

Norbert Busch, Stefan Vollmer und Marcus Hatz

Neue Auswertemethode zum Nachweis von Wasserstandsänderungen im Zusammenhang mit der morphologischen Entwicklung an Bundeswasserstraßen – dargestellt am Beispiel der Mittleren Elbe

New method for analysing trends in water level changes related to the morphological development in German Federal Waterways using the example of the Middle Elbe

Eine der Hauptaufgaben der Wasser- und Schifffahrtsverwaltung des Bundes ist es, optimale Verkehrsbedingungen für die Schifffahrt auf den Bundeswasserstraßen in Deutschland zu gewährleisten. Hierfür erarbeitet und berücksichtigt sie umfassend abgestimmte, nachhaltige Konzepte hinsichtlich Betrieb, Unterhaltung und Ausbau der Wasserstraßen. Enthalten sind auch Messkonzepte zur regelmäßigen Erfassung der Gewässergeometrie durch Peilungen und Wasserstands- bzw. Abflussmessungen an Pegelstandorten. Vervollständigt werden die Messkonzepte durch Wasserstandslängsprofilmessungen (Wasserstandsfixierungen) für die gewässerkundliche Beschreibung und durch morphologische Messungen zur Ermittlung des Feststoffhaushalts in den Bundeswasserstraßen. Für vergleichende Untersuchungen der Bundesanstalt für Gewässerkunde (BfG) wurden diese unterschiedlichen Messgrößen herangezogen, um Auswirkungen zeitlicher Sohlhöhenänderungen in morphologisch aktiven Strecken an der Mittleren Elbe auf die Wasserspiegellagen nachweisen zu können. Es wurde auf eine in der Hydrometrie bewährte Methode zur Auswertung von Abflussmessungen zurückgegriffen, die nun erstmalig auf die vorliegenden Wasserspiegelfixierungen angewendet wurde. Ergebnis sind epochenbezogene Sohlhöhen- und Wasserspiegeldifferenzen. Diese auf Messwerten basierenden integrativen Untersuchungen sind Bestandteil einer Erfolgskontrolle bei der Unterhaltung der Bundeswasserstraßen. Sie können auch zur Plausibilisierung der Ergebnisse von Feststofftransportmodellen im Rahmen der Beschreibung und Analyse morphodynamischer Prozesse genutzt werden.

Schlagwörter: Elbe, Flusshydrologische Software (FLYS), Gewässermorphologie, Sohlhöhenänderungen, Wasserspiegelfixierungen, Wasserstandsänderungen

Ensuring optimum navigation conditions in the Federal Waterways is one of the main tasks of German water and navigation authorities. Therefore, the administration creates and considers well-coordinated, sustainable concepts for the operation, maintenance and development of the German Federal Waterways. This includes monitoring concepts for systematic survey of the geometry, water level and discharge at water gauges and water level surveys in longitudinal profiles for hydrological analyses as well as sediment transport monitoring in waterways. These parameters were applied by the Federal Institute of Hydrology (BfG) to identify changes of the bed level in morphodynamic active river reaches of the Upper Rhine, the Middle Elbe River and the border reach of the Oder River. The conceptual approach of this analysis is to derive functional relations of water levels and corresponding discharges for each water level survey and continuously along the entire reach of the study sites. The results of this investigation reflect the trends of water level increase or decrease in longitudinal profiles of the study sites related to morphological alterations. These trends in water level changes are compared to observed river bed alterations. This abstract presents the evaluation method and results using the example of a river reach in the Middle Elbe. Water level surveys and corresponding analyses are integral parts of the monitoring concepts of the water and navigation authorities, for hydrological and morphological analyses as well as for the calibration of numerical hydro- and morphodynamic models.

Keywords: Bed level changes, Elbe River, River Hydrology Software FLYS, river morphology, water level changes, water level survey

1 Einleitung

Wasserstandsmessungen und Abflussmessungen werden an ca. 170 regional bedeutsamen Pegeln der Bundeswasserstraßen (BWaStr) durchgeführt. Zusätzlich erfolgen sporadische Wasserstandsmessungen im Längsprofil, sog. Wasserspiegelfixierungen. Sie bilden seit jeher das Rückgrat des klassischen hydrometrischen Messkonzepts der Wasser- und Schifffahrtsverwaltung des Bundes (WSV). Wasserstandsdaten aus Wasserspiegelfixierungskampagnen werden insbesondere für den Betrieb, die Unterhaltung und den Ausbau der Wasserstraßen benötigt. So hat sich beispielsweise der Gleichwertige Wasserstand (GIW) als maßgebliche Größe für die Unterhaltung der Fahrrinne am Rhein etabliert. Er dient der Schifffahrt zur Ermittlung der Abladetiefe und wird seit 1932 alle 10 Jahre zuerst für gewässerkundliche Pegel und danach für die Fließstrecken zwischen den Pegeln neu fest-

gelegt. Wichtige Grundlagen für die Bestimmung des GIW sind die Wasserspiegelfixierungen (SCHONLAU 1991). Abbildung 1 zeigt für eine Oberrheinstrecke die Linie des aktuellen GIW₂₀₀₂, die des mittleren Abflusses (MQ) sowie fixierte Wasserstände im Niedrig- und Mittelwasserbereich im Zeitraum nach 2009, die für die Neufestlegung des GIW₂₀₁₂ herangezogen werden.

Alle gemessenen Wasserstände, ob an Pegeln oder in Messkampagnen von Wasserspiegelfixierungen erhoben, dokumentieren gleichermaßen das hydrologische und morphologische Gedächtnis der Gewässer. Deshalb sind gemessene Wasserstände 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 identifizieren zu können.

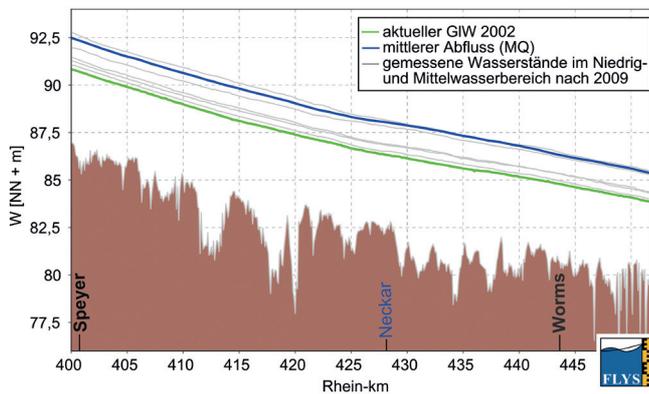


Abbildung 1
Wasserspiegelfixierungen am Oberrhein (nach 2009), Wasserspiegellagen für MQ und für den aktuellen GIW₂₀₀₂
Water level surveys at the Upper Rhine (after 2009), water levels for MQ and for the currently valid GIW₂₀₀₂

Für 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 anhand 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 die Wasserstandsentwicklung zeigt,

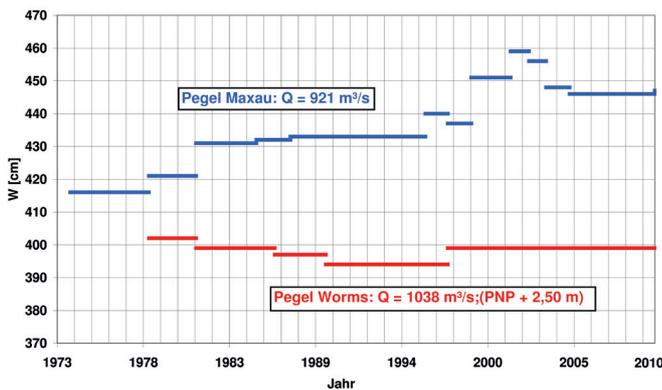


Abbildung 2
Wasserstandsänderungen (1973–2010) an den Pegeln Maxau/Rhein und Worms/Rhein bei einem Abfluss im Bereich des MNQ (geringfügig oberhalb)
Changes in water levels (1973–2010) at the gauges Maxau/Rhine and Worms/Rhine at mean low-flow discharge (slightly above)

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.

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 beliebige Streckenpunkte an dem untersuchten Gewässer eine Abflusskurve zu ermitteln. Aus anderen 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. Mit diesem Verfahren können die in zeit- und kostenaufwändigen Sondermessungen entlang der BWaStr erhobenen hydrologischen Daten für morphologische Untersuchungen weiter verwendet und zeitlich analysiert werden.

In diesem Beitrag werden die neue Auswertemethode im Detail und hieraus hervorgehende Ergebnisse beispielhaft für die Mittlere Elbe zwischen Torgau und Aken vorgestellt. Ergebnisse der Untersuchung stehen stellvertretend für drei Projekte, in denen im Auftrag und in Zusammenarbeit mit der WSV Wasserspiegelfixierungen am Oberrhein (BUNDESANSTALT FÜR GEWÄSSERKUNDE 2010), an der Mittleren Elbe und an der Grenzoder (BUNDESANSTALT FÜR GEWÄSSERKUNDE 2012-A) auf Wasserstandsänderungen analysiert und mit Sohlhöhenänderungen verglichen wurden. Als Analysewerkzeug stand die Flusshydrologische Software (FLYS) der BfG, Desktop-Version 2.1.3, und die Bürosoftware Excel zur Verfügung (BUNDESANSTALT FÜR GEWÄSSERKUNDE 2009). Zukünftig werden die Analyseschritte integral mit der weiterentwickelten Version der Software FLYS (FLYS-3.0) möglich sein.

2 Veranlassung und Zielsetzung

Um die aus Peildaten und Feststofftransportmessungen abgeleitete Sohlhöhenentwicklung über längere Zeiträume abzusichern und zu validieren, ist die Auswertung der Wasserspiegelfixierungen für die Bestimmung von morphologischen Änderungen eine wichtige Grundlage. 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. Diese Datengegenüberstellung dient u.a. der Plausibilisierung der lokal an Messstellen erfassten Transportdaten, aus welchen Sohlhöhenänderungen entlang der gesamten Fließstrecke für den Epochenzeitraum ermittelt werden. Des Weiteren sichert der Differenzenvergleich von ermittelten Wasserstandsänderungen für Peildatenepochen mit den entsprechenden Wasserstandsänderungen für Wasserspiegelfixierungsepochen die Datengenauigkeit aller drei Datenbestände mit unterschiedlichsten Messverfahren und Messgenauigkeiten ab. Wenn in Streckenabschnitten keine Sohlpeilungen vorliegen oder diese erhebliche Unsicherheiten enthalten, dann können die Wasserspiegelfixierungsanalysen auch als Hauptdatenpool genutzt werden.

Mit dem beschriebenen integrativen Ansatz werden somit unterschiedliche hydrologische, morphologische und geodätische Messdaten 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. Solche morphologisch aktiven Gewässerabschnitte existieren insbesondere am frei fließenden Ober- und Niederrhein, an der Mittleren Elbe und an der Grenzoder. Vor dem Hintergrund der Unterhaltung der BWaStr werden diese integrativen Untersuchungen als flankierender Bestandteil der Erfolgskontrolle angesehen. Die erzielten Ergebnisse können weiterhin zur Plausibilisierung von Feststofftransportmodellen im Rahmen der Beschreibung und Analyse morphodynamischer Prozesse verwendet werden.

3 Wasserspiegelfixierungen an Bundeswasserstraßen

Wasserspiegelfixierungen werden in Deutschland hauptsächlich an den frei fließenden Bundeswasserstraßen vorgenommen. Die WSV hat den gesetzlichen Auftrag, für die Sicherheit und Leichtigkeit der Schifffahrt auf den Wasserstraßen zu sorgen. Sie muss sicherstellen, dass sie überall und zu jedem Zeitpunkt, d.h. unabhängig vom jeweiligen Abflusszustand, dieser Verantwortung mit entsprechenden Maßnahmen (Betrieb, Unterhaltung und Ausbau der Wasserstraßen) gerecht wird. Folgerichtig wurden Wasserspiegelfixierungen in der WSV zu früheren Zeiten vorrangig verwendet, um daraus maßgebliche Wasserspiegellagen (z.B. GIW, HSW¹) für den Betrieb der Wasserstraßen abzuleiten.

Im Laufe der Zeit haben sich die Methoden der Wasserstandsmessungen im Kontext der Wasserspiegelfixierungen erheblich gewandelt. Solche Messungen wurden bis vor ca. 20 Jahren überwiegend mit der Pflockmethode ausgeführt, indem der Wasserstand am Ufer an einem geschlagenem Pflock zunächst markiert/fixiert wurde. Die danach oft erst später erfolgten Einmessungen der Marken waren wasserstandsabhängig teilweise mit erheblichen systematischen Fehlern verbunden. Heute werden auf den meisten frei fließenden BWaStr die Wasserspiegelfixierungen von einem Messschiff mittels PDGPS-Sensor (Präzises Differentielles GPS) ausgeführt. Der Wasserstand wird im Stromstrich und nicht mehr am Ufer fixiert.

Wasserspiegelfixierungen sollten möglichst bei stationären Abflusszuständen vorgenommen werden, da nur dann in den

Messstrecken eindeutige Beziehungen zwischen dem gemessenen Wasserstand und dem vorherrschenden Abfluss existieren. Tatsächlich werden sie aber insbesondere aus logistischen Gründen teilweise bei instationären Verhältnissen durchgeführt. Deshalb sollten nach Abschluss der Messungen die Daten zunächst vermessungstechnisch und anschließend hydrologisch plausibilisiert werden, indem jedem gemessenen Wasserstand der Fixierung der zum Messzeitpunkt vorhandene Abfluss zugeordnet wird. Für besondere Zielsetzungen existiert dabei in der WSV auch die Praxis, instationäre Messungen auf stationäre Verhältnisse umzurechnen.

Zur Ermittlung des Abflusses erfolgt die Bezugnahme der im Verlauf der Wasserspiegelfixierungen gemessenen Wasserstände auf die Wasserstände an den Bezugspegeln. Die Vorgehensweise ist damit konsistent zur Auswertung von Abflussmessungen. Eine einheitliche Vorgehensweise zur Plausibilisierung und zur zeitlichen Auswertung von Wasserspiegelfixierungen hat es im Gegensatz zu den Auswertungen von Wasserstands- und Abflussmessungen in der WSV bisher nicht gegeben.

4 Vorstellung der Untersuchungsmethode

Zum Verständnis von morphologisch bedingten Wasserspiegellagenänderungen an BWaStr sind die Zusammenhänge zwischen Sohlhöhenänderungen, Feststofftransport, Sedimenthaushalt und den gewässerspezifischen Abfluss- und Strömungsverhältnissen zu analysieren. Unabhängig vom gewählten Ansatz sind derartige Untersuchungen grundsätzlich großräumig durchzuführen. Nachfolgend werden drei Verfahren beschrieben, wobei die für diese Untersuchungen gewählte Methode der Analyse von Wasserspiegelfixierungen in Kapitel 4.3 ausführlich dargestellt wird.

4.1 Modellierung des Sedimenthaushalts

Eine sehr detaillierte Methode zur Untersuchung des zuvor skizzierten Sachverhalts besteht in der großräumigen morphodynamisch-hydraulischen Langzeitmodellierung des Feststoffhaushalts. Durch diesen modellgestützten, dynamischen Ansatz lässt sich die Ursache-Wirkungskette mit diversen Rückkopplungseffekten gut beschreiben, auch wenn zum Betreiben der Feststofftransportmodelle auf Flussgebietsmaßstab erheblich vereinfachende Annahmen getroffen werden müssen. In Zukunft wird die Bedeutung dieser Modelle für Betrieb und Unterhaltung von BWaStr weiter zunehmen. Sie lassen sich u.a. durch eine effizientere Datenbereitstellung, erweiterte Modellansätze (2D bzw. 3D-Modelle) und durch größere Rechnerkapazitäten noch verbessern.

4.2 Klassisches Verfahren (Einhänge-Methode)

Das klassische Verfahren, zeitliche Wasserstandsänderungen in der Strecke, d.h. zwischen den Pegeln an BWaStr, festzustellen, beinhaltet die Auswertung von Wasserspiegelfixierungen in der Längsschnittbetrachtung. Es kann auch als Bezugslinienverfahren bezeichnet werden. Zunächst ist ein Bezugszeitpunkt der Untersuchung durch die Auswahl einer Wasserspiegelfixierung zu bestimmen. Üblicherweise wählt man eine Messung aus der fernen Vergangenheit. Damit wird neben dem Bezugszeitpunkt auch für hydrologische Pegel der Bezugswasserstand und Bezugsabfluss festgelegt. Die gemessenen Wasserstände dieser Wasserspiegelfixierung fungieren im Weiteren als Bezugswasserstände entlang der Untersuchungsstrecke. Danach werden die

¹ höchster schiffbarer Wasserstand

gemessenen Wasserstände weiterer Wasserspiegelfixierungen auf den Bezugsabfluss umgerechnet. An hydrologischen Pegeln ergeben sich nach den gültigen Abflusskurven für die ermittelten Abflussdifferenzen (ΔQ) die resultierenden Wasserstands-differenzen (ΔW). Für die übrigen Messorte auf der Strecke zwischen den Pegeln wird mangels Kenntnis der lokalen Durchflussverhältnisse angenommen, dass das für den Pegel ermittelte ΔW auf alle Messorte übertragen werden kann. Im letzten Schritt erfolgt dann für alle Auswertepunkte die Differenzenbildung zwischen umgerechneter Wasserspiegelfixierung und Bezugswasserspiegellage, woraus schließlich die Differenzlinie entsteht.

Die in diesem Verfahren getroffene Annahme, dass die Durchflusscharakteristik am Bezugspegel auf jeden Punkt einer Untersuchungsstrecke übertragen werden kann, birgt u.U. eine erhebliche Unsicherheit in sich. Auch wenn die untersuchten BWaStr schon seit vielen Jahrzehnten zur Verbesserung der Schiffbarkeit ausgebaut wurden und unterhalten werden, führt dies allenfalls zu einer Vergleichmäßigung der Durchflussverhältnisse von Punkt zu Punkt. Insbesondere im Niedrig- und Mittelwasserbereich unterscheidet sich auch heute noch die Leistungsfähigkeit der Profile entlang der Gewässer (BUNDESANSTALT FÜR GEWÄSSERKUNDE 2012-B). Eine weitere Unsicherheit der klassischen Methode liegt in der Verwendung einer Einzelmessung als Bezugswasserspiegellage, der dann absolute Bedeutung beige-messen wird.

4.3 Auswertung von Wasserspiegelspiegelfixierungen in Analogie zu Abflussmessungen

Gemessene Wasserstände aus Wasserspiegelfixierungen werden üblicherweise im Längsschnittdiagramm einer Gewässerstrecke dargestellt. Beim Vergleich der Fixierungen werden unterschiedliche lokale Gefälleverhältnisse deutlich (Abb. 1). 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 verschiedenen Zeiten und bei differierenden 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 widerspiegeln, müssten sich ebenso beim Vergleich vieler Wasserspiegelfixierungen wiederfinden. Grundlage hierfür ist, die gemessenen Wasserstände aller Wasserspiegelfixierungen zusammen mit ihren entsprechenden Abflüssen 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 Messpunkt 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 Auswertverfahrens, das erstmals im Rahmen der Untersuchungen am

Oberrhein angewendet wurde (BUNDESANSTALT FÜR GEWÄSSERKUNDE 2010). 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 des Bezugszeitraums und von Auswertezitrräumen, in denen jeweils eine ausreichende Anzahl auswertbarer Fixierungen vorliegt sowie Definition der Schrittweite der diskreten, stationsbezogenen Auswertung, in der Praxis alle 500 m bis 1.000 m. Die gewählten zeitlichen Abschnitte gelten gleichermaßen für alle Untersuchungsorte. Der Bezugszeitraum wird unter hydrologischen Gesichtspunkten festgelegt. Die Auswertepochen 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 Auswertepunkt 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: $W(Q) = a \cdot \ln(m \cdot Q + b)$.

Dritter Schritt: Die gemessenen Wasserstände aus den vorliegenden Wasserspiegelfixierungen der Auswertezitrräume werden in Relation zur berechneten Abflusskurve des Bezugszeitraums (Nulllinie) gesetzt und die daraus resultierenden Wasserstands-differenzen (ΔW) ermittelt. Diese sind am Beispiel für Elbe-km 199 (Abb. 3) deutlich zu erkennen. Danach werden die Wasserstandsänderungen dieser Wasserspiegelfixierungen chronologisch in einem ΔW -Zeit-Diagramm dargestellt (Abb. 4). Abgeschlossen ist die stationsbezogene Auswertung der Wasserstandsänderungen nach der Berechnung von mittleren Abweichungen für die zu Beginn definierten Epochen und

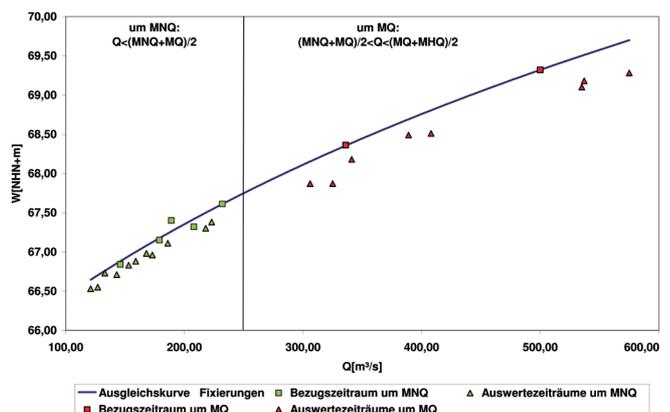


Abbildung 3 Stationsbezogene Analyse von Wasserspiegelfixierungen für Elbe-km 199. Bezugszeitraum 1994–1998; Auswertezitrräume 2003–2006 und 2007–2009
Analysis of water level surveys related to the station at Elbe-km 199. Reference period 1994–1998; analysis of time series 2003–2007 and 2007–2009

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 Auswertepochen und über Abflussbereiche. Die Epochenauswertung ist notwendig, da Wasserspiegelfixierungen an den BWaStr sporadisch und nicht kontinuierlich in äquidistanten Zeitabständen (z.B. einmal pro Jahr) erfolgen. Idealerweise sollten der Bezugszeitraum und alle Auswertepochen unmittelbar aufeinanderfolgen, damit das Epochenverhalten von Wasserständen lückenlos nachgewiesen werden kann.

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 Auswerteziträume 2003–2006 und 2007–2009 die für den Abflusssektor um MNQ gemittelten Einzelwerte als horizontale Linien. Verglichen mit dem Bezugszeitraum 1994–1998 erkennt man, dass die Wasserstände um MNQ für den Auswertezitraum 2003–2006 im Mittel um ca. –13 cm abgesenkt sind. Für den Zeitraum 2007–2009 beträgt die Absenkung ca. –15 cm. Aufgrund der geringen Differenz zwischen den beiden Auswertepochen könnte man davon ausgehen, dass die Erosion an der ausgewählten Station Elbe-km 199 scheinbar zum Stillstand gekommen ist.

Vierter Schritt: Wiederholung der Schritte 2 und 3 für weitere Auswertepunkte der Untersuchungsstrecke und Zusammenführung der stationsweise ermittelten und für Zeiträume und Abflussbereiche gemittelten Wasserstandsänderungen (ΔW) über 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. Anschließend sind die so ermittelten Sohlhöhenänderungen im Vergleich zu hydrologischen Ergebnissen darzustellen und gewässermorphologisch auszuwerten (Kap. 6).

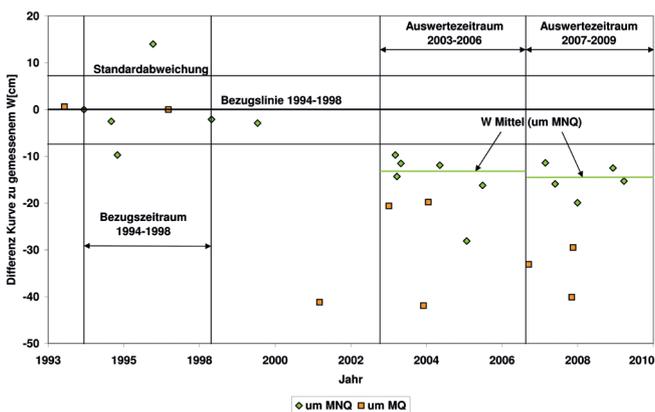


Abbildung 4
 Abweichungen von der Ausgleichskurve. Chronologische Wasserstandsänderungen bei Elbe-km 199 als Einzelwerte und gemittelt für Auswerteziträume und den Abflussbereich um MNQ
Deviation of the compensation curve. Chronological water level changes at Elbe-km 199 as single values and averaged for evaluation periods and the discharge range around low-flow discharge

Hinsichtlich Umfang und Qualität sind mehrere Anforderungen an die Datengrundlage 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 (Kap. 5). Es müssen ausreichend viele Wasserspiegelfixierungen für unterschiedliche Wasserstandsbereiche 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 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 Verfahren als Bezugslinien für die Messungen aus den Auswerteziträumen zu verwenden sind. Abbildung 4 zeigt für Elbe-km 199 alle im Bezugszeitraum 1994–1998 ausgeführten Wasserspiegelfixierungen im Niedrig- und Mittelwasserbereich. Auf Basis von 7 Wasserstandsmesswerten und den ihnen zugeordneten Abflüssen lässt sich eine gut abgesicherte Abflusskurve berechnen.

5 Gewässerkundliche Plausibilisierung und Unsicherheiten

5.1 Gewässerkundliche Plausibilisierung

Im Rahmen der gewässerkundlichen Plausibilisierung sind den gemessenen Wasserständen an allen Auswertepunkten der Wasserspiegelfixierungen ihre Abflüsse zuzuweisen. Hierbei wird die in der WSV bisher übliche Vorgehensweise der Abflusszuweisung beibehalten, indem zunächst Bezugswasserstände- und abflüsse 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 sachgemäß, wenn die Wasserspiegelfixierungen in Fließrichtung durchgeführt werden und die Abfolge der Messungen dabei in etwa der Fließgeschwindigkeit der Welle/Strömung entspricht (Kap. 5.2). Überprüfungen von Messprotokollen zeigten, dass die Messabläufe dieser Anforderung größtenteils entsprachen. Zur Ermittlung der Bezugsabflüsse wurden die Bezugswasserstände mit den gültigen Abflusstafeln umgerechnet.

Weiter wird den Abflüssen an den Bezugspegeln 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 nimmt entlang den angenommenen Streckengültigkeitsbereichen der drei Bezugspegel an der Mittleren Elbe das oberirdische Einzugsgebiet der Elbe zwischen 0,25 % und 2 % zu (BUNDESANSTALT FÜR GEWÄSSERKUNDE 2012-B). Das dichte Pegelmessnetz an den BWaStr berücksichtigt insgesamt eine ausreichende 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 Messpunkte zwischen den bedeutsamen Nebenflussmündungen gelten.

5.2 Unsicherheiten bei den Messungen und der Plausibilisierung

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 Tabelle 1 sind die aus Messfehlern und der anschließenden Plausibilisierung resultierenden Unsicherheiten im Überblick aufgeführt. Nachfolgend werden die Fehlerquellen und die abgeschätzten Unsicherheiten näher beschrieben.

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 Wasser- und Schifffahrtsamtes (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 (HERBST 2007). Unsicherheiten in den Wasserstandsmessungen bei der früher praktizierten Pflockmethode betragen nach Angabe 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 zu berücksichtigen. Es wird angenommen, dass die in Tabelle 1 genannten Unsicherheitsbereiche maximale Werte darstellen.

Tabelle 1 Unsicherheiten bei der Analyse von Wasserspiegelfixierungen <i>Uncertainties in analysing water level surveys</i>	
Fehlerquelle, Messungen und Plausibilisierungen	Unsicherheit (cm)
PDGPS-Wasserstandsmessungen	~ 5–6
Stationarität/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

- Stationarität/Instationäre 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 auf 1–2 cm geschätzt werden können.

- Zuweisung Bezugswasserstand am Bezugspegel:
In der Zuweisung des Bezugswasserstandes an den Bezugspegeln steckt gegebenenfalls eine nicht vernachlässigbare Fehlerquelle bzw. Unsicherheit. Die Messfahrten werden stromab mit der kleinstmöglichen für die Manövrierfähigkeit des Messschiffs erforderlichen Motorkraft durchgeführt, d.h. das Schiff treibt mit der Strömung zu Tale (sog. Schleichfahrt). Hydrologisch bedeutet dies, dass die Wasserspiegelfixierung annähernd mit der durchflussabhängigen Fließgeschwindigkeit des Gewässers vorgenommen wird. Damit werden im Verlauf der Messungen überall korrespondierende Abflusszustände erfasst. Insbesondere gilt dies für den Messort Bezugspegel. So kann der zum Zeitpunkt der Pegelpassage gemessene Wasserstand am Bezugspegel als Bezugswasserstand der Fixierung angesetzt werden. 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. mit 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. Wie in Abbildung 5 dargestellt, kann als realistischer Wert für die Genauigkeit der Abflusskurven eine Abweichung von 5 % beim Abfluss angesetzt werden.

Beispielsweise ergibt sich für einen Abfluss von 300 m³/s in der Elbe bei diesem Genauigkeitsmaß der Abflusskurve eine resultierende Abflussabweichung von ± 15 m³/s, was aufgrund der Steigung der Abflusskurve wiederum eine Wasserstandsunsicherheit von ca. 10 cm bedeutet. Die zu berücksichtigende

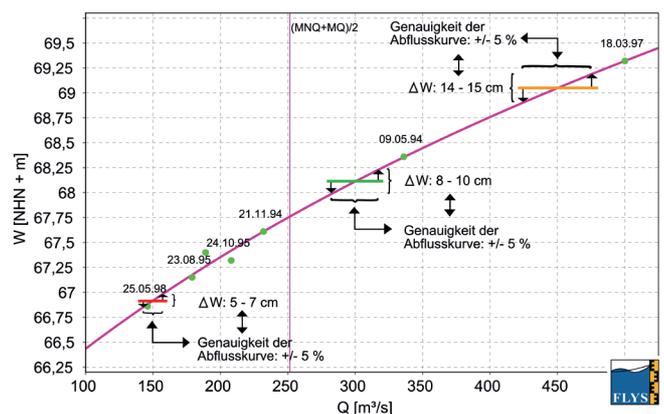


Abbildung 5
Analyse von Wasserspiegelfixierungen. Unsicherheiten bei Anwendung der aktuell gültigen Abflusskurve (Elbe, 9.5.1994–25.5.1998)
Analysis of water level survey. Uncertainties in using the currently valid discharge curve (Elbe, 9.5.1994–25.5.1998)

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 gültigen Abflusskurve ab. Bei der angenommenen Genauigkeit der Abflusskurve am Bezugspegel von 5 % ergeben sich für die an der Elbe verwendeten Abflüsse zwischen 100 m³/s und 600 m³/s Unsicherheiten im Wasserstand von 5–15 cm. Somit sind die aus fehlerbehafteten Abflusskurven entstehenden Unsicherheiten größer als die aus der eigentlichen Messung.

• Streckengültigkeit des Bezugsabflusses:

Da das Messnetz an den BWaStr aus dicht hintereinander folgenden gewässerkundlichen Pegeln mit Abflussermittlung besteht, die die Abflusentstehung entsprechend der Flächenzunahme des oberirdischen Einzugsgebiets sinnvoll abbilden, wird angenommen, dass der Abfluss an den Bezugspegeln den Abfluss zwischen den Mündungen der großen Zuflüsse hinreichend genau repräsentiert. Seitliche Zuflüsse aus den Zwischeneinzugsgebieten werden vernachlässigt, da die Einzugsgebietszunahmen auf diesen Strecken in der Regel nur ca. 1–2 % betragen. Unter der Annahme der streckenhaften Gültigkeit des Bezugsabflusses resultieren geringfügige Unsicherheiten im Wasserstand, die auf 0–1 cm geschätzt werden. Grundsätzlich wächst die Unsicherheit mit zunehmender Entfernung vom Bezugspegel.

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 zu rechnen, die eher im einstelligen Bereich liegt.

6 Ergebnisse der Streckenauswertung an der Mittleren Elbe

Für einige morphologisch aktive Flussabschnitte an den Bundeswasserstraßen, an denen Wasserstandsänderungen bereits mit klassischen Verfahren nachgewiesen wurden, liegen für einen längeren Zeitraum umfangreiche Messreihen von Wasserspiegelfixierungen vor. Diese standen als Datengrundlage für die Anwendung der neuen Auswertemethode der BfG zur Verfügung. Beispielhaft werden in diesem Beitrag die Ergebnisse der Untersuchungen an der Mittleren Elbe zwischen Torgau und Aken (Abb. 6) vorgestellt.



Abbildung 6
Untersuchungsstrecke zwischen Torgau und Aken an der Mittleren Elbe
Study area between Torgau and Aken at the Middle Elbe

6.1 Die Untersuchungsstrecke zwischen Torgau und Aken

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, als Erosionsstrecke bezeichnete 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 Talau. 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 (Tab. 2). Großschifffahrt in nennenswertem Umfang findet in diesem mit Buhnen regulierten Abschnitt der Elbe heute kaum noch statt.

Die jährliche Eintiefung an der Erosionsstrecke der Mittleren Elbe beträgt 1–2 cm. Dieser Effekt führt zu Stabilitätsproblemen bei flussbaulichen Bauwerken und wirkt sich durch die korrespondierende Absenkung des Grundwasserspiegels auf dort vorhandene ökologisch wertvolle Naturräume (z.B. Biosphärenreservat Mittel-elbe) aus. Die WSV-Arbeitsgruppe „Umsetzung des Sohlsta-

Tabelle 2
Hauptwerte des Abflusses für die Pegel an der Mittleren Elbe
Characteristic parameters for the discharge at the Middle Elbe

Pegel	Gewässer	Lage Fluss-km	MNQ m ³ /s	MQ m ³ /s	MHQ m ³ /s	Reihe 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

bilisierungskonzepts für die Elbe von Mühlberg bis zur Saalemündung“ beschäftigt sich mit Lösungsansätzen für diese Problematik. Dazu gehört z.B. im Rahmen eines umfassenden Monitoringprogramms auch die zeitliche Analyse von Wasserspiegelfixierungen.

6.2 Verwendete Wasserspiegelfixierungen

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 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 für die Unterhaltungskonzepte der WSV an Bundeswasserstraßen maßgeblich sind, werden Wasserspiegelfixierungen hauptsächlich bei niedrigen und mittleren Abflüssen durchgeführt, so dass für Analysen eine ausreichende Anzahl an Fixierungen vorliegt.

6.3 Ergebnisse

Vor der Analyse von Wasserspiegelfixierungen im Hinblick auf zeitliche Wasserstandsänderungen wurden die Randbedingungen der Untersuchungen mit den gewässermorphologischen Fachreferaten der BfG und WSV abgestimmt. Festgelegt wurden die Bezugs- und Auswerteziträume sowie die Abflussbereiche (um MNQ, um MQ) für die Berechnung Epochen-gemittelter Wasserstandsänderungen. Messdaten aus Peilungen, die während bestimmter Epochen in durchgängigen längeren Strecken erfasst wurden, sind hier von zentraler Bedeutung.

Für die Festlegung des Bezugszeitraumes muss aus hydrologischer Sicht prioritär eine hinreichende Anzahl von Wasserspiegelfixierungen vorliegen. In Tabelle 3 sind die festgelegten Bezugs- und Auswerteziträume sowie die Anzahl der Messereignisse angegeben. Für die Mittlere Elbe fiel die Wahl des Bezugszeitraumes auf die Zeitspanne 1994–1998.

Da die größten Auswirkungen einer Sohlhöhenänderung bei Niedrigwasserstand zu erwarten sind, wurde entschieden, die Epochenauswertungen für die mittleren zeitlichen Wasserstandsänderungen nur für die Abflussklasse um MNQ vorzunehmen.

Für die Ermittlung der Sohlhöhendifferenzen wurden die von der WSV ausgeführten Peilungen der Gewässersohle ausgewertet. Grundsätzlich ist zu beachten, dass die Zeitpunkte der berücksichtigten Peilungen innerhalb der für die Analyse der Wasserspiegelfixierungen festgelegten Zeiträume liegen. Zur Ermittlung der Sohlhöhendifferenzen wurde aus gewässermorphologischer Sicht an der Mittlere Elbe die Peilung des Jahres 1995 als Bezugspeilung und die Peilung von 2010 als Auswertepoilung ausgewählt.

Schon seit Ende des 19. Jahrhunderts wird an der Mittleren Elbe zwischen Torgau und Aken Sohlrosion 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 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 Abbildung 7 sind die Ergebnisse der Sohlhöhen- und Wasserstandsänderungen zwischen Torgau und Aken für die untersuchte Epoche 2007–2009 bei niedrigen Elbeabflüssen dargestellt. Die hierin enthaltene Nulllinie dient als Bezugslinie und beschreibt die Niedrigwassersituation in der Mittleren Elbe im

Tabelle 3
Verwendete Datensätze für die zeitliche Analyse von Wasserspiegelfixierungen
Data sets applied for the temporal analysis of water level surveys

Elbe (1994–2009)			
Epoche	A/B	Anzahl der Fixierungen	
		um MNQ	um MQ
1994–1998	B	7	4
2003–2006	A	6	6
2007–2009	A	5	3

A = Auswertezitraum; B = Bezugszeitraum

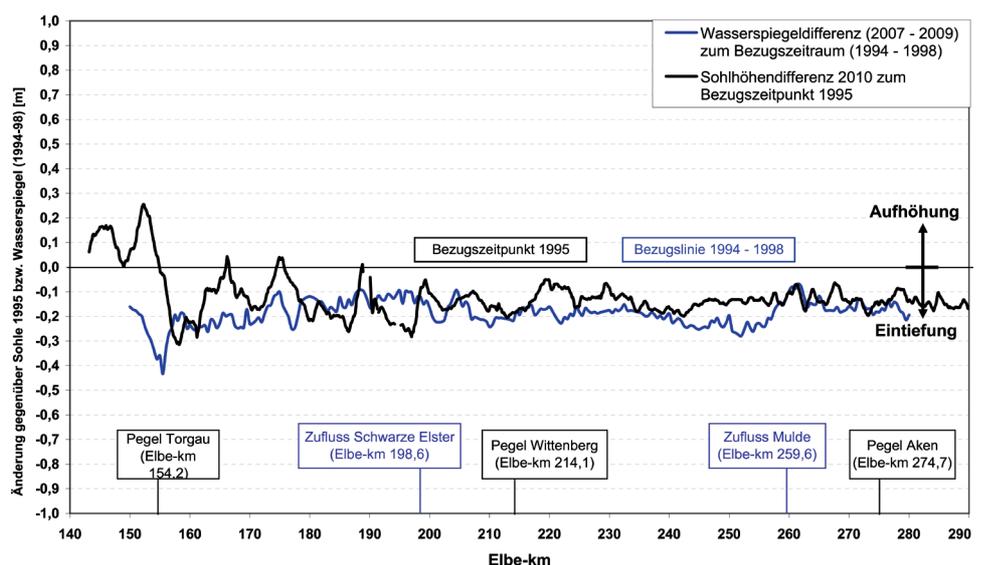


Abbildung 7
Sohlhöhen- und Wasserstandsänderungen bei Niedrigwasser an der Mittleren Elbe zwischen Torgau und Aken
Changes in river bed level and water level at low-flow in the Elbe between Torgau and Aken

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 7 und 8 zu ersehen ist, ergeben sich über weite Strecken an der Mittleren Elbe nahezu identische Werte zwischen den ermittelten Sohlhöhen und den 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 Epoche 2003–2006 uneingeschränkt bestätigt werden. Für die in Abbildung 7 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.

Als Resultat aus dem Epochenvergleich (2003–2006 mit 2007–2009) 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 sind die Niedrigwasserstände nochmals um mehr als –10 cm gesunken. Im Zeitraum 2007–2009 sind zwischen Torgau und der Mündung der Schwarzen Elster die Niedrigwasserstände ebenfalls um weitere 5–10 cm gefallen. Nur um Klöden (Elbe-km 190) haben sich die Wasserspiegelverhältnisse stabilisiert. Allgemein kann festgestellt werden, dass die Sohlerosion an der Mittleren Elbe ungebremst weiter fortschreitet (mit lokal begrenzten Ausnahmen). Die ermittelten Ergebnisse für die Epoche 2007–2009 werden deshalb insgesamt nicht als Indiz angesehen, dass die ab 2004 vorgenommenen Sohlstabilisierungsmaßnahmen schon erste Erfolge hinsichtlich konstanteren Niedrigwasserverhältnissen zeigen.

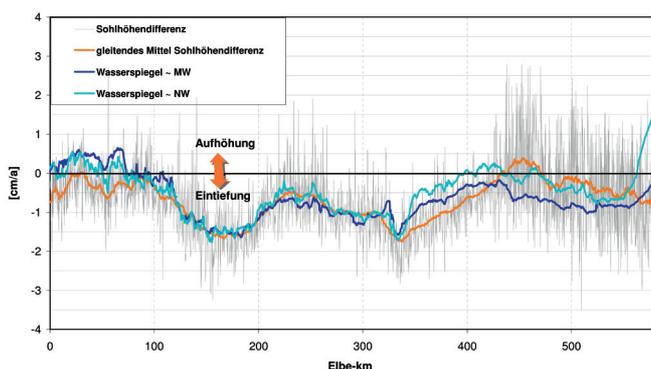


Abbildung 8
Mittlere Sohlhöhenänderung und Wasserspiegellagenentwicklung (cm/a) der Elbe 1898–2004 (QUICK et al. 2012)
Changes in average river bed level and water levels (cm/a) in the Elbe between 1898–2004 (QUICK et al. 2012)

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 8 sind die Veränderungen (Aufhöhung/Eintiefung) von Wasserspiegel und Sohlhöhen der deutschen Binnenelbe über den Zeitraum 1898–2004 gegeneinander aufgetragen. In diesem Vergleich über 106 Jahre fallen Unsicherheiten der Einzeldatenauswertung und andere Einflüsse nicht ins Gewicht. Es zeigt sich deutlich, dass die Eintiefung der Flusssohle die treibende Kraft für das Absinken der Wasserspiegel ist.

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 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 Sohlagenentwicklung 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. Unterstrom von Neu Darchau (km 536,4) kommt es seit dem Bau der Staustufe Geesthacht (km 585,9) 1960 zu einer Wasserspiegelstützung.

7 Zusammenfassung und Ausblick

Zum besseren Verständnis von gewässermorphologischen Prozessen und Entwicklungen entlang der frei fließenden Bundeswasserstraßen werden in der BfG Feststoffmessungen, Peilmessungen der Sohlhöhen und Wasserstandsmessungen aus Wasserspiegelfixierungen mit unterschiedlichen Methoden ausgewertet. Hierfür werden für festgelegte Epochen zunächst Differenzen ermittelt und diese in einer anschließenden Synopse aller Ergebnisse in Hinblick auf Sohlhöhen- und Wasserstandsveränderungen weiter analysiert.

In diesem Beitrag sind die wesentlichen Ergebnisse der Analysen von Wasserspiegelfixierungen auf zeitliche Wasserstandsänderungen beschrieben. Bisher fanden Wasserstände aus Messkampagnen im Längsprofil der Bundeswasserstraßen in Ermangelung einer anerkannten Auswertemethode für abschnittsweise morphologische Untersuchungen wenig Beachtung. Untersucht wurden die Wasserspiegelfixierungen aus Messreihen für die Mittlere Elbe zwischen Torgau und Aken. Es wurde eine neue Auswertemethode angewendet, in dem die gemessenen Wasserstände aus Wasserspiegelfixierungen in Verbindung mit ihren Abflüssen stationsbezogen wie Abflussmessungen ausgewertet und zeitlich analysiert werden. Diese in der Software FLYS enthaltene Methode der zeitlichen Auswertung von Wasserspiegelfixierungen hat sich bewährt und wurde beispielhaft für einen Abschnitt an der Mittleren Elbe im Detail beschrieben. Ergebnisse der Untersuchungen sind Wasserstandsabsenkungen, die auf epochenweise festgestellte morphologisch veränderte Durchflüsse zurückzuführen sind. Die-

se aus Wasserspiegelfixierungen abgeleiteten signifikanten bzw. tendenziellen Wasserstandsänderungen werden im Zusammenhang mit Sohlhöhenänderungen dargestellt und beschrieben. Sie werden jedoch nicht im Sinne einer Ursache-Wirkungsanalyse in Hinblick auf Sohlhöhenveränderungen abschließend untersucht.

Für Unterhaltungszwecke der Wasser- und Schifffahrtsverwaltung, für hydrologische und gewässermorphologische Auswertungen sowie für die Kalibrierung mathematischer Abfluss- und Strömungsmodelle aller Wissenschaftsbereiche der Gewässerkunde und des Wasserbaus werden Wasserspiegelfixierungen an den Bundeswasserstraßen auch in Zukunft benötigt. Wegen der zunehmenden Bedeutung mathematischer Modelle sollten die Messungen insbesondere in den morphologisch aktiven Gewässerstrecken an der Mittleren Elbe weiterhin in allen Abflussbereichen von Niedrig- bis Hochwasser erfolgen. Wasserspiegelfixierungen stellen einen besonderen Datenschatz dar, der bisher in wissenschaftlichen Untersuchungen nicht gebührend gewürdigt wurde. Die Analyse zeitlicher Wasserstandsänderungen aus Wasserspiegelfixierungen ist neben den Auswertungen von Peildaten und Messungen zum Sedimenttransport ein weiterer wertvoller Bestandteil eines auf Messdaten basierenden Auswerteinstruments, das dauerhaft für gewässermorphologische Untersuchungen an Bundeswasserstraßen und zur Erfolgskontrolle von Unterhaltungskonzepten eingesetzt werden sollte. Die Auswertung der Wasserspiegelfixierungen ist für die Bestimmung von morphologischen Änderungen ein wichtiges Instrument, um die aus den Peildaten abgeleiteten Sohlhöhenentwicklungen über längere Zeiträume abzusichern und zu validieren. Wenn in Streckenabschnitten keine Sohlpeilungen vorliegen oder diese erhebliche Unsicherheiten enthalten, können Datensätze von Wasserspiegelfixierungen herangezogen werden.

Summary and outlook

The understanding of morphological processes and river bed changes in the Federal Waterways has been improved by a comprehensive analysis of sediment transport, echosoundings and water level surveys. Therefore, the alterations of each of these parameters for corresponding fixed periods were determined and consequently compared and analysed regarding a synoptic view on river bed and water level alterations.

The essential analysis results of temporal water level changes are given in this article. Failing any accepted methodology for the morphological analysis on a catchment scale, the water levels observed in longitudinal measurements along the inland waterways have so far gone large unheeded.

The water level surveys from existing data sets of the study site Middle Elbe River between Torgau and Aken were analysed. The conceptual approach of this analysis is to derive functional relations from the pair of water level and discharge values for each water level survey and along the entire reach of the study sites. This new methodology implemented in the software FLYS, has been successfully tested and established, and is presented in this article in detail. Results of this investigation are trends of water level increase or decrease as longitudinal profiles of the study sites in context with morphological alterations. These trends of water level changes are compared to observed river bed alterations. Some interpretation is given, but this is not aimed at a final analysis in terms of actio-reactio.

Water level surveys and an appropriate interpretation/validation are required for the work of the water and navigation authorities, for hydrologic and morphologic analyses as well as for the calibration of numerical hydro- and morphodynamic models. Due to the increasing acceptance of numerical models, water level surveys should be performed for many different discharges in morphodynamically active rivers. Water level surveys represent a valuable data set, which has not been recognized in scientific research, yet. Beside echo soundings and sediment transport monitoring, analysing water levels in terms of temporal changes is an additional tool for morphological investigations and hence improving maintenance and management strategies for Federal Waterways.

Anschrift der Verfasser:

Dipl.-Met. N. Busch
Dr.-Ing. S. Vollmer
Dipl. Geoök. M. Hatz
Bundesanstalt für Gewässerkunde
Am Mainzer Tor 1, 56068 Koblenz
busch@bafg.de

Literaturverzeichnis

- BUNDESANSTALT FÜR GEWÄSSERKUNDE (2009): Wasserstands-
informationsdienste der BfG für die Bundeswasserstraßen.
– BfG-Veranstaltungen 1/2009, Koblenz
- BUNDESANSTALT FÜR GEWÄSSERKUNDE (2010): Analyse und
Bewertung der hydraulisch-morphologischen Situation zwi-
schen Iffezheim und Mainz. – BfG-Bericht 1702, Koblenz
- BUNDESANSTALT FÜR GEWÄSSERKUNDE (2012-A): Untersu-
chung der großräumigen hydraulisch-morphologischen
Entwicklung an der Grenzoder. – BfG-Bericht 1765, Koblenz
- BUNDESANSTALT FÜR GEWÄSSERKUNDE (2012-B): 14. Gewässer-
morphologisches Kolloquium: Dynamik des Sedimenthaus-
haltes von Wasserstraßen. – BfG-Veranstaltungen 1/2012,
Koblenz
- ELBSTROMWERK (1898): Der Elbstrom, sein Stromgebiet und
seine wichtigsten Nebenflüsse. – Königliche Elbstromverwal-
tung zu Magdeburg, Berlin
- HERBST, G. (2007): Messmethoden, Messgeräte, Durchführung
von Wasserspiegelfixierungen. – SAF-Seminar Einführung in
Wasserspiegelfixierungen und Auswertungen an Bundes-
wasserstraßen, Hannover
- NESTMANN, F. & B. BUECHELE (2002) (Hrsg.): Morphodynamik
der Elbe – Schlussbericht des BMBF-Verbundprojektes mit
Einzelbeiträgen der Partner. – Eigenverlag Inst. f. Wasserwirt-
schaft und Kulturtechnik, Universität Karlsruhe, 439 S., 10
Anhänge, Anlagen-CD-Rom
- QUICK, I., F. KÖNIG, N. CRON, C. SVENSON, S. SCHRIEVER & S.
VOLLMER (2012): Hydromorphologische Bewertung und
Praxisprojekte mit Schnittstelle zur Ökologie. – In: Bun-
desanstalt für Gewässerkunde (Hrsg.): Hydro-ökologische
Modellierungen und ihre Anwendungen. 1. Ökologisches
Kolloquium am 14./15. Februar 2012 in Koblenz. – Veranstal-
tungen 6/2012, Koblenz, 43–62
- SCHONLAU, G. (1991): Gleichwertiger Wasserstand, Pegelstände
und Abladetiefe am Niederrhein. – Zeitschrift für Binnen-
schifffahrt-ZfB-Nr. 14