



Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg

Fakultät Life Sciences

**Analyse der Eignung von SMAP-Satelliten Daten zur Vorhersage von
Hochwasserereignissen für Deutschland am Beispiel des Ahrtals**

Bachelorarbeit

Studiengang: Umwelttechnik (B.Sc.)

vorgelegt von

Marvin Gronschölski [REDACTED]

Hamburg

am 12.07.2023

1. Gutachtende Person: Prof. Dr. Carolin Floeter (HAW Hamburg)
2. Betreuende Person: Prof. Dr. Jürgen Böhner (Universität Hamburg)

Inhalt

| | | |
|-------|---|-----|
| I. | Abbildungsverzeichnis..... | III |
| II. | Tabellenverzeichnis..... | IV |
| III. | Abkürzungsverzeichnis..... | V |
| 1. | Einleitung..... | 1 |
| 2. | Theoretische Grundlagen..... | 5 |
| 2.1 | Bodenkunde des Ahrtals..... | 5 |
| 2.2 | Entstehungen von Hochwasserereignissen..... | 7 |
| 2.3 | Aktueller Forschungsstand..... | 10 |
| 2.4 | SWAP-Satellit..... | 11 |
| 3. | Forschungsfrage..... | 15 |
| 4. | Material und Methoden..... | 16 |
| 4.1 | Radar..... | 16 |
| 4.2 | Radiometer..... | 18 |
| 4.3 | Antenne..... | 20 |
| 4.3.1 | Eingefalteter Modus..... | 20 |
| 4.3.2 | Ausgefalteter Modus..... | 21 |
| 4.3.3 | Funktion..... | 21 |
| 4.4 | Daten..... | 23 |
| 4.5 | Datenraum..... | 25 |
| 5. | Ergebnisse..... | 26 |
| 5.1 | Erster Untersuchungstag (12.07.21)..... | 26 |
| 5.2 | Zweiter Untersuchungstag (13.07.21)..... | 27 |
| 5.3 | Dritter Untersuchungstag (14.07.21)..... | 30 |
| 5.4 | Vierter Untersuchungstag (15.07.21)..... | 31 |
| 5.5 | Fünfter Untersuchungstag (16.07.21)..... | 33 |

| | |
|---|----|
| 5.6 Rasteranalyse zur Bodenfeuchtigkeitsveränderung | 34 |
| 6. Diskussion | 39 |
| 7. Fazit..... | 44 |
| Literaturverzeichnis | 49 |
| Eidesstattliche Erklärung | 58 |

I. Abbildungsverzeichnis

| | |
|---|----|
| Abbildung 1:Niederschlagsdaten des Tiefdruckgebiets (Junghänel et al. 2021)..... | 3 |
| Abbildung 2: Topgraphische Karte der Eifel (Römer 2017) | 6 |
| Abbildung 3: „Die Entstehung von oberflächlichem Abfluss“ (Rothe 2022) | 9 |
| Abbildung 4: Messprinzip eines Radars [eigene Darstellung in Anlehnung an (NASA 2023f)] | 17 |
| Abbildung 5: Messprinzip eines Radiometers [eigene Darstellung in Anlehnung an (NASA 2023f)] | 19 |
| Abbildung 6: Ausgefalltete Antenne des SMAP Satelliten (NASA 2023e) | 21 |
| Abbildung 7: Antennenstrahl (NASA 2023d)..... | 22 |
| Abbildung 8: Level 4-Daten für den 12.07.21 mit Bereichen [eigene Darstellung] | 27 |
| Abbildung 9: Level 2-Daten für den 13.07.21 mit Bereichen [eigene Darstellung] | 28 |
| Abbildung 10: Level 2-Daten für den 14.07.21 mit Bereichen [eigene Darstellung] | 30 |
| Abbildung 11: Level 4-Daten für den 15.07.21 mit Bereichen [eigene Darstellung] | 32 |
| Abbildung 12: Level 2-Daten für den 16.07.21 mit Bereichen [eigene Darstellung] | 33 |
| Abbildung 13: Rasteranalyse zur Bodenfeuchtigkeit vom 12. auf den 13.07.21 mit Bereichen [eigene Darstellung]..... | 35 |
| Abbildung 14: Rasteranalyse zur Bodenfeuchtigkeit vom 13. auf den 14.07.21 mit Bereichen [eigene Darstellung]..... | 35 |
| Abbildung 15: Rasteranalyse zur Bodenfeuchtigkeit vom 14. auf den 15.07.21 mit Bereichen [eigene Darstellung]..... | 36 |
| Abbildung 16: Rasteranalyse zur Bodenfeuchtigkeit vom 15. auf den 16.07.21 mit Bereichen [eigene Darstellung]..... | 37 |
| Abbildung 17: Diagramm über die Bodenfeuchtigkeitsveränderungen innerhalb der Untersuchungstage [eigene Darstellung]..... | 38 |
| Abbildung 18: Durchschnittswerte für kombinierte und einzelne Datenprodukte [eigene Darstellung]..... | 40 |
| Abbildung 19: Luftbilder des Einzugsgebiets vor dem Hochwasser (Stand: Juni 2019) (GDI-RP 2019) | 46 |

| | |
|--|----|
| Abbildung 20: Luftbilder vom Hochwassereinzugsgebiet vom September 2021 (GDI-RP 2021)..... | 46 |
|--|----|

II. Tabellenverzeichnis

| | |
|---|----|
| Tabelle 1: Technische Daten zum Satelliten (Rischer 2023) | 13 |
| Tabelle 2: Technische Anforderungen an das Radar (Entekhabi et al. 2014) | 18 |
| Tabelle 3: Technische Anforderungen an das Radiometer (Entekhabi et al. 2014) | 20 |
| Tabelle 4: Anforderungen an die Antenne (Entekhabi et al. 2014) | 22 |
| Tabelle 5: Übersicht der verwendeten Daten (NASA 2023a) | 23 |
| Tabelle 6: Koordinaten für den geografischen Untersuchungsraum..... | 25 |
| Tabelle 7: Werte für die Bereiche am ersten Untersuchungstag | 27 |
| Tabelle 8: Werte für die Bereiche am zweiten Untersuchungstag | 29 |
| Tabelle 9: Werte für die Bereiche am dritten Untersuchungstag | 31 |
| Tabelle 10: Werte für die Bereiche am vierten Untersuchungstag..... | 32 |
| Tabelle 11: Werte für die Bereiche am fünften Untersuchungstag | 34 |

III. Abkürzungsverzeichnis

| | |
|------------|---|
| V_{Ges} | Gesamtvolumen |
| V_W | Wasservolumen einer Probe |
| θ_v | Volumetrischer Wassergehalt |
| ASF | Alaska Satellite Facility |
| DAAC | Distributed Active Archive Center |
| EASE | Equal-Area Scalable Earth |
| ESA | European Space Agency |
| ft | Foot/Fuß |
| IPCC | Intergovernmental Panel on Climate Change |
| KSG | Bundes-Klimaschutzgesetz |
| NASA | National Aeronautics and Space Administration |
| NRT | Near real-time |
| NSIDC | National Snow and Ice Data Center |
| SAR | synthetische Apertur Radar |
| SMAP | Soil Moisture Active Passiv |

1. Einleitung

Die Klimaveränderung stellt die Menschheit in Bezug auf Hochwasserereignisse vor immer größer werdenden Herausforderungen (Neukirchen 2019). Studien zeigen, dass unter der Klimaveränderung sowohl Menschen als auch die biologische Diversität leiden (IPCC 2022; Midgley et al. 2002). Expert*innen gehen davon aus, dass die Veränderungen, welche durch die Klimaerwärmung hervorgerufen werden, sich indirekt und direkt auf den Wasserkreislauf auswirken, sodass Hochwasserereignisse regional stärker auftreten können (Hennegriff et al. 2006). Die Verstärkung der Intensität von ein- oder zwei-Tages-Regenereignissen in der Sommersaison in der Region des Ahrtals schwankt zwischen 3 % - 19 % (Kreienkamp und et al. 2021). Des Weiteren treten solche Kurzregenereignisse in der Region im Vergleich zu einem 1,2 °C kühlerem Klima um einen Faktor von 1,2 bis 9 häufiger auf (Kreienkamp und et al. 2021).

Doch wie soll dem Klimawandel entgegengewirkt werden und welche Daten können in der Maßnahmenanalyse unterstützend wirken?

Dazu hält die von den Vereinten Nationen im Jahr 1988 gegründete Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) Konferenzen ab, welche sich mit dem Weltklima beschäftigen (IPCC 2023). Ein zwischenstaatlicher Ausschuss, der den wissenschaftlichen Stand der Forschung zum Klimawandel zusammenfasst und oft die Handlungsbasis für Gesetzesentwürfe abbildet, welche dem Klimaschutz dienen sollen (IPCC 2023). Artikel 20a GG verpflichtet den Staat, die natürlichen Lebensgrundlagen für künftige Generationen zu schützen (Grundgesetz für die Bundesrepublik Deutschland vom 19.12.2022). Obwohl der Ausbau der erneuerbaren Energien und der Kampf gegen die globale Erwärmung stetig vorangeht, wird es Deutschland nach Flachland und Levi (2021) bei gleichbleibender Geschwindigkeit nicht schaffen, seine Klimaschutzziele zu erfüllen. Daher wurde 2019 das Klimaschutzgesetz (KSG) vom Deutschen Bundestag verabschiedet (Flachland und Levi 2021). Der Zweck des KSG ist eine bindende Verpflichtung gegenüber dem Pariser Klimaabkommen¹ und der Begrenzung der globalen Durchschnittstemperatur auf unter 2 °C (Flachland und Levi 2021). Mit der Priorisierung der Klimapolitik

¹ Das Pariser Klimaabkommen ist 2015 von 195 Nationen unterzeichnet worden. Das Ziel des Vertrages ist eine Abschwächung des Klimawandels und eine Zusammenarbeit hinsichtlich der Begrenzung der globalen Erwärmung (Lässig 2022).

durch das KSG wird die Klimagovernance² in Deutschland ausgeweitet (Flachsland und Levi 2021).

Um die Folgen des Klimawandels zu dokumentieren und die Wirksamkeit getroffener Maßnahmen überprüfen zu können, ist es notwendig, Klimadaten zu erheben (Schönwiese 1995; Hupfer 1996). Zum Erheben solcher Daten wurden durch die National Aeronautics and Space Administration (NASA) und andere Raumfahrtbehörden Satellitenprogramme entwickelt, wie der Soil Moisture Active Passive (SMAP) Satellit, der die Bodenfeuchtigkeit global erfasst (Rummel 2017). Auf den NASA-Internetseiten wird geworben, dass der SMAP-Satellit Überschwemmungen anhand seiner Daten vorhersehen kann (NASA 2023g).

In dieser Arbeit soll diese Aussage überprüft werden. Es wird untersucht, ob durch die vom SMAP-Satelliten erfassten Daten über die Bodenfeuchtigkeit Hochwasserereignisse vorhergesagt werden können. Der Untersuchungsrahmen bezieht sich auf die Flutkatastrophe im rheinland-pfälzischen Ahrtal. Dort kam es in der Nacht vom 14. auf den 15. Juli 2021 durch Starkregen zu einem Hochwasser, welches zu schweren Überschwemmungen führte (Junghänel et al. 2021). Verursacht wurde dies durch das Tiefdruckgebiet „Bernd“ (Junghänel et al. 2021). Die Niederschlagsmenge vom 13. Juli und 14. Juli 2021 von 100 mm bis 150 mm, wie in Abbildung 1 dargestellt, sorgten dafür, dass die bisherigen Pegelrekorde der Ahr von 2016 (3,71 m, Abfluss: $236 \frac{m^3}{s}$) übertroffen wurden (Schäfer et al. 2021). Die Niederschlagsmenge sorgte dafür, dass Messstationen überflutungsbedingt bei einem Pegelwert von 5,05 m ausfielen (Schäfer et al. 2021). Schätzungen nach verursachte die Niederschlagsmenge Pegelstände zwischen 7 m bis 8 m und erreichten einen Abfluss von $400 \frac{m^3}{s}$ bis $700 \frac{m^3}{s}$ (Schäfer et al. 2021).

² Klimagovernance umfasst ökonomische, politische und soziale Mechanismen zur Einhaltung der Klimaschutzziele (Flachsland und Levi 2021).

**Tief Bernd über Mitteleuropa,
Summe des Niederschlags aus Radar: 12. Juli, 05:50 UTC - 15. Juli 2021, 05:50 UTC**

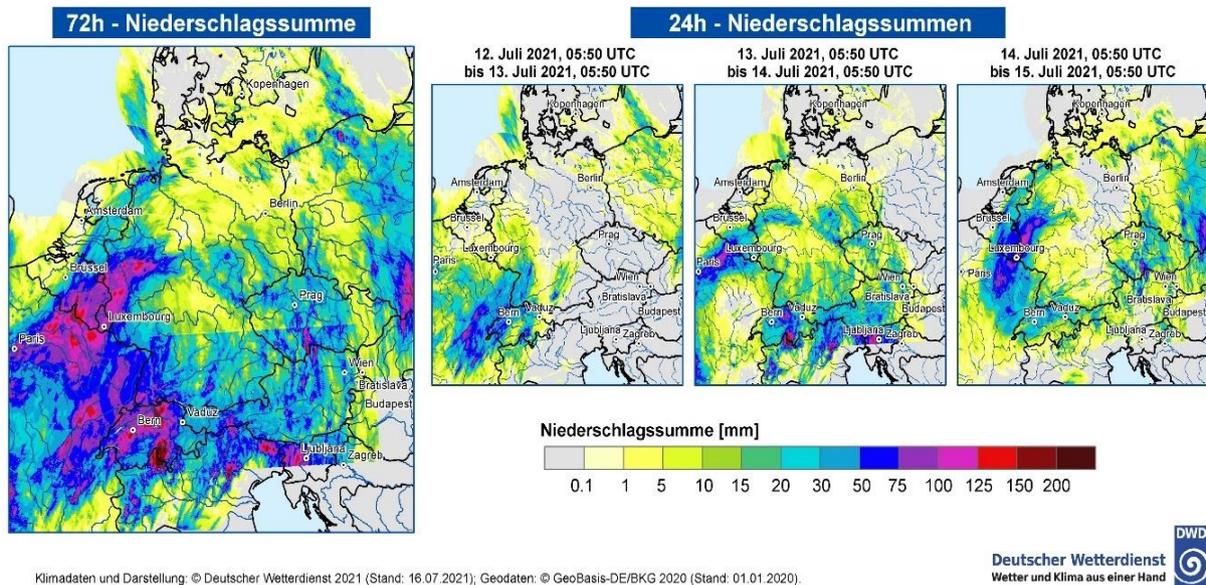


Abbildung 1: Niederschlagsdaten des Tiefdruckgebiets (Junghänel et al. 2021)

Die vom SMAP-Satelliten erfassten Daten über die Bodenfeuchtigkeit werden herangezogen, um zu prüfen, ob ein Zusammenhang zwischen den bereits vor dem Tiefdruckgebiet „Bernd“ gesättigten Böden und der Überschwemmung besteht.

Die theoretische Hinführung (vgl. Kapitel 2) dient als Grundlage für dieses Vorhaben. Grundlegende Informationen werden dabei vorgestellt. Zuerst wird auf die Bodenkunde des Ahrtales und die topografische Entstehung sowie die damit zusammenhängenden örtlichen physikalischen Bodeneigenschaften eingegangen (vgl. Kapitel 2.1). Im Anschluss werden die verschiedenen Hochwassertypen sowie der Zusammenhang zur Bodensättigung erklärt (vgl. Kapitel 2.2). Darauf folgt der aktuelle Forschungsstand, in dem thematisiert wird, ob aktuelle Studien die Verwendung vom SMAP-Satellit bei Hochwasserereignissen befürworten oder ablehnen (vgl. Kapitel 2.3). Grundlagen zum SMAP-Satelliten werden anschließend vorgestellt (vgl. Kapitel 2.4 und 4). Mithilfe des Radars und des Radiometers (vgl. Kapitel 4.1 und 4.2) sind Daten im Einzugsgebiet Ahrtal erhoben worden (vgl. Kapitel 4.5). Um zu überprüfen, ob die Bodenfeuchtigkeit im Zusammenhang mit dem Hochwasser steht, sind Ergebnisse der verschiedenen Datenprodukte ausgewertet worden (vgl. Kapitel 5). Inwieweit die Zunahme der Bodenfeuchtigkeit zwischen den Untersuchungstagen variiert, soll mithilfe der durchgeführten Rasteranalyse geprüft werden

(vgl. Kapitel 5.6). Die Ergebnisse der Datenprodukte der jeweiligen Untersuchungstage und der Rasteranalyse sollen in dieser Arbeit interpretiert und diskutiert werden (vgl. Kapitel 6). Abschließend werden die interpretierten und diskutierten Ergebnisse herangezogen, um eine Antwort auf folgende Fragen (vgl. Kapitel 3) zu geben:

- *Können SMAP-Satellitendaten bei der Vorhersage von Hochwasserereignissen in Deutschland unterstützend wirken?*
- *Inwieweit können die Daten herangezogen werden, um beim vorbeugenden Hochwasserschutz verwendet zu werden?*

2. Theoretische Grundlagen

In diesem Kapitel soll theoretisches Wissen über die Bodensituation im Ahrtal, die Differenzierung verschiedener Hochwasserarten und deren Entstehung vermittelt werden. Außerdem wird der aktuelle Forschungsstand zu Erdbeobachtungssatelliten und deren Verwendung erklärt. Das letzte Unterkapitel (Kapitel 2.4) stellt Grundlagen zu dem SMAP-Satelliten zusammen und dient als Übergang zum Kapitel Material und Methoden (Kapitel 3).

2.1 Bodenkunde des Ahrtals

Das Rheinische Schiefergebirge bildete sich bei der Faltung des Variskischen Gebirges in der Karbon³-Zeit (Wienecke-Janž 2008). Während der Diagenese⁴ zur Gesteinsmetamorphose⁵ wurden die langgestreckten Krustenstreifen (Grabenbildung) gebildet, welche die spätere Landschaftsbildung stark geprägt hat (Büchs et al. 1993).

Das Ahrtal selbst ist zum Ende der Tertiärzeit⁶ entstanden (Büchs et al. 1993). Zu diesem Zeitpunkt floss der Fluss Ahr nicht in den Rhein, sondern in den Norden in die Niederrheinische Bucht (Büchs et al. 1993). Durch den schnelleren Anstieg der Rheinischen Masse in der mittleren Quartärzeit (vor etwa 700.000 Jahren) wurde die Gewässerstruktur geändert, sodass die Ahr sich durch die tieferliegende Erosionsbasis anpasste, in den Rhein floss und somit ein Nebenfluss wurde (Büchs et al. 1993).

Das heutige Ahrgebirge ist ein Mittelgebirgszug der Osteifel (siehe Abbildung 2) (Büchs et al. 1993). Dieses gehört zum Rheinischen Schiefergebirge und wird von der Ahr durchflossen (Büchs et al. 1993). Diese hat eine Lauflänge von ca. 86 km und bildet mit seinen Nebenbächen das zentrale Gewässersystem für den Naturraum Ahr-Eifel (Ministerium für Klimaschutz, Umwelt, Energie und Mobilität 2022). Gleichzeitig prägt die Ahr auch die Flora, Fauna und das anliegende Ökosystem (Büchs et al. 1993).

³ Die Erdgeschichte wird in verschiedene Zeitalter eingeteilt, wobei die Karbonzeit mit 62 Mio. Jahre eine davon abbildet und vor etwa 355 Mio. Jahren bis 290 Mio. Jahren andauerte (Ribbert 2010; Spektrum 2022).

⁴ Die Diagenese ist der geologische Prozess der Verfestigung von Sedimenten (Stahr et al. 2020).

⁵ Die Gesteinsmetamorphose ist die Veränderung von Gestein durch Druck- und Temperatureinwirkung ohne den Verlust des festen Zustands (Stahr et al. 2020).

⁶ Auch die Tertiärzeit ist ein Erdzeitalter und begann vor etwa 50 Mio. (Meyer 2008).

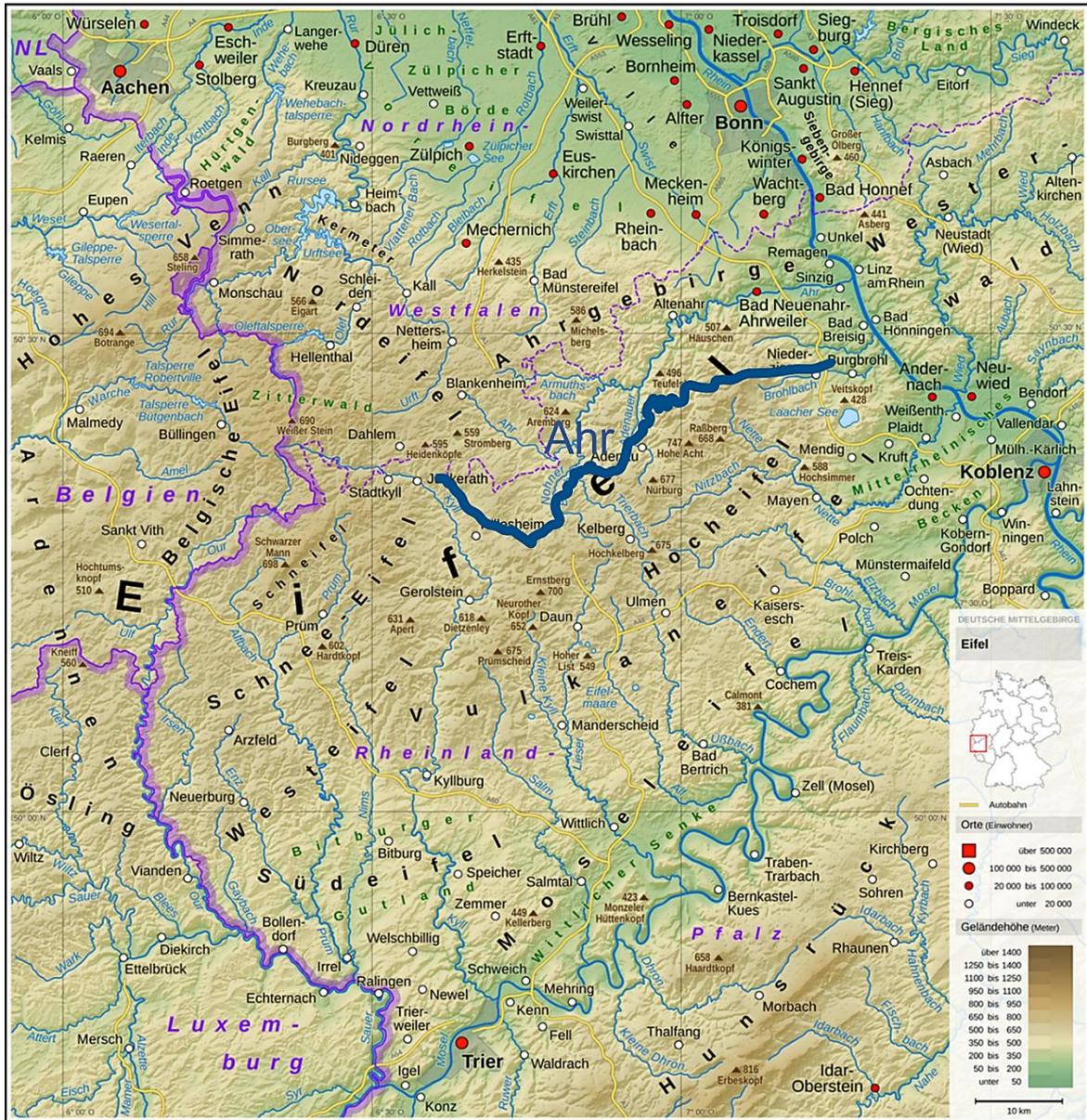


Abbildung 2: Topographische Karte der Eifel (Römer 2017)⁷

Das heutige Ahrtal ist von Sandstein, Schluffstein und Tonschiefer geprägt (Büchs et al. 1993). Diese bilden die starke Falte des Ahrtalesattels und prägen das typische Eng- und Kerbtal des Ahrtales (Ministerium für Wirtschaft, Klimaschutz, Energie und Landesplanung Rheinland-Pfalz 2013; Büchs et al. 1993). Die topographische Struktur beeinflusst den Wasserabfluss stark, sodass bereits seit 1348 Hochwasserereignisse im Gebiet Ahrtal aufkommen (Janta und Poppelreuter 2010).

Insbesondere in den Bereichen mit anthropogenen Einfluss, wie zum Beispiel mit Bodenverdichtungen oder -versiegelungen in Siedlungsgebieten, wirken diese sich

⁷ Der Fluss Ahr wurde zur besseren Sichtbarkeit nachträglich in die Karte eingezeichnet.

auf das Abflussverhalten des Wassers aus (Baumgarten et al. 2011). Böden können die Funktion als Wasserspeicher gänzlich durch anthropogene Einflüsse verlieren (Kommission Bodenschutz beim Umweltbundesamt 2016).

2.2 Entstehungen von Hochwasserereignissen

Das An- und Anschwellen von Wasserständen bei Flüssen und Bächen ist ein natürlicher Prozess (Baumgarten et al. 2011). Dieser dient der natürlichen Landschafts- und Strukturanpassung (Baumgarten et al. 2011). Weiterhin haben sich Tiere und Pflanzen an die Flussaue⁸ angepasst und benötigen diese jetzt zum Überleben (Meyer 2017). Wie stark der Anstieg ist und wann es als ein Hochwasser zu charakterisieren ist, hängt von einer Vielzahl an Faktoren ab (Baumgarten et al. 2011). Grundlegend wird zwischen vier Hochwasserarten unterschieden (Patt und Jüpner 2020):

1. Die erste Hochwasserart ist die *Sturzflut* (Beyer 2016). Sie entsteht durch Starkregenereignisse und kann auch fernab von Gewässern auftreten (Beyer 2016). Sturzfluten treten in kurzer Zeit und Dauer auf, woraus eine sehr kurzen Vorwarnzeit resultiert, weshalb kaum Schutzmaßnahmen getroffen werden können (Beyer 2016).

„Bei niederschlagsbedingten Sturzfluten übersteigt die Niederschlagsintensität häufig die Infiltrationsrate des Bodens, so dass das Wasser oberflächlich abfließt und eine rasch ansteigende, äußerst energiereiche Hochwasserwelle entsteht.“ (Beyer 2016).

Ein besonderes Gefährdungspotential liegt bei steilen Einzugsgebieten vor, da das energiereiche Hochwasser auf dem Weg ins Tal Bäume, Steine oder Erdmassen mitreißen kann, die (schwere) Personen- und Sachschäden verursachen können (Patt und Jüpner 2020; Beyer 2016).

2. *Sturmfluten* sind ortsspezifische Phänomene, welche nur an Küsten von Meeren oder großen Seen vorkommen (Patt und Jüpner 2020; Malcherek

⁸ Flussaue sind Gebiete, die von stetigem An- und Abstieg des Wassers geformt wurden (Meyer 2017).

2010). Starke Winde drücken das Wasser in Richtung Festland und verursachen hohe Wasserstände (Patt und Jüpner 2020; Malcherek 2010). Dabei können hohe Wellen entstehen und das Küstengebiet bedrohen (Malcherek 2010).

3. Eine weitere Hochwasserart ist die *Überschwemmung aus Starkregenereignisse*, welche vor allem in ebenen Gelände auftreten kann (Patt und Jüpner 2020). Begünstigend wirken dabei Feststoffe, welche durch Starkregenereignisse in die Wasserläufe transportiert wurden und sich dort abgelagert haben (Patt und Jüpner 2020).
4. Die letzte und für diese Arbeit teilrelevante⁹ Hochwasserart ist die *Flussüberschwemmung* (Beyer 2016; Patt und Jüpner 2020). Normalerweise treten diese nicht unerwartet auf, sondern sind das Resultat aus anhaltendem starkem Niederschlag (Beyer 2016; Patt und Jüpner 2020). Die Geschwindigkeit des Wasseranstiegs hängt dabei von der Beschaffenheit, der Größe, des Bodens, der Vegetation und der Bebauung des Einzugsgebietes ab (Beyer 2016; Patt und Jüpner 2020).

Um zu verstehen, wie ein Hochwasser entsteht, muss der Wasserkreislauf, wie in Abbildung 3 dargestellt, nachvollzogen werden. Sobald das Wasser in Form von Niederschlag durch Regen, Schnee, Tau oder Reif auf die Landoberfläche trifft, verdunstet ein Teil davon (Baumgarten et al. 2011). Ein Anteil versickert im Boden, solange bis dieser gesättigt ist (Baumgarten et al. 2011). Die Sättigung hängt dabei von dynamischen Parametern, wie zum Beispiel dem Niederschlag oder dem Gebietszustand ab (Schädel et al. 2006). Eine Sättigung wird für sandige Böden bei 30 % und bindende Böden bei 50 % infolge langanhaltender Austrocknung angesetzt (Schädel et al. 2006). Bei langanhaltenden Niederschlägen können jegliche Bodenarten eine maximale Sättigung von 80 % erreichen (Schädel et al. 2006).¹⁰

⁹ Die Analyse dieser Arbeit hat ergeben, dass das Hochwasser im Ahrtal als eine Kombination aus Sturzflut, Flussüberschwemmung und den Bodenbedingungen eingeordnet werden kann. Das Tiefdruckgebiet „Bernd“ hat anhaltenden und stark dynamischen Niederschlag verursacht und resultierte in steigenden Wassermassen, wodurch der Fluss über die Belastungsgrenze anschwellte (Schäfer et al. 2021).

¹⁰ Diese Sättigungswerte müssen kritisch betrachtet werden, weil diesen keine eindeutigen Werte zugeordnet werden können, sondern dynamische Grenzen haben, welche abhängig von den Bodeneigenschaften vor Ort sind und nicht nur ein Bodentyp im Ahrtal vorhanden ist.

Kommt es zu einer Sättigung des Bodens, bildet das überschüssige Wasser den Landoberflächenabfluss, der dann ein Teil des Abflusstromes wird (Fohrer et al. 2016). Das versickerte Wasser trifft auf die ungesättigte Bodenzone und wird dort als Bodenfeuchte zwischengespeichert und trägt zur Grundwasserbildung bei (Fohrer et al. 2016). Die Vegetation nimmt über ihre Wurzeln das im Boden gespeicherte Wasser auf und gibt dieses mittels Transpiration wieder an ihre Umwelt ab (Fohrer et al. 2016). Dabei ist die Infiltrationsrate der Faktor, der angibt, wie viel Wasser ein Boden aufnehmen kann, was von den Bodeneigenschaften wie z. B. dem vorhandenen Bodenvolumen, dem Druck und der Viskosität der Flüssigkeit abhängt (Fiedler 2001). Die Rate ist dynamisch und sinkt im Laufe des Niederschlags so lange, bis der Boden keine Infiltration mehr zulässt (Fiedler 2001; Stahr et al. 2020). Danach fließt das gesamte Niederschlagswasser hangabwärts als Landoberflächenabfluss in z. B. Flüsse (Fiedler 2001). Bei langanhaltendem und großflächigem Dauerregen steigen die Wasserstände der Flüsse an, weil dort das überschüssige Wasser der Nebenflüsse und Bäche zusammenläuft (Baumgarten et al. 2011), woraus Hochwasser entstehen kann.

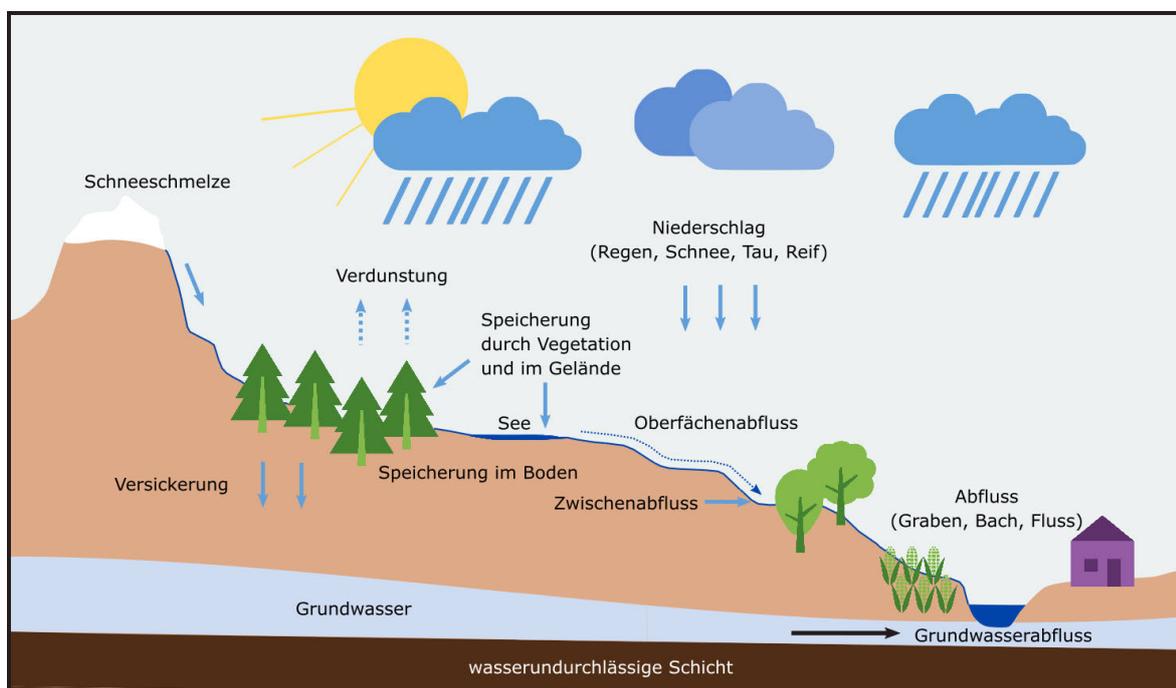


Abbildung 3: „Die Entstehung von oberflächlichem Abfluss“ (Rothe 2022)

2.3 Aktueller Forschungsstand

Inwieweit die Forschung Satelliten zur Datenerhebung und Analyse von Hochwasserereignissen nutzt, soll in diesem Kapitel erläutert werden. Die aktuelle Verwendung von Satelliten zur Vorhersage von Hochwasserereignissen zeigt nach Copernicus¹¹ mit ihren Ergebnissen, dass bereits Satelliten bei Katastrophenlagen unterstützend wirken können (Copernicus 2021). Auch die European Space Agency (ESA) äußert sich positiv über die Möglichkeiten von Satelliten bei Hochwasserkrisen (ESA 2002b). So können diese auf Basis einer strategischen Planung von entsprechenden Maßnahmen bei der Bewältigung der Krisensituation helfen (ESA 2002a).

Grundsätzlich werden Satelliten für verschiedene Datenaufzeichnungen verwendet (EUMETSAT 2022; ESA 2002a; ESA 2002b; Fohrer et al. 2016; Du et al. 2021; Da Cunha Luz Barcellos und Cataldi 2020). Die wichtigsten Anwendungen bei Hochwasserereignissen sind folgende:

1. Die Überwachung von Hochwassergebieten. Diese können bei Hochwasserereignissen realistische Überblicke über die Gesamtsituation liefern (ESA 2002b). Nach der (ESA 2002b) haben Satellitenbilder gegenüber Luftbildern die Möglichkeit tatsächlich betroffene Gebiete besser eingrenzen zu können. Darüber hinaus können sie in Akutfällen bei der Evakuierung helfen und Auswirkungen auf die Infrastruktur überwachen (ESA 2002b).
2. Die Verwendung von Wettersatelliten ist eine weitere Hilfe bei der Vorhersage von Hochwasserkatastrophen (EUMETSAT 2022). Diese liefern Daten über Wolkenbildung, Niederschlag und die atmosphärischen Gegebenheiten (Zwatz-Meise 2013; Rudolf und Simmer). Das Niederschlagsgebiet und die Niederschlagsmenge geben Aufschluss darüber, wie hoch das Gefährdungspotential für eine Überschwemmung ist (Patt und Jüpner 2020; Rudolf und Simmer).
3. Kombinierte Daten von diversen Satellitensystemen werden für automatisierte Frühwarnsysteme genutzt (GITEWS 2007). Das Kombinieren von hyd-

¹¹ Copernicus ist das Erdbeobachtungsprogramm der Europäischen Union. Der Fokus des Programms ist die Informationsgewinnung für den Schutz des Planeten und die dazugehörige Umwelt (Copernicus 2023b).

rologischen Daten in Kombination mit geographischen Modellen und Niederschlagsmustern können dafür verwendet werden Hochwasserereignisse frühzeitig erkennen (Fuchs 2022; Copernicus 2023).

4. Satellitenfernerkundung verwendet verschiedene Messsysteme, um Informationen über zum Beispiel die Bodenfeuchte, den Wasserstand und andere Parameter zu gewinnen (Schönthaler et al. 2017). Dazu werden verschiedene Messmethoden, wie zum Beispiel Radar oder Radiometer verwendet (Schönthaler et al. 2017).

Ob der SMAP-Satellit sich dafür eignet, um Hochwasserereignisse vorherzusagen wurde bereits mehrfach untersucht. Nach NASA und Kimball Du et al. (2021) eignet sich dieser (NASA 2023g; Du et al. 2021). In dieser Arbeit wird die SMAP-Satelliten Eignung zur Vorhersage am Fallbeispiel des Hochwasserereignisses im Ahrtal geprüft.

2.4 SWAP-Satellit

Die Aufgabe von Erdbeobachtungssatelliten ist, Daten in Form von Bildern und Messwerten aufzuzeichnen. Zu diesen gehört auch der SMAP-Satellit, welcher den Wassergehalt in den ersten 5 cm des Bodens auf der Erde misst. Im Januar 2015 startete die NASA die Mission und begann die ersten Daten im April desselben Jahres aufzuzeichnen. Die Hauptmissionszeit betrug drei Jahre (2018) und ist seitdem in der erweiterten Betriebsphase.

Das Ziel der Mission ist, aus den erfassten Daten über den Feuchtigkeitsgehalt im Boden Informationen zu extrahieren, woraus laut NASA folgende Bereiche profitieren sollen (NASA 2023g):

Die Bodenfeuchtigkeit liefert Informationen über Dürren und kann als Frühwarnsystem verwendet werden (NASA 2023g). Gerade die Landwirtschaft ist davon stark betroffen, weil eine geringe Bodenfeuchtigkeit schlechte Ernten oder sogar Ernteauffälle zur Folge haben kann (NASA 2023g). Wissenschaftler*innen prognostizieren eine Zunahme von Dürren für den europäischen Raum (Grillakis 2019). Diese fallen schwerer aus und weisen eine größere räumliche Ausdehnung und erhöhte Dauer auf (Grillakis 2019). Hierbei sollen die SMAP-Daten als Informationsquelle

dienen, um bessere Konzepte für die Folgen von Dürren zu entwickeln (NASA 2023g).

Des Weiteren ist die Bodenfeuchtigkeit ein Teil des Wasserkreislaufes und somit elementar für das Gleichgewicht des Ökosystems (Patt und Jüpner 2020). Die Überwachung der Bodenfeuchtigkeit gibt Aufschluss über einen Teil des Erdsystems und die Funktionalität der Bodenfeuchtigkeit im Wasser-, Energie- und Kohlenstoffaustausch (NASA 2023g). Außerdem können Wetterdienste und Klimaforscher*innen aus den Informationen über die Bodenfeuchtigkeit Rückschlüsse auf das Wetter ziehen (NASA 2023g). Der Zusammenhang besteht darin, dass die Menge an Wasser, welche aus der Landoberfläche in die Atmosphäre verdunstet, mit der Bodenfeuchtigkeit gekoppelt ist (NASA 2023b). Die Informationen über die potenzielle Verdunstungsmenge kann lokale und regionale Wettervorhersagen verbessern (NASA 2023g).

Der für diese Arbeit wichtigste Nutzen der Daten ist der Zugewinn an Informationen über die Bodenfeuchtigkeit, wodurch Hochwasserwarnungen verbessert werden können (NASA 2023g). Informationen über den Feuchtigkeitsgehalt des Bodens vor Starkregenereignissen können für eine bessere Risikobewertung in Form von verbesserten Hochwasservorhersagen herangezogen werden (NASA 2023g). Hochwasserkatastrophen bilden 40 % aller Naturkatastrophen weltweit ab (NASA 2023g). Dazu sind in den Vereinigten Staaten Überschwemmungen die Haupttodesursache für wetterbedingte Todesfälle (NASA 2023g).

Um einen erfolgreichen Einsatz zu gewährleisten, muss der SMAP-Satellit bestimmte technische Anforderungen erfüllen, die im Folgenden auszugsweise erläutert werden. Der SMAP-Satellit befördert neben den Nanosatelliten anderer Raumfahrtbehörden zwei Hauptmesseinrichtungen (Radar und Radiometer) für die Erfassung von Daten sowie eine technische Besonderheit, welche in Kapitel 4.3 näher erläutert wird. Der SMAP-Satellit ist mit einer Trägerrakete (Delta II-Rakete 7320-10C) von der Vandenberg Air Force Base gestartet (Rischer 2023).

Der Satellit hat ein Gewicht von 944 kg und befindet sich in einer 685 km hohen, sonnensynchronen Umlaufbahn¹² (Rischer 2023). Der SMAP hat im Betriebszustand eine Abmessung von 9,7 m mal 7,1 m mal 6,8 m (Rischer 2023). Die gesamte Elektronik des Satelliten, wie zum Beispiel Computer, Elektromotor für die Antenne oder auch Kommunikationssysteme, werden durch eine faltbare Solaranlage mit 1,5 kW Leistung betrieben (NASA 2023f; Entekhabi et al. 2014).

Tabelle 1: Technische Daten zum Satelliten (Rischer 2023)

| Beschreibung | Wert | Einheit |
|------------------------------------|-----------------|---------|
| Gewicht | 944 | kg |
| Größe im Betrieb | 9,7 x 7,1 x 6,8 | m |
| Antennenreflektor (Durchmesser) | 6 | m |
| Solaranlage | 1,5 | kW |

Der SMAP-Satellit misst die Bodenfeuchtigkeit als den volumetrischen Wassergehalt der ersten 5 cm des oberen Bodens (Entekhabi et al. 2014). Der volumetrische Wassergehalt θ_V ist das Verhältnis zwischen Volumenanteil des Wassers einer Probe V_W und dem Gesamtvolumen V_{Ges} , welche in folgender Formel resultieren (Gräber 2005):

$$\theta_V = \frac{V_W}{V_{Ges}} \quad (\text{Gräber 2005})$$

In der Regel wird dieser Wert in % angegeben und muss entsprechend um den Faktor 100 multipliziert werden:

$$\theta_V [\%] = \frac{V_W}{V_{Ges}} * 100 \% \quad (\text{Gräber 2005})$$

¹² Bei einer sonnensynchronen Umlaufbahn behält die Bahnebene immer dieselbe Orientierung zur Sonne (Glover et al. 2005). Das bedeutet, dass die Orbitalebene einen festen Winkel zur Linie Planet-Sonne hat (Cosmos-indirekt 2023).

Die Level 2- und Level 4-Datenpakete, welche in Kapitel 4.4 ausführlicher beschrieben werden, werden in den Einheiten $\frac{cm^3}{cm^3}$ (Level 2) beziehungsweise in $\frac{m^3}{m^3}$ (Level 4) dargestellt (Reichle et al. 2022; Das et al. 2019a).

3. Forschungsfrage

Der Aktueller Forschungsstand zeigt, dass bereits verschiedene Studien validierte Daten des SMAP-Satelliten für verschiedene Forschungszwecke verwenden, wie z. B. die Simulation der Sturzfluten in der Bergregion von Rio de Janeiro in 2011 von Da Cunha Luz Barcellos und Cataldi (2020) oder die Bewertung und Vorhersage der Überschwemmungen in Südafrika durch den Zyklon „Idai“ von Du et al. (2021). Eine Studie über die direkte Verwendung des SMAP-Satelliten bezogen auf die Analyse eines Hochwasserereignisses für den deutschen Raum gibt es bisher nicht. Demnach benötigt es weitere Studien, die sich mit der Wirksamkeit der Fernerkundung und deren Möglichkeiten beschäftigen. In dieser Arbeit soll untersucht werden, inwieweit die erfassten Daten des SMAP-Satelliten Hochwasserereignisse vorhersehen können.

Dafür sind folgende Fragestellungen entwickelt worden:

- *Können SMAP-Satellitendaten bei der Vorhersage von Hochwasserereignissen in Deutschland unterstützend wirken?*
- Inwieweit können die Daten herangezogen werden, um beim vorbeugenden Hochwasserschutz verwendet zu werden?

Während der Rechercharbeiten ist folgende Hypothese entwickelt worden, die zur Beantwortung der Fragestellungen beitragen soll:

- Der SMAP-Satellit kann unterstützend bei der Vorhersage von Hochwasserereignissen sein.

Zur Klärung der Hypothese sind zwei weitere Fragen aufgekommen, die den Forschungsbereich eingrenzen sollen:

- Kann die Vorhersage von Hochwasserereignissen ohne Wetterdaten erfolgen?
- Reicht die Auflösung des SMAP-Satelliten für eine genaue Eingrenzung von Hochwasserschutzschwachstellen?

Um diese Fragen beantworten zu können, werden im folgenden Kapitel die Messinstrumente des Satelliten und die Forschungsmethoden vorgestellt.

4. Material und Methoden

Das Kapitel gibt einen Überblick darüber, womit und wie die Daten erhoben werden. Bezogen wird sich jeweils auf die Erhebung der volumetrischen Bodenfeuchtigkeit in den obersten 5 cm des Bodens (Entekhabi et al. 2014). Dabei gilt eine volumetrische Genauigkeit von $\pm 0,04 \frac{\text{cm}^3}{\text{cm}^3}$ (bei 2-3-Tages-Intervall bei 10 km räumlicher Auflösung) (Entekhabi et al. 2014). Der SMAP-Satellit wurde für diese Arbeit gewählt, weil dieser, der NASA (2023b; NASA 2023c) zufolge, mit seiner hohen Auflösung präzise Daten zur Bodenfeuchtigkeit liefern kann, um bei der Vorhersage von Hochwasserereignissen zu unterstützen. Ermöglicht wird das durch das Kombinieren der Radiometer- und Radardaten (NASA 2023c).

4.1 Radar

Die für die aktive Messung der Bodenfeuchtigkeit zuständige Messeinrichtung ist ein speziell für den SMAP-Satelliten entwickeltes Radar (Symbios 2023). Dieses wurde den Anforderungen entsprechend entwickelt und übernimmt die aktive Messung der Daten (Entekhabi et al. 2014). Die Aufgabe des Radars ist, wie in Abbildung 4 dargestellt, die Rückstreuung von kurzen Hochfrequenzimpulsen zu messen, nachdem sie von der Erdoberfläche reflektiert wurden (NASA 2023f). Abhängig vom Feuchtigkeitsgehalt verändert sich die Rückstreuung auf das Radar (NASA 2023f). Dabei erhöht sich die Rückstreuung, desto feuchter der Boden ist (NASA 2023f). Eine zusätzliche Messfunktion, die das Radar erfüllen kann, ist das Analysieren von Tau- und Gefrierzeiten (NASA 2023f).

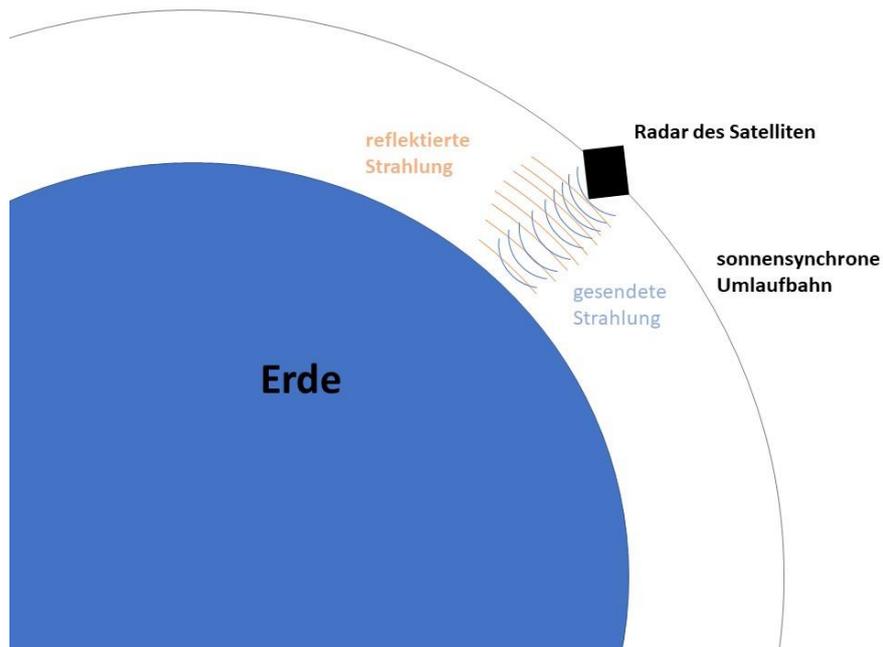


Abbildung 4: Messprinzip eines Radars [eigene Darstellung in Anlehnung an (NASA 2023f)]

Die Messung findet im Mikrowellenbereich (L-Band) statt (Das et al. 2019a). Der Vorteil der L-Band-Mikrowellen ist, dass sie nicht oder nur geringfügig durch andere hochfrequente elektromagnetische Wellen (HF-Puls) durch z. B. geringe Vegetation oder das Wetter beeinträchtigt werden (Entekhabi et al. 2014). Damit das Radar die radiofrequente Rückstreuung auf einer wesentlich kleineren Oberfläche auflösen kann, verwendet die NASA dafür ein „Radar mit synthetischer Apertur“ (SAR) (Brown 1967; Entekhabi et al. 2014). Mithilfe des SAR kann die Bodenfeuchtigkeit mit einer Auflösung von 9 km und der Frost-Tau-Zustand mit einer Auflösung von 3 km gemessen werden (Das et al. 2014; Entekhabi et al. 2014).

Wissenschaftler*innen haben die Daten des Radars mit Daten anderer Messverfahren zu der Bodenfeuchtigkeit an speziell ausgewählten Standorten getestet und die Genauigkeit anhand dessen bestätigen können (Colliander et al. 2022). Die technischen Anforderungen an das Radar sind in Tabelle 2 aufgelistet.

Tabelle 2: Technische Anforderungen an das Radar (Entekhabi et al. 2014)

| Beschreibung | Wert mit Einheit |
|----------------------------|--------------------------------|
| L-Band Radar | Einstellbar von 1,22 – 1,3 GHz |
| Polarisation ¹³ | VV, HH, HV (oder VH) |
| Auflösung | 10 km |
| Relative Genauigkeit | 0.5 dB (VV und HH) |
| Konstanter Einfallswinkel | 35 °- 50 ° |

Am 7. Juli 2015 brach der Datenfluss des Radars ab (JPL 2019). Die Störung wurde durch einen Defekt am Niederspannungsnetzteil des Radars verursacht (JPL 2019). Versuche, das Radar wieder in Betrieb zu nehmen, sind gescheitert (JPL 2019). Seit diesem Vorfall liefert das Radar vom SMAP-Satelliten keine Daten mehr und kann den Untersuchungszeitraum nicht abdecken. Durch den Ausfall des Radars fehlen die Daten für die Kombination der aktiven und passiven Messungen. Im Kapitel 4.4 wird erläutert, wodurch die Daten des Radars ersetzt werden.

4.2 Radiometer

Das empfindliche Radiometer des SMAP-Satelliten empfängt Hochfrequenzen, welche von der Erdoberfläche, wie in Abbildung 5 dargestellt, auf natürliche Weise emittiert werden (NASA 2023f). Diese Messfunktion findet im Vergleich zum Radar passiv statt, weil keine aktive Abstrahlung des Satelliten erforderlich ist (Derksen et al. 2017). Das Radiometer empfängt Energie im niedrigen Mikrowellenbereich (Derksen et al. 2017). Diese Frequenzen, welche für das Radiometer relevant sind, sind international für bestimmte Anwendungen reserviert, bei denen nur das Empfangen und nicht das Senden erlaubt ist (Bundesnetzagentur 2022). So können die Empfänger störungsfrei arbeiten (Bundesnetzagentur 2022). Ein weiterer Vorteil für das Radiometer ist, dass in dem Frequenzband (L-Band) keine oder nur geringe Störungen durch Wetter oder bei mäßiger Vegetation auftreten (Entekhabi et al. 2014).

¹³ Die Polarisation beim Radar oder auch Radiometer ist der Ausrichtung der gesendeten oder empfangenen Wellen (Wolff 26.12.2022). Dabei steht „V“ für vertikal polarisiert und „H“ für horizontal polarisiert und ergibt dadurch vier verschiedene Kombinationen (Entekhabi et al. 2014).

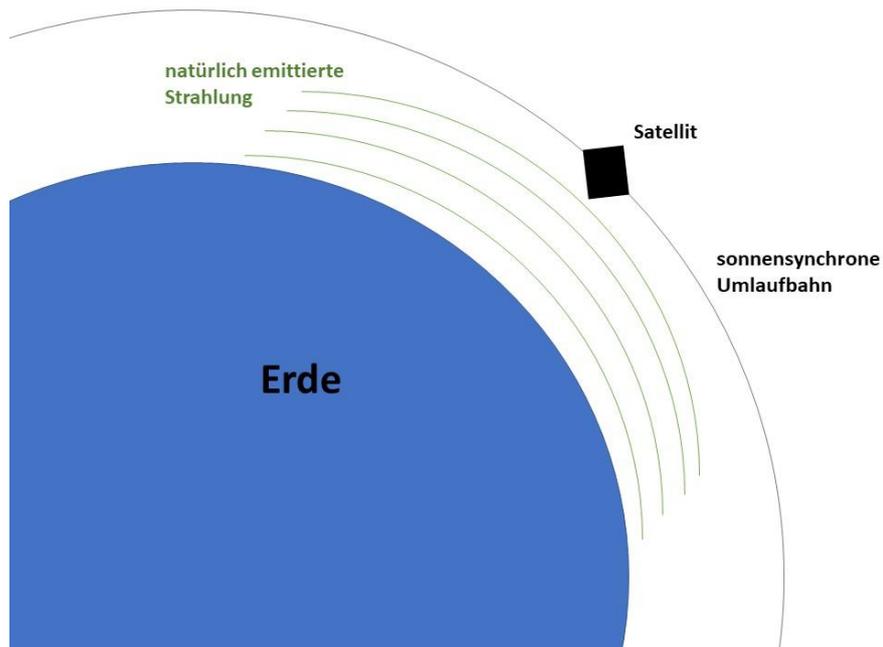


Abbildung 5: Messprinzip eines Radiometers [eigene Darstellung in Anlehnung an (NASA 2023f)]

Das Radiometer funktioniert ähnlich wie eine Infrarotkamera (NASA 2023f). Kalte Objekte werden „dunkler“ wahrgenommen und wärmere, proportional dazu, „heller“ (NASA 2023f). Auf die Bodenfeuchtigkeit bezogen, wird Boden mit hohem Wassergehalt relativ „kalt“ (ungefähr 100 K) und trockener Boden als relativ „warm“ (ungefähr 300 K) wahrgenommen (NASA 2023f). Aus dem vorhandenen Temperaturunterschied der Erdoberflächenstrahlung zwischen feuchtem und trockenem Boden lassen sich Bodenfeuchtigkeitsgehalte mit einer volumetrischen Genauigkeit von $\pm 0,04 \frac{cm^3}{cm^3}$ ableiten (NASA 2023f).

Nach umfangreicher Kalibrierung des Radiometers haben Wissenschaftler*innen die erhaltenen Daten an speziell ausgewählten Standorten mit vorhandenen Daten verglichen, um die Genauigkeit der Messung zu bestätigen (Colliander et al. 2022). Die an das Radiometer gestellten technischen Anforderungen sind in Tabelle 3 aufgelistet.

Tabelle 3: Technische Anforderungen an das Radiometer (Entekhabi et al. 2014)

| Beschreibung | Wert mit Einheit |
|------------------------------|--------------------------------|
| L-Band Radiometer | 1,41 GHz |
| Polarisation ¹³ | V, H, 3 und 4 Stokes Parameter |
| Auflösung | 40 km |
| Radiometrische Ungenauigkeit | 1,3 K |
| Konstanter Einfallswinkel | 40 ° |

4.3 Antenne

Ein weiterer elementarer Bestandteil der Messeinrichtung des Satelliten ist die Antenne. Auf der Webseite der NASA wird die Antenne als „Auge“ des Instruments bezeichnet (NASA 2023f). Kommunikationssatelliten nutzen ähnliche Instrumente mit vergleichbaren Antennen (NASA 2023f). Was die Antenne des SMAP Satelliten jedoch besonders macht, ist die erste Verwendung für den wissenschaftlichen Bereich sowie die Ausklapp- und Spinning-Funktion der Antenne (Rodriguez-Alvarez et al. 2019). Damit dieses spezielle Instrument auch nach dem Start und der Inbetriebnahme störungsfrei arbeiten kann, wurden, um vergleichbare Bedingungen zu schaffen, spezielle „Schwerkraftkompensations“-Geräte entwickelt und mit diesen Stresstests durchgeführt (NASA 2023f).

4.3.1 Eingefalteter Modus

Die Antenne muss besondere Anforderungen erfüllen. Dazu wurde sie so konstruiert, dass sie während des Starts und des Fluges eingeklappt nur noch einen Durchmesser von 30,48 cm (1 ft) hat und in die Trägerrakete passt, welche gleichzeitig vor Beschädigungen schützt (NASA 2023f). Außerdem durfte das Gewicht der Antenne nur um die 25 kg für den Start betragen (NASA 2023f). Dennoch muss der Schirm nach dem Ausfalten ausreichend präzise sein, um die HF-Energie auf den geforderten Punkt der Erde fokussieren zu können (NASA 2023f).

4.3.2 Ausgefalteter Modus

Die Instrumentenantenne ist im ausgefalteten Betrieb nahezu rund (siehe Abbildung 6) und dreht sich mit einer Geschwindigkeit von $13 \frac{U}{min}$ bis zu $14,6 \frac{U}{min}$ gegen den Uhrzeigersinn (von oben betrachtet) (Entekhabi et al. 2014). Im ausgefalteten Modus hat die Antenne einen Durchmesser von 6 m (Entekhabi et al. 2014). Die Oberfläche des Drahtgeflechts ist vergoldet, wodurch sie die empfangenen Frequenzen von Radar und Radiometer bündeln kann (Mikhaylov et al. 2014).

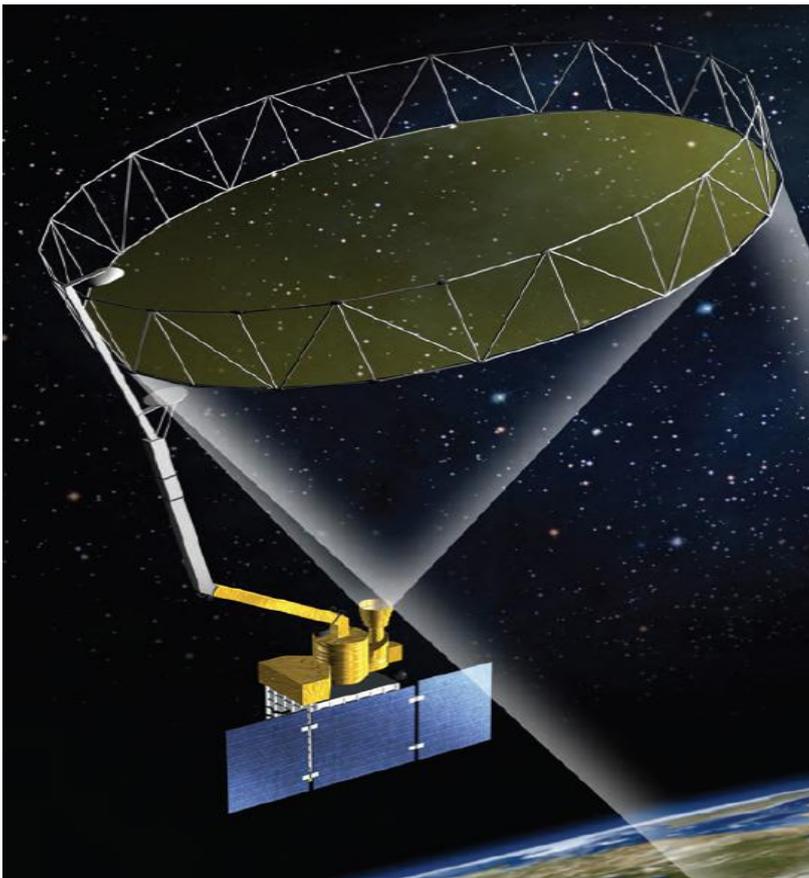


Abbildung 6: Ausgefaltete Antenne des SMAP Satelliten (NASA 2023e)

4.3.3 Funktion

Wie bereits zu Beginn in Kapitel 4.3 beschrieben funktioniert die Antenne als „Auge“ des Satelliten (NASA 2023f). Sie reflektiert das Licht, welches vom Speisehorn auf den Reflektor gestrahlt wird und leuchtet wie eine Taschenlampe konisch mit einem Neigungswinkel von 40° auf die Erdoberfläche (NASA 2023f). Durch die Spin-Funktion dreht sich der reflektierte Lichtstrahl um die Achse des Satelliten und leuchtet, wie in Abbildung 7, einen „Kreis“ mit 1000 km Durchmesser (Schwadbreite) auf die

Erdoberfläche (Entekhabi et al. 2014). Während des Drehens bewegt sich der Satellit auf seiner Umlaufbahn und kann dadurch die gesamte Erde alle zwei bis drei Tage abmessen (Entekhabi et al. 2014).

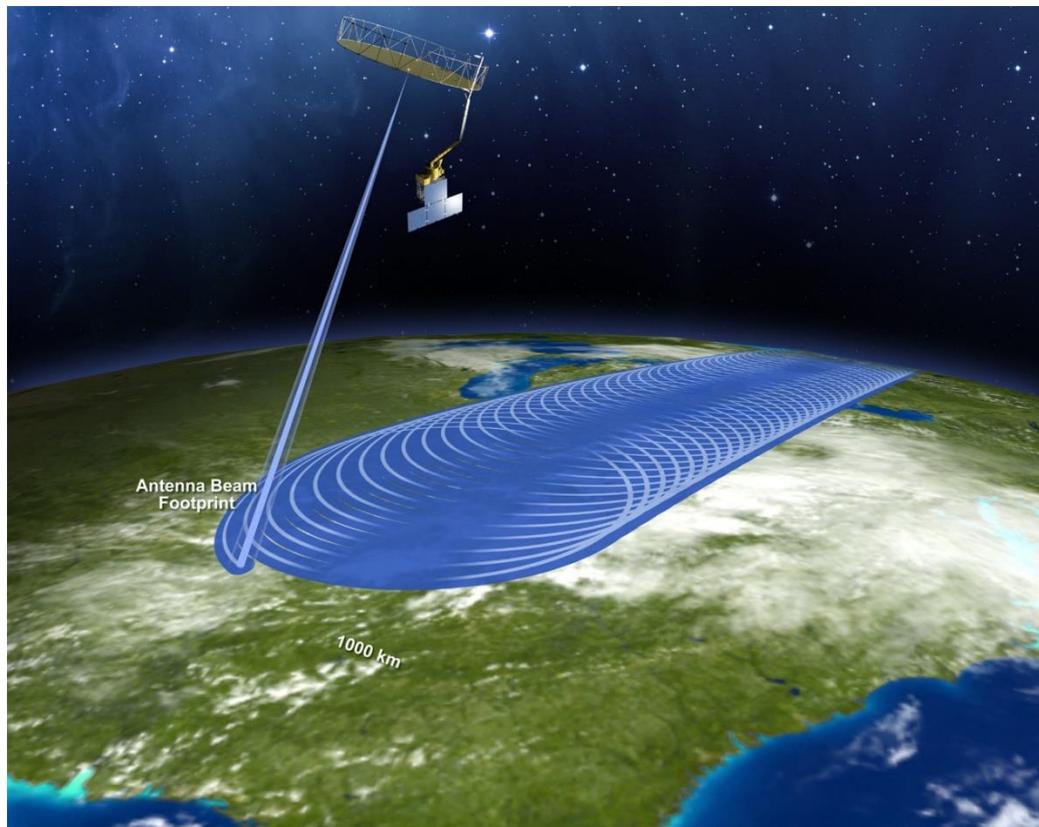


Abbildung 7: Antennenstrahl (NASA 2023d)

Sowohl die aktive als auch die passive Messung verwendet den Reflektor zum Empfangen der Frequenzen (Entekhabi et al. 2014). Diese müssen anhand der Frequenzunterschiede getrennt werden (Entekhabi et al. 2014). Dies ermöglicht ein Duplexer, welcher vor das Speisehorn geschaltet ist (Entekhabi et al. 2014). Das Kombinieren der Daten ermöglicht eine höhere Auflösung (Entekhabi et al. 2014). Die technischen Daten der Antenne werden in Tabelle 4 nochmals aufgelistet.

Tabelle 4: Anforderungen an die Antenne (Entekhabi et al. 2014)

| Beschreibung | Wert mit Einheit |
|----------------------------|---------------------------|
| Durchmesser | 6 m |
| Rotationsgeschwindigkeit | 13 – 14,6 $\frac{U}{min}$ |
| Schwadbreite ¹⁴ | 1000 km |

¹⁴ Die Schwadbreite ist die Breite des Aufnahmestreifens auf der Erdoberfläche, welche das Messinstrument abdecken kann (Kurt Baldenhofer 2022)

4.4 Daten

Dieser Abschnitt behandelt die Verwendung der Level 2- (Das et al. 2020) und Level 4-Daten (Reichle et al. 2022) und geht auf die daraus resultierende Methodik ein. Der Untersuchungsrahmen wurde auf den 12. Juli 2021 bis zum 16. Juli 2021 festgelegt. Für diesen Zeitraum werden zwei Datentypen verwendet. Die genaue Zuordnung ist in der folgenden Tabelle aufgezeigt:

Tabelle 5: Übersicht der verwendeten Daten (NASA 2023a)

| Tag | Datenprodukt | Beschreibung | Auflösung | Räumliche Abdeckung |
|------------|---------------------|---|------------------|----------------------------|
| 12.06.21 | L2_SM_SP | Kombiniert SMAP Radiometer mit Sentinel Radar zur Messung der Bodenfeuchtigkeit | 3 km | Halber Orbit |
| 13.06.21 | L4_SM | Kombiniert Beobachtungsdaten mit Landoberflächenmodell | 9 km | Täglich Global |
| 14.06.21 | L2_SM_SP | Kombiniert SMAP Radiometer mit Sentinel Radar zur Messung der Bodenfeuchtigkeit | 3 km | Halber Orbit |
| 15.06.12 | L4_SM | Kombiniert Beobachtungsdaten mit Landoberflächenmodell | 9 km | Täglich Global |
| 16.06.21 | L2_SM_SP | Kombiniert SMAP Radiometer mit Sentinel Radar zur Messung der Bodenfeuchtigkeit | 3 km | Halber Orbit |

Am 12., 14. und 16. Juli 2021 wird das Datenprodukt L2_SM_SP (vgl. Tabelle 5) verwendet. Das Level 1-Datenprodukt (L1) bildet die Grundlage für die Level 2-Produkte (Entekhabi et al. 2014). Diese sind geophysikalische Abfragen der Bodenfeuchtigkeit, welche auf einem festen Erdgitter (EASE-Grid 2.0¹⁵ mit der global, gleiche Fläche Projektion (ESPG: 6933)) erfasst werden (Entekhabi et al. 2014). Das SM_SP steht für die Kombination der Daten des passiven SMAP-Radiometers und des aktiven Sentinel-1A/B-Radars (NASA 2023a; NSIDC 2023). Das SMAP-Radiometer erfasst im L-Band und das Radar des Sentinel-1 im C-Band (NSIDC 2023). Wie bereits in Kapitel 4.1 „Radar“ beschrieben, muss die NASA seit 2015 die Sentinel-1-Radardaten verwenden, weil der SMAP-Radar seit der Betriebsstörung keine Daten mehr liefert. Die Kombination der beiden Datenprodukte ermöglicht eine räumliche Auflösung von 3 mal 3 km (NASA 2023a). Die räumliche Abdeckung umfasst den halben Orbit (vgl. Tabelle 5). Das bedeutet, dass alle zwei bis drei Tage die gesamte Umlaufbahn abgedeckt wird (NASA 2023a).

Die Daten für den 13. und 15. Juli werden durch das Datenprodukt L4_SM abgedeckt. Die Level 4-Datenprodukte sind aus einem Ensemble-Kalman-Filter (EnKF) gewonnen, welches SMAP-Beobachtungen mit den Schätzungen eines Landoberflächenmodell (NASA Catchment Land Surface Model) zusammenführt (Reichle et al. 2022). Dieses Datenprodukt verwendet auch das EASE-Grid 2.0 (EPSG: 6933) Referenzsystem (Reichle et al. 2022). Weil das andere Datenprodukt (L2_SM_SP) nur alle zwei bis drei Tage dieselbe geografische Stelle abdeckt, wird hier eine tägliche globale Erfassung benötigt. Das Datenprodukt L4_SM erfüllt dieses Kriterium, hat aber den Nachteil, dass dieses im Vergleich zu den anderen Tagen eine geringe Auflösung hat (NASA 2023a). Die Auflösung von L4_SM beträgt 9 km (NSIDC 2023; Reichle et al. 2022).

Die Datenpakete können über die NASA-Plattform EOSDIS Worldview visualisiert werden. Auf dieser lassen sich verschiedene Ebenen (Layers) einstellen. Anschließend können beide Datenpakete in Form einer Ebene eingefügt werden. Im unteren Bildschirmbereich lässt sich ein Datum einstellen. Unter dem Reiter „Data“ kann das

¹⁵ Das EASE-Grid 2.0 ist ein räumliches Referenzsystem, was unter anderem für die Fernerkundung gedacht ist (NSIDC 09.06.2023). Daten können auf einem digitalen Feld in verschiedenen Auflösungen dargestellt werden (Brodzik et al. 2012; Brodzik et al. 2014). Diese sind auf eine der vier verschiedenen Projektionen (z. B. Global, gleiche Fläche (ESPG:6933) definiert (Brodzik et al. 2012; Brodzik et al. 2014).

jeweils gewünschte Paket ausgewählt werden. Bei „Set Area of Interest“ kann der gewünschte Standort per Cursor ausgewählt werden. Der Bereich kann anhand von Breiten- und Längengraden spezifiziert werden. Der Downloadbutton leitet anschließend mit den gewünschten Kriterien auf Earthdata Search weiter. Die Kriterien werden beibehalten. Dort kann nun der Zeitraum des Untersuchungsrahmens der Arbeit eingestellt werden. Anschließend kann der Download angepasst („Customize“) werden. Für diese Arbeit wird das Dateiformat GeoTIFF verwendet. Unter „Band Subsetting“ lassen sich mitaufgenommene Daten, welche für die Arbeit nicht relevant sind, aussortieren. Die heruntergeladenen Daten werden anschließend mit der freien Geografischen-Informationssystemsoftware (QGIS) verarbeitet und analysiert. Die Ergebnisse werden im 5. Kapitel dargestellt.

4.5 Datenraum

Die Veränderung der Bodenfeuchtigkeit ist auf das Tiefdruckgebiet „Bernd“ zurückzuführen, welches vom 12.07.2021 bis zum 19.07.2021 über Teile von Deutschland zog. Dieses sorgte besonders zwischen dem 13. und 15. Juli zu regionalen Starkregenereignissen, welche zum Hochwasser im Ahrtal führten. Somit werden anhand des gewählten Untersuchungszeitraumes (12. Juli 2021 bis 16. Juli 2021) auch Informationen über den Bodenfeuchtigkeitszustand vor dem Einsetzen des Niederschlags und ein Tag nach dem Hochwasserereignis gewonnen.

Für eine bessere Vergleichbarkeit wurde der Datenraum der Untersuchung für den geografischen Standort, in Form eines Rechtecks, mit folgenden Koordinaten ausgewählt. Der Datenraum der Untersuchung ist in nachfolgender Tabelle 6 aufgelistet.

Tabelle 6: Koordinaten für den geografischen Untersuchungsraum

| Richtung | Koordinaten |
|-----------------|--------------------|
| Norden | 50,58811 |
| Osten | 7,18872 |
| Süden | 50,43931 |
| Westen | 6,94572 |

5. Ergebnisse

In diesem Abschnitt werden die für diese Arbeit gewonnenen Daten durch den SMAP-Satelliten dargestellt. Der Untersuchungsrahmen bezieht sich, wie bereits erläutert, auf das Ahrtal. Betrachtet wird der Zeitraum vom 12. bis zum 16. Juli 2021. Alle vorgestellten Daten in diesem Kapitel betrachten denselben geografischen Standort (vgl. Kapitel 4.4 und 4.5). Analysiert werden die Ahr-nahen Bereiche (vgl. Tabelle 7 und Tabelle 8 sowie Abbildung 9), weil weit entfernte Böden, ohne direkten Zufluss, keinen relevanten Einfluss auf das entstandene Hochwasser hatten. Die Daten sind auf den gleichen Farb- und Messbereich skaliert. Auf allen Ergebnissen ist der Fluss „Ahr“ blau hinterlegt.

Dies ermöglicht eine Vergleichbarkeit, welche in der Diskussion aufgegriffen werden kann. Die beiden Datenpakete unterscheiden sich in der Bemessungsfläche. Das Level 2-Paket zeichnet Daten in $\frac{cm^3}{cm^3}$ auf, während das Level 4-Paket aufgrund seiner Auflösung die Daten in $\frac{m^3}{m^3}$ darstellt. Eine Vergleichbarkeit kann dennoch gezogen werden, weil diese nach Umrechnung identische Werte haben.

5.1 Erster Untersuchungstag (12.07.21)

Die folgende Abbildung 8 stellt die Daten (L4_SM) des SMAP-Satelliten am 12.07.21 für den Zeitraum zwischen 13:30 Uhr und 16:30 Uhr dar. Die Auflösung beträgt 9 km und ist aufgrund der Auflösung in $\frac{m^3}{m^3}$ dargestellt. Der Grund für die Verwendung des Level 4-Produkts ist, dass bei dem kombinierten Datenprodukt (L2_SM_SP) eine Abdeckungslücke für den Untersuchungsraum am Untersuchungstag vorhanden ist. Dies liegt an dem zwei bis drei Tages-Intervall, die der Satellit benötigt, um die Erde zu bemessen (vgl. Kapitel 4). Zusätzlich können Aufzeichnungslücken aufgrund der technischen Unterschiede des SMAP- und des Sentinel-Satelliten entstehen (vgl. Kapitel 6).



Abbildung 8: Level 4-Daten für den 12.07.21 mit Bereichen [eigene Darstellung]

Die Tabelle 7 zeigt, dass die Bereiche A-C1 und A-C2 ähnliche Werte haben und keine besonderen Ausreißer vorhanden sind. Sie liegen alle in einem Wertebereich von 23 % bis 25,5 %.

Tabelle 7: Werte für die Bereiche am ersten Untersuchungstag

| Bereich | | Skalenbereich | Vol. Wassergehalt [$\frac{m^3}{m^3}$] | Vol. Wassergehalt [%] |
|---------|---|---------------|--|-----------------------|
| A | 1 | 0,205 - 0,239 | 0,247334 | 24,7334 |
| A | 2 | 0,239 - 0,274 | 0,238755 | 23,8755 |
| B | 1 | 0,205 - 0,239 | 0,238601 | 23,8601 |
| B | 2 | 0,205 - 0,239 | 0,235294 | 23,5294 |
| C | 1 | 0,239 - 0,274 | 0,242985 | 24,2985 |
| C | 2 | 0,239 - 0,274 | 0,254621 | 25,4621 |

5.2 Zweiter Untersuchungstag (13.07.21)

Der zweite Untersuchungstag (13.07.21) (siehe Abbildung 9) wird mit dem Level 2-Datenpaket (L2_SM_SP) ausgewertet. Das kombinierte Datenprodukt hat eine Rasterauflösung von 3 km und wird in $\frac{cm^3}{cm^3}$ gemessen.

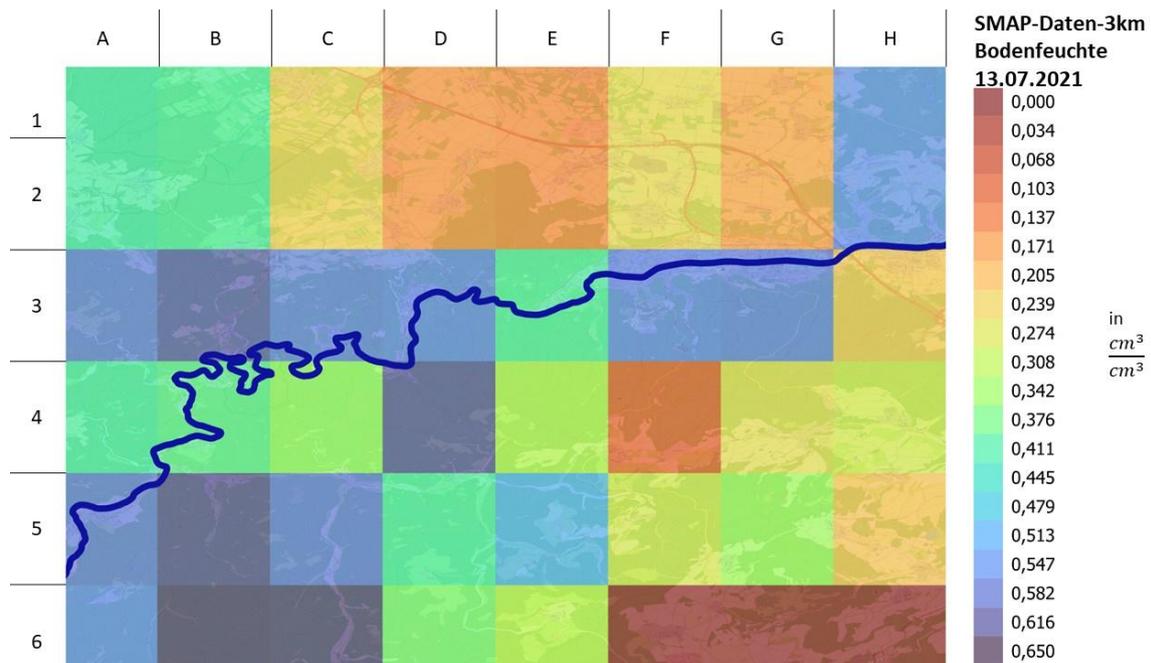


Abbildung 9: Level 2-Daten für den 13.07.21 mit Bereichen [eigene Darstellung]

In der folgenden Tabelle sind die Werte des volumetrischen Wassergehalts aufgelistet. Diese zeigen auf, dass entlang der Ahr der Wassergehalt insgesamt hohe Werte aufweist. Werte, welche teilweise knapp unterhalb des Maximums liegen. Bereiche, die sich hier bereits hervorheben, sind B3 und D4 mit jeweils einem Wert über 60 % (siehe Tabelle 8). Mit einem Wert unter 20 % sticht der Bereich G2 besonders hervor (siehe Tabelle 8).

Tabelle 8: Werte für die Bereiche am zweiten Untersuchungstag

| Bereich | | Skalenbereich | Vol. Wassergehalt [$\frac{cm^3}{cm^3}$] | Vol. Wassergehalt [%] |
|---------|---|---------------|--|-----------------------|
| A | 5 | 0,569 - 0,571 | 0,569 | 56,9 |
| B | 3 | 0,602 - 0,604 | 0,602795 | 60,2795 |
| B | 4 | 0,388 - 0,391 | 0,391 | 39,1 |
| C | 3 | 0,561 - 0,564 | 0,56308 | 56,308 |
| C | 4 | 0,345 - 0,348 | 0,346 | 34,6 |
| D | 3 | 0,554 - 0,556 | 0,555695 | 55,5695 |
| D | 4 | 0,612 - 0,614 | 0,612537 | 61,2537 |
| E | 3 | 0,404 - 0,406 | 0,404 | 40,4 |
| E | 4 | 0,315 - 0,317 | 0,316 | 31,6 |
| F | 2 | 0,249 - 0,251 | 0,251 | 25,1 |
| F | 3 | 0,554 - 0,556 | 0,5550385 | 55,50385 |
| G | 2 | 0,183 - 0,185 | 0,184 | 18,4 |
| G | 3 | 0,561 - 0,564 | 0,563215 | 56,3215 |
| H | 2 | 0,543 - 0,546 | 0,543818 | 54,3818 |
| H | 3 | 0,226 - 0,229 | 0,226 | 22,6 |

5.3 Dritter Untersuchungstag (14.07.21)

Der dritte Untersuchungstag (14.07.21), der Vortag des Hochwasserereignisses, wird in der nächsten Grafik aufgezeigt. Die Werte basieren auf Level 2-Daten (L2_SM_SP) mit einer 3 km Auflösung.

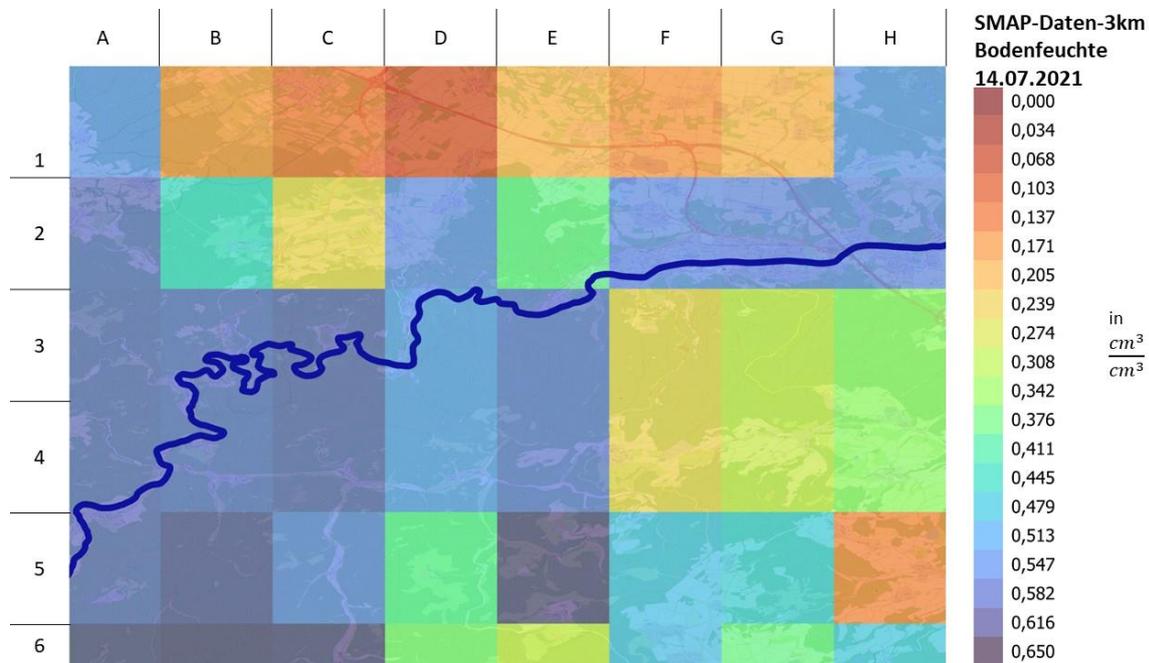


Abbildung 10: Level 2-Daten für den 14.07.21 mit Bereichen [eigene Darstellung]

Die aufgenommenen Daten zeigen, dass in vielen Bereichen entlang der Ahr hohe Wassergehaltswerte aufgezeichnet wurden. Diese weisen fast alle Werte über 50 % auf (siehe Tabelle 9). Besonders stechen C3 und C4 mit Werten vom über 60 % heraus (siehe Tabelle 9).

Tabelle 9: Werte für die Bereiche am dritten Untersuchungstag

| Bereich | | Skalenbereich | Vol. Wassergehalt [$\frac{cm^3}{cm^3}$] | Vol. Wassergehalt [%] |
|---------|---|---------------|--|-----------------------|
| A | 5 | 0,582 - 0,616 | 0,595856 | 59,5856 |
| B | 3 | 0,582 - 0,616 | 0,587848 | 58,7848 |
| B | 4 | 0,582 - 0,616 | 0,587848 | 58,7848 |
| C | 3 | 0,582 - 0,616 | 0,600779 | 60,0779 |
| C | 4 | 0,582 - 0,616 | 0,600779 | 60,0779 |
| D | 3 | 0,513 - 0,547 | 0,535 | 53,5 |
| D | 4 | 0,513 - 0,547 | 0,535 | 53,5 |
| E | 3 | 0,547 - 0,582 | 0,578 | 57,8 |
| E | 4 | 0,547 - 0,582 | 0,578 | 57,8 |
| F | 2 | 0,547 - 0,582 | 0,5550385 | 55,50385 |
| F | 3 | 0,239 - 0,274 | 0,245 | 24,5 |
| G | 2 | 0,547 - 0,582 | 0,563215 | 56,3215 |
| G | 3 | 0,274 - 0,308 | 0,292 | 29,2 |
| H | 2 | 0,547 - 0,582 | 0,560608 | 56,0608 |
| H | 3 | 0,342 - 0,376 | 0,355 | 35,5 |

5.4 Vierter Untersuchungstag (15.07.21)

Der 15.07.21, der Tag des Hochwassers, ist wieder mit Level 4-Daten (L4_SM) mit einer Auflösung von 9 km erfasst worden. Diese Daten sind wie die am 12.07.21 erhobene Daten im Zeitraum von 13:30 Uhr und 16:30 Uhr. Auch diese werden in der nächsten Abbildung in $\frac{m^3}{m^3}$ dargestellt. An diesem Untersuchungstag kam es ebenfalls zu einer Abdeckungslücke, weshalb die Level 2-Daten nicht verwendet werden konnten.



Abbildung 11: Level 4-Daten für den 15.07.21 mit Bereichen [eigene Darstellung]

Die Abbildung zeigt, dass die Daten in allen Bereichen (A-C1 und A-C2) einen ähnlichen Wert haben und sich alle im selben Skalenbereich befinden. Alle Werte liegen in einem Bereich zwischen 28 % und 31 %. Eine Analyse, warum die Daten sich vom Vortag unterscheiden, wird in der Rasteranalyse (siehe Kapitel 5.6) aufgegriffen und in der Diskussion (siehe Kapitel 6) interpretiert.

Tabelle 10: Werte für die Bereiche am vierten Untersuchungstag

| Bereich | | Skalenbereich | Vol. Wassergehalt [$\frac{m^3}{m^3}$] | Vol. Wassergehalt [%] |
|---------|---|---------------|--|-----------------------|
| A | 1 | 0,274 - 0,308 | 0,296159 | 29,6159 |
| A | 2 | 0,274 - 0,308 | 0,292004 | 29,2004 |
| B | 1 | 0,274 - 0,308 | 0,288971 | 28,8971 |
| B | 2 | 0,274 - 0,308 | 0,296216 | 29,6216 |
| C | 1 | 0,274 - 0,308 | 0,290558 | 29,0558 |
| C | 2 | 0,274 - 0,308 | 0,303708 | 30,3708 |

5.5 Fünfter Untersuchungstag (16.07.21)

Der 16.07.21 ist der letzte Untersuchungstag. Die Level 2-Daten (L2_SM_SP) werden in folgender Abbildung dargestellt. Wie in den vorherigen Level 2-Abbildungen dargestellt, ist ein 3 km Raster die Basis für die Erhebung, welche in $\frac{cm^3}{cm^3}$ gemessen wird.

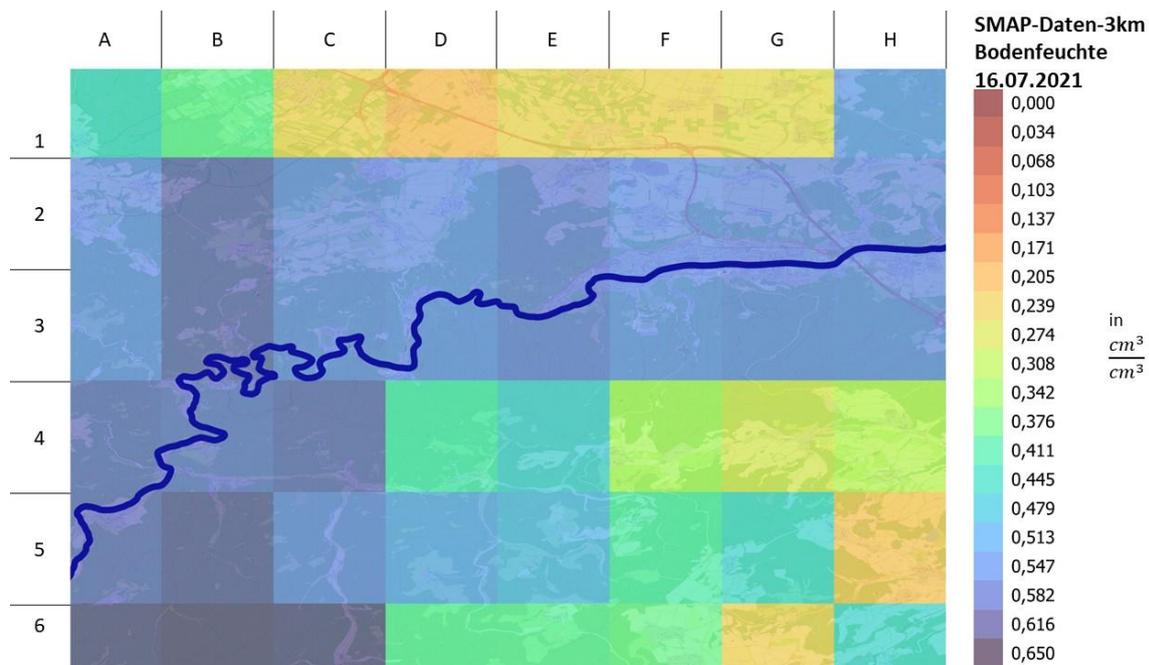


Abbildung 12: Level 2-Daten für den 16.07.21 mit Bereichen [eigene Darstellung]

Die aufgenommenen Daten weisen nach, dass die Bereiche entlang der Ahr ohne Ausnahme hohe Wassergehaltswerte aufzeigen. Diese Bereiche weisen Werte größer als 55 % auf (siehe Tabelle 11). B3 und C4 haben jeweils einen Wert von über 60 % (siehe Tabelle 11). Auch die niedrigsten Werte sind im Vergleich zu den vorherigen Untersuchungstagen hoch und liegen über 40 % (siehe Tabelle 11).

Tabelle 11: Werte für die Bereiche am fünften Untersuchungstag

| Bereich | | Skalenbereich | Vol. Wassergehalt [$\frac{cm^3}{cm^3}$] | Vol. Wassergehalt [%] |
|---------|---|---------------|--|-----------------------|
| A | 5 | 0,582 - 0,616 | 0,595856 | 59,5856 |
| B | 3 | 0,582 - 0,616 | 0,602795 | 60,2795 |
| B | 4 | 0,582 - 0,616 | 0,587848 | 58,7848 |
| C | 3 | 0,547 - 0,582 | 0,56308 | 56,308 |
| C | 4 | 0,582 - 0,616 | 0,600779 | 60,0779 |
| D | 3 | 0,547 - 0,582 | 0,555695 | 55,5695 |
| D | 4 | 0,411 - 0,445 | 0,429 | 42,9 |
| E | 3 | 0,547 - 0,582 | 0,574934 | 57,4934 |
| E | 4 | 0,445 - 0,479 | 0,475 | 47,5 |
| F | 2 | 0,547 - 0,582 | 0,5550385 | 55,50385 |
| F | 3 | 0,547 - 0,582 | 0,5550385 | 55,50385 |
| G | 2 | 0,547 - 0,582 | 0,563215 | 56,3215 |
| G | 3 | 0,547 - 0,582 | 0,563215 | 56,3215 |
| H | 2 | 0,547 - 0,582 | 0,560608 | 56,0608 |
| H | 3 | 0,547 - 0,582 | 0,560608 | 56,0608 |

5.6 Rasteranalyse zur Bodenfeuchtigkeitsveränderung

Die Rasteranalyse wurde mittels QGIS durchgeführt und fokussiert die zeitliche Abfolge der Untersuchungstage. Dabei wurden die Daten vom Vortag analysiert und mit denen des Folgetages verglichen (vgl. Kapitel 5.1 bis 5.5). Die Ergebnisse dieser Analyse wurden in Form eines neuen Rasters mit 3 km Auflösung auf dieselbe Karte aufgetragen. Die jeweiligen Zu- und Abnahmen der Bodenfeuchtigkeit in Form des volumetrischen Wassergehaltes werden auf der Karte schwarz dargestellt. Dadurch lässt sich der Verlauf der Wasserveränderung räumlich und zeitlich identifizieren. Die erste Abbildung zeigt die Veränderung der Bodenfeuchtigkeit vom 12. auf den 13. Juli 2021.

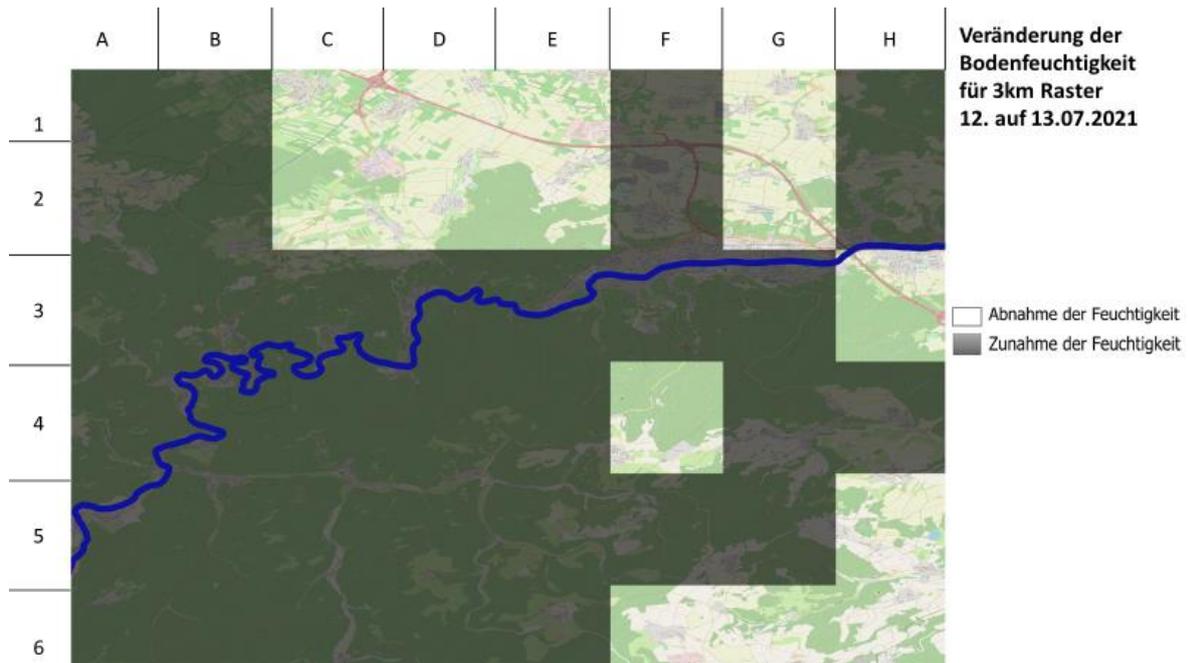


Abbildung 13: Rasteranalyse zur Bodenfeuchtigkeit vom 12. auf den 13.07.21 mit Bereichen [eigene Darstellung]

Die Abbildung zeigt, dass es entlang des gesamten Flusses zu einer Zunahme der Bodenfeuchtigkeit kam. Dies deckt sich mit den Werten aus den Kapiteln 5.1 bis 5.5. Die nächste Abbildung bildet den 13. Juli auf den 14. Juli ab.

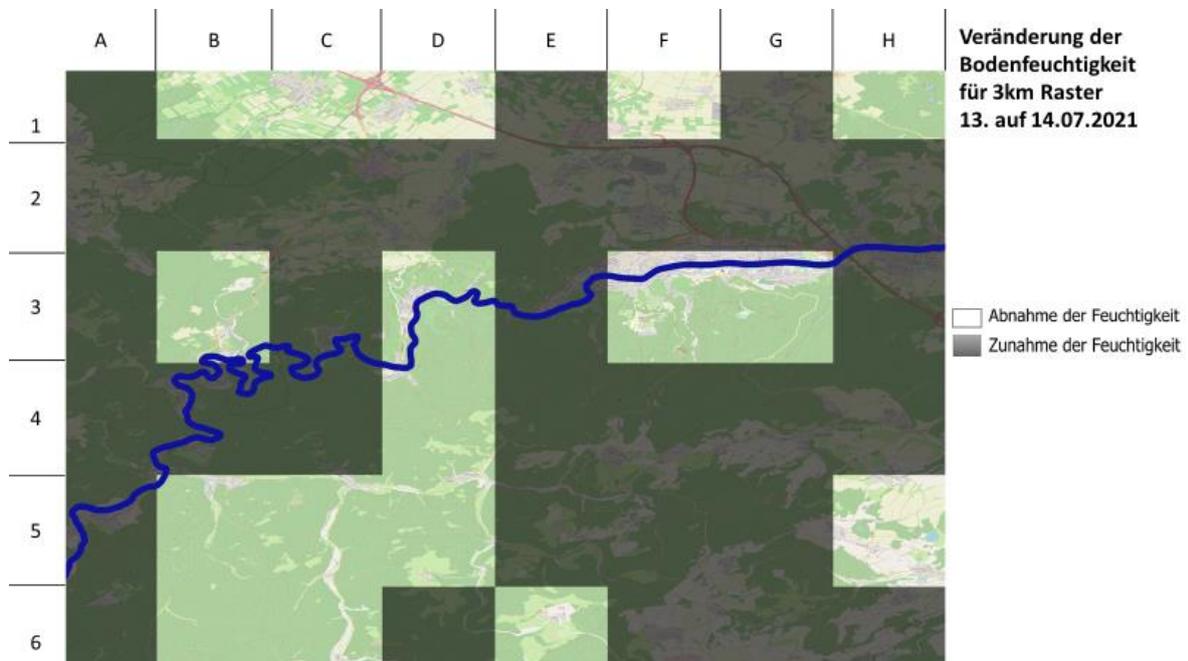


Abbildung 14: Rasteranalyse zur Bodenfeuchtigkeit vom 13. auf den 14.07.21 mit Bereichen [eigene Darstellung]

Die Grafik Abbildung 14 weist auf, dass es in ausgewählten Bereichen zu einer partiellen Zunahme gekommen ist. In den 3er-Bereichen von D, F und G kam es zu

keiner Zunahme, sondern zu einer Abnahme (vgl. Tabelle 8 und Tabelle 9). Das nächste Bild zeigt die Veränderung vom Vortag (14.07.21) auf den Tag des Hochwassers (15.07.21).



Abbildung 15: Rasteranalyse zur Bodenfeuchtigkeit vom 14. auf den 15.07.21 mit Bereichen [eigene Darstellung]

Die Analyse zeigt, dass es erneut entlang des gesamten Flusses zu einer Zunahme kam (vgl. Tabelle 9 und Tabelle 10). Nur in F3 kam es in Flussnähe zu einer Abnahme der Bodenfeuchtigkeit (vgl. Tabelle 9 und Tabelle 10). Die folgende Abbildung visualisiert die Veränderung vom Tag des Hochwassers auf den letzten Untersuchungstag (16.07.21).



Abbildung 16: Rasteranalyse zur Bodenfeuchtigkeit vom 15. auf den 16.07.21 mit Bereichen [eigene Darstellung]

Auch in der Abbildung 16 ist zu erkennen, dass es entlang des Flusses zu einer Zunahme des volumetrischen Wassergehaltes kam (vgl. Tabelle 10 und Tabelle 11). Dazu unterstützend wurden die durch den Satelliten gewonnen volumetrischen Wassergehaltswerte in % der beiden Datenpakete dem Untersuchungszeitraum gegenübergestellt und bilden somit einen zeitlichen Werteverlauf dessen ab. Die Ergebnisse der Gegenüberstellung sind in der nachfolgenden Grafik in Form eines Diagramms dargestellt.

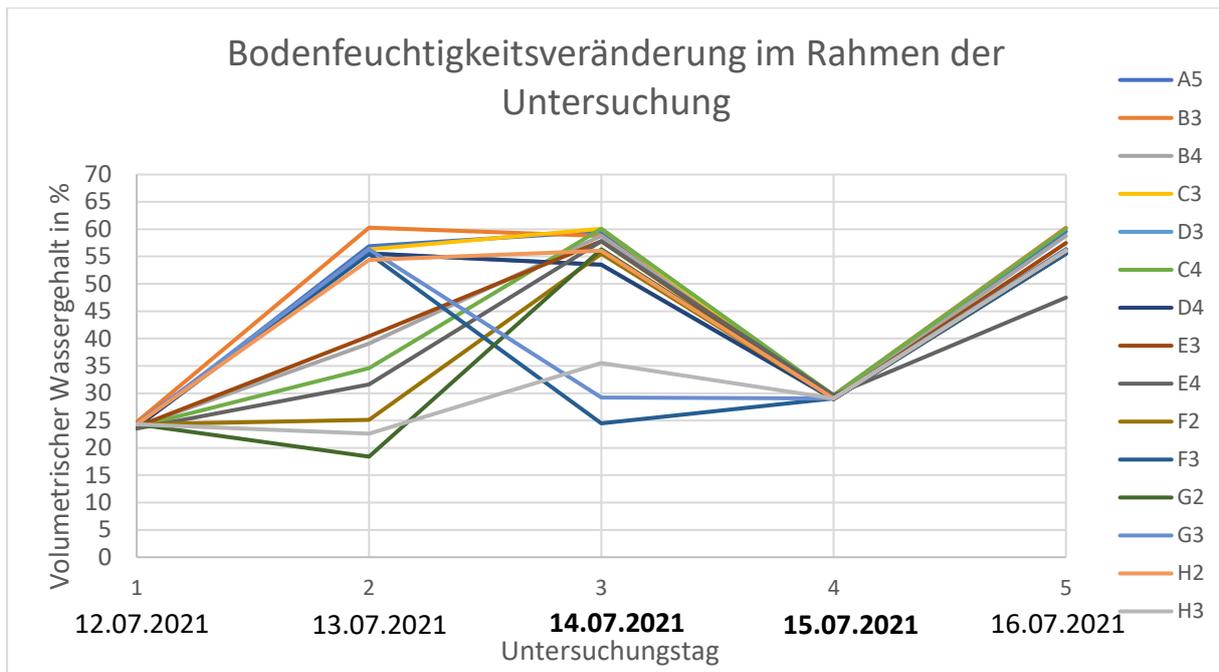


Abbildung 17: Diagramm über die Bodenfeuchtigkeitsveränderungen innerhalb der Untersuchungstage [eigene Darstellung]

Das Diagramm visualisiert die Werteveränderung des Wassergehalts über die Untersuchungstage. Die Werte weisen am ersten Tag ähnlich hohe Werte auf. Zum nächsten Tag verändern sich die Werte und verteilen sich entlang der y-Achse, wobei das Minimum (18,4 %) als auch das Maximum (60,28 %) im Vergleich zu den anderen Tagen, eine signifikante Differenz aufweisen. Vom zweiten auf den dritten Tag steigen die vorher geringeren Werte an, während nur wenige wieder sinken (24,5 %, 29,2 % und 35,5 %). Ein Teil der bereits hohen Werte bleibt auf einem vergleichbaren Level. Am Vortag des Hochwasserereignisses sind zehn der 13 Bereiche bei einem Wert über 50 % angelangt. Tag vier weist eine Abnahme in allen Bereichen auf, die sich bei Werten unter 30 % einpendeln. An dem darauffolgenden Tag steigen diese wieder auf Werte über 45 % an, teilweise sogar über 60 %. Die Bedeutung und die Gründe der jeweiligen Veränderungen werden in der Diskussion erläutert und interpretiert.

6. Diskussion

In diesem Kapitel werden die Ergebnisse und die Erkenntnisse aus dem vorherigen Kapitel interpretiert und diskutiert. Aus der Interpretation und Diskussion der Daten soll geprüft werden, ob auf Basis derer die Forschungsfragen aus Kapitel 3 beantwortet werden können.

Aus den Rasterdaten von Kapitel 5.1 bis 5.5 können verschiedene Erkenntnisse gezogen werden. Am ersten Untersuchungstag (vgl. Kapitel 5.1) sind die Werte in einem ähnlichen Wertebereich um die 24 % volumetrischer Bodenfeuchtigkeit. Der Boden ist bei den Werten vom 12. Juli 2021 noch nicht gesättigt und fungiert noch als Wasserspeicher (vgl. Kapitel 2.2). Mit dem Einsetzen des Niederschlags durch das Tiefdruckgebiet „Bernd“ verändert sich der volumetrische Wassergehalt zum zweiten Untersuchungstag. Flussfern steigen die Werte nur gering an und sinken sogar teilweise auf knapp unter 20 % (vgl. Kapitel 5.2). Die Werte der Bereiche steigen entlang der Ahr, im Vergleich zum Vortag, allesamt an (vgl. Kapitel 5.6). Einige Datenfelder erreichen Werte von knapp über 60 % und haben damit den Sättigungszustand erreicht, beziehungsweise überschritten, welcher ab 50 % eintreten kann und die Böden damit ihre Funktion als Wasserspeicher verlieren (vgl. Kapitel 2.2). Bereiche, die im Vergleich zum Vortag sinken, behalten ihre Funktion als Wasserspeicher bei (vgl. Kapitel 2.2).

Die Ahr-nahen-Bereiche mit Werten über 50 % erreichen somit am 13. Juli 2021 einen hohen Sättigungsgrad (vgl. Kapitel 2.2) (Schäfer et al. 2021). Auch zum dritten Untersuchungstag und Vortag des Hochwassers steigen die Bodenfeuchtigkeitswerte weiter an (vgl. Kapitel 5.3 und 5.6). Außerdem kommt es zu einer Zunahme des niedrigsten Wertes auf 24 %. Wohingegen die höheren Werte bei ca. 55 % und das Maximum erneut um die 60 % eher in flussdurchzogenen Bereichen liegen. Das bestätigt, dass die in der Theorie erwähnte Sättigung des Bodens ab einem Wert von 50 % erreicht werden kann (vgl. Kapitel 2.2 und 5.3) und der Boden nicht mehr als optimaler Wasserspeicher fungiert (Schäfer et al. 2021). Die Auswirkungen des Hochwassers sind am vierten Untersuchungstag nicht direkt erkennbar, weil die Werte im Vergleich zum Vortag sinken und zunächst ein falsches Bild erzeugen. Gründe dafür können die Unterschiede bei den verwendeten Datenpaketen und dem Aufnahmezeitraum sein, auf welche im nächsten Abschnitt weiter eingegangen

wird. Der letzte Untersuchungstag hingegen zeigt die Auswirkungen des Tiefdruckgebiets und das damit zusammenhängende Hochwasser eindeutig (vgl. Kapitel 5.5). Auch umliegende Bereiche sind nun stärker von der Feuchtigkeitszunahme betroffen (vgl. Kapitel 5.5 und 5.6). Der niedrigste Wert, in den für die Untersuchung relevanten Bereichen, liegt bei 42 % und damit deutlich über dem, der anderen Untersuchungstage (vgl. Kapiteln 5.5). Das Maximum hingegen liegt erneut bei knapp über 60 % und unterstützt die theoretischen Informationen zur Bodensättigung (vgl. Kapitel 2.2 und 5.5). Dies deutet darauf hin, dass das Sättigungsmaximum für die verschiedenen Bodenarten im Untersuchungsraum zwischen 50 % und 60 % liegt.

Aus der in Kapitel 5.6 durchgeführten Rasteranalyse können verschiedene Erkenntnisse gezogen werden. Die dazugehörigen visuellen Darstellungen zeigen den Anstieg des volumetrischen Wassergehalts vom 12.07.2021 bis zum Vortag des Ahr-Hochwassers (14.07.2021) und die Folgen davon (Kapitel 5.6). Denn auch nach dem 14.07.2021 steigen die Werte entlang des Flusses weiter an. Dies kann durch die ansteigenden Wassermassen verursacht worden sein. Unterstützend wirkt dabei die folgende Abbildung 18, welche die Durchschnittswerte zu den Bereichen der Tabelle 7-Tabelle 11 aufzeigt.

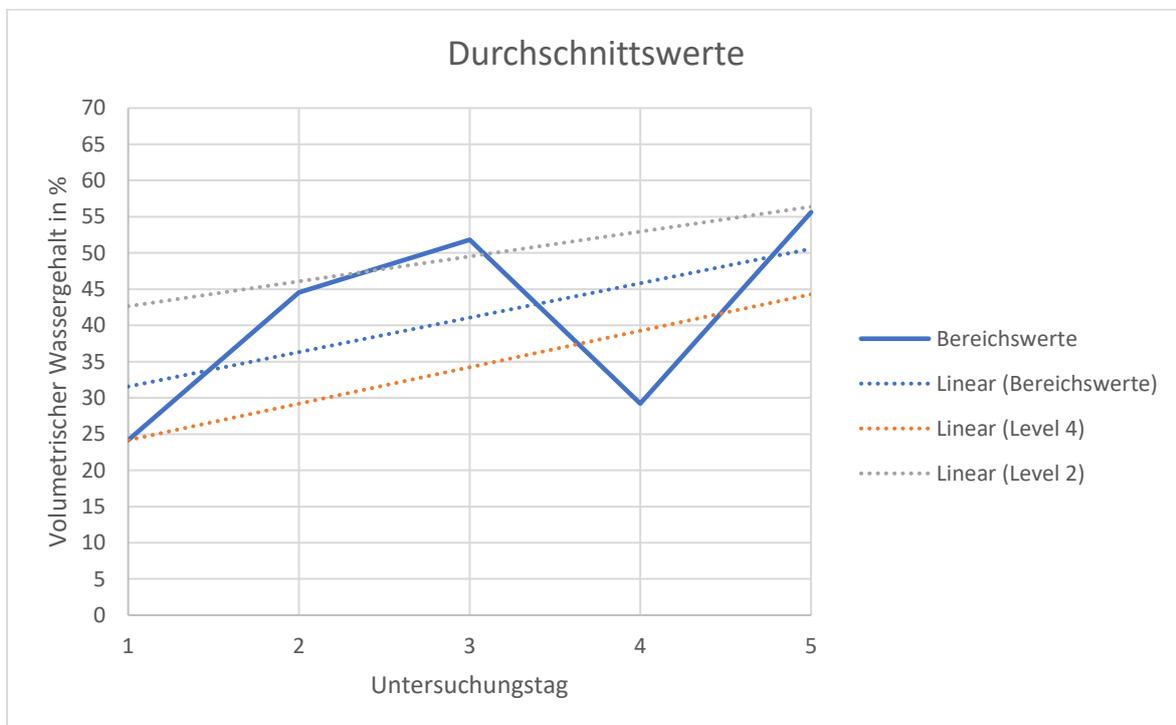


Abbildung 18: Durchschnittswerte für kombinierte und einzelne Datenprodukte [eigene Darstellung]

Die Durchschnittswerte zeigen verschiedene Validierungen zur Zunahme des Wassergehalts. Die Trendlinien von sowohl Level 2 als auch von Level 4 sind steigend (vgl. Abbildung 18). Das zeigt, dass obwohl die Rastergröße sich unterscheidet, der Trend der Zunahme gleich bleibt. Die Daten beider Level zeigen einen Zunahme-Trend auf.

Dennoch muss bedacht werden, dass die verschiedenen Datenpakete mit den unterschiedlichen Auflösungen nur begrenzt miteinander vergleichbar sind. Das könnte daran liegen, dass die jeweils aufgezeichneten Raster mit jeweils 3 km und 9 km bei einem Vergleich miteinander eine gewisse Verfälschung erzeugen, was im Diagramm zur Rasteranalyse (vgl. Abbildung 17) aufgezeichnet ist. In dieser Abbildung ist zu sehen, dass jeweils am ersten und vierten Untersuchungstag deutlich niedrigere Werte aufgezeichnet wurden als im Vergleich zum Trend der Level 2-Datenpakete (Untersuchungstage 2, 3 und 5). Diese verhalten sich entgegen dem Trend hoher Wassergehaltswerte. Ein Grund dafür könnte der gewählte Zeitpunkt von 13:30 Uhr bis 16:30 Uhr der Datenaufzeichnung für das Datenpaket (L4_SM) sein. An sonnigen Tagen führt darüber hinaus dieser gewählte Tageszeitpunkt dazu, dass vorhandenes Wasser verdunstet, wodurch niedrige Werte resultieren. Diese Problematik gilt nicht für das Level 2-Paket, welches einen Tagesdurchschnitt abbildet. Darüber hinaus sorgen die großen 9 km Raster dafür, dass potenziell trockenere Umgebungsbereiche den Durchschnittswert des Gesamtrasters senken. Beispiel hierfür sind die Daten für den zweiten Untersuchungstag (vgl. Abbildung 9). Dort ist zu sehen, dass flussferne Bereiche (zum Beispiel A1-G1 oder F6-H6) sich sehr von flussnahen Bereichen unterscheiden. Teilweise je nach Bereich bis zu 45 %. Ein Problem der Level 2-Datenpakete ist, dass diese täglich nur den halben Orbit aufzeichnen und dadurch Analyselücken entstehen. Zusätzlich gibt es aufgrund der schmalen Schwadbreite und der geringen Wiederholrate des Sentinel-1-Radars räumliche und zeitliche Differenzen der Messdaten beider Satelliten, sodass es zu Analyselücken kommt (Mao et al. 2019; Das et al. 2017).

Die Genauigkeit der Daten wurde bereits in mehreren Studien validiert und bedarf keiner weitreichenden Anpassungen (Mohseni et al. 2022; Colliander et al. 2022). Damit es jedoch zu keinen Aufzeichnungslücken kommt, sollte der Orbit entweder täglich mit einer Auflösung von mindestens 3 km aufzeichnen oder ein zweiter Satellit mit derselben Auflösung entstehende Lücken füllen, sodass täglich bei einer

Mindestauflösung von 3 km Daten erfasst werden. Für eine Echtzeit-Überwachung besteht das Problem der Latenz¹⁶. Bei den verwendeten Level 4-Daten liegt die erforderliche Latenz bei sieben Tagen und die mittlere Latenz unter normalen Betriebsbedingungen bei zwei Tagen und 15:53:00 Stunden (NSIDC 2023). Die Latenzen der Level 2-Daten hängen dabei von den SMAP-Radiometer-Daten ab (Das et al. 2020; Das et al. 2019b). Diesen liegen für die erforderliche Latenz bei zwei Tagen und 02:00:00 Stunden und die mittlere Latenz unter normalen Betriebsbedingungen bei einem Tag und 05:34:25 Stunden (NSIDC 2023). Somit sind die SMAP-Daten nicht geeignet für eine Echtzeit-Überwachung und sind für die Vorhersage von Hochwasserereignissen in Deutschland nicht verwendbar, da diese nicht im Sinne der Fernerkundung als Echtzeit oder NRT gelten (vgl. Fußnote 16). Des Weiteren kann anhand der verwendeten Satellitendaten nur der Zustand der oberen 5 cm des Bodens abgedeckt werden und gibt keine Auskunft über tieferliegende Sättigungszustände. Allein anhand der Bodenfeuchtigkeitsdaten kann ein Hochwasser nicht prognostiziert werden. Entsprechend werden noch Wetterdaten benötigt, welche Informationen über die Niederschlagsmengen und das Wetterverhalten für die jeweiligen Bereiche liefern.¹⁷

Der SMAP-Satellit als einzelner Satellit reicht aufgrund vorheriger Gründe und seiner Radar-Betriebsstörung (vgl. Kapitel 4.1) nicht aus, um Vorhersagen zu Hochwasserereignisse in Deutschland zu treffen. Selbst in Kombination mit den Sentinel-1-Daten, ist das nicht ausreichend. Dennoch können diese beim vorbeugenden Hochwasserschutz unterstützend wirken, indem die Fernerkundung Bereiche identifiziert, welche über einen längeren Zeitraum zu feucht oder zu trocken sind. Um bei der Planung zu unterstützen, reicht eine Auflösung von sowohl 9 km als auch 3 km nicht aus. Besser wäre eine Auflösung von 1 km oder geringer, um spezifische Gefahrenstellen, welche besondere Schutzanlagen brauchen, zu erkennen.

¹⁶ Latenz in der Fernerkundung ist die Zeit zwischen der Aufnahme der Daten und die Bereitstellung dieser (Cassidy 26.08.2020). Unterschieden wird hier bei der theoretisch angesetzten beziehungsweise erforderlichen Latenz und der tatsächlichen beziehungsweise mittleren Latenz unter normalen Betriebsbedingungen (NSIDC 23.06.2023c). Zeiten unter einer Stunde werden dabei als Echtzeit und zwischen ein bis drei Stunden als nahezu Echtzeit (NRT) angesehen (Cassidy 26.08.2020) Geringe Latenz ist zwischen drei und 24 Stunden (Cassidy 26.08.2020).

¹⁷ Neben den Wetterdaten wären topografische Daten von Vorteil, weil diese Aufschluss über das Abflussverhalten, bezogen auf das Gelände, geben könnten. Was vermutlich die Prognosen verbessern würde, jedoch den Rahmen dieser Arbeit überschreitet.

Darüber hinaus ist eine Verringerung der Latenz und eine Kombination aus Satelliten- und Wetterdaten notwendig, um ausreichende Voraussetzungen zu schaffen, um ein Früherkennungssystem in Form eines Projektes zu verwirklichen, damit Vorhersagen über künftige Hochwasserereignisse möglich sind.

7. Fazit

Das Ziel dieser Arbeit ist die Überprüfung der Eignung von SMAP-Satelliten Daten zur Vorhersage von Hochwasserereignissen am Beispiel des Ahrtals. Die dafür verwendete Methodik sowie die Level 2- und Level 4-Daten des SMAP-Satelliten haben sich während der Analyse und der Auswertung des Hochwasserereignisses im Ahr-tal (2021) grundsätzlich als wirksam erwiesen. Die Ergebnisse der Daten ermöglichen die Beantwortung der Forschungsfragen:

Können SMAP-Satellitendaten bei der Vorhersage von Hochwasserereignissen in Deutschland unterstützend wirken?

Der SMAP-Satellit allein, ohne die Sentinel-Daten, kann bei der Prognose von Hochwasserereignisse in Deutschland unterstützend wirken. Jedoch ist die Auflösung, welche allein durch das passive Radiometer des SMAP-Satelliten bereitgestellt wird, nur begrenzt nützlich zur Verwendung gegen Hochwasser, welche oft lokale Auswirkungen haben. Die Kombination mit den Sentinel-Daten verbessert die Auflösungsqualität und behält den Ursprungsgedanken des SMAP-Projekts bei und ist daher besser geeignet. Zusätzlich liefern sie Informationen über bereits eingetretene Hochwasser, welche dabei helfen, diese besser zu verstehen und daraus geeignete Maßnahmen ableiten zu können. Zur inhaltlichen Präzisierung der Forschungsfrage wird folgende Unterfrage aufgegriffen.

- *Kann die Vorhersage von Hochwasserereignissen ohne Wetterdaten erfolgen?*

Die Vorhersagung von Hochwasserereignisse ist ausschließlich durch die Daten des SMAP-Satelliten oder auch in Kombination mit den Sentinel-Daten ohne Wetterdaten hinzuzuziehen nicht möglich. Ein Grund dafür ist, dass die verwendeten Daten über den volumetrischen Wassergehalt nur die oberen 5 cm des Bodens abdecken. Diese sind zwar ein Indikator dafür, wie gesättigt der Boden ist, sind aber keine fundierte Basis mit der eine Aussage über den Boden unterhalb der 5 cm getroffen werden kann. Allein anhand des Indikators lässt sich keine Vorhersage über potenzielle Hochwasser treffen. Was sie können, ist darüber Informationen liefern, wie sehr ein Boden an der Oberfläche gesättigt ist. Sollte dieser bereits gesättigt sein, deutet das darauf hin, dass der Boden seiner Funktion als Wasserspeicher

nicht mehr nachkommen kann und das Wasser fortan zum großen Anteil als Landoberflächenabfluss abgeleitet wird. Im Falle des Ahrtals war gerade das ein Problem, da die topografischen Bedingungen (Kerbtäler) dazu führten, dass das Wasser in die Ahr floss. Da bei Hochwasser bestimmter Arten die Menge des Niederschlags maßgeblich ist, kann eine Vorhersage ohne Wetterdaten nicht erfolgen. Erschwerend dazu ist die Latenz der Satelliten, sodass ein blinder Datenfleck voran läuft. Im Falle des Ahrtal bedeutet das, dass die Daten noch nicht verfügbar waren, als das Tiefdruckgebiet „Bernd“ bereits auf das Ahrtal traf. Diese Vorlaufzeit verhindert eine Vorhersage ausschließlich anhand der SMAP- und oder Sentinel-Daten ohne die Berücksichtigung von Wetterdaten.

Die Antwort auf die zweite Forschungsfrage wird mithilfe der folgenden Unterfrage beantwortet. Diese grenzt die Forschungsfrage näher ein und unterstützt bei der Beantwortung.

Inwieweit können die Daten herangezogen werden, um beim vorbeugenden Hochwasserschutz verwendet zu werden?

- *Reicht die Auflösung des SMAP-Satelliten für eine genaue Eingrenzung von Hochwasserschutzschwachstellen?*

Grundsätzlich können Luftbilder/ Satellitenbilder oder Fernerkundungsdaten beim vorbeugenden Hochwasserschutz verwendet werden. Satellitenbilder werden zum Beispiel herangezogen, um unter anderem Veränderungen der Vegetation oder die Auswirkung eines Hochwassers sichtbar zu machen. Dabei helfen sie vor allem bei der Planung für zukünftige Vorfälle. Um geltendes Recht (§76 Abs. 3 WHG) zu erfüllen, wurde das Überschwemmungsgebiet Ahrtal mittels Luftbildern im Juni 2019 (siehe Abbildung 19) und im September 2021 erfasst (siehe **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.**).



Abbildung 19: Luftbilder des Einzugsgebiets vor dem Hochwasser (Stand: Juni 2019) (GDI-RP 2019)

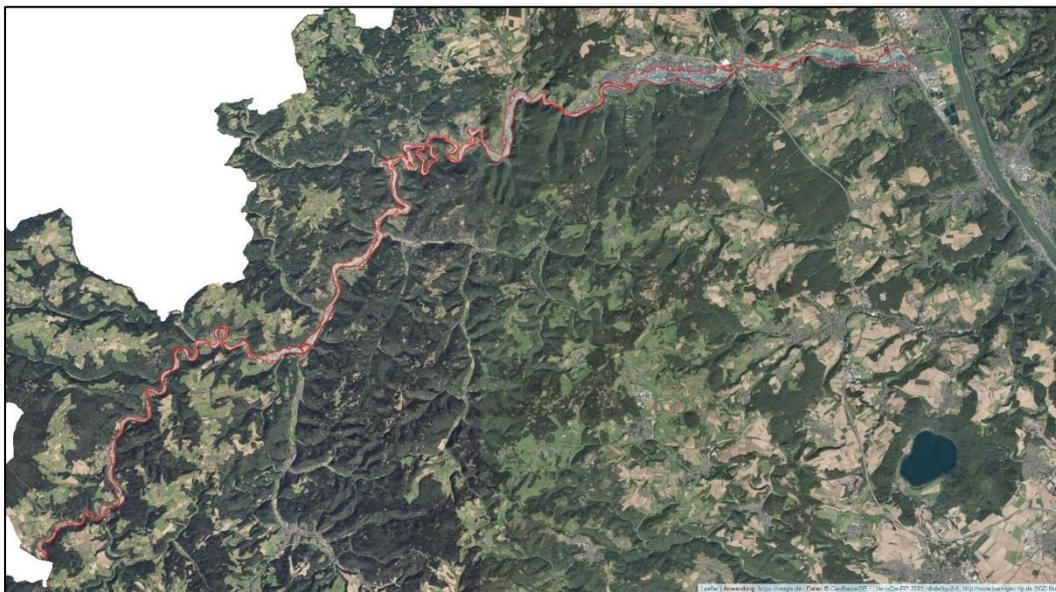


Abbildung 20: Luftbilder vom Hochwassereinzugsgebiet vom September 2021 (GDI-RP 2021)

Primär werden diese dafür verwendet, um bei Evakuierungen und bei der Identifizierung von Gefahrenstellen zu helfen (LVermGeo-RP 2022). Hierbei können die Daten des SMAP-Satelliten unterstützend wirken. Im Falle eines Hochwassers kann mithilfe der Bodenfeuchtigkeitsdaten, topografischen Modellen und Niederschlagsverhalten durch Wetterdaten analysiert werden, in welchen Bereichen ein besonders hohes Risiko für Überschwemmungen besteht. Auch hier sind die kombinierten Daten von SMAP und Sentinel zu präferieren. Diese liefern Informationen darüber, ob der Boden die anfallende Menge Niederschlag aufnehmen kann.

Auf die Frage, ob die Auflösung des SMAP-Satelliten zur Eingrenzung für eine genaue Identifizierung von Hochwasserschutzschwachstellen reicht, kann angemerkt werden, dass die kombinierten Daten (3 km) von SMAP und Sentinel über die alleinigen SMAP-Daten (9 km) zu bevorzugen sind, dennoch ist die Auflösung zu gering und somit nicht ausreichend. Für die sehr genaue Identifizierung gilt, dass die Auflösung der Daten so groß¹⁸ wie möglich, aber mindestens bei 3 km liegen sollten. Im Falle des Ahrtals wäre eine Auflösung von 1 km oder größer hilfreich gewesen, um besonders im besiedelten Raum mit vielen Versiegelungen Gefahrenstellen zu erkennen. Die Analyse dieser Arbeit hat gezeigt, dass ein Vergleich zwischen Daten mit verschiedenen Auflösungen (3 km und 9 km) zu Werteverzerrungen führen kann. Daher sollten Daten derselben Auflösung verwendet werden, weil eine Werteverzerrung dafür sorgt, dass potenziell Gefährdungsbereiche nicht identifiziert werden können, da ihre Werte nicht die eigentliche Situation widerspiegeln. Bei der Nutzung von Level 4-Daten sollte ein Durchschnitt des gesamten Tages verwendet werden und nicht nur ein spezielles Zeitfenster, wodurch eine Werteverzerrung durch bestimmte Tageszeiten verhindert werden kann.

Die Interpretation der Ergebnisse zeigt, dass die Fernerkundung durch den SMAP-Satelliten für Hochwasserereignisse nicht dazu geeignet ist, diese vorherzusagen. Auch die Kombination der SMAP- und Sentinel-Daten vermag das nicht. Eventuell wären sie in der Lage dazu, sofern die Daten mit Wetterdaten kombiniert werden würden. Dies müsste in Form eines Projekts geprüft werden. Weitgehend kann gesagt werden, dass die Latenz ein Grund dafür ist, da diese je nach Datenprodukt Tage benötigt, um diese zur Nutzung bereitzustellen. Kann diese verringert werden, sodass sie im Echtzeit- (vgl. Fußnote 16) oder im NRT-Bereich (vgl. Fußnote 16) liegt, wäre die Möglichkeit SMAP-, Sentinel- und Wetterdaten durchaus weitreichend und in Form eines automatisierten Früherkennungssystems realisierbar. Gleichzeitig muss bedacht werden, dass es bei den aktuellen und verwendeten Daten zu Abdeckungslücken kommt. Diese Analyselücken können bei einem automatisierten System dazu führen, dass potenzielle Gefahren unentdeckt bleiben, diese müssten mittels anderer Satelliten oder Techniken abgedeckt werden. Der 3 km

¹⁸ Eine größere Auflösung bedeutet in dem Fall mehr Bereiche für denselben Standort.

Auflösungsbereich würde für Vorhersagen vermutlich reichen. Bevorzugt wären jedoch größere Auflösungen, damit potenzielle Gefahrenbereiche genauer identifizierbar sind.

Grundsätzlich müssten weitere Vorfälle anhand der Satelliten-Daten analysiert werden, um zuverlässige Ergebnisse hinsichtlich der Anwendbarkeit und der verschiedenen Möglichkeiten zu gewinnen.

Die in dieser Arbeit gewonnenen Erkenntnisse beweisen, dass die Daten des SMAP-Satelliten allein oder in Kombination mit Sentinel nicht ausreichen, um Vorhersagen über Hochwasserereignisse in Deutschland zu treffen, sie aber beim vorbeugenden Hochwasserschutz unterstützend wirken können und dabei helfen, bereits geschehene Ereignisse besser verstehen zu können.

Literaturverzeichnis

- Baumgarten, Corinna/Christiansen, Eike/Naumann, Stephan/Penn-Bressel, Gertrude/Rechenberg, Jörg/Walter, Anne-Barbara (2011). Hochwasser-verstehen, erkennen, handeln! Online verfügbar unter https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/378/publikationen/uba_hochwasser_barrierefrei_new.pdf (abgerufen am 13.12.2022).
- Beyer, Ralf (2016). Starkregen und Sturzfluten. Landsberg, ecomed Sicherheit.
- Brodzik, Mary J./Billingsley, Brendan/Haran, Terry/Raup, Bruce/Savoie, Matthew H. (2012). EASE-Grid 2.0: Incremental but Significant Improvements for Earth-Gridded Data Sets. *ISPRS International Journal of Geo-Information* 1 (1), 32–45. <https://doi.org/10.3390/ijgi1010032>.
- Brodzik, Mary/Billingsley, Brendan/Haran, Terry/Raup, Bruce/Savoie, Matthew (2014). Correction: Brodzik, M.J., et al. EASE-Grid 2.0: Incremental but Significant Improvements for Earth-Gridded Data Sets. *ISPRS International Journal of Geo-Information* 2012, 1, 32–45. *ISPRS International Journal of Geo-Information* 3 (3), 1154–1156. <https://doi.org/10.3390/ijgi3031154>.
- Brown, William M. (1967). Synthetic Aperture Radar. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems* AES-3 (2), 217–229. <https://doi.org/10.1109/TAES.1967.5408745>.
- Büchs, Wolfgang/Boecker, M./Cölln, K./Düll, R./Fisang, R./Froehlich, C./Fuchs, H./Gellert, G./Groh, K./Ladda, F./Meyer, W./Risch, S./Rütten, M./Schmitz, O./Schmitz, W./Sorg, M./Tschirnhaus, M. von/Wirth, V./Wollmann, K./zur Strassen, R. (1993). Das Naturschutzgebiet "Ahrschleife bei Altenahr". (einschliesslich angrenzender schutzwürdiger Bereiche) ; Fauna, Flora, Geologie und Landespflegeaspekte. Landesamt für Umweltschutz und Gewerbeaufsicht Rheinland-Pfalz.
- Bundesnetzagentur (Hrsg.) (2022). FREQUENZPLAN. gemäß § 54 TKG über die Aufteilung des Frequenzbereichs von 0 kHz bis 3000 GHz auf die Frequenznutzungen sowie über die Festlegungen für diese Frequenznutzungen. Online verfügbar unter https://www.bundesnetzagentur.de/SharedDocs/Downloads/DE/Sachgebiete/Telekommunikation/Unternehmen_Institutionen/Frequenzen/20210114_Frequenzplan.pdf?__blob=publicationFile&v=3 (abgerufen am 25.06.2023).
- Cassidy, Emily (2020). What is Data Latency? Earth Science Data Systems,NASA vom 26.08.2020. Online verfügbar unter <https://www.earthdata.nasa.gov/learn/backgrounders/data-latency> (abgerufen am 24.06.2023).

Colliander, Andreas/Reichle, Rolf H./Crow, Wade T./Cosh, Michael H./Chen, Fan/Chan, Steven/Das, Narendra Narayan/Bindlish, Rajat/Chaubell, Julian/Kim, Seungbum/Liu, Qing/O'Neill, Peggy E./Dunbar, R. Scott/Dang, Land B./Kimball, John S./Jackson, Thomas J./Al-Jassar, Hala Khalid/Asanuma, Jun/Bhattacharya, Bimal K./Berg, Aaron A./Bosch, David D./Bourgeau-Chavez, Laura/Caldwell, Todd/Calvet, Jean-Christophe/Collins, Chandra Holifield/Jensen, Karsten H./Livingston, Stan/Lopez-Baeza, Ernesto/Martinez-Fernandez, Jose/McNairn, Heather/Moghaddam, Mahta/Montzka, Carsten/Notarnicola, Claudia/Pellarin, Thierry/Greimeister-Pfeil, Isabella/Pullianen, Jouni/Ramos, Judith Gpe./Seyfried, Mark/Starks, Patrick J./Su, Zhongbo/van der Velde, R./Zeng, Yijian/Thibeault, Marc/Vreugdenhil, Mariette/Walker, Jeffrey P./Zribi, Mehrez/Entekhabi, Dara/Yueh, Simon H. (2022). Validation of Soil Moisture Data Products From the NASA SMAP Mission. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing* 15, 364–392. <https://doi.org/10.1109/JSTARS.2021.3124743>.

Copernicus (2021). Hochwasser: Satellitendaten helfen bei der Aufklärung der gegenwärtigen Katastrophenlagen. Online verfügbar unter https://www.d-copernicus.de/infothek/news/news-details/news/hochwasser-satellitendaten-helfen-bei-der-aufklaerung-der-gegenwaertigen-katastrophenlagen/?tx_news_pi1%5Bcontroller%5D=News&tx_news_pi1%5Baction%5D=detail&cHash=a638b66fed97276b746d3c56fe354c4c (abgerufen am 27.05.2023).

Copernicus (2023). Katastrophen- und Krisenmanagement | Copernicus. Online verfügbar unter <https://www.copernicus.eu/de/dienste/katastrophen-und-krisenmanagement> (abgerufen am 27.05.2023).

Copernicus (2023b). Über Copernicus | Copernicus. Online verfügbar unter <https://www.copernicus.eu/de/ueber-copernicus> (abgerufen am 27.05.2023).

Cosmos-indirekt (2023). Sonnensynchrone Umlaufbahn – Physik-Schule. Online verfügbar unter https://www.cosmos-indirekt.de/Physik-Schule/Sonnensynchrone_Umlaufbahn (abgerufen am 07.02.2023).

Da Cunha Luz Barcellos, Priscila/Cataldi, Marcio (2020). Flash Flood and Extreme Rainfall Forecast through One-Way Coupling of WRF-SMAP Models: Natural Hazards in Rio de Janeiro State. *Atmosphere* 11 (8), 834. <https://doi.org/10.3390/atmos11080834>.

Das, Narendra N./Dara Entekhabi/Scott Dunbar/Andreas Colliander/Mario Chaubell/Simon Yueh/Thomas Jagdhuber/Peggy E. O'Neill/Wade Crow, Fan Chen (2019a). AI-

gorithm Theoretical Basis Document. SMAP-Sentinel L2 Radar/Radiometer (Active/Passive) Soil Moisture Data Products. JPL D-104870. NASA Goddard Space Flight Center, Greenbelt, Jet Propulsion Laboratory.

Das, Narendra N./Entekhabi, Dara/Dunbar, R. Scott/Chaubell, Mario J./Colliander, Andreas/Yueh, Simon/Jagdhuber, Thomas/Chen, Fan/Crow, Wade/O'Neill, Peggy E./Walker, Jeffrey P./Berg, Aaron/Bosch, David D./Caldwell, Todd/Cosh, Michael H./Collins, Chandra H./Lopez-Baeza, Ernesto/Thibeault, Marc (2019b). The SMAP and Copernicus Sentinel 1A/B microwave active-passive high resolution surface soil moisture product. *Remote Sensing of Environment* 233, 111380.

<https://doi.org/10.1016/j.rse.2019.111380>.

Das, Narendra N./Entekhabi, Dara/Dunbar, R. Scott/Kim, Seung-bum/Yueh, Simon/Colliander, Andreas/O'Neill, Peggy E./Jackson, Tom/Jagdhuber, Thomas/Chen, Fan/Crow, Wade/Walker, Jeffrey P./Berg, Aaron/Bosch, David D./Caldwell, Todd/Cosh, Michael H. (2020). SMAP/Sentinel-1 L2 Radiometer/Radar 30-Second Scene 3 km EASE-Grid Soil Moisture, Version 3.

<https://doi.org/10.5067/ASB0EQO2LYJV>.

Das, Narendra N./Entekhabi, Dara/Kim, Seungbum/Yueh, Simon/Dunbar, Scott/Colliander, Andreas (2017). SMAP/Sentinel-1 L2 Radiometer/Radar 30-Second Scene 3 km EASE-Grid Soil Moisture, Version 1. <https://doi.org/10.5067/9UWR1WTHW1WN>.

Das, Narendra Narayan/Entekhabi, Dara/Njoku, Eni G./Shi, Jiancheng J. C./Johnson, Joel T./Colliander, Andreas (2014). Tests of the SMAP Combined Radar and Radiometer Algorithm Using Airborne Field Campaign Observations and Simulated Data. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* 52 (4), 2018–2028.

<https://doi.org/10.1109/TGRS.2013.2257605>.

Derksen, Chris/Xu, Xiaolan/Scott Dunbar, R./Colliander, Andreas/Kim, Youngwook/Kimball, John S./Black, T. Andrew/Euskirchen, Eugenie/Langlois, Alexandre/Loranty, Michael M./Marsh, Philip/Rautiainen, Kimmo/Roy, Alexandre/Royer, Alain/Stephens, Jilmarie (2017). Retrieving landscape freeze/thaw state from Soil Moisture Active Passive (SMAP) radar and radiometer measurements. *Remote Sensing of Environment* 194, 48–62. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2017.03.007>.

Du, Jinyang/Kimball, John S./Sheffield, Justin/Pan, Ming/Fisher, Colby K./Beck, Hylke E./Wood, Eric F. (2021). Satellite Flood Inundation Assessment and Forecast Using SMAP and Landsat. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing* 14, 6707–6715.

<https://doi.org/10.1109/JSTARS.2021.3092340>.

Entekhabi, D./Yueh, S./O'Neill, P. E./Kellogg K. H./Allen, A./Bindlish, R./Brown, M./Chan, S./Colliander, A./Crow, W. T./Das, N./Lannoy, G. de/Dunbar, R. S./Edelstein, W. N./Entin, J. K./Escobar V./Goodman, S. D./Jackson, T. J./Jai, B./Johnson, J./Kim, E./Kim, S./Kimball, J./Koster, R. D./Leon, A./McDonald, K. C./Moghaddam, M./Mohammed, P./Moran, S./Njoku, E. G./Piepmeier, J. R./Reichle, R./Rogez, F./Shi, J. C./Spencer, M. W./Thurman, S. W./Tsang, L./van Zyl, J./Weiss, B./West, R. (2014). SMAP Handbook – Soil Moisture Active Passive. Mapping Soil Moisture and Freeze/Thaw from Space.

ESA (2002a). Fliegende Katastrophenhelfer. Online verfügbar unter https://www.esa.int/Space_in_Member_States/Austria/Fliegende_Katastrophenhelfer (abgerufen am 27.05.2023).

ESA (2002b). Hochwasserhilfe aus dem All. Online verfügbar unter https://www.esa.int/Space_in_Member_States/Austria/Hochwasserhilfe_aus_dem_All (abgerufen am 27.05.2023).

EUMETSAT (2022). Europäische Meteorologie bereitet neues Satellitenzeitalter vor. Über 200 Expertinnen und Experten aus Meteorologie und Klimaforschung versammeln sich ab heute im hessischen Darmstadt, um den Aufbruch in ein neues Zeitalter der Satellitenmeteorologie in Europa einzuläuten. vom 2022. Online verfügbar unter <https://www.eumetsat.int/de/europaeische-meteorologie-bereitet-neues-satellitenzeitalter-vor> (abgerufen am 27.05.2023).

Fiedler, Hans Joachim (2001). Böden und Bodenfunktionen in Ökosystemen, Landschaften und Ballungsgebieten. 78 Tabellen. Renningen-Malmsheim, expertverlag.

Flachsland, Christian/Levi, Sebastian (2021). Das deutsche Klimaschutzgesetz: Möglichkeiten einer sektorübergreifenden Klimagovernance. Online verfügbar unter https://ariadneprojekt.de/media/2021/11/Ariadne-Hintergrund_Klimaschutzgesetz_November2021.pdf (abgerufen am 07.12.2022).

Fohrer, Nicola/Bormann, Helge/Miegel, Konrad/Casper, Markus/Bronstert, Axel/Schumann, Andreas H./Weiler, Markus (Hg.) (2016). Hydrologie. Bern/Stuttgart, Haupt Verlag; UTB GmbH.

Fuchs, Hannah (2022). Wettervorhersage: Wie Satelliten bei der Prognose helfen | DW | 27.05.2022. Deutsche Welle (www.dw.com). Online verfügbar unter <https://www.dw.com/de/wettervorhersage-wie-satelliten-bei-der-prognose-helfen/a-61913020> (abgerufen am 27.05.2023).

GDI-RP (2019). Luftbild des Hochwassereinzugsgebiet. Zentrale Stelle Geodateninfrastruktur Rheinland-Pfalz. Online verfügbar unter <https://mapcache.de/ahr/> (abgerufen am 27.06.2023).

- GDI-RP (2021). Luftbild des Hochwassereinzugsgebiet. Zentrale Stelle Geodateninfrastruktur Rheinland-Pfalz. Online verfügbar unter <https://mapcache.de/ahr/> (abgerufen am 27.06.2023).
- GITEWS (2007). Das Tsunami-Frühwarnsystem für den Indischen Ozean.
- Glover, Linda K./Chaikin, Andrew/Daniels, Patricia S. (2005). Die große National Geographic Enzyklopädie Weltall. Hamburg, National Geographic Deutschland (G+J/RBA).
- Gräber, Peter-Wolfgang (2005). Grundwassermesstechnik. Band 2.
- Grillakis, Manolis G. (2019). Increase in severe and extreme soil moisture droughts for Europe under climate change. *The Science of the total environment* 660, 1245–1255. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.01.001>.
- Grundgesetz für die Bundesrepublik Deutschland vom 19.12.2022.
- Hennegriff, Wolfgang/Kolokotronis, Vassilis/Weber, Hans/Bartels, Hella (2006). Klimawandel und Hochwasser. Erkenntnisse und Anpassungsstrategien beim Hochwasserschutz. Online verfügbar unter https://www.accc.at/pdf/klimawandel_hochwasser.pdf (abgerufen am 26.06.2023).
- Hupfer, Peter (1996). *Unsere Umwelt: Das Klima. Globale und lokale Aspekte*. Wiesbaden, Vieweg+Teubner Verlag.
- IPCC (2023). History — IPCC. Online verfügbar unter <https://www.ipcc.ch/about/history/> (abgerufen am 27.06.2023).
- IPCC (Hg.) (2022). *Global Warming of 1.5°C. IPCC Special Report on Impacts of Global Warming of 1.5°C above Pre-industrial Levels in Context of Strengthening Response to Climate Change, Sustainable Development, and Efforts to Eradicate Poverty*. Cambridge University Press.
- Janta, Leonhard/Poppelreuter, Helmut (2010). „...Das Elend übersteigt jeden Begriff... Ahr-Hochwasser am 12./13. Juni 1910 forderte 52 Menschenleben. Heimatjahrbuch Kreis Ahrweiler vom 2010. Online verfügbar unter <https://www.grafbruehl.com/wp-content/uploads/Flut-Ahrtal-1910.pdf> (abgerufen am 18.05.2023).
- JPL (2019). Proximate Cause of the SMAP Radar Failure. Online verfügbar unter <https://llis.nasa.gov/lesson/27701> (abgerufen am 24.05.2023).
- Junghänel, T./Bissolli, P./Daßler, J./Fleckenstein, R./Imbery, F./Janssen, W./Kaspa, F./Lengfeld, M./Rauhe-Schöch, A./Rocek, M./Walawender, E./Weigl, E. (2021). Hydro-klimatologische Einordnung der Stark- und Dauerniederschläge in Teilen Deutschlands im Zusammenhang mit dem Tiefdruckgebiet „Bernd“ vom 12. bis 19.

- Juli 2021. Online verfügbar unter https://www.dwd.de/DE/leistungen/besondereereignisse/niederschlag/20210721_bericht_starkniederschlaege_tief_bernd.pdf?__blob=publicationFile&v=6 (abgerufen am 26.06.2023).
- Kommission Bodenschutz beim Umweltbundesamt (2016). Böden als Wasserspeicher. Erhöhung und Sicherung der Infiltrationsleistung von Böden als ein Beitrag des Bodenschutzes zum vorbeugenden Hochwasserschutz.
- Kreienkamp, Frank/et al. (2021). Rapid attribution of heavy rainfall events leading to the severe flooding in Western Europe during July 2021. Online verfügbar unter <https://www.worldweatherattribution.org/heavy-rainfall-which-led-to-severe-flooding-in-western-europe-made-more-likely-by-climate-change/> (abgerufen am 15.05.2023).
- Kurt Baldenhofer, Nicolas Marschall (2023). S: SAC-C bis Szene. Online verfügbar unter <https://www.fe-lexikon.info/lexikon-s.htm#schwadbrente> (abgerufen am 06.02.2023).
- Lässig, Christine (2022). Das Pariser Klimaabkommen. Ziele, Wirkungen und Reformperspektiven. Baden-Baden, Tectum Verlag.
- LVerGeo-RP (2022). Ein Jahr nach der Flut: Die Vermessungs- und Katasterverwaltung zieht Bilanz. Online verfügbar unter <https://lvermgeo.rlp.de/de/aktuelles/detail/news/News/detail/ein-jahr-nach-der-flut-die-vermessungs-und-katasterverwaltung-zieht-bilanz/> (abgerufen am 08.07.2023).
- Malcherek, Andreas (2010). Gezeiten und Wellen. Die Hydromechanik der Küstengewässer. s.l., Vieweg+Teubner (GWV).
- Mao, Hanzhi/Kathuria, Dhruva/Duffield, Nick/Mohanty, Binayak P. (2019). Gap Filling of High-Resolution Soil Moisture for SMAP/Sentinel-1: A Two-Layer Machine Learning-Based Framework. *Water Resources Research* 55 (8), 6986–7009. <https://doi.org/10.1029/2019WR024902>.
- Meyer, Thomas (2017). Ökologie Mitteleuropäischer Flussauen. Berlin, Heidelberg, Springer Berlin / Heidelberg.
- Meyer, Wilhelm (2008). Die Entstehung unserer Täler. In: Heimatjahrbuch Kreis Ahrweiler 2008.
- Midgley, G. F./Hannah, L./Millar, D./Rutherford, M. C./Powrie, L. W. (2002). Assessing the vulnerability of species richness to anthropogenic climate change in a biodiversity hotspot. *Global Ecology and Biogeography* 11 (6), 445–451. <https://doi.org/10.1046/j.1466-822X.2002.00307.x>.

- Mikhaylov, Rebecca/Dawson, Douglas/Kwack, Eug-Yun (2014). Temperature Knowledge and Model Correlation for the Soil Moisture Active and Passive (SMAP) Reflector Mesh. Pasadena, California.
- Ministerium für Klimaschutz, Umwelt, Energie und Mobilität (2022). Die Ahr. Online verfügbar unter <https://wasser.rlp-umwelt.de/servlet/is/1210/> (abgerufen am 11.12.2022).
- Ministerium für Wirtschaft, Klimaschutz, Energie und Landesplanung Rheinland-Pfalz (Hg.) (2013). Konkretisierung der landesweit bedeutsamen historischen Kulturlandschaften zur Festlegung, Begründung und Darstellung von Ausschlussflächen und Restriktionen für den Ausbau der Windenergienutzung. Historische Kulturlandschaft. Online verfügbar unter https://mwkel.rlp.de/fileadmin/mwkel/Abteilung_7/Landesplanung/Konkretisierung_der_LandKula_zur_Festlegung__Begrueundung_und_Darstellung_von_Ausschlussflaechen_und_Restriktionen_fuer_den_Ausbau_der_Windenergienutzung__Z_163_d_.pdf (abgerufen am 18.05.2023).
- Mohseni, Farzane/Mirmazloumi, S. Mohammad/Mokhtarzade, Mehdi/Jamali, Sa-degh/Homayouni, Saeid (2022). Global Evaluation of SMAP/Sentinel-1 Soil Moisture Products. Remote Sensing 14 (18), 4624. <https://doi.org/10.3390/rs14184624>.
- NASA (2023a). Data Products | Data – SMAP. Online verfügbar unter <https://smap.jpl.nasa.gov/data/> (abgerufen am 06.06.2023).
- NASA (2023b). Description | Mission – SMAP. Online verfügbar unter <https://smap.jpl.nasa.gov/mission/description/> (abgerufen am 18.01.2023).
- NASA (2023c). Instrument | Observatory – SMAP. Online verfügbar unter <https://smap.jpl.nasa.gov/observatory/instrument/> (abgerufen am 04.07.2023).
- NASA (2023d). SMAP Antenna Beam Footprint : SMAP. Online verfügbar unter <https://smap.jpl.nasa.gov/resources/61/smap-antenna-beam-footprint/> (abgerufen am 06.02.2023).
- NASA (2023e). SMAP Large Antenna : SMAP. Online verfügbar unter <https://smap.jpl.nasa.gov/resources/38/smap-large-antenna/> (abgerufen am 27.01.2023).
- NASA (2023f). Specifications | Observatory – SMAP. Online verfügbar unter <https://smap.jpl.nasa.gov/observatory/specifications/> (abgerufen am 21.01.2023).
- NASA (2023g). Why It Matters | Mission – SMAP. Online verfügbar unter <https://smap.jpl.nasa.gov/mission/why-it-matters/> (abgerufen am 18.01.2023).
- Neukirchen, Florian (2019). Die Folgen des Klimawandels. Berlin, Heidelberg, Springer Berlin / Heidelberg.

- NSIDC (2023). A Guide to EASE Grids. Online verfügbar unter <https://nsidc.org/data/user-resources/help-center/guide-ease-grids> (abgerufen am 09.06.2023).
- NSIDC (2023). SMAP L4 Global 3-hourly 9 km EASE-Grid Surface and Root Zone Soil Moisture Analysis Update, Version 7. Overview. Online verfügbar unter <https://nsidc.org/data/spl4smau/versions/7> (abgerufen am 08.06.2023).
- NSIDC (2023). SMAP/Sentinel-1 L2 Radiometer/Radar 30-Second Scene 3 km EASE-Grid Soil Moisture, Version 3. Online verfügbar unter https://nsidc.org/data/spl2smap_s/versions/3 (abgerufen am 07.06.2023).
- NSIDC (2023). What are the latencies for SMAP radiometer data sets? Online verfügbar unter <https://nsidc.org/data/user-resources/help-center/what-are-latencies-smap-radiometer-data-sets> (abgerufen am 23.06.2023).
- Patt, Heinz/Jüpner, Robert (Hg.) (2020). Hochwasser-Handbuch. Auswirkungen und Schutz. 3. Aufl. Wiesbaden/Heidelberg, Springer Vieweg.
- Reichle, R. H./Lucchesi, R. A./Ardizzone, J. V./Kim, G.-K./Smith, E. B./Weiss, B. H. (2022). Soil Moisture Active Passive (SMAP) Mission Level 4 Surface and Root Zone Soil Moisture (L4_SM) Product Specification Document. GMAO Office Note No. 10 (Version 1.6). NASA Goddard Space Flight Center, Greenbelt.
- Ribbert, Karl-Heinz (2010). Nordeifel. Krefeld, Geologischer Dienst NRW.
- Rischer, Roland (2023). SMAP erfolgreich auf Delta II gestartet – Raumfahrer.net. Online verfügbar unter <https://www.raumfahrer.net/smap-erfolgreich-auf-delta-ii-gestartet/> (abgerufen am 18.01.2023).
- Rodriguez-Alvarez, Nereida/Misra, Sidharth/Podest, Erika/Morris, Mary/Bosch-Lluis, Xavier (2019). The Use of SMAP-Reflectometry in Science Applications: Calibration and Capabilities. Remote Sensing 11 (20), 2442.
<https://doi.org/10.3390/rs11202442>.
- Römer, Thomas (2017). Eifel - Deutsche Mittelgebirge. Online verfügbar unter <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=58496282> (abgerufen am 17.12.2022).
- Rothe, Matthias (2022). Hochwasser – wie sie entstehen und wie der Mensch sie beeinflusst. Online verfügbar unter <https://www.umweltbundesamt.de/themen/wasser/extremereignisse/hochwasser#hochwasser-sind-natuerliche-ereignisse> (abgerufen am 17.12.2022).
- Rudolf, Bruno/Simmer, Clemens. Niederschlag, Starkregen und Hochwasser.

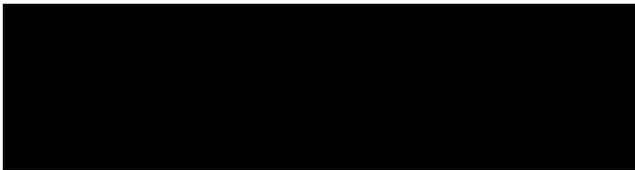
- Rummel, Reiner (Hg.) (2017). Erdmessung und Satellitengeodäsie. Handbuch der Geodäsie, herausgegeben von Willi Freeden und Reiner Rummel. Berlin, Heidelberg, Springer Berlin Heidelberg.
- Schädel, W./Becker, R./Ihringer, Jürgen (2006). Entwicklung eines Verfahrens zur Hochwasserfrühwarnung in kleineren und mittleren Einzugsgebieten auf der Grundlage von verteilten Online-Bodenfeuchtemessungen. Online verfügbar unter <https://pudi.lubw.de/detailseite/-/publication/33682> (abgerufen am 22.06.2023).
- Schäfer, Andreas/Mühr, Bernhard/Daniell, James/Ehret, Uwe/Ehmele, Florian/Küpfer, Katharina/Brand, Johannes/Wisotzky, Christina/Skapski, Jens/Rentz, Lukas/Mohr, Susanna/Kunz, Michael (2021). Hochwasser Mitteleuropa, Juli 2021 (Deutschland) : 21. Juli 2021 – Bericht Nr. 1 „Nordrhein-Westfalen & Rheinland-Pfalz“. <https://doi.org/10.5445/IR/1000135730>.
- Schönthaler et al. (2017). Welchen Beitrag können Satellitenfernerkundung und insbesondere Copernicus-Daten und – Dienste für die Ermittlung ausgewählter Indikatoren des Indikatoren-Sets der Deutschen Anpassungs- strategie an den Klimawandel (DAS) leisten. Online verfügbar unter https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1410/publikationen/2017-02-23_climate-change_07-2017_copernicus.pdf (abgerufen am 27.02.2023).
- Schönwiese, Christian (1995). Klimaänderungen. Daten, Analysen, Prognosen. Berlin, Heidelberg, Springer Berlin Heidelberg; Imprint Springer.
- Spektrum (2022). Karbon. Online verfügbar unter <https://www.spektrum.de/lexikon/geowissenschaften/karbon/8079> (abgerufen am 11.12.2022).
- Stahr, Karl/Kandeler, Ellen/Herrmann, Ludger/Streck, Thilo (2020). Bodenkunde und Standortlehre. 4. Aufl. Stuttgart, Verlag Eugen Ulmer.
- Symbios (2023). THE CEOS DATABASE : INSTRUMENT SUMMARY - L-band Radar (SMAP). Online verfügbar unter <http://database.eohandbook.com/database/instrumentssummary.aspx?instrumentID=986> (abgerufen am 21.01.2023).
- Wienecke-Janz, Detlef (Hg.) (2008). Die große Chronik-Weltgeschichte. Von den Anfängen bis zur Gegenwart. Erscheinungsort nicht ermittelbar.
- Wolff, Christian (2023). Polarisation von Antennen - Radar Basics. Online verfügbar unter <https://www.radartutorial.eu/06.antennas/Polarisation.de.html> (abgerufen am 26.06.2023).
- Zwatz-Meise, Veronika (2013). Satellitenmeteorologie. Satelliten Beobachten das Wetter. Berlin, Heidelberg, Springer Berlin / Heidelberg.

Eidesstattliche Erklärung

Hiermit erkläre ich, dass ich die vorliegende Arbeit eigenständig und ohne fremde Hilfe angefertigt habe. Textpassagen, die wörtlich oder dem Sinn nach auf Publikationen oder Vorträgen anderer Autoren beruhen, sind als solche kenntlich gemacht. Die Arbeit wurde bisher keiner anderen Prüfungsbehörde vorgelegt und auch noch nicht veröffentlicht.

Hamburg, den 11.07.2023

Marvin Gronschölski



Name (Unterschrift)