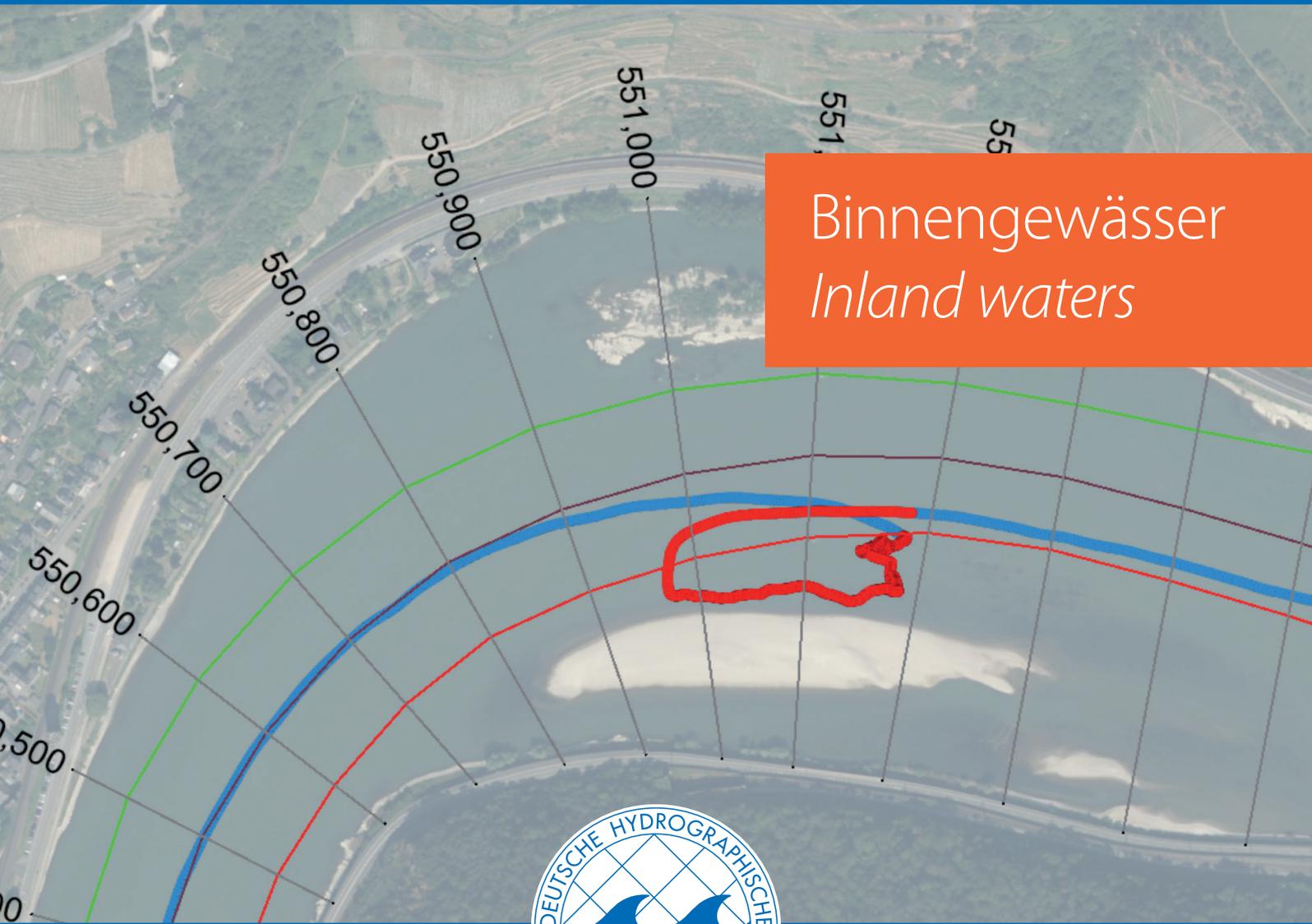


Journal of Applied Hydrography

HYDROGRAPHISCHE NACHRICHTEN

03/2025

HN 130



Binnengewässer
Inland waters



Wasserspiegelfixierung zur Bestimmung der Wasseroberflächengeometrie

Ein Beitrag von THOMAS BRÜGGEMANN, FELIX LORENZ, ALISA YAKHONTOVA, BENJAMIN EBERHARDT, ROBERT WEISS und THOMAS ARTZ

Um den nichtlinearen Verlauf des Wasserspiegels zwischen den zeitlich kontinuierlich aufgezeichneten Wasserständen an den Pegeln eines Gewässers zu bestimmen, wird eine Wasserspiegelfixierung (WSF) durchgeführt. Diese Publikation beleuchtet die Durchführung mittels präziser 3D-Satellitenortung (GNSS – Global Navigation Satellite System) durch Messschiffe sowie die hydrographische Auswertung der WSF. Der Einsatz von luftgestütztem Laserscanning bietet Ergänzungspotenzial zur klassischen schiffsbasierten WSF, um flächenhafte Messdaten des Wasserspiegels zu erfassen.

Wasserspiegel | Wasseroberfläche | Wasserspiegelfixierung (WSF) | Wasserspiegelhöhe | GNSS | NIR-ALS | bALS | Pegel | SAPOS
water table | water surface | water surface fixing | water level | GNSS | NIR-ALS | bALS | gauge | SAPOS

A water surface fixing (WSF) is performed to measure the non-linearity of the water surface between continuously recorded water level at gauges of a water body. This publication highlights how the measurements are carried out using precise ship-based 3D satellite positioning (GNSS – Global Navigation Satellite System), and sets out the hydrographic analysis of the results. Airborne laser scanning may supplement traditional ship-based WSF in order to derive a surface model of the water body.

Autoren

Thomas Brüggemann, Felix Lorenz, Alisa Yakhontova, Benjamin Eberhard, Dr. Robert Weiß und Dr. Thomas Artz arbeiten bei der Bundesanstalt für Gewässerkunde (BfG) in Koblenz.

brueggemann@bafg.de

Einleitung und Motivation

Eine Wasserspiegelfixierung (WSF) ist ein Messverfahren, mit dem der nichtlineare Verlauf des Wasserspiegels zwischen den zeitlich kontinuierlich aufgezeichneten Wasserständen an den Pegeln eines Gewässers ermittelt wird. Die Durchführung von Wasserspiegelfixierungen an den Bundeswasserstraßen gehört im Binnenbereich zum Aufgabenportfolio der Wasserstraßen- und Schifffahrtsverwaltung des Bundes (WSV). Die Höhen der Wasseroberflächen bei verschiedenen Abflusssituationen sind für den Betrieb, die Unterhaltung und den Ausbau der Bundeswasserstraßen erforderlich. Zudem nutzen die Ressortforschungseinrichtungen wie die Bundesanstalt für Gewässerkunde (BfG) und die Bundesanstalt für Wasserbau (BAW) diese Daten, um spezielle und projektbezogene Fragestellungen im Auftrag der WSV zu untersuchen.

Bei einer WSF wird die Höhe der Wasseroberfläche möglichst bei stationären Abflusszuständen gemessen. Bis in die 1990er-Jahre wurde beispielsweise die WSF am Rhein mittels der Pflöckchenmethode durchgeführt. Hierbei wurde unter anderem nach einem Hochwasser die Geschwemmsellinie am Ufer mit Pflöckchen mar-

kiert und anschließend mit Hilfe mehrerer Messtrupps lage- und höhenmäßig eingemessen. Für den Rhein liegen die auf diese Weise erfassten Daten für den Zeitraum 1882 bis 1989 vor und wurden im Rahmen des Projekts »Abladeoptimierung Mittelrhein« teilweise digitalisiert und ausgewertet (Riedel et al. 2017; Vollmer und Schulz 2019). Seit der Mitte der 1990er-Jahre werden die Wasserspiegelfixierungen in der WSV mittels präziser 3D-Satellitenortung (GNSS – Global Navigation Satellite System) mit Messschiffen durchgeführt. Da während einer GNSS-gestützten WSF in der Regel ein instationärer Zustand vorliegt, muss dies bei der späteren hydrologischen Auswertung entsprechend berücksichtigt werden.

Die Ergebnisse der Wasserspiegelfixierungen werden für zahlreiche hydrologische Aufgaben verwendet. Unter anderem für die Festlegung der gewässerkundlichen Bezugswasserstände, wie beispielsweise dem Gleichwertigen Wasserstand (GIW), am Rhein oder an der Elbe dienen die Wasserspiegelfixierungen als wichtige Grundlage (Abel et al. 2014). Außerdem werden Wasserspiegelfixierungen für die Bewertung der Wirkung von Deichrückverlegungen oder zur Validierung von (Abfluss-)Modellen genutzt und um grund-

sätzliche Kenntnisse über die Wechselwirkung von Topografie, Strömung und Geschiebetransport zu sammeln (Faulhaber 2013). Durch den Ausbau des Oberrheins zwischen 1955 und 1977 haben sich die Hochwassersituation und die morphologischen Verhältnisse am frei fließenden Oberrhein unterhalb der Staustufe Iffezheim drastisch geändert, die auch Durchflussveränderungen mit sich ziehen. Im Rahmen der Arbeitsgruppe »Optimierung der hydraulisch-morphologischen Situation zwischen Iffezheim und Mainz« untersuchte die BfG zeitliche Änderungen von Wasserständen auf der Basis von Wasserspiegelfixierungen des Zeitraums 1978 bis 2008. Die Auswertung veranschaulicht den Zusammenhang zwischen Anlandungen an der Sohle und dem Wasserstandsanstieg sowie zwischen der Sohlerosionen und Wasserstandsabsenkungen (Larina 2009).

Eine WSF ist logistisch anspruchsvoll und bedarf einer sorgfältigen Planung der Ressourcen und einer intensiven Abstimmungen mit den Nutzenden. Der Artikel fokussiert primär auf die Vorbereitung des Messsystems, die Messung sowie deren hydrographische Auswertung. Zudem wird in einem Ausblick auf die flächenhafte Erfassung der Wasseroberfläche mittels flugzeuggestützter Messverfahren eingegangen.

Messvorbereitung

Um das Genauigkeitspotenzial der eingesetzten schiffsgestützten Messtechnik tatsächlich nutzen zu können, müssen alle Sensoren in ein fahrzeugfestes Koordinatensystem (Schiffskoordinatensystem) qualitätsgesichert eingemessen werden (Brüggemann 2014; Brüggemann et al. 2018). Die Genauigkeit der Einmessung sollte so hoch sein, dass der Resteinfluss auf das Ergebnis der WSF nicht mehr als 1 cm beträgt.

Um die WSF mit Hilfe von GNSS durchführen zu können, muss der genaue Abstand der GNSS-Antenne zum tatsächlichen Wasserspiegel bekannt sein. Da sich die Eintauchtiefe des Schiffes aufgrund von unterschiedlichen Beladungszuständen, beispielsweise aufgrund der gebunkerten Treibstoffmenge, Brauch- und Schmutzwassermenge sowie der Personenanzahl an Bord, verändert, wird diese vor jeder WSF erfasst und berücksichtigt. Für die Erfassung werden entweder Eintauchmarken z.B. in Form einer E-Teilung am Rumpf des Schiffes (siehe Abb. 1) oder ein Schauglas (siehe Abb. 2), welches den aktuellen Wasserspiegel im Schiff in Ruhelage anzeigt, verwendet. Das Schauglas besteht aus einem Steigrohr und einer Skala und wird im Schiff in der Schiffsachse möglichst unterhalb der GNSS-Antenne in Höhe der Wasserlinie montiert. Beide Ableseeinrichtungen sollen bezogen auf das Schiffskoordinatensystem eingemessen werden, damit der exakte tatsächliche Abstand zwischen der GNSS-Antenne

und dem zu erfassenden Wasserspiegel in Ruhelage qualitätsgesichert bekannt ist.

Neben dem Beladungszustand ist der Squat – das fahrdynamische vertikale Einsinken eines fahrenden Schiffes aufgrund der relativen Geschwindigkeit durchs Wasser – von großer Bedeutung. Die Größe des Squats ist unter anderem abhängig von der Fahrgeschwindigkeit, der Unterkiehlfreiheit (Abstand zwischen Schiffsboden und Gewässersohle), der Rumpfform des Schiffes und dem Gewässerquerschnitt. Für jedes Messschiff, welches eine WSF durchführt, sollte das Squatverhalten in Abhängigkeit der Motordrehzahl bestimmt werden. Anhand der Motordrehzahl und der sich daraus ergebenden Geschwindigkeit des Schiffes kann ein funktionaler Zusammenhang zwischen der Messgeschwindigkeit und dem Squat abgeleitet werden.

Da die Wasserspiegelfixierungen mit möglichst geringer Motordrehzahl ausgeführt werden sollten, reicht es aus, das Einsinkverhalten im unteren Drehzahlbereich zu ermitteln. Das Squatverhalten kann aus Höhendifferenzen der mit GNSS aufgezeichneten Wasserspiegelhöhen bei einer bestimmten Motordrehzahl gegenüber der Wasserspiegelhöhe in Ruhelage abgeleitet werden. Diese Messungen können in stillen Gewässerbereichen, z. B. in einem Hafen, durchgeführt werden. Hierbei ist darauf zu achten, dass die Wasserspiegelhöhe während und zwischen den Messungen unverändert bleibt. Die Messungen sollten mehrfach wiederholt werden, um aus statistischer Sicht einen zuverlässigen Mittelwert zu erhalten.

Ablauf der Messung

Die WSF dient der Erfassung der Höhenlage des Wasserspiegels eines Flussstreckenabschnitts zu einem bestimmten Zeitpunkt. Das Ergebnis einer WSF sollte die Wasserspiegellage bei möglichst stationären Abflusszuständen abbilden. Um den Squateinfluss so gering wie möglich zu halten,



Abb. 1: E-Teilung am Rumpf des Schiffes



Abb. 2: Schauglas mit einem Steigrohr und einer Skala (links) und die vergrößerte Darstellung der Skala (rechts)

sollte die Messung mit dem Messschiff mit der geringstmöglichen Geschwindigkeit durchs Wasser mit möglichst konstanter Motordrehzahl zu Tal entlang des mit den Nutzenden abgestimmten Sollmesswegs erfolgen.

Die Bestimmung der 3D-Koordinaten erfolgt mit geeigneten geodätischen RTK-GNSS-Empfängern. Indem ausschließlich der SAPOS-Korrekturdatendienst der deutschen Landesvermessung verwendet wird, ist sichergestellt, dass die Ergebnisse der WSF im aktuellen amtlichen Raumbezug vorliegen.

Da die Berufsschiffahrt nicht immer Rücksicht auf die Messungen nehmen kann und die Schiffsbegegnungen die WSF-Messungen negativ beeinflussen, müssen diese dokumentiert werden. Wenn zu erwarten ist, dass die entstehende Störung in den Messdaten 200 m übersteigt, wird die Messung unterbrochen und anschließend mit einer Überlappung von mindestens 200 m fortgesetzt.

Während der Messung wird ein Messprotokoll geführt, in dem alle mess- und auswerterelevanten Informationen und Ereignisse dokumentiert werden. Dies sind Informationen wie beispielsweise

Wetter, Windverhältnisse und starker Wellengang, die die Interpretation der Daten später erleichtern. Zur Kontrolle der WSF werden bei der Vorbeifahrt an einem Pegel die Pegelwasserstände erfasst und dokumentiert.

Hydrographische Auswertung

Im Rahmen der hydrographischen Datenauswertung der WSF werden Fehlmessungen und sonstige unbrauchbare Daten, z. B. aufgrund von unzureichender Positionsgenauigkeit durch Abschattungen (z. B. Brücken), sowie Daten im Bereich von Schiffsbegegnungen eliminiert. Mit Hilfe einer Draufsicht und einem Aufriss (siehe Abb. 3) werden die Messdaten zunächst visualisiert. Die Plausibilisierung der Messdaten und die Berechnung der bedarfsorientierten Wasserspiegelhöhen erfolgen anschließend in einem weitestgehend automatisierten Verfahren. So wird der Einfluss der manuellen subjektiven Bearbeitung der Daten minimiert. Nur bei Bedarf können zusätzlich Messpunkte manuell eliminiert werden. Die hier vorgestellte hydrographische Auswertung ist in der WSV-eigenen PEILDATEN AUSWERTE SOFTWARE-HYDROGRAPHIE (PAUSS-H) implementiert. Die hydrographische Auswertung besteht aus mehreren aufeinander aufbauenden Prozessschritten.

Die Messdaten müssen mit dem GNSS-RTK-Status versehen sein. So können bereits beim Import der Messdaten die 3D-Messpunkte als unplausibel markiert werden, die keine ausreichende Qualität haben. Außerdem müssen die Messdaten für die weitere Bearbeitung mit einer ausreichend genauen Messzeit versehen sein. Beispielsweise muss bei einer Messrate von 10 Hz die Uhrzeit auf Zehntelsekunden angegeben werden.

Nach dem Import werden alle Messpunkte, die durch Berg- oder Talfahrer beeinflusst wurden, als unplausibel markiert. Dies kann dann automatisiert erfolgen, wenn die Messdaten bereits während der Messdatenerfassung ein entsprechendes Attribut erhalten. Sollten die Schiffsbegegnungen anderweitig dokumentiert werden, müssen die Daten entsprechend manuell bereinigt werden. Für den Fall, dass beim Unterbrechen der Messung das Schiff aufgedreht hat und die Messdatenaufzeichnung nicht unterbrochen wurde (siehe Abb. 4), müssen diese Bereiche als unplausibel markiert werden. In PAUSS-H erfolgt dies automatisiert. Hierbei wird jeder Messpunkt anhand der Ordnungsprofile stationiert und alle Messpunkte, die nicht der Hauptmessrichtung folgen, werden als unplausibel markiert.

Mit Hilfe einer mehrstufigen linienhaften Plausibilisierung können Fehlmessungen automatisiert als unplausibel markiert werden (siehe Abb. 4). In einer ersten Stufe werden zunächst über einen gleitenden Median grobe Fehlmessungen detektiert. Hierbei wird der Median der Messwerte, die in

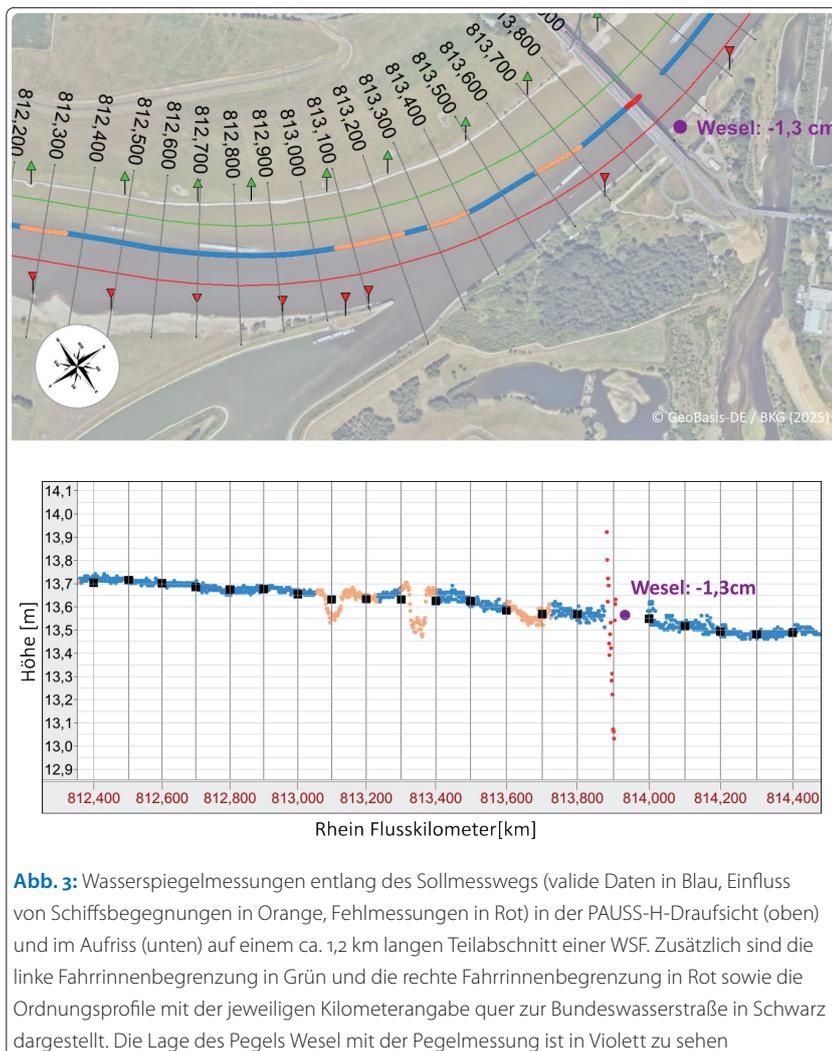


Abb. 3: Wasserspiegelmessungen entlang des Sollmesswegs (valide Daten in Blau, Einfluss von Schiffsbegegnungen in Orange, Fehlmessungen in Rot) in der PAUSS-H-Draufsicht (oben) und im Aufriss (unten) auf einem ca. 1,2 km langen Teilabschnitt einer WSF. Zusätzlich sind die linke Fahrrinnenbegrenzung in Grün und die rechte Fahrrinnenbegrenzung in Rot sowie die Ordnungsprofile mit der jeweiligen Kilometerangabe quer zur Bundeswasserstraße in Schwarz dargestellt. Die Lage des Pegels Wesel mit der Pegelmessung ist in Violett zu sehen

einer definierten Fensterbreite liegen, abschnittsweise auf dem Profil berechnet. Die Messwerte, die eine maximal zulässige obere und untere Abweichung in Bezug auf den gleitenden Median überschreiten, werden als unplausibel markiert. Der Grenzwert ist eine durch die Nutzenden vorzugebende revierspezifische Größe.

In einer weiteren Stufe wird eine automatische linienhafte Plausibilisierung mit Hilfe von Polynomfunktionen durchgeführt. Dabei wird, analog zur Plausibilisierung mittels Medians, eine Polynomfunktion an die Messpunkte in einer definierten Fensterbreite approximiert. Wenn der getestete Messwert im statistischen Sinne eine Fehlmessung ist, wird dieser jedoch erst dann als unplausibel markiert, wenn er einen definierten Abstand überschreitet. Abstand, Fensterbreite und Polynomgrad sind wieder als revierspezifische Parameter vorab zu definieren.

Nach der Plausibilisierung der Messpunkte können Höhenkorrekturen, z. B. für die Eintauchtiefen, sowie Korrekturen für den Squat angebracht werden.

Im letzten Auswerteschritt werden für alle Ordnungsprofile die Wasserspiegelhöhen abgeleitet. Dazu erfolgt eine gleitende Polynomapproximation. Die Auswahl der jeweils zu berücksichtigenden gemessenen Wasserspiegelhöhen erfolgt durch eine vordefinierte Fensterbreite (siehe Abb. 5). Der Polynomgrad und die Fensterbreite können wiederum revierspezifisch festgelegt werden. Die Lage der berechneten Wasserspiegelhöhenpunkte wird aus dem Schnitt der Ordnungsprofile mit dem tatsächlichen Messweg berechnet.

Aufgrund von Lücken in den plausibilisierten Daten, z. B. in Bereichen mit Schiffsbegegnungen, können an einigen Ordnungsprofilen keine Wasserspiegelhöhenpunkte berechnet werden. Diese Lücken können anschließend rechentechnisch geschlossen werden. Dies erfolgt erneut durch eine Polynomapproximation der benachbarten Wasserspiegelhöhenpunkte. Hierbei können bei Bedarf die bisherigen Höhenwerte zusätzlich geglättet werden.

Die berechneten Wasserspiegelhöhen werden an den Pegeln geprüft. Hierbei werden die Differenzen der Wasserstandshöhen an den Pegeln und den Wasserspiegelhöhen berechnet. Die Differenzen können in PAUSS-H in einer Tabelle numerisch oder grafisch in den Ansichten (siehe Abb. 3) dargestellt werden.

Genauigkeitsabschätzung

Die Wasserspiegelhöhen stellen nur eine bestmögliche Schätzung für die wahren Wasserstände an den Ordnungsprofilen dar. Daher ist es gemäß GUM (2008) erforderlich, eine (kombinierte) Unsicherheit für die Höhen zu bestimmen und anzugeben. Da für die Bestimmung der Wasser-

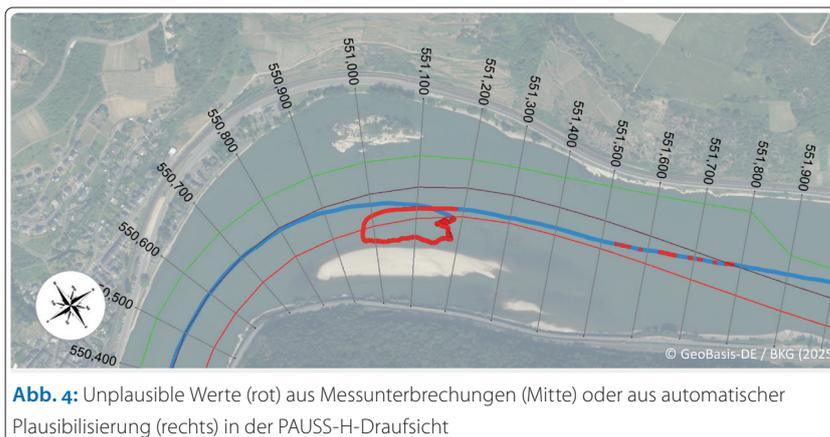


Abb. 4: Unplausible Werte (rot) aus Messunterbrechungen (Mitte) oder aus automatischer Plausibilisierung (rechts) in der PAUSS-H-Draufsicht

spiegelhöhen verschiedene Größen herangezogen werden, spricht man von einer »kombinierten Standardunsicherheit«. Um die kombinierte Standardunsicherheit einer WSF abschätzen zu können, werden die verschiedenen wesentlichen Einflussgrößen für die Berechnung der Wasserspiegelhöhen betrachtet und in einer Modellgleichung zusammengeführt.

Für jede durchgeführte WSF werden die Unsicherheiten der einzelnen Einflussgrößen individuell anhand des Funktionsmodells analysiert, um daraus die erweiterte kombinierte Standardunsicherheit abzuleiten. Eine beispielhafte Berechnung ist in Tabelle 1 dargestellt. Die kombinierte Standardunsicherheit nach GUM (2008) liegt dabei unter der Annahme der hier genannten Unsicherheiten der Einflussgrößen bei ca. $U_{0,68} = 28$ mm. Die erweiterte kombinierte Standardunsicherheit ergibt sich für $k=2$ (Vertrauensbereich 95 %) zu $U_{0,95} = 55$ mm.

Möglichkeit einer flächenhaften Wasserspiegelfixierung via Airborne-Laserscanning

Die bisher beschriebene Methode beschreibt eine lineare Abtastung der Wasseroberfläche durch ein darauf befindliches Messschiff, dessen Interaktionen (z. B. Eintauchtiefe, Rollwinkel) mit dem Wasser bekannt sind. Im Bereich der Fernerkundung ist es seit vielen Jahren möglich und üblich, die Topografie des Geländes via Airborne-Laserscanning

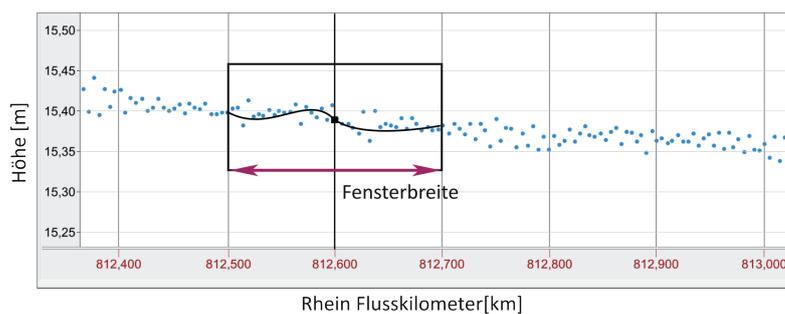


Abb. 5: Berechnete Wasserspiegelhöhenpunkte [m]

Einflussgröße	Verteilung	Ober-/ Untergrenze	Gewichtung	Berechnung	Standardmess- unsicherheit
u1 – zufällige Unsicherheiten der GNSS-Einzelmessungen	N		1		10 mm
u2 – SAPOS-Referenzhöhe	N		1		2 mm
u3 – SAPOS-Referenzkorrekturen	R	a _o = +15 mm a _u = -15 mm	1/√3	(a _o – a _u)/2 · 1/√3	9 mm
u4 – Geoid	R	a _o = +10 mm a _u = -10 mm	1/√3	(a _o – a _u)/2 · 1/√3	6 mm
u5 – Antennenabstand	N		1		5 mm
u6 – Roll-/Pitch-Einfluss	R	a _o = +0 mm a _u = -15 mm	1/√3	(a _o – a _u)/2 · 1/√3	4 mm
u7 – Eintauchtiefe	N		1		10 mm
u8 – Squat	N		1		20 mm
$U_{0,68} = \sqrt{\sum u_i^2}$					27,6 mm
$U_{0,95} = k \cdot U_{0,68}$ (k = 2)					55,2 mm

Tabelle 1: Beispielhafte Berechnung der kombinierten Unsicherheiten für die berechneten Wasserspiegelhöhen an den Ordnungsprofilen. Hierbei werden den einzelnen Unsicherheiten entweder die Normalverteilung (N) oder die unsymmetrische Rechteckverteilung (R) zugeordnet

(ALS) zu erfassen. Seit einigen Jahren werden auch mit Hilfe bathymetrischer ALS-Systeme (bALS) die Topografien von Flachwasserbereichen unterhalb der Wasseroberfläche erfasst. Möglich ist dies durch den Einsatz von grünem Laserlicht, welches im Gegensatz zu Laserlicht im nahen Infrarot (NIR) der konventionellen Laserscanner die Wasseroberfläche durchdringen und so auch Echos des Gewässerbodens erfassen kann. Beim Durchdringen der Wassersäule werden jeweils Anteile des Laserpulses an der Wasseroberfläche, an Streukörpern im Wasser und am Gewässerboden reflektiert. Im Gegensatz hierzu wird beim konventionellen (NIR-) ALS der komplette Laserimpuls an der Wasseroberfläche reflektiert. Somit ist es mit beiden Systemen möglich, die Wasseroberfläche zu erfassen.

Um die Potenziale von ALS-Systemen zu verdeutlichen, werden Messungen an der Elbe aus den Jahren 2018 (bALS) und 2022 (NIR-ALS) verwendet. Die erlangenen Daten wurden einer Strei-

fenausgleichung unterzogen und die Geometrie über Pass- und Referenzflächen im Boden fixiert. Daraus ergeben sich, wie bei der schiffbasierten WSF, Koordinaten im amtlichen System (hier ETRS89/DREF91.R16 für die Lage sowie DHHN16 für die Höhe). Als Testgebiet für die folgenden Betrachtungen dient der Bereich um den Pegel Mühlberg. In diesem Bereich liegen sowohl ALS- als auch bALS-Daten überlappend und stromauf/ stromab um einen Pegel vor.

Rauschverhalten

Zur Einschätzung der Laserbefliegung als potenzielle Ergänzung der herkömmlichen Methode zur Wasserspiegelfixierung wird im Folgenden das Rauschverhalten beleuchtet, um die zufälligen Abweichungen zu quantifizieren. Durch eine einfache Profilschnittbildung der Punktwolken aus der grünen (bALS) und roten (ALS) Laserbefliegung lässt sich ein erster Eindruck zu dem Rauschmaß gewinnen. In Abb. 6 ist ein Profilschnitt einer Profillinie mit einem Korridor von 2 m dargestellt.

Die oberen (roten) Messpunkte der ALS-Befliegung befinden sich in einem Band von etwa 0,1 m Höhe, die unteren (blauen) Messpunkte der bALS-Befliegung hingegen weisen ein Rauschband von etwa 0,2 m auf. Eine flächenhafte Information zu dem Rauschmaß ist in Abb. 7 zu erkennen.

Hierzu wurde aus jeder Befliegung jeweils ein vermittelndes 1-m-Modell nach der in Lorenz et al. (2021) beschriebenen Methode gerechnet, und die vertikalen Abstände zu den Einzelmesspunkten wurden berechnet. Diese Residuen werden in Abb. 7 farbig dargestellt. In der gesamten Fläche streuen die Messpunkte der bALS-Befliegung in einem deutlich höheren Ausmaß als die Messpunkte

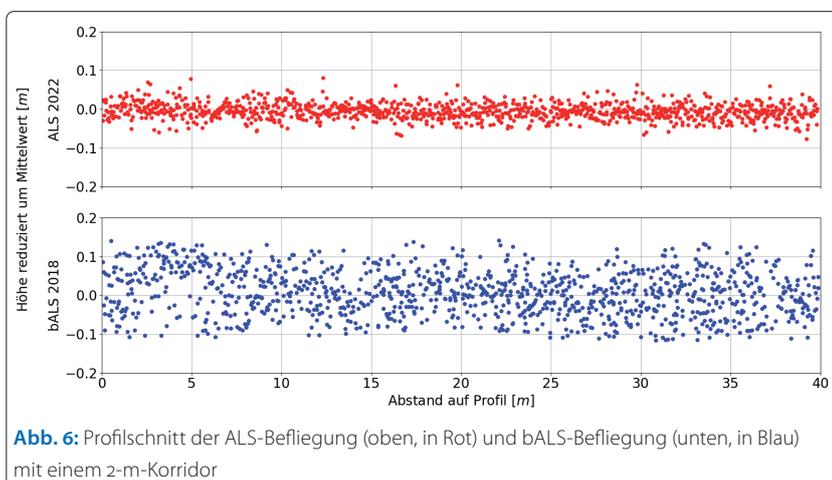


Abb. 6: Profilschnitt der ALS-Befliegung (oben, in Rot) und bALS-Befliegung (unten, in Blau) mit einem 2-m-Korridor

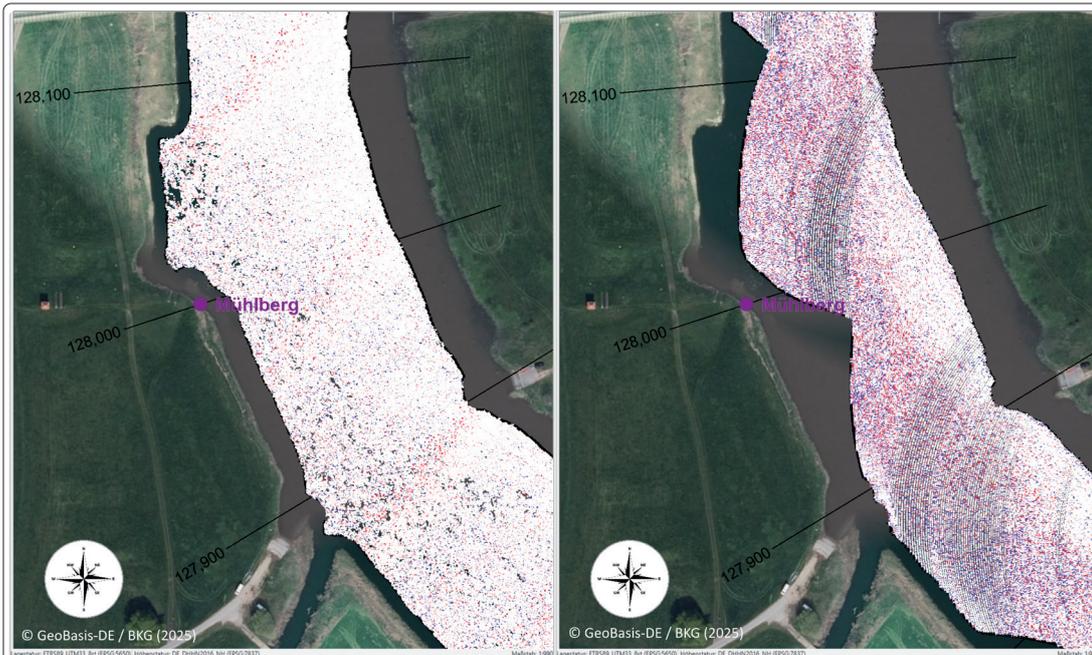


Abb. 7: Draufsicht Residuen der Messpunkte zu vermittelndem Modell, links: ALS-Befliegung, rechts: bALS-Befliegung nahe des Pegels Mühlberg. Residuen $\pm 0,04$ m in Weiß, größere positive Residuen in Rot (Messpunkt höher als Modell), größere negative Residuen in Blau

der ALS-Befliegung. Die Standardabweichung der Residuen beträgt für die ALS-Messung 0,22 m und 0,44 m für die bALS-Messung. Der bALS-Messung liegen also höhere zufällige Abweichungen inne.

Vergleich von Wasserspiegellage und Pegelstand

Neben den zufälligen Abweichungen haben auch die systematischen Abweichungen eine besondere Relevanz. Die systematischen Abweichungen betreffen die Richtigkeit, mit der Zielgrößen bestimmt werden. Um die systematischen Abweichungen auf Messwertebene zu beleuchten, werden die Höhen der Grid-Stützpunkte der jeweiligen vermittelnden 1-m-Modelle mit dem jeweils zum Zeitpunkt des Flugstreifenmessbeginns gültigen Pegelstand verglichen.

Für Aussagen zur Qualität der erfassten Wasserspiegellagen sind Referenzen in Form von Pegelbeobachtungen erforderlich. Für diese Vergleiche werden sowohl die Pegelstandorte als auch die ALS-/bALS-Daten beschickt, das heißt auf einen definierten Bezugswasserstand umgerechnet (hier GIW20 des WSA Elbe). Durch diese Differenzbildung erfolgt die Berücksichtigung des Gewässergefälles in Relation zu dem Pegelstandort. Die Vergleiche können damit genutzt werden, um die Verfahren bALS und NIR-ALS zu vergleichen. Es kann aber keine Genauigkeitsaussage in Relation zum Wasserstand getroffen werden, da die Messungen der Wasserspiegellage verwendet werden sollen, um Inhomogenitäten in Relation zu den diskreten Pegelstandorten zu erfassen. Zu erfassende Abweichungen zu den Pegelmessungen

enthalten also systematische Abweichungen der Messverfahren und Variationen der Wasseroberfläche.

Aus Abb. 8 geht hervor, dass die Höhe des ALS-Modells deutlich besser zum dazu gültigen Pegelstand passt als die Höhe des bALS-Modells. Die Wasseroberfläche wird vom grünen Laser penetriert, die zu erwartende Unterschätzung der Wasseroberfläche ist in dem Histogramm deutlich zu erkennen. Nahezu 85 % der bALS-Messpunkte liegen tiefer als 0,1 m unterhalb des Pegelstandes. Etwa 75 % der ALS-Modellhöhen liegen in einem Bereich von $\pm 0,03$ m um den Pegelstand.

Zusammenfassung und Perspektiven

Die Wasserspiegelfixierung liefert wichtige Messergebnisse für verschiedene hydrologische Aufgabenstellungen im Binnenbereich. Insbesondere

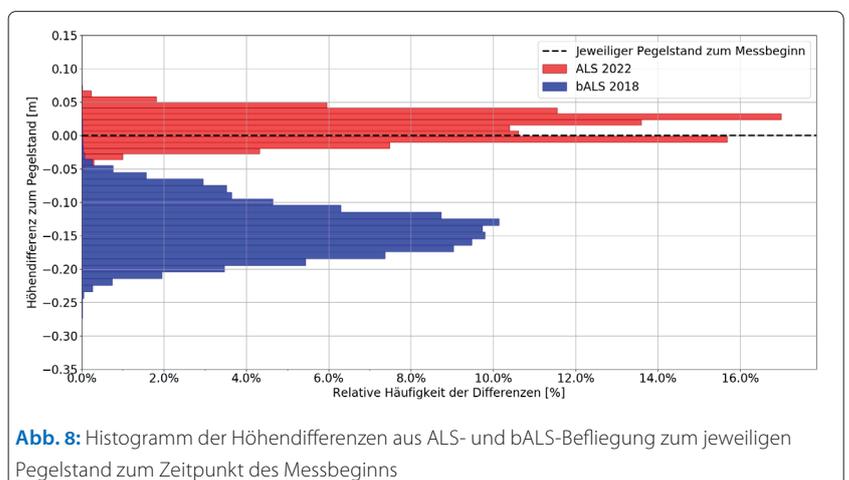


Abb. 8: Histogramm der Höhendifferenzen aus ALS- und bALS-Befliegung zum jeweiligen Pegelstand zum Zeitpunkt des Messbeginns

ihre Relevanz im Rahmen der Kalibrierung einer hydronumerischen Modellierung verlangt, dass die WSF-Messungen nach einem einheitlichen, nachvollziehbaren Mess- und Auswertekonzept erfolgen müssen. Außerdem ist eine realistische Genauigkeitsbetrachtung der Messergebnisse ausschlaggebend für die weitere Verwendung.

Mit dem technischen Fortschritt verändern sich auch die Messmethoden. Die manuelle Wasserspiegelfixierung mit Pflöckchenmethode wurde durch eine linienhafte Bestimmung der Wasserspiegelhöhen mit 3D-Positionierung vom Messschiff ersetzt. Durch den Einsatz von Airborne-Laserscanning eröffnen sich mittlerweile Möglichkeiten zur Ergänzung der schiffsbasierten Erfassung um flächenhafte Informationen zur Wasserspiegeltopografie. Weitere Potenziale bietet seit einiger Zeit die Satellitenfernerkundung (Schwatke et al. 2015) und hier für den Binnenbereich insbesondere die Mission SWOT (Surface Water and Ocean Topography) (Fu et al. 2024).

Der vorliegende Artikel beschäftigt sich ausschließlich mit schiffs- und flugzeugbasierten Messungen. Für die in der WSV etablierte schiffsbasierte WSF wurde ein standardisiertes Konzept vorgestellt, mit dem qualitätsgesicherte Was-

serspiegelhöhen entlang eines vorgegebenen Messweges mit einer Genauigkeit von ca. 5 cm bereitgestellt werden können. Außerdem wurde gezeigt, dass eine flächenhafte Datenerfassung mittels ALS-Befliegung möglich ist. Dabei ist die NIR-ALS-Befliegung im Vergleich zur bALS-Befliegung die geeignetere Messmethode. Ein geringeres Maß an Rauschen und eine schärfere Detektion der Wasseroberfläche sind hierbei gegenüber der bALS-Befliegung zu nennen. NIR-ALS kann als potenzielle Ergänzung zur schiffsbasierten WSF gesehen werden. Ein wesentlicher Vorteil der ALS-Befliegung ist die 2D-Erfassung. Neben der flächenhaften Information zur Wasserspiegelhöhe können zusätzliche Informationen wie ein Quergefälle bestimmt werden. Durch die schnelle Messdatenaufnahme lässt sich ein nahezu stationärer Wasserstand erfassen.

Perspektivisch sind weitere Erprobungen und Validierungen der Verfahren notwendig. Die gleichzeitige bzw. zeitähnliche Erfassung der Wasserspiegellage mittels herkömmlicher Methodik (WSF durch Messschiffe) und der Befliegung in Bereichen nahe von Pegeln kann weitere Aufschlüsse zur Vergleichbarkeit liefern. Hierbei sind auch altimetrische Satellitenmessungen einzubeziehen. //

Literatur

- Abel, Dietmar; Stefanie Ackermann; Norbert Busch; Matthias Hammer; Peter Hörter (2014): Grundlagen für die Festlegung der Wasserspiegellinie GIW2012 am Rhein zwischen Iffezheim und der deutsch-niederländischen Grenze. Bundesanstalt für Gewässerkunde, Koblenz. Bericht BfG-1815
- Brüggemann, Thomas (2014): Leitfaden für die Einmessung von hydrographischen Messsystemen auf Vermessungsschiffen. Bundesanstalt für Gewässerkunde, Koblenz. Bericht BfG-1822
- Brüggemann, Thomas; Thomas Artz; Robert Weiß (2018): Kalibrierung von Multisensorsystemen. In: Hydrographie 2018 – Trend zu unbemannten Messsystemen. DVW-Schriftenreihe, Band 91, S. 29–46
- Faulhaber, Petra (2013): Zusammenschau und Analyse von Naturmessdaten. In: BAW-Mitteilungen Nr. 97. Bundesanstalt für Wasserbau, Karlsruhe, S. 109–134
- Fu, Lee-Lueng; Tamlin Pavelsky; Jean-Francois Cretaux et al. (2024): The Surface Water and Ocean Topography Mission: A Breakthrough in Radar Remote Sensing of the Ocean and Land Surface Water. *Geophysical Research Letters*, DOI: 10.1029/2023GL107652
- GUM (2008): Technische Regel ISO/IEC Guide 98-3:2008-09 – Messunsicherheit – Teil 3: Leitfaden zur Angabe der Unsicherheit beim Messen
- Larina, Maria (2009): Erfahrungen und Ergebnisse mit dem Fixierungstool zur Analyse von Wasserspiegelfixierungen am Oberrhein zwischen 1977 und 2008. In: Wasserstands-informationsdienste der BfG für die Bundeswasserstraßen. Kolloquium am 24. März 2009, S. 52-65.
- Lorenz, Felix; Thomas Artz; Thomas Brüggemann; Julius Reich; Robert Weiß; Axel Winterscheid (2021): Simulation-based Evaluation of Hydrographic Data Analysis for Dune Tracking on the River Rhine. PFG, DOI: 10.1007/s41064-021-00145-0
- Riedel, Annika; Werner Bengel; Michael Willems (2017): Dokumentation der Digitalisierung von Wasserspiegelfixierungen des WSA Bingen. Kurzbericht im Rahmen des Projekts »Abladeoptimierung Mittelrhein«, Bundesanstalt für Gewässerkunde, Koblenz
- Schwatke, Christian; Denise Dettmering; Wolfgang Bosch; Florian Seitz (2015): DAHITI – an innovative approach for estimating water level time series over inland waters using multi-mission satellite altimetry. *Hydrology and Earth System Sciences*, DOI: 10.5194/hess-19-4345-2015
- Vollmer, Stefan; Dirk Schulz (2019): Berechnung historischer Wasserspiegel- und Sohlagen des Rheins. In: Information und Organisation in der hydrologischen Forschung und Praxis. Beiträge zum Tag der Hydrologie am 28./29. März 2019 am Karlsruhe Institut für Technologie (KIT). Forum für Hydrologie und Wasserbewirtschaftung 41.19, S. 17–23