

Stefanie Wiek, Björn Helm, Pierre Karrasch, Sebastian Hunger, Tim G. Hoffmann, Simon Schönrock, Wolfgang Klehr, Achim Six, Ines Stäglich, Karin Kuhn, Dietmar Mehl, Jens Tränckner, Lars Bernard & Peter Krebs

Boot-gestütztes längskontinuierliches Monitoring von Fließgewässern mit online-Sonden

Boat-based measurement system for longitudinal monitoring of rivers with online sensors

Eine abiotische Beschreibung und Bewertung von Oberflächengewässern bildet eine Grundlage zur Charakterisierung des ökologischen Gewässerzustandes. Sie erfordert umfangreiche Daten zur Wasserqualität sowie Hydrologie und Morphologie. Im Projekt BOOT-Monitoring¹ wurde ein integriertes Erhebungskonzept mit einem bootgestützten Messsystem und fernerkundlichen Methoden entwickelt, um Daten zu Fließgewässern längskontinuierlich zu erfassen. Konfigurationen des Messsystems werden für einen Tiefland- und einen Mittelgebirgsfluss vorgestellt. Eine quasi kontinuierliche Darstellung der Gewässermorphologie wird eingeführt und unter Nutzung von Fernerkundungsdaten, Ultraschall-Doppler-Profil-Strömungsmessungen (ADCP) und Echolotmessungen ausgewertet. Die Interpolation der Lage der Gewässersohle aus gleichzeitig aufgenommenen Tiefendaten mit einem ADCP und einem schwenkbaren Echolot dient als Grundlage für die Ableitung von Querprofilen. Diese werden mit longitudinalen Geschwindigkeits- und Konzentrationsprofilen kombiniert um die Entwicklung von Durchfluss und Fracht im Gewässerverlauf zu quantifizieren. Am Beispiel von Längsprofilen der Nitrat- und Arsenkonzentration werden Einschränkungen bei der Auswertung konventioneller ortsfester Schöpfproben demonstriert. Auf Grundlage der untersuchten Beispiele werden Potentiale, Herausforderungen und Grenzen des Erhebungskonzepts reflektiert und zukünftige Forschungsfragen vorgeschlagen.

Schlagwörter: Gewässermonitoring, Online-Messungen, Längsprofile, Messboot, Fernerkundung, Morphologie, Morphometrie

The abiotic description and evaluation of the state of surface water bodies is a prerequisite for an evaluation of the ecological condition of any body of water. It requires extensive data on hydrology, morphology and water quality. The BOOT-Monitoring project developed an integrated, longitudinally continuous data acquisition concept, which combines a boat-based sensor system and remote sensing methods. Configurations of the boat-based sensor system are presented for application conditions in lowland and upland rivers. A quasi continuous representation of the river morphology metrics are determined and assessed from remote sensing data, acoustic Doppler current profiler and echo sounding. A method for continuous interpolation of the riverbed serves as a basis for river cross sections determination. They are combined with longitudinal flow velocity and concentration profiles to quantify discharge and load devolution along the flow course. Longitudinal concentration profiles of nitrate and arsenic exemplify the limitations of conventional stationary site sampling. Based on the examples presented in the text, potentials, challenges, and limitations of the longitudinally continuous data acquisition approach are reflected and future research questions are suggested.

Keywords: River monitoring, online measurements, longitudinal profile, measurement boat, remote sensing, morphology, morphometry

1. Einleitung

Die Europäische Wasserrahmenrichtlinie (EG-WRRL) gibt für natürliche Oberflächenwasserkörper als strategisches Ziel das Erreichen eines mindestens guten ökologischen und guten chemischen Zustands vor. Bei künstlichen oder erheblich veränderten Wasserkörpern gilt das Umweltziel eines mindestens guten ökologischen Potenzials.

Eine maßgebliche Grundlage für die Zustandsbewertung, die Ableitung von Bewirtschaftungsplänen und Maßnahmenprogrammen sowie für die Überprüfung der umgesetzten Maßnahmen bildet dabei das Monitoring der Gewässer. Die einzelnen Qualitätskomponenten für die Einstufung des ökologischen Zustands sind im Anhang V der EG-WRRL bzw. in der Oberflächengewässerverordnung (OGewV) aufgeführt und umfassen bei den Oberflächenwasserkörpern biologische, hydromorphologische sowie chemische und physikalisch-chemische Qualitätskomponenten. Für die Einstufung des chemischen Zustands für Oberflächenwasserkörper gelten EU-weit die Umweltqualitätsnorm aus der

EG-Nitratrichtlinie (Vorgabe für Nitrat) sowie die Umweltqualitätsnormen-Richtlinie (2013/39/EU) mit Grenzwerten für insgesamt 45 prioritäre Stoffe.

Mit Ausnahme der hydromorphologischen Aspekte, für die sich Kartierungsverfahren als Erhebungsmethode etabliert haben (BORCHARDT et al., 2006), erfolgt die Bestimmung der Qualitätskomponenten an stationären Messstellen. Nach den Vorgaben der Richtlinie und des Leitfadens der Gemeinsamen Umsetzungsstrategie (EUROPEAN COMMISSION, 2003) sind Messstellen für eine langfristige Überwachung (Überblicksüberwachung) an Gewässern mit mehr als 2.500 km² Einzugsgebiet eingerichtet. Die Messstellen sollen dabei wesentliche Belastungen des Gewässers und ihre kumulativen Effekte erfassen. Im Sinne der operativen Überwachung sind Messstellen zur Ermittlung des Zustandes einzelner kleiner Wasserkörper mit mindestens 10 km² Einzugsgebiet vorgesehen, wenn das Gewässer den guten Zustand nicht oder möglicherweise nicht erreicht. Darüber hinaus kann bedarfsweise zu Ermittlungszwecken überwacht werden. Im Ergebnis waren 2015 in Deutschland 313 Messstellen an der Überblicksüberwachung (eine Messstelle je 1.140 km²) und 13.265 Messstellen an der operativen Überwachung (eine Messstelle je 27 km²) beteiligt (UMWELTBUNDESAMT, 2016).

¹ Gefördert durch das BMBF im Rahmen der ReWaM Bekanntmachung im Rahmenprogramm FONA, Laufzeit: 1. Juni 2015 - 30. November 2018, Förderkennzahl: 033W039.

Trotz dieses erheblichen Untersuchungsaufwands wurden in der Auswertung des Monitoringprogramms im ersten Bewirtschaftungszyklus verschiedene Aspekte hervorgehoben, die mit dem bestehenden Instrumentarium nur unzureichend adressiert werden können. ALLAN et al. (2007) beleuchten die begrenzte Aussagekraft von Stichproben der biologischen und chemischen Qualitätsparameter bzgl. zeitlicher und räumlicher Auflösung. Die Auswirkung geringer zeitlicher Auflösung der Probenahme von Wasserqualitätskomponenten auf die Unsicherheit der Messwerte und der abgeleiteten Bewertungskriterien werden zudem in CARTENSEN (2007) und ANTILA et al. (2012) diskutiert. Das mangelnde Ursache-Wirkungs-Verständnis zu den Zusammenhängen zwischen Gewässermorphologie und ökologischen Auswirkungen wird in zahlreichen Fallstudien, u. a. PASSAUER et al. (2002) sowie DUNBAR et al. (2010) dokumentiert und kondensiert in der Forderung nach integrierter ökohydromorphologischer Forschung (VAUGHAN et al., 2009). Dabei stehen insbesondere die Aspekte der räumlichen Struktur der Hydromorphologie und ihrer Variabilität in Raum und Zeit sowie die Kovarianz zwischen Gewässerstruktur und ökologischer Funktion im Untersuchungsschwerpunkt.

Ein Untersuchungsansatz, der dazu beitragen kann, die aufgeführten Forschungsfragen zu adressieren, besteht in der Aufnahme kontinuierlicher, orts- und zeitkonkreter Kenndaten zur Wasserqualität und -quantität sowie zur Gewässerstruktur. Untersuchungen von MEI et al. (2011) zeigen das Potential zur Optimierung von Monitoringnetzwerken der Wasserqualität. In einer Studie zur Stickstoffdynamik zeigen KUNZ et al. (2017), dass sich durch längskontinuierliche Messungen Eintrags- und Umsatzraten von Nitrat für morphologisch unterschiedlich degradierte Gewässerabschnitte differenzieren lassen. DODDS et al. (2018) weisen in ihrer Studie auf die räumliche Variabilität von Kohlenstoff- und Stickstoffumsatzprozessen in Fließgewässern hin, die durch konventionelle Probenahmeprogramme unzureichend charakterisiert werden.

Im vorliegenden Artikel werden Methoden zur Erhebung und Nutzung räumlich kontinuierlicher Daten vorgestellt, mit denen sich das bestehende Monitoring hin zu einem besseren Verständnis der Gewässergüte erweitern lässt. Dabei kommen bootgestützte und fernerkundliche Daten in einem integrierten Messkonzept zum Einsatz.

Die Bestimmung der Gewässerstruktur erfolgt in den etablierten Bewertungsverfahren auf Grundlage vordefinierter Gewässerabschnitte mit konstanter Länge (LAWA, 1999). Diese Herangehensweise wird der Variabilität und den unterschiedlichen räumlichen Skalen einzelner Bewertungsaspekte nicht immer gerecht. Beispielsweise können Sohl- und Uferstrukturen im Bereich weniger Meter stark variieren, während die Laufkrümmung im Bereich von 10 bis 1.000 m variiert. An den Beispielen Breitenvarianz, Tiefenvarianz, Querprofil und Sohlstruktur werden automatisierte Verfahren demonstriert, die eine quasi-kontinuierliche Bewertung der Gewässerstruktur ermöglichen. Die dabei eingesetzten Metriken können das Expertenwissen aus Kartierungen ergänzen und festgestellte Veränderungen genauer quantifizieren. Darüber hinaus werden, insbesondere für größere und sicht-trübe Gewässer, Eigenschaften der Gewässersohle außerhalb des sichtbaren Bereichs erfassbar.

Auch die Messung von Konzentrationen relevanter Wasserinhaltsstoffe bzw. von physikalischen Kennwerten an stationären

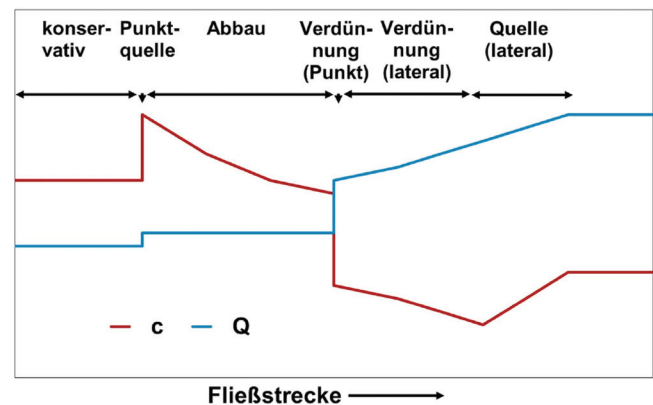


Abbildung 1

Prinzipdarstellung zur Auswertung von Transport und Umsatzprozessen aus der längskontinuierlichen Messung von Konzentration und Durchfluss.

Schematic representation of continuous longitudinal measurements of concentration and flow rate for the interpretation of transport and conversion processes.

Messstellen bildet die Variabilität im Gewässerverlauf nicht ab. Messstellen quantifizieren die akkumulierte Konzentration gelöster inerte Stoffe bei ausreichender zeitlicher Auflösung zutreffend. Im Gegensatz dazu wird der Transport abbaubarer und partikulärer Stoffe von den Randbedingungen entlang der Fließstrecke geprägt und kritische Konzentrationen können lokal im Gewässerverlauf auftreten. Die Identifikation dieser kritischen Abschnitte wird durch die räumlich kontinuierliche Erfassung unterstützt.

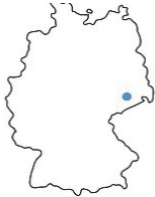
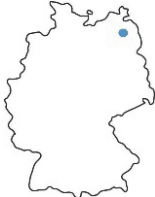
In Ergänzung zu bisherigen Untersuchungen sollen neben der Messung von Stoffkonzentrationen auch die Daten für eine räumlich kontinuierliche Durchflussbestimmung erhoben werden. Durch die simultane Messung von Stoffkonzentration und Durchfluss werden Eintrags- und Transformationsprozesse quantifiziert und abgrenzbar (Abb. 1). Veränderungen in der Fracht verdeutlichen Eintrag oder Abbau, während eine Verdünnung durch konstante Fracht und zunehmenden Abfluss gekennzeichnet ist.

2. Untersuchungsgebiete

Um eine Verwendbarkeit der Analyseverfahren für grundsätzlich unterschiedliche Gewässertypen zu gewährleisten, findet die Methodenentwicklung an zwei Gewässern statt. Die Tollense in Mecklenburg-Vorpommern repräsentiert dabei den Gewässertypus des Tieflandes, die Freiburger Mulde in Sachsen ein Gewässer des Hügel- und Berglandes. Die Gebietseigenschaften sind in Tabelle 1 zusammengestellt.

3. Integriertes Messkonzept des Boot-Monitoring-Projekts

Parameter der chemischen, physiko-chemischen und hydromorphologischen Qualitätskomponenten werden im Boot-Monitoring Projekt mit einem integrativen Messkonzept unterschiedlicher Betrachtungsebenen erhoben. Fernerkundliche Daten und Methoden der angewandten Geoinformatik finden bei der Erfassung von Informationen aus dem Gewässerumfeld und der Uferzone Anwendung. Auf der zweiten Ebene erhebt ein boot-

Tabelle 1 Übersicht der für das Projekt wichtigen Gewässereigenschaften der Pilotgewässer. <i>Overview of properties of the two investigated rivers important for the project.</i>		
Name	Freiberger Mulde	Tollense
Lage Untersuchungsgebiet in Deutschland		
Einzugsgebietsfläche	2.673 km ²	1.800 km ²
Länge	126 km	68 km ab Tollensesee (96 km ab Quelle)
Statistische Hauptwerte	Pegel Mahlitzsch MNW: 56 cm MNQ: 1,88 m ³ /s MW: 84 cm MQ: 10,3 m ³ /s MHW: 265 cm MHQ: 141 m ³ /s	Pegel Klempenow MNW: 101 cm MNQ: 1,70 m ³ /s MW: 126 cm MQ: 5,77 m ³ /s MHW: 179 cm MHQ: 17,6 m ³ /s
Messstrecke	27 km zwischen Döbeln und Mündung in die Vereinigte Mulde	30 km zwischen Klempenow und Mündung in die Peene
Bewertung nach WRRL 1. Bewirtschaftungszeitraum 2010 - 2015		
Bewertung für Oberflächenwasserkörper	Freiberger Mulde	Untere Tollense
Chemischer Zustand:	Nicht gut	Nicht gut
Überschrittene Umweltqualitätsnormen	Hg, PAK, Cd, Fluoranthen, Hexachlorcyclohexan	Hg, PAK (Benzo(a)pyren), HBCDD
Ökologischer Zustand:	Mäßig	Mäßig
Flussspez. Schadstoffe	Arsen, Zink	-
Morphologie	Sehr stark verändert	Erheblich verändert (HMWB)
Nicht eingehaltene allg. phys.-chem. Parameter	Gesamtposphor, max. pH	Sauerstoff, Nitrat
Beispiele für Belastungsursachen	- Nährstoffbelastung aus der Landwirtschaft - Fehlende Durchgängigkeit durch Querverbauungen	- Nährstoffbelastung aus der Landwirtschaft - Sehr geringe Fließgeschwindigkeiten und damit verbundenes Algenwachstum (erhöhte Autotrophie) - Rückstauereffekte durch die Peene und an Wehren
Zielerreichung nach WRRL	2027	2027
Wichtigster natürlicher Zufluss im Messgebiet	Zschopau	Augraben

gestütztes Messsystem längskontinuierliche Daten aus dem Wasserkörper, der Gewässersohle sowie den Uferbereichen. Schließlich dienen in-situ Probenahmen und Erhebungen an einzelnen Stellen im Gewässer zur Bestimmung zusätzlicher biologischer und chemischer Parameter der betrachteten Fließgewässer. Im vorliegenden Text werden vor allem die beiden erstgenannten Untersuchungsansätze demonstriert, um den Mehrwert der Synopse aus bootsgestützten Messdaten und zusätzlichen Gewässerinformationen aufzuzeigen

3.1 Fernerkundliche Bestimmung von Gewässerstrukturparametern

Methoden der Fernerkundung und der angewandten Geoinformatik haben in den vergangenen Jahren im Umfeld der Analyse von Gewässern und insbesondere an Fließgewässern weiter an Bedeutung gewonnen. Mit einer Vielzahl an Untersuchungen konnte das Potential thematische (FORGET & OUIILLON, 1998; ODERMATT et al., 2008; DÍAZ-DELGADO et al., 2010; TARRANT et al., 2010) und geometrische Informationen (PARSONS & GILVEAR, 2002; GILVEAR et al., 2004; PEIXOTO et al., 2009; NARDI & RINALDI, 2015) zu gewinnen, nachgewiesen werden.

Im Rahmen des Boot-Monitoring Projektes wurden Daten unterschiedlicher Aufnahmeplattformen verwendet, die die Erhebung verschiedener Gewässerstrukturparameter auf unterschiedlichen Maßstabsebenen ermöglichen. Hierbei kommen Daten verschiedener Satellitenmissionen zum Einsatz. Aufnahmen der Landsat-Systeme (Auflösung: 30 m) ermöglichen auch Aussagen über retrospektive Zustände (1990 - 2016) und damit Entwicklungen des Gewässerumfeldes. Für aktuelle Analysen werden auch Sentinel 2 Daten mit einer Auflösung von 10 - 20 m eingesetzt, um den Mehrwert unterschiedlicher Fusionsverfahren für Analysen im Gewässerumfeld zu evaluieren (HUNGER et al., 2016). Um geometrische Eigenschaften (Uferlinien, Krümmungsgrade, Flussbreiten und Breitenvarianzen) von kleinen oder mittleren Fließgewässern mit fernerkundlichen Methoden zu erheben, können hochauflösende, aber kostenintensive Satellitendaten (WorldView 1 - 4, GeoEye 1) oder auch Datenprodukte der Landesvermessungen der Bundesländer genutzt werden. Für das Untersuchungsgebiet der Freiberger Mulde wurden vierkanalige digitale Orthophotos mit einer geometrischen Auflösung von 20 cm (2015) ausgewertet. Mit Hilfe dieser Daten ist es beispielsweise möglich, die Uferlinien zu extrahieren. Abbildung 2 zeigt, dass die so gefundenen

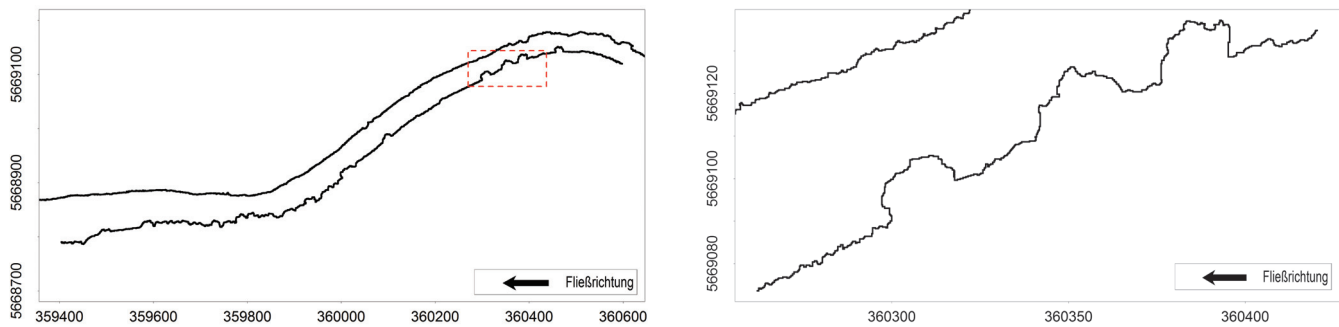


Abbildung 2

Aus digitalen Orthophotos extrahierte sichtbare (scheinbare) Uferlinien (Abschnitt Klosterbuch, Freiburger Mulde).
Visible (seemingly) river bank lines extracted from digital orthophotos.

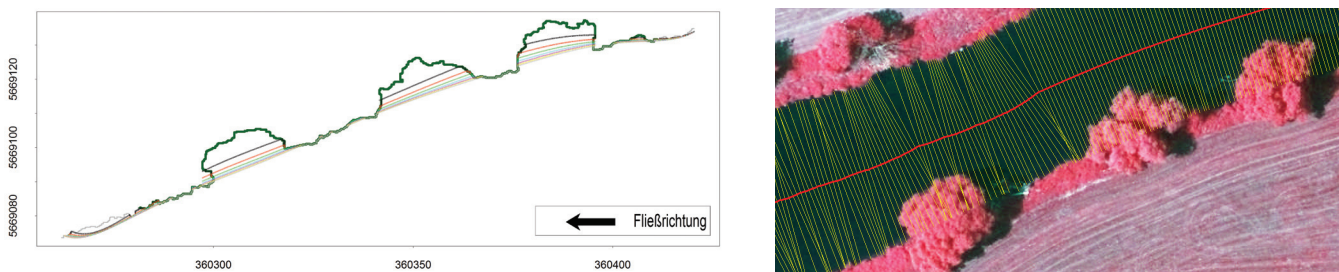


Abbildung 3

Erosion der scheinbaren Uferlinien (links); Bestimmung der Flussbreiten und Flussbreitenvarianzen auf Grundlage korrigierter Uferlinien (rechts),
Datenquelle: Staatsbetrieb Geobasisinformation und Vermessung Sachsen (GeoSN).
Erosion of visible river bank lines (left); determination of river widths and river width variances based on corrected river bank lines (right), Source: GeoSN.

Geometrien zwar den Flussverlauf gut wiedergeben, im Detail jedoch von der Vegetation in den Uferbereichen, welche die Wasseroberfläche überdeckt, beeinflusst werden.

Sollen mit Hilfe dieser geometrischen Informationen Parameter wie Flussbreitenvarianzen oder Krümmungsgrade der daraus abgeleiteten Flussmittellinie (KARRASCH et. al. 2015) generiert werden, müssen diese Artefakte in der sichtbaren (scheinbaren) Uferlinie korrigiert werden. Nach dem Auffinden betroffener Stellen wurde ein Verfahren entwickelt, das auf Grundlage einer iterativen Erosion unter zu Hilfenahme polynomialer Modelle die tatsächliche Uferlinie rekonstruiert (Abb. 3, links, ausführliche Informationen zur Methodik finden sich in KARRASCH & HUNGER, 2016).

Die so gewonnenen Daten wurden durch Nutzung von UAV Systemen (Unmanned Aerial Vehicle) validiert. Die Daten der DJI Spreading Wings 900 (Flughöhe: 80 m) ermöglichen in Verbindung mit zwei Kamera-Systemen (Canon EOS M) Aufnahmen in einer Auflösung von ca. 2 cm. Die mit der iterativen Erosion gefundenen Uferlinien bilden dann im weiteren Verlauf der Analyse geometrischer Eigenschaften die Grundlage für Berechnungen von Gewässereigenschaften wie zum Beispiel der Breitenvarianz (Abb. 3, rechts (KARRASCH & HUNGER, 2016)). Als metrisches Maß der Breitenvarianz wird dabei die Standardabweichung der Breite in gleitenden Aggregationsfenstern genutzt. Dafür wird ein quasi-kontinuierliche Ansatz gewählt. Dieser ermöglicht die visuelle Analyse der Breitenvarianz unabhängig von der Größe

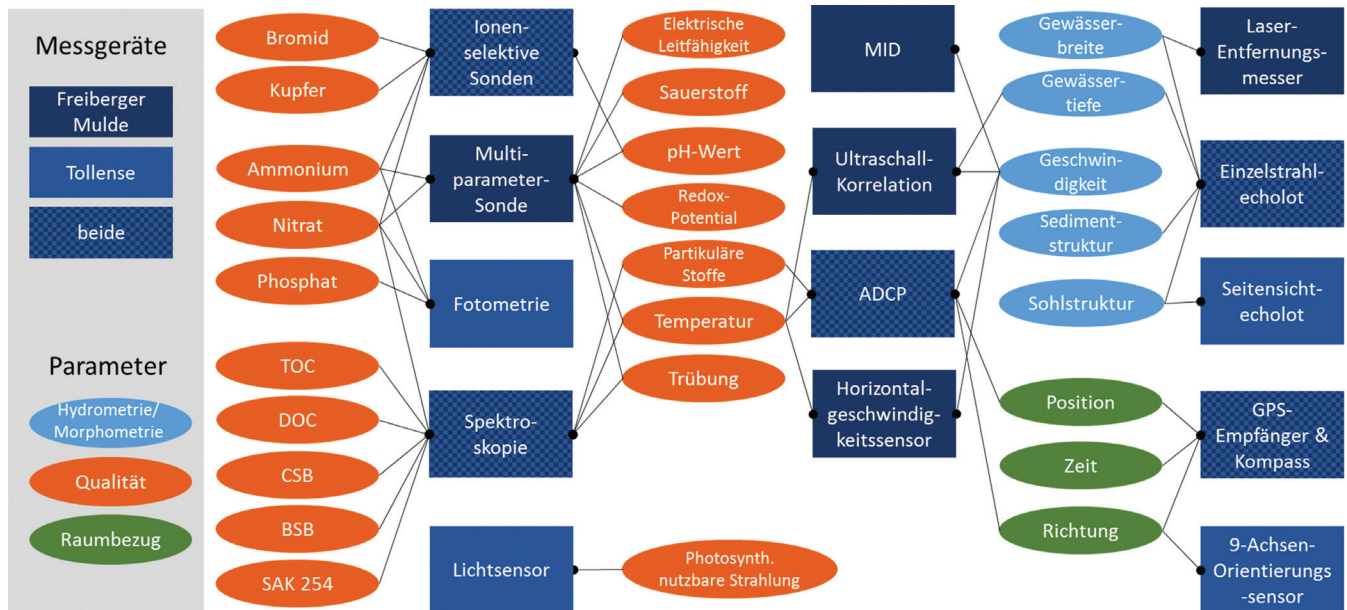
des zu bewertenden Flussssegments an jeder Stelle des Flusses. Zusätzlich wird die im Kapitel 3.2 vorgestellte Messplattform eines unbemannten Messbootes genutzt, um Kamerasysteme für die Aufnahme der Flussufer zu installieren.

3.2 Konfiguration des modularen Messbootes

Die unterschiedlichen Randbedingungen der untersuchten Gewässer erforderten die Entwicklung von zwei Messkonfigurationen. Wegen der Varianz der Wasserstände über die Messstrecke von wenigen Zentimetern bis 7 m Gewässertiefe in Kombination mit häufigen Querbauwerken wird an der Freiburger Mulde ein Schleppverband bestehend aus Schlauchboot und Sondenträger verwendet. Das Schlauchboot dient zum Transport der Steuerung und der zentralen Steuer- und Speichereinheit. Aufbau und Funktionalität der Steuer- und Speichereinheit sind so ausgelegt, dass diese auch für andere Messaufgaben in mobilen oder stationären Anwendungen zum Einsatz kommen kann. Zur gleichzeitigen zeitgesteuerten Erfassung der Sensorsignale und Ausgabe der Steuersignale für den Schrittmotor wurde die Software² um die spezifischen, für das bootgestützte Monitoring vorgesehenen Geräte und Geber erweitert.

Die lange Befahrungsstrecke kombiniert mit der geringen Fließgeschwindigkeit der Tollense erfordert eine motorgestützte Befahrung, welche aufgrund der durchgehend höheren Wassertiefe

2 Eingesetzt wurde das vom Projektpartner entwickelte SENSOMaster32-Modul.

**Abbildung 4**

Konzeption für das Sensorsystem im Projekt Boot-Monitoring mit Darstellung der verwendeten Messgeräte und der erfassten Parameter.
Sensor system concept in the Boot-Monitoring project with illustration of the applied measurement devices and acquired parameters.

auch mit einem größeren Boot realisierbar ist. Die Messgeräte wurden zum Schutz vor den häufig auftretenden Wasserpflanzen in einen Messaufbau ins Boot verlagert und die Wasserproben dahin gepumpt. Der Messaufbau, mit dem in hoher Genauigkeit Nährstoffkonzentrationen unterhalb des Messbereiches üblicher Online-Sensorik erfasst werden können, ermöglicht erstmals den mobilen Einsatz eines Online-Analysators auf Gewässern dieser Größe.

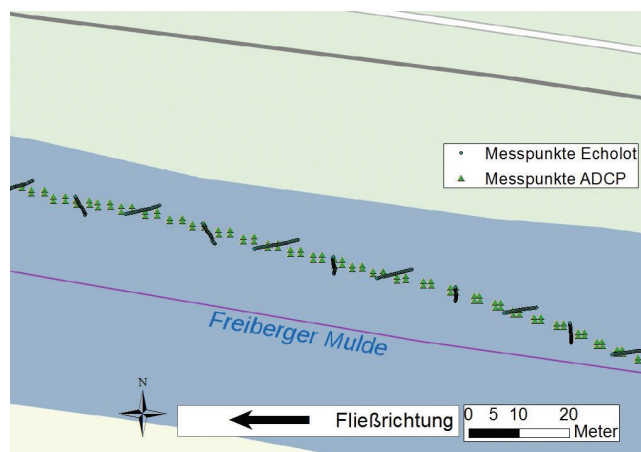
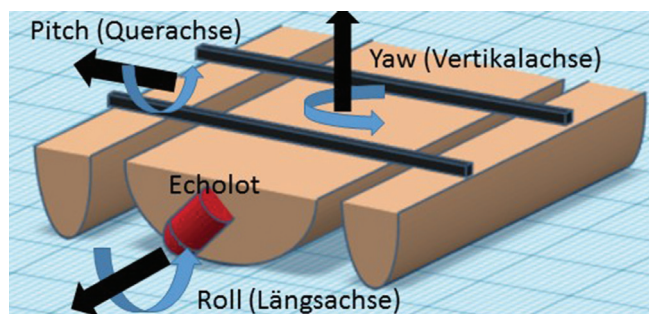
In Abbildung 4 sind die verwendeten Sensoren zur Bestimmung der Wasserqualität und Hydrometrie und das modularisierte Konzept dargestellt. Redundante Messungen der Wasserqualität durch die eingesetzte Sondentechnik verringern Messunsicherheiten. Die verfügbaren Sensoren sind in ihrem Messbereich meist limitiert und wurden deshalb entsprechend der erwarteten Messwerte und den spezifischen Fragestellungen in den untersuchten Gewässern ausgewählt. (Ausführlichere Informationen finden sich in HELM et al., 2017.)

In beiden Anwendungsfällen werden die Daten der Sensoren auf der zentralen Steuer- und Speichereinheit in ASCII-Format gespeichert. Die Daten werden nach den Messfahrten ausgelesen und alle Rohdaten über ein zentrales Datenmanagementsystem den Projektpartnern und auch sukzessive der Öffentlichkeit zur Verfügung gestellt. Die Daten werden dabei noch mit den nötigen Metadaten versehen, um Sie auch über die Projektlaufzeit hinaus nutzbar zu halten. Der Weblink für die Datenplattform ist: <https://boot.geo.tu-dresden.de>. Die Weiterverarbeitung der Daten erfolgt über die freie Software R.

3.3 Erfassung der Gewässerstruktur mit dem modularen Messboot

Ein wichtiges Ziel der Untersuchungen bestand darin, Messansätze zu entwickeln, um während der Längsbefahrung möglichst umfangreiche Daten des Verlaufs- und der Struktur der Gewässer-

sole zu erfassen. Im Gegensatz zu geodätisch motivierten Messungen, sollte dabei keine flächendeckende Befahrung erfolgen, da diese für eine Befahrung mit der Strömung zu langsam ist. An der Freiberger Mulde wurde ein Single Beam Echolot (Echologer EU400) mit einem Schrittmotor kombiniert, um die Schallimpulse im Halbraum unter dem Messboot zu oszillieren. Das Echolot erfasst die Sohlentiefe im Querprofil bereits ab Wassertiefen von 12 cm. Entfernung- und Ausrichtungsmessungen des schwenkbaren Echolotes wurden mit dem Raumbezug verschnitten, um eine Punktwolke der Gewässertiefe unterhalb des Messbootes zu generieren. Die Positionsinformationen des Messbootes im dreidimensionalen Raum wurden über die drei Eulerwinkel Pitch, Roll und Yaw (Nicken, Rollen und Gieren) ermittelt (Abb. 5, links). Die genaue Neigung des Echolotschallkopfes wurde über einen integrierten Neigungssensor im Echolot bestimmt (Pitch und Roll); das ADCP (Acoustic Doppler Current Profiler) misst die Drehung des Bootes bezüglich der Nordausrichtung (Yaw) und ein Globales Positionsbestimmungssystem (Global Positioning System, GPS) gibt die genaue Position des Sensorträgers auf dem Gewässer als Geokoordinaten aus. Zusätzlich wurden die Tiefenmessungen der vier Beams des ADCP hinzugezogen. Diese sind mit konstant 20° Neigung von der Lotrechten ausgerichtet und verdichten das Messsignal unter dem Messboot. Bei der Wahl der Fahrgeschwindigkeit des Bootes und der Schwenkgeschwindigkeit des Echolotsensors muss die Wassertiefe berücksichtigt werden. Bei Echolot-Laufzeiten von mehr als 0.005 s, das entspricht Entfernungen über 4 m empfängt das Echolot durch die Laufzeit der Schallwellen bei zu großer Positionsänderung nur unzuverlässig das reflektierte Signal. Ein Beispiel für eine Punktwolke aus Echolot und ADCP-Tiefendaten ist in Abbildung 5 exemplarisch aufgezeigt. Um die Eingangsgrößen, bestehend aus den georeferenzierten Tiefendaten des Echolots und des ADCPS, für die Interpolation des Gerinneprofils in der Darstellung sichtbar zu machen, wurden die Daten mit einer sekundlichen Auflösung dargestellt.


Abbildung 5

Darstellung der drei Eulerwinkel an einem Modell des Messsystems an der Freiburger Mulde (links) und die Lage der Messpunkte in einem kurzen Abschnitt der Freiburger Mulde, Hintergrundkarte: GeoSN (rechts).

Visualisation of the three Euler angles on a measuring system model at the Freiburger Mulde (left) and the location of measuring points in a short section of the Freiburger Mulde background map: GeoSN (right).

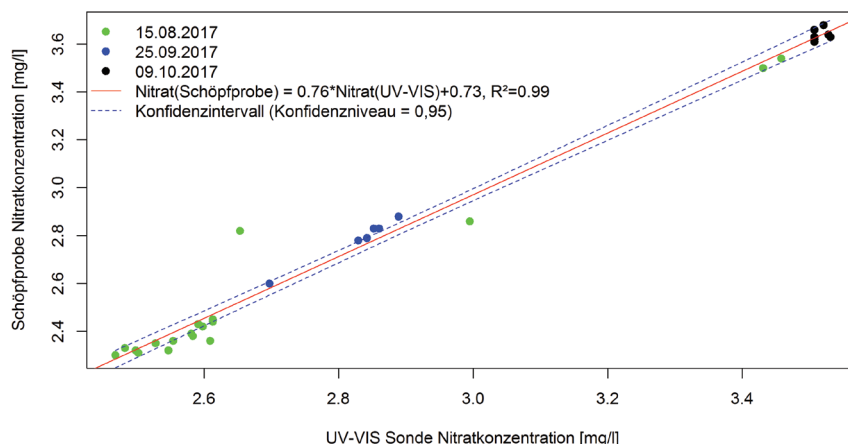
Bei 2 Metern Wassertiefe werden Punkte im Abstand von 2,5 m links und rechts neben dem ausschwenkenden Echolot aufgezeichnet. Mit flachem Einfallswinkel des Schallsignals verringert sich dabei der zum Empfänger hin reflektierte Anteil. Flache, breite Gewässerquerprofile stellen daher besondere Anforderungen an die Messung. Um die Datendichte über die gesamte Gewässersohle zu erhöhen kann zusätzlich eine langsame kurvenreiche Befahrungsstrategie gewählt werden.

Gewässersohlen zeigen in der Regel anisotrope Eigenschaften, mit deutlich größeren Änderungsraten quer zu Fließrichtung als entlang der Strömung. Um die Anisotropie bei der Interpolation auf die Tiefendaten einzubeziehen wurden die vorliegenden Tiefeninformationen in ein geradliniges Flusskoordinatensystem übertragen (SMITH & MCLEAN, 1984), bei dem die Flussmittellinie eine Richtungsachse repräsentiert, die lokalen Querprofile die Zweite. Als einfaches Interpolationsverfahren wurde die Inverse Distanzwichtung (SHEPARD, 1968) verwendet. In detaillierten Untersuchungen zur Interpolation von Gerinneprofilen konnte nachgewiesen werden, dass die Befahrungsstrategie und die damit einhergehende Messpunktdichte einen höheren Einfluss auf die Güte der Morphologiebestimmung hat als die Methode des Interpolationsverfahren (KRÜGER et al., 2018). Nach der erfolgten Interpolation wurden die Daten wieder in das ursprüngliche Koordinatensystem rücktransformiert. Longitudinale Tiefenmessungen von Echolot und ADCP wurden auch für die quasi-kontinuierlicher Auswertung der Tiefenvarianz verwendet. Hierfür wurde, identisch zu der bereits beschriebenen Breitenvarianz (vgl. Kapitel 3.1), über ein gleitendes Messfenster dabei die Standardabweichung der Tiefe entlang des Fließweges ermittelt.

An der Tollense wurde erstmals für einen Tieflandlandfluss ein elektroakustisches Verfahren zur Unterstützung der hydromor-

phologischen Gewässerkartierung verwendet. Derartige Verfahren werden im marinen Bereich bereits standardisiert eingesetzt (BSH, 2016). Erprobungen solcher Kartieransätze erfolgten aber auch schon im limnischen Bereich für Fließgewässer (BUSCOMBE et al., 2014a, b) und für stehende Gewässer (HILGERT & FUCHS, 2016).

Um die Echolotdaten für eine Kartierung des Gewässergrunds heranziehen zu können, wurden markante Stellen der Signalkurve eines Echolotsignals (Ping) definiert und für jedes einzelne Echolotsignal bestimmt (Stützpunkte). Insgesamt wurden für drei verschiedene Kanäle unterschiedlicher Frequenzen (83 kHz, 200 kHz und 800 kHz) jeweils fünf verschiedene Typen von Stützpunkten definiert (z. B. die Stelle des ersten Kontakts eines Echos im Lot des Signalkegels), anhand derer Rückschlüsse auf Charakteristika des Sohlensubstrats gezogen werden können. Auf diese Weise wurden insgesamt 15 erklärende Variablen gebildet.


Abbildung 6

Validierungsergebnisse über eine Korrelationsanalyse mit den gemessenen Nitratkonzentrationen einer online UV-VIS Sonde und den parallel aufgenommenen Schöpfproben am 15.08., 25.09. und 09.10.2017.

Validation result from a correlation analysis with the measured nitrate concentrations of an online UV-VIS sensor and the simultaneously recorded samples bailed on 15/8/, 25/9/ and 9/10/2017.

Anhand dieser Variablen wurde anschließend über multivariat-statistische Verfahren untersucht, ob die Variabilität der Signalwerte an den Stützpunkten Rückschlüsse auf Veränderungen der Bodenbeschaffenheit (Sediment, Detritus, Vegetation) zulässt. Dafür wurden die 15 Variablen zunächst über eine Hauptkomponentenanalyse zu vier Hauptkomponenten zusammengefasst, so dass potenzielle Störgrößen (z. B. Wassertiefe) extrahiert und statistisch unbedeutende Variablen ausgeschlossen werden konnten. Die Faktorwerte der Hauptkomponenten wurden anschließend über eine kombinierte Clusteranalyse aus einem hierarchischen (Average-Linkage) und einem partitionierenden (k-means) Algorithmus zu elf Clustern ähnlicher Echolotsignalausprägungen zusammengefasst. Es zeigte sich, dass auf Basis clusteranalytischer Verfahren (z. B. BACKHAUS et al., 2011) eine Gruppierung der extrahierten Stützpunktwerte vorgenommen werden kann. Den gebildeten Clustern wurden in einem nächsten Schritt anhand von Ground-Truth-Daten (Sedimentproben, Videosequenzen) sowie anhand von Expertenwissen sedimentologische Eigenschaften und Charakteristika der Oberflächenbeschaffenheit des Gewässergrunds zugewiesen.

3.4 Nutzung des modularen Messbootes zur Abschätzung von Durchflussprofilen

Es wurden Geschwindigkeitsprofile in die Tiefe direkt unter dem Boot mit einem Workhorse Rio Grande ADCP der Firma Teledyne RDI erhoben und daraus längskontinuierliche Fließgeschwindigkeitsprofile entlang des Fließgewässers ermittelt. Die aufgenommenen Fließgeschwindigkeiten beschränken sich auf ein Profil direkt unterhalb des Bootes und können somit nicht repräsentativ für den gesamten Querschnitt sein. Zudem streuen die gemessenen Fließgeschwindigkeiten ausgeprägt, da das Boot nicht immer der stärksten Strömung folgt. Um die Variabilitäten zu reduzieren wurden die Fließgeschwindigkeiten, die mit einer Messfrequenz von 2 Sekunden aufgenommen wurden, auf 20-Sekunden-Werte gemittelt. Zur Bestimmung des Durchflusses wurden aus dem Gewässerprofil Durchflussquerschnitte extrahiert und ausgehend von einer maximalen Bootsgeschwindigkeit von 1 m/s, entsprechend über eine Strecke von 20 m gemittelt und mit der räumlich nächstliegenden mittleren Fließgeschwindigkeit multipliziert. Mit der Annahme der Kontinuität und der Einbeziehung der Durchflussinformationen an den Pegeln als Randbedingungen soll dadurch eine Abschätzung der Durchflussentwicklung möglich werden.

3.5 Messung von longitudinalen Konzentrationsprofilen der Wasserqualitätsparameter

Neben den Parametern zur Ermittlung der Morphologie und Hydrometrie erfasst die Sensorik des Messbootes ein breites Spektrum von Parametern der Wasserqualität. Als signifikanter Parameter beider Untersuchungsgebiete hat sich die Nitratkonzentration herausgestellt, da die Belastung durch die Landwirtschaft in beiden Einzugsgebieten dominant ist. Der Parameter wurde mit einem online UV-Vis Spektrometer erfasst. Die alleinige Nutzung der globalen Kalibrierung führt zu einem Fehler, der 30 bis 45 % des Messwertes betragen kann (CARADOT, 2013). Die Sensormessungen wurden daher bei 3 Messfahrten bei unterschiedlichen Nitratkonzentrationen mit Schöpfproben lokal kalibriert. Dabei wird die lineare Abhängigkeit zwischen den Messwerten der Schöpfprobe und den Messwerten globaler Kalibrierung quantifiziert. Das Ergebnis der lokalen Anpassung für den Messwertbereich von 2,3 bis 3,7 mg/l ist in Abbildung 6 dargestellt.

Die aufgenommenen Stoffkonzentrationen bilden kombiniert mit den gleichzeitig erhobenen Positionsdaten des GPS-Signals Konzentrationsprofile entlang der Messstrecke ab. Über die Synopse von berechneten Durchflüssen und den gemessenen Konzentrationsprofilen werden Längsprofile der Stofffrachten abgeleitet.

4 Ergebnisse und Diskussion

4.1 Breitenvarianz und Uferlinien aus Fernerkundungsdaten

Die aus der iterativen Ufererosion gebildeten Uferlinien wurden zur Analyse geometrischer Eigenschaften, wie der Breitenvarianz genutzt. Abbildung 7 zeigt eine quasi-kontinuierliche Darstellung der Breitenvarianz für einen ca. 1,3 km langen Abschnitt der Freiburger Mulde. Auf der x-Achse ist die betrachtete Flusslänge in Metern abgebildet. Für jeden Flussmeter kann nun entlang der y-Achse die Breitenvarianz, ausgedrückt als Standardabweichung der Breite abgelesen werden. Dabei bezieht sich die Länge des Berechnungsabschnitts auf ein gleitendes Fenster ober- und unterstrom des betrachteten Flussmeters. Die Skala der y-Achse stellt die Länge des halben Gleitfensters dar. Als Beispiel beträgt die ermittelte Breitenvarianz nach 600 m Flusslänge und einen betrachteten Flussabschnitt von 200 m flussauf und flussab nur 2 m. Wird dieser Flussabschnitt auf 600 m erhöht, also die komplette Flusslänge von 1.200 m betrachtet, steigt die Breitenvarianz auf 13 m an.

Es wird deutlich, dass, abhängig von der betrachteten Stelle am Fluss, die Länge des zu bewertenden Flussabschnittes (River Segment) einen mehr oder weniger stark ausgeprägten Einfluss auf den Wert der Breitenvarianz haben kann. Die Genauigkeit dieser Untersuchungen ist, wie bereits erwähnt, von der Genauigkeit der Uferlinien abhängig. Der gezeigte Ansatz der Ufererosion kann nur bei Kenntnis einer Referenzuferlinie überprüft werden. Diese Uferlinien wurden in einem weiteren Analyseschritt aus Bilddaten, die in den Wintermonaten mit Hilfe eines UAV (Unmanned Aerial Vehicle) erhoben worden sind (Abb. 8, oben), rekonstruiert.

Auf Grund der fehlenden Belaubung der flussbegleitenden Vegetation ist es so möglich, die unter den Bäumen befindlichen

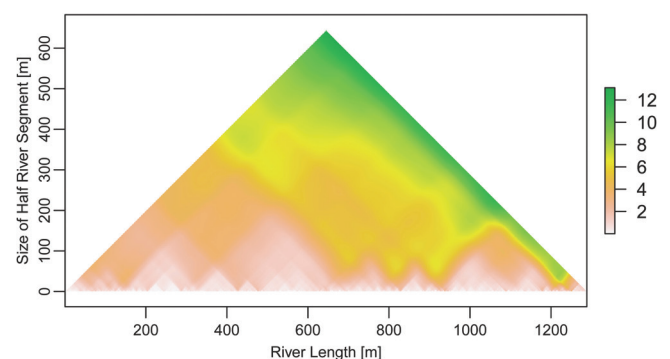
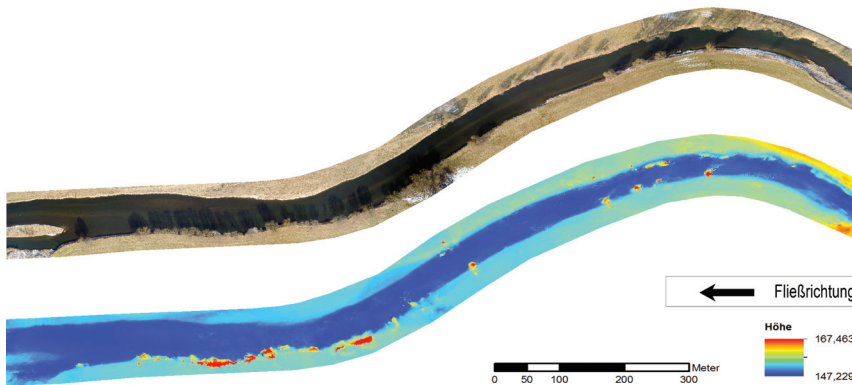
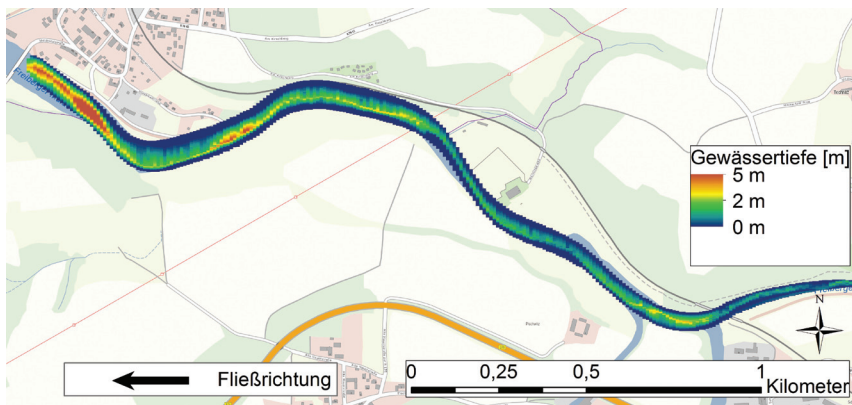


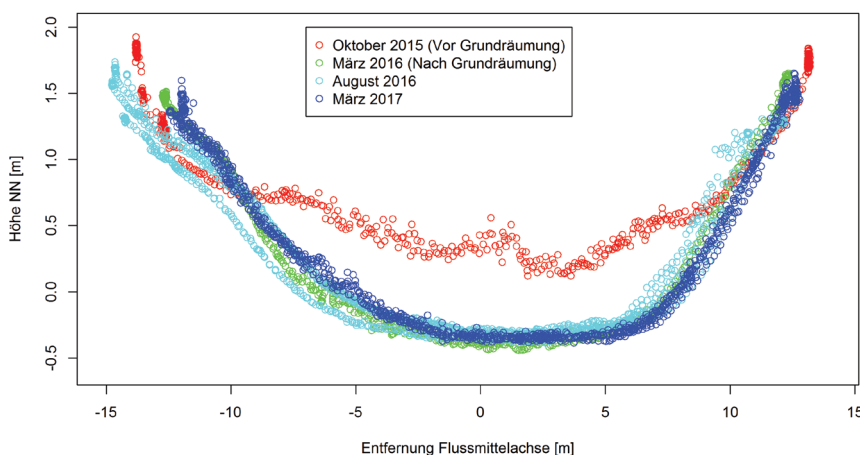
Abbildung 7
Quasi-kontinuierliche Darstellung der Breitenvarianz [m]; Freiburger Mulde (Abschnitt: Klosterbuch), Skala: Standardabweichung der Breite. *Quasi-continuous representation of width variance [m]; Freiburger Mulde (Section: Klosterbuch); Scale: standard deviation of the width.*


Abbildung 8

Digitales Orthophoto der Freiburger Mulde (Abschnitt: Klosterbuch) abgeleitet aus UAV-Daten im Februar 2017 (oben); Oberflächenmodell des gleichen Flussabschnittes (unten).
 Digital orthophoto of the Freiburger Mulde (Section: Klosterbuch) taken from UAV data in February 2017 (top); surface model of the same river section (bottom).


Abbildung 9

Interpoliertes Gewässerprofil für einen 4 km langen Abschnitt der Freiburger Mulde zwischen Technitz und Westewitz bei einer Messkampagne am 15.8.2017, Hintergrundkarte: GeoSN.
 Interpolated river profile for a 4 km river section of the Freiburger Mulde between Technitz and Westewitz during a measuring campaign on 15/8/2017, background map: GeoSNs.


Abbildung 10

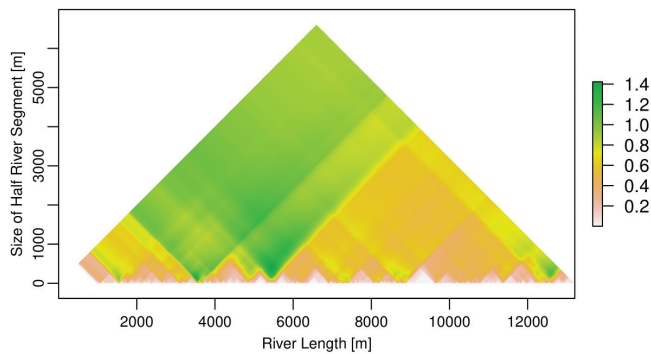
Auf NN normierte Messungen der Sohlentiefe vor und nach einer erfolgten Grundräumung an der Tollense.
 Nominal riverbed depth measurements before and after a successful riverbed clearance at Tollense.

Uferstrukturen zu erkennen und die Anwendbarkeit des beschriebenen Erosionsansatzes zu überprüfen. Gleichzeitig bieten die UAV-Bildaufnahmen auch die Möglichkeit, Mikroreliefe des Flussumfeldes zu generieren (Abb. 8 unten).

4.2 Exemplarische Gewässerstrukturdaten des modularen Messboots

Wie im Abschnitt 3.3 dargestellt, wurden die Messungen der Sohlentiefe zu Gerinneprofilen des Gewässers interpoliert. Beispielhaft ist in Abbildung 9 ein Ergebnis für einen 4 km langen Abschnitt der Freiburger Mulde bei einer Messfahrt vom 15. August 2017 dargestellt. Am Pegel Mahlitzsch (11,2 km Oberstrom des abgebildeten Messabschnittes) wurde am 15. August 2017 ein mittlerer Wasserstand von 57 cm gemessen, dies entspricht nahezu dem mittleren Niedrigwasserstand von 56 cm. Durch die gleichzeitig niedrigen Fließgeschwindigkeiten konnte das entwickelte Messprinzip unter optimalen Bedingungen angewendet werden, da bei gleichzeitiger Ausschwenkung des Echolotes nur eine geringe Positionsänderung des Messbootes in Stromrichtung erfolgte. Gut ist die ausgeprägte Tiefenvarianz erkennbar. Auftretende Unsicherheiten in der Ausdehnung des Gewässerprofils zu den Ufergrenzen sollen in Zukunft mit der Verschneidung von Informationen zu den Uferlinien aus der fernerkundlichen Analyse vermindert werden, da diese Höheninformationen sich im Böschungsbereich verdichten. In den derzeitigen Analysen wurden die Uferlinien aus Satellitendaten extrahiert. Das Sächsische Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie verfügt über Querprofildaten, die im Jahr 2003 im betrachteten Abschnitt alle 200 m erhoben wurden. Mit dieser Auflösung ist die Interpolation in einem Abschnitt mit hoher Variabilität nur eingeschränkt möglich; die stark abfallende Gewässersohle, wie in Abbildung 10 kurz vor Ende des dargestellten Abschnittes, wäre nicht nachweisbar.

Querprofilbefahrung mit ADCP begleiteten eine Saugspülbaggerung im Rahmen der Gewässerunterhaltung an der Tollense. Hier wurden klassische Querprofilbefahrungen in Abständen von 1.000 m während der longitudinalen Messkampagne angewandt, um gesicherte Tiefeninformationen über den gesamten Flussquerschnitt zu erhalten. Durch Messungen vor der Ausbaggerung und wiederholte Befahrungen nach der Ausbaggerung konnte eine Vertiefung der Sohle um 1 m nachgewiesen werden (Abb. 10). Eine Verlandung innerhalb eines Jahres findet nicht maßgeblich statt. Der reguläre Ein-

**Abbildung 11**

Quasi-kontinuierliche Darstellung der Tiefenvarianz [m]; Freiburger Mulde (Abschnitt: Döbeln bis Leisnig), Skala: Standardabweichung der Tiefe. *Quasi-continuous representation of depth variance [m]; Freiburger Mulde (Section: Döbeln to Leisnig), Scale: standard deviation of the depth.*

satz von Querprofilmessungen ermöglicht das Monitoring von Verlandungsvorgängen und die Lokalisierung besonders stark betroffener Gewässerbereiche.

Die Ergebnisse in Abbildung 11 stellen die Tiefenvarianz in der Freiburger Mulde auf Grundlage bootsbasierter Wassertiefenmessungen dar. Es wurde dabei die gleiche Darstellungsweise wie in Abbildung 7 gewählt. Sie bestätigen die Abhängigkeit von der betrachteten Stelle am Fluss und der Länge des zu bewertenden Flussabschnittes (River Segment) für den Wert der Tiefenvarianz. Lokale Strukturen, z. B. ein lokales Maximum bei etwa 5.200 m, haben dabei auch für große Fließabschnitte einen hohen Einfluss auf den ermittelten Wert der Tiefenvarianz. Zusätzlich erweist sich die Standardabweichung der Tiefe als Maß für die Tiefenvarianz als skalenabhängig, mit zunehmender Länge des Flussabschnittes nimmt auch die Tiefenvarianz zu.

Für die in Kapitel 3.3 vorgestellte Clusteranalyse sind in Abbildung 12, links, exemplarisch die abgeleiteten elf Cluster dargestellt. Kompakte, zusammenhängende Bereiche der Punktwolke deuten an, dass sich einige der gebildeten Cluster durch die ers-

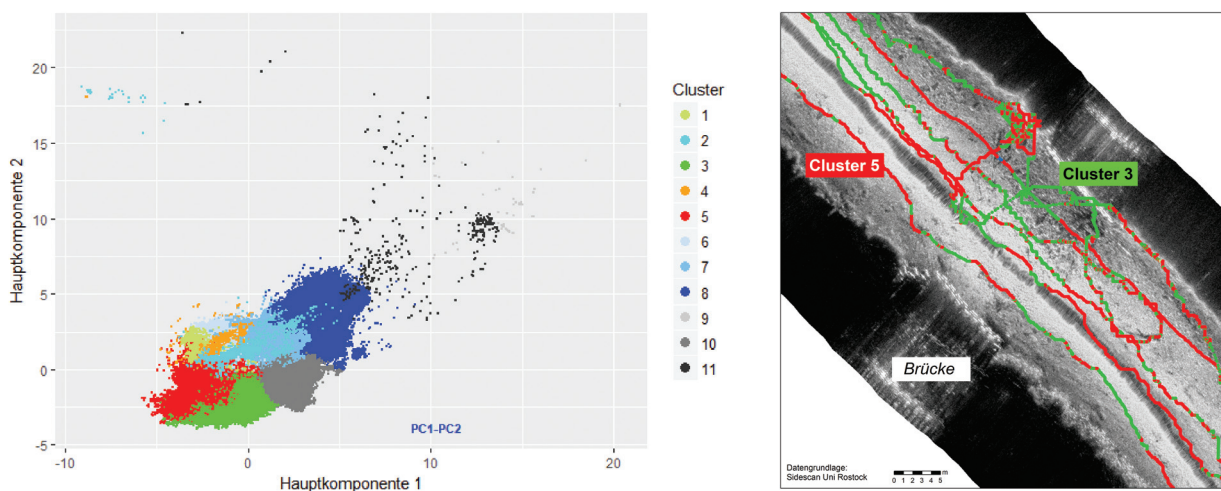
ten beiden der insgesamt vier Hauptkomponenten abgrenzen lassen. Je nach Cluster variieren die Effekte der vier Hauptkomponenten auf die Clusterbildung jedoch.

Den gebildeten Clustern wurden in einem nächsten Schritt anhand empirischer Daten sowie Expertenwissen sedimentologische Eigenschaften und Charakteristika der Oberflächenbeschaffenheit des Gewässergrunds zugewiesen.

Abbildung 12, rechts, zeigt exemplarisch die gebildeten Cluster für einen Abschnitt der Tollense. Hier stellte sich die Dominanz der Cluster 3 und 5 heraus, denen anhand von Probenahmen und Expertenkenntnissen grob- bis mittelsandige Sedimente (Cluster 3) bzw. torfiger Untergrund (Cluster 5) zugeordnet werden konnte. Für andere Abschnitte der befahrenen Gewässer wurden weitere Sedimente wie Feinsande, sandig-schlackige Sedimente sowie Steinsedimente ermittelt. Zudem wurden Cluster gebildet, die auf das Vorkommen von Wasserpflanzen hindeuten.

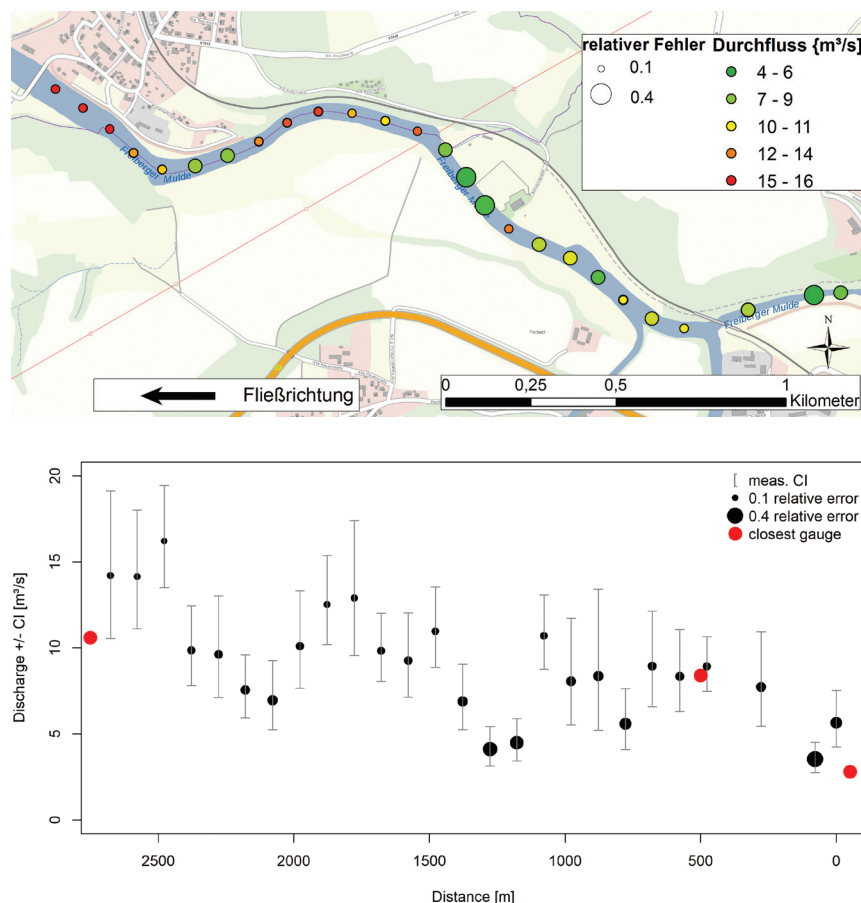
4.3 Berechnung von Durchflussprofilen

Für den selben Untersuchungsabschnitt wie bei der Gewässerprofilbestimmung in Kapitel 4.2 sind in Abbildung 13 die berechneten Durchflüsse farbskaliert und die Standardfehler größenskaliert dargestellt. Im unteren Abschnitt der Abbildung ist das Profil der Durchflüsse einschließlich des Konfidenzintervalls und des relativen Fehlers dargestellt. Wertelücken, z. B. bei 200 - 400 m Distanz, kennzeichnen dabei Abschnitte in denen die mittlere Geschwindigkeit auf Grund hoher Fluktuation der Messwerte nicht zuverlässig bestimmt werden konnte. Neben den Unsicherheiten die sich aus den Messungen und der Interpolation der Querprofile ergeben, treten auch systematische Fehler auf. Als obere und untere Randbedingung sind die Pegeldata bekannt. Am 15. August 2017 betrug der mittlere Durchfluss am Pegel Mahlitzsch (ca. 9,5 km oberstrom zum betrachteten Abschnitt) 2,75 m³/s und der mittlere Durchfluss am Pegel Leisnig (ca. 8 km unterstrom zum betrachteten Abschnitt) 10,6 m³/s. Zwischen diesen beiden Pegel ist die Zschopau der einzige signifikante Zufluss. Dieser wird am Pegel Kriebstein (15 km vorm Zusammenfluss mit der Freiburger Mulde) mit 8,37 m³/s angegeben. In den Abschnitten bei etwa 1.200 - 1.300 m Distanz wer-

**Abbildung 12**

Links: Scatterplot mit den gebildeten elf Clustern; rechts: // Exemplarische Darstellung der gebildeten Cluster für einen Abschnitt der Tollense mit Darstellung von Sidescan-Daten.

Left: Scatterplot with the eleven formed clusters; right: exemplary representation of formed clusters for a section at Tollense with representation of Sidescan-data.


Abbildung 13

Durchflussprofil und berechneter Standardfehler (SE), ermittelt aus dem interpolierten Gerinneprofil und der gemessenen Fließgeschwindigkeit bei einer Messkampagne in der Freiburger Mulde am 15.08.2017 Hintergrundkarte: GeoSN (oben)
 Längsprofil der Durchflüsse entlang der Befahrungsstrecke (distance) mit Konfidenzintervallen der Messwertstreuung als Fehlerbalken und relativem 95 %-Standardfehler als Punktgröße (unten).
Flow rate profile and calculated standard deviation, determined from the interpolated river channel profile and the measured flow velocity during a measuring campaign in the Freiburger Mulde on 15/08/2017, background map (GeoSN) (above)
Longitudinal profile of the discharge along the measured route with confidence intervals of the measured value dispersion as error bar and relative 95% standard error as point size (below).

den die mittlere Geschwindigkeit und damit der Durchfluss unterschätzt, weil die Befahrung nicht in der Strömung erfolgt. Bei inhomogenen Fließgeschwindigkeitsverteilung durch z. B. den Zufluss der Zschopau bei 350 m Distanz steigt auch der Messfehler stark an. In den Bereichen mit kleinräumigen Schwankungen des geschätzten Durchflusses liegt auch der Standardfehler bei einem Faktor von bis zu 50 %. Um eine dichtere Information über die Fließgeschwindigkeitsverteilung zu erhalten, wird bei zukünftigen Messfahrten ein Horizontal-ADCP in Kombination mit einer kurvenreichen Befahrung verwendet. Durch Auswertung der Fließgeschwindigkeitenprofile des ADCP's in die Tiefe und des H-ADCP seitlich zum Messboot kann ein zweidimensionales Fließgeschwindigkeitsfeld bestimmt werden, dass eine genauere Information über die Fließgeschwindigkeitsverteilung im Querschnitt liefert.

4.4 Longitudinale Konzentrationsprofile der chemischen Gewässerqualitätsparameter

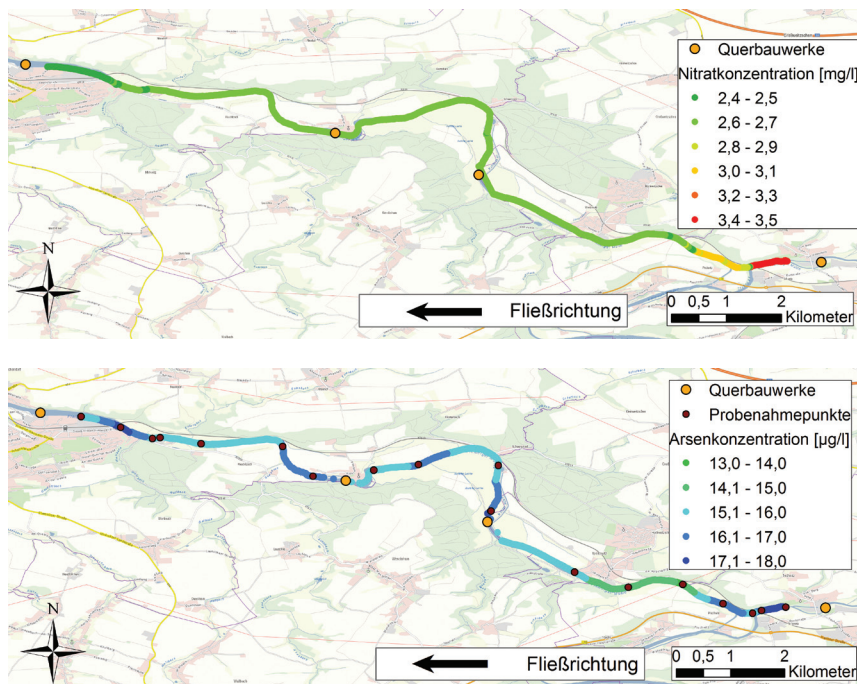
Für dieselbe Messkampagne, auf die sich bereits die Beispiele der Morphologie und Hydrometrie stützen, wurden die Konzentra-

tionsverläufe für Nitrat und Arsen ermittelt. Für Nitrat ergeben sich an der Freiburger Mulde vor dem Zufluss der Zschopau bei der Messfahrt am 15. August 2017 Konzentrationen von 3,5 mg/l, die sich durch den Zufluss der Zschopau auf 2,6 mg/l verringern (Abb. 14, oben). Durch die örtlichen Strömungsturbulenzen am Zusammenfluss kommt es zu Messschwankungen, die mindestens über 1 km anhalten. Im weiteren Messverlauf sinkt die Nitratkonzentration im Bereich einer Strecke von 10 km auf 2,3 mg/l ab. Dafür können sowohl laterale Verdünnung, als auch Abbauprozesse verantwortlich sein. Am Ende der Messstrecke kommt es durch ein Querbauwerk zu einem 1 km langen, rückstaubeinflussten Bereich mit erhöhtem Makrophytenwachstum in dem die Nitratkonzentration weiter auf 2,1 mg/l reduziert wird.

Eine weitere flussspezifische Belastung der Freiburger Mulde stellen Halbmetalle und Schwermetalle dar. Zur Ermittlung dieser Konzentrationen ist eine Analyse der Schöpfproben aus der Wassermatrix im Labor nötig. Vorangegangene Tests mit Ionenselektiven Sonden ergaben unter Feldbedingungen keine Kalibriermöglichkeit des empfangenen Spannungssignals in Konzentrationsbereichen unter 1 mg/l auf die zu messende Wasserqualitätsgröße. Deshalb wurden die zur Validierung der Sonden entnommenen Schöpfproben ebenfalls auf Halb- und Schwermetalle untersucht. Die ermittelten Konzentrationen wurden im Gewässerverlauf linear interpoliert, in Abbildung 14, unten ist der Konzentrationsverlauf für Arsen dargestellt. In Abschnitten mit höherer Fließgeschwindigkeit unterstrom von Querbauwerken sind die höchsten Arsenkonzentrationen gemessen worden. Einen

Erklärungsansatz bietet der Einfluss lokal aufgewirbelter Sedimente, absorbierte Arsenverbindungen gelangen in Suspension und erhöhen die Konzentration in der entnommenen Wasserprobe. In weniger turbulenten Gewässerabschnitten kommt es zu einer erneuten Sedimentation und damit zur Abnahme der Messwerte.

Die Variabilität der Messwertverläufe wird durch die Probenahmen an den Messstellen der Landesämter nicht abgebildet. Die Staatliche Betriebsgesellschaft für Umwelt und Landwirtschaft (BfUL) führte in Absprache mit dem sächsischen Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie für Nitrat alle zwei Wochen und für Arsen einmal im Monat eine Beprobung durch. Die Ergebnisse sind in Tabelle 2 aufgelistet. Die Probenahmestelle in Döbeln befindet sich 2 km flussaufwärts des betrachteten Messabschnitts; der Probenahmepunkt in Leisnig etwa 0,5 km vor Ende des Messabschnitts. Die Zschopau wird 500 m vor der Mündung in die Freiburger Mulde beprobt. Die Abnahme der Nitratkonzentration kann über das Probenahmeprogramm des Landesamtes abgebildet werden. Ebenfalls findet sich die

**Abbildung 14**

Konzentrationsprofil der mit einem online Spektrometer gemessenen Nitratkonzentration (oben) und aus Schöpfprobennahmen linear interpoliertes Konzentrationsprofil für die Arsenkonzentration (unten) in der Freiburger Mulde am 15.08.2017 Hintergrundkarte: GeoSN.
Concentration profile of measured nitrate concentration with an online spectro-lyser (above) and a linear interpolated concentration profile for arsenic concentration from bailed samples (below) in the Freiburger Mulde on 15/8/2017, background map: GeoSN.

Verdünnung durch die Zschopau in den Proben bestätigt. Ein Informationszugewinn durch die Bootsbeifahrung stellt der Nachweis der Durchmischung von Freiburger Mulde und Zschopau über 1 km Fließlänge dar. Zusätzlich ist eine genauere Aussage über Höhe und Verlauf der Nitratkonzentration nach dem Zufluss möglich.

Für Arsen hingegen kann aus dem Probenahmeprogramm der Verlauf der Konzentrationen nicht abgebildet werden. Es kann ein fast konstanter Konzentrationsverlauf angenommen werden, der die Messwerte von stellenweise über 18 µg/l nicht wieder spiegelt.

An der Tollense konnte eine Punktquelle für die Nitratkonzentration nachgewiesen werden. Der Au Graben entwässert direkt aus einem stark landwirtschaftlich geprägten Gebiet am 11. August 2016 mit einer Nitratkonzentration von 0,87 mg/l in die Tollense. Dispersion, diffuse Quellen und Stoffumsätze können hier nicht

direkt aus den Daten abgelesen werden, da auf der Tollense die Fließgeschwindigkeit so gering ist, dass das Boot nicht mit der Fließgeschwindigkeit treiben kann. Eine Einmischung der Punktquelle ist auf einer Länge von 300 m nachweisbar (Abb. 15).

5. Schlussfolgerungen und Ausblick

Der Artikel stellt Mess- und Auswerteverfahren vor, die Gewässereigenschaften flächig und im Längsverlauf kontinuierlich quantifizieren. Für viele der Verfahren ist dabei die Anwendung in kleinen und mittleren Fließgewässern innovativ. Die aufgeführten Beispiele demonstrieren, wie längskontinuierliche Messungen und Analysen an Fließgewässern die Aussagekraft bestehender Monitoringprogramme erhöhen und verdichten können. Beim Monitoring zu Ermittlungszwecken erlauben die Verfahren die Lokalisierung von Quellen und Schwerpunkten der Gewässerbelastung und tragen so zur besseren Interpretation etablierter Datenbestände bei.

Gerade die starke räumliche Variabilität einiger morphologischer Größen kann mit dem integrierten Erhebungskonzept genauer quantifiziert werden. Für die hydromorphologischen Einzelparameter Laufkrümmung, Breitenvarianz, Tiefenvarianz und Sohlsubstrat

wurden beispielhaft Ansätze für eine metrische, quasikontinuierliche Auswertemethodik demonstriert. Elektroakustische Kartierverfahren der Sohlsubstrate bieten gegenüber stationärem Monitoring mit punktuellen Sedimentprobenahmen den Vorteil einer flächendeckenden Erfassung der vorherrschenden Sedimente. Kleinräumige Variabilität und Mosaikstrukturen der Gewässerstruktur, werden gut detektiert und differenzierter erfasst, als z. B. im Rahmen von Vor-Ort-Gewässerstrukturkartierungen. Zusammen mit der gleichfalls flächendeckenden Aufnahme von Sohlprofilen können elektroakustische Verfahren gerade in tiefen und trüben Gewässern wertvolle Informationen zur Sohlstruktur liefern (vgl. entsprechende Haupt- und Einzelparameter der gängigen Strukturgüteverfahren (z. B. LAWA, 1999; THIELE et al., 2011)). Die bisher verwendeten Verfahren zur Erfassung der Fließgeschwindigkeit schränken die Zuverlässigkeit der Durchflussbestimmung bei Längsbefahrung ein. Insbesondere bei heterogenen Querprofilen und lateralen Strömungen kommt es zu systematischen Ungenauigkeiten des Durchflusswertes.

Neben den beschriebenen Änderungen in der Befahrungsstrategie und zusätzlicher Verwendung horizontaler Geschwindigkeitsmessung, hat die flächenhafte Erfassung der Oberflächengeschwindigkeit mit einem Kamerasystem das Potential die Interpolationsergebnisse zu verbessern.

Die begrenzte Aussagekraft von Stichproben mit großen zeitlichen und räumlichen Intervallen wurde am Beispiel der Nitrat- und Arsenkonzentration an der Freiburger Mulde

Tabelle 2

Messergebnisse aus dem Probenahmeprogramm für die Parameter Nitrat und Arsen für die Zeitpunkte um den 15.08.2017.

Measurement results from the sampling program for the parameters nitrate and arsenic around 15/8/2017.

Ort	Döbeln		Pischwitz	Leisnig	
Fließgewässer	Freiburger Mulde		Zschopau	Freiburger Mulde	
Datum	09.08.2017	21.08.2017	01.08.2017	01.08.2017	14.08.2017
Nitrat	3,1 mg/l	3,1 mg/l	1,8 mg/l	2,2 mg/l	2,3 mg/l
Arsen	-	16 µg/l	12 µg/l	15 µg/l	-

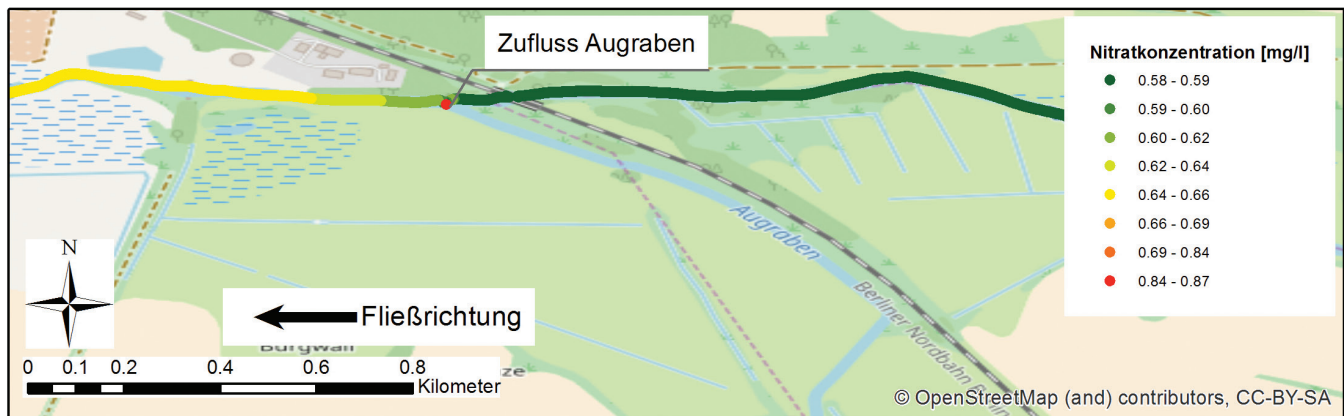


Abbildung 15

Konzentrationsprofil der gemessenen Nitratkonzentration mit einem online Spektrometer in der Tollense am 11.08.2016, Hintergrundkarte: OpenStreetMap.

Concentration profile of measured nitrate concentration with an online spectro-lyser in the Tollense river on 11/8/2016, background map: OpenStreetMap.

demonstriert. Lokale Durchmischungsprozesse, Stoffeinträge oder Stoffakkumulation vor Querbauwerken werden mit stationären Messstellen nur unvollständig beschrieben. Stationarität bedeutet in dieser Hinsicht Integration und Aggregation über Raum und Zeit. Die längskontinuierlichen Konzentrationsdaten bilden daher eine erweiterte Informationsgrundlage für die Optimierung der Monitoringnetze und für die Identifikation von Gewässerabschnitten mit vordringlichem Handlungsbedarf. Außerdem erscheint es sinnvoll, auch eine Beprobung nach relevanten Zuflüssen durchzuführen sowie die Beprobung für partikelgebundene Stoffe um Stellen mit erhöhter Fließgeschwindigkeit und Sedimentmobilität zu erweitern. Um insbesondere die Akkumulations- und Resuspensionsdynamik besser zu erfassen, werden in Zukunft Befahrungen bei unterschiedlichen Abflussbedingungen ausgewertet.

Die aufgenommenen Daten werden derzeit zum Aufbau eines hydrodynamischen Wasserqualitätsmodells genutzt. Der Mehrwert der längskontinuierlichen Daten kann für eine bessere Kalibrierung der Abbauraten im Verlauf des Gewässers genutzt werden. Mit dem so aufgesetzten Modell sollen Auswirkungen von Bewirtschaftungsmaßnahmen und der Einfluss von gewässerstrukturellen Randbedingungen auf die Stoffumsatzprozesse bewertet werden.

Conclusions and outlook

This article presents measurement and evaluation procedures, which quantify water body properties in a spatially continuum. For many of them, the application in small to medium rivers is unprecedented. The examples demonstrate how longitudinally continuous measurements and river analyses can improve and condense the significance of existing monitoring programmes. Furthermore, such methods may serve for investigative monitoring purposes and enhance the understanding of riverine conditions and processes in space.

In particular, spatial variability of some morphologic parameters is quantified more specifically with the integrated acquisition approach. Exemplarily, continuous metric evaluation methods are presented for the hydromorphological parameters river sinu-

osity, depth variation, width variation and riverbed substrate. Electroacoustic mapping of riverbed substrate is preferable over conventional sediment monitoring sites, as it captures prevalent sediment type continuously in space. Small-scale variabilities and mosaic patterns of river structure are detected and catalogued in a more differentiated manner with electroacoustic methods than within the frameworks of an on-site river mapping. Together with the equally extensive recording of the riverbed profile, electroacoustic methods can yield valuable information with regard to the riverbed structure, especially in deep and murky waters (cf. suitable main and individual parameters of common structural quality methods (e.g. LAWA, 1999, THIELE et al., 2011)).

The limited value of grab samples with low spatial and temporal density was demonstrated with the examples of nitrate and arsenic concentration at the Freiburger Mulde river. Local mixing processes, substance input, or accumulation at lateral structures are not fully recorded by regular sampling sites. In this respect, stationarity of the sites causes integration and aggregation in time and space. Longitudinally continuous concentration data therefore contribute to the optimisation of monitoring networks and the identification of river sections with urgent rehabilitation need. Furthermore, it seems advisable to extend sampling at relevant tributaries. For particle bound contamination, sampling should be extended to sites with increased flow velocity. In order to improve the recording of accumulation and resuspension dynamics, measurement campaigns with varying flow conditions will be systematically evaluated.

The recorded data are currently used for the implementation of a numerical model of hydrodynamics and water quality. The added value of longitudinally continuous data can be used for an improved calibration of transformation and decay rates in the course of the river. The model will be used to evaluate river rehabilitation and management measures and to assess the impact of morphological boundary conditions on matter dynamics.

Danksagung

Wir danken dem Bundesministerium für Bildung und Forschung BMBF für die Förderung des Forschungsvorhabens BOOT-Monitoring (FKZ 033W039A).

Anschriften der Verfasser

Dipl.-Hydrol. Stefanie Wiek
Technische Universität Dresden
Bergstraße 66, 01069 Dresden
Stefanie.Wiek@tu-dresden.de

Dipl.-Ing., Dipl. Hydrol. Björn Helm
Technische Universität Dresden
Bergstraße 66, 01069 Dresden
Björn.Helm@tu-dresden.de

Dr.-Ing. Pierre Karrasch
Technische Universität Dresden
Helmholtzstraße 10, 01069 Dresden
Pierre.Karrasch@tu-dresden.de

Dipl.-Geogr. Sebastian Hunger
Technische Universität Dresden
Helmholtzstraße 10, 01069 Dresden
Sebastian.Hunger@tu-dresden.de

Dr. rer. nat. Tim Hoffmann
Institut biota GmbH
Nebelring 15, 18246 Bützow,
Tim.Hoffmann@institut-biota.de

M.Sc. Simon Schönrock
Institut biota GmbH
Nebelring 15, 18246 Bützow
Simon.Schoenrock@institut-biota.de

M. Sc. Wolfgang Klehr
Universität Rostock
Satower Str 48, 18059 Rostock
Wolfgang.Klehr@uni-rostock.de

Dipl.-Hydrol. Achim Six
Sächsisches Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie
Zur Wetterwarte 11, 01109 Dresden
Achim.Six@smul.sachsen.de

Dipl.-Hydrol. Ines Stäglich
Staatliches Amt für Landwirtschaft und Umwelt
Mecklenburgische Seenplatte
Neustrelitzer Straße 120, 17033 Neubrandenburg
Ines.Staeglich@stalums.mv-regierung.de

Dipl.-Hydrol. Karin Kuhn
Sächsisches Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie
Zur Wetterwarte 11, 01109 Dresden
Karin.Kuhn@smul.sachsen.de

Dr. rer. nat. Dr. agr. Dietmar Mehl
Institut biota GmbH
Nebelring 15, 18246 Bützow
Dietmar.Mehl@institut-biota.de

Prof. Dr. Jens Tränckner
Universität Rostock
Satower Str 48, 18059 Rostock
Jens.Traenckner@uni-rostock.de

Prof. Dr. Lars Bernard
Technische Universität Dresden
Helmholtzstraße 10, 01069 Dresden
Lars.Bernard@tu-dresden.de

Prof. Dr. Peter Krebs
Technische Universität Dresden
Bergstraße 66, 01069 Dresden
Peter.Krebs@tu-dresden.de

Literaturverzeichnis

- ALLAN, I. J., VRANA, B., GREENWOOD, R., MILLS, G. A., ROIG, B., & GONZALEZ, C. (2006): A "toolbox" for biological and chemical monitoring requirements for the European Union's Water Framework Directive. *Talanta*, 69(2), 302-322
- BACKHAUS, K., ERICHSON, B., PLINKE, W. & R. WEIBER (2011): Multivariate Analysemethoden. Eine anwendungsorientierte Einführung. – 13. Aufl., Springer, Heidelberg, 583 S.
- BORCHARDT, D.; RICHTER, S.; WILLECKE, J. (2006): Vorgehen und Methoden bei der Bestandsaufnahme nach Artikel 5 der Wasserrahmenrichtlinie in Deutschland, UBA Texte 30/2006, Umweltbundesamt
- BSH (Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie) (2016): Anleitung zur Kartierung des Meeresbodens mittels hochauflösender Sonare in den deutschen Meeresgebieten. – BSH Nr. 7201, 30 S. (+ Anhang)
- BUSCOMBE, D., GRAMS, P. E. & M. A. KAPLINSKI (2014a): Characterizing riverbed sediment using high-frequency acoustics: 1. Spectral properties of scattering. – *Journal of Geophysical Research: Earth Surface* 119, 2674-2691
- BUSCOMBE, D., GRAMS, P. E. & M. A. KAPLINSKI (2014b): Characterizing riverbed sediment using high-frequency acoustics: 2. Scattering signatures of Colorado River bed sediment in Marble and Grand Canyons. – *Journal of Geophysical Research: Earth Surface* 119, 2692-2710
- CARADOT, N., SONNEBERG, H., RIECHEL, M., MATZINGER, A., ROUNAULT, P. (2013): the Influence of local calibration on the quality of UV-VIS spectrometer measurements in urban stormwater monitoring, *Water Practice and Technology* 8, (3-4)
- DÍAZ-DELGADO, R., AMEZTOY, I., CRISTÓBAL, J. & BUSTAMANTE (2010): J. Long time series of Landsat images to reconstruct River surface temperature and turbidity regimes of Guadalquivir Estuary. *IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium*, 25-30 July 2010 2010. 233-236
- DODDS, W. K., HIGGS, S. A., SPANGLER, M. J., GUINNIP, J., SCOTT, J. D., HEDDEN, S. C., & EVANS_WHITE, M. A. (2018): Spatial heterogeneity and controls of ecosystem metabolism in a Great Plains river network. *Hydrobiologia*, 1-18
- DUNBAR, M. J., PEDERSEN, M. L., CADMAN, D. A. N., EXTENCE, C., WADDINGHAM, J., CHADD, R., & LARSEN, S. E. (2010): River discharge and local-scale physical habitat influence macroinvertebrate LIFE scores. *Freshwater Biology*, 55(1), 226-242
- EUROPEAN COMMISSION (2003): Monitoring under the Water Framework Directive. Common Implementation Strategy, Guidance Document No 7 on monitoring, Luxembourg: Office for Official Publications of the European Communities. ISBN 92-894-5127-0, ISSN 1725-1087
- FORGET, P. & OUIILLON, S. (1998): Surface suspended matter off the Rhone river mouth from visible satellite imagery. *Oceanologica Acta*, 21, 739 - 749
- GILVEAR, D. J., DAVIDS, C. & TYLER, A. N. (2004): The use of remotely sensed data to detect channel hydromorphology; River Tummel, Scotland. *River Research and Applications*, 20, 795-811

- HELM, B., WIEK, S., KREBS, P., ENGELS, R., STECKING, M., BOLLE, F. (2017): Die Gewässer Lückenlos erfassen – Konzepte und Ansätze für eine durchgängige Aufnahme und Auswertung von Gewässereigenschaften, KW- Korrespondenz Wasserwirtschaft Nr. 4, S. 203-208
- HILGERT, S. & S. FUCHS (2016): Hydro-akustische Sedimentmächtigkeitsdetektion und Charakterisierung in einem Stausee. - Korrespondenz Wasserwirtschaft 9(4), S. 226-232
- HUNGER, S., KARRASCH, P. & WESSOLLEK, C. (2016): Evaluating the potential of image fusion of multispectral and radar remote sensing data for the assessment of water body structure. SPIE Remote Sensing, SPIE, 9998 - 9998-11
- HYDROLOGIC ENGINEERING CENTER (HEC). (2010): HEC-RAS: River analysis system hydraulic reference manual. Davis, California: Hydrologic Engineering Center, US Corps of Engineers
- KARRASCH, P., HENZEN, D., HUNGER, S. & HÖROLD, M. (2015): Determination of water body structures for small rivers using remote sensing data. SPIE Remote Sensing, SPIE, 96370W-96370W-13
- KARRASCH, P. & HUNGER, S. (2016): Determination of bank structures and river width variations using remote sensing data. SPIE Remote Sensing, SPIE, 9998 - 9998-18
- KARRASCH, P. & HUNGER, S. (2017): Simulation of vegetation and relief induced shadows on rivers with remote sensing data. SPIE Remote Sensing, SPIE, 10428 - 10428-13
- KRÜGER, R.; KARRASCH, P.; BERNARD, L. (2018): Evaluating spatial data acquisition and interpolation strategies for river bathymetries. IN: Geospatial Technologies for all, Lecture Notes in Geoinformation and Cartography. Springer International Publishing
- KUNZ, J. V., HENSLEY, R., BRASE, L., BORCHARDT, D., & RODE, M. (2017): High frequency measurements of reach scale nitrogen uptake in a fourth order river with contrasting hydromorphology and variable water chemistry (Weiße Elster, Germany). Water Resources Research, 53(1), 328-343
- LAWA (1999): Gewässerstrukturgütekartierung in der Bundesrepublik Deutschland, Verfahren für kleine und mittelgroße Fließgewässer. – Empfehlung, erstellt im Auftrag der Bund-/Länderarbeitsgemeinschaft Wasser
- MEI, K., ZHU, Y., LIAO, L., DAHLGREN, R., SHANG, X., & ZHANG, M., (2011): Optimizing water quality monitoring networks using continuous longitudinal monitoring data: a case study of Wen-Rui Tang River, Wenzhou, China. Journal of Environmental Monitoring 13(10), 2755-2762
- NARDI, L. & RINALDI, M. (2015): Spatio-temporal patterns of channel changes in response to a major flood event: the case of the Magra River (central–northern Italy). Earth Surface Processes and Landforms, 40, 326-339
- ODERMATT, D., HEEGE, T., NIEKE, J., KNEUBÜHLER, M. & ITTEN, K. (2008): Water Quality Monitoring for Lake Constance with a Physically Based Algorithm for MERIS Data. Sensors, 8, 4582-4599
- OGewV: Verordnung zum Schutz der Oberflächengewässer (Oberflächengewässerverordnung – OGewV) vom Juni 2016 (BGBl. I S. 1373)
- PARSONS, H. & GILVEAR, D. (2002): Valley floor landscape change following almost 100 years of flood embankment abandonment on a wandering gravel-bed river. River Research and Applications, 18, 461-479
- PASSAUER, B., MEILINGER, P., MELZER, A., & SCHNEIDER, S. (2002): Beeinflusst die Strukturgüte von Fließgewässern das Vorkommen von Makrophyten?. Acta hydrochim. hydrobiol. 30(4), 197 – 206
- PEIXOTO, J. M. A., NELSON, B. W. & WITTMANN, F. (2009): Spatial and temporal dynamics of river channel migration and vegetation in central Amazonian white-water floodplains by remote-sensing techniques. Remote Sensing of Environment, 113, 2258-2266
- Richtlinie 2013/39/EU des Europäischen Parlaments und des Rates vom 12. August 2013 zur Änderung der Richtlinien 2000/60/EG und 2008/105/EG in Bezug auf prioritäre Stoffe im Bereich der Wasserpolitik, Amtsblatt der Europäischen Union L 226/1 vom 24.8.2013
- SHEPARD, D. (1968): A Two-dimensional Interpolation Function for Irregularly-spaced Data, Proceedings of the 1968 23rd ACM National Conference, 517-524
- SMITH, J.D., MCLEAN, S.R. (1984): A model for flow in meandering streams, Water Resources Research, 20(9), 1301-1315
- TARRANT, P. E., AMACHER, J. A. & NEUER, S. (2010): Assessing the potential of Medium-Resolution Imaging Spectrometer (MERIS) and Moderate-Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) data for monitoring total suspended matter in small and intermediate sized lakes and reservoirs. Water Resources Research, 46
- THE EUROPEAN STANDARD EN ISO 748 (2007): Hydrometry-Measurement of liquid flow in open channels using current-meters or floats, British Standards, 58 S.
- THIELE, V., DEGEN, B., KASPER, D., HOLL, S., ENGLICH, T. & I. WEINZIERL (2011): Fließgewässerstrukturgütekartierung in Mecklenburg-Vorpommern. Handbuch zur Erfassung der Fließgewässerstrukturen und der Querbauwerke. – Materialien zur Umwelt 2/2011, Landesamt für Umwelt, Naturschutz und Geologie Mecklenburg-Vorpommern [Hrsg.], 109 S.
- Umweltbundesamt (Hrsg.) (2016): Die Wasserrahmenrichtlinie – Deutschlands Gewässer 2015. Dessau
- VAUGHAN, I. P., DIAMOND, M., GURNELL, A. M., HALL, K. A., JENKINS, A., MILNER, N. J., & ORMEROD, S. J. (2009): Integrating ecology with hydromorphology: a priority for river science and management. Aquatic Conservation: Marine and Freshwater Ecosystems, 19(1), 113-125