

Bericht

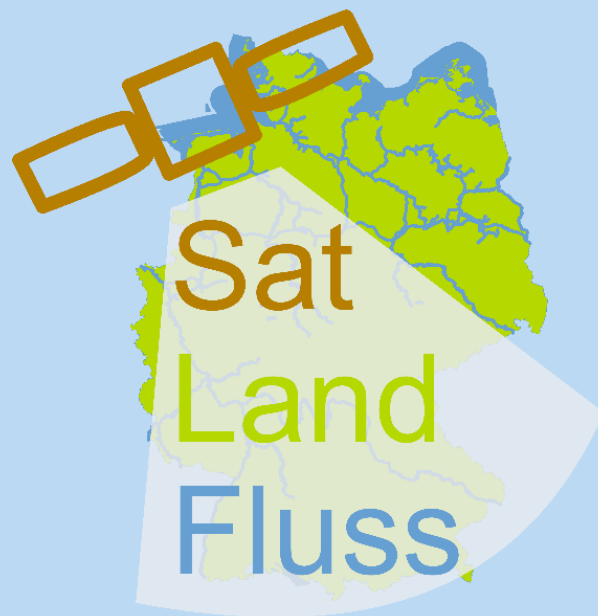
# Satellitenbasierte Wasser- Land-Grenzen Bestimmung (Sat-Land-Fluss) Schlussbericht

---

28.01.2025  
BfG-2203

Dr. Silke Mechernich

Bastian Gessler



**BfG** Bundesanstalt für  
Gewässerkunde



---

Bericht

# Satellitenbasierte Wasser-Land-Grenzen Bestimmung (Sat-Land-Fluss) Schlussbericht

---

**Kurztitel** Sat-Land-Fluss

---

**Autoren /-innen** Mechernich, Silke; Gessler, Bastian  
**Bundesanstalt für Gewässerkunde**  
*Referat Geodäsie und Fernerkundung*

---

**Projektträger** Raumfahrtmanagement des Deutschen Zentrums für Luft und Raumfahrt,  
i.A. Bundesministerium für Digitales und Verkehr

Förderprogramm: Entwicklung und Implementierungsvorbereitung von Copernicus Diensten für den öffentlichen Bedarf in Deutschland, 4. Bekanntmachung: Nationale Copernicus Nutzung  
Förderkennzeichen: 50EW2015  
Laufzeit des Vorhabens: 01.11.2020 bis 30.04.2024

---

**Projekt-Nummer** M39610504152

**BfG-Nummer** BfG-2203

---

**DOI** **10.5675/BfG-2203**

Gefördert durch:



Bundesministerium  
für Digitales  
und Verkehr

aufgrund eines Beschlusses  
des Deutschen Bundestages

---

# Impressum

---

**Herausgeber** Bundesanstalt für Gewässerkunde  
Am Mainzer Tor  
56068 Koblenz

Telefon +49 261 1306-0  
Telefax +49 261 1306-5302

E-Mail [posteingang@bafg.de](mailto:posteingang@bafg.de)  
Internet [www.bafg.de](http://www.bafg.de)

---

**Weitere Beteiligte** Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie  
Bundesamt für Bevölkerungsschutz und Krisenmanagement  
Bundesamt für Kartographie und Geodäsie  
Bundesanstalt für Wasserbau  
Wasserstraßen- und Schifffahrtsamt Elbe-Nordsee

BfG Koblenz, Referat Geodäsie und Fernerkundung:  
Artz, Thomas; Baschek, Björn; Brehm, Tobias; Schumann, Lars; Weiß, Robert

BfG Koblenz, Referat Gewässermorphologie, Sedimentdynamik und -management:  
Reiss, Marcel; Winterscheidt, Axel

BfG Koblenz, Wasserhaushalt, Vorhersagen und Prognosen:  
Ebner von Eschenbach, Anna

BfG Koblenz, Vegetationskunde, Landschaftspflege:  
Weber, Arnd

---

**Zitiervorschlag** Mechernich und Gessler (2025): Satellitenbasierte Wasser-Land-Grenzen Bestimmung (Sat-Land-Fluss). Schlussbericht, 42 Seiten. Bericht der Bundesanstalt für Gewässerkunde BfG-2203, Koblenz. DOI: 10.5675/BfG-2203

---

**Bildnachweis Titelseite** Hennecke, Sonja, *Bundesanstalt für Gewässerkunde, Referat für Geodäsie und Fernerkundung*

---

# Inhaltsverzeichnis

<b>Impressum</b> .....	<b>3</b>
<b>Inhaltsverzeichnis</b> .....	<b>4</b>
<b>1 Kurze Darstellung</b> .....	<b>5</b>
1.1 Aufgabenstellung .....	5
1.2 Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde .....	5
1.3 Planung und Ablauf des Vorhabens .....	6
1.4 Wissenschaftlicher und technischer Stand .....	9
1.4.1 Technische Grundlagen Wasser-Land-Grenzen aus Radarsatellitendaten .....	9
1.4.2 Anwendungsthema „Extremereignisse Binnen“ .....	11
1.4.3 Anwendungsthema „Dynamik im Tidebereich“ .....	11
1.4.4 Verwendete Fachliteratur .....	12
1.5 Zusammenarbeit mit anderen Stellen .....	14
<b>2 Eingehende Darstellung</b> .....	<b>16</b>
2.1 Ziele und Ergebnisse .....	16
2.1.1 AP 0: Projektkoordination .....	16
2.1.2 AP 1: Bestandsaufnahme, Datenaufbereitung, Auswerteworkflow .....	17
2.1.3 AP 2: Validierung vorhandener WLGs .....	20
2.1.4 AP 3: Optimierung der WLG-Ableitung .....	21
2.1.5 AP 4: Validierung optimierter WLGs .....	24
2.1.6 AP 5: Nutzungsszenarien und Umsetzungsstrategien .....	33
2.2 Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises .....	35
2.3 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit .....	35
2.4 Nutzen und Verwertbarkeit des Ergebnisses .....	36
2.5 Bekannt gewordene Fortschritte auf dem Vorhabengebiet während der Durchführung ....	36
2.6 Ergebnisveröffentlichung .....	37
2.6.1 Tagungsband-Beiträge .....	37
2.6.2 Poster (internationale Konferenzen) .....	38
2.6.3 Vorträge (Fachbeiträge und Projektvorstellungen, ohne o.g. Tagungsbandbeiträge) ...	38
2.6.4 Internetveröffentlichungen .....	38
2.6.5 Datenveröffentlichung .....	39
2.6.6 Sonstiges .....	39
<b>Abbildungsverzeichnis</b> .....	<b>40</b>
<b>Tabellenverzeichnis</b> .....	<b>42</b>
<b>Literaturverzeichnis</b> .....	<b>42</b>

# 1 Kurze Darstellung

## 1.1 Aufgabenstellung

Hydrologische Extremereignisse (Hoch- und Niedrigwasser) sowie kontinuierliche Prozesse verändern laufend die Grenze zwischen Wasser und Gelände, die sogenannte Wasser-Land-Grenze (WLG). Deren Erfassung bzw. Monitoring ist eine Basisvoraussetzung zur Bearbeitung vielfältiger öffentlicher Aufgaben im Rahmen des Gewässermanagements, z.B. für die Hochwasservorhersage, Identifizierung von Bereichen hoher morphologischer Veränderungen, optimierter Planung notwendiger Messeinsätze oder Information im Krisenfall. Dazu bietet sich fachlich wie wirtschaftlich der Einsatz satellitengestützter Fernerkundungsverfahren, v.a. die kostenfreien Copernicus-Satelliten Sentinel-1 (Radar) sowie ergänzend Sentinel-2 (optisch) an. Allerdings weisen bisherige WLG-Produkte häufig Datenlücken auf und sind unzureichend validiert. Somit werden fachliche Optimierungen und validierte belastbare Produkte benötigt. Dies soll in diesem Projekt anhand hoch aufgelöster Zusatzinformationen erfolgen. Das Projekt adressiert dabei WLG-Auswertungen zu den Anwendungsthemen „Extremereignisse Binnen“ sowie „Dynamik im Tidebereich“ (durch Strömungen, Gezeiten sowie Sturmfluten). Basierend auf den validierten WLGs wurden gemeinsam mit den Verwertungspartnern in beispielhaften Gebieten Datenprodukte erstellt (z.B. WLG einzelner Zeitpunkte, sowie von einer Niedrigwasserphase).

Vor diesem Hintergrund waren die wesentlichen Projektziele von Sat-Land-Fluss:

- Zusammenstellung vorhandener WLG-Produkte aus Fernerkundungsdaten und Einschätzung der Nutzbarkeit unter Berücksichtigung von räumlicher Auflösung, Genauigkeit und Zuverlässigkeit
- Entwicklung eines prototypischen Workflows für möglichst lückenlose und belastbare WLGs aus Sentinel-1 und Geobasisdaten (u.a. mittels CODE-DE)
- Validierung der optimierten Produkte im Sinne der Anwendungsorientierung und Belastbarkeit
- Erstellung verbesserter und spezialisierter Produkte in Bedarfsgebieten der Verwertungspartner

## 1.2 Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde

Das anwendungsorientierte Projekt „Sat-Land-Fluss“ lief im Rahmen des 4ten Förderaufrufs „Nationale Copernicus Nutzung“ des Raumfahrtmanagement des Deutschen Zentrums für Luft und Raumfahrt (DLR), im Förderprogramm „Entwicklung und Implementierungsvorbereitung von Copernicus Diensten für den öffentlichen Bedarf in Deutschland“. Es wurde vom BMDV unter dem Förderkennzeichen 50EW2015 gefördert und startete im November 2020 mit einer Laufzeit von drei Jahren sowie einer zusätzlichen u.a. corona-bedingten kostenneutralen Verlängerung von sechs Monaten bis Ende April 2024.

Das FuE Projekt wurde an der Bundesanstalt für Gewässerkunde (BfG) durchgeführt. Die BfG ist das interdisziplinäre, wissenschaftliche Institut des Bundes für Forschung, Begutachtung und Beratung zu den Themen Hydrologie, Beschaffenheit, Entwicklung, Ökologie und Schutz der Gewässer im Geschäftsbereich des Bundesministeriums für Digitales und Verkehr (BMDV). Sie berät, forscht und informiert neben dem BMDV auch weitere Ministerien, die Wasserstraßen- und Schifffahrtsverwaltung (WSV), die Länder und Dritte. Die BfG verfügt über ein umfangreiches Fachnetzwerk im Bereich der Gewässerkunde. Insbesondere ist sie in Copernicus und in vielfältigen Gremien wie der (Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft Wasser (LAWA) und Flussgebietsgemeinschaften (FGGs) aktiv. Kontakte des Netzwerkes werden im Rahmen des Projektes einbezogen. Entsprechend konnten die beteiligten

Referate der BfG sowohl die fachlichen Grundlagen als Voraussetzung zur Projektbearbeitung als auch entsprechende Aufgaben an Bundeswasserstraßen für einen Praxistransfer der Ergebnisse einbringen.

Das Referat M5 entwickelt geodätische und fernerkundliche qualitätsgesicherte Methoden zur Erfassung der Gewässer und ihrer Auen und lieferte entsprechende methodische Eingangsvoraussetzung durch Vorarbeiten im Bereich der Fernerkundung. Daten des Verbundprojektes GeoWAM (mFUND Förderung 11/2018-10/2021, BfG als Projektpartner) konnten zur Validierung genutzt werden.

Als Verwertungspartner und als weitergehende anwendungsorientierte Nutzerschnittstellen wurden folgende Institutionen einbezogen. Sie beantragten keine Förderung und haben sich jeweils projektbegleitend mit Stammpersonal eingebacht. Dies waren:

- Die **Bundesanstalt für Wasserbau** (BAW) als die technisch-wissenschaftliche Bundesoberbehörde für verkehrswasserbauliche Forschung, Begutachtung und Beratung der WSV. Der BAW Standort Hamburg (BAW HH) war für die Themen in Küstenbereich involviert, der BAW Standort Karlsruhe (BAW KA) für die Themen im Binnenbereich.
- Das **Bundesamt für Bevölkerungsschutz und Katastrophenhilfe** (BBK) ist im Krisenfall zuständig für die Bereitstellung von Datenprodukten und eine schnelle Kommunikation. Aufgaben sind u.a. die Fachkoordination für den Copernicus Emergency Management Service (CEMS), die Umsetzung des Sendai-Rahmenwerks der UN in Deutschland, zudem ist das Gemeinsame Melde- und Lagezentrum von Bund und Ländern (GMLZ) im BBK angesiedelt.
- Das **Bundesamt für Kartographie und Geodäsie** (BKG) erstellt u.a. länderübergreifende Geodatenprodukte und betreibt den satellitengestützten Krisen- und Lagedienst (SKD), der als Nachfolge Teile des Zentrums für Kriseninformationen (ZKI) übernimmt.
- Das **Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie** (BSH) ist u.a. zuständig für die Sicherheit der Seeschifffahrt, wozu ein Monitoring inkl. z.B. Wrakdetektion gehört, und für die Bereitstellung der aktuellen Küstenlinie.
- Das **Wasserstraßen- und Schifffahrtsamt Elbe-Nordsee** (WSA EN) ist zuständig für den Betrieb und die Unterhaltung eines großen Teils der Tideelbe sowie für die Fahrrinnenanpassung von Unter- und Außenelbe.
- In der **Bundesanstalt für Gewässerkunde** (BfG) finden sich breite Anwendungsthemen in verschiedenen Fachreferaten. Mit folgenden Referaten findet im Projekt Sat-Land-Fluss ein enger Austausch statt:
  - **Referat M2** (BfG/M2) Wasserhaushalt, Vorhersagen und Prognosen betreibt verschiedene HN-Modelle für Vorhersagen sowie Planungsfragen der Gewässererhaltung,
  - **Referat M3** (BfG/M3) Gewässermorphologie, Sedimentdynamik und -management betrachtet u.a. Sedimentverlagerungen mit besonderem Fokus auf Baumaßnahmen,
  - **Referat U3** (BfG/U3) Vegetationskunde, Landschaftspflege betrachtet u.a. die Überflutungsdauer verschiedener Vegetationszonen u.a. an der Binnen und Tideelbe.

Eine Auswahl relevanter und geeigneter Untersuchungsgebiete mit Bezug zu Maßnahmen der BfG bzw. der WSV wurde mit den Verwertungspartnern festgelegt.

Zur Unterstützung der Projektarbeiten war es vorgesehen, Teilleistungen an einen externen Auftragnehmer zu vergeben. Dies betrifft insbesondere die Automatisierung der Vorprozessierung der Satellitendaten auf CODE-DE (Geländekorrektur, Speckle-Filterung u.ä.). In diesem Marktsegment sind vor allem kleine und mittlere Unternehmen (KMU) aktiv, auf deren Expertise aufgebaut werden sollte.

### 1.3 Planung und Ablauf des Vorhabens

Das Vorhaben wurde in Arbeitspakete gegliedert, deren inhaltliche Zusammenfassung und zeitliche Bearbeitung in *Abbildung 1* dargestellt ist. Im Folgenden werden die Arbeitspakete zusammengefasst. Eine



nähere Erläuterung der Methodik und Ergebnisse folgt in Abschnitt 2.1.

Im **AP 0 „Projektkoordination“** wurde neben dem Projektmanagement, Berichtswesen, Fachpräsentationen und Öffentlichkeitsarbeit v.a. auch eine Vergabe zur automatisierten Vorprozessierung von Sentinel-1 Radardaten durchgeführt. Der fachliche Workflow dazu wurde in AP1 generiert.

Durch **AP 1 „Bestandsaufnahme, Datenaufbereitung, Auswerteworkflow“** wurde der aktuelle Stand der Forschung und Entwicklung zu Projektbeginn sowie fortlaufend erfasst und darauf aufbauend die Methodik von Sat-Land-Fluss verfeinert. Auf Basis einer Bedarfsabfrage von Produkten und Schwerpunkten der Arbeitsregionen der Verwertungspartnern wurden die Testarbeitsgebiete festgelegt, d.h. das Mittelrheintal für das Anwendungsthemen „Extremereignisse Binnen“ und das Elbe-Ästuar für „Dynamik für das Anwendungsthemen Tidebereich“. In beiden Gebieten liegt aufgrund der hohen Relevanz eine gute Datengrundlage vor, insbesondere aktuelle Digitale Geländemodelle des Wasserlaufs (DGM-W) und Befliegungsdaten vorangegangener Projekte. Dies ist eine relevante Grundlage für die Validierung der Sat-Land-Fluss (Zwischen-)Produkte.

Wesentlicher Arbeitsschwerpunkt dieses AP 1 lag in dem Aufbau eines Auswerteworkflow der Sentinel-1 Satellitendaten. Hierfür wurde die optimierte Vorprozessierung (Geländekorrektur, Speckle-Filterung u.ä.) der Sentinel-1 Daten erarbeitet um daraus Wassermasken abzuleiten. Hierzu werden veröffentlichte Algorithmen weiterentwickelt und auf die konkreten Bedarfe und auf zusätzlich einbindbare Geobasisdaten angepasst. Diese Algorithmen werden von einer Firma innerhalb einer VM auf CODE-DE implementiert, so dass eine großteils automatisierte Prozessierung ohne Arbeitsspeicherverbrauch innerhalb der BfG möglich ist (Vergabe in AP 0) (Abbildung 2).

In **AP 2 „Validierung vorhandener WLG-Produkte“** wurden Vergleichs- und Validierungskonzepte aufgebaut, basierend auf der statistischen Anzahl insgesamt korrekt und nicht-korrekt klassifizierter Pixel, sowie auf der Sicherheit der WLG-Lagegenauigkeit durch Distanz der abgeleiteten WLG zur Validierungs-WLG. Dieser Validierungsworkflow wurde anschließend auf veröffentlichte WLG-Produkte, auf die ersten Prozessierungen sowie in AP 4 auf die abgeleiteten WLG-(Zwischen-)Produkte in den ausgewählten Nutzungsszenarien und Projektgebieten angewandt.

Nach Fertigstellung des ersten Auswerteworkflows (AP 1) inkl. erster Validierung (AP 2) folgte in AP 3 „Optimierung der WLG-Ableitung“. Im Vordergrund stand algorithmisch die Lückenschließung und Verbesserung der Datenlage in unsicheren Bereichen (v.a. Vegetation, Bebauung). Dies erfolgte durch Einbeziehung von vorhandenen Geobasisdaten (Zusatzdaten) wie der Lage der Fahrrinne, Landnut-

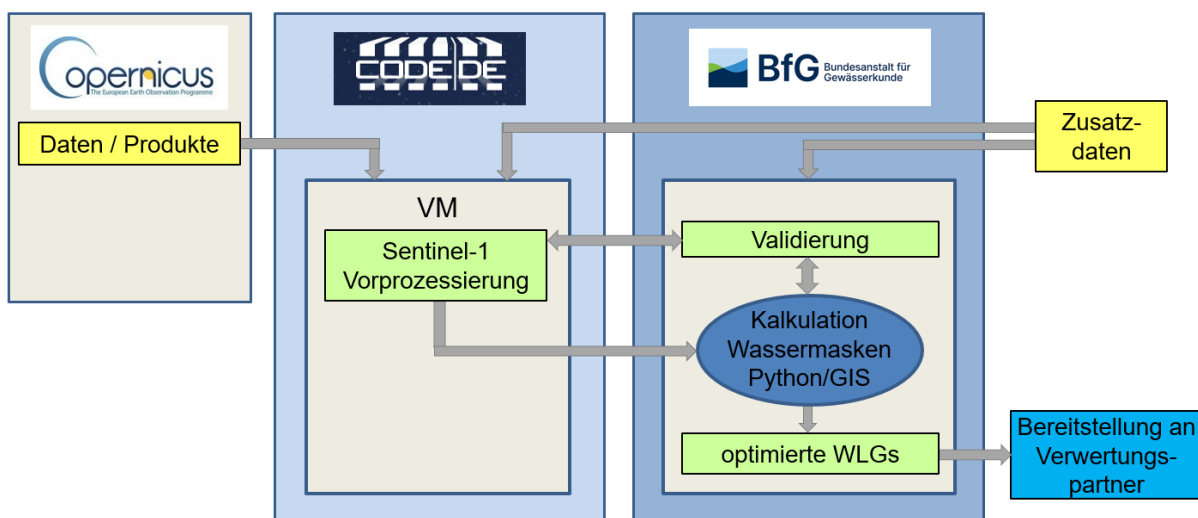


Abbildung 2: Darstellung des Validierungs- und Auswerteworkflows

zungsdaten und hochaufgelösten digitalen Geländemodellen in Kombination mit gemessenen und interpolierten Wasserständen. Die Gewinnbringung der einzelnen Schritte wurde evaluiert. Aus den hierbei berechneten überarbeiteten Wassermasken wird anschließend die WLG erstellt (*Abbildung 2*) und in Korrelation zu dem vorherrschenden Wasserstand und Datum gesetzt (Metadatenerstellung). Die Berechnung erfolgte erst manuell und wurde später schrittweise automatisiert.

Für **AP 4 „Validierung optimierter WLGs“** sofern keine genauen Validierungsdaten vorlagen, wurden **Messkampagnen** parallel zu Sentinel-1 Überflügen durchgeführt um auszuschließen, dass Abweichungen durch andere Faktoren zustande kommen können. Die präzise Validierung der verbesserten Sat-Land-Fluss WLG aus AP 3 erfolgte auf Basis der Ergebnisse der Messkampagnen bzw. vorliegenden Validierungsdaten (*Abbildung 2*). Des Weiteren erfolgte die Entwicklung und Evaluation eines (dauerhaften) Validierungs- und Qualitätssicherungsansatzes mit u.a. dauerhaft verfügbaren Satellitendaten (z.B. Sentinel-2), aktuellen Geländemodellen, Landnutzungsdaten und sonstigen Geobasisdaten.

In dem letzten **AP 5 „Nutzungsszenarien und Umsetzungsstrategien“** wurden teilautomatisierte Auswertungen durchgeführt und die Entwicklung und Erstellung spezifischer Produkte gemeinsam mit den Verwertungspartnern vorangetrieben. Die öffentliche Verbreitung der Ergebnisse erfolgte mittels

- Nationalen und internationaler Konferenz und Workshop-Teilnahme (s.a. AP 0),
- Veröffentlichung von Beiträgen (Homepage, umfassende Konferenzbeiträge)
- Ergebnisbereitstellungen über Gremien (z.B. LAWA, FGGs, Nationales Forum für Fernerkundung und Copernicus, Küstengremien),
- sowie über die Verwertungspartner.

Die Bewertung der Anwendbarkeit der Produkte und die Einbindbarkeit in bestehende bzw. neue Verfahren durch die Verwertungspartner wurde ebenso durchgeführt wie die gemeinsame Entwicklung eines Ansatzes für die weitergehende Nutzung der Ergebnisse des Projektes mit den Verwertungspartnern.

## 1.4 Wissenschaftlicher und technischer Stand

### 1.4.1 Technische Grundlagen Wasser-Land-Grenzen aus Radarsatellitendaten

In den letzten Jahren nahm die Anzahl an Studien, Entwicklungen und Diensten zur Auswertung satellitengestützter Daten zur Wasser-Land-Differenzierung zu (s. Abschnitt 1.4.4). Optische Satellitendaten sind aufgrund von Bewölkung bzw. unzureichenden Lichtverhältnissen oft nicht verlässlich auswertbar. Entsprechend weisen die Radardaten im Vergleich zu optischen Sensoren ein deutliches Potential auf um unabhängig von Tageslicht und Wetter kontinuierliche und detailreichere WLGs zu detektieren (Olt-hof und Tolszczuk-Leclerc, 2018).

Vor allem zur Identifikation von glatten Wasseroberflächen eignen sich die Radardaten (SAR Daten) sehr gut. Meist wird hierbei die Intensität der Rückstreuung genutzt, da eine glatte Wasseroberfläche eine spiegelnde Eigenschaft aufweist, sodass die dazugehörigen Pixel eine sehr geringe Rückstreuung aufzeigen (Martinis et al., 2015). Andere Methoden basieren auf der Untersuchung des Kohärenzwertes, der die Ähnlichkeit der Phase von zwei zeitlich aufeinander folgenden SAR Bildern untersucht (Chini et al., 2019; Li et al., 2019).

Aufgrund der schrägen Aufnahmegeometrie kommt es bei SAR Bildern grundsätzlich zu geometrisch bedingten Abbildungseffekten, wie *Foreshortening*, *Layover* und Abschattung, die durch deutliche Erhebungen und Objekten im Gelände verursacht werden (z.B. Small, 2011). Insbesondere die Abschattung (z.B. durch Steilkanten, Vegetation oder Gebäude) stellt eine Schwierigkeit dar, da in diesem Bereich ähnlich zu Wasserflächen keine Rückstreuung auftritt. In Gebieten mit starker Vegetation oder in urbanen Gebieten kann es zudem zu verstärkten oder Mehrfachreflexionen kommen, so dass die

Gebiete und angrenzende Wasserflächen eine scheinbar deutlich höhere Rückstreuung aufweisen und nicht als wasserbedeckt ausgewiesen werden (*Abbildung 3*, Vegetationsgebiete) (z.B. Notti et al., 2018; Tsyganskaya et al., 2018). Kleine Strukturen, wie z.B. Buhnen, können je nach Blickrichtung des Satelliten, Einfallswinkel der Radarstrahlen bzw. Größe der Objekte nicht immer erfasst werden.

Die Rückstreuereigenschaft von Gewässeroberflächen erhöht sich zudem bei rauen Wasseroberflächen, die durch Strömung oder zunehmende Windstärke und Windexponiertheit entstehen, was besonders im Tidebereich zu beachten ist. Glatte Landoberflächen (z.B. Sandböden, Golfplätze) oder durchfeuchtete Gebiete weisen hingegen erheblich reduzierte Rückstreuungen auf, so dass eine dem Wasser vergleichbare spiegelnde Eigenschaft zu verzeichnen ist (Martinis et al., 2018; Kumar, 2021) (*Abbildung 3*, durchfeuchtete Felder). Um Interpretationsfehler zu vermeiden werden die SAR Daten häufig mit anderen Sensoren, wie optischen Daten, digitalen Gelände- und Oberflächenmodellen kombiniert (Huang et al., 2018; Olthof und Tolszczuk-Leclerc, 2018; Liao und Wen, 2020) oder, falls vorhanden, kann die multitemporale Auswertung von Daten zu einer verbesserten Klassifikation führen (Martinis et al., 2018).

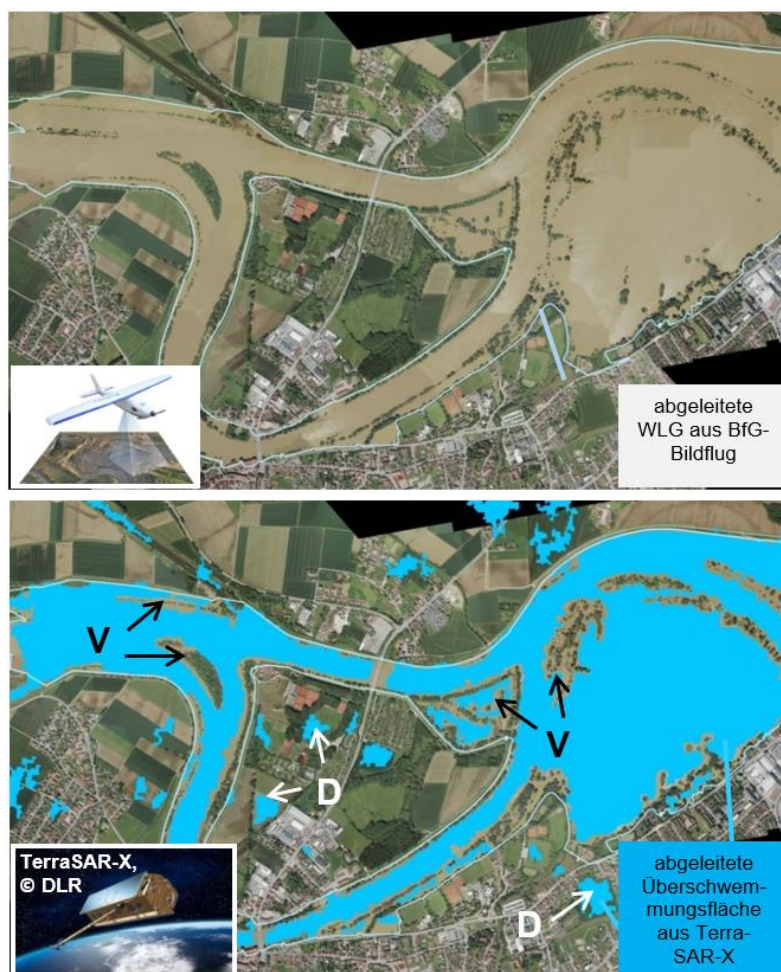


Abbildung 3: Auswertungen des Donau-Hochwassers am Straubinger Bogen im Juni 2013. (a) Orthophoto (©BfG) und abgeleitete scheinelnaher WLK (©BfG) aus dem WSV Bildflug vom 5.6.2013. (b) BfG-Orthophoto aus a) mit Überschwemmungsfläche, die aus TerraSAR-X Daten abgeleitet wurde (4.6.2013, ZKI1). Klar erkennbar sind Unterschätzungen der Überschwemmungsfläche in Vegetationsbereichen (Gebiete V) sowie Überschätzungen in durchfeuchteten Bereichen (Gebiete D).

<sup>1</sup> ZKI: Zentrum für Satellitengestützte Kriseninformation im Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR)

### 1.4.2 Anwendungsthema „Extremereignisse Binnen“

In Deutschland erfolgte zu Projektbeginn für das Anwendungsthema „Extremereignisse Binnen“ eine WLG-Bestimmung nur auf akute Anforderung, z.B. im Fall eines Binnenhochwassers durch die Dienste CEMS bzw. SKD, oder für Hoch- und Niedrigwasserereignisse durch verschiedene Bundes- oder Landesbehörden (u.a. BfG, satelliten- und flugzeuggestützt). Eine Validierung erfolgt nur im Einzelfall auf spezielle Anforderung und meist als Plausibilisierung ohne Hinzuziehen von weiteren Daten wie zusätzlichen Satelliten- oder in-situ-Daten.

Um schnellere Lieferungen zu erreichen wurde durch den CEMS-Dienst ein Konzept entwickelt für ein prophylaktisches Überflutungsmonitoring ausschließlich basierend auf Copernicus Sentinel-1 (TED 2020, Matgen et al., 2020). Während der Projektlaufzeit von Sat-Land-Fluss wurde der Dienst dazu (Global Flood Monitoring, GFM) gestartet und zeigte sich als sehr hilfreich für eine schnelle Gesamtübersicht, wobei Vegetations- und Baugebiete von der Auswertung ausgeschlossen sind (s.a. Abschnitt 2.5).

Hochaufgelöste Zusatzdaten werden somit in den bisherigen und geplanten Diensten zur WLG-Ableitung nicht verwendet, wodurch Bereiche größerer Lücken und Unsicherheiten vorliegen, die die Belastbarkeit der Produkte stark eingrenzt. Durch die oftmals fehlende Validierung ist weitgehend unbekannt wie belastbar die WLG-Produkte sind. Entsprechend können sie in kritischen Fragestellungen nur eingeschränkt genutzt werden. Diese Problematiken wurden u.a. in einem umfassenden Austausch zwischen Datenbereitstellenden und -nutzenden im Rahmen des Bund-Länder-Workshops „Großräumiges Hochwassermonitoring – Möglichkeiten, Grenzen, Chancen der Fernerkundung“ im Dezember 2018, organisiert von BfG, BBK und BKG, aufgezeigt (BfG et al., 2019).

### 1.4.3 Anwendungsthema „Dynamik im Tidebereich“

Das Anwendungsthema „Dynamik im Tidebereich“ hat die besondere Herausforderung von schnellen morphologischen Veränderungen, wie der Verlagerung von Prielen mit sehr variablen Raten von bis zu 50 Metern pro Jahr (Schüller und Hoffstede, 1992; Ricklefs und Asp Neto, 2005).

Aktuell bieten Firmen im Tidebereich eine operationelle WLG-Bestimmung aus Sentinel-2 Daten an. Durch die Verwendung von optischen Daten liegen bei Bewölkung oder mangelnder Beleuchtung keine verwertbaren Daten vor, was größere Datenlücken zur Folge hat. Auch hier besteht Validierungs- und Verbesserungsbedarf, z.B. durch eine Ergänzung mit Radardaten.

Dies wurde von dem abgeschlossenen Projekt EasyGSH-DB<sup>2</sup> aufgegriffen. Hier wurden WLGs aus SAR-Daten abgeleitet und mit modellierten Wasserständen aus HW-Modellierungen verglichen. Diese wurden teilweise bestätigt, teils wurden auch größere Abweichungen festgestellt. Da im Projekt EasyGSH-DB keine generelle Validierung mit unabhängigen Geländedaten durchgeführt wurde, konnten diese Abweichungen nicht weiter bewertet werden.

Das Verbundprojekt GeoWAM (mFUND Förderung 11/2018-10/2021, BfG als Projektpartner) evaluierte die Möglichkeiten der Nutzung von flugzeuggestützter Radartechnik zur topographischen Erfassung von Wattflächen. Sowohl die Rohdaten als auch Produkte (z.B. flugzeugbasierte WLG) stehen dem Projekt Sat-Land-Fluss zur Verfügung, z.B. zum Vergleich mit Satellitendaten und als Basis für methodische Entwicklungen. Im Gegensatz zu Sat-Land-Fluss wurden im Projekt GeoWAM keine satellitengestützten Daten verwendet.

---

<sup>2</sup> <https://mdi-de.baw.de/easygsh/index.html>

Zudem werden zur Beweissicherung im Projekt Elbvertiefung durch das WSA EN regelmäßige präzise Geodaten erfasst und daraus ein DGM-W erstellt, dessen flächige Daten sehr gut für Produktvergleiche (Plausibilitätstests) geeignet sind.

#### 1.4.4 Verwendete Fachliteratur

Während der Antragstellung und im Rahmen des Projektes fanden umfangreiche Recherchen zur Literatur und zur Wissensbasis statt. Als Informationsquellen wurden unter anderem verwendet:

- Datenbanken und Dokumentationen der Fachreferate der BfG,
- eigene Recherchen im Web-of-Science, in ResearchGate und Google Scholar,
- die hauseigene Bibliothek der Bundesanstalt für Gewässerkunde (inkl. Neubestellungen),
- Internetrecherchen und direkte Rückfragen z.B. zu Projekten, Datenbanken, Geobasisdaten
- Hinweise und Erkenntnisse aus Workshops und Konferenzen.

##### 1.4.4.1 Auflistung relevanter Literatur (Auszug)

BfG, BBK, BKG, 2019: Ergebnisdokumentation Bund-Länder-Workshops „Großräumiges Hochwassermonitoring – Möglichkeiten, Grenzen, Chancen der Fernerkundung“ im 05.-06. Dezember 2018; [https://www.bafg.de/SharedDocs/Downloads/DE/Veranstaltungen/2018/2018\\_12\\_05/2018\\_12\\_05\\_ergebnisse.pdf?\\_\\_blob=publicationFile&v=1](https://www.bafg.de/SharedDocs/Downloads/DE/Veranstaltungen/2018/2018_12_05/2018_12_05_ergebnisse.pdf?__blob=publicationFile&v=1).

Büttig, S., Lins, M., Goihl, S., 2022: WaterMaskAnalyzer (WMA) – A User-Friendly Tool to Analyze and Visualize Temporal Dynamics of Inland Water Body Extents. *Remote Sensing* 14(18), 4485; <https://doi.org/10.3390/rs14184485>

Chini, M., Pelich, R., Pulvirenti, L., Pierdicca, N., Hostache, R., Matgen, P., 2019: Sentinel-1 InSAR Coherence to Detect Floodwater in Urban Areas: Houston and Hurricane Harvey as a Test Case. *Remote Sensing* 11(2), 107; <https://doi.org/10.3390/rs11020107>

ESA, 2022: About WorldCover; <https://esa-worldcover.org/en/about/about>, letzter Zugriff am 11.01.2022

Huang, W., DeVries, B., Huang, C., Lang, M.W., Jones, J.W., Creed, I.F., Carroll, M.L., 2018: Automated Extraction of Surface Water Extent from Sentinel-1 Data. *Remote Sensing* 10, 797; <https://doi.org/10.3390/rs10050797>

Kittler, J., Illingworth, J., 1985. On threshold selection using clustering criteria. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, SMC-15 (5), 652-655; <https://doi.org/10.1109/TSMC.1985.6313443>

Kumar, D., 2021: Urban objects detection from C-band synthetic aperture radar (SAR) satellite images through simulating filter properties. *Scientific Reports* 11, 6241; <https://doi.org/10.1038/s41598-021-85121-9>

Li, Y., Martinis, S., Wieland, M., Schläffer, S., Natsuaki, R., 2019: Urban Flood Mapping Using SAR Intensity and Interferometric Coherence via Bayesian Network Fusion. *Remote Sensing* 11, 2231; <https://doi.org/10.3390/rs11192231>

Liao, H.-Y., Wen, T.-H., 2020: Extracting urban water bodies from high-resolution radar images: Measuring the urban surface morphology to control for radar's double-bounce effect. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation* 85, 2020, 102003; <https://doi.org/10.1016/j.jag.2019.102003>

Martinis, S., Kersten, J., Twele A., 2015: A fully automated TerraSAR-X based flood service. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* 104, 203–212; <https://doi.org/10.3390/rs10040583>

Martinis, S., Plank, S.M., Cwik, K., 2018: The use of Sentinel-1 time-Series data to improve flood Monitoring in arid areas. *Remote Sensing*, 10 (582), Seiten 1-13; <https://doi.org/10.3390/rs10040583>

Matgen, P., Martinis, S., Wagner, W., Freeman, V., Zeil, P., McCormick, N., 2020: Feasibility assessment of an automated, global, satellite-based flood monitoring product for the Copernicus Emergency Management Service, EUR 30073 EN, Publications Office of the European Union, Ispra, JRC119812; <https://doi.org/10.2760/653891>

- Nobre, A. D., Cuartas, L. A., Hodnett, M., Rennó, C. D., Rodrigues, G., Silveira, A., Waterloo, M., Saleska, S., 2011: Height Above the Nearest Drainage – a hydrologically relevant new terrain model. *Journal of Hydrology* 404, 13-29; <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2011.03.051>
- Notti, D., Giordan, D., Caló, F.; Pepe, A.; Zucca, F.; Galve, J.P., 2018: Potential and Limitations of Open Satellite Data for Flood Mapping. *Remote Sensing* 10, 1673; <https://doi.org/10.3390/rs10111673>
- Olthof, I., Tolszczuk-Leclerc, S., 2018: Comparing Landsat and RADARSAT for Current and Historical Dynamic Flood Mapping, *Remote Sensing* 10, 780; <https://doi.org/10.3390/rs10050780>
- Peters, S., 2022: Bestimmung morphodynamischer Veränderungen an der deutschen Nordseeküste mithilfe von Synthetischer Apertur Radar Daten, Bachelorarbeit Universität Hamburg, 26 Seiten
- Ricklefs, K., Asp Neto, N.E., 2005: Geology and Morphodynamics of a Tidal Flat Area along the German North Sea Coast. *Die Küste* 69. Heide, Holstein: Boyens., 93-127; <https://henry.baw.de/bitstream/20.500.11970/101522/1/k069104.pdf>
- Schüller, A., Hoffstede, J., 1992: Untersuchungen über die Morphodynamik im Wattgebiet der inneren Deutschen Bucht. Abschlußbericht des KFKI-Projektes MORAN, Teil II. *Die Küste* 53, 277-312; <https://izw.baw.de/die-kueste/0/k053107.pdf>
- Small, D., 2011: Flattening Gamma: Radiometric Terrain Correction for SAR Imagery. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* 49, 3081–3093; <https://doi.org/10.1109/TGRS.2011.2120616>
- TED, 2020, *prior information notice* am 21.2.2020 veröffentlicht; <https://ted.europa.eu/udl?uri=TED:NO-TICE:86466-2020:TEXT:EN:HTML&src=0>
- 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>
- Twele, A., Cao, W., Plank, S., Martinis, S., 2016: Sentinel-1-based flood mapping: a fully automated processing chain. *International Journal of Remote Sensing* 37 (13), 2990-3004; <https://doi.org/10.1080/01431161.2016.1192304>

#### 1.4.4.2 Auflistung relevanter Datenbanken/Webservices/Dienste (Auszug)

##### Geobasisdaten

- Ad-hoc DGM-W für die Abladeoptimierung Mittelrhein, 0,5 m räumliche Auflösung, erstellt durch die Bundesanstalt für Gewässerkunde (BfG), Vorabversion 2023
- DGM-W Außen- und Unterelbe 2022, 1 m räumliche Auflösung, erstellt durch das Wasserstraßen- und Schifffahrtsamt Elbe-Nordsee (WSA EN), verfügbar über das Zentrale Datenmanagement (ZDM) Küstendaten; [https://www.kuestendaten.de/Tideelbe/DE/Service/Kartenthemen/Kartenthemen\\_node.html](https://www.kuestendaten.de/Tideelbe/DE/Service/Kartenthemen/Kartenthemen_node.html)
- Digitales Geländemodell Gitterweite 5 m (DGM5), abgeleitet durch das Bundesamt für Kartographie und Geodäsie (BKG) aus dem DGM1 der Landesvermessungseinrichtungen, <https://gdz.bkg.bund.de/index.php/default/digitales-gelandemodell-gitterweite-5-m-dgm5.html>
- Digitale Bundeswasserstraßenkarte 1:2000 (DBWK2), von der Wasserstraßen und Schifffahrtsverwaltung des Bundes (WSV) (hieraus wurde z.B. die Lage der Fahrrinne extrahiert); <https://metadaten.geoportal-bw.de/geonetwork/srv/api/records/5f187011-491f-43fa-9b95-d0636614bf81>
- EasyGSH-DB Projektdatenbank zum mFUND-Projekt „Erstellung anwendungsorientierter synoptischer Referenzdaten zur Geomorphologie, Sedimentologie und Hydrodynamik in der Deutschen Bucht“; <https://mdi-de.baw.de/easygsh/index.html>
- ESA WorldCover 2020, erstellt durch die Europäische Weltraumorganisation (ESA), globale Landnutzung in 10 m räumliche Auflösung für 2020, basierend auf Sentinel-1 und 2 Daten (ESA, 2022); <https://worldcover2020.esa.int/download>
- TrilaWatt: mFUND-Projekt „Digitaler hydromorphologischer Zwilling des trilateralen Wattenmeeres“, inkl. öffentlichen Datenprodukten und Datenviewer; <https://trilawatt.eu/>

## Wasserstände

- Pegelonline: Wasserstände von Pegeln der Bundeswasserstraßen der letzten 30 Tage, veröffentlicht von der WSV; [www.pegelonline.wsv.de](http://www.pegelonline.wsv.de)
- ELWIS: Wasserstände an Pegeln der Bundeswasserstraßen der letzten ca. 6 Tage inkl. Vorhersage, veröffentlicht von der WSV; <https://www.elwis.de/DE/dynamisch/Wasserstaende/View>
- Wasserstandsvorhersage des Bundesamts für Seeschifffahrt und Hydrographie (BSH) an der Nordsee; [https://www.bsh.de/DE/DATEN/Vorhersagen/Wasserstand\\_Nordsee/wasserstand\\_nordsee\\_node.html](https://www.bsh.de/DE/DATEN/Vorhersagen/Wasserstand_Nordsee/wasserstand_nordsee_node.html)

## WLG-Kartierung

- Global Flood Monitoring Portal, Karten: <https://portal.gfm.eodc.eu>,
- Produktbeschreibung: <https://extwiki.eodc.eu/en/GFM/PDD>
- *Rapid Mapping* des Copernicus Dienst für Katastrophen- und Krisenmanagement (EMS); <https://emergency.copernicus.eu/mapping/ems/rapid-mapping-portfolio>
- WaterMaskAnalyser (WMA): Berechnung von Wassermasken aus Radar und optischen Daten auf der Google Earth Engine, entwickelt vom sächsischen Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie (LfULG); <https://bit.ly/3wEdnMI>
- Satellitengestützter Krisen- und Lagedienst (SKD), angesiedelt im Bundesamt für Kartographie und Geodäsie, hier genutzt zur Satellitendatenbestellung; [https://www.bkg.bund.de/DE/Produkte-und-Dienste/SKD/skd\\_cont.html](https://www.bkg.bund.de/DE/Produkte-und-Dienste/SKD/skd_cont.html)
- CODE-DE Showcase: Landesamt für Vermessung und Geoinformation (LVerGeo) Schleswig-Holstein: „Detektion von Überschwemmungsflächen“; <https://code-de.org/de/showcases>

## 1.5 Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Innerhalb des Projektes fand ein enger und regelmäßiger Austausch mit den in Abschnitt 1.2 benannten Verwertungspartnern (BfG/M2, BfG/M3, BfG/U3, WSA EN, BSH, BAW HH, BAW KA, BKG, BBK) statt. Insbesondere die enge Zusammenarbeit mit dem WSA EN ermöglichte die zeitkritische Erfassung der Validierungsdaten an der Küste. Durch die sehr gute Abstimmung, konnten Messungen des WSA Teams am Neukooger Priel zeitgleich zu Messungen des BfG-Teams in Otterndorf erfolgen. Dabei unterstützte auch in Otterndorf ein Mitarbeiter des WSA EN die Arbeiten. Die verschiedenen rechtlichen Unterlagen für die Forschungsarbeiten im Nationalpark und Vogelschutzgebiet konnten fristgerecht von den verschiedenen zuständigen Behörden des NLWKN<sup>3</sup>, LKNSH<sup>4</sup>, MELUND<sup>5</sup> eingeholt werden.

Im Rahmen einer Vergabe wurde Brockmann Consult eingebunden um die Vorprozessierung der Sentinel-1 Daten auf CODE-DE einzubinden. In die WLG-Ableitung an sich war Brockmann Consult nicht eingebunden.

Zusätzlich fand ein enger Austausch mit dem **sächsischen Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie (LfULG)** statt, da im Rahmen des Leuchtturmprojektes BigFE ebenfalls die Ableitung von Wasser-Land-Grenzen aus u.a. Sentinel-1 Daten im Fokus stand. Zielgebiet des WaterMaskAnalyser (WMA) waren Seen, so dass ein effizienter Austausch zur Vorprozessierung erfolgen konnte, ansonsten jedoch andere Herausforderungen vorlagen als in Sat-Land-Fluss. Der enge Fach- und

---

<sup>3</sup> Niedersächsischer Landesbetrieb für Wasserwirtschaft, Küsten- und Naturschutz

<sup>4</sup> Landesbetrieb für Küstenschutz Nationalpark und Meeresschutz Schleswig-Holstein

<sup>5</sup> Ministerium für Energiewende, Landwirtschaft, Umwelt, Natur und Digitalisierung des Landes Schleswig-Holstein

Erfahrungsaustausch mit dem bearbeitenden Kollegen zu spezifischen Fachpunkten und deren Herangehensweise half beiden Parteien und Doppelarbeiten konnten vermieden werden.

Des Weiteren fand ein fachlicher Austausch mit der **Universität Hamburg** (Institut für Meereskunde, AG experimentelle Ozeanographie) statt, da diese AG ebenfalls an der WLK-Ableitung im Küstenbereich arbeitet. Insbesondere die Bachelorarbeit von Peters (2022), die ebenfalls Sentinel-1 Daten zur Wasser-Land-Grenzen Bestimmung verwendete, lieferte relevante Impulse für die Sat-Land-Fluss Bearbeitung.

Des Weiteren fand ein reger wissenschaftlicher Austausch mit Kollegen verschiedener Institutionen und Firmen auf **Konferenzen** statt.

Für die Abschlussbesprechung des Projektes wurden Vertreter aller o.g. Institutionen eingeladen.

## 2 Eingehende Darstellung

### 2.1 Ziele und Ergebnisse

Entsprechend des Ziels des Förderaufrufs, die Nutzung von Copernicus-Daten und -Diensten in Deutschland im Kontext der öffentlichen Aufgabenwahrnehmung zu optimieren, zielte dieses Projekt insbesondere auf die folgenden Bereiche ab:

- Verbreiterung der Informationsbasis für politische Entscheidungen, z.B. in der Umweltgesetzgebung und Verkehrsplanung, sowie
- Vermeidung oder Reduzierung negativer Auswirkungen auf öffentliche Infrastruktur, Städte, landwirtschaftliche und forstliche Nutzflächen, oder naturnahe Schutzgebiete durch Sturm, Überschwemmungen, Landsenkungen oder Hitze- und Dürreperioden durch effektiveren Ressourceneinsatz basierend auf den Ergebnissen der Vorhaben.

Die Verwendung von Sentinel-1 Copernicus-Daten wurde in verschiedene Arbeitsprozesse integriert.

Die übergeordneten Ziele des Projektes Sat-Land-Fluss waren:

- Erarbeitung eines prototypischen Workflows zur Erstellung möglichst lückenloser und belastbarer WLG-Nutzerprodukte aus Sentinel-1 und Zusatz-Daten
- Zusammenstellung vorhandener WLG-Fernerkundungsprodukte, inklusive Einschätzung der Nutzbarkeit bzgl. räumlicher Auflösung, Genauigkeit und Zuverlässigkeit
- Aufzeigen möglicher Verbesserungen bei der WLG-Bestimmung durch die Einbindung von Zusatzdaten, wie z. B. Bestandsdaten in Form von Digitalen Geländemodellen (z. B. DGM5, DGM-W), Fahrrinnen- oder Landnutzungsinformationen
- Validierung der optimierten WLG-Nutzerprodukte im Sinne der Anwendungsorientierung und Belastbarkeit, inkl. Geländedatenerfassung
- Erstellung und Bereitstellung ausgewählter WLG-Produkte inklusive Qualitätsbeschreibung an ausgewählten relevanten Abschnitten von Bundeswasserstraßen. Die Produkte werden in enger Zusammenarbeit mit den Verwertungspartnern erstellt, so dass die Anforderungen der Nutzer von vornherein berücksichtigt werden und eine starke Anwendungsorientierung und Bewertung der Integrierbarkeit in Anwenderverfahren vorliegt.

In den folgenden Unterabschnitten werden die erreichten Ziele und Ergebnisse umfassend anhand der beantragten Arbeitspakete (AP) erläutert. Die wesentlichen thematischen Bearbeitungen der einzelnen APs, und damit die Gliederung dieses Abschnittes, ist in *Abbildung 1* dargestellt.

#### 2.1.1 AP 0: Projektkoordination

##### 2.1.1.1 Koordination und Projektmanagement

Die organisatorischen Arbeiten verliefen im Wesentlichen nach Plan, mit leichten Verzögerungen durch eine etwas verzögerte Personaleinstellung, corona-bedingte Aufwände und den Ausfall von Sentinel-1B, was zu niedrigerer Datenverfügbarkeit führte. Die meisten Besprechungen mit den Vertragspartnern wurden entgegen der ursprünglichen Planung online und nicht in Präsenz durchgeführt. Eine 6-monatige kostenneutrale Laufzeitverlängerung wurde bewilligt. Somit konnte der Großteil der geplanten Arbeiten erfolgen.

### **2.1.1.2 Personal-Einstellung und Einarbeitung**

Der Projektmitarbeiter (Bastian Gessler) wurde zum 01.05.2021 eingestellt. Dies war 3 Monate später als im Projektablaufplan vorgesehen.

### **2.1.1.3 Begleitende Vergabe/Beschaffung**

Beschaffung: BlackSky Satellitendaten über den Satellitengestützten Lage- und Krisendienst (SKD) im BKG. Hierbei erfolgte ein erfolgreiches *Tasking* für den möglichst zeitgleichen Überflug zu Sentinel-1.

Vergabe: Für die Vergabe der Implementierung der Sentinel-1 Daten Vorprozessierung auf einer virtuellen Maschine von CODE-DE wurde auf einen Rahmenvertrag der BfG mit Brockmann Consult zurückgegriffen. Die Abwicklung (ohne fachliche Vorplanungen) dauerte von Juni 2023 bis Dezember 2023 (*Abbildung 1*).

### **2.1.1.4 Berichtswesen, Öffentlichkeitsarbeit, Konferenzbeiträge**

Die Projektpräsentationen sind in Kap. 2.6 dargestellt.

## **2.1.2 AP 1: Bestandsaufnahme, Datenaufbereitung, Auswerteworkflow**

### **2.1.2.1 Bedarfsabfragen**

In mehreren Besprechungen mit den Verwertungspartnern wurden die Anwendungsthemen vor dem Hintergrund der realisierbaren erfolgsversprechenden Genauigkeiten abgestimmt. Die Lagegenauigkeit der WLG sollte im Binnenbereich bei ca. 10 m liegen und im Küstenbereich bei 10er Metern. Das große Potential wird in der gesicherten Regelmäßigkeit der möglichen Ableitungen zu allen Jahres- und Tageszeiten gesehen. An Produkten steht v.a. die Dokumentation der aktuellen Lage der WLG sowie die Identifikation von Veränderungshotspots im Mittelpunkt.

### **2.1.2.2 Bestand von Daten, Produkten, Diensten, Prozessoren, inkl. Defizitanalyse**

Als Grundlage des Algorithmus zur Wasser-Land-Grenzen Bestimmung, werden in Sat-Land-Fluss neben den Sentinel 1 Daten auch hochaufgelöste Zusatzdaten verwendet. Hierzu wurden verschiedene Datenarten evaluiert und bei Eignung organisiert und aufbereitet (s.a. Abschnitt 1.4.4). Dabei handelt es sich um:

- Das DGM5 (digitales Geländemodell mit 5 x 5 m Gitter) des BKG, inkl. aus den DGM5 Daten abgeleitete *Height Above Nearest Drainage* (HAND) Daten,
- Vergangene Wasserstände in den Arbeitsgebieten,
- Die Lage der Fahrrinne von der WSV,
- Das jeweils aktuelle DGM-W (1 m-Gitter bzw. 0,5 m-Gitter) der BfG und der WSV,
- Luftbilddaten bestimmter Ereignisse (z.B. Niedrigwasser Rhein 2018),
- Landbedeckungsdaten ESA WorldCover 2020 (10 m räumliche Auflösung).

Auf dem Markt befinden sich viele verschiedene Wasser-Land-Grenzen (WLG) Produkte, darunter Publikationen, Projekte, Einzelprodukte und teilweise Dienste (s. Abschnitt 1.4.4). Durch ihre Evaluierung, sowie Bedarfsabfragen bei den Verwertungspartnern, konnten konkrete Defizite benannt werden. Es wurde festgestellt, dass die Zielrichtungen und damit verbunden auch die Charakteristiken der vorhandenen WLG-Produkte dazu führen, dass sie für die Aufgabenerfüllung der BfG und der Verwertungspartner nicht in ausreichendem Maß nutzbar sind. Dies wird insbesondere bedingt durch:

- meist nicht öffentliche Zugänglichkeit von Metadaten, Algorithmen und vieler Produkte,
- meist sind Genauigkeit und Zuverlässigkeit unveröffentlicht,
- häufig werden optische Fernerkundungsdaten verwendet (somit besteht eine Wetter- und Tageslicht-Abhängigkeit),

- meist werden Produkte einmalig und lokal erstellt (entsprechend eignen sie sich nicht für die operationelle Nutzung),
- teilweise wurden Produkt-Komposite aus Aufnahmen verschiedener Zeitpunkte erstellt, in denen Mittelungen dargestellt sind und keine Hoch-/Niedrigwasser oder Tidesituationen abgedeckt werden, z.B. *High resolution layer Water and Wetness* des Copernicus Landdienstes.

Konkrete während des Projektverlaufs etablierte Dienste und Anleitungen werden in Abschnitt 2.5 benannt.

### 2.1.2.3 Festlegung Projektgebiete

Entsprechend der Anforderungen der Verwertungspartner wurde je ein Anwendungsgebiet für die wesentlichen Anwendungsthemen ausgewählt (*Abbildung 4*):

(a) Niedrigwasserereignisse im Binnenbereich: Mittelrhein von Bingen bis zur Loreley/St Goar, landschaftlich vielfältiges und radartechnisch herausforderndes Gebiet, u.a. mit Steilhängen, Kiesinseln, verschiedener Verkehrsinfrastruktur und Wasserbauwerken.

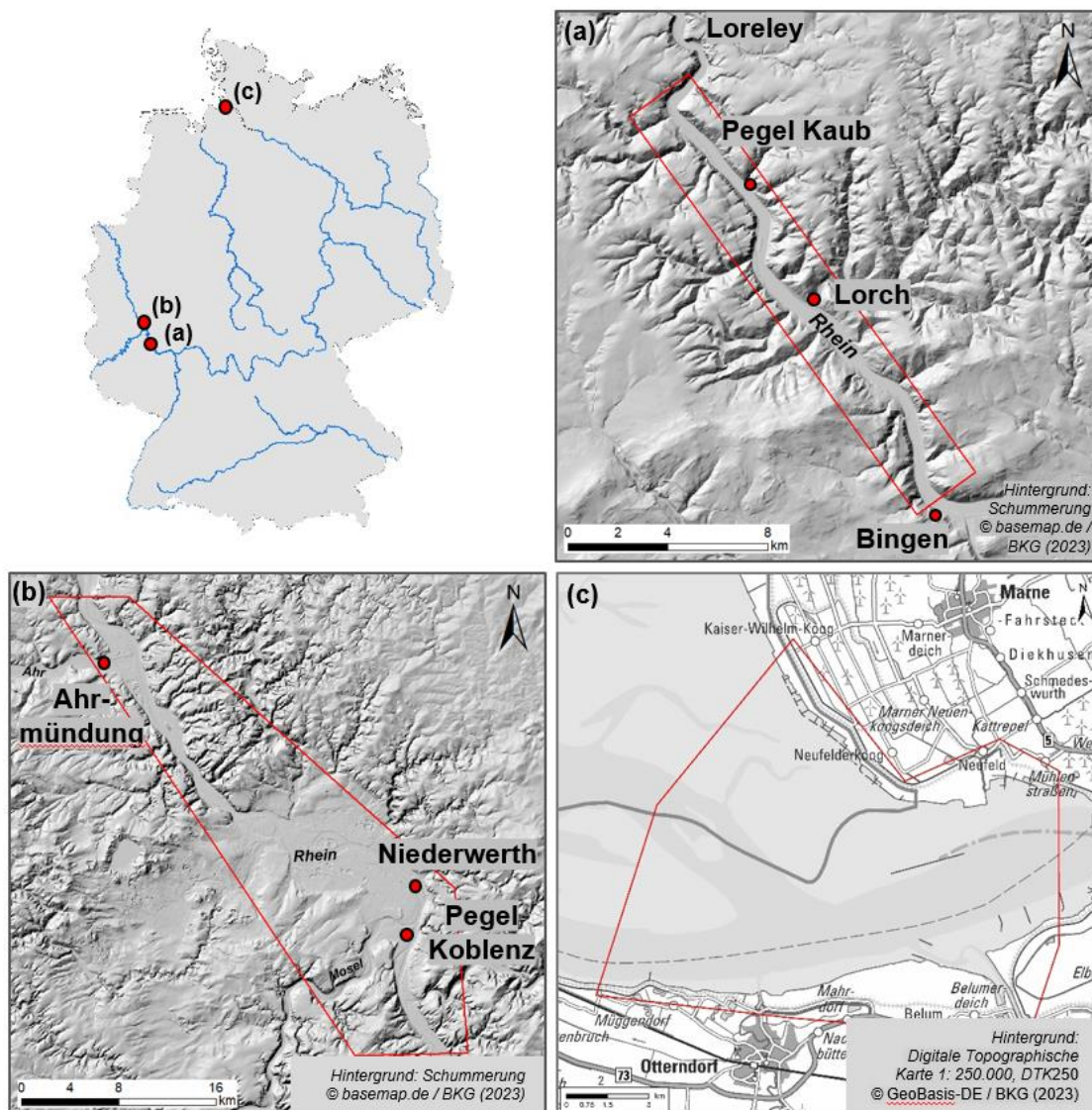


Abbildung 4: Karte mit den Anwendungsgebieten. (a) Mittelrhein zum Anwendungsthema Niedrigwasser, (b) Rhein von Koblenz bis zur Ahrmündung zum Anwendungsthema Hochwasser und (c) Tidelbe zum Anwendungsthema Küstendynamik.

(b) Hochwasserereignisse im Binnenbereich: Koblenz bis zu Ahrmündung (Schwerpunkt Insel Niederwerth), welches im Juli 2021 von einem Hochwasser geprägt war. Hier existierten v.a. im Ahrgebiet viele hochaufgelöste Satellitenaufnahmen und Luftbildbefliegungen, die sich hervorragend als Validierungsdaten eignen.

(c) Dynamik im Küstenbereich: Tideelbe von Brunsbüttel bis Cuxhaven (Bereich der Medemrinne).

#### 2.1.2.4 Datenbeschaffung, Datenaufbereitung (inkl. Organisation Datenhaltung)

Die unter b) benannten Daten wurden beschafft strukturiert auf dem Server der BfG abgelegt. Das DGM5 (©BKG 2016) wurde zudem auf einer VM von CODE-DE mit Zugriff durch die BfG hochgeladen, so dass u.a. eine optimierte Geländekorrektur erfolgen kann.

#### 2.1.2.5 Auswerteworkflow und erste Auswertung Sentinel-1-Daten

Zunächst wurde die Vorprozessierung der Sentinel-1 Daten vorangetrieben, wobei die Auswertung zeigte, dass ein deutlicher Mehrwert vorliegt, wenn *Interferometric Wide Swath (IW) Single Look Complex (SLC)* Daten verwendet werden (s.a. Gessler et al., 2023a). Dies ist eine niedrigere Vorverarbeitungsstufe als die in bisherigen Produkten und Studien verwendeten *Ground Range Detected (GRD)* Daten (z.B. Global Flood Monitoring Algorithmus, Martinis et al., 2018, Liao und Wen, 2020). Die Nutzung der SLC-Daten ermöglicht nicht nur eine höhere Flexibilität bei der Vorprozessierung, es bleiben außerdem Informationen über die Phase erhalten. Diese Informationen erlauben zusätzliche Verarbeitungsschritte, die weitere hilfreiche Auswertungen ermöglichen. Ein Beispiel hierfür wären dual-polarimetrische Klassifikationsverfahren. Die Vorprozessierung wurde vollständig an der BfG mit bestehender Hard- und Software durchgeführt. Hierbei orientieren sich die Arbeiten an den in der BfG vorhandenen, in Python geschriebenen Softwarewerkzeugen und an publizierten Arbeitsschritten. Daraus entstand ein **eigenes Skript** der Sentinel-1 Datenaufbereitung, das im Rahmen einer Vergabe (s. AP 0, Abschnitt 2.1.1) auf einer virtuellen Maschine von **CODE-DE** implementiert wurde. Dabei sollten verschiedene Einstelloptionen der Vorprozessierung umgesetzt werden, v.a.:

- Beliebige *Area of Interest (AOI)*, anzugeben als *well-known text (WKT)*
- Auto-Download Sentinel-1 SLC Szene in AOI
- Geländeabflachung (*Terrain-Flattening*): DEM frei wählbar (vordefinierte DEMs oder externes DEM einbindbar als tif-Datei; als Beispiel wurde deutschlandweit das DGM5 des BKG (2016) eingebunden)
- Speckle-Filter: ist optional (komplettes Auslassen des Filters ist möglich), Filterart (aktuell sind „Lee Sigma“, „Refined Lee“ und „Median“ implementiert) und Parameter sind frei wählbar
- Geländekorrektur (*Terrain-Correction*): DEM frei wählbar (vordefinierte DEMs oder externes DEM)
- Berechnung der Rückstreuintensität der VV- und VH-Polarisierungen als GeoTiff

Für den Vergleich der Ergebnisse, wurde in den Haupt-Anwendungsgebieten von Sat-Land-Fluss (*Mittelrhein und Elbeästuar, Abbildung 4*) die Differenz zwischen der lokal in der BfG und den auf der CODE-DE VM prozessierten Rückstreuintensitäten berechnet. Differenzen treten insbesondere an stark rückstreuenden Oberflächen auf, was für Projektbearbeitung unkritisch ist, da die starken Rückstreuer keine Auswirkungen in der WLG-Auswertung haben. Die Hauptursache für die verbleibenden Unterschiede liegt sehr wahrscheinlich in dem unterschiedlichen Prozessierungsvorgehen, insbesondere da bei der lokalen Prozessierung aufgrund von Hardwarebeschränkungen Zwischenprodukte geschrieben werden mussten. Die Sentinel-1 Vorprozessierungen ab Dezember 2023 liefen alle über die CODE-DE VM (s. AP 3). *Abbildung 2* visualisiert den kombinierten Validierungs- und Auswerteworkflow und das Zusammenspiel von CODE-DE mit den an der BfG durchzuführenden Prozessierungen. Final wurden alle Sentinel-1 Datensätze über CODE-DE bezogen, **so dass der Transfer großer Datenmengen vermieden wurde**. An der BfG erfolgte die anschließende Wassermaskenerstellung, zunächst ohne und später

mit Zusatzdaten (s. AP 3, Abschnitt 2.1.4). Im Binnenbereich geschieht dies auf Basis einer Grenzwertbildung nach Kittler und Illingworth (1985). Dabei wird der Grenzwert automatisch aus den Sentinel-1 Rückstreudaten bestimmt (s. Twele et al., 2016) und alle Pixel einer Sentinel-1 Szene oberhalb des Grenzwertes werden als Land-Pixel klassifiziert und unterhalb des Wertes erfolgt eine Zuordnung zu Wasser-Pixeln. Im Tidebereich wurden aufgrund der hohen Watt-Durchfeuchtung dadurch keine zufriedenstellenden Ergebnisse erreicht, so dass hier ein Kantenalgorithmus etabliert wurde.

### 2.1.3 AP 2: Validierung vorhandener WLGs

#### 2.1.3.1 Validierungsworkflow

Die Validierungs- und Qualitätssicherungskonzepte sind abhängig von der jeweiligen Datenverfügbarkeit.

Für die Validierung werden unabhängige flächendeckende Daten bei möglichst gleichem Wasserstand benötigt. Es wurde ein Workflow entwickelt um solch unabhängige WLGs, basierend auf (i) der statistischen Anzahl der korrekt und nicht-korrekt klassifizierter Pixel, sowie auf (ii) der WLG-Lagegenauigkeit durch Distanz von der abgeleiteten WLG zur Validierungsdaten-WLG, zu validieren. Beispielhaft wird diese Validierung in Abschnitt 2.1.5 beschrieben, sowie in Gessler et al., 2023a und Gessler et al., 2024 beschrieben.

Liegen keine Validierungsdaten vor (z.B. für Produkterstellungen zur Beratung, Messplanung o.ä.), so wird ein Qualitätssicherungskonzept durch Vergleich zu unabhängigen Daten durchgeführt. Hierfür können vielfältige Daten/Produkte zum Einsatz kommen, je nach Verfügbarkeit und Prüfsituation. Dies sind z.B. zeitnahe Lage der WLG aus optischen Satellitendaten, Abweichung zur WLG aus vorangegangenen Sentinel-1 Auswertungen, lokale WLG-Einmessungen, hochaufgelöste Geländedaten (z.B. DGM-W), hydrodynamisch-numerische Modellierungen, Messungen von Wasserdrucksensoren.

#### 2.1.3.2 Validierung vorhandener WLGs

Zu Projektbeginn beinhalteten die meisten der vorhandenen Produkte und Dienste keine veröffentlichten bzw. nutzbaren Validierungsberichte oder -daten. Die BfG besitzt von einigen vergangenen Ereignissen hochaufgelöste Daten, diese lagen aber v.a. vor der Zeit der Sentinel-1 Datenerfassungen (z.B. Hochwasser 2002, 2013), oder nicht im Fokus veröffentlichter WLG-Produkte (z.B. Niedrigwasser 2018, verschiedene Abschnitte der Bundeswasserstraßen für technische Erprobungen bzw. FuE Fragestellungen außerhalb von Sat-Land-Fluss). Dadurch wäre die Validierung von vorhandenen Produkten vergangener Ereignisse im Rahmen von Sat-Land-Fluss nur mit einem starken zeit- und kostenintensiven Aufwand (d.h. Beschaffung hochaufgelöster Satellitendaten) realisierbar. Somit fokussierten sich die Validierungen auf aktuelle Produkte, insbesondere auf die Ende 2021 veröffentlichten **Global Flood Monitoring (GFM) Produkte**, welches dem Copernicus Dienst für Katastrophen- und Krisenmanagement (Emergency Management Service, EMS) zugeordnet wird. Die GFM-Wassermaske enthielt zu Beginn der Operationalität noch viele Unstimmigkeiten (s. [Übersichtsvortrag](#) Mechernich et. al., 2023, 2nd CEMS Global Flood Forecasting and Monitoring Meeting). Die Vergleiche zu abgeleiteten Wasserflächen aus Geländemessungen, UAV (s. AP 4, Abschnitt 2.1.5) und aktuellen DGM-W Daten zeigten, dass sich das GFM-Produkt („Observed Water“) nicht für Zeitpunkte niedrigen Wasserstandes (Tideniedrigwasser) eignet. Es wurden Anfang 2023 verschiedene Zeitpunkte und Pegelstände geprüft. Während Szenen bei mittlerem Tidehochwasser im Rahmen von ca.  $\pm 50$  m die Wasser-Land-Grenze treffen, wird die Wasserausdehnung bei allen niedrigeren Wasserständen deutlich überschätzt. Große Flächen trockengefallenen Watts werden stets als Wasserfläche ausgewiesen. Diese Überschätzung ist auf den verwendeten permanenten Wasser-Layer zurückzuführen, der ebenfalls aus Sentinel1-Daten abgeleitet wird und nasse Wattflächen auch bei Niedrigwasser als Wasser interpretiert.

Im Küstenbereich der Tideelbe werden im Auftrag der **BAW HH** aus allen **Sentinel-2 Daten „Land-Wassergrenzen“** abgeleitet. Die Daten wurde der BfG im Rahmen von Sat-Land-Fluss exemplarisch zur Verfügung gestellt. Vergleiche des Produktes mit Sentinel-1 und Sentinel-2 Daten, sowie mit den Validierungsdaten aus Sat-Land-Fluss (Abschnitt 2.1.5c) während gleicher bzw. ähnlicher Wasserständen ergaben, dass Einschränkungen nur bei Wolkenbildung bestehen: Teilweise tritt bei den BAW-Daten unter Wolken eine Wasserüberschätzung auf.

Die WLG wurde bei den analysierten Daten mit ausreichender räumlicher Genauigkeit für die Anwendungen der Verwertungspartner von Sat-Land-Fluss abgeleitet.

Dieses BAW-Land-Wassergrenzenprodukt wurde im Projektverlauf von Sat-Land-Fluss zum Vergleich zu der aus S-1 abgeleiteten WLG verwendet.

## 2.1.4 AP 3: Optimierung der WLG-Ableitung

### 2.1.4.1 Verbesserte Algorithmen mit Zusatzdaten

Insbesondere WLG-Produkte, die auf Rückstreuungswerten von einzelnen Radarbildern beruhen, weisen wie in Abschnitt 1.4.1 erläutert, oft **Lücken und Fehlklassifikationen** auf. Um diese zu reduzieren kamen im Projekt Sat-Land-Fluss neben den S-1 Daten als Grundlagendaten zur Wasser-Land-Grenzen Bestimmung zusätzlich auch hochaufgelöste, bereits bestehende Zusatzdaten zum Einsatz. Die Zusatzdaten wurden beschafft und in der BfG zur Nutzung aufbereitet. Dies waren v.a.:

- die Lage der Fahrrinne (Shape Datei) aus den Daten der WSV
- Landnutzungsdaten, verschiedene Quellen von Landnutzungsdaten wurden getestet (z.B. LBM-DE-2018, CORINE Land Cover, Holzbodenkarte), am geeignetsten stellte sich ESA WorldCover (Version 2020, 10 m räumliche Auflösung) heraus
- Digitales Geländemodell mit 5 x 5 m Gitter (DGM5) des Bundesamtes für Kartographie und Geodäsie (BKG)
- Verbesserter Index *Height Above Nearest Drainage* (HAND, Nobre et al., 2011) Daten durch Nutzung des DGM5 (bisherige Studien verwenden die SRTM 30 m räumliche Auflösung). Dadurch können Gebiete potentieller Fehlklassifizierung ausgeschlossen werden, die z.B. im HW-Fall aufgrund der topographischen Bedingungen nur sehr unwahrscheinlich überflutet werden
- DGM-Ws der BfG bzw. der WSV

Insbesondere in dem Anwendungsgebiet Mittelrhein wurden exemplarische Berechnungen durchgeführt (*Abbildung 5*). Insbesondere die Landbedeckungsdaten (ESA WorldCover 2020) sowie die Höheninformationen (digitales Geländemodell mit 5 x 5 m Gitter des Bundesamtes für Kartographie und Geodäsie) stellten sich als äußerst geeignet dar, um die Genauigkeit des WLG-Algorithmus zu erhöhen. Ohne diese Zusatzdaten kommt es an Flächen relativ niedriger Rauigkeit aufgrund der relativ geringen Radarrückstreuung zu fehlerhaft als Wasser klassifizierten Landflächen. Sofern der Wasserstand niedriger als mittleres Hochwasser ist, können durch die Landbedeckungsinformationen Klassen wie z.B. Ackerflächen, Grasland und bebaute Gebiete ausmaskiert werden (Gessler et al., 2023a), da diese dann nicht wasserbedeckt sind.

Informationen über die Lage der Fahrrinne sorgen ebenfalls für eine Reduzierung fehlklassifizierter Pixelbereiche. Dabei wird sich zunutze gemacht, dass die Fahrrinne selbst bei extremen Niedrigwasserereignissen noch mit Wasser bedeckt ist. Kommt es in diesem Bereich der jeweiligen Sentinel-1 Szene zu Störeffekten aufgrund von Schiffen, Brücken oder anderen metallischen Objekten, sowie lokal erhöhter Rauigkeit verursacht durch Wellen, führt dies oftmals zu starker Signalüberlagerung bzw. erhöhten Intensitätswerten innerhalb eines Flusses. Dies hat Fehlklassifizierungen zur Folge, die durch die Fahrrinneninformationen reduziert werden können. Das Gesamtergebnis für das Niedrigwasser 2018

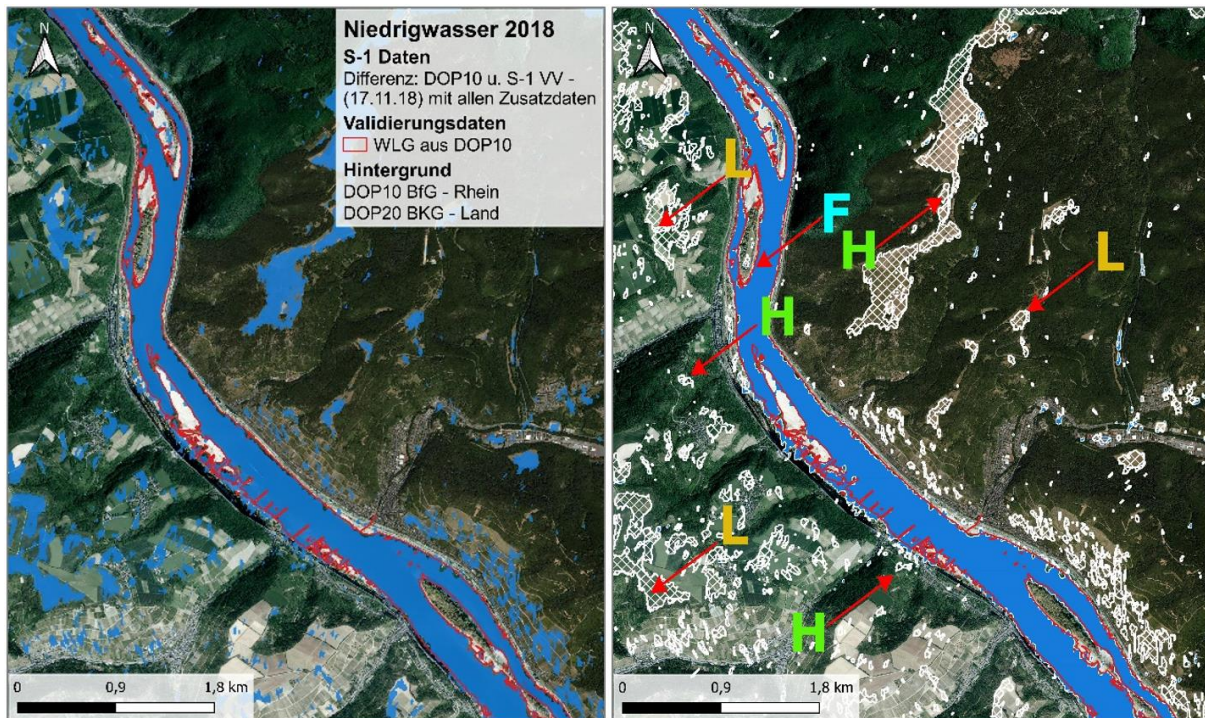


Abbildung 5: Niedrigwasser 2018: Sentinel-1 Wasserflächenableitung ohne (links) und inkl. aller Zusatzdaten (Fahrrinne, HAND-Index, Landbedeckung, rechts). Die weißen Bereiche markieren fehlklassifizierte Gebiete, die durch die Zusatzdaten korrigiert werden konnten. Exemplarisch sind diese dabei mit Buchstaben markiert (Fahrrinne = F, HAND-Index = H, Landbedeckung = L), s.a. Gessler et al. (2023a).

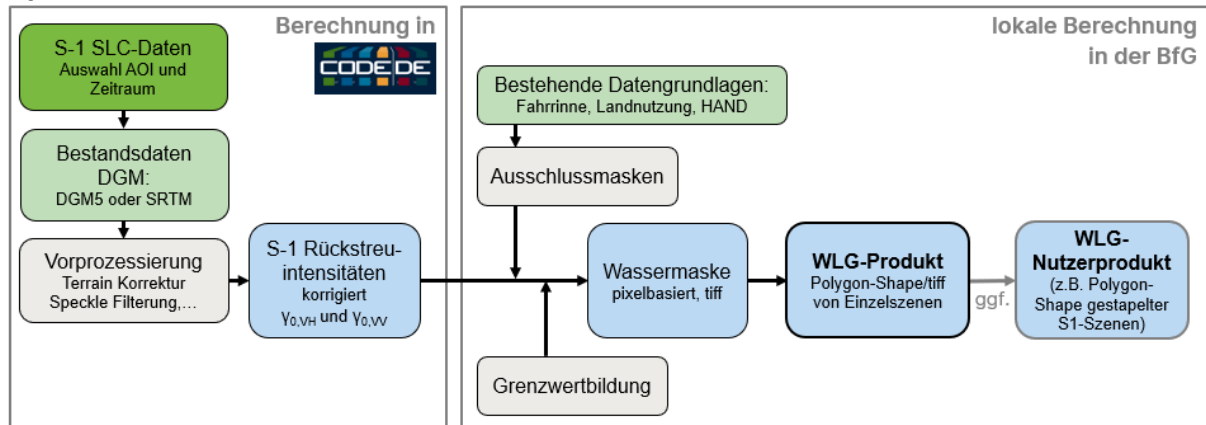
ist zusammengefasst in *Abbildung 5* dargestellt. Eine detailliertere Erläuterung liefert Gessler et al. (2023a); die wesentlichen Ergebnisse der Validierung sind in Abschnitt 2.1.5 benannt.

#### 2.1.4.2 Ableitung der WLG und Metadatenerstellung

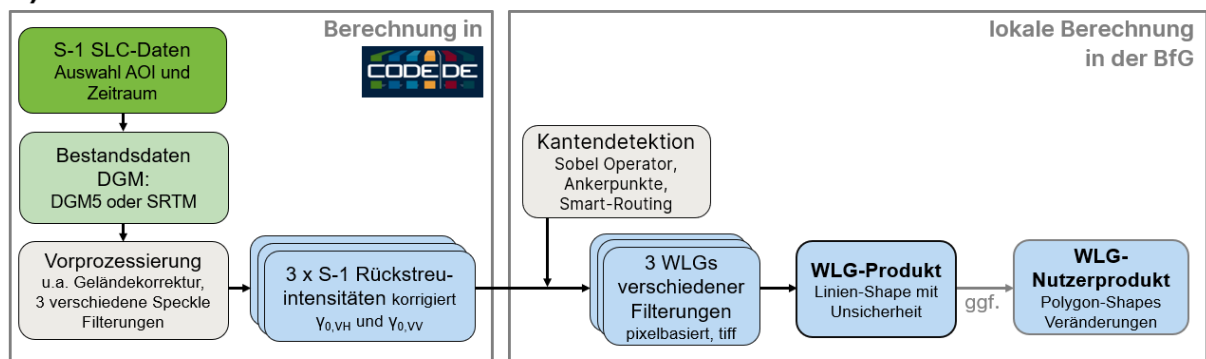
Aus der generierten Wassermaske aus Sentinel-1 Rückstreuintensitäten mit Zusatzdaten wird im nächsten Schritt die WLG abgeleitet (s. *Abbildung 6*) und mit Metadaten (z.B. Datum/Uhrzeit der Aufnahme, Wasserstand) hinterlegt und schließlich weiterführende Produkte erstellt (s. AP 5, Abschnitt 2.1.6).

Im Küstenbereich lieferte das Verfahren der Grenzwertbildung keine zufriedenstellenden Ergebnisse. Dies liegt an der niedrigen Rückstreuintensität in durchfeuchteten Gebieten bei gleichzeitig hoher Rückstreuintensität durch Wellen (*Abbildung 7*), die zu grundsätzlichen Fehlklassifizierungen führen. Entsprechend wird im Küstenbereich eine andere Methodik eingesetzt als im Binnenbereich (*Abbildung 6*). Plausible Ergebnisse wurden durch eine Kantendetektion mittels eines *Sobel-Operators*, der den Verlauf der Rückstreuintensitäts-Änderung, die Gradienten, und die Richtung dieser Änderung bestimmt (Gessler et al., 2024) erreicht. Nach Herausfilterung schwacher und kurzer Kanten, 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 Kanten-WLG festlegt. Basierend auf verschiedenen Speckle-Filterungen werden drei unterschiedliche WLG-Versionen erzeugt, die jeweils etwas unterschiedliche Kantenstrukturen aufweisen. Falls dabei mindestens zwei der drei WLGs eine WLG andeuten, wird diese als *sicher* klassifiziert (*Abbildung 8*). Bei nur einem Treffer wird die Kategorie *ungenau* vergeben und dazwischen wird interpoliert bzw. logisch verknüpft (*unsicher*). Dieser Schritt verläuft manuell. Eine abschließende manuelle Bereinigung entfernt Linienstrukturen die nicht an das Gewässer angeschlossen sind, so dass ein möglichst einfacher Datensatz der Wattkanten für weitere Analysen vorliegt (*Abbildung 7, Abbildung 8*).

**a) Binnenbereich**



**b) Tidebereich**



- Input S-1 Daten
- Input Bestandsdaten
- Verarbeitungsschritte
- (Zwischen-)Produkte

Abbildung 6: Schematische Darstellung zur Wasser-Land-Grenzen Ableitung von Sat-Land-Fluss aus Sentinel-1 und Geobasisdaten. Die Methode unterscheidet sich im (a) Binnenbereich und (b) Tidebereich durch die unterschiedliche Gewässercharakteristik.

**2.1.4.3 Prototyp Erstellung, Automatisierungsgrad erhöhen**

Zur Erhöhung des Automatisierungsgrades waren Anpassungen am Algorithmus erforderlich. Die Vorprozessierung der Sentinel-1 Daten erfolgt nach der Implementierung auf CODE-DE (s. AP 0) nahezu vollautomatisiert über die virtuelle Maschine (VM) (Abbildung 6). Das Resultat ist ein GeoTiff, welches von der VM auf einen lokalen Rechner in der BfG geladen wird. Die Vorprozessierung dauert ca. 60 min pro Szene, abhängig von der Gebietsgröße. Zudem sind ca. 15 Minuten manuelle Arbeit erforderlich (login, AOI und Datum wählen, Ergebnis speichern). Es ist zu beachten, dass in der aktuellen Konfiguration die virtuelle Maschine durch andere BfG-Prozessierungen belegt sein und die Berechnung dadurch nicht unbedingt sofort gestartet werden kann.

Anschließend läuft die Prozessierung mittels Python Skripten innerhalb der BfG (Abbildung 6). Dies bietet sich an, da die Zusatzdaten hier lokal vorliegen und nur korrekt beschnitten werden müssen. Bei Bedarf können sie aktualisiert werden.

Im Binnenbereich ist das fertige WLG-Produkt bei freien Rechenkapazitäten frühestens nach einem halben Arbeitstag verfügbar, wobei ca. 2 Stunden Arbeitszeit erforderlich sind. Im Tidebereich ist dagegen noch einige manuelle Arbeit erforderlich. Im Testgebiet der Medemrinne dauert es mindestens einen Arbeitstag bis zur fertigen WLG, wobei ca. 6 Stunden Handarbeit erforderlich sind (Algorithmus starten, Download der Daten, Kantenverbindung, Homogenisierung, Datenbereitstellung z.B. über ftp).

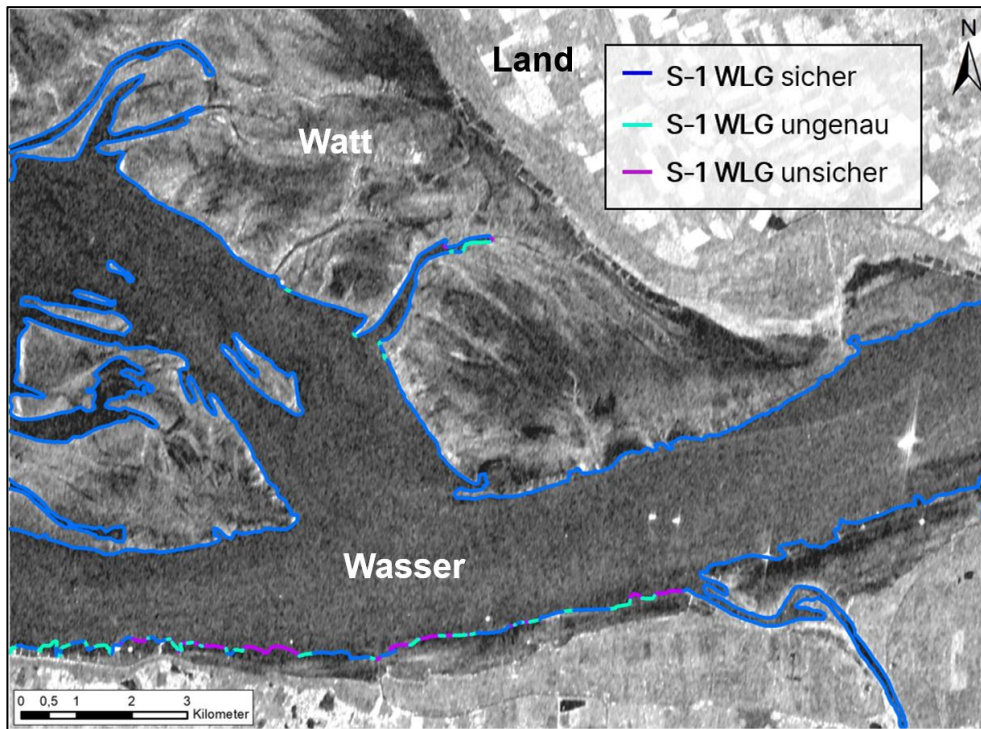


Abbildung 7: Beispiel der Rückstreuintensität im Untersuchungsgebiet der Tideelbe (Tideniedrigwasser 12.07.2022), hier inkl. abgeleitete Wasser-Land-Grenzen (WLG) durch Extraktion der Kanten mittels Sat-Land-Fluss Algorithmus. Die Farben der WLG geben die Sicherheit der Lage wieder. Hintergrund: Sentinel-1 Rückstreuintensität (VV) vom 12.07.2022

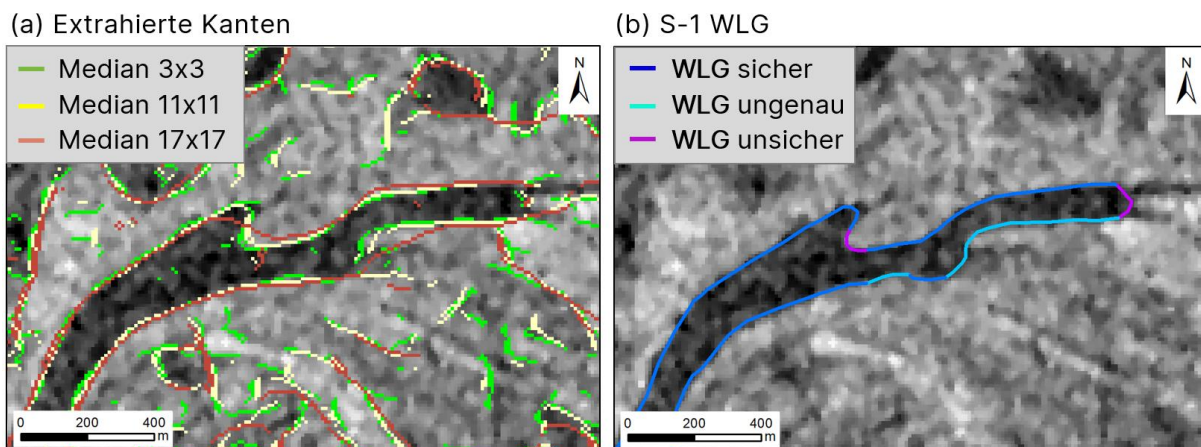


Abbildung 8: Methodik der Kanten-Detektion an der Küste am Beispiel des Tideniedrigwassers am 12.07.2022. Im Hintergrund ist die Rückstreuintensität der vorprozessierten Sentinel-1 (S-1) Szene (VV-Polarisierung) mit Speckle-Filter Median 3x3 dargestellt. (a) extrahierte Kanten Median 3x3, 11x11 und 17x17, (b) daraus extrahierte WLG aus den Sentinel-1 Daten des 12.07.2022. Dabei wird nur die WLG von angeschlossenen Gewässern kartiert (und keine stehenden Gewässer). WLG sicher bei zwei oder drei Kanten, WLG ungenau bei einer Kante, WLG unsicher ist manuell erstellt, basierend auf Rückstreuintensität.

### 2.1.5 AP 4: Validierung optimierter WLGs

#### 2.1.5.1 Anwendungsthema 1 „Niedrigwasser Binnen“

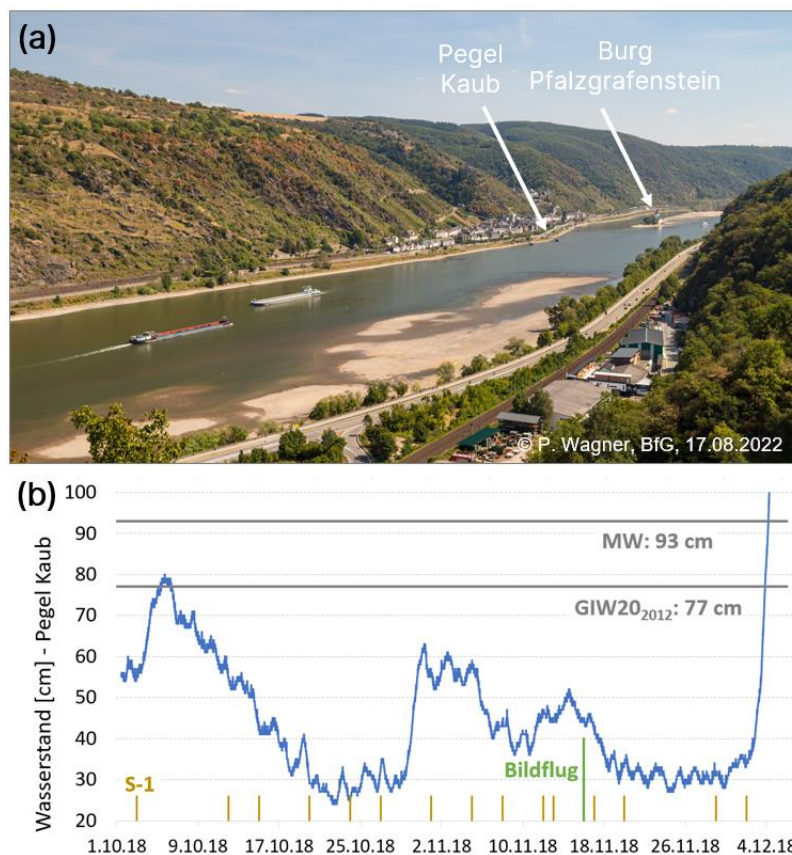
Im Validierungsgebiet des landschaftlich vielfältigen Mittelrheins lagen bereits sehr gute Datengrundlagen vor, v.a. dank der Niedrigwasserbefliegung während der langanhaltenden Niedrigwasserphase im Sommer/Herbst 2018 durch das WSA Oberrhein. Der Wasserstand während

der Befliegung lag sehr nah an denen von verschiedenen Sentinel-1 Erfassungszeitpunkten (*Abbildung 9*). Aus diesen Luftbildern berechnete die BfG Digitale Orthophotos mit 10 cm räumlicher Auflösung, sowie die DOP-Wassermaske und DOP-Wasser-Land-Grenze.

Bei der Validierung der Sat-Land-Fluss Algorithusergebnisse wurden Unterschiede der DOP-Wassermaske und der verschiedenen Sentinel-1 Wassermasken durch eine **pixelweise Analyse** untersucht. Dies erfolgte detailliert über die Auswertung von Konfusionsmatrizen für die Integration keiner, der einzelnen und aller Zusatzdaten (Gessler et al., 2023a). Der Genauigkeitsgewinn ist ersichtlich, z.B. wurden bei ausschließlicher Nutzung der Sentinel-1 Daten nur 67,7 % der Wasserflächen korrekt erkannt, bei Nutzung aller Zusatzdaten (hier: Fahrrinne, HAND, Landnutzung) waren es 90,3 % (*Tabelle 1*).

Insgesamt konnte durch die Nutzung der Zusatzdaten, auch im herausfordernden Gebiet des Mittelrheins, die Quote der Fehlklassifikationen um ~25 % reduziert werden, so dass nun ~85-90 % der Wasserpixel korrekt identifiziert werden.

Beispielhaft sind Karten für ist die Auswertung mit allen Zusatzdaten in *Abbildung 10* dargestellt, wobei die korrekt und falsch klassifizierten Land und Wasserflächen farblich unterlegt sind. Die noch fehlerhaften Klassifizierungen liegen v.a. in der Nähe der Wasser-Land-Grenze. Durch die räumliche Auflösung von 5 x 20 m der Sentinel-1 Daten, sind kleinskalige Strukturen (z.B. Buhnen) kaum erfassbar. Hier wurde überwiegend der Anteil des Wassers überschätzt (*Abbildung 10c,d* im Detail). In der Szenenauswertung des 17.11.2018 wird am sehr steilen nordöstlichen Ufer dagegen die Wasserausdehnung deutlich unterschätzt (*Abbildung 10a,c,d*). Dies ist vermutlich darin begründet, dass eine Abschätzung durch die schräge Blickrichtung des Satelliten (hier *ascending*, Blick aus Nordnordost) stattfand.



*Abbildung 9: Beispiel Niedrigwasser am Mittelrhein. (a) Arbeitsgebiet mit steilen Hängen und trockenliegenden Kiesbänken im Flussbett während des Niedrigwassers 2022. (b) Wasserstand 2018 am Pegel Kaub und Zeitpunkte der Sentinel-1 und Validierungsdatenerfassung. MW: Mittelwasser, GIW20: gleichwertiger Wasserstand der an statistisch 20 Tagen im Jahr unterschritten wird*

Tabelle 1: Richtigkeit der Klassifikation aus Nutzersicht (User Accuracy) für die Wassermasken, die aus Sentinel-1 SLC IW VV Daten des 17.11.2018 und des 20.11.2018 abgeleitet wurden. Die prozentualen Anteile an den Gesamtpixeln, sowie die User Accuracy beziehen sich auf den Vergleich zu den entsprechenden Wasser-/Land-Pixeln der WLK der Luftbildbe-  
fliegung vom 16.11.2018. Details siehe Gessler et al. (2023a).

User Accuracy	17.11.2018 ( <i>descending</i> )		20.11.2018 ( <i>ascending</i> )	
Klassifizierung	Wasser	Land	Wasser	Land
S-1	67,7 %	97,5 %	59,0 %	98,4 %
S-1 und Fahrrinne	67,7 %	97,5 %	59,3 %	98,5 %
S-1 und Landbedeckung	88,1 %	97,7 %	81,1 %	98,6 %
S-1 und HAND-Index	88,1 %	97,7 %	78,8 %	98,6 %
S-1 und alle Zusatzdaten	<b>90,3 %</b>	<b>99,8 %</b>	<b>85,7 %</b>	<b>98,7 %</b>
Prozentuale Verbesserung durch alle Zusatzdaten	<b>22,6 %</b>	<b>0,3 %</b>	<b>26,7 %</b>	<b>0,3 %</b>

Beim Vergleich mit *Abbildung 10b* (*descending*, Blickrichtung des Sentinel-1 Satelliten aus Südsüdost) fällt auf, dass am Nordostufer keine dominante Wasserflächenunterschätzung vorliegt. Die unterschiedlichen Schwerpunkte der Fehlklassifikationen wurden in AP 5 (Abschnitt 2.1.6) zur Produktoptimierung verwendet.

Der Vergleich der **Lagerichtigkeit** der Sentinel-1 WLK zu den Vergleichsdaten bei Verwendung aller Zusatzdaten erfolgte in Form von Abweichungsklassen in 10er Metern (*Abbildung 11*). Für die Szene des 17.11.2018 wurde das Gebiet aus *Abbildung 10a,b* ausgewertet und ergab sich eine Lagesicherheit im Bereich von 22 m ( $1\sigma$ ). Über mehrere Szenen hinweg ergab sich im dem herausfordernden Gebiet des Mittelrheins eine durchschnittliche Lagesicherheit von 24 m. Es treten v.a. größere Differenzen um die Bühnen und trocken gefallen Kiesbänke auf.

### 2.1.5.2 Anwendungsthema 2 „Hochwasser Binnen“

Das Hochwasser im Juni 2021 wurde für kurzfristige Datenerfassungen von u.a. überfluteter Vegetation genutzt. In einer Messkampagne am 19.07.2021 wurde während des Hochwasserereignisses in Westdeutschland auf der Insel Niederwerth bei Koblenz die WLK kartiert und u.a. mithilfe eines PDGNSS-Systems<sup>6</sup> eingemessen. Als Korrekturdatendienst wurde SAPOS<sup>7</sup> HEPS<sup>8</sup> genutzt, weshalb die erfassten Daten eine hohe Genauigkeit aufweisen.

Am Vorabend der Geländearbeiten überflog ein Sentinel-1 Satellit das Gebiet (S-1A 18.07.2021 19:19 Uhr bei 569 cm am Pegel Koblenz), sowie auch am Abend des Messtages (S-1B 19.07.2021 19:08 Uhr bei 534 cm am Pegel Koblenz), so dass die Wasserstände während der Feldmessungen nur wenige cm von denen der Sentinel-1-Überflüge abwichen (*Abbildung 12a*). Bei der Kartierung und den PDGNSS-Messungen wurden verschiedene Landschaftsmerkmale bzw. Landbedeckungstypen, sowie Bodenbeschaffenheit und Überflutungs-/Durchfeuchtungsgrad erfasst. Dies waren insbesondere: Weg, Wiese, Weizenfeld, Spargelfeld, Kartoffelfeld, Streuobstwiese, Wald, steile Böschung um deren Erscheinungsbild in den Sentinel-1 Auswertungen zu vergleichen (*Abbildung 12b,c*). Diese Daten geben Einblicke für eine gezielte Optimierung des Algorithmus bzgl. der Herausforderungen im Hochwasserfall.

<sup>6</sup> Präzises Differentielles Globales Satellitennavigationssystem RTK

<sup>7</sup> SAPOS: Satellitenpositionierungsdienst der deutschen Landesvermessung

<sup>8</sup> HEPS: Hochpräziser Echtzeit-Positionierungs-Service

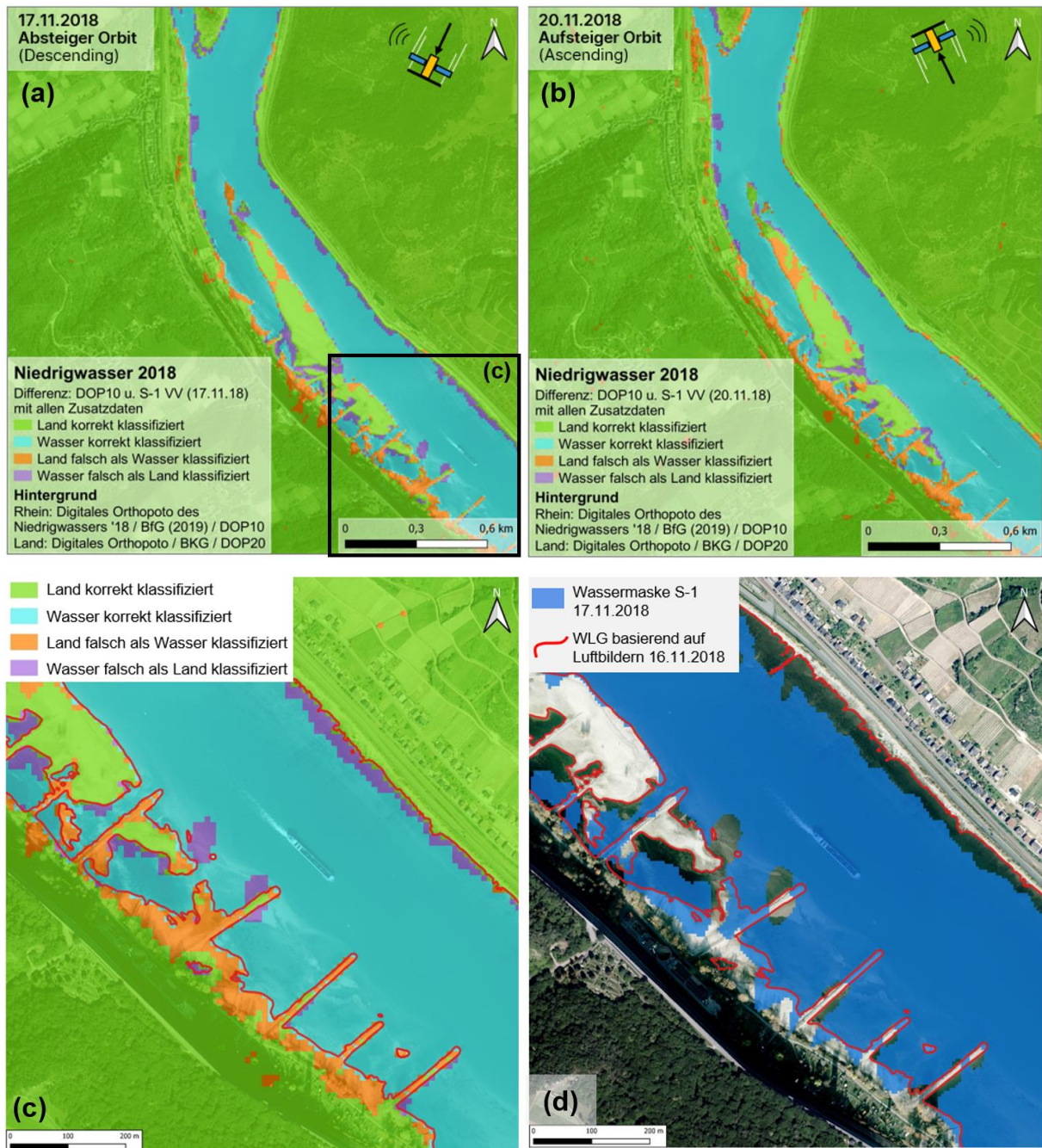


Abbildung 10: Validierung nach Pixeln. Farbliche Darstellung der Unterschiede (Klassifizierungskorrektheit) zwischen den Wasserflächen aus dem Sat-Land-Fluss Algorithmus (inklusive aller Zusatzdaten) zu dem DOP10 aus Befliegungsdaten bei vergleichbarem Wasserstand. (a) Absteigender Orbit, d.h. Blickrichtung des Sentinel-1 Satelliten vom Nordnordosten, (b) Aufsteigender Orbit mit Blickrichtung aus Südsüdosten, (c) hereingezoomter Bereich von (a) zur Detailansicht der Buhnen, (d) Sat-Land-Flusswassermaske des 17.11.2018 inkl. Validierungs-WLG, Hintergrund: DOP10 der Niedrigwasserbefliegung ©BfG

Die einzige Wasserfläche auf der Insel Niederwerth (Ausdehnung circa 45 x 30 m, z.B. *Abbildung 12c, d*), bei der kein Bewuchs oberhalb der Wasseroberfläche zu erkennen war, wurde vom Algorithmus ohne Zusatzdaten bereits grob identifiziert. Außerdem wurden die Wasserflächen des Rheins inkl. der beiden Nebenarme homogen als Wasser erkannt (*Abbildung 12d*).

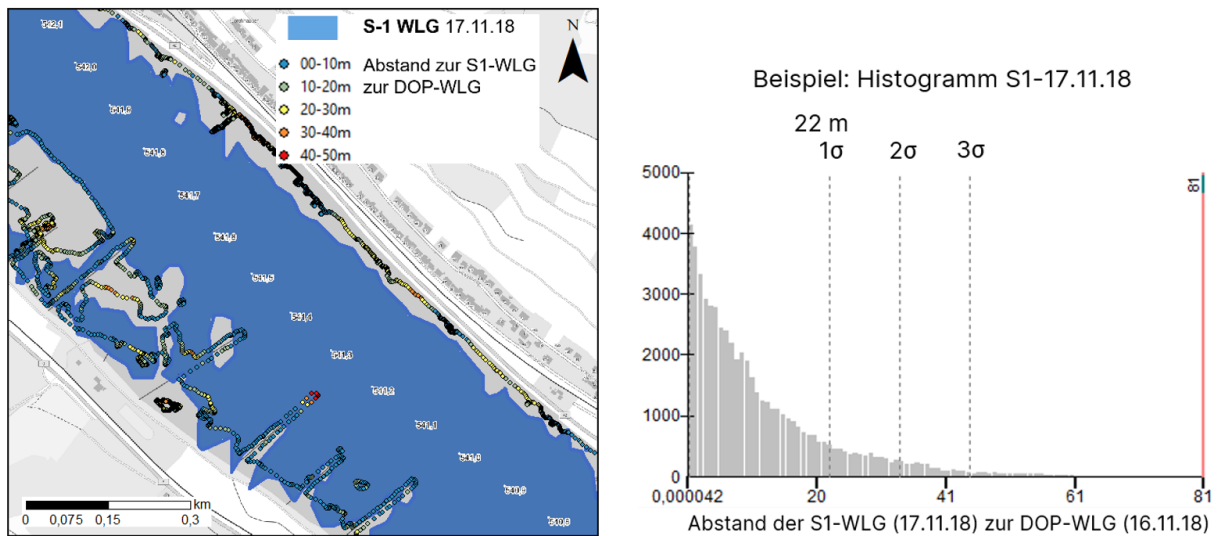


Abbildung 11: Bewertung der Lagegenauigkeit für den Sat-Land-Fluss Algorithmus inklusive aller Zusatzdaten, auf Basis von Beflegungsdaten (DOP10) bei vergleichbarem Wasserstand, Niedrigwasserfall Binnen: (a) Wassermaske des 17.11.2018 mit Abstandvalidierung als farbliche Punkte (gleicher Bildausschnitt wie Abbildung 10c,d), (b) Histogramm mit Sicherheitswahrscheinlichkeiten der Auswertung vom 17.11.2018 (Auswertungsbereich wie in Abbildung 10a,b).

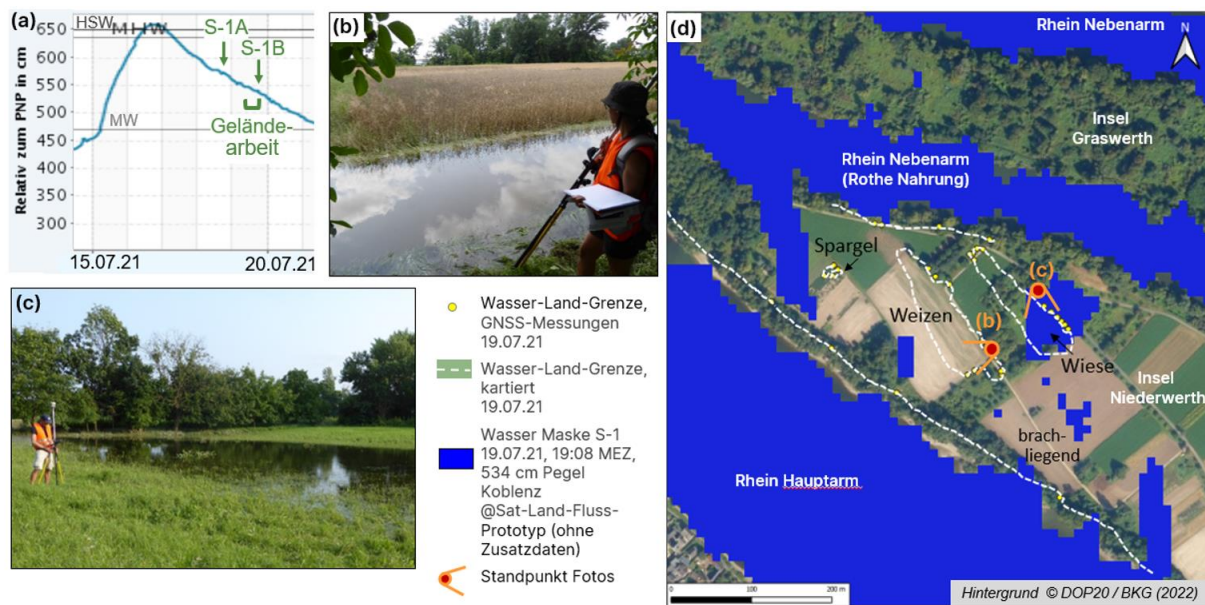


Abbildung 12: Hochwasser im Juli 2021 am Rhein bei Koblenz, Insel Niederwerth, mit Fokus auf die Überflutung verschiedener Landschaftstypen. (a) Wasserstand am Pegel Koblenz (5 km stromaufwärts), (b) überflutetes Weizenfeld, die Überflutung ist auf dem Foto und in den Sentinel-1 Daten nur auf dem Weg erkennbar. (c) überflutete Wiese, (d) Karte der Geländeergebnisse (gelbe Punkte und weiße Linien markieren die Wasser-Land-Grenze) und der Sentinel-1B Wassermaske (19.07.2021) des Sat-Land-Fluss Prototyp-Algorithmus ohne Zusatzdaten.

Herausfordernd sind jedoch:

- kleinere Überflutungsflächen, die durch die PDGNSS-Daten erfasst wurden, jedoch bisher wegen den relativ gering aufgelösten Sentinel-1 Daten (5 x 20 m räumliche Auflösung) nicht abgeleitet werden konnten.
- die Anwesenheit verschiedener Vegetationsarten im Überflutungsgrenzgebiet (Bäume, Büsche, bewachsene Ackerflächen), die durch ihre Radarrückstreuungseigenschaften die Ableitung der WLG stark beeinflussen. In den meisten überfluteten Bereichen überragte die Vegetation das Wasser (z.B. Abbildung 12b).

- die starke Blickwinkel-Abhängigkeit des Sentinel-1 Satelliten an den Grenzen zwischen Bäumen und freiem Feld bzw. Wiese. Je nach Orbit werden deshalb wasserbedeckte Flächen in diesen Grenzbereichen unterschiedlich gut abgeleitet.
- Mehrere Ackerflächen ohne Bewuchs (mit relativ geringer Bodenrauheit und hoher Durchfeuchtung) wurden fälschlicherweise als Wasserflächen identifiziert. Gemäß ihrer Höhenlage im DGM-W waren sie auch beim Scheitel nicht überflutet.

Die Lösungen für diese Punkte wurden nicht detailliert weiterverfolgt, da im Projektverlauf deutliche Verbesserungen an Hochwasserprodukten und -Dienstleistungen erreicht wurden (s. Abschnitt 2.5), die von den Verwertungspartnern und Wasserwirtschaftsverwaltungen der Länder vorerst als ausreichend genaue Monitoringdaten betrachtet werden. Detaillierte hochaufgelöste Scheiteldaten werden dagegen noch benötigt. Mit Sentinel-1 kann diese Anforderung nicht erfüllt werden, da eine genaue Terminierung und eine Bodenauflösung von möglichst  $\leq 20$  cm vorliegen sollte, so dass kurzfristige Befliegungen erforderlich sind. Dagegen sahen die Verwertungspartner einen hohen, bisher unvollständig abgedeckten Produktbedarf im Küstenbereich.

### 2.1.5.3 Anwendungsthema 3 „Dynamik im Tidebereich“

Im Gebiet des Elbe-Ästuars lagen zwar viele hochwertige Messdaten vor (u.a. verschiedene Befliegungen im Rahmen von DGM-W Erstellungen, GeoWAM Befliegungsdaten) und auch die Land-Wassergrenzen der BAW HH und Sentinel-2 Daten, allerdings ändert sich der Wasserstand und die Morphologie tidebedingt so schnell, dass durch die nicht-zeitgleichen Daten zu Sentinel-1 Aufnahmen schon deutliche Unsicherheiten auftreten. Entsprechend wurden im Projektverlauf drei verschiedene Gebiete innerhalb der Medemrinne bei Tidehochwasser und Tideniedrigwasser untersucht (Abbildung 13).

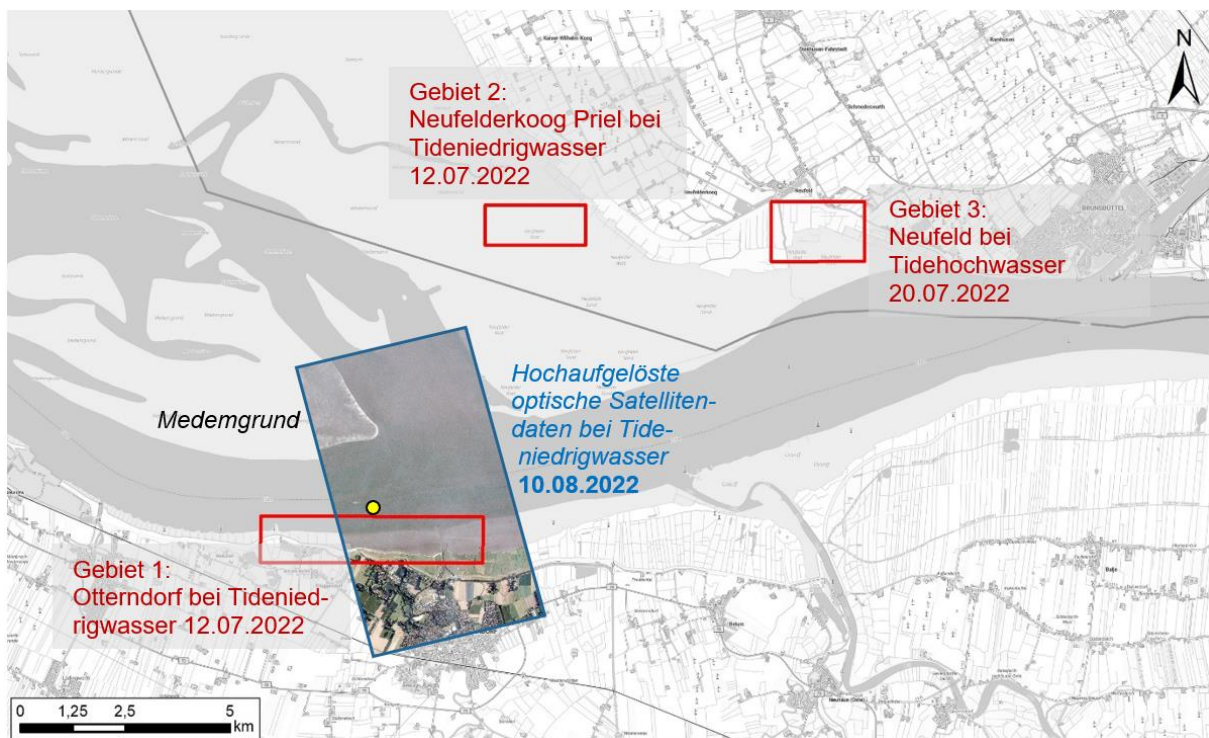


Abbildung 13: Die drei Arbeitsgebiete an der Tideelbe, Medemrinne (östlich von Cuxhaven). Des Weiteren ist die Vorschau der BlackSky-Satellitendaten über Otterndorf und dem Medemgrund vom 20.08.2022 dargestellt (kostenfreie Datenbereitstellung durch den satellitengestützten Krisen- und Lagedienst, SKD). Gelber Punkt: Pegelmessstation Otterndorf. Hintergrundkarte: Digitale Topographische Karte 1:1.00.000, DTK1000 © GeoBasis-DE / BKG (2023).

Dabei wurden parallel zu Sentinel-1 Überflügen terrestrische Geländearbeiten und UAV-Flüge<sup>9</sup> durchgeführt, zudem kamen hochaufgelöste BlackSky Satellitendaten zum Einsatz (Abbildung 14). Die PDGNSS-Vermessung erfolgte manuell durch Ablaufen der aktuell vorliegenden WLG (auflaufende Wellen, durchgeführt von Projektmitarbeitenden der BfG). Die UAV-Messungen wurden der Bundesanstalt für Gewässerkunde (BfG, Gebiet 1 12.07.2022, Tideniedrigwasser und Gebiet 3 20.07.2022, Tidehochwasser) und vom WSA EN (Gebiet 2, 12.07.2022, Tideniedrigwasser) durchgeführt (s.a. Gessler et al., 2024). Die digitalen Orthophotos aus den UAV Daten, sowie die PDGNSS-Messdaten wurden auf Zenodo<sup>10</sup> veröffentlicht. Aus allen Messdaten wurde manuell die WLG abgeleitet und als Validierungsdatensatz verwendet.

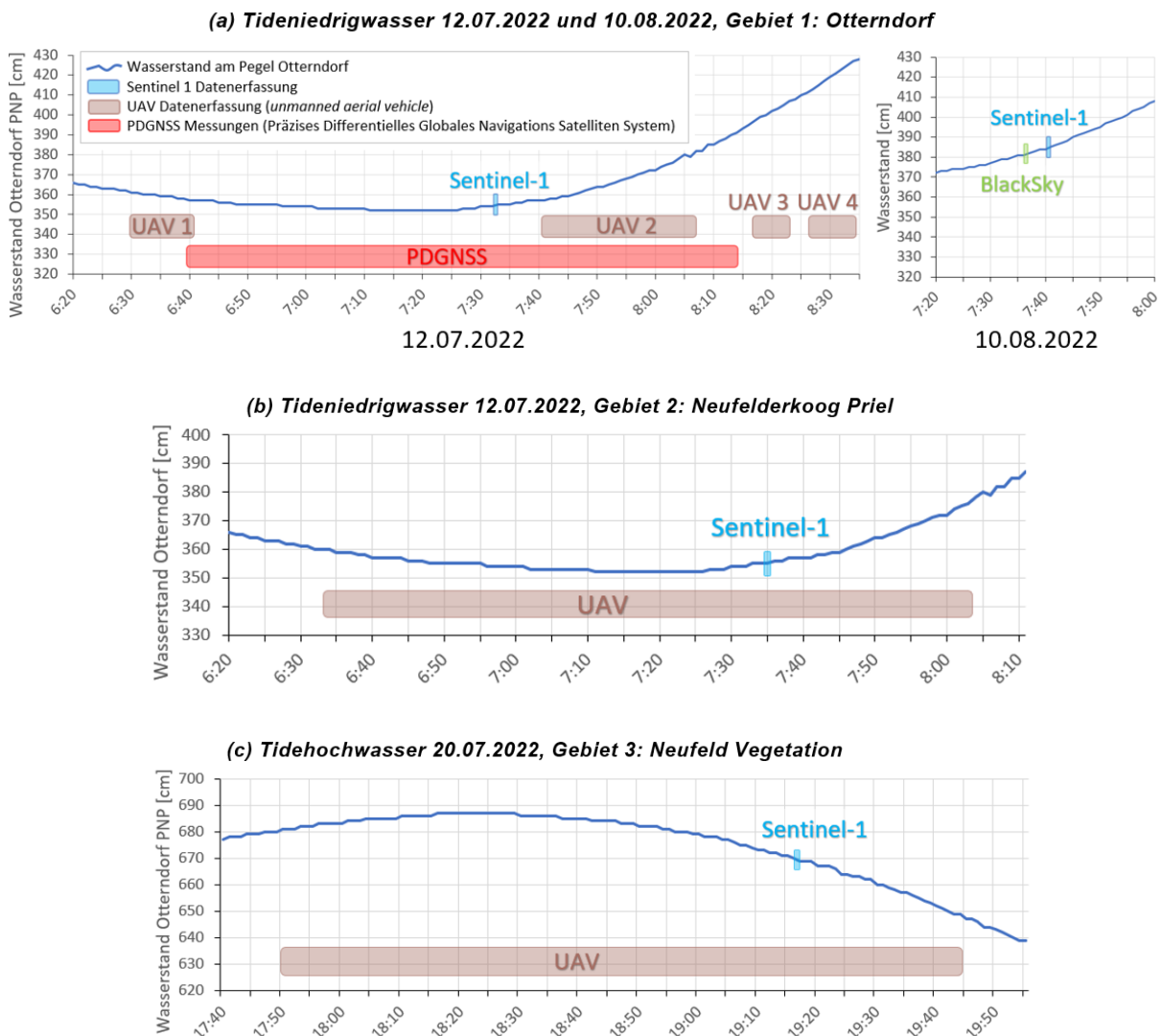


Abbildung 14: Wasserstände des Pegels Otterndorf während der Geländearbeiten, sowie die Zeiträume der Sentinel-1 Überflüge (blau markiert), der UAV<sup>9</sup>-Flüge (braune Kästen), der terrestrischen PDGNSS<sup>6</sup>-Messungen (roter Kasten) und der BlackSky Aufnahme (grün markiert).

Im **Gebiet 1 „Otterndorf“** wurden während eines Sentinel-1 Überflugs (12.07.2022, Tideniedrigwasser) neben den UAV-Bildern zusätzlich PDGNSS-Daten<sup>6</sup> erfasst und zu einem späteren Tideniedrigwasser (10.08.2022) auch hochaufgelöste optische BlackSky-Daten verwendet. Bei den UAV-Daten (RGB),

<sup>9</sup> UAV: unbemanntes Luftfahrzeug, Drohne

<sup>10</sup> <https://doi.org/10.5281/zenodo.13953070>

sowie den BlackSky-Daten waren die Kontrastverhältnisse zwischen braunen Wasserflächen und ebenfalls bräunlichem Sand bzw. Schlack herausfordernd für die Interpretation (Abbildung 15a, c).

Der Vergleich zwischen Sentinel-1- und den Validierungsdaten zeigte in der Mitte des Untersuchungsgebietes zusammenhängende Bereiche relativ niedriger Rückstreuung (Abbildung 15b).

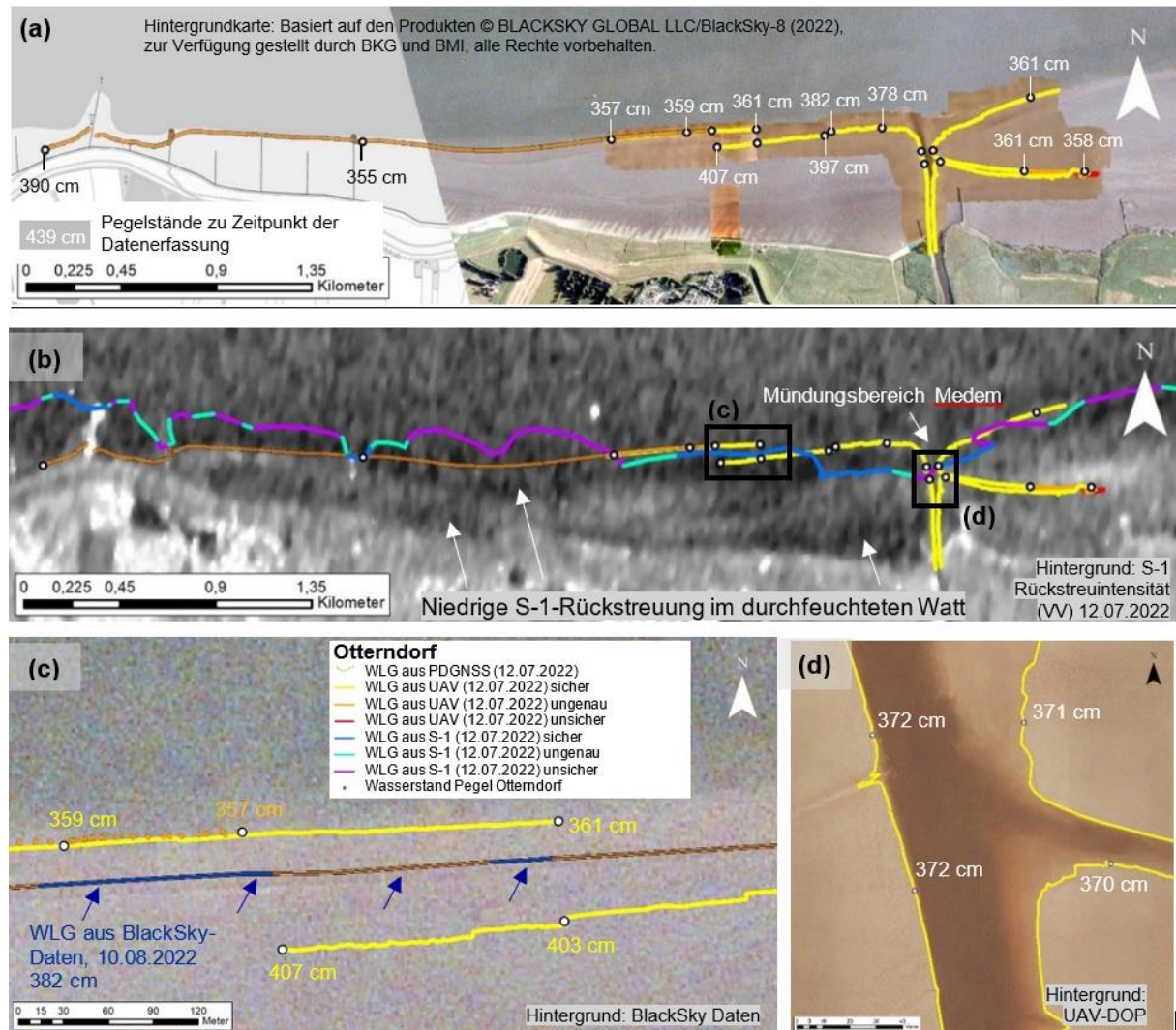


Abbildung 15: Ergebnisse der Geländearbeiten in Gebiet 1 (Otterndorf). (a) UAV-basiertes digitales Orthophoto (DOP) des 12.07.2022 und die daraus abgeleitete WLG, sowie die PDGNSS-Messwerte. Sprünge in der WLG sind auf die sich schnell ändernden Wasserstände zurückzuführen (s.a. Abbildung 14a). (b) Sentinel-1 (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 WLG und den jeweiligen Pegelständen.

Hierbei handelt es sich um knöcheltiefe Pfützen bzw. sehr nasse glatte Oberflächen, wodurch ein Großteil des ausgesendeten Radarsignals vom Sensor weg reflektiert wird. Solche Bereiche treten bei Niedrigwasser im Watt sehr häufig auf.

Weitere Auswertungen und Erkenntnisse von Herausforderungen wurden detailliert in Gessler et al. (2024) beschrieben.

Insgesamt zeigt der Vergleich zwischen Sentinel-1 und den Validierungsdaten in Gebiet 1, dass die abgeleitete S1-WLG gut zu den verschiedenen Validierungsdaten passt: 76% der Daten weichen um weniger als 70 m ab, wobei lokal Abweichungen auftreten (Abbildung 15b). Im westlichen Bereich der UAV-WLG werden die Wasserflächen durch die Sat-Land-Fluss WLG bis zu 60 m überschätzt, noch

weiter westlich kommt es im Vergleich mit den PDGNSS-Daten zu größeren Unterschätzungen (bis maximal 300 m) (*Abbildung 15b*).

Im **Gebiet 2 „Neufelderkoog Priel“** wurden die Strukturen mehrerer unterschiedlich breiter Priele aufgezeichnet (*Abbildung 16*). Der Vergleich mit der Sentinel-1 Szene (12.07.2022) ergab, dass der Haupt-Priel mit einer Breite von circa 115 m in den VV-polarimetrischen Sentinel-1 Daten deutlich und kontrastreich zu erkennen ist. Priel-Strukturen von circa 60 m Breite sind in den Sentinel-1 Daten noch auszumachen, jedoch war im Untersuchungsgebiet das Kontrastverhältnis geringer als bei dem größeren Priel. Kleinere Priele von unter 45 m Breite sind nicht mehr sichtbar. Der VH-polarimetrische Kanal lässt keinerlei Strukturen im Wattgebiet erkennen.

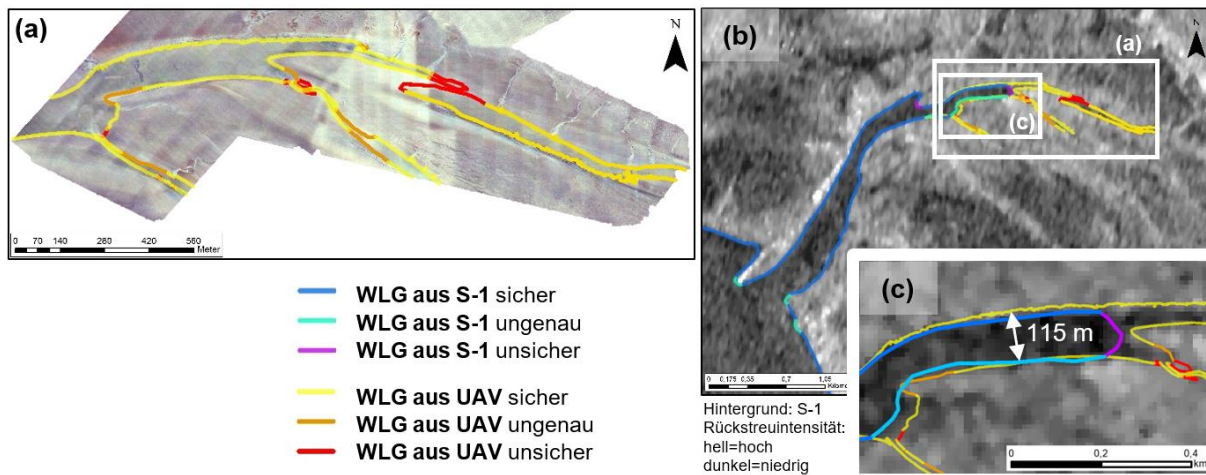


Abbildung 16: Ergebnisse der WLГ-Ableitungen in Gebiet 2 (Neufelderkoog Priel). Sentinel-1 (S-1) des 12.07.2022 um 7:33 Uhr, Tideniedrigwasser. (a) UAV-DOP des 12.07.2022 gegen 7 Uhr morgens und die daraus abgeleitete WLГ (inkl. ihrer Sicherheit), (b) Abgeleitete Sat-Land-Fluss WLГ und UAV-WLГ vor den Sentinel-1 VV-Rückstreuintensitäten, (c) Detailansicht.

Im **Gebiet 3 „Neufeld“** wurde teilgeflutete Vegetation (hier bis zu 4 m hohes Schilf) kartiert um zu untersuchen wieweit dies mit Sentinel-1 Daten möglich ist (*Abbildung 17*). Die Geländearbeiten sowie das DGM-W zeigten, dass das Schilf außerhalb der Wege im Wasser steht. Im Bereich des dichten und hoch gewachsenen Schilfs, können weder die Sentinel-1 Daten, noch die UAV-Kamera das Wasser detektieren. Ähnlich wie bereits im vorherigen Fall wurden schmale schilffreie Wasserflächen (<40 m) in den Sentinel-1 Daten (VV und VH Polarisationen) nicht mehr aufgelöst.

In den UAV-Daten wurden zudem licht bewachsene, teilweise überflutete Vegetationsflächen erfasst, die mit einer erhöhten Oberflächenrauigkeit in den Sentinel-1 Daten korrelieren und dort zu einer ähnlich hohen Rückstreuintensität wie über trockenliegenden Vegetationsflächen führen (*Abbildung 17b-c*). Dies lässt darauf schließen, dass sich mit Sentinel-1 und vermutlich auch anderen C-Band Satelliten überflutete Vegetationsbereiche größtenteils nicht von trockenliegender Vegetation unterscheiden. Bei sehr spärlichem Schilf-Bewuchs war dies an den Rändern der Vegetationsflächen begrenzt möglich.

Insgesamt ergab die Validierung im Tidebereich eine **WLГ-Lageabweichung** von ca. 20 m bei Priele und in Umgebung des Medemgrunds und um ca. 70 m im Bereich des flachen Watts bei Otterndorf (Gessler et al., 2024). Unbewachsene Wasserbereiche (z.B. Priele) sind ab ca. 75 m Breite sicher detektierbar. Im Bereich dichter (gefluteter) Vegetation (z.B. Schilf) liegt eine Wasser-Unterschätzung von mehreren 10er Metern vor (Gessler et al., 2024).

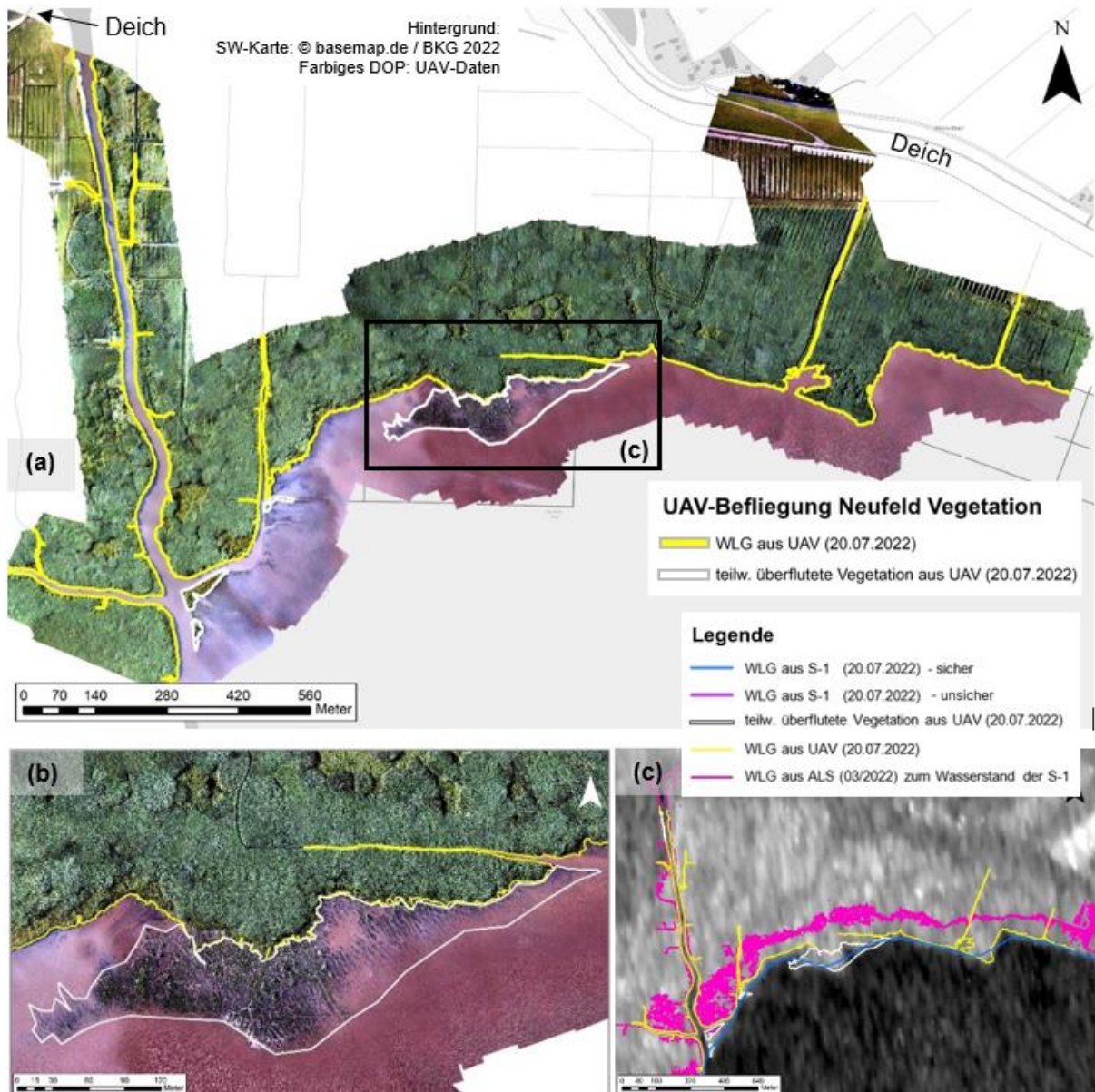


Abbildung 17: Ergebnisse in Gebiet 3 bei Neufeld. (a) UAV-DOP des 20.07.2022 gegen 19 Uhr abends. (b) Detaillierte Einblicke aus den UAV-Bildern zur großteils gefluteten Vegetation. (c) Sentinel-1 (S-1) Szene am 20.07.2022 19:17 Uhr, mit abgeleiteter WLG aus der UAV-Befliegung.

#### 2.1.5.4 Entwicklung Validierungs-/Qualitätssicherungsansatz

Sofern in Teilgebieten zukünftiger WLG-Berechnungen Validierungsdaten vorliegen, so ist eine Analyse auf Basis der Abweichungen pro Pixel sowie der Lagegenauigkeit vorgesehen.

Wenn keine Validierungsdaten vorliegen, so kann – je nach Verfügbarkeit - eine Plausibilisierung durch Vergleiche zu optischen Daten (z.B. Sentinel-2), *in-situ* Messungen, Verschnitten der Wasserstandshöhe mit einem möglichst aktuellen DGM-W, hydrodynamisch-numerischen Modellen, o.ä. erfolgen.

### 2.1.6 AP 5: Nutzungsszenarien und Umsetzungsstrategien

#### 2.1.6.1 Produktweiterentwicklung (gemeinsam mit Verwertungspartnern)

Mit der erheblich schnelleren Vorprozessierung über die CODE-DE VM konnten alle Sentinel-1 Szenen der Niedrigwasserperiode (August bis November 2018) aufbereitet werden. Im Binnenbereich konnte

so untersucht werden, wieweit **Stapelungen** von mehreren Sat-Land-Fluss Wassermasken während ähnlicher Wasserstände ( $\pm 20$  cm) weitere Verbesserungen in der WLГ-Ableitung erbringen (*Abbildung 18*). Um aus der Wahrscheinlichkeitsabdeckung auf eine klare, einzelne WLГ zu kommen, erwies es sich als optimal, wenn Bereiche die in mindestens 25 % der Szenen wasserbedeckt sind verwendet werden. Bei dem Beispiel mit 15 Szenen bedeutet das, dass überall dort Wasser ist, wo mindestens 4 auf ca. 15 m (einfache Standardabweichung) bestimmt werden kann (*Abbildung 18b,c*), Einzelszenen Wasser anzeigen (*Abbildung 18b*). Das Ergebnis zeigte, dass die Lage der WLГ hiermit was deutlich besser ist als die circa  $\pm 24$  m Lagegenauigkeit der Einzelszenen. Die Verbesserung der WLГ-Lage ist insbesondere gegeben, wenn *ascending* und *descending* Daten in möglichst gleichem Verhältnis verwendet werden. Dies ist darin begründet, dass dann die Abschattungen (s. *Abbildung 10a,b*) bestmöglich herausgemittelt werden. BfG-Kollegen des Referates „Gewässermorphologie, Sedimentdynamik und -management“ sehen in der erreichten höheren Genauigkeit die Option für weitergehende Veränderungsanalysen.

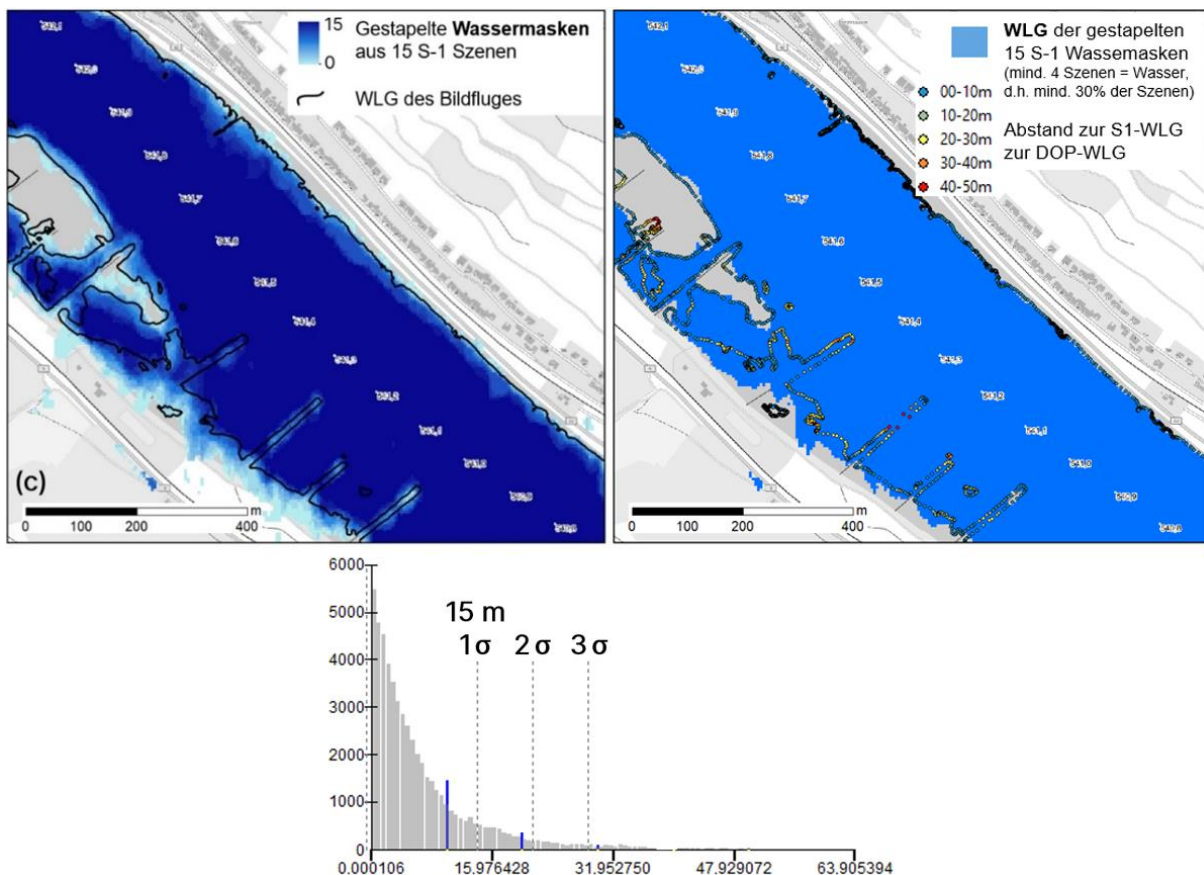


Abbildung 18: Auswertungen für die Stapelung mehrerer Sentinel-1 Szenen inkl. Zusatzdatennutzung, Beispiel Niedrigwasser 2018: (a) Gestapelte Wassermasken aus den 15 Sentinel-1 Szenen, die Szenenauswahl ist in Abbildung 9b dargestellt, (b) Bestimmte klare WLГ daraus, sowie Validierungsergebnisse der Lagegenauigkeit (c) Histogramm der Abweichung der gestapelten Sat-Land-Fluss WLГ zu den Validierungsdaten.

Im Tidebereich lieferten die Ergebnisse und Produkte der Geländearbeiten im Sommer 2022 eine sehr genaue Datengrundlage, die mit der BAW HH, dem WSA EN und dem BSH besprochen und diskutiert wurde und auch für weitere Analysen dienen kann. Basierend auf diesen Daten war u.a. auch eine unabhängige Validierung der BAW-Land-Wassergrenzen möglich (s. Abschnitt 2.1.3b).

Mit der Kanten-Methodik wurden die Sentinel-1 Daten im Tidebereich neu ausgewertet und inkl. Unsicherheiten dargestellt (*Abbildung 15 bis Abbildung 17*, Gessler et al., 2024). Im Gegensatz zur Binnenmethodik, ist somit im Tidebereich bereits eine **Qualitätsangabe** als weiterführendes Nutzerprodukt im

direkten WLK-Produkt integriert. Dieses gibt wertvolle Hinweise für eine Interpretation und Weiterverwendung der Daten, so dass die Relevanz der Ergebnisse in diesem schwer auszuwertenden Gebiet klargestellt ist. Die erstellten WLK-Ergebnisse erreichen dadurch eine nutzbare Genauigkeit für die „Küstenbehörden“ und insbesondere im Winter, wird in der Methodik ein Mehrwert gesehen, da dann optische Satellitendaten nur unzuverlässig verfügbar sind.

Neben aktueller Datengrundlage zur optimierten Vorbereitung von Messungen, wie z.B. Peilungen der WSV im Flachwasser, steht die Identifizierung von Veränderungshotspots im Fokus des Bedarfs der Verwertungspartner. Bisher liegen hierfür die vorhandenen DGM-Ws, das operationelle HN-Modell der BAW sowie die Vergabe zur Ableitung von Sentinel-2 Land-Wassergrenzen vor, mit Kostenaufwänden und methodisch bedingten Erfassungslücken. Ein weitergehender Ansatz von Sat-Land-Fluss, ist die Überlagerung von mehrere Radarbildern von verschiedenen, nahbeieinander liegenden Zeitpunkten, die auch im Binnenbereich genauere Ergebnisse lieferten. Dabei ist die Berücksichtigung von Tidephasen essentiell, idealerweise werden nur Szenen mit ähnlichen Wasserständen verwendet. Die Wasserstandsabweichung an sich dienen auch als Plausibilitätskriterium, da eine WLK höherer Wasserstände eine WLK niedrigerer Wasserstände nur in Fällen starker Veränderung oder bei Kalkulationsunsicherheiten schneidet. Zur konkreten Analyse von Veränderungen kann die der Abstands-Validierungsmethodik verwendet werden.

#### **2.1.6.2 Aufbereitung für die Weiternutzung**

Am Projektende wurde der Sat-Land-Fluss Algorithmus durch Kommentierung aufbereitet und eine Bedienungsanleitung verfasst, inkl. Nennung der verwendeten Software-Versionen und Python Umgebungen. Wie oben benannt, wurde die Weiterentwicklung von Hochwasserprodukten nicht weiter vorangetrieben und der Algorithmus ist für mittlere und niedrige Wasserstände optimiert.

#### **2.1.6.3 Gremienarbeit**

Das Projekt und die Ergebnisse wurden im Netzwerk der BfG, mit den direkten Verwertungspartnern, sowie weiteren Behörden, Universitäten, Forschungseinrichtungen und Firmen vorgestellt (s. Abschnitt 1.5). Direkte Präsentationen fanden u.a. auf dem Nationalen Forum für Fernerkundung und Copernicus statt (s. Abschnitt 2.6) und in der Arbeitsgruppe „Geodätische Forschung und Entwicklung für Anwendungen in Küstengewässern“. Durch die offenen Diskussionen des jeweils aktuellen Projektstandes, konnte eine hohe Arbeitseffizienz mit Vermeidung von Doppelarbeiten erreicht werden.

## **2.2 Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises**

Die Gesamtausgaben der BfG für dieses Projekt betragen 228.865,93 € mit einem Förderanteil von 100 % (vorbehaltlich der finalen Bestätigung durch den Projektträger).

## **2.3 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit**

Sämtliche Arbeiten wurden in angemessener Weise, entsprechend den sich aus dem Projektplan ergebenden Notwendigkeiten unter Berücksichtigung aktueller Begebenheiten und Erkenntnisse, durchgeführt. Gegenüber der ursprünglichen Kalkulation fielen die Kosten insgesamt niedriger aus, da Dienstreisen, sofern möglich, durch Webbesprechungen ersetzt wurden und da die Vergabekosten niedriger als kalkuliert ausfielen.

## 2.4 Nutzen und Verwertbarkeit des Ergebnisses

Die grundlegenden gewonnenen Erkenntnisse (Produktverständnis, technische Möglichkeiten und Limitierungen) nutzen der BfG sowie den u. g. Verwertungspartnern u. a. zur Evaluierung und Machbarkeitsbeurteilung. Das Projekt lieferte relevante Erkenntnisse, wieweit durch Integration vorhandener Zusatzdaten Informationslücken in Radarabschattungs- oder Vegetationsbereichen geschlossen werden können, sowie Fehlklassifizierungen durch Oberflächeneigenschaften deutlich reduziert werden.

Der prototypische Workflow kann bei Bedarf für ad-hoc Kalkulationen verwendet werden, da die Anforderungen der Nutzer von vornherein berücksichtigt wurden. Es ist anzumerken, dass der Algorithmus im Binnenbereich für niedrige und mittlere Wasserstände optimiert ist - und nicht für Hochwasser. Die Basis zu weiteren Kooperationen und Entwicklungsansätzen wurde durch den projektinternen Austausch und die Diskussionen mit den Verwertungspartnern gelegt. Die BfG, die Verwertungspartner und/oder andere Nutzer (z. B. Länder, Forschungsinstitute) können in den Jahren nach Projektabschluss auf den Ergebnissen aufbauende Nutzungsszenarien und -verfahren entwickeln. Voraussichtlich werden z. B. aktuelle Sentinel-1 Daten ausgewertet, die als Planungsgrundlage des WSA EN für Echolotvermessungen im Tidebereich der Elbmündung benötigt werden, um Flachwasserbereiche möglichst umfassend befahren zu können. Durch die Kenntnis der aktuellen Situation, werden die Vermessungsleistungen sicherer, umfassender und somit auch nachhaltiger.

Die WLG-Produkte werden grundsätzlich in vielerlei Richtungen benötigt, so dass vielfältige Anwendungen erwartbar sind, u. a. zum Monitoring von hydrologischen Extremereignissen sowie Umweltbedingungen für kontinuierliche Analysen morphologischer Veränderungen (z. B. Wattkanten- und Prielverlagerungen) und/oder als Grundlage für Trainingsdaten in KI-Anwendungen. Sofern Kapazitäten zur Verfügung stehen, kann der Sat-Land-Fluss Algorithmus ausgebaut werden.

Die Ergebnisse wurden auf mehreren Fachkonferenzen vorgestellt und im Netzwerk der BfG und somit z. B. im Rahmen der (deutschen) Copernicus-Aktivitäten, auf dem Nationalen Forum für Fernerkundung und Copernicus und in Gremien der Wasserwirtschaft wie z. B. die LAWA, FGGen, Küstengremien kommuniziert. Dadurch stehen sie kurz- bis mittelfristig einem großen Netzwerk zur Verfügung.

## 2.5 Bekannt gewordene Fortschritte auf dem Vorhabengebiet während der Durchführung

Während des Projektverlaufs starteten mehrere neue Dienste und Forschungsprojekte und Aktualisierungen vorhandener Dienste wurden durchgeführt. Die bekanntgewordenen Entwicklungen werden im Folgenden zusammengefasst:

Der **Copernicus Dienst für Krisen- und Katastrophenmanagement (CEMS)** verbesserte die Produkte des „*Rapid Mapping*“ signifikant. In Deutschland werden mittlerweile DGM1 Daten eingebunden um die Wassertiefe bei Überflutungen abzuschätzen (z.B. EMSR763 beim Oder-Hochwasser 2024). Dennoch weist der EMS-Dienst darauf hin, dass die thematische Richtigkeit in urbanen und bewaldeten Gebieten wegen der SAR-Limitationen geringer sein kann. Ergänzt wurde das *CEMS Rapid Mapping* zudem durch die *Aerial Component*<sup>11</sup>, bei der nach Bedarf UAV Einsätze und Befliegungen angefragt werden können, die nach Bewertung durch den CEMS und freien Kapazitäten realisiert werden können. Bisher liegen in Deutschland noch keine Erfahrungen der Aerial Component vor.

---

<sup>11</sup> <https://www.copernicus.eu/en/news/news/observer-improving-disaster-mapping-and-assessment-cems-aerial-component>

Von **UN-SPIDER**<sup>12</sup> wurde eine **Anleitung** für eine „*Step-by-Step: Recommended Practice Flood Mapping and Damage Assessment using S1 in Google Earth Engine*“ veröffentlicht<sup>13</sup>. Hierbei wird ein Verfahren aufgeführt, bei dem S1-basierte Überflutung mit dem *JRC Global Human Settlement Population Layer*<sup>14</sup> und Landnutzungsdaten (*MODIS LandCover Type dataset* der NASA<sup>15</sup>) verknüpft werden, mit dem Ziel der Schadensabschätzung. Leider ist die Nutzung von Google Earth Engine in der BfG nicht vorgesehen, somit konnte nicht untersucht werden welche Qualität die Ergebnisse haben.

Ebenfalls die Google Earth Engine nutzt der **WaterMaskAnalyzer (WMA)**, der im Rahmen des Leuchtturmprojekt BigFE durch das LfULG mit dem Schwerpunkt der Seen- und Reservoirüberwachung vorangetrieben wird (Büttig et al., 2022).

Der Dienst „**Global Flood Monitoring Service**“ (**GFM**) wurde Ende 2021 im Rahmen des CEMS etabliert. Die Produkte basieren auf Sentinel-1 Daten und werden global ermittelt. Neben Flutungsmasken werden hier u.a. auch Ausschlusslayer, Flags, permanente Wasserflächen für jede einzelne Sentinel-1 Szene frei verfügbar bereitgestellt (<https://portal.gfm.eodc.eu>). Seit dem Start des Dienstes wurde u.a. die Bestimmung des „permanent water layers“ optimiert, sowie die HAND-Kalkulation und der Flut-Kalkulations-Algorithmus weiter optimiert (<https://extwiki.eodc.eu/GFM/GFMVersioning>). Der Algorithmus ist für Hochwasser optimiert und im Binnenbereich wird bei Wasserständen unter dem mittleren Hochwasser die Wasserfläche unterschätzt. Im Tidebereich wird das durchfeuchtete Watt dagegen stets als Wasser detektiert analog zum mittleren Tidehochwasser. Die präsentierten Überflutungsflächen des Übersichtsvortrag von Frau Mechernich im Rahmen des „2nd CEMS Global Flood Forecasting and Monitoring Meeting“ zeigen weiterhin die aktuellen Ableitungen (Link zum Vortrag siehe oben unter Abschnitt 2.6). Im Hochwasserfall könnte der GFM einen relevanten Mehrertrag aufzeigen für den Fall, dass der CEMS nicht ausgelöst wird.

Das Landesamt für Vermessung und Geoinformation (LVermGeo) Schleswig-Holstein arbeitet seit Anfang 2022 an einer „Detektion von Überschwemmungsflächen“ (<https://code-de.org/de/showcases>). Hierzu wird eine k-means Klassifikation aus S1-IW (VV und VH-Polarisierung) durchgeführt und zudem werden HAND-Daten aus dem DGM von SH, ATKIS-Gewässerflächen, die Hangneigung (>3° Ausmasse), sowie die Bodenfeuchte (mit Hilfe der TU-Wien-Methode) zur Ableitung der Überschwemmungsflächen verwendet. Das Ergebnis wird als eine prozentuale Zuverlässigkeit der überschwemmten Flächen angegeben in 33 %, 66 % oder 100 %. Die Ergebnisse von drei Beispielen von Hochwasser bzw. Springflut sind im o.g. ShowCase dargestellt. Es wurden bisher keine Artikel oder GIS Karten veröffentlicht.

Entsprechend der vielen aktuellen Weiterentwicklungen im Hochwasserfall, wurde dieser in Sat-Land-Fluss nicht fokussiert. Dagegen ist weiterhin kein WLK-Produkt bekannt, das den Anforderungen der BfG und der Verwertungspartner im Niedrigwasserfall und im Tidebereich entspricht.

## 2.6 Ergebnisveröffentlichung

### 2.6.1 Tagungsband-Beiträge

Mechernich, S., Weiss, R., 2022: Fernerkundungs-Aktivitäten zu großräumigen hydrologischen Extremereignissen im Kontext des Nationalen Hochwasserschutzprogramms (NHWS). Tagungsband zur Dreiländertagung der DGPF, der OVG und der SGPF in Dresden – Publikationen der DGPF, Band 30, S. 160-172; <https://www.dgpf.de/src/tagung/jt2022/proceedings/start.html>

---

<sup>12</sup> UN-SPIDER: United Nations Platform for Space-based Information for Disaster Management and Emergency Response

<sup>13</sup> <https://www.un-spider.org/advisory-support/recommended-practices/recommended-practice-google-earth-engine-flood-mapping/step-by-step>

<sup>14</sup> [https://developers.google.com/earth-engine/datasets/catalog/JRC\\_GHSL\\_P2016\\_POP\\_GPW\\_GLOBE\\_V1](https://developers.google.com/earth-engine/datasets/catalog/JRC_GHSL_P2016_POP_GPW_GLOBE_V1)

<sup>15</sup> <https://modis.gsfc.nasa.gov/data/dataproduct/mod12.php>

Gessler, B., Mechernich, S., Baschek, B., 2023a: Detektion großräumiger Niedrigwassersituationen durch satellitenbasierte Wasser-Land-Grenzen-Bestimmung („Sat-Land-Fluss“). Tagungsband Deutsche Gesellschaft für Photogrammetrie, Geodäsie und Fernerkundung (DGPF), 31, 263-275; <https://www.dgpf.de/src/tagung/jt2023/start.html>

Gessler, B., Mechernich, S., Baschek, B., Brehm, T., 2024: Wasser-Land-Grenzen im Ästuarbereich aus S-1-Daten und Validierung mittels UAV, Gelände- und optischen Satellitendaten. Tagungsband Deutsche Gesellschaft für Photogrammetrie, Geodäsie und Fernerkundung (DGPF), 32, 442-454; <https://www.dgpf.de/src/tagung/jt2024/start.html>

### 2.6.2 Poster (internationale Konferenzen)

Gessler, B., Mechernich, S., Weiß, R., Baschek, B., 2023b: Mapping of large-scale low water situations using satellite-based water-land boundaries. European Geoscience Union General Assembly, 23.-28.04.2023, Posterbeitrag (Abstract: <https://meetingorganizer.copernicus.org/EGU23/EGU23-3415.html>)

### 2.6.3 Vorträge (Fachbeiträge und Projektvorstellungen, ohne o.g. Tagungsbandbeiträge)

Mechernich, S., 2021: Sat-Land-Fluss: Satellitenbasierte Wasser-Land-Grenzen-Bestimmung, Copernicus Austausch für den LAWA-AH, 23.04.2021, online

Mechernich, S., 2021: Satellitenbasierte Wasser-Land-Grenzen-Bestimmung „Sat-Land-Fluss“, Workshop Satellitendaten und Nutzung für den Verkehrssektor im Ressortbereich des Bundesministeriums für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMVI), 20.05.2021, online

Mechernich, S., 2021: Satellitenbasierte Wasser-Land-Grenzen-Bestimmung „Sat-Land-Fluss“, 3. Symposium zur angewandten Satellitenerdbeobachtung „Neue Perspektiven der Erdbeobachtung, Vernetzungsinitiative, 15.-16.06.2021, online

Gessler, B., Mechernich, S., 2021: Sat-Land-Fluss: Erkennung von Wasser-Land-Grenzen, Workshop "Marktplatz Satellitenfernerkundung für Binnengewässer und Bundeswasserstraßen", 07.09.2021, online; [https://www.bafg.de/DE/5\\_Informiert/3\\_Veranstaltungen/Veranstaltungsseiten/2021/2021\\_09\\_07/2021\\_09\\_07.html](https://www.bafg.de/DE/5_Informiert/3_Veranstaltungen/Veranstaltungsseiten/2021/2021_09_07/2021_09_07.html)

Mechernich, S., Gessler, B., 2022: Vorstellung Sat-Land-Fluss, Anwendungsthemen, vorhandene WLK-Produkte, Zwischenergebnisse, Validierung, Nutzer- und Umsetzungsstrategien, Fernerkundungsaustausch der BfG 10.02.2022, online

Mechernich, S., 2022: Geotopographic support of the national flood protection programme. Eingeladener Vortrag zum Geowissenschaftliches Kolloquium der Universität Münster, 23.05.2022, Münster

Mechernich, S., Gessler, B., 2022: Satellitenbasierte Wasser-Land-Grenzen-Bestimmung „Sat-Land-Fluss“ am 23.06.2022, Copernicus-Symposium „Entwicklung und Implementierungsvorbereitung von Copernicus-Diensten für den öffentlichen Bedarf in Deutschland“, Berlin

Mechernich, S., Gessler, B., Baschek, B., Judex, M., Löw, F., 2023: Exemplary evaluation results of the Global Flood Monitoring (GFM) product for applications in German federal agencies. CEMS Global Flood Forecasting and Monitoring Meeting, virtuell, 08.-09.02.2023, Vortrag; <https://www.globalfloods.eu/media/events/4/evaluation-results-of-the-gfm-product-for-applications-in-german-federal-agencies.pdf>

### 2.6.4 Internetveröffentlichungen

Bundesanstalt für Gewässerkunde, 2022: Sat-Land-Fluss, Satellitenbasierte Wasser-Land-Grenzen-Bestimmung, Sat-Land-Fluss, Kompendium Forschung und Entwicklung 2022/2023 BMDV, Seiten 28-29; [https://www.bafg.de/SharedDocs/Downloads/DE/bfg\\_publicationen\\_OeA/fue\\_kompendium\\_2022\\_2023.pdf?\\_\\_blob=publicationFile&v=1](https://www.bafg.de/SharedDocs/Downloads/DE/bfg_publicationen_OeA/fue_kompendium_2022_2023.pdf?__blob=publicationFile&v=1)

Mechernich, S., Gessler, B., 2022: Darstellung von Sat-Land-Fluss auf der D-Copernicus-Webseite. [https://www.d-copernicus.de/fileadmin/Content/pdf/Beispiele-aus-Deutschland/binnengewaeser/Sat\\_Land\\_Fluss.pdf](https://www.d-copernicus.de/fileadmin/Content/pdf/Beispiele-aus-Deutschland/binnengewaeser/Sat_Land_Fluss.pdf) (veröffentlicht 26.04.2022)

Mechernich, S., 2025: Sat-Land-Fluss, Satellitenbasierte Wasser-Land-Grenzen-Bestimmung, Sat-Land-Fluss, Kompendium Forschung und Entwicklung 2024/2025 BMDV, in Vorbereitung

### **2.6.5 Datenveröffentlichung**

Die im Rahmen des Projektes Sat-Land-Fluss erhobenen Digitalen Orthophotos die Wasser-Land-Grenzen Einmessungen sind über Zenodo öffentlich zugänglich unter <https://doi.org/10.5281/zenodo.13953070>. Der Online-Speicherdienst Zenodo wird hauptsächlich für wissenschaftliche Datensätze, aber auch für wissenschaftsbezogene Software, Publikationen, Berichte, Präsentationen, Videos etc. verwendet und von der Europäischen Kommission finanziert.

Die Metadaten sind zudem im Geoportal der BfG eingespeist.

### **2.6.6 Sonstiges**

Gessler, B., Mechernich, S., 2022: Sat-Land-Fluss, Touch-Table-Präsentation, Nationales Forum für Fernerkundung und Copernicus 2022, 21.-23.06.2022, Berlin

## 3 Verzeichnisse

### Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1:	Projektablaufplan, wesentliche Abhängigkeiten sind mit Pfeilen markiert.....	7
Abbildung 2:	Darstellung des Validierungs- und Auswerteworkflows.....	8
Abbildung 3:	Auswertungen des Donau-Hochwassers am Straubinger Bogen im Juni 2013. (a) Orthophoto (©BfG) und abgeleitete scheinnahe WLK (©BfG) aus dem WSV Bildflug vom 5.6.2013. (b) BfG-Orthophoto aus a) mit Überschwemmungsfläche, die aus TerraSAR-X Daten abgeleitet wurde (4.6.2013, ZKI). Klar erkennbar sind Unterschätzungen der Überschwemmungsfläche in Vegetationsbereichen (Gebiete V) sowie Überschätzungen in durchfeuchteten Bereichen (Gebiete D).....	10
Abbildung 4:	Karte mit den Anwendungsgebieten. (a) Mittelrhein zum Anwendungsthema Niedrigwasser, (b) Rhein von Koblenz bis zur Ahrmündung zum Anwendungsthema Hochwasser und (c) Tideelbe zum Anwendungsthema Küstendynamik. ....	18
Abbildung 5:	Niedrigwasser 2018: Sentinel-1 Wasserflächenableitung ohne (links) und inkl. aller Zusatzdaten (Fahrrinne, HAND-Index, Landbedeckung, rechts). Die weißen Bereiche markieren fehlklassifizierte Gebiete, die durch die Zusatzdaten korrigiert werden konnten. Exemplarisch sind diese dabei mit Buchstaben markiert (Fahrrinne = F, HAND-Index = H, Landbedeckung = L), s.a. Gessler et al. (2023a). ....	22
Abbildung 6:	Schematische Darstellung zur Wasser-Land-Grenzen Ableitung von Sat-Land-Fluss aus Sentinel-1 und Geobasisdaten. Die Methode unterscheidet sich im (a) Binnenbereich und (b) Tidebereich durch die unterschiedliche Gewässercharakteristik. ....	23
Abbildung 7:	Beispiel der Rückstreuintensität im Untersuchungsgebiet der Tideelbe (Tideniedrigwasser 12.07.2022), hier inkl. abgeleitete Wasser-Land-Grenzen (WLK) durch Extraktion der Kanten mittels Sat-Land-Fluss Algorithmus. Die Farben der WLK geben die Sicherheit der Lage wieder. Hintergrund: Sentinel-1 Rückstreuintensität (VV) vom 12.07.2022.....	24
Abbildung 8:	Methodik der Kanten-Detektion an der Küste am Beispiel des Tideniedrigwassers am 12.07.2022. Im Hintergrund ist die Rückstreuintensität der vorprozessierten Sentinel-1 (S-1) Szene (VV-Polarisierung) mit Speckle-Filter Median 3x3 dargestellt. (a) extrahierte Kanten Median 3x3, 11x11 und 17x17, (b) daraus extrahierte WLK aus den Sentinel-1 Daten des 12.07.2022. Dabei wird nur die WLK von angeschlossenen Gewässern kartiert (und keine stehenden Gewässer). WLK sicher bei zwei oder drei Kanten, WLK ungenau bei einer Kante, WLK unsicher ist manuell erstellt, basierend auf Rückstreuintensität.....	24

- Abbildung 9: Beispiel Niedrigwasser am Mittelrhein. (a) Arbeitsgebiet mit steilen Hängen und trockenliegenden Kiesbänken im Flussbett während des Niedrigwassers 2022. (b) Wasserstand 2018 am Pegel Kaub und Zeitpunkte der Sentinel-1 und Validierungsdatenerfassung. MW: Mittelwasser, GIW20: gleichwertiger Wasserstand der an statistisch 20 Tagen im Jahr unterschritten wird..... 25
- Abbildung 10: Validierung nach Pixeln. Farbliche Darstellung der Unterschiede (Klassifizierungskorrektheit) zwischen den Wasserflächen aus dem Sat-Land-Fluss Algorithmus (inklusive aller Zusatzdaten) zu dem DOP10 aus Befliegungsdaten bei vergleichbarem Wasserstand. (a) Absteigender Orbit, d.h. Blickrichtung des Sentinel-1 Satelliten vom Nordnordosten, (b) Aufsteigender Orbit mit Blickrichtung aus Südsüdosten, (c) hereingezoomter Bereich von (a) zur Detailansicht der Bühnen, (d) Sat-Land-Flusswassermaske des 17.11.2018 inkl. Validierungs-WLG, Hintergrund: DOP10 der Niedrigwasserbefliegung ©BfG ..... 27
- Abbildung 11: Bewertung der Lagegenauigkeit für den Sat-Land-Fluss Algorithmus inklusive aller Zusatzdaten, auf Basis von Befliegungsdaten (DOP10) bei vergleichbarem Wasserstand, Niedrigwasserfall Binnen: (a) Wassermaske des 17.11.2018 mit Abstandsvalidierung als farbliche Punkte (gleicher Bildausschnitt wie Abbildung 10c,d), (b) Histogramm mit Sicherheitswahrscheinlichkeiten der Auswertung vom 17.11.2018 (Auswertungsbereich wie in Abbildung 10a,b). ..... 28
- Abbildung 12: Hochwasser im Juli 2021 am Rhein bei Koblenz, Insel Niederwerth, mit Fokus auf die Überflutung verschiedener Landschaftstypen. (a) Wasserstand am Pegel Koblenz (5 km stromaufwärts), (b) überflutetes Weizenfeld, die Überflutung ist auf dem Foto und in den Sentinel-1 Daten nur auf dem Weg erkennbar. (c) überflutete Wiese, (d) Karte der Geländeergebnisse (gelbe Punkte und weiße Linien markieren die Wasser-Land-Grenze) und der Sentinel-1B Wassermaske (19.07.2021) des Sat-Land-Fluss Prototyp-Algorithmus ohne Zusatzdaten. .... 28
- Abbildung 13: Die drei Arbeitsgebiete an der Tideelbe, Medemrinne (östlich von Cuxhaven). Des Weiteren ist die Vorschau der BlackSky-Satellitendaten über Otterndorf und dem Medemgrund vom 20.08.2022 dargestellt (kostenfreie Datenbereitstellung durch den satellitengestützten Krisen- und Lagedienst, SKD). Gelber Punkt: Pegelmessstation Otterndorf. Hintergrundkarte: Digitale Topographische Karte 1:1.00.000, DTK1000 © GeoBasis-DE / BKG (2023). .... 29
- Abbildung 14: Wasserstände des Pegels Otterndorf während der Geländearbeiten, sowie die Zeiträume der Sentinel-1 Überflüge (blau markiert), der UAV<sup>9</sup>-Flüge (braune Kästen), der terrestrischen PDGNSS<sup>6</sup>-Messungen (roter Kasten) und der BlackSky Aufnahme (grün markiert)..... 30
- Abbildung 15: Ergebnisse der Geländearbeiten in Gebiet 1 (Otterndorf). (a) UAV-basiertes digitales Orthophoto (DOP) des 12.07.2022 und die daraus abgeleitete WLG, sowie die PDGNSS-Messwerte. Sprünge in der WLG sind auf die sich schnell ändernden Wasserstände zurückzuführen (s.a. Abbildung 14a). (b) Sentinel-1 (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 WLG und den jeweiligen Pegelständen. ....	31
Abbildung 16:	Ergebnisse der WLG-Ableitungen in Gebiet 2 (Neufelderkoog Priel). Sentinel-1 (S-1) des 12.07.2022 um 7:33 Uhr, Tideniedrigwasser. (a) UAV-DOP des 12.07.2022 gegen 7 Uhr morgens und die daraus abgeleitete WLG (inkl. ihrer Sicherheit), (b) Abgeleitete Sat-Land-Fluss WLG und UAV-WLG vor den Sentinel-1 VV-Rückstreuintensitäten, (c) Detailansicht. ....	32
Abbildung 17:	Ergebnisse in Gebiet 3 bei Neufeld. (a) UAV-DOP des 20.07.2022 gegen 19 Uhr abends. (b) Detaillierte Einblicke aus den UAV-Bildern zur großteils gefluteten Vegetation. (c) Sentinel-1 (S-1) Szene am 20.07.2022 19:17 Uhr, mit abgeleiteter WLG aus der UAV-Befliegung. ....	33
Abbildung 18:	Auswertungen für die Stapelung mehrerer Sentinel-1 Szenen inkl. Zusatzdatennutzung, Beispiel Niedrigwasser 2018: (a) Gestapelte Wassermasken aus den 15 Sentinel-1 Szenen, die Szenenauswahl ist in Abbildung 9b dargestellt, (b) Bestimmte klare WLG daraus, sowie Validierungsergebnisse der Lagegenauigkeit (c) Histogramm der Abweichung der gestapelten Sat-Land-Fluss WLG zu den Validierungsdaten. ....	34

## Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:	Richtigkeit der Klassifikation aus Nutzersicht (User Accuracy) für die Wassermasken, die aus Sentinel-1 SLC IW VV Daten des 17.11.2018 und des 20.11.2018 abgeleitet wurden. Die prozentualen Anteile an den Gesamtpixeln, sowie die User Accuracy beziehen sich auf den Vergleich zu den entsprechenden Wasser-/Land-Pixeln der WLG der Luftbildbefliegung vom 16.11.2018. Details siehe Gessler et al. (2023a).....	26
------------	---	----

## Literaturverzeichnis

siehe Abschnitte 1.4.4 und 2.6.

**Bundesanstalt für Gewässerkunde**

Am Mainzer Tor  
56068 Koblenz

Telefon: +49 261 1306-0

Telefax: +49 261 1306-5302

E-Mail: [posteingang@bafg.de](mailto:posteingang@bafg.de)

[www.bafg.de](http://www.bafg.de)