

Wasser-Land-Grenzen im Ästuarbereich aus S-1-Daten und Validierung mittels UAS, Gelände- und optischen Satellitendaten

BASTIAN GESSLER¹, SILKE MECHERNICH¹, TOBIAS BREHM¹ & BJÖRN BASCHEK¹

Zusammenfassung: Diese Studie des Projektes „Sat-Land-Fluss“ (satellitenbasierte Wasser-Land-Grenzen Bestimmung) untersucht wieweit an der tidebeeinflussten Küste aus Sentinel-1 (S-1) Daten qualitativ nutzbare Wasser-Land-Grenzen (WLGs) abgeleitet werden können. Hierfür wurde eine halb-automatische Kantendetektion durchgeführt. Zur Validierung wurde 2022 die WLG mittels UAV (Unmanned Aerial Vehicle), PDGNSS (Präzises Differentielles Globales Positionierungssystem) und optischen Satellitendaten (BlackSky) bestimmt. Großflächig decken sich die S-1 WLGs mit den Validierungsdaten (Tideniedrigwasser: 76% der Daten liegen innerhalb 70 m). Schmale Gewässer/Priele können ab einer Breite von 60 m zuverlässig detektiert werden. Im Fall von Vegetation unterschätzt die S-1 WLG die Wasserflächen. Diese Ergebnisse zeigen, dass auch an der Küste zeitlich hochaufgelöste WLG-Produkte aus S-1 Daten erstellt werden können.

1 Einleitung und Motivation

Das Projekt „Sat-Land-Fluss“ (satellitenbasierte Wasser-Land-Grenzen Bestimmung) untersucht wieweit aus Sentinel-1 (S-1, Copernicus) Daten valide Wasser-Land-Grenzen (WLGs) an der tidebeeinflussten Küste abgeleitet werden können. Aufgrund der hohen Dynamik der Strömungsverhältnisse und der entsprechend stark ausgeprägten morphologischen Veränderungen, ist ein Monitoring der Küstenregion u.a. für die Schifffahrt und Ökologie von großer Bedeutung. Um im tidebeeinflussten Gebiet einheitliche WLGs zu erhalten, muss die Datenerfassung großflächig und in einem engen Zeitraum erfolgen. Ideal sind somit satellitengestützte Methoden, insbesondere mit Einsatz von Radarsatelliten, da die Daten wetter- sowie beleuchtungsunabhängig sind und bei Verwendung von Copernicus-Daten, d.h. des Sentinel-1, dauerhaft kostenfrei zur Verfügung stehen.

2 Forschungsstand

Laufende Dienste und verschiedene Projekte zeigen die generelle Machbarkeit der WLG-Ableitung aus satellitengestützten Radardaten (GESSLER et al. 2023). Z. B. erstellt der *Copernicus Emergency Management Service* (CEMS) im *Rapid Mapping* bzw. *Risk and Recovery Mapping* u.a. Hochwasserprodukte inklusive WLGs. Beim *Global Flood Monitoring* (GFM, ebenfalls Teil einer Komponente des CEMS) werden automatisiert alle S-1 Szenen ausgewertet und jeweils eine abgeleitete Überflutungsfläche, sowie weitere Informationen wie Ausschlussgebiete und Unsicherheiten in einer Webanwendung visualisiert (EODC 2023). Die ausgewerteten Produkte zeigen aktuell Plausibilitätsfehler bei der Wasserklassifizierung auf trockengefallenen Watt-Flächen auf

¹ Bundesanstalt für Gewässerkunde (BfG), Am Mainzer Tor 1, D-56068 Koblenz, E-Mail: [gessler, mechernich, brehm, baschek]@bafg.de

(Abb. 1). Auch bei anderen Diensten und Produkten fehlt meist die Validierung, so dass die Belastbarkeit der Produkte weitgehend unbekannt und somit die Nutzung für kritische Fragestellungen nur eingeschränkt möglich ist.

Dieser Beitrag untersucht inwieweit S-1 Daten Wasserflächen im Elbe-Ästuar erfassen können und wo die Grenzen bezüglich räumlicher Auflösung und Detektion teilweise überfluteter Vegetation sind. Hierfür sind verlässliche Validierungsdaten unerlässlich, deren Generierung und Auswertung im Folgenden thematisiert werden.

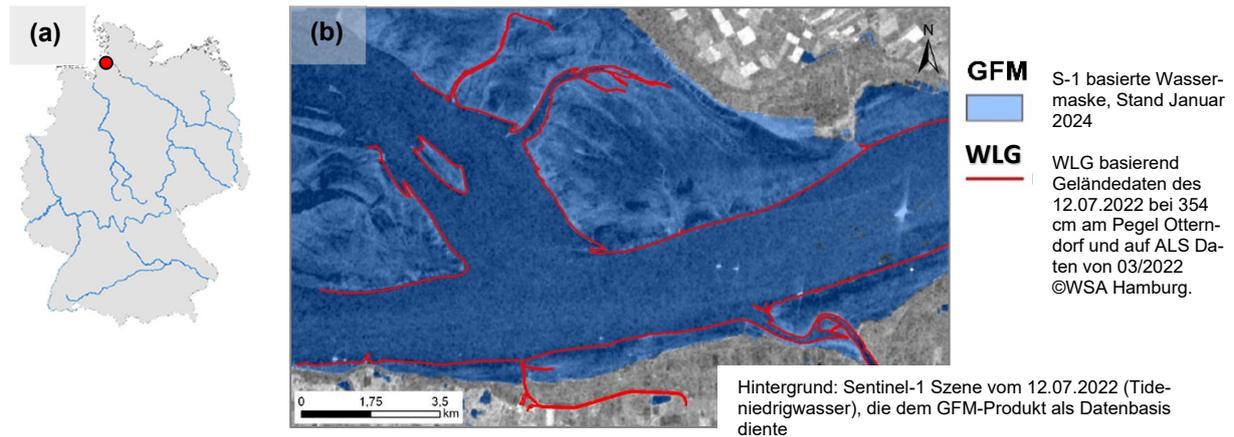


Abb. 1: (a) Deutschlandkarte mit Bundeswasserstraße, (b) Wasserflächen des *Global Flood Mapping* (GFM) Dienstes in blau; sie zeigen eine starke Diskrepanz zu der rot markierten Wasser-Land-Grenze (WLG) der Validierungsdaten.

3 Datengrundlagen

3.1 Sentinel-1

Beim S-1 handelt es sich um einen im C-Band operierenden europäischen Radarsatelliten, der seit 2014 Daten erfasst. Die zeitliche Auflösung der verwendeten S-1A Daten (S-1B ist ausgefallen) liegt in Norddeutschland bei durchschnittlich 6 Tagen. Die räumliche Auflösung beträgt circa 5 x 20 m (ESA 2022). Für weitere Informationen vgl. z.B. GESSLER et al. (2023).

Für diese Studie wurden die VV-polarisierten S-1 Level-1 SLC (*Single Look Complex*) Daten verwendet. Die VH-Daten lassen im Küstenbereich keine Unterscheidung zwischen durchfeuchtem Wattbereich und Wasserflächen zu und wurden darum nicht weiter berücksichtigt. Grundsätzlich eignen sich HH-polarisierte SAR Daten am besten für die Untersuchung von Wasserflächen, da hier der Kontrast zwischen Land- und Wasserflächen am höchsten ist (HENRY et al. 2006), jedoch stehen über Deutschland keine HH-polarisierten S1-Daten zur Verfügung.

3.2 Validierungsdatenerfassung

Um die Qualität automatisch abgeleiteter WLGs aus S-1 Daten beurteilen zu können, wurden in einer Validierungskampagne im Sommer 2022 unabhängige Daten zeitgleich mit S-1 Satellitenüberflügen im Elbeästuar erfasst. Sowohl bei Tideniedrig- als auch Tidehochwasser wurden insbesondere unterschiedlich breite Priele, durchfeuchtete Wattflächen und überflutete Gebiete mit Vegetationsbestand (Schilf) erfasst (Abb. 2, 3).

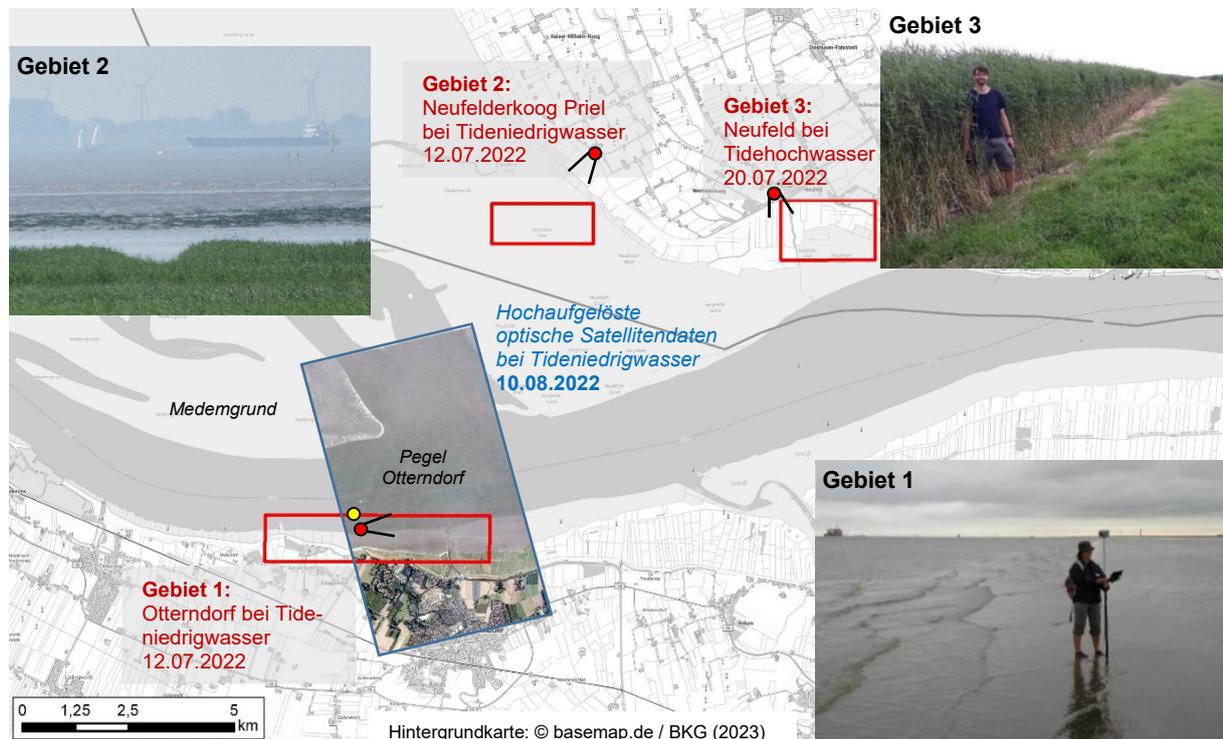


Abb. 2: Elbeästuar (Tideelbe) östlich von Cuxhaven. Die drei Validierungsgebiete sind rot markiert: Gebiet 1: Otterndorf (inkl. Vorschau der verwendeten BlackSky-Satellitendaten), Gebiet 2: Neufelderkoog, Gebiet 3: Neufeld Vegetation (Schilf beginnt 1,5 m unterhalb des Weges)

Vor dem Geländeeinsatz wurden die Zeitpunkte der Datenerfassung durch mehrere für die Fragestellung relevante, prognostizierte Pegelstände während entsprechenden S-1 Überflügen abgestimmt. Insbesondere aufgrund der flachen Topographie der Wattflächen und der tidebedingt stark variablen Wasserstände war das Zeitfenster der Validierungsdatenerfassung auf wenige 10er Minuten um den Zeitpunkt des Satellitenüberfluges beschränkt (Abb. 3). Insgesamt kamen bei den Geländeeinsätzen UAV-basierte RGB-Bilder, terrestrische Erfassungen mit PDGNSS-Rovern, sowie hochaufgelöste optische BlackSky Satellitendaten zeitgleich zu S-1 Überflügen zum Einsatz (Abb. 3). Die UAV-Messungen wurden vom Wasserstraßen- und Schifffahrtsamt (WSA) Hamburg (Gebiet 2, 12.07.2022, Tideniedrigwasser) und der Bundesanstalt für Gewässerkunde (BfG, Gebiete 1 12.07.2022, Tideniedrigwasser und 3 20.07.2022, Tidehochwasser) durchgeführt. Das Erfassungsgebiet wurde um die voraussichtliche Lage der WLG definiert, die aus 4 Monate alten Niedrigwasser-ALS Daten des WSA Hamburg berechnet wurden. Das zu erfassende Gebiet muss groß genug gewählt werden um den tatsächlichen Verlauf der WLG auch zu beinhalten und klein genug, um im zur Verfügung stehenden Zeitrahmen machbar zu sein.

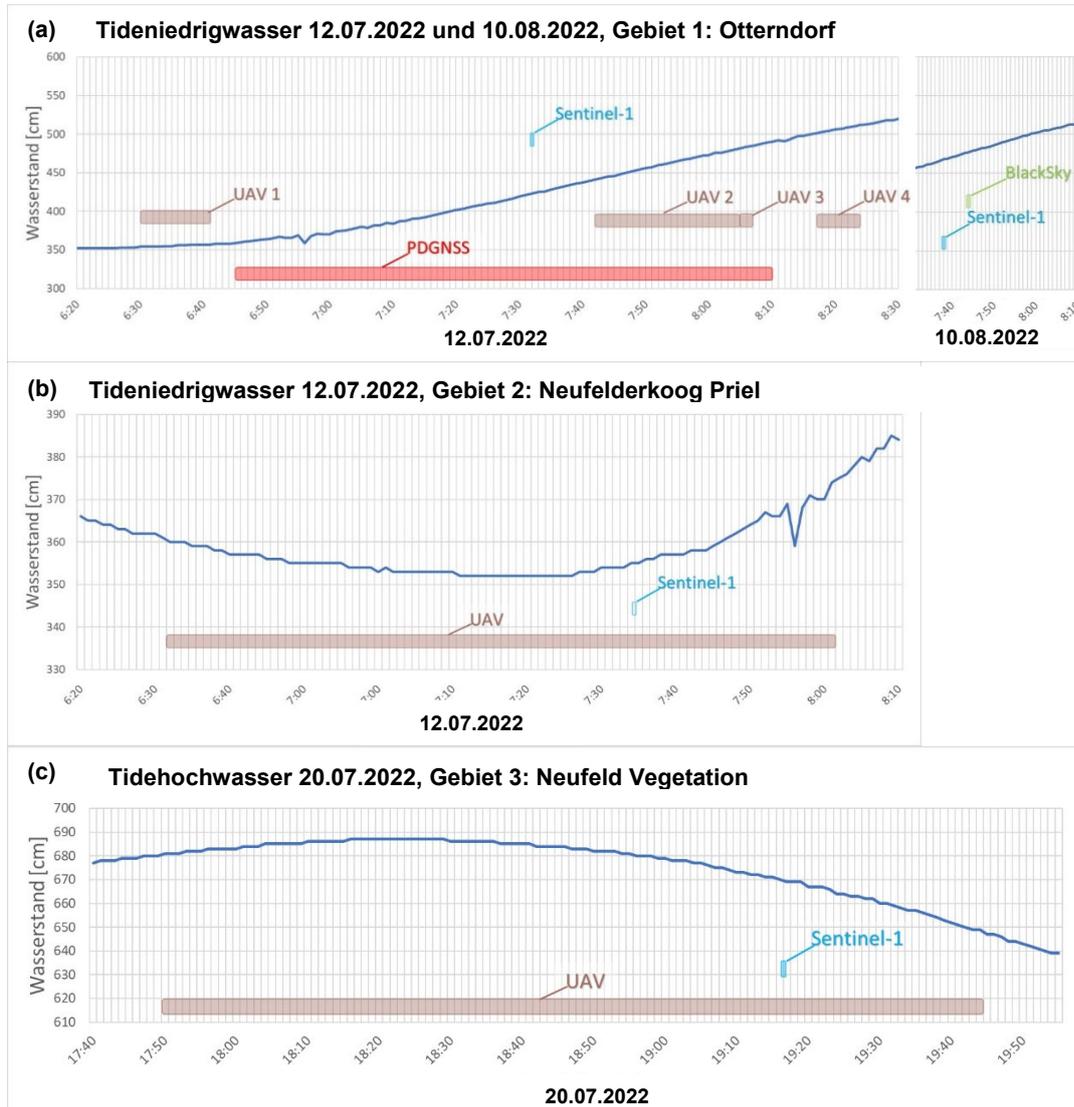


Abb. 3: Wasserstände des Pegel Otterndorf während der Geländearbeiten, sowie die Zeiträume der S-1 Überflüge (hellblau markiert), der UAV-Flüge (braune Kästen), der terrestrischen PDGNSS-Messungen (roter Kasten) und der BlackSky Aufnahme (grün markiert)

Die PDGNSS-Daten wurden ebenfalls im Gebiet Otterndorf am 12.07.2022 (Tideniedrigwasser) erfasst. Dies erfolgte durch Ablaufen der aktuell vorliegenden WLK im Zweierteam und mit Sicherheitspersonal am Strand. Großteils lag Sand vor, auf dem gut gelaufen werden konnte, teils gab es schlickiges Gebiet, so dass auch ein Einsinken bis zu 40 cm das Vorankommen und die Messungen erschwerte. Es wurden die auflaufenden Wellen vermessen und aufgrund der Wellendynamik ist die Lage der WLK grundsätzlich nur bis auf ca. ± 4 m Genauigkeit bestimmbar (Abb. 2 inset zu Gebiet 1). Des Weiteren wurden die optischen Satellitendaten (BlackSky, 10.08.2022) zu einem vergleichbaren Tideniedrigwasserstand per Tasking durch den Satellitengestützten Krisen- und Lagedienst (SKD) erfasst. Im Gebiet 3 bei Neufeld wurden die relevanten Gelände- und

Vegetationsmerkmale per UAV aufgezeichnet. Aus den erfassten UAV-Datensätzen wurde jeweils ein digitales Orthophoto gerechnet und daraus die WLГ abgeleitet (s. Kapitel 4.1).

4 Methodik

Im Folgenden wird die Methodik beschrieben, die für die Ableitung der WLГ aus S-1- und aus den Validierungsdaten eingesetzt wurde.

4.1 Methodik zur WLГ-Ableitung aus Sentinel-1 Daten

Im Rahmen der Studie wurden mehrere Methoden getestet und mussten als unzureichend verworfen werden. Auch diese Punkte werden im Folgenden kurz erläutert bevor die final verwendete Methode beschrieben wird.

Der erste Ansatz war die Ableitung der WLГ aus den S-1 Daten mittels Grenzwertbestimmung der Rückstreuintensität (GESSLER et al. 2023). Diese Methode führte im Elbeästuar jedoch zu keinem nutzbaren Ergebnis, da die Wasserflächen der Elbe größtenteils nicht erkannt werden (Abb. 4). Dies liegt vermutlich daran, dass aufgrund der Wasserrauheit (Wellen) die Radarückstreuung des Wassers in einer ähnlichen Größenordnung wie die Rückstreuung auf Landflächen liegt. Des Weiteren wurde das durchfeuchtete Watt als Wasser klassifiziert (blaue Flächen in Abb. 4).

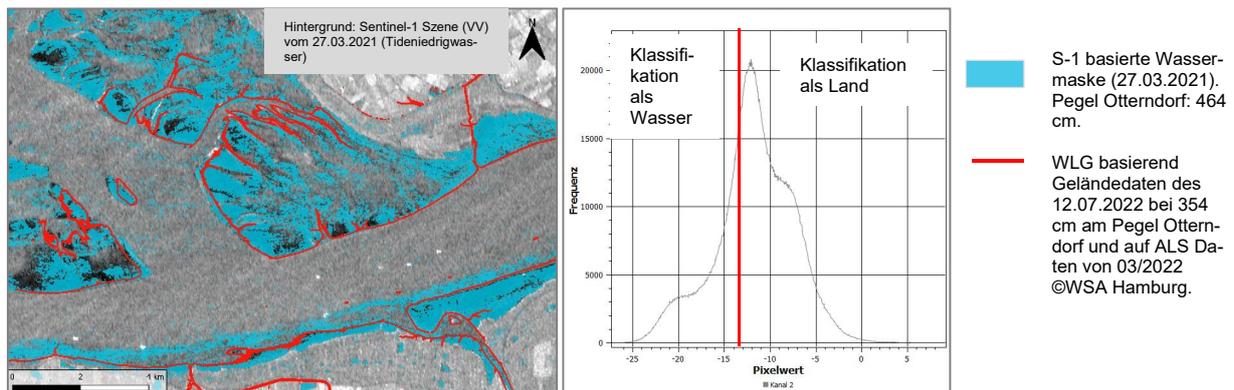


Abb. 4: Qualitativ unzureichendes Ergebnis der WLГ-Ableitung durch Rückstreuintensität. a) S-1 VV Wassermaske vom 27.03.2021 (Tideniedrigwasser) in blau. (b) Histogramm der S-1 Daten und der automatisch bestimmte Grenzwert zur Erstellung der Wassermaske (rot).

Anschließend wurden die dual-polarimetrischen Informationen (polarimetrische Dekomposition) des Satellitensignals untersucht, jedoch ergaben diese Informationen, vermutlich aufgrund des zu geringen Kontrastes zwischen Wasser- und Wattflächen, keinen Mehrwert. Quad-polarimetrische Daten könnten durch ihre höhere Informationsdichte und der Möglichkeit die einzelnen Streumechanismen aufzuspalten Vorteile bei der WLГ-Ableitung erzielen (TSYGANSKAYA et al. 2018), aber sie stehen bei S-1 Daten nicht zu Verfügung.

Zusätzlich wurde versucht den Informationsgehalt durch Verwendung mehrerer S-1-Szenen zu erhöhen. Aufgrund der sich zeitlich schnell verändernden Lage und des komplexen Aufbaus der WLГ waren die Abweichung der jeweiligen WLГ jedoch zu groß um für einen Mehrwert bei der Ableitung einer einzigen WLГ sorgen zu können. Auch externe Zusatzdaten die im Binnenbereich

einen großen Mehrwert haben (GESSLER et al. 2023) konnten hier nicht genutzt werden, da die Topographie sich sehr schnell ändert und gerade diese Änderungen relevant sind.

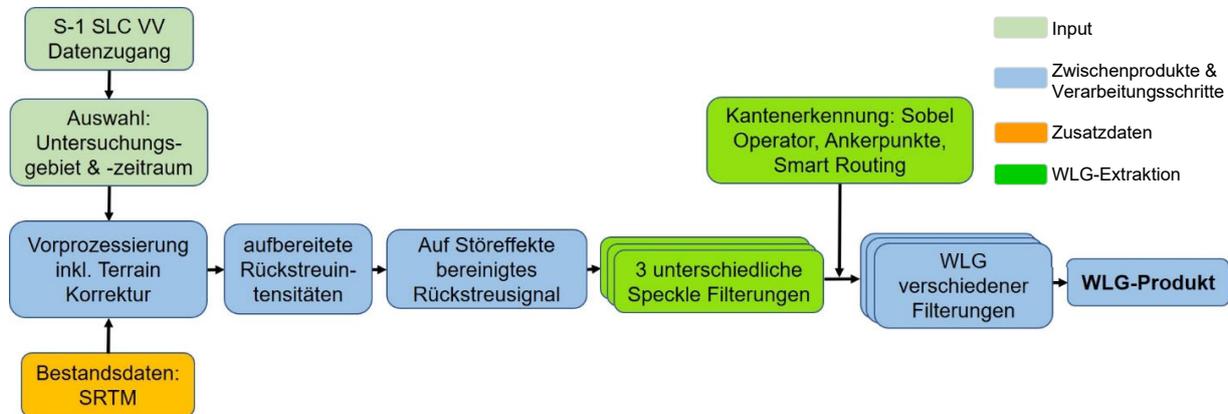


Abb. 5: Darstellung der Methodik zur WLG-Ableitung durch Kantenerkennung.

Die hier verwendete WLG-Ableitung im Küstenbereich stützt sich daher auf eine kontrastbasierte Kantendetektion die im Folgenden vorgestellt wird (Abb. 5). Während der Vorprozessierung der S-1 Daten fließen bei der Geländekorrektur Höheninformationen des SRTM (*Shuttle Radar Topography Mission*) zur Homogenisierung der Daten ein. Zur Reduktion des sogenannten *Speckle*-Effekts finden drei verschiedene Filter Verwendung, die diesen Störeffekt möglichst geringhalten und dabei Objektstrukturen konservieren, um eine spätere Extraktion von Wasserflächen zu optimieren (Abb. 5). Der eingesetzte *Median*-Filter berechnet innerhalb eines vorgegebenen Pixel-Bereichs (hier: 3x3, 11x11, 17x17) den Median des zentralen Pixels für die komplette Satellitenszene. Andere Filter verwenden hierfür weitere statistische Kennwerte, wie z.B. den Mittelwert. Die Kombination der drei Filterlösungen ermöglicht in späteren Arbeitsschritten die Ableitung einer möglichst geschlossenen WLG. Auf jede der gefilterten S-1 Szenen wird anschließend die Kantendetektion angewendet, die in Bereichen starker Änderungen der Rückstreuintensität linienhafte Strukturen extrahiert. Hierfür werden aus der jeweiligen S-1 Szene mithilfe eines *Sobel-Operators* zuerst der Verlauf der Rückstreuintensität-Änderung, die Gradienten, und die Richtung dieser Änderung bestimmt. Es folgt eine Filterung dieser Informationen, um schwach ausgeprägte, vereinzelte Kanten geringer Größe ausschließen zu können, da derartige Strukturen innerhalb der Elbe durch Wellen verursacht werden. Im Anschluss werden besonders markante Punkte in der Gradienten-Karte, sogenannte *Ankerpunkte*, bestimmt. Diese Ankerpunkte dienen anschließend als Startpunkte für einen *Smart-Routing-Prozess*, der diese Punkte miteinander verbindet und den Verlauf der WLG festlegt. Es werden drei unterschiedliche WLG-Versionen erzeugt, die unterschiedliche Konzentrationen von Kantenstrukturen aufweisen und in der Folge miteinander durch Addition kombiniert werden. Falls dabei mindestens zwei der drei WLGs eine WLG andeuten, wird diese als *sicher* klassifiziert. Bei nur einem Treffer wird die Kategorie *unsicher* vergeben. Eine abschließende manuelle Bereinigung entfernt Linienstrukturen, die nicht die WLG darstellen wie z.B. Strukturen innerhalb des trockengefallenen Watts. Die WLGs von Wasserflächen die nicht an den Ästuarbereich angeschlossen sind werden dabei ebenfalls entfernt. Anschließend

sorgt eine manuelle Lückenfüllung für eine durchgängige, auf Konsistenz mit den S-1 Daten geprüfte WLK. Diese Abschnitte werden als *interpoliert* klassifiziert. Der verwendete Ansatz funktioniert somit halb-automatisch.

4.2 Methodik zur WLK-Ableitung aus Validierungsdaten

Für die Ableitung der WLK aus UAV-Bilddaten wird aus den einzelnen Aufnahmen erst ein digitales Orthophoto erzeugt, auf dessen Basis manuell eine WLK abgeleitet wird. Die verändernde Tidesituation während der Flugzeit verändert auch die Position der WLK. Damit ist für die verschiedenen Bereiche des Untersuchungsgebiets je nach Befliegungszeitpunkt von einer leichten systematischen Abweichung auszugehen. Außerdem können von vorbeifahrenden Schiffen ausgelöste Wellen eine Höhe von mehreren Metern (Cuxhaven 2015: maximal 2,42 m Höhe) erreichen, die temporär die WLK um mehrere Meter in Richtung Ufer verschieben (NIEDERSACHSEN PORTS GMBH & CO. KG: 2016). Diese Effekte treten zeitabhängig nicht auf allen Flugstreifen der UAV Befliegung in gleichem Maße auf und erzeugen im zusammengesetzten Orthophoto als auch der davon abgeleiteten WLK teilweise deutliche treppenartige Effekte (Abb. 6c).

Die Erkennbarkeit der Wasser-Land-Grenzen in den Orthophotos ist unterschiedlich gut. Daher wurde ein Qualitätsparameter für die abgeleitete WLK eingeführt der zwischen 3 Kategorien unterscheidet: *sicher*, *ungenau* und *unsicher/interpoliert*. Ist die WLK eindeutig und zweifelsfrei bestimmbar, wird diese als *sicher* kategorisiert. Die Kategorie *ungenau* umfasst WLK-Abschnitte, deren genaue Position, z.B. aufgrund mangelnden Kontrastes, nicht exakt bestimmt werden kann. Wenn die Position der WLK nur mit geringer Genauigkeit bestimmbar ist (z. B. weil die Farben der Flachwasserbereiche sich kaum von denen des Wattbereichs abgrenzen), oder wenn mehrere Verläufe in Frage kommen, werden diese Linien als *unsicher/interpoliert* eingeordnet (Abb. 6b). Die Ableitung und Kategorisierung der WLK aus den optischen BlackSky Satellitendaten wurden analog zur UAV-Auswertung durchgeführt.

Die PDGNSS-Messungen wurden digital aufgezeichnet und weisen eine von der Methodik her hohe Lagegenauigkeit von <5 cm auf. Es wurde ausschließlich die WLK als Abgrenzung zum tiefen Ästuarbereich vermessen, so dass größere mit Wasser bedeckten Bereiche im Watt nicht erfasst wurden (Abb. 6b). Lediglich der Wellengang sorgt für gewisse Schwankungen der Position der WLK, deren Umfang jedoch aufgrund der räumlichen Auflösung der S-1 Daten von 5 x 20 m vernachlässigbar ist. Analog zu den UAV-Daten unterscheidet sich der Wasserstand während der Aufzeichnung der PDGNSS-WLK aufgrund der Messdauer (circa 1 ½ h) (Abb. 3a).

5 Anwendungsbeispiele Küste (Elbeästuar)

Innerhalb des Untersuchungsgebietes wurden drei Validierungsgebiete (Abb. 2) so gewählt, dass möglichst viele Herausforderungen der WLK-Ableitung untersucht werden konnten.

Grundsätzlich ist die relativ niedrige räumliche Auflösung der S-1 Daten (5 x 20 m) bei der Erfassung kleiner Strukturen (z.B. Buhnen) herausfordernd. Außerdem sorgen die sich während der UAV- und PDGNSS-Messungen verändernden Pegelstände (v.a. in Otterndorf) dafür, dass nicht in allen Bereichen die Informationen als Validierungsdaten dienen können.

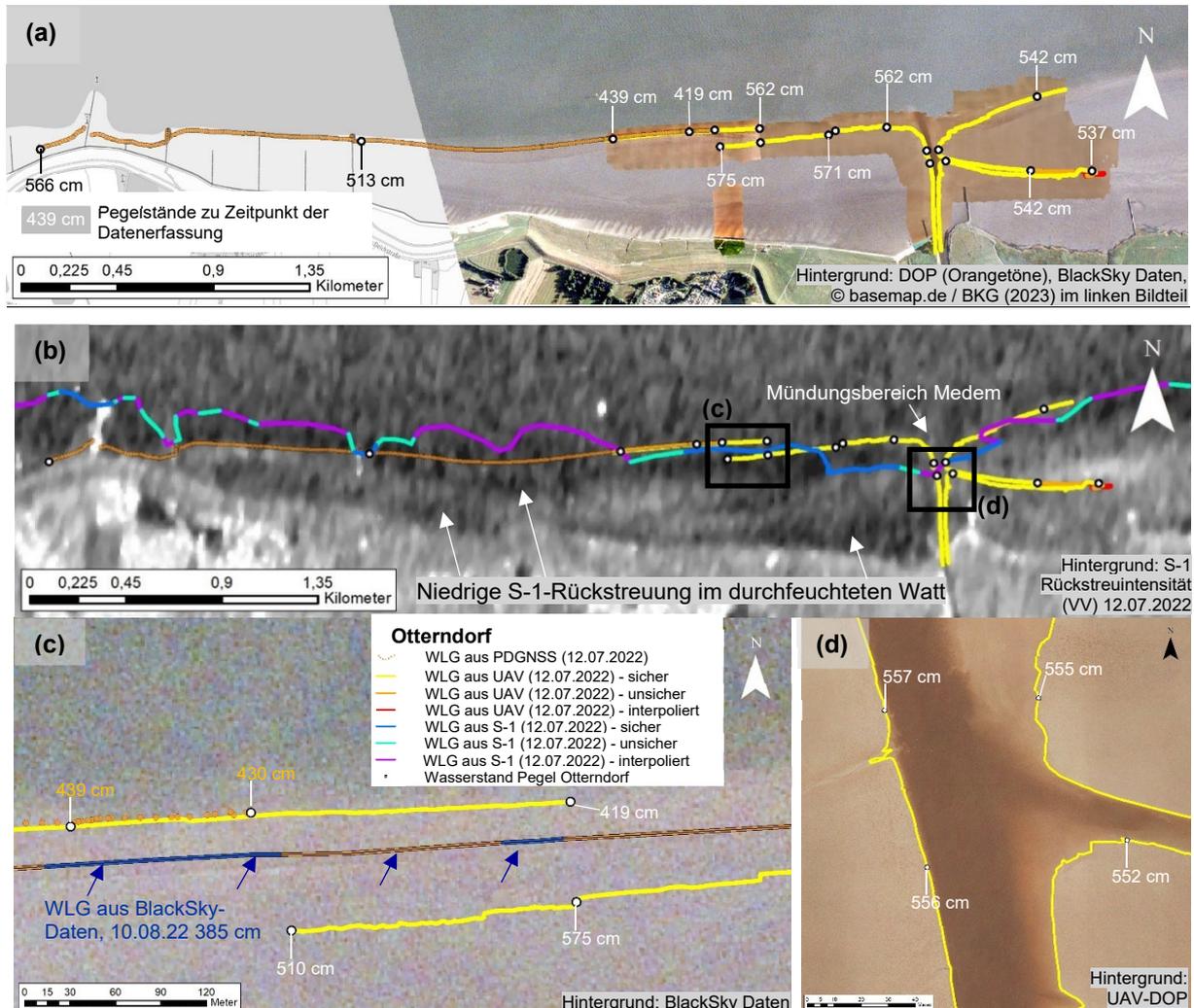


Abb. 6: Ergebnisse der Geländearbeiten in Gebiet 1 (Otterndorf). (a) UAV-basiertes digitales Orthophoto (DOP) des 12.07.2022 und die daraus abgeleitete WLK, sowie die PDGNSS-Messwerte. Sprünge in der WLK sind auf die sich schnell ändernden Wasserstände zurückzuführen (s.a. Abb. 3a). (b) S-1 Szene am 12.07.2022 um 7:33 Uhr. Dunkle Bereiche repräsentieren eine geringe Rückstreuung, helle Bereiche eine hohe Rückstreuung. (c) Detailausschnitt des Überlappungsbereichs zu zwei verschiedenen UAV-Befliegungszeitpunkten sowie mit den PDGNSS-Messungen. (d) Detailausschnitt des UAV-DOP mit abgeleiteter WLK und den jeweiligen Pegelständen

5.1 Tideniedrigwasser

Bei Tideniedrigwasser wurden die Gebiete 1 Otterndorf und 2 Neufelderkoog Priel untersucht (Abb. 6, 7). Zunächst werden jeweils die WLK-Ergebnisse der Validierungsdaten, dann die Ergebnisse der S-1 WLK vorgestellt und anschließend die Übereinstimmungen und Diskrepanzen aufgezeigt.

In **Gebiet 1 (Otterndorf)** waren bei den UAV-basierenden Orthophotos die Kontrastverhältnisse zwischen braunen Wasserflächen und ebenfalls bräunlichen Sand bzw. Schlack herausfordernd für

die Interpretation (Abb. 6a, d). Dies war im süd-östlichen Teil des Untersuchungsgebiets an den Grenzen eines Priels der Falls. Im restlichen Gebiet war die WLK-Bestimmung problemlos möglich. Das Untersuchungsgebiet von UAV Flug 2 wurde bei auflaufendem Wasser von Ost nach West und innerhalb von 11 min befliegen. Dadurch verläuft die WLK im westlichen Teil des Untersuchungsgebiets weiter uferseitig als im östlichen Teil des Gebiets, da während der Zeit der UAV Erfassung der Wasserstand um ca. 20 cm gestiegen ist (Abb. 3, 6).

Dieser Effekt trat analog auch bei der PDGNSS-WLK auf, da diese Messungen vom Startpunkt (Abb. 6c) aus Richtung Westen zu Fuß durchgeführt wurden und der Wasserstand während der Messung kontinuierlich anstieg. Deshalb sind diese Informationen vor allem im Westen des Untersuchungsgebietes nicht vollständig mit der S-1 WLK vergleichbar.

Im Gegensatz dazu erfassen die BlackSky Daten die WLK großflächig und hochaufgelöst bei einem Pegel von 385 cm (Otterndorf). Die Kontrastverhältnisse waren im Umfeld des Medemgrunds äußerst günstig, in Gebiet 1 jedoch unterschiedlich. Der Grenzbereich des Priels im Osten konnte an seinem östlichen Ende mit geringer Sicherheit bestimmt werden. In den restlichen Bereiche wurde die WLK mit wechselnder Sicherheit (sicher, unsicher) bestimmt.

Ein Vergleich zwischen der PDGNSS - und UAV-WLK am Strand von Otterndorf bestätigt jedoch die Plausibilität zwischen der zeitlichen und räumlichen Übereinstimmung beider Messverfahren (Abb. 6a, c). Der Einfluss des Tidenhubs auf die Lage der WLK ist im westlichen Bereich der UAV-WLK zu erkennen, wo ein Lagesprung von 70 m in der UAV-WLK durch einen 156 cm höheren Wasserstand verursacht wurden (Abb. 6c). Die BlackSky-WLK liegt genau zwischen der UAV- und PDGNSS-WLK, obwohl zum Zeitpunkt der Datenerfassung der niedrigste Pegelstand vorherrschend war (Abb. 6c). Vermutlich fanden zwischen den Aufnahmezeitpunkten der BlackSky- und den restlichen Daten morphologische Veränderungen statt.

Die S1-Rückstreuintensität zeigt, dass bei der VV-Polarisierung in der Mitte des Validierungsgebietes zusammenhängende Bereiche relativ niedriger Rückstreuung erkennbar sind (Abb. 6b). Hierbei handelt es sich um etwas tiefer liegende Bereichen in denen knöchelhohes Wasser kartiert wurde, was dafür sorgt, dass ein Großteil des ausgesendeten Radarsignals vom Sensor weg reflektiert wird und nur ein kleiner Teil des Signals über diesen Flächen aufgezeichnet wird. Solche Bereiche erschweren die Ableitung einer durchgängigen S1-WLK.

Der Vergleich zwischen S-1 und den Validierungsdaten in Gebiet 1 zeigt, dass insgesamt die abgeleitete S1-WLK sehr gut zu den Validierungsdaten passt: 76% der Daten weichen um weniger als 70 m ab (Abb. 6b), jedoch treten lokal Abweichungen auf (Abb. 6). Im westlichen Bereich der UAV-WLK werden die Wasserflächen durch die S-1 WLK bis zu 60 m überschätzt, noch weiter westlich kommt es im Vergleich mit den PDGNSS-Daten zu noch größeren Unterschätzungen (bis maximal 300 m) (Abb. 6).

Der Vergleich der jeweils abgeleiteten WLKs zeigt in Abb. 6b, dass im Bereich der Mündung der Medem die S-1 WLK den Mündungsbereich und einen von dort circa 700 m flussaufwärts befindlichen Abschnitt von etwa 23-78 m Durchmesser nicht erfassen kann. Wellen und die räumliche Auflösung des S-1 könnten eine Ursache dafür sein. Östlich der Medem-Mündung wird ein 19-50 m breiter Priel in der S-1 WLK, aufgrund der räumlichen Auflösung, nicht abgeleitet. Am Strandbereich, westlich der Medem-Mündung, wurden die Wasserflächen von der S1-WLK, aufgrund niedrigen Kontrastes, unterschätzt (Abb. 6b). In einem etwa 900 m langem Bereich weiter westlich

sind beide WLGs ähnlich positioniert, vereinzelt weichen sie circa 20 m ab. Am westlichen Ende der UAV-Erfassung (Abb. 6b) weist die S-1 WLG wegen extrem ungünstiger Kontrastverhältnisse Abweichungen von bis zu 220 m auf. Im Gebiet östlich der Medem-Mündung, wo Zeitpunkt der Satellitenaufnahme und der UAV-Erfassung gut übereinstimmen, ist die räumlich Übereinstimmung beider Datensätze größer (Abb. 6b). Auf einer Strecke von circa 400 m kommt es bei beiden WLGs zu maximal 8 m Abweichung. Die S-1 Daten lassen erkennen (Abb. 6b), dass hier günstigere Bedingungen zur Unterscheidung zwischen Watt- und Wasserflächen herrschten. Ursachen könnten lokal günstigere Windbedingungen oder Schiffswellen sein.

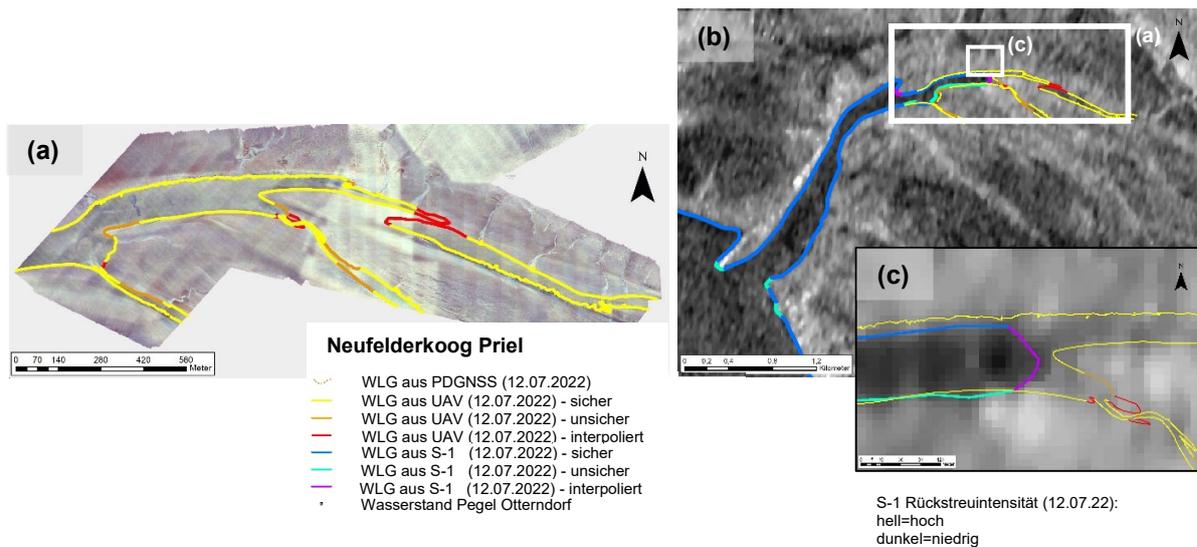


Abb. 7: Ergebnisse der WLG-Ableitungen in Gebiet 2 (Neufelderkoog Priel). S-1 des 12.07.2022 um 7:33 Uhr. (a) Abgeleitete S-1 WLG und UAV-WLG vor den S-1 VV-Rückstreuintensitäten, (b) Detailansicht, (c) UAV-DOP des 12.07.2022 gegen 7 Uhr morgens und die daraus abgeleitete WLG

Im **Gebiet 2 (Neufelderkoog Priel)** wurde das Auflösungspotential der S-1 Daten anhand von unterschiedlich breiten Prielen analysiert (Abb. 7). Im Prielbereich sind die Kontrastverhältnisse in den UAV-Daten mit einheitlichen Grau- und Brauntöne niedrig (Abb. 7a), was die Bestimmung der UAV-WLG erschwert (Abb. 7c). Dennoch dominieren hier die Klassen *sicher* und nur in manchen Bereichen *unsicher* und *interpoliert*. Der Vergleich mit der zeitgleich aufgenommenen S-1 WLG ergab, dass der Haupt-Priel mit einer Breite von circa 100-110 m deutlich zu erkennen ist (Abb. 7b, c). Priel-Strukturen von circa 60 m Breite sind in den S-1 Daten noch erkennbar, jedoch war im Untersuchungsgebiet das Kontrastverhältnis geringer als bei dem größeren Priel. Kleinere Priele von unter 45 m Breite sind nicht mehr ableitbar (Abb. 7b, c).

5.2 Tidehochwasser

Im Gebiet 3 Neufeld wurden während Tidehochwasser verschiedene Gelände- und Vegetationskriterien untersucht. Dies waren (i) bis zu ~4 m hohes dichtes Schilf auf trockenem Boden (Abb. 2), (ii) hohes dichtes Schilf auf überschwemmtem Boden, (iii) spärliches Schilf auf überschwemmten Boden und (iv) Kanäle durch das Schilf (Abb. 8). Der Bereich des dichten Schilfs (i und ii)

wirkte in den UAV und S-1 Daten identisch. Es konnte nicht detektiert werden, dass dort teilweise Wasser stand (Abb. 8).

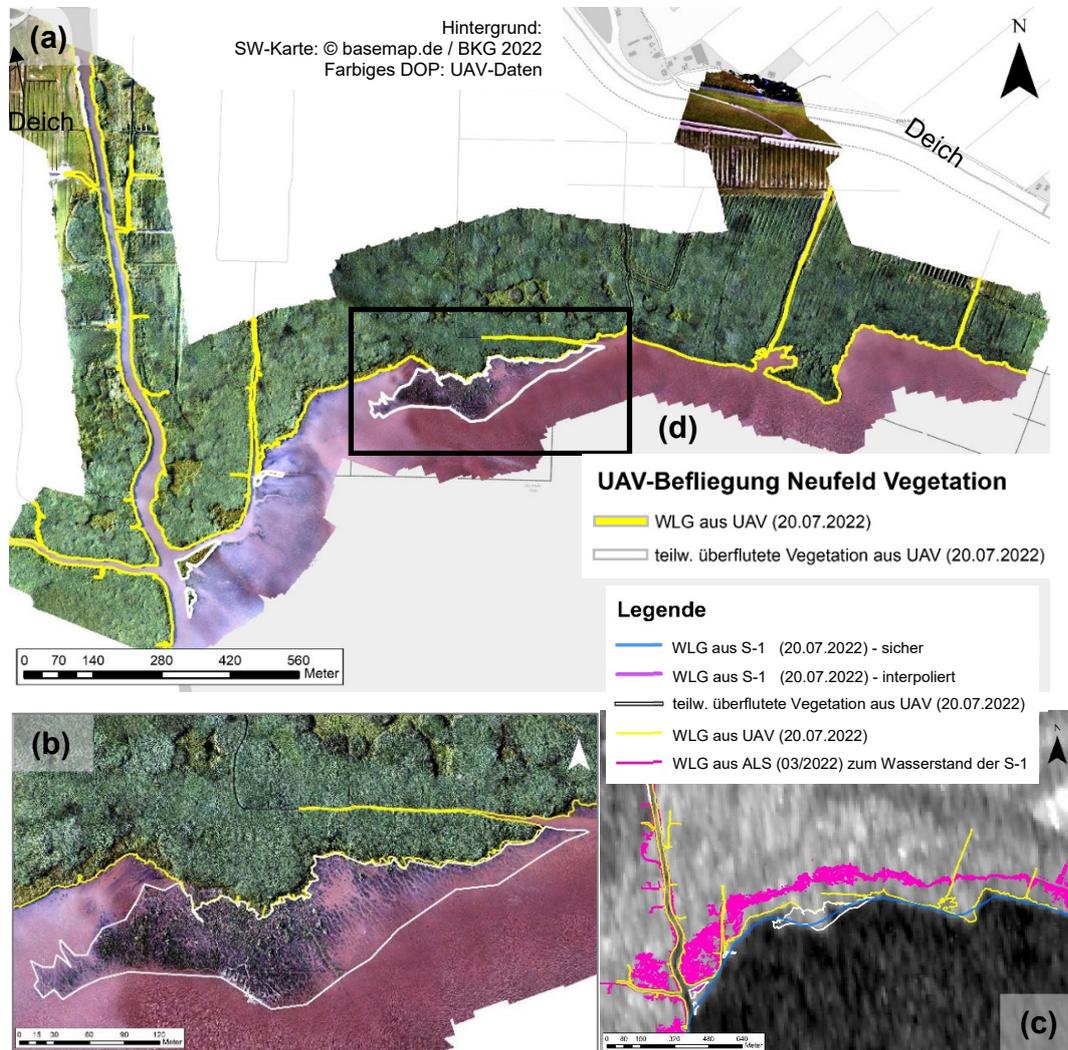


Abb. 8: Ergebnisse in Gebiet 3 bei Neufeld. (a) UAV-DOP des 20.07.2022 gegen 19 Uhr abends. (b) Detaillierter Einblicke aus den UAV-Bildern zur überfluteten Vegetation. (c) S-1 Szene am 20.07.2022 19:17 Uhr, mit abgeleiteter WLG aus der UAV-Befliegung

In den Bereichen mit niedriger Vegetationsdichte (iii) ist in den UAV-Daten klar erkennbar, dass der Boden wasserbedeckt ist (weiße Bereiche in Abb. 8). Diese Bereiche korrelieren mit einer hohen S-1 Rückstreuintensität, die der angrenzenden dichten Vegetation entspricht (Abb. 8c). Die Flutungsgebiete werden in der S-1 WLG deshalb fälschlicherweise als Landflächen klassifiziert. An der Vegetationsgrenze ist erkennbar, dass die UAV WLG und die S-1 WLG um circa 40 m in Nordwest-Südost-Richtung abweichen (Abb. 8c). Es wird vermutet, dass aufgrund der niedrigeren räumlichen Auflösung des S-1 und durch die physikalischen Bedingungen der Radarwellen die S-1 WLG die Schilfgebiete überschätzt.

Bei Kanälen zwischen dem Schilf, konnte erst ab einer Breite von mindestens 40 m eine WLГ aus den S-1 Daten abgeleitet werden.

6 Fazit & Ausblick

Erst die hochwertigen Geländedaten ermöglichen es die Stärken und Schwächen der WLГ-Bestimmung durch S-1 Daten beurteilen zu können. Die Ableitung einer nutzbaren WLГ durch S-1 Daten ist im Tideästuar möglich. Dabei eignen sich die S-1 Daten vor allem in Bereichen, die von deutlichen Kontrastverhältnissen (idealerweise kaum Wellen) gekennzeichnet sind, zur Erfassung großflächiger Wasserflächen. Die Priele und die Flusseinmündung zeigen, dass Fließrinnen ab 60 m Breite verlässlich erfasst und Wasserbereiche, die schmaler als 45 m sind nicht mehr aufgelöst werden können.

Überflutete Vegetation konnte durch die S-1 Daten nicht detektiert werden, auch nicht, wenn sie nur ~10% der Fläche ausmachte. Sie wurde als Landfläche erkannt und es kommt zudem zu einer Lageverschiebung der WLГ von ca. 30 m im Satellitenrichtung aufgrund des schrägen Radareinfallwinkels und physikalischen Bedingungen der Radarwellen.

Während Tideniedrigwasser liegt auf den Wattflächen der Großteil (76 %) der S1-WLГ im Bereich von ± 70 m der Validierungs-WLГ. Lokal kommt es zu Abweichungen zwischen 60 m bis vereinzelt 300 m. Dabei werden in der S-1 WLГ die Wasserflächen des Sat-Land-Fluss Algorithmus meistens unterschätzt, vermutlich durch relativ starke Wellen (hohe Rauigkeit).

Diese Fallstudie zeigt somit, dass an der Küste zeitlich hochaufgelöste WLГ-Produkte durch einen halb-automatischen Ansatz aus S-1 Daten erstellt werden können. Die erreichte Lagegenauigkeit ermöglicht die Produktweiterentwicklung für verschiedene Anwendungsfälle. Z.B. benötigen mehrere Bundes- und Landesbehörden eine aktuelle Kenntnis der Dynamik der Ästuarie, die Detektion von Änderungshotspots sowie eine Grundlage zur Validierung für hydraulische Modelle.

7 Danksagung

Wir bedanken uns für die Förderung des Projektes „Sat-Land-Fluss“ (Förderkennzeichen 50EW2015) in der Förderrichtlinie „Entwicklung und Implementierungsvorbereitung von Copernicus Diensten für den öffentlichen Bedarf in Deutschland“, durch das Bundesministerium für Digitales und Verkehr (BMDV) und den Projektträger des Deutschen Zentrums für Luft und Raumfahrt (DLR). Des Weiteren bedanken wir uns beim WSA Hamburg für die UAV-Aufnahmen bei Neufelderkoog.

8 Literaturverzeichnis

EODC, 2023: Global Flood Monitoring Portal. <https://portal.gfm.eodc.eu/>, letzter Zugriff 05.01.2023.

ESA, 2022: Geographical Coverage. <https://sentinels.copernicus.eu/web/sentinel/missions/sentinel-1/satellite-description/geographical-coverage>, letzter Zugriff 29.12.23.

- GESSLER, B., MECHNERNICH, S. & BASCHEK, B., 2023: Detektion großräumiger Niedrigwassersituationen durch satellitenbasierte Wasser-Land-Grenzen-Bestimmung („Sat Land-Fluss“). 43. Wissenschaftlich-Technische Jahrestagung der DGPF in München – Publikationen der DGPF, **31**, 263-275, https://www.dgpf.de/src/tagung/jt2023/proceedings/paper/18_dgpf2023_Gessler_et_al.pdf, letzter Zugriff 30.01.24.
- HENRY, J.-B. , CHASTANET, P., FELLAH, K. & DESNOS, Y.-L., 2006: Envisat multi-polarized ASAR data for flood mapping, International Journal of Remote Sensing, **27**(10), 1921-1929, <https://doi.org/10.1080/01431160500486724>.
- NIEDERSACHSEN PORTS GMBH & CO. KG 2016: Liegeplatz 9.4 Cuxhaven – Ermittlung schiffserzeugter Belastungen, IMP-Bericht Nr. 341, 1-66, Quelle: https://www.nlwkn.niedersachsen.de/download/104581/Anlage_5_-_Schwall-_und_Sunkmessungen_am_Liegeplatz_9.4.pdf, letzter Zugriff 24.01.24.
- TSYGANSKAYA, V., MARTINIS, S., MARZAHN, P. & LUDWIG, R., 2018: SAR-based detection of flooded vegetation – a review of characteristics and approaches. International Journal of Remote Sensing, **39**(8), 2255-2293, <https://doi.org/10.1080/01431161.2017.1420938>.