten und Sohl Schubspannungen akkumuliert. Diese Fraktionen werden der suspendierten Bettfracht zugeordnet. Für Abflüsse von 2MQ (zweifacher mittlerer Jahresabfluss) wurden sohlennahe Sandkonzentrationen von ca. 30 g/m^3 bei El-km 57,8 (Dresden), ca. 160 g/m^3 bei El-km 275 (Aken) und ca. 280 g/m^3 bei El-km 536,2 (Neudarchau) gemessen. Das Verhältnis von Sand-Spülfracht zur suspendierten Bettfracht verändert sich im Längsverlauf der Elbe. Oberhalb von El-km 200 übertraf bei den Untersuchungen der BFG die Spülfracht bei allen Messungen die suspendierte Bettfracht, unterhalb von El-km 200 können bei hohen Abflüssen auch die Anteile der suspendierten Bettfracht überwiegen (SAUER & SCHMIDT 1999).

3.2 Entwicklung der Mittel-elbe vom naturnahen Tieflandstrom zur Bundeswasserstrasse

3.2.1 Natürliche Entwicklung der Flusslandschaft der Elbe

Die Entwicklung des Flussgebietes der Elbe vollzog sich über lange geologische Zeiten. Die kreidezeitlichen Sedimentgesteine in Nordböhmen und der Sächsischen Schweiz wurden in großen, flachen Seebecken abgelagert. Über den Dresdener Halbgraben bestand eine Verbindung zwischen diesen Gebieten und dem kreidezeitlichen Meer im Bereich des heutigen Norddeutschland. Trotz der tektonischen Hebung von Erzgebirge und Lausitzer

Bergland und dem lebhaften Vulkanismus im Zusammenhang mit dem sich bildenden Egergraben, behauptete die Elbe während des Tertiärs ihren Lauf im Bereich der alten Tiefenlinie und entwässerte das nördliche böhmische Becken (EISSMANN 1975).

Im Quartär war für die Laufentwicklungen der Elbe und ihrer Nebenflüsse in Norddeutschland das glaziale und fluvio-glaziale Geschehen im Zusammenhang mit dem mehrfachen Auf- und Abbau des skandinavischen Inlandeises steuernd. Zwischen Gorleben und Cuxhaven entwickelte sich die heutige Linienführung des Elbelaufes erst im Zusammenhang mit der Weichsel-Kaltzeit. Die dabei entstehenden Niederterrassen belegen durch ihren Schotterbestand die Verbindung der Mittelgebirgsflüsse mit der unteren Elbe und bekunden durch ihre Talbreite von örtlich bis über 10 km die große Bedeutung dieser Abflussbahn. Das Aussehen dieser ausgedehnten periglazialen Talgründe verdeutlicht die Abbildung von EISSMANN (1981) für den Raum Leipzig – Riesa: in den kilometerbreiten Tälern wechselten die Abflussbahnen zwischen den Sand- und Kiesbänken in verzweigten Flussbetten. Nur im Bereich der feuchteren Talränder kam es örtlich zu höherer Vegetation. Dominant waren baumlose Tundrenflächen mit Eiskeilpolygonen. In den trockenen Jahreszeiten wirbelten Starkwinde riesige Staubfahnen auf, das Material wurde als Löss in der weiteren Nachbarschaft abgelagert. Die erodierten Flusssande blieben als äolische Bodenfracht in den Talgründen liegen und formten Dünenfelder.

Nach dem letzten Kälterückschlag zu Beginn des Holozäns setzten vor 10.300 Jahren im Präboreal und Boreal die Bewaldung der Landschaft durch Kiefern und Eichen ein und damit auch eine Veränderung der Talgestaltung. Parallel mit dem Abschmelzen des Permafrostes und dem Ende der periglazialen Abtragungsbedingungen auf den Hängen veränderten sich sowohl die hydrologischen Bedingungen als auch die Sedimentfrachten grundlegend. Die Abflüsse der Elbe reduzierten sich enorm und durch Erosion entstand ein etwa 2 bis 3 km breites Talband. Das neue Flussbett mit Stromschlauch und Hochwasserbett tiefte sich um etwa 6 m in die Niederterrasse ein und besteht im wesentlichen aus umgelagerten Sanden und Feinkiesen aus der Niederterrasse. Im Grundriss entwickelte sich dabei aus dem vormals verzweigten Flusssystem das aktuelle Mäandersystem (ROHDE 1971).

Mit der vor etwa 8.000 Jahren einsetzenden Phase des sogenannten Atlantikums erreichte die aktuelle Warmzeit Maximalbeträge an Wärme und Feuchtigkeit. Vielerorts kam es dabei erstmals zur Ablagerung von den ältesten Auenlehmen, doch dominant blieben die in ehemaligen Altarmen der Mäander eingelagerten humosen Altwassersedimente. Der Raum Magdeburg – Havelberg wurde in dieser Phase ganz besonders durch häufige Flussverlagerungen betroffen. Über die Tiefenlinie Burg – Genthin – Rathenow kam es bei

Hochwasserabflüssen der Elbe immer wieder zu Laufveränderungen nach Osten. Mit Hilfe der Sedimente in den ehemaligen Altarmen ist durch eingelagerte Früchte, Hölzer und Pollen der vormalige Aufbau der Auen zu rekonstruieren (EISSMANN 1975).

3.2.2 Nutzungsbedingte Veränderungen und Ausbau zur Schifffahrtsstrasse

Im Subatlantikum vor etwa 3.500 Jahren setzten mit zunehmender bäuerlicher Nutzung der flussnahen Landschaften und damit aufkommender verstärkter Erosion von Rodungsflächen Ablagerungen von Auelehm in den Hochwasserbereichen der Elbe ein. Diese Vorgänge erreichten ihre volle Dominanz jedoch erst in einzelnen Phasen der mittelalterlichen Rodung. Bei zunehmendem Nutzungsdruck änderten sich unter mittelalterlichen und neuzeitlichen Bedingungen die hydrologischen und sedimentologischen Rahmenbedingungen der Flüsse, selbst die Abflussbahnen wurden nun den Bedürfnissen der Nutzer angepasst. Eine besondere Bedeutung der Elbe als Schifffahrtsstrasse kann erst über die Verleihung von Elbzöllen an Magdeburg 968 durch Otto I. und an den Bischof von Meißen 983 durch Otto III. abgeleitet werden (TEUBERT 1911). Insbesondere der Handel mit Kochsalz von Lüneburg über Hamburg elbaufwärts gewann in den darauffolgenden Jahrhunderten an Gewicht und führte von 1391 bis 1398 zum Bau des Stecknitz-Kanals, des ersten europäischen Scheitelkanals mit 17 Staustufen. Die dort verkehrenden Schiffe erreichten Längen bis 19 m, bei einem Tiefgang von 0,43 m und einer Tragfähigkeit von 12,5 Tonnen (TEUBERT 1911).

Weitere Ausbaumaßnahmen konnten aufgrund der technisch beschränkten Möglichkeiten in größerem Umfang im Mittelalter nicht durchgeführt werden. Der Strom war weiterhin verwildert und durch Verlagerungen von Talwegen, Stromspaltungen und wandernde Sandbänke geprägt (METSCHIES 1939). Wasserbauliche Maßnahmen waren lokal begrenzt und auf den Bau von Ringdeichen um Ortschaften oder vereinzelt auf den Uferschutz beschränkt. Arbeiten zur Verbesserung des Fahrwassers erfolgten im 15. und 16. Jahrhundert nicht. Dieses Ziel wurde erst ab dem 17. Jahrhundert verfolgt, beispielsweise mit dem Ausbau der Elbe bei Magdeburg 1655 – 1686 und Durchstichen bei Lostau um 1740 und bei Rothensee um 1786 (ROHDE 1971).

Koordinierte und systematische Ausbauten deutscher Ströme für die Binnenschifffahrt folgten erst im Gefolge der Neuordnung Mitteleuropas durch den Wiener Kongress und wurden zwischen den Anrainerstaaten in der Elbschifffahrtsakte vom 23. Juni 1821 verabredet und unterzeichnet. Mit dieser Absichtserklärung zur Verbesserung und Vereinheitlichung des Schiffsverkehrs auf der Elbe war die Basis für einen umfassenden

technischen Flussausbau gelegt. SCHMIDT (2001) führt in Tabelle 4/1 in seinem oben erwähnten Buch für die Zeit zwischen vor '1600 und 1810' für die Elbe bereits 13 Mäanderdurchstiche auf, doch der ‚Durchbruch‘ zum modernen Flusssystem geschah erst nach der sogenannten Additionalakte vom 13. April 1844. Die Ausbauarbeiten begannen bald nach Abschluss der Additionalakte und beinhalteten u.a. die Regelung von Einmündungen, die Beseitigung störender Wehre und Durchführungen von Baggerungen. Als Regelungsbawerke wurden oberhalb von Strehla bei El-km 121 in Sachsen überwiegend Parallel- und Deckwerke und unterhalb in Preußen vor allem Bühnen durchgängig angelegt. Eine Statistik der Stromschaukommission wies 1858 die Errichtung von 4298 Bühnen, 113,4 km Deckwerke und 27,8 km Parallelwerke aus. Allerdings verbesserten sich die Fahrwasserverhältnisse der Elbe im Zuge dieser Baumaßnahmen nicht wesentlich (ROHDE 1971). Gewünschte Erfolge brachten erst die umfangreichen Maßnahmen der Elbstromverwaltung, die in einem Regelungsplan von 1877 und in einem erweiterten Regelungsentwurf von 1893 festgelegt und bis 1910 umgesetzt wurden. Der Bau von Bühnen, zum Teil mit Kopfschwellen, und von Deckwerken, die Beseitigung von Felsen, Baumstämmen und Sandbänken sowie weitere Durchstiche und Baggerungen geschahen in großem Umfang und erreichten bis zur Havelmündung eine Festlegung des Talweges, eine Ausgleichung des Gefälles sowie die Befestigung der Ufer (ROHDE 1971). Unterhalb der Havelmündung hingegen verlagerte sich der Talweg aufgrund der wandernden Sandbänke weiterhin regelmäßig.

Die Festlegung des Laufs aufgrund wasserbaulicher Maßnahmen verdeutlichen Arbeiten von ROMMEL (2000) in Abbildung 3-13. Die Fixierungen des Flussschlauches und der Uferbereiche ab der zweiten Hälfte des 19. Jahrhunderts können auch anhand von Messtischblättern von 1843 und 1996 dokumentiert werden. Für die Elbe im ehemaligen Mündungsbereich der Havel bei Werben wurde ein Kartenvergleich durchgeführt (WIRTZ & ERGENZINGER 2002). Die preussischen Urmesstischblätter 1 : 25 000 wurden entlang der Elbe in den Jahren vor der Additionalakte aufgenommen und dokumentieren somit sehr präzise den Zustand des Flusses vor seinem großen Umbau. Entsprechendes gilt für die sächsische Elbstromkarte aus den Jahren 1850 bis 1855. Zwischen den Stromkilometern 424,5 und 433,5 hat sich in den betrachteten Jahren prinzipiell wenig verändert. Aufgrund der Bühnenbauten und der Deckwerke hat sich der Elblauf kaum verlagert. Der Deichverlauf ist mehr oder weniger konstant geblieben. Die Fläche zwischen den Deichen beträgt 10,4 km², der mittlere Abstand von Deich zu Deich beträgt etwa 1,2 km, die Breite des Stromschlauches ist bei Mittelwasser ungefähr 240 m. Die größten geomorphologischen Veränderungen sind dabei im Uferbereich festzustellen. 1842 war gerade die erste Generation von Bühnen gebaut. Nach der Karte erreichten sie eine Gesamtlänge von etwa 2 km, während das heutige Bühnensystem laut der topographischen Karte (d. h. ohne die versandeten Bühnen) eine strömungswirksame

Gesamtlänge in der Größenordnung von 5,9 km erreichen. Unter ökologischen Gesichtspunkten war die im Zusammenhang mit den Ausbauten eingetretene Erosion zahlreicher ausgedehnter Kies- und Sandbänke (46ha) sicherlich gravierend. Weiterhin ist festzuhalten, dass auch im Raum Werben zwischen den Deichen die noch vor 150 Jahren vorhandenen Auenwaldbestände von etwa 150 ha oder rund 15 % der Deichzwischenfläche auf einzelne Baumgruppen und Baumreihen reduziert wurden. Die Beseitigung der Auenwälder und die Reduktion der Bäume und Buschbestände in den Deichvorländern geschah immer mit dem Ziel der Hochwasserregulierung (WIRTZ & ERGENZINGER 2002).

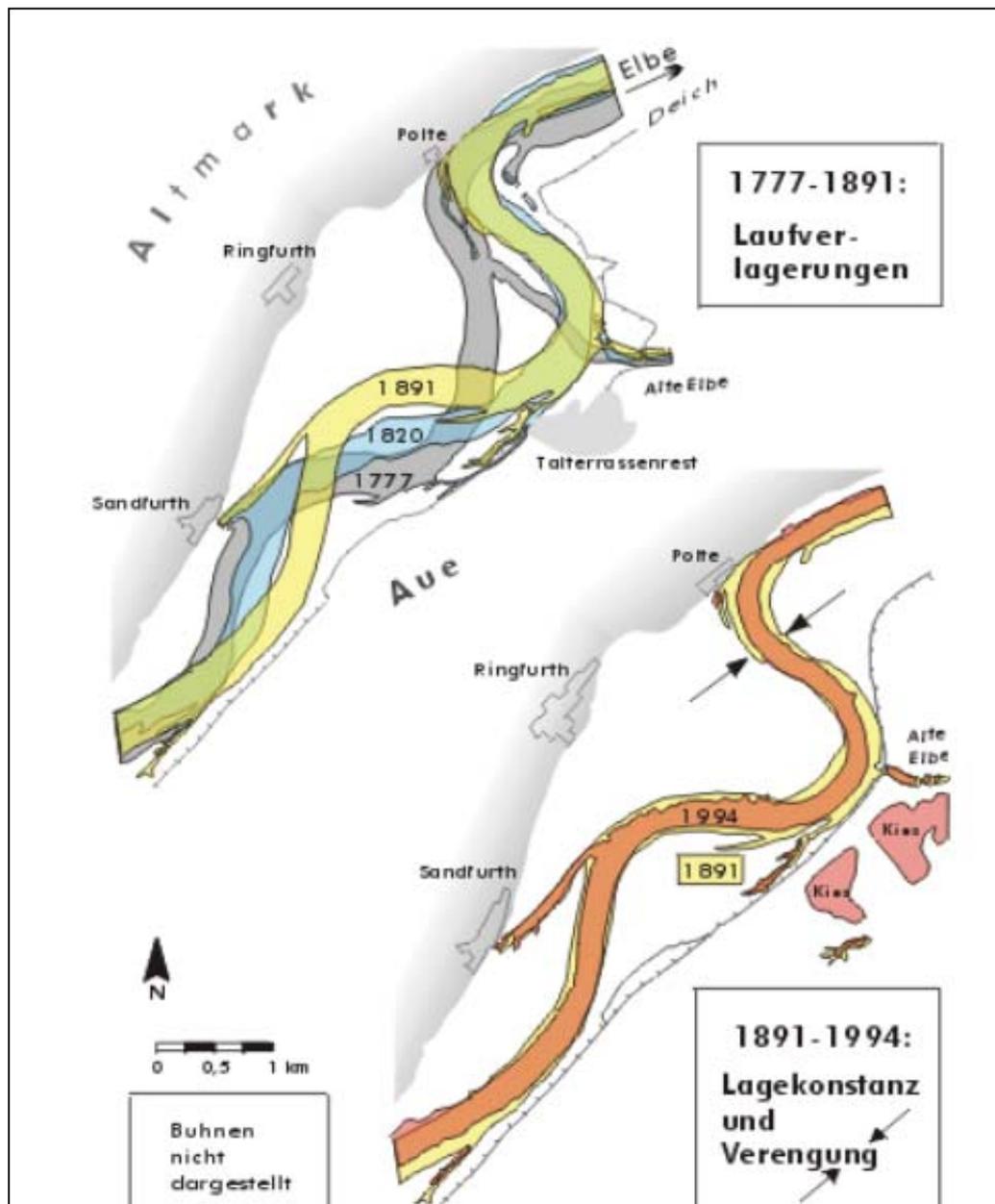


Abb. 3-13: Linienführung der Elbe bei Sandfurth (El-km 360 – 370) ca. 1777 bis 1994 (ROMMEL 2000):

- a) 1777 – 1891: Laufmigration und –expansion um 250 bis maximal 1250 m
- b) 1891 – 1994: Lagekonstanz und Flussbettverengung um 75 bis max. 225 m

Nach 1910 fanden umfangreiche Planungen für eine Niedrigwasserregulierung statt, welche u.a. den Neubau von Buhnen, Hakenbuhnen und Zwischenbuhnen, Buhnenverlängerungen, den Bau eines Wehres bei Magdeburg und eines zusätzlichen Speicherbeckens bei Pirna für Zuschusswasserabgaben bei Niedrigwasser vorsahen. Der Bau von Kanälen, insbesondere des Mittellandkanals, welcher die Elbe an die westdeutschen Industriegebiete anschloss und die damit einhergehende Steigerung des Schiffsverkehrs machten den Ausbau oberhalb der Havelmündung in einigen Teilstrecken und unterhalb der Havelmündung durchgängig notwendig (ROHDE 1971). Angestrebt wurden Mindestfahrwassertiefen von 1,10 m oberhalb und 1,25 m unterhalb der Saalemündung, so dass 700 Tonnen-Schiffe, welche bei voller Ladung einen Tiefgang von 1,75 m aufwiesen mit $\frac{3}{4}$ Ladung verkehren konnten. Dies entsprach dem 1929 definierten Regelungswasserstand 1929 (RW 29), welcher sich bei der geringsten bis dahin beobachteten Wassermenge von 1904 einstellen würde. Der erhöhte RW 29 (ERW 29), welcher die Kapazitäten der Speicherbeckenzugaben beinhaltete, bedeutete den Verkehr von 1000 Tonnen-Schiffen mit $\frac{3}{4}$ Ladung und Mindestwassertiefen von 1,25 oberhalb und 1,40 m unterhalb der Saalemündung. Ungefähr 60 % des Grobausbaus wurden im Rahmen der Niedrigwasserregulierung bis 1943 fertiggestellt. Keine Arbeiten wurden bis heute im Bereich der sogenannten Reststrecke zwischen El-km 504 und 524 durchgeführt. Ebenfalls nicht gebaut wurde das Speicherbecken bei Pirna sowie die Staustufe Magdeburg (ROHDE 1971). Die Brücke des Mittellandkanals über die Elbe wurde begonnen, aber erst nach der Wiedervereinigung 2002 fertiggestellt.

Nach 1945 wurde die Niedrigwasserregulierung nur in geringem Maß fortgesetzt. Vor allem im Bereich der Reststrecke erfolgten noch einige Arbeiten, ansonsten fanden nur wenige Unterhaltungsmaßnahmen an der Elbe in der DDR statt, so dass viele der Strombauwerke 1991 in schlechtem oder zerstörtem Zustand waren. Am westdeutschen Abschnitt der Elbe sind der Bau der Staustufe Geesthacht bei El-km 585,9 in den Jahren 1957 bis 1960 und der Bau des 115,2 km langen Elbe-Seiten-Kanals von 1968 bis 1976 hervorzuheben. Die Staustufe Geesthacht sollte sowohl die im Zusammenhang mit fortschreitender Erosion aufgrund der Eintiefungen an der Untereibe auftretenden sinkenden Wasserstände im Bereich der oberen Tideelbe stabilisieren und damit die Schifffahrtsverhältnisse verbessern, als auch die zu niedrigen Grundwasserstände anheben. Der Elbe-Seiten-Kanal diente der besseren Anbindung der Binnenschifffahrt Hamburgs an die Wirtschaftsräume des Ruhrgebiets, sowie Hannovers und Braunschweigs. Die Befahrung der Elbe bis Magdeburg und die Schleusung in den Mittellandkanal entfiel somit, was die Fahrtstrecken erheblich verkürzte. Die Strecke von Hamburg ins Ruhrgebiet reduzierte sich z. B. um 215 km. Zudem sind aufgrund der gewährleisteten Tauchtiefe von 2,5 m höhere Beladungen möglich, der Elbe-Seiten-Kanal ermöglicht die Befahrung mit 1350 Tonnen-Schiffen. Vorhergehende Untersuchungen der

Wasser- und Schifffahrtsdirektion Hamburg ergaben zudem, dass eine Stauregelung der Elbe bis Magdeburg deutlich teurer sein würde als ein Kanalneubau (ROHDE 1971).

3.2.3 Politische Diskussion aktueller Ausbaupläne

Der 1992 festgelegte Bundesverkehrswegeplan sieht umfangreiche Ausbau- und Unterhaltungsmaßnahmen vor (FAIST 1999). Dazu zählten Verbesserungen der Fahrrinnenbedingungen und Minderung von Erosionen in der Erosionsstrecke (geschätzte Kosten ca. 130 Mio. DM), Maßnahmen in der Magdeburger Stadtstrecke (geschätzte Kosten ca. 30 bis 50 Mio. DM) und der Ausbau der Reststrecke zur Verringerung der Streichlinienbreite (geschätzte Kosten ca. 80 Mio. DM). Weiterhin sind vor allem an den Regelungsbauwerken umfangreiche Instandsetzungsarbeiten vorgesehen. Von insgesamt 6903 Buhnen sind 1559 und von den 327,1 km Längsbauwerken (Deck- und Leitwerke) 106,8 km wiederherzustellen. 3 % der Investitionssumme sind für ökologische Ausgleichsmaßnahmen vorgesehen. Die Strombaumaßnahmen sollen eine Fahrrinntiefe von 1,6 m an 95 % der Tage eines Jahres gewährleisten und damit eine durchschnittliche Tiefenverbesserung für die Schifffahrt von 20 cm und streckenweise bis zu 40 cm erreichen (FAIST 1999). Diese Zielsetzung ist aus verschiedenen Gründen umstritten. Zum einen könnten umfangreiche Baumaßnahmen eine Reduzierung der sich in den letzten Jahrzehnten eingestellten morphologischen Vielfalt in den Uferbereichen und damit eine ökologische Verschlechterung bedeuten, zum anderen wird die wirtschaftliche Notwendigkeit angezweifelt. Ging der BVWP 92 noch von einem Investitionsaufwand von 500 Mio. DM und einem Nutzen/Kosten-Verhältnis (NKV) von 9,3 aus, so hat die Entwicklung der letzten 10 Jahre gezeigt, dass die Bedeutung der Binnenschifffahrt auf der Elbe im Vergleich zu anderen Verkehrsträgern nachgelassen hat (Tabelle 3-2 nach IÖW 2002) und dieses NKV überschätzt ist (IÖW 2002).

Tab. 3-2: Vergleich von Prognose und Entwicklung der Verkehrsträger von 1992 bis 2002 (IÖW 2002)

Güterverkehr - Verkehrsleistung: Modal split			
	BVWP 92 Prognose 2010	Reale Entwicklung 2000	BVWP 02 Integrationsszenario
Straßengüterverkehr	43%	69%	61%
Bahn	35%	16%	24%
Binnenschifffahrt	21%	14%	14,1%

Auch die oftmals genannte Argumentation der Notwendigkeit einer leistungsfähigen Schifffahrtsstrasse für die Tschechische Republik (GABRIEL 2002, ZIDEK 2002) ist nicht unumstritten. Die tschechische Binnenschifffahrtsflotte, die durch lediglich eine Reederei betrieben

wurde, deckte die stattfindenden Transporte zwischen Magdeburg und Tschechien aufgrund angepasster Schiffe mit geringeren Tauchtiefen und aufgrund geringerer Kosten als die der deutschen Binnenschiffer, zu über 90% ab. Dennoch musste die Reederei 2001 Konkurs anmelden. Der Anteil der Binnenschifffahrt an den Verkehrsträgern hat sich in Tschechien noch deutlicher als in Deutschland reduziert und es bestehen gut ausgebaute Bahnverbindungen von Prag in Seehäfen Westeuropas, die ein vielfaches der Gütermengen der Binnenschifffahrt bewältigen (IÖW 2002).

Im Ringen um eine politische Lösung zwischen den Naturschutz- und Umweltverbänden (BUND, NABU, WWF 1996) und dem Bundesverkehrsministerium kam es 1996 zu der Elbevereinbarung. Darin wurde festgelegt, dass „ein Gesamtkonzept für den Ausbau bzw. die Unterhaltung der Elbe erarbeitet wird, welches das verkehrliche Potenzial sichert und die ökologischen Erfordernisse berücksichtigt“. „Für die untere Mittelelbe soll das derzeitige ökologische Potenzial erhalten bleiben und nach Ausbau des Elbe-Seitenkanals werden weitere ökologische Verbesserungen angestrebt“. Die bis 2003 angestrebte Ertüchtigung des Elbe-Seiten-Kanals sollte Ausbau- und Unterhaltungsmaßnahmen an der Elbe unterhalb von Magdeburg ersetzen und die Möglichkeit einer umfangreichen Verbesserung des ökologischen Potenzials bieten.

Die Bedeutung des Elbe-Seitenkanals im Vergleich mit der unteren Mittelelbe für die Schifffahrt verdeutlichen die Zahlen einer Studie im Auftrag des BUND (IÖW 2002), welche belegen, dass nur ein geringer Teil der auf der Elbe umgeschlagenen Güter tatsächlich über die untere Mittelelbe transportiert wird. Nach einer Statistik der Magdeburger Hafen GmbH von 1998 wurden von den insgesamt 15 Millionen Tonnen lediglich 2 Mio. Tonnen in Richtung Hamburg und Dresden über die Elbe abgewickelt. 6 Mio. Tonnen liefen über den Mittel-landkanal, 4 Mio. Tonnen über den Elbe-Havel-Kanal in Richtung Berlin und 3 Mio. Tonnen direkt in den Hafen Magdeburg (IÖW 2002). Nach Angaben des Wasser- und Schifffahrtsamtes Lauenburg gehen von den 9,4 Mio. Tonnen von Hamburg nach Magdeburg rund 7 Mio. Tonnen über den Elbe-Seitenkanal, 1 Mio. Tonnen über den Elbe-Lübeck-Kanal und lediglich 1,4 Mio. Tonnen über die Strecke der unteren Mittelelbe. Der Elbe-Seitenkanal ist ganzjährig beladen befahrbar, die Elbe wird nur bei günstigen Wasserständen und von Talfahrern bevorzugt, da die Fahrtzeiten zwischen Häfen entlang der Elbe kürzer sind und die Kosten für die Nutzung des Elbe-Seitenkanals nicht anfallen.

Nach dem Augusthochwasser 2002 wurde im Koalitionsvertrag im Oktober 2002 festgelegt, dass Ausbaumaßnahmen und in ihren Auswirkungen vergleichbare Unterhaltungsmaßnahmen nicht umgesetzt werden. Diese Vereinbarung befand sich allerdings wenige Monate

später bereits wieder auf dem Prüfstand. Die Bundesanstalt für Wasserbau als Fachbehörde des Bundesverkehrsministeriums prüft z. Zt. (Stand März 2003) den Einfluss der Regulierungsbauwerke der Buhnen in einem Gutachten zur Hochwasserneutralität der Strombaumaßnahmen.

Für die weitere Entwicklung der Elbe ist außerdem ausschlaggebend, ob der von der Europäischen Wasserrahmenrichtlinie (WRRL) vorgeschriebene gute ökologische und chemische Zustand bis 2015 angestrebt wird. Die erheblichen Veränderungen der Hydro-morphologie aus Gründen des Hochwasserschutzes und der Schifffahrt sowie die Nutzung als internationale Wasserstrasse könnten eine Ausnahmeregelung gemäß Artikel 4(3) ermöglichen. Danach erlaubt die WRRL unter bestimmten Umständen eine Ausweisung als erheblich verändertes Oberflächengewässer (Heavily Modified Water Body, HMWB) bis 2008, wenn der ökologisch gute Zustand ohne gravierende Folgen für die Nutzung nicht erreichbar ist. In diesem Fall wäre das anzustrebende Ziel das gute ökologische Potenzial, also der beste erreichbare ökologische Zustand, den die bestehenden Nutzungen noch zulassen. Dies würde eine Nutzung der unteren Mittelelbe als Schifffahrtsstraße inklusive der damit verbundenen Regulierungen weiter erlauben. Möglich sind allerdings auch Ausnahmeregelungen nach den Artikeln 4(4) und 4(5) der WRRL, wonach keine Ausweisung als erheblich veränderter Wasserkörper erfolgt, sondern weniger strenge Ziele für die Wasserkörper angesetzt und der Zeitplan für die Erreichung dieser Ziele verlängert werden (Ecologic 2002, WRRL 2000). Eine Fallstudie des Institutes für Gewässerforschung und Gewässerschutz der Universität Kassel (FREY et al. 2002) konnte für die Elbe eine Ausweisung als HMWB nicht empfehlen. Die Autoren kommen zu dem Schluss, dass eine Aufgabe der Schifffahrt der Elbe auch bei einer Nichtausweisung nicht notwendig ist und weiterhin alternative Transportmittel für den Fall einer Verschlechterung bestehen. Verschiedene vorgeschlagene Varianten für eine Verbesserung belegen, dass eine Erreichung des guten ökologischen Zustandes möglich ist. Eine Abwägung der negativen ökologischen Auswirkungen von Regulierungsmaßnahmen mit den geringen ökonomischen Nachteilen einer Nichtausweisung führt zu einer Ablehnung nicht notwendiger Ausbaumaßnahmen.

3.2.4 Veränderungen der Landschaftsökologie der Elbe

Trotz wasserbaulicher Veränderungen der letzten Jahrhunderte gilt die Elbe aktuell auf deutschem Gebiet, besonders wegen fehlender Querverbauungen oberhalb von Geesthacht als ein Fluss, der aufgrund einer relativ heterogenen Morphologie noch über ein hohes Regenerationspotenzial verfügt (BRUNKE et al. 2003). Dies trifft sowohl für die rezente Aue zu,

als auch für abwechslungsreiche Uferstrukturen, welche aufgrund der stark reduzierten Unterhaltungsarbeiten zu DDR-Zeiten entstanden sind. Des weiteren besitzt die Elbe mit dem Streckenabschnitt von Wittenberg bei Stromkilometer 215 bis Stromkilometer 585,9 ein ausgedehntes Potamal, stellt also einen Tieflandfluss mit den typischen Eigenschaften von geringer Tiefe, feinkörnigem Sediment und unter natürlichen Bedingungen einer ausgeprägten Mäandrierung und Seitenerosion dar. Die Umlagerungen von Sedimenten, welche unterhalb der Havelmündungen in Form von Transportkörpern stattfinden (HENTSCHEL 1998) und die abwechselnden Akkumulationen und Erosionen in Abhängigkeiten von wechselnden Wasserständen bedingen eine hohe Strukturvielfalt und Variabilität der Sohle und der Strömung. Diese Eigenschaften haben z. B. in Bereichen mit durchrissenen Buhnen und erodierten Uferbefestigungen zu einer teilweisen wiedereingesetzten Seitenerosion mit Uferabbrüchen und durch Umlagerungen von Sedimenten zu Sandbänken und temporären Inseln in Buhnenfeldern geführt.

Neben der aktuellen Unterauslastung ist der schlechte Erhaltungszustand vieler Regelbauwerke bis 1989 und in den Jahren danach ein Unterschied zu westdeutschen Wasserstrassen. JÄHRLING (1996) schreibt, dass es aufgrund unterlassener oder nur partiell betriebener Unterhaltung in den Jahren bis 1989 u.a. zu Absenkungen von Buhnen, „Durchreißen“ von Buhnenwurzeln, Überwachsen vorhandener Buhnen, Uferabbrüchen und Sedimentanspülungen kam. Die Reparatur von durchrissenen Buhnen wird kontrovers diskutiert. Befürworter befürchten die Abnahme der Regelungsfähigkeit durch Hinterströmen der durchrissenen Buhnen mit den Folgen von Ufererosion und verringerter Sohlschubspannung im Hauptstrom sowie einer Zunahme des hydraulisch wirksamen Querschnitts. Für die Tauchtiefen, welche während der ausgedehnten Niedrig- und niedrigen Mittelwasserphasen für die Schifffahrt als zu gering gelten, wird eine Abnahme bei gleichzeitig zunehmender Seitenerosion prognostiziert. Umgekehrt bedeuten durchrissene Buhnen gerade aufgrund der kleinräumig begrenzten Erosionstätigkeit der Durchrissströmung eine erhöhte Vielfalt der Morphologie und eine reduzierte Verlandung innerhalb der Buhnenfelder.

Weiterhin stehen in dem durchgängigem Abschnitt der Mittleren Elbe aufgrund fehlender Stauhaltungen Abfluss und Wasserstand noch in direktem Zusammenhang. Allerdings sind viele Nebenflüsse der Elbe, u. a. Havel, Saale, Schwarze Elster, Karthane, Stepenitz, Seege und Elde durch Staustufen, Schöpfwerke, Talsperren und Wehre reguliert, womit oberhalb der Einmündungen Einflüsse auf Abflussregime, Sedimenttransport, Selbstreinigungskapazitäten und die Longitudinalität bestehen sowie Retentionsraum bei Hochwässern verloren geht. Von hoher Bedeutung ist auch der Zusammenhang zwischen Aue und Hauptstrom, einerseits durch ausgedehnte Überflutungsflächen, andererseits durch die noch vorhandenen

temporär oder permanent angebundenen Nebengewässer. Die Überflutungsrinnen in den Auenbereichen deuten auf die ursprünglich raumgreifende und weit verzweigte Stromlandschaft mit Nebengewässern und Altarmen hin.

Dennoch hat sich die Morphologie der Mittelelbe in den letzten Jahrhunderten als Folge wasserbaulicher Maßnahmen weitgehend verändert. Bis Anfang des 19. Jahrhunderts wies die Elbe noch überwiegend naturnahe Strukturen auf (ROHDE 1971), danach kam es durch die oben beschriebenen Eingriffe zu gravierenden Änderungen. So führten Durchstiche von Mäandern und das Abtrennen von Flussbögen im Laufe der Jahrhunderte zu Verkürzungen der Wasserlaufängen. Insgesamt reduzierte sich die Länge des Flussschlauchs in Tschechien um 55 km, und in Deutschland zwischenzeitlich um 60 km. Dies bewirkte in der Folgezeit zunehmende Fließgeschwindigkeiten. Insbesondere der Bau von Deichen schränkte die Überflutungsflächen ein und verursachte Beschleunigungen des Hochwasserablaufs (BFG 2002). Der Stromlauf selber wurde durch Regulierungsbauwerke, insbesondere Bühnen fixiert. ROMMEL (2000) wies allerdings nach, dass sich vor der durchgängigen Bühnenverbauung ab Mitte des 19. Jahrhunderts die 60 km Laufverkürzungen des deutschen Abschnitts wieder auf etwa 20 km verminderten. Dies geschah aufgrund von Uferverformungen, welche die Laufexpansionen und -migrationen verursachten. Insgesamt lassen sich also 2 Fixierungen der Elbe beschreiben. Der Deichbau reduzierte bereits frühzeitig sukzessive die für Veränderungen des Flusslaufes nach Hochwässern zur Verfügung stehende Talbreite von ursprünglich ca. 10 km auf ca. 1 km. Die Flussbaumaßnahmen fixierten schließlich das Mittelwasserbett und unterbanden die Seitenerosionen (FAULHABER 2000).

Auswertungen von historischen Karten durch HARMS et al. (1998) weisen den Verlust von Strominseln und Sandbänken sowie die Abnahme der Anzahl angebundener Nebengewässer und die Flächenreduzierung naturnaher Auenlandschaften für einen ausgewählten Flussabschnitt beispielhaft nach (Tabelle 3-3). Insgesamt kann so ein Rückgang der morphodynamischen Vielfalt und die grundlegende Veränderung der für einen Tieflandfluss typischen Morphologie festgestellt werden.

Weitere Untersuchungen zu historischen und aktuellen Breiten-Tiefenverhältnissen führten NESTMANN und BÜCHELE (2002) durch. Die Ergebnisse verdeutlichen, dass die kleinsten historischen Breiten-Tiefenverhältnisse den größten aktuellen entsprechen, was weiter bedeutet, dass die heutigen ausgebauten Querschnitte den kompaktesten historischen Querschnitten vergleichbar sind. Die Standardabweichung der historischen Breiten-Tiefenverhältnisse wiederum ist vergleichbar der heutigen Situation bei ausufernden Wasserständen,

also Bedingungen bei denen die Niedrigwasserregelungen keinen Einfluss mehr haben. Hervorzuheben ist nach diesen Untersuchungen weiterhin eine hohe Variabilität der historischen Breiten, wie Auswertungen aktueller und historischer Daten für die El-km 470 bis 504 ergaben. Diese Breitenvariabilität wurde durch die wasserbaulichen Eingriffe in der Form so eingeschränkt, dass die hohen Querschnittsbreiten, zumindest für Mittel- und Niedrigwasser, heutzutage nicht mehr vorkommen.

Tab. 3-3: Morphologische Veränderungen von 1776 bis 1992 an der Elbe von El-km 475 – 583 (nach HARMS et al. 1998)

Struktur	1776	1992
Länge des Elbabschnitts	ca. 106 km	108 km
Elbbeite inkl. der Inseln, für 1992 zwischen den Ufern	max. 850 m, Durchschnitt 420 m min. 130 m	max. 550 m, Durchschnitt 340 m, min. 230 m
Breite der Elbe (ohne Inseln) zwischen den Bühnenköpfen	max. 750 m, Durchschnitt 380 m min. 130 m	max. 430 m, Durchschnitt 220 m min. 150 m
Länge des Elbelaufes mit Inseln	32 km	0
Inseln (mit Vegetation/ ohne Vegetation)	55 (30/25)	0
Insel-Fläche (mit Vegetation/ ohne Vegetation)	ca. 5,74 km ² (4,13 km ² /1,70 km ²)	0
Länge der amphibischen Zone um die Inseln	ca. 70 km	0
Regelungsbauwerke	27 Bühnen	ca. 1680 Bühnen
Länge des rechten und linken Ufers mit Bauwerken (% des gesamten Ufers)	5,4 km (2,5%)	198,3 km (91,8%)
Nebengewässer ohne Elbe-Verbindung	62	142
Nebengewässer mit Elbe-Verbindung (Gesamtlänge/Durchschnitt)	40 (52,9 km/ 1,3 km)	28 (23,7 km/ 0,8 km)

3.3 Geschichte des Bühnenbaus und dessen Bedeutung für Morphologie und Abfluss der Elbe

Der Beginn des Bühnenbaus an der Elbe ist nach NEGER (1932) bei Magdeburg bis 1500 zurückzuverfolgen. Vor der Gründung der Elbstromverwaltung 1866 fand im Raum Torgau-Wittenberg ein unplanmäßiger Bau vor allem von Faschinenbühnen statt, die später mit Bruchsteinen abgedeckt wurden. Bei Magdeburg wurden Bühnen zuerst aus eingeschlagenen Pfählen mit Verfüllungen aus Reisig und Lehm hergestellt, später ging man zu einer Bauweise mit Strauchwerk, Sand und Steinschüttung über. Die Elbstrombauverwaltung legte schließlich eine allgemeine Bauweise mit lagenweisen Absenkungen von mit Steinen be-

schwerten Reisig und Packwerk fest, die bis Ende des 19. Jahrhunderts angewendet wurde. Die Krone der Buhne war ca. 1,5 bis 2 m breit und 1:50 bis 1:100 in Längsrichtung geneigt, die Seitenböschungen waren 1:1 geneigt. Der gepflasterte Buhnenkopf war mit einer seitlichen Böschung von 1:2,5 und einer stromseitigen Neigung in Verlängerung der Buhnenachse von 1:4 bis 1:5 wesentlich flacher geneigt. Die neueren Buhnen ab dem 20. Jahrhundert bestanden aus Packwerk und waren unterhalb der Niedrigwasserlinie mit Steinschüttung und oberhalb mit Spreutlage bedeckt. Der Kopf wurde gepflastert, die Pflasterung wurde in Richtung des Ufers auf der Buhnenkrone um 10 m verlängert. Die Neigungen veränderten sich nicht. Bis 1930 wurde diese Bauweise noch einmal modifiziert. Danach wurde die Krone durchgängig bis an das Ufer gepflastert oder mit Steinknack oder Steinschüttung befestigt. Die seitlichen Böschungen wurden mit einer Neigung von 1:3 flacher; die Böschungen am Kopf wurden auf 10 m mit Steinschüttungen oder Pflasterungen versehen. Die flachere Neigung der Seitenböschung dient dem Überschieben von großen Eisschollen auf die Buhne, da bei direktem Zusammenprall mit steileren Böschungen Beschädigungen häufiger auftreten (NEGER 1932). Die Buhnen wurden demnach zunehmend kompakter und mit längerfristiger Haltbarkeit konzipiert.

Neben Bauweisen und Materialverwendung entwickelte sich auch der Kenntnisstand zu hydraulisch relevanten Eigenschaften wie Ausrichtungen, Abständen und Längen der Buhnen weiter. Dazu waren vor allem Untersuchungen der Wechselwirkungen von Buhnen einerseits und Strömungsverhältnissen und Sedimenttransport andererseits notwendig. Erfahrungen wurden durch Naturbeobachtungen, Naturuntersuchungen an Versuchsstrecken in der Elbe zwischen EI-km 423,2 und 435,3 (ROHDE 1971) und Versuchsrinnen in Laboren gesammelt (KREY 1935, LIEBS 1942, ZSCHIESCHE 1954, GLAZIK 2000). Weitere Fragen betrafen die Wahl der Regulierungsbauwerke (Längs- oder Querbauten) in Abhängigkeit von der Lage im Fluss. Vorteile der Querbauten (Buhnen) stellen geringere Kosten, geringerer Raumbedarf und die Möglichkeit bei Bedarf nachträgliche Verlängerungen durchführen zu können dar (NEGER 1932). Längsbauwerke (Parallelwerke) führen andererseits nicht zu den unerwünschten Auskolkungen, wie sie unterhalb von Buhnenköpfen zu finden sind (SCHLEIERMACHER 1955) und werden bei Hochwässern als weniger abflussmindernd beurteilt (SÖHNGEN 2000).

Die Untersuchungen klärten auch die Strömungsverhältnisse in Buhnenfeldern. Bei nicht überströmten Buhnen befinden sich im zentralen Bereich des Buhnenfeldes eine Feldwalze mit senkrechter Achse und in den beiden Ecken kleinere Eck- oder Sekundärwalzen (vgl. Abb. 2-1). Die Einströmung (Scherzone) verläuft in einer Abweichung von 6° (WINKEL 1927) bis 13° (RITZERT 2001) zu der Hauptströmung unterhalb der direkten Verbindungslinie der

Buhnenköpfe aus feldeinwärts. Die Wassermassen strömen an dem stromaufgelegenen Buhnenkopf aus dem Buhnenfeld und es entstehen Walzen und Wirbel unterhalb des Buhnenkopfes. Die Energieumwandlung zwischen der Strömung des Flusses und der zentralen Buhnenfeldwalze führt zusammen mit den Verwirbelungen zur Kolkbildung. Eine stärkere Auskolkung kann dabei durch eine geringere Neigung des Buhnenkopfes vermieden werden, da die Steilheit sowohl die Tiefe des Kolkes als auch die Nähe zum Buhnenkopf fördert. Aus diesem Grunde erfolgt unterstrom vom Buhnenkopf eine Befestigung der Sohle mit Sinkstücken oder Schüttung. Das im Kolk erodierte Geschiebe wird weiter unterstrom, oftmals im Zentrum des gleichen Buhnenfeldes oder zwischen den Buhnenköpfen unterhalb des Kolkes wieder abgelagert (NEGER 1932). Bei überströmten Buhnen bildet sich stromab von der Buhne eine Walze mit horizontaler Achse. Eine flache Neigung der Seitenböschungen der Buhnen vermindert neben Zerstörungen durch Eisgang und der Kolkbildung zusätzlich auch größere Erosionen durch die Walze stromab der Buhne. Auf der Buhne nehmen die Fließgeschwindigkeiten bei Überströmung aufgrund der Querschnittsverengung erheblich zu (NEGER 1932).

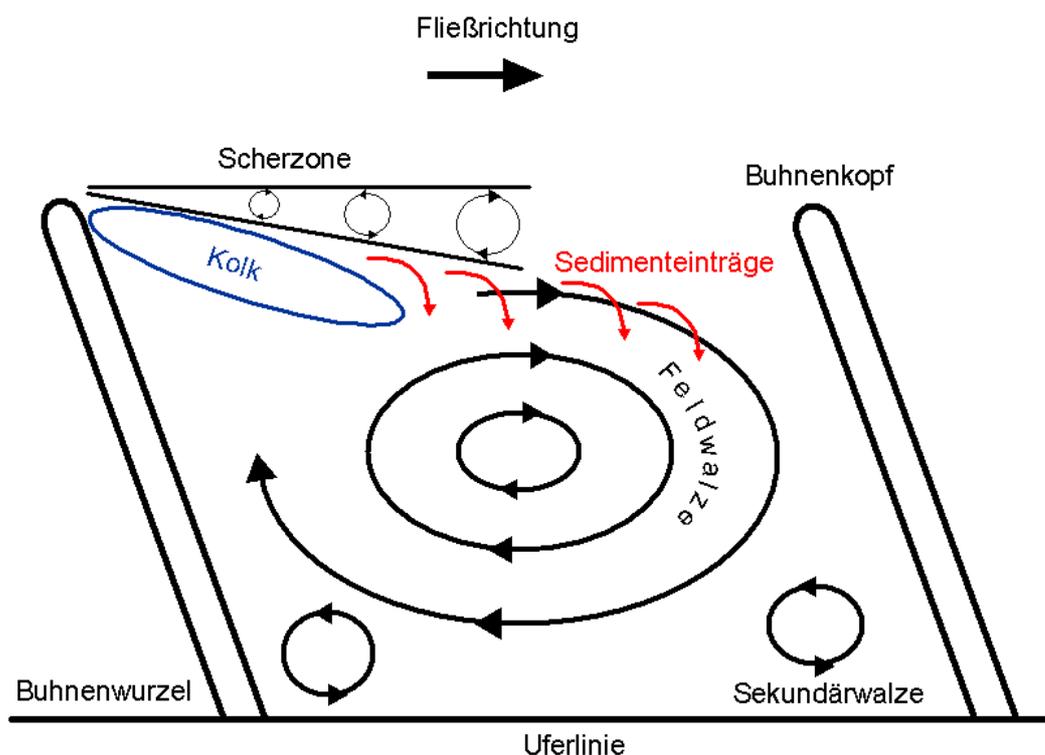


Abb. 3-14: Schema der Strömungsverhältnisse sowie von Erosion und Sedimentation in einem Buhnenfeld bei nicht überströmten Buhnen

Die Neigung der Längsachse der Buhne in Richtung des Hauptstroms verhindert das Hinterströmen und bei Sackungen das Entstehen von Überflusstellen, welche Initialstellen für

weitere, vergrößerte Durchrisse bilden würden. Aus wasserbaulicher Sicht ist dies unerwünscht, da die Mengen des durch Durchrisse strömenden Wassers im Hauptstrom fehlt und sich die Sohlschubspannung dadurch verringert. Für die Lage der Buhnen beider Ufer zueinander ist vorgesehen, dass sich die Verlängerungen der Buhnen in der Stromachse treffen. Bei Differenzen von dieser Lage von mehr als 15 m kann es zu Schlängelungen des Talweges kommen.

NEGER (1932) empfiehlt den Abstand der Buhnen entlang eines Ufers so zu wählen, dass die Walze des Buhnenfeldes in der Mitte der stromaufliegenden Buhne auftrifft, womit sich je nach Lage an Prall- oder Gleithang ein Abstand von $1,25$ bis $4,5 \cdot$ der Buhnenlänge ergibt. Neuere Arbeiten von SPANNRING (1999) und RITZERT (2001) weisen daraufhin, dass die obere Grenze dieses Abstandes zu groß ist zum Erreichen stabiler Strömungsverhältnisse. RITZERT ersetzte den Winkel von 6° der Einströmung (nach WINKEL 1927), welcher dieser Abstandsempfehlung zugrunde lag, durch einen mit der Formel von Abramovich zur Berechnung von Strahlablösungen in Labyrinthströmungen ermittelten Winkel von 13° und erhielt einen theoretisch ermittelten Buhnenabstand von $2,22 \cdot$ der Länge der Buhnen. Diese Angaben passen zu Ergebnissen aus Modellversuchen, die FELKEL (1975) in Versuchsrinnen der Bundesanstalt für Wasserbau (BAW) durchführte. Danach ergeben sich bei einem Verhältnis von Buhnenabstand zu Buhnenlänge von $> 3:1$ nach FELKEL (1975) für die Schifffahrt nachteilige instationäre Wirbelbildungen. Weiterhin kommt es auch in diesen Fällen zu den unerwünschten Schlängelungen des Talweges, welche bei geringeren Abständen nicht auftreten. In der Praxis werden in Flussbiegungen die Buhnen am Prallhang aufgrund größerer Belastungen enger gelegt, am kürzeren Gleithang werden dann teilweise Buhnen ausgelassen um keinen Versatz der ansonsten nicht mehr gegenüberliegenden Buhnen zu erzielen (NEGER 1932).

Einen weiteren Aspekt bei Planung und Bau von Regulierungsbauwerken stellt der Hochwasserschutz dar. SÖHNGEN (2000) untersuchte an der BAW mittels des Programmsystems COMET die nachteilig eingeschätzte Abflussminderung für Varianten mit unterschiedlichen Kombinationen von Buhnenabständen (125 m) und -längen (100 m) in einem generalisierten numerischen Flussmodell von 200 m Breite und Wassertiefen bis 9 m. Weiterhin wurden der Verlandungsgrad der Buhnenfelder (un-, teil- und vollverlandet) und die Buhnenhöhen (1,5 m und 3 m) variiert und ein Leitwerk zum Vergleich herangezogen. Das Ergebnis war der Grad der Abflussminderung, der sich unter den unterschiedlich modellierten Bedingungen einstellt und für Hochwassersituationen als nachteilig gilt. Für vollverlandete Buhnenfelder lag das errechnete Abflussvermögen für Wassertiefen von 9 m, vermutlich aufgrund der reduzierten Rauigkeit um bis zu 5 % höher als für teilverlandete

und um 8 % höher als für unverlandete Bühnenfelder. Die niedrigeren 1,5 m hohen Bühnen erhöhten den Abfluss um bis zu 30 % gegenüber den 3 m hohen Bühnen, weshalb die Bühnenhöhen in der Praxis als so gering wie nötig gewählt werden, ohne die Regelungsfähigkeit bei Mittelwasser zu beeinträchtigen. Halbierte Bühnenabstände ergaben Abnahmen des Abflusses von 10 % und verdoppelte Abstände Zunahmen des Abflusses von 5 %. Der Vergleich von Abflusssituationen mit Bühnen und Parallelwerken ergab für praxisrelevante Bühnenabstände von 125 m und Queranschlussabständen von 500 m für das Parallelwerk eine 20 % geringere Abflussleistung, weshalb Bühnen für Hochwasserereignisse als ungünstiger eingestuft werden.

Die Ausrichtung der Bühnen zum Stromstrich liegt an der Elbe, abgesehen von Sonderbauweisen, welche noch ausführlich behandelt werden, in der Regel bei 70° bis 72°, d.h. in stromauf gelegener Richtung (inklinante Ausrichtung, vgl. Abb. 2-3 und 3-14). Zu Beginn des 19. Jahrhunderts herrschte noch die deklinante Ausrichtung vor, also eine Neigung in gleicher Richtung wie die Strömung (stromab, vgl. Abb. 2-4). Diese Bauweise bewährte sich nicht und von 1830 an wurden nur noch inklinante Bühnen errichtet, da so eine stärkere gewünschte Verlandung auftrat und das Ablenken der Strömung vom Ufer in Richtung des Hauptstroms bei Hochwasser die Ufer und die Bühnen selber schützte (NEGER 1932).

Die Regelungsziele von Bühnen waren in der Vergangenheit unterschiedlich, konzentrieren sich aber seit einer geplanten Vorgehensweise des Bühnenbaus Mitte des 19. Jahrhunderts auf die Schaffung ausreichender Tiefen für die Schifffahrt. Die Querschnittsverengungen und die zunehmenden Verlandungen erhöhen die Sohlschubspannung und Erosion in der Fahrinne sowie die Wasserspiegellage. Die Anhebung der Wasserspiegellage ist Folge einer Reduzierung der auf den gesamten Querschnitt bezogenen mittleren Fließgeschwindigkeit. Dies wird durch den Energieverlust bedingt, der als Folge der Wirbelbildung in den Bühnenfeldern auftritt (RITZERT 2001). RITZERT entwickelte im Rahmen seiner Dissertation ein Computerprogramm (BuSim) zur Quantifizierung der Auswirkungen dieses Energieverlustes auf die Fließgeschwindigkeit und die Wasserspiegellage. Am Beispiel der Rheinstrecke bei Iffezheim wurden für den Vergleich Varianten mit und ohne Bühnen berechnet. Es ergaben sich durch den Einfluss der Bühnen eine Zunahme der Wasserspiegellage von ca. 10 cm und für die Fließgeschwindigkeit eine Abnahme von ca. $0,08 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ bei absoluten Geschwindigkeiten von $1,60 - 1,80 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$.

Für Wasserstände mit nicht überströmten Bühnen steht der Abnahme der auf den gesamten Querschnitt bezogenen mittleren Fließgeschwindigkeit eine Zunahme der lediglich auf den Hauptstrom bezogenen Fließgeschwindigkeit gegenüber. Weiterhin treten gravierende

Unterschiede zwischen deutlich geringeren mittleren Geschwindigkeiten in den Bühnenfeldern und höheren Geschwindigkeiten im Hauptstrom auf, die sich ungefähr um den Faktor 3 – 4 unterscheiden, wie eigene Messungen ergaben. Es besteht also bezüglich des Abflusses ein höheres Ungleichgewicht zwischen den ufernahen Bereichen und dem Hauptstrom als im unregulierten Zustand. Dies bedeutet für die Flächen zwischen den Bühnen eine zunehmende Verlandung, da es kontinuierlich zu Umlagerungen von Geschiebe und zu Eindrift und Absetzen von Schwebfracht in die Bühnenfelder kommt (Abb. 3-14). In der freien Fließstrecke hingegen werden wegen der deshalb reduzierten geringeren Transportfrachten zusätzliche Energien freigesetzt, die im Zusammenhang mit den größeren Fließgeschwindigkeiten die Sohlerosionen verursachen.

Die Verlandungen waren durchaus geplant und erwünscht, da sie zusätzlichen Uferschutz und Schutz für die Bühnen bedeuten, die Wirkung der Bühnen verstärken können und der Sedimenteintrag als Rohstoff gewonnen werden kann. NEGER (1932) weist allerdings daraufhin, dass eine vollständige Verlandung der Bühnenfelder Nachteile für die Strömungsregulierung bedeuten, da dann aufgrund der nicht mehr auftretenden Rückströmungen dem Fluss keine weitere Energie entzogen wird. Der Verlandungsprozess unterliegt in den unterschiedlichen Bühnenfeldern ähnlichen Randbedingungen, kann aber bei unterschiedlichen Lagen oder Bühnenanströmungen zu unterschiedlichen Akkumulationsformen führen. NESTMANN und BÜCHELE (2002) werteten dazu Luftbilder und Schifffahrtskarten aus und korrelierten die morphologischen Parameter, insbesondere die Ausdehnung vegetationsfreier Flächen, mit Bühnenabständen, Art des Verbaus und Lage (Prallhang, Gleithang). Generell ist eine einfache Zuordnung von Verlandungsformen zu den vielfältigen Einflussfaktoren nicht möglich. Es ergaben sich im Wesentlichen Aussagen die auch für unverbaute Flussabschnitte gelten. So treten in Gleithangbereichen aufgrund verstärkter Akkumulationen flachere Neigungen und größere vegetationsfreie Flächen auf. Eine der ersten Beschreibungen der Verlandungsprozesse zu unterschiedlichen Wasserständen erfolgte durch ENGELS (1904). Ablagerungen sind teilweise auch anthropogen verursacht, da Material, welches bei Baggerungen der Flusssohle entnommen wird, hier verbracht wird. Der Ufer- und Deichschutz werden durch die Reduzierung der ufernahen Strömungen gefördert und Entstehen von Eisversatz aufgrund höherer Fließgeschwindigkeiten und größerer Tiefen im Hauptstrom erschwert. Die BFG (2002) weist allerdings auf die nachzuweisende Hochwasserneutralität von Sohl- und Ufersicherungen bei neuen Maßnahmen hin. Zu den durchzuführenden Unterhaltungsmaßnahmen zählt auch die Bewuchsbeseitigung um die Wandrauheiten zu senken, so dass höhere Fließgeschwindigkeiten erhalten bleiben und keine Staueffekte eintreten.

Folgende Bühnenwirkungen lassen sich zusammenfassen:

- Reduktion des Flussquerschnitts und Erhöhung der Rauigkeit in Uferbereichen.
- Erhöhung der Wasserspiegellage durch Minderung der auf den gesamten Querschnitt bezogenen Fließgeschwindigkeit.
- Veränderung der Verteilung von Fließgeschwindigkeiten im Querschnitt des Flusses. Erhöhte Fließgeschwindigkeiten im Hauptstrom bei stark reduzierten Geschwindigkeiten in den verbauten Uferbereichen (Bühnenfeldern).
- Zunahme der Sohlschubspannungen und erhöhte Transportleistungen im Hauptstrom bei gleichzeitig stattfindenden Auflandungen in den Bühnenfeldern
- Eintiefung der Flusssohle und Zunahme der Wassertiefe im Hauptstrom
- Lagekonstanz durch Stabilisierung und Fixierung des Flusslaufs. Verminderung von Seitenerosionen
- Erhöhte vertikale Wasserstandsschwankungen im Jahresverlauf aufgrund des verringerten Flussquerschnitts

Für die Beschreibung des Erhaltungszustandes der Bühnen vor dem Augusthochwasser 2002 im Abschnitt des Wasser- und Schifffahrtsamtes Magdeburg (EI-km 290,7 bis 502,2) wurden mündliche Angaben von Mitarbeitern des Wasser- und Schifffahrtsamtes herangezogen. Im gesamten Abschnitt existieren 2967 Bühnen, von denen 838 (28%) als defekt gelten und 1117 seit 1995 repariert wurden. Die defekten Bühnen werden in 5 Schadensklassen eingeteilt. Die Schadensklassen 0 und 1 bedeuten keine oder nur geringe Schäden, die Schadensklasse 2 kennzeichnet größere Schäden, z.B. am Kopf der Bühne, in der Schadensklasse 3 ist die hydraulische Funktion der Bühne beeinträchtigt (z.B. bei Durchrissen) und in der Schadensklasse 4 ist die hydraulische Funktion nicht mehr vorhanden. Von den 838 defekten Bühnen werden 624 (74,5%) in die Schadensklasse 2, 164 (19,5 %) in die Schadensklasse 3 und 50 (6%) in die vierte Schadensklasse eingeordnet. Für 20 Bühnen der vierten Schadensklasse ist eine Reparatur nicht mehr vorgesehen. Dabei handelt es sich vorwiegend um Bühnen in stark verlandeten Bereichen ohne große hydraulische Bedeutung. Insgesamt ist bezogen auf alle Schadensklassen für ca. 10 Prozent der defekten Bühnen keine Instandsetzung mehr vorgesehen. Die meisten defekten Bühnen befinden sich zwischen EL-km 422,8 bis 502,2 im untersten Bezirk Wittenberge des Abschnitts des WSA Magdeburg. Von den hier insgesamt 1245 Bühnen gelten 535 (43%) als reparaturbedürftig. Das Augusthochwasser 2002 wird hinsichtlich neuerer Schäden an Bühnen der Mittleren Elbe als eher unbedeutend eingestuft, eine klärende Begutachtung der Bühnen konnte bis März 2003 aufgrund hoher Wasserstände nicht erfolgen. Im Durchschnitt beträgt die Halbwertszeit für gepflasterte Bühnen ca. 50 Jahre und für geschüttete Bühnen ca. 30 Jahre.