

Bachelorarbeit

Validierung tropischer Satelliten-Niederschlagsdaten mittels Schiffsbeobachtungen

Maximilian Ringel

maximilian.ringel@studium.uni-hamburg.de

Studiengang: B.Sc. Meteorologie

Matr.-Nr.: 7072876

Erstgutachter: Prof. Dr. Stefan Bühler

Zweitgutachter: Dr. Manfred Brath

Abgabe: 01.2020

Bachelorarbeit im Fachbereich Erdsystemwissenschaften der Universität Hamburg.
Thema der Arbeit: *Validierung globaler Satelliten-Niederschlagsdaten mittels Schiffsbeobachtungen*

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
2	Daten	3
2.1	Satelliten-Messungen: GPM-IMERG	3
2.2	Schiffsbeobachtungen: OceanRAIN	5
2.3	Modelldaten: GEM	6
3	Kollokation von GPM-IMERG und OceanRAIN	7
3.1	Repräsentativitäts-Fehler	7
3.2	Kollokations Algorithmus	8
3.3	Statistiken der Kollokation	10
4	Einfluss der raum-zeitlichen Auflösung auf Niederschlagsmessungen	15
4.1	Einfluss der räumlichen Auflösung	15
4.2	Einfluss der zeitlichen Auflösung	16
5	Vergleich der Niederschlagsbilanzen	17
5.1	Häufigkeitsverteilungen der Niederschlagsraten	17
5.2	Niederschlagsmengen und mittlere Niederschlagsraten	20
5.2.1	Vergleich zu anderen Satelliten-Niederschlagsmessungen	23
5.2.2	Modellierter Niederschlag mit variabler räumlicher Auflösung	24
5.2.3	Konvektiver und stratiformer Niederschlag	26
6	Zusammenfassung und Ausblick	29
	Literatur	31

Abbildungsverzeichnis

2.1	GPM Satelliten Konstellation.	4
3.1	Ablauf-Schema des Kollokations-Algorithmus.	10
3.2	Die Routen der OceanRAIN Schiffe mit den entsprechenden GPM-IMERG Kollokationen.	11
5.1	Wahrscheinlichkeitsdichteverteilungen der kollokierten Niederschlagsraten. 19	
5.2	Kreisdiagramme der Frequenz-Anteile der leichten, mäßigen und hohen Niederschlagsraten.	19
5.3	Niederschlagsmengen in Abhängigkeit der Niederschlagsraten	22
5.4	Kreisdiagramme der Mengen-Anteile der leichten, mäßigen und hohen Niederschlagsraten an der Gesamt-Niederschlagsmenge.	23
5.5	Kreisdiagramme der Frequenz- und Mengen-Anteile der von GEM simulierten Niederschlagsraten, bei verschiedenen räumlichen Auflösungen. .	25
5.6	Kreisdiagramme der Frequenz- und Mengen-Anteile von konvektiv, stratiform und nicht klassifiziertem Niederschlag.	26
5.7	Zonal gemittelte Niederschlagsraten.	28

Tabellenverzeichnis

3.1	Übersicht der einzelnen Kollokationen von GPM-IMERG und den Ocean-RAIN Schiffen.	12
3.2	Trefferquoten und Maßzahlen aller Kollokationen.	13
5.1	Gesamt-Niederschlagsmengen und mittlere Niederschlagsraten	21
5.2	Niederschlagsmengen und mittlere Niederschlagsraten für konvektiven, stratiformen und nicht kategorisierten Niederschlag.	27

1 Einleitung

Niederschlag ist in vielen Bereichen des Erdsystems ein entscheidender Parameter. Als Quelle von Süßwasser ist Niederschlag für alle Lebensformen auf dem Planeten Erde unabdingbar. Zugleich stellt Niederschlag einen Hauptbestandteil des globalen hydrologischen sowie energetischen Kreislaufs der Erde dar. Dies macht Niederschlag zu einer der essenziellen Klimavariablen, den sogenannten „Essential Climate Variables“ (ECV). Um Niederschlag als Bestandteil globaler Kreisläufe quantifizieren zu können, sind Niederschlagsmessungen auf einer globalen Skala notwendig. Allerdings steht nur über Land eine ausreichend hohe Dichte an bodengestützten Niederschlags-Messinstrumenten, wie z.B. Niederschlagssammler oder -radare, zur Verfügung. Auf den Ozean-Oberflächen, die ca. 75% der Erdoberfläche ausmachen, gibt es hingegen nur sehr begrenzte Möglichkeiten solche bodengestützten Niederschlagsmessungen durchzuführen. Daher sind globale Niederschlagsmessungen nur mithilfe von Satelliten-Messungen aus dem Weltall möglich. Einzelne Satelliten-Niederschlagsmessungen können aber noch keine global abdeckenden Messungen bieten. Um globale Niederschlagsmessungen zu ermöglichen, werden daher Kombinationen von Niederschlagsmessungen mehrerer Satelliten verwendet.

Die sogenannte „Global Precipitation Measurement (GPM) Mission“ (Skofronick-Jackson et al., 2017) ist die aktuellste Satelliten-Mission, die das Ziel der globalen Niederschlagsmessung, mittels einer Konstellation verschiedener Satelliten verfolgt. Die kombinierten Niederschlagsmessungen all dieser Satelliten werden mit dem sogenannten „Integrated Multi-satellite Retrievals for GPM (IMERG)“ Datensatz zur Verfügung gestellt (G. Huffman et al., 2015). Da solche Messungen oft die einzigen Informationsquellen für Niederschlag über Ozean-Gebieten sind, ist es von großem Interesse deren Messgenauigkeit, gerade über Ozeanen, zu bestimmen bzw. zu validieren. Über den Ozeanen fällt etwa das 2,5-fache Niederschlagsvolumen wie über Land (Adler et al., 2017), wodurch dort unbekannte Messfehler schnell zu falschen Beurteilungen des hydrologischen Kreislaufs führen können.

In dieser Arbeit sollen daher die GPM-IMERG Niederschlagsmessungen über tropischen Ozean-Oberflächen im Bereich von 30° Süd bis 30° Nord validiert werden. Als Referenz-Niederschlagsmessungen werden dafür Schiffsbeobachtungen des „Ocean Rainfall And Ice-phase precipitation measurement Network (OceanRAIN)“ (Klepp et al., 2018) verwendet. Warum gerade diese Schiffsbeobachtungen als Referenz-Niederschlagsmessungen für die Validierung verwendet werden, wird in Kapitel 2.2 begründet.

Der GPM-IMERG Datensatz wurde bereits in einer Vielzahl an Studien in verschiedenen

geografischen Regionen sowie anhand verschiedener Referenzmessungen validiert (z.B. Petersen et al., 2020, Dezfuli et al., 2017, Manz et al., 2017, Maghsood et al., 2020, Xu et al., 2017). Khan und Maggioni (2019) nutzten bei deren GPM-IMERG Validierung u.a. ebenfalls OceanRAIN Daten als Referenzmessungen. Bei deren Untersuchung wurde jedoch noch eine ältere Version des IMERG Datensatzes (Version V05) verwendet. Zudem lag deren Fokus hauptsächlich auf der Untersuchung inwiefern die Messgenauigkeit von GPM-IMERG von der räumlichen Auflösung abhängt.

In dieser Arbeit sollen mittels einer raum-zeitlichen Kollokation die gemessenen Niederschlagsbilanzen von GPM-IMERG und OceanRAIN miteinander verglichen werden. Bei diesem Vergleich liegt der Fokus vor allem auf der mittleren Niederschlagsrate, da diese eine besonders wichtige Kenngröße für den hydrologischen und energetischen Kreislauf darstellt. Verknüpft man die mittlere Niederschlagsrate mit der Verdampfungsenthalpie von Wasser, so wird die Beziehung zwischen diesen beiden Kreisläufen der Atmosphäre deutlich. Durch die Freisetzung latenter Wärme bei der Niederschlagsbildung wirkt der globale Niederschlag (hydrologischer Kreislauf) der Abkühlung der Atmosphäre - verursacht durch langwellige Ausstrahlung - entgegen (DeAngelis et al., 2015) (energetischer Kreislauf). In einer tiefergehenden Analyse werden die mittleren Niederschlagsraten beider Niederschlagsmessungen für konvektiven und stratiformen Niederschlag berechnet und miteinander verglichen. Eventuelle Diskrepanzen zwischen den beiden gemessenen Niederschlagsbilanzen sollen genauer analysiert und hinsichtlich möglicher Ursachen diskutiert werden. Dabei werden stets die unterschiedlichen zeitlichen und räumlichen Auflösungen der beiden Messung beachtet.

2 Daten

2.1 Satelliten-Messungen: GPM-IMERG

Die GPM Mission stellt mit der neuesten Version (V06B) des IMERG Datensatzes einen globalen Satelliten-Niederschlagsdatensatz mit einer zeitlich sowie räumlich vergleichsweise hohen Auflösung zur Verfügung (Skofronick-Jackson et al., 2017). Aufgrund der Komplexität der GPM Mission und des IMERG Algorithmus werden in diesem Abschnitt nur, die für diese Arbeit relevanten, Eigenschaften bzw. Schritte erläutert. Für detailliertere Informationen zu der allgemeinen GPM Mission wird auf Skofronick-Jackson et al. (2017) verwiesen. Genauere Informationen zum IMERG Algorithmus und der Kombination der verschiedenen Niederschlagsmessungen können unter G. Huffman et al. (2015) nachgeschlagen werden. Dort werden die GPM-IMERG Niederschlagsmessungen aufgrund der Kombination unterschiedlicher Niederschlagsmessungen und anschließender Kalibration als „Niederschlagsschätzungen“ bezeichnet. Um in dieser Arbeit möglichst konsistent zu bleiben, wird dennoch der Begriff „Niederschlagsmessungen“ verwendet.

Die für diesen Abschnitt verwendeten Informationen stammen von Skofronick-Jackson et al. (2017). Niederschlagsmessungen von GPM-IMERG entstammen einer Konstellation mehrerer Satelliten. Diese setzt sich neben dem zentralen Satelliten der Mission, dem sogenannten „GPM Core Observatory“ (GPM-CO), aus verschiedenen „Partnersatelliten“ eigenständiger, nationaler und internationaler Missionen zusammen (Abb. 2.1). Die Partnersatelliten sind zum größten Teil polarumlaufende Satelliten, jedoch sind auch geostationäre Satelliten Teil der Konstellation. Während die polarumlaufenden Satelliten der Konstellation Niederschlag mittels passiver Mikrowellen-Sensoren messen, nutzen die geostationären Satelliten dafür passive Infrarot-Sensoren. Aufgrund der unterschiedlichen Missions-Zeiträume der einzelnen Partnersatelliten ändert sich die Konstellation im Laufe der Zeit immer wieder. Das GPM-CO ist seit Anfang 2014 in Betrieb und ist für die Niederschlagsmessung mit einem passiven Mikrowellen-Sensor sowie einem aktiven Niederschlagsradar ausgestattet, welches Niederschlag auf zwei unterschiedlichen Frequenzen misst.

Für den folgenden Abschnitt werden die Informationen von G. Huffman et al. (2015) verwendet. Die Niederschlagsmessungen der beiden GPM-CO Instrumente werden dazu genutzt die Mikrowellen-Niederschlagsmessungen der verschiedenen polarumlaufenden Partnersatelliten aufeinander abzustimmen, bevor diese kombiniert werden. Mithilfe der geostationären Infrarot-Niederschlagsmessungen werden verbleibende größere

Messlücken zwischen den Schwaden der polarumlaufenden Satelliten gefüllt. Kleinere Messlücken werden durch eine raum-zeitliche Interpolation der Mikrowellen-Niederschlagsmessungen gefüllt. Durch diesen aufwendigen, mehrschrittigen Algorithmus bietet GPM-IMERG einen Satelliten-Niederschlagsdatensatz mit einer globalen Abdeckung, auf einem regulären $0,1^\circ \times 0,1^\circ$ Gitter (entspricht in etwa $10 \text{ km} \times 10 \text{ km}$, also 100 km^2), mit einer zeitlichen Auflösung von maximal 30 Minuten. Laut G. Huffman et al. (2015) erfasst der IMERG Algorithmus Niederschlagsraten ab ca. $0,2 \text{ mm h}^{-1}$, was eine deutliche Verbesserung gegenüber älteren Satelliten-Niederschlagsmessungen ist.

Der GPM-IMERG Datensatz ist in den drei Versionen „*Early Run*“, „*Late Run*“ und „*Final Run*“ verfügbar. Die *Early Run*- und *Late Run*-Versionen sind nahezu in „Echtzeit“, also wenige Stunden nach dem Zeitpunkt der Messung, verfügbar. Der *Final Run* ist ca. 3,5 Monate nach der Messung verfügbar. In dieser Zeit werden die kombinierten Satelliten-Niederschlagsmessungen mittels in-situ Niederschlagsmessungen von Regensammlern auf Land, sowie klimatologischen Anpassungen weiter verbessert bzw. kalibriert. Jede dieser drei Versionen wird in drei verschiedenen zeitlichen Auflösungen (monatlich, täglich, halbstündlich) zur Verfügung gestellt. In dieser Arbeit werden die kombinierten und nachträglich kalibrierten Niederschlagsmessungen mit dem Variablennamen `precipcal` des *Final Runs* mit der höchsten zeitlichen Auflösung von 30 Minuten verwendet (G. Huffman et al., 2019). Des Weiteren ist zu erwähnen, dass für diese Arbeit die GPM-IMERG Daten erst ab dem Jahr 2014 genutzt werden, auch wenn GPM-IMERG in der aktuellsten Version, durch Ergänzung von Daten von Vorgänger-Missionen, bis in das Jahr 2000 zurückreicht. In dieser Arbeit werden also nur GPM-IMERG Daten validiert, bei denen auch bereits das GPM-CO in Betrieb war.

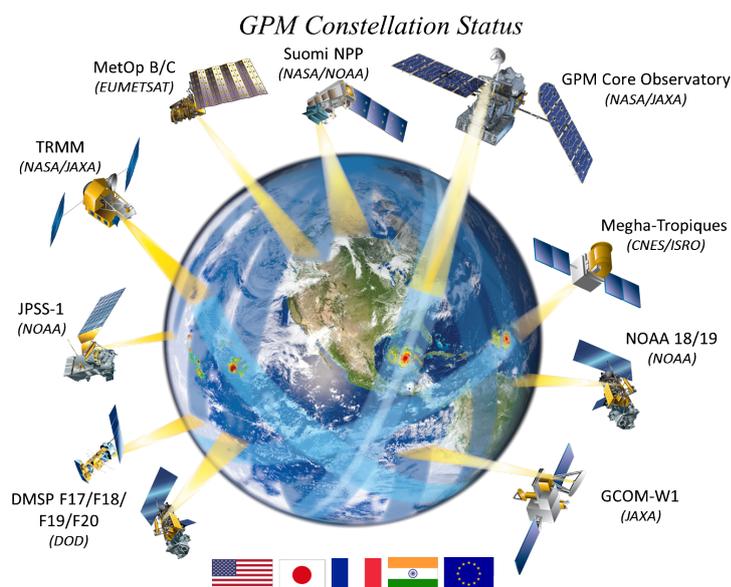


Abbildung 2.1: Schematische Darstellung der GPM Satelliten-Konstellation, mit verschiedenen Partnersatelliten sowie dem GPM Core Observatory (oben rechts).

Quelle: NASA, 2014; Frei zur Verwendung für Bildungszwecke.

2.2 Schiffsbeobachtungen: OceanRAIN

Sofern nicht ausdrücklich anders erwähnt, stammen die Informationen für dieses Kapitel von Klepp et al., 2018. Die Aussagekraft einer Validierung satellitengestützter Niederschlagsmessungen wird maßgeblich durch die Wahl des Referenzdatensatzes bzw. der Referenzmessungen beeinflusst. Die Referenzmessungen sind zum einen ebenfalls von verschiedenen Messfehlern beeinflusst, zum anderen unterscheiden sich diese oftmals in der räumlichen sowie zeitlichen Auflösung von den Satelliten-Messungen. Gerade über den Ozeanen ist es meist besonders schwer, geeignete bodengestützte Niederschlags-Referenzmessungen für satellitengestützte Niederschlagsmessungen zu finden. Neben der in Kapitel 1 erwähnten geringen räumlichen Dichte von geeigneten Niederschlags-Messgeräten auf den Ozeanen im Vergleich zu Landgebieten, treten bei den dort vorhandenen Messungen zusätzliche Fehlerquellen auf. Die meisten zeitlich kontinuierlichen Niederschlagsmessungen über den Ozeanoberflächen werden von Mess-Plattformen wie dauerhaft installierten Messbojen sowie kommerziellen Containerschiffen und zivilen Kreuzfahrtschiffen durchgeführt. Niederschlagsmessungen von diesen Mess-Plattformen haben jedoch zum einen den Nachteil, dass die Messgeräte nur selten und unregelmäßig gewartet werden, zum anderen die Schiffe meist Schlechtwetter-Gebiete (d.h. Gebiete mit sehr hohen Niederschlagsraten) bewusst umfahren. Letzteres wird im Englischen oft als „fair weather bias“ bezeichnet.

Diese schlechten Bedingungen für Niederschlags-Referenzmessungen über den Ozeanen bildet die Motivation für das OceanRAIN Projekt. OceanRAIN verfolgt das Ziel Niederschlagsmessungen nach wissenschaftlichem Standard über den globalen Ozeanen als Referenzmessungen für die Validierung von Satelliten-Produkten zur Verfügung zu stellen. Dabei sollen typische Messfehler, wie die oben genannten, gezielt minimiert werden. Die Niederschlagsdaten von OceanRAIN stammen von insgesamt sieben Forschungsschiffen und einem Kreuzfahrtschiff, welche zwischen Juni 2010 und April 2017, mittels eines optischen Distrometers, Niederschlag gemessen haben. Die Verwendung von Forschungsschiffen als Mess-Plattformen bietet den Vorteil, dass sie Niederschlag auch bis in hohe Breiten messen, sowie meist einen sehr geringen *fair weather bias* aufweisen. In den insgesamt ca. 7 Jahren in denen die einzelnen Schiffe Niederschlagsmessungen für OceanRAIN durchgeführt haben, wurde somit über nahezu alle Breiten- und Längengrade, sowie in allen Jahreszeiten Niederschlag gemessen. Auf allen Schiffen wurde das speziell für Schiffsmessungen konzipierte und automatisierte optische Distrometer ODM470 verwendet. Das ODM470 kann Niederschlagsraten ab $0,01 \text{ mm h}^{-1}$, mit einer zeitlichen Auflösung von einer Minute messen. Neben den Niederschlagsmessungen wird, für die hier durchgeführte Validierung, auch der in den OceanRAIN Datensätzen enthaltene, physikalisch abgeleitete `konvektiv_stratiform_index (KSI)` verwendet. Dieser Index wurde von Thurai et al. (2010) entwickelt und von Klepp et al. (2018) zu den OceanRAIN Niederschlagsmessungen hinzugefügt. Der Index orientiert sich an der von OceanRAIN gemessenen parametrisierten Tröpfchengrößen-Verteilung und kategorisiert den

gemessenen Niederschlag, je nach den Werten der Verteilungs-Parameter, in konvektiven ($KSI = 1$) oder stratiformen ($KSI = 0$) Niederschlag, sofern möglich.

OceanRAIN bietet insgesamt drei verschiedene Datensätze (*OceanRAIN-W*, *OceanRAIN-M*, *OceanRAIN-R*) für jedes der Schiffe der OceanRAIN-Flotte an. Für diese Arbeit wurde der Datensatz OceanRAIN-W verwendet (Klepp et al., 2017), da dieser im Gegensatz zu den anderen beiden, zeitlich kontinuierliche Niederschlagsmessungen bietet, also auch Messungen mit einer Niederschlagsrate von 0 mm h^{-1} . Die hier verwendeten OceanRAIN Niederschlagsmessungen werden in dem OceanRAIN-W Datensatz als `ODM470-precipitation_rate_R` bezeichnet.

2.3 Modelldaten: GEM

Neben den OceanRAIN Referenz-Niederschlagsmessungen werden zusätzlich simulierte Niederschlagsraten eines hochauflösenden, numerischen Wettermodell's hinzugezogen. Diese ermöglichen in Kapitel 5.2.2 eine genauere Untersuchung des generellen Einflusses der räumlichen Auflösung auf Niederschlagsmessungen. Die Modelldaten stammen vom kanadischen numerischen Vorhersagemodell „Global Environmental Multiscale Model (GEM)“ (Côté et al., 1998). Der Einfachheit halber werden von diesem Modell Niederschlagsdaten verwendet, die bereits von einer anderen Studie (Brath et al., 2020) aufbereitet und genutzt wurden. Diese Daten stammen von einem rechteckigen Ausschnitt ($6.200 \text{ km} \times 200 \text{ km}$) innerhalb der innertropischen Konvergenzzone (ITCZ) westlich von Hawaii, simuliert für den 24.06.2015, 00:00 UTC. Der Ausschnitt enthält insgesamt knapp 20 Millionen Modell-Profile mit simulierten Niederschlagsraten. Auch wenn die verwendeten Modelldaten nur einen sehr kleinen geografischen Bereich in den Tropen, sowie nur einen einzelnen Zeitpunkt abdecken, reicht dies für den genannten Zweck einer qualitativen Untersuchung des Einflusses der räumlichen Auflösung auf Niederschlagsmessungen aus.

3 Kollokation von GPM-IMERG und OceanRAIN

3.1 Repräsentativitäts-Fehler

Um die Satelliten-Niederschlagsmessungen von GPM-IMERG mit den Schiffsbeobachtungen von OceanRAIN vergleichen bzw. validieren zu können, bedarf es zunächst einer zeitlich und räumlich möglichst präzisen Kollokation dieser beiden Messungen. Der Begriff Kollokation beschreibt die Suche nach den jeweils, zu den Schiffsmessungen räumlich sowie zeitlich, nächstgelegenen GPM-IMERG Messungen. Bei der Kollokation der Niederschlagsmessungen von GPM-IMERG und OceanRAIN müssen allerdings die unterschiedlichen räumlichen und zeitlichen Auflösungen beachtet werden. Die GPM-IMERG Niederschlagsmessungen sind sowohl zeitlich als auch räumlich geringer aufgelöst als die OceanRAIN Niederschlagsmessungen (Kap. 2). Dies bedeutet, dass die Niederschlagsmessungen von GPM-IMERG größere Flächen und längere Zeitintervalle (ca. 100 km², 30 Minuten) als die OceanRAIN Niederschlagsmessungen (Punktmessungen, 1 Minute) repräsentieren. Trotz einer perfekten raum-zeitlichen Kollokation, können sich die Niederschlagsmessungen dadurch deutlich voneinander unterscheiden. Dies wird allgemein als „Repräsentativitäts-Fehler“ bezeichnet (Burdanowitz, 2017). Der Unterschied in den räumlichen Auflösungen und die damit verbundenen Konsequenzen werden auch als „Punkt-zu-Fläche Problem“ bezeichnet (Burdanowitz, 2017). Wie genau die Messung von Niederschlag durch die zeitlichen und räumlichen Auflösungen der Messung beeinflusst wird, wird in Kapitel 4 tiefer gehend erklärt. Hier soll jedoch bereits betont werden, dass eine sinnvolle Kollokation eine Methodik zur Reduzierung des Repräsentativitäts-Fehlers beinhalten sollte, auch wenn dieser nicht komplett vermieden werden kann. In der Literatur werden verschiedene Lösungsansätze für dieses Problem beschrieben. Burdanowitz (2017) zeigt u.a. Ansätze wie OceanRAIN Daten statistisch an den Datensatz der Satelliten-Mission HOAPS („Hamburg Ocean Atmosphere Parameters and Fluxes from Satellite Data“) angeglichen werden können, um den Repräsentativitäts-Fehler zu reduzieren. Eine einfachere aber effiziente Methode die zeitliche und räumliche Repräsentativität von Niederschlagsmessungen zu erhöhen, ist deren zeitliche Mittelung (Bohnenstengel et al., 2011 und Burdanowitz, 2017). Die Methodik zur Reduzierung des Repräsentativitäts-Fehlers bei der hier durchgeführten Kollokation wird im Laufe des nächsten Kapitels (Kap. 3.2) beschrieben.

3.2 Kollokations Algorithmus

Der Kollokations-Algorithmus ist in der Programmiersprache Python geschrieben und kollokiert jeweils die Niederschlagsmessungen eines Schiff's (RV - aus dem Englischen für *Research-Vessel*) der OceanRAIN-Flotte mit den entsprechenden Niederschlagsmessungen der GPM-IMERG Daten. Der Algorithmus kann in drei Schritte unterteilt werden: 1) Zeitliche Kollokation (*rote Phase*) 2) Zeitliche Mittelung der Schiffsmessungen (*gelbe Phase*), 3) räumliche Kollokation (*grüne Phase*). Die Zuordnung in verschiedene Farben bzw. Phasen beruht auf der vereinfachten schematischen Darstellung des Algorithmus in Abbildung 3.1. Da die OceanRAIN Daten vom Jahr 2010 bis 2017 reichen, die von GPM-IMERG in dieser Arbeit allerdings erst ab dem Jahr 2014 verwendet werden (Kap. 2.1), beträgt die Überschneidung bzw. die Zeitspanne für Kollokationen der beiden Datensätze ca. 3 Jahre.

Rote Phase:

Nach dem Einlesen der Datensätze, erfolgt in der *roten Phase* zunächst eine zeitliche Kollokation, welche darauf abzielt die Zeiträume beider Datensätze aufeinander abzustimmen. Damit wird sichergestellt, dass nur GPM-IMERG Daten verwendet werden, die innerhalb des Mess-Zeitraums des jeweiligen Schiffes ($t_{0_{RV}} - t_{1_{RV}}$) liegen. Sobald diese erste zeitliche Kollokation abgeschlossen ist, wird mittels einer Schleife (gekennzeichnet durch den umrandeten Bereich in Abbildung 3.1) jeder GPM-IMERG Messwert dieses Mess-Zeitraums, mit den entsprechenden Schiffsmessungen kollokiert. Um sowohl zeitlich als auch räumlich eine bessere Repräsentativität (Vergleichbarkeit) der Schiffsmessungen im Vergleich mit den GPM-IMERG Messungen zu erhalten, werden jeweils - anstatt nur einer - 30 Schiffsmessungen zu einer GPM-IMERG Messung kollokiert. Aus diesen 30 Schiffsmessungen werden später Mittelwerte gebildet (siehe *gelbe Phase*). Die 30 Schiffsmessungen werden so ausgewählt, dass sie innerhalb des 30-minütigen Messzeitraums der jeweiligen GPM-IMERG Messung ($t_{0_{IMERG}} - t_{30_{IMERG}}$) liegen. Dieser 30-Minuten Zeitraum wird als „Kollokations-Zeitfenster“ bezeichnet. Bevor mit der Kollokation fortgefahren wird, erfolgen an diesem Punkt mehrere Kontroll-Abfragen. Zum einen wird überprüft ob sich das jeweilige Schiff innerhalb der 30 Minuten in einem Hafen befand, zum anderen ob bei mehr als 20% der Messungen (entspricht 6 von 30 Messungen) das Distrometer defekt war, oder Fehlmessungen vorlagen. Nur wenn keine dieser Bedingungen zutrifft geht der Algorithmus in die *gelbe Phase* über.

Gelbe Phase:

In dieser Phase der Kollokation kommt die zeitliche Mittelung der OceanRAIN Messungen ins Spiel um, wie in Kapitel 3.1 beschrieben, den Repräsentativitäts-Fehler zu reduzieren. Zusätzliche statistische Anpassungen der OceanRAIN Niederschlagsmessungen an die GPM-IMERG Niederschlagsmessungen, wie von Burdanowitz (2017) vorgeschlagen, konnten aufgrund des begrenzten Umfangs dieser Arbeit nicht entwickelt werden.

Anhand der 30 Schiffsmessungen des Kollokations-Zeitfensters wird eine zeitlich gemittelte Niederschlagsrate $\overline{RR_{RV}}$ der Schiffsmessungen berechnet. Auch wenn dies in mathematischer Hinsicht einer rein zeitlichen Mittelung der OceanRAIN Niederschlagsmessungen entspricht, ist es genau genommen eine Mischung aus zeitlicher sowie räumlicher Mittelung. Dies liegt daran, dass sich das Schiff während dieser 30 Messungen in den meisten Fällen bewegt, die Niederschlagsmessungen also von verschiedenen Orten stammen. Mittelt man über diese 30 Messungen, um die kollokierte Niederschlagsrate zu erhalten, enthält diese neben der zeitlichen auch eine räumliche Information. Für den Fall, dass sich das Schiff während der 30 Minuten nicht bewegt, entspricht die kollokierte Niederschlagsrate einer zeitlich gemittelten Punktmessung. Zeiträume in denen sich das Schiff für längere Zeit nicht bewegt, haben dadurch meist einen relativ großen Repräsentativität-Fehler und können zu größeren Unstimmigkeiten der kollokierten Niederschlagsraten von OceanRAIN und GPM-IMERG führen. Bei den OceanRAIN Messungen wird parallel zu den Niederschlagsmessungen auch der *KSI* (Kap. 2.2) kollokiert. Nicht alle gemessenen Niederschlags-Ereignisse können vom *KSI* eindeutig als stratiform oder konvektiv eingeordnet werden. Um auch diese nicht kategorisierten Niederschlags-Ereignisse erfassen zu können, wird der *KSI* in solchen Fällen auf „Not a Number“ (NaN) gesetzt. Auch der *KSI* wird, wie die Niederschlagsmessungen, über das Kollokations-Zeitfenster gemittelt (\overline{KSI}). Ist der so gebildete Mittelwert \overline{KSI} größer als 0,5 wird er auf 1 gesetzt und die kollokierte OceanRAIN Niederschlagsmessung somit als konvektiv kategorisiert. Ist der \overline{KSI} kleiner als 0,5 wird er auf 0 gesetzt, die Niederschlagsmessung also stratiformen Niederschlag zugeordnet. Fälle in denen $\overline{KSI} = NaN$ gilt, bleiben NaN-Werte, werden also nicht kategorisierten Niederschlags-Ereignissen zugeordnet. Um in der anschließenden *grünen Phase* eine räumliche Kollokation zu ermöglichen wird jeweils das arithmetische Mittel für die Längen- und Breitengrade der Schiffskordinaten während des Kollokations-Zeitfensters gebildet ($\overline{Lon_{RV}}, \overline{Lat_{RV}}$).

Grüne Phase:

In der *grünen Phase* - der Phase der räumlichen Kollokation - werden die räumlichen Distanzen Δx aller GPM-IMERG Gitterzellen ($Lons_{IMERG}, Lats_{IMERG}$) zu der gemittelten Schiffskordinate ($\overline{Lon_{RV}}, \overline{Lat_{RV}}$) aus der *gelben Phase* wie folgt berechnet:

$$\Delta x = (Lons_{IMERG} - \overline{Lon_{RV}})^2 + (Lats_{IMERG} - \overline{Lat_{RV}})^2 \quad (3.1)$$

Der Messwert der GPM-IMERG Gitterzelle mit der geringsten Distanz Δx_{min} zu den gemittelten Schiffskordinaten ($Lons_{IMERG}(\Delta x_{min}), Lats_{IMERG}(\Delta x_{min})$) bildet letztendlich die kollokierte GPM-IMERG Messung $\overline{RR_{IMERG}}$. Ist die berechnete Distanz Δx der so bestimmten GPM-IMERG Gitterzelle zu der OceanRAIN Koordinate größer als 7,5 km erfolgt keine Kollokation, da dann der Großteil der Schiffs-Messungen außerhalb des 10 km x 10 km Pixel's liegt.

Die anhand dieses Algorithmus kollokierten Messungen sind also: \overline{RR}_{IMERG} , \overline{RR}_{RV} , \overline{KSI} . Da die GPM-IMERG Niederschlagsmessungen RR_{IMERG} durch den IMERG Algorithmus ebenfalls ein räumliches und zeitliches Mittel darstellen (Kap. 2.1), wird die Variable hier auch als Mittelwert dargestellt \overline{RR}_{IMERG} .

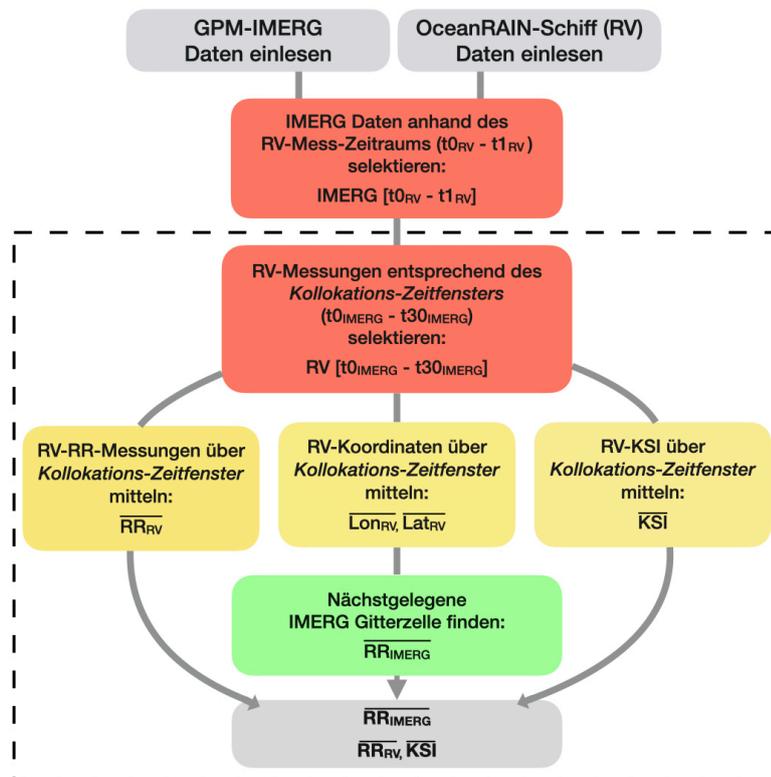


Abbildung 3.1: Vereinfachte, schematische Darstellung des Algorithmus zur raum-zeitlichen Kollokation von GPM-IMERG und OceanRAIN. Der umrandete Bereich kennzeichnet, dass die darin eingeschlossenen Schritte (mittels einer Schleife) für jede GPM-IMERG Messung einzeln durchgeführt werden. Für genauere Beschreibung siehe Text.

3.3 Statistiken der Kollokation

Insgesamt wurden mit dem in Kapitel 3.2 beschriebenen Kollokations-Algorithmus 40.623 Kollokationen, im Zeitraum vom 11. März 2014 bis zum 4. Februar 2017, im Bereich zwischen 30° Süd und 30° Nord gefunden. Durch die zeitlichen und räumlichen Kollokations-Randbedingungen (GPM-IMERG Daten erst ab 2014 verwendet, Beschränkung auf Tropen) konnten die Niederschlagsmessungen von nur sechs der insgesamt acht OceanRAIN Schiffe zu den GPM-IMERG Niederschlagsmessungen kollokiert werden. Die kompletten Routen der kollokierten Schiffe, sowie die dazugehörigen Kollokationen mit GPM-IMERG sind in Abbildung 3.2 dargestellt. Bei einzelnen Schiffen, wie der Maria-S-Merian sind nicht kollokierte Fahrtabschnitte innerhalb der Tropen zu erkennen (Abb. 3.2, in blau). Der Grund hierfür ist, dass diese Fahrtabschnitte noch vor dem Jahr 2014, und

damit vor dem Kollokations-Zeitraum durchgeführt wurden. Die kollokierten Fahrtabschnitte der Schiffe Investigator, Maria-S-Merian und Roger-Revelle sind im Vergleich zu denen von Polarstern, Meteor und SonneII deutlich kürzer. Dadurch werden bei letzteren vergleichsweise wenig Kollokationen gefunden (3.1). Zudem decken Investigator, Maria-S-Merian und Roger-Revelle nur einen geringen Bereich der Breitengrade zwischen 30° Süd und 30° Nord ab. Aufgrund der daraus resultierenden statistischen Unsicherheiten, werden die kollokierten Niederschlagsmessungen nicht für jede Kollokation einzeln analysiert. Es werden stattdessen die Niederschlagsmessungen aller Kollokationen kombiniert betrachtet.

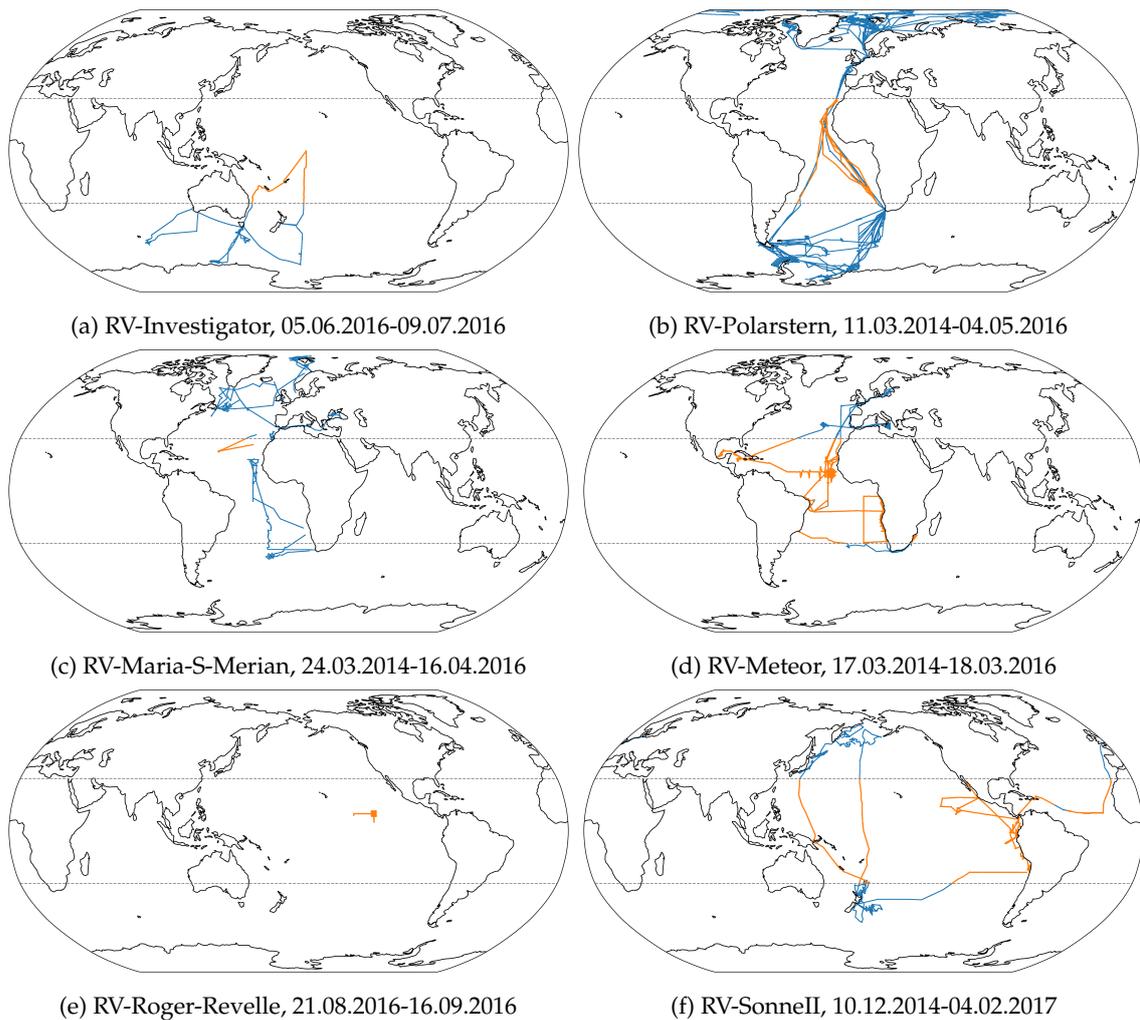


Abbildung 3.2: Die Routen der sechs kollokierten OceanRAIN Schiffe (in blau). In Orange darüber sind die Koordinaten der jeweils kollokierten GPM-IMERG Messungen abgebildet (Mittelpunkt der Gitterzellen). Die unter den Karten angegebenen Zeiträume geben die kollokierten Zeiträume, nicht die Zeiträume der gesamten Schiffsfahrt an. Die grauen Markierungen zeigen 30° Nord und 30° Süd an.

Wie aus Tabelle 3.1 ersichtlich ist, wurden von GPM-IMERG bei allen Kollokationen, abgesehen von der Kollokation mit dem Schiff Maria-S-Merian, mehr Niederschlags-Ereignisse erkannt als von OceanRAIN. Insgesamt erkannte GPM-IMERG damit 951 Nie-

derschlagsereignisse mehr als OceanRAIN. Da die einzelnen Niederschlagsmessungen von GPM-IMERG eine weitaus größere Fläche ($\sim 100 \text{ km}^2$) abdecken als die dazu kollokierten Schiffsmessungen, ist es nachvollziehbar, dass GPM-IMERG dadurch mehr Niederschlags-Ereignisse „sieht“ als die OceanRAIN Messungen.

Tabelle 3.1: Übersicht der einzelnen Kollokationen von GPM-IMERG und den OceanRAIN Schiffen. Die prozentualen Anteile in der letzten Spalte ergeben sich aus der Division der Anzahl der Niederschlags-Ereignisse (3. Spalte) durch die Anzahl der Kollokationen (2. Spalte).

Kollokiertes Schiff (RV)	Anzahl an Kollokationen	Niederschlags-Ereignisse		Anteil an Niederschlag	
		IMERG	RV	IMERG	RV
RV Investigator	1531	223	186	14,57%	12,15%
RV Maria-S-Merian	1107	78	566	7,05%	51,13%
RV Roger-Revelle	1085	467	440	43,04%	40,55%
RV Polarstern	4941	322	167	6,52%	3,38%
RV Meteor	16382	1299	722	7,93%	4,41%
RV SonneII	15577	1705	1062	10,95%	6,82%
Gesamt	40623	4094	3143	10,08%	7,74%

Um die Genauigkeit der Kollokation etwas besser beurteilen zu können, werden die Maßzahlen der Wahrscheinlichkeit der Niederschlags-Detektion („*Probability of Detection*“, *POD*) und der allgemeinen Genauigkeit der Niederschlags-Detektion („*Accuracy*“, *ACC*), analog zu der Validierung von Khan und Maggioni (2019) berechnet. Die OceanRAIN Niederschlagsmessungen werden dabei als Referenz, d.h. als Wahrheit interpretiert. Diese beiden Maßzahlen lassen sich aus den folgenden kategorisierten Trefferquoten der Kollokation berechnen: Fälle, in denen GPM-IMERG und OceanRAIN Niederschlag gemessen haben, werden als *Hits* (*H*, Treffer) kategorisiert. Hat weder GPM-IMERG noch OceanRAIN Niederschlag gemessen, zählt dies als *True-Zero* (*Z*), korrekt *Niederschlagsfrei*. Wenn nur OceanRAIN Niederschlag gemessen hat, ist dies ein *Miss* (*M*, Fehlschlag) für GPM-IMERG. Wenn hingegen nur GPM-IMERG Niederschlag gemessen hat, zählt es als *False* (*F*), also als falsche Niederschlags-Detektion. Mit diesen Trefferquoten lassen sich die *POD* und *ACC* wie folgt berechnen:

$$POD = \frac{H}{H + M} \quad (3.2)$$

$$ACC = \frac{H + Z}{H + Z + M + F} \quad (3.3)$$

Tabelle 3.2 zeigt, dass es häufiger Fälle gab in denen GPM-IMERG Niederschlag detektiert hat und OceanRAIN keinen (*False*: 6,63%), als dass GPM-IMERG Niederschlagsmessungen von OceanRAIN nicht erfasst hat (*Miss*: 4,28%). Dies zeigt sich bereits in der höheren Anzahl an Niederschlags-Ereignissen bei GPM-IMERG in Tabelle 3.1. Auch hier

sind also wieder die großflächigen Niederschlagsmessungen von GPM-IMERG als Ursache zu nennen. Der relativ geringe Anteil an *Hits* (3,45%) ist jedoch auf den ersten Blick überraschend und führt zu einer *POD* von nur knapp 45%. Das bedeutet, dass nur knapp 45% der von OceanRAIN gemessenen Niederschlags-Ereignisse auch von GPM-IMERG erkannt werden. Bei Khan und Maggioni (2019) liegt die *POD* bei allen untersuchten räumlichen Auflösungen bei ca. 80%. Dabei ist jedoch zu berücksichtigen, dass dort deutlich niedrigere räumliche Auflösungen ($0,5^\circ - 3^\circ$) für die Untersuchung verwendet wurden. Zudem werden Tageswerte der Niederschlagsmessungen und keine halbstündlichen Niederschlagsmessungen, wie in dieser Arbeit, untersucht. Durch diese gröberen zeitlichen und räumlichen Auflösungen scheint es plausibel, dass die *POD* dort größer ausfällt. GPM-IMERG und OceanRAIN müssen jeweils nur eine Niederschlagsmessung größer Null, in ein und derselben (relativ großen) Gitterzelle innerhalb 24 Stunden erfassen, um einen *Hit* zu erzeugen. Bei der Kollokation von Burdanowitz (2017) von HOAPS und OceanRAIN, wurde beispielsweise eine ähnlich niedrige *POD* von unter 50% ermittelt. Die hier ermittelte *POD* erscheint dadurch, trotz des geringen Wertes, plausibel. Die hohe allgemeine Genauigkeit *ACC* der kollokierten GPM-IMERG Niederschlagsmessungen entsteht durch die Berücksichtigung der niederschlagsfreien Kollokationen (*Z*), die mit über 80% den weitaus größten Anteil ausmachen. Besonders auffällig ist die einzelne Kollokation mit dem Forschungsschiff Maria-S-Merian, bei der eine *POD* von gerade einmal 10,42% erreicht wurde. Bei dieser Kollokation verpasste GPM-IMERG knapp 46% (*Miss*) der von OceanRAIN gemessenen Niederschlags-Ereignisse. Da bei dieser Kollokation die Datenmenge jedoch sehr gering ist (Tab. 3.1), können bereits kleine Unstimmigkeiten in der Kollokation zu großen Fehlern führen. Die überdurchschnittlich hohe *POD* bei der Kollokation mit dem Forschungsschiff Roger-Revelle könnte durch die besondere Route des Schiff's zu begründen sein, welche sich auf einen sehr kleinen geografischen Bereich beschränkt (Abb. 3.2e).

Tabelle 3.2: Alle Trefferquoten (*Z,H,F,M*) der einzelnen und gesamten Kollokation als Anteile aller kollokierten Niederschlagsmessungen, sowie die beiden daraus berechneten Maßzahlen *ACC* und *POD*. Alle Zahlenwerte in Prozent.

Kollokiertes Schiff	True Zeros (Z)	Hits (H)	False (F)	Miss (M)	ACC	POD
RV Investigator	78,64	5,36	9,23	6,79	84,00	44,09
RV Maria-S-Merian	47,15	5,33	1,72	45,80	52,48	10,42
RV Roger-Revelle	43,23	26,82	16,22	13,73	70,05	66,14
RV Polarstern	91,90	1,80	4,72	1,58	93,71	53,29
RV Meteor	89,85	2,19	5,74	2,22	92,05	49,72
RV SonneII	85,58	3,34	7,60	3,47	88,93	49,06
GESAMT	85,63	3,45	6,63	4,28	89,08	44,58

4 Einfluss der raum-zeitlichen Auflösung auf Niederschlagsmessungen

Niederschlag kann räumlich und zeitlich sehr variabel sein. Niederschlagsmessungen mit unterschiedlichen zeitlichen und räumlichen Auflösungen können daher zu unterschiedlichen Niederschlags-Statistiken führen (Lin und Hou, 2012). Da GPM-IMERG und OceanRAIN sehr unterschiedliche Auflösungen aufweisen (Kap. 2 und 3.1), wird hier zunächst im Allgemeinen auf die Auswirkungen dieser unterschiedlichen Auflösungen eingegangen, bevor im Anschluss die Niederschlagsbilanzen beider Messungen verglichen werden. Zur Begriffsklärung: Mit „gröberen“ oder „schlechteren“ Auflösungen sind hier räumliche (zeitliche) Auflösungen gemeint, bei denen einzelne Messungen größere Flächen (Zeitintervalle) repräsentieren (wie z.B. GPM-IMERG) als „feiner“ bzw. „höher“ aufgelöste Messungen (wie z.B. OceanRAIN). Des Weiteren werden in dieser Arbeit Niederschlagsraten kleiner als 10^0 mm h^{-1} als *leichte*, Niederschlagsraten zwischen 10^0 mm h^{-1} und 10^1 mm h^{-1} als *mäßige* und Niederschlagsraten größer als 10^1 mm h^{-1} als *hohe* Niederschlagsraten bezeichnet.

Durch die Kollokation der beiden Niederschlagsmessungen (Kap. 3.2) werden die räumlichen und zeitlichen Auflösungen der OceanRAIN Messungen etwas an die von GPM-IMERG angepasst. Dennoch bleibt ein markanter Unterschied der räumlichen Auflösung zu beachten. Eine OceanRAIN Niederschlagsmessung repräsentiert eine maximal ca. 10-15 km lange (eindimensionale) Spur, nimmt man eine konstante Maximal-Geschwindigkeit der Schiffe von ca. 10-15 Knoten (ca. $20\text{-}30 \text{ km h}^{-1}$) während des Kollokations-Zeitfensters (0,5 h) an. Diese Abschätzung verdeutlicht den Unterschied zu den GPM-IMERG Messungen, die etwa 100 km^2 große (zweidimensionale) Flächen repräsentieren.

4.1 Einfluss der räumlichen Auflösung

Der Unterschied in den räumlichen Auflösungen führt zu einem dazu, dass GPM-IMERG durch dessen deutliche gröbere Auflösung insgesamt mehr Niederschlagsereignisse erfasst als OceanRAIN. Dieser Effekt wurde bereits in Kapitel 3.3 angesprochen und kann - sofern gewünscht - umgangen werden, indem relative anstatt absoluter Vergleiche verwendet werden. Zum anderen führt eine gröbere räumliche Auflösung zu einer Verschiebung der Niederschlagsraten-Häufigkeitsverteilung - und damit der mittleren Nieder-

schlagsrate - zu leichteren Niederschlagsraten (Lin und Hou, 2012). Je größer die räumliche Auflösung einer Niederschlagsmessung ist, desto häufiger werden leichte Niederschlagsraten und seltener hohe Niederschlagsraten gemessen. Größere räumliche Auflösungen bedeuten größere Flächen über die gemessen bzw. gemittelt wird. Daher werden bei größeren Auflösungen mehr niederschlagsfreie Gebiete mit in das Flächen-Mittel einbezogen. Dies verringert die gemessene Niederschlagsrate. Nach Lin und Hou (2012) sowie Khan und Maggioni (2019) ist dies die Haupt-Ursache für die Verschiebung der Häufigkeitsverteilung der Niederschlagsraten bei größeren räumlichen Auflösungen. Wie stark die Niederschlagsmessungen durch die räumliche Auflösung beeinflusst werden, hängt zudem davon ab, wie groß die räumliche Variabilität des Niederschlags während der Messung tatsächlich ist. Bei konvektiven Niederschlags-Ereignissen, die horizontal meist nur gering ausgedehnt sind, ist die Variabilität größer als bei stratiformen Niederschlags-Ereignissen. Letztere sind meist großflächiger und horizontal homogener verteilt. Daher sollten bei stratiformen Niederschlag bessere Übereinstimmungen in Niederschlagsmessungen mit unterschiedlichen räumlichen Auflösungen erwartet werden können, als bei konvektiven. Diese Vermutung wird in Kapitel 5.2.3 geprüft.

4.2 Einfluss der zeitlichen Auflösung

Lin und Hou (2012) zeigen, dass auch die zeitliche Auflösung einen Einfluss auf die Messung von Niederschlag hat. Demnach nimmt bei größeren zeitlichen Auflösungen (d.h. längeren zeitlichen Mittelungs-Intervallen) die Häufigkeit von leichten Niederschlagsraten zu. Mäßige und hohe Niederschlagsraten zeigen hingegen eine geringe Abnahme in der Häufigkeit. Nach der Kollokation entspricht die zeitliche Auflösung der OceanRAIN Niederschlagsmessungen der der GPM-IMERG Niederschlagsmessungen (30 Minuten, siehe Kap. 3.2). Daher sollte bei dem Vergleich der Niederschlagsbilanzen der beiden Messungen (Kap. 5) vor allem der Einfluss der räumlichen und weniger der zeitlichen Auflösung berücksichtigt werden.

5 Vergleich der Niederschlagsbilanzen

Im nun folgenden Teil der Arbeit, werden die kollokierten Niederschlagsmessungen hinsichtlich ihrer jeweiligen Niederschlagsbilanzen analysiert und miteinander verglichen. Die OceanRAIN Schiffsmessungen werden dabei als Referenzmessungen angesehen. Wie in Kapitel 3.3 angekündigt, werden jeweils die gesamten kollokierten Niederschlagsmessungen kombiniert betrachtet und mit „GPM-IMERG“ und „OceanRAIN“ bezeichnet.

5.1 Häufigkeitsverteilungen der Niederschlagsraten

Um die von GPM-IMERG und OceanRAIN gemessenen Niederschlagsraten miteinander zu vergleichen, werden hier keine absoluten Häufigkeitsverteilungen verwendet, sondern Wahrscheinlichkeitsdichteverteilungen (WDV). Diese sind so normiert, dass deren Integral über alle Niederschlagsraten 1 ergibt. Dadurch sind beide Verteilungen unabhängig von der absoluten Anzahl gemessener Niederschlags-Ereignisse. Niederschlagsfreie Messungen werden in diesen Verteilungen nicht berücksichtigt. In Abbildung 5.1 sind die WDV der gemessenen Niederschlagsraten von GPM-IMERG und OceanRAIN dargestellt. Hierbei wird die (semi) logarithmische Darstellung gegenüber der linearen bevorzugt, da bei letzterer die leichten Niederschlagsraten visuell zu sehr dominieren und somit eine genaue Analyse erschweren würden. Bei der Darstellung wird insbesondere darauf geachtet, dass auch die dargestellte Fläche unter dem jeweiligen Graphen 1 ergibt. Dafür werden die Niederschlagsraten RR zunächst logarithmiert $\log(RR)$ und in - im logarithmischen Raum lineare - Niederschlagsraten-Bins $d(\log(RR))$ sortiert, bevor die Verteilung normiert wird (Gl. 5.1).

$$\int_{-\infty}^{+\infty} WDV(\log(RR)) d(\log(RR)) = 1 \quad (5.1)$$

Um die Abbildung leichter lesbar zu machen, wird die Beschriftung der (eigentlich linearen) x-Achse im logarithmischen Raum dargestellt. Dies ändert nichts an der Verteilung selbst, verdeutlicht aber, dass die Betrachtung der WDV im logarithmischen Raum stattfindet.

Auf den ersten Blick ist in Abbildung 5.1 zu erkennen, dass die Maxima beider Verteilungen im mittleren Bereich des dargestellten Spektrums der Niederschlagsraten liegen. Während bei GPM-IMERG das Maximum der Verteilung bei ungefähr $3 \cdot 10^{-1} \text{ mm h}^{-1}$ liegt, sind bei OceanRAIN zwei kleinere Maxima bei ca. $3 \cdot 10^{-2} \text{ mm h}^{-1}$ und $8 \cdot 10^{-1} \text{ mm h}^{-1}$

zu erkennen. Die am häufigsten gemessenen Niederschlagsraten liegen ungefähr im Bereich von $10^{-1} \text{ mm h}^{-1}$ bis 10^0 mm h^{-1} . In den angrenzenden Bereichen des Niederschlagsraten-Spektrums nimmt die Wahrscheinlichkeitsdichte bei beiden Verteilungen stark ab. Bei den hohen Niederschlagsraten ist dies zu erwarten, da Niederschlagsereignisse mit Niederschlagsraten über 10^1 mm h^{-1} selten auftreten. Am häufigsten treten die leichten Niederschlagsraten unter 10^0 mm h^{-1} auf. Lin und Hou (2012) zeigten z.B. mittels eines bodengestützten kombinierten Niederschlagsradar und -sammler Netzwerks in den USA, dass Niederschlagsraten unter 10^0 mm h^{-1} 62,5% der Messungen ausmachten. Niederschlagsraten über 10^1 mm h^{-1} traten hingegen nur bei 2,6% der Messungen auf. Die restlichen 34,9% der Messungen entsprachen mäßigen Niederschlagsraten. Über Ozeanen gemessene Niederschlagsraten weisen ähnliche Verteilungen auf (Lin und Hou, 2012). Bei dieser deutlichen Dominanz der niedrigen Niederschlagsraten ist es auf den ersten Blick verwunderlich, dass beide Verteilungen unter $10^{-1} \text{ mm h}^{-1}$ wieder deutlich abfallen. Betrachtet man aber zusätzlich auch die in Kapitel 2 genannten Messgenauigkeiten der jeweiligen Messinstrumente, so sieht man, dass die Wahrscheinlichkeitsdichten ungefähr unterhalb des Limits der jeweiligen Instrument-Sensitivität (in Abbildung 5.1 als „Detektions-Limit“ eingezeichnet) abnehmen. Gerade bei der WDV von GPM-IMERG trifft dies relativ genau zu. Dies lässt darauf schließen, dass die Haupt-Ursache für die geringen Wahrscheinlichkeitsdichten bei den Niederschlagsraten unter $10^{-1} \text{ mm h}^{-1}$ darin liegt, dass die Messgeräte diese nicht gut genug erfassen können. Zudem muss beachtet werden, dass Regenraten unter $10^{-2} \text{ mm h}^{-1}$ nicht mehr unbedingt als tatsächliche Niederschlagssignale gewertet werden können, sondern eher als Störsignale am Messgerät. Die zu erwartende Verteilung, mit dem Maximum bei den leichten und einer deutlichen Abnahme hin zu den hohen Niederschlagsraten, stellt sich bei GPM-IMERG und OceanRAIN jeweils erst oberhalb der Detektionslimits ein. Da nur die Bereiche der Verteilungen oberhalb der Detektionslimits physikalisch sinnvoll erscheinen, ist es ratsam den weitergehenden Vergleich auf den Bereich des Spektrums zu beschränken, der oberhalb beider Detektionslimits von GPM-IMERG und OceanRAIN liegt ($RR > 2 \cdot 10^{-1} \text{ mm h}^{-1}$). So können bei diesem Vergleich Einflüsse durch technische Randbedingungen wie unterschiedliche Instrument-Sensitivitäten oder Störsignale, als Ursache für beobachtete Unterschiede ausgeschlossen werden. Betrachtet man nun speziell diesen Bereich, fällt in Abbildung 5.1 auf, dass sich die Verteilung von den GPM-IMERG Niederschlagsmessungen auch in diesem Bereich nicht besonders gut mit der von den OceanRAIN Niederschlagsmessungen deckt. Niederschlagsraten zwischen $2 \cdot 10^{-1} \text{ mm h}^{-1}$ und $4 \cdot 10^0 \text{ mm h}^{-1}$ werden von GPM-IMERG häufiger gemessen als von OceanRAIN, während höhere Niederschlagsraten ($> 4 \cdot 10^0 \text{ mm h}^{-1}$), hingegen häufiger bei den OceanRAIN Messungen auftreten.

Diese Diskrepanzen werden besonders deutlich, wenn man die Frequenz-Anteile von leichten, mäßigen und hohen Niederschlagsraten in einem Kreisdiagramm darstellt (Abb. 5.2). Mit Frequenz-Anteilen sind hier die prozentualen Häufigkeiten dieser Niederschlagsraten (relativ zu jeweils allen Niederschlagsmessungen) gemeint. Hier werden, aus den

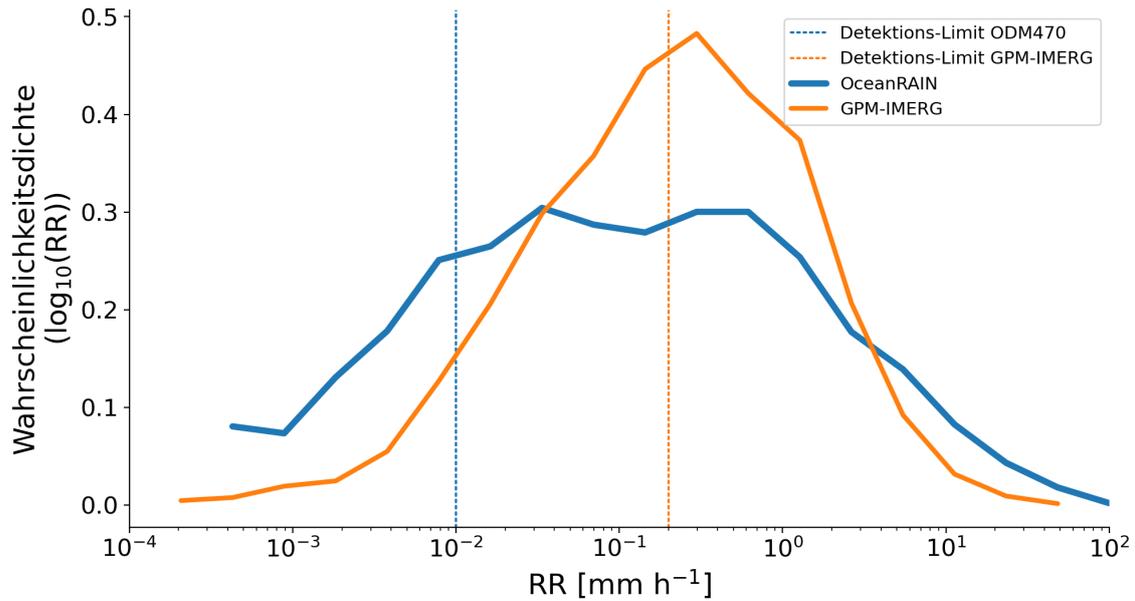


Abbildung 5.1: Die Wahrscheinlichkeitsdichteverteilung der kollozierten Niederschlagsraten RR von GPM-IMERG und OceanRAIN. Die Detektionslimits markieren die jeweils unteren Grenzen Instrument-Sensitivitäten beider Niederschlagsmessungen.

genannten Gründen, nur noch Niederschlagsraten größer als $2 \cdot 10^{-1} \text{ mm h}^{-1}$ berücksichtigt. Die Dominanz der leichten Niederschlagsraten mit einem Anteil von mehr als 50%, wird hier bei beiden Niederschlagsmessungen deutlich sichtbar. GPM-IMERG misst jedoch mit einem Anteil von 67% um knapp 13 %-Punkte mehr dieser leichten Niederschlagsraten. Dafür sind die Anteile an mäßigen und hohen Niederschlagsraten bei GPM-IMERG geringer als bei den OceanRAIN-Messungen. Letztere weisen mit 6,4% einen gut sechsmal so großen Anteil an hohen Niederschlagsraten auf wie die von GPM-IMERG mit nur 1%.

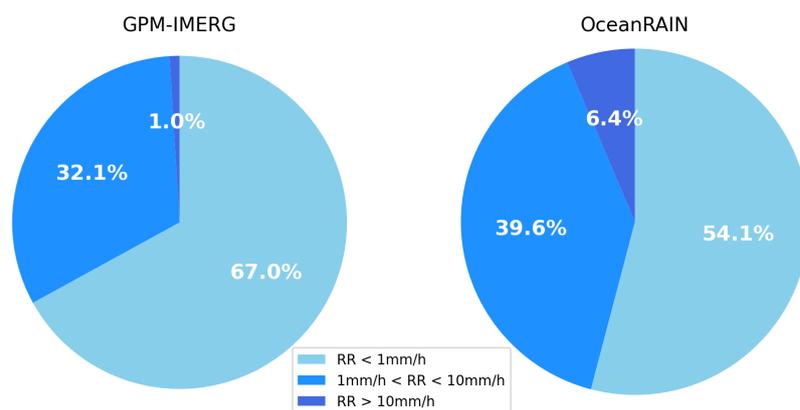


Abbildung 5.2: Frequenz-Anteile der leichten, mäßigen und hohen Niederschlagsraten (siehe Legende) von jeweils allen Niederschlagsmessungen von GPM-IMERG und OceanRAIN. Zu beachten: Hierfür werden nur Niederschlagsraten größer als $2 \cdot 10^{-1} \text{ mm h}^{-1}$ berücksichtigt.

Der Vergleich der Häufigkeitsverteilungen der Niederschlagsraten der beiden Niederschlagsmessungen zeigt bei GPM-IMERG, im Bereich von Niederschlagsraten größer als $2 \cdot 10^{-1} \text{ mm h}^{-1}$, eine Verschiebung zu geringeren Niederschlagsraten. Daher liegt die Vermutung nahe, dass diese durch den Einfluss der räumlichen Auflösung (Kap. 4) entsteht. Im Folgekapitel werden die Auswirkungen der Unterschiede zwischen den Häufigkeitsverteilungen auf die Gesamt-Niederschlagsmenge bzw. mittlere Niederschlagsrate untersucht.

5.2 Niederschlagsmengen und mittlere Niederschlagsraten

Die bei der Kollokation jeweils gemessene Gesamt-Niederschlagsmenge M kann, anhand der kollokierten Niederschlagsraten RR_i , mithilfe folgender Gleichung berechnet werden:

$$M = \sum_{i=1}^N RR_i \cdot 0,5 \text{ h} \quad (5.2)$$

Die kollokierten Niederschlagsraten RR_i sind in der Einheit mm h^{-1} angegeben, stellen aber über 30 Minuten gemittelte Niederschlagsraten dar. Daher müssen diese mit $0,5 \text{ h}$ multipliziert werden, um die korrekte Niederschlagsmenge in mm zu erhalten. N ist in diesem Fall die Anzahl aller kollokierten Niederschlagsmessungen. Die mittleren Niederschlagsraten \overline{RR} ergeben sich aus dem Quotienten der Gesamt-Niederschlagsmenge M und der Gesamt-Messzeit T . Letztere errechnet sich durch die Multiplikation der Anzahl der Messungen mit $0,5 \text{ h}$. Setzt man für die Gesamt-Niederschlagsmenge M Gleichung 5.2 ein, so entspricht die Berechnung einer arithmetischen Mittelwertbildung (Gl. 5.5):

$$\overline{RR} = \frac{M}{T} \quad (5.3)$$

$$= \frac{\sum_{i=1}^N RR_i \cdot 0,5 \text{ h}}{N \cdot 0,5 \text{ h}} \quad (5.4)$$

$$= \frac{\sum_{i=1}^N RR_i}{N} \quad (5.5)$$

Da bei der Gesamt-Anzahl an kollokierten Niederschlagsmessungen N auch niederschlagsfreie Messungen mit einbezogen werden, bezieht sich diese mittlere Niederschlagsrate auf die Gesamt-Messzeit. Auf diese Weise berechnete mittlere Niederschlagsraten fallen geringer aus, als mittlere Niederschlagsraten die ausschließlich für Messungen mit Niederschlag berechnet werden. Die sich nach Gleichung 5.2 bzw. 5.5 ergebenden Niederschlagsmengen und mittleren Niederschlagsraten für GPM-IMERG und OceanRAIN sind in Tabelle 5.1 angegeben. GPM-IMERG misst im Vergleich zu OceanRAIN eine um 30,15% geringere Gesamt-Niederschlagsmenge. Da die mittlere Niederschlagsrate über Gleichung 5.3 direkt mit der Gesamt-Niederschlagsmenge verknüpft ist, ist bei dieser die gleiche Unterschätzung von -30,15% feststellbar.

Tabelle 5.1: Tabelle der Gesamt-Niederschlagsmengen M (nach Gl. 5.2) und der (gerundeten) mittleren Niederschlagsraten \overline{RR} (nach Gl. 5.5) für die jeweils kollokierten Niederschlagsmessungen. Für die Berechnung der relativen Differenzen ($\frac{GPM-IMERG - OceanRAIN}{OceanRAIN}$) wurden die exakten Werte verwendet.

	GPM-IMERG	OceanRAIN	Relative Differenz
M	1176 mm	1684 mm	-30,15%
\overline{RR}	0,06 mm h ⁻¹	0,08 mm h ⁻¹	-30,15%

Auch die Validierung von Khan und Maggioni (2019) zeigt eine Unterschätzung der mittleren Niederschlagsrate von GPM-IMERG gegenüber OceanRAIN. Bei deren Validierung ergeben sich allerdings weitaus höhere mittlere Niederschlagsraten als die hier ermittelten. Für die dort u.a. untersuchte räumliche Auflösung von 0,5°, liegt die mittlere Niederschlagsrate von GPM-IMERG bei ca. 0,45 mm h⁻¹, die von OceanRAIN bei knapp 1,45 mm h⁻¹. Demnach ergibt sich eine deutlich größere Unterschätzung der mittleren Niederschlagsrate von GPM-IMERG gegenüber OceanRAIN von knapp -70%. Eine einzelne Niederschlagsmessung mit einer räumlichen Auflösung von 0,5°, repräsentiert eine etwa 25-mal größere Fläche, als eine Niederschlagsmessung mit einer räumlichen Auflösung von 0,1°. Dadurch ist der Unterschied in den räumlichen Auflösungen zwischen GPM-IMERG und OceanRAIN in deren Untersuchung noch größer als bei der hier durchgeführten. Nach Kapitel 4.1 ist daher auch eine noch deutlichere Verschiebung der mittleren Niederschlagsrate zu leichteren Niederschlagsraten zu erwarten. In dieser Hinsicht erscheint eine größere Unterschätzung plausibel zu sein. Des Weiteren ist die von Khan und Maggioni (2019) durchgeführte Kollokation nicht auf einen geografischen Bereich, wie die Tropen, begrenzt. Daher ist es zu erwarten, dass die dort ermittelten mittleren Niederschlagsraten von den hier ermittelten abweichen.

Im Folgenden soll die hier ermittelte Unterschätzung der mittleren Niederschlagsrate von gut -30%, seitens GPM-IMERG, genauer untersucht werden. Dafür wird analysiert, wie viel die gemessenen Niederschlagsraten jeweils zu der Gesamt-Niederschlagsmenge beitragen. Dies verknüpft die Häufigkeit der gemessenen Niederschlagsraten (Abb. 5.2) mit der Niederschlagsmenge. Um einen Vergleich der Häufigkeiten bzw. Wahrscheinlichkeitsdichten, dargestellt in Abbildung 5.1, zu den daraus resultierenden Niederschlagsmengen zu erhalten, wird die gefallene Niederschlagsmenge für die gleichen (logarithmischen) Niederschlagsraten-Bins berechnet. Diese wird nach Gleichung 5.2 für jeden der Bins einzeln berechnet. Um auch bei diesem Vergleich unabhängig von der Gesamtanzahl an Niederschlagsmessungen zu bleiben, werden die Niederschlagsmengen pro Bin durch die jeweilige Gesamt-Niederschlagsmenge (Tab. 5.1) geteilt. Abbildung 5.3 stellt daher den prozentualen Anteil der (pro Bin) gemessenen Niederschlagsmenge, an der Gesamt-Niederschlagsmenge dar.

Als erstes fällt dabei auf, dass bei der Niederschlagsmenge die hohen Niederschlagsra-

ten trotz deren Seltenheit ausschlaggebend sind (Abb. 5.2) und nicht wie bei der Häufigkeitsverteilung die leichten Niederschlagsraten. Erst ab Niederschlagsraten größer als $10^{-2} \text{ mm h}^{-1}$ entstehen nennenswerte Niederschlagsmengen. Lässt man, wie in Kapitel 5.1 empfohlen, Niederschlagsraten kleiner als $10^{-2} \text{ mm h}^{-1}$ unberücksichtigt, wird also trotzdem nahezu die gesamte Niederschlagsmenge erfasst. Da GPM-IMERG häufiger leichte Niederschlagsraten als OceanRAIN misst (Kap. 5.1), erfasst GPM-IMERG bis ca. $3 \cdot 10^0 \text{ mm h}^{-1}$ größere Niederschlagsmengen. Erst ab höheren Niederschlagsraten erfasst OceanRAIN größere Niederschlagsmengen. Der Großteil der gemessenen Niederschlagsmenge von GPM-IMERG kommt durch Niederschlagsraten von etwa 10^0 mm h^{-1} zustande. Bei OceanRAIN entsteht der Großteil der Niederschlagsmenge durch Niederschlagsraten von ungefähr 10^1 mm h^{-1} , also einer Größenordnung größer.

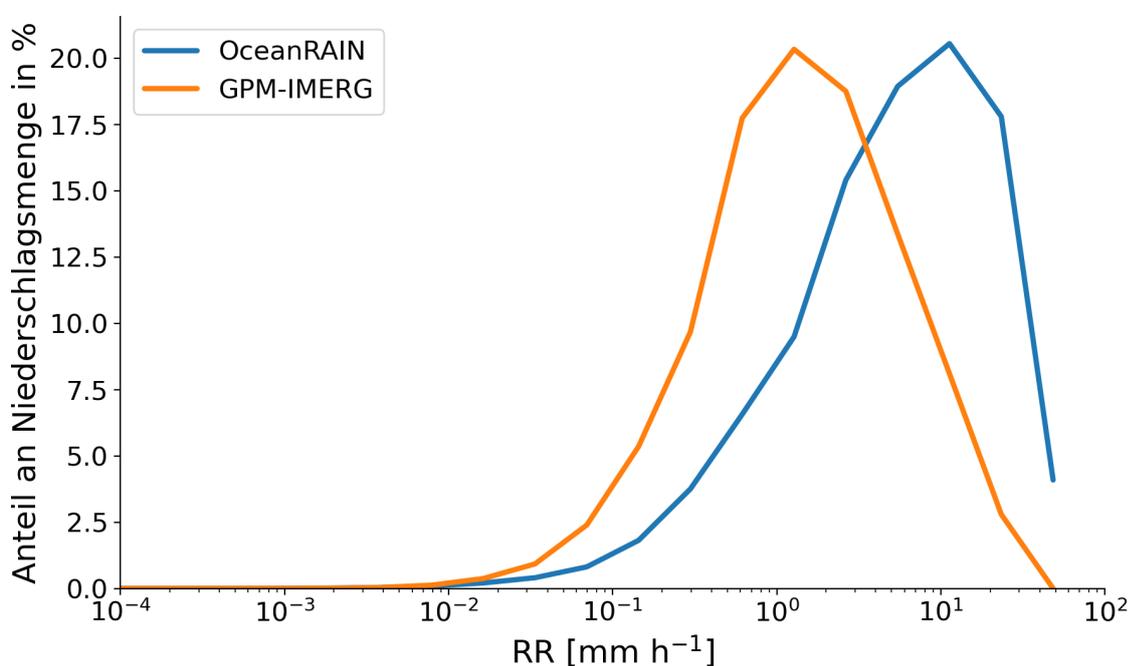


Abbildung 5.3: Niederschlagsmengen pro Niederschlagsraten-Bin (Kap. 5.1) als prozentuale Anteile der Gesamt-Niederschlagsmenge.

Stellt man die Niederschlagsmengen der leichten, mäßigen und hohen Niederschlagsraten als Anteile an der Gesamt-Niederschlagsmenge in Kreisdiagrammen dar, so wird der Grund der vergleichsweise niedrigen Gesamt-Niederschlagsmenge von GPM-IMERG deutlicher sichtbar (Abb. 5.4). Bei einem Vergleich der Abbildungen 5.2 und 5.4 wird ersichtlich, dass trotz des seltenen Auftretens von hohen Niederschlagsraten bei beiden Messungen, diese einen großen (bzw. den größten) Anteil an der Gesamt-Niederschlagsmenge ausmachen. Bei den OceanRAIN Niederschlagsmessungen fallen nur gut 6% aller Niederschlagsmessungen in den Bereich der hohen Niederschlagsraten. Diese 6% sind jedoch für knapp 47% der Gesamt-Niederschlagsmenge von OceanRAIN verantwortlich. Bei GPM-IMERG treten diese nur bei 1% der Messungen auf und tragen nur 13,2% zur

Gesamt-Niederschlagsmenge bei. Der größte Anteil von gut 60% der Gesamt-Niederschlagsmenge lässt sich bei GPM-IMERG auf mäßige Niederschlagsraten zurückführen.

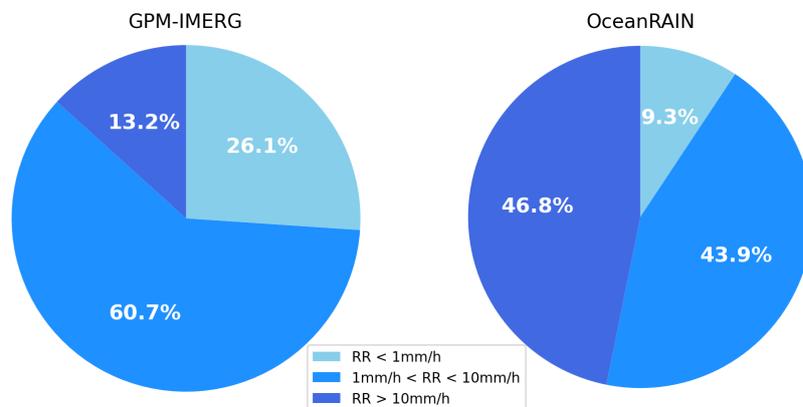


Abbildung 5.4: Mengen-Anteile der leichten, mäßigen und hohen Niederschlagsraten (siehe Legende) an der jeweiligen Gesamt-Niederschlagsmenge. *Zu beachten:* Hierfür wurden nur Niederschlagsraten größer als $2 \cdot 10^{-1} \text{ mm h}^{-1}$ berücksichtigt.

GPM-IMERG erfasst über einen relativ großen Bereich des Niederschlagsraten-Spektrums mehr Niederschlagsraten und eine größere Niederschlagsmenge als OceanRAIN. Dennoch reicht dessen Unterschätzung der hohen Niederschlagsraten aus, um im Netto-Effekt bei der Gesamtbilanz eine geringere Niederschlagsmenge bzw. mittlere Niederschlagsrate zu messen als OceanRAIN.

5.2.1 Vergleich zu anderen Satelliten-Niederschlagsmessungen

Die mittlere Niederschlagsrate von $0,06 \text{ mm h}^{-1}$ (ca. $1,39 \text{ mm Tag}^{-1}$) von GPM-IMERG (Tab. 5.1) fällt im Vergleich zu anderen Satelliten-Messwerten tropischer mittlerer Niederschlagsraten (über Ozeanen) äußerst gering aus. Adler et al. (2017) vergleichen u.a. globale und tropische Niederschlags-Mittelwerte für den Zeitraum 1979-2014 von GPCP („Global Precipitation Climatology Project“) - ebenfalls einem globalen Satelliten Niederschlags-Datensatz - mit anderen Satelliten-Produkten. Die von GPCP gemessene mittlere Niederschlagsrate liegt über den Ozeanen, im Bereich von 35° Süd bis 35° Nord, bei $2,99 \text{ mm Tag}^{-1}$ (ca. $0,12 \text{ mm h}^{-1}$). Die Niederschlagsmessungen von TRMM („Tropical Rainfall Measurement Mission“) - der Vorgänger-Mission von GPM - lagen ebenfalls sehr nahe an diesem Wert. Diese mittlere Niederschlagsrate ist damit fast doppelt so groß wie die von GPM-IMERG, die in dieser Arbeit bestimmt wurde. Selbst die Referenz-Niederschlagsmessungen von OceanRAIN zeigen in dieser Arbeit eine vergleichsweise geringe mittlere Niederschlagsrate. Wahrscheinlich ist die Abweichung der hier ermittelnden mittleren Niederschlagsraten zu den Literatur-Werten zu einem großen Teil durch die begrenzte Datenmenge an kollokierten Niederschlagsmessungen zu erklären. Die kollokierten Niederschlagsraten decken nur einen sehr kleinen Teil der Tropen ab. Manche der Schiffe, wie z.B. die Meteor, durchfahren für längere Zeiten sehr trockene Gebiete der Tropen, wie

den südöstlichen Atlantik (Burdanowitz, 2017). Dies bedeutet, dass die hier ermittelnden mittleren Niederschlagsraten, stark durch die Routen der einzelnen Schiffe beeinflusst sind. Die mittleren Niederschlagsraten aus Tabelle 5.1 sind demnach nicht repräsentativ für die gesamten Tropen. Daher sind diese auch nur schwer mit Werten aus der Literatur zu vergleichen, deren mittleren Niederschlagsraten die gesamten Tropen repräsentieren.

GPM-IMERG fällt zudem bei einem Vergleich von Skofronick-Jackson et al. (2017) mit der niedrigsten mittleren Niederschlagsrate von $2,44 \text{ mm Tag}^{-1}$ (ca. $0,10 \text{ mm h}^{-1}$) auf. Dort wird ein größerer geografischer Bereich untersucht (50° Süd bis 50° Nord). In diesem Gebiet zeigen die Messungen von GPCP mit $3,15 \text{ mm Tag}^{-1}$ (ca. $0,13 \text{ mm h}^{-1}$) die größte mittlere Niederschlagsrate. Ein zu IMERG sehr ähnlicher Datensatz der ebenfalls auf den GPM Messdaten beruht, genannt GSMaP („The Global Satellite Mapping of Precipitation Project“) (Ushio et al., 2003), zeigt bei dem Vergleich von Skofronick-Jackson et al. (2017) eine mittlere Niederschlagsrate von $2,83 \text{ mm Tag}^{-1}$ (ca. $0,12 \text{ mm h}^{-1}$). Diese stimmt damit deutlich besser mit GPCP überein als GPM-IMERG. Auch die Radar-Niederschlagsmessungen des GPM-CO liegen höher als die von GPM-IMERG und relativ nah an dem Wert von GSMaP. Die Ergebnisse von Skofronick-Jackson et al. (2017) zeigen zusätzlich eine Unterschätzung der zonal gemittelten Niederschlagsrate von GPM-IMERG gegenüber den anderen genannten Satelliten-Produkten über alle Breitengrade zwischen 30° Süd und 30° Nord.

Diese beobachteten Unterschätzungen sind umso auffälliger wenn man bedenkt, dass Skofronick-Jackson et al. (2017) nur Satelliten Produkte miteinander vergleichen. Da sich diese hinsichtlich räumlich und zeitlicher Auflösung nicht so sehr unterscheiden sollten wie GPM-IMERG und OceanRAIN, ist eine bessere Übereinstimmung zu erwarten. Dass GPM-IMERG dennoch eine so geringe mittlere Niederschlagsrate im Vergleich zu den anderen Satelliten-Messungen zeigt, deutet auf eine gewisse systematische Unterschätzung von GPM-IMERG hin.

5.2.2 Modellierter Niederschlag mit variabler räumlicher Auflösung

In diesem Abschnitt wird mithilfe der GEM Modelldaten (Kap. 2.3) genauer untersucht, wie stark sich Änderungen in der räumlichen Auflösung auf die Häufigkeitsverteilung von Niederschlagsraten auswirken. Hierfür wird die originale räumliche Auflösung der Modell-Niederschlagsdaten von $0,25 \text{ km}$, nachträglich auf $0,5 \text{ km}$, $2,5 \text{ km}$, $5,0 \text{ km}$ und 10 km gesetzt.

Die von GEM simulierten Niederschlagsraten werden ebenfalls in leichte, mäßige und hohe Niederschlagsraten unterteilt, und als Kreisdiagramme für jede der räumlichen Auflösungen dargestellt (Abb. 5.5).

Auch die GEM Modell-Niederschlagsdaten zeigen einen überwiegenden Frequenz-Anteil an leichten Niederschlagsraten (Abb. 5.5 oben). Die hohen Niederschlagsraten machen,

auch bei diesen Daten, den kleinsten Frequenz-Anteil aus. Mit der größer werdenden räumlichen Auflösung sinkt deren Frequenz-Anteil von 8,1% (0,25 km Auflösung) auf 4,6% (10 km Auflösung) ab. Auch der Frequenz-Anteil der mäßigen Niederschlagsraten sinkt mit geringer werdender Auflösung. Nur der Frequenz-Anteil der leichten Niederschlagsraten zeigt eine Zunahme von 66,9% (0,25 km Auflösung) auf 78,5% (10 km Auflösung).

Auch bei den Mengen-Anteilen (Abb. 5.5 unten) ist eine Abnahme des Anteils der hohen Niederschlagsraten, und eine leichte Zunahme des Anteils der leichten Niederschlagsraten zu erkennen. Obwohl die mäßigen Niederschlagsraten in der Frequenz abnehmen, nimmt deren Anteil an der Gesamt-Niederschlagsmenge zu.

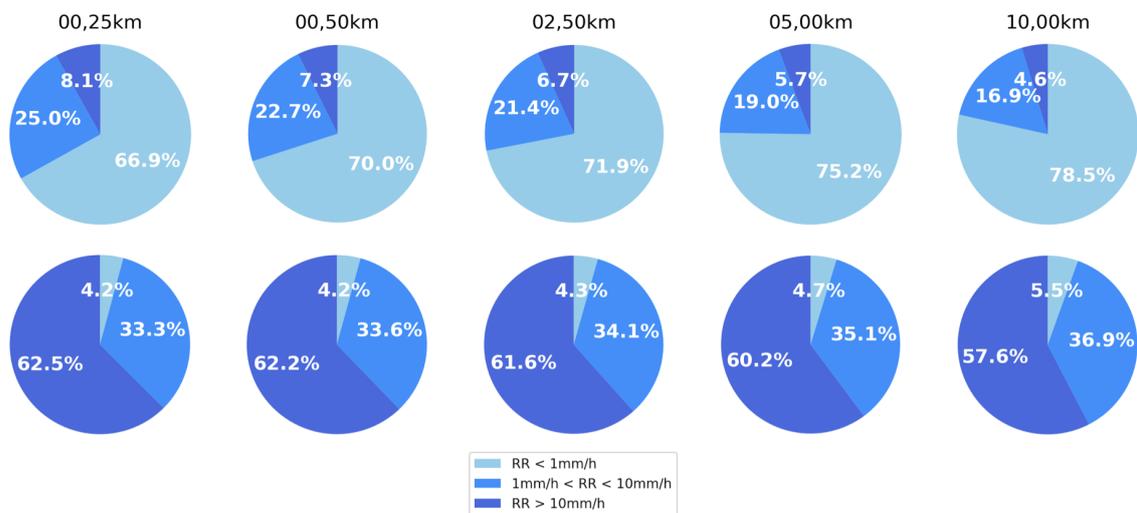


Abbildung 5.5: Frequenz- (oben) sowie Mengen-Anteile (unten) der leichten, mäßigen und hohen Niederschlagsraten (siehe Legende) der von GEM simulierten Niederschlagsraten, für verschiedene räumliche Auflösungen.

Obwohl die räumliche Auflösung hier nur in relativ kleinen Schritten verändert wurde, unterscheiden sich die jeweiligen Anteile der Niederschlagsraten bereits um mehrere Prozentpunkte. Khan und Maggioni (2019) zeigten zudem bei ihrer Validierung explizit eine Abnahme der mittleren Niederschlagsrate von GPM-IMERG sowie eine Zunahme dessen Unterschätzung gegenüber OceanRAIN bei größeren räumlichen Auflösungen. Dies bedeutet, dass die Niederschlagsmessungen tatsächlich sehr stark durch die jeweilige räumliche Auflösung beeinflusst sind. Die beobachteten Diskrepanzen bei den Niederschlagsraten und -mengen von GPM-IMERG und OceanRAIN sind daher zum größten Teil mit deren unterschiedlichen räumlichen Auflösungen zu begründen. Da bei GPM-IMERG und OceanRAIN der Unterschied der räumlichen Auflösung größer ausfällt als bei den hier untersuchten Modell-Auflösungen, sind auch die in Vergleich zu Abbildung 5.5 größeren Diskrepanzen in Abbildung 5.2 und 5.4 plausibel.

5.2.3 Konvektiver und stratiformer Niederschlag

In Kapitel 4 wird vermutet, dass der Einfluss der räumlichen Auflösung auf die Niederschlagsmessung von der räumlichen Struktur des Niederschlags abhängt. Bei konvektivem, also eher kleinräumig und lokal organisiertem Niederschlag sollte die Diskrepanz in der Niederschlagsmenge und mittleren Niederschlagsrate größer ausfallen, als bei flächendeckendem, räumlich homogenen, stratiformen Niederschlag. Um diese Vermutung genauer zu überprüfen, werden Niederschlagsmengen und mittlere Niederschlagsraten getrennt für diese beiden Arten von Niederschlag berechnet. Hierfür ist jedoch eine einfache Unterteilung des Niederschlagsraten-Spektrums in leichte, mäßige und hohe Niederschlagsraten nicht sinnvoll. Niederschlagsraten alleine betrachtet ermöglichen keine eindeutige Rückführung auf die Art des Niederschlags (Lin und Hou, 2012). Aus diesem Grund wird der in Kapitel 2.2 vorgestellte, physikalisch abgeleitete *konvektiv-stratiform-index* (KSI), der OceanRAIN Niederschlagsmessungen verwendet. Da dieser Index nur für die OceanRAIN-Niederschlagsmessungen vorhanden ist, werden mit der Kategorisierung nur die Kollokationen abgedeckt, in denen OceanRAIN Niederschlag detektiert hat (*Hits* und *Misses*, Kap. 3.3). Alle Kollokationen bei denen OceanRAIN keinen Niederschlag gemessen hat (*False* und *True Zeros*, Kap. 3.3) werden hier nicht berücksichtigt. Aus diesem Grund dient diese Kategorisierung nur zu einer groben Abschätzung, ob die räumliche Struktur des Niederschlags bzw. die Niederschlagsart tatsächlich ein maßgebender Faktor für die Stärke des Einflusses der räumlichen Auflösung ist.

Der Großteil der von OceanRAIN klassifizierten Niederschlags-Ereignissen ist mit fast 60% stratiformer Art, gefolgt von den nicht klassifizierten Niederschlags-Ereignissen mit 35,5%. Konvektiver Niederschlag kam bei nur knapp 6% der Niederschlags-Ereignissen vor (Abb. 5.6). Da dieser aber meist mit hohen Niederschlagsraten verbunden ist, verursacht konvektiver Niederschlag den größten Anteil an der Gesamt-Niederschlagsmenge.

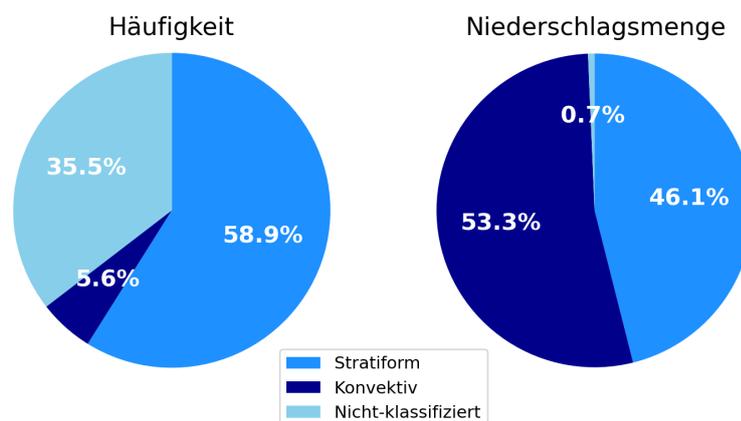


Abbildung 5.6: Frequenz- (links) und Mengen-Anteile (rechts) von konvektiv, stratiform und nicht klassifiziertem Niederschlag.

Wie in Tabelle 5.2 zu erkennen, ist die Unterschätzung von GPM-IMERG mit knapp -83% bei den konvektiven Niederschlags-Ereignissen weitaus größer, als mit knapp -30% bei stratiformen Niederschlags-Ereignissen. Dies bestätigt die Vermutung, dass der Einfluss der räumlichen Auflösung besonders bei konvektiven Niederschlag zum Tragen kommt. Daher sollten bei konvektiven Niederschlägen größere Diskrepanzen zwischen Niederschlagsmessungen mit unterschiedlicher räumlicher Auflösung erwartet werden. Bei stratiformen Niederschlags-Ereignissen zeigt sich hier, trotz des geringeren Einflusses der räumlichen Auflösung, eine markante Unterschätzung der Niederschlagsmenge bzw. mittleren Niederschlagsrate von ca. -30%, von GPM-IMERG gegenüber OceanRAIN. Für eine Unterschätzung bei dieser Niederschlagsart, sind wahrscheinlich andere Faktoren, wie unterschiedliche Instrument Sensitivitäten (Detektions-Limits), ausschlaggebend. GPM-IMERG hat im Vergleich zu OceanRAIN eine geringere Sensitivität hinsichtlich der Messung von Niederschlagsraten (Kap. 2). Dies könnte also erklären, warum GPM-IMERG auch bei den stratiformen Niederschlags-Ereignissen eine gewisse Unterschätzung aufzeigt.

Tabelle 5.2: Niederschlagsmengen sowie mittlere Niederschlagsraten für die, nach dem *konvektiv-stratiform-index*, klassifizierten Niederschlagsarten. Bei diesen Berechnungen sind nur Kollokationen einbezogen, bei denen OceanRAIN Niederschlag größer Null gemessen hat.

Niederschlagsmengen	GPM-IMERG	OceanRAIN	rel. Differenz
Stratiform (M_S)	545 mm	776 mm	-29,75%
Konvektiv (M_K)	154 mm	897 mm	-82,79%
Nicht klassifiziert (M_{NC})	56 mm	11 mm	+3,94%
Mittl. Niederschlagsraten			
Stratiform ($\overline{RR_S}$)	0,59 mm h ⁻¹	0,84 mm h ⁻¹	-29,75%
Konvektiv ($\overline{RR_K}$)	1,74 mm h ⁻¹	10,13 mm h ⁻¹	-82,79%
Nicht klassifiziert ($\overline{RR_{NC}}$)	0,10 mm h ⁻¹	0,02 mm h ⁻¹	+3,94%

In Abbildung 5.7 sind die mittleren zonalen Niederschlagsraten von GPM-IMERG und OceanRAIN gegen die geografische Breite dargestellt. Dafür werden alle kollokierten Niederschlagsmessungen der geografischen Breite nach in 3° große Bins unterteilt und daraus die jeweilige mittlere zonale Niederschlagsrate berechnet.

Über nahezu alle Breiten ist die Unterschätzung der mittleren Niederschlagsrate von GPM-IMERG gegenüber OceanRAIN zu erkennen. Besonders groß ist diese Unterschätzung etwas nördlich des Äquators. Dort befindet sich im Jahresmittel die innertropische Konvergenzzone (ITCZ), ein Gebiet mit besonders intensiver Konvektion und daher großer räumlicher Niederschlags-Variabilität. In den Gebieten nördlich und südlich davon stimmen die mittleren Niederschlagsraten besser überein. Dies sind Gebiete mit eher flacher (vertikal gering ausgedehnter) Konvektion, die horizontal eine geringere Variabilität aufweisen. Allerdings sind gerade im Bereich des Äquators vergleichsweise wenig Kollokationen (Abb. 5.7 rechts) vorhanden. Das bedeutet, dass die mittleren zonalen

Niederschlagsraten in diesem Bereich mit einem relativ großen Fehler behaftet sind. Ob tatsächlich die Niederschlagsart hier die maßgebliche Rolle für die Unterschiede in den mittleren Niederschlagsraten spielt, lässt sich durch die Abbildung nicht eindeutig feststellen.

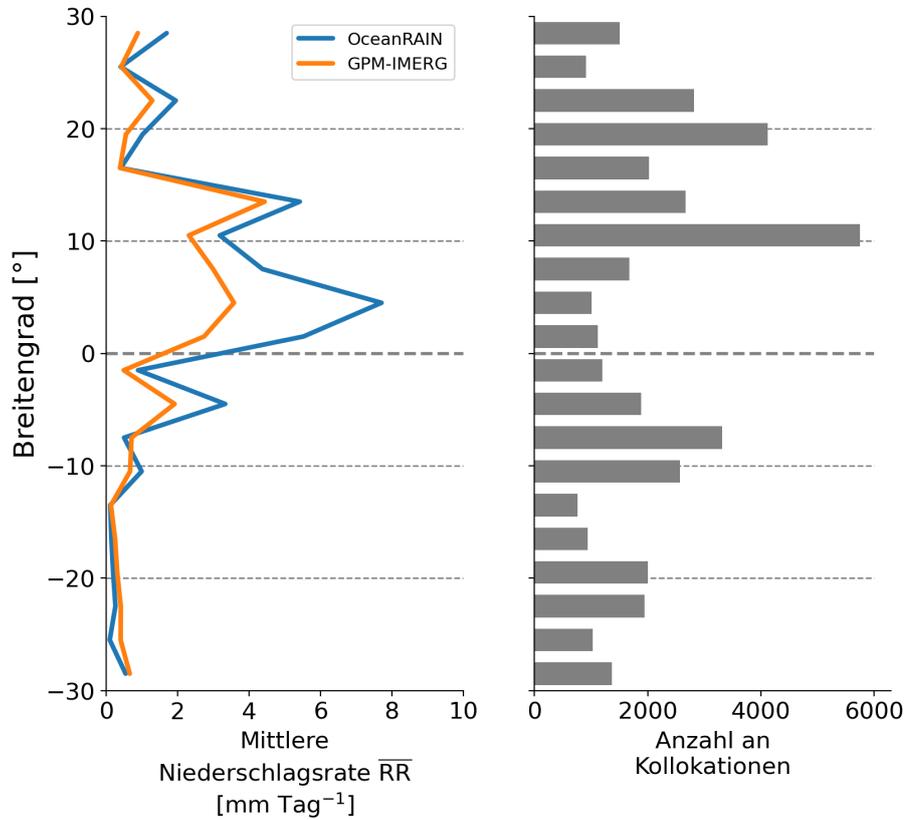


Abbildung 5.7: Die mittleren, zonalen Niederschlagsraten (links) und Anzahl an Kollokationen (rechts) sortiert in 3° große Breitengrad-Bins von GPM-IMERG und OceanRAIN.

6 Zusammenfassung und Ausblick

Die hier durchgeführte Validierung der Satelliten-Niederschlagsmessungen von GPM-IMERG anhand der Schiffs-Niederschlagsmessungen von OceanRAIN zeigt, dass GPM-IMERG die von OceanRAIN gemessene mittlere Niederschlagsrate um gut 30% unterschätzt. Dieses Ergebnis stimmt im Allgemeinen mit der ähnlichen Validierung von Khan und Maggioni (2019) überein.

Khan und Maggioni heben bereits den großen Einfluss der räumlichen Auflösungen auf den direkten Vergleich der beiden Niederschlagsmessungen hervor. Auch in dieser Arbeit wird dieser als Hauptursache für die beobachtete Unterschätzung seitens GPM-IMERG bestätigt.

Die Vermutung, dass diese Unterschätzung der mittleren Niederschlagsrate durch das Punkt-zu-Fläche Problem besonders bei konvektivem und weniger bei stratiformen Niederschlag zum Tragen kommt, stellt sich hier in einer ersten abschätzenden Untersuchung als richtig heraus. Bei stratiformen Niederschlags-Ereignissen zeigt sich hingegen der Einfluss der unterschiedlichen Instrument Sensitivitäten.

Auch Vergleiche von GPM-IMERG Niederschlagsmessungen mit anderen etablierten Satelliten-Niederschlagsmessungen (Skofronick-Jackson et al., 2017) weisen auf eine generelle Unterschätzung der mittleren Niederschlagsrate seitens GPM-IMERG hin.

Hinsichtlich der Absolutwerte der mittleren Niederschlagsraten zeigen diese Vergleiche, dass die hier ermittelten mittleren Niederschlagsraten stark von den Werten der Literatur abweichen und somit als nicht repräsentativ anzusehen sind.

Bei der Verwendung von GPM-IMERG Niederschlagsmessungen sollte also generell, vor allem jedoch bei konvektivem Niederschlag, eine Unterschätzung der mittleren Niederschlagsrate berücksichtigt und diese nach Möglichkeit nach oben korrigiert werden. Insbesondere bei Verwendungen der GPM-IMERG Niederschlagsmessungen für quantitative Abschätzungen des globalen hydrologischen Kreislaufs, sollte diese Unterschätzung der mittleren Niederschlagsrate bzw. Niederschlagsmenge unbedingt berücksichtigt werden. Die hier durchgeführte Validierung reicht allerdings nicht aus, einen entsprechenden Korrekturfaktor, mit ausreichender Sicherheit, ableiten zu können. Zum einen sollte die Validierung dafür auf alle Breitengrade ausgeweitet werden. Zum anderen wären weitere Validierungen der GPM-IMERG Niederschlagsmessungen gegen andere geeignete Referenz-Datensätze sinnvoll.

Weiterführend zu dieser Arbeit, wäre es zudem naheliegend die OceanRAIN Niederschlagsmessungen durch statistische Anpassungen nach der Methodik von Burdanowitz (2017) noch besser an die GPM-IMERG Niederschlagsmessungen anzugleichen. Damit wäre ein Vergleich der beiden Messungen mit einem geringeren Repräsentativitätsfehler möglich. Des Weiteren wäre eine solche Validierung auch für den japanischen Satelliten-Niederschlags-Datensatz GSMaP sinnvoll, welcher ebenfalls auf den GPM Niederschlagsmessungen beruht und dessen Algorithmus dem von GPM-IMERG ähnlich ist.

Literatur

- Adler, Robert F, Guojun Gu, Matthew Sapiano, Jian-Jian Wang und George J Huffman (2017). „Global precipitation: Means, variations and trends during the satellite era (1979–2014)“. In: *Surveys in Geophysics* 38.4, S. 679–699.
- Bohnenstengel, Sylvia I., K.H. Schlünzen und F. Beyrich (2011). „Representativity of in situ precipitation measurements – A case study for the LITFASS area in North-Eastern Germany“. In: *Journal of Hydrology* 400.3, S. 387–395. ISSN: 0022-1694. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2011.01.052>. URL: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0022169411000862>.
- Brath, Manfred, Robin Ekelund, Patrick Eriksson, Oliver Lemke und Stefan A Buehler (2020). „Microwave and submillimeter wave scattering of oriented ice particles“. In: *Atmospheric Measurement Techniques* 13.5, S. 2309–2333.
- Burdanowitz, Jörg (2017). „Point-to-area validation of passive microwave satellite precipitation with shipboard disdrometers“. Diss. Universität Hamburg.
- Côté, Jean, Sylvie Gravel, André Méthot, Alain Patoine, Michel Roch und Andrew Staniforth (1998). „The operational CMC–MRB global environmental multiscale (GEM) model. Part I: Design considerations and formulation“. In: *Monthly Weather Review* 126.6, S. 1373–1395.
- DeAngelis, Anthony M, Xin Qu, Mark D Zelinka und Alex Hall (2015). „An observational radiative constraint on hydrologic cycle intensification“. In: *Nature* 528.7581, S. 249–253.
- Dezfuli, Amin K, Charles M Ichoku, George J Huffman, Karen I Mohr, John S Selker, Nick Van De Giesen, Rebecca Hochreutener und Frank O Annor (2017). „Validation of IMERG precipitation in Africa“. In: *Journal of Hydrometeorology* 18.10, S. 2817–2825.
- Huffman, G.J., David T Bolvin, Dan Braithwaite, Kuolin Hsu, Robert Joyce, Pingping Xie und Soo-Hyun Yoo (2015). „NASA global precipitation measurement (GPM) integrated multi-satellite retrievals for GPM (IMERG)“. In: *Algorithm Theoretical Basis Document (ATBD) Version 4*.
- Huffman, G.J., E.F. Stocker, D.T. Bolvin, E.J. Nelkin und Jackson Tan (2019). *GPM IMERG Final Precipitation L3 Half Hourly 0.1 degree x 0.1 degree V06*. DOI: [10.5067/GPM/](https://doi.org/10.5067/GPM/)
-

- IMERG / 3B-HH / 06. URL: https://disc.gsfc.nasa.gov/datasets/GPM_3IMERGHH_06/summary?keywords=%5C%22IMERG%20final%5C%22.
- Khan, Sana und Viviana Maggioni (2019). „Assessment of level-3 gridded Global Precipitation Mission (GPM) products over oceans“. In: *Remote Sensing* 11.3, S. 255.
- Klepp, Christian, Simon Michel, Alain Protat, Jörg Burdanowitz, Nicole Albern, Marvin Kähnert, Andrea Dahl, Valentin Louf, Stephan Bakan und Stefan A Buehler (2018). „OceanRAIN, a new in-situ shipboard global ocean surface-reference dataset of all water cycle components“. In: *Scientific data* 5, S. 180122.
- Klepp, Christian, Simon Michel, Alain Protat, Jörg Burdanowitz, Nicole Albern, Valentin Louf, Stephan Bakan, Andrea Dahl und Tanja Thiele (2017). *Ocean Rainfall And Ice-phase precipitation measurement Network - OceanRAIN-W*. DOI: 10.1594/WDCC/OceanRAIN-W. URL: <https://doi.org/10.1594/WDCC/OceanRAIN-W>.
- Lin, Xin und Arthur Y Hou (2012). „Estimation of rain intensity spectra over the continental United States using ground radar-gauge measurements“. In: *Journal of climate* 25.6, S. 1901–1915.
- Maghsood, Fatemeh Fadia, Hossein Hashemi, Seyyed Hasan Hosseini und Ronny Berndtsson (2020). „Ground Validation of GPM IMERG Precipitation Products over Iran“. In: *Remote Sensing* 12.1, S. 48.
- Manz, Bastian, Sebastián Páez-Bimos, Natalia Horna, Wouter Buytaert, Boris Ochoa-Tocachi, Waldo Lavado-Casimiro und Bram Willems (2017). „Comparative ground validation of IMERG and TMPA at variable spatiotemporal scales in the tropical Andes“. In: *Journal of Hydrometeorology* 18.9, S. 2469–2489.
- NASA (2014). *Illustration of the multiple precipitation measurement satellites which comprise the GPM constellation*. URL: <https://gpm.nasa.gov/image-gallery/gpm-constellation>.
- Petersen, Walter A, Pierre-Emmanuel Kirstetter, Jianxin Wang, David B Wolff und Ali Tokay (2020). „The GPM Ground Validation Program“. In: *Satellite Precipitation Measurement*. Springer, S. 471–502.
- Skofronick-Jackson, Gail, Walter A Petersen, Wesley Berg, Chris Kidd, Erich F Stocker, Dalia B Kirschbaum, Ramesh Kakar, Scott A Braun, George J Huffman, Toshio Iguchi et al. (2017). „The Global Precipitation Measurement (GPM) mission for science and society“. In: *Bulletin of the American Meteorological Society* 98.8, S. 1679–1695.
- Thurai, M, VN Bringi und PT May (2010). „CPOL radar-derived drop size distribution statistics of stratiform and convective rain for two regimes in Darwin, Australia“. In: *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology* 27.5, S. 932–942.
-

- Ushio, Tomoo, Ken'ichi Okamoto, Toshio Iguchi, Nobuhiro Takahashi, Koyuru Iwanami, Kazumasa Aonashi, Shoichi Shige, Hiroshi Hashizume, Takuji Kubota und Toshiro Inoue (2003). „The global satellite mapping of precipitation (GSMaP) project“. In: *Aqua (AMSR-E) 2004*.
- Xu, Ran, Fuqiang Tian, Long Yang, Hongchang Hu, Hui Lu und Aizhong Hou (2017). „Ground validation of GPM IMERG and TRMM 3B42V7 rainfall products over southern Tibetan Plateau based on a high-density rain gauge network“. In: *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* 122.2, S. 910–924.
-

Eidesstattliche Versicherung

Hiermit versichere ich an Eides statt, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig und ohne fremde Hilfe angefertigt und mich anderer als der im beigefügten Verzeichnis angegebenen Hilfsmittel nicht bedient habe. Alle Stellen, die wörtlich oder sinngemäß aus Veröffentlichungen entnommen wurden, sind als solche kenntlich gemacht. Ich versichere weiterhin, dass ich die Arbeit vorher nicht in einem anderen Prüfungsverfahren eingereicht habe und die eingereichte schriftliche Fassung der auf dem elektronischen Speichermedium entspricht.

Ich bin mit einer Einstellung in den Bestand der Bibliothek des Fachbereiches einverstanden.

Hamburg, den _____ Unterschrift: _____