KLIWAS
Klima · Wasser · Schifffahrt

KLIWAS Schriftenreihe
KLIWAS-67/2014

Sedimenttransport und Flussbettentwicklung der Binnenelbe

Koblenz, im November 2014

bfg Bundesanstalt für Gewässerkunde

KLIWAS

KLIWAS Schriftenreihe
KLIWAS-67/2014

Sedimenttransport und Flussbettentwicklung der Binnenelbe

Autoren:
Stefan Vollmer
Doreen Grätz
Sönke Schriever
Klaudia Krötz
Frauke König
Christian Svenson
Markus Promny
Norbert Busch
Marcus Hatz

SAP-Nr.:
M39610305402

DOI:
10.5675/Kliwas_67/2014_Binnenelbe

Seite Kapitel

Inhaltsverzeichnis

03		ABBILDUNGSVERZEICHNIS
06		TABELLENVERZEICHNIS
07	1	EINFÜHRUNG
08	2	BESCHREIBUNG DES FLUSSGEBIETES
11	3	DATENQUELLEN UND MESSVERFAHREN
11	3.1	WASSERSPIEGELFIXIERUNGEN
12	3.1.1	METHODIK
18	3.1.2	DATENLAGE
21	3.1.3	ERGEBNISSE
26	3.2	ERFASSUNG UND AUSWERTUNG DER SOHLHÖHENÄNDERUNGEN
26	3.2.1	METHODIK
29	3.2.2	DATENLAGE
31	3.2.3	ERGEBNISSE
32	3.3	TRANSPORTMESSUNGEN
32	3.3.1	METHODIK
34	3.3.2	DATENLAGE
35	3.3.3	ERGEBNISSE
38	3.4	KORNGRÖßEN DER DECKSCHICHT
38	3.4.1	METHODIK
39	3.4.2	DATENLAGE
39	3.4.3	ERGEBNISSE
41	3.5	KORNGRÖßEN DES UNTERGRUNDES
41	3.5.1	METHODIK
41	3.5.2	DATENLAGE
41	3.5.3	ERGEBNISSE

Seite Kapitel

Inhaltsverzeichnis

44	3.6	POROSITÄT
45	3.6.1	METHODIK
50	3.6.2	ERGEBNISSE
53	4	UNSICHERHEITEN
63	5	SOHLNAHER SEDIMENTTRANSPORT
63	5.1	EINTRAG AUS NEBENFLÜSSEN
64	5.2	EINTRAG IN DIE TIDEELBE/BILANZIERUNG IM STAURAUM GEESTHACHT
67	5.3	GESCHIEBEBEWIRTSCHAFTUNG
69	5.4	FRACHTLÄNGSSCHNITTE
73	6	SEDIMENTBILANZIERUNG
80	7	SCHWEBSTOFFHAUSHALT
86	8	ZUSAMMENFASSENDE DARSTELLUNG UND IMPLIKATIONEN
95		LITERATURVERZEICHNIS

Seite Abbildung

Abbildungsverzeichnis

Seite	Abbildung	
09	1	KARTE DER ELBE UND IHRER NEBENFLÜSSE MIT WICHTIGEN MESSSTELLEN
13	2	WASSERSTANDSÄNDERUNGEN AN DEN PEGELN MAXAU/RHEIN UND WORMS/RHEIN BEI EINEM ABFLUSS IM BEREICH (GERINGFÜGIG OBERHALB) DES MNQ
16	3	STATIONSBEZOGENE ANALYSE VON WASSERSPIEGELFIXIERUNGEN FÜR ELBE-KM 199
17	4	CHRONOLOGISCHE WASSERSTANDSÄNDERUNGEN BEI ELBE-KM 199 ALS EINZELWERTE UND GEMITTELT FÜR AUSWERTEZEITRÄUME UND DEN ABFLUSSBEREICH "UM MNQ"
19	5	UNTERSUCHUNGSSTRECKE ZWISCHEN TORGAU UND AKEN AN DER MITTLEREN ELBE
23	6	SOHLHÖHEN- UND WASSERSTANDSÄNDERUNGEN BEI NIEDRIGWASSER AN DER MITTLEREN ELBE ZWISCHEN TORGAU UND AKEN
24	7	MITTLERE SOHLHÖHENÄNDERUNG UND WASSERSPIEGELLAGEN-ENTWICKLUNGEN [IN CM/A] DER ELBE ZWISCHEN 1898 UND 2004 (QUICK ET AL. 2012)
27	8	MORPHOLOGISCHE BREITE DER BINNENELBE IN [M]
28	9	VERWENDETE QUERPROFILDATENGRUNDLAGE DES JAHRES 1993 (EPOCHE 1996)
29	10	PLAUSIBILISIERUNG DES ERZEUGTEN GELÄNDEMODELLS AUS ECHOLOT-AUFNAHMEN
31	11	SOHLDIFFERENZEN VERSCHIEDENER ELBEPEILUNGEN ZUM BEZUGSZEITRAUM 2004 IN ABSOLUTER HÖHENÄNDERUNG [M] SOWIE RELATIV JE JAHR [CM/A]
33	12	ENTNAHME EINER GESCHIEBEPROBE AUS DEM GESCHIEBEFÄNGER AM 5.11.2009 AN DER MESS-STELLE VOCKERODE
34	13	ENTNAHMEGERÄT FÜR DIE SCHWEBSTOFFPROBE (OBERER BILDRAND, UNTER WASSER) UND FILTRIERUNG DES SUSPENDIERTEN SANDANTEILS (VORN) AM 5.11.2009 AN DER MESSSTELLE VOCKERODE
36	14	MESSERGEBNIS DER GESCHIEBE- UND SUSPENDIERTEN SANDMESSUNG AM 25.11.2008 BEI MOCKRITZ
40	15	MITTLERE KORNDURCHMESSER DER DECKSCHICHT DER SOHLE 1993, 1996/1997 UND 2006
40	16	FOTOGRAFISCHE AUFNAHMEN DER SOHLE 1993 AM ELBE-KM 35,0 (LINKS) UND 2006 AM ELBE-KM 35,4 (RECHTS)
42	17	MITTLERE KORNZUSAMMENSETZUNG DER SOHLE DER KAMPAGNE 2006 IN DEN TIEFENSCHICHTEN 0-0,1 M UND 0,1-0,3 M

Seite Abbildung

Abbildungsverzeichnis

Seite	Abbildung	
43	18	MITTLERE KORNDURCHMESSER UNTERSCHIEDLICHER TIEFENSCHICHTEN DER GEFRIERKERNPROBEN AUS DEM JAHR 2007
44	19	GEFRIERKERNPROBE BEI ELBE-KM 202,0 AUS DEM JAHR 2007
47	20	TAUCHERGLOCKENSCHIFF CARL STRAAT (RM FRINGS)
48	21	3D STREIFENPROJEKTIONSSCANNER (OBEN) UND METALLRAHMEN MIT QUADRATISCHER KUNSTSTOFFBASIS ZUR POROSITÄTSMESSUNG IM TAUCHERGLOCKENSCHIFF (UNTEN) (RM FRINGS)
48	22	BEISPIEL EINES MESSLOCHS ZUR BESTIMMUNG DER POROSITÄT. DARGESTELLT IST DIE HÄLFTE DES LOCHS
49	23	SCHEMATISCHER AUFBAU DES ARBEITSABLAUFS ZUR AUSWERTUNG DER SOHLSCANS EINER SEITE: 1 MIT DEM STREIFENPROJEKTIONSSCANNER AUFGENOMMENE PUNKTDATEN, 2 UMWANDLUNG DER PUNKTDATEN IN RASTER, 3 ÜBERLAGERUNG DER NO DATA-WERTE IM HOCHAUFGELÖSTEN RASTER MIT DEN WERTEN AUS DEM NIEDRIG AUFGELÖSTEN, 4 AUSWERTUNG IN FORM EINER TABELLE
52	24	ERMITTLUNG DER SEDIMENTDICHTE
52	25	BERECHNUNG DER POROSITÄT DER ELBE
55	26	UNSICHERHEITEN BEI ANWENDUNG DER AKTUELL GÜLTIGEN ABFLUSSKURVE
64	27	IM RAHMEN VON VERKEHRSSICHERUNGSPEILUNGEN ERFASSTE FLÄCHE OBERHALB DES WEHRES GEESTHACHT IM BEREICH VON FLUSSKILOMETER 580-584
65	28	MITTLERE EROSION (NEGATIV/ROT) UND MITTLERE AKKUMULATION (POSITIV/BLAU) IN [CM/A] BERECHNET FÜR PEILDATEN DES WSA LAUENBURG (GRÜN: JAHRESHAUPTPEILUNGEN, BLAU: HW-PEILUNG) IM ELBEABSCHNITT VON KM 575 - KM 607 IM ZEITRAUM 2008-2013, BAGGERMAßNAHMEZEITRÄUME IN SCHWARZ, BLAUE KURVE ILLUSTRIERT DIE ABFLUSSGANGLINIE FÜR DEN BETRACHTETEN ZEITRAUM
68	29	UMLAGERUNGEN AUS DER GESCHIEBEBEWIRTSCHAFTUNG [T/A] UND RESULTIERENDE RECHNERISCHE SOHLHÖHENENTWICKLUNG [CM/A] SOWIE DIE ZUGABENMENGEN IM BERICHT PG EROSIONS-STRECKE (2010)
69	30	ENTWICKLUNG DER GESCHIEBEZUGABE IN DER MITTLEREN ELBE (FARBLICH IST NACH DEN QUELLEN DES ZUGABEMATERIALS UNTERSCHIEDEN; VORLÄUFIGE GRÖßENORDNUNG BUHNENFELDBERÄUMUNG)
70	31	LÄNGSSCHNITT DER SUSPENDIERTEN SANDFRACHT DER ZEITRÄUME 1996 BIS 2008, 2000 BIS 2008 UND 2004 BIS 2008 IM VERGLEICH ZUM LÄNGSSCHNITT AUS DEM BERICHT BFG, 2004
71	32	LÄNGSSCHNITT DER GESCHIEBEFRACHT DER BILANZIERUNGSZEITRÄUME 1996 BIS 2008, 2000 BIS 2008 UND 2004 BIS 2008 IM VERGLEICH ZUM LÄNGSSCHNITT AUS DEM BERICHT BFG, 2004

Seite Abbildung

Abbildungsverzeichnis

Seite	Abbildung	
71	33	LÄNGSSCHNITT DER SUSPENDIERTEN SANDFRACHT DER ZEITRÄUME 1996 BIS 2008 UND 2000 BIS 2008 SOWIE DIE JEWEILIGEN ANTEILE „BETTBILDEND“ UND SPÜLFRACHT
72	34	MITTLERE JÄHRLICHE SEDIMENTFRACHT DER UNTER- UND MITTELELBE FÜR 2 ZEITRÄUME
75	35	VERGLEICH DER BILANZIERUNG AUS SOHLHÖHENENTWICKLUNG UND FESTSTOFFTRANS-PORTMESSUNGEN FÜR DEN ZEITRAUM 1996 BIS 2008
78	36	SCHEMASKIZZE FLIEßQUERSCHNITT
79	37	VERGLEICH DER BILANZIERUNG AUS SOHLHÖHENENTWICKLUNG UND FESTSTOFFTRANSPORTMESSUNGEN FÜR DEN ZEITRAUM 1996 BIS 2008 SOWIE KONTROLLRECHNUNG ÜBER WASSERSPIEGELÄNDERUNGEN IM GLEICHEN ZEITRAUM
81	38	ÜBERSICHTSKARTE ÜBER DIE STATIONEN DES SCHWEBSTOFFMESSNETZES DER WSV
82	39	AUSSCHNITT DER DEUTSCHEN BINNENELBE MIT MARKIERUNGEN FÜR SCHWEBSTOFFMESSSTATIONEN
84	40	LÄNGSSSCHNITT DER SCHWEBSTOFFFRACHTEN [IN T/A] FÜR DIE DT. BINNENELBE. ZUM VERGLEICH DIE MITTLERE ABFLUSSFÜHRUNG [IN M^3/S] AUF DER SEKUNDÄRACHSE AUFGETRAGEN
84	41	LÄNGSSCHNITT DER SCHWEBSTOFFKONZENTRATIONEN [IN MG/L] FÜR DIE DT. BINNENELBE
87	42	VERGLEICH DER AUF BASIS VON SOHLPEILUNGEN (1993/99 – 2004/2010) ERMITTELTEN SOHL-EINTIEFUNG MIT DEM ANTEIL DER GLW-ANPASSUNG ZWISCHEN GLW1989/98 UND GLW2010, WELCHER AUF SOHLÄNDERUNGEN BASIERT
88	43	FRACHTENLÄNGSSCHNITT DER AN DER BETTBILDUNG BETEILIGTEN FRAKTIONEN KIES UND SAND. FRACHTERMITTLUNG FÜR DEN ZEITRAUM 1996-2008 ALS JAHRESMITTELWERTE IN [T]
90	44	VERGLEICH DER SOHLHÖHENDIFFERENZ AUF GRUNDLAGE DER PEILUNGEN ZWISCHEN 1995 UND 2010 MIT DER WASSERSPIEGEL-ABSENKUNG 2008 GEGENÜBER 1996 IN [M]. KM 150-280
91	45	VERGLEICH DER SOHLHÖHEN- UND WASSERSPIEGELDIFFERENZ ZWISCHEN 1898 UND 2004
93	46	ENTWICKLUNG DER GESCHIEBEZUGABE IN DER MITTLEREN ELBE (FARBLICH IST NACH DEN QUELLEN DES ZUGABEMATERIALS UNTERSCHIEDEN; VORLÄUFIGE GRÖßENORDNUNG BUHNENFELDBERÄUMUNG; GEGENÜBERGESTELLTE GRÖßENORDNUNG DES SEDIMENTDEFIZITES)

Tabellenverzeichnis

Seite	Tabelle	
09	1	ABSCHNITTE DER DEUTSCHEN ELBE
20	2	HAUPTWERTE DES ABFLUSSES FÜR DIE PEGEL AN DER MITTLEREN ELBE
21	3	VERWENDETE FIXIERUNGEN IN DER ANALYSE DER ENTWICKLUNG DER WASSERSPIEGELLAGEN
22	4	VERWENDETE DATENSÄTZE ZUR ZEITLICHEN ANALYSE VON WASSERSPIEGELFIXIERUNGEN
30	5	VERWENDETE PEILDATEN
35	6	ÜBERSICHT DER ANZAHL DER MESSUNGEN AN DEN TRANSPORTMESS-STELLEN ENTLANG DER ELBE. GRÜN HINTERLEGT SIND DIE MESSSTELLEN UND –ZEITRÄUME, WELCHE DIE DEFINIERTEN ZUVERLÄSSIGKEITSKRITERIEN ERFÜLLEN
56	7	UNSICHERHEITEN BEI DER ANALYSE VON WASSERSPIEGELFIXIERUNGEN
83	8	SCHWEBSTOFFFRACHT, -KONZENTRATION UND ABFLUSS DER JAHRE 2003 BIS 2008

1 Einführung

Der vorliegende Bericht fasst den aktuellen Kenntnisstand der Bundesanstalt für Gewässerkunde bezüglich des Sedimenttransports und der Flussbettentwicklung der Elbe zusammen. Grundlage sind die durch die Wasser- und Schifffahrtsverwaltung erfassten Messdaten der Wasserspiegel- und Sohllagen, des Geschiebe- und Schwebstofftransports sowie der Sohlkorndurchmesser.
Die letzte umfassende Beschreibung von Sedimenttransport und Flussbettentwicklung der Elbe erfolgte durch Vollmer und Schriever (BFG, 2004). Im vorliegenden Bericht werden die zugrundeliegenden Beobachtungsdaten um den Zeitraum bis 2010 erweitert.
Eine Erweiterung stellen auch die gewachsenen methodischen Ansätze dar. Insbesondere die systematische Auswertung der Veränderungen der Wasserspiegellage und die überprüfenden Vergleiche zwischen Sohlhöhenänderung, Wasserspiegeländerung und sohlnahen Frachten in übereinstimmenden Untersuchungszeiträumen ist zu einer stichhaltigen Gesamtbilanzierung gereift, die es erlaubt die Zunahme der Frachten im Längsverlauf und das Ausmaß des Erosionsregimes in der Mittelelbe abgesichert einzuschätzen. Diese Bilanzierung der bewegten Sedimente in der Elbe umfasst mittlerweile alle als Quellen und Senken für Sedimente relevanten Kompartimente (wie z. B. Zugaben, Baggerungen, Umlagerungen, Abrieb, Nebenflusseinträge, Vorlandsedimentation).
Weiterhin wurde die Ermittlung der Porosität und Sedimentdichte an der Gewässersohle durch gezielte Untersuchungen erheblich verbessert, so dass die Umrechnung von Frachten in Sohlhöhenänderungen und umgekehrt präzisiert wurde. Dieser Bericht gibt Auskunft über die Flussbettentwicklung sowohl des aktuellen Zeitraumes (der letzten zwei Jahrzehnte) als auch für einen rund 100-jährigen Zeitraum auf Basis historischer Daten bzw. Auswertungen des Elbstromwerkes.
Somit bildet der Bericht eine wichtige Grundlage u.a. für die Untersuchungen im Rahmen der Klimafolgenforschung. Hier werden als Basis für die Betrachtungen der Projektionszeiträume, wie sie im KLIWAS-Forschungsverbund festgelegt wurden (bis 2100), die morphologischen Referenzzeiträume beschrieben. Mit diesem Bericht stehen zum Vergleich mit den Projektionen nun der aktuelle Zeitraum (Ist) sowie die historische Entwicklung (100-jähriger Zeitraum) zur Verfügung.

2 Beschreibung des Flussgebietes

Das Quellgebiet der Elbe liegt im Riesengebirge (1384 m ü. N.N). Bis zu ihrer Mündung in die Nordsee bei Cuxhaven legt die Elbe einen Weg von 1091 km zurück. Das 148 268 km² große Einzugsgebiet der Elbe hat Anteile an der Bundesrepublik Deutschland (96 932 km²), an der Tschechischen Republik (50 176 km²), an Österreich (920 km²) und an der Republik Polen (240 km²). Die Fließgewässerkilometrierung erfolgt in Tschechien von der Grenze bis zur Quelle und in Deutschland in entgegengesetzter Richtung von der Grenze (Elbe-km 0) bis zur Mündung. Es werden mit Oberer, Mittlerer und Unterer Elbe drei Abschnitte unterteilt. In Abb. 1 ist eine Übersicht der Elbe und der wichtigsten Nebenflüsse gegeben. Tab. 1 listet die drei Hauptabschnitte mit der jeweiligen Kilometrierung auf (BFG, 2004).

Das Einzugsgebiet der Elbe liegt im Übergangsbereich zwischen dem maritim geprägten Klima Westeuropas und dem kontinentaleren Klima Osteuropas. Höhere Durchflüsse treten durch die Kombination von Niederschlagsereignissen und Schneeschmelze in den Mittelgebirgslagen vornehmlich im Winter und im Frühjahr auf. Winterliche Hochwasserwellen werden durch die zyklonale Tätigkeit und sommerliche Hochwasserwellen, wie das Hochwasser 2002, durch Tiefdruckgebiete, die feuchtwarme Luft aus dem Mittelmeerraum nach Norden transportieren (Vb Wetterlagen), ausgelöst. Aus Gründen des Hochwasserschutzes, der Trink- und Brauchwasserversorgung, der Fischzucht und der Energieerzeugung wurden ab dem Ausgang des 19. Jahrhunderts und vor allem in der 2. Hälfte des 20. Jahrhunderts im Elbe-Einzugsgebiet 265 Talsperren und Rückhaltebecken mit einem Stauraum von 3,95 Mrd. m³ errichtet. Diese führen nach Berechnungen der WSD Ost nicht nur zu einer deutlichen Verringerung der Abflussspitzen in Dresden um 230 m³/s (HQ2) bis 430 m³/s (HQ20) und am Pegel Barby um 630 m³/s (HQ5) bis 480 m³/s (HQ50), sondern beeinflussen auch die Feststoffführung der Gewässer. Eine weitere Modifikation der Abfluss- und Transportverhältnisse wird durch die derzeit 24 Staustufen zwischen Pardubice (Labe-km 240,04) und Usti n.L. (Labe-km 40,4) verursacht. An der deutsch-tschechischen Grenze beträgt der langjährige mittlere Abfluss der Elbe 314 m³/s und an ihrer Mündung in die Nordsee 877 m³/s (BFG, 2004).

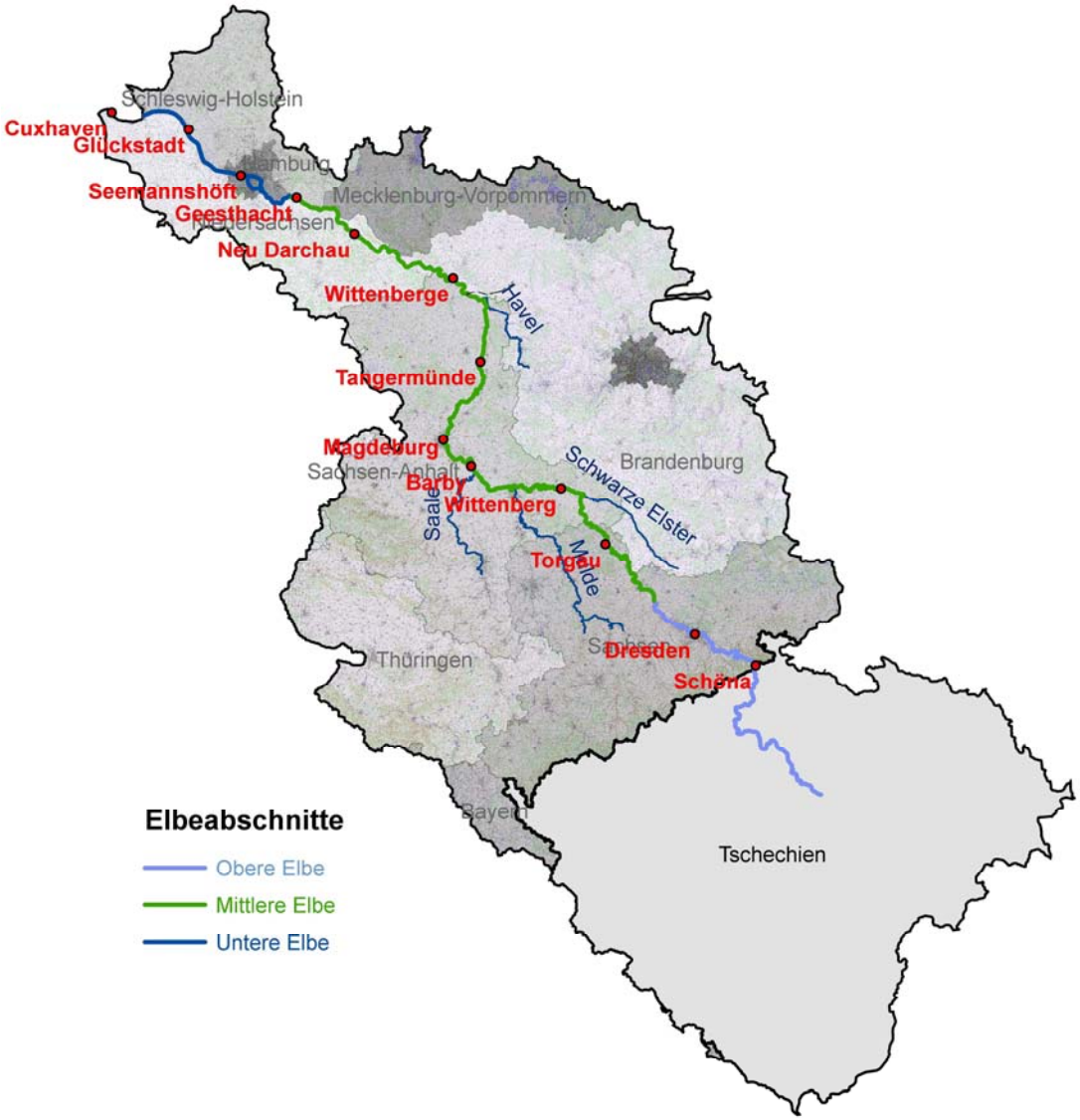


Abbildung 1: Karte der Elbe und ihrer Nebenflüsse mit wichtigen Messstellen.

Tabelle 1: Abschnitte der deutschen Elbe.

Obere Elbe	Grenze bis Schloss Hirschstein	(Elbe–km 0 bis 96,0)
Mittlere Elbe	Schloss Hirschstein bis Wehr Geesthacht	(Elbe-km 96,0 bis 585,9)
Untere Elbe	Wehr Geesthacht bis Seegrenze bei Cuxhaven-Kugelbake	(Elbe-km 585,9 bis 727,7)

Die mit Abstand größten Nebenflussgebiete der Moldau, der Saale und der Havel weisen zusammen eine Einzugsgebiets-Fläche von 76 194 km² auf, was einem Anteil von 51 % an der Gesamtfläche des Elbe-Einzugsgebietes entspricht. Eine hervorge-

hobene hydrologische Bedeutung für das Abflussgeschehen der Elbe kommen der Moldau mit einem MQ von 150 m³/s, der Saale und der Havel mit jeweils 115 m³/s und mit Abstrichen der Mulde mit 73 m³/s zu. Über 50 % des mittleren Abflusses der Elbe wird in diesen Nebenflussgebieten gebildet.
Die Nebenflussdichte ist im Bereich des Oberlaufs der deutschen Elbe mit durchschnittlich 4 einmündenden Gewässern auf einer Fließstrecke von 10 km am höchsten. Vom Beginn der Mittleren Elbe bis Magdeburg nimmt die Nebenflussdichte fast kontinuierlich ab. In diesem Abschnitt münden die bedeutenden Nebenflüsse Saale, Mulde und Schwarze Elster in die Elbe. Auffällig gering ist die Nebenflussdichte auf der 65,5 km langen Fließstrecke zwischen Tangermünde und Wittenberge, an der im Prinzip einzig die - jedoch bedeutende - Havel in die Elbe mündet.

Während die Staustufen im tschechischen Teil des Elbelaufes und in den Nebenflüssen einen wesentlichen Einfluss auf die oberen morphologischen Randbedingungen ausüben, stellt das Tidewehr bei Geesthacht die untere Randbedingung für die mittlere Elbe dar, indem es das Einströmen der Flut sowie deren Feststofffracht unterbindet.

Stromab des Tidewehres Geesthacht sind das hydrologische Regime sowie die Feststofftransporte durch den wechselnden Einfluss von Ebbe und Flut geprägt. Charakteristisches Merkmal des Elbeästuars ist ein als Trübungszone bezeichneter Bereich, der sich im Übergang zwischen Salz- und Süßwasser ausbildet. In diesem Bereich zwischen Elbe-km 660 und 710 liegen die gemessenen Schwebstoffgehalte mit bis zu 600 mg/l deutlich über den binnen- bzw. seeseitig gemessenen Gehalten. Die wichtigsten Nebenflüsse in die Unterelbe sind die Stör und die Oste. Für den Sturm- und Hochwasserschutz sind die Nebenflüsse der Unterelbe durch Sperrwerke gesichert. Stromab des Nord-Ostsee-Kanals bei Brunsbüttel beginnt der Mündungstrichter der Unterelbe, welcher durch weitläufige Wattflächen mit einer ausgeprägten Morphodynamik charakterisiert ist.

Der vorliegende Bericht ist auf die Prozesse im Binnenbereich, also der Oberen und Mittleren Elbe, ausgerichtet.

3 Datenquellen und Messverfahren

Die zur Verfügung stehenden Daten bestimmen die Tiefe und Qualität der Beurteilung des Gewässersystems. In den letzten Jahren wurden deutliche Verbesserungen der eingesetzten Messtechnik erreicht. Jedoch stellen Personal- und andere Ressourcenengpässe häufig Limitierungen der erreichbaren Datenverfügbarkeit dar. Durch den Einsatz der Wasser- und Schifffahrtsdirektion, sowie der Ämter Dresden, Magdeburg und Lauenburg, sowie der beratenden Oberbehörden kann jedoch eine gute Datengrundlage erreicht werden.

Im Folgenden werden die eingesetzten und dieser Auswertung zugrunde liegenden Messmethoden aufgeführt. Wasserspiegelfixierungen, Sohlhöhenmessungen durch Peilungen und Transportmessungen sind zur Beurteilung der Entwicklung von Flussbett und Sedimenthaushalt geeignet. Sohlkornbeprobungen dienen der Analyse der Entwicklung der Kornzusammensetzung.

3.1 Wasserspiegelfixierungen

Wasserspiegelfixierungen gehören neben den kontinuierlichen Wasserstandsmessungen an Pegeln sowie den regelmäßigen Abflussmessungen und daraus hervorgegangenen Abflusskurven für überregional bedeutsame Pegel zu den klassischen Methoden im hydrologischen Messkonzept der WSV.

Neben Messkonzepten zur regelmäßigen Erfassung der Gewässergeometrie durch Peilungen und Wasserstands- bzw. Abflussmessungen an Pegelstandorten, werden durch die WSV-Messkonzepte zu Wasserstandslängsprofilmessungen mittels Wasserspiegelfixierungen und morphologische Messungen zur Ermittlung des Sedimenthaushalts entlang der Bundeswasserstraßen ausgeführt. In vergleichenden Untersuchungen in der Bundesanstalt für Gewässerkunde (BfG) wurden diese unterschiedlichen Messgrößen herangezogen, um Auswirkungen zeitlicher Sohlhöhenänderungen entlang von morphologisch aktiven Strecken an der Mittleren Elbe auf die Wasserspiegellagen nachweisen zu können. Hierfür wurde auf eine in der Hydrometrie bewährte Methode zur Auswertung von Abflussmessungen (s. Kap. 3.1.1) zurückgegriffen, die auf die vorliegenden Wasserspiegelfixierungen angewendet wurde. Als Ergebnis liegen epochenbezogene Sohlhöhen- und Wasserspiegeldifferenzen für die untersuchten Gewässerabschnitte vor.

Die Auswertung der Wasserspiegelfixierungen ist für die Bestimmung von morphologischen Änderungen ein wichtiges Standbein, um die aus Peildaten und Feststofftransportmessungen abgeleitete Sohlhöhenentwicklung über längere Zeiträume abzusichern und zu validieren. Hierfür erfolgt ein Vergleich der morphologischen Transportdaten, der hydrographischen Peildaten und der Wasserspiegelfixierungen über zuvor festgelegte einheitliche Zeiträume, welche mindestens 5 Jahre umfassen und mit dem Begriff "Epoche" bezeichnet werden.

Die Beurteilung erfolgt, wenn möglich kontinuierlich, über die Differenzenbildung zwischen den Epochen. Der Differenzenvergleich von ermittelten Wasserstandsänderungen für Peildatenepochen mit den entsprechenden Wasserstandsänderungen für Wasserspiegelfixierungsepochen sichert die Genauigkeit dieser drei unabhängigen Datenstandbeine mit unterschiedlichen Messverfahren und Messgenauigkeiten ab. Wenn in Streckenabschnitten keine Sohlpeilungen vorliegen oder diese erhebliche Unsicherheiten enthalten, dann können die Wasserspiegelfixierungsanalysen auch die Rolle des Hauptstandbeins übernehmen.
Mit dem beschriebenen integrativen Ansatz werden somit unterschiedliche hydrologische, morphologische und geodätische Messdaten Disziplinen-übergreifend mit einer einheitlichen Zielsetzung ausgewertet. Von besonderer Bedeutung und erheblichem Nutzen ist dieses Verfahren für Streckenabschnitte an BWaStr, in denen ausgeprägte zeitliche Änderungen der Sohlhöhe und daraus folgend der Wasserspiegellage bei vergleichbaren Abflüssen stattfinden (BFG 2010b, BFG 2012a).

3.1.1 Methodik

Kontinuierliche Wasserstandsmessungen finden an Bundeswasserstraßen (BWaStr) an Pegeln statt. Zusätzlich hierzu und zu den Abflussmessungen an ca. 170 regional bedeutsamen Pegeln zur Erstellung von Abflusskurven, erfolgen die sporadischen Wasserstandsmessungen im Längsprofil (d.h. entlang des Verlaufs der BWaStr), sog. Wasserspiegelfixierungen. Sie bilden seit jeher das Rückgrat des klassischen hydrometrischen Messkonzepts der Wasser- und Schifffahrtsverwaltung des Bundes (WSV). Gemessene Wasserstände aus Wasserspiegelfixierungskampagnen werden insbesondere für den Betrieb, die Unterhaltung und den Ausbau der Wasserstraßen benötigt. So hat sich beispielsweise der Gleichwertige Wasserstand (GlW) als maßgebliche Größe für die Unterhaltung der Fahrrinne etabliert. Wichtige Grundlagen für die Bestimmung des GlW sind die Wasserspiegelfixierungen.

Alle gemessenen Wasserstände, ob an Pegeln oder in Messkampagnen von Wasserspiegelfixierungen erhoben, dokumentieren gleichermaßen das hydrologische und morphologische Gedächtnis unserer Gewässer. Deshalb sind gemessene Wasserstän-

de aus Wasserspiegelfixierungen für Langzeituntersuchungen ebenso wertvoll wie die an Pegeln gemessenen Wasserstände. Will man das Wasserstandsverhalten im Hinblick auf morphologisch bedingte Veränderungen messwertgestützt analysieren, ist es nicht ausreichend nur Wasserstände zu verschiedenen Zeiten auszuwerten. Kurzfristig resultieren Wasserstandsänderungen aus Abflussänderungen („der Wasserstand folgt dem Abfluss"), über längere Zeiträume können jedoch weitere Faktoren die durchschnittlichen, statistisch ermittelten Wasserstände beeinflussen. Deshalb ist es für den Betrieb der Bundeswasserstraßen von großem Interesse, zeitliche, nur von lokalen Durchflussveränderungen verursachte Wasserstandsänderungen zwischen den Pegeln an den BWaStr identifizieren zu können.

Für umfassende, morphologische Untersuchungen hat die Bundesanstalt für Gewässerkunde (BfG) eine hydrologische Datenbasis für BWaStr aufgebaut, die neben langen Wasserstands- und Abflusszeitreihen sowie allen historisch gültigen Abflusskurven an Pegelstandorten auch gemessene Wasserstände aus Wasserspiegelfixierungen beinhaltet. Abbildung 2 zeigt mit Hilfe der Auswertung der historischen Abflusskurven, wie sich die Wasserstände an den beiden Oberrheinpegeln Maxau und Worms zwischen 1973 und 2010 bei einem Abfluss, der geringfügig über dem statistisch ermittelten, mittleren Niedrigwasserabfluss (MNQ) im Rhein liegt, entwickelt haben. Wie man anhand der Wasserstandsentwicklungen erkennt, haben sich die lokalen Durchflussverhältnisse an beiden Pegeln ganz unterschiedlich verändert. Während in Maxau für gleiche Abflüsse die Wasserstände bis 2003 deutlich angestiegen sind (ca. 40 cm), was auf lokale bzw. bereichsweise Sedimentation im Flussbett schließen lässt, sind am Pegel Worms in den vergangenen fast 40 Jahren bei leichter Erosionstendenz nahezu konstante Wasserstände festzustellen.

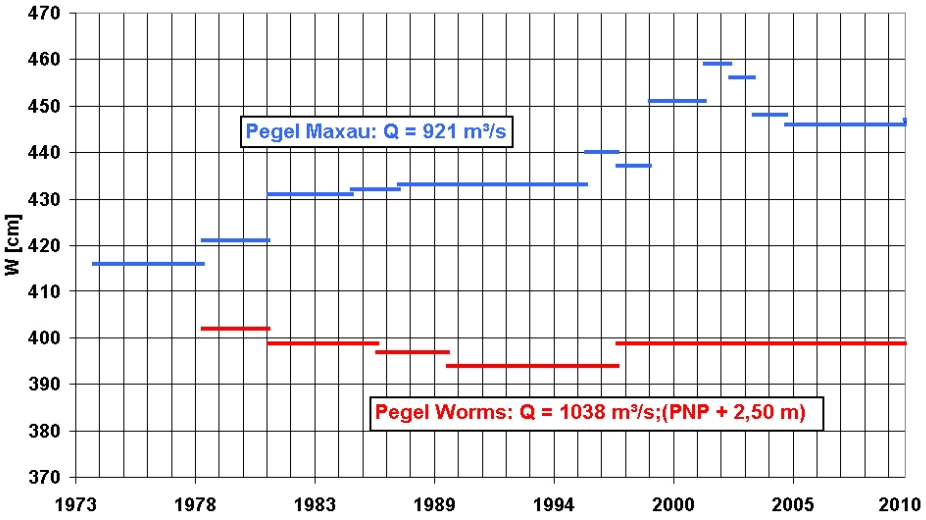


Abbildung 2: Wasserstandsänderungen an den Pegeln Maxau/Rhein und Worms/Rhein bei einem Abfluss im Bereich (geringfügig oberhalb) des MNQ.

Da diese Wasserstandsänderungen streng genommen nur für die Pegelstandorte Maxau und Worms gelten, stellt sich die Frage, ob und wie sich die Rheinwasserstände auf der Strecke zwischen den Pegeln verändert haben. Dazu können Wasserspiegelfixierungen ausgewertet werden. Um vergleichbare auf Messwerte gestützte, belastbare Aussagen zu morphologisch bedingten Wasserstandsänderungen für die gesamte Rheinstrecke zwischen diesen beiden Pegeln zu erhalten, wird auf eine bewährte hydrometrische Auswertemethode zurückgegriffen und diese auf Wasserspiegelfixierungen angewendet. In Analogie zur Auswertung von Abflussmessungen für die Erstellung von Abflusskurven an Pegeln werden allen in Wasserspiegelfixierungen gemessenen Wasserständen ihre entsprechenden Abflüsse zugeordnet, so dass es möglich ist, für jeden Gewässerkilometer der untersuchten Gewässerstrecke Abflusskurven zu ermitteln. Aus anderen Epochen (Zeiträumen) stammende Fixierungen werden hierzu in Relation gesetzt und ihre Differenzen im Hinblick auf Wasserstandsänderungen zeitlich analysiert. Das vorgestellte Verfahren, Wasserspiegelfixierungen nicht wie bisher üblich im Längsschnitt, sondern stationsweise wie Abflussmessungen auszuwerten, ist neu und setzt die sorgfältige hydrologische Plausibilisierung der Messungen (= Messort bezogene Abflusszuweisung) voraus. Erst durch diese „Veredlung“ können die in zeit- und kostenaufwändigen Sondermessungen entlang der BWaStr erhobenen hydrologischen Daten für morphologische Untersuchungen weiter verwendet und zeitlich analysiert werden.

In diesem Bericht werden die neue Auswertemethode und hieraus hervorgehende Ergebnisse beispielhaft für die Mittlere Elbe zwischen Torgau und Aken vorgestellt. Als Analysewerkzeug stand die Flusshydrologische Software (FLYS) der BfG, Desktop-Version 2.1.3 zur Verfügung.

Gemessene Wasserstände aus Wasserspiegelfixierungen werden üblicherweise im Längsschnittdiagramm einer Gewässerstrecke dargestellt. Im Vergleich der Fixierungen untereinander werden unterschiedliche lokale Gefälleverhältnisse deutlich. Allerdings gibt diese Darstellungsart wenig Aufschluss über zeitliche gewässermorphologisch bedingte Veränderungen der Wasserspiegellagen, die möglicherweise vorhanden sind, aber nicht erkannt werden, da die Wasserspiegelfixierungen zu unterschiedlichen Zeiten und bei unterschiedlichen Abflüssen durchgeführt wurden. Folglich müssen die Abflüsse auf deren Grundlage sich die gemessenen Fixierungswasserstände einstellten, als Normierungsgröße in die Untersuchungen mit einbezogen werden. Für frei fließende Gewässer beschreiben Abflusskurven die Beziehung zwischen Wasserstand und Abfluss. Diese lassen sich in W-Q-Diagrammen darstellen.
Bekannte Phänomene, wie Anlandungen und Sohleintiefungen, die sich auf Wasserstände auswirken und sich an Pegeln in der historischen Entwicklung der Abflusskurven wiederspiegeln, müssten sich in gleicher Weise im Vergleich vieler Wasserspiegelfixierungen wiederfinden. Grundlage hierfür ist, die gemessenen Wasserstände aller Wasserspiegelfixierungen zusammen mit ihren entsprechenden Abflüssen, wie

Ergebnisse von Abflussmessungen auszuwerten und Änderungen zeitlich zu analysieren. Dieser Ansatz, Wasserspiegelfixierungen und Abflussmessungen in gleicher Weise auszuwerten, ist neu, aber doch naheliegend. Während bei Abflussmessungen der gemessene Abfluss einem Bezugswasserstand am Bezugspegel zugeordnet wird, werden analog hierzu, für jeden Ort der Fixierungen den gemessenen Wasserständen jetzt auch ihre Abflüsse zugeordnet. Messungen aus Fixierungen werden folglich, wie Ergebnisse aus Abflussmessungen, in W-Q-Diagrammen dargestellt und analysiert. Dies ist der Kern des Auswerteverfahrens, das erstmals im Rahmen der Untersuchungen am Oberrhein angewendet wurde (BFG 2010-B). Das mehrere Schritte umfassende Verfahren kann nur für frei fließende Gewässer angewendet werden, da nur hier eindeutige Beziehungen zwischen Abflüssen und den sich einstellenden Wasserständen existieren. Es ist stationsweise auszuführen.

Erster Schritt: Festlegung eines Bezugszeitraums und von Auswertezeiträumen, in denen jeweils eine ausreichende Anzahl auswertbarer Fixierungen vorliegt, sowie Definition der Schrittweite der diskreten, stationsbezogenen Auswertung (in der Praxis alle 500m bis 1000m). Die gewählten zeitlichen Abschnitte gelten gleichermaßen für alle Untersuchungsorte. Unter hydrologischen Gesichtspunkten wird der Bezugszeitraum festgelegt, die Auswerteepochen ergeben sich in Abhängigkeit von der existierenden Datengrundlage zu Geschiebemessungen und Gewässerpeilungen, die aus vergangenen gewässermorphologischen Messkampagnen stammen.

Zweiter Schritt: Für den festgelegten Bezugszeitraum wird auf Grundlage der darin erfolgten Fixierungen stationsweise für jeden Auswerteort in der Gewässerstrecke eine Abflusskurve berechnet. Für frei fließende Gewässer erfolgt die Ermittlung der Abflusskurve i.d.R. am besten wie in Abbildung 3 dargestellt mittels Anpassung der gemessenen Wasserstände durch eine logarithmisch-lineare Funktion: $W(Q)=a*\ln(m*Q+b)$.

Dritter Schritt: Die gemessenen Wasserstände aus den vorliegenden Wasserspiegelfixierungen der Auswertezeiträume werden in Relation zur berechneten Abflusskurve des Bezugszeitraums (=Nulllinie) gesetzt und die daraus resultierenden Wasserstandsdifferenzen (ΔW) ermittelt. Diese sind im gewählten Beispiel für Elbe-km 199 (Abbildung 3) deutlich zu erkennen. Danach werden die Wasserstandsänderungen dieser Wasserspiegelfixierungen chronologisch in einem ΔW-Zeit-Diagramm dargestellt (Abbildung 4). Abgeschlossen ist die stationsbezogene Auswertung der Wasserstandsänderungen nach der Berechnung von mittleren Abweichungen für die zu Beginn definierten Epochen und signifikante Abflussbereiche (z.B. um MNQ: $Q<(MNQ+MQ)/2$ oder um MQ: $(MNQ+MQ)/2< Q<(MQ+MHQ)/2$). In der chronologischen Ergebnisauswertung erfolgt somit eine doppelte Mittelung der berechneten ΔW über Auswerteepochen und über Abflussbereiche. Die Epochenauswertung ist notwendig, da Wasserspiegelfixierungen an den BWaStr sporadisch und nicht konti-

nuierlich in äquidistanten Zeitabständen (z.B. einmal pro Jahr) erfolgen. Idealerweise sollten der Bezugszeitraum und alle Auswerteepochen unmittelbar aufeinander folgen, damit lückenlos das Epochenverhalten von Wasserständen nachgewiesen werden kann.

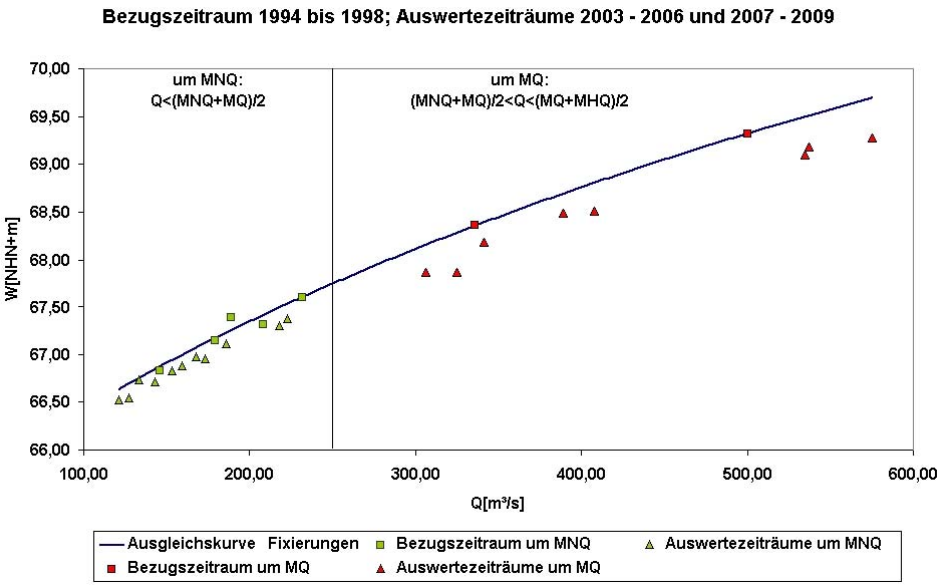


Abbildung 3: Stationsbezogene Analyse von Wasserspiegelfixierungen für Elbe-km 199.

In Abbildung 4 sind für Elbe-km 199 die ermittelten ΔW aller Wasserspiegelfixierungen im Vergleich zur Nulllinie des Bezugszeitraums 1994-1998 in einem Zeitdiagramm als Einzelwerte dargestellt. Darüber hinaus zeigt das Diagramm für die beiden gewählten Auswertezeiträume 2003-2006 und 2007-2009 die für den Abflusssektor "um MNQ" gemittelten Einzelwerte als horizontale Linien. Man erkennt, dass die Wasserstände im Bereich " um MNQ" im Auswertezeitraum 2003-2006 im Mittel um ca. -13 cm im Vergleich zum Bezugszeitraum 1994-1998 abgesenkt sind. Für den Zeitraum 2007-2009 beträgt die Absenkung ca. -15 cm.

Vierter Schritt: Wiederholung der Schritte 2 und 3 für weitere Orte der Untersuchungsstrecke und Zusammenführung der stationsweise ermittelten und für Zeiträume und Abflussbereiche gemittelten Wasserstandsänderungen (ΔW) für die gesamte Untersuchungsstrecke. Die Untersuchung kann abgeschlossen werden, wenn die mittleren Wasserstandsänderungen an den einzelnen Untersuchungsstationen epochenweise und für Abflussbereiche vorliegen und im Überblick in einem Streckendiagramm graphisch dargestellt sind.

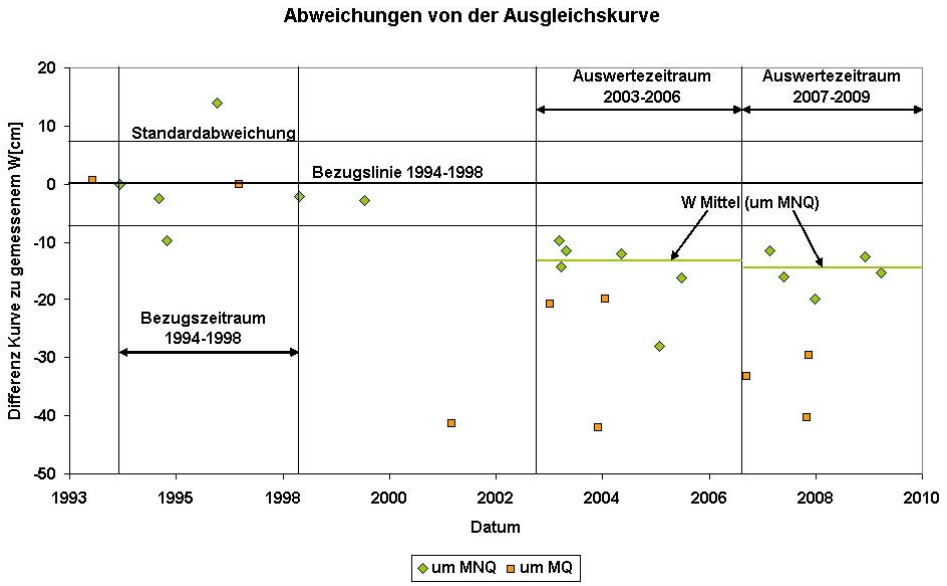


Abbildung 4: Chronologische Wasserstandsänderungen bei Elbe-km 199 als Einzelwerte und gemittelt für Auswertezeiträume und den Abflussbereich "um MNQ".

Verfahrensbedingt sind mehrere Anforderungen an die zu verwendende Datengrundlage hinsichtlich Umfang und Qualität zu stellen. Wichtig ist, dass im Rahmen der Plausibilisierung von Wasserspiegelfixierungen, den gemessenen Wasserständen an allen Messorten bestmöglich die zum Messzeitpunkt vorhandenen Abflüsse zugeordnet werden. Es müssen hinreichend viele Wasserspiegelfixierungen in unterschiedlichen Wasserstandsbereichen vorliegen, die möglichst kontinuierlich den gesamten Untersuchungszeitraum abdecken. Abbildung 3 zeigt für Elbe-km 199 alle im untersuchten Zeitraum 1994-2009 ausgeführten Wasserspiegelfixierungen im Niedrig- und Mittelwasserbereich. Da mehr als 30 Messereignisse für die zeitliche Analyse bereitstehen, ist die Anforderung an den Datenumfang voll erfüllt. Für den festzulegenden Bezugszeitraum muss ebenfalls eine hinreichende Anzahl von Fixierungen zur Verfügung stehen, damit auf deren Grundlage gesicherte Abflusskurven berechnet werden können, die im weiteren Auswerteverfahren als Bezugslinien für die Messungen aus den Auswertezeiträumen zu verwenden sind. Abbildung 3 zeigt für Elbe-km 199 alle in dem gewählten Bezugszeitraum 1994-1998 ausgeführte Wasserspiegelfixierungen im Niedrig- und Mittelwasserbereich. Auf Basis von 7 Wasserstandsmesswerten und den ihnen zugeordneten Abflüssen lässt sich eine gut abgesicherte Abflusskurve berechnen.

Gewässerkundliche Plausibilisierung

Im Rahmen der gewässerkundlichen Plausibilisierung sind den gemessenen Wasserständen an allen Auswerteorten der Wasserspiegelfixierungen ihre Abflüsse zuzuweisen. Hierbei wird die in der Gewässerkunde der WSV bisher übliche Vorgehensweise der Abflusszuweisung beibehalten, indem zunächst Bezugswasserstände- und abflüs-

se für Bezugspegel festgelegt und diesen dann Streckengültigkeiten zugewiesen werden. Als Bezugswasserstände werden die an den Pegeln gemessenen Wasserstände verwendet, die zum Zeitpunkt der Passage der Wasserspiegelfixierung am Pegelstandort aufgezeichnet wurden. Diese übernommene, seit Jahrzehnten praktizierte Plausibilisierung der Naturmessungen ist durchaus sachgemäß, wenn die Wasserspiegelfixierungen ordnungsgemäß in Fließrichtung durchgeführt werden und die Abfolge der Messungen dabei in etwa der Fließgeschwindigkeit der Welle/Strömung entspricht. Überprüfungen von Messprotokollen zeigten, dass die Messabläufe dieser Anforderung größtenteils entsprachen. Zur Ermittlung der Bezugsabflüsse wurden die Bezugswasserstände mit den gültigen Abflusstafeln umgerechnet.

Den Abflüssen an den Bezugspegeln wird weiterhin eine Streckengültigkeit zugewiesen. Diese Streckengültigkeitsbereiche werden in Analogie zur Flächenzunahme des oberirdischen Einzugsgebiets entlang der jeweiligen BWaStr festgelegt und orientieren sich an den Mündungen großer Zuflüsse. Dabei werden die Zwischengebietsabflüsse als vernachlässigbar klein angenommen. Beispielsweise wächst entlang der angenommenen Streckengültigkeitsbereiche der drei Bezugspegel an der Mittleren Elbe das oberirdische Einzugsgebiet der Elbe zwischen 0,25% und 2%. Das eng geknüpfte Messnetz der Pegel an den BWaStr berücksichtigt insgesamt eine hinreichende Anzahl von Messstellen mit Abflussermittlung, so dass die dort gültigen Abflüsse auch eine regionale Bedeutung haben. Vereinfachend wird deshalb angenommen, dass deren Abflüsse auch für alle Orte zwischen den bedeutsamen Nebenflussmündungen gelten.

Naturmessungen und die anschließende Abflusszuweisung im Rahmen der gewässerkundlichen Plausibilisierung sind zwangsläufig mit Fehlern und Unsicherheiten behaftet. Diese sind zu ermitteln und bei der Analyse und Bewertung der berechneten, zeitlichen Wasserstandsänderungen zu beachten. In Kapitel 4 werden die Fehlerquellen und die abgeschätzten Unsicherheiten näher beschrieben. In der Tabelle 7 sind die aus Messfehlern und der anschließenden Plausibilisierung resultierenden Unsicherheiten im Überblick aufgeführt.

3.1.2 Datenlage

Für einige morphologisch aktive Flussabschnitte an den BWaStr, an denen Wasserstandsänderungen bereits mit „klassischen“ Verfahren nachgewiesen wurden, liegen für einen längeren Zeitraum umfangreiche Messreihen von Wasserspiegelfixierungen vor. Diese standen als Datengrundlagen für die Anwendung der neuen Auswertemethode der BfG zur Verfügung. In Kapitel 3.1.3 werden die Ergebnisse der Untersuchungen an der Mittleren Elbe zwischen Torgau und Aken (siehe Abbildung 5) wiedergegeben.

Als Mittlere Elbe bezeichnet man den Elbeabschnitt zwischen dem Eintritt in das norddeutsche Tiefland bei Schloss Hirschstein (nördlich von Meißen bei Elbe-km 96) und dem Wehr Geesthacht (Elbe-km 585,9), welches die Grenze zwischen der frei fließenden und der tidebeeinflussten Elbe markiert. Der gewässermorphologisch untersuchte, ca. 130 km lange Teil der mittleren Elbe, befindet sich zwischen Torgau (Elbe-km 150) und kurz unterhalb Aken (Elbe-km 280). In zahlreichen Bögen fließt die Mittlere Elbe hier als Flachlandfluss durch ihre Talaue. Mit der Schwarzen Elster und der Mulde münden zwei bedeutende Nebenflüsse in die Untersuchungsstrecke ein. Gewässerkundlich lässt sich dieses Teilstück der Mittleren Elbe durch die gemessenen Wasserstände und Abflüsse an den Pegeln Torgau, Lutherstadt Wittenberg und Aken beschreiben (siehe Tabelle 2).

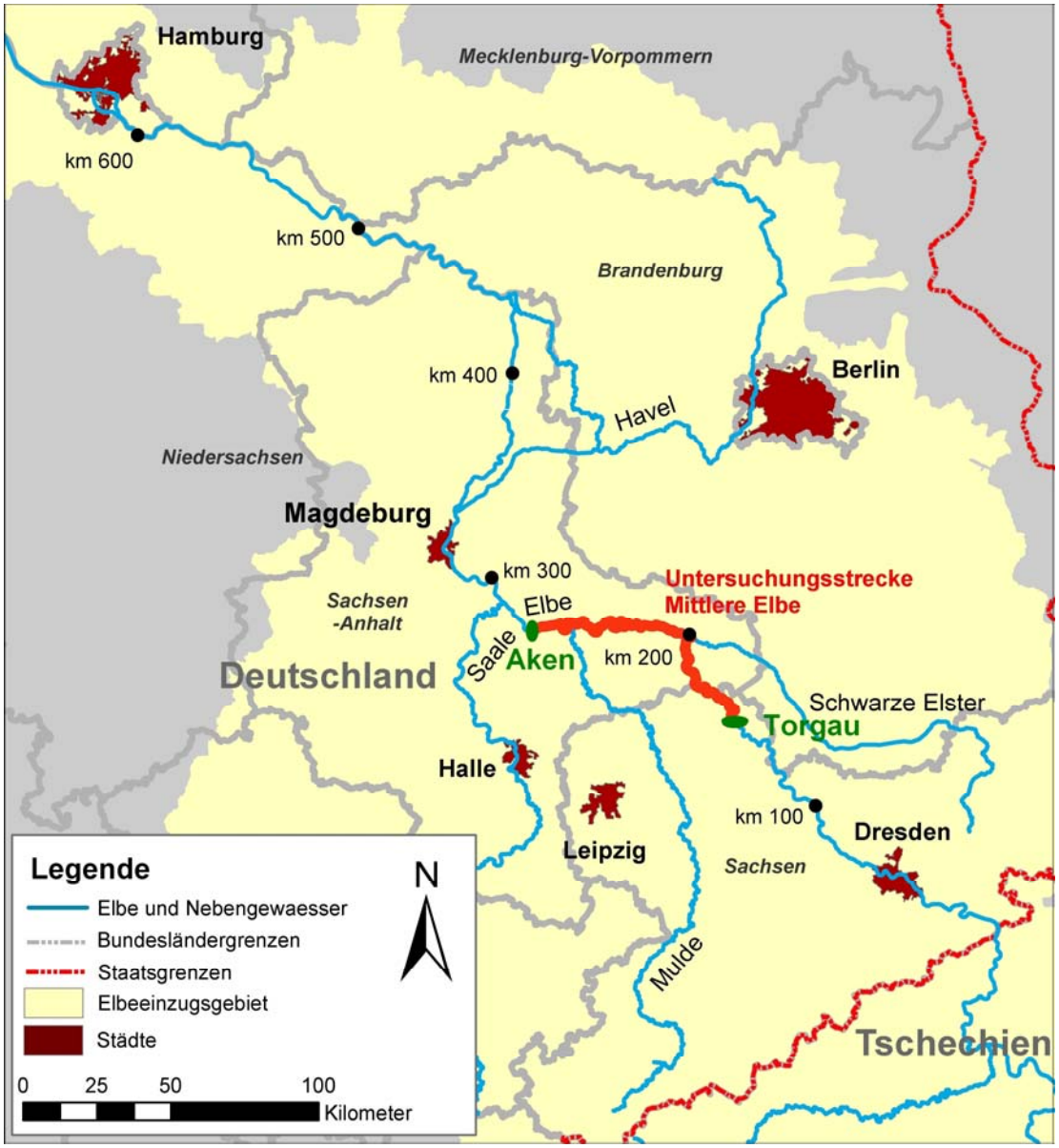


Abbildung 5: Untersuchungsstrecke zwischen Torgau und Aken an der Mittleren Elbe.

Tabelle 2: Hauptwerte des Abflusses für die Pegel an der Mittleren Elbe.

Pegel	Gewässer	Lage am Gewässer	MNQ	MQ	MHQ	Reihe
		[Fluss-km]	[m³/s]	[m³/s]	[m³/s]	von - bis
Torgau	Elbe	154,15	117	343	1420	1936 - 2010
Lutherst. Wittenberg	Elbe	214,14	134	357	1400	1951 - 2010
Aken	Elbe	274,75	161	439	1710	1936 - 2010

Für die Mittlere Elbe konnte in der BfG auf die von der Bundesanstalt für Wasserbau (BAW) erstellte Wasserspiegelfixierungsdatenbank (Stand: Juli 2010) zugegriffen werden. Die dort gespeicherten Datensätze verfügen über Messwerte mit folgenden Attributen: Wasserstand [NHN+m], Datum, Uhrzeit und Stationierung [Fluss-km]. Insgesamt standen so für die zeitliche Analyse von Wasserspiegelfixierungen 32 Messereignisse im Niedrig- und Mittelwasserbereich für den Zeitraum 1994 - 2009 zur Verfügung. Vorliegende Messereignisse, die nicht stationäre Abflussverhältnisse beschreiben, wurden nicht auf den stationären Zustand umgerechnet.

Grund für die Beschränkung der Untersuchungen auf Messungen im Niedrig- und Mittelwasserbereich ist die Annahme, dass morphologisch bedingte Sohlhöhenänderungen signifikante Wasserstandsänderungen insbesondere bei kleinen und mittleren Abflüssen verursachen und die niedrigen Wasserstände so am besten die Veränderungen der Gewässersohle widerspiegeln. Da diese Wasserstände zudem maßgeblich die Unterhaltungskonzepte der WSV für BWaStr bestimmen, werden Wasserspiegelfixierungen hauptsächlich bei niedrigen und mittleren Abflüssen durchgeführt, so dass letztendlich auch eine ausreichende Anzahl an Fixierungen vorliegt, die Analysen im Hinblick auf Wasserstandsänderungen ermöglicht.

Tabelle 3: Verwendete Fixierungen in der Analyse der Entwicklung der Wasserspiegellagen.

Fixierung vom	km (von-bis)	Pegel Torgau Elbe-km (154,15) gültig: El-km 108,4 - 198,6		Pegel Wittenberg Elbe-km (214,14) gültig: El-km 198,6 - 259,6		Pegel Aken Elbe-km (274,75) gültig: El-km 259,6 - 290,8	
		W (cm)	Q (m³/s)	W (cm)	Q (m³/s)	W (cm)	Q (m³/s)
10.10.1994	153 - 157	124	136				
08.11.1994	153 - 157	-	148				
21.11.1994	150 - 280	160	206	202	232	169	287
23.08.1995	150 - 210	122	164	-	179		
24.10.1995	150 - 280	153	194	201	208	160	272
15.10.1996	150 - 280	151	192	187	189	154	261
25.05.1998	150 - 280	88	128	136	146	97	172
01.09.1999	150 - 280	88	128	125	133	80	148
16.06.2003	153 - 250	97	152	143	168		
30.06.2003	150- 185	75	125				
01.07.2003	185 - 280	-	127	121	143	71	160
10.08.2003	153,5 - 247	58	114	101	121		
11.08.2003	246,5 - 280			96	116	54	140
03.09.2004	150 - 154	97	151				
04.09.2004	153,5 - 257	91	144	135	159		
05.09.2004	255,5 - 280			129	152	88	179
08.11.2005	150 - 280	91	144	147	173	120	226
01.08.2007	156 - 226	85	143	138	153		
02.08.2007	226 - 280			138	153	101	197
06.11.2007	150 - 185	132	209				
07.11.2007	185 - 246	-	216	188	223		
08.11.2007	246 - 280			-	236	161	294
17.06.2008	150 - 155	133	210				
18.06.2008	155 - 217	134	205	185	218		
19.06.2008	217 - 280			185	217	132	245
09.06.2009	150 - 184	100	160				
10.06.2009	184,5-245,5	105	167	162	186		
11.06.2009	245,5 - 280			165	185	-	220
29.09.2009	150 - 210	57	110	101	127		
30.09.2009	210 - 280			101	127	60	142

3.1.3 Ergebnisse

Vor der Analyse von Wasserspiegelfixierungen im Hinblick auf zeitliche Wasserstandsänderungen wurden mit den gewässerkundlichen Fachreferaten in BfG und WSV die Randbedingungen der Untersuchungen abgestimmt. Festgelegt wurden die Bezugs- und Auswertezeiträume sowie die Abflussbereiche (um MNQ, um MQ) zur Ermittlung Epochen gemittelter Wasserstandsänderungen. Das Vorhandensein von Peilungen, die während bestimmter Epochen in durchgängigen längeren Strecken durchgeführt wurden, ist dabei eine zentrale Randbedingung.

Für die Festlegung des Bezugszeitraumes muss aus hydrologischer Sicht prioritär die Anforderung nach einer hinreichenden Anzahl von Wasserspiegelfixierungen beachtet werden. In Tabelle 4 sind im Überblick die festgelegten Bezugs- und Auswerte-

zeiträume angegeben. Für die Mittlere Elbe fiel aufgrund der vorliegenden Datensätze die Wahl des Bezugszeitraumes auf die Zeitspanne 1994-1998; diese liegt am Anfang der Messreihe.

Tabelle 4: Verwendete Datensätze zur zeitlichen Analyse von Wasserspiegelfixierungen.

Elbe (1994-2009)			
Epoche	**A/B**	**Anzahl Fix**	
		um MNQ	um MQ
1994-1998	B	7	4
2003-2006	A	6	6
2007-2009	A	5	3

A = Auswertezeitraum B = Bezugszeitraum

Da die größten Wirkungen von Sohlhöhenänderungen auf den Niedrigwasserstand zu erwarten sind, wurde entschieden, die Epochenauswertungen für die mittleren zeitlichen Wasserstandsänderungen nur für die Abflussklasse „um MNQ“ vorzunehmen. Tabelle 4 enthält auch Angaben zur Anzahl der verfügbaren Messereignisse für Abflussklassen und Epochen.

Für die Ermittlung der Sohlhöhendifferenzen wurden die von der WSV ausgeführten Peilungen der Gewässersohle zu verschiedenen Zeitpunkten ausgewertet. Auch hier hängt die Wahl der Bezugspeilung und die der Auswertepeilung von der Verfügbarkeit vollständiger, qualitativ hochwertiger Peildatensätze ab. Grundsätzlich ist zu beachten, dass die Zeitpunkte der berücksichtigten Peilungen innerhalb der für die Analyse der Wasserspiegelfixierungen festgelegten Zeiträume liegen. Für die Mittlere Elbe wurde aus gewässermorphologischer Sicht zur Ermittlung der Sohlhöhendifferenzen die Peilungen des Zeitraumes 1993-98 („1995“) als Bezugspeilung und die Peilung von 2010 als Auswertepeilung ausgewählt.

An der Mittleren Elbe zwischen Torgau und Aken wird schon seit Ende des 19. Jahrhunderts Sohlerosion registriert, die zu bedeutsamen Wasserspiegelabsenkungen führte (Nestmann et al. 2002). Neben der Quantifizierung von Wasserstandsabsenkungen für Niedrigwasser nach 1994 war im Auftrag der WSV-Arbeitsgruppe „Sohlstabilisierungskonzept“ auch zu untersuchen, ob durchgeführte Maßnahmen zur Sohlstabilisierung nach 1996 und insbesondere die nach dem extremen Elbehochwasser vom August 2002 intensivierten Maßnahmen ab 2004 erfolgreich waren und ein weiteres Absinken der Wasserstände verhindern konnten.

In der Abbildung 6 sind im Überblick die ermittelten Ergebnisse zu Sohlhöhen- und Wasserstandsänderungen bei niedrigen Elbeabflüssen zwischen Torgau und Aken für die untersuchte Epoche 2007-2009 graphisch dargestellt. Die hierin enthaltene Nulllinie dient als Bezugslinie und beschreibt die Niedrigwassersituation in der Mittleren Elbe im Zeitraum 1994-1998. Eine der Sohlhöhenentwicklung entsprechende gleichmäßige Entwicklung der Wasserstände kann für natürliche Gewässer nicht erwartet werden, da sowohl die Sohlverhältnisse als auch die Durchflussverhältnisse lokal differieren und Besonderheiten aufweisen. In der Tendenz sollten sich jedoch im Längsprofil eines untersuchten Gewässers vergleichbare Verhaltensmuster zeigen, da die Entwicklung der Wasserstände denen der Sohlhöhen folgt. Wie aus den Abbildungen 6 und 7 zu ersehen ist, ergeben sich über weite Strecken an der Mittleren Elbe sehr ähnliche Werte zwischen den ermittelten Sohlhöhen und Wasserstandsänderungen.

Allgemein kann für die analysierte Strecke an der Mittleren Elbe festgestellt werden, dass die bekannten Wasserstandsabsenkungen „um MNQ“ durch die hier vorgenommenen Untersuchungen für die erste untersuchte Epoche 2003-2006 uneingeschränkt bestätigt werden. Für die in der Abbildung 6 dargestellte zweite Epoche 2007-2009 sind als Ergebnis der Analysen ebenfalls nahezu überall deutliche Wasserspiegelabsenkungen festzustellen, die lokal am Pegel Torgau (Elbe-km 154,4) sogar ca.-40 cm erreichen und unterhalb der Mündung der Schwarzen Elster (Elbe-km 199) Werte zwischen -10 cm und -30 cm aufweisen. Nur für die oberhalb der Mündung der Schwarzen Elster gelegene Strecke zwischen Elbe-km 180-200 werden tendenziell kleinere Wasserstandsabsenkungen um -10 cm ermittelt.

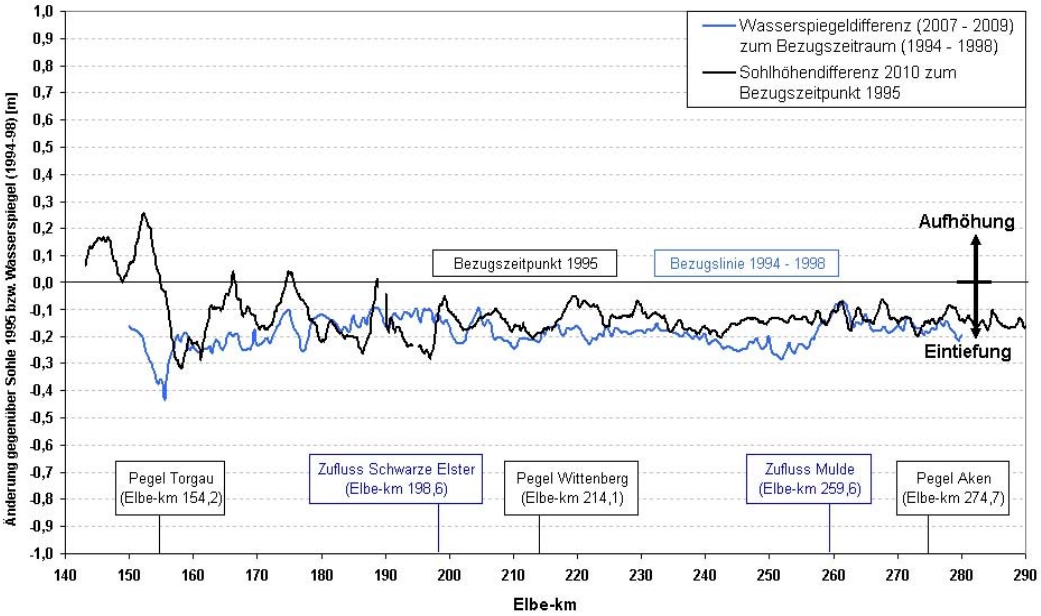


Abbildung 6: Sohlhöhen- und Wasserstandsänderungen bei Niedrigwasser an der Mittleren Elbe zwischen Torgau und Aken.

Als Resultat aus dem Epochenvergleich ergibt sich im Längsschnitt der Mittleren Elbe, dass sich die bekannten Wasserstandsabsenkungen "um MNQ" für die zweite untersuchte, hier dargestellte Epoche 2007-2009 im Bezug zum Zeitraum 1994-1998 überwiegend weiter fortgesetzt haben. Im Bereich unterhalb von Torgau senkten sich die Niedrigwasserstände mit mehr als -10 cm nochmals weiter ab. In dem dreijährigen Zeitraum zwischen 2007-2009 sind auch zwischen Torgau und der Mündung der Schwarzen Elster die Niedrigwasserstände nochmals um 5-10 cm abgesunken. Nur um Klöden (Elbe-km 190) haben sich die Wasserspiegelverhältnisse stabilisiert. Allgemein kann festgestellt werden, dass (mit lokal begrenzten Ausnahmen) an der Mittleren Elbe die Sohlerosion ungebremst weiter fortschreitet. Die ermittelten Ergebnisse für die Epoche 2007-2009 werden deshalb insgesamt nicht als Indiz angesehen, dass die vorgenommenen Sohlstabilisierungsmaßnahmen ab 2004 schon erste Erfolge auf konstantere Niedrigwasserverhältnisse zeigen.

Das in diesem Beitrag vertretene Konzept, den Vergleich von Änderungen der Sohlhöhe und Wasserspiegellage im Niedrigwasserbereich über korrespondierende Zeiträume für die Dokumentation der gewässermorphologischen Entwicklung in Flussgebieten heranzuziehen, wird durch die nachfolgende Auswertung über einen sehr langen Zeitraum verdeutlicht. In Abbildung 7 sind die Veränderungen (Aufhöhung/Eintiefung) von Wasserspiegel und Sohlhöhen der deutschen Binnenelbe über den Zeitraum von 1898 bis 2004 gegeneinander aufgetragen. In diesem Vergleich über 106 Jahre hinweg fallen Unsicherheiten der Einzeldatenauswertung und andere Einflüsse nicht ins Gewicht und es zeigt sich sehr deutlich, dass die Eintiefung der Flusssohle der treibende Mechanismus für den Verfall der Wasserspiegel ist.

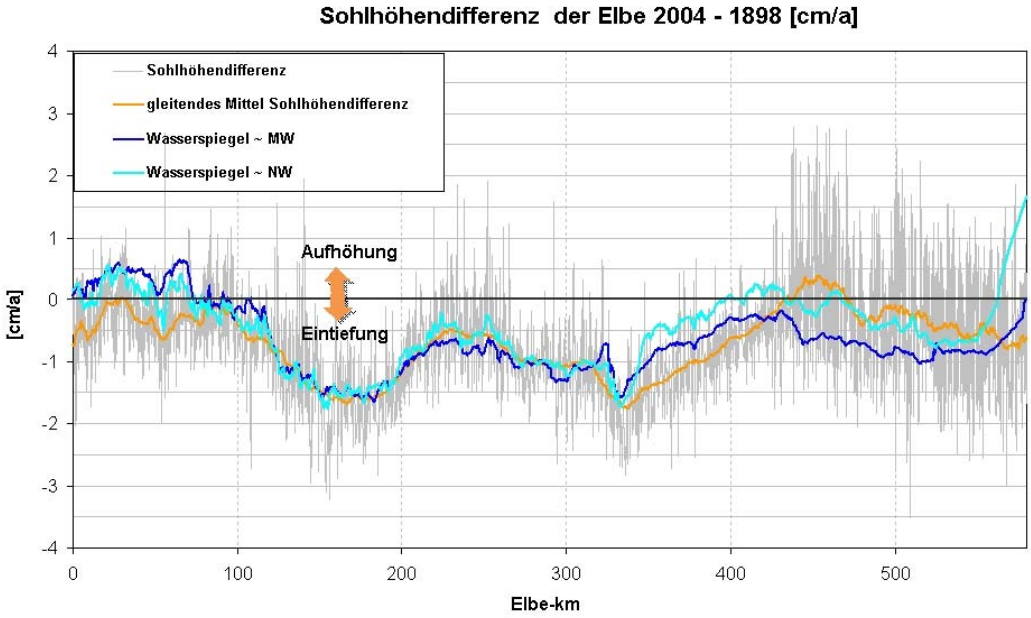


Abbildung 7: Mittlere Sohlhöhenänderung und Wasserspiegellagenentwicklungen [in cm/a] der Elbe zwischen 1898 und 2004 (Quick et al. 2012).

Die maximalen Eintiefungen betragen ca. 2 cm/Jahr, dies entspricht einer Eintiefung von ca. 2 m im Zeitraum zwischen 1898 und 2004. Gut erkennbar sind die bekannten Erosionsstrecken von km 130-220 sowie im Bereich von Magdeburg (km 326) und der verschärft regulierten Strecke von km 333-344. Unterstrom der Havelmündung (ca. km 428) ist zunächst eine Akkumulation und anschließend eine nur geringe Erosion festzustellen. Die zur Validierung der Sohllagenentwicklung berechnete mittlere Wasserspiegellagenänderung zeigt einen weitgehend kongruenten Verlauf zur Sohlhöhenänderung. Lediglich von km 0-60 und ab km 430 sind Abweichungen vorhanden. Im oberstromigen Bereich sind diese auf methodische Ungenauigkeiten zurückzuführen: Aufgrund nicht vorhandener Informationen aus Tschechien konnten die Abflüsse zu den im Elbstromwerk (1898) angegebenen Wasserspiegellagen nur bis zum Pegel Dresden (km 55,6) ermittelt werden. Die Abflüsse bis zur tschechischen Grenze wurden extrapoliert. Die Abweichungen zwischen Sohlhöhenänderung und Wasserstandsänderungen stromab Elbe-km 430 resultieren vermutlich aus baulichen Veränderungen im Vergleichszeitraum zwischen 1898 und 2004. Neben einer weiteren Verlegung der Havelmündung (z. B. um 1956) fanden viele Ausbaumaßnahmen in diesem Abschnitt erst deutlich später als in den oberstromigen Bereichen statt. Des Weiteren ist dieser Bereich durch die sogenannte Reststrecke (km 508-521) mit verringertem Ausbaugrad und einer größeren Streichlinienbreite, Transportkörperbewegungen und dadurch erhöhte Messungenauigkeiten sowie einer anthropogenen Entnahme von Sohlbaggergut zwischen 1929-1935 gekennzeichnet (Glazik 1994, Faulhaber 2000, Nestmann et al., 2002).
Unterstrom von Neu Darchau (km 536,4) kommt es seit dem Bau der Staustufe Geesthacht (km 585,9) 1960 zu einer Wasserspiegelstützung.

In diesem Abschnitt wurden bereits Ergebnisse zu den Sohlhöhenänderungen im Elbeverlauf genutzt, um die Methodik der Auswertungen von Wasserspiegeländerungen als Gradmesser der morphologischen Entwicklung darzustellen. Die Methodik und exemplarische Auswertungen der Peildaten, welche die Grundlage für die Ergebnisse zu den Sohlhöhenänderungen bilden, werden nachfolgend gezeigt.

3.2 Erfassung und Auswertung der Sohlhöhenänderungen

3.2.1 Methodik

Die Erfassung und Berechnung der Sohlhöhenänderung ermöglicht die direkte Analyse der Flussbettentwicklung. Dazu sind bei der WSV das Peilschiff „Domfelsen“ und das Messboot „Rosslau“ im Einsatz, welche in regelmäßigen Abständen flächenhafte Aufnahmen der Sohle erzeugen. Diese sind entweder aus einer Abfolge von Querprofilpeilungen erstellt oder aus der flächigen Aufnahme mittels Fächerecholot.

Die in dieser Untersuchung verwendeten Peilungen sind bis 2004, mit Ausnahme eines Peilabschnitts im Jahr 1998, alle als Querprofilpeilungen aufgenommen worden (s. Tab. 5). Diese Echolotdaten wurden überwiegend im Abstand von 100 m zwischen den Hektometern innerhalb der Fahrrinne aufgenommen. Seit 2004 konnten hochaufgelöste Flächenpeildaten verwendet werden. Teilweise erfassten die Peilungen einzelner Jahre dabei auch über die Fahrrinne hinausgehende Bereiche. Wegen der Vergleichbarkeit der Peilungen untereinander sind jedoch nur die Schnittmengen aller ausgewerteten Peilungen verwendet worden. Daraus ergaben sich Auswertepolygone von 50 m Breite und 100 m Länge, welche jedoch nicht die gesamte geschiebeführende Breite abdecken (s. Abb 8).

Diese Breite der beweglichen Sohle, welche sich aus dem Abstand zwischen den Buhnenfüßen errechnet, schwankt im oberen Abschnitt der dt. Binnenelbe bis El-km 140 von 65 m bis 185 m und durchströmt in der anschließenden Erosionsstrecke bis El-km 200 die engsten durchströmten Transportquerschnitte von ca. 85 m Breite. Von El-km 200 bis 350 steigt die morphologische Breite, mit Unstetigkeiten an Nebengewässermündungsbereichen und der Stromteilung bei Magdeburg, auf ca. 170 m an und stagniert dann bis zur Havelmündung, um nachfolgend bis zum Beginn der Elbe-Reststrecke um 210 m zu pendeln. Die Reststrecke (El-km 508-521) ist durch auffällig größere morphologische Breiten zwischen 235-250 m gekennzeichnet, welche dann stromab bis zur Stauwurzel des Geesthachter Wehres wiederum um 210 m Breite pendeln.

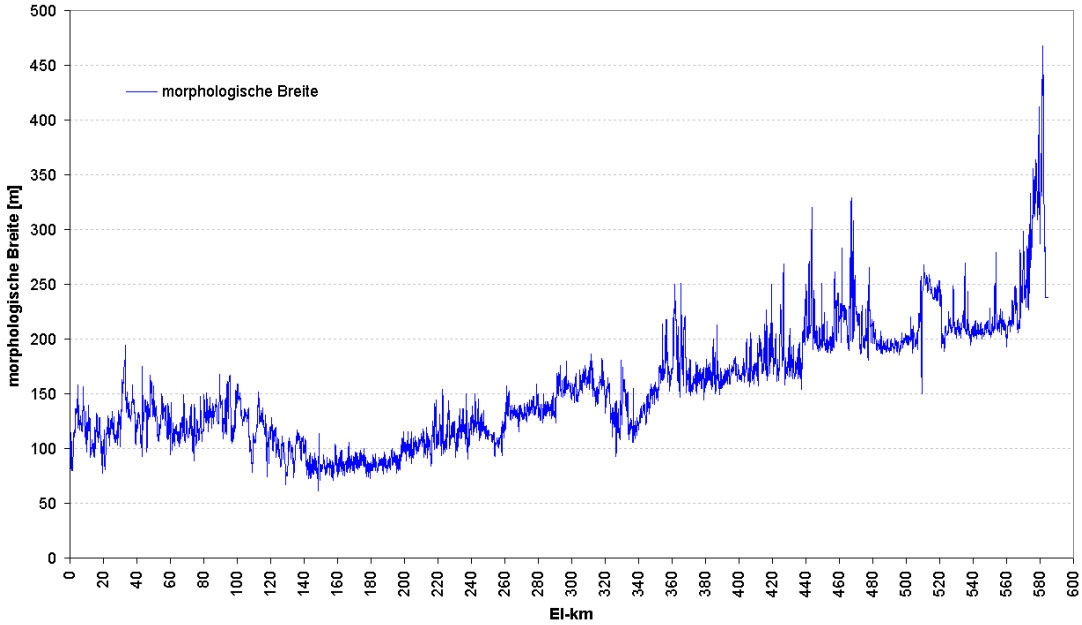


Abbildung 8: Morphologische Breite der Binnenelbe in [m].

Die aufbereiteten Peildaten, welche der BfG z.T. bereits in berechneten Gelände-Modellen übergeben wurden, sind für 10 km lange Flussabschnitte in die verwendete Peildatensoftware HYDAP eingelesen und plausibilisiert worden. Anschließend erfolgte die Datenbereinigung und –verdichtung sowie die Interpolation von Lücken, um daraus ein digitales Geländemodell (DGM) zu erzeugen. Bei der Auswertung von Querprofilpeilungen entsteht dabei kein gebietsabdeckendes digitales Geländemodell, sondern lediglich ein Modell mit Linien oder Streifen im Abstand der Querprofile (i.A. von 100 m), welches sich für die Echolotaufnahmen der ersten Epoche 1996 als sehr inhomogen in der Datenqualität herausstellte (s. Abb. 9). Dadurch sind die Daten dieser Jahre (Mischepoche 1993 bis 2000) mit größeren Unsicherheiten als die 2004er, 2009er oder 2010er Peildaten behaftet.

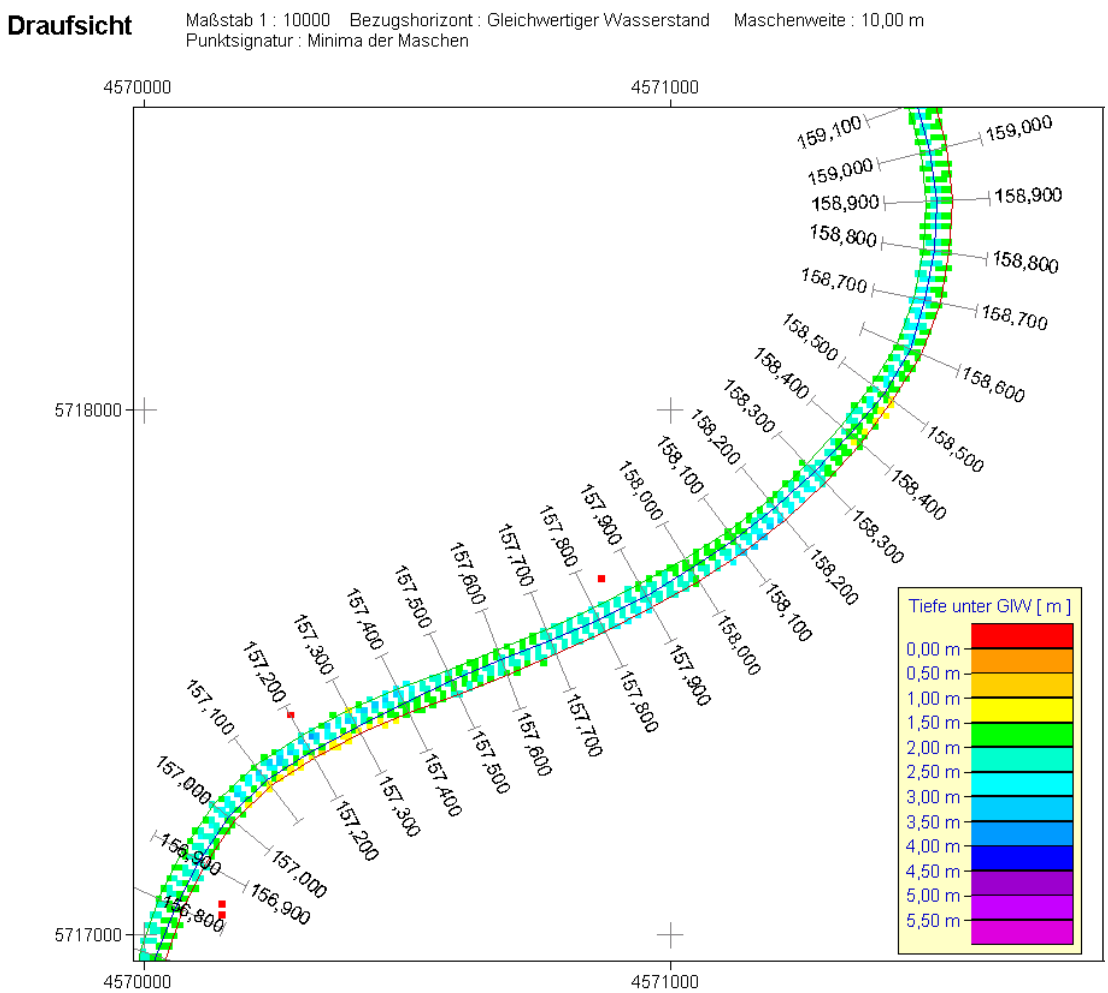


Abbildung 9: verwendete Querprofildatengrundlage des Jahres 1993 (Epoche 1996).

Bei der Auswertung der Peildaten des Jahres 2004 ließ sich hingegen eine gute Datenqualität erzeugen. Generell konnte mit der achsorientierten Modellierung und Verdichtung auch für die Linienpeilungen eine gute Qualität des digitalen Geländemodells erreicht werden, da der überwiegende Teil der Messdaten in regelmäßigen und ausreichend dichten Peilabständen von 50 bis 100 m vorlagen.

Anschließend erfolgte die Plausibilisierung und Qualitätsprüfung des erzeugten Modells anhand der gemessenen Querprofile (s. Abb. 10), wobei starke Ausreißer durch Profilausdünnungen eliminiert wurden, was jedoch nur selten der Fall war. In einem weiteren Arbeitsschritt generiert das Programm die mittleren Sohlhöhen im Hektometerabstand aus den zuvor definierten Auswertepolygonen mit 50 m Breite und 100 m Länge.

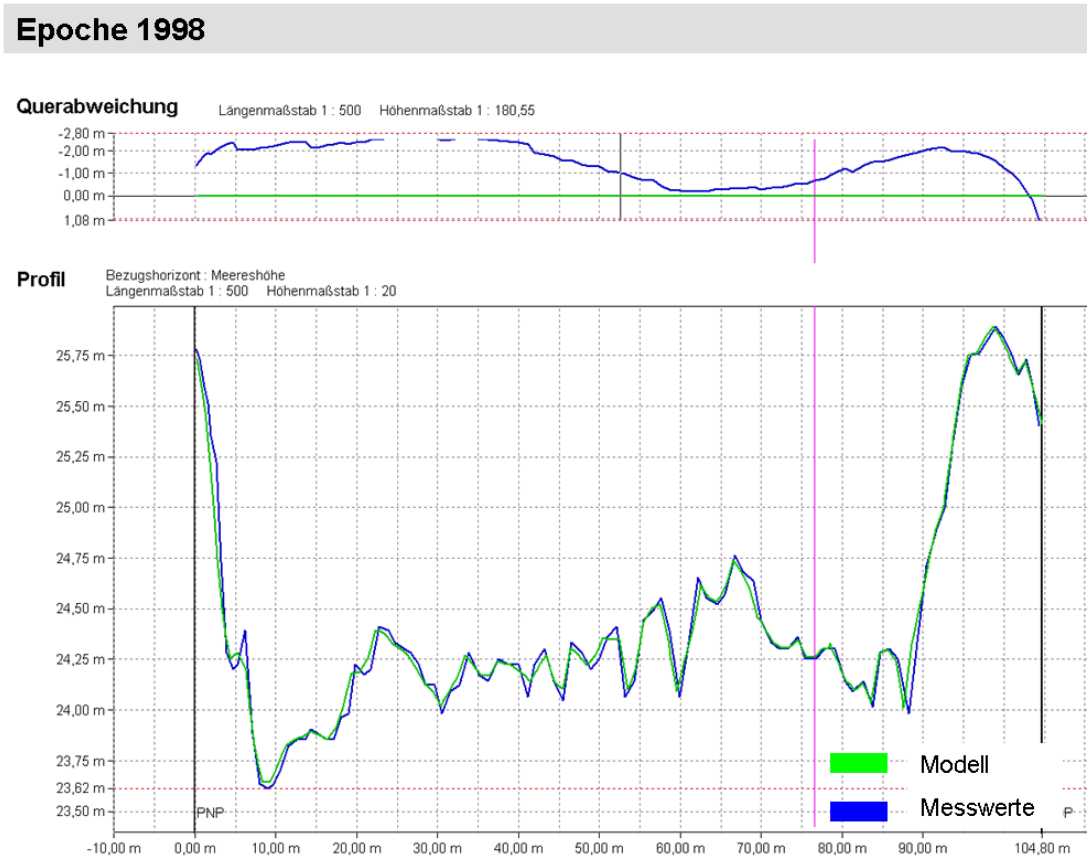


Abbildung 10: Plausibilisierung des erzeugten Geländemodells aus Echolotaufnahmen.

Infolge des Wechsels der Höhenreferenzsysteme enthalten die Daten ggf. Höhenfehler, da bisher nur für den Dresdener Amtsbereich bis El-km 290 Umrechnungshöhen zwischen den Höhensystemen bekannt sind. Für die Auswertung der Echolotaufnahmen wurden alle verwendeten mittleren Sohlhöhen soweit möglich in das Höhensystem (160) DHHN 92 als Referenzsystem umgerechnet, da dies für die vergleichende Betrachtung der Sohlhöhenunterschiede und Wasserstandsunterschiede erforderlich war. Dies erzeugte aus unterschiedlichen über die zurückliegenden Jahrzehnte verwendeten Höhensystemen einen einheitlichen Höhenbezug. Hierfür wurden die vom WSA Dresden bereitgestellten Umrechnungshöhen zwischen den Höhensystemen verwendet.

3.2.2 Datenlage

Die in den Untersuchungen der BfG verwendeten Echolotaufnahmen (s. Tabelle 5) wurden der BfG von den drei Wasser- und Schifffahrtsämtern Dresden, Magdeburg und Lauenburg, überwiegend im Zuge der Erstellung des 1D-Feststofftransportmodelles der dt. Binnenelbe im Jahr 2008 zur Verfügung gestellt.

Tabelle 5: Verwendete Peildaten.

Epoche	von Elbe-km	bis Elbe-km	Mess-system	Messdatum	verwendende Strecke	Lage-system	Höhen-system
1996	0,00	100,00	LP / QP	Feb/Mrz 2000	0-5; 10-84,9	LS 150	HS 160
1996	85,00	140,00	LP / QP	Jan/Feb/Mrz/Apr/Aug 1999 (Sep 1995, Jul/Sep 1996, Mai/Jun 1998)	85-140	LS 150	HS 160
1996	140,00	185,00	LP / QP	Jul/Sep/Okt/Nov/Dez 1993 (Sep 1996, Aug 1997)	140,7-184,0	LS 150	HS 160
1996	175,00	291,00	FP	Jan/Feb/Mrz/Apr/Mai 1998	184,1-186,4; 235,7-290,6	LS 150	HS 160
1996	185,10	235,60	LP / QP	Aug/Nov/Dez 1995	186,5-235,6	LS 150	HS 160
1996	267,50	271,00	LP / QP	Aug/Nov/Dez 1995	-	LS 150	HS 160
1996	323,00	471,00	LP / QP	Jun 1993	323-340; 434-471	LS 150	HS 100
1996	432,00	435,00	LP / QP	Jun/Aug 1998	432,9-433,9	LS 150	HS 100
1996	291,00	502,00	LP / QP	Jan/Feb/Okt/Nov 1995 (Dez 1994)	291-322,6; 350-432,8; 471,5-502,2	LS 150	HS 100
1996	340,00	350,00	LP / QP	Sep/Nov/Dez 1997	340-350	LS 150	HS 100
1996	305,00	345,00	LP / QP	Sep/Nov/Dez 1997	-	LS 150	HS 100
1996	549,39	572,20	LP / QP	1994	549,3-572,2	LS 100	HS 100
1996	572,31	585,60	LP / QP	1994	572,31-584,1	LS 100	HS 100
1996	584,11	585,74	LP / QP	1994	584,11-585,74	LS 100	HS 100
1996	502,30	549,30	LP / QP	1995	502,3-513,2; 523,9-549,3	LS 100	HS 100
1996	502,30	523,90	LP / QP	1996	513,2-523,9	LS 100	HS 100
2004	0,00	502,10	FP	Mai/Jun 2004	gesamt	LS 150	HS 160
2004	502,00	525,00	LP / QP	Feb/Mrz 2004	gesamt	LS 100	HS 160
2004	525,00	586,00	FP	Mai/Jun 2004	gesamt	LS 100	HS 160
2007	0,00	265,00	FP	Okt/Nov 2007	gesamt	LS 150	HS 160
2007	264,00	290,70	FP	Mrz/Apr 2007	265-290,7	LS 150	HS 160
2007	290,70	502,25	FP	Jan/Aug 2007	290,7-502,25	LS 150	HS 160
2007	502,00	586,00	FP	Jan/Feb/Mrz/Apr/Jun/ Jul 2007	502-586	LS 100	HS 160
2009	0,00	68,50	FP	Mai/Jun 2009	gesamt	LS 150	HS 160
2009	68,50	139,00	FP	Mai/Apr 2009	gesamt	LS 150	HS 160
2009	140,60	213,60	FP	Feb/Jul 2009	gesamt	LS 150	HS 160
2009	213,60	290,70	FP	Jul/Nov 2009	gesamt	LS 150	HS 160
2010	0,00	34,30	FP	Okt 2010	gesamt	LS 150	HS 160
2010	44,00	45,20	FP	Okt 2010	gesamt	LS 150	HS 160
2010	46,70	49,70	FP	Nov 2010	gesamt	LS 150	HS 160
2010	52,00	63,00	FP	Okt 2010	gesamt	LS 150	HS 160
2010	69,00	70,20	FP	Okt 2010	gesamt	LS 150	HS 160
2010	70,20	81,70	FP	Jun 2010	gesamt	LS 150	HS 160
2010	83,00	140,20	FP	Jun 2010	gesamt	LS 150	HS 160
2010	140,20	141,20	FP	Okt 2010	gesamt	LS 150	HS 160
2010	141,20	170,00	FP	Mai/Jun 2010	gesamt	LS 150	HS 160
2010	170,00	239,00	FP	Jul 2010	gesamt	LS 150	HS 160
2010	239,00	267,00	FP	Aug 2010	gesamt	LS 150	HS 160
2010	267,00	290,70	FP	Okt 2010	gesamt	LS 150	HS 160

3.2.3 Ergebnisse

Die Auswertung von Peildaten aus unterschiedlichen Zeiträumen (Epochen) konnte mit Hilfe der oben beschriebenen Vorgehensweisen für einen insgesamt etwa acht (1996-2004) bzw. vierzehn (1996-2010) Jahre umfassenden Zeitraum durchgeführt werden, wobei 2004 als Bezugszeitraum genommen wurde, da für das Jahr 2010 nur Daten im Amtsbereich des WSA Dresden bis ca. El-km 290 ausgewertet wurden. Die unterschiedlichen Erfassungsmethoden und Datengrundlagen wurden jeweils in Längsschnittdarstellungen zusammengeführt, um sie untereinander vergleichen zu können. Die wichtigste Längsschnittdarstellung ist die Auftragung der Differenzen der zwischen zwei Epochen ermittelten Sohlhöhen (s. Abb. 11).

Im Ergebnis kann für den gesamten Flusslauf der Elbe die chronologische Entwicklung der Sohlhöhe durchgängig aufgetragen und nachvollzogen werden. Hierbei wurde die farbliche Darstellung mit rot (Epoche 1996-2004) über blau (2009-2004) zu grün (2010-2004) verwendet, um vom historischen auf den jüngsten Betrachtungszeitraum zu kommen. Oberhalb der Nulllinie sind Anhöhungen der Sohle zu verzeichnen, im negativen Bereich wird Erosion repräsentiert.

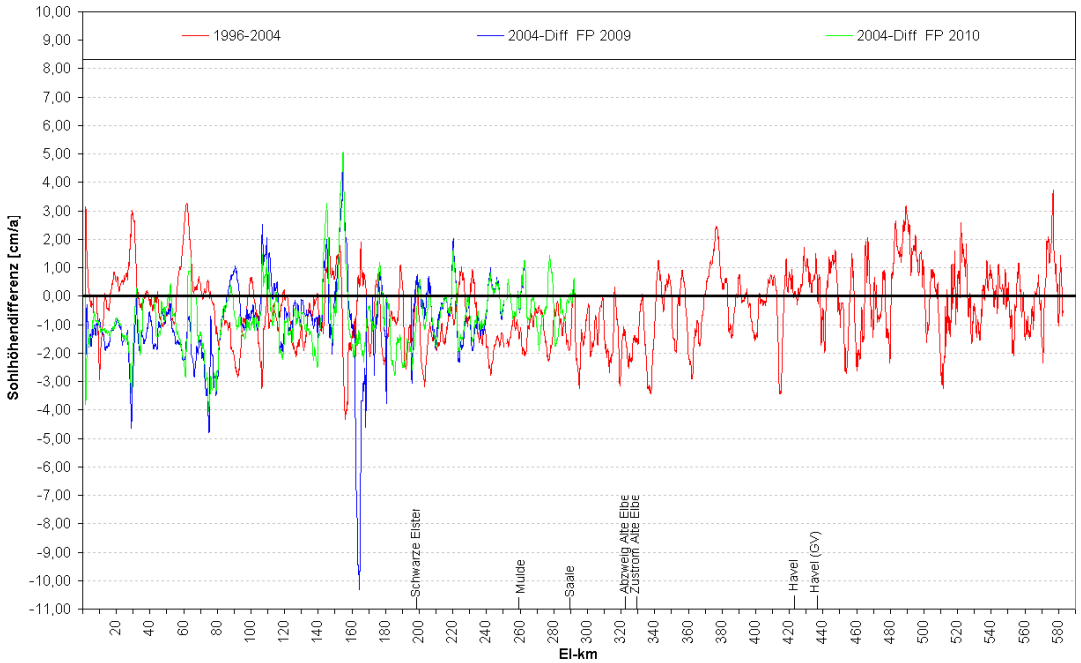


Abbildung 11: Sohldifferenzen verschiedener Elbepeilungen zum Bezugszeitraum 2004 in absoluter Höhenänderung [m] sowie relativ je Jahr [cm/a].

Diese Datengrundlage aus den Echolotdaten wird, unter Berücksichtigung der in Kap. 4 benannten Unsicherheiten, als belastbarste Grundlage für die Beschreibung der Gewässerbettentwicklung der Elbe angesehen.

Die Datengrundlage der Echolotaufnahmen der Gewässersohle kann weiterhin für die Beschreibung von Sedimenttransport und Flussbettentwicklung auch mittels des sogenannten „dune tracking"-Verfahrens genutzt werden.
Die BfG sichtet in Abstimmung mit der AG Hydrometrie bzw. Qualitätszirkel Gewässerkunde sowie mit den Dienststellen der WSV fortlaufend Neuentwicklungen im Bereich der gewässerkundlichen Messverfahren. Im Bereich der Gewässermorphologie werden Literaturstudien und Recherchen im internationalen Raum durchgeführt und gemeinsam mit den Amtsbereichen regelmäßig neue Verfahren in BWaStr. auf Robustheit und Einsatzreife in der Praxis getestet. In den aktuellen Berichten der BfG zu den Messverfahren zur Erfassung des Schwebstoffhaushaltes sowie der Geschiebe- und Sohluntersuchungen werden entsprechende Übersichten zum Stand der Technik gegeben (BfG, 2012d). Als alternatives Verfahren zur Erfassung des Geschiebetriebs insb. an Flüssen mit hohem Sandanteil wurde seit 2008 das Verfahren der Transportkörpermessungen mittels Echolotaufnahmen (dune tracking) fortlaufend erprobt und weiterentwickelt. Die BfG hat dieses Verfahren in Zusammenarbeit mit Universitäten (Utrecht und Aachen) und mit der Geodäsie im Referat M5 in verschiedenen Abschnitten der BWaStr. angewendet. Die Methodik kann insb. im Rheingau und am Niederrhein, in der Oder und im unteren Abschnitt der dt. Binnenelbe, wo Sand und Transportkörper in Form von Dünen dominieren, erfolgversprechend sein und ist in BfG (2011) detailliert dargestellt.

3.3 Transportmessungen

3.3.1 Methodik

Geschiebetransport- und Schwebstoffvielpunktmessungen werden an der Elbe mit dem WSV-Schiff „Elbegrund" durchgeführt. Der für die Geschiebemessungen verwendete BfG-Geschiebefänger (Abb. 12) ist eine Apparatur aus Geschiebefangkorb, Leitwerk, Zugvorrichtung, Fängermaul, Scheinwerfern und einer Unterwasserkamera. Das Gerät wird mittels Kran auf die Gewässersohle abgelassen, wobei die Kamera zur Überprüfung der korrekten Positionierung auf der Sohle und der in-situ-Beobachtung des Geschiebetransports dient. Der Fangkorb weist seit 1992 eine Maschenweite von 1,4 mm auf, wodurch einerseits die Strömung geringstmöglich beeinflusst werden soll und andererseits die Geschiebefracht möglichst vollständig aufgefangen werden soll. Die übliche Messdauer beträgt 3 Wiederholungen zu je 300 Sekunden je Messlotrechte, von denen 5 bis 10 innerhalb des Querschnittes an jeder Messstelle angeordnet sind. Durch Integration der gemessenen Transportraten in den Lotrechten über den Messquerschnitt wird der Gesamttransport [kg/s] ermittelt.

Die Schwebstofffracht wird über die Entnahme von Wasserproben in verschiedenen Tiefen an mehreren Messlotrechten zu je 4-5 Messpunkten im Querprofil ermittelt. Dabei wird je Messpunkt eine Probenmenge von 50 l über ein 0,063 mm Feinsieb

abgepumpt. Der Siebrückstand wird im Folgenden als suspendierter Sandanteil bezeichnet (Abb. 13). Mittels Filtration einer 5 l-Teilprobe wird der Anteil mit Korndurchmessern kleiner 0,063 mm bestimmt, beides wird über den Abflussquerschnitt integriert und zur Gesamtschwebstofffracht addiert.

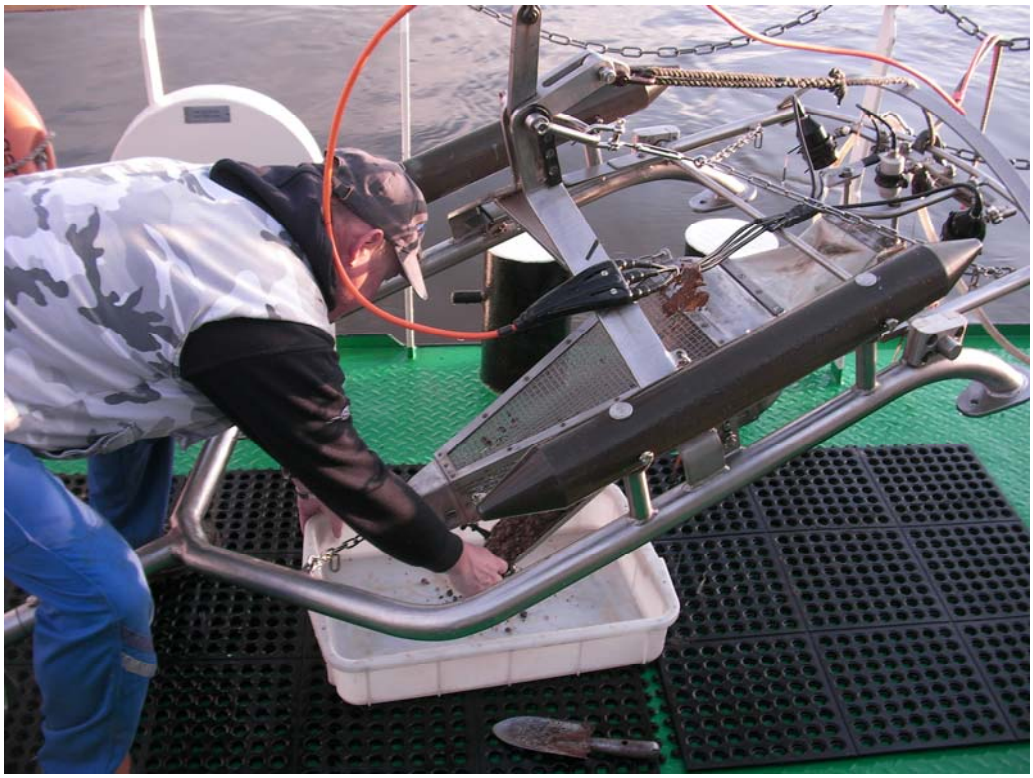


Abbildung 12: Entnahme einer Geschiebeprobe aus dem Geschiebefänger am 5.11.2009 an der Messstelle Vockerode.

Abbildung 13: Entnahmegerät für die Schwebstoffprobe (oberer Bildrand, unter Wasser) und Filtrierung des suspendierten Sandanteils (vorn) am 5.11.2009 an der Messstelle Vockerode.

3.3.2 Datenlage

Den folgenden Auswertungen liegen die Messungen der Jahre 1996 bis 2008 zugrunde. Der Auswertezeitraum ist zum einen durch die zur Verfügung stehenden Peilungen (Kapitel 3.2) begrenzt, mit denen die Transportmessungen, in Form der Sedimentbilanzierung, letztendlich verglichen werden (Kapitel 6). Zum anderen wurden Messungen vor 1996 nicht berücksichtigt, da diese aufgrund von Änderungen an der Messtechnik (Maschenweite, Kamera) nicht unbedingt vergleichbar sind. Für die Messzeiträume 1996 bis 2008, 2000 bis 2008 sowie 2004 bis 2008 werden jeweils Transport-Abfluss-Beziehungen für Geschiebe und suspendierten Sand aufgestellt. Zur weiteren Auswertung werden nur die Zeiträume verwendet, welche die in Kapitel 3.3.3 definierten Zuverlässigkeitskriterien erfüllen.

Tabelle 6: Übersicht der Anzahl der Messungen an den Transportmessstellen entlang der Elbe. Grün hinterlegt sind die Messstellen und –zeiträume, welche die definierten Zuverlässigkeitskriterien erfüllen.

Messstelle	Fluss-km	Anzahl Messungen Geschiebe			Anzahl Messungen suspendierter Sand		
		1996 - 2008	2000 - 2008	2004 - 2008	1996 - 2008	2000 - 2008	2004 - 2008
Pirna	34,8	7	2	0	17	11	8
Dresden	57,8	18	15	13	8	1	0
Mühlberg	126,6	32	20	15	34	15	7
Torgau	155	33	27	15	25	16	7
Mockritz	167,9	28	25	15	22	17	10
Pretzsch-Mauken	185	38	28	17	26	16	9
Wittenberg	214,8	41	34	18	27	19	9
Vockerode	245,6	25	25	18	15	15	11
Dessau 259	259	10	10	10	0	0	0
Dessau 260	260	10	10	10	0	0	0
Aken	275	43	32	21	30	19	11
Barby	294	31	23	16	26	15	9
Magdeburg 321	321	19	15	15	7	7	7
Magdeburg 324	324	23	20	16	13	9	6
Magdeburg 332	332	26	20	15	21	13	8
Niegripp	345,4	25	24	16	20	16	9
Tangermünde	388,8	35	26	18	8	8	7
Sandau	416,4	16	16	16	7	7	7
Wittenberge	456,6	30	24	17	20	16	6
Langendorf	500,6	40	23	16	20	12	8
Wilkenstorf	516,2	37	23	14	25	16	8
Neu Darchau	536,2	35	24	15	23	14	7
Calbe / Saale		24	16	15	29	14	5

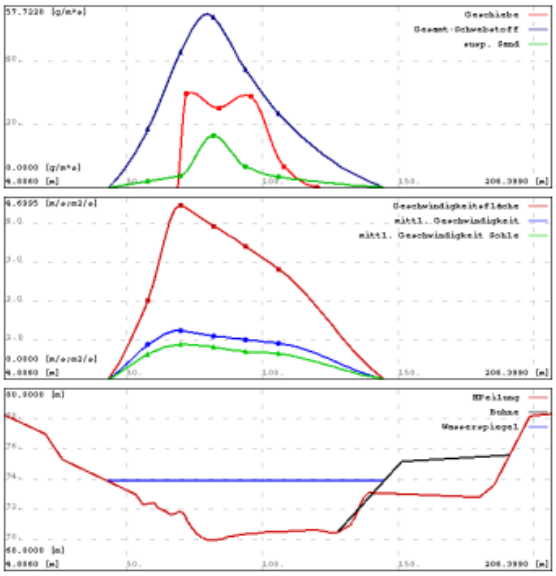
3.3.3 Ergebnisse

Beispielhaft für die 1566 verwendeten Transportmessungen der Jahre 1996 bis 2008 (grün hinterlegt in Tabelle 6) ist in Abb. 14 die Geschiebe- und suspendierte Sandtransportmessung am 25.11.2008 an der Messstelle Mockritz dargestellt. Die Ergebnisse der Messungen sind in der Datenbank SedDB der BfG gespeichert und unter der Adresse geoportal.bafg.de abrufbar.

Gewässer:		Messstelle:		Bezugspegel:	
Name:	Elbe	Name:	Mockritz	Name:	Torgau
Kennung:		Kilometer:	167.85 km	Kennung:	
		Uferbezug:	links	Kilometer:	154.60 km
				Nullpunkt:	74.99 m ü.NN

Bfg-Datenbank SedDB - http://geoportal.bafg.de/

Messnummer:	35
Datum:	25.11.2008
Beginn:	08:10
Ende:	13:30
Kilometer:	167.80 km
FGUE:	
Geschiebefänger:	BfG-Fänger neu grob
Hauptpeilung:	167.80 km
	02.01.2004
Messungspeilung:	nicht vorhanden
Durchfluss Q:	218 m^3/s
Wasserstand W:	142 cm
Wasserspiegel:	73.85 m ü.NN
Wasserspiegelgefälle IE:	0.20
mittl. Geschwindigkeit:	0.85 m/s
mittl. Geschw. Sohle:	0.53 m/s



Geschiebe:		Kornanalyse:				Schwebstoff-Vielpunktmessung:	
Anzahl Lotr.:	5	DM:	2.05 mm	D50:	1.17 mm	Anzahl Lotr.:	5
Geschiebetransport:	0.958 kg/s	SO:	2.24	D84:	3.00 mm	susp. Sandtransp.:	0.399 kg/s
GBreite:	52 m	SK:	1.31	D16:	0.60 mm	Schwebstofftransp.:	2.229 kg/s
GBreite von:	69 m	U:	2.85	D90:	3.80 mm	Schwebstoffkonz.:	10.226 g/m^3
GBreite bis:	121 m			D10:	0.52 mm		

Abbildung 14: Messergebnis der Geschiebe- und suspendierten Sandmessung am 25.11.2008 bei Mockritz.

Die Transportmessungen stellen die Grundlage der ermittelten Transport-Abfluss-Beziehungen dar.

Grundlage für die Sedimentbilanz (Kapitel 6) bilden die Geschiebe- und Schwebstoffmessungen der WSV. Mit Hilfe von Transport-Abfluss-Beziehungen werden durch die BfG Jahresfrachten berechnet. Die mit dem Geschiebefänger ermittelten Frachten umfassen Korngrößen zwischen 0,063 und 125 mm und werden im Folgenden als Geschiebefracht bezeichnet. Der Anteil der Suspensionsfrachten mit Korngrößen größer 0,063 mm wird im Folgenden als suspendierte Sandfracht, der Anteil kleiner 0,063 mm als Spülfracht bezeichnet. Letztere wird für die Bilanzierung nicht berücksichtigt, da diese Korngrößen an der Sohlkornzusammensetzung keinen Anteil haben und daher für die Sohlhöhenentwicklung nicht relevant sind.

Um aus den ermittelten Sedimenttransportdaten gesicherte Transport-Abfluss-Funktionen berechnen zu können, werden aus den Messstellen entlang der Elbe nur diejenigen ausgewählt, die

1. mehr als 10 Messungen für den jeweiligen Zeitraum aufweisen und
2. als Datensatz einen statistischen Signifikanztest (t-Test) erfüllen.

Darüber hinaus wird für die Geschiebemessungen verlangt, dass

3. Messungen bei Abflüssen vorhanden sind, die während 5 % eines Jahres überschritten werden (95 %-Fraktile der Abflussdauerlinie). Für die Messungen des suspendierten Sandes konnte wegen der allgemein guten Korrelation zwischen Transportmenge und Abfluss auf dieses Kriterium verzichtet werden.

Die Frachten der Messstellen und Auswertezeiträume, welche die drei genannten Anforderungen erfüllen (s. Tab. 6 in Kap. 3.3.2), werden im Folgenden als zuverlässig bezeichnet.

Der Geschiebetransport und der Transport des suspendierten Sandes werden getrennt ausgewertet, da sie unterschiedlich auf steigende Abflüsse reagieren. Im Unterschied zum vorhergehenden Bericht (BFG, 2004) wird hier der Zusammenhang zwischen Sedimenttransport und Abfluss für alle Messstellen durch Potenzfunktionen der Form

$$Q_s = a(Q - Q_{krit})^b \qquad \textbf{(1)}$$

beschrieben. Damit wird die Methodik aus der aktuellen Analyse des Sedimenttransports des Rheins (BfG, 2010b) übernommen. Q_s ist der Feststofftransport in kg/s, Q ist der Abfluss in m^3/s und a (kg/m^3) und b (-) sind Konstanten, die für jede Kurve berechnet werden. Q_{krit} als kritischer Abflusswert für den Bewegungsbeginn wurde in Anlehnung an Sauer (2000) zu Null angenommen. Diese Festlegung vereinfacht die Regressionsanalyse, da bei freier Anpassung aller Parameter an die Messwerte auch unrealistische, negative Werte für Q_{krit} resultieren können. Die physikalisch unzutreffende Annahme des Bewegungsbeginns bei $Q = 0$ stellt hingegen für die praktische Anwendung der Regression kein Problem dar, da im natürlich auftretenden Abflussspektrum keine Abflüsse nahe bei Null auftreten. Sie gibt hingegen auch die Beobachtung wieder, dass bei praktisch allen gemessenen Abflüssen ein wie auch immer geringer Sedimenttransport messbar ist, und ein Grenzwert für den Bewegungsbeginn für reale Fließgewässerbedingungen als unrealistisch angesehen werden muss.

Bei der Aufstellung der Transport-Abfluss-Funktionen müssen stark abweichende Messwerte, welche die Steigung der Kurve zu stark beeinflussen würden, eliminiert werden. Es wurden alle Messwerte, die mehr als die dreifache Standardabweichung von der Transport-Abfluss-Beziehung entfernt liegen, nicht berücksichtigt (Ausreißer).

Weiterhin muss berücksichtigt werden, dass es bei der Regression mit Hilfe von Potenzfunktionen mit zunehmender Standardabweichung zu einer systematischen Unterschätzung der Frachten kommt. Um die Frachten zu korrigieren sind verschiedene Korrekturverfahren in der Literatur beschrieben. Hier wird das Verfahren nach Duan verwendet. Hierbei wird die ermittelte Fracht mit einem Korrekturfaktor C erhöht, der sich berechnet zu

$$C = \frac{\sum e^{r}}{N} \qquad \textbf{(2)}$$

worin N die Anzahl der der Regression zugrunde liegenden Messwerte ist und r das Residuum der Einzelmesswerte, also die Abweichung von gemessenem und durch Formel (1) berechnetem Transport. Die Frachten M berechnen sich mit Formel (1) und (2) zu

$$M = C \sum_{t} Q_S(Q) \qquad \textbf{(3)}$$

worin t den einzelnen Jahren des Auswertezeitraumes entspricht. Die so ermittelten Jahresfrachten jeder Messstelle werden jeweils über den Auswertezeitraum gemittelt. Es werden Jahresfrachten für die Geschiebefracht sowie die suspendierte Sandfracht erstellt.

3.4 Korngrößen der Deckschicht

3.4.1 Methodik

Der Deckschicht als Kontaktzone von Strömung und Sohle kommt eine herausragende Bedeutung für die Flussbettentwicklung zu. Abpflasterungen, also Anreicherungen grober Komponenten, können als natürliche Reaktion des Gewässers auf ein Geschiebedefizit gewertet werden. Weiterhin ist die Deckschicht sowohl für die Rauheit der Sohle als auch für die Bereitstellung möglicher Geschiebefraktionen maßgebend. Die Veränderungen der Deckschichtkorndurchmesser müssen folglich für die Analyse des Gewässerzustandes quantifiziert werden.

Entlang der Elbe wurden in mehreren Kampagnen Beprobungen der Sohle durchgeführt. Da an der Elbe kein Taucherschacht zur Verfügung steht, werden Greiferproben von schwimmenden Geräten aus genommen. Diese haben den Nachteil, dass bei der Entnahme durch Auswaschung von Feinanteilen eine Verfälschung der Proben-

sieblinie möglich ist. Die Greiferproben wurden für unterschiedliche Tiefenschichten getrennt hinsichtlich der Kornzusammensetzung ausgewertet. Als Deckschicht wird im Folgenden die oberste separat erfasste Tiefenschicht bezeichnet. In den ausgewerteten Proben ist die entsprechende Schicht zwischen 10 cm (Kampagne 2006) und 20 cm (Kampagne 1993) mächtig.

3.4.2 Datenlage

Der Datensatz der letzten zwei Jahrzehnte enthält zwei zeitliche Schwerpunkte: Die umfangreichen Kampagnen der Jahre 1993 und 2006. 1993 wurde die komplette frei fließende Elbe oberhalb von Geesthacht im Abstand von maximal 50 km beprobt (BfG, 1994). Im Jahr 2006 erfolgte eine weitere Probennahme zwischen Elbe-km 0 und 312 mit Abständen von maximal ca. 10 km. Zusätzlich wurde im Rahmen eines Tracerversuchs in den Jahren 1996 und 1997 zwischen Elbe-km 138 und 170 eine lokale Erhebung mit engem räumlichen Raster durchgeführt.

3.4.3 Ergebnisse

Aus den einzelnen Proben wurde der geometrisch mittlere Korndurchmesser d_m bestimmt. Die Resultate sind in Abb. 15 dargestellt. Oberhalb von Torgau (Elbe-km 155) weisen die mittleren Korndurchmesser deutlich stärkere örtliche Schwankungen als unterstrom auf.
Ebenfalls sind die Absolutwerte der mittleren Korndurchmesser deutlich größer. In beiden Kampagnen 1993 und 2006 zeigt sich ein abnehmender d_m, der beispielsweise mit einer exponentiell fallenden Funktion angenähert beschrieben werden kann.

Im Betrag unterscheiden sich die in den Kampagnen 1993 und 2006 ermittelten mittleren Korndurchmesser oberhalb von Torgau jedoch deutlich. Die Abweichungen gehen auf methodische Unterschiede in der Auswertung zurück. Da die Originalproben nicht mehr vorhanden sind, lässt sich eine vergleichende Untersuchung zur Quantifizierung des Einflusses der Auswertemethodik nicht mehr durchführen. Exemplarisch kann jedoch anhand der fotografischen Aufnahmen der Proben gezeigt werden, dass eine so deutliche Vergröberung, wie sie aus dem zeitlichen Vergleich der mittleren Korndurchmesser zu folgern wäre, nicht stattgefunden hat (Abb. 16). Die Aufnahmen bilden den Bereich bei Elbe-km 35,0, 60 m von links bzw. Elbe-km 35,4, 54 m von links ab. Die entsprechenden geometrisch mittleren Korndurchmesser betragen 11,4 mm (1993) bzw. 31,4 mm (2006). Auf den fotografischen Aufnahmen ist jedoch zu erkennen, dass sich die Sohlkornzusammensetzung nicht wesentlich geändert hat. In beiden Zeiträumen sind große Steine mit Kantenlängen über 10 cm erkennbar, die

in einem Sand-Kies-Gemisch eingelagert sind. Der deutlich unterschiedliche mittlere Korndurchmesser der beiden Proben ist vermutlich maßgeblich durch das Weglassen der Grobkomponenten bei der Bestimmung des d_m in der Kampagne 1993 (BfG, 1994) begründet.

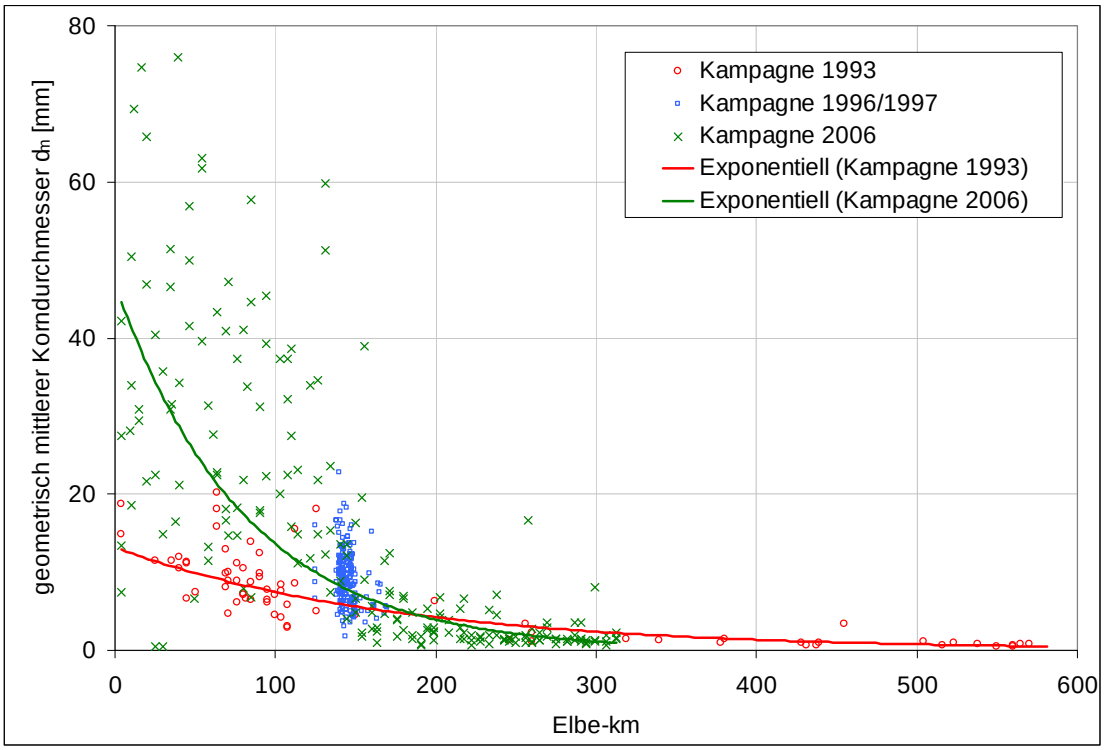


Abbildung 15: Mittlere Korndurchmesser der Deckschicht der Sohle 1993, 1996/1997 und 2006.

Abbildung 16: Fotografische Aufnahmen der Sohle 1993 am Elbe-km 35,0 (links) und 2006 am Elbe-km 35,4 (rechts).

3.5 Korngrößen des Untergrundes

3.5.1 Methodik

Zur Bestimmung der Korngrößenverhältnisse unterhalb der Deckschicht wurden Greiferproben nach Tiefenschichten getrennt ausgewertet. Darüber hinaus wurden Gefrierkerne genommen, die eine Beprobung in größeren Tiefen sowie eine detailliertere Zuordnung der Kornproben zur Tiefe ermöglichen.

3.5.2 Datenlage

In der Kampagne des Jahres 2006 zwischen Elbe-km 0 und 312 wurden im Abstand von maximal ca. 10 km Greiferproben in Tiefenschichten getrennt ausgewertet. Zwischen Elbe-km 150 und 250 wurden im Jahr 2007 Gefrierkernproben entnommen, die eine Unterscheidung von bis zu 5 Tiefenschichten bis in 1,5 m Tiefe ermöglichen.

3.5.3 Ergebnisse

Die mittleren Korndurchmesser der Greiferproben der Kampagne 2006, ausgewertet in den Tiefenschichten 0-0,1 m und 0,1-0,3 m, sind in Abb. 17 dargestellt. Trotz der großen Streuung der Einzelmesswerte lässt sich feststellen, dass oberhalb von Elbe-km 130 im Mittel etwa drei- bis viermal so große mittlere Korndurchmesser in der Schicht 0-0,1 m wie in der Schicht 0,1-0,3 m zu verzeichnen sind. Im Bereich um Torgau (Elbe-km 130-170) gleichen sich die mittleren Korndurchmesser der beiden Schichten allmählich an. Unterhalb von Elbe-km 170 ist zwischen den Tiefenschichten kein Unterschied der Korngrößen mehr feststellbar.

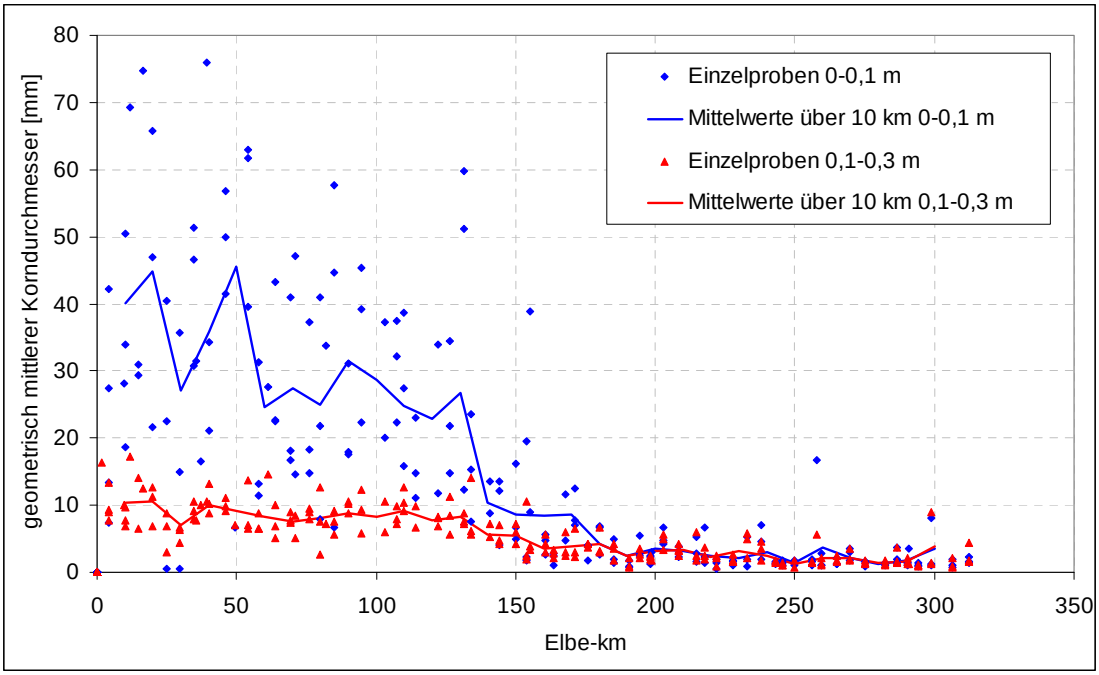


Abbildung 17: Mittlere Kornzusammensetzung der Sohle der Kampagne 2006 in den Tiefenschichten 0-0,1 m und 0,1-0,3 m.

Die Kampagne mit Gefrierkernproben aus dem Jahr 2007, welche im Bereich zwischen Elbe-km 150 und 250 durchgeführt wurde, kommt zum gleichen Ergebnis. Ein Zusammenhang von Korndurchmesser und der Tiefenschicht der Probe ist im Bereich der Gefrierkernbeprobung nicht feststellbar. Vielmehr kommen alle Korndurchmesser im gesamten Tiefenspektrum der Gefrierkerne vor (Abb. 18). Ein Beispiel zur Illustration ist in Abb. 19 gegeben, dass den 2007 entnommenen Gefrierkern bei Elbe-km 202 (140 m von rechts) zeigt. Hier ist zu erkennen, dass bis in 0,9 m Tiefe ein annähernd homogenes Gemisch mit Korngrößen bis Grobkies vorliegt. Darunter anschließend bis in 1,3 m Tiefe ist eine deutlich feinere Schicht mit Korngrößen im Sand- bis Feinkiesbereich festzustellen, bevor in 1,3 bis 1,5 m Tiefe nochmals eine Lage Sedimente im Grobkiesbereich in einer feineren Matrix ansteht.

Die Abfolge gröberer und feinerer Schichten im Untergrund der Elbe ist durch die eiszeitliche Entstehung der Elbtalablagerungen begründet. Im Bereich zwischen Dessau und Riesa kam es während des Elsterglazials (vor 400.000 bis 320.000 Jahren) zu einer Ausschürfung durch Inlandeis, welche im Torgauer Gebiet bis auf das Niveau 30 bis 10 m über NN hinabreicht. Diese Wanne wurde nach Rückgang der Vergletscherung im Spätelsterglazial durch überwiegend rollige fluviatile Sedimente aufgefüllt. In der nachfolgenden Saale-Eiszeit kam es zur weiteren Aufschüttung von bis zu 10 m Mächtigkeit, während es in der letzten Vereisungsperiode (Weichselglazial) zur zeitweisen Erosion bis in die saaleglazialen Ablagerungen kam. Im Holozän (seit etwa 12.000 Jahren) wurden die eiszeitlichen Ablagerungen durch seitliche Erosion

umgelagert, es kam jedoch zu keiner wesentlichen Tiefenerosion. Die warmzeitliche Elbe weist als natürliche Grundrissform überwiegend migrierende Mäander auf, wobei stellenweise sowohl durch Bänke mehrfach gegliederte als auch wenig migrierende Abschnitte vorkommen. Sie weist ein ausgeglichenes Verhältnis von Erosion und Sedimentation auf. Die rezenten Ablagerungen sind daher quantitativ von untergeordneter Bedeutung. In den letzten 12.000 Jahren kam es vorwiegend zur Umlagerung glazialer Sedimente innerhalb überdimensionierter eiszeitlicher Täler. Ständige Laufverlagerungen führten zu einer innerhalb der Talfläche sowie auch vertikal relativ homogenen Mischung abgelagerter Korngrößen, die jedoch auch teilweise Abschnitte feinerer (längerfristige Depositionszone) und gröberer Komponenten (Ergebnis der Einwirkung höherer Strömungsbelastungen über längere Zeiträume) enthält (vgl. Abb. 19).

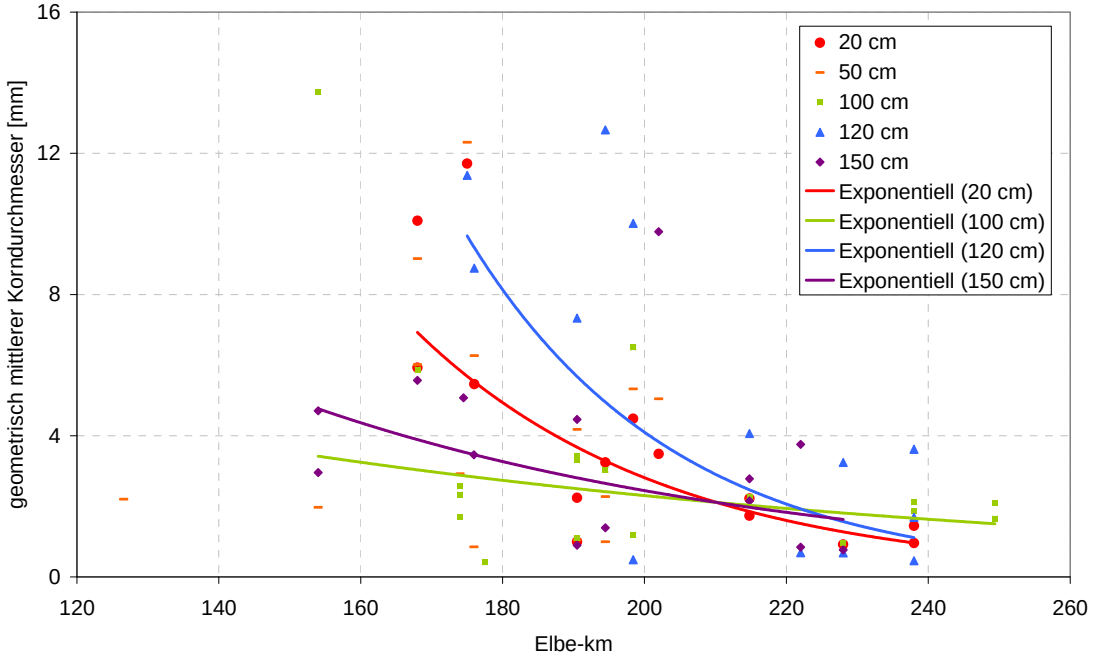


Abbildung 18: Mittlere Korndurchmesser unterschiedlicher Tiefenschichten der Gefrierkernproben aus dem Jahr 2007.

Abbildung 19: Gefrierkernprobe bei Elbe-km 202,0 aus dem Jahr 2007.

3.6 Porosität

Eines der Standardprobleme in der Flussmorphologie ist die Umwandlung von Sedimentvolumina in Sedimentmassen und umgekehrt. Die Erstellung von Sedimentbilanzen zum Beispiel ist nur möglich, wenn alle Eingangsdaten die gleichen Einheiten besitzen. Meistens ist das nicht der Fall und werden Sedimentationsmengen volumetrisch aus Peildaten bestimmt, während Sedimenttransportraten in Masseneinheiten aus Transportmessungen bestimmt werden.

Die Umrechnung von Volumina in Massen setzt die Kenntnis der Lagerungsdichte der Sedimente voraus (ρ_L, kg/m³). Die Lagerungsdichte ist die Dichte einer porösen Sedimentmischung einschließlich der Porenräume. Sie wird berechnet als das Verhältnis der Masse der Sedimentpartikel zum eingenommenen Lagerungsvolumen. ρ_L ist abhängig von der Trockenrohdichte der konstituierenden Mineralien (ρ_R, kg/m³) und der Porosität der Mischung (n, -), wobei letzteres das Verhältnis des Porenvolumens zum Gesamtvolumen darstellt. Obwohl es möglich ist ρ_L direkt zu messen oder vorherzusagen (z.B. Verstraeten & Poesen, 2001), ist es besser, die Lagerungsdichte aus ihren grundlegenden Bestandteilen zu rekonstruieren:

$$\rho_L = (1-n)\ \rho_R. \qquad (1)$$

Die räumliche Variation in ρ_R innerhalb eines Flusssystems ist oft gering und es ist eine allgemein akzeptierte Praxis, ρ_R mit der Dichte von Quarz (2650 kg/m^3) gleichzustellen, wenn die Lithologie unbekannt ist. Die Bestimmung von n ist viel schwieriger, da die Porosität in der Natur sehr variabel ist (Bereich 0,0-1,0).

Zur Bestimmung der Porosität der Gewässersohle im Niederrhein wurden zwei Methoden angewandt: 1) rechnerische Abschätzung und 2) Naturmessungen.

3.6.1 Methodik

In den letzten Jahrzehnten wurde mehrmals postuliert, dass die Porosität auf Grund der Korngrößenverteilung der Sedimentmischung abgeschätzt werden kann. Es wurden verschiedene Porositätsprädiktoren entwickelt, variierend von rein empirischen Methoden (z. B. Carling & Reader, 1982; Wu und Wang, 2006; Wooster et al., 2008; Peronius & Sweeting, 1985) zu theoretischen Modellen (z. B. Yu & Standish, 1991). Bis vor kurzem hat keine dieser Methoden ihren Weg in die Praxis gefunden, wahrscheinlich, weil unabhängige Beweise für die Richtigkeit der korngrößenbasierten Porositätsvorhersage für natürliche Sedimente noch fehlen.
Im Rahmen der Forschungskooperation zwischen der Bundesanstalt für Gewässerkunde und der Universität Utrecht wurden in den Jahren 2008 und 2009 Labor- und Naturmessungen der Porosität durchgeführt, um die existierenden Porositätsprädiktoren zu validieren. Bei den Naturmessungen kam das Taucherglockenschiff des Wasser- und Schifffahrtsamts Duisburg-Rhein zum Einsatz. Diese Untersuchungen haben gezeigt, dass die vorhandenen empirischen Porositätsprädiktoren für den Rhein nicht geeignet sind. Der theoretische Prädiktor von Yu und Standish (1991) liefert relativ zu den anderen Prädiktoren bessere Porositätsschätzungen, zeigt aber eine Tendenz zu einer systematischen Unterschätzung der Porosität. Deshalb wurde ein semi-empirischer Porositätsprädiktor entwickelt (Frings et al. 2011):

$$n = 0{,}362 - 0{,}088\sigma_g + 0{,}219 f_{<0{,}5} \qquad (r^2 = 0{,}50,\ \mathrm{RMSE} = 0{,}06) \qquad (2)$$

mit $f_{<0,5}$ der Anteil der Körner kleiner 0,5 mm (-) und σ_g die geometrische Standardabweichung der Korngrößenverteilung (-), ausgedrückt auf der φ-Skala. Die Anpassungsgüte von Gl. 2 wird mithilfe des Bestimmtheitsmaßes (r^2) und der Wurzel aus der mittleren quadratischen Abweichung (*RSME*) angegeben. Die Formel zur Bestimmung von σ_g lautet:

$$\sigma_g = \sqrt{\sum f_i \left(\varphi_i - \sum f_i \varphi_i\right)^2} \qquad (3)$$

mit f_i dem Anteil des Sediments in der Korngrößenklasse i (-) und φ_i dem charakteristischen Sedimentdurchmesser der Korngrößenklasse i auf der φ-Skala (-). φ wird, laut Krumbein (1934), berechnet als:

$$\varphi = -\log_2 (D_i/D_{ref}) \qquad (4)$$

mit D_i dem charakteristischen Korndurchmesser der Korngrößenklasse i (m) und D_{ref} dem Referenzdurchmesser (0,001 m).
Eine höhere Standardabweichung (σ) impliziert eine breitere Korngrößenverteilung und damit eine größere Wahrscheinlichkeit, dass die feinen Körner Poren zwischen den groben Körnern besetzen, wodurch die Porosität abnimmt (daher das Minuszeichen vor σ). Ein höherer Gehalt an feinen Körnern ($f_{<0,5}$) führt zu Adhäsions- und

Flokkulationseffekten, die einen erhöhenden Einfluss auf die Porosität haben (daher das positive Vorzeichen vor $f_{<0,5}$).
Für alle 2927 Kornverteilungen der Unterschicht des Niederrheins aus dem Zeitraum 1992-2010 wurden zuerst die Werte für $f_{<0,5}$ und σ bestimmt. Dasselbe wurde für Kornverteilungen aus dem niederländischen Teil des Rheins durchgeführt. Mit diesen Werten wurde dann für jede Kornverteilung die zugehörige Porosität anhand des eingeführten Prädiktors berechnet. Die Ergebnisse wurden pro Querprofil gemittelt.

Porositätsmessungen
Zusätzlich zu den Porositätsberechnungen wurden im April 2011 im unteren Niederrhein auch Porositätsmessungen durchgeführt. Bei diesen Messungen wurden sowohl das Volumen der Feststofffraktion (V_f, m³) als auch das Lagerungsvolumen (V_L, m³) bestimmt, um die Porosität (=1-V_f/V_L) ermitteln zu können. Wichtig dabei ist, dass das Lagerungsvolumen vor Ort an der Messstelle bestimmt wurde, und nicht später in einem Labor, da es im Labor schwierig ist die ursprüngliche Sedimentlagerung nachzubilden.
Die klassische Methode zur Bestimmung des in-situ Lagerungsvolumens (basierend auf ASTM, 1994) beinhaltet die Entnahme einer Sedimentprobe, die Abdeckung des Probenlochs mit einer Kunststofffolie und die Bestimmung der Wassermenge, die benötigt wird, um das Loch bis zum Rand zu füllen. Diese Methode ist jedoch zeitaufwendig und fehleranfällig, weil spitze Körner zu Löchern in der Folie und daher zu einer Unterschätzung der Porosität führen können (Frings et al., 2011b).
Deshalb wurde im Rahmen dieses Projekts eine neue Methode zur Bestimmung des in-situ Lagerungsvolumens entwickelt. Die Methode basiert auf dem Streifenprojektionsverfahren, das manchmal auch als Streifenlichttopometrie bezeichnet wird. Ein Streifenprojektionsscanner besteht aus einem Musterprojektor, der vom Prinzip einem Diaprojektor ähnelt, und einer digitalen Videokamera. Der Projektor beleuchtet das Messobjekt zeitlich sequenziell mit Mustern von parallelen hellen und dunklen Streifen unterschiedlicher Breite. Die Kamera registriert das projizierte Streifenmuster unter einem bekannten Blickwinkel zur Projektion. Für jedes Projektionsmuster wird mit der Kamera ein Bild aufgenommen. Aus der von der Topographie des Objekts verursachten Verzerrung des Projektionsmusters können so präzise die Koordinaten des Messobjekts bestimmt werden. Der eingesetzte 3D-Streifenprojektionsscanner ist in der Lage, die Topographie des Messlochs mit einer vertikalen Ungenauigkeit von weniger als 0,2 mm zu bestimmen, was zu einer erheblichen Verringerung der Unsicherheit des Lagerungsvolumens im Vergleich zur klassischen Methode führt.
Insgesamt wurden 47 Porositätsmessungen an 10 Fließquerprofilen zwischen Rhein-km 800 und Rhein-km 880 durchgeführt. Um ungestörte Porositätsmessungen unterhalb der Wasseroberfläche zu ermöglichen, wurde das Taucherglockenschiff des WSA Duisburg-Rhein eingesetzt (Abb. 20). An jeder Messstelle wurde zuerst die eventuelle Deckschicht entfernt, da die Mächtigkeit der Deckschichtsedimente (0 bis 10 cm Tiefe) für zuverlässige Porositätsmessungen zu gering war.

Abbildung 20: Taucherglockenschiff Carl Straat (Frings).

Danach wurde ein Metallrahmen mit einer quadratischen Kunststoffbasis von 100 x 100 cm auf den Unterschichtsedimenten fixiert (Abb. 21). Der 3D Streifenprojektionsscanner wurde etwa 190 cm über der Sohle auf dem Rahmen installiert und nach einer kurzen Kalibrierung wurde die Topographie der Sohle gemessen. Im Gegensatz zu den Spezifikationen des Herstellers schien der Scanner nicht in der Lage zu sein, die gesamte Messstelle auf einmal zu messen. Deshalb wurden überlappende Scans vom linken und rechten Teil der Messstelle gemacht (beide ca. 70 x 95 cm groß). Nach Entfernung des Scanners wurde ein 13-37 cm tiefes Loch in der Mitte der Messstelle exkaviert (Abb. 22). Um einen Zusammenbruch der Seiten zu verhindern nahm der Durchmesser von etwa 75 cm an der Oberseite auf etwa 40 cm an der Basis ab. Danach wurde der Scanner wieder auf den Rahmen gestellt, um die Höhenlage des linken und rechten Teils des Messlochs (Aushub) zu ermitteln (Abb. 21).
Das Sediment aus dem Aushub wurde vor Ort gewogen. Etwa ein Drittel wurde an das Labor verschickt. In der Versuchshalle wurde das Sediment in einem Trockenschrank (105^0C) 24 bis 48 Stunden getrocknet und danach erneut gewogen, um die Trockenmasse der Sedimente (M_t, kg) zu bestimmen. Anschließend wurde das Sediment mit einem 0,5-φ Siebsatz (mit Sieben zwischen 0,063 und 125 mm) gesiebt und die Kornverteilung festgestellt. Wegen der hohen Sedimentmassen (50-60 kg) und der geringen Siebverluste (in der Regel unter 0,5 % der gesamten Probemasse) sind die resultierenden Korngrößenverteilungen als zuverlässig anzusehen.

Abbildung 21: 3D Streifenprojektionsscanner (oben) und Metallrahmen mit quadratischer Kunststoffbasis zur Porositätsmessung im Taucherglockenschiff (unten) (Frings).

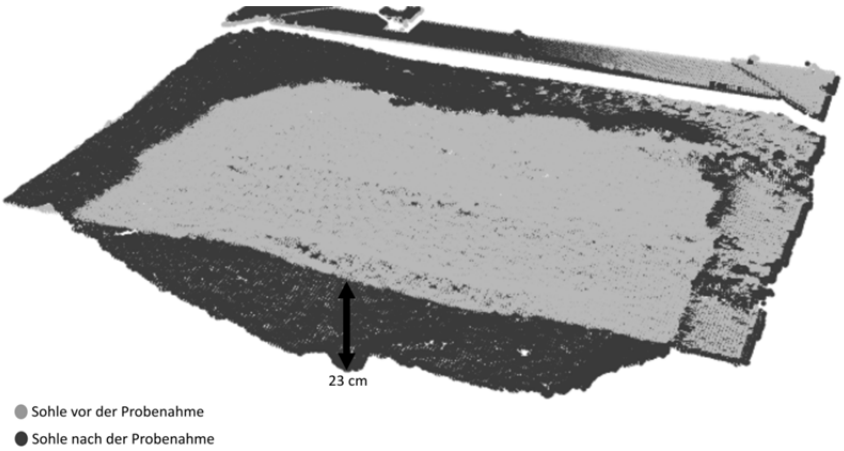


Abbildung 22: Beispiel eines Messlochs zur Bestimmung der Porosität. Dargestellt ist die Hälfte des Lochs.

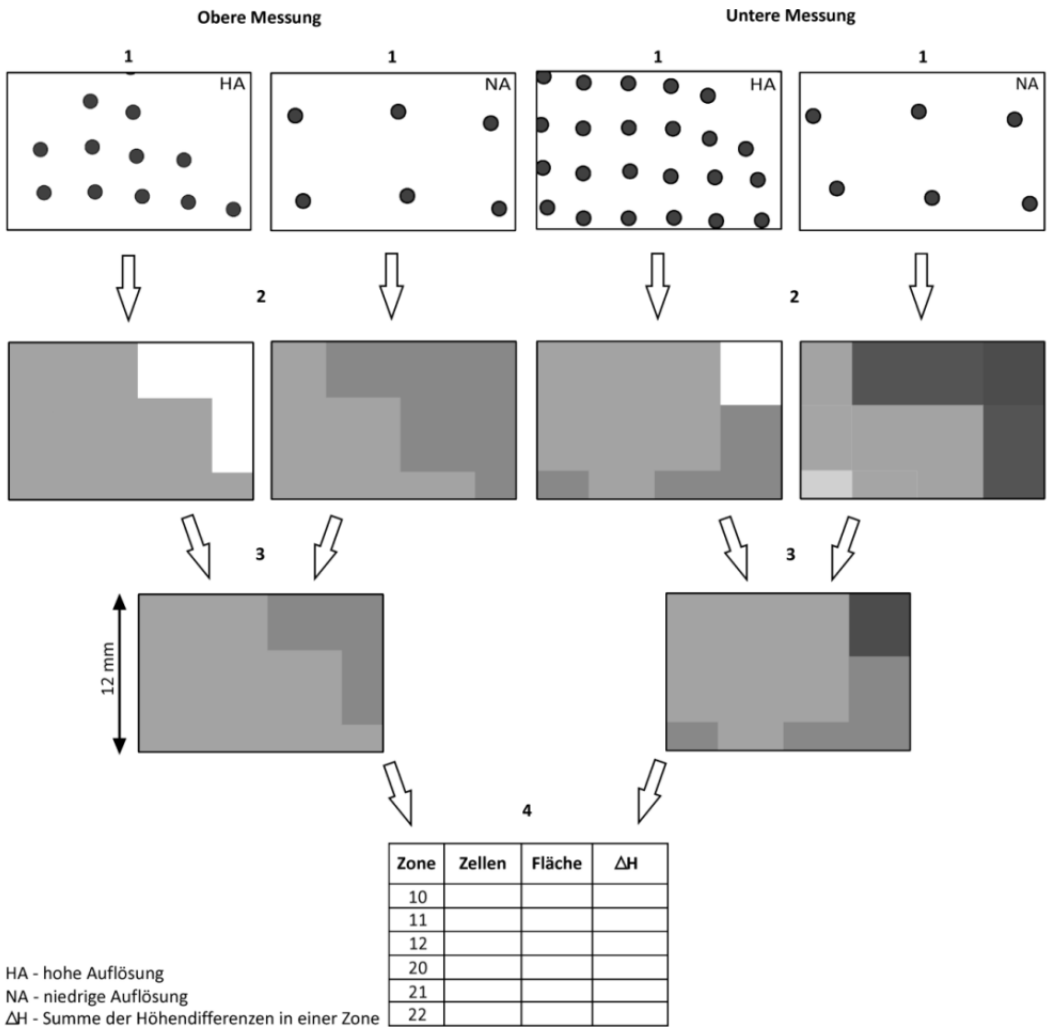


Abbildung 23: Schematischer Aufbau des Arbeitsablaufs zur Auswertung der Sohlscans einer Seite: 1 mit dem Streifenprojektionsscanner aufgenommene Punktdaten, 2 Umwandlung der Punktdaten in Raster, 3 Überlagerung der no Data-Werte im hochaufgelösten Raster mit den Werten aus dem niedrig aufgelösten, 4 Auswertung in Form einer Tabelle.

Die Sedimente wurden nach dem Sieben in einen zylinderförmigen Behälter mit bekanntem Wasservolumen mit Wasser gesättigt. Durch Klopfen gegen die Behälterwände wurden alle Luftblasen entfernt. Die Trockenrohdichte der Feststofffraktion (ρ_R) wurde wie folgt bestimmt:

$$\rho_r = \frac{(M_{bws} - M_{bw})}{V_{ws} - (M_{bw} - M_b)/\rho_w} \qquad (5)$$

mit M_{bws} der Gesamtmasse von Behälter, Wasser und Sedimenten (kg), M_{bw} der Masse des mit Wasser gefüllten Behälters vor der Zugabe der getrockneten Sedimente (kg), V_{WS} dem Gesamtvolumen von Wasser und Sediment im Behälter (m^3), M_b der Masse des Behälters (kg), und ρ_w der Dichte von Wasser (1000) (kg/m^3).

Danach wurde das in-situ Lagerungsvolumen als Produkt der Fläche und mittleren Tiefe des Messlochs bestimmt. Die mittlere Tiefe folgte aus dem Vergleich der

Sohlscans vor und nach der Probenahme (Abb. 22). Hierzu wurden zunächst aus den mit dem Streifenprojektionsscanner aufgenommenen Punkthöhen Raster berechnet. Die Sohlscans liegen für jede Messstelle in einer hohen und einer etwas niedrigeren Auflösung vor. Die hochaufgelösten Scans bilden die Sohle sehr genau ab. Sie haben jedoch den Nachteil, dass an einigen Stellen keine Punkte aufgenommen wurden und die Sohle deshalb nicht flächendeckend erfasst wurde. Somit hat das berechnete Raster an diesen Stellen Löcher. Bei den aus den niedrigaufgelösten Scans berechneten Rastern stellte sich dieses Problem nicht. Um ein durchgängiges Raster der Oberfläche zu erhalten wurden die Raster aus niedriger und hoher Auflösung zu einem neuen Raster verschmolzen (Abb. 23). Dabei wurden vorrangig die Zellwerte aus dem hochaufgelösten Raster verwendet und nur wenn kein Zellwert vorlag die Werte des niedrigaufgelösten Rasters verwendet. Zum Schluss wurde die mittlere Tiefe des Messlochs ermittelt, indem das verschmolzene Raster vor der Probenahme von dem verschmolzenen Raster nach der Probenahme abgezogen wurde. Die Ergebnisse wurden in einer Tabelle ausgegeben (Abb. 23.4). Nachdem dieses Verfahren separat sowohl für den linken und rechten Teil der Messstelle durchgeführt wurde, wurden die erhaltenen Werte kombiniert um das gesamte Lagerungsvolumen zu erhalten. Das Volumen der Feststofffraktion, die aus dem Messloch entnommen wurde (m^3), wurde dann berechnet über:

$$V_f = \frac{M_t}{k_p \rho_r} \tag{6}$$

mit M_t der Trockenmasse der Sedimente aus dem Messloch, die in die Versuchshalle transportiert wurden (kg) und k_p dem Anteil der gesamten Probe, die in die Versuchshalle transportiert wurde (-).

Die Überprüfung des Datensatzes zeigte, dass sich fast alle berechneten Porositätswerte in einem realistischen Bereich befanden. Vier Messungen wurden als Ausreißer gekennzeichnet und in weiteren Auswertungen außer Betracht gelassen, weil sie unrealistische Porositätswerte (> 0,55 oder ≤ 0,0) aufwiesen.

3.6.2 Ergebnisse

Aus der rechnerischen Abschätzung der Porosität ergab sich für den Niederrhein eine mittlere Porosität von 0,18. Obwohl die Porositätswerte eine starke Streuung aufweisen, ist eine gleichmäßige Zunahme der Porosität bis Rhein-km 840-850 zu beobachten. Ab dort steigt die Porosität abrupt von etwa 0,20 auf etwa 0,30. Im niederländischen Teil des Rheins liegt die Porosität im Durchschnitt bei 0,30.

Die Porositätsmessungen im unteren Niederrhein bestätigen das Bild von relativ niedrigen Porositätswerten, die in der Nähe zur deutsch-niederländischen Grenze zunehmen (Rhein-km 867). Auch hier streuen die Porositätswerte stark (Bandbreite 0,06-0,45), nichtsdestotrotz ist aber eine Porositätszunahme von 0,20 auf 0,30 wahrzunehmen. Die Zunahme ist weniger abrupt als bei den berechneten Porositätswerten.

Wo die Porosität starke Variationen zeigt, weisen die Messungen der Trockenrohdichte kaum Variationen auf. Der Mittelwert liegt bei 2603 kg/m^3.
Aus den gemessenen und berechneten Porositäts- und Trockenrohdichtewerten ergibt sich für den Niederrhein als Ganzes eine mittlere Schüttdichte von etwa 2,0 t/m^3. An der deutsch- niederländischen Grenze liegt die mittlere Schüttdichte bei etwa 1,8 t/m^3. Im oberen Bereich der untersuchten Flussstrecke (etwa Rhein-km 800-845) weisen die Unterschichtsedimente eine bimodale Kornverteilung, mit einem schmalen Sand-Modus, einem breiten Kies-Modus und kaum dazwischenliegenden Sedimenten auf. Im unteren Bereich sind die meisten Kornverteilungen immer noch bimodal, obwohl es hier auch unimodale Kies- und unimodale Sandverteilungen gibt. Wird die Variation der Korngrößen nach Unterstrom betrachtet, fallen eine Abnahme des Kiesgehalts und starke Zunahme des Sandgehalts auf.

Die für den Niederrhein berechneten Porositätswerte stimmen mit den auf Basis anderer Methoden berechneten Werten (z.B. Frings et al. 2008, Frings et al. 2011b) überein. Auch frühere Messungen der Porosität im Rhein (Frings et al. 2011a) wiesen ähnliche Werte auf.
Die Elbe weist für den Geschiebetrieb und die Sohlzusammensetzung sehr vergleichbare Verhältnisse der Korngrößen und –verteilungen auf (von Kies bis Sand-dominiert). Die Berechnung der Sedimentdichte ausgehend von den Korngrößenzusammensetzungen der Elbsohle führt zu der Darstellung der beiden Schichten (die oberen 10 cm und Schicht der darunterliegenden 20 cm) im Längsverlauf (s. Abb. 24). Hieraus wird im Folgeschritt die Porosität errechnet (s. Abb. 25). In Übereinstimmung mit den Auswertungen der Korngrößen (s. Kap. 3.5 Abb. 17 u. 18) wird jeweils für die Bereiche unterstrom Elbe-km 170 die gute Übereinstimmung der beiden Kurven für die Deck- und die Unterschicht wiedergefunden. Die Porosität bzw. Sedimentdichte ist weiterhin relevant für die Sedimentbilanzierung (s. Kap. 6). Die Dichte in t/m³ geht jeweils in die Bilanzierung ein, wenn aus Transportmessungen Rückschlüsse auf an der Sohle bewegte Massen bzw. Volumen- oder Sohlhöhenveränderungen gezogen werden sollen oder, wenn anhand von Peilungen ermittelte Volumen- oder Sohlhöhenänderungen in Frachten umgerechnet werden sollen. Entscheidend für diese Umrechnung ist die Sedimentdichte der Untergrundschichten, da davon ausgegangen wird, dass sich bei ständiger Überströmung der Sohle eine vergleichbare Deckschicht über den Untergrundschichten bildet, unabhängig davon, ob dort Sedimentation oder Erosion stattgefunden hat. Änderungen treten also in der Unterschicht auf, die darüberliegende Deckschicht ist davon unberührt.

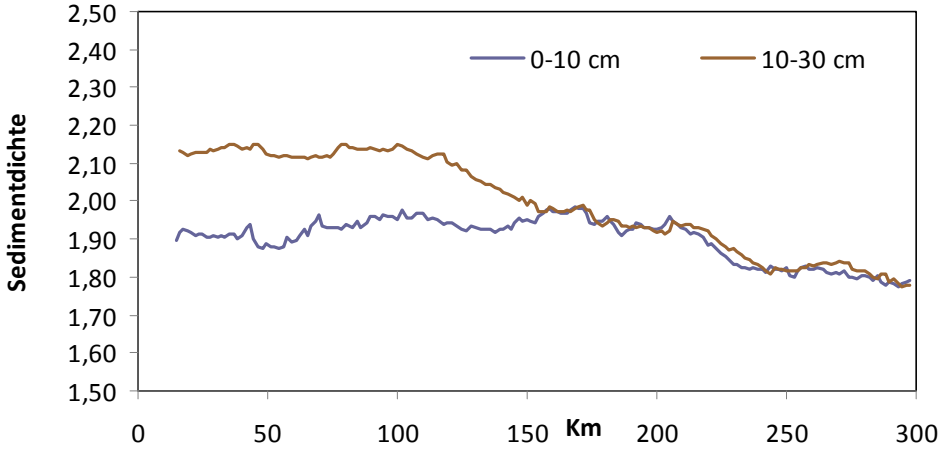


Abbildung 24: Ermittlung der Sedimentdichte.

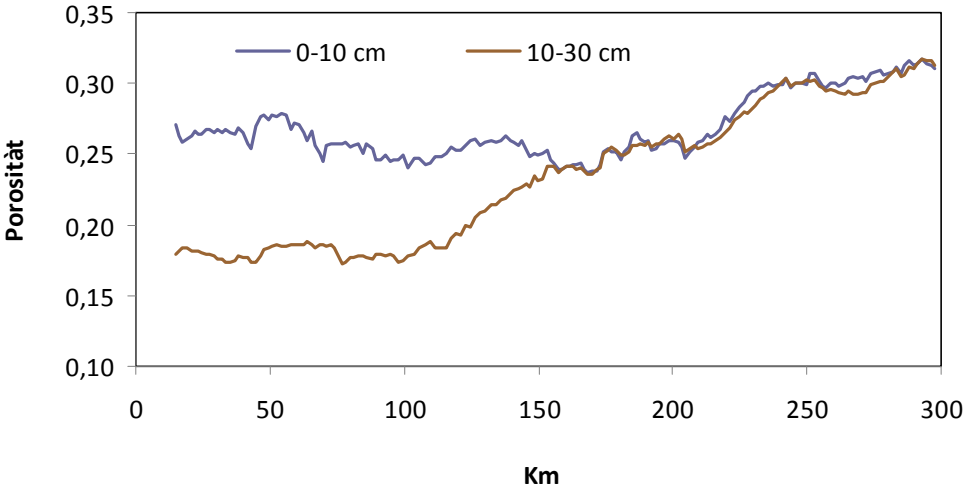


Abbildung 25: Berechnung der Porosität der Elbe.

Die auf Grundlage der Porositätsmessungen berechnete Schüttdichte (im Durchschnitt etwa 1,9 t/m^3, s. oben) liegt jedoch deutlich über der in Laboruntersuchungen bestimmten Schüttdichte des Geschiebezugabematerials. Laut Mesters (2008) liegt die Schüttdichte der Zugabegemische 4/32 mm und 2/16 mm zwischen 1,34 und 1,70 t/m^3. Diese Werte wurden gemäß DIN EN 1097-3/4 mit einem 10 l Eimer bestimmt. Dabei wurde das arithmetische Mittel aus drei Einzelbestimmungen berechnet. Eine Erklärung für die relativ niedrige Schüttdichte des Geschiebezugabematerials findet sich in der künstlichen Packungsweise, die zu einer viel lockereren Packung führt, als dies normalerweise auf der Flusssohle der Fall ist. Weiterhin besteht das Geschiebezugabematerial aus einem relativ engen Kornspektrum, welches generell zu einer niedrigeren Dichte führt.

4 Unsicherheiten

Die Erfassung hydrologischer, hydrographischer, sedimentologischer und morphologischer Daten ist aufgrund der hohen räumlichen und zeitlichen Variabilität eine komplexe Aufgabe. Dadurch, dass ein Großteil der Prozesse nicht direkt sichtbar unter Wasser stattfindet, wird die Schwierigkeit nochmals erhöht.

Unsicherheiten der hydrologischen Daten

Unsicherheiten in den Wasserstandsmessungen

Es ist davon auszugehen, dass die gemessenen Einzelwerte einer Wasserspiegelfixierung einen stochastischen Messfehler aufweisen. Systematische Fehler in Messkampagnen würden zu einer Nichtberücksichtigung dieser Fixierung in der weiteren Auswertung führen, können jedoch aufgrund der vorweggenommenen vermessungstechnischen Plausibilisierung ausgeschlossen werden. Nach Untersuchungen des WSA Duisburg-Rhein sind die mit einem PDGPS-Sensor erfassten Wasserstände unterschiedlichen verfahrensbedingten Fehlerquellen ausgesetzt, die sich in ihrer Summe zu einer Ungenauigkeit von 5-6 cm addieren. Unsicherheiten in den Wasserstandsmessungen bei der früher praktizierten Pflockmethode betragen nach den Angaben des WSA Duisburg-Rhein 3 cm und liegen somit in derselben Größenordnung wie die Unsicherheiten der Wasserstandsmessungen mit PDGPS-Sensoren.

Unsicherheiten in der gewässerkundlichen Plausibilisierung

Aufgrund des methodischen Vorgehens im Rahmen der gewässerkundlichen Plausibilisierung sind weitere Fehlerquellen zu untersuchen, deren Unsicherheiten abzuschätzen und in Summe zu berücksichtigen sind. Es wird angenommen, dass die in der Tabelle 7 enthaltenen Angaben zu den abgeschätzten Unsicherheiten maximale Werte darstellen.

● **Stationarität/Instationare Effekte:**

Wasserspiegelfixierungen sollten möglichst bei stationären Abflusszuständen vorgenommen werden, damit die Vergleichbarkeit verschiedener Messungen gewährleistet wird. Aus logistischen Gründen ist dies nicht immer möglich. Da die in der BfG vorgenommenen Untersuchungen sich auf Wasserspiegelfixierungen bei relativ kleinen Abflüssen (z.B. Elbe: < 600 m³/s) beschränken, wird angenommen, dass die aus instationären Effekten resultierenden Unsicherheiten im Wasserstand mit 1-2 cm abgeschätzt werden können.

● **Zuweisung Bezugswasserstand am Bezugspegel:**

In der Zuweisung des Bezugswasserstandes an den Bezugspegeln steckt gegebenenfalls eine nicht vernachlässigbare Fehlerquelle bzw. Unsicherheit. Nach Auskunft mehrerer Messleiter werden die Messfahrten stromab mit der kleinstmöglichen für die Manövrierfähigkeit des Messschiffs erforderlichen Motorkraft durchgeführt, d.h. man lässt sich weitestgehend zu Tale treiben (sog. Schleichfahrt). Hydrologisch bedeutet dies, dass die Wasserspiegelfixierung annähernd mit der durchflussabhängigen Fließgeschwindigkeit des Gewässers vorgenommen wird. Da der Abfluss das Messschiff gleichsam „transportiert“, werden im Messablauf überall und somit an allen Messorten einander korrespondierende Abflusszustände angetroffen. Insbesondere gilt dies für den Messort „Bezugspegel“. Dies begründet die Festlegung, dass der zum Zeitpunkt der Pegelpassage gemessene Wasserstand am Bezugspegel als Bezugswasserstand der Fixierung angesetzt werden kann. Die Unsicherheit, die für die Zuweisung des Bezugswasserstands bei Schleichfahrt zu berücksichtigen ist, wird mit 1-3 cm angenommen. Wurde die Messfahrt zu schnell oder zu langsam durchgeführt (z.B. durch Unterbrechungen) und wurden deshalb nicht überall korrespondierende Abflusszustände angetroffen, kann die Festlegung eines Bezugswasserstands am Bezugspegel mit einem größeren Fehler behaftet sein.

● **Anwendung der gültigen Abflusskurve:**

Der am Bezugspegel zum Zeitpunkt der Pegelpassage angetroffene Bezugswasserstand wird mit der aktuell gültigen Abflusskurve in einen Bezugsabfluss umgesetzt. Dieser Abfluss gilt dann für alle Messorte innerhalb des Streckengültigkeitsbereichs des Bezugspegels. Aus der Zuweisung des Bezugsabflusses resultiert im Zuge der Plausibilisierung eine weitere Fehlerquelle bzw. Unsicherheit, die durch die Genauigkeit der aktuell gültigen Abflusskurve begründet wird. Diese beruht auf Abflussmessungen und hat ihrerseits ein in der Regel nicht bekanntes Genauigkeitsmaß. Abbildung 26 zeigt, dass als realistischer Wert für die Genauigkeit der Abflusskurven ein Abweichung von 5% beim Abfluss angesetzt werden kann.

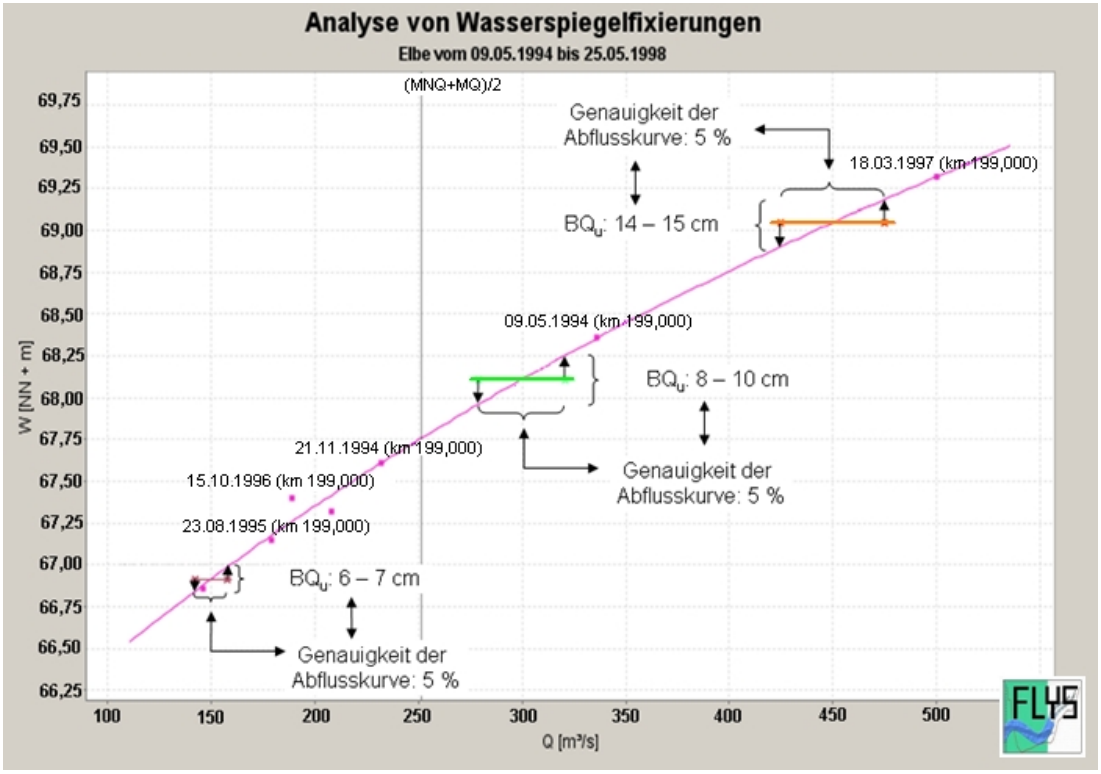


Abbildung 26: Unsicherheiten bei Anwendung der aktuell gültigen Abflusskurve.

Beispielsweise ergibt sich für einen Abfluss von 300 m³/s in der Elbe bei diesem Genauigkeitsmaß der Abflusskurve eine resultierende Abflussspanne von 15 m³/s, was aufgrund der Steigung der Abflusskurve wiederum eine Wasserstandsunsicherheit von ca. 10 cm bedeutet. Die zu berücksichtigende methodische Unsicherheit, die bei der Zuweisung des Bezugsabflusses an den gemessenen Fixierungswasserstand entsteht, hängt somit von der Genauigkeit in der Zuweisung des Bezugswasserstands und der Genauigkeit der gültigen Abflusskurve ab. Bei der angenommenen Genauigkeit der Abflusskurve am Bezugspegel von 5% beim Abfluss, ergeben sich für die in den Untersuchungen der Elbe verwendeten Abflüsse zwischen 100 m³/s und 600 m³/s resultierende Unsicherheiten im Wasserstand von 5-15 cm. Somit werden die aus fehlerbehafteten Abflusskurven entstehenden Unsicherheiten größer als die aus der eigentlichen Messung hervorgehenden.

● **Streckengültigkeit des Bezugsabflusses:**

Da das bestehende Messnetz an den BWaStr in dichter Folge gewässerkundliche Pegel mit Abflussermittlung besitzt, die die Abflussentstehung entsprechend der Flächenzunahme des oberirdischen Einzugsgebiets sinnvoll abbilden, wird angenommen, dass der Abfluss an den Bezugspegeln hinreichend genau den Abfluss zwischen den Mündungen der großen Zuflüsse repräsentiert. Seitliche Zuflüsse aus den Zwischeneinzugsgebieten werden vernachlässigt, da die Einzugsgebietszunahmen auf diesen Strecken in der Regel nur ca. 1-2% betragen. Resultierende geringfügige Unsicherhei-

ten im Wasserstand aus der Annahme der streckenhaften Gültigkeit des Bezugsabflusses werden insgesamt zu 0-1cm abgeschätzt. Grundsätzlich wächst die Unsicherheit mit zunehmender Entfernung vom Bezugspegel.

Tabelle 7: Unsicherheiten bei der Analyse von Wasserspiegelfixierungen.

Fehlerquelle	Unsicherheit [cm]
PDGPS-Wasserstandsmessungen	~ 5 – 6
Gewässerkundliche Plausibilisierung der Fixierungen	
Stationärität/Instationäre Effekte	~1 – 2
Zuweisung Bezugswasserstand am Bezugspegel	~1 – 3
Anwendung der gültigen Abflusskurve (Genauigkeit von 5 %) bei Zuweisung des Bezugsabflusses	~5 - 15
Streckengültigkeit des Bezugsabflusses	~ 0 – 1

Bei den beschriebenen Fehlern und Anfälligkeiten des Verfahrens handelt es sich um stochastische Unsicherheiten ohne Korrelation zwischen den jeweiligen Fehlerursachen. Dies bedeutet, dass die Fehlerquellen unabhängig voneinander sind und in der Gesamtbetrachtung additiv überlagert werden. Sollte der sehr unwahrscheinliche Fall eintreten, dass sich die Unsicherheiten tendenziell gleich verhalten und nur in die positive oder negative Richtung vom tatsächlich gemessenen Wert abweichen, dann ergeben sich als Summe aller zu berücksichtigenden Unsicherheiten aus Wasserstandsmessungen und der anschließenden gewässerkundlichen Plausibilisierung maximale Werte zwischen 12 cm und 27 cm. Da dies sehr unwahrscheinlich ist, ist mit einer deutlich geringeren Unsicherheit eher im einstelligen Bereich zu rechnen.

Unsicherheiten der hydrographischen Daten

Die der Auswertung der Sohllagenentwicklung zugrunde liegenden mittleren Sohlhöhen sind durch Linienpeilungen gewonnen worden. Dazu wird die Flusssohle während Querfahrten in regelmäßigen Distanzen per Echolot vermessen. Die Einzelmesswerte weisen dabei einen nicht unerheblichen stochastischen Messfehler auf. Dieser kann jedoch als Gauß-verteilt betrachtet werden, wodurch die positiven und negativen Fehler in der Vielzahl der Messwerte zu Null werden.

Systematische Fehler hingegen weisen bei jeder Messkampagne ein jeweils positives oder negatives Vorzeichen auf. Sie mitteln sich daher nicht aus, sondern verfälschen die Ergebnisse einzelner Messfahrten, Messkampagnen oder gar Messsysteme. Trotz sorgfältiger Durchführung sind solche Fehler aufgrund der Komplexität der Mess- und Auswertesysteme und die dadurch große Anzahl möglicher Fehlerquellen nicht völlig ausgeschlossen.

Systematische Fehlerquellen bei der Erfassung der Topografie sind im Einzelnen:

Wechsel der Höhenreferenzsysteme

Infolge des Wechsels der Höhenreferenzsysteme sind in den Daten lokale Höhenfehler bis zu ca. 2,5 cm identifiziert worden (BfG, 2010b). Diese systematischen Fehler wurden in der Datengrundlage rechnerisch korrigiert und können somit als behoben angesehen werden.

Einführung satellitenbasierter Messungen (GPS)

Die vor Einführung der GPS-Messungen erhobenen Topografiedaten können möglicherweise durch ungenügende Korrektur der Schiffsdynamik (Squat) fehlerbehaftet sein. Eine Rekonstruktion des Fehlers ist nicht möglich. Vergleichende Messungen in den Niederlanden haben jedoch ein hohes mögliches Fehlerpotenzial erkennen lassen. Es gibt keinen Anhaltspunkt dafür, dass ein solcher Fehler auch im Untersuchungsgebiet und –zeitraum vorliegt. Jedoch stimmt die Periode der größten Sohlhöhenänderungen streckenweise mit dem Zeitpunkt der Einführung der GPS-Messungen überein.

Fehlerhafte Kalibrierung der Echolotsysteme

Die Analyse der Peildaten in den Teilstrecken der einzelnen Außenbezirke (ABZ) liefert Hinweise auf existierende systematische Fehler von Messkampagnen, wenn z.B. erhebliche Sprünge an ABZ-Grenzen auftreten. Es wird vermutet, dass Abweichungen durch eine fehlerhafte Kalibrierung begründet sein können. Die Existenz weiterer systematischer Fehler dieser Art, insbesondere falls diese betragsmäßig kleiner wären, kann trotz sorgfältiger Prüfung der Daten nicht ausgeschlossen werden.

Fehlerhafte Extrapolation aus der Fahrrinne in Randbereiche

Für die Sedimentbilanz wurden die in der Fahrrinne gemessenen Sohlhöhenänderungen linear bis zum Ufer extrapoliert, wo sie zu Null angenommen wurden. Diese Annahme muss aufgrund fehlender Peilungen außerhalb der Fahrrinne als bestmögliche Schätzung akzeptiert werden. Es wird empfohlen, diese mögliche Fehlerquelle zukünftig durch zusätzliche Peilungen in Seitenbereichen zu eliminieren.

Fehlerhafte Umrechnung von Volumen in Massen

Die Umrechung von gemessenen Volumenänderung in Massen erfolgt unter Annahme einer Korndichte von 2,65 g/cm³. Detaillierte Porositätsmessungen lieferten die Datenbasis für eine streckenweise variierende Porositätsberechnung, die im Mittel etwa $n = 0{,}25$ ergibt. Die Parameter werden als zuverlässig eingeschätzt und beinhalten ein vernachlässigbares Fehlerpotenzial.

Fehlerhafte Zeitzuweisung der Peilungen

Teilweise wurden die genauen Messzeitpunkte der Peilungen nicht festgehalten. Für diese Peilungen wurde der Zeitpunkt bestmöglich geschätzt. Der mögliche Fehlereinfluss infolgedessen wird als gering eingeschätzt.

Datenlücken

In den Peilungen sind teilweise Lücken enthalten, die durch Interpolation der umliegenden Daten geschlossen wurden.

Die vorgenannte Analyse möglicher Fehlerquellen der Topografie erhebt keinen Anspruch auf Vollständigkeit. Es kann nicht ausgeschlossen werden, dass weitere mögliche systematische Fehler in der Datenbasis enthalten sind.

Unsicherheiten der Daten zu Zugaben, Baggerungen und Verklappungen

Die vorliegenden Daten zu Zugaben, Baggerungen und Verklappungen könnten ebenfalls Fehler enthalten. Insbesondere ist nicht ausgeschlossen, dass Baggerungen teilweise undokumentiert durchgeführt wurden.

Unsicherheiten des Sedimenteintrags aus Nebengewässern

Wegen der teilweise großen Entfernung der Messstellen an Nebengewässern von deren Mündung in die Elbe sowie der weniger umfangreichen Messprogramme in Nebengewässern sind die Einträge als unsicher zu bezeichnen. Der Einfluss des Messfehlers auf die Gesamtsedimentbilanz der Elbe wird dennoch als von untergeordneter Bedeutung angenommen, insbesondere, da die wesentlichen Zuflüsse sämtlich durch Stauregulierung und entsprechenden Sedimentrückhalt geprägt sind.

Unsicherheiten der Sedimentsenken

Vorlandsedimentation

Der in der Bilanzierung berücksichtigte Wert für die Vorlandsedimentation von 350 t Sand je Kilometer wird als sehr unsicher angesehen, da er auf nur zwei Messwerten beruht. Der Vergleich mit Messwerten am Niederrhein lässt jedoch vermuten, dass die Größenordnung der Annahme realistisch ist. Der Anteil der angenommenen Vorlandsedimentation an der Gesamtsedimentbilanz ist vergleichsweise gering und der mögliche Fehlereinfluss zu vernachlässigen.

Buhnenfelder

Buhnenfelder werden in der Sedimentbilanz nicht explizit berücksichtigt. Es wird angenommen, dass sich die Sohlhöhenänderungen der Fahrrinne analog zu den Bereichen außerhalb der Buhnenfelder linear zum Ufer extrapolieren lassen, wo die Änderung zu Null angenommen werden. Denkbar ist, dass Buhnenfelder als Zwischenspei-

cher von Sediment dienen, in welche insbesondere durch Hochwässer ein Eintrag stattfindet, der erst allmählich und eventuell unvollständig wieder in den Hauptstrom ausgetragen wird. Solche Beobachtungen liegen an anderen Flüssen, z. B. dem Niederrhein bzw. in den Niederlanden, vor. Da die Buhnen im Untersuchungsgebiet überwiegend jedoch schon sehr lange existieren ist anzunehmen, dass sich langfristig ein Gleichgewicht zwischen Ein- und Austrag bereits eingestellt hat.

Nebenarme

Daten über die Sohlhöhenänderungen in Seiten- und Nebenarmen liegen überwiegend nicht vor. Es ist zu vermuten, dass es teilweise zu Sedimentation in diesen Bereichen kommt, die in der bisherigen Sedimentbilanz nicht enthalten ist. Da die Anzahl von Nebenarmen jedoch gering ist, wird der mögliche Fehlereinfluss als gering angesehen. Die Wirkung der Altelben im Magdeburger Bereich ist in BfG (2004) explizit behandelt.

Abrieb

Die Geschiebefracht verliert durch Abrieb ständig an Masse. Die Abriebrate wird aus Laborversuchen abgeleitet und kann als relativ sicher angesehen werden. Die durch Abrieb entstehenden Partikel werden entweder als Sandfracht weitertransportiert oder gehen in Suspension über, wenn die Partikelgrößen entsprechend klein sind. Mit den hier angesetzten Abriebraten ergeben sich geringe Beiträge des Abriebs zur Sedimentbilanz. Lediglich eine um Größenordnungen falsche Abriebrate würde einen merklichen Effekt auf die Bilanz haben. Der mögliche Fehlereinfluss kann daher als gering angesehen werden.

Unsicherheiten des Geschiebetransports

Die Messung des Geschiebetransportes ist eine anspruchsvolle technische Aufgabe. Mögliche Unsicherheiten ergeben sich durch stochastische und systematische Fehlerquellen.

Der Geschiebetransport ist ein räumlich und zeitlich variabler, stochastischer Prozess. Einzelmessungen können daher nicht als repräsentativ für die Transportrate unter den jeweils aktuellen Bedingungen angesehen werden. Auch durch die mehrmalige Wiederholung der Punktmessungen und die Integration des Transports aus mehreren Punktmessungen innerhalb eines Messprofils werden gewisse hydraulische und sedimentologische Effekte (z. B. Hystereseeffekte) nicht vollständig eliminiert. Dies zeigt sich letztlich in der Streuung der einzelnen Messwerte um die abgeleiteten Transport-Abfluss-Beziehungen. Aufgrund der vielfachen Wiederholung der Messungen zu unterschiedlichen Zeitpunkten kann jedoch davon ausgegangen werden, dass stochastische Effekte einen vernachlässigbaren Einfluss auf die abgeleiteten Transportraten haben.

Jedoch sind systematische Fehlerquellen der Transportmessungen möglich:

Fehlerhafte Positionierung des Geschiebefängers

Trotz der Ausrüstung des BfG-Geschiebefängers mit einer Kamera zur Kontrolle kann nicht ausgeschlossen werden, dass der Fänger aufgrund fehlerhafter Positionierung den tatsächlichen Transport unterschätzt. Dies ist jedoch nur wahrscheinlich, wenn hoher Transport mit ungenügender Sicht herrscht und weiterhin die Sohle durch Unebenheiten gekennzeichnet ist. Eine systematische Unterschätzung der Transportraten bei hohen Abflüssen kann daher nicht ausgeschlossen werden.

Ungenügende hydraulische Effektivität des Geschiebefängers

Da der Fänger aufgrund des eigenen Strömungswiderstandes im Einlaufbereich eine geringere Fließgeschwindigkeit als die umgebende Strömung aufweist, wird der gemessene Transport systematisch unterschätzt. Dieser Effekt wird jedoch durch einen in Laborversuchen ermittelten Korrekturfaktor berücksichtigt. Ein systematischer Restfehler kann nicht ausgeschlossen werden, der mögliche Einfluss wird jedoch als gering angesehen.

Ungenügende sedimentologische Effektivität des Geschiebefängers

Die sedimentologische Effektivität gibt an, wie viel des in den Geschiebefängers eingetragenen Materials tatsächlich gefangen wird. Maßgeblichen Einfluss darauf hat die Maschenweite des Fangkorbs. Eine kleine Maschenweite verringert die hydraulische Effektivität, Geschiebe wird durch den Stau um den Fänger herum transportiert. Größere Maschenweiten beinhalten die Wahrscheinlichkeit, dass Feinkorn durch die Maschen hindurchtransportiert wird, mit zunehmender Füllung des Korbes nimmt dieser Effekt jedoch ab. Aufgrund der positiven Erfahrungen wird seit einigen Jahren im Untersuchungsgebiet ein Geschiebefangkorb mit 1,4 mm Maschenweite eingesetzt. Vergleichsmessungen mit anderen, für feinere Korngrößen entwickelten, Geschiebefängern zeigen, dass der im Untersuchungsgebiet eingesetzte Geschiebefänger bei geringem Abfluss den Transport unterschätzt. Es ist weiterhin zu vermuten, dass ein Teil der Feinfraktionen beim Bergen des Fängers verloren geht. Der Einfluss der sedimentologischen Effektivität wird daher als nicht unerheblich für die Sedimentbilanzierung eingeschätzt. Eine Quantifizierung des möglichen Fehlers sowie mögliche Kalibrierungswerte sollten in weiteren Natur- und Laborversuchen angestrebt werden (vgl. Kap. 8).

Fehlerhafte Integration des Transports über die Breite

Die Integration der Transportmenge aus den Einzelmessungen über die Gewässerbreite erfolgt in der Datenbank SedDB. Es ist möglich, dass zwischen den Einzelmessungen noch höhere, nicht gemessene Transportraten auftraten, wodurch die Integration eine systematische Unterschätzung ergäbe. Aufgrund der Vielzahl der Messpunkte (überwiegend 5 bis 10) und des meist visuell plausiblen Verlaufs der Transportrate über die Breite wird der mögliche Fehlereinfluss als gering eingeschätzt.

Fehlerhafte Transport-Abfluss-Beziehungen

Die Korrelation des Geschiebetransportes mit dem Abfluss ist theoretisch nicht zwingend eindeutig. Besser begründet wäre eine Korrelation mit der Schubspannung, welche jedoch nicht direkt gemessen werden kann. Unter den möglichen Korrelationen wurde die Potenzfunktion ausgewählt, da sich damit im Vergleich zu anderen Funktionen die höchsten Korrelationskoeffizienten ergeben. Die Regressionsanalyse reagiert jedoch besonders stark auf einzelne Werte im hohen Abflussbereich, in dem die Datendichte naturgemäß am geringsten ist. Eine weitere Verbesserung der Korrelation ließe sich durch die Verwendung von abflussbereichsweise gültigen Transportfunktionen erreichen. Hierfür liegen noch keine Erfahrungen im Untersuchungsgebiet vor, weswegen hier weiterer Forschungsbedarf gesehen wird. Der mögliche Fehlereinfluss auf die Sedimentbilanzierung aufgrund der Unsicherheiten in den Transport-Abfluss-Beziehungen wird als nicht unerheblich eingeschätzt (vgl. Kap. 6).

Ferguson-Korrektur

Ferguson (1986) zeigt, dass auf Potenzfunktionen beruhende Transport-Abfluss-Beziehungen zu einer systematischen Unterschätzung von Jahresfrachten führen. Der dafür vorgeschlagene Korrekturfaktor ist eine Funktion der Standardabweichung der Messwerte von der Transport-Abfluss-Funktion. Es kann davon ausgegangen werden, dass mit dieser Korrektur die genannte systematische Unterschätzung behoben wird und somit ein unerheblicher möglicher Fehlereinfluss verbleibt.

Repräsentativität der Transport-Abfluss-Beziehungen

Transport-Abfluss-Beziehungen sind nur für gewisse Zeiträume gültig, in denen die maßgeblichen Einflussgrößen Sohlgefälle, Profilform sowie Sedimentzusammensetzung und -eintrag als annähernd konstant angesehen werden können.

Unsicherheiten des suspendierten Sandtransports

Systematische Unsicherheiten

Die Suspensionsfracht lässt sich prinzipiell einfacher und genauer als die Geschiebefracht bestimmen. Der mögliche Fehlereinfluss auf die Transportbilanzen ist dennoch von Bedeutung.

Fehlerhafte Integration des Transports über die Breite und Tiefe

Die Integration der Suspensionsfracht aus Punkt- und Vollprofilmessungen erfolgt in der Datenbank SedDB. Manuelle Überprüfung zeigte keinen systematischen Fehler. Ein Vergleich der Frachten aus Vollprofilmessungen mit den in Punktmessungen ermittelten Frachten deutet auf eine mögliche systematische Unterschätzung der Frachten hin. Dies sollte Gegenstand vertiefter Untersuchungen werden (vgl. Kap. 8).

Fehlerhafte Transport-Abfluss-Beziehungen

Suspensionsfrachten sind ebenso wie Geschiebefrachten nicht direkt mit dem Abfluss korreliert. Dennoch ist es Stand der wissenschaftlichen Praxis, solche Korrelationen,

z. B. mit Potenzfunktionen, aufzustellen. Eine Überprüfung der Berechnung von Frachten aus den abgeleiteten Transport-Abfluss-Beziehungen mit den gemessenen Frachten ergab jedoch, dass sich für hohe Abflüsse eine Unterschätzung der Suspensionsfracht ergibt. Die Größe der Unterschätzung kann derzeit nicht quantifiziert werden, da die Anzahl der Messungen bei hohen Abflüssen dafür zu gering ist. Der mögliche Fehlereinfluss auf die Sedimentbilanzierung aufgrund der Unsicherheiten in den Transport-Abfluss-Beziehungen für den Suspensionstransport wird als nicht unerheblich eingeschätzt.

Fehlerhafte Ferguson-Korrektur

Analog der Betrachtung zu den Unsicherheiten bezüglich des Geschiebetransports wird der durchgeführten Ferguson-Korrektur ein unerheblicher möglicher Fehlereinfluss beigemessen.

Repräsentativität der Transport-Abfluss-Beziehungen

Ebenso wie für den Geschiebetransport sind Transport-Abfluss-Beziehungen der Suspensionsfracht nur für einen begrenzten Zeitraum gültig, in welchem die wesentlichen Randbedingungen vergleichbar sind. Insbesondere die Verfügbarkeit von Sand hat einen hohen Einfluss auf den Betrag der Suspensionsfracht. Wird die verfügbare Sandmenge erhöht (beispielsweise durch Erosion sandhaltiger Schichten), so kann die Suspensionsfracht unabhängig vom Abfluss ansteigen.

Die Bilanzierungsmethode, welche sich auf die Auswertung der Sohlhöhenentwicklung stützt, benötigt eine Reihe zusätzlicher Annahmen, wodurch sich die Anzahl möglicher Fehlereinflüsse erhöht. Im Resultat der Unsicherheitsanalyse kann dieser Methode dennoch die höhere Zuverlässigkeit zugesprochen werden, da in der Methodik der Feststofftransportmessungen eine größere Anzahl möglicher nicht unerheblicher Fehlerquellen identifiziert werden konnte.

Die tatsächlichen Frachten liegen wahrscheinlich zwischen den Bilanzierungen beider Methoden, da die Sohlhöhenentwicklung die Frachten tendenziell eher überschätzt, wohingegen die Feststofftransportbilanzierung insbesondere die Sandfracht tendenziell unterschätzt.

5 Sohlnaher Sedimenttransport

Die anhand der Transport-Abfluss-Beziehungen ermittelten Jahresfrachten, abgeleitet aus den durchgeführten Messungen des Geschiebe- und suspendierten Sandtransports (Kapitel 3), werden im Folgenden als Längsschnitt der transportierten Fracht entwickelt und im Längsdiagramm dargestellt. Dabei werden unterschiedlich lange Auswertezeiträume betrachtet, die jeweils im Jahr 2008 enden und den dem Bericht der AG Sohlstabilisierung (2011) zugrunde liegenden Auswertungen entsprechen.

Alle Messstellen werden einer einheitlichen Zuverlässigkeitsanalyse unterzogen (s. Kap. 3).

5.1 Eintrag aus Nebenflüssen

Systematische Geschiebe- und Schwebstoffvielpunktmessungen werden nur an der Saale, als für die Sedimentfracht wichtigster Nebenfluss der Elbe durchgeführt. Die Bilanzierung der Geschiebemessungen ergibt eine Fracht zwischen 6.000 t/a (Zeitraum 1996-2008) und 12.200 t/a (Zeitraum 2000-2008) für die Saale. Der Frachtanteil des gesamten suspendierten Sandes beträgt zwischen 17.600 t/a (Zeitraum 1996-2008) und 21.800 t/a (Zeitraum 2000-2008).

Dauermessungen der Gesamtschwebstofffracht (werktägliche Oberflächenproben) werden von der WSV an der Saale (Messstelle Calbe) und der Havel (Rathenow) durchgeführt (vgl. Kap. 7). Aufgrund der Erkenntnis, dass die suspendierte Sandfracht der Saale nur einen geringen Anteil der Gesamtschwebstofffracht ausmacht (ca. 20.000 t/a von ca. 90.000 t/a) kann angenommen werden, dass auch die Havel einen vernachlässigbaren Eintrag suspendierten Sandes beiträgt, da deren Gesamtschwebstofffracht lediglich ca. 26.200 t/a und somit weniger als ein Drittel der Schwebstofffracht der Saale beträgt. Weitere Nebenflüsse werden in der vorliegenden Bilanzierung, wegen der vermutlich untergeordneten Bedeutung, nicht berücksichtigt (vgl. Naumann et al., 2003).

5.2 Eintrag in die Tideelbe/Bilanzierung im Stauraum Geesthacht

In Fließrichtung gesehen sind Neu Darchau (km 536,2) und Artlenburg (km 573,8) die letzten Messstellen, an denen die Feststofffrachten unter anderem mit Geschiebefängern erfasst werden. Transport-Abflussbeziehungen, die aus Daten dieser Messstellen abgeleitet wurden, haben bedingt durch die Barrierewirkung der Staustufe Geesthacht wenig Relevanz für die Frachten an Geschiebe und suspendiertem Sand, die aus der Binnenelbe in den gezeitenbeeinflussten Teil der Elbe über das Wehr Geesthacht transportiert werden. Jedoch lässt sich aus der langjährigen Entwicklung der Sohlhöhen eine vorläufige Abschätzung der Sedimentbilanz der sandigen Gewässersohle und damit auch der Sandfrachten, die über das Wehr hinweg in den tidebeeinflussten Bereich der Elbe gelangen, durchführen. Grundlage für diese Untersuchung ist der Bestand an flächenhaften Peildaten des WSA Lauenburg aus den Gewässerabschnitten stromauf (Abbildung 27) und stromab der Staustufe Geesthacht, welche hinsichtlich der Sohlhöhenentwicklung und der damit verbundenen volumetrischen Änderungen ausgewertet und im Kontext des Abflussgeschehens sowie der stattfindenden Baggeraktivitäten interpretiert worden sind.

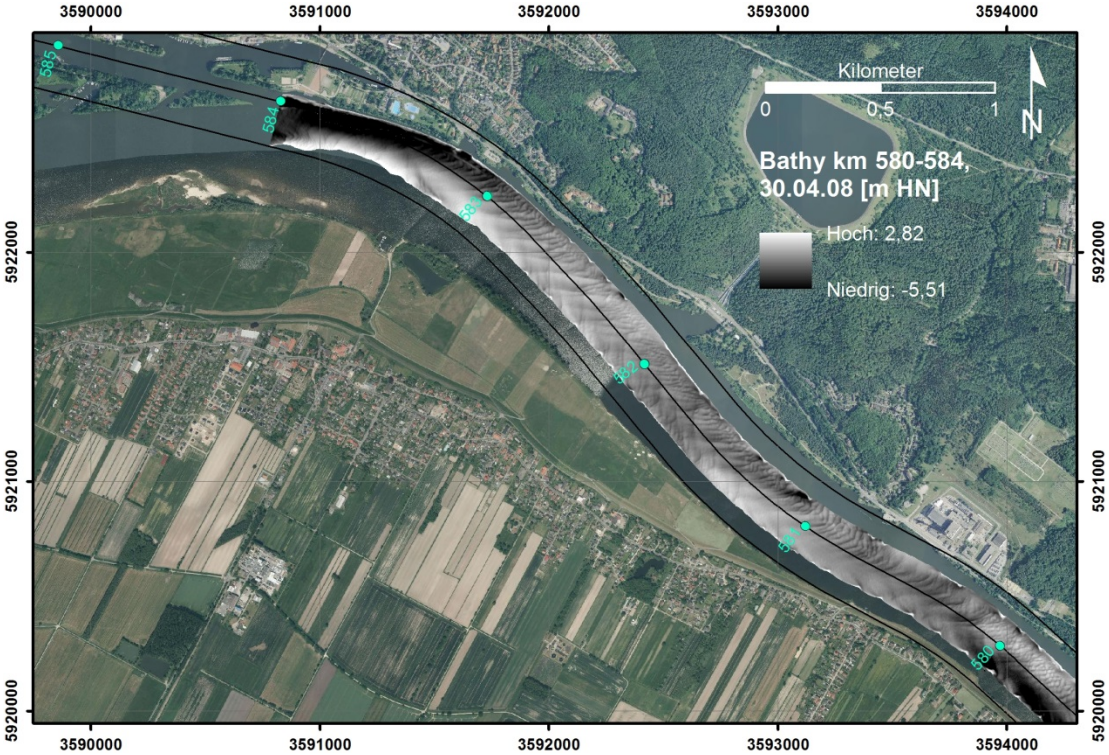


Abbildung 27: Im Rahmen von Mehrzweckpeilungen erfasste Fläche oberhalb des Wehres Geesthacht im Bereich von Flusskilometer 580-584.

Die Ergebnisse der Untersuchung sind in Form von Erosions- bzw. Akkumulationsraten in der Abbildung 28 zusammengefasst. Der graue Abschnitt von km 584 bis km

588 stellt den Stauhaltungsbereich unmittelbar ober- und unterhalb des Wehrkörpers dar. Es liegen hier keine Daten vor, da dieser Bereich nicht durch Flächenpeilungen erfasst wird. Die Schifffahrt wird in diesem Abschnitt über den parallel verlaufenden Schleusenkanal abgewickelt. Auch die Seitenbereiche außerhalb der Fahrrinne sowie die Vorländer, die als Sedimentquelle oder –senke von Bedeutung sind, konnten aufgrund des Datendefizits in diesen Bereichen nicht in die Untersuchung einbezogen werden.

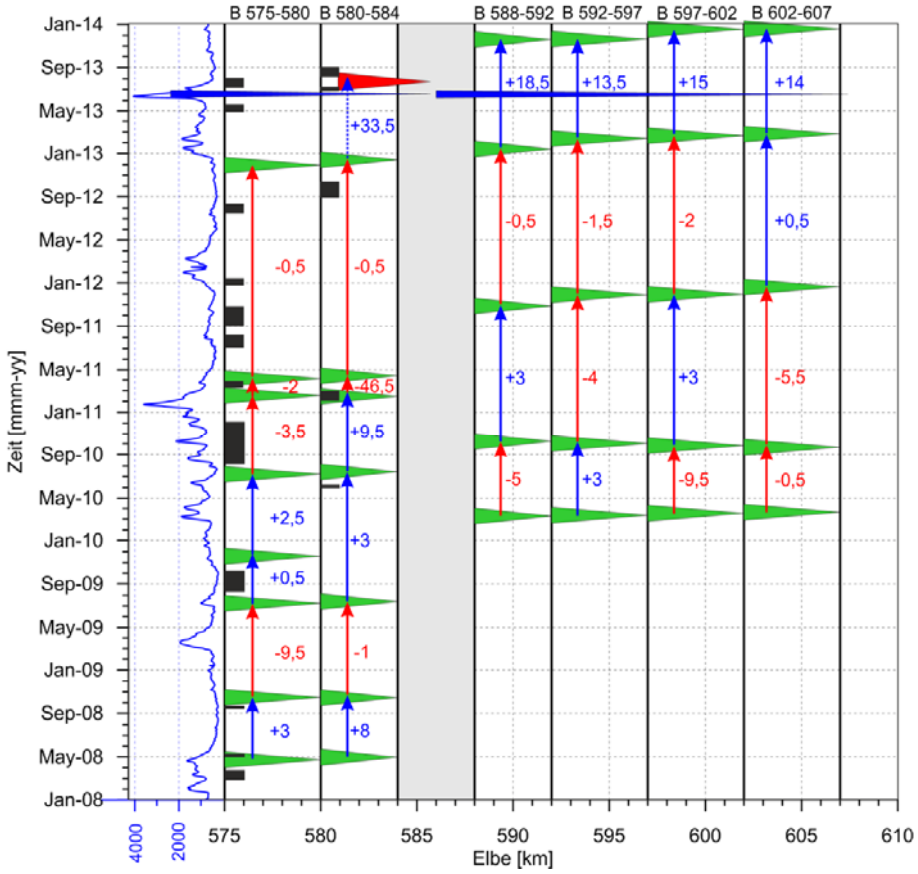


Abbildung 28: mittlere Erosion (negativ/rot) und mittlere Akkumulation (positiv/blau) in [cm/a] berechnet für Peildaten des WSA Lauenburg (grüne Flächen: Mehrzweckpeilungen, blaue Flächen: HW-Peilung) im Elbeabschnitt von km 575 - km 607 im Zeitraum 2008-2013, Baggermaßnahmezeiträume in schwarz, blaue Kurve illustriert Abflussganglinie für betrachteten Zeitraum

Sedimentbilanz oberhalb Wehr Geesthacht

Die Auswertung des Bestandes an flächenhaften Peildaten, der bis 2004 zurückreicht (Darstellung in Abbildung 28 erst ab 2008), deutet eine Sedimentbilanz oberhalb der Staustufe an, die als positiv bzw. überwiegend auflandig zu charakterisieren ist. Aus den Sohlhöhenänderungen im Zeitraum von April 2008 bis November/Dezember 2012 resultiert zwar ein kumuliertes Volumen von -43.000 m³ im Bilanzraum von km 575 bis km 584. Dieser Wert entspricht, gemessen an der gepeilten Fläche von etwa 2,02 km², einer kumulierten Erosionsrate von -0,5 cm. Dem gegenüber jedoch steht

im selben Zeitraum eine gebaggerte Menge von ~152.000 m³. Der überwiegende Teil des Baggergutes wird in den hier nicht durch Peilungen erfassten Stauhaltungsbereich unmittelbar vor dem Wehrkörper untergebracht und steht dort als potentiell mobilisierbare Sedimentquelle für den Weitertransport in den tidebeeinflussten Teil der Elbe zur Verfügung. Bis zur letzten Peilung vor dem Sommerhochwasser 2013 pendelt die Sedimentbilanz bis auf eine Ausnahme (Feb-Apr 2011 in B580-584) moderat um einen Gleichgewichtszustand, der offensichtlich erst durch die Baggeraktivitäten erreicht wird. Oberhalb der Staustufe Geesthacht stehen mit der einmaligen Fächerecholotpeilung aus Mai/Juni 2004 (BfG 2008) ältere Daten zur Verfügung. Der Vergleich mit der Peilung aus April 2008 ergibt über den Zeitraum von etwa 4 Jahren innerhalb der sich überschneidenden, gepeilten Flächen eine Auflandung von 182.666 m³ im Abschnitt von km 575 bis km 580 sowie eine Auflandung von 183.074 m³ im Abschnitt von km 580 bis km 584. Das entspricht einer mittleren Auflandungsrate von ca. 4 cm/a im oberen Abschnitt bzw. ca. 5 cm/a im Abschnitt unmittelbar oberhalb der Stauhaltung. Die Baggeraktivitäten in diesem Zeitraum wurden nicht ausgewertet, jedoch kann die positive Sedimentbilanz oberhalb der Staustufe auch für den längeren Zeitraum (2004 – 2012) bestätigt werden. Anhand der Peilaufnahme aus Juli 2013 (rote Fläche in Abbildung 28, deckt nicht den gesamten Bilanzabschnitt B580-584 ab) wird deutlich dass das Junihochwasser 2013 oberhalb des Wehres stark auflandig wirkt. In Bezug zur Peilung von Dezember 2012 resultiert eine mittlere Auflandungsrate von 33,5 cm/a.

Sedimentbilanz unterhalb Wehr Geesthacht

Indizien zum Eintrag sandiger Sedimente aus der Mittelelbe in die tidebeeinflusste Unterelbe ergeben sich aus der Betrachtung der Peildaten unterhalb der Stauhaltung Geesthacht. Bis zur letzten erfolgten Peilkampagne vor dem Sommerhochwasser 2013 ist das Regime als tendenziell erosiv zu charakterisieren. Die Erosionsraten überwiegen die Sedimentationsraten (vgl. Abbildung 28). Von April 2010 bis Januar/Februar 2013 ergeben sich für die Gewässersohle Volumenänderungen von -2.564 m³ (B588-592), -56.100 m³ (B592-597), -55.200 m³ (B597-602) sowie -102.500 m³ (B602-607). Im betrachteten Zeitraum, inklusive des Januarhochwassers von 2011 (Qmax: ~3.600 m³/s) sind möglicherweise keine größeren Mengen an Geschiebe und suspendierten Sanden von oberstrom über das Wehr in die Tideelbe gelangt. Aufgrund der teilweise langen Zeiträume zwischen den einzelnen Peilungen wird hier auf die hohe Unsicherheit der Aussage hingewiesen. Deutlich anders stellt sich der Zeitraum um das Junihochwasser 2013 (Qmax: ~4.000 m³/s) dar. Anhand der Hauptpeilungen vor und nach dem Hochwasser ergeben sich mittlere Sedimentationsraten von 14 bis 18 cm/a. Die volumetrischen Zunahmen an der Sohle in dem durch die Peilung erfassten Bereich betragen im Zeitraum von Januar/Februar bis November/Dezember 2013 137.000 m³ (B588-592), 127.400 m³ (B592-597), 163.700 m³ (B597-602) sowie 173.100 m³ (B602-607).

Die folgenden Schlussfolgerungen können aus den zuvor dargestellten Sedimentbilanzen für die Flussabschnitte stromauf und stromab des Wehres gezogen werden:

- Der Transport von Geschiebe und der suspendierten Sandfraktion ist erwartungsgemäß stark durch die Barrierewirkung der Stauhaltung Geesthacht geprägt. Überwiegend wird das Sohlsubstrat im Stauraum zurückgehalten. Ein morphologisches Gleichgewicht der Sohle wird durch stattfindende Baggeraktivitäten aufrechterhalten.
- Unterhalb der Stauhaltung ist die morphologische Entwicklung der Gewässersohle, basierend auf den bisher ausgewerteten Daten, in der Tendenz als erosiv zu beschreiben. In Hochwassersituationen ist zu erwarten, dass größere Mengen an Sanden mobilisiert und in den tidebeeinflussten Bereich der Elbe als Geschiebe oder suspendierter Sand eingetragen werden und dort den Sandhaushalt stützen. Deutlich zu erkennen ist diese Wirkung bei dem Junihochwasser 2013.

Um die Belastbarkeit der bislang gezogenen Schlussfolgerungen zu erhöhen, wird im Rahmen laufender Untersuchungen das hier vorgestellte methodische Spektrum, ausgehend von Fluss-km 607 weiter in den Bereich der Hamburg Port Authority bzw. in Richtung Norder- und Süderelbe fortgesetzt. Dabei berücksichtigt wird auch die Entwicklung der sandigen Baggermengen, die in diesem Bereich anfallen. Messungen des Geschiebetransports sowie des Transports suspendierter Sande unmittelbar ober- und unterhalb der Staustufe hätten großes Potential, die aus den Peilungen abgeleiteten Ergebnisse bezüglich der Sedimenttransportmodi zu validieren. Auf der überwiegend sandigen sowie morphologisch durch Transportkörper geprägten Sohle kann diesbezüglich auch das Tool Rheno BT (Gehres & Frings 2012) vorteilsbringend eingesetzt werden. Zu diesem Zweck sind zeitlich nah aufeinanderfolgende Peilungen essentiell.

5.3 Geschiebebewirtschaftung

Für die Bewertung der Flussbettentwicklung müssen die Umlagerungen infolge der Geschiebebewirtschaftung ebenfalls bilanziert werden. Abb. 29 zeigt den Längsschnitt der mittleren Geschiebebewirtschaftungsmengen im Zeitraum 1995 bis 2007 [t/a] und die daraus resultierende abschnittsweise gemittelte rechnerische Sohlhöhenentwicklung [cm/a]. Für Vergleichszwecke ebenfalls dargestellt sind die Zugabenmengen im Bericht PG Erosionsstrecke (2011), welche keine Baggerungen enthalten. Für die Bilanzierung der Geschiebebewirtschaftungsmengen wird im Folgenden die Summe aus Baggerungen und Verklappungen 1995 bis 2007 verwendet (schwarze Linie) und die daraus resultierende rechnerische Sohlhöhenentwicklung (rote Linie).

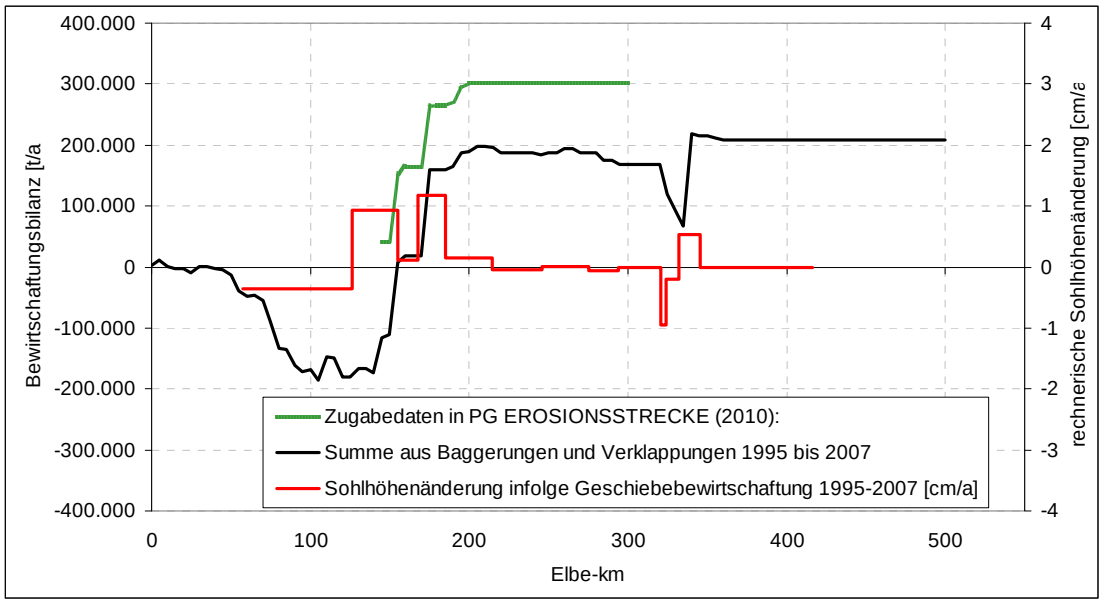


Abbildung 29: Umlagerungen aus der Geschiebebewirtschaftung [t/a] und resultierende rechnerische Sohlhöhenentwicklung [cm/a] sowie die Zugabemengen im Bericht PG Erosionsstrecke (2011).

Die für die Geschiebebewirtschaftung verwendeten Sedimentmassen sind im Detail (Aufschlüsselung nach Herkunft, Strecke, Zeit, etc.) in den Geschiebezugabe-Berichten der Arbeitsgruppe aufgeführt. Aus großräumlicher Sicht ist für die Interpretation der Wirkung für die Sedimentbilanz bzw. aus Sicht des Sedimenthaushaltes eine Aufschlüsselung in Hauptkategorien der Zugabemassen von Belang. Im Wesentlichen setzt sich das Zugabematerial aus drei Herkunftsquellen zusammen; Herkunft 1) aus Steinbrüchen/Kiesgruben (Zufuhr aus externen Quellen), 2) aus der Saale sowie 3) aus dem oberen Elbe-Abschnitt. Darüber hinaus bleibt nur ein geringer Anteil an Massen im geringen Prozentbereich, die sich diesen drei Kategorien nicht zuordnen ließen. Für den Zeitraum von Beginn der Zugaben 1996 bis 2009 ergibt sich für die Kategorien 1) ein Anteil von 43 %, 2) 11 % und 3) 40 %. Dieses Verhältnis ist dementsprechend auch gut in Abb. 29 widergespiegelt durch die schwarze Kurve. Hier ist für den Zeitraum 1995-2007 durch die kumulative Auftragung abgebildet, dass im oberen Bereich der Elbe zunächst annähernd die Hälfte der Massen ausgebaggert wurden, welche im Bereich der sogenannten Erosionsstrecke zugegeben wurden. Bei Betrachtung der zeitlichen Entwicklung ist festzustellen, dass in den weiter zurückliegenden Jahren der Anteil der Zugabemassen, die aus externen Quellen zugeführt wurden, größer war und insbesondere in den letzten Jahren stark zurückgegangen ist. Im jüngsten Zeitraum wurde dazu übergegangen das Zugabematerial aus den Buhnenfeldbereichen der Flussstrecke unterhalb der Elstermündung zu gewinnen, d.h. die Zufuhr aus externen Quellen wurde in den letzten 8 Jahren stetig reduziert und mittlerweile auf Null zurückgefahren (vgl. Abb.30). Durch die Beräumung von Buhnenfeldern werden Sedimentsenken geschaffen, welche dem Fluss in der Folge

wieder Sedimente entziehen. Somit wird langfristig nur Sediment im Kreislauf bewegt, welches keinen nachhaltig wirksamen Effekt auf die Sedimentbilanzen hat. Es wurde zwischen den Behörden abgestimmt inwieweit Material aus der Buhnenfeldberäumung als kurzzeitig wirksam zu einem geringen Anteil in die Bilanzierung eingeht. Aus längerfristiger Sicht erbringt die Buhnenfeldberäumung keinen Beitrag zur Geschiebezugabe. Die Gesamtmenge des aus externen Quellen zugeführten Zugabematerials liegt bei rund 350.000 t im Zeitraum 1996-2012. Bei Hinzunahme der aus der Saale gewonnen Massen erhöht sich der Wert auf ca. 435.000 t, das entspricht 20.000 t pro Jahr bzw. 25.000 t pro Jahr. Die Gesamtzugabemenge (inkl. der Umlagerung aus den oberen Elbe-Abschnitten) liegt im Zeitraum 1996-2009 bei maximal 58.000 t/a.

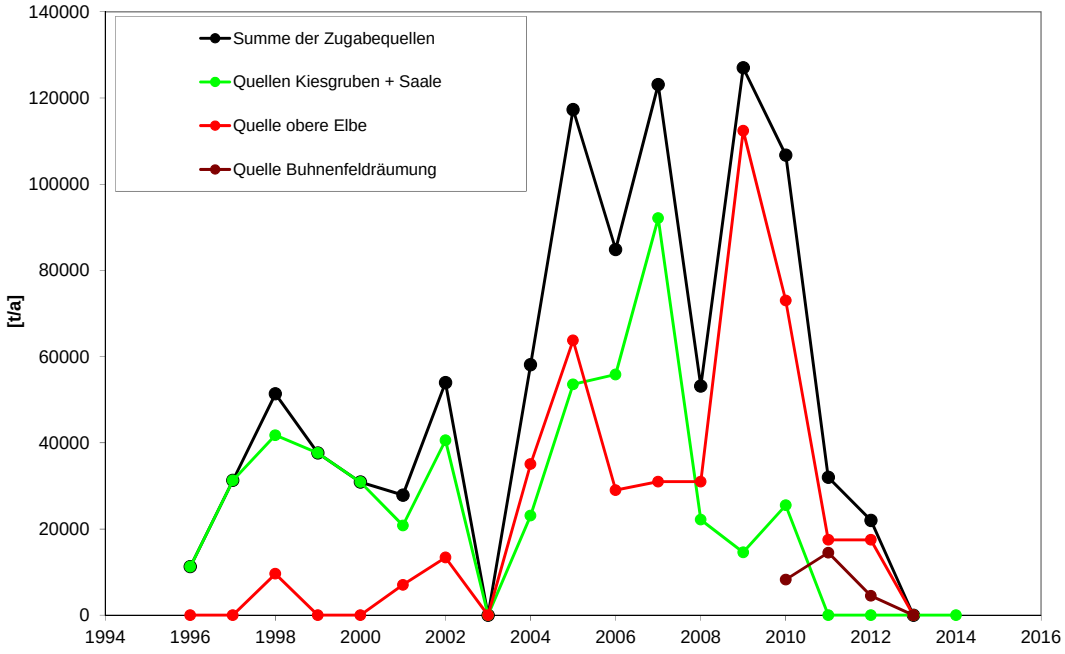


Abbildung 30: Entwicklung der Geschiebezugabe in der mittleren Elbe (farblich ist nach den Quellen des Zugabematerials unterschieden).

5.4 Frachtlängsschnitte

Im Folgenden werden Frachten auf Basis der Transportmessungen ermittelt.
Zunächst wird zu Vergleichszwecken der neuen Auswertungen mit dem Bericht BFG (2004) die Berechnung des bettbildenden Anteils der Feststofffracht nach SAUER (2000), analog zu der dort gewählten Methodik, durchgeführt. In Abb. 31 ist der Längsschnitt der suspendierten Sandfracht der Zeiträume 1996 bis 2008, 2000 bis 2008 und 2004 bis 2008 im Vergleich zum Längsschnitt aus dem Bericht BfG (2004) dargestellt. In den Längsschnitt aufgenommen worden sind nur Datenpunkte, die als zuverlässig eingestuft wurden (vgl. Kapitel 3). Für den Zeitraum 2004 bis 2008 kann

kein Längsschnitt dargestellt werden, da nur an der Messstelle Mockritz die Ergebnisse als zuverlässig eingestuft werden.

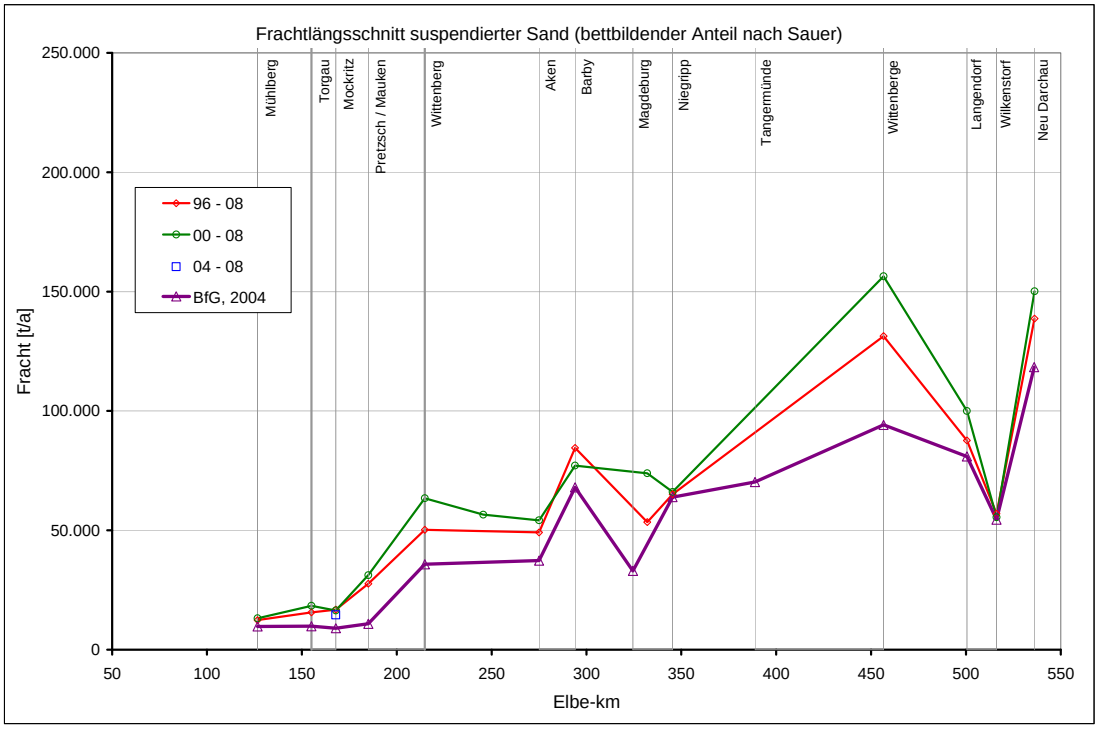


Abbildung 31: Längsschnitt der suspendierten Sandfracht der Zeiträume 1996 bis 2008, 2000 bis 2008 und 2004 bis 2008 im Vergleich zum Längsschnitt aus dem Bericht BfG, 2004.

Die Geschiebefracht der gleichen Zeiträume ist in Abb. 32, ebenfalls im Vergleich zum Vorgängerbericht dargestellt. Die suspendierten Sandfrachten der aktuellen Auswertung sind durchgehend höher als in der Auswertung BFG (2004). Als Ursache für die Abweichungen können methodische Unterschiede der aktualisierten Auswertung sowie eventuelle Änderungen im Frachtregime angenommen werden. Auch die Geschiebefrachten sind überwiegend höher als bei der vorhergehenden Auswertung. Hier kommt als zusätzliche Ursache für die Abweichungen die geänderte Messtechnik (vgl. Kapitel 3.3.1) in Betracht. Auffällig ist die deutlich höhere Geschiebetransportrate der aktuellen Auswertung für alle drei Zeiträume ab der Messstelle Barby.

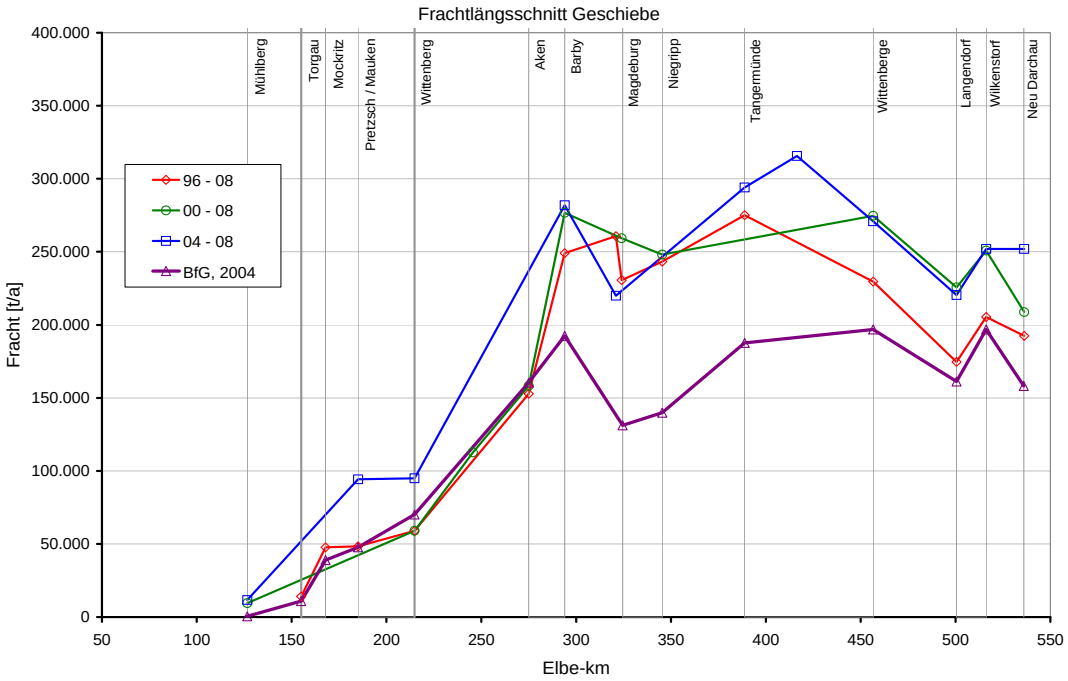


Abbildung 32: Längsschnitt der Geschiebefracht der Bilanzierungszeiträume 1996 bis 2008, 2000 bis 2008 und 2004 bis 2008 im Vergleich zum Längsschnitt aus dem Bericht BfG, 2004.

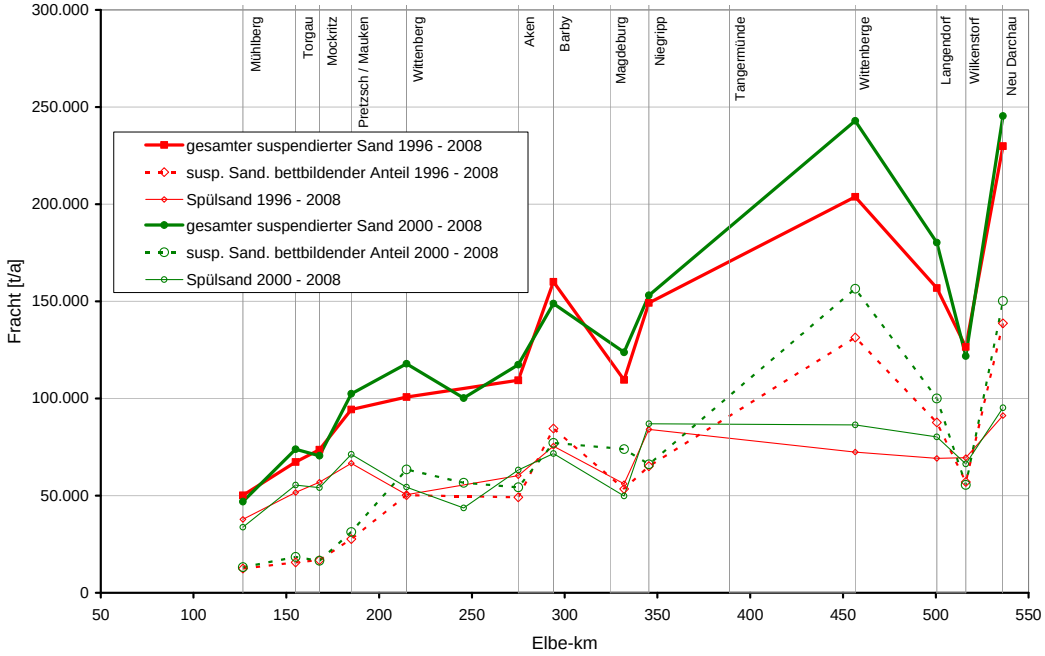


Abbildung 33: Längsschnitt der suspendierten Sandfracht der Zeiträume 1996 bis 2008 und 2000 bis 2008 sowie die jeweiligen Anteile „bettbildend“ und Spülfracht.

Anstelle des bettbildenden Anteils der suspendierten Sandfracht, der hauptsächlich zu Vergleichszwecken mit den vorhergehenden Auswertungen dargestellt wurde, wird hier auch der gesamte suspendierte Sandtransport dargestellt (Abb. 33). Die Differenz, im Folgenden als Spülfracht bezeichnet, hat einen Anteil zwischen 36 und 77 %

am gesamten suspendierten Sandtransport. Theoretisch ist die Spülfracht entlang der Fließstecke konstant, mit Ausnahme von Einträgen aus Nebenflüssen sowie Verlusten infolge von Vorlanddeposition. Dies wird in der vorliegenden Bilanzierung annähernd erreicht (Abb. 33). Verbleibende Schwankungen des Betrages der Spülfracht im Längsschnitt können als Maß für die Unsicherheit der Frachtbilanzierung angesehen werden. Diese betragen (abgeleitet aus den Frachtlängsschnitten) ca. 10 bis 40 %. Die Messstelle Magdeburg (Elbe-km 324) wurde als einzige von der Darstellung ausgeklammert, obwohl alle Zuverlässigkeitskriterien (vgl. Kapitel 3) erfüllt sind. Der Grund dafür ist die Abweichung der ermittelten suspendierten Sandfracht von den Frachten der umliegenden Messstellen. Eine weitere Auffälligkeit stellt die Messstelle Wilkenstorf dar. Hier sind ebenfalls alle Zuverlässigkeitskriterien erfüllt, jedoch liegt die ermittelte suspendierte Sandfracht merklich unterhalb derer der umliegenden Messstellen. beide Messstellen scheinen aufgrund der örtlichen Gegebenheit ein abweichendes Verhalten aufzuweisen. Dieser Vermutung wird im Rahmen der Betreuung des Messnetzes weiter nachgegangen (vgl. Kap. 8).

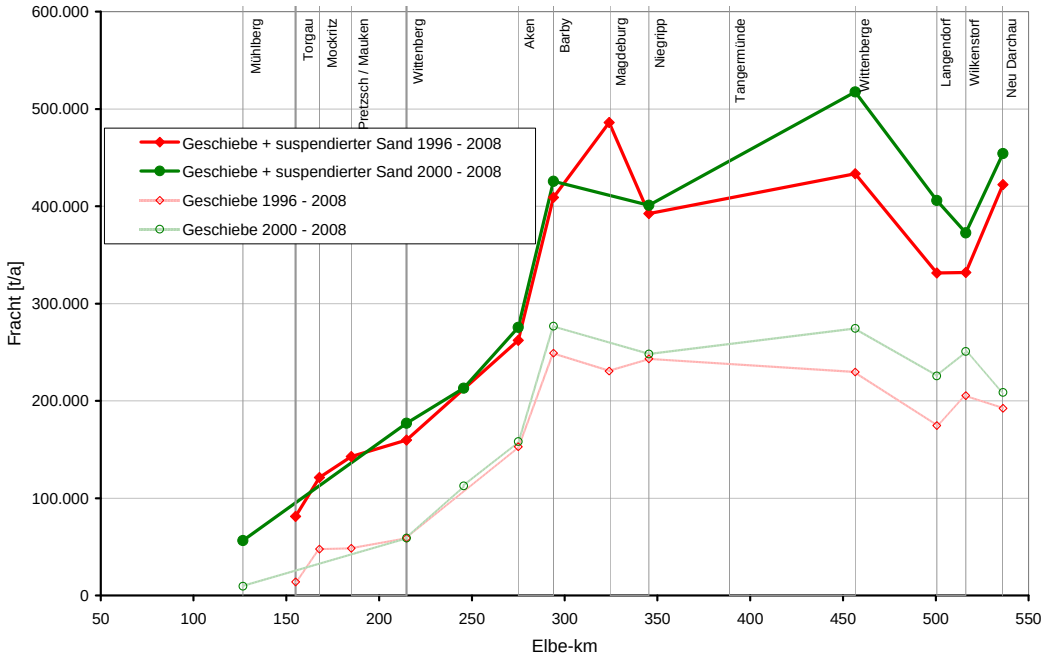


Abbildung 34: Mittlere jährliche Sedimentfracht der Unter- und Mittelelbe für 2 Zeiträume.

In Abb. 34 ist der Längsschnitt der mittleren jährlichen Sedimentfracht der Elbe zwischen Mühlberg und Neu Darchau für die Auswertezeiträume 1996 bis 2008 und 2000 bis 2008 dargestellt. Diese Auswertung ist das für die Sedimentbilanzierung (Kap. 6) relevante Ergebnis, da es die für die Sohlhöhenänderungen entscheidenden Komponenten des Geschiebes und des suspendierten Sandes beinhaltet und zusammenfasst. Im Wesentlichen werden die aus vorhergehenden Untersuchungen bekannten Muster des Frachtlängsschnitts der Elbe bestätigt. Bis zur Saalemündung (Barby, El-km 294) steigt die Gesamtfracht kontinuierlich an. Im weiteren Elbe-Verlauf bleibt die Transportrate auf weitgehend konstantem Niveau.

6 Sedimentbilanzierung

Um die gewässermorphologische Entwicklung der Binnenelbe zu analysieren, sollen im Rahmen dieses Untersuchungskonzeptes grundsätzlich zwei Methoden angewandt werden. Die erste Methode basiert auf Peilungen (Echolot- und Stangenpeilungen) der Sohlenhöhe, die zweite auf Transportmessungen. Die auf Grundlage dieser Methoden ermittelten Sohlhöhenänderungen sind grundsätzlich verschieden. Dies liegt teilweise an der unterschiedlichen räumlichen Auflösung der beiden Methoden, aber auch daran, dass beide Methoden nicht genau die gleiche Zeitspanne abdecken. Hinzu kommen Unsicherheiten u.a. bei den Sedimenttransportmessungen. Hilfreich ist daher zusätzlich die vergleichende Betrachtung der Sohlentwicklung mit den großskaligen Trends (zeitlich und räumlich) der Wasserspiegellagenentwicklung (sowie der Veränderung des mittleren Sohlkorndurchmessers, s. Kap. 3). Alle drei Datengrundlagen können ggf. nach korrespondierenden Zeiträumen gruppiert und ausgewertet werden, um die Entwicklungen der Parameter Fracht, Sohllage und Wasserstand über vergleichbare Zeiträume zu gewährleisten.

Im Folgenden wird aus der beobachteten Sohlhöhenentwicklung (auf Basis von Peilungen) eine rechnerische Sedimentbilanz erstellt, für die eine zusätzliche Berücksichtigung von Sedimenteinträgen, Geschiebezugaben, Baggerungen und Verklappungen sowie Vorlandsedimentation und Abrieb erfolgt. Die Sedimentbilanzierung anhand der Sohlhöhenentwicklung erfolgt für festgelegte Betrachtungs-Zeiträume. Die Höhenänderung zwischen den Peilungen wird für bestimmte Abschnitte ermittelt. Bei Kenntnis des Sedimenteintrags am oberstromigen Rand des Abschnittes lässt sich daraus die Fracht am unterstromigen Rand des Abschnittes bilanzieren als

$$V_{aus} = V_{ein} + \Delta z\ b\ l + V_{Zugabe} - V_{Baggerung} + V_{Verklappung} + V_{Neben} - V_{Vorland} - V_{Abrieb} \qquad (1)$$

mit V_{aus} als der Fracht am unterstromigen Rand des Abschnittes, V_{ein} als den Frachteintrag am oberstromigen Rand, Δz der mittleren Sohlhöhenänderung im Abschnitt, b der Breite, über welche die Sohlhöhenänderung stattfand, l der Länge des Abschnittes, V_{Zugabe} als das Volumen, welches im Bilanzierungszeitraum im Abschnitt zugegeben wurde, $V_{Baggerung}$ als das Volumen, welches im Bilanzierungszeitraum im Abschnitt gebaggert wurde und $V_{Verklappung}$ als das Volumen, welches im Bilanzierungszeitraum im Abschitt verklappt wurde. Die Terme V_{Neben}, $V_{Vorland}$ und V_{Abrieb} bezeichnen die Volumina der Nebengewässereinträge, Vorlanddeposition und des Abriebverlustes, welche ebenfalls auf den Bilanzierungsabschnitt bezogen werden. Bei bekannten Einträgen am oberen Rand des Untersuchungsgebietes kann somit sukzessive die Gesamtsedimentbilanz für das Untersuchungsgebiet aufgestellt werden.

Am oberen Rand der Flussstrecke der deutschen Binnenelbe kann aufgrund der staugeregelten oberstromigen Strecken des tschechischen Elbe- und Moldaugebietes der Geschiebeeintrag nahezu Null angesetzt werden. Aus den vorhandenen Messungen in der oberen Elbe geht hervor, dass in der deutsch-tschechischen Grenzstrecke nur sehr geringe Anteile der Kies-/Sandfraktionen transportiert werden. Der mittlere Eintrag wird in der Größenordnung 10^5 t/a eingeschätzt.

Geschiebeeinträge aus Nebenflüssen sind aufgrund von Staustufen bzw. Sedimentrückhalt zu vernachlässigen. In der Gesamtbilanz wird der relevante Eintrag der Kies-/Sandfraktionen aus der Saale mit 0,028 Mio. t/a und jeweils 0,01 Mio. t/a aus der Mulde und der Havel angesetzt. Die Wirkung der Altelben als Senken wird nach BfG (2004) mit 0,085 Mio. t/a eingeschätzt.

Ansätze für den Abriebverlust müssen anhand von mittleren Geschiebefrachten und geschätzten Abriebraten überschlägig ermittelt werden. Es ergeben sich für:

- Elbe-km 0-250: 50 t/km/a (mittlere Geschiebefracht von 0,05 Mio. t/a bei einer Abriebrate von 0,001 1/km)
- ab Elbe-km 250: 200 t/km/a (mittlere Geschiebefracht von 0,2 Mio. t/a bei einer Abriebrate von 0,001 1/km)

Für die Vorlanddeposition entlang der Elbe wird ein Betrag von bis zu 350 t Sand/km/a angesetzt. Dieser Wert beruht auf Messungen der Universität Karlsruhe, welche für diese Analyse im Hinblick auf den Sandanteil der Deposition neu ausgewertet wurden.

Die Umrechnung von Volumina in Massen setzt die Kenntnis der Lagerungsdichte der Sedimente voraus (ρ_L, kg/m³). Die Lagerungsdichte ist die Dichte einer porösen Sedimentmischung einschließlich der Porenräume. Sie wird berechnet als das Verhältnis der Masse der Sedimentpartikel zum eingenommenen Lagerungsvolumen. ρ_L ist abhängig von der Trockenrohdichte der konstituierenden Mineralien (ρ_R, kg/m³) und der Porosität der Mischung (n, -), wobei letzteres das Verhältnis des Porenvolumens zum Gesamtvolumen darstellt.

Die Porosität n, welche zur Umrechnung zwischen Massen und Volumina benötigt wird, wird in Kap.3.6 (s. Abb. 25) berechnet. Entscheidend für die Umrechnung im Zuge der Sedimentbilanzierung ist die Sedimentdichte der Untergrundschichten. Änderungen der Mächtigkeit treten in der Unterschicht auf, die darüberliegende Deckschicht ist davon unberührt, da sie von der Strömung immer wieder neu als Deckschicht geschaffen wird.

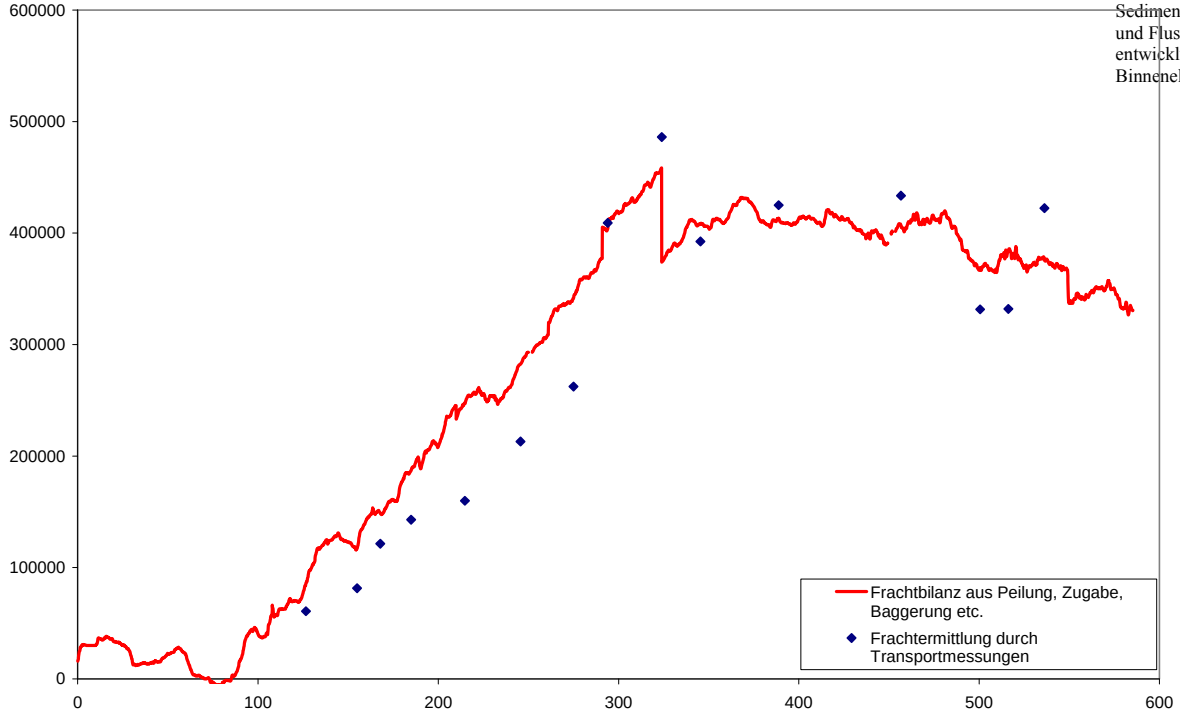


Abbildung 35: Vergleich der Bilanzierung aus Sohlhöhenentwicklung und Feststofftransportmessungen für den Zeitraum 1996 bis 2008.

Die rote Linie in Abb. 35 stellt die Summenlinie für alle nach Gleichung 1 relevanten Kompartimente (z.B. Sohlhöhenänderung anhand Peildifferenzen, Abrieb, Vorlandsedimentation, Eintrag aus Nebenflüssen, Senken etc.) für die sohlnahe Fracht dar. Die sohlnahe Fracht nimmt demnach ab ca. km 80 relativ stetig zu bis etwa km 370. Der Anstieg von 0 auf ca. 450.000 t/a bei Magdeburg setzt sich nach Berücksichtigung der Alten Elbe (minus ca. 85.000 t/a) dann unterstrom weiter fort und umfasst weitere rund 50.000 t/a. Somit umfasst der Anstieg auf ca. 290 km Länge eine Gesamtfracht von rund 0,5 Mio. t/a. Unterstrom von km 370 pendelt die sohlnahe Fracht dann um ca. 400.000 t/a. Der mittels Sedimentbilanzierung ermittelte Frachtanstieg und die relativ konstante Fracht im unteren Abschnitt korrespondieren gut mit den direkt per Geschiebefänger gemessenen sohlnahen Frachten (blaue Datenpunkte).

Beide Methoden der Feststofftransportbilanzierung – anhand der Feststofftransportmessungen und der Sohlhöhenentwicklung – sind voneinander unabhängig. Der Vergleich der Resultate kann Hinweise über die Vertrauenswürdigkeit der jeweiligen Ergebnisse liefern.

Als weitere indirekte Methode wird weiterhin die neu entwickelte Methode zur Analyse von Wasserspiegelfixierungen (vgl. Kap. 3.1) herangezogen, um Rückschlüsse auf die großskalige Sohlentwicklung zu ziehen. Der Vergleich dieser Wasserspiegella-

genentwicklung mit Auswertungen zur Sohlhöhenentwicklung deutet darauf hin, dass Zusammenhänge zwischen großräumigen Sohlveränderungen und Tendenzen für die Wasserspiegellagen anhand der entwickelten Methodik besser nachvollzogen werden können als bisher. Durch die optimierte Abstimmung ihrer zeitlichen und räumlichen Messdaten-Auflösung kann die vergleichende Auswertung von Wasserspiegelfixierungen und Sohlpeilungen weiter optimiert werden.
Die Gegenüberstellung der drei Parameter Wasserstandsänderung, Sohlhöhenänderung und Sedimentfracht unter Berücksichtigung der Bau- und Unterhaltungsmaßnahmen kann die Kenntnis des hydraulisch-morphologischen Systems verbessern.

Zusätzliche Kontrollrechnung:
Die an den Geschiebemessstationen gemessenen Transportraten (in kg/s) und Frachten (in t) wurden bisher verglichen mit den Sedimentmassen (in t), die sich aus der Volumendifferenz zwischen zwei Gewässerbett-Peilungen, ergeben. Für die Ermittlung der Sedimentmassen wurde an der BfG eine Kontrollmöglichkeit gefunden, welche statt der komplexen Peildaten (vgl. Kap. 3.2) auf die sehr viel einfacher und häufiger zu erfassenden Wasserspiegellagen zurückgreift. Die grundlegende Idee dahinter ist die, dass ein auf die Gewässersohle sinkender großer Sedimentkörper durch die Verdrängung des gleich großen Wasserkörpers eine messbare Wasserstandsänderung an der Oberfläche erzeugt. Durch Sedimentation (zusätzlicher Sedimentkörper an der Gewässersohle) wird eine Verdrängung und somit eine messbare Wasserstandshebung erzeugt und durch Erosion (fehlender Sedimentkörper an der Gewässersohle) wird eine messbare Wasserstandsabsenkung hervorgerufen. Voraussetzung ist, dass die Wasserkörper zu den Zeitpunkten mit/ohne Sedimentkörper hinreichend miteinander vergleichbar (hydraulisch und von der seitlichen und unteren Berandung) sind. Dies wird erfüllt, da nur identische, meist niedrige bis mittlere Abflüsse miteinander verglichen werden. Zudem ist das Strömungsfeld zwischen der (durch die Streichlinie s. Abb. 36) festgelegten seitlichen Berandung sowie bei Annahme gleicher Rauheitswirkung der Gewässersohle als unterer Berandung hinreichend vergleichbar.
Diese Annahme, dass das Strömungsfeld zwischen den zwei Zeitpunkten (mit und ohne Sedimentkörper) hinreichend gleich ist, führt darauf, dass für beide Zeitpunkte die gleiche mittlere Strömungsgeschwindigkeit v_m im Fließquerschnitt angesetzt wird. Bezüglich der gleichen hydraulischen Rauheitswirkung der Gewässersohle ist die Annahme gerechtfertigt, da die Substratverhältnisse identisch sind und sich an der Oberfläche die gleichen Bettstrukturen bilden infolge der Strömung. Dass sich über der Gewässersohle bis hin zur Wasseroberfläche dasselbe Strömungsfeld ausbildet, kann angenommen werden, wenn sich durch den zusätzlichen Sedimentkörper kein erheblich anderer Fließquerschnitt ausbildet. Da wir Erosions- und Sedimentationsvorgänge betrachten über Zeiträume von mehreren Jahren, liegen die Änderungsraten allgemein im Bereich von wenigen Zentimetern bis zu ein oder zwei Dezimetern. Wenn man sich den Fließquerschnitt ohne Überhöhung betrachtet, wird deutlich, dass

ein Versatz in der Höhe um wenige Zentimeter oder Dezimeter keine erhebliche Änderung des Fließquerschnittes und Strömungsfeldes bewirkt. Die Annahme:

$v_{m1} = v_{m2}$

ist gerechtfertigt, wenn

$Q_1 = Q_2$

mit v_m = mittlere Strömungsgeschwindigkeit im Fließquerschnitt, Q = Abfluss, t = 1 und t = 2 Zeitpunkte zwischen denen verglichen wird.

Da für den Abfluss gilt:

$Q = v_m * A$

ergibt sich für die Flächen des durchflossenen Querschnitts (A)

$A_1 = A_2$

also, dass die Fließquerschnitte zu beiden Zeitpunkten t = 1, 2 gleich groß sind. Als seitliche Berandung bzw. als Breite des betrachteten Fließquerschnittes wird die Streichlinienbreite b gewählt, welche zwischen den Zeitpunkten unveränderlich festgelegt bleibt. Damit ergibt sich für die mittlere Höhe h_m dann:

$h_{m1} = h_{m2}$

Das bedeutet, dass sich bei einer mittleren Höhenänderung an der unteren Berandung der Fläche, an der Sohle, (Δs_m) eine gleich große mittlere Änderung des Wasserspiegels (Δw_m) ergibt (s. Abb. 36).

$\Delta s_m = \Delta w_m$ (= Δw)

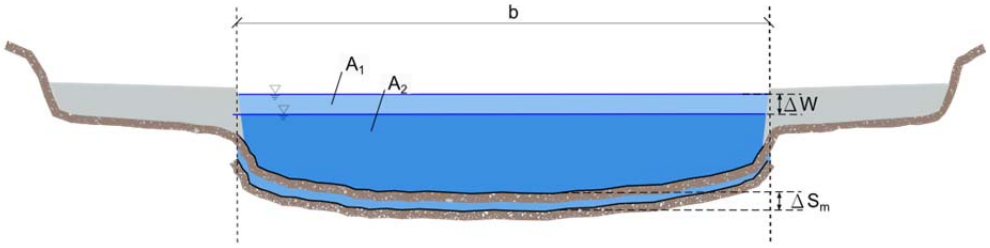


Abbildung 36: Schemaskizze Fließquerschnitt.

Wobei Δw_m nicht gemittelt betrachtet werden muss, sondern als Δw ermittelt werden kann, da sich eine Wasserstandsänderung im gesamten Fließquerschnitt einheitlich ergibt.

Somit kann der Wert für mittlere Sohlhöhenänderungen (Δs_m) unter Beachtung einfacher Regeln unmittelbar aus der Wasserspiegeldifferenz Δw abgelesen werden. Die Streichlinienbreite wurde z.B. deswegen gewählt, weil sie den abflusswirksamen Teil des Fließquerschnittes begrenzt.

Um in dem Frachtendiagramm (Abb. 35) neben den gemessenen Sohlfrachten und der Sedimentbilanzierung auf Basis von Peildaten nun zur Kontrolle diese neue Frachtberechnung auf Basis von Wasserstandsänderungen einblenden zu können, wird weiterhin so verfahren, wie für die Sedimentbilanzierung oben beschrieben. Mit dem Kontrollwert für Δs_m wird nun zunächst ein Volumen durch Multiplikation mit der Strecke und der Streichlinienbreite b errechnet und dann mit der Sedimentdichte in t/m³ multipliziert, so dass eine Fracht in t erhalten wird. Diese Fracht geht dann in die Verschneidung mit Zugabemassen, Abrieb, Vorlanddeposition etc. ganz genauso ein, wie für die Peildaten durchgeführt. Im Ergebnis kann die Größe Kontrollfracht (auf Basis von Wasserstandsänderungen) im Frachtdiagramm (s. Abb. 37 unten) dann im Vergleich zu der gemessenen Sohlfracht und Sedimentbilanzierung eingeblendet werden.

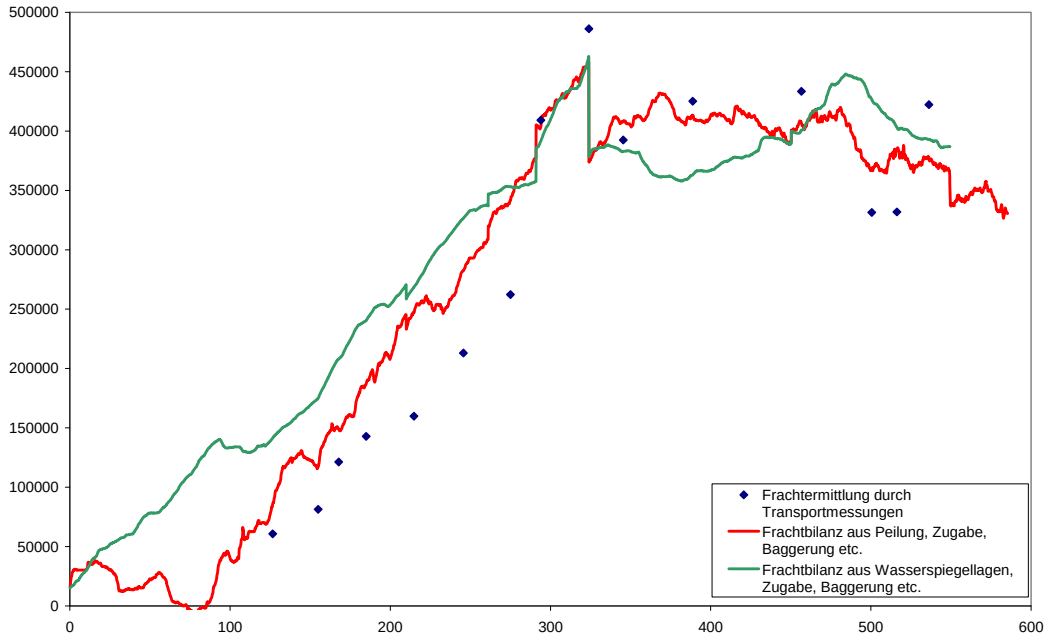


Abbildung 37: Vergleich der Bilanzierung aus Sohlhöhenentwicklung und Feststofftransportmessungen für den Zeitraum 1996 bis 2008 sowie Kontrollrechnung über Wasserspiegeländerungen im gleichen Zeitraum.

Der Bilanzierungs-Zeitraum für die Frachtberechnung aus Transportmessungen ist 1996-2008. Dies stimmt gut überein mit dem Bilanzierungs-Zeitraum für die Frachtberechnung aus Peildaten (inkl. Zugaben, Baggerungen, Abrieb, Vorlandsedimentation etc.). Daher wurde für die Kontrollrechnung ein vergleichbarer Zeitraum vorgegeben, indem für den Startzeitpunkt die Wasserspiegellage für 1997 (Fixierungen von 1994 bis 2000) und für den Endzeitpunkt die Wasserspiegellage für 2008 (Fixierungen von 2004 bis 2013) festgelegt wurden. Im Ergebnis liefert die Kontrollrechnung eine Frachtbilanz mit den gleichen Hauptcharakteristika, wie die Frachtberechnungen aus Transportmessungen und Peildaten (inkl. Zugaben, Baggerungen, Abrieb, Vorlandsedimentation etc.); Bis in den Magdeburger Bereich steigt die Fracht auf ca. 450.000 t/a an, fällt aufgrund der Wirkung der Alten Elbe als senke ab und bleibt dann bis Geesthacht in dem Bereich von ca. 400.000 t/a (s. Abb. 37).

Der große Vorteil dieser Methode ist die Verwendung von Wasserspiegelfixierungen zur Berechnung, welche wesentlich besser und einfacher zu erfassen sind als durchgängige Peilungen der Gewässersohle. Dadurch, dass auch in den zurückliegenden Jahrzehnten sehr viel mehr Fixierungen als durchgängige Peilungen im Elbelauf vorliegen, kann mit dieser Kontrollrechnung für verschiedene Zeiträume eine Frachtberechnung vorgenommen werden. Die Methode ist variabler als die aufwändige Methode auf Basis von Peilungen (vgl. Kap. 3.2).

7 Schwebstoffhaushalt

Das Kapitel zum Schwebstoffhaushalt stellt ein Sonderkapitel in diesem Bericht dar, da es für sich allein steht und keine Verschränkungen zu den anderen Kapiteln aufweist. Dennoch ist der Schwebstoffhaushalt ein Bestandteil des Sedimenthaushaltes der Elbe und wird daher hier abgehandelt. In diesem Kapitel wird mit dem Schwebstoff ein Kompartiment behandelt, welches nicht an der Sohlveränderung Anteil hat. Die Messungen des Schwebstoffmessnetzes erfassen den Anteil, der als Spülfracht durch das System transportiert wird und die feinen Fraktionen (kohäsive Sedimente), die in der Gewässersohle der Binnenelbe nicht vorkommen und an deren Umlagerungen nicht beteiligt sind.

Das Schwebstoffmessstellennetz an den Bundeswasserstraßen im Binnenbereich wird von der Bundesanstalt für Gewässerkunde (BfG) langjährig in Zusammenarbeit mit den Ämtern der Wasser- und Schifffahrtsverwaltung (WSV) betrieben. An den Messstellen wird durch werktägliche Entnahme einer Wasserprobe die Schwebstoffkonzentration bestimmt, aus der anschließend der Schwebstofftransport berechnet werden kann. Im Bereich der deutschen Nordseeästuare findet erst seit wenigen Jahren ein Schwebstoffmonitoring statt, dort werden mit optischen Sonden meist nur die Trübungswerte erfasst.
In untenstehender Übersichtskarte (Abb. 38) ist das Gebiet der deutschen Binnenelbe hervorgehoben. Dieser Ausschnitt bzw. die Erfassung des Schwebstoffhaushalts im Flussgebiet Elbe wird im Folgenden behandelt. Dieser Bereich des Sedimenthaushaltes ist für die Flussbettentwicklung von untergeordneter Bedeutung.

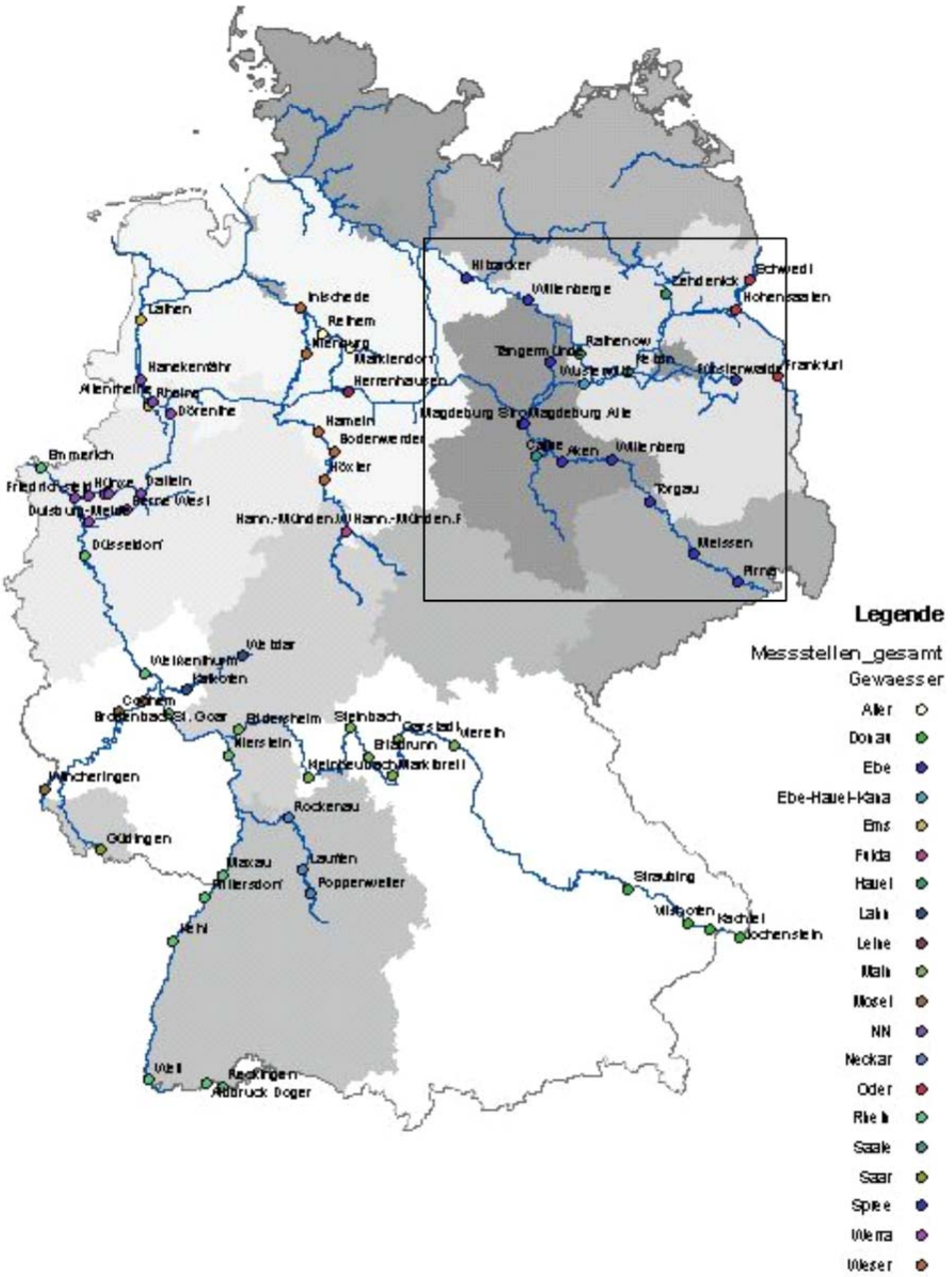


Abbildung 38: Übersichtskarte über die Stationen des Schwebstoffmessnetzes der WSV.

Im Rahmen der nationalen (Flussgebietsgemeinschaft Elbe) und internationalen (Internationale Kommission zum Schutze der Elbe) Zusammenarbeit wurden unter Federführung der BfG für das zurückliegende Jahrzehnt die Datengrundlagen zum Schwebstoffhaushalt der Elbe zusammengestellt und ausgewertet. Im untenstehenden Kartenausschnitt (Abb. 38) für die deutsche Binnenelbe sind durch Kreise die für die Flussgebietsbetrachtung ausgewerteten Messstationen des Elbestroms und der aus quantitativer Sicht relevanten Nebenflüsse (Schwarze Elster, Mulde, Saale, Havel) markiert. Dunkelrote Kreise kennzeichnen die internationalen Bilanzmessstellen, gelbe Kreise sind Messstellen der Bundesländer und orangefarbene Kreise die Messstel-

len des WSV-Schwebstoffmessnetzes. An den Bilanzmessstellen und den Messstellen der Bundesländer sind zumeist auch WSV-Messeinrichtungen, welche vielfach das Rückgrat für die Auswertungen im Flussgebiet bilden und die Vergleichbarkeit der unterschiedlichen Messnetze gewährleisten. Neben den zum Teil optischen Messsonden der Bundesländer wurden auch die Auswertungen der sogenannten Abfiltrierbaren Stoffe (Pfeile) und die Messungen an der Tschechischen Elbe in die Auswertung einbezogen (vgl. Tabelle 8).

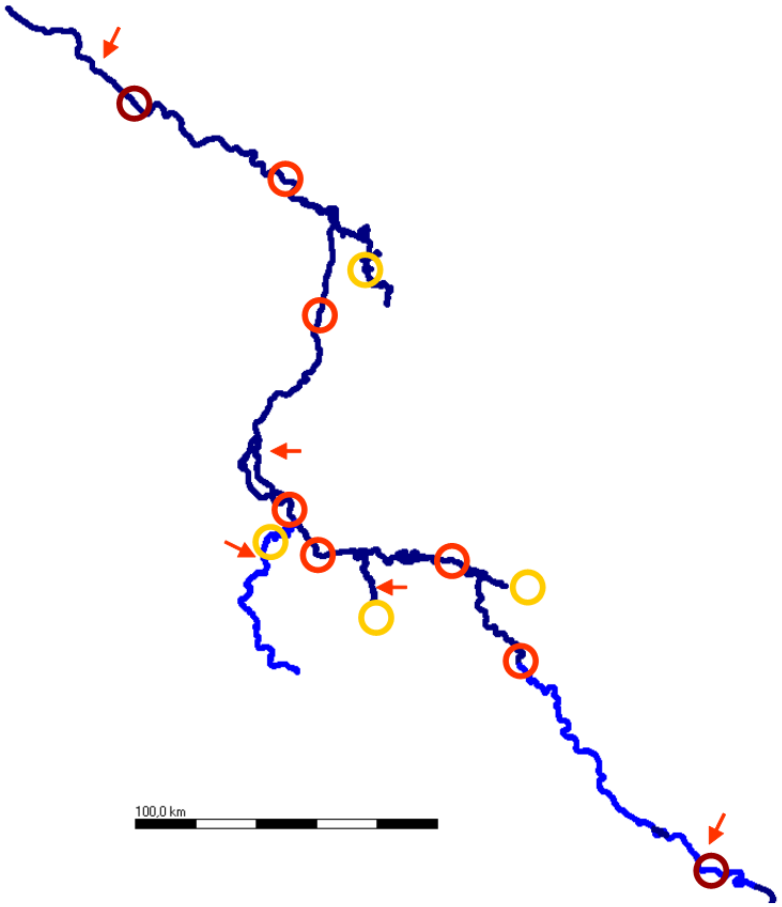


Abbildung 39: Ausschnitt der deutschen Binnenelbe mit Markierungen für Schwebstoffmessstationen.

Tabelle 8: Schwebstofffracht, -konzentration und Abfluss der Jahre 2003 bis 2008.

Anmerkung: In dieser Tabelle sind bei allen Parametern (mit Ausnahme des MQ) für den Zeitraum 1961-2005, für den es aufgrund des langen 45-Jahre-Zeitraums nahezu irrelevant ist) Kalenderjahre zugrundegelegt und nicht hydrologische Jahre, da dies auch die Basi

Messstelle	Gewässer	2003			2004			2005			2006			2007			2008			2003 - 2008					
																				Min.			Max.		Mittel
		Fracht	Konzen	Durchfluss	Fracht	Konzentr	Durchfluss	Fracht	Konzentr	Durchflu	Fracht	Konzentr	Durchfl	Fracht	Konzentr	Durchflu	Fracht	Konzent	Durchfl	Fracht	Konzent	Fracht	Konzentr	Fracht
		[t]	[mg/l]	[m³.s⁻¹]	[t]	[mg/l]	[m³.s⁻¹]	[t]	[mg/l]	[m³.s⁻¹]	[t]	[mg/l]	[m³.s⁻¹]	[t]	[mg/l]	[m³.s⁻¹]	[t]	[mg/l]	[m³.s⁻¹]	[t]	[mg/l]	[t]	[mg/l]	[t]
Debrne, Vestrev (-	Elbe	5,551	13.5	5.00	8,576	18.9	6.79	6,050	17.5	6.71	23,960	24.2	6.98	8,500	15.3	7.82	6,805	8.9	6.96	5,551	8.9	23,960	24.2	9,907
Nemcice		73,554	47.1	35.90	62,078	37.9	35.50	48,097	29.7	43.20	83,168	23.4	47.30	48,558	33.0	48.10	23,117	17.9	36.40	23,117	17.9	83,168	47.1	56,429
Valy		31,227	14.7	45.45	56,465	16.5	46.35	42,537	17.1	56.65	105,719	20.4	63.46	45,641	15.6	62.20	27,896	13.3	47.67	27,896	13.3	105,719	20.4	51,581
Lysa n.Labem		69,722	18.2	57.22	67,783	16.1	59.13	46,830	15.5	68.15	124,591	20.7	73.72	50,778	15.3	76.01	35,760	12.2	59.54	35,760	12.2	124,591	20.7	65,911
Obristvi		40,474	9.1	75.43	72,621	11.7	81.24	111,407	16.8	92.19	227,301	31.2	106.54	90,301	17.7	102.47	33,236	9.1	81.35	33,236	9.1	227,301	31.2	95,890
Dolni Berkovice		173,312	12.8	212.86	153,787	15.8	210.36	151,473	11.0	265.82	599,349	21.2	324.69	106,616	12.4	224.03	62,543	8.0	194.79	62,543	8.0	599,349	21.2	207,847
Decin - Dolni Zleb		122,996	11.9	259.53	190,595	16.1	254.30	229,710	15.2	325.66	549,491	23.0	388.61	186,464	19.5	281.93	126,173	13.4	245.22	122,996	11.9	549,491	23.0	234,738
Tyniste n. Orlici	Orlice	19,803	23.8	13.43	15,393	14.0	14.40	21,425	19.9	16.82	26,026	18.8	22.95	12,310	19.9	18.64	6,965	11.7	13.03	6,965	11.7	26,026	23.8	16,987
Turice	Jizera	20,263	14.4	18.20	30,617	15.5	22.78	23,310	13.1	24.23	47,088	17.5	27.44	18,966	11.7	25.92	12,153	9.7	21.60	12,153	9.7	47,088	17.5	25,400
Vranany	Moldau	61,998	12.7	129.97	53,259	11.3	132.98	131,775	14.8	172.31	214,085	13.2	217.11	41,988	9.0	121.29	26,423	6.4	113.15	26,423	6.4	214,085	14.8	88,255
Srbsko	Berounka	73,752	23.7	38.21	30,768	26.5	28.22	61,716	21.5	37.51	72,730	21.9	44.05	18,458	15.7	29.24	13,000	10.5	27.97	13,000	10.5	73,752	26.5	45,001
Niespeky	Sazava	26,939	24.2	17.62	36,581	33.3	15.73	41,541	29.5	21.97	47,560	22.7	30.22	14,313	26.6	17.18	5,125	12.4	13.33	5,125	12.4	47,560	33.3	28,677
Louny	Eger	12,639	7.5	30.29	9,785	9.5	27.55	22,436	8.5	39.74	30,011	10.8	38.72	10,184	7.8	40.38	10 500**	10**	33.19	9,785	7.5	30,011	10.8	15,926
Usti n.L. (Trmice)	Bilina	5,432	18.1	6.49	6,283	24.1	5.62	7,240	24.0	6.82	5,591	21.7	6.22	7,111	27.6	6.78	3,234	16.8	5.65	3,234	16.8	7,240	27.6	5,816
Benetov n.P.	Ploučnice	3,420	12.2	7.35	6,593	17	7.39	7,428	15.0	7.79	5,598	12.9	7.85	5,104	17.5	7.12	4,941	19.5	6.26	3,420	12.2	7,428	19.5	5,514
Pirna	Elbe	233,599	24.0	275.24	199,307	18.0	262.34	314,758	17.5	339.07	636,900	21.7	406.71	189,867	15.9	301.81	121,827	12.5	263.06	121,827	12.5	636,900	24.0	282,543
Torgau		361,475	34.0	302.40	311,455	31.1	267.87	410,839	26.2	350.41	721,929	31.4	412.36	282,282	27.9	307.22	197,028	19.9	275.00	197,028	19.9	721,929	34.0	380,835
Wittenberg		282,538	32.2	323.70	302,556	30.1	282.67	310,932	21.7	376.21	612,110	27.0	441.80	223,084	23.9	321.34	185,282	19.4	299.60	185,282	19.4	612,110	32.2	319,417
Aken		409,758	37.4	366.33	315,779	28.3	339.70	295,273	20.5	444.95	630,692	29.3	502.47	276,713	24.8	397.22	254,112	22.5	360.93	254,112	20.5	630,692	37.4	363,711
Barby		486,651	37.1	474.12	470,509	33.8	407.06	486,656	25.9	533.13	663,709	29.5	589.55	423,843	27.1	521.27	382,257	25.2	465.19	382,257	25.2	663,709	37.1	485,604
Tangermünde		474,302	36.9	499.11	465,626	36.5	428.28	453,554	26.5	551.84	546,215	28.7	599.20	405,448	27.5	532.49	351,800	24.7	481.67	351,800	24.7	546,215	36.9	449,491
Wittenberge		707,508	47.7	620.46	591,776	40.6	511.27	590,869	30.0	656.97	663,286	31.8	689.64	564,685	31.6	668.98	459,118	28.9	629.97	459,118	28.9	707,508	47.7	596,207
Hitzacker		690,131	46.9	628.08	632,375	43.7	511.21	614,617	31.3	669.73	745,176	36.2	707.01	608,199	34.0	697.41	475,444	31.3	643.46	475,444	31.3	745,176	46.9	625,990
Gorsdorf	Schw. Elster	4,282	8.8	9.09	3,824	10.4	10.05	3,037	5.5	12.48	3,543	6.1	12.08	2,294	6.6	10.60	3,167	5.5	14.43	2,294	5.5	4,282	10.4	3,358
Dessau	Mulde	17,777	11.9	48.65	32,937	11.2	57.91	63,963	13.6	75.44	35,690	8.3	65.93	15,871	5.3	72.27	19,032	5.4	59.49	15,871	5.3	63,963	13.6	30,878
Calbe	Saale	113,243	32.4	117.21	83,078	25.1	82.72	98,727	25.6	101.27	228,348	40.0	95.89	152,299	29.8	128.33	89,438	19.8	110.18	83,078	19.8	228,348	40.0	127,522
Rathenow	Havel	25,691	15.1	64.11	20,019	12.9	55.74	26,285	13.2	67.59	23,589	12.5	61.70	33,689	13.4	81.98	27,079	11.1	78.13	20,019	11.1	33,689	15.1	26,059

Im Rahmen der IKSE wurde 2009 eine Ad-hoc-Expertengruppe „Sedimentmanagement“ eingerichtet. Ihr Ziel ist es, auf der Grundlage qualitativer und quantitativer Sedimentuntersuchungen im Elbestrom und seinen bedeutenden Nebenflüssen eine einheitliche Vorgehensweise für das Sedimentmanagement zu entwickeln und in die Praxis einzuführen. Die obenstehende tabellarische übersicht zeigt, dass eine gute Grundlage zur Beschreibung des Schwebstoffhaushaltes im Flussgebiet der Elbe entstanden ist. Die nachfolgenden Auswertungen zeigen hieraus ausschnittweise die Längssschnitte der Schwebstofffrachten und –konzentrationen für die dt. Binnenelbe (Abb. 40, 41). In den Abbildungen ist jeweils die Bandbreite und die mittlere Schwebstofffracht und –konzentration und zum Vergleich die mittlere Abflussführung im Längsschnitt dargestellt. Es ist jeweils eine Zunahme entlang des Längsverlaufes einhergehend mit dem steigenden Durchfluss bzw. Transportkapazität und Eintrag ersichtlich.

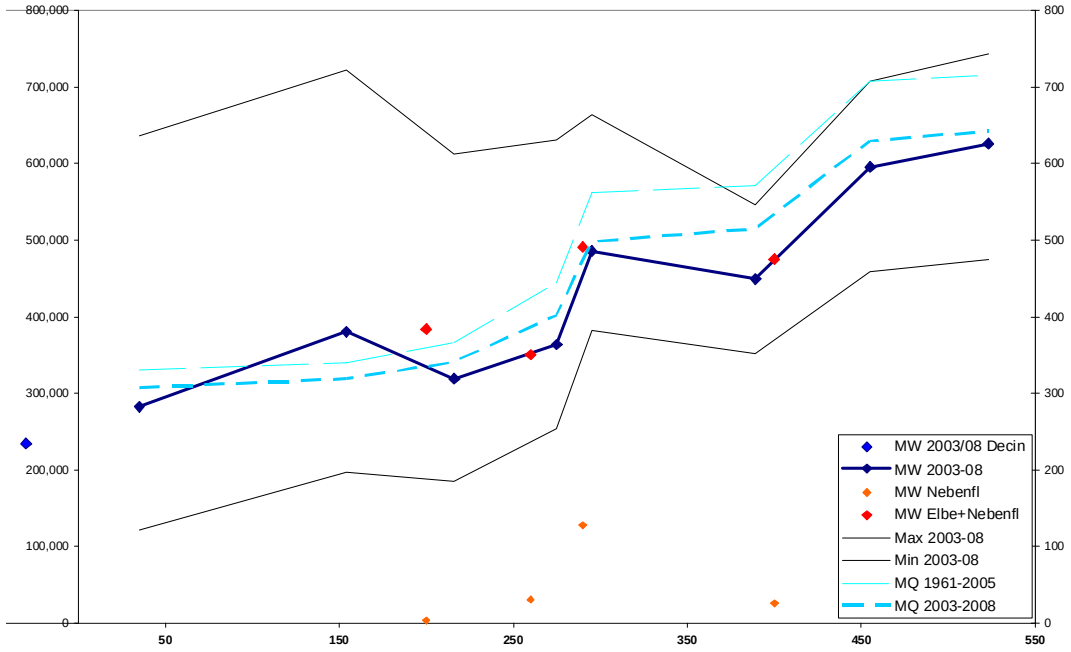


Abbildung 40: Längsschnitt der Schwebstofffrachten [in t/a] für die dt. Binnenelbe. Zum Vergleich die mittlere Abflussführung [in m³/s] auf der Sekundärachse aufgetragen.

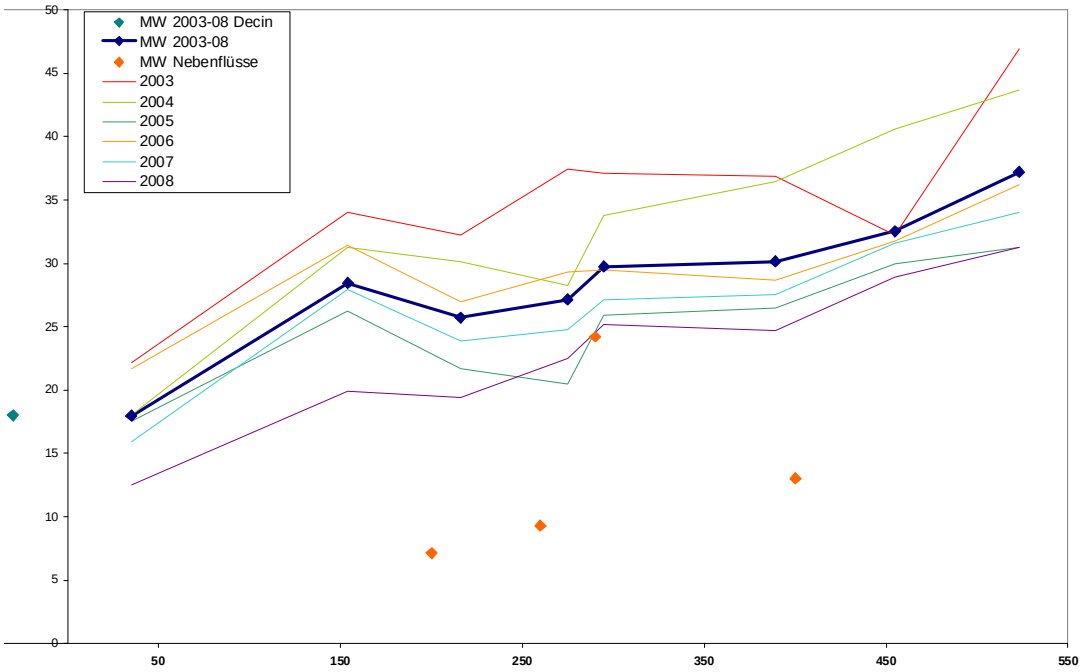


Abbildung 41: Längsschnitt der Schwebstoffkonzentrationen [in mg/l] für die dt. Binnenelbe.

Schwebstoffe sind Sedimente, die durch die Turbulenz und die konvektive Strömung fließenden Wassers in Schwebe gehalten werden. Ein Großteil des Sedimenttransportes in Flüssen vom Einzugsgebiet bis zur Mündung in Seen oder ins Meer erfolgt durch den Transport von Schwebstoffen. Die Kenntnis der Größe des Sedimenttrans-

portes eines Flusses und der Anteil der Schwebstoffe daran ist für die Schifffahrt, für die Wasserwirtschaft, die Wasserqualität und die Ökologie des Gewässers von Bedeutung. Die Sedimentation von Schwebstoffen kann das Stauraumvolumen vor Staustufen und Kraftwerken vermindern, Ablagerungen im Flussschlauch können die Schifffahrt beeinträchtigen und den Unterhaltungsaufwand erheblich vergrößern. Während Hochwasserereignissen, wenn es zu Ausuferungen eines Flusses kommt, werden Schwebstoffe in Auenbereiche oder auf landwirtschaftliche Nutzflächen transportiert. Auch die Wasserqualität ist von Schwebstoffen abhängig, da ein großer Teil der organischen Schadstoffe und der Schwermetalle an die feinsten Fraktionen der Schwebstoffe gebunden ist. Aus ökologischer Sicht beeinflussen Schwebstoffe den Sauerstoffgehalt und die Durchlichtung eines Gewässers und prägen maßgebend den Sedimenttransport und den Sedimenthaushalt und daher wiederum den hydromorphologischen Zustand eines Gewässers in Hinblick auf Struktur, Substrat und Durchgängigkeit. Sie sind in qualitativer und quantitativer Hinsicht für den guten Zustand eines Fließgewässers bzw. für den Betrieb einer Wasserstraße mit ausschlaggebend. Ein Flussgebiet-bezogenes Monitoring zum Sedimenthaushalt einschließlich des Schwebstoffhauhalts ist wichtige Grundlage für die Managementaufgaben in Bundeswasserstraßen.

8 Zusammenfassende Darstellung und Implikationen

Der vorliegende Bericht zu den Untersuchungen des Sedimenthaushaltes und der Flussbettentwicklung der Elbe enthält neben den Auswertungen der morphologischen Standard-Messungen eine Reihe von Auswertungen zu speziellen Fragestellungen wie z.B. zu Sedimentdichte, Porosität, Schwebstoffhaushalt, Transportkörper-Erfassung und Wasserspiegelfixierungen. Die zusätzlichen Auswertungen sind zum überwiegenden Teil Aspekte aus dem Bereich Forschung und Entwicklung. Da sie für die Kenntnis des Gesamtsystems aber auch für die hier fokussierte Betrachtung der Sedimentbilanz und Flussbettveränderung der Elbe von Bedeutung sind, sind die Darstellungen dieser zusätzlichen Untersuchungen in diesem Bericht aufgenommen und es wird weiterhin auf die jeweiligen detaillierten Einzelberichte der BfG verwiesen. Im Folgenden werden die vielfältigen sich aus diesen Zusatzaspekten ergebenden Rückschlüsse nicht wiederholt, sondern gehen in den Kontext der Sedimentbilanzierung und Darstellung der flussmorphologischen Entwicklung ein:

Nach 1990 liegen eine Reihe von Sohlpeilungen in den Bereichen der Binnenelbe als originäre digitale Datengrundlagen vor. Mit Ausnahme des DGM 2004 liegt keine durchgängige Sohlenerfassung für das gesamte Flussgebiet vor. In den Neunziger Jahren liegen generell weniger Daten vor als für das zurückliegende Jahrzehnt. In der BfG wurden die meist abschnittweise vorliegenden Sohlpeilungen unter Einbeziehung des Aufgabenbereiches Hydrographie des geodätischen Fachreferates ausgewertet. Für alle Zeiträume wurde jeweils dieselbe Gewässerbreite (der vor dem Hintergrund Verkehrssicherheit gepeilte Fahrrinnenbereich) für die Erstellung von Geländemodellen im Fahrwasserbereich zugrunde gelegt.
Da die auf Grundlage der Geländemodelle querprofilweise gemittelte Sohlhöhe eines Jahrgangs x somit für dieselbe Flussbreite gilt, wie die des Jahrgangs y, gibt die Sohlhöhendifferenz Auskunft über die Änderung der mittleren Sohle als untere Randbedingung für die Fahrrinne. Das Verhältnis der Unsicherheiten bei der Auswertung von Sohlpeilungen in Relation zu der Größe des Messsignales (Sohlhöhenänderung) nimmt mit der Länge des Zeitraumes, über den verglichen wird, ab (vgl. Unsicherheitsbetrachtungen in Kap. 4). Auf Basis der vorliegenden digitalen Datengrundlage kann aus den Zeiträumen 1993-1999 und 2004-2010 der längstmögliche Vergleichszeitraum für die Gesamtstrecke der Binnenelbe gebildet werden. Die Auftragung der Sohlhöhenänderung im Längsprofil erfolgt in cm/a, um eine Vergleichbarkeit auch von überlappenden oder leicht abweichenden Zeiträumen in den jeweiligen Teilstrecken zu gewährleisten.

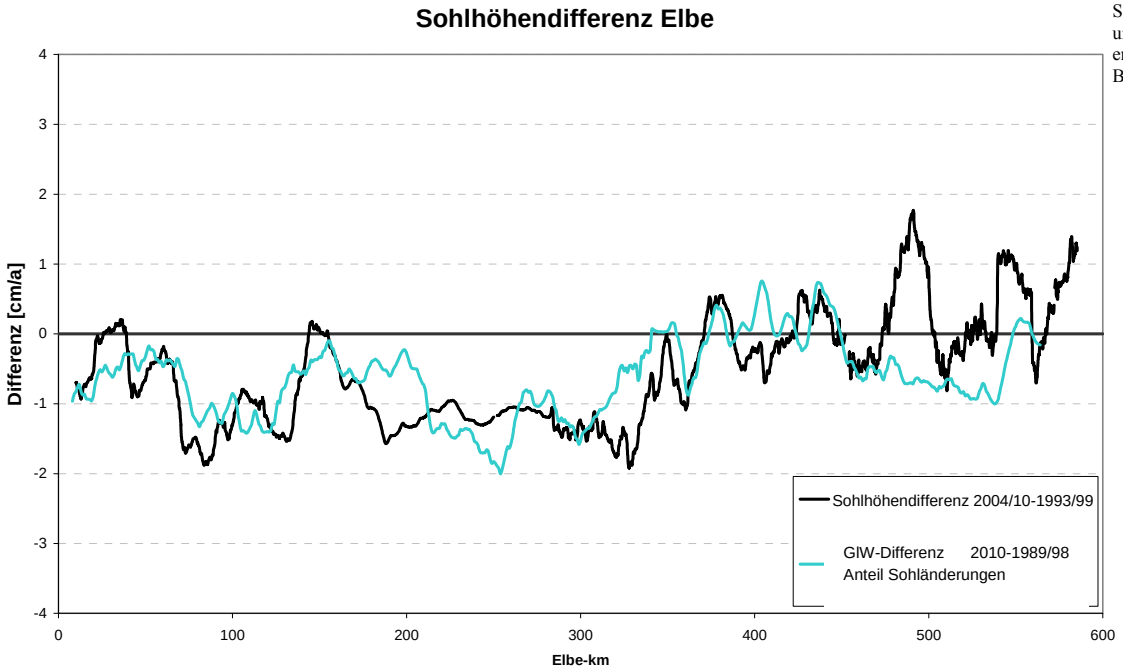


Abbildung 42: Vergleich der auf Basis von Sohlpeilungen (1993/99 – 2004/2010) ermittelten Sohleintiefung mit dem Anteil der GlW-Anpassung zwischen GlW1989/98 und GlW2010, welcher auf Sohländerungen basiert.

Die Auswertungen der Sohlpeilungen weisen auf eine überwiegende Erosionstendenz im Bereich der Binnenelbe hin, wobei in der Strecke zwischen km 75 und km 370 die Eintiefung deutlich überwiegt und die übrige Strecke wechselnde Vorzeichen der Sohlhöhenänderung aufweist und eher ausgeglichen erscheint. Die mittlere Erosionsrate liegt in der Strecke zwischen km 75 und km 370 im Bereich 1 bis 1,25 cm/a (Abb. 42).

Für einen Abgleich mit den Erkenntnissen zu Erosion, Anlandung oder ausgeglichenen morphologischen Verhältnissen auf Basis der Sohlpeilungen im Zeitraum 1993-1999 bis 2004-2010 wird die Sedimentfracht-Ermittlung für den Zeitraum 1996-2008 herangezogen (s. Abb. 43; aus Bericht PG Erosionsstrecke, 2011). Die Auftragung der transportierten Sedimentfrachten im Längsverlauf der Binnenelbe weist die Jahresfrachten der an der Bettbildung beteiligten Kies- und Sandfraktionen an den 18 Messstellen der Binnenelbe und einen generellen Anstieg aus. Die Abnahme der Frachten im Magdeburger Raum ist auf die Wirkung der Altelbe-Strecken als Sedimentsenken zurückzuführen und spiegelt keine Anlandung im Hauptstrom wider (BfG, 2004). Zwischen Mühlberg (km 125) und Magdeburg (km 325) nimmt der Fluss demnach rund 0,45 Mio. t/a an Sedimenten ganz überwiegend aus dem Flussbett auf. Unterstrom des Magdeburger Stadtbereiches (Sedimentverlust s.o.) nimmt der Fluss entsprechend des Frachtlängsschnittes dann weiterhin in geringerem Umfang Sediment auf (BfG, 2004).

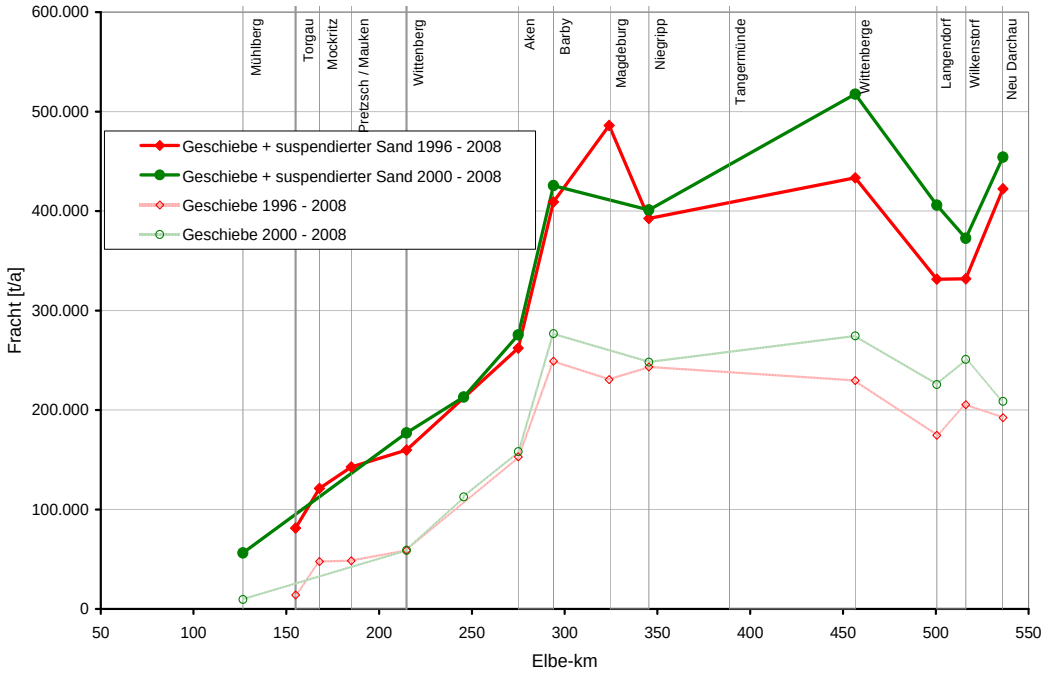


Abbildung 43: Frachtenlängsschnitt der an der Bettbildung beteiligten Fraktionen Kies und Sand. Frachtermittlung für den Zeitraum 1996-2008 als Jahresmittelwerte in [t].

Über den Ansatz der Umrechnung von m³ in t (Sedimentdichte im Bereich 1,75 - 2 t/m³, vgl. Frings et al., 2011b bzw. Kap. 3 und 6) ist ein Abgleich zwischen der Aufnahme von Sedimentfrachten aus dem Flussbett mit der Differenzen-Betrachtung zweier Geländemodelle über vergleichbare Zeiträume möglich. Der Fluss nimmt Sedimente zwar hauptsächlich, jedoch nicht ausschließlich, aus dem Hauptströmungsbereich in Flussmitte auf. Auf Grundlage der erstellten digitalen Geländemodelle für die Binnenelbe und entsprechenden Vergleichsbilanzierungen von gemessenen Flussbettveränderungen mit Frachtermittlungen am Rhein (BfG, 2010b) wird für eine Umrechnung in vom Fluss aufgenommene Massen näherungsweise auch der Bereich von je 20 m Breite links und rechts neben der Fahrrinne einbezogen. Der Bereich der Fahrrinne ist durch Peilungen auf einer Breite von 60 m zu den verschiedenen Zeitpunkten weitgehend abgedeckt. Für die beiden seitlich anschließenden Bereiche kann eine stetige Abnahme der Sedimenttransportdynamik bzw. Erosionsrate angesetzt werden (vgl. Messungen und Querprofildarstellungen des Sedimenttransportes aus http://geoportal.bafg.de/SedDB). Der Ansatz einer stetigen Abnahme der Transportdynamik und Erosionsrate zwischen Fahrrinne und den seitlichen Bereichen führt rechnerisch auf den Ansatz einer mittleren Breite von 80 m mit mittlerer Eintiefungsraten von 1 bis 1,25 cm/a auf einer Streckenlänge von 295 km (vgl. Abb. 42). Bei Umrechnung des sich hieraus ergebenden Volumens mit den jeweiligen Mittelwerten ergeben sich jährliche Sedimentmengen von rund 0,5 Mio. t. Beim Minimal-Ansatz, also einer geringeren Sedimentdichte (z.B. von 1,75 t/m³) und 15 % geringerer Breite (Eintiefung sänke dann wenige Meter neben der Fahrrinne auf Null ab), würden sich

immernoch rund 0,4 Mio. t/a ergeben. Die auf Basis dieser Volumenbilanzierung ermittelte Größenordnung von 0.5 Mio. t/a ist in guter Übereinstimmung mit dem aus den Frachtermittlungen berechnetem Sedimentdefizit. Die Geschiebezugabe lag von 1996 bis 2010 im Jahresmittel eine Größenordnung niedriger (PG Erosionsstrecke, 2011). Auf Grundlage der Auswertungen lässt sich keine Reduktion des Sedimentdefizites der Binnenelbe im Zeitraum der beiden zurückliegenden Jahrzehnte gegenüber der historischen Eintiefung (vgl. Kap. 3.1 u. Abb. 45) erkennen.

Für einen Vergleich mit Sohlhöhenänderungen können zusätzlich die Entwicklungen der niedrigen Wasserstände in korrespondierenden Zeiträumen herangezogen werden, da die Wasserspiegellagen im Flussschlauch der Sohlentwicklung weitgehend folgen, wenn sich nicht auch weitere relevante Randbedingungen ändern bzw. wenn die Sohlhöhenänderung die dominierende Systemveränderung ist. Zu diesem Zweck ist es sinnvoll, die Durchfluss-Randbedingung bei einem solchen Epochenvergleich festzuhalten. Da jedoch für die verlangten Zeiträume bzw. die jeweiligen Vergleichs-Zeitpunkte niemals identische im Flussgebiet gleichwertige Abflüsse vorkommen, muss das Abflussspektrum (mit Fokus auf niedrige bis mittlere Abflüsse) ausgewertet werden (vgl. Kap. 3.1). Eine Möglichkeit des Vergleiches über Zehn-Jahres-Zeiträume z. B. bietet die vergleichende Betrachtung zweier GlW-Linien (z. B. 1998 mit 2010). Dieser Vergleich ist bereits in Abb. 42 mitenthalten, jedoch bereinigt um die Anteile aus Abflussänderungen (s.o. Bedingung identischer Abflüsse), so dass darin nur noch die morphologischen Anteile des Wasserspiegelabsunkes gespiegelt sind. Der eliminierte Anteil aus Abflussänderungen konnte über das hydraulische Modell der BAW ermittelt werden (BAW-Bericht vom 7.11.2012). Die Übereinstimmung zwischen der Sohlhöhenänderung auf Basis von Peildaten und der GlW-Veränderungen aufgrund der morphologischen Anteile ist wiederum gut. Beide weisen zwischen km 75 etwa und km 370 das überwiegende Erosionsregime aus mit über 1 cm /a Eintiefungsrate.

In der Gewässerkunde wurde in den letzten Jahren eine Vorgehensweise (Fixierungsanalyse nach BfG, 2010b; BfG 2012a; Busch et al., 2013) etabliert, die die Vielzahl der Fixierungen für einen längeren Vergleichszeitraum zu einer einzigen Kurve im Längsprofil (Differenz zwischen zwei Epochen) aggregiert. Hierzu wurde die grundlegende Methode der Bildung von Wasserstands-/Abfluss- Beziehungen (W/Q-Fkt.) von einzelnen Pegelstellen auf die Flussstrecke übertragen, indem den durchgehenden Wasserstandsmessungen (Fixierungen) in der Strecke die jeweiligen zum Zeitpunkt der Fixierungen vorhandenen Abflüsse zugeordnet werden. Dementsprechend kann an jeder Stelle eine W/Q-Funktion auf Basis des Parameter-Paares Durchfluss und Wasserstand gebildet werden, sofern eine ausreichende Dichte von Messungen vorhanden ist (vgl. Kap. 3.1).

Mit den für die jeweiligen Zeiträume zutreffenden W/Q-Beziehungen kann dann für gleiche Durchflüsse (z.B. MNQ oder GlQ) der jeweilige Wasserstand ermittelt und eine Differenz über die mit den vorliegenden Sohlhöhenvergleichen korrespondieren-

den Zeiträume als durchgehende Kurve im Längsprofil gebildet werden, welche bei festgehaltenem Durchfluss die Sohlhöhenänderung spiegelt (s. Abb. 44).

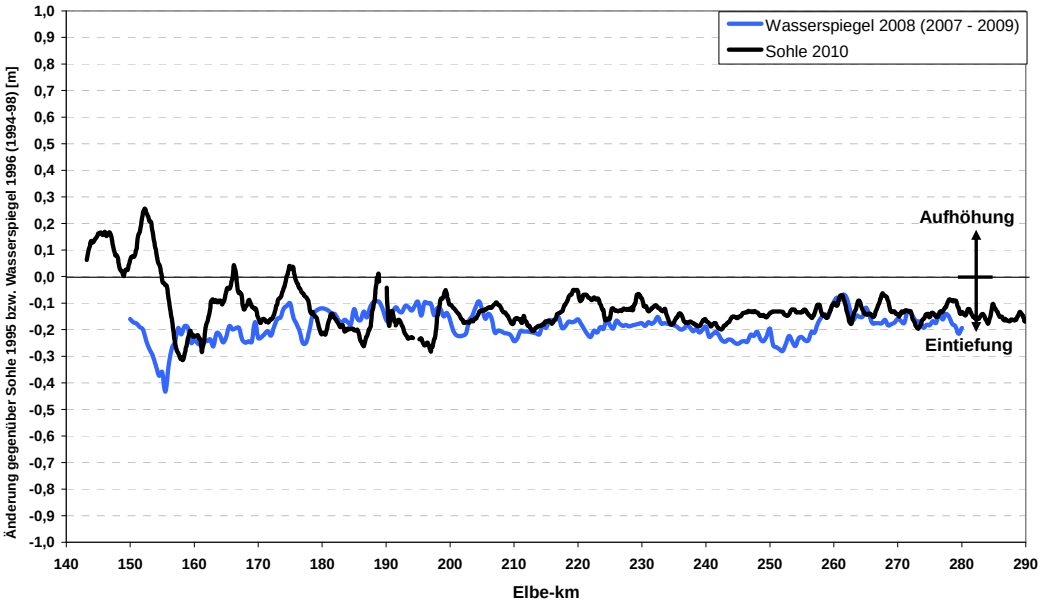


Abbildung 44: Vergleich der Sohlhöhendifferenz auf Grundlage der Peilungen zwischen 1995 und 2010 mit der Wasserspiegel-Absenkung 2008 gegenüber 1996 in [m]. km 150-280.

In Abb. 44 werden die Sohlhöhenänderungen des zurückliegenden Zeitraumes (Auswertung der Peilungen von 1993/1998 bis 2004/2010) mit der Wasserstandsänderung (Auswertung der Fixierungen zwischen den Zeiträumen 1994/1998 und 2007/2009 für MNQ) im korrespondierenden Zeitraum verglichen. Die Durchführung der Fixierungsanalyse (Busch et al. 2013) erfolgte im Bereich der „Erosionsstrecke“. Wie zu erwarten, liegen die Sohleintiefung und Wasserspiegelabsenkung in dem 12 bis 15 Jahreszeitraum bei annähernd gleichem Niveau. Im Erosionsregime schlägt der Einfluss der Sohlhöhenänderung mit einer Rate von über 1 cm/a voll auf den Wasserspiegelverfall (bei gleicher Durchfluss-Randbedingung) durch. Der Verlauf der Absenkungen ist kongruent und großräumlich in derselben Größenordnung. Die Änderungen der Wasserspiegel sind kleinräumlich weniger schwankend als die der Sohlhöhe.

Im Bereich der Binnenelbe herrscht aus großskaliger Sicht (großräumlich und langfristig – 106 Jahre) die Eintiefungstendenz im gleichen Umfang wie in den letzten 15 Jahren seit Beginn der Maßnahmen zur Geschiebezugabe. Aus dem ehemals als „Erosionsstrecke“ bekannten Bereich hat sich der Schwerpunkt tendenziell nach unterhalb der Elstermündung verlagert (BfG, 2004; BMVBW, 2005; Gabriel et al. 2011). Bei der Betrachtung über den 106 Jahre langen Zeitraum (s. Abb. 45) fallen die Unsicherheiten der Einzelmessungen nicht mehr ins Gewicht; für einen rund 300 km langen Streckenbereich der Binnenelbe ergibt sich eine Erosionsrate von 1 - 1,25 cm/a. Diese Erosionsrate ergibt sich gleichermaßen aus den Auswertungen der Echolotaufnahmen der letzten zwei Jahrzehnte (s.o.).

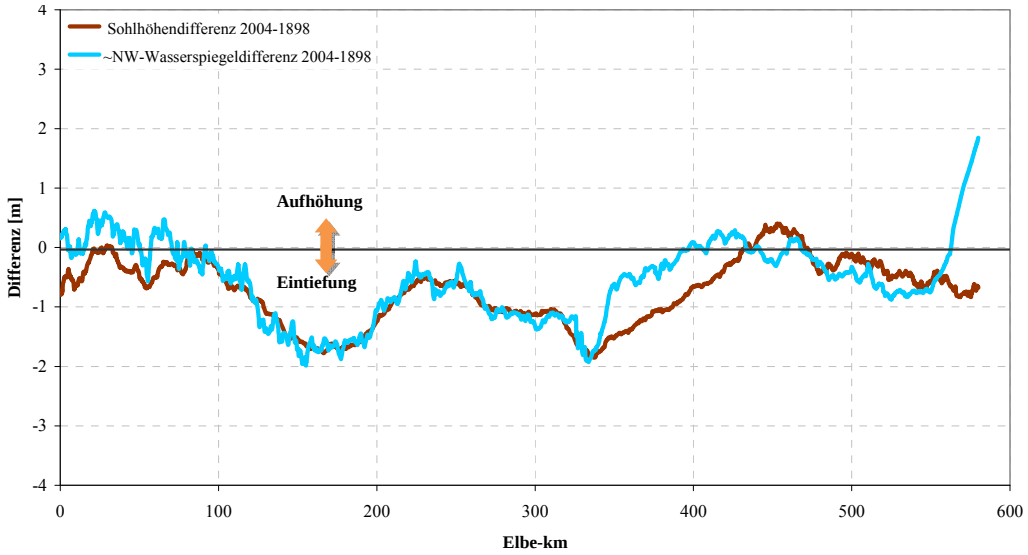


Abbildung 45: Vergleich der Sohlhöhen- und Wasserspiegeldifferenz zwischen 1898 und 2004.

Die langfristige Entwicklung des Wasserstandes (im NW-Bereich) folgt der langfristigen Entwicklung des Flussbettes. Dies zeigt u.a. die Auswertung in Abb. 45 für den langen Zeitraum (106 Jahre) und Abb. 44 für den Zeitraum der zurückliegenden 15 Jahre.

Aus allen voranstehenden Auswertungen geht hervor, dass die Wasserspiegellagen im Flussschlauch der Sohlentwicklung weitgehend folgen, wenn die Sohlhöhenänderung die dominierende Systemveränderung ist bzw. wenn sich nicht weitere relevante Randbedingungen ändern. Im Erosionsregime folgt der Wasserstand der Sohleintiefung in der Elbe. Das Erosionsregime betrifft eine Strecke von ca. 300 km mit einer mittleren Erosionsrate von über 1 cm/a.

Insbesondere in der Strecke bis in den Magdeburger Bereich weisen die dargestellten Auswertungen der unabhängigen Datengrundlagen (Wasserstände, Sohle und Sedimentfrachten) großräumlich mittlere Eintiefungen von über 1 cm/a auf. U.a. in dieser großen Flussstrecke ist somit eine Entlastung der hydraulischen Sohlenbeanspruchung geboten.

Aus den Betrachtungen der bisherigen Entwicklung der Binnenelbe geht hervor, dass ohne erhebliche Entlastung der hydraulischen Sohlenbeanspruchung bei gleichzeitig wirksamem Ausgleich des Sedimentdefizites eine Fortschreibung der großräumlich defizitären Sohlentwicklung und des einhergehenden Wasserstandabsunks erwartbar ist.

Im Flussgebiets-Längsverlauf ist die wirksame Reduktion der Transportkapazität und die umfassende Erhöhung der Sedimentzufuhr erforderlich, um die nachteiligen Wirkungen von Sohl- und begleitendem Wasserspiegelverfall im Fahrwasserbereich abzustellen. Für alle Planungen von Unterhaltungsvorgaben und einzelnen Maßnahmen

muss die großräumliche Entwicklung des Flusses und langfristige Dynamik von Sohle und Wasserspiegel einbezogen werden, um u.a. eine nachlassende oder negative Wirksamkeit von lokalen Maßnahmen auch im umgebenden Flussgebiet zu vermeiden. Um nachteilige Wirkungen von Sohl- und begleitendem Wasserspiegelverfall auf Planungen von Maßnahmenkonzepten, auf die Unterhaltung und auf den Gewässerzustand zu vermeiden, sind vordringlich Flussgebiets-übergreifende Konzepte zum Ausgleich des Sedimentdefizites der Binnenelbe und zur wirksamen Verhinderung der Sohleintiefung zu prüfen.

Das Sedimentdefizit in der deutschen Binnenelbe liegt in der Größenordnung von 450.000 t/a. Dieses Defizit ist der Strecke zwischen Elbe-km 70 und 370 etwa zuzuordnen. Das für einen Ausgleich des Sedimentdefizites erforderliche Maß an Sedimentzufuhr, kann daher die **innerhalb** dieser Strecke umgelagerten Sediment-Massen nicht berücksichtigen. Es ist für die Beschreibung des Systems sinnvoll, zwischen solchen Umlagerungen **innerhalb** des betroffenen Systems einerseits und **echter Sedimentzufuhr** andererseits zu unterscheiden. Eine **echte Sedimentzufuhr** in das System der defizitären Elbstrecke stellt **ausschließlich** das Einbringen von Zugabematerial aus externen Quellen, d.h. von Quellen außerhalb des Systems Binnenelbe dar (Geschiebezugabematerial aus Steinbruch/Kiesgrube). Die Zugabemengen, die aus dem oberen Elbeabschnitt stammen sowie Zugabemengen, die seit 2011 aus den Buhnenfeldern der Elbstrecke zwischen Elster- und Muldemündung entnommen wurden, können nicht als Sedimentzufuhr eingestuft werden, sondern stellen bei Betrachtung des großräumlich defizitären Systems Binnenelbe Umlagerungen **innerhalb** des defizitären Systems dar. Durch die Beräumung von Buhnenfeldern werden Sedimentsenken geschaffen, welche dem Fluss in der Folge wieder Sedimente entziehen.
In Kap. 5 ist ausgeführt, dass aus dem oberen Bereich der Elbe zunächst annähernd die Hälfte der Massen stammen, welche im Bereich der sogenannten Erosionsstrecke zugegeben wurden. Bei Betrachtung der zeitlichen Entwicklung ist festzustellen, dass in den weiter zurückliegenden Jahren zu Beginn der Geschiebezugabe an der Elbe der Anteil der Zugabemassen, die aus externen Quellen zugeführt wurden, größer war und insbesondere in den letzten Jahren stark zurückgegangen ist. In dem Zeitraum ab 2011 wurde dazu übergegangen das Zugabematerial aus den Buhnenfeldbereichen der Flussstrecke unterhalb der Elstermündung und zum Teil aus dem Fahrwasserbereich aus anderen Strecken der Mittelelbe (z.B. Mehderitzsch bei Torgau/Belgern) zu gewinnen, d.h. der Anteil der Zufuhr aus externen Quellen an der Geschiebezugabe wurde im zurückliegenden Jahrzehnt stetig reduziert und mittlerweile auf Null zurückgefahren.

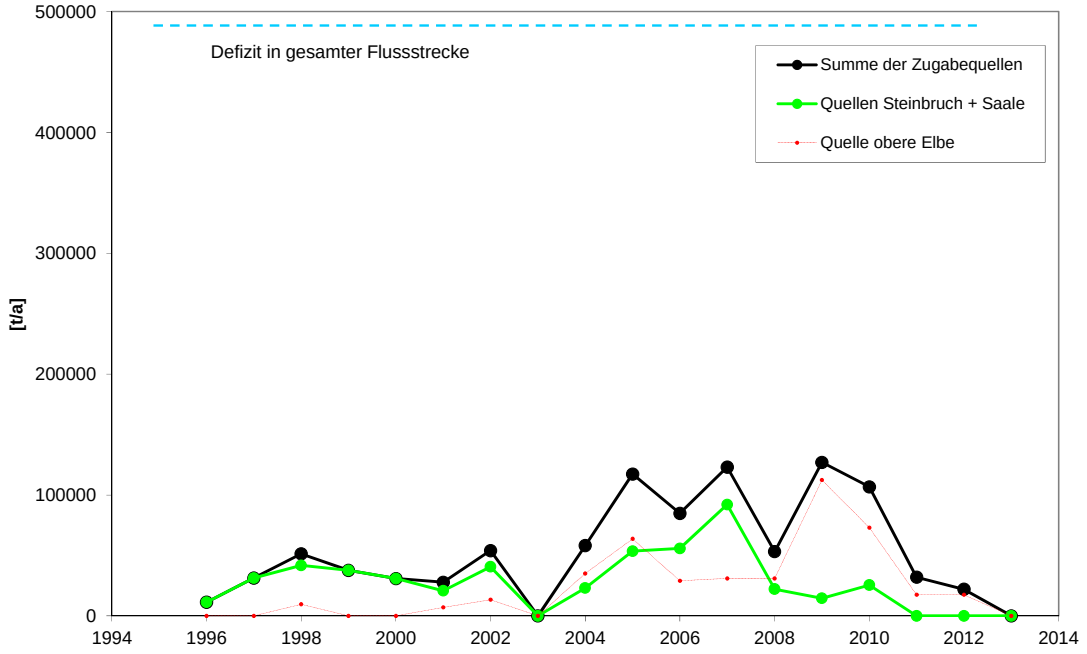


Abbildung 46: Entwicklung der Geschiebezugabe in der mittleren Elbe (farblich ist nach den Quellen des Zugabematerials unterschieden; vorläufige Größenordnung Buhnenfeldberäumung; gegenübergestellte Größenordnung des Sedimentdefizites).

Die Gesamtmenge des aus externen Quellen zugeführten Zugabematerials liegt bei rund 350.000 t im Zeitraum 1996-2012. Bei Hinzunahme der aus der Saale gewonnen Massen erhöht sich der Wert auf ca. 435.000 t, das entspricht 20.000 t pro Jahr bzw. 25.000 t pro Jahr. Die Gesamtzugabemenge (inkl. der Umlagerung aus den oberen Elbe-Abschnitten) liegt im Zeitraum 1996-2009 bei maximal 58.000 t/a. In den letzten vier Jahren geht dieser Wert auf ca. 15.000 t/a zurück, die echte Sedimentzufuhr (aus externen Quellen) auf 0 t/a.

Somit liegt die Gesamtzugabemenge inkl. der Umlagerungen im Bereich von ca. 10 % des Sedimentdefizites und die **echte Sedimentzufuhr unter 5 % des Sedimentdefizites**. Hierbei ist die Entwicklung stark rückläufig und zuletzt wurde effektiv kein Ausgleich des Sedimentdefizites durch Sedimentzufuhr aus externen Quellen umgesetzt. In der Gesamtsicht auf das System der defizitären Binnenelbe deckt sich die vorhergehende Analyse des unverminderten Fortschreitens der Tiefenerosion der Elbe mit der Einschätzung fehlender Wirksamkeit der Sedimentbewirtschaftung. Die Geschiebezugabe seit 1996 ist bislang die einzige umfängliche Maßnahme zur Erosionsbekämpfung in der Binnenelbe (AU-Entwurf. Nr. I3711.100.0002). Dies führt darauf, dass die bisherigen Bewirtschaftungs - und Unterhaltungskonzepte zu hinterfragen sind und insbesondere Analysen und Konzepte für die Binnenelbe als Gesamtsystem zugrunde zu legen sind.

Die dargelegten Auswertungen und Schlussfolgerungen fußen auf einer breiten Datengrundlage. Es wurde angestrebt die Ergebnisse und Zusammenschau wo immer möglich auf mehrere voneinander unabhängige Daten-Standbeine zu stützen bzw. gegeneinander abzusichern. Die zugrunde liegenden Einzelmessungen bzw. Auswertungen enthalten noch immer Unsicherheiten, welche in Kap. 4 diskutiert werden. Trotz aller bestehenden Unsicherheiten ist es eine Maßgabe die möglichen Auswertungen und Untersuchungen durchzuführen und in einer Gesamtsicht zusammenzustellen.

Die BfG sichtet in Abstimmung mit der AG Hydrometrie bzw. den Qualitätszirkel Gewässerkunde sowie mit den Dienststellen der WSV fortlaufend Neuentwicklungen im Bereich der gewässerkundlichen Messverfahren. Im Bereich der Gewässermorphologie werden Literaturstudien und Recherchen im internationalen Raum durchgeführt und gemeinsam mit den Amtsbereichen regelmäßig neue Verfahren in BWaStr. auf Robustheit und Einsatzreife in der Praxis getestet. In den aktuellen Berichten der BfG zu den Messverfahren zur Erfassung des Schwebstoffhaushaltes sowie der Geschiebe- und Sohluntersuchungen werden entsprechende Übersichten zum Stand der Technik gegeben (BfG, 2011 und BfG 2012d).

Diese fortlaufenden Arbeiten zur Recherche, Sichtung, Bewertung und Darstellung der Entwicklungen bzgl. Stand der Technik zu den unterschiedlichen Bereichen der gewässerkundlichen Datenerfassung werden durch gezielte Untersuchungen ergänzt, welche auf die Unsicherheiten der vorhandenen Messungen und Auswertungen ausgerichtet sind.
So wird z.B. eine erneute Kalibrierung der sedimentologischen Effizienz des BfG-Geschiebefängers in 2014 mittels Laborversuchen durchgeführt, nachdem dies zuletzt in den Jahren um die Jahrtausendwende und noch nicht für den Bereich erhöhter Abflüsse ausgeführt wurde. Ebenso ist die Überprüfung der Transportmessungen des suspendierten Sandes im Vollprofil anhand der Messungen des WSV-Dauermessnetzes Schwebstoff Gegenstand eines von 2012 bis 2015 laufenden F+E-Projektes zur Sedimentbilanzierung im Flussgebiet.

Literaturverzeichnis

AG Sohlstabilisierung, 2011: Erosionsstrecke der Elbe, Bewertung der Geschiebezugabe und ergänzende Untersuchungen 2004 bis 2009", Bericht der AG Umsetzung des Sohlstabilisierungskonzeptes

ASTM, 1994: Standard test method for density of soil and rock in place by the water replacement method in a test pit (D 5030 89). American Society of Testing and Materials, West Conshohocken Pennsylvania (USA).

AU-Entwurf. Nr. I3711.100.0002 für Geschiebezugabe 2013 - 2014 in der Erosionsstrecke der Elbe von Elbe-km 120 bis 259,6

BAW, 2012, P. Faulhaber, Abgrenzung hydrologischer und morphologischer Anteile an der Wasserspiegeländerung des festzulegenden GlW2010 gegenüber den Werten im Zeitraum der Festlegung des GlW89* 7.11.2012

BMVBW, 2005, Grundsätze für das Fachkonzept der Unterhaltung der Elbe zwischen Tschechien und Geesthacht mit Erläuterungen, Bonn 2005

BMV, 1997, Sohlengleichgewicht am Rhein – Bestandsaufnahme und Maßnahmenprogramm Rheinsohlenerosion, Bundesministerium für Verkehr, Bonn 1997

BfG, 1994: Kornzusammensetzung der Elbesohle von der deutsch-tschechischen Grenze bis zur Staustufe Geesthacht. BfG-0734, 1994

BfG, 2004, Vollmer, S., Schriever, S., „Feststofftransport und Flussbettentwicklung der Elbe“, BfG-1431 Bericht der Bundesanstalt für Gewässerkunde, Koblenz

BfG, 2008: Auswertung digitaler Fernerkundungsaufnahmen des Elbe-Wasserlaufes (FE-Datenauswertung Elbe). BfG-1580, Koblenz.

BfG, 2010a, Frings, R. M., Vollmer, S.: Morphological development of the Rhine between 1996 and 2006 : a comparison of two approaches: sediment transport measurements and echosounding surveys; [Iffezheim - Brohl (km 336-620)] Koblenz, BfG-1640

BfG, 2010b: Analyse und Bewertung der hydraulisch-morphologischen Situation zwischen Iffezheim und Mainz, Bericht BfG-1702, Dez. 2010

BfG, 2011: Bericht 1710, N. Gehres, A. Winterscheid – Untersuchung der Dynamik von Transportkörpern sowie deren Oberflächenabhängigkeit an ausgewählten Flussabschnitten der Tideelbe.

BfG, 2012a: 14. Gewässermorphologisches Kolloquium, Dynamik des Sedimenthaushaltes von Wasserstraßen, Veranstaltungen 1/2012, ISSN 1866-220X, Koblenz, April 2012

BfG, 2012b: Untersuchung der großräumigen hydraulisch-morphologischen Entwicklung an der Grenzoder, Bericht BfG-1765, 2012

BfG, 2012c: Wasserstandsänderungen im Zusammenhang mit der morphologischen Entwicklung an Oberrhein, mittlerer Elbe und Grenzoder, Bericht BfG-1767, 2012

BfG 2012d: Messverfahren des Geschiebetriebs für Wasserstraßen, Bericht BfG-1761, August 2012

BfG, 2013: 15. Gewässermorphologisches Kolloquium, Geomorphologische Prozesse unserer Flussgebiete, „Flussmorphologische Entwicklung des Rheins“, D. Abel, Veranstaltungen x/2013, Koblenz 2013

Busch, N., Hatz, M., Vollmer, S., 2013: Neue Auswertemethode zum Nachweis von Wasserstandsänderungen im Zusammenhang mit der morphologischen Entwicklung an Bundeswasserstraßen – dargestellt am Beispiel der Mittleren Elbe, Hydrologie und Wasserwirtschaft, 2013

Carling, P. A., Reader, N. A.; 1982. Structure, composition and bulk properties of upland stream gravels. Earth Surface Processes Landforms Vol. 7, pp. 349–365 (doi:10.1002/esp.3290070407).

Elbstromwerk, 1898: Der Elbstrom, sein Stromgebiet und seine wichtigsten Nebenflüsse. Königliche Elbstromverwaltung zu Magdeburg. Berlin.

Faulhaber, P., 2000: Veränderung hydraulisch-morphologischer Parameter der Elbe. – Mitt. Bundesanstalt für Wasserbau, Nr. 82, 97-117

Ferguson, R.I., 1986: River loads underestimated by rating curves. Water Resources Research Vol. 22, pp. 74-76.

Frings, R.M., 2008: Downstream fining in large sand-bed rivers. Earth Science Reviews Vol. 87 (1), pp. 39–60 (doi: 10.1016/j.earscirev.2007.10.001).

Frings, R.M., Kleinhans, M.G., Vollmer, S., 2008: Discriminating between pore-filling load and bed-structure load: a new porosity-based method, exemplified for the river Rhine. Sedimentology Vol. 55 (6), pp. 1571–1593 (doi: 10.1111/j.1365-3091.2008.00958.x).

Frings, R.M., Ottevanger, W., Sloff, K., 2011a: Downstream fining processes in sandy lowland rivers, Journal of Hydraulic Research Vol. 49 (2), pp. 178-193 (doi:10.1080/00221686.2011.561000)

Frings, R.M., Schüttrumpf, H., Vollmer, S., 2011b: Verification of porosity predictors for fluvial sand-gravel deposits. Water Resources Research, 47, W07525, doi:10.1029/2010WR009690.

Gabriel, T., Kühne, E., Faulhaber, P., Promny, M., Horchler, P., 2011: Sohlenstabilisierung und Erosionseindämmung am Beispiel der Elbe, WasserWirtschaft, Heft 06/2011

Gehres, N., Winterscheid, A., 2011: Untersuchung der Dynamik von Transportkörpern sowie deren Oberflächenabhängigkeit an ausgewählten Flussabschnitten der Tideelbe – BfG Bericht 1710.

Gehres, N., Frings, R.M., 2012: Dune Tracking – Eine Methode zur quantitativen Erfassung des sohlnahen Sedimenttransportes über Transportkörper. In: Dyna-

mik des Sedimenthaushaltes von Wasserstraßen, 14. Gewässermorphologisches Kolloquium 2011, 43-51. BfG, Koblenz.

Glazik, G., 1994: Zur Abschätzung der Sedimenttransportverhältnisse in der Elbe als Grundlage wasserbaulicher Maßnahmen. - Wustrow, unveröffentlicht

Krumbein, W. C., 1934: Size frequency distributions of sediments. Journal of Sedimentary Research Vol. 4, pp. 65–77 (doi:10.1306/D4268EB9-2B26-11D7-8648000102C1865D).

Mesters, K., 2008: Baustoffprüfung im Rahmen der Geschiebezugabe Unterer Niederrhein – Jahresdokumentation 2008, KM GmbH für Straßenbau- und Umwelttechnik, Bochum

Naumann, S., Schriever, S., Möhling, M. & Hansen, O., 2003: Bedeutung der Nebenflüsse für den Feststoffhaushalt der Elbe. – Bericht BfG-1382, Koblenz, April 2003

Nestmann, F.& Büchele, B. [Hrsg.] 2002: Morphodynamik der Elbe. – Schlussbericht des BMBF-Verbundprojektes FK 0339566, Karlsruhe, Januar 2002

Peronius, N., Sweeting, T. J., 1985: On the correlation of minimum porosity with particle size distribution, Powder Technology Vol. 42, pp. 113–121 (doi:10.1016/0032-5910(85)80043-7).

PG Erfolgskontrolle Geschiebebewirtschaftung, 2005: Gesamtkonzept zur Durchführung einer Erfolgskontrolle Geschiebebewirtschaftung am Rheinstrom, Münster/Mainz, September 2005

PG Erosionsstrecke Elbe, 2009: Sohlstabilisierungskonzept für die Elbe von Mühlberg bis zur Saalemündung, WSD Ost, WSA Dresden; BAW, BfG unter Mitwirkung der Biosphärenreservatsverwaltung „Mittelelbe“ im Landesverwaltungsamt Sachsen-Anhalt und des Sächsischen Staatsministeriums für Umwelt und Landwirtschaft

PG Erosionsstrecke Elbe, 2011: Erosionsstrecke der Elbe. Bewertung der Geschiebezugaben und ergänzende Untersuchungen 2004 bis 2009, WSA Dresden; BAW, BfG, unveröffentlichter Bericht der Projektgruppe „Erosionsstrecke“, Juli 2011

Quick et al., 2012: Hydromorphologische Bewertung und Praxisprojekte mit Schnittstelle zur Ökologie, BfG-Schriftenreihe; Gewässerökologisches Kolloquium der Bundesanstalt für Gewässerkunde, Koblenz

Sauer, W., 2000: Quantifizierung sohlhöhenrelevanter Feststofftransportprozesse in der Elbe. Abschlussbericht der Teilprojekte II. 3 „Suspendierte Feststofffracht“ und I.6. „Hydrologisches Feststoff-Bilanz-Modell (HFBM)“. Bericht BfG-1307, Berlin-Koblenz

Verstraeten, G., Poesen, J., 2001: Variability of dry sediment bulk density between and within retention ponds and its impact on the calculation of sediment yields. Earth Surface Processes and Landforms Vol. 26, pp. 375–394 (doi:10.1002/esp.186).

Wooster, J. K., Dusterhoff, S. R, Cui, Y., Sklar, L. S., Dietrich, W. E., Malko, M., 2008: Sediment supply and relative size distribution effects on fine sediment in-

filtration into immobile gravels. Water Resource Research Vol. 44, W03424 (doi:10.1029/2006WR005815).

Wu, W., Wang, S. S. Y., 2006. Formulas for sediment porosity and settling velocity. Journal of Hydraulic Engineering Vol. 132 (8), pp. 858–862 (doi:10.1061/(ASCE)0733-9429(2006)132:8(858)).

Yu, A. B., Standish, N., 1991. Estimation of the porosity of particle mixtures by a linear- mixture packing model. Industrial and Engineering Chemical Research Vol. 30, pp. 1372–1385 (doi:10.1021/ie00054a045).

Bundesanstalt für Wasserbau
Kompetenz für die Wasserstraßen

Bundesanstalt für Wasserbau (BAW)

Kußmaulstraße 17
76187 Karlsruhe

www.baw.de
info@baw.de

Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie (BSH)

Bernhard-Nocht-Straße 78
20359 Hamburg

www.bsh.de
posteingang@bsh.de

Deutscher Wetterdienst (DWD)

Frankfurter Straße 135
63067 Offenbach/Main

www.dwd.de
info@dwd.de

Bundesanstalt für Gewässerkunde (BfG)

Am Mainzer Tor 1
56068 Koblenz

www.bafg.de
posteingang@bafg.de

BUNDESAMT FÜR SEESCHIFFFAHRT UND HYDROGRAPHIE

bfg Bundesanstalt für Gewässerkunde

IMPRESSUM

Herausgeber:
Bundesanstalt für Gewässerkunde
KLIWAS Koordination
Am Mainzer Tor 1
Postfach 20 02 53
56002 Koblenz
Tel.: 0261 / 1306-0
Fax: 0261 / 1306-5302
E-Mail: kliwas@bafg.de
Internet: http://www.kliwas.de

Redaktion: KLIWAS-Koordination, Bundesanstalt für Gewässerkunde

Autoren: Doreen Grätz, Sönke Schriever, Klaudia Krötz, Frauke König, Christian Svenson, Markus Promny, Norbert Busch, Marcus Hatz (BfG)

Layout: Christin Hantsche und Tobias Knapp, Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie - Rostock

Druck: Bundesanstalt für Gewässerkunde

DOI: 10.5675/Kliwas_67/2014_Binnenelbe

URL: http://doi.bafg.de/KLIWAS/2014/Kliwas_Binnenelbe.pdf