Simon Schönrock, Tim G. Hoffmann, Alexander Kost, Dietmar Mehl & Konrad Miegel

Entwicklung einer echolotgestützten Methodik zur Kartierung der Sohlenstruktur von Oberflächengewässern des Tieflandes: Stand und Ausblick

Conception of an echo sounder-based approach for mapping bottom structures of lowland surface waterbodies: status and outlook

Die Beschaffenheit der Gewässersohlen ist ökologisch von sehr hohem Belang und als Bewertungsparameter u. a. Teil der Gewässerstrukturbewertung. Gerade im Hinblick auf die Umsetzung der gesetzlichen Aufgaben des Gewässerschutzes ist die Qualität der Gewässersohle ein maßgebliches Kriterium bei der Renaturierung (Gewässerausbau) und der Gewässerunterhaltung. Das vorgegebene gewässertypbezogene Vorgehen sichert bei sachgerechter Anwendung ab, dass eingeleitete Zustandsverbesserungen zu naturraumgemäßer ökologischer Funktionsfähigkeit beitragen.
Im ReWaM-Verbundforschungsvorhaben "BOOT-Monitoring", das durch das Bundesministerium für Bildung und Forschung gefördert worden ist, wurde deshalb, neben anderen Fragestellungen, zur Kartierung der Sohlenstruktur von Binnenoberflächengewässern des Tieflandes eine Methodik auf Basis hydroakustischer Messdaten (Echolotmessdaten) erarbeitet. Der bereits fortgeschrittene Stand wird im vorliegenden Beitrag anhand von Daten aus drei Gewässern in Mecklenburg-Vorpommern vorgestellt. Nach einem Einleitungsteil zielt der Beitrag insbesondere auf Aspekte der Datenerhebung und Datenauswertung. Dabei bildet die Kombination von statistischen Analysen der Echolotsignalwerte und die Validierung auf Basis empirischer Daten (Ground-Truth-Daten) den Kern des Ansatzes. Abschließend wird der Bedarf einer methodischen Weiterentwicklung und damit verbundenen weiterführenden Untersuchungen beschrieben. Hierbei stehen insbesondere die Erprobung der Methodik in weiteren Gewässern und damit Gewässertypen sowie die parallele Erhebung von Validierungsdaten im Blickpunkt.
Die praktischen Anwendungsmöglichkeiten der Methodik sind vielfältig: Sie reichen von den verbesserten Möglichkeiten der hydromorphologischen Kennzeichnung der Sohleigenschaften, insbesondere im Hinblick auf die Bewertung der biologischen Qualitätskomponenten und als wesentlicher Habitatindikator, bis zu verbesserten substratspezifischen Möglichkeiten der Interpretation punktueller Sedimentqualitätsaufnahmen (Nähr-/Schadstoffe). So kann mit Hilfe der Methodik beispielsweise die Auswahl von repräsentativen Probestellen erreicht werden. Die Kartierergebnisse können auch als unterstützende Information für die Gewässerunterhaltung dienen, z. B. bei gestörtem Sedimenthaushalt. Für bilanzierende Fragestellungen können die Echolotmessdaten zusätzlich mit ihrer Tiefeninformation herangezogen werden ("Sohlvermessung"). Befahrungen gleicher Gewässerstrecken/-areale zu verschiedenen Zeitpunkten lassen es ferner zu, auf die Dynamik der Sohlentwicklung und des Sedimenthaushaltes zu schließen.

Schlagwörter: Gewässersohlkartierung, Echolot, Sohlensubstrat, Sohlstrukturen, Clusteranalyse, Wasserrahmenrichtlinie (WRRL)

The structure and properties of the bottom of waterbodies are of high ecological importance and are used as assessment parameters to evaluate the hydromorphological state of inland surface waters. Especially with regard to the implementation of the legal duties of water protection, the state of the bottom of the waterbodies to be protected provides an essential aspect in the context of restoration as well as regulation and maintenance of surface waters. Predefined water type-specific approaches ensure, if applied appropriately, that initiated measures of improving the state of these waterbodies contribute to ecological viability in compliance with the requirements of respective natural environments.
For this reason, a method for mapping bottom substrates and structures of lowland surface waters based on hydroacoustic measurements (echo sounder measurements) was developed within the ReWaM joint research project "BOOT-Monitoring", sponsored by the Federal Ministry of Education and Research (BMBF). This paper seeks to present the advanced status of the mapping approach already achieved using the example of three surface waterbodies in the federal state of Mecklenburg-Western Pomerania (northeast Germany). After a short introduction, the aspects of data collection, analysis and interpretation are addressed. The introduced mapping approach combines an analysis of echo sounder signal values with statistical methods and validation procedures using respective ground truth data. Finally, needs for an ongoing development of the mapping approach and for further research are described. This concerns especially further testing of the mapping approach in other waterbodies as well as the collection of validation data.
The introduced mapping approach offers various possible applications ranging from improved hydromorphological characterisation of the bottom of various surface waterbodies, especially with regard to assessing biological quality elements and concerning its' role as a major habitat indicator, through to spatially balancing local sediment quality assessments (nutrients/pollutants) in order to detect representative sample sites. The mapping results may also serve as supplemental information for the maintenance and conservation of waterbodies (e.g. in case of an impaired sedimentation) and may additionally be used for measuring the bathymetry of surface waterbodies. Surveying segments of waterbodies at different times would enable researchers to analyse dynamic processes of the bottom of waters and sediments.

Keywords: water bed mapping, echo sounder, bottom substrates, bottom structures, cluster analysis, Water Framework Directive (WFD)

1. Einleitung

Informationen über die Beschaffenheit der Gewässersohle von Binnenoberflächengewässern hinsichtlich anorganischer und organischer Substratarten sowie hydraulisch und gewässerökologisch relevanter Strukturen, wie das Vorkommen von Makrophyten oder Totholz, sind von hohem praktischen Wert. Eine besonders große Rolle spielt dies bei der durch die Europäische Wasserrahmenrichtlinie (EG-WRRL) geforderten Vermeidung einer weiteren Verschlechterung bzw. überwiegend notwendigen Verbesserung des Gewässerzustandes und dem damit verbundenen Renaturierungsbedarf. Auch können über die Erhebung entsprechender Daten fundierte Grundlagen für die Planung und Umsetzung von Maßnahmen der Gewässerunterhaltung im Sinne von "Pflege" und "Entwicklung" (§ 39 Wasserhaushaltsgesetz − WHG) geschaffen werden .

Eng mit der EG-WRRL verknüpft sind die Ziele der Fauna-Flora-Habitat-Richtlinie (FFH-Richtlinie), wonach sich die an der Umsetzung beteiligenden Staaten dazu verpflichten, zum Erhalt wildlebender Tier- und Pflanzenarten sowie ihrer natürlichen Lebensräume beizutragen und dabei über nationale Grenzen hinweg ein Netzwerk von Schutzgebieten aufzubauen (Natura-2000-Gebiete). Da die Umsetzung beider europäischer Richtlinien eine gemeinsame Behandlung von Gewässernutzung und Gewässerschutz erfordert, ist die Bündelung von Lösungsansätzen zur Schaffung von Synergieeffekten gefragt (LfULG, 2014). Dies gilt nicht nur für die Entwicklung, die Planung und die Umsetzung von Maßnahmen, sondern auch für die Schaffung relevanter Datengrundlagen und damit die Vorbereitung und Durchführung. Hier ist, auch im Interesse eines günstigen Kosten-Nutzen-Verhältnisses, ein möglichst breites Spektrum an Verwendungsmöglichkeiten anzustreben.

Insofern wächst der Bedarf an räumlich und zeitlich hochaufgelösten Fachinformationen. Für viele Fragestellungen sind vor allem flächendeckende bzw. "räumlich kontinuierliche" Daten von hohem Belang (ORR et al., 2008; WÖFFLER et al., 2016; HELM et al., 2017). Diesem Aspekt widmete sich das durch das Bundesministerium für Bildung und Forschung geförderte ReWaM-Verbundforschungsvorhaben "BOOT-Monitoring", in welchem auch die nachfolgend dargestellten Methoden und Ergebnisse erarbeitet wurden (WIEK et al., 2019). Die im vorliegenden Artikel vorgestellte Methodik erlaubt dabei die Erfassung längskontinuierlicher Gewässerinformationen. Darunter wird die Durchführung diskreter Messungen im Längsprofil eines Gewässers bzw. bei Seen oder Küstengewässern entlang von Transekten in regelmäßigem räumlichen Abstand (z. B. 2 Meter) und regelmäßigem zeitlichen Intervall über eine längere Distanz (z. B. mehrere Kilometer) verstanden. Die flächenhafte Datenerfassung ist aufgrund der eingesetzten Technik (Singlebeam-Echolot) nicht möglich (Kapitel 3.1), jedoch ließen sich aus den längskontinuierlichen Informationen im Zuge weiterführender Analysen (z. B. statistische Modellierung) flächenhafte Informationen gewinnen.

Entsprechend der Bewertungsvorgaben für den ökologischen Zustand/das ökologische Potenzial gemäß Anhang V der EG-WRRL handelt es sich bei dem Betrachtungsobjekt "Gewässergrund" bzw. "Menge, Struktur und Substrat des Bodens" (Begriffe nach Oberflächengewässerverordnung − OGewV) um einen Parameter der hydromorphologischen Qualitätskomponenten für Flüsse und Seen sowie auch für Übergangs- und Küstengewässer. Die hydromorphologischen Qualitätskomponenten sind unterstützende Komponenten für die biologische Zustandsbewertung auf Basis der Gewässerflora und -fauna. Bei den Flüssen und Seen sind entsprechende biologische Qualitätskomponenten das Phytoplankton, die Makrophyten/das Phytobenthos, die benthische wirbellose Fauna sowie die Fischfauna. In vielen Gewässern bildet der Gewässergrund den Hauptraum der Besiedlung durch aquatische Invertebraten und Makrophyten. Er stellt einen vielschichtigen Lebensraum für eine Vielzahl von weiteren Artengruppen dar (sehr hohe naturschutzfachliche und auch fischereibiologische Bedeutung).

Der Gewässergrund setzt sich aus Gewässersohle und Untergrund zusammen und kann, je nach geologischen Verhältnissen, Stoffeintrag aus dem Einzugsgebiet, trophischer Prägung sowie Transportkraft des Wassers (in Fließgewässern insbesondere abhängig von Sohlgefälle und Durchfluss), sehr verschieden beschaffen sein und dahingehend typisiert werden (MEHL et al., 2002; DÖBBELT-GRÜNE et al., 2014).

Die Gewässersohle wiederum kann als "Weichboden" oder als "Hartboden" (UHLMANN, 1988) ausgebildet sein und anhand spezifischer Eigenschaften (z. B. Korngröße, Anteil organischen Materials) weiter differenziert werden (DIN EN ISO 14688). Die natürlichen Fließgewässer des Tieflandes sind nur ausnahmsweise, d. h. bei lokalen Gefällebrüchen bzw. Erosionsbasen (z. B. Durchbruchstäler) durch feste, nicht-alluviale Gewässersohlen gekennzeichnet. Hier können z. B. abschnittsweise Ton-/Lehmsohlen oder residuale Anreicherungen von Blöcken und Steinen vorkommen (MEHL & THIELE, 1998). Der Normalfall sind daher alluviale, durch m. o. w. transportierbare Sedimente geprägte Gewässersohlen. Fluviale Sedimente sind zum einen Feststoffe, die vom Wasser transportiert werden. Andererseits umfasst das auch die Feststoffe, die sich bereits an der Gewässersohle abgelagert haben und temporär oder dauerhaft ortsfest bleiben (DWA-M 525). Die ortskonkreten hydrodynamischen Bedingungen (Fließgeschwindigkeit, Sohlschubspannung) entscheiden, ob Sedimente transportiert oder abgelagert werden.

Der häufig vorhandene Lückenraum unterhalb der Gewässersohle, der sich teilweise auch noch über das Ufer hinaus fortsetzen kann, wird als hyporheisches Interstitial oder Hyporheal bezeichnet (SCHWOERBEL,1964). In vielen Fließgewässern leben nur etwa 20 % der benthischen Invertebraten an der Oberfläche der Gewässersohle, während man die höchsten Dichten in 10 bis 40 cm Tiefe findet (SCHÖNBORN, 1992). Die Bevorzugung des Interstitials durch die einzelnen Arten und Artengruppen ist wesentlich verknüpft mit bestimmten Entwicklungs- und physiologischen Stadien. Viele Tiere nutzen das hyporheische Lückensystem als temporären Ausweichraum bei Störungen wie z. B. zu hohem Strömungsdruck auf der Gewässersohle oder kritischer chemisch-physikalischer Wasserbeschaffenheit. In einigen Gewässern ist im Sinne eines Ökotoncharakters eine deutliche Überlappung von Interstitial- und Grundwasserlebensgemeinschaft vorhanden (PENNAK & WARD, 1986).

Die Gewässersohle wird beim Gewässermonitoring bislang überwiegend im Rahmen der Fließgewässerstrukturkartierung visuell erfasst und auf Basis von Empfehlungen der Bund/Länder-

Tabelle 1
Relevante Sohlsubstrate der Fließgewässerstrukturkartierung in Mecklenburg-Vorpommern, aus: THIELE et al. (2011).
Bottom substrates with relevance for the hydromorphological structural mapping in Mecklenburg-Western Pomerania, by: THIELE et al. (2011).

Art	Definition (LAWA, 1999)
Lehm/Ton	Lehm oder Ton weist eine relativ feste Konsistenz auf. Der Fluchtstab dringt unter stärkerem Druck in das Material ein.
Sand	Die Konsistenz ist locker. Der Fluchtstab dringt mühelos, ohne Widerstand ein.
Kies	Kies bis zu einer Korngröße von ø ca. 2 – 10 cm. Die Konsistenz ist locker. Der Fluchtstab dringt unter Druck und Hin- und Herbewegung ein.
Steine	Steine mit einer Korngröße von ø ca. 5 – 30 cm. Das Material ist locker gefügt. Der Fluchtstab dringt bei größerem Druck und heftiger Hin- und Herbewegung begrenzt ein.
Blöcke	Blockwerk mit ø mehr als 30 cm natürlicher Herkunft. Die Blöcke sind dicht gefügt und fest ineinander verkeilt. Der Fluchtstab stößt fast immer auf hartes, nicht ausweichendes Gestein. Die sehr holperige Sohlenoberfläche und das grobe Fugensystem sind deutlich zu ertasten.
Schlamm	Feine Ablagerungen am Boden von Gewässern, die das ursprüngliche Sohlensubstrat überlagern. Fluchtstab dringt mühelos ein.
Torf	Organisches Material mit meist weicher Konsistenz. Der Fluchtstab dringt ohne größeren Druck mühelos ein. Es können aber auch verfestigte Torfe auftreten, in die der Fluchtstab nur unter Druck eindringt.
Totholz	Sammelbegriff für abgestorbene Bäume oder deren Teile.
Wurzeln	Wurzelflächen angrenzender Ufergehölze unter Mittelwasserlinie, die in der Regel mit der Uferböschung verwachsen sind.
künstliche Substrate	Künstliches Sohlendeckwerk aus Beton, Betonplatten, Halbschalen bzw. Steinsatz oder aus den Blöcken einer Steinschüttung. Der Sohlverbau ist nur teilweise oder gar nicht von Sediment überdeckt.
nicht einschätzbar	Aufgrund von starker Gewässertrübung und hoher Gewässertiefe ist keine Schätzung möglich.

Arbeitsgemeinschaft Wasser (LAWA, 1999) nach landespezifisch angepassten Kartieranleitungen bewertet (LUA NRW, 2001; THIELE et al., 2011; Tab. 1). Aber auch die Sedimentqualität in ihrer Bedeutung als Senke oder Quelle von Nähr- und Schadstoffen steht im Fokus spezifischer Untersuchungen (DEUTSCH et al., 2019).

Eine relativ neue Möglichkeit, hochaufgelöste längs-kontinuierliche Informationen über das Sohlensubstrat zu erfassen, bieten hydroakustische Messverfahren (im Folgenden auch Echolotmessverfahren). Ursprünglich entwickelt, um über die Laufzeit zwischen dem Aussenden eines Schallimpulses und der Reflexion des Impulses (Echo) die Gewässertiefe zu bestimmen, können aus einem Echolotsignal auch Informationen hinsichtlich der Beschaffenheit der Gewässersohle gewonnen werden. Als Echolotsignal wird hier die Menge von Messwerten (Signalwerte) verstanden, die durch das Echolotsystem vom Aussenden des Schallimpulses bis zum Empfang des Echos erfasst werden. Ein Echolotsignal setzt sich demnach aus vielen einzelnen Signalwerten zusammen. Je nach Sohlsubstraten und Sohlstrukturen und der damit verbundenen Dichte des jeweiligen Sohlmaterials bzw. des Materials von Sohlauflagen werden die Schallwellen des Schallimpulses des Echolots aufgrund der Dichteänderung beim Auftreffen unterschiedlich reflektiert bzw. vom jeweiligen Material absorbiert. Aus der Dichte eines Mediums und aus der Geschwindigkeit, mit der sich Schall in dem jeweiligen Medium ausbreitet (Schallausbreitungsgeschwindigkeit), kann die sogenannte Schallkenn-impedanz (auch akustischer Wellenwiderstand) ermittelt werden. Je dichter ein Medium, desto größer ist – in Abhängigkeit von der Schallgeschwindigkeit – die Schallimpedanz eines Mediums und desto schwieriger ist es für die Schallwellen, das Medium zu "durchdringen". Dementsprechend ergibt sich beim Auftreffen der Schallwellen auf ein sehr dichtes Medium ein starkes Echo. Allerdings können die Schallwellen aufgrund verschiedener Störungen (z. B. Objekte im Wasser, Gasbläschen) schon vor Auftreffen auf die Gewässersohle reflektiert werden oder aufgrund von Unebenheiten (raue Oberfläche) oder einer exponierten Lage (Hangneigung) gestreut oder abgelenkt werden. Darüber hinaus wird die Ausprägung eines Echos auch durch die Frequenz und die Geberstärke des Echolotsensors (Leistung in Watt) beeinflusst. Höhere Frequenzen erfassen aufgrund der kürzeren Wellenlänge mehr Details. Allerdings sind sie auch anfälliger gegenüber Störungen in der Wassersäule, die den Schallimpuls vor seinem Auftreffen auf die Gewässersohle reflektieren oder streuen. Niedrige Frequenzen ermöglichen hingegen eine feinere Differenzierung bei der Erfassung von Material mit geringerer Dichte. Die hier in stark vereinfachter Form dargelegten Prinzipien der (Hydro)Akustik in Verbindung mit ihrer Anwendung bei der Gewässersohlkartierung werden eingehend in der Fachliteratur behandelt (ETTER, 1996; LERCH et al., 2009; HODGES, 2010), auf die sich die obigen Ausführungen stützen.

Bei Untersuchungen zu marinen Gewässern ist der Einsatz hydroakustischer Verfahren zur Kartierung des Meeresbodens bereits langjährig etabliert. Sowohl auf nationaler (BSH, 2016) als auch auf internationaler Ebene (LURTON & LAMARCHE, 2015) wurden entsprechende Kartieranleitungen und Leitfäden erarbeitet, um auf der Basis von Echolotmessungen eine Klassifizierung des Meeresbodens hinsichtlich der dort vorkommenden Substrate zu ermöglichen. Für Binnengewässer existieren hingegen in Deutschland noch keine Regeln bzw. standardisierte Verfahrensweisen. Hier wird die Echolottechnik wie bereits oben vermerkt bislang primär zu Vermessungszwecken eingesetzt (BIOTA, 2018).

Vom Prinzip her sind die an marinen Gewässern erprobten Verfahren zur Meeresbodenkartierung aber auch für Seen (HILGERT et al., 2016) und Fließgewässer (AMIRI-SIMKOOEI et al., 2009; BUSCOMBE et al., 2014a, b) geeignet, auch wenn hier aus messtechnischen Gründen vor allem das Problem der vergleichsweise geringen Wassertiefe besteht. Bei kleinen und sehr kleinen Fließgewässern kann zudem schon allein die Gerinnebreite ein limitierender Faktor bei der Realisierung von Messkampagnen sein. Aber gerade für diese Gewässer besteht vor dem Hintergrund der Umsetzung der EG-WRRL ein hoher Bedarf an Messsystemen,

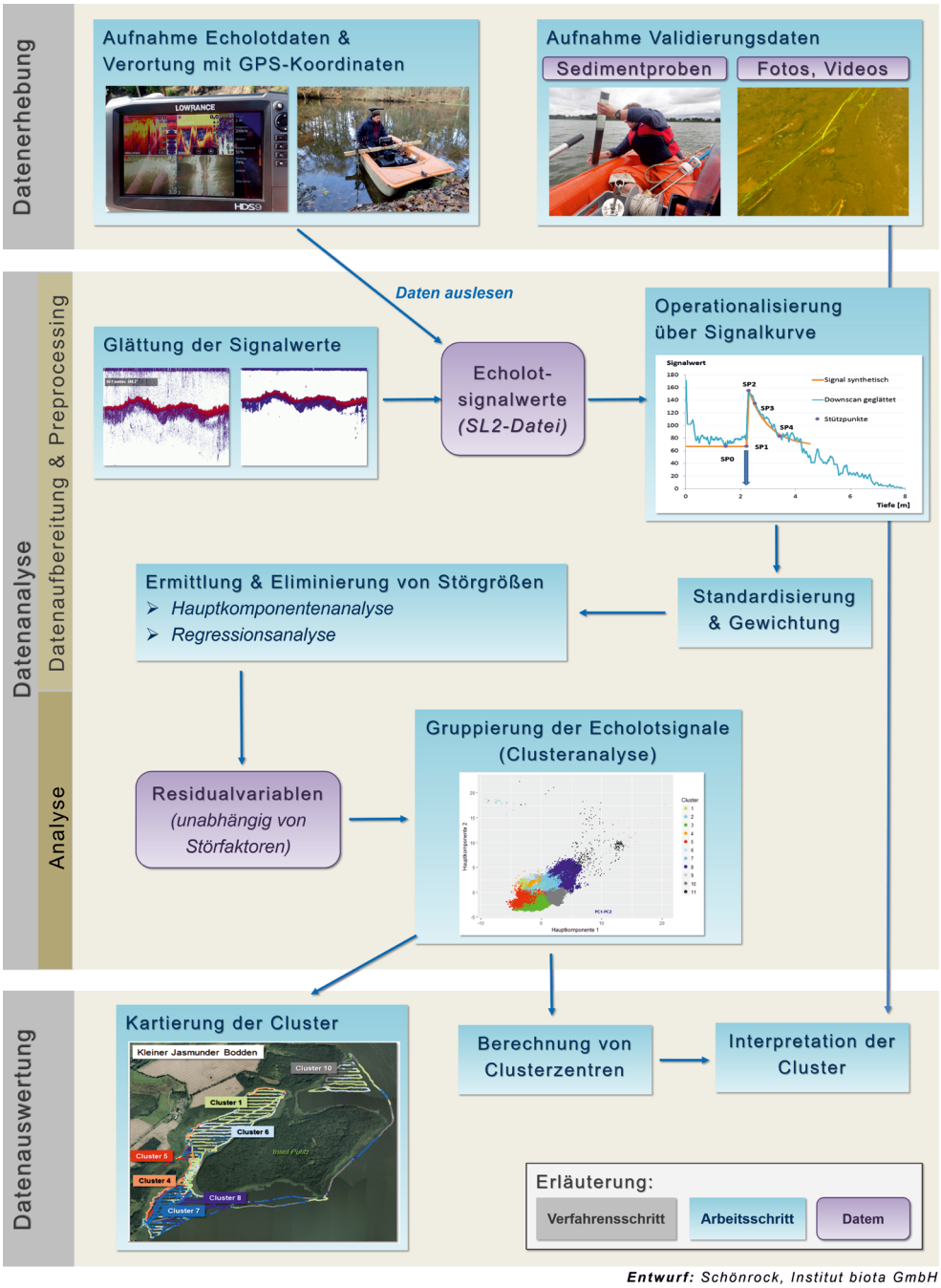


Abbildung 1
Schematische Darstellung der entwickelten Kartiermethodik.
Schematic illustration of the mapping approach.

die an die Gewässergröße angepasst sind (HELM et al., 2016), stehen doch eben diese Gewässer oftmals im Fokus regionaler und kommunaler Projekte zur Umsetzung der EG-WRRL (MEHL et al., 2018). Dementsprechend ist die verwendete Echolottechnik ein entscheidender Faktor bei der Entwicklung einer praxistauglichen Kartiermethodik.

Vor diesem Hintergrund wird im vorliegenden Beitrag ein methodischer Entwurf zur Kartierung der Sohlsubstrate von Oberflächengewässern des Tieflandes in Mecklenburg-Vorpommern vorgestellt. Der Kartieransatz basiert auf dem Einsatz von Echolotmessungen und statistischen Algorithmen zur Auswertung der dabei aufgenommenen Echolotsignalwerte (Echolotsignalanalyse) und ermöglicht eine Anwendung auf kleine bis mittelgroße Gewässer. Der vorliegende Beitrag soll Impulse für eine standardisierte Vorgehensweise geben und fokussiert dabei auf die in Abbildung 1 dargestellten Arbeitsschritte.

2. Untersuchungsgewässer

Für das Kartierungsvorhaben wurden abschnittsweise Echolotdaten von drei Binnengewässern in Mecklenburg-Vorpommern erhoben (Abb. 2, Tab. 2). Mit der Tollense und der Maurine wurden zwei wichtige Fließgewässertypen des Norddeutschen Tieflandes betrachtet, die sich neben dem Fließgewässertyp hinsichtlich ihrer Größe unterscheiden.

Als drittes Beispielgewässer wurde der auf der Insel Rügen gelegene Kleine Jasmunder Bodden befahren, wobei Echolotdaten für zwei an der Halbinsel Pulitz gelegene Buchten erhoben wurden. Bei dem Kleinen Jasmunder Bodden handelt es sich um ein mesohalines inneres Küstengewässer (Tab. 2). Er ist durch einen Damm vom nördlich gelegenen Großen Jasmunder Bodden getrennt und hat daher keine direkte Verbindung zur Ostsee. Aufgrund der vorherrschend windgetriebenen Strömungen ist die Strömungsdynamik sehr gering ausgeprägt (LUNG-MV, 2005a). Dementsprechend kann gegenüber den untersuchten Fließgewässern von deutlich homogeneren Substratvorkommen ausgegangen werden, insbesondere in den geschützten Bereichen der vielzählig ausgebildeten Buchten.

3. Daten und methodisches Vorgehen

3.1 Datenerhebung

Das zur Kartierung der Gewässersohle eingesetzte Echolotgerät musste einige Voraussetzungen erfüllen. Zum einen sollte das Gerät nicht zu groß sein, um es auf einem verhältnismäßig kleinen Boot installieren und so Gewässer mittlerer und kleiner Größenordnung befahren zu können. Des Weiteren sollte die

Möglichkeit bestehen, aufgenommene Signalwerte auszulesen, um diese statistisch auswerten zu können. Deshalb wurde bewusst auf ein Singlebeam-Echolot zurückgegriffen, da sich dieses für den Einsatz in kleinen Fließgewässern eignet. Singlebeam-Echolote senden zwar immer nur ein einziges, lotrechtes Signal aus und können ein Gewässer somit nur linienhaft erfassen. Multibeam-Echolote, die eine weitaus größere Fläche des Gewässergrunds bzw. der -sohle erfassen, können hingegen nur ab einer bestimmten Gewässergröße und Gewässertiefe eingesetzt werden. Dennoch ist es keinesfalls so, dass durch ein Singlebeam-Echolot nur ein einzelner Punkt der Gewässersohle erfasst wird. Vielmehr enthält das von der Gewässersohle reflektierte Signal Informationen über eine annähernd ellipsenförmige Fläche (kreisförmig nur bei vollständig waagerechter, planarer Gewässersohle) unterhalb des Echolots (Footprint), deren Größe von der Distanz zwischen Echolot und Gewässersohle sowie vom Öffnungswinkel (variiert je nach Frequenz) abhängt.

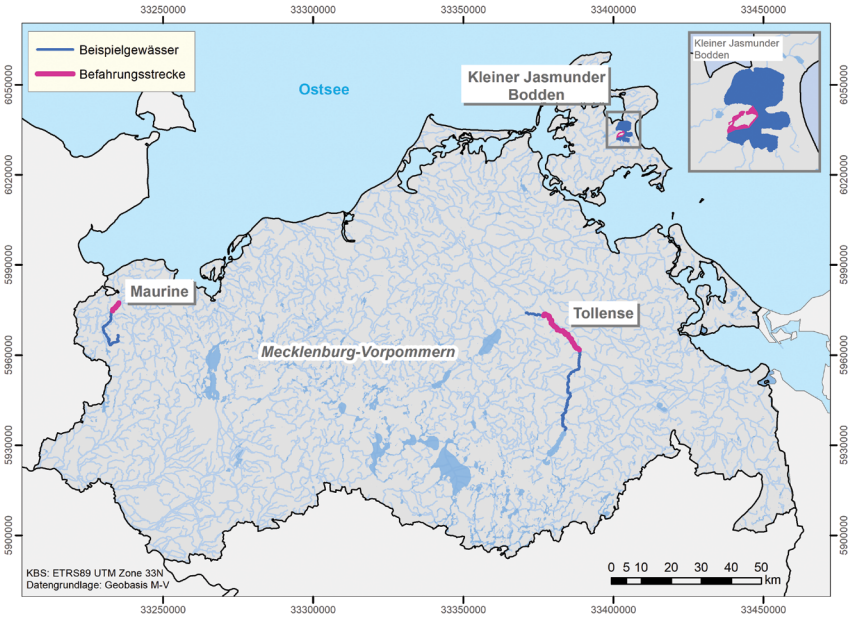


Abbildung 2
Lage der Untersuchungsgewässer in Mecklenburg-Vorpommern: Maurine, Tollense und Kleiner Jasmunder Bodden.
Location of the examined surface waters in Mecklenburg-Western Pomerania: Maurine, Tollense and Kleiner Jasmunder Bodden.

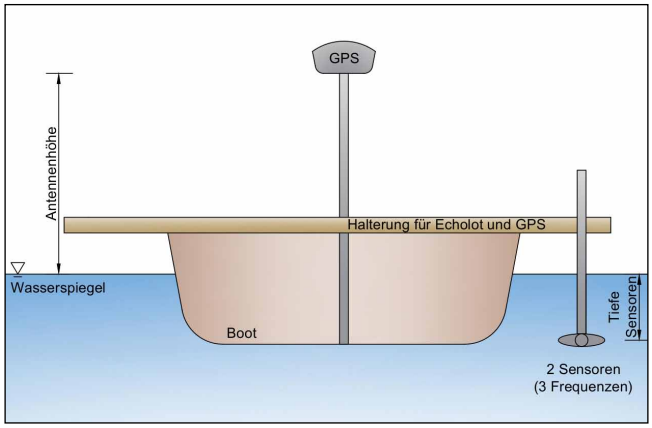
Das eingesetzte Echolot war zudem mit der CHIRP-Technik (Compressed High-Intensity Radiated Pulse) ausgestattet, d. h. das Echolot besitzt mehrere Sensoren unterschiedlicher Frequenzen, die gleichzeitig Schallimpulse aussenden können. Dies hat den Vorteil, dass von der Gewässersohle rückgestrahlte Echos besser hinsichtlich variierendem Materials differenziert werden können. Im vorliegenden Fall war das verwendete Echolot mit zwei Sensoren ausgestattet, die insgesamt drei Frequenzkanäle

Tabelle 2
Charakterisierung der Untersuchungsgewässer.
Characterisation of the examined surface waters.

	Maurine	Tollense	Kl. Jasmunder Bodden
Kategorie von Oberflächengewässern nach OGewV	Fluss	Fluss	Küstengewässer
Gewässertyp(en) nach OGewV	sandgeprägter Tieflandbach **(Typ 14)**	organisch geprägter Fluss **(Typ 12)**	mesohalines inneres Küstengewäser, Salzgehalt 5 - 10 PSU[a] **(Typ B2a)**
Zusätzlich im Befahrungsabschnitt vorkommende Gewässertyp(en) nach OGewV	organisch geprägter Bach **(Typ 11)**	–	–
Länge (Fluss)/Fläche (Küsten-GW)	20 km	95,8 km	28,4 km²
Befahrungsstrecke/-fläche	3,9 km	20 km	1,56 km² (Strecke 44,3 km)
Größe des oberirdischen Einzugsgebiets (EZG)	167 km²	1.829 km²	100 km²
Größenklasse EZG gem. WRRL, OGewV	klein	groß	klein (Größenklassen gilt für Fließgewässer)
Tiefenkennwerte der Befahrungsabschnitte **Mittel**	1,32 m	1,74 m	1,48 m
Max.	2,32 m	3,70 m	3,59 m
Min.	0,77 m	0,77 m	0,38 m
Ungefähre Gewässerbreite der Befahrungsabschnitte	7 – 11 m	18 – 25 m	–
mittlerer Durchfluss (MQ)	0,89 m³ s⁻¹	5,77 m³ s⁻¹	507 cm (MW)[d]
Pegel-Name/-Kennung	Pegel Schönberg	Pegel 04803.5	Pegel 03156.0
Bezugszeitraum	1965 – 2005[b]	2006 – 2015[c]	2/2019[c]

[a] PSU (Practical Salinity Units): Maßeinheit für Salinität [b] LUNG-MV (2005b) [c] LUNG-MV (2019) [d] mittlerer Wasserstand (MW)

Montage des Echolotmesssystems am Boot



Entwurf: Julia Ewert (Institut biota GmbH)

Foto: Institut biota GmbH

Abbildung 3
Montage des Echolotmesssystems am Boot: schematische Darstellung (links) und Aufnahme vor einer Befahrung (rechts).
Installation of the echo sounder system: schematic illustration (left) and picture taken before a survey (right).

abdeckten: Primary-Kanal (83 kHz), Secondary-Kanal (200 kHz) und Downscan bzw. Sidescan (800 kHz). Dieses eignet es sich gut für den Einsatz in seichteren Gewässern, da hier hohe Frequenzen zweckdienlicher sind (LURTON, 2010). Die Geberleistung des Echolots betrug 300 W.

Die Befahrungen erfolgten mit einem durch einen Verbrennungs- bzw. Elektromotor betriebenen Boot, das mit einem Techniker und einem Vermessungsingenieur besetzt war. Die Echolotsensoren wurden an einer eigens dafür konstruierten Halterung montiert, so dass sie seitlich am Boot ins Wasser ragten (Abb. 3).

Über einen GNSS-Empfänger (Global Navigation Satellite System) wurden die aufgenommenen Echolotsignale mit einer Lagegenauigkeit von ≤ 0,05 m (Nutzung des SAPOS-Korrekturdatendienstes) räumlich verortet (Koordinatenbezugssystem ETRS-1989/UTM-Zone-33N). Dies ist von großer Bedeutung für die spätere Gruppierung der Echolotsignale, da die über den GNSS-Empfänger ermittelten Positionspunkte (im Folgenden GNSS-Positionspunkte) mit den verknüpften Informationen der Echolotmessdaten die zu gruppierenden Objekte bei der Clusteranalyse bilden. Der Abstand, in dem die Echolot-Messprofile erfasst werden, kann über eine Voreinstellung im Echolotsystem (Range) angepasst werden. Als Faustregel gilt hier die doppelte Gewässertiefe anzusetzen. Damit wird eine Echolotmessung (ein Ping-Signal) immer in Abhängigkeit von der Gewässertiefe im Abstand der doppelten Laufzeit einer Schallwelle vorgenommen. Bei angepasster Fahrtgeschwindigkeit (3 – 4 km/h) ist dann eine längskontinuierliche Erfassung der Gewässersohle möglich.

Die Vermessungen erfolgten allesamt außerhalb der Vegetationsperiode, um störende Einflüsse der Unterwasservegetation auszuschließen bzw. zu minimieren.

Für die *Tollense* wurden an insgesamt 24 Probenahmestellen (PNS) Sedimentproben per Ekman-Birge-Greifer (härtere Substrate) oder Sedimentcorer von Uwitec (weichere Substrate) genommen, die vor Ort den in Tabelle 1 aufgelisteten Substratarten zugeordnet wurden. Zusätzlich wurden die PNS durch Einsatz einer Unterwasserkamera mit Fotos und Videosequenzen dokumentiert.

3.2 Preprocessing I

Die Aufbereitung der ausgelesenen Echolotdaten erfolgte zunächst mittels C-Programmierung. In einem ersten Schritt wurden die Echolotsignalwerte durch Bildung gleitendender Mittelwerte in XY-Richtung (in Fahrtrichtung und gegen die Fahrtrichtung) sowie in Z-Richtung (in Richtung Wasseroberfläche und in Richtung Gewässersohle) geglättet, um den Einfluss in der Wassersäule auftretender Störungen wie kleinere Makrophyten oder Gasbläschen zu reduzieren (Abb. 4 a und b). Der nächste Schritt der Signalauswertung bestand darin, für jedes Signal (Ping) einen realen Tiefenwert zu bestimmen, wofür Signalwerte des Downscan-Kanals die Grundlage bildeten, da dieser aufgrund der hohen Frequenz (800 kHz) ein stärker ausgeprägtes Echo liefert, als die niederfrequenten Kanäle und somit gegenüber diesen eine eindeutigere Erfassung der Sohltiefe erlaubt. Jedem Wert innerhalb einer Signalkurve (1.400 Signalwerte im Downscan) wurde nun eine vom Echolot ermittelte Tiefenposition zugeordnet. Bei Tiefen größer als 0,4 m waren der maximale Ausschlag einer Signalkurve und die dazugehörige Tiefe zu ermitteln (Abb. 4 c). Anhand dieses Tiefenwertes und des Öffnungswinkels des Sensors (30 °) wurde der Laufzeitunterschied ermittelt, über den schließlich die reale Tiefe berechnet werden konnte (Abb. 4 d). Echolotsignale für Gewässerbereiche mit weniger als 0,4 m Tiefe wurden nicht berücksichtigt, da diese Signale aufgrund starker Reflexionseffekte nicht valide auswertbar waren.

3.3 Statistische Analysen

Die nachfolgend beschriebenen statistischen Analysen wurden – sofern nicht anderweitig angegeben – mit der frei verfügbaren Statistik-Software und Skriptsprache R (R Core Team, 2017; RStudio Team, 2017) durchgeführt. Einige der verwendeten Pakete werden an den entsprechenden Stellen benannt. Zusätzlich wurde auf Funktionen aus folgenden Paketen zurückgegriffen: dplyr (WICKHAM et al., 2018), GGally (SCHLOERKE et al., 2017), ggplot2 (WICKHAM, 2009), grid (R Core Team, 2017).

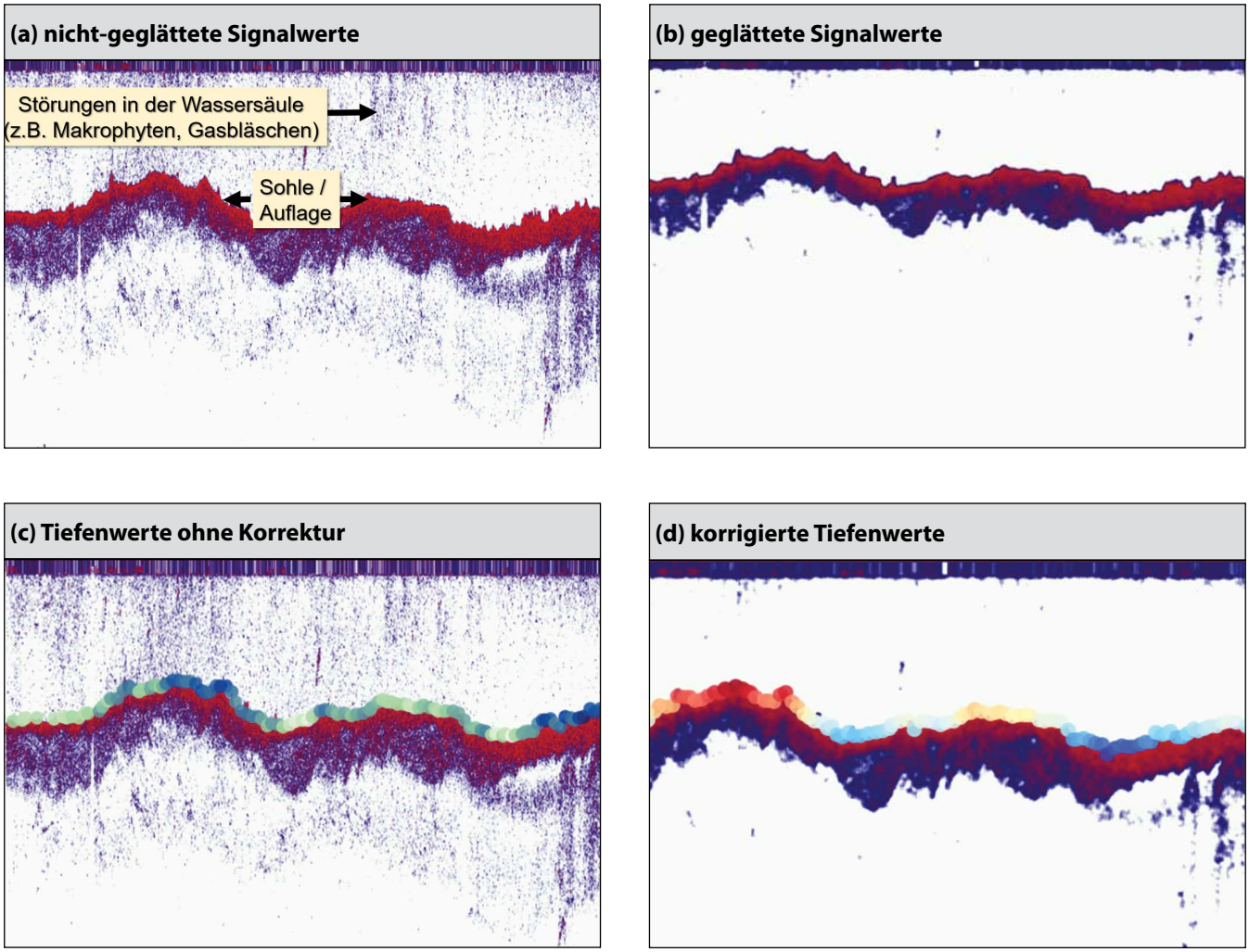


Abbildung 4
Vergleich von nicht-geglätteten (a) und geglätteten (b) Signalwerten sowie von nicht-korrigierten (c) und korrigierten Tiefenwerten (d) für einen exemplarisch ausgewählten Gewässerabschnitt.
Comparison of non-smoothed (a) and smoothed (b) signal values as well as uncorrected (c) and corrected depth values (d) for an exemplarily selected part of the surveyed waterbodies.

3.3.1 Operationalisierung anhand der Echolotsignalkurve

Aufgrund der CHIRP-Technik (Kap. 3.1) stehen für jeden aufgenommenen GNSS-Positionspunkt insgesamt drei Echolotsignale zur Verfügung, ein Signal für jede der drei Frequenzen. Ein aufgenommenes Echolotsignal (Ping) umfasst jedoch nicht einen einzigen Wert, sondern ist über eine Vielzahl einzelner Signalwerte definiert, die im Zeitraum zwischen der Signalaussendung, der Reflexion durch ein Objekt und der Registrierung des Signalechos durch das Echolot generiert werden. Im Downscan-Kanal (800 kHz) sind dies beispielsweise gut 1.400 Signalwerte für ein einzelnes Ping (Kap. 3.2). Um die Echolotsignale mit ihren vielen Signalwerten für eine Gruppierung der GNSS-Positionspunkte (Clusterbildung) heranziehen zu können, müssen dafür geeignete Parameter (Variablen) gefunden werden, durch die sich ein einzelnes Echolotsignal näher charakterisieren lässt.

Die Ableitung der Variablen für die Clusteranalyse erfolgte automatisiert mittels C-Programmierung auf Basis der geglätteten Echolotsignale. Da jeder der gut 1.400 Signalwerte, aus denen sich ein einzelnes Echolotsignal zusammensetzt, einen zugehörigen Tiefenwert hat, kann anhand der Signalwerte für jedes einzelne Echolotsignal eine Signalkurve gebildet werden (Abb. 5). Mittels der Signalkurve wurden nun in einem nächsten Schritt markante Ausprägungen eines Echolotsignals definiert (Stützpunkte, SP).

Tabelle 3 dokumentiert die definierten SP und deren Relevanz für die Gruppierung der Echolotsignale. SP1 (reale Tiefe) und SP2 (maximaler Signalwert) wurden bereits im Zuge der Bestimmung der realen Tiefe ermittelt (Kap. 3.2). Als weitere Parameter wurden die Stützpunkte SP0, SP3 und SP4 identifiziert. Die Stützpunkte SP3 und SP4 orientieren sich an den bei CHIVERS et al. (1990) definierten akustischen Parametern. Demnach lassen sich auch aus den Echolotsignalwerten, die nach dem höchsten Ausschlag eines Signals folgen, Informationen hinsichtlich der Gewässersohle ableiten. Diese akustischen Parameter (E1- bzw. E2-Parameter) wurden zwar für Echolot-Anwendungen in marinen Gewässern entwickelt (SIWABESSY et al., 1999; ICES, 2007), fanden aber auch schon in Binnengewässern Anwendung (HILGERT et al., 2016; BUSCOMBE, 2017).

Anhand des sogenannten E1-Parameters können Rückschlüsse auf die Rauheit des Untergrunds gezogen werden. Die Stützpunkte SP3 und SP4 decken dabei den oberen bzw. unteren Wertebereich des E1-Parameters ab. Der E2-Parameter enthält hingegen Informationen über die relative Härte der Gewässersohle. Dieser Parameter wurde in der vorliegenden Arbeit jedoch aufgrund der geringen Leistungsstärke des verwendeten Gebers nicht ausgewertet. Stattdessen wurde der sogenannte Peak SV-Parameter (entspricht SP2, maximaler Signalausschlag) ausgewertet, dessen Ausprägung ebenfalls von der Härte der Gewässersohle abhängt (ReefMaster, 2015).

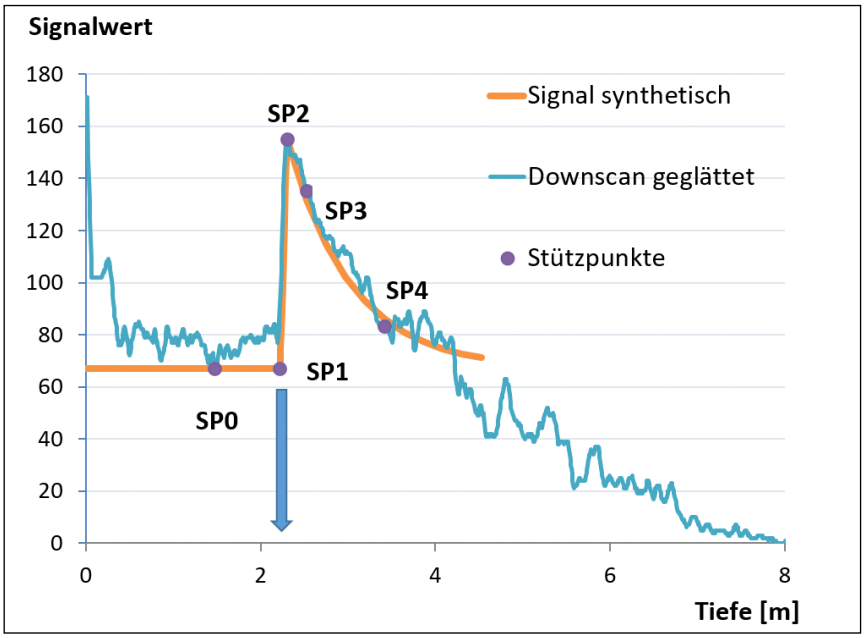


Abbildung 5
Definition von fünf Stützpunkten (SP) der Signalkurve eines Echolotsignals zur Ableitung von Variablen für die Clusteranalyse.
Definition of five distinct locations (SP) of an echo sounder signal curve for derivation of cluster analysis variables.

Starke Ausprägungen an den Stützpunkten SP0 und SP1 deuten darauf hin, dass der Schallimpuls des Echolots vor seinem Auftreffen auf die Gewässersohle bereits an Intensität verliert. Verantwortlich hierfür können Objekte im Wasser sein, die bereits einen Teil des Schallimpulses reflektieren, z. B. Makrophyten oder Bläschen, die sich aufgrund von Turbulenzen in der Wassersäule bilden. Die Ausprägung von SP2 kann einen Hinweis darauf geben, ob der Schallimpuls eher reflektiert (harte Gewässersohle und starkes Echo) oder absorbiert (weichere Gewässersohle und schwaches Echo) wird. Ebenso kann es passieren, dass das Signal beim Auftreffen auf eine unebene, raue Oberfläche gestreut wird. In diesem Fall sind niedrige Werte an den Stützpunkten SP3 und SP4 zu erwarten. Umgekehrt sollte hier bei einer glatten Oberfläche, aufgrund der geringen Streuung des Signals, ein stärkeres Echo auftreten.

Da bei jedem Echolotsignal die Geokoordinaten hinterlegt wurden, sind auch die Stützpunkte für jeden GNSS-Positionspunkt entlang der befahrenen Gewässer bekannt. Über die Variabilität der Signalausprägungen an den Stützpunkten waren nun die einzelnen GNSS-Positionspunkte mittels einer Clusteranalyse zu Gruppen ähnlicher Signalausprägungen (Cluster) zu aggregieren.

Tabelle 3
Definierte Stützpunkte (SP) der Signalkurve eines Echolotsignals und ihr Informationsgehalt bei der Signal-Interpretation.
Defined distinct locations (SP) of an echo sounder signal curve and their respective relevance for signal interpretation.

SP	Definition	Relevanz für Signal-Interpretation
SP0	Stelle des Minimums vor dem maximalen Ausschlag	Hintergrundrauschen Detektion von Störungen in der Wassersäule (z. B. Makrophyten, Gasbläschen), bevor das Signal die Gewässersohle erreicht.
SP1	Stelle vor dem maximalen Ausschlag	Stelle der realen Tiefe
SP2	Maximaler Ausschlag	Rückschluss auf Beschaffenheit der Gewässersohle (Härte)
SP3	Tiefe an SP2 + 10 % der realen Tiefe (SP1)	Rückschluss auf Beschaffenheit der Gewässersohle (Rauheit)
SP4	Tiefe an SP2 + 50 % der realen Tiefe (SP1)	Rückschluss auf Beschaffenheit der Gewässersohle (Rauheit)

Positionspunkte mit bestimmter Clusterzugehörigkeit können anschließend als Indikator für Gewässersohltypen hinsichtlich vorkommender Substrate und Sohlstrukturen betrachtet werden.

Die Vorgehensweise der Stützpunktbildung wurde auf die Echolotsignale aller drei Kanäle (Primary, Secondary, Downscan) angewandt, so dass im Ergebnis 15 Variablen (5 je Frequenz) für die Clusteranalyse zur Verfügung standen, die jeweils ein einzelnes Echolotsignal (Ping) näher charakterisieren.

3.3.2 Preprocessing II

3.3.2.1 Standardisierung und Gewichtung

In einem ersten Schritt erfolgte eine Standardisierung der abgeleiteten Variablen (Stützpunkt-Werte, SP). Dabei wurden jeweils die Stützpunkte SP0, SP1, SP3 und SP4 innerhalb eines Kanals (Primary, Secondary, Downscan) anhand des arithmetischen Mittels des SP2-Wertes (reale Tiefe) aus dem jeweiligen Kanal normiert.

Allerdings ist die Spannweite der SP-Variablen in den niederfrequenten Kanälen (Primary und Secondary) gegenüber dem hochfrequenten Downscan deutlich geringer, so dass auch die Wahrscheinlichkeit geringer ist, dass die SP-Variablen der niederfrequenten Kanäle als entscheidende Merkmale zur Clusterbildung ausgewählt werden. Aufgrund dessen wurden die normierten SP-Variablen des Primary- und des Secondary-Kanals zusätzlich gewichtet.

Um die Gewichtungsfaktoren zu ermitteln, wurde für jede Variable die Stan-

dardabweichung berechnet. Anschließend erfolge jeweils ein Vergleich der Standardabweichungen der Stützpunkte der unterschiedlichen Kanäle (z. B. SP1 des Downscan-Kanals mit SP1 des Primary-Kanals). Aus der Differenz beider Standardabweichungen wurde anschließend der Faktor für die Gewichtung ermittelt. Diese Werte bildeten die Grundlage, um den Gewichtungsfaktor für die normierten Werte der SP-Variablen des Primary-Kanals mit 1,5 und für die normierten Werte der SP-Variablen des Secondary-Kanals den Gewichtungsfaktor mit 2 festzulegen.

Diese Angleichung der Auswahlwahrscheinlichkeiten der SP-Variablen aus den unterschiedlichen Kanälen soll verzerrten Ergebnissen der Clusteranalyse und daraus resultierenden Fehlinterpretationen der Cluster vorbeugen. Außerdem steigern sowohl die Normierung als auch die Gewichtung die Vergleichbarkeit der Ergebnisse nachfolgender statistischer Analysen.

3.3.2.2 Ermittlung und Eliminierung von Störgrößen

Um zu verhindern, dass die räumlichen Muster der später gebildeten Cluster zu stark von der Gewässertiefe beeinflusst werden und am Ende letztlich nur die Tiefenvarianz des Gewässers wiederspiegeln, muss die Clusterbildung von ungewollten Einflussfaktoren wie Gewässertiefe und Fahrtgeschwindigkeit des Bootes unabhängig gemacht werden. Ein expliziter Ausschluss solcher Variablen, die signifikant mit der Gewässertiefe korreliert sind (beispielsweise SP1, reale Tiefe), kann hier keine Lösung darstellen, bilden sie doch einen wichtigen Parameter zur Definition der Echolotsignalkurve. Daher wurde eine Hauptkomponentenanalyse durchgeführt – Umsetzung in R mittels stats Paket (R Core Team, 2017) und Hmisc Paket (HARRELL, 2018). Im Gegensatz zur Clusteranalyse werden bei der Hauptkomponentenanalyse nicht die einzelnen Objekte (GNSS-Positionspunkte mit verknüpften Echolotsignalen), sondern die Variablen (SP-Stützpunkte) aggregiert. Dadurch kann der summierte Einfluss bestimmter Parameter (z. B. Wassertiefe) aus allen 15 Variablen (die 15 Stützpunkte) auf einer Hauptkomponente konzentriert werden. Durch Ausschluss dieser Hauptkomponente aus der Clusteranalyse wird dann der Einfluss des jeweiligen Parameters auf die Clusterbildung reduziert.

Über die Hauptkomponentenanalyse wurden die 15 Variablen zu insgesamt vier Hauptkomponenten ($\lambda > 1$, bei 74,5 % erklärtem Varianzanteil) zusammengefasst. Die Vorgehensweise wurde durch eine Korrelationsanalyse (Produkt-Momentkorrelation nach Pearson) zwischen den Störgrößen Wassertiefe bzw. Fahrtgeschwindigkeit und den gebildeten Hauptkomponenten verifiziert. Diese ergab, dass die erste Hauptkomponente im Vergleich zu den übrigen Hauptkomponenten die stärksten Korrelationen aufweist (Korrelation zur Wassertiefe: $r = 0{,}82$; Korrelation zur Fahrtgeschwindigkeit: $r = 0{,}17$). Folglich kann über den Ausschluss dieser Hauptkomponente der Einfluss der Wassertiefe auf die Clusterbildung beträchtlich minimiert werden.

Es ist jedoch zu beachten, dass neben der Wassertiefe und Fahrtgeschwindigkeit weitere Informationen in der betroffenen Hauptkomponente enthalten sind, die bei ihrer Ausklammerung aus der Clusteranalyse verloren gingen. Zudem sind auch in den übrigen drei Hauptkomponenten noch Informationsanteile der Störgrößen enthalten, die ungewollte Auswirkungen auf die Clusterbildung haben können.

Daher wurden in einem zweiten Schritt je Hauptkomponente ein multiples lineares Regressionsmodell mit den Störgrößen Wassertiefe und Fahrtgeschwindigkeit als unabhängige Variablen erstellt und die vier Hauptkomponenten auf diese Weise regressionsanalytisch geschätzt. Die Residuen dieser Schätzung (Differenz einer geschätzten Hauptkomponente zu der jeweiligen Hauptkomponente aus der Hauptkomponentenanalyse) stellen dann denjenigen Varianzanteil der Schätzung dar, der nicht durch die Störgrößen erklärt werden kann. Demzufolge sind die Residuen der Regressionsmodelle unabhängig von diesen Störgrößen und können nun für die Clusteranalyse verwendet werden (Residualvariablen).

3.3.3 Clusteranalyse

Die nachfolgenden Ausführungen stützen sich auf die einschlägige Fachliteratur aus der Statistik. Für weiterführende Informationen zu clusteranalytischen Verfahren sei auf entsprechende Fachliteratur verwiesen (KAUFMAN & ROUSSEEUW, 1990; BACKHAUS et al., 2011).

3.3.3.1 Grundlagen

Oberstes Ziel der Clusteranalyse ist es, einzelne Objekte (hier die GNSS-Positionspunkte entlang der Beispielgewässer) entsprechend ihrer Eigenschaften (hier die Echolotsignale, operationalisiert durch die Residualvariablen) so zu gruppieren, dass die dabei entstehenden Gruppen (Cluster) Objekte enthalten, die innerhalb ihrer Gruppe in Bezug auf ihre Eigenschaften möglichst homogen sind und möglichst heterogen in Bezug auf ihre Eigenschaften gegenüber den Objekten der übrigen Gruppen.

Es gibt verschiedene clusteranalytische Verfahren, von denen hierarchische und partionierende am häufigsten zum Einsatz kommen. Ein entscheidender Unterschied zwischen beiden Verfahrensgruppen ist, dass bei partionierenden Verfahren von einer bereits bestehenden Gruppierung der Objekte und damit einhergehend von einer feststehenden Anzahl von Clustern ausgegangen wird, während Gruppen und Anzahl der Cluster bei hierarchischen Verfahren vorab nicht bekannt sind. Zudem können bei partionierenden Verfahren die Objekte während des Analyseprozesses zwischen Gruppen ausgetauscht werden. Bei hierarchischen Verfahren kann hingegen eine gebildete Gruppe nicht mehr aufgelöst werden, d. h. die ihr zugeordneten Objekte verbleiben in dieser Gruppe. Partionierende Verfahren werden in der Praxis häufig zur Optimierung von Gruppierungen eingesetzt, die zuvor über ein hierarchisches Verfahren gebildet worden sind.

Für die Gruppierung von Einzelobjekten zu Clustern sind letztlich zwei Analyseschritte von Bedeutung, die sich je nach Clusterverfahren unterscheiden:

1) Ermittlung der Ähnlichkeit (Proximitätsmaß) bzw. Unterschiedlichkeit (Distanzmaß) der zu gruppierenden Objekte;

2) Gruppierung der Einzelobjekte mittels eines Fusionierungsalgorithmus (Zusammenfassen von Objekten) oder eines Partionierungsalgorithmus (Aufteilung der Objekte auf bereits bekannt Gruppen).

3.3.3.2 Durchführung

Als Variablen der Clusteranalyse dienten nun anstelle der 15 Stützpunkte (Kap. 3.3.1) die vier aus den Regressionsmodel-

Tabelle 4
Absolute und relative Häufigkeiten der gebildeten Cluster insgesamt und differenziert nach den drei Beispielgewässern Maurine, Tollense und Kleiner Jasmunder Bodden.
Absolute and relative cluster frequencies in total and differentiated by the three examined surface waters Maurine, Tollense and Kleiner Jasmunder Bodden.

Cluster	Gesamtdatensatz		Maurine		Tollense		Kl. Jasmunder Bodden	
	Absolut	%	Absolut	%	Absolut	%	Absolut	%
1	**171.888**	**19,3**	103	0,2	491	0,1	**171.294**	**35,6**
2	9.324	1,0	1.639	3,6	903	0,2	6.782	1,4
3	**210.469**	**23,6**	**32.762**	**72,6**	**175.306**	**48,2**	2.401	0,5
4	38.987	4,4	0	0,0	790	0,2	38.197	7,9
5	**197.272**	**22,2**	**7.116**	**15,8**	**182.666**	**50,2**	7.490	1,6
6	68.610	7,7	110	0,2	120	< 0,1	**68.380**	**14,2**
7	106.457	12,0	132	0,3	1.879	0,5	**104.446**	**21,7**
8	20.990	2,4	16	< 0,1	165	< 0,1	20.809	4,3
9	185	< 0,1	1	< 0,1	48	< 0,1	136	< 0,1
10	65.591	7,4	3.154	7,0	1.434	0,4	**61.003**	**12,7**
11	361	< 0,1	98	0,2	100	< 0,1	163	< 0,1
Σ	890.334	100,0	45.131	100,0	363.902	100,0	481.101	100,0

farbliche Hervorhebung dominierender Cluster

len abgeleiteten Residualvariablen (Kap. 3.3.2). Aufgrund des zu hohen Rechenaufwandes musste der Gesamtdatensatz, der fast 900.000 Objekte aus allen drei Untersuchungsgewässern umfasste, auf 18.000 Objekte reduziert werden. Dazu wurden iterativ zufällig Objekte aus dem Gesamtdatensatz ausgewählt. Über Signifikanztests (t-Test) wurde sichergestellt, dass der reduzierte Datensatz repräsentativ in Bezug auf den Gesamtdatensatz ist. Bedingt durch die Datensatzreduzierung waren zwei separate Clusteranalysen notwendig.

Im ersten Analyseschritt wurde ein hierarchisches Verfahren auf den reduzierten Datensatz angewandt, wobei die Euklidische Distanz als Distanzmaß und das Average-Linkage-Verfahren als Fusionierungsalgorithmus verwendet wurden. Beim Average-Linkage-Verfahren wird immer für zwei Cluster die mittlere Distanz (arithmetisches Mittel) aus den einzelnen Distanzen aller Objektpaare gebildet, wobei die Objekte mit der geringsten Distanz zu einem Cluster zusammengefasst werden. Die Umsetzung in R erfolgte mittels der hclust Funktion aus dem stats Paket (R Core Team, 2017). Dabei wurden insgesamt elf Cluster gebildet. Die Festlegung der Clusterzahl orientiert sich an der zu erwartenden Anzahl potenziell vorkommender Sohlsubstrate und Sohlstrukturen. Für die elf Cluster wurden anschließend mittels des rattle Pakets (WILLIAMS, 2011) die Clusterzentren ermittelt.

Im zweiten Analyseschritt mussten die Objekte des Gesamtdatensatzes den gebildeten Clustern zugeordnet werden. Mit dem k-means-Algorithmus wurde hierbei auf ein partionierendes Verfahren zurückgegriffen. Die Anwendung erfolgte in R mit dem fpc Paket (HENNIG, 2015). Der k-means-Algorithmus ordnet die Objekte des Gesamtdatensatzes immer demjenigen Cluster zu, zu dessen Clusterzentrum das jeweilige Objekt aufgrund seiner Variablenausprägungen den geringsten Abstand aufweist.

4. Ergebnisse

Um den gebildeten Clustern eine fachliche Bedeutung zuzuweisen ist es hilfreich, vorab einige statistische Kennwerte zu ermitteln (Kap. 4.1) und die räumlichen Muster der Cluster zu untersuchen (Kap. 4.2). Daher werden die Cluster zunächst entsprechend ausgewertet, bevor schließlich ihre Interpretation erfolgt (Kap. 4.3).

4.1 Deskriptiv-statistische Auswertung der Clusteranalyse

Die elf gebildeten Cluster unterscheiden sich sowohl bezüglich ihrer Häufigkeiten (Anzahl an Objekten pro Cluster), als auch bezüglich ihres Vorkommens in den drei Untersuchungsgewässern. So wurden bei der Auswertung der Objekthäufigkeiten (Tab. 4) drei dominante Cluster gefunden: Cluster 3 (23,6 % der GNSS-Positionspunkte), Cluster 5 (22,2 %) und Cluster 1 (19,3 %). Cluster 7 umfasst immerhin noch 12 % der GNSS-Positionspunkte. Alle weiteren Cluster beinhalten weniger als 10 % der gruppierten Objekte. Den Clustern 9 und 11 wurden mit Abstand die wenigsten Objekte zugeordnet (jeweils unter 0,05 %).

Eine nach den drei Untersuchungsgewässern differenzierte Betrachtung der Objekthäufigkeiten zeigt, dass die beiden dominanten Cluster 3 und 5 lediglich in der Tollense und in der Maurine in ausgeprägter Form vorkommen (Tab. 4). Dabei überwiegt in der Maurine Cluster 3 mit einem Anteil von 72,6 %, während in der Tollense die Häufigkeiten beider Cluster nahezu ausgeglichen sind (Cluster 3 mit 48,2 %, Cluster 5 mit 50,2 %). Alle übrigen Cluster sind in diesen beiden Gewässern nur mit geringen Anteilen vertreten. Vor allem in der Tollense haben alle weiteren Cluster kleinere Anteile als 0,5 %. Der Kleine Jasmunder Bodden ist hingegen durch eine deutlich höhere Diversität an Clustern charakterisiert. Zudem treten hier im Vergleich zu Maurine und Tollense andere Cluster verstärkt in Erscheinung (Cluster 1 und 7 mit 35,6 % bzw. 21,7 %). Ebenfalls große Anteile mit > 10 % weisen die Cluster 6 und 10 auf.

Anhand von Streudiagrammen kann visuell überprüft werden, ob sich die einzelnen Cluster voneinander abgrenzen lassen. Dabei werden immer zwei der zur Bildung der Cluster herangezogenen Variablen – im vorliegenden Fall die vier Residualvariablen

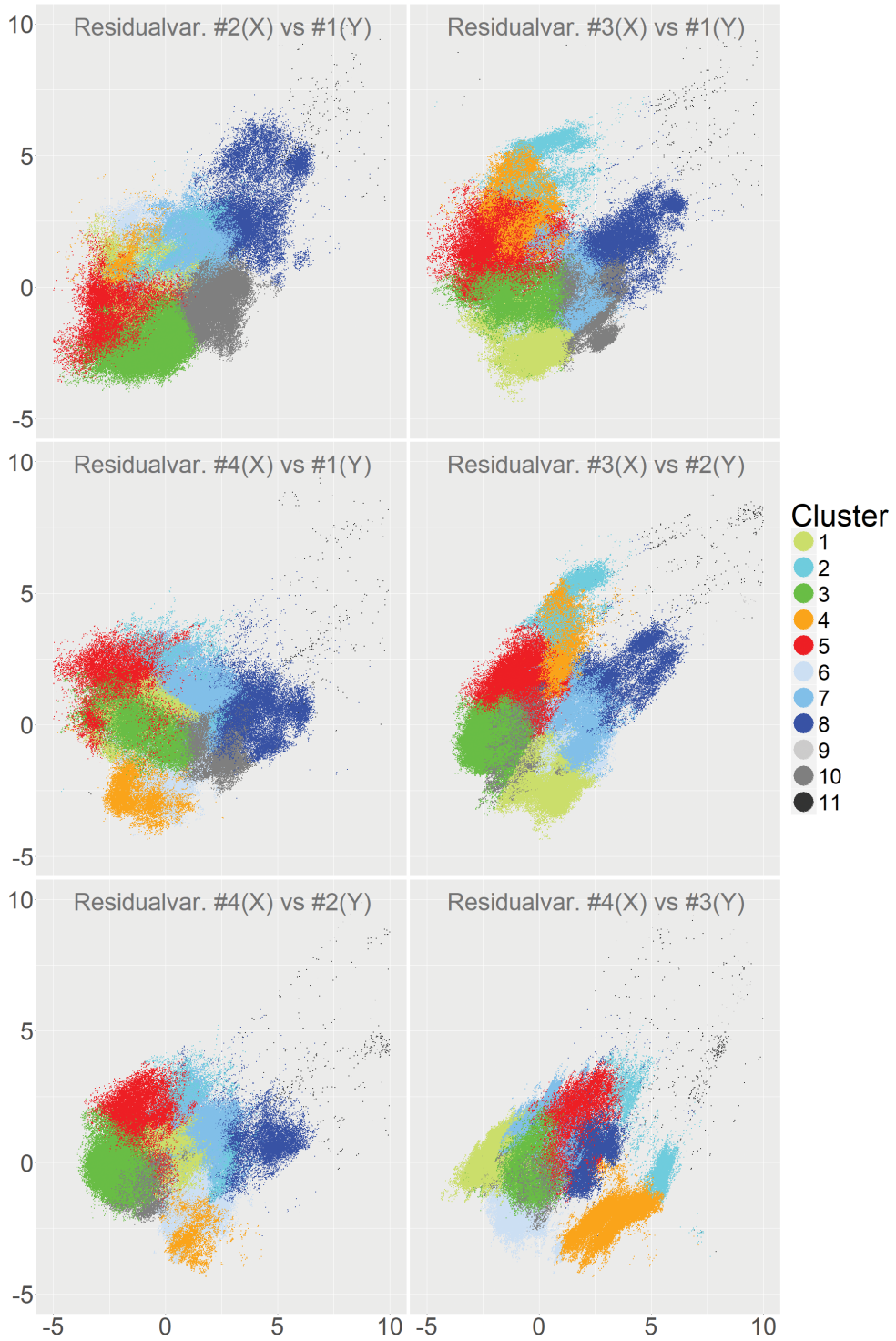


Abbildung 6
Streudiagramme zur Abgrenzung der elf gebildeten Cluster auf Basis der vier Residualvariablen.
Scatter plots for distinction of the eleven derived clusters based on the four residual variables.

(Kap. 3.3.2) – in einem zweidimensionalen Raum gegenübergestellt. Diejenigen Cluster, deren Objekte im Streudiagramm eine kompakte Punktwolke ausbilden, lassen sich dann auf Basis der jeweils gegeneinander aufgetragenen Variablen gut gruppieren, was gleichzeitig auf einen starken Einfluss der jeweiligen Variablen auf die Clusterbildung hindeutet. Ebenso wird ersichtlich, ob eine klare Zuordnung der Objekte zu den Clustern möglich ist, oder ob sich die Objekte einiger Cluster vermischen (streuende Punktwolken).

Abbildung 6 zeigt, dass sich die Cluster 3, 5, 6, 8 und 10 bereits sehr gut anhand der ersten beiden Residualvariablen voneinander abgrenzen lassen. Cluster 5 weist Ähnlichkeiten zu Cluster 3 auf, da beide Punktwolken ineinander streuen. Sehr undifferenziert ausgebildete sind hingegen die Cluster 1, 2 und 4. Cluster 4 lässt sich hingegen besser anhand der Residualvariable 4 abgrenzen (Abb. 6, Mitte links, unten links und rechts). Die beiden Cluster mit sehr geringer Objektzahl (Cluster 9 und 11) bilden keine zusammenhängenden Punktwolken und sind diffus im Diagramm verteilt.

4.2 Kartierung der Cluster

Da die Echolotdaten mit Geokoordinaten verortet wurden, können die gebildeten Cluster in einem Geographischen Informationssystem (GIS) visualisiert werden. Dabei zeigt sich, dass Cluster mit großer Objektzahl auch räumlich zusammenhängende Muster ausbilden. In der Maurine und der Tollense treten die beiden dominanten Cluster 3 und 5 stets wechselnd in unterschiedlich langen Abschnitten auf (Abb. 7). In der Tollense ist dieser Wechsel dabei sowohl im Längs-, als auch im Querprofil zu erkennen (Abb. 7, rechts). Neben den Cluster 3 und 5 wurden im unteren Bereich des Befahrungsabschnitts der Maurine vereinzelt Bereiche dem Cluster 10 zugeordnet. Das sporadisch auftretende Cluster 2 ist in Abschnitten zu finden, in denen Makrophyten vorkommen (Abb. 7, links).

Der Kleine Jasmunder Bodden ist bezüglich der Clustervorkommen, wie bereits oben angedeutet, von einer höheren Diversität charakterisiert. Die vier dominierenden Cluster 1, 6, 7 und 10 treten jeweils in größeren, räumlich zusammenhängenden Bereichen des Gewässers auf (Abb. 8). Auffällig sind zwei Bereiche in den beiden Buchten nördlich der Halbinsel Pulitz, in denen die Mehrzahl an Objekten den Clustern 1 und 6 zugeordnet wurde. Im südlichen Teil des Untersuchungsgebiets treten die Clustern 7 und 8 am häufigs-

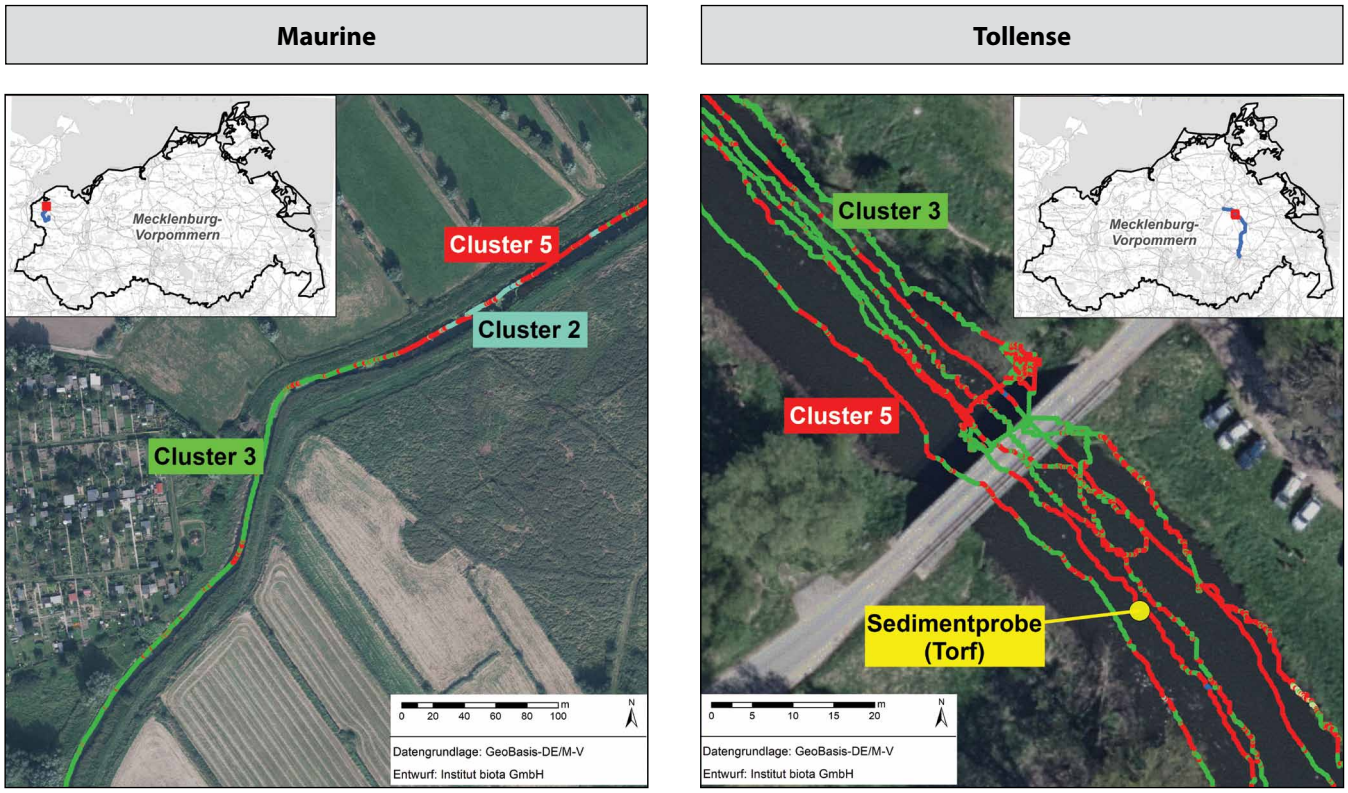


Abbildung 7
Kartierung/Verortung der gebildeten Cluster für exemplarisch ausgewählte Abschnitte der Maurine (links) und der Tollense (rechts).
Mapping/locating the clusters for exemplarily selected parts of the rivers Maurine (left) and Tollense (right).

ten in Erscheinung. In den ufernahen Bereichen sind gehäuft die Cluster 4, 5 und 10 zu finden. Cluster 10 tritt dabei vor allem entlang felsiger Uferbereiche mit Geröll auf.

4.3 Interpretation der Cluster

Die Clusteranalyse ermöglicht eine mathematisch abgeleitete, lediglich formale Gruppierung der GNSS-Positionspunkte aufgrund der Ausprägung der Echolotsignale an den jeweiligen Positionen. Daran sollte sich eine fachliche Bewertung und sachgerechte Zuweisung zu Sedimenttypen anschließen. Eine fachliche Bedeutung kann den gebildeten Clustern nur über Experteneinschätzungen zugewiesen werden. Eine Absicherung der Experteneinschätzung kann wissensgestützt-qualitativ erfolgen (z. B. aufgrund von Beobachtungen, Vorkenntnissen über örtliche Gegebenheiten) oder aber quantitativ anhand von Validierungsdaten. In der Praxis kommen meist beide Ansätze in kombinierter Form zur Anwendung. Zusätzliche statistische Auswertungen der Cluster können unterstützende Informationen bei der Interpretation liefern.

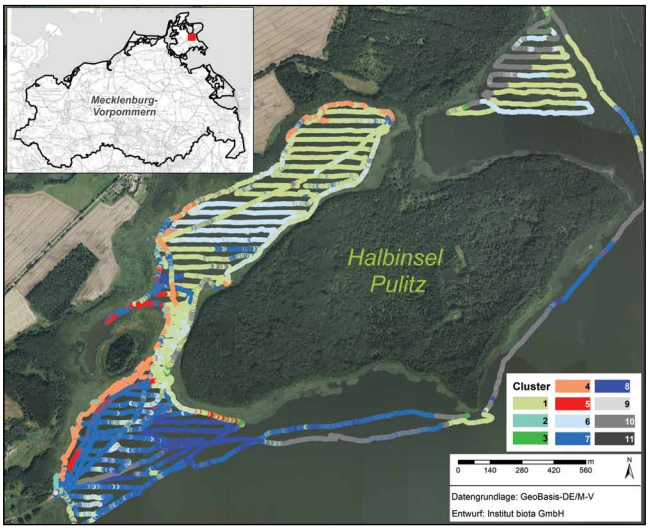


Abbildung 8
Kartierung/Verortung der gebildeten Cluster im Kleinen Jasmunder Bodden.
Mapping/locating the clusters within the coastal water Kleiner Jasmunder Bodden.

So wurde eine erste Charakterisierung der gebildeten Cluster anhand der Clusterzentren vorgenommen. Die Clusterzentren bilden dabei differenziert nach den elf Clustern die mittlere Ausprägung der zur Clusterbildung herangezogenen Variablen ab (die vier Residualvariablen). Eine fachliche Interpretation dieser Clusterzentren ist im vorliegenden Fall jedoch schwierig, da die Residualvariablen aus der Hauptkomponentenanalyse stammen (Kap. 3.3.2) und eine Residualvariable somit die Information mehrerer der ursprünglichen 15 Variablen (Stützpunkte der Signalkurve) enthält. Daher wurden die Clusterzentren für die ursprünglichen 15 Variablen berechnet und nicht für die vier Residualvariablen. Somit lässt sich der mittlere Verlauf der Signalkurve für jedes Cluster graphisch darstellen (Abb. 9 a bis c). Zudem kann eine nach den drei Kanälen (Primary, Secondary, Downscan) differenzierte Auswertung vorgenommen werden, was anhand der vier Residualvariablen nicht möglich ist.

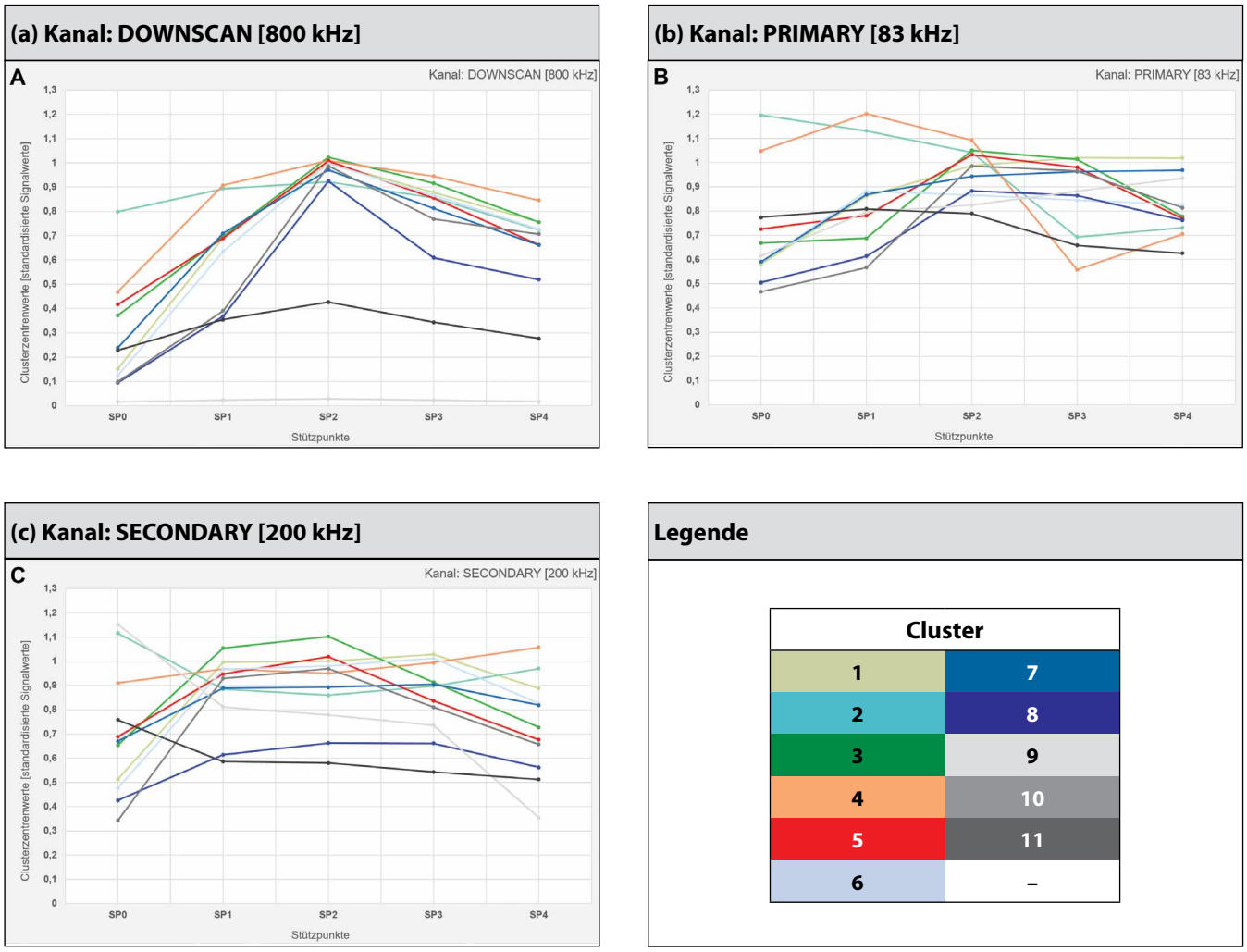


Abbildung 9
Darstellung der Clusterzentren gemäß den Ausprägungen der 15 Stützpunkte (SP) der Echolotsignalkurve und differenziert nach den drei Kanälen Downscan (a), Primary (b) und Secondary (c).
Calculated cluster centers according to the 15 defined locations (SP) along the echo sounder signal curve and differentiated by the frequency channels Downscan (a), Primary (b) und Secondary (c).

Neben den Clusterzentren und den Validierungsdaten von der Tollense wurden ergänzend die Ortskenntnisse aus den Befahrungen in die Cluster-Interpretation eingebunden. Tabelle 5 zeigt die Interpretation der elf gebildeten Cluster. Diese fußt auf den nebenstehenden Cluster-Beschreibungen.

5. Schlussfolgerungen und Ausblick

Die Analysen an den drei Untersuchungsgewässern Maurine, Tollense und Kleiner Jasmunder Bodden haben gezeigt, dass die vorgestellte Kartiermethodik eine Differenzierung der Gewässersohle hinsichtlich vorkommender Substrate und Strukturen ermöglicht. Die gebildeten Cluster ergaben räumlich plausible Muster und konnten inhaltlich interpretiert werden.

Trotz eines fortgeschrittenen Entwicklungstandes der Methodik besteht jedoch weiterer Bedarf für eine Schärfung und damit für weitere Untersuchungen. Hierzu sind weiterführende Untersuchungen geplant. Im Fokus werden hierbei insbesondere die Testung in weiteren Gewässern und damit Gewässertypen sowie die parallele Erhebung von Validierungsdaten stehen. Neben der Aufnahme von Ground-Truth-Daten, wie Sedimentproben und Videoaufnahmen von der Gewässersohle, sollte eine zusätzliche Validierung charakteristischer Echolotsignale durch gezielte Mehrfacherhebungen markanter Gewässerstellen mit eindeutig ausgeprägten Substratvorkommen erfolgen. In diesem Zuge können auch Potenziale und Grenzen hinsichtlich der Genauigkeit des Verfahrens unter Verwendung der benannten Messtechnik eingehender untersucht und präzisiert werden. Weitere Ansatzpunkte für eine Methodenschärfung bestehen in der Erprobung alternativer Algorithmen zur Gruppierung der Echolotsignalwerte sowie in der Ableitung und Nutzung alternativer Variablen zur Charakterisierung der Echolotsignale.

Die Methodik lässt sich aus technischer Perspektive in integrierte (WIEK et al., 2019) bzw. holistisch ausgerichtete Ansätze des Gewässermonitorings eingliedern (WÖFFLER et al., 2016; KUTSCHERA et al., 2018), bei denen eine Vielzahl von Messtechniken kombiniert werden und auf diese Weise eine effektive und umfassende Aufnahme räumlich verorteter Gewässerdaten erfolgt. Für die vorgestellte Kartiermethodik würden auf diese Weise eine Fülle an Metadaten generiert werden, die als unter-

Tabelle 5
Interpretation der aus den Echolotsignalen abgeleiteten Cluster.
Interpretation of the clusters derived from the echo sounder signals.

Cluster	Beschreibung	Interpretation
1	• hohe Signalwerte, insbesondere in niederfrequenten Kanälen an SP3 und SP4 • Ähnlichkeit zu Cluster 6 und 7 (Clusterzentren, räumliche Verbreitung) • Vorkommen in strömungsarmen Bereichen (Kleiner Jasmunder Bodden), die eine Akkumulation feiner Substrate begünstigen	feiner Sand
2	• Hohe Signalwerte an SP0 und SP1 • Ähnlichkeit zu Cluster 4 • räumliche Verbreitung in der Maurine korrespondiert mit dort beobachteten Makrophyten-Vorkommen (Abb. 7, links)	Makrophyten
3	• hohe Signalwerte insgesamt, aber insbesondere an SP2 • Ähnlichkeit zu Cluster 5 und 10, jedoch höhere Signalwerte • gegenüber Cluster 1, stärkere Ausprägung an SP2, schwächere an SP3 und SP4 • dominierendes Cluster in Maurine und Tollense • Befahrungsabschnitt der Maurine wird von sandigen Substraten dominiert • Vorkommen korrespondieren gut mit Fließgewässertypisierung gem. OGewV • Cluster-Interpretation kann über Sedimentproben für die Tollense bestätigt werden	grober Sand
4	• hohe Signalwerte an SP0 und SP1 • Ähnlichkeit zu Cluster 2 • Vorkommen primär am Kleinen Jasmunder Bodden bei unruhiger Wasseroberfläche und Wellenschlag im ufernahen Bereich	Auflage, Streu, vereinzelte Makrophyten (ggf. durch Wellenschlag, Strömungen am Ufer beeinflusst)
5	• Signalwertausprägungen sehr ähnlich zu Cluster 3 jedoch mit geringerer Intensität • Vorkommen korrespondieren gut mit Fließgewässertypisierung gem. OGewV • Cluster-Interpretation kann über Sedimentproben für die Tollense bestätigt werden	Torf
6	• Signalwertausprägungen und räumliches Vorkommen des Clusters sehr ähnlich zu Cluster 1 • Signalwerte an Stützpunkten SP 3 und SP4 von geringerer Intensität gegenüber Cluster 1 • Vorkommen in strömungsarmen Bereichen (Kleiner Jasmunder Bodden)	feiner Sand, Übergang zu Schluff (ggf. Schlick)
7	• Signalwertausprägungen und räumliches Vorkommen des Clusters sehr ähnlich zu den Clustern 1 und 6, jedoch leicht schwächeres Signal • Vorkommen primär am Kleinen Jasmunder Bodden	überwiegend feine Sedimente; ähnlich zu Cluster 1 und 6, nur stärkere Turbulenzen in Wassersäule (→ gestörtes Signal z. B. durch Bootbewegung, Wellenschlag)
8	• Signalwertausprägungen ähnlich zu Cluster 10 im Downscan (800 kHz) und Primary (83 kHz) und ähnlich zu Cluster 1 und 6 im Secondary (200 kHz), jeweils aber von geringerer Intensität • Vorkommen primär am Kleinen Jasmunder Bodden	Signal mit geringerer Echointensität aufgrund stärkerer Absorption und größerer Wassertiefe
9	• sehr niedrige Signalwerte im hochfrequenten Kanal (800 kHz) • sehr geringe Objektanzahl im Cluster (n = 185)	Störung
10	• Signalwertausprägungen sehr ähnlich zu den Clustern 3 und 5, jedoch mit geringerer Signalintensität • Vorkommen primär am Kleinen Jasmunder Bodden in Ufernähe entlang von Geröllufern • lokale Vorkommen in Maurine; kann hier anhand Fließgewässertypisierung gem. OGewV verifiziert werden	raue Oberflächen und härtere Substrate (Geröll, Mergel, Kies)
11	• sehr niedrige Signalwerte, vor allem im hochfrequenten Kanal (800 kHz) • sehr geringe Objektanzahl im Cluster (n = 361)	Störung

stützende Informationen bei der Cluster-Interpretation hinzugezogen werden könnten.

Mit Blick auf die Kartierergebnisse ergeben sich vielfältige Möglichkeiten für deren Weiterverwendung. So ist die Gewässersohle ein wichtiger Parameter zur Einschätzung der Gewässerstruktur und somit auch relevant bei der Bewertung der hydromorphologischen Qualitätskomponente im Rahmen der EG-WRRL. Über die vorgestellte Kartiermethodik lassen sich eine Reihe bewertungsrelevanter Parameter der Gewässerstrukturgütekartierung (LAWA, 1999) erfassen (Sohlensubstrat, Substratdiversität, besondere Sohlstrukturen). Zustand und Beschaffenheit der Gewässersohle sind zudem von großer Bedeutung für die biologischen Qualitätskomponenten. Die vorkommenden Substrate und Strukturen bilden wesentliche abiotische Faktoren zur Ableitung von Biotoptypen (FINCK et al., 2017) und von benthischen Habitaten (GROLL et al., 2016; NOACK et al., 2019). Bei deren flächendeckender Vorhersage standen bislang primär marine Gewässer im Fokus (SCHÖNROCK, 2016; SCHÖNROCK et al., 2020), während entsprechende Untersuchungen für Binnengewässer aufgrund fehlender räumlich kontinuierlicher Informationen zur Gewässersohle kaum vorliegen. Zunehmend wird aber auch bei Binnengewässern die Notwendigkeit gesehen, benthische Habitate flächendeckend zu kartieren. Echolotgestützte Kartierungen der Gewässersohle können dazu erforderliche Datengrundlagen liefern und hochaufgelöste Habitatkartierungen ermöglichen (BUSCOMBE, 2017).

Die hier vorgestellte Kartiermethodik kann somit zur Bewertung der biologischen Qualitätskomponenten gemäß EG-WRRL geeignete Basisinformationen beisteuern und Analysen hinsichtlich der räumlichen Dimensionen schützenswerter Habitate im Sinne der Fauna-Flora-Habitat-Richtlinie (FFH-Richtlinie) ermöglichen. Weiterhin ermöglichen die Daten aber auch die Übertragung

von punktuell erhobenen Daten zur Sedimentqualität (Nähr- und Schadstoffe) auf Flächenwerte und damit bessere Einschätzungen im Hinblick auf gewässerinterne physikalisch-chemische Belastungen (KRÄMER et al., 2016). Finden Befahrungen regelmäßig und/oder ereignisbezogen statt (z. B. nach Hochwassern), dann ermöglichen die Analysen auch Aussagen zur Dynamik von Sohlstrukturen und Sedimenten. Dies eröffnet gerade für die Effizienzkontrolle von Renaturierungen, die Bewertung von gewässerinterner Belastung, aber auch für Gewässerunterhaltungsmaßnahmen ("ordnungsgemäßer Wasserabfluss") gänzlich neue Perspektiven.

Damit bietet die Methodik ein breites Anwendungsspektrum, das sowohl hydromorphologische, als auch ökologisch ausgerichtete Fragestellungen des Gewässerschutzes und der -bewirtschaftung bedienen kann.

Conclusions and Outlook

The analysis of hydroacoustic data recorded in the three surface waters Maurine, Tollense, Kleiner Jasmunder Bodden revealed that the introduced mapping approach enables to differentiate bottom substrates and structures. The derived clusters provided plausible results in terms of their spatial distribution and were substantially interpreted.

Despite an advanced level of development there is need for further improvement of the approach and hence for further research that will include the application of the mapping approach to other waterbodies and types of waterbodies, as well as parallel sampling of validation data. Beside collecting ground truth data like sediment samples and video recordings, a further validation of characteristic hydroacoustic signals by repeatedly surveying locations of waterbodies with distinct and well defined occurrence of bottom substrates is desired. This may enable to examine and specify the potential and limits of the approach concerning its accuracy. A further improvement of the approach may be achieved by using alternative statistical algorithms for grouping the hydroacoustic data or by deriving alternative variables for characterizing the echo sounder signals.

From a technical point of view, the conceptualized mapping method can be embedded into integrated (WIEK et al., 2019) or holistically oriented approaches of waterbody monitoring (WÖFFLER et al., 2016; KUTSCHERA et al., 2018). Such approaches offer effective and comprehensive ways to record spatially referenced data by combining different measurement techniques. This would produce a multitude of metadata, which might provide supplemental information for the cluster interpretation.

The mapping results themselves offer various possibilities of further usage. The bottom of surface waters is an important parameter to describe hydromorphological structures and consequently to evaluate the hydromorphological quality elements within the framework of the EU-WFD. Evaluation-relevant parameters, such as bottom substrates, diversity of substrates or particular bottom structures, are covered by the presented mapping method. Accordingly, the method serves as an adequate tool for hydromorphological structural mappings of waterbodies (the stream habitat survey, LAWA, 1999). The state of the bottom of waterbodies and its' properties are also relevant regarding the biological quality elements of the EU-WFD. Prevalent bottom substrates and structures are principal abiotic factors defining biotope types (FINCK et al., 2017) and benthic habitats (GROLL et al., 2016; NOACK et al., 2019). Previously taken full coverage mappings of benthic habitats primarily focused on marine waters (SCHÖNROCK, 2016; SCHÖNROCK et al., 2019), whereas respective studies barely exist for inland surface waters due to a lack of adequate spatially continuous information, even though there is a rising demand. Hydroacoustic bottom mappings can provide a proper data basis enabling for high resolution habitat mapping of inland waters (BUSCOMBE, 2017).

To this extent, the introduced mapping approach can supply appropriate basic information to assess biological quality elements according to the EU-WFD and furthermore to delineate highly sensitive habitats in accordance with the FFH directive. Additionally, hydroacoustic data allow to transfer locally sampled data on substrate quality (nutrients and pollutants) to spatially full coverage information, which in turn enables assessments regarding physical-chemical contamination of a particular waterbody (KRÄMER et al., 2016). Analyses may also allow a study of dynamic processes of sediments and bottom structures, if mapping campaigns are performed regularly and/or event-related (e.g. after floods). This opens up new opportunities concerning efficiency controls of restoration measures, contamination assessments as well as measures of maintenance (orderly quantity of water flow). Overall, the mapping approach presented in this paper offers a wide range of applications covering hydromorphologically as well as ecologically oriented aspects of water protection and management.

Anmerkung
Das diesem Bericht zugrundeliegende ReWaM-Verbundsprojekt "BOOT-Monitoring" wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Bildung und Forschung (BMBF) unter dem Förderkennzeichen 033W039C gefördert. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autoren.

Anschriften der Verfasser
M.Sc. S. Schönrock
Dr. T. G. Hoffmann
M.Sc. A. Kost
Dr. Dr. D. Mehl
biota – Institut für ökologische Forschung und Planung GmbH
Nebelring 15, 18246 Bützow
postmaster@institut-biota.de

Prof. Dr. K. Miegel
Lehrstuhl Hydrologie und Angewandte Meteorologie
Agrar- und umweltwissenschaftliche Fakultät
Universität Rostock
Satower Straße 48, 18059 Rostock
konrad.miegel@uni-rostock.de

Literaturverzeichnis

AMIRI-SIMKOOEI, A. R., SNELLEN, M. & D. G. SIMONS (2009): Riverbed sediment classification using multi-beam echo-sounder backscatter data. – J. Acoust. Soc. Am. 126 (4), 1724-1738

BACKHAUS, K., ERICHSON, B., PLINKE, W. & R. WEIBER (2011): Multivariate Analysemethoden. Eine anwendungsorientierte Einführung. – 13. Aufl., Springer, Heidelberg, 583 S.

BIOTA (2018): Gewässerentwicklungs- und -pflegeplan (GEPP) Warnow von Eickhof bis Rühn (WRRL-Maßnahmen-ID: WAMU-0200_M07). – biota – Institut für ökologische Forschung und Planung GmbH im Auftrag des Staatlichen Amtes für Landwirtschaft und Umwelt „Mittleres Mecklenburg" (StALU-MM).

BSH (2016): Anleitung zur Kartierung des Meeresboodens mittels hochauflösender Sonare in den deutschen Meeresgebieten. – BSH Nr. 7201, Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie, 30 S. + Anhang.

BUSCOMBE, D. (2017): Shallow water benthic imaging and substrate characterization using recreational-grade sidescan-sonar. – Environmental Modelling & Software 89, 1-19.

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.

CHIVERS, R. C., EMERSON, N. & D. R. BURNS (1990): New acoustic processing for underway survey-ing. – The Hydrographic Journal 56, 9-17.

DEUTSCH, B., HOFFMANN, T. G. & D. MEHL (2019): P-Dynamik und Abschätzung des P-Rückhaltes in Sedimenten von Seen im Einzugsgebiet der Warnow, einem norddeutschen Tieflandfluss. – KW Korrespondenz Wasserwirtschaft 12 (3), 140-147.

DIN EN ISO 14688-1:2018-05: Geotechnische Erkundung und Untersuchung – Benennung, Beschreibung und Klassifizierung von Boden – Teil 1: Benennung und Beschreibung (ISO 14688-1:2017).

DIN EN ISO 14688-2:2018-05: Geotechnische Erkundung und Untersuchung – Benennung, Beschreibung und Klassifizierung von Boden – Teil 2: Grundlagen für Bodenklassifizierungen (ISO 14688-2:2017).

DÖBBELT-GRÜNE, S., HARTMANN, C., ZELLMER, U., REUVERS, C., ZINS, C. & U. KOENZEN (2014): Hydromorphologische Steckbriefe der Fließgewässertypen. – UBA-Texte 43/2014, Umweltbundesamt [Hrsg.], Dessau-Roßlau, 288 S.

DWA-M 525: Sedimentmanagement in Fließgewässern – Grundlagen, Methoden, Fallbeispiele. Merkblatt. – Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e. V. – DWA [Hrsg.], November 2012.

ETTER, P. C. (1996): Underwater Acoustic Modeling. Principles, techniques and applications. – Second Edition, E & FN Spon, London, 344 S.

FINCK, P., HEINZE, S., RATHS, U., RIECKEN, U., & A. SSYMANK (2017): Rote Liste der gefährdeten Biotoptypen Deutschlands. Dritte fortgeschriebene Fassung 2017. – Schriftenr. Naturschutz und Bio-logische Vielfalt 156, Bundesamt für Naturschutz [Hrsg.], Bonn, Bad Godesberg, 583 S. + Anhang.

FFH-Richtlinie: Richtlinie 92/43/EWG des Rates vom 21. Mai 1992 zur Erhaltung der natürlichen Lebens-räume sowie der wildlebenden Pflanzen und Tiere (Flora-Fauna-Habitat-Richtlinie). - (Abl. EG Nr. L 206 S. 7), zuletzt geänd. durch Akte v. 23.09.2003 (Abl. EG Nr. L 236 S. 33).

GROLL, M., THOMAS, A. K., JUNGERMANN, L. & K. SCHÄFER (2016): Typology of Riverbed Structures and Habitats (TRiSHa) – A new method for a high resolution characterization of the spatial distribution and temporal dynamic of riverbed substrates and microhabitats. – Ecological Indicators 61(2), 219-233.

HARRELL, F. E., with contributions from DUPONT, C. and many others (2018): Hmisc: Harrell Miscella-neous. – R package version 4.1-1, URL: https://CRAN.R-project.org/package=Hmisc

HELM, B., WIEK, S., KARRASCH, P., HUNGER, S., KUHN, K., SIX, A. & P. KREBS (2016): Das Projekt Boot-Monitoring: Entwicklung eines Messsystems für die räumlich kontinuierliche Erfassung von Hydrometrie, Morphometrie und Wasserqualität zur Bewertung der Gewässergüte. In: Stamm, J.; Graw, K.-U. [Hrsg.]: Gewässerentwicklung & Hochwasserrisikomanagement – Synergien, Konflikte und Lösungen aus EU-WRRL und EU-HWRM-RL. – Dresdner Wasserbauliche Mitteilungen, Heft 57 zum 39. Dresdner Wasserbaukolloquium 2016, 03.-04. März 2016, Dresden, 263-274.

HELM, B., WIEK, S., KREBS, P., ENGELS, R., STECKING, M. & F.-W. BOLLE (2017): Die Gewässer lückenlos erfassen. Konzepte und Ansätze für eine durchgängige Aufnahme und Auswertung von Gewässereigenschaften. – Korrespondenz Wasserwirtschaft 10 (4), 203-208.

HENNIG, C. (2015): fpc: Flexible Procedures for Clustering. – R package version 2.1-10, URL: https://CRAN.R-project.org/package=fpc

HILGERT, S., WAGNER, A., KIEMLE, L. & S. FUCHS (2016): Investigation of echo sounding parameters for the characterisation of bottom sediments in a sub-tropical reservoir. – Advances in Oceanography and Limnology 7 (1), 93-105.

HODGES, R. P. (2010): Underwater Acoustics. Analysis, Design and performance of sonar. – John Wiley & Sons, Chichester, UK, 353 s.

ICES (2007): Report of the Working Group on Marine Habitat Mapping (WGMHM). – International Council for the Exploration of the Sea – 17.-20. April 2007, Woods Hole, USA, ICES CM 2007/MHC:07, 129 S.

KAUFMAN, L. & P. J. ROUSSEEUW (1990): Finding Groups in Data: An Introduction to Cluster Analysis. – John Wiley & Sons, Hoboken, New Jersey, 342 S.

KRÄMER, I., NAUSCH, M., MEHL, D., NAUSCH, G. & B. DEUTSCH (2016): Phosphor von der Quelle bis ins Meer. – Wasser und Abfall 9/2016, 18-22.

KUTSCHERA, G., BLANKENBACH, J., BLUT, C., BOLLE, F.-W., EFFKEMANN, C., GAHLAUT, S., HEIN, N., LAGOW, M.-L., SCHÜTTRUMPF, H., SCHWERMANN, R., TABATABAEI, S. & T. WÖFFLER (2018): Monitoring kleiner und mittlerer Fließgewässer mittels bemannter und unbemannter Wasserfahrzeuge – Ergebnisse des Projektes RiverView. – Hydrologie und Wasserbewirtschaftung 62 (6), 423-440.

LAWA (1999): Gewässerstrukturgütekartierung in der Bundesrepublik Deutschland, Verfahren für kleine und mittelgroße Fließgewässer. – Empfehlung, erstellt im Auftrag der Länderarbeitsgemeinschaft Wasser (LAWA), 16 S. + Anhang.

LERCH, R., SESSLER, G. & WOLF, D. (2009): Technische Akustik. Grundlagen und Anwendungen. – Springer, Heidelberg, 949 S.

LfULG (2014): WRRL und FFH in Sachsen – Handlungsanleitung. Maßnahmenplanung zur gemeinsamen Umsetzung der Wasserrahmenrichtlinie (WRRL) und Fauna-Flora-Habitat-Richtlinie (FFH-RL) unter Berücksichtigung des Biotopverbundkonzeptes an einem ausgewählten Beispiel in Sachsen. – Schriftreihe des LfULG 11/2014, Sächsisches Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie, Dresden, 55 S.

LUA NRW (2001): Gewässerstrukturgüte in Nordrhein-Westfalen: Anleitung für die Kartierung mittelgroßer bis großer Fließgewässer. – Landesumweltamt Nordrhein-Westfalen, Essen, 152 S.

LUNG-MV (2005a): Bestandsaufnahme 2004 nach Wasserrahmenrichtlinie in der Flussgebietseinheit Warnow/Peene. Bericht über die Umsetzung der Artikel 5 und 6 der Richtlinie 2000/60/EG. – Landesamt für Umwelt, Naturschutz und Geologie Mecklenburg-Vorpommern, Güstrow, 81 S. + Anhang.

LUNG-MV (2005b): Wasserstände und Durchflüsse 2005 für Pegel Mecklenburg-Vorpommerns aus dem Deutschen Gewässerkundlichen Jahrbuch, Teil Küstengebiet der Ostsee. – Landesamt für Umwelt, Naturschutz und Geologie Mecklenburg-Vorpommern.

LUNG-MV (2019): Online-Pegelportal. – Landesamt für Umwelt, Naturschutz und Geologie Mecklenburg-Vorpommern. URL: http://pegelportal-mv.de/pegel_mv.html

LURTON, X. (2010): An Introduction to Underwater Acoustics. Principles and Applications. – Springer, New York, 680 S.

LURTON, X. & G. LAMARCHE (2015): Backscatter measurements by seafloor-mapping sonars. Guidelines and Recommendations. 200 S., URL: http://geohab.org/wp-content/uploads/2013/02/BWSG-REPORT-MAY2015.pdf

MEHL, D. & V. THIELE (1998): Fließgewässer- und Talraumtypen des Norddeutschen Tieflandes am Beispiel der Naturräume Mecklenburg-Vorpommerns. – Parey Buchverlag im Blackwell Wissen-schaftsverlag, Berlin, 261 S.

MEHL, D., THIELE, V., DEGEN, B. & A. WOLFF (2002): Ökologische Wirkungsanalysen im Zusammenhang mit Bundeswasserstraßenplanungen, 148 S., in: UBA-Texte 02/02: Umweltorientierte Bewertung von Bundeswasserstraßenplanungen. - Forschungsbericht 298 85 106, Umweltbundesamt, UBA-FB 000292 - Umweltforschungsplan des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit.

MEHL, D., KNÜPPEL, M., BLODOW, F. & S. BUNZEL (2018): Optimierung von Bewirtschaftungs- bzw. Renaturierungsmaßnahmen im Einzugsgebiet der Barthe zur Verbesserung des Hochwasserschutzes. – Wasser und Abfall 01-02/2018, 56-62 und Wasser und Abfall 03/2018, 35-40.

NOACK, M., LECHNER, A. & P. PODRAZA (2019): Untersuchungen von Mikrohabitaten und deren Bedeutung für das Makrozoobenthos in zwei renaturierten Mittelgebirgsgewässern. – Korrespondenz Wasserwirtschaft 12(1), 18-23.

OGewV: Verordnung zum Schutz der Oberflächengewässer (Oberflächengewässerverordnung) vom 20. Juni 2016 (BGBl. I Nr. 28 S. 1373).

ORR, H. G., LARGE, A. R. G., NEWSON, M. D. & C. L. WALSH (2008): A predictive typology for charac-terising hydromorphology. – Geomorphology 100, 32-40.

PENNAK, R. W. & J. V. WARD (1986): Interstitial faunal communities of the hyporheic and adjacent ground water biotopes of a Colorado mountain stream. – Arch. Hydrobiol. Suppl. 74 (Mongr. Beitr. 3), 356-398.

R Core Team (2017): R: A language and environment for statistical computing. – R Foundation for Statistical Computing, Wien, URL: https://www.R-project.org/

ReefMaster (2015): ReefMaster v1.8. – ReefMaster Software Ltd., Birdham, URL: https://reefmaster.com.au/reference/index.htm

RStudio Team (2017): RStudio: Integrated Development Environment for R. – RStudio, Inc., Boston, MA, URL: http://www.rstudio.com

SCHLOERKE, J. C., COOK, D., BRIATTE, F., MARBACH, M., THOEN, E., ELBERG, A. & J. LARMA-RANGE (2017): GGally: Extension to 'ggplot2'. R package version 1.3.2. URL: https://CRAN.R-project.org/package=GGally

SCHÖNBORN, W. (1992): Fließgewässerbiologie. – Gustav Fischer Verlag, Stuttgart, 504 S.

SCHÖNROCK, S. (2016): Vergleichende Erprobung prädiktiv-statistischer Verfahren zur flächenhaften Kartierung benthischer Weichbodengemeinschaften in der Ausschließlichen Wirtschaftszone (AWZ) der deutschen Nordsee. – Masterarbeit, Beuth Hochschule für Technik Berlin, Fachbereich III – Bauingenieur- und Geoinformationswesen, 123 S. + Anhang.

SCHÖNROCK, S., SCHUCHARDT, B., BILDSTEIN, T., KREUTLE, A., HEINICKE, K. & R. PESCH (2020): Geostatistical Applications in a Marine Benthic Biological Context. – KRESSE, W. & D. M. DANKO (Hrsg.): Springer Handbook of Geographic Information. [eingereicht].

SCHWOERBEL, J. (1964): Die Bedeutung des Hyporheals für die benthische Lebensgemeinschaft der Fließgewässer. – Verh. Internat. Verein. Limnol. XV, 215-226.

SIWABESSY, J., PENROSE, J., KLOSER, R. & D. FOX (1999): Seabed habitat classification. – Shallow Survey '99 – International Conference on High Resolution Surveys in Shallow Water, Oktober 1999 – Sydney, Australia, 1-9.

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.

UHLMANN, D. (1988): Hydrobiologie. Ein Grundriß für Ingenieure und Naturwissenschaftler. – Gustav Fischer Verlag, Jena, 298 S.

WHG: Gesetz zur Ordnung des Wasserhaushalts (Wasserhaushaltsgesetz - WHG) vom 31. Juli 2009 (BGBl. I S. 2585), das zuletzt durch Artikel 1 des Gesetzes vom 18. Juli 2017 (BGBl. I S. 2771) geändert worden ist.

WICKHAM, H. (2009): ggplot2: Elegant Graphics for Data Analysis – Springer, New York.

WICKHAM, H., FRANÇOIS, R., HENRY, L. & K. MÜLLER (2018): dplyr: A Grammar of Data Manipulation. – R package version 0.7.6, URL: https://CRAN.R-project.org/package=dplyr

WIEK, S. HELM, B., KARRASCH, P. HUNGER, S., HOFFMANN, T. G., SCHÖNROCK, S., KLEHR, W., SIX, A., STÄGLICH, I., KUHN, K., MEHL, D., TRÄNCKNER, J., BERNARD, L. & P. KREBS (2019): Boot-gestütztes längskontinuierliches Monitoring von Fließgewässern mit online-Sonden. – Hydrologie und Wasserbewirtschaftung 63 (1), 19-32.

WILLIAMS, G. J. (2011): Data Mining with Rattle and R: The Art of Excavating Data for Knowledge Discovery, Use R! – Springer, New York, Dordrecht, Heidelberg, London, 374 S.

WÖFFLER, T., ENGELS, R. & H. SCHÜTTRUMPF (2016): RiverView – Eine virtuelle Flussfahrt. – Wasser und Abfall 18 (6), 22-27.

WRRL (Europäische Wasserrahmenrichtlinie): Richtlinie 2000/60/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 23. Oktober 2000 zur Schaffung eines Ordnungsrahmens für Maßnahmen der Gemeinschaft im Bereich der Wasserpolitik, Amtsblatt der EG Nr. L 327/1 vom 22.12.2000.