

Detektion großräumiger Niedrigwassersituationen durch satellitenbasierte Wasser-Land-Grenzen-Bestimmung („Sat-Land-Fluss“)

BASTIAN GESSLER¹, SILKE MECHERNICH² & BJÖRN BASCHEK³

Zusammenfassung: Ausdehnung und Lage von wasserbedeckten Gebieten sind für vielfältige Anwendungen von Interesse wie z.B. für das Monitoring von hydrologischen Extremereignissen. Um die auftretenden Prozesse besser verstehen und Schäden möglichst gering halten zu können, sind quantitative Informationen über Lage und Verlagerung der Grenze zwischen Wasser und Land von großer Bedeutung (Wasser-Land-Grenze, WLG). Der Radarsatellit Sentinel-1 (S-1) bietet hier großes Potential, deshalb verwendet das Projekt „Sat-Land-Fluss“ diese Daten als Grundlage. Bei der Auswertung der S-1 Daten sind technische Herausforderungen zu lösen und eine Kombination mit anderen Daten zielführend, um Datenlücken und Unsicherheiten zu minimieren. Im Projekt werden Radar-Rückstreuinformationen aufbereitet und mit verschiedenen Geobasisdaten kombiniert. Schwerpunktmäßig untersucht das Projekt, wieweit die Integration dieser Zusatzdaten die Qualität der WLG-Produkte steigern kann. Dieser Beitrag fokussiert sich auf die Niedrigwassersituation 2018 am Rhein.

1 Einleitung und Motivation

Hydrologische Extremereignisse sowie kontinuierliche Prozesse verändern laufend die Grenze zwischen Wasser und Gelände bzw. den trockengefallenen Flächen der Wasserwechselzone. Die Ausprägung und Verlagerung der Wasser-Land-Grenze (WLG) sind wesentliche Größen für das Prozessverständnis im Bereich der Binnen- und Küstengewässer. Darum ist deren Erfassung bzw. Monitoring eine Basisvoraussetzung zur Bearbeitung vielfältiger Fragestellungen des Gewässer-managements.

Dazu bietet sich aus fachlichen und wirtschaftlichen Überlegungen der Einsatz satellitengestützter Fernerkundungsverfahren, insbesondere die Nutzung der kostenfreien Copernicus-Datenprodukte des Satelliten Sentinel-1 (S-1, Radar), an. Das Projekt „Sat-Land-Fluss“ zielt darauf ab, die Verlässlichkeit der aus S-1 Daten abgeleiteten WLG zu analysieren und dabei das Potential, sowie die Limitierungen der Produkte zu untersuchen.

Dieser Beitrag zeigt auf, wieweit die Integration von Zusatzdaten die S-1 Datenauswertungen in Niedrigwassersituationen verbessern. Solche Ableitungen können z.B. für das Monitoring von Extremereignissen, ein Veränderungsmonitoring zur Unterstützung des Sedimentmanagement und zur Überwachung der Schiffbarkeit dienen.

¹ Bundesanstalt für Gewässerkunde (BfG), Am Mainzer Tor 1, D-56068 Koblenz, gessler@bafg.de

² Bundesanstalt für Gewässerkunde (BfG), Am Mainzer Tor 1, D-56068 Koblenz, mechernich@bafg.de

³ Bundesanstalt für Gewässerkunde (BfG), Am Mainzer Tor 1, D-56068 Koblenz, baschek@bafg.de

2 Forschungsstand

Die Nutzung von Radardaten (SAR) bietet sich an, da die Daten – im Gegensatz zu optischen Satellitendaten - unabhängig von Tageslicht und Wetter auswertbar sind. Entsprechend haben die Radardaten ein höheres Potential, um kurzfristige Ereignisse zeitgerecht zu detektieren (OLTHOF & TOLSZCZUK-LECLERC 2018).

Aufgrund der schrägen Aufnahmegeometrie kommt es bei SAR Bildern zu geometrisch bedingten Abbildungseffekten, wie *Foreshortening*, *Layover* und Abschattung, die durch Relief, Bauwerke und hohe Vegetation verursacht werden. Während *Foreshortening* und *Layover* durch geometrische Korrekturen weitestgehend behoben werden können, treten im Bereich von Abschattungen (z.B. durch Steilkanten) Datenlücken auf. Um die Datenlücken zu schließen, lässt die Nutzung von Zusatzdaten (z.B. DGM-Integration) erhebliche Produkt-Verbesserung erhoffen (HUANG et al. 2018; LIAO & WEN 2020; OLTHOF & TOLSZCZUK-LECLERC 2018).

Meist wird zur WLG-Ableitung die Intensität der Rückstreuung genutzt, da glatte Wasseroberflächen spiegelnde Eigenschaften und somit geringere Rückstreuintensitäten aufweisen (MARTINIS et al. 2015). Die Rückstreuungseigenschaft von Gewässeroberflächen erhöht sich bei rauen Wasseroberflächen, die bei Strömung, Schiffswellen oder zunehmender Windstärke entstehen. Glatte Landoberflächen (z.B. Flugplätze) 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). Um Interpretationsfehler zu vermeiden werden die SAR-Daten häufig mit Informationen anderer Sensoren, wie optischen Daten oder digitalen Gelände- und Oberflächenmodellen kombiniert oder eine multitemporale Auswertung von Daten durchgeführt (OLTHOF & TOLSZCZUK-LECLERC 2018; LIAO & WEN 2020; HUANG et al. 2018; MARTINIS et al. 2018).

Verschiedene Projekte und laufende Dienste zeigen die generelle Machbarkeit der WLG-Ableitung aus satellitengestützten Radardaten, z. B. existieren mehrere Dienste des Copernicus Emergency Management Service (CEMS; Rapid Mapping, Risk and Recovery Mapping, Global Flood Monitoring), die Satellitendaten zur Erstellung von Hochwasserprodukten (inkl. WLG) verwenden. Die beiden Kartierungsarten des CEMS-Dienstes stellen in/nach einer Krise Karten bereit, die auf Auswertungen von Satellitenaufnahmen basieren (BBK 2023). Die Dienste müssen über eine nationale Kontaktstelle aktiviert werden. Beim *Global Flood Monitoring* (GFM) werden dagegen automatisiert alle S-1 Szenen ausgewertet und jeweils eine abgeleitete Überflutungsfläche, sowie weitere Informationen (u.a. Ausschlusswerte, Unsicherheiten) in einer Webanwendung visualisiert (EODC 2023). Die ausgewerteten Produkte zeigen in der aktuellen beta-Version Plausibilitätsfehler bei der Wasserklassifizierung auf trockenengefallenen Flächen auf. Durch die oftmals fehlende Validierung ist die Belastbarkeit der Produkte weitgehend unbekannt und somit die Nutzung für kritische Fragestellungen nur eingeschränkt möglich.

Im Gegensatz zu den operationellen Produkten, nutzt dieser Beitrag hochaufgelöste Geländeinformationen zur Datenvorprozessierung (S-1) und verschiedene GeoBasisdaten zur Erstellung von Ausschlussmasken in Zuge der WLG-Bestimmung. Die abgeleiteten Wasserflächen werden mit hochaufgelösten, zeitlich in geringem Abstand versetzten Validierungsdaten abgeglichen, wodurch eine präzise Validierung vorliegt.

3 Datengrundlagen

3.1 Sentinel-1

Bei den verwendeten S-1 Daten handelt es sich um Level-1 SLC (Single Look Complex) Daten, die im *Interferometric Wide Swath* Modus aufgezeichnet werden und sowohl VV als auch VH-polarisiert sind. Die räumliche Auflösung beträgt bei S-1 beträgt circa 5 x 20 m. In Deutschland deckt der verbleibende S-1A ein Gebiet ca. alle 6 Tage ab (ESA 2022).

Bei der Auswertung von Radardaten sind die in Kap. 2 genannten technische Herausforderungen zu lösen. Zudem stößt die Erfassung von bestimmten Objekten aufgrund der relativ niedrigen räumlichen Auflösung teilweise an ihre Grenzen, z. B. bei der Erfassung „kleiner“ Strukturen wie Bühnen. Diese können je nach Blickrichtung des Satelliten, Einfallswinkel der Radarstrahlen bzw. Größe der Objekte nicht immer erfasst werden (JENEROWICZ et al. 2019), da die Radar-Rückstreuung vom Einfallswinkel abhängt und somit u. a. je nach Satelliten-Orbit (aufsteigend/absteigend) und Entfernung eines Objekts zum Sensor variiert (KAPLAN et al. 2021).

3.2 Zusatzdaten

Die verwendeten Zusatzdaten zur Verbesserung der WLГ-Ableitung aus S-1 Daten werden im Folgenden kurz vorgestellt.

a) Landbedeckung/Landcover – ESA WorldCover 2020

Im Projekt werden Landbedeckungsinformationen des frei und global verfügbaren Datensatzes *WorldCover* der Europäischen Weltraumorganisation (ESA) verwendet (Version 2020). In den WorldCover Daten wurden optische (S-2), sowie Radardaten (S-1) kombiniert (ESA 2023a).

b) Höhendaten (DGM5) und HAND-Index

Aus dem Digitalen Geländemodell Gitterweite 5 m (DGM5, 2016) des Bundesamt für Kartographie und Geodäsie (BKG) wurde im Projektverlauf der HAND-Index (Height Above Nearest Drainage, NOBRE et al. 2011) berechnet. Während der Prozessierung wird die Geländetopographie entlang eines bestimmten Entwässerungssystems in Beziehung zur relativen Höhe gesetzt, so dass der Index das Entwässerungspotential des jeweiligen Pixels widerspiegelt.

c) Fahrrinneninformationen

Im Bereich der Fahrrinne der Bundeswasserstraßen liegt stets Wasser vor, auch im extremen Niedrigwasserfall. Die Lage der Fahrrinne wurde aus den Daten des Wasserstraßen- und Schifffahrtsamtes (WSA) Rhein entnommen (Stand 2021).

3.3 Validierungsdaten

Um beurteilen zu können, wie gut der Algorithmus die WLГ abbildet, sind Validierungsdaten erforderlich. Für die in diesem Beitrag ausgewertete Niedrigwassersituation am Mittelrhein 2018 (Abb. 1) wurden Informationen aus einem Bildflug verwendet, der im Auftrag des Wasserstraßen- und Schifffahrtsamtes (WSA) Oberrhein durchgeführt wurde.

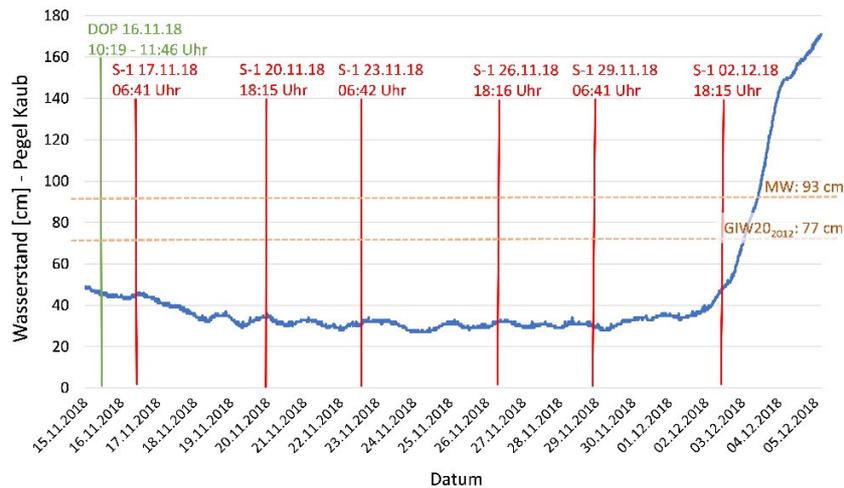


Abb. 1: Wasserstände um die Niedrigwassersituation 2018 am Pegel Kaub (Mittelrhein), mit den Zeitpunkten der verfügbaren Sentinel-1 Daten (rot) sowie der Befliegung (grün). Der Mittelwasserstand (MW) und gleichwertiger Wasserstand (GIW20₂₀₁₂, Wasserstand der statistisch an 20 Tagen im Jahr unterschritten wird) sind als horizontale orange Linien abgebildet.

Der Bildflug fand im Projektgebiet am 16.11.2018 statt, und somit kurz vor dem Zeitpunkt des niedrigsten Wasserstandes 2018. Aus den Bildflugdaten generierte die BfG DOPs mit 10 cm Bodenauflösung, woraus in einem GIS die WLG visuell bzw. manuell abgeleitet wurde.

4 Methodik

Das methodische Vorgehen bei der Datenprozessierung ist in Abb. 2 dargestellt. In die Aufbereitung der S-1 Daten (Vorprozessierung) fließen Höheninformationen des DGM5 ein, die bei der Geländekorrektur für die Homogenisierung der Daten sorgen. Bei der Reduzierung des sogenannten *Speckle*-Effekts werden Filter verwendet, die Objektstrukturen nach Möglichkeit optimal zur späteren Extraktion der Wasserflächen konservieren. Der *Speckle*-Effekt muss deshalb je nach Anwendung möglichst stark gemindert werden, da dieser Störeffekt den Informationsgehalt und die Bildinterpretation negativ beeinflusst (KUMAR 2021). Die Vorprozessierung ist nach weitestgehender Bereinigung der S-1 Daten abgeschlossen und es folgt die Grenzwertbildung nach KITTNER & ILLINGWORT (1985).

Anschließend werden mehrere Ausschlussmasken erstellt, die in Bereichen von sicherem Wasser (Fahrrinne) oder sicherem Land (bestimmte Landnutzungsklassen und Entwässerungspotentiale) angewandt werden. Aus der Kombination der ausgewerteten S-1 Daten und den Masken der Zusatzdaten ergibt sich eine Wassermaske (Abb. 2). Aus dieser können im weiteren Projektverlauf die WLG sowie weitere WLG-Produkte errechnet werden.

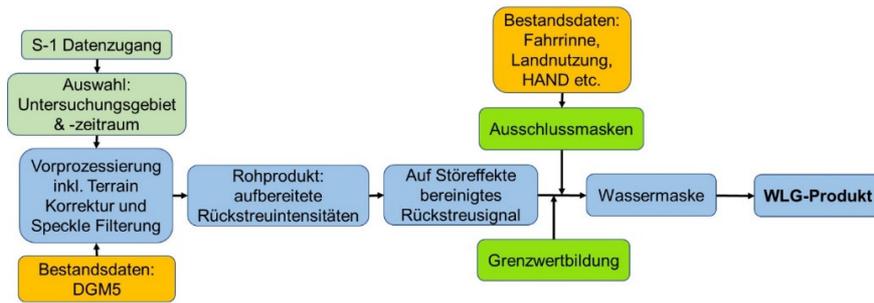


Abb. 2: Schematische Darstellung der Methodik der WLG-Ableitung.

5 Anwendungsbeispiel Niedrigwasser Mittelrhein

Das Projektgebiet für das Niedrigwasser 2018 wurde im Bereich des Mittelrheins gewählt (Abb. 3). Hier befinden sich mehrere Kiesbänke, von denen einige immer und andere nur bei niedrigen Wasserständen trockenfallen. Die starke Topographie (Abb. 3b) erschwert die vollständige Datenerfassung aufgrund von Abschattungen, so dass hier die aufwändige Geländekorrektur während der S-1 Datenaufbereitung einen Mehrertrag erzielt.

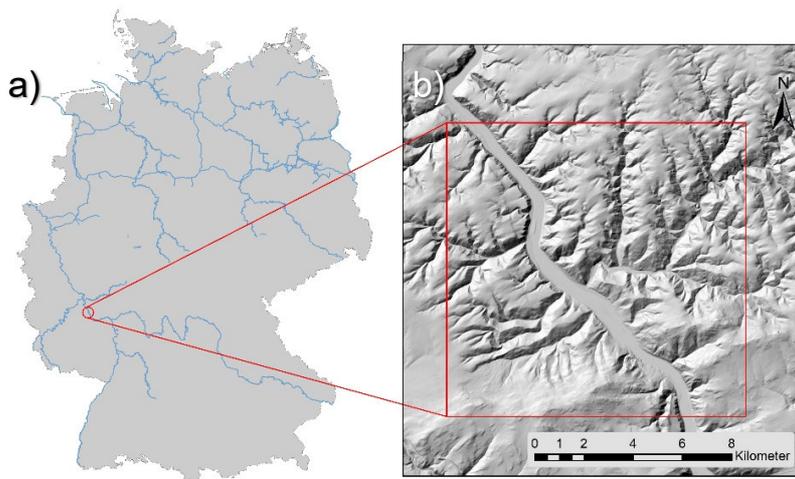


Abb. 3: (a) Deutschland mit dem Verlauf der Bundeswasserstraßen (BWaStr, © WSV) und dem Punkt des Untersuchungsgebietes, (b) Schummerung im Bereich des Mittelrheins (© basemap.de / BKG Januar 2023).

Am Rhein begann die Niedrigwassersituation 2018 im August und hielt auch noch den kompletten November bei sehr ähnlichen Wasserständen an. Im November fand am Mittelrhein ein Bildflug und sechs Sentinel-1 (S-1) Aufnahmen statt (Abb. 1). Der Bildflug und die daraus abgeleitete WLG diente zur Validierung der S-1 Auswertungen. Die S-1 Szene vom 17.11.2018 wird hier als Beispiel gezeigt. Nach eingehender Prüfung beider Polarisierungen (VH, VV) der S-1 Szene des 17.11.2018, wurde die VV-polarisierten Daten als weniger fehleranfällig identifiziert. Deshalb beziehen sich alle weiteren Abbildungen auf diese Polarisation.

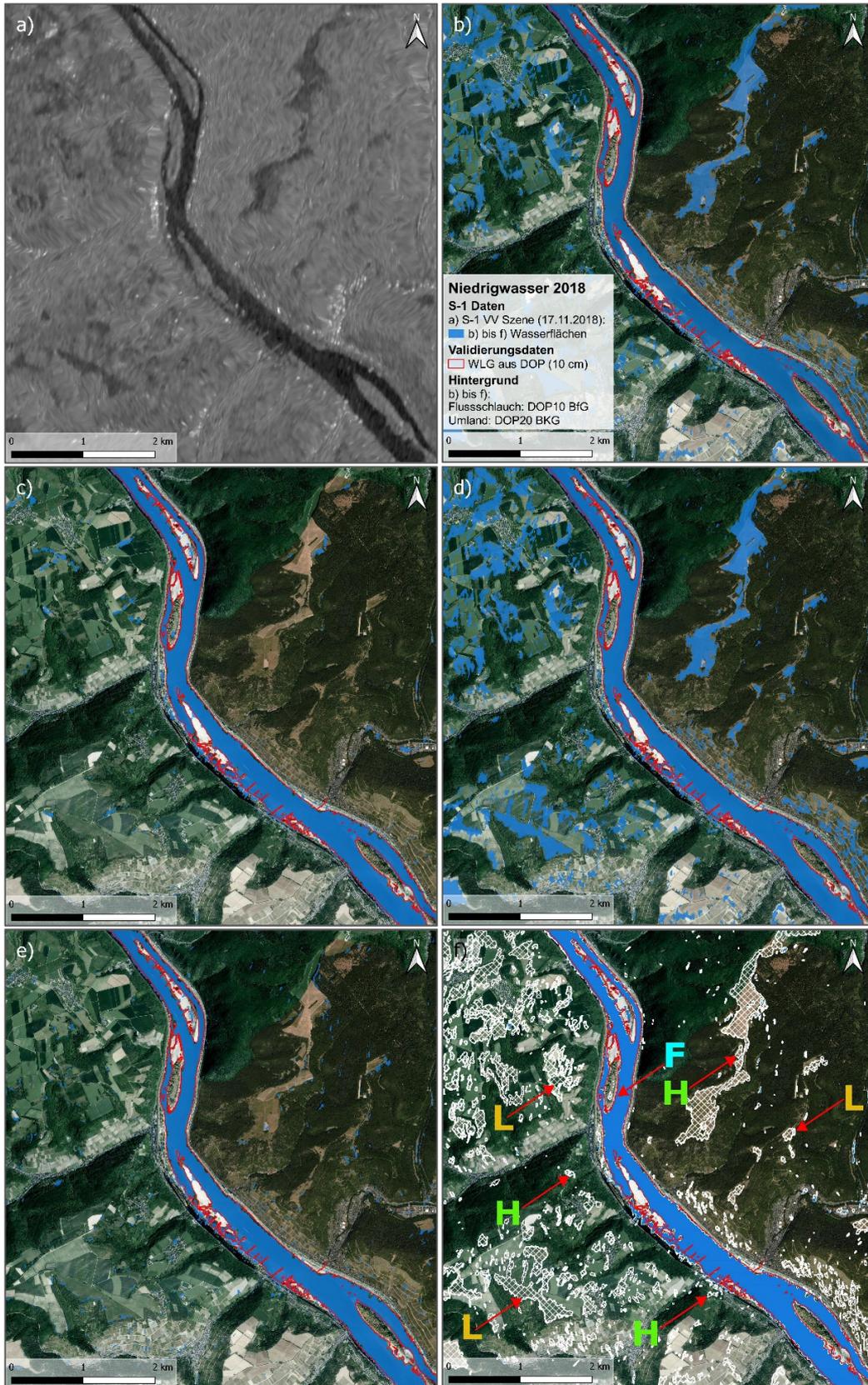


Abb. 4: Niedrigwassersituation am Mittelrhein am 17.11.2018, (a) Sentinel-1 Rückstreuintensität (je dunkler, desto weniger Rückstreuung des Radarsignals), (b) Wassermaskenableitung aus S-1 Daten ohne Zusatzdaten, (c) Wassermaskenableitung aus S-1 Daten und HAND-Algorithmus, (d) Wassermaskenableitung aus S-1- und Fahrrinneninformationen, (e) Wassermaskenableitung aus S-1- und Landbedeckungsdaten, (f) Wassermaskenableitung aus S-1- sowie allen Zusatzdaten. Die Buchstaben **L** (Landbedeckungsdaten), **H** (HAND-Algorithmus) und **F** (Fahrrinneninformationen) symbolisieren die exemplarisch aufgezeigten Verbesserungen durch die entsprechenden Zusatzdaten.

In Abb. 4a ist die Rückstreuintensität der aufbereiteten S-1 Szene dargestellt. Die dunkelsten Pixelwerte werden dabei in der Mitte des Bildes erreicht. Hierbei handelt es sich um den Rhein, bei dem aufgrund seiner relativ glatten Wasseroberfläche ein Großteil der vom Satelliten ausgesendeten Strahlung nicht mehr zum Sensor zurückgestreut wird. In den folgenden Abbildungen 4b-f ist die WLK aus dem Bildflug als rote Linie dargestellt.

5.1 WLK durch ausschließliche Nutzung der S-1 Daten

Die nach der Vorprozessierung abgeleiteten Wasserflächen aus den S-1 Daten zeigen den Rhein als zusammenhängende blaue Struktur (Abb. 4b). Zusätzlich sind etliche Wasserflächen bzw. größere Anhäufungen von Pixeln abseits des Flusses auszumachen, bei denen es sich um Fehlklassifizierungen handelt. Diese werden durch Grauwerte, die den Pixelwerten der tatsächlichen Wasserflächen im Bereich des Gewässers zu ähnlich sind, hervorgerufen.

5.2 Ableitung inklusive der Zusatzdaten mittels HAND-Index

Durch die Berechnung des HAND-Index aus den hochaufgelösten Höheninformationen wurde der Ausschluss von Flächen ermöglicht, die aufgrund ihrer topographischen Lage als nicht wasserbedeckt eingeordnet werden können (Abb. 4c). In Abb. 4c sind größere Bereiche von Wasser-Pixeln außerhalb des Rheins, im Vergleich zu den S-1 Wasserflächen ohne Zusatzdaten (Abb. 4b), verschwunden. Fehlklassifizierungen in Abb. 4c bestehen größtenteils noch in Tallagen, die von der HAND-Ausschlussmaske nicht abgedeckt werden, da der Index diese als potentiell wasserbedeckt einstuft.

5.3 Ableitung inklusive der Zusatzdaten Fahrrinnenlage

Verbesserungen durch Fahrrinneninformationen stellen sich im abgebildeten Untersuchungsgebiet als relativ gering dar, da während der Aufzeichnung der S-1 Szene scheinbar kaum Überlagerungseffekte von Schiffen stattgefunden haben, nur kleine Metallstrukturen (Bauwerke) im Bereich der Fahrrinne vorliegen und die Wasseroberfläche glatt war. Ein Verbesserungseffekt durch Fahrrinnenlage-Information ist somit stark auf die Anwesenheit dieser Objekte und den Windbedingungen bzw. der Windexponiertheit beschränkt. In weiter nördlich gelegenen Bereichen des Rheins wurden deutliche Verbesserungen der Wassermaske durch die Integration der Fahrrinnenlage nachgewiesen.

5.4 Ableitung inklusive der Zusatzdaten Landbedeckung

Durch die Integration der Landbedeckungsdaten ist in Abb. 4e, ähnlich wie in Abb. 4c, deutlich zu beobachten, dass große, durch uneindeutige Rückstreuungseffekte fälschlicherweise als Wasser klassifizierte Gebiete, nun richtig zugeordnet werden. Die Hintergrundinformation des DOP20

lässt deutlich werden, dass an den Stellen der entsprechenden Pixel homogene Landflächen anzutreffen sind (Abb. 4c). Hierbei handelt es sich beispielsweise um landwirtschaftliche Anbauflächen oder Wiesen. Aufgrund der vorherrschenden niedrigen Vegetation, des gepflügten Bodens etc. ist in diesen Gebieten die Rückstreuung relativ gering und es kommt durch das Schwellwertverfahren zur fehlerhaften Klassifizierung. Aber auch Abschattungsbereiche im Umfeld größerer Erhebungen lösen vermutlich die niedrigen Grauwerte aus, denn hier interpoliert die Geländekorrekturen während der Vorprozessierung der S-1 Daten über den Radarschatten hinweg. Die abgeschatteten Bereiche werden wahrscheinlich durch angrenzende Pixel, die relativ geringe Rückstreuwerte aufweisen, gemittelt. Letztendlich kommt es zu den vermeintlich als Wasser klassifizierten Bildelementen. Verbleibende Fehlklassifizierungen finden sich noch in Randbereichen bestimmter Landnutzungsklassen, die vermutlich nicht oder nur teilweise in den Bereich der Abschlussmaske fallen.

5.5 Validierung und Interpretation

Die Validierung der abgeleiteten Wasserflächen erfolgt sowohl visuell (Abb. 4, 5) als auch quantitativ (Tab. 1-3).

Die räumlichen Diskrepanzen zwischen den Wasserflächen aus den Befliegungsdaten und den abgeleiteten Wasserflächen aus den S-1 Daten inklusive aller Zusatzdaten sind in Abb. 5 dargestellt. Es wird deutlich, dass die meisten Fehlklassifizierungen in direkter Umgebung zum Rhein verbleiben. Speziell befinden sich die meisten falsch klassifizierten Wasserbereiche vermehrt am linksrheinischen Ufer, konzentriert im Bereich von Buhnen oder in deren näheren Umgebung. Wahrscheinlich sind Abschattungseffekte aufgrund der Geländetopographie und der Aufnahmegeometrie (absteigender Orbit, *descending*) dafür verantwortlich. Außerdem sind die meisten Buhnen zu klein um vom S-1 aufgelöst werden zu können. Des Weiteren konzentrieren sich falsch klassifizierte Wasserpixel auf trockengefallene Bereiche der Kiesbänke. Hier könnte eine Durchfeuchtung die niedrige Radar-Rückstreuung hervorgerufen haben. Vereinzelt finden sich Pixelgruppen an den Hängen der Seitentäler des Rheins, bei denen ebenfalls Abschattungseffekte als Ursache angenommen werden. Insgesamt liegt im Abstand von ca. 50-100 m um die Uferlinie eine unsichere Klassifizierung vor (Abb. 5). Abseits der direkten Umgebung des Rheins weisen große Gebiete eine korrekte Klassifizierung vor.

Für die quantitative pixelweise Evaluierung wird beispielhaft die Konfusionsmatrix der Klassifizierungsergebnisse unter Verwendung aller Zusatzdaten sowohl nach absoluten (Tab. 1) als auch nach prozentualen Anteilen (Tab. 2) dargestellt. Eine Gesamtübersicht der Qualität der jeweiligen Klassifizierungen wird in Tab. 3 betrachtet.

Die Zeilen der Konfusionsmatrizen (Tab. 1, 2) geben die abgeleiteten Klassen aus den S-1 Daten wieder und in den Spalten werden die aus dem Bildflug berechneten Klassifizierungsergebnisse erfasst. Die Zahlen in der obersten, linken Zelle von Tab. 1 geben die Pixelanzahl der Land-Klasse wieder, die aus den S-1 Daten als Land-Pixel bestimmt wurden und auch in den Validierungsdaten (DOP) dieser Klasse zugeordnet wurden. Diagonal nach unten versetzt ist dies für die Klasse *Was-*

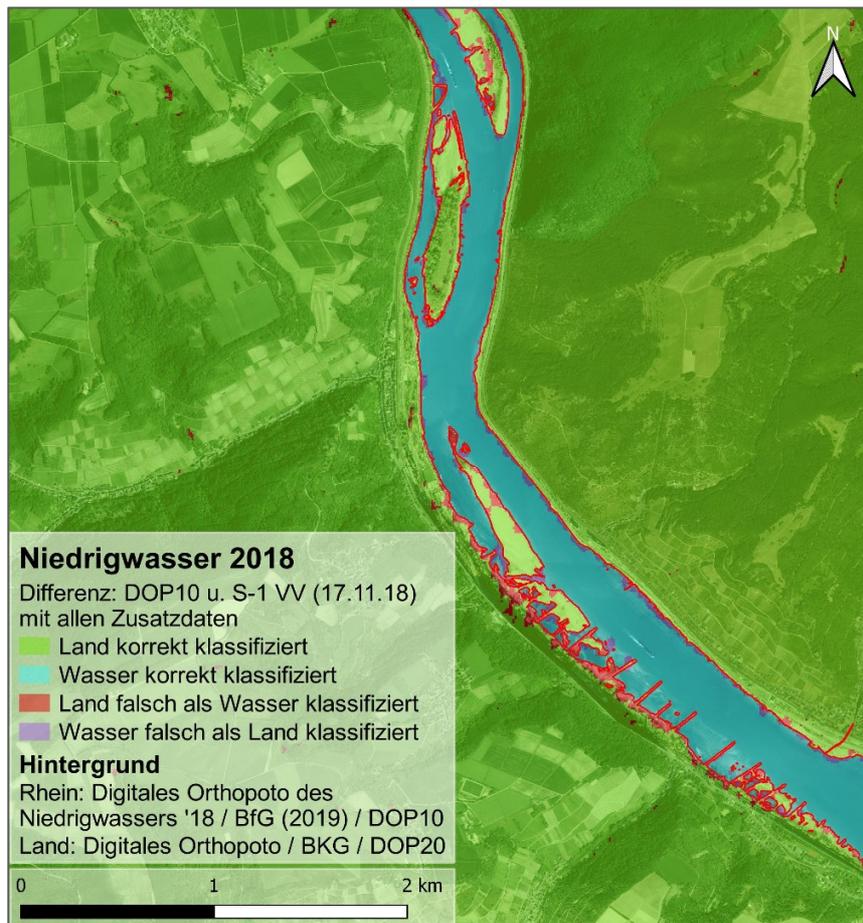


Abb. 5: Über Hintergrundbilddaten (DOP10 und DOP20) werden die Unterschiede zwischen den Wasserflächen aus den Befliegungswasserflächen und den abgeleiteten Wasserflächen aus den S-1 Daten inklusive aller Zusatzdaten dargestellt.

ser erfolgt. Die nicht fettgedruckten Werte geben die aus den S-1 Daten fälschlicherweise als Wasser bzw. Land eingeordneten Pixel wieder. Der prozentuale Anteil an der Gesamtpixelanzahl wird in Tab. 2 dargestellt.

Wie bereits in der visuellen Analyse festgestellt, wird auch in der tabellarischen Analyse der verhältnismäßig große Anteil korrekt klassifizierter Land-Pixel (Tab. 1, 2: 1.491.101 Pixel, 96,42 %) deutlich.

Tab. 3 zeigt die Auswertungen der verschiedenen Algorithmen, um das Verbesserungspotential der Zusatzdaten beurteilen zu können. Werden die Ergebnisse der S-1 Ableitung auf Pixelebene analysiert bestätigt Tab. 3, dass bei den erfolgreich klassifizierten Land-Pixel bis ~96 % erreicht werden. In direkten Zusammenhang dazu steht der Anteil falsch als Wasser klassifizierte Pixel, da diese Klasse sich durch die Zusatzdaten deutlich verringert und die meisten zuvor falsch als Wasser klassifizierten Pixel zu Land-Pixel korrigiert werden. Gemessen an der Gesamtpixelanzahl liegt dieser ohne Zusatzdaten ~9 % höher als mit allen Zusatzdaten (0,42 %, Tab. 3).

Die größte Verbesserung wird mittels zusätzlicher Informationen durch den Einsatz von Landbedeckungsdaten und des HAND-Index erreicht (Tab. 3). Dies gilt insbesondere für die fehlerhaft

als Wasser klassifizierten Flächen. Die Werte korrekt eingeordneter Wasser-Pixel stagnieren durchweg bei $\sim 2,9\%$, da sich nur wenige Pixel durch die Verwendung der Zusatzdaten verbessern. Dies zeigt, dass Verbesserungen im Bereich des Rheins nicht signifikant durch die Zusatzdaten erreicht werden. Wenig Veränderung besteht ebenfalls bei der fälschlicherweise als Land eingeordneten Pixelklasse, die stets einen Anteil von $\sim 0,2\%$ aufweist (Tab. 3). Diese Pixel befinden sich v.a. in der Nähe des Rheinufer (Abb. 5) und sie werden wahrscheinlich durch Rückstreuungseffekte ausgelöst, die z.B. Buhnen, Stege und andere Bauwerke verursachen.

Somit wird die Fehlklassifizierung beider Klassen durch die Verwendung aller Zusatzdaten von $9,73\%$ (Summe falsch klassifizierter Land- und Wasser-Pixel aus Tab. 3) auf $0,64\%$ (Summe falsch klassifizierter Land- und Wasser-Pixel aus Tab. 2) reduziert.

Tab. 1: Konfusionsmatrix für die Wassermaske, die aus S-1 SLC IW VV Daten des 17.11.2018 und Verwendung aller Zusatzdaten (Fahrrinne, Landbedeckung, HAND-Index) abgeleitet wurde. Angegeben ist die jeweilige Pixelanzahl.

		Validierungsdaten [Pixel]		
		Land	Wasser	Summe
Klassifikation [Pixel]	Land	1.491.101	3.455	1.494.556
	Wasser	6.522	45.410	51.932
	Summe	1.497.623	48.865	1.546.488

Tab. 2: Konfusionsmatrix für die Wassermaske, die aus S-1 SLC IW VV Daten des 17.11.2018 und Verwendung aller Zusatzdaten (Fahrrinne, Landbedeckung, HAND-Index) abgeleitet wurde. Angegeben ist der prozentuale Anteil bezogen auf die Gesamtpixelzahl.

		Validierungsdaten [%]		
		Land	Wasser	Summe
Klassifikation [%]	Land	96,42	0,22	96,64
	Wasser	0,42	2,94	3,36
	Summe	96,84	3,16	100,00

Die Richtigkeit einer entsprechenden Objektklasse aus Herstellersicht (*producer accuracy*, PA) wird durch Division der Zahl korrekt klassifizierter Pixel durch die Anzahl der klassifizierten Pixel der entsprechenden Klasse der Validierungsdaten (hier Wassermaske aus den DOPs) bestimmt. Die PA spiegelt somit die Wahrscheinlichkeit wieder, mit der das entsprechende Pixel korrekt zur jeweiligen Klasse zugeordnet wurde. Analog ergibt die Anzahl korrekt klassifizierter Pixel der jeweiligen Klasse, dividiert durch die Pixel-Summe der jeweiligen Klasse, die Richtigkeit aus Nutzersicht (*user accuracy*, UA, Tab. 3). Dieses Qualitätsmaß gibt somit die Wahrscheinlichkeit an, mit der ein Pixelwert einer bestimmten Klasse auch tatsächlich dieser Klasse angehört.

Tab. 3: Auswertungsmatrix für die Wassermasken, die aus S-1 SLC IW VV Daten des 17.01.2018 abgeleitet wurden. Angegeben sind die prozentualen Anteile an der Gesamtpixelzahl der klassifizierten Pixel im Vergleich zu den entsprechenden Wasser-/Land-Pixel des DOP vom 16.11.2018. UA (*user accuracy*) und PA (*producer accuracy*) beziehen sich auf den Vergleich mit den entsprechenden Wasser-/Land-Pixel des DOP vom 16.11.2018.

Klassifikation im DOP	Land				Wasser			
Pixelanzahl	1.497.623				48.865			
[%]	96,84%				3,16%			
Klassifizierung [%]	korrekt als Land klassifiziert	falsch als Land klassifiziert	UA	PA	korrekt als Wasser klassifiziert	falsch als Wasser klassifiziert	UA	PA
S1	87,34	0,23	99,74	90,19	2,93	9,50	23,59	92,87
S1 + Fahrrinne	87,34	0,22	99,75	90,19	2,94	9,50	23,61	92,95
S1 + Landbedeckung	95,27	0,23	99,76	98,38	2,93	1,57	65,18	92,85
S1 + HAND-Index	95,67	0,23	99,77	98,80	2,96	1,17	71,56	92,87
S1 + alle Zusatzdaten	96,41	0,22	99,77	99,56	2,94	0,42	87,44	92,93

Durch den Einsatz aller Zusatzdaten wurden die UA der Klasse Wasser um circa 64 % gesteigert, die Klasse Land hat nur ~9 % Verbesserung zu verzeichnen (Tab. 3). Die starke Verbesserung der UA-Werte der Wasserklassifikation hängt mit der deutlichen Senkung falsch als Wasser klassifizierter Pixel zusammen. Bei der PA hingegen konnte die Richtigkeit in der Wasser-Klasse nicht wesentlich gesteigert werden (nur geringer Zuwachs korrekt klassifizierter Wasser-Pixel). Wogegen bei der Land-Klasse eine Steigerung von ~9 % erreicht wird (Tab. 3). Sowohl visuelle, als auch quantifizierende Validierungsmaßnahmen zeigen, dass Verbesserungen durch Zusatzdaten größtenteils über Landbereichen erfolgen und die meisten falsch als Wasser klassifizierten Pixel zu Land-Pixel korrigiert werden, was in der zunehmenden UA der Wasser-Klasse deutlich wird.

6 Fazit & Ausblick

Das Anwendungsbeispiels Niedrigwasser am Mittelrhein 2018 zeigt, dass ausschließlich aus S-1 Radardaten extrahierte Wasserflächen einige Fehlklassifizierungen nach sich ziehen. Da die Problematiken messtechnisch bedingt sind (z.B. Abschattungsbereiche, Überlagerungseffekte), wurden zur Reduktion der Fehlklassifizierungen GeoBasisdaten wie DGM5, Landnutzungsdaten, sowie die Lage der Fahrrinne verwendet. Die deutlichsten Verbesserungen der Wasser-Land-Ableitung konnten durch Integration von Höhen- und Landbedeckungsinformationen erreicht werden, die ohne Zusatzdaten fälschlicherweise als Wasser klassifiziert wurden. Insgesamt wurde eine Richtigkeit aus Nutzersicht (UA) von 87,44 % für Wasserflächen bzw. 99,77 % für Landflächen erreicht. Die verbleibenden Abweichungen befinden sich vor allem in direkter Nähe zum Fluss und

werden vermutlich durch Abschattungseffekte und die geringe Auflösung der S-1 Daten hervorgerufen. Für detaillierte Betrachtungen des trockenfallenden Bereichs sind diese Differenzen jedoch relevant, so dass die Ableitungen aktuell noch nicht den Anforderungen für ein Monitoring von Extremereignissen, ein Veränderungsmonitoring oder zur Überwachung der Schiffbarkeit genügen. Im weiteren Projektverlauf wird darum zusätzlich das hochaufgelöste Digitale Geländemodell des Wasserlaufs (DGM-W) integriert, geprüft wieweit sich dadurch die noch vorhandenen Unsicherheiten in der Nähe der WLГ reduzieren und die Anwendbarkeit detailliert herausgearbeitet.

7 Danksagung

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

8 Literaturverzeichnis

- BBK, 2023: Copernicus Dienst für Katastrophen- und Krisenmanagement. https://www.bbk.bund.de/DE/Themen/Krisenmanagement/Lagebild/Fernerkundung/Copernicus/copernicus_node.html, letzter Zugriff am 04.01.2023.
- EODC, 2023: Global Flood Monitoring Portal. <https://portal.gfm.eodc.eu/>, letzter Zugriff am 05.01.2023.
- ESA, 2022: Geographical Coverage. <https://sentinels.copernicus.eu/web/sentinel/missions/sentinel-1/satellite-description/geographical-coverage>, letzter Zugriff am 29.12.2022.
- ESA, 2023a: 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>.
- JENEROWICZ, J., ORYCH, A., SIOK, K. & SMAROWSKI, M., 2019: Application of Sentinel-1 and Sentinel-2 data to conduct reconnaissance analyses. SPIE 11160, Electro-Optical Remote Sensing 13, 111600L, <https://doi.org/10.1117/12.2533319>.
- KAPLAN, G., LIOR F., LUKYANOV, V., MANIVASAGAM, V. S., TANNY, J. & ROZENSTEIN, O., 2021: Normalizing the Local Incidence Angle in Sentinel-1 Imagery to Improve Leaf Area Index, Vegetation Height, and Crop Coefficient Estimations. Land 10 (7), 680, <https://doi.org/10.3390/land10070680>.
- 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>.
- 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, 102003, 1-13 <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. & CÍWIK, K., 2018: The Use of Sentinel-1 Time-Series Data to Improve Flood Monitoring in Arid Areas. *Remote Sensing* 10, 583, 1-13, <https://doi.org/10.3390/rs10040583>.
- 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>.
- OLTHOF, I. & TOLSZCZUK-LECLERC, S., 2018: Comparing Landsat and RADARSAT for Current and Historical Dynamic Flood Mapping, *Remote Sensing* 2018, 10 (5), 780, 1-19, <https://doi.org/10.3390/rs10050780>.