

Analysen von Satelliten-Aerosol-Zeitreihen: Konsistenz, Trends und spezielle Episoden 2019/2020

Masterarbeit im Studiengang Physik

7. April 2022

Ulrike Stöffelmair

angefertigt am

DEUTSCHEN ZENTRUM FÜR LUFT- UND RAUMFAHRT E.V.

OBERPFAFFENHOFEN

und am

LEHRSTUHL FÜR ATMOSPÄRENFERNERKUNDUNG

INSTITUT FÜR PHYSIK DER UNIVERSITÄT AUGSBURG



Erstprüfer: Prof. Dr. MICHAEL BITTNER

Zweitprüfer: Prof. Dr. ACHIM WIXFORTH

Betreuer: Dr. THOMAS POPP

Betreuerin: DIANA DERMANN

Inhaltsverzeichnis

1. Einleitung	1
2. Aerosole	3
2.1. Aerosolquellen	4
2.2. Rolle im Klimawandel	4
3. Physikalische Grundlagen	6
3.1. Strahlungstransport	6
3.2. Aerosol Optische Dicke als Messgröße	7
4. Messinstrumente und ihre Funktionsweisen	8
4.1. AERONET-Messungen vom Erdboden aus	8
4.2. Retrieval aus Satellitendaten	9
4.2.1. Satellitenmessungen mit Dual-view-Instrumenten (ATSR-2, AATSR, SLSTR)	11
4.2.2. Satellitenmessungen mit Infrarot Interferometern (IASI)	13
4.3. Unsicherheiten in den Messungen	15
5. Verwendete Analysemethoden	16
5.1. Klimatologien und Anomalien	17
5.2. Trends	17
5.3. Biaskorrekturen	19
5.4. Konsistenz	20
6. Konsistenzbetrachtungen	21
6.1. Unterschiedliche Algorithmen für gleiche Instrumente	21
6.1.1. Dual-view-Instrumente: AOD und FmAOD	21
6.1.2. IASI	26
6.2. Ähnliche Dual-view-Instrumente mit gleichen Algorithmen in einer Zeitreihe	28
6.3. Konsistenz der AOD-Komponenten	29
6.4. Diskussion der Konsistenzbetrachtungen	31
7. Trends in den Aerosoleigenschaften aus Satellitendaten	34
7.1. Dual-view-Instrumente im Vergleich mit AERONET	34
7.2. Großflächige Betrachtung der AOD Trends mittels Trendkarten	35
7.3. Regionale Betrachtungen der Trends in AOD, FmAOD und DAOD	36
7.3.1. Asien	37

Inhaltsverzeichnis

7.3.2. Westen von Nord Amerika	37
7.3.3. Australien	38
7.3.4. Europa: Mittelmeerraum und Zentral	39
7.4. Diskussion der Trends in Aersoleigenschaften	39
8. Analyse und Diskussion außergewöhnlicher Episoden 2019/2020 vor dem Hintergrund langjähriger Entwicklung	43
8.1. Brände 2019 und 2020	43
8.1.1. Brände Australien (Dezember 2019/Januar 2020)	43
8.1.2. Brände Kalifornien (August 2019 und 2020)	46
8.2. Saharastaubereignisse in Deutschland	47
8.3. Diskussion der verschiedenen Ereignisse	51
9. Zusammenfassung und Ausblick	53
Abkürzungsverzeichnis	ii
Literatur	ii
Abbildungsverzeichnis	x
A. Anhang	xiv
A.1. Aerosolquellen [9]	xiv
A.2. Herleitung Strahlungstransportgleichung	xv
A.3. Verschiedene Algorithmen zum Retrieval von Aerosolsatellitendaten	xviii
A.3.1. Für die Instrumente ATSR2, AATSR und SLSTR	xviii
A.3.2. Für das IASI Instrument	xix
A.4. Regionendefinitionen	xx
A.5. Versionen der verwendete Algorithmen	xxiii
A.6. Bias Korrekturen	xxiv
A.7. Konsistenzbetrachtungen	xxvi
A.7.1. Vergleich der ATSR-2 Algorithmen in regionalen Zeitserien	xxvi
A.7.2. Vergleich der AATSR Algorithmen in regionalen Zeitserien	xxix
A.7.3. Vergleich der SLSTR Algorithmen in regionalen Zeitserien	xxxii
A.7.4. Vergleich der IASI Algorithmen in regionalen Zeitserien	xxxv
A.7.5. Vergleich der regionalen Klimatologien der Dual-view-Instrumenten	xxxviii
A.7.6. Konsistenz der unterschiedlichen Teil-AOD Komponenten	l
A.8. Trendbetrachtungen	li
A.8.1. Trendkarten	li
A.8.2. Regionale Trends	lii
B. Inhalt der beiliegenden CD	lv
C. Danksagung	lvi

1. Einleitung

„It is unequivocal that human influence has warmed the atmosphere, ocean and land. Widespread and rapid changes in the atmosphere, ocean, cryosphere and biosphere have occurred.“ schreibt der Weltklimarat IPCC in seinem aktuellen Bericht und warnt vor den Konsequenzen des Klimawandels: „They include increases in the frequency and intensity of hot extremes, marine heatwaves, and heavy precipitation, agricultural and ecological droughts in some regions, and proportion of intense tropical cyclones, as well as reductions in Arctic sea ice, snow cover and permafrost.“ [1]

Dies zeigt nochmals deutlich, dass die weltweite Einhaltung der Pariser Klimaziele [2] eine hohe Priorität haben sollte. Zur Eindämmung der Erderwärmung werden hierbei die zulässigen Emissionsmengen an Treibhausgasen beschränkt. Der Einfluss dieser Treibhausgase, wie beispielsweise Kohlenstoffdioxid CO_2 , auf das Klimasystem ist mit großer Genauigkeit bekannt. Im Gegensatz dazu ist die Auswirkung von Aerosolen auf den Klimawandel, welche durch Abstrahlung in den Weltraum den Treibhauseffekt teilweise kompensieren, nur mit großen Unsicherheiten bekannt [3].

Zum besseren Verständnis der Einflüsse der Aerosole in der Atmosphäre sind unter anderem die satellitengestützten Messungen und Retrieval der Aerosoleigenschaften und -menge wichtig, da durch sie eine deutlich größere Abdeckung erreicht werden kann als mit Messungen vom Erdboden aus. Allerdings treten bei Messungen durch Satelliten größere Unsicherheiten auf als bei Bodenmessungen [4].

Dies macht eine genauere Untersuchung der, mit unterschiedlichen Messinstrumenten gemessenen und mithilfe verschiedener Algorithmen berechneten, Daten nötig. Nur wenn diese konsistente (d.h. zusammenpassende) Ergebnisse liefern, können die Messungen als belastbar angesehen und für weitere Betrachtungen der Wirkung von Aerosolen verwendet werden.

Für die Analyse der Konsistenz der Daten sind neben den technischen Gesichtspunkten, wie etwa das Format und die Gitterung, die Konsistenz der verschiedenen Datensätze der gleichen Variablen und die Konsistenz der unterschiedlichen abhängigen Variablen innerhalb ihrer Messunsicherheiten wichtig [5]. In dieser Arbeit wird vor allem die Retrieval-Konsistenz (Zusammenpassen verschiedener Algorithmen und aufeinanderfolgender Sensoren) als Voraussetzung für wissenschaftliche Analysen und darauf aufbauend die wissenschaftliche Konsistenz (Zusammenpassen verschiedener gekoppelter Variablen) betrachtet. Für die abschließende Analyse der Auswirkungen von einzelnen Ereignissen auf die Aerosolmengen in der Atmosphäre und damit auch ihrem Einfluss auf das Klimasystem müssen diese gegen die langfristigen Trends betrachtet werden. Auch die Bestimmung dieser Trends unterliegt der Frage nach der Konsistenz der unterschiedlichen aufeinander

1. *Einleitung*

folgenden Messinstrumente.

Ziel dieser Arbeit ist eine umfassende Konsistenzanalyse der Satellitendatensätze (Kapitel 6) und die Analyse regionaler Aerosoltrends (Kapitel 7) und darauf aufbauend die Untersuchung der Auswirkung von Ereignissen wie großflächigen und lange andauernden Feuern in Kalifornien und Australien (Kapitel 8.1) und Saharstaubevents in Deutschland (Kapitel 8.2).

Hierfür beschäftigt sich diese Arbeit mit den optischen Eigenschaften der Aerosole und ihrer Rolle für den Klimawandel (Kapitel 2), den Grundlagen des Strahlungstransports in der Atmosphäre (Kapitel 3) und den unterschiedlichen Messinstrumenten zur Bestimmung von optischen Aerosolparametern in der Atmosphäre (Kapitel 4). Für die weiteren Analysen werden die in Kapitel 5 beschriebenen Methoden der Zeitreihen- und Trendanalyse genutzt.

2. Aerosole

Alle Schwebestoffe in Luft, ob flüssig oder fest, die keine natürlichen Kondensationsprodukte oder Niederschlagsteilchen, wie Wassertropfen, Eispartikel oder Schneeflocken, sind, werden als Aerosolteilchen, Aerosolpartikel oder Aerosol bezeichnet. In der Atmosphäre treten in der Regel Aerosole als Mischung verschiedener chemischer Stoffe mit unterschiedlichen Größen, mikrophysikalischen Eigenschaften und aus verschiedenen Quellen auf [6].

Es werden in der Atmosphäre drei verschiedene Moden - Nukleations-, Akkumulations- und Grobpartikelmode - nach der jeweiligen Partikelgröße unterschieden. Eine typische Volumenverteilung ist in Abbildung 2.1 zu sehen. Mikrophysikalische Aerosoleigenschaften, wie die Konzentration, die Größe, der Brechungsindex und die chemische Zusammensetzung, haben einen Einfluss auf die optischen Eigenschaften zur Streuung, Reflexion und Absorption von Strahlung. Dies wird ausgenutzt um Informationen über diese Eigenschaften der Aerosole zu erlangen. Hierauf wird im Laufe dieser Arbeit noch genauer eingegangen.

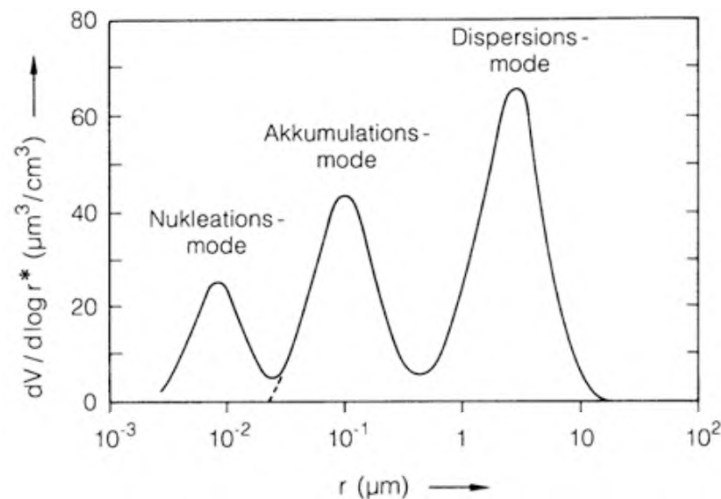


Abbildung 2.1.: Volumenverteilung der unterschiedlichen Aerosolpartikel [7]

Atmosphärische Aerosole können abhängig von ihrer Größe durch Winde über weite Strecken transportiert werden und über einen Zeitraum von mehreren Tagen bis Wochen in der Atmosphäre verweilen. Hierbei sinken größere bzw. schwerere Partikel schneller ab als leichtere und lagern sich auf dem Boden ab. Dieser Vorgang kann außerdem von Niederschlag beschleunigt werden [8].

2. Aerosole

2.1. Aerosolquellen

Aerosole stammen sowohl aus verschiedenen natürlichen als auch aus verschiedenen anthropogenen Quellen und unterscheiden sich resultierend daraus auch in ihrer Zusammensetzung. Aerosole werden unterschieden in Wüstenstaubaerosole, maritime, vulkanische, biogene und durch Verbrennung fossiler Brennstoffe oder Biomasse erzeugte Aerosole. An der Beschreibung von Oliver Boucher in dem Lehrbuch „Atmospheric Aerosols Properties and Climate Impacts“ [9] orientiert sich die genauere Erläuterung der Aerosolquellen im Anhang A.1.

2.2. Rolle im Klimawandel

Aerosole beeinflussen das Klima direkt und indirekt über verschiedene Wege. Es wird unterschieden zwischen Wechselwirkungen der Aerosole mit Strahlung, mit Wolken und mit der Erdoberfläche.

Durch die Reflexion der solaren Strahlung zurück in das All reduziert sich der Strahlungs- und Energieeintrag in die Atmosphäre. Somit hat dieser direkte Effekt einen kühlenden Einfluss auf das Klimasystem. Wird Strahlung absorbiert, beispielsweise von dunklen Partikeln, wie schwarzem Grafit und kohlenstoffhaltige Teilchen, führt dies im Gegensatz dazu zu einer lokalen Erwärmung der Aerosolschicht in der Atmosphäre [10]. Durch eine solche Erwärmung ändert sich das vertikale Temperaturprofil der Atmosphäre, was Einfluss auf die Luftfeuchtigkeit, die Stabilität der Atmosphäre und die Wolkenbildung hat [11].

Aerosole können auch als Kondensationskeime fungieren und damit die Wolkenbildung und die Wolkeneigenschaften beeinflussen. Eine größere Konzentration an Kondensationskeimen und damit an Wolkentropfen führt zu kleineren Wolkenteilchen und erhöht die Reflektivität der Wolke (Twomey-Effekt) [12, 13]. Auch das Abregnen der Wolken wird durch die Tropfengröße beeinflusst und somit auch die Dauer, die die Wolken Einfluss auf die Strahlungsbilanz der Atmosphäre haben [10]. Diese indirekten Effekte sind noch nicht vollständig verstanden [3].

Außerdem kann das Oberflächenreflexionsvermögen durch Aerosole beeinflusst werden. Bei mit Schnee und Eis bedeckten Flächen führt eine Einlagerung von Aerosolen zu einem höheren absorbierten und geringeren reflektierten Anteil der Strahlung und damit zu einer Erwärmung des Erdbodens und des Klimasystems. Auch die Vegetation, die durch Aerosole, beispielsweise durch die düngenden Eigenschaften von Saharastaub im Amazonas Gebiet [14], beeinflusst wird, verändert das Reflexionsvermögen des Erdbodens und hat somit einen Einfluss auf die Temperatur [9].

Global haben Aerosole somit durch den direkten Effekt und durch Wolkenaufhellung einen überwiegend kühlenden Effekt. Absorbierenden Aerosolen können regional auch wärmende Effekte haben. Die Details hängen von der räumlich und zeitlich sehr variablen Aerosolmenge und Zusammensetzung ab. Aufgrund der Unsicherheiten der Kenntnisse

2.2. Rolle im Klimawandel

der Aerosolverteilung und Aerosoltypen in der Atmosphäre haben die berechneten Strahlungsantriebe große Fehlerbalken [15], wie in Abbildung 2.2 dargestellt ist.

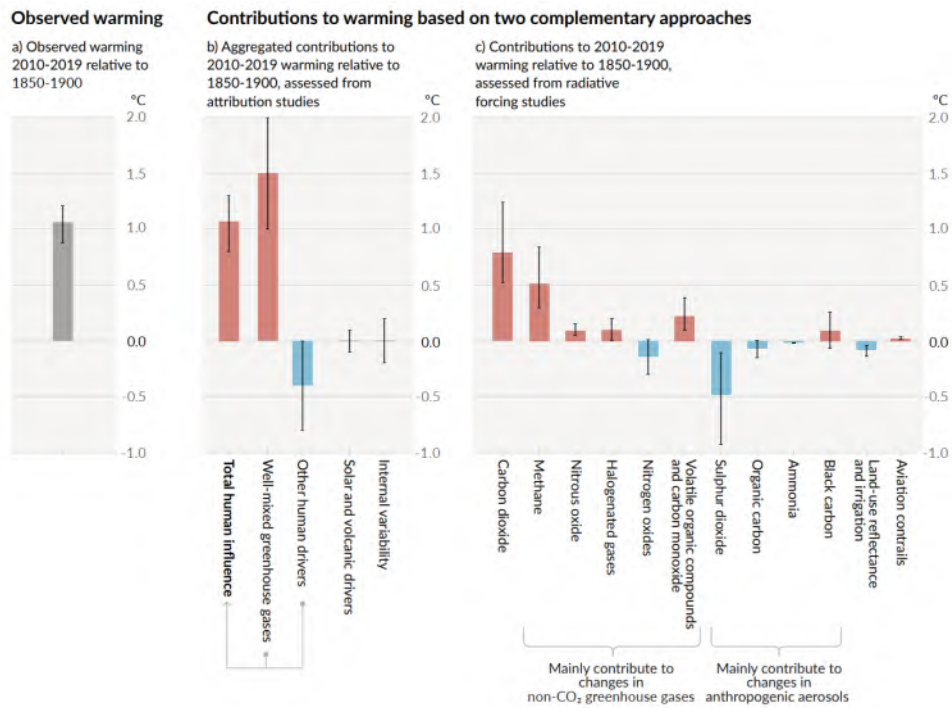


Abbildung 2.2.: Einfluss der Aerosole auf das Klima mit teilweise großen Fehlerbereichen [15].

3. Physikalische Grundlagen

Solare Strahlung wird durch Aerosolpartikel in den Weltraum zurückgestreut und kann dort von Satelliten gemessen werden. Das ermöglicht die Fernerkundung dieser Partikel, da die Strahlungsintensität und die Wellenlängenabhängigkeit der Strahlung von den Eigenschaften der Aerosole in der Atmosphäre und von deren Menge abhängig ist.

Es wird bei Fernerkundungsmessungen zwischen aktiven und passiven Systemen unterschieden. Aktive Systeme, die sogenannten Lidarsysteme, senden Signale aus - elektromagnetische Strahlung im sichtbaren und nahen Infrarot Bereich - und detektieren beispielsweise dessen rückgestreuten Anteil und erlauben damit Rückschlüsse über die vertikale Verteilung der Aerosole. Passive System, wie sie in dieser Arbeit betrachtet werden, nutzen im Gegensatz dazu die Rückstrahlung des Sonnenlichts von der Erde oder der Strahlung anderer Himmelskörper [6].

Für ein besseres Verständnis der Messmethoden werden im Folgenden die physikalischen Grundlagen des Strahlungstransports und die betrachteten Messgrößen erläutert bevor dann auf die unterschiedlichen Messmethoden und Instrumente eingegangen wird.

3.1. Strahlungstransport

Alle betrachteten Messmethoden detektieren die elektromagnetische Strahlung, die am Messinstrument ankommt, und berechnen auf Grundlage dieser verschiedene für die Untersuchung der Aerosole in der Atmosphäre wichtige Größen.

Die Strahlung, beispielsweise von der Sonne, durchquert die Atmosphäre und wechselwirkt dabei mit den in der Atmosphäre vorliegenden strahlungsaktiven Gasen und Aerosolen. Hierbei kommt es zu Absorption und Streuung von elektromagnetische Strahlung durch die strahlungsaktiven Gase und Aerosole. Diese emittieren zusätzlich auch elektromagnetische Strahlung im Infraroten Bereich. Für den Zusammenhang zwischen der Strahlung vor und nach dem Durchgang durch die Atmosphäre betrachtet man den Strahlungstransport. Dieser wird über die Strahlungstransportgleichung (Gleichung 3.1), deren Herleitung und Lösung im Anhang A.2 genauer beschrieben ist, beschrieben.

Sie verknüpft die charakteristischen Größen der Atmosphäre, wie die Dichte der strahlungsaktiven Gase ρ_a , mit der spektralen Strahldichte L_ν entlang des Weges s :

$$\frac{dL_\nu}{ds} = -k_\nu \rho_a (L_\nu - J_\nu). \quad (3.1)$$

Der von Temperatur und Druck abhängige Extinktionskoeffizient k_ν ist hierbei die Summe aus den monochromatischen Streu- und Absorptionskoeffizienten und beschreibt die Abschwächung der Strahlung durch Absorption und Streuung. Die durch strahlungsaktive

3.2. Aerosol Optische Dicke als Messgröße

Gase emittierte elektromagnetische Strahlung und der daraus resultierenden Strahlungszuwachs wird durch den Quellterm J_ν beschrieben.

Die Lösung dieser Differentialgleichung ergibt vereinfacht:

$$L_\nu(s) = \int_0^{\chi_\nu} J_\nu(\chi') e^{-(\chi_\nu - \chi')} d\chi' + L_{\nu 0} e^{-\chi_\nu} \quad (3.2)$$

χ_ν ist hierbei das Integral über die Extinktion, welche sich aus dem Produkt von Extinktionskoeffizient und Dichte der strahlungsaktiven Gase berechnet, und wird als optischer Weg bezeichnet. Die Strahlung am Ort s ergibt sich somit vereinfacht aus der Strahlung, die vom Ort $s_0 = 0$ ausgehend entlang des Weges s exponentiell gedämpft wird, und der Strahlung, die in den Wegstücken ds' an den Orten s' emittiert wird und entlang des Weges $s - s'$ exponentiell gedämpft wird. Dies kann ausgenutzt werden um Rückschlüsse auf die Konzentration und die Eigenschaften der Aerosole in der Atmosphäre zu ziehen [16].

Bei der Betrachtung der Kanäle im sichtbaren Bereich, in dem keine Emission durch strahlungsaktive Gase und Aerosole auftritt, fällt der Quellterm weg und es ergibt sich das Beersche Gesetz:

$$L_\nu(s) = L_{\nu 0} e^{-\chi_\nu} \quad (3.3)$$

3.2. Aerosol Optische Dicke als Messgröße

Die Auswirkungen auf die Strahlung durch die Atmosphäre werden über die optische Dicke beschrieben. Die optische Dicke

$$\tau_\lambda = \int_0^\infty k_\lambda \rho_a dz \quad (3.4)$$

für Strahlung der Wellenlänge λ ist das Integral über die Extinktion entlang des Weges, den das Licht durch die Atmosphäre zurücklegt [17].

Die gesamte optische Dicke $\tau_{\text{TOT}}(\lambda)$ beinhaltet Komponenten der unterschiedlichen strahlungsaktiven Gase und Aerosole und lässt sich als Summe der unterschiedlichen Anteile der optischen Dicke

$$\tau_{\text{TOT}} = \tau_{\text{Aerosol}} + \tau_{\text{H}_2\text{O}} + \tau_{\text{Rayleigh}} + \tau_{\text{O}_3} + \tau_{\text{NO}_2} + \tau_{\text{CO}_2} + \tau_{\text{CH}_4} \quad (3.5)$$

berechnen [18]. Wird im speziellen die Aerosol Optische Dicke (AOD) und damit der Einfluss der Aerosole auf die Strahlung betrachtet müssen somit Messungen oder Annahmen über die anderen Größen vorliegen oder getroffen werden.

Bei der Betrachtung der AOD können Aerosole verschiedener Größen getrennt betrachtet werden. Es wird hier zwischen der Fine mode Aerosol Optische Dicke (FmAOD) (für Aerosole mit einem Radius kleiner als $0.5 \mu\text{m}$) und Coarse Mode AOD (für Aerosole mit einem Radius größer als $0.5 \mu\text{m}$) unterschieden. Die Coarse Mode AOD setzt sich aus Dust Aerosol Optische Dicke (DAOD) (für Mineralstaubaerosole) und Sea Salt Aerosol Optische Dicke (SSAOD) (für Meersalzaerosole, die allerdings nicht von den in dieser Arbeit verwendeten Messinstrumenten gesondert gemessen werden) zusammen [19].

4. Messinstrumente und ihre Funktionsweisen

Alle hier betrachteten Messinstrumente messen die elektromagnetische Strahlung und ziehen über die Invertierung der Strahlungstransportgleichung (3.1) Rückschlüsse auf die Menge und die Eigenschaften der in der Atmosphäre vorhandenen Aerosole. Es werden in dieser Arbeit Daten von zwei verschiedenen Messsatellitenserien verwendet, die mit insgesamt neun unterschiedlichen Algorithmen aufgearbeitet worden sind. Für Vergleiche und zur Validierung werden vom Erdboden aus gemessene Sonnen-Photometer-Daten aus dem Aerosol Robotic Network (AERONET) Netzwerk genutzt. Im Folgenden werden die unterschiedlichen Messinstrumente und ihre Funktionsweisen sowie die unterschiedlichen Algorithmen und die Unterschiede zwischen ihnen erläutert.

4.1. AERONET-Messungen vom Erdboden aus

Zur Validierung der Satellitenmessungen der Aerosoldaten wird häufig auf Messungen von Photometern zurückgegriffen, die vom Boden aus die AOD der über ihnen liegenden Luftsäule bestimmen. Über das AERONET Netzwerk der NASA sind weltweit die Daten 1560 solcher Messinstrumente verknüpft, gesammelt und öffentlich zugänglich gemacht [20].

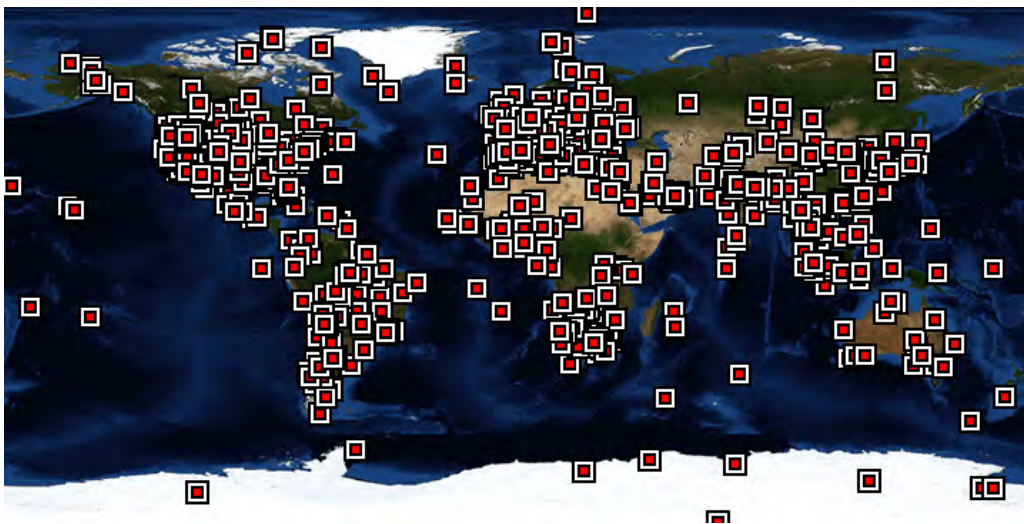


Abbildung 4.1.: Verteilung der AERONET-Stationen [20]

Die Anzahl der Messinstrumente ist seit dem Beginn des AERONET Programms 1993

mit 18 Standorten auf die in Abbildung 4.1 abgebildeten angestiegen. In Europa und Nordamerika ist eine deutliche bessere Abdeckung mit AERONET-Stationen zu sehen als beispielsweise im Norden von Asien [20].

Für das AERONET Programm wird das Sonnenphotometer CIMEL CE-318 verwendet. Es ist ein mit Solarenergie betriebenes, wetterfestes spektrales Radiometer, das roboter-gesteuert auf die Sonne oder den Himmel ausgerichtet wird.

Das Radiometer führt zwei Basismessungen durch, einmal direkt in die Sonne und einmal in einen anderen Bereich des Himmels. Hierbei wird jeweils mit verschiedenen Sequenzen und über verschiedene Wellenlängen gemessen, und eine Mittlung durchgeführt, um Effekte durch Wolken zu reduzieren. Die Messung direkt in die Sonne werden mit Filtern für acht verschiedene Wellenlängen (340, 380, 440, 500, 670, 870, 940 und 1020 nm) für jeweils ungefähr zehn Sekunden durchgeführt. Da Aerosole einer kleineren zeitlichen Variation unterliegen als Wolken werden jeweils drei Messungen in einem Abstand von 30 Sekunden durchgeführt und so die Messungen zwischen Sonnenauf- und Sonnenuntergang in einem 15 Minutentakt wiederholt. Sie ermittelt mit hoher Genauigkeit die multispektrale AOD.

Die Messungen gegen den Himmel werden für vier unterschiedliche Wellenlängen (440, 670, 870 and 1020 nm) durchgeführt. Es werden Messungen in verschiedenen Winkel zur Sonne betrachtet, um Informationen über die Größenverteilung und Absorption der Aerosole, welche jedoch größere Unsicherheiten aufweisen, zu erhalten [21].

4.2. Retrieval aus Satellitendaten

Im Gegensatz zu den AERONET Instrumenten, die vom Erdboden aus messen, kann durch Messungen von Satelliten eine deutlich bessere räumliche Abdeckung erreicht werden. Statt an einzelnen Punkten wird somit, dort wo es möglich ist, der ganze Globus untersucht.

Erschwert wird die Bestimmung (Retrieval) von Aerosoleigenschaften dadurch, dass das vom Satelliten empfangene Signal neben der an Aerosolen gestreuten solaren Strahlung auch und oft dominierend Strahlung enthält, die vom Boden oder von Wolken reflektiert wurde, siehe Abbildung 4.2.

Das Detektieren der von Wolken oder von Schnee und Eis reflektierte Strahlung führt aufgrund der hohen Wolken- bzw. Bodenheiligkeit (Albedo) zu einer deutlichen Überschätzung der Aerosol optischen Dicke. Somit ist ein wichtiger Schritt bei der Arbeit mit Satellitendaten das Erkennen und Maskieren von Wolken und von Eis und Schnee bedeckten Flächen [22].

Außerdem führen bei Messungen gegen den Erdboden unter anderem unterschiedliche Bodenalbado zu Schwierigkeiten bei der Ableitung von Informationen über die atmosphärischen Aerosole. Aus diesem Grund sind hierbei auch die Messunsicherheiten deutlich größer als bei den AERONET Messungen.

Um aus den Rohdaten der Satellitenmessung Aerosolinformationen zu erhalten, muss die

4. Messinstrumente und ihre Funktionsweisen

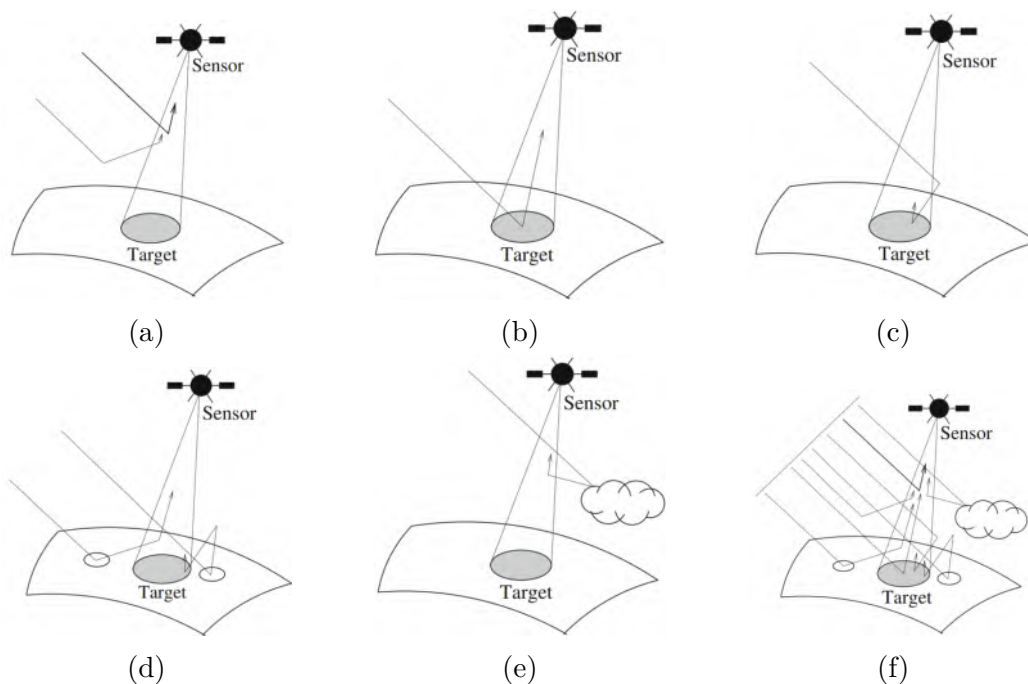


Abbildung 4.2.: Vom Satelliten detektiertes Licht hat einen unterschiedlichen Weg zurückgelegt. Zu sehen sind in a) die atmosphärischen Beiträge, b) die direkten Beiträge des Erdbodens, c) die indirekten Beiträge des Erdbodens, d) die Beiträge der umgebenden Erdoberfläche, e) andere Beiträge der Umgebung wie beispielsweise Wolken und f) die Kombination aus all diesen Beiträgen zur am Satelliten detektierten Strahlung [9].

von Aerosol zurückgestreute Strahlung von den anderen Anteilen des Signals separiert werden. Während ein zunehmender Aerosolgehalt über dunklen Flächen zu einer Signalaufhellung führt, hat er über hellen Flächen bei absorbierendem Aerosol den gegenteiligen Effekt. Im Zwischenbereich kann das dazu führen, dass das Aerosol für den Satelliten nicht sichtbar ist. In Abbildung 4.3 ist beispielsweise deutlich zu sehen, dass der aufgewirbelte Saharastaub, der über der Sahara kaum sichtbar ist, über dem Meer deutlich zu sehen ist [6]. Die Bestimmung des Bodeneffekts ist somit essentiell und wird an Orten und Zeiten mit einer minimalen AOD durchgeführt. Im thermischen Infrarotbereich ist auch die Bodenemissivität und die Emissionen der Atmosphäre selbst wichtig.

Zur Ableitung der AOD und ihrer Anteile muss dann die Strahlungstransportgleichung (3.1) invertiert werden. Hierfür gibt es in den meisten Fällen nur numerische und keine analytischen Lösungen, außerdem ist es notwendig Annahmen über die unbekanntenen optischen Eigenschaften der Aerosole zu treffen. Beispielsweise werden die Aerosolpartikel nach der Mie-Theorie [24] in der Regel als kugelförmig angenommen, um das Retrieval zu vereinfachen. Für Teilchen bei denen diese Näherung nicht gegeben ist, wie Vulkanasche, Mineralstaub und trockene Salzkristalle, werden für qualitativ hochwertige Retrievals empirische Korrekturfaktoren oder fortgeschrittene Streutheorie verwendet [6].

Bei der Nutzung nur einer Einzelmessung zur Bestimmung der Aerosoleigenschaften, kann

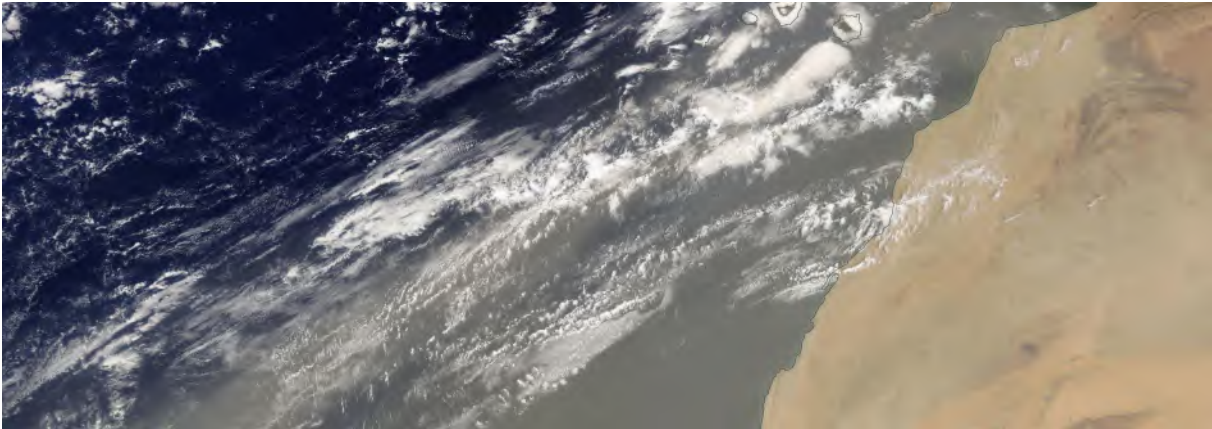


Abbildung 4.3.: Die von der Sahara ausgehende Staubwolke ist über dem Ozean, also einer dunklen Oberfläche, wesentlich deutlicher sichtbar als über dem hellen Wüstenboden. Aufnahme des Saharasturms vom 11. Juni 2020 aufgenommen mit Modis Terra [23].

auch nur ein Parameter, meistens die AOD, berechnet werden, wobei Annahmen über die anderen Aerosolparameter und die Bodenalbedo mit einfließen. Hierbei hängt die Qualität der AOD-Bestimmung von den getroffenen Annahmen ab. Um mehrere Aerosoleigenschaften zu ermitteln, werden von einem Satellitenpixel zeitgleich mehrere Messungen benötigt. Es werden spektrale (z.B. bei den MODIS Instrumenten), polarimetrische (z.B. bei POLDER) oder anguläre (z.B. bei den Along Track Scanning Radiometer (ATSR) Instrumenten) Messmethoden verwendet, um dies zu erreichen [6].

Auf die Funktionsweise der ATSR Instrumente und des Infrarot Spektrometers Infrared Atmospheric Sounding Interferometer (IASI) wird im Folgenden genauer eingegangen, da diese Messungen im Rahmen dieser Arbeit genauer betrachtet werden sollen.

4.2.1. Satellitenmessungen mit Dual-view-Instrumenten (ATSR-2, AATSR, SLSTR)

Die ATSR Instrumentenserie besteht aus mehreren Instrumenten, die im Dual-view Prinzip mit einer Gitterung von $1\text{km} \times 1\text{km}$ messen. Genauer betrachtet werden hier die zweite (Along Track Scanning Radiometer 2 (ATSR-2)), dritte (Advanced Along Track Scanning Radiometers (AATSR)) und vierte (Sea and Land Surface Temperature Radiometer (SLSTR)) Generation der ATSR Instrumentenserie. ATSR-2 war hierbei von 1995 bis 2002 auf dem ESA Polarorbitsatellit ERS-2 aktiv und AATSR als direktes Nachfolgeinstrument von 2002 bis 2012 auf dem Polarorbitsatellit ENVISAT, welcher mit zehn Instrumenten und acht Tonnen die bisher größte zivile Erdbeobachtungsmission darstellt [25]. SLSTR auf den Schwestersatelliten Sentinel-3A und Sentinel-3B misst seit 2016 bzw. 2018 [26].

Die Instrumente ATSR-2 und AATSR haben eine Scanbreite von 512km , daraus resultiert eine globale Abdeckung alle fünf bis sechs Tage [27]. SLSTR kann durch eine Scanbreite

4. Messinstrumente und ihre Funktionsweisen

von 1400km eine globale Abdeckung innerhalb von zwei Tagen liefern [26].

Das Dual-view Prinzip ermöglicht im Gegensatz zu Messungen mit Single-view Instrumenten eine bessere Entkopplung der Strahlungsbeiträge von Boden und Atmosphäre. Daraus resultierend folgt eine größere Genauigkeit beider Anteile [28].

Zur Gewährleistung der Messgenauigkeit, haben die Instrumente auch ein internes Kalibrierungssystem für die Kanäle im thermischen und sichtbaren Bereich. Für die Kalibrierung im infraroten Bereich werden Schwarzkörperstrahler verwendet und für den sichtbaren Bereich einer dieser Schwarzkörperstrahler als Null-Strahlungsquelle und das Sonnenlicht [29]. Ein kontinuierlich rotierender Scanspiegel leitet die Strahlung aus den zwei Messapparaturen und den Kalibrierungssystemen zu dem Radiometer [28].

Im Folgenden wird nach der Erläuterung der allgemeinen Funktionsweise genauer auf die Algorithmen, mit denen aus den Rohdaten des Messinstruments (Level 1 oder L1 Daten) über einen Zwischenschritt (Level 2 oder L2 Daten) für den Endnutzer nutzbare Level 3 oder L3 Daten berechnet werden, eingegangen. Level 2 Daten sind hierbei die Tagesdaten, wie sie vom Retrieval berechnet werden, aggregiert auf einer Gitterung von $10 \times 10\text{km}^2$, welche für jedes Pixel quality flags und eine Schätzung der Messunsicherheiten beinhalten. Level 3 Daten sind im Gegensatz dazu die gemittelten Tages- oder Monatsdaten mit einer Gitterung von $1^\circ \times 1^\circ$. Die statistischen Informationen aus der Mittelung, wie der gemittelte Pixelfehler, sind für jedes Pixel enthalten. [30]

Messmethode

Das Dual-view Prinzip kombiniert zwei Einzelmessungen. Die erste Messung wird in einem Winkel von 55° zum Nadir, der einer senkrechten Blickrichtung zu Erdoberfläche entspricht, durchgeführt. Die zweite Messung von dem gleichen Bereich der Erde wird dann etwa 150 Sekunden später und ungefähr 1000 km weiter in Flugrichtung in Nadir Richtung aufgenommen [29]. Die Messungen in Flugrichtung sind durch die annähernd doppelte Weglänge mehr von Streuung und Absorption in der Atmosphäre beeinflusst als die Messungen in Nadir Richtung, wodurch eine Separation der atmosphärischen Einflüsse auf die Strahlung von denen der Oberfläche möglich ist. Die Messgeometrie ist in Abbildung 4.4 illustriert.

Es werden bei der ATSR Instrumentenreihe neben den zwei Blickwinkeln auch unterschiedliche spektrale Kanäle verwendet, um mehr Rückschlüsse auf die Eigenschaften der Aerosole zu ermöglichen. Die Instrumente ATSR-2 und AATSR haben sieben, SLSTR hat neun, spektrale Kanäle, welche elektromagnetische Strahlung im sichtbaren und infraroten Bereich mit einer Bandbreite um die jeweiligen Wellenlängen detektieren (siehe Tabelle 4.1).

Für das Aerosolretrieval werden die Daten der Kanäle aus den sichtbaren und nahen-Infrarot Bereich genutzt. Diese haben eine kleine Bandbreite von ungefähr 20 nm und liegen außerhalb der Absorptionsbereiche des atmosphärischen Wassers [35].

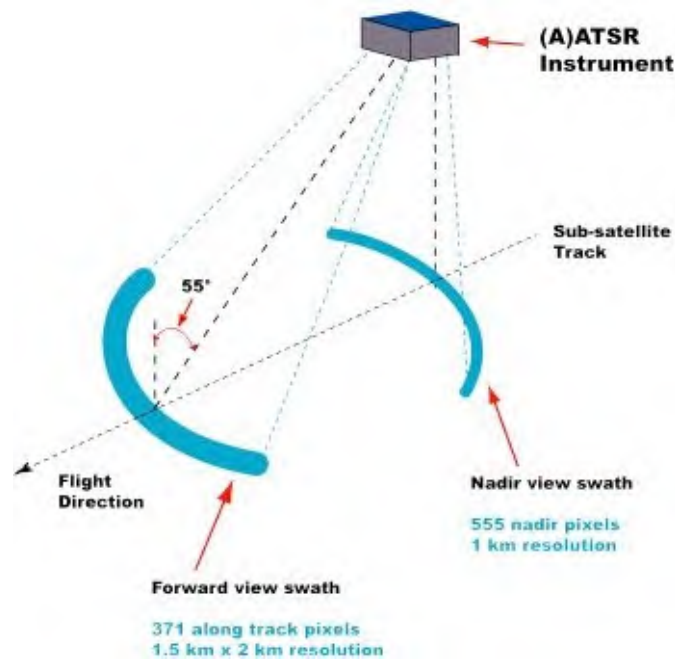


Abbildung 4.4.: AATSR Messgeometrie [29]

Kanal	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Wellenlänge (nm)	550	665	865	1300*	1610	2250*	3740	10850	12000
Bandbreite ATSR-2, AATSR (nm) [31, 32]	20	20	20		300		150	500	500
Bandbreite SLSTR (nm) [33]	20	20	20	15	60	50	380	900	1000
Bereich	sichtbar			nahes Infrarot			thermisches Infrarot		

Tabelle 4.1.: Spektralkanäle der ATSR Instrumente [34], *nur bei SLSTR

Unterschiedliche Algorithmen

Die Daten der ATSR Instrumentenserie werden durch drei unterschiedliche Algorithmen weiterverarbeitet, ORAC (Oxford-RAL Aerosol and Cloud von der Oxford Universität), ADV (AATSR Dual View Algorithm vom Finnish Meteorological Insitut (FMI)), SWAN-SEA (von der Swansea Universität) und ein Ensemble aus diesen (vom Deutschen Luft- und Raumfahrtzentrum (DLR)). Diese verwenden die gleichen Methoden zu Wolkenmaskierung [36] und legen bei der Aerosolmischungsbestimmung [30, 37] die gleichen Modelle zugrunde. Allerdings unterscheiden sie sich in ihrem im Anhang A.3.1 kurz erläuterten Funktionsprinzip.

4.2.2. Satellitenmessungen mit Infrarot Interferometern (IASI)

Neben den bisher beschriebenen Datensätzen werden auch Daten des IASI (Infrared Atmospheric Sounding Interferometer) Instrumentes betrachtet, welches seit 2007 an Board des EUMESAT Metop Satelliten aktiv ist [38]. IASI liefert Daten über die Atmosphäre, das Land und den Ozean für Wettervorhersagen und Klimauntersuchungen. Das Messprinzip

4. Messinstrumente und ihre Funktionsweisen

von IASI basiert auf passiver Infrarot Fernerkundung mit Hilfe eines Fourier Transformations Spektrometer (FTS), welches mit dem Aufbau eines Michelson Interferometer in einem Spektralbereich von $3,7$ bis $15,5\mu\text{m}$ misst, und einer mit diesem verbundener Infrarotkamera, die im Spektralbereich von $10,3$ bis $12,5\mu\text{m}$ arbeitet. Über eine inverse Fouriertransformation und radiometrische Kalibrierung wird in dem IASI Instrument ein Interferogramm berechnet [39].

IASI misst an 30 Positionen im Bereich von $-48,3^\circ$ bis $48,3^\circ$ zur Nadir Richtung senkrecht zur Satellitenbahn, wie in Abbildung 4.5 zu sehen. Damit kann bei einer Höhe des METOP Satelliten von 840 km ein Bereich von ungefähr 2400 km Breite abgedeckt werden. Dies macht eine globale Abdeckung innerhalb von 12 Stunden möglich [40]. Ein Scanvorgang, der ungefähr acht Sekunden dauert, beinhaltet neben den 30 Blickrichtungen auf der Erde auch zwei in den Weltraum gerichtete Messungen und zwei Messungen gegen Schwarzkörperstrahler zur Kalibrierung [39].

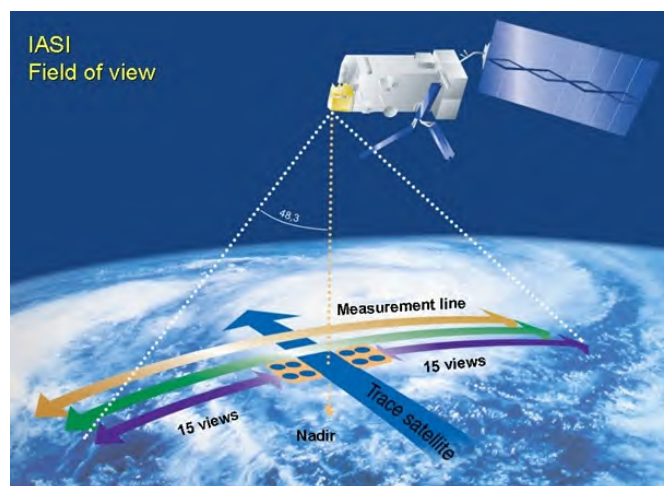


Abbildung 4.5.: IASI Messgeometrie [38]

Bedingt durch die genaue Messung im infrarotem Spektralbereich können über Aerosolretrieval Informationen über die Menge und die Eigenschaften der Dust Aerosolpartikel gewonnen werden [40]. Hierzu werden insbesondere die spektralen Signaturen von Silikaten, welche den Hauptbestandteil der Mineralstaub-Aerosole darstellen, betrachtet [41].

Messmethode

Die Fouriertransformationsspektroskopie wird mit einem Michelson Interferometer durchgeführt. Eingehende Strahlung wird durch einen Strahlungsteiler geteilt in einen Strahl, der einem Pfad konstanter Länge folgt, und einen Strahl, der von einem beweglichen Spiegel reflektiert wird und somit einem Pfad von variabler Länge zurücklegt. Die Energie des kombinierten Strahls im Detektor variiert mit dem Gangunterschied zwischen diesen beiden Strahlen, da sie konstruktiv oder destruktiv miteinander interferieren. Die durch die konstante Geschwindigkeit des Spiegels zeitabhängige Energie am Detektor ist die Grundlage des sogenannten Interferogramms. Dieses Interferogramm ist das Fouriertransformierte des Strahlungsspektrums, welches somit durch eine inverse Fouriertransformation

on berechnet werden kann. Durch eine radiometrische und spektrale Kalibrierung werden dann die Level 0 Daten berechnet, die vom Instrument übermittelt werden. Eine weitere Aufbereitung, wie Dekodierung, spektrale Kalibrierung, radiometrische Nachkalibrierung, Navigation und Datierung, zu Level 1 Daten am Boden macht die Weiterverarbeitung durch die folgenden Algorithmen möglich [39].

Unterschiedliche Algorithmen

Auch bei den IASI Instrumenten gibt es verschiedene Aerosolretrievalalgorithmen, die Informationen über die DAOD und weitere Eigenschaften der Dust Aerosolpartikel ermitteln. In dieser Arbeit werden Daten der Algorithmen Infrared Mineral Aerosolretrieval Scheme (IMARS) (vom Deutschen Luft- und Raumfahrtzentrum (DLR)), MAPIR (Mineral Aerosol Profiling from Infrared Radiances des Belgian Institute For Space Aeronomy), ULB (von der Université Libre de Bruxelles), LMD (vom Laboratoire de Météorologie Dynamique) und ein Ensemble aus diesen (vom Deutschen Luft- und Raumfahrtzentrum (DLR)) betrachtet. Diese Algorithmen arbeiten mit verschiedenen Funktionsprinzipien und werden im Anhang A.3.2 kurz beschrieben.

4.3. Unsicherheiten in den Messungen

Sowohl Messinstrumente als auch Algorithmen haben ihre Grenzen bei der Genauigkeit. Messunsicherheiten und Messfehler treten bei jeder Messmethode und damit auch jeder der betrachteten Messungen vom Erdboden und von Satelliten aus auf [4].

Die Unsicherheiten aus Messung und Retrieval berechnen sich einerseits durch Fehlerfortpflanzung aus den Messunsicherheiten der Instrumente und den Unsicherheiten bei der Invertierung der Strahlungstransportgleichung, bei der Wolkenmaskierung und bei der Bodenalbedoabschätzung [19, 28, 41–48]. Diese Unsicherheiten führen unter anderem auch zu den Unterschieden in den Daten der Algorithmen, wobei die unterschiedlichen Algorithmen jeweils in unterschiedlichen Bereichen der Erde größere Unsicherheiten aufzeigen.

Andererseits werden Fehler aus den Abweichungen der Satellitendaten von den Bodenmessungsdaten von AERONET (Kapitel 4.1) berechnet.

Aus einem Vergleich der Retrieval-Unsicherheiten, welche durch Fehlerfortpflanzung abgeschätzt wurden, und den Fehlern, welche aus der Differenz mit AERONET berechnet wurden, können Korrekturfunktionen bestimmt werden. Mit Hilfe dieser Korrekturfunktionen können aus Retrieval-Unsicherheiten der unterschiedlichen Algorithmen ihre Fehler abgeschätzt werden [49].

Da dies ein gutes Maß für die Qualität der Messung darstellt, wird im weiteren Verlauf dieser Arbeit bei der Betrachtung von Unsicherheiten die Validierung mit den AERONET Bodenmessungsdaten betrachtet.

5. Verwendete Analysemethoden

Im Folgenden werden die verwendeten Analysemethoden vorgestellt und genauer erläutert. Es werden mit Python erstellte Zeitserien und Karten betrachtet. Die Zeitserien werden für die einzelnen Regionen, siehe Anhang A.4, ausgewertet. Für die Berechnung und Darstellung der Zeitserien werden die, über jeweils einen Monat gemittelten, Aersoldaten verwendet. Hierbei werden sowohl die AOD, die FmAOD und die DAOD (Kapitel 3.2) als auch, wenn vorhanden, deren Messunsicherheiten (Kapitel 4.3), als Fehlerbereich um die Messwerte, betrachtet.

Bei der Betrachtung unterschiedlicher Regionen, über welche die vorhandenen Aerosoldaten monatsweise gemittelt werden, werden die tabellarisch in Anhang A.1 aufgelisteten und in ausgewählten Beispielen in Abbildung 5.1 dargestellten Regionen zugrunde gelegt. Die räumliche Abdeckung der Regionen mit Daten kann durch eine hohe Bodenhelligkeit oder durch vermehrtes Auftreten von Wolken beeinträchtigt sein. Dies kann zu einer Verfälschung der über die Region gemittelten Daten führen. Beispielsweise tragen Gebiete, die mit Eis bedeckt sind, nicht zu den gemittelten Daten bei (siehe Kapitel 4.2).

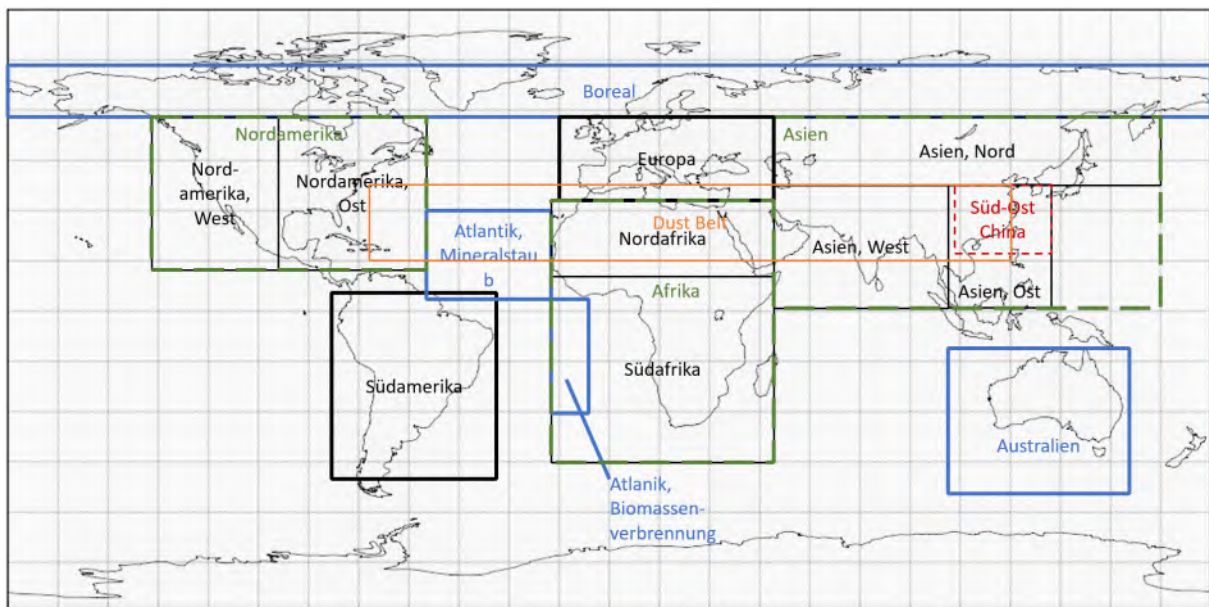


Abbildung 5.1.: Beispielhafte Darstellung einiger Regionen der verwendeten Regionendefinitionen [4], Karte aus Panoply [50]

5.1. Klimatologien und Anomalien

Sowohl bei der Betrachtung von Karten, als auch bei der Betrachtung von Zeitserien, ist der Bezug zum langjährigen Mittel interessant. Hierfür werden in dieser Arbeit für jeden Sensor und jeden Algorithmus die jeweiligen Klimatologien berechnet. Zur Bestimmung der Klimatologie werden jeweils die Daten eines Monats in allen von dem Instrument vorliegenden Jahren betrachtet und hier Mittelwert und Standardabweichung berechnet.

Um den Einfluss der natürlichen Variabilität aus der statistischen Betrachtung des Klimas zu reduzieren, werden bei der Betrachtung einer Klimatologie gemäß Empfehlungen der WMO (Weltorganisation für Meteorologie) Mittelwerte über den Zeitraum einer klimatologische Referenzperiode von mindestens 30 Jahren betrachtet [51]. Für die Aerosolbetrachtung mit Satelliten und damit für diese Arbeit ist keine Datengrundlage über eine solche Zeitspanne vorhanden. Aus diesem Grund und zur Vereinfachung, wird im Folgenden auch ein klimatologischer Mittelwert, welcher über eine Zeitspanne von 4 bis 20 Jahre ermittelt wird, als Klimatologie bezeichnet [52].

Betrachtet man die Abweichungen der jeweiligen Jahre von der Klimatologie, also die Anomalien, lassen sich Rückschlüsse auf außergewöhnliche Ereignisse, wie großräumige Feuer oder Vulkanausbrüche, ziehen.

5.2. Trends

Die Trends werden im Folgenden mit einem saisonalen Mann-Kendall Trend Test mithilfe des Python Pakets pyMannKendall [53] aus dem Monatsmitteln der AOD oder der DAOD berechnet.

Der Mann-Kendall Test ([54], [55]) ist ein nicht-parametrischer Test zur Bestimmung eines monotonen Trends in einer Zeitserie. Nicht-parametrische Tests eignen sich besser als parametrische Tests für nicht normalverteilte, teilweise maskierte und fehlende Daten [56] und sind somit besser zur Betrachtung der Aerosolraten geeignet. Bei dem ursprünglichen Mann-Kendall Test werden zwei Beobachtungsdatensätze $X = x_1, x_2, \dots, x_n$ und $Y = y_1, y_2, \dots, y_n$ betrachtet. Ist einer dieser Datensätze die Zeit, kann dieser Test als Trendtest verwendet werden [54]. Hier wird die Statistik S berechnet über:

$$S = \sum_{i < j} a_{ij} \quad (5.1)$$

mit

$$a_{ij} = \text{sgn}(x_j - x_i) = \begin{cases} 1 & \text{für } x_i < x_j \\ 0 & \text{für } x_i = x_j \\ -1 & \text{für } x_i > x_j \end{cases} \quad (5.2)$$

Unter der Nullhypothese, dass X und Y unabhängig und zufallsverteilt sind, ergibt sich für eine große Stichprobengröße n der Mittelwert $E(S)$ und die Varianz $\text{var}(S)$:

5. Verwendete Analysemethoden

$$E(S) = E \left[\sum_{i < j} a_{ij} \right] = E \left[\sum_{i < j} \text{sgn}(x_j - x_i) \right] = 0 \quad (5.3)$$

$$\text{var}(S) = E \left[\sum_{i > j} a_{ij} \right]^2 = \frac{n(n-1)(2n+5) - \sum_t t(t-1)(2t+5)}{18} \quad (5.4)$$

wobei der Term $\sum_t t(t-1)(2t+5)/18$ aus den Korrelationen in einem Datensatz resultiert und bei nicht korrelierten Daten wegfällt. Für die standardisierte Teststatistik Z ergibt sich:

$$Z = \begin{cases} \frac{S-1}{\sqrt{\text{var}(S)}} & \text{für } S < 0 \\ 0 & \text{für } S = 0 \\ \frac{S+1}{\sqrt{\text{var}(S)}} & \text{für } S > 0 \end{cases} \quad (5.5)$$

Die Nullhypothese, dass kein Trend vorhanden ist, sollte angenommen werden, wenn $|Z| \leq Z_{\alpha/2}$ gilt, wobei $Z_{\alpha/2}$ der Wert der Standardnormalverteilung mit einer Überschreitungswahrscheinlichkeit von $\alpha/2$ ist. Wird die Nullhypothese bei einem solchen zweiseitigen Test abgelehnt, entspricht dies bei positivem S einem steigenden und bei negativem S einem fallenden Trend, welcher mit einer Signifikanz, oder auch p-Wert genannt, gegeben ist. Der p-Wert ist hierbei die doppelte Wahrscheinlichkeit ein gleiches oder größeres (bei positivem Z) bzw. kleineres Z (bei negativem Z) als das errechnete Z zu erhalten. Die Nullhypothese wird dementsprechend mit einer höheren Wahrscheinlichkeit angenommen je größer p ist. In der weiteren Betrachtung werden Trends als signifikant bezeichnet und auch weitergehend betrachtet, die einen p -Wert von unter 5% haben.

Zur Berechnung der Stärke des Trends wird die Trendstärkeschätzung nach Sen [57] verwendet, welche auch als Theil-Sen-Estimator bezeichnet wird. Für die Berechnung der sogenannten Sen-Slope wird für jedes mögliche Wertepaar $(x(j) = x_j, x(k) = x_k)$ in dem Datensatz der Länge n die Steigung der Verbindungsgeraden über $\frac{x_j - x_k}{j - k}$ berechnet. Über die $1/2n(n-1)$ Steigungen wird anschließend der Median berechnet, welcher die Steigung b der Trends angibt.

$$b = \text{med} \left(\frac{x_j - x_k}{j - k} \right) \quad \forall \quad 1 \leq k < j \leq n \quad (5.6)$$

Liegt in den Datensätzen eine saisonale Abhängigkeit vor, wie es in Aerosoldaten der Fall ist, wird der Saisonale Mann-Kendall Trendtest verwendet, welcher die einzelnen Datensätze monatsweise betrachtet. Es werden hierbei zuerst S , $E(S)$, $\text{var}(S)$ und b für die jeweiligen Monate berechnet und dann die Summe dieser Werte über die 12 Monate zur Berechnung des Gesamten Erwartungswertes, der Varianz, der standardisierten Teststatistik Z und des Gesamttrends b verwendet [58].

Es werden in dieser Arbeit Trends sowohl über gemittelte Regionen in Zeitserien berechnet, dargestellt und analysiert als auch Punktweise berechnete und in Karten dargestellt.

In Zeitserien sind dabei die signifikanten Trends mit durchgezogenen Linien und die nicht signifikanten Trends mit gestrichelten Linien dargestellt.

5.3. Biaskorrekturen

Für die Betrachtung längerer Zeitserien werden Daten von Instrumenten einer Instrumentenserie zusammengesetzt, wie beispielsweise bei den Dual-view-Instrumenten ATSR-2, AATSR und SLSTR. Zwischen den jeweiligen Instrumenten gibt es bei den meisten Algorithmen Unterschiede. Diese können sowohl im Jahresverlauf, hier vor allem in der Amplitude der Schwankungen als auch in der Absoluten Höhe, als auch in einem Bias liegen. Dieser Bias kann beispielsweise im Vergleich zu den AERONET Messungen ermittelt werden, allerdings unterscheidet er sich deutlich regional [59]. Für diese Arbeit wird aus diesem Grund eine Biaskorrektur entwickelt, die zu einem besseren Vergleich der Instrumente und für das Erstellen einer fortlaufenden Zeitserie von 1995 bis 2020 genutzt wird. Eine besondere Schwierigkeit resultiert hier aus der Datenlücke zwischen April 2012 und Juli 2017.

Diese Biaskorrekturen für regionale Zeitserien werden in dieser Arbeit über die Trends in den einzelnen Instrumenten berechnet. Bei linearen Trends über den gesamten Zeitraum, wie beispielsweise in Europa, Nordafrika und Australien wird diese Bias Korrektur wie folgt berechnet: Es werden die Trendlinien für ATSR-2, AATSR und der Mittelwert der SLSTR Daten berechnet und dann die ATSR-2 Daten so verschoben, dass sich die Trendlinien von ATSR-2 und AATSR zum Zeitpunkt 01.01.2003 schneiden. Die SLSTR Daten werden so verschoben, dass ihr Mittelwert auf der Verlängerung der AATSR Trendlinie im Dezember 2018 liegt. In 5.2 ist eine solche Verschiebung beispielhaft zu sehen. Tritt in dem betrachteten Zeitraum eine Trendänderung auf, wie beispielsweise in China (siehe Kapitel 7.3.1), so kann durch eine Trennung der Zeitserien in Abschnitte mit linearen Trends die Anwendung der beschriebenen Methode ermöglicht werden. Hier sind allerdings größere Ungenauigkeiten zu erwarten und zu beobachten, da die Zeitabschnitte aus denen die Trends berechnet werden dementsprechend kürzer sind und somit die Trend größtenteils auch eine geringere Signifikanz aufweisen.

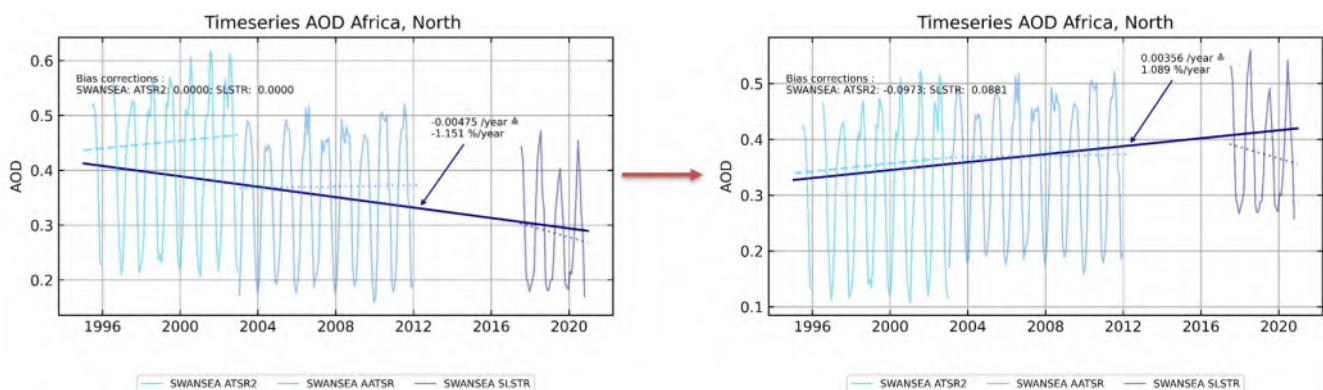


Abbildung 5.2.: Zeitserien von Nordafrika, links ohne und rechts mit Biaskorrektur.

5. *Verwendete Analysemethoden*

Diese Methode lässt sich über einen Vergleich der zu AERONET nötigen Biaskorrekturen validieren. Bei einer großen Anzahl an in der Region repräsentativ verteilten Stationen ist die Biaskorrektur im Rahmen von Unsicherheiten übereinstimmend, siehe Anhang A.6.

5.4. Konsistenz

Satellitengestützte Messungen und Aerosolretrieval führen, neben dem großen Vorteil einer besseren Abdeckung, gegenüber den Bodenmessungen auch zu Schwierigkeiten resultierend aus den größeren Unsicherheiten [4]. Durch eine Analyse der Konsistenzen zwischen den Algorithmen und Instrumenten, können belastbare Informationen identifiziert werden.

Im Rahmen dieser Arbeit werden Satelliten Daten untersucht, die in konsistentem Format (NetCDF) und Gitterung (1° auf 1°) vorliegen. Die CAMS Model Daten, die in Kapitel 6.3 Vergleichswerte liefern, liegen ebenfalls im NetCDF-Format vor, allerdings mit einer Gitterung von $0,75^\circ$ auf $0,75^\circ$, was bei der Betrachtung von Regionen vernachlässigt werden kann. Die AERONET Bodenmessungsdaten allerdings sind stationsbasiert und unterscheiden sich somit in Format und Gitterung deutlich von den anderen Datensätzen.

Für die Konsistenzanalysen sind, neben den genannten technischen Gesichtspunkten, die Konsistenz der verschiedenen Datensätze der gleichen Variablen und die Konsistenz der unterschiedlichen abhängigen Variablen innerhalb ihrer Messunsicherheiten wichtig [5].

Im Folgenden wird die Retrieval-Konsistenz, welche das Zusammenpassen verschiedener Algorithmen (Kapitel 6.1) und aufeinanderfolgender Sensoren (Kapitel 6.2) beschreibt, untersucht. Diese Konsistenz ist Voraussetzung für wissenschaftliche Analysen. Aufbauend auf der Retrieval-Konsistenz wird die wissenschaftliche Konsistenz betrachtet. Diese beschreibt das Zusammenpassen verschiedener gekoppelter Variablen, wie beispielsweise die unterschiedlichen Teil-Komponenten der AOD (Kapitel 6.3).

Die Konsistenzen werden in regionalen Zeitserien untersucht. Für die Betrachtungen der Retrieval-Konsistenz wird für den saisonalen Verlauf der AOD, analog zu einer Schwingung, der Parameter einer Amplitude verwendet. Neben einem optischen Vergleich der unterschiedlichen regionalen Zeitserien werden explizit auch die unterschiedlichen Parameter: Durchschnittswert und Amplitude betrachtet.

6. Konsistenzbetrachtungen

Für die folgenden Analysen der Konsistenz werden regionale Zeitserien betrachtet. Um hier Zusammenhänge herzustellen, werden Gebiete mit ähnlichen geografischen Begebenheiten gegenübergestellt. Beispielsweise werden Regionen mit Wüsten, mit Ozeanen oder mit Industrieländern, aber auch nach Breitengrad miteinander verglichen.

In diesem Kapitel wird die Konsistenz zwischen den unterschiedlichen Algorithmen eines Messinstrumentes (ATSR-2, AATSR, SLSTR und IASI) betrachtet, bevor dann die Konsistenz eines Algorithmus über den Zeitraum der drei Dual-view-Instrumente betrachtet wird. Anschließend wird die wissenschaftliche Konsistenz betrachtet, indem die verschiedenen Messgrößen AOD und FmAOD aus AATSR, DAOD von IASI und SSAOD aus Modellen gesammelt betrachtet werden.

Ziel ist es am Ende des Kapitels Aussagen über die Belastbarkeit der Daten in verschiedenen Regionen zu treffen und somit Daten für die weitere Arbeit auszuwählen.

6.1. Unterschiedliche Algorithmen für gleiche Instrumente

Im Folgenden soll die Konsistenz zwischen den unterschiedlichen Algorithmen der jeweiligen Instrumente untersucht werden. Hierbei werden für IASI die fünf Algorithmen MAPIR, IMARS, LMD, ULB und Ensemble betrachtet und für die drei Dual-view-Instrumente ATSR-2, AATSR und SLSTR jeweils die vier Algorithmen ORAC, SWANSEA, ADV bzw. SDV und Ensemble einbezogen.

6.1.1. Dual-view-Instrumente: AOD und FmAOD

Bei der Betrachtung der Konsistenz innerhalb der einzelnen Dual-view-Instrumente können, in Regionen mit einer ausreichend guten Abdeckung an AERONET Stationen, Vergleiche mit AERONET zur Verifizierung gezogen werden.

In der weltweiten Betrachtung (siehe Abb. 6.1 Zeile 1) der AOD zeigt sich bei ATSR-2 und AATSR eine gute Konsistenz der Algorithmen SWANSEA, Ensemble und ORAC, wobei ORAC allerdings deutlich höhere Maxima aufweist. ADV zeigt hier leicht höhere Durchschnitts AOD-Werte mit einer geringeren Amplitude des Jahresgangs. In den Aerosol Retrieval aus den SLSTR Daten zeigt sich eine relative große Konsistenz im Verlauf der Daten der vier Algorithmen, mit höheren Absolutwerten bei ORAC und SDV und einer

6. Konsistenzbetrachtungen

kleineren Jahresamplitude bei ORAC. Bei einem Vergleich mit den AERONET Daten zeigen sich bis 1998 sehr große Abweichungen. Ab 1998 stimmt der Verlauf der AERONET Daten mit denen der Satellitenmessungen überein, bei dem ATSR-2 Instrument ist ein Bias von 0,04 zu beobachten, bei AATSR von 0,07 und bei SLSTR von ungefähr -0,01.

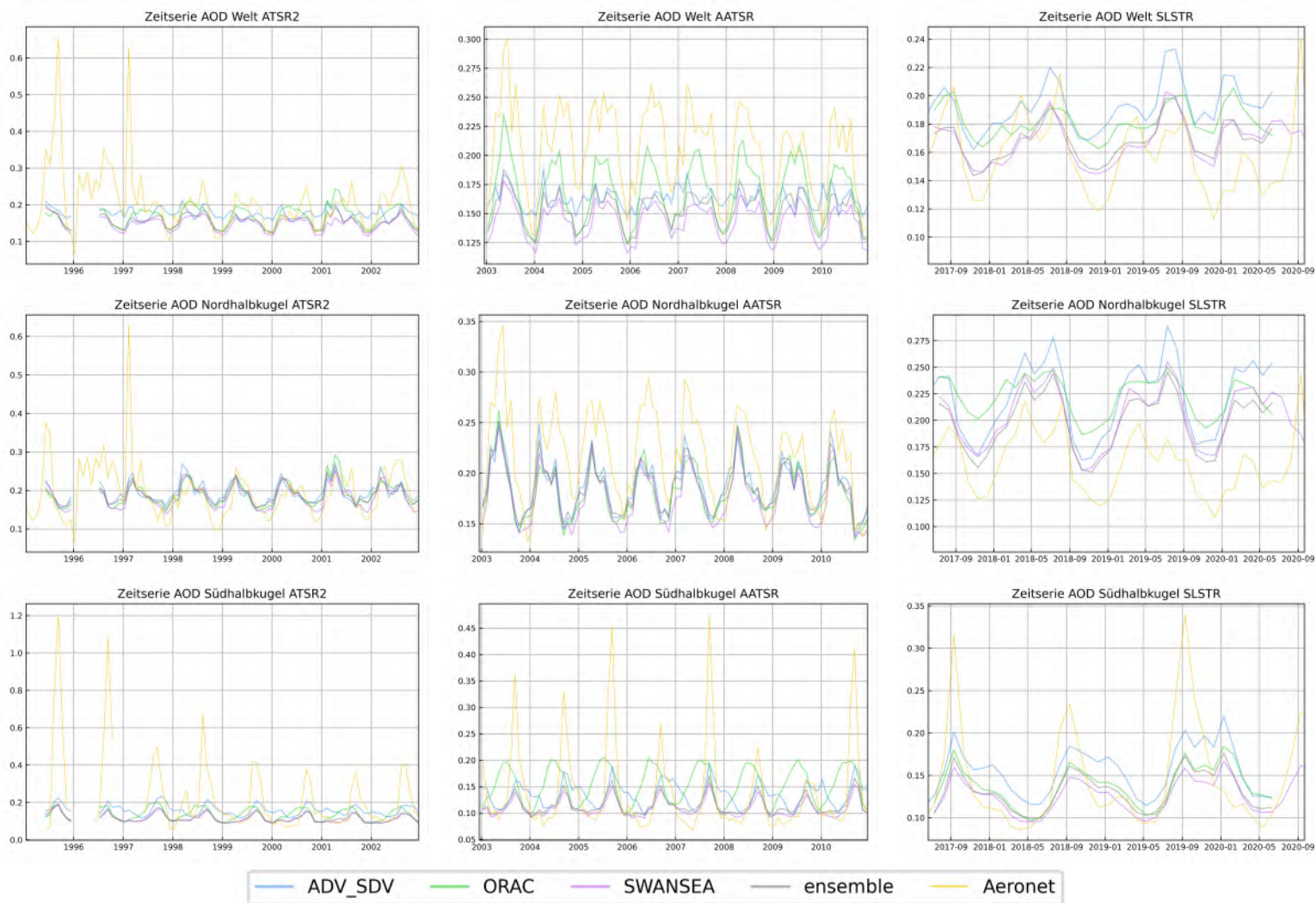


Abbildung 6.1.: Verlauf der AOD weltweit (erste Zeile), auf der Nordhalbkugel (zweite Zeile) und auf der Südhalbkugel (dritte Zeile) ermittelt über die Algorithmen SWANSEA, ORAC, ADV/SDV und Ensemble der Dual-view-Instrumenten: ATSR-2 (links), AATSR (Mitte) und SLSTR (rechts) im Vergleich mit den Daten der AERONET Bodenstationen

Für eine differenzierte Betrachtung ist eine getrennte Analyse der Daten auf der Nord- und auf der Südhalbkugel hilfreich. Auf der Nordhalbkugel (siehe 6.1 Zeile 2) sind die vier Algorithmen der Dual-view-Instrumente untereinander konsistent. Für den Zeitraum 1998 bis 2011 zeigen die Daten der AERONET Bodenstationen einen ähnlichen Verlauf wie die Satellitendaten, allerdings mit breiteren und zeitlich leicht nach hinten verschob-

6.1. Unterschiedliche Algorithmen für gleiche Instrumente

benen Maxima, welche beim Vergleich mit dem AATSR Instrument zusätzlich um bis zu 0,05 höhere Werte aufweisen. Bei SLSTR weist der Verlauf weniger Ähnlichkeiten zu den AERONET-Daten auf und die AOD-Werte liegen insgesamt niedriger.

Auf der Südhalbkugel (siehe 6.1 Zeile 3) ist deutlich weniger Konsistenz in den Daten der Algorithmen zu beobachten als auf der Nordhalbkugel. Bei den Daten des SLSTR Instruments sind die unterschiedlichen Algorithmen konsistent mit kleineren Unterschieden in der absoluten Höhe im Bereich von bis zu 0,06. AERONET zeigt hier allerdings, wie auch im Vergleich zu den anderen beiden Dual-view-Instrumenten, ausgeprägtere und kürzere Maxima. In dem Zeitraum von 1995 bis 2011 weisen die Algorithmen SWANSEA und Ensemble konsistente Daten auf. ADV zeigt leicht höhere Maxima auf, welche langsamer abfallen als bei den anderen drei Algorithmen. ORAC weist im Gegensatz dazu um ca. drei Monate frühere Maxima auf, welche beim AATSR Instrument um 0,05 größer sind als die Maxima von SWANSEA und Ensemble.

Um die Ursachen für die Unterschied auf der Süd- und Nordhalbkugel nachzuvollziehen und Aussagen über die Belastbarkeit der Algorithmen und ihrer Kombinationen treffen zu können werden geographisch ähnliche Gebiete verglichen, um so den Einfluss von besonderen Begebenheiten auf das Satellitenretrieval der Aerosoleigenschaft betrachten zu können. Betrachtet werden hierbei jeweils die Gebietstypen Wüsten, Land ohne Wüstenbedeckung, Ozeane auf der Nordhalbkugel und Ozeane auf der Südhalbkugel. Die Verläufe der regionalen Zeitserien und die Konsistenz der Algorithmen in Gebieten mit ähnlichen geographischen Merkmalen weisen große Gemeinsamkeiten auf. Dies wird im Folgenden genauer bei den einzelnen Dual-view-Instrumenten betrachtet.

ATSR-2

Die im Folgenden für die Analysen verwendeten Daten der einzelnen Regionen sind im Anhang A.7.1 dargestellt. In Abbildung 6.2 sind die nach Gebietstypen zusammengefassten ATSR-2 Daten aufgezeigt.

Über den Ozeanen der Nordhalbkugel liefern die Algorithmen SWANSEA, ORAC und Ensemble des ATSR-2 Instruments im Rahmen ihrer Ungenauigkeiten konsistente Werte. Der ADV Algorithmus weist bei konstant höheren Werten teilweise eine Verschiebung der Maxima auf. Auf der Südhalbkugel zeigt sich über Ozean ein ähnliches Bild, allerdings weist hier der ORAC Algorithmus systematisch frühere und höhere Maxima auf als die Algorithmen SWANSEA und Ensemble (siehe Anhang A.7.1).

Über Land können drei verschiedene unterschiedliche Verhalten ausgemacht werden. Diese lassen sich zusammenfassen in Wüstengebiete, Südhalbkugel südlich von -15°N und den restlichen Landmassen. In den Aerosol Retrieval über Wüsten sind die Daten der Algorithmen SWANSEA, ORAC und Ensemble auf der Nordhalbkugel konsistent in absoluter Höhe und Verlauf mit erhöhten Maximalwerten in den gemäßigten nördlichen Breiten bei SWANSEA. ADV zeigt einen ähnlichen Verlauf mit geringerer Amplitude und niedrigeren Absolutwerten. Südlich vom -15°N Breitenkreis zeigen die vier Algorithmen im Jahresverlauf Ähnlichkeiten, allerdings mit einem deutlichen Bias zwischen den einzelnen Algorithmen. Über den Wüsten in diesen Gebieten zeigt ADV verhältnismäßig niedrigere Werte auf. Bei der Betrachtung der Aerosol Retrieval über Land auf der Nordhalbkugel

6. Konsistenzbetrachtungen

und in Äquatornähe ist eine deutliche Konsistenz zwischen allen vier betrachteten Algorithmen und soweit vorhanden zu von AERONET Bodenstationen gemessenen Daten zu beobachten (siehe Anhang A.7.1).

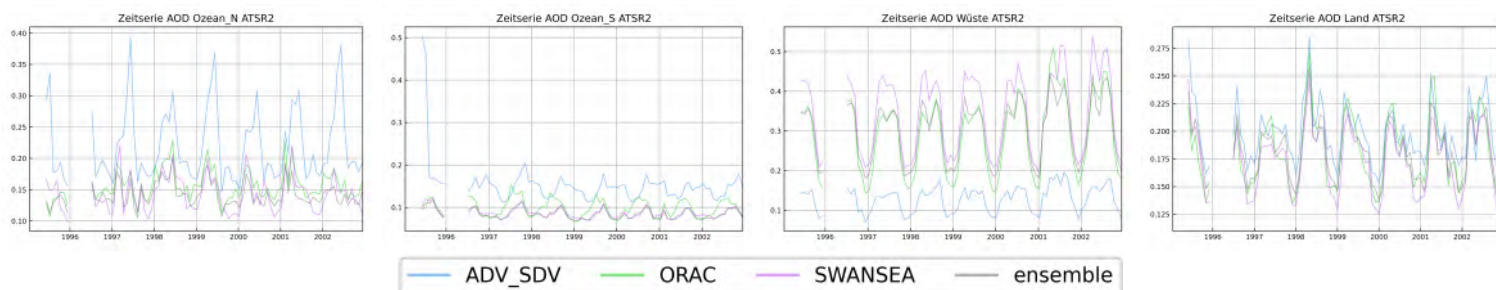


Abbildung 6.2.: Darstellung der ATSR-2 Daten der Algorithmen ORAC, SWANSEA, ADV und Ensemble in den vier unterschiedlichen Gebieten: Ozean Nordhalbkugel, Ozean Südhalbkugel, Wüsten und Land. Die Einzeldaten der verschiedenen zusammengefassten Regionen befinden sich im Anhang A.7.1.

AATSR

Die Daten der einzelnen Regionen, die im Folgenden für die Analysen verwendet werden, sind im Anhang A.7.2 dargestellt. In Abbildung 6.3 sind die nach Gebieten zusammengefassten AATSR Daten aufgezeigt.

Die AATSR Daten der Algorithmen SWANSEA, ORAC und Ensemble weisen über den Ozeanen der Nordhalbkugel eine große Konsistenz auf, wohingegen über den Ozeanen auf der Südhalbkugel ORAC deutlich höhere und um ca. 3 Monate frühere Maxima aufweist. ADV weist sowohl auf der Nord- als auch auf der Südhalbkugel höhere Maximalwerte auf als die anderen Algorithmen (siehe 6.3 Bild 1 und 2).

Über Land zeigen sich analoge Verhältnisse wie bei den ATSR-2 Daten. Für die drei beschriebenen Gebiete: Wüstengebiete, Südhalbkugel südlich von -15°N und die restlichen Landmassen, ergibt sich somit Folgendes: Über Wüsten sind die Daten der Algorithmen SWANSEA, ORAC und Ensemble auf der Nordhalbkugel konsistent in absoluter Höhe und Verlauf. ADV zeigt einen ähnlichen, deutlich abgeschwächten Jahresgang mit deutlich niedrigeren Absolutwerten (siehe 6.3 Bild 3). Südlich von dem -15°N Breitenkreis zeigen die vier Algorithmen im Jahresverlauf Ähnlichkeiten, allerdings mit einem deutlichen Bias zwischen den einzelnen Algorithmen, über den Wüsten zeigt ADV auch in diesen Gebieten verhältnismäßig niedrigere Werte auf (siehe Anhang A.7.2).

Bei der Betrachtung der Aerosol Retrieval über Land auf der Nordhalbkugel und in Äquatornähe ist deutlich eine Konsistenz zwischen allen vier betrachteten Algorithmen und, soweit vorhanden, zu von AERONET Bodenstationen gemessenen Daten zu beobachten. Im Vergleich zu den ATSR-2 Daten zeigt sich hier deutlich ein konsistenteres Bild zwischen Satelliten- und Bodenmessungen (siehe Anhang A.7.2, A.7.1).

6.1. Unterschiedliche Algorithmen für gleiche Instrumente

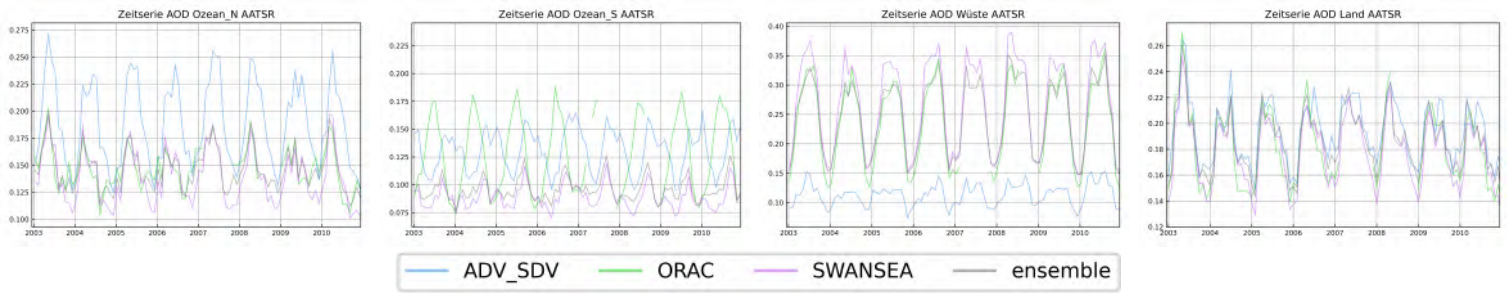


Abbildung 6.3.: Darstellung der AATSR Daten der Algorithmen ORAC, SWANSEA, ADV und Ensemble in den vier unterschiedlichen Gebieten: Ozean Nordhalbkugel, Ozean Südhalbkugel, Wüsten und Industrieländer. Die Einzel-daten der verschiedenen zusammengefassten Regionen befinden sich im Anhang A.7.2.

SLSTR

Für SLSTR liegen Daten für einen relativ kurzen Zeitraum vor, dies führt dazu, dass einzelne Fehler in Monatsdaten oder ungewöhnliche Ereignisse einen größeren Einfluss auf das Gesamtbild der Daten und der Konsistenz zwischen den Algorithmen haben. Die Zeitserien sind auch für diesen Zeitraum für die einzelnen Regionen im Anhang A.7.3 dargestellt. Die nach unterschiedlichen geographischen Begebenheiten zusammengefassten Daten sind in Abb. 6.4 gezeigt.

Über den Ozeanen der Südhalbkugel weist SDV höhere Werte auf, als die anderen drei Algorithmen, im Jahresverlauf zeigen alle vier eine große Konsistenz auf. Auf der Nordhalbkugel sind hier größere Inkonsistenzen zu beobachten. Während SWANSEA, Ensemble und SDV im Verlauf große Ähnlichkeiten zeigen, SDV hierbei bei höheren Absolutwerten, sind die ORAC Daten teilweise stark verschoben. Dies tritt vor allem über dem Atlantik auf, was hier ein Zusammenfassen der Nördlichen Ozeane erschwert (siehe Anhang A.7.3).

Bei der Betrachtung der unterschiedlichen Algorithmen-daten über Wüsten im Norden, wie in Asien und in Nord Amerika, fällt auf, dass SWANSEA hier einen deutlich veränderten Verlauf zeigt im Vergleich zu den anderen drei im Verlauf konsistenten Algorithmen, die sich hauptsächlich in der absoluten Höhe unterscheiden. SWANSEA weist ein Minimum am Minimum und am Maximum der anderen Algorithmen und je ein Maximum zwischen diesen auf. ORAC zeigt über allen Wüsten, allerdings besonders deutlich auf der Südhalbkugel, höhere Absolutwerte auf als die anderen Algorithmen, wobei SDV niedrigere Werte aufweist als Ensemble und außerhalb von Asien auch SWANSEA (siehe Anhang A.7.3).

Über nicht wüstenbedecktem Land zeigt sich bei der Betrachtung der Daten, dass die Algorithmen in absoluter Höhe und im Jahresgang konsistenter sind, je näher die Region am Äquator liegt. Je nördlicher desto höher werden die Maxima bei SDV und desto kleiner die Amplitude des Jahresgang und der Durchschnittsabsolutwert von ORAC im Verhältnis zu den anderen Algorithmen (siehe Anhang A.7.3).

6. Konsistenzbetrachtungen

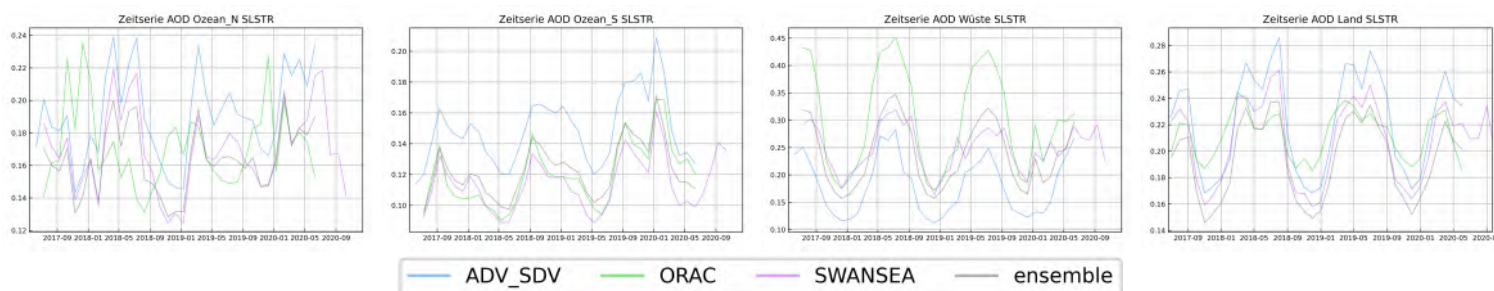


Abbildung 6.4.: Darstellung der SLSTR Daten der Algorithmen ORAC, SWANSEA, ADV und Ensemble in den vier unterschiedlichen Gebieten: Ozean Nordhalbkugel, Ozean Südhalbkugel, Wüsten und Industrieländer. Die Einzeldaten der verschiedenen zusammengefassten Regionen befinden sich im Anhang A.7.3.

6.1.2. IASI

Es werden hier zur besseren Vergleichbarkeit die IASI Daten ab Februar 2011 betrachtet, da zuvor beim MAPIR Algorithmus ein kleinerer Teilbereich der Erdoberfläche abgedeckt wird (0° bis 40°N und -80° bis 120°O). Ab Februar 2011 wächst dieser Bereich auf -60° bis 60°N über den gesamten Breitenkreis an. In Regionen, die nicht komplett in diesem Bereich liegen, ist ein Vergleich zwischen MAPIR und den anderen Algorithmen schwer möglich.

Für IASI werden die gleichen Regionen betrachtet wie bisher bei den Dual-view-Instrumenten, um hier eine bessere Vergleichbarkeit zu schaffen (siehe Anhang A.7.4). Hier stellt sich allerdings ein Zusammenfassen nach geografischen Besonderheiten, wie beispielsweise Wüsten, nur in Kombination mit der geografischen Breite als aussagekräftig heraus. Durch die hohen Staubaufkommen im sogenannten Dust Belt ergibt sich hier eine für Analysen der IASI Daten wichtige Region, die gesondert betrachtet wird. Der Dust Belt erstreckt sich vom Äquator bis zum 40. Längengrad Nord und vom -80 bis 120 Breitengrad Ost und umfasst somit neben der Sahara und den Asiatischen Wüsten auch weitere Teile Asiens und Afrikas und angrenzende Bereiche über Ozean. Innerhalb des Dust Belts zeigen alle 5 Algorithmen einen konsistenten Verlauf, allerdings mit teilweise großen Unterschieden in absoluter Höhe und Amplitude (siehe Abb. 6.5). Die Daten außerhalb des Dust Belts sind im Anhang A.7.4 zu sehen.

Über Meer unterscheidet sich die Betrachtung deutlich zwischen dem Atlantik und dem pazifischen und indischen Ozean. Über dem Atlantik, wo durch die Wüstenstaubverwehungen der Sahara und der Asiatischen Wüsten auch vergleichsweise hohe AOD-Werte gemessen werden, zeigen die Algorithmen konsistente Verläufe mit ähnlichen Amplituden aber bei variierenden Absolutwerten. Über den anderen Ozeanen ist allerdings wenig Konsistenz zwischen den Algorithmen zu beobachten. Hier zeigen sich teilweise bis zu gegenphasig verschoben Verläufe mit unterschiedlichen Amplituden und bei unterschiedlichen Höhen (siehe Anhang A.7.4).

6.1. Unterschiedliche Algorithmen für gleiche Instrumente

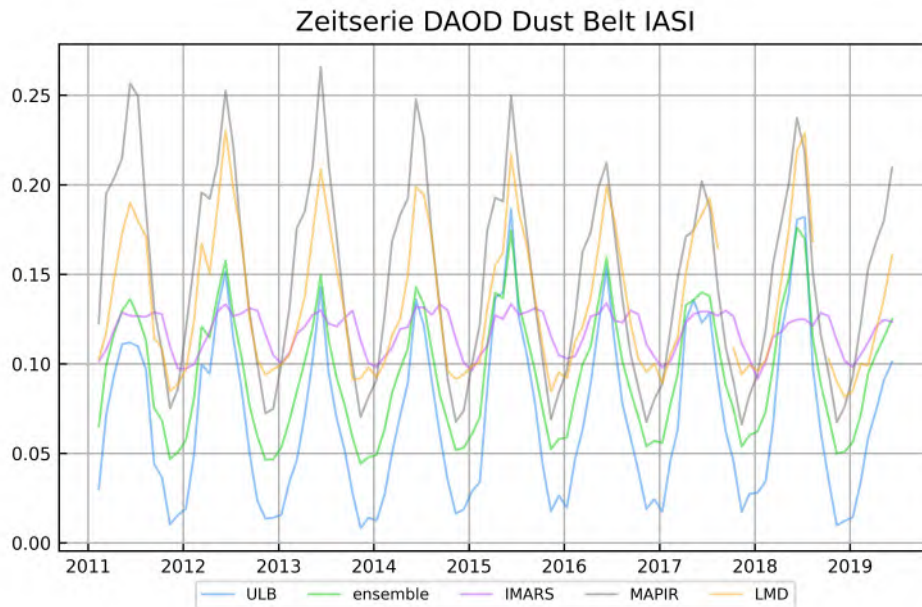


Abbildung 6.5.: Darstellung der IASI Daten der Algorithmen ULB, LMD, MAPIR, IMARS und Ensemble im Dust Belt.

Über Land der Nordhalbkugel im Bereich von 60°N bis zum Pol sind im Verlauf der Daten keine Konsistenzen zwischen den Algorithmen zu beobachten. In Regionen zwischen dem Dust Belt und dem beschriebenen Bereich im Norden weisen die Algorithmen MAPIR und ULB in Verlauf, Amplitude und Absolutwerten konsistente Daten auf, die anderen Algorithmen unterscheiden sich jedoch deutlich (siehe Anhang A.7.4).

In Äquatornähe auf der Südhalbkugel herrscht ein Tageszeitenklima vor, dadurch ergeben sich weniger ausgeprägte Amplituden in den Jahresgängen. Dies erschwert einen Vergleich der unterschiedlichen Algorithmen in diesen Regionen. Es sind hier ähnliche Verläufe bei ULB, MAPIR und Ensemble zu beobachten.

Weiter südlich sind teilweise Konsistenzen zwischen ULB, MAPIR und IMARS zu beobachten, beispielsweise über Argentinien, allerdings sind in weiten Teilen der Südhalbkugel große Inkonsistenzen zu beobachten (siehe Anhang A.7.4).

Bei der Betrachtung der Algorithmen IMARS, LMD und Ensemble sind einige Besonderheiten auffällig. IMARS zeigt zwischen Äquator und dem $30.$ Breitenkreis AOD-Werte zwischen 0,12 und 0,22 auf und mit einer deutlichen Abgrenzung außerhalb dieses Bereiches AOD-Werte zwischen 0,005 und 0,06.

LMD zeigt außerhalb des Dust Belts nicht den Saisonalen Verlauf, den die anderen Algorithmen aufzeigen sondern deutlich unregelmäßigere Schwankungen.

Das Ensemble zeigt resultierend aus der Zusammensetzung aus den anderen Algorithmen Einflüsse der beschriebenen Auffälligkeiten der anderen Algorithmen (siehe Anhang A.7.4).

6.2. Ähnliche Dual-view-Instrumente mit gleichen Algorithmen in einer Zeitreihe

Für die Betrachtung längerer Zeitserien werden Daten von Instrumenten einer Instrumentenserie zusammengesetzt, wie beispielsweise bei den Dual-view-Instrumenten ATSR-2, AATSR und SLSTR. Zwischen den jeweiligen Instrumenten gibt es bei den meisten Algorithmen Unterschiede, diese können sowohl im Jahresverlauf, hier vor allem in der Amplitude der Schwankungen, als auch in der absoluten Höhe, einem Bias aufweisen. Dieser Bias kann beispielsweise im Vergleich zu den AERONET Messungen ermittelt werden, unterscheidet sich allerdings deutlich regional [59].

Für die Konsistenzbetrachtungen zwischen den Daten des jeweils gleichen Algorithmus der einzelnen Instrumenten werden die Klimatologien der Instrumente in der betrachteten Region genutzt. Diese Betrachtung liefert ein aussagekräftigeres Bild als der Vergleich der einzelnen Jahre. Bei SLSTR ist die Klimatologie als Mittelwert aus vier Jahren allerdings weniger aussagekräftig als bei den anderen beiden Instrumenten. Beispielhaft sind die Vergleiche für vier ausgewählte Regionen und jeweils einem Algorithmus in Abb. 6.6 abgebildet, ergänzt werden diese durch weitere Abbildungen im Anhang A.7.5.

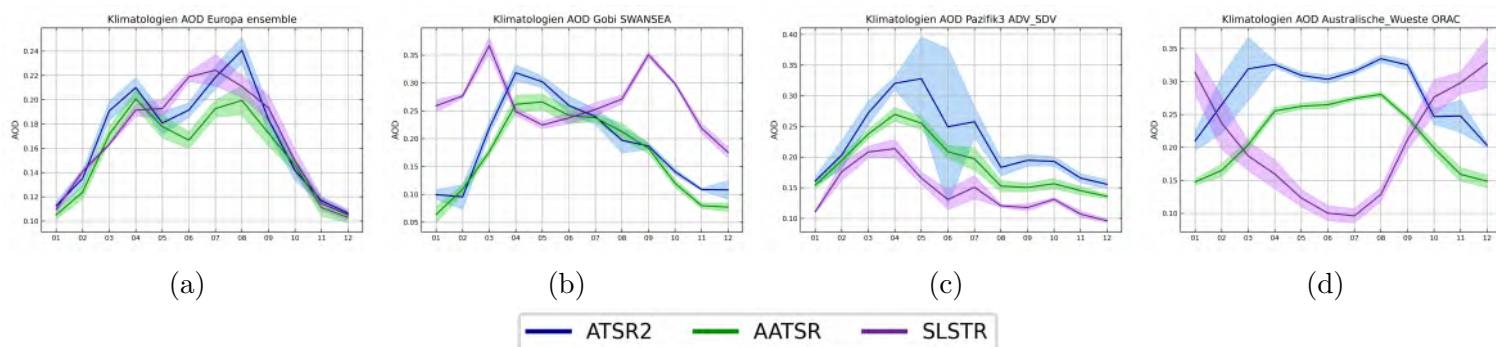


Abbildung 6.6.: Beispielhafter Vergleich der Klimatologien von ATSR-2, AATSR und SLSTR Daten jeweils für einen ausgewählten Algorithmus in den vier unterschiedlichen Regionen: a) Europa (Ensemble), b) Wüste Gobi (SWANSEA), c) Pazifik3 (ADV/SDV) und d) Australien (ORAC). Die Daten der weiteren Regionen und Algorithmen befinden sich im Anhang A.7.5.

Die Daten der Instrumente ATSR-2 und AATSR weisen bei allen Algorithmen deutlich mehr Konsistenz auf als im Vergleich zu SLSTR. Im Verlauf sind sie weltweit sehr ähnlich, über Wüsten und deutlicher über der Südhalbkugel sind Unterschiede in der absoluten Höhe zu beobachten.

In diesen Gebieten sind auch die Unterschiede von SLSTR zu den anderen beiden Instrumenten am größten. Über Wüsten auf der Südhalbkugel sind kaum Konsistenzen zu beobachten. Die Daten von SLSTR zeigen hier mit überwiegend höherer Amplitude und niedrigeren Durchschnitts-AOD-Werten sogar einen gegenphasigen Verlauf zu den ande-

ren beiden Instrumenten. Dieser phasenverschobene, teilweise bis zu gegenphasige, Verlauf mit kleineren absoluten AOD-Werten und größeren Amplituden zeigt sich auch über anderen Ländern der Südhalbkugel wie beispielsweise über Argentinien (siehe Anhang A.7.5). Über dem Ozean der Südhalbkugel zeigt nur ORAC ein solches gegenphasiges Bild. Die anderen Algorithmen zeigen hier nur leicht höhere Absolutwerte auf.

Über den Ozeanen der Nordhalbkugel weisen die Instrumente bei allen Algorithmen sehr große Konsistenzen in Verlauf und Höhe auf. Über Land auf der Nordhalbkugel weist SLSTR höhere Werte auf je nördlicher die betrachtete Region liegt, bei ORAC zeigt sich zusätzlich noch eine geringere Amplitude (siehe Anhang A.7.5).

Über den Wüsten der Nordhalbkugel zeigen sich unterschiedliche Zusammenhänge: Der SDV Algorithmus des SLSTR Instruments weist bei einem ähnlichen Verlauf deutlich höhere Werte auf als ADV bei den Instrumenten ATSR-2 und AATSR. Dies liegt darin begründet, dass bei ADV Daten über helle Oberflächen ausmaskiert werden und dies bei SDV erst in der nächsten Version erfolgen wird [60]. ORAC zeigt in den SLSTR Daten ähnliche Verläufe mit größerer Amplitude und höheren Durchschnittswerten als in den ATSR-2 und AATSR Daten. Bei SWANSEA zeigen die Wüsten in Asien bei SLSTR das in Kapitel 6.1.1 beschrieben außergewöhnliche Verhalten. Über der Sahara und der nahe liegenden Arabischen Halbinsel sind die Werte bei SLSTR niedriger als bei den anderen beiden Instrumenten. Bei dem Ensemble aus diesen Algorithmen ergibt sich für die beiden letztgenannten Wüsten eine gute Konsistenz zwischen den einzelnen Instrumenten und bei den Asiatischen Wüsten ein konsistenter Verlauf mit ähnlicher Amplitude allerdings höheren Durchschnittswerten bei SLSTR im Vergleich zu den Instrumenten ATSR-2 und AATSR.

In Regionen an Land in Äquatornähe auf der Südhalbkugel ist das Verhalten bei den SLSTR Daten ähnlich zu dem bei den anderen Instrumenten, unterscheiden sich allerdings in der Durchschnittshöhe und der Amplitude. In diesem Breitengraden auf dem afrikanischen Kontinent und in Indonesien weist SLSTR höhere Werte und eine größere Amplitude auf, in Südamerika, zum Beispiel in Brasilien, sind im Gegensatz dazu niedrigere Durchschnittswerte und kleinere Amplituden zu beobachten (siehe Anhang A.7.5).

6.3. Konsistenz der AOD-Komponenten

Wie in Kapitel 3.2 beschrieben, setzt sich die gesamte AOD aus der FmAOD, der DAOD und der SSAOD zusammen.

In den Algorithmen ORAC, ADV/SDV, SWANSEA und dem Ensemble der Dual-view-Instrumente werden sowohl die AOD als auch FmAOD ausgegeben. Dies ermöglicht einen direkten Vergleich der AOD und der FmAOD Komponente mit der DAOD Komponente des IASI Instruments. Die Komponente der Meersalzaerosole wird aus einer Reanalyse, EAC4 (ECMWF Atmospheric Composition Reanalysis 4) des ECMWF (European Centre for Medium-Range Weather Forecasts), zu Vergleichszwecken hinzugezogen. Für eine Konsistenz der Instrumente und Variablen müsste im Rahmen der Uncertainties die Summe aus FmAOD, DAOD und SSAOD die Gesamt AOD ergeben.

Es werden im Folgenden für AOD und FmAOD die Daten des Ensemble verwendet, da

6. Konsistenzbetrachtungen

diese in 6.1.1 konsistent zu den anderen Algorithmen waren und vom Absolutwert einen Mittelweg darstellen. Es werden außerdem beispielhaft die Jahre 2008 bis 2010 betrachtet, da hier sowohl die Daten von IASI und AATSR vorliegen und AATSR eine bessere Übereinstimmung mit AERONET gezeigt hat als SLSTR. Für die DAOD werden im Folgenden die Daten des ULB Algorithmus verwendet, da dieser, wie in Kapitel 6.1.2 untersucht, die schlüssigsten Ergebnisse zeigt.

Bei einer weltweiten Betrachtung liegt die Summe aus FmAOD von AATSR, SSAOD von EAC4 und DAOD des ULB Algorithmus von IASI im Bereich der Unsicherheiten der AOD. Hier sind somit die unterschiedlichen Größen der verschiedenen Instrumente konsistent, siehe Abb. 6.7.

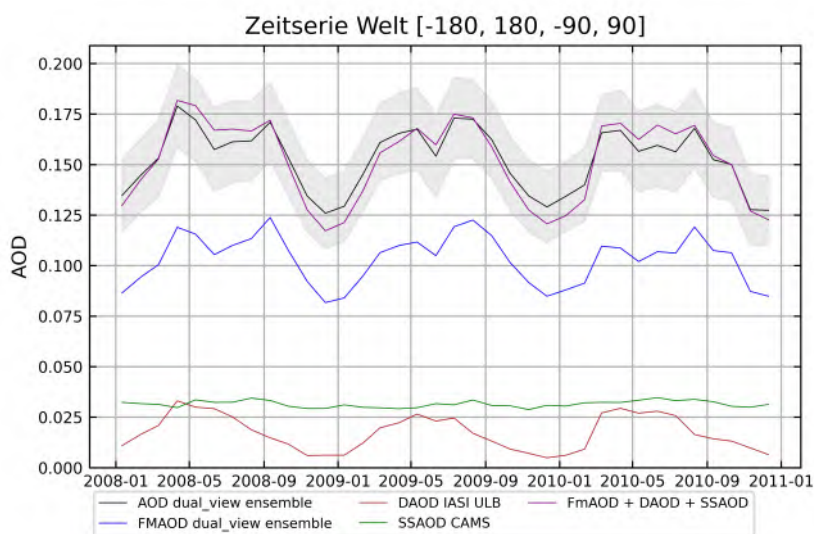


Abbildung 6.7.: Vergleich der AOD mit Fehlerbereich (Ensemble AATSR) und den AOD-Komponenten FmAOD (Ensemble AATSR), DAOD (ULB IASI), SSAOD (EAC4) und der Summe aus FmAOD, DAOD und SSAOD weltweit im Zeitraum von 2008 bis 2010.

Beispielhaft werden in Abb. 6.8 die folgenden sechs Regionen genauer betrachtet: ein zentral in der Sahara gelegener Bereich (1°O bis 37°O , 17°N bis 32°N), ein Bereich über Ozean mit wenig Sea Salt Aerosolen (-20°O bis -1°O , -20°N bis -1°N), zwei Bereiche über Ozean mit viel Sea Salt Aerosolen (20°O bis 80°O , -60°N bis -40°N und -40°O bis -20°O , 40°N bis 60°N) und zwei Bereiche über Industrieländern (Nord Amerika (-135°O bis -55°O , 13°N bis 60°N) und Europa (0°O bis 50°O , 36°N bis 60°N)).

Bei den Bereichen über Industrieländern und über Ozeanen mit wenig Meersalzaerosolen zeigt sich eine gute Übereinstimmung der Gesamt AOD mit der Summe der einzelnen Komponenten (siehe Abb. 6.8).

Über der Sahara liegt die Summe der Komponenten unter der gemessenen Gesamt-AOD. In den Gebieten über Ozeanen mit viel Meersalzaerosolen liegt die Summe der Komponenten teilweise deutlich über der Gesamten gemessenen AOD. Diese Gebiete liegen entweder auf der Südhalbkugel nahe der Antarktis oder weit nördlich, wo über weitere Strecken hin-

6.4. Diskussion der Konsistenzbetrachtungen

weg Winde hohe Geschwindigkeiten und somit mehr Meersalz aufnehmen können (siehe Abb. 6.8).

Wird bei diesen Betrachtungen die Summe aus den verschiedenen Teil-AOD Komponenten mit der Gesamt AOD von CAMS verglichen, zeigen sich ähnliche Inkonsistenzen über den Gebieten über Ozean mit viel SSAOD und über der Sahara. Allerdings sind über den zwei betrachteten Regionen über Industrieländern hier ebenfalls größere Inkonsistenzen zu beobachten (siehe Anhang A.7.6).

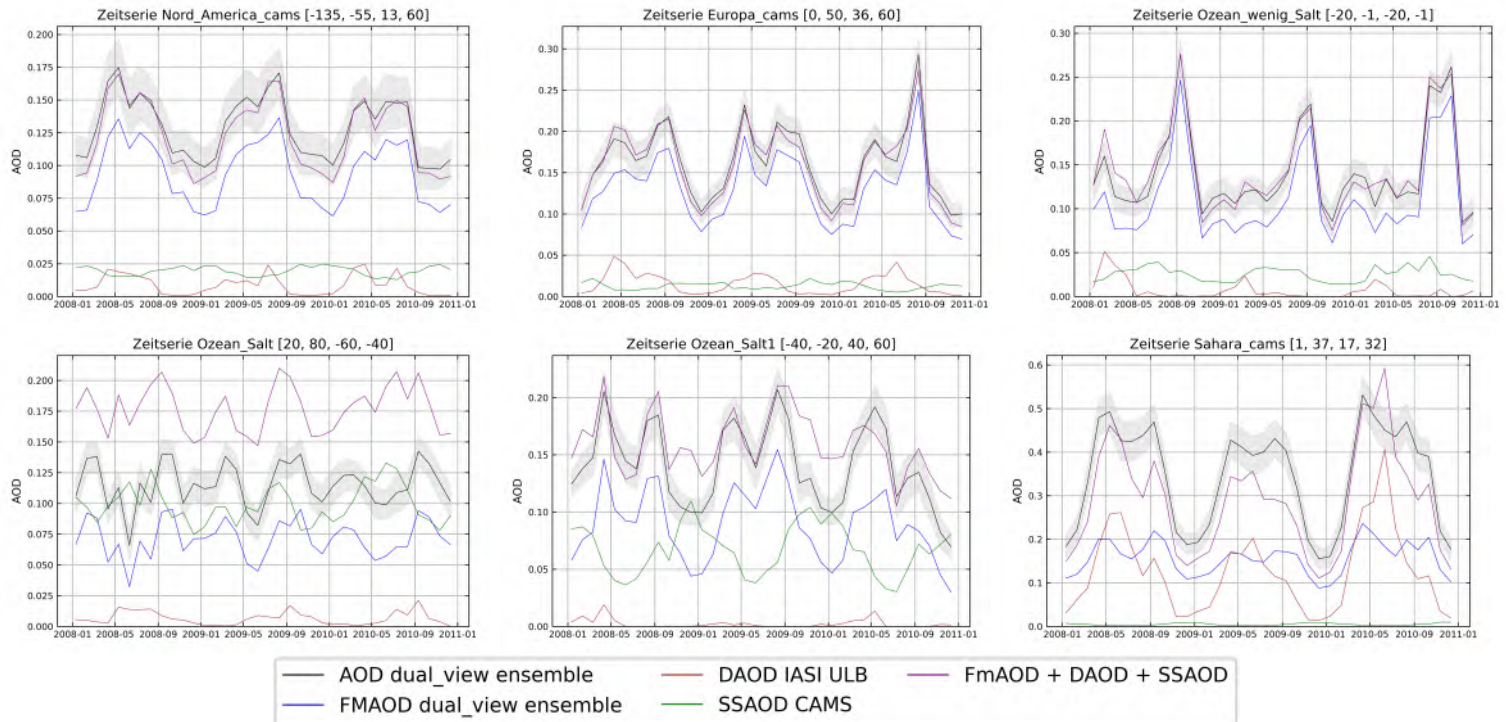


Abbildung 6.8.: Vergleich der AOD mit Fehlerbereich (Ensemble AATSR), FmAOD (Ensemble AATSR), DAOD (ULB IASI), SSAOD (EAC4) und der Summe aus FmAOD, DAOD und SSAOD im Zeitraum von 2008 bis 2010 in den Regionen: Nord Amerika, Europa, Ozean mit wenig Meersalzaerosolen, 2 Regionen Ozean mit viel Meersalzaerosolen und Sahara.

6.4. Diskussion der Konsistenzbetrachtungen

Bei den Daten von IASI sind die Algorithmen auf den Dust Belt optimiert und sind innerhalb von diesem konsistent und belastbar. Außerhalb des Dust Belts sind diese allerdings durch die relativ großen Unterschiede in den Algorithmen nur bedingt belastbar. Durch den Vergleich mit den Modelldaten und den Messungen der Dual-view-Instrumenten deutet sich hier der ULB Algorithmus als am zuverlässigsten an. Für eine weitere Nutzung der IASI Daten wird somit dieser oder eine Kombination der Algorithmen genutzt. Letzteres kann vor allem für die Analyse einzelner Ereignisse mit IASI Daten zu besseren

6. Konsistenzbetrachtungen

Ergebnissen führen.

Die Dual-view-Instrumente ATSR-2 und AATSR zeigen über Land nördlich von 15°S , ausgenommen der Wüsten, konsistente und damit belastbare Daten, für SLSTR weichen die Daten des ORAC Algorithmus deutlich ab. Je weiter nördlich die betrachtete Region liegt, desto größere Abweichungen treten hier auf. Südlich dieser Grenze sind die Daten im Verlauf aber nicht in den absoluten Daten bei SLSTR konsistent. Bei ATSR-2 und AATSR zeigen sich hier große Inkonsistenzen. Die Algorithmen ADV bzw. SDV zeigen deutliche Unterschiede zu den anderen Algorithmen über Wüsten und Ozeanen. ORAC zeigt über Meer bei ATSR-2 und AATSR auf der Südhalbkugel und bei SLSTR auf der Nordhalbkugel deutliche Unterschiede mit Phasenverschiebung und teilweise in den absoluten Werten. Diese Veränderung zwischen AATSR und SLSTR bei der Betrachtung der Unterschiede zwischen Süd- und Nordhalbkugel könnte auf den Einfluss der geänderten Blickrichtung zurückzuführen sein. SLSTR blickt zusätzlich zur Nadir Richtung im 55° Winkel nach hinten, ATSR-2 und AATSR im 55° Winkel nach vorne [61]. Die Schwierigkeiten über Wüsten lassen sich durch hohe Bodenelligkeit, die das Aerosolretrieval erschwert, erklären [22].

Der Vergleich der unterschiedlichen Instrumente bei jeweils gleichen Algorithmen zeigt teilweise bei gleichem Verlauf einen Unterschied in der absoluten Höhe. Für die weiteren Betrachtungen im Rahmen dieser Arbeit wird aus diesem Grund eine Biaskorrektur, siehe 5.3, durchgeführt für das Erstellen einer fortlaufenden Zeitserie von 1995 bis 2020 und einer hierdurch möglichen besseren Trendbetrachtung. Eine besondere Schwierigkeit resultiert hier aus der Datenlücke zwischen April 2012 und Juli 2017. Auch zeigen die Daten teilweise unterschiedliche Amplituden und Jahresverläufe. Die Fortführung der Zeitserie wird auch durch die in Kapitel 6.2 beschriebenen Unterschiede in Jahresgang und Amplitude erschwert.

Die Betrachtung der wissenschaftlichen Konsistenz der unterschiedlichen Teilkomponenten der AOD zeigt, neben den konsistenten Daten über nichtwüstenbedecktem Land und über Ozean mit wenig Sea Salt Aerosolen, über der Sahara und über Ozean mit großem Sea Salt Aerosol Aufkommen Inkonsistenzen auf.

Über der Sahara, wo die Summe der einzelnen AOD-Komponenten größtenteils kleiner als die gesamt AOD ist, erschwert die Wüste durch die helle Bodenoberfläche das Retrieval von AOD und FmAOD, was zu den beobachteten Unterschieden führen könnte.

Über den Bereichen der Ozeane mit viel Sea Salt Aerosol liegt die Summe der Teilkomponenten der AOD teilweise deutlich über der AOD aus dem Satellitenretrieval. In ebendiesen Gebieten sind allerdings in den Aerosolretrieval der Dual-view-Instrumente große Teile ausmaskiert, was hier zu einer Verfälschung des Mittels über die Regionen führen könnte. Dies führt wahrscheinlich auch zu den ähnlichen Inkonsistenzen bei Vergleich mit den CAMS AOD Daten, da hier in der Summe der Einzelkomponenten über die FmAOD die selben Fehlerquellen auftreten. Die Inkonsistenzen zwischen Summe der AOD-Teilkomponenten und der CAMS total AOD in den Industrieländern könnten, da die AERONET Daten hier die Satellitendaten stützen, auch auf Unsicherheiten in den

Modelldaten hinweisen.

Die Vergleich der Satellitendaten mit AERONET weisen zu späteren Zeitpunkten (vor allem im aktiven Messzeitraum des AATSR-Instruments) größere Konsistenzen auf. Dies lässt sich durch eine steigende Anzahl an AERONET Stationen erklären.

Die Konsistenzen ist hier auch Regionenabhängig. Beispielsweise weisen Regionen wie Nord Amerika und Europa große Konsistenzen auf, während über Asien, der Sahara und über den Ozeanen weniger Konsistenzen zwischen AERONET und Satellitenmessungen beobachtet werden können. Dies lässt sich über die Verteilung der AERONET Stationen erklären. In Europa und Nord Amerika ist eine repräsentative Abdeckung der Region durch die hohe Anzahl der Stationen möglich. Über Ozean, wo nur wenige Stationen auf Insel in den untersuchten Bereichen liegen, ist eine repräsentative Abdeckung durch diese Stationen schwer möglich.

Am Beispiel von China und auch dem gesamten Asiatischen Raum ist der Einfluss deutlich zu erkennen. Da hier die Stationen hauptsächlich in den industriereichen Küstengebieten messen und die industrieärmeren Gebiete im Landesinneren unterrepräsentiert sind, sind die Absolutwerte der AOD der AERONET Stationen deutlich höher als die der Satellitenmessungen die über die gesamte Region mitteln [62, 63].

Auch in den großräumigen Betrachtungen von Nord- und Südhalbkugel und der globalen Betrachtung ist der Einfluss der nicht repräsentativen Verteilung der AERONET Stationen als ein Grund für die Unterschiede zwischen Boden- und Satellitenmessungen zu identifizieren.

7. Trends in den Aerosoleigenschaften aus Satellitendaten

Bilden die Daten eines Instruments ein konsistentes Bild, können aus diesen auch Informationen über einen langfristigen Trend abgeleitet werden. Diese Trends werden wie in Kapitel 5.2 beschrieben berechnet.

Solche langfristigen Trends zeigen auch den Einfluss des Klimawandels auf die Atmosphäre der Erde sehr deutlich. Für die Betrachtung von Ereignissen ist der Vergleich mit dem weitergeführten Trend auch wichtig, um hier zwischen langfristigen Entwicklungen und kurzzeitigen Anomalien durch Einzelereignisse unterscheiden zu können.

Nachdem die Trendbestimmung aus Satellitendaten beispielhaft mit Trends aus den AERONET Daten verglichen werden um hier Unterschiede, Schwächen und Probleme aufzuzeigen, werden großflächige Betrachtungen mittels Trendkarten beleuchtet. Gesondert werden dann die Regionen betrachtet die in den späteren Analysen der speziellen Ereignisse eine Rolle spielen: der Westen von Nord Amerika, Europa im Mittelmeerraum und Zentraleuropa und Australien.

Die verwendeten Darstellungen und Signifikanzbedingungen sind in Kapitel 5.2 erläutert.

7.1. Dual-view-Instrumente im Vergleich mit AERONET

Beispielhaft wird an den Regionen Europa und Asien im Zeitraum 2003 bis 2012 mit Daten des AATSR Instruments mit dem Ensemble Algorithmus sichtbar, welchen Einfluss eine repräsentative Verteilung von Stationen in einer Region auf die Konsistenz der Trends und der AOD aus Satellitenmessungen und AERONET hat, siehe Abb. 7.1.

Vergleicht man die Trends in der AOD aus dem Ensemble der AATSR Daten (Abb. 7.1 oben) mit den Trends von AERONET (Abb. 7.1 mitte), also gemittelten Trends der Stationen in der jeweiligen Region, sieht man in Europa eine relativ gute Übereinstimmung, in Asien unterscheiden sich jedoch sowohl der Trend als auch die absoluten Werte der AOD deutlich. Betrachtet man nun zur besseren Vergleichbarkeit nur die Pixel der Satellitendaten, in denen sich eine AERONET-Station befindet, (Abb. 7.1 unten) ergibt sich folgendes Bild: In Europa konvergiert der Trend etwas. In Asien ist deutlich zu erkennen, dass der Trend zwar noch positiv, aber nicht mehr signifikant ist und die absoluten AOD-Werte deutlich besser zu AERONET passen.

Diese Beobachtungen zeigen, dass die Verteilung der Stationen in der betrachteten Regionen einen großen Einfluss auf die Vergleichbarkeit von AERONET Trends und Trends aus Satellitendaten haben. In Europa, wo viele Stationen vergleichsweise repräsentativ

7.2. Großflächige Betrachtung der AOD Trends mittels Trendkarten

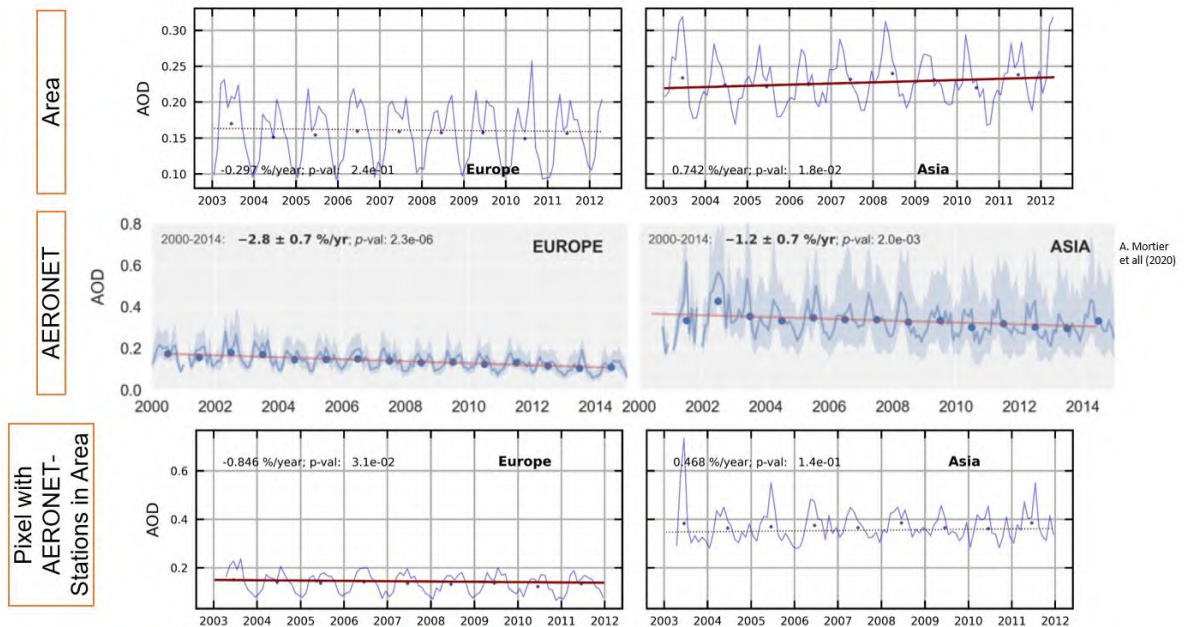


Abbildung 7.1.: Vergleich der AOD Trends. Links sind die Daten inklusive Trends in Europa und rechts die aus Asien. In der ersten Zeile sind die Daten und Trends von 2003 bis 2012 des Ensembles von AATSR dargestellt. Zeile zwei zeigt die Trends und Daten von AERONET in diesem Zeitraum, aus [64]. In Zeile drei sind die Daten des AATSR Ensembles dargestellt, wobei hier nur die Pixel berücksichtigt werden, in denen eine AERONET Station liegt, die zu den Daten in Zeile zwei beigetragen hat.

für die gesamte Region verteilt sind, passen Beobachtungen von AERONET und Satellitenmessungen großteils zusammen. In Asien, wo der Großteil der Stationen an der industriereichen Küste Chinas liegen und somit das Inland und vor allem der Norden der Region mit weniger von Menschen verursachten Aerosolen unterrepräsentiert ist, zeigt sich weniger Konsistenz zwischen AERONET und Satellitendaten [62, 63].

7.2. Großflächige Betrachtung der AOD Trends mittels Trendkarten

Für die Zeiträume 1995 bis 2002 (ATSR-2) und 2003 bis 2010 (AATSR) können jeweils Trendkarten erstellt werden. Exemplarisch sind in Abb. 7.2 zwei solche Trendkarten, hier für die Zeiträume 1995 bis 2002 (links) und 2003 bis 2010 (rechts), aus den Daten des Ensemble Algorithmus des ATSR-2 und des AATSR Instruments zu sehen. Für die anderen Algorithmen zeigen sich ähnliche Bilder (siehe Anhang A.8.1).

Zu sehen sind bei AATSR unter anderem deutlich steigende Trends über Indien und der Arabischen Halbinsel und stark fallende Trends über Brasilien und Teilen Westafrikas.

7. Trends in den Aerosoleigenschaften aus Satellitendaten

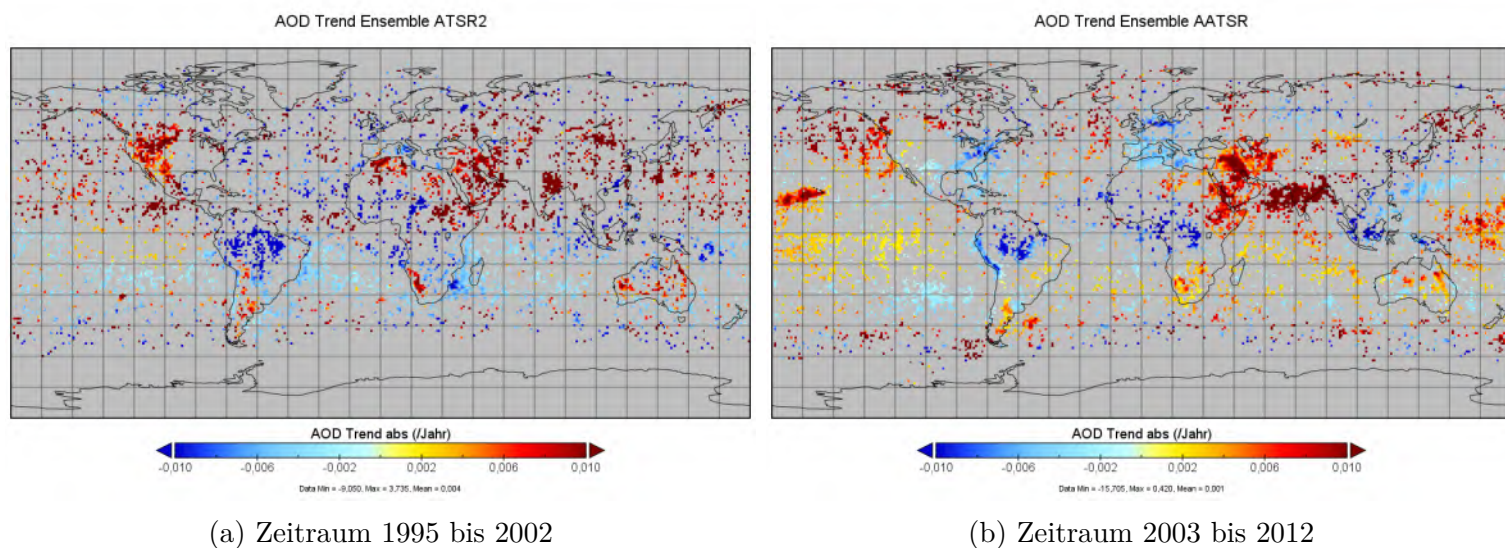


Abbildung 7.2.: AOD Trendkarten des Ensemble Algorithmus.

Über Europa und Nord Amerika sind großteils fallende Trends zu sehen, in Australien unterscheidet sich dies regional deutlich.

Bei ATSR-2 ist über größeren Teilen Asiens, vor allem Chinas, und auch über großen Teilen Nord Amerikas ein stark steigender Trend zu sehen. Dieser schwächt sich ab und kehrt sich teilweise sogar um im Zeitraum der AATSR Instruments. Dies ist beispielsweise mit dem Rückgang an Emissionen durch staatliche Beschränkungen zu erklären.

Eine Trendkarte über den gesamten Zeitraum der Dual-view-Instrumente ist aufgrund der nötigen Biaskorrektur und den zu berücksichtigenden Trendwechsel schwer zu realisieren und stark fehlerbehaftet.

7.3. Regionale Betrachtungen der Trends in AOD, FmAOD und DAOD

Für die drei Regionen, die im weiteren Verlauf der Arbeit eine größere Rolle spielen, werden die Trends in der AOD, der FmAOD und der DAOD genauer untersucht. Für die Analysen der Feuer in Kalifornien wird hier die Region Nord Amerika, West betrachtet, für die Feuer in Australien die Region Australien und für die Saharastaubereignisse in Deutschland die beiden Regionen Europa Zentral und Europa Mittelmeerraum. Die aufgrund der starken Trendumkehr interessante Region Asien wird in Kapitel 7.3.1 ebenfalls analysiert.

Bei den konsistenten Datensätzen kann der Trend bei jedem Algorithmus bestimmt und dann über die signifikanten Trends gemittelt werden, um eine zuverlässige Aussage über den Trend in der Region zu ermitteln. Bei Betrachtungen zu den einzelnen Ereignissen wird, wenn relevant, nur der Trend der betrachteten Daten miteinbezogen.

7.3.1. Asien

Ein Beispiel für deutliche Trendänderung aufgrund von Änderungen in Industrieemissionen ist Asien. Als Folge der Beschränkungen der Emissionen durch die chinesische Regierung 2008 ist hier ab 2008 eine deutliche Trendänderung zu sehen [65, 66]. Für den Zeitraum 1995 bis 2008 ergibt sich ein steigender Trend in der AOD von $0,00281 \pm 0,00059$ pro Jahr. Nach dem Trendwechsel zeigt sich ein fallender Trend von $-0,00840 \pm 0,00019$ pro Jahr, siehe Abb. 7.3. Dies bestätigt die Effektivität der von der chinesischen Regierung erlassenen Maßnahmen.

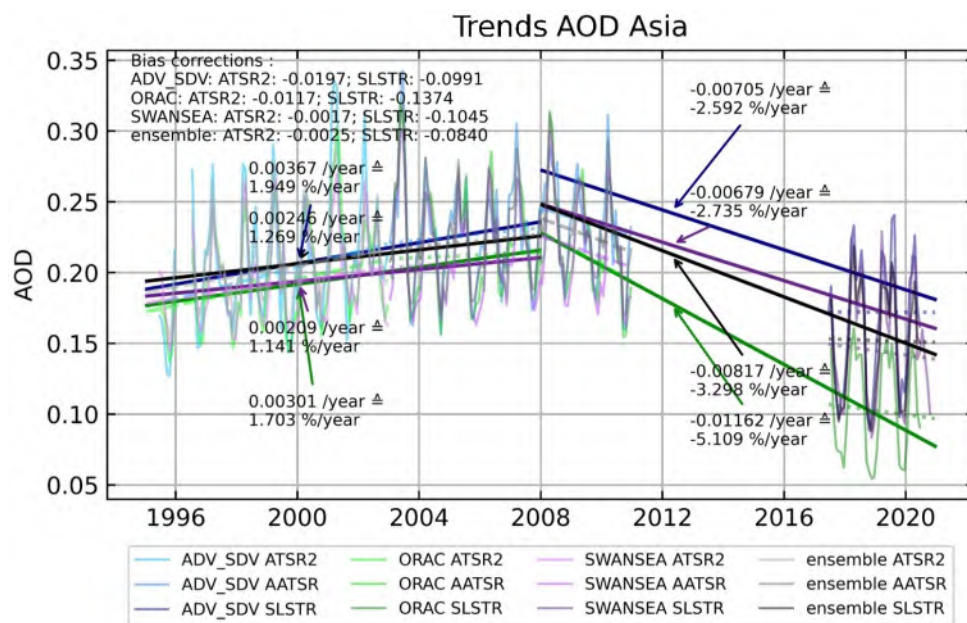


Abbildung 7.3.: Vergleich der AOD Trends für Asien.

7.3.2. Westen von Nord Amerika

Für die Betrachtungen der Feuer in Kalifornien sind vor allem die AOD und FmAOD über dem Westen der USA relevant. Der Trend in der AOD liegt hier bei $0,00071 \pm 0,00049$ pro Jahr und in der FmAOD bei $0,00059 \pm 0,00047$ pro Jahr über den Zeitraum 1995 bis 2020, siehe Abb. 7.4. In den Trendkarten 7.2 ist deutlich zu sehen, dass im Zeitraum 1995 bis 2002 die AOD großflächig im Westen der USA deutlich steigt. Im Zeitraum 2003 bis 2010 ist dieser Zuwachs deutlich geringer und hauptsächlich auf die Westküste beschränkt. Im Vergleich hat sich im Osten der USA von im Norden steigenden und im Süden leicht fallenden Trends im Zeitraum von 1995 bis 2002 zu fallenden Trends im gesamten Osten, wobei diese im Norden stärker fallen, gewandelt.

7. Trends in den Aerosoleigenschaften aus Satellitendaten

In der DAOD ist ein fallender Trend von $-0,00033 \pm 0,00051$ pro Jahr zu beobachten (siehe Anhang A.8.2). Innerhalb dieses großen Fehlerbereichs passen auch im Westen Nord Amerikas die Trends in den Größen AOD, FmAOD und DAOD zusammen. Auch hier ist es möglich, dass die Trendbestimmung durch den Wandel in der Industrie innerhalb des Zeitraumes des AATSR Instruments die Biaskorrektur verfälscht wird.

Trends AOD und FmAOD North America, West

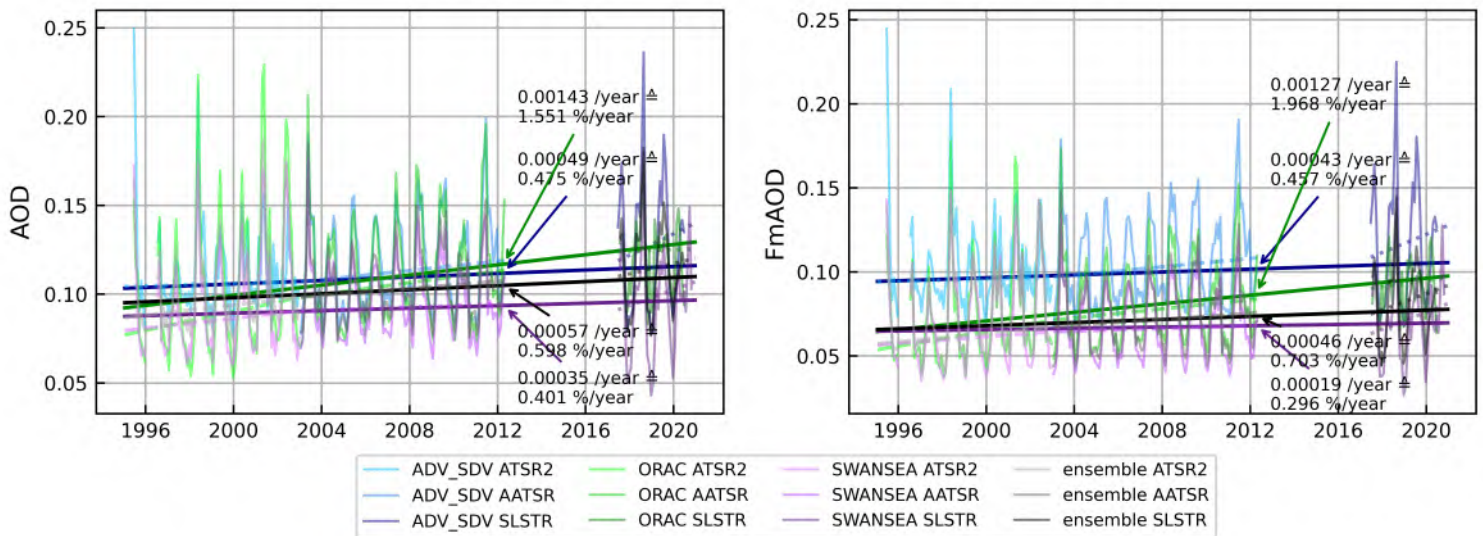


Abbildung 7.4.: Vergleich der AOD und FmAOD Trends im Westen von Nord Amerika.

7.3.3. Australien

Über Australien werden mit dem IASI Instrument in der DAOD fallende Trends von $-0,00063 \pm 0,00057$ pro Jahr ermittelt (siehe Anhang A.8.2). Dies passt im Rahmen der großen Fehlerbereiche auch zu den Trends in der AOD ($0,00048 \pm 0,00058$ pro Jahr) und der FmAOD ($0,00069 \pm 0,00038$ pro Jahr), siehe Abb. 7.5. Hier ist die Bestimmung der Trends bei den Dual-view-Instrumenten besonders schwierig, da auf der Südhalbkugel 2011 und 2012 erhöhte Werte auftreten. Außerdem erschweren die durch die großen Brände in Australien in den letzten Jahren stark steigenden Trends und hohe Mittelwerte der SLSTR Daten in Kombination mit der Datenlücke zwischen 2012 und 2017 die Biaskorrektur.

Trends AOD und FmAOD Australia

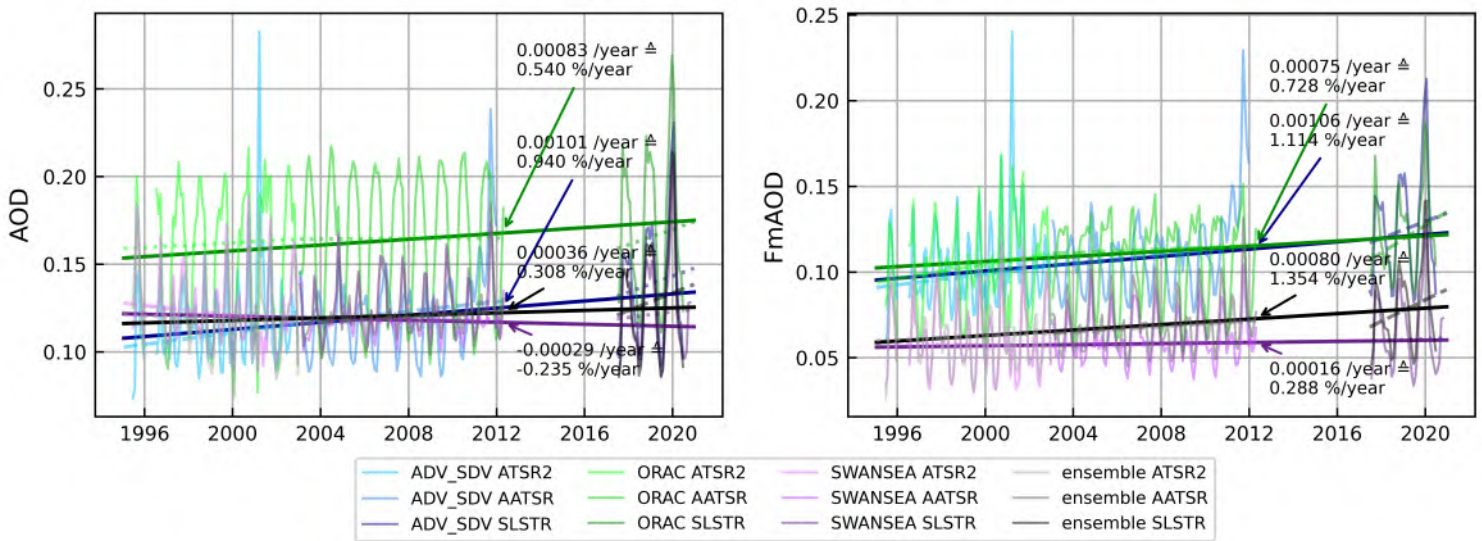


Abbildung 7.5.: Vergleich der AOD und FmAOD Trends in Australien.

7.3.4. Europa: Mittelmeerraum und Zentral

Für die Betrachtung von Saharastaubereignissen werden Daten über dem europäischen Mittelmeerraum und über Zentraleuropa verwendet. Es zeigen sich hier fallende Trends sowohl in der AOD als auch in der FmAOD.

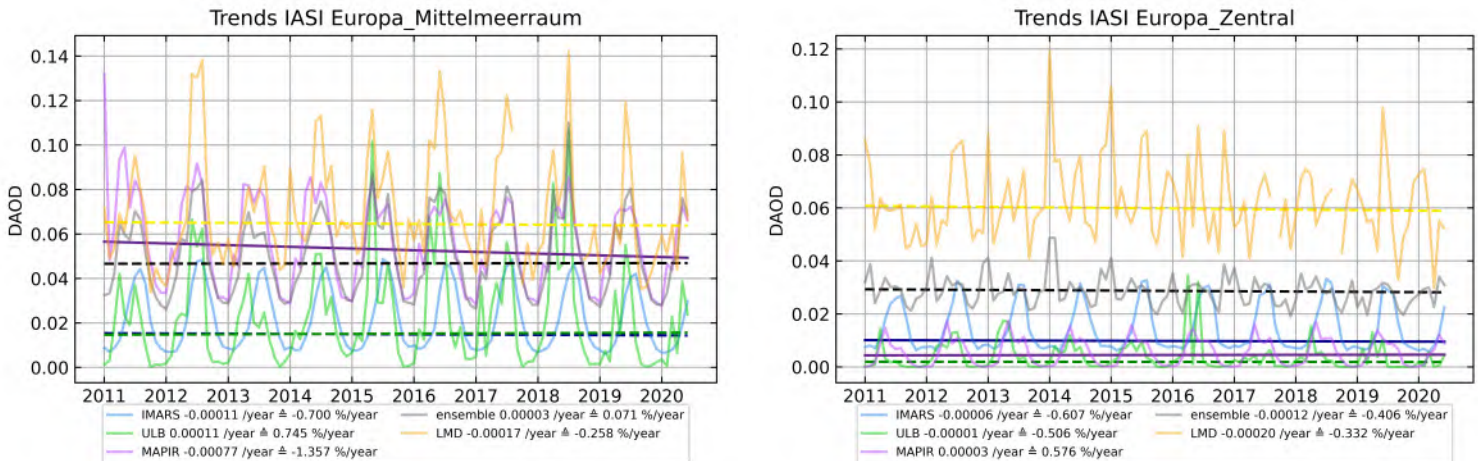
Über dem europäischen Mittelmeerraum fällt die AOD pro Jahr um $-0,00110 \pm 0,00027$ und die FmAOD pro Jahr um $-0,00102 \pm 0,00023$ (siehe Anhang A.8.2). Mit Trends von $-0,00138 \pm 0,00039$ pro Jahr in der AOD und $-0,00158 \pm 0,00047$ pro Jahr in der FmAOD tritt in Zentraleuropa ein stärker fallendes Verhalten auf als im Mittelmeerraum (siehe Anhang A.8.2).

Für die Analysen der Saharastaubevents werden die Daten des IASI Instruments verwendet. In der DAOD ist im Mittelmeerraum ein Trend von $-0,00088 \pm 0,00081$ pro Jahr zu beobachten (siehe Abb. 7.6a) und in Zentraleuropa von $-0,00017 \pm 0,00039$ pro Jahr (siehe Abb. 7.6b). Hier sind deutlich größere Fehlerbereiche angegeben, da zwischen den Algorithmen des IASI Instruments größere Inkonsistenzen bestehen als bei den Dual-view-Instrumenten (siehe Abb. 7.6).

7.4. Diskussion der Trends in Aersoleigenschaften

Zusammenfassend lässt sich über Trends in atmosphärischen Aerosolen sagen, dass diese große regionale Unterschiede aufweisen, wie in Trendkarten sichtbar wird. Durch einen Vergleich der Trendkarten der Instrumente ATSR-2 und AATSR werden starke Trend-

7. Trends in den Aerosoleigenschaften aus Satellitendaten



(a) Europäischen Mittelmeerraum

(b) Zentral Europa

Abbildung 7.6.: DAOD Trends in Europa.

wenden unter anderem in Nordamerika und in Asien deutlich. Diese Trendänderungen erschweren das Erstellen bzw. verfälschen das Ergebnis gesamtter Trendkarten und Trendanalysen für den Zeitraum von 25 Jahren und resultieren großteils aus Veränderungen in der Industrie, wie am Beispiel von Asien ersichtlich ist.

Auch die notwendige pixelweise Biaskorrektur führt hier Schwierigkeiten. Dies liegt daran begründet, dass es bei pixelweise durchgeführter Biaskorrektur (wie in 5.3 beschrieben) durch ausmaskierte oder fehlerhafte Pixel, die sonst durch die Mittelung über die Regionen keinen so großen Einfluss haben, zu großen Fehlern kommt. Diese belaufen sich bei einzelnen Pixeln, vor allem an der Süd- und Nordgrenze der ausgewerteten Pixel, auf bis zu AOD Trends von 9000 pro Jahr - können allerdings ausmaskiert werden. Auch können bei solchen Trendkarten keine Trendwechsel betrachtet werden, da diese nur bei bekanntem Trendwechselzeitpunkt berechnet werden und auch dann nicht in einer Karte dargestellt werden können. Dies führt zu fehlerhaften Biaskorrekturen und somit fehlerhaften Trends.

Die Datenlücke bei den Dual-view-Instrumenten zwischen 2012 und 2017 und die Inkonsistenzen zwischen den einzelnen Sensoren und Algorithmen erschweren hier belastbare Aussagen über die exakten Trends. Die Tendenzen in den Trends sind jedoch Regional deutlich zu erkennen.

Die Zeitserien der einzelnen Instrumente der Dual-view-Instrumentenserie sind mit vier bis neun Jahren in klimatologischen Maßstäben kurz, was den Einfluss von Anomalien auf den Trend erhöht. Auch Trendänderungen können hier Schwierigkeiten darstellen, da diese mit dem Änderungszeitpunkt bestimmt werden müssen, um Analysen der Zeiträume mit konstantem Trend betrachten zu können. Vor allem Trendaussagen über den kurzen bisherigen Zeitraum des SLSTR Instruments sind mit großen Unsicherheiten belegt.

Die Trendvergleiche von Boden- und Satellitenmessungen zeigen, wie schon in den Kon-

7.4. Diskussion der Trends in Aersoleigenschaften

sistenzbetrachtungen deutlich wurde, den Einfluss der Stationenverteilung und ihrer Repräsentivität für die betrachtete Region.

Für die Regionen, die für die weitere Arbeit wichtig sind und die Betrachtung der Ereignisse, ergibt sich Folgendes:

Für die Analysen der Saharastaubevents über Deutschland werden die Daten des IASI Instruments verwendet und die beiden Regionen Europa Zentral und Europa Mittelmeerraum miteinbezogen. In diesen Regionen zeigen sich leicht abnehmende Trends, welche jedoch häufig nicht signifikant sind. Für die Betrachtung der Saharastaubevents, die kurzzeitig zu deutlich erhöhter DAOD führen, ist jedoch dieser geringe Trend nicht ausschlaggebend und kann bei der Betrachtung der Tagesdaten vernachlässigt werden.

Für die Betrachtung der Feuer in Kalifornien und Australien in den letzten Jahren wird die FmAOD aus den Daten der Dual-view-Instrumente betrachtet. Hier zeigen die Daten einen steigenden Trend, allerdings deutlich schwächer als die durch die Feuer verursachten Anomalien, was auch hier die Möglichkeit der Vernachlässigung der Trends gibt.

Bei Analysen von Ereignissen in Asien, wie beispielsweise die Studien zu Auswirkungen der Covid-19 Pandemie, können aufgrund der starken und sich umkehrenden Trends, diese Trendbetrachtungen nicht vernachlässigt werden.

8. Analyse und Diskussion außergewöhnlicher Episoden 2019/2020 vor dem Hintergrund langjähriger Entwicklung

Im Folgenden werden die Brände in Australien und in Kalifornien 2019/2020 und Saharastaubereignisse in Deutschland genauer analysiert. Hierfür werden die Erkenntnisse über Konsistenzen der Datensätze und über Trends in der AOD, FmAOD und DAOD miteinbezogen, um diese Ereignisse vor dem Hintergrund langjähriger Entwicklung zu beleuchten.

8.1. Brände 2019 und 2020

Die Brände in Kalifornien und Australien in den Jahren 2019 und 2020 gingen durch die Medien [67]. In beiden Regionen sind jährliche Feuer keine Seltenheit, allerdings nehmen diese in Größe und Länge mit den Jahren immer weiter zu [68, 69]. Dies kann auch in den Aerosol Daten der Dual-view-Instrumente beobachtet werden und soll hier genauer analysiert werden. Hierbei wird hauptsächlich die FmAOD verwendet, da die bei Verbrennungen entstehenden Aerosole in der Größenordnung der FmAOD liegen (siehe Anhang A.1). Für die Betrachtung von Anomaliezeitserien werden hier weiterhin Monatsdaten verwendet. Für die Analysen mit Videos und Bildern zur Lokalisierung der Brände und zur Verbreitung der Rauchwolken werden Tagesdaten verwendet. Um hier einen besseren Überblick zu ermöglichen, werden die Daten von drei aufeinanderfolgenden Tagen zusammengenommen, um eine vollständigere Abdeckung zu erreichen.

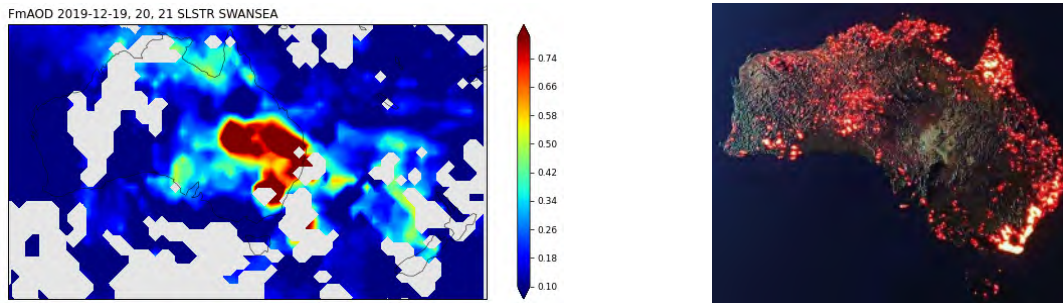
8.1.1. Brände Australien (Dezember 2019/Januar 2020)

In Australien kommt es beinahe jährlich zu großflächigen Bränden im Dezember und Januar. Von Dezember 2019 bis Februar 2020 hatten diese Feuer ein deutlich größeres Ausmaß angenommen und mehr als 24 Millionen Hektar Busch- und Ackerland sind verbrannt [70].

Über die je drei Tage zusammenfassenden Kartenserien können die größten Ausmaße der Feuer 2019/20 im Osten Australiens lokalisiert werden (siehe Abb. 8.1a und Video „Australien Feuer“ auf beiliegender CD). Dies wird auch durch Messungen des Fire Information for Resource Management System (FIRMS) der NASA, welches mit Daten des Modera-

8. Analyse und Diskussion außergewöhnlicher Episoden 2019/2020

te Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) arbeitet, bestätigt (siehe Abb. 8.1b) [71].



- (a) Beispielhafter Ausschnitt des Videos „Australien Feuer“ auf beiliegender CD zur Lokalisierung der Feuer im Osten Australiens.
- (b) Feuer zwischen 5.12.2019 und 05.01.2020 aus FIRMS Satelliten der NASA, wobei heller Farben für eine größere Anzahl an Feuer stehen [71], [firms.modaps].

Abbildung 8.1.: Lokalisierung der Feuer in Australien im Winter 2019/2020.

Über Videos aus diesen Kartenserien lässt sich der Transport der Rauchwolke in Form von erhöhter FmAOD beobachten. Hier ist deutlich sichtbar, dass die Rauchwolke innerhalb von 2 Wochen einmal die Erde umrundet hat, bevor sie sich aufgelöst hat, und somit einen großen Einfluss auf die Atmosphäre der gesamten südlichen Hemisphäre hatte (siehe Abb. 8.2 und Video „Transport Australien Feuer“ auf beiliegender CD).

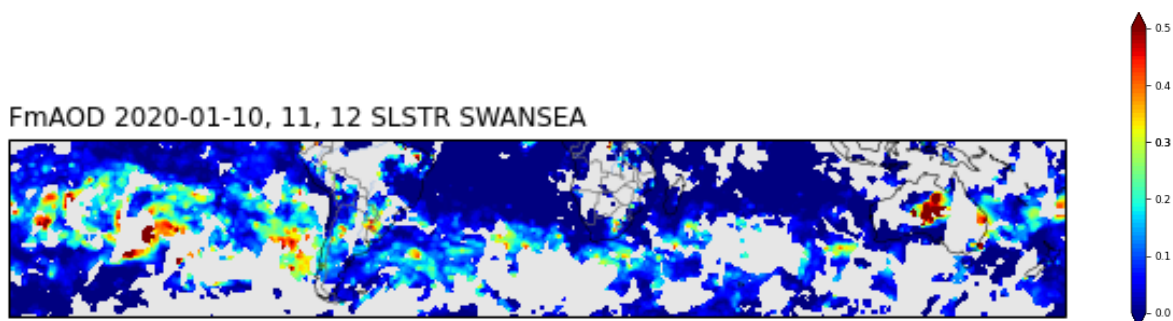
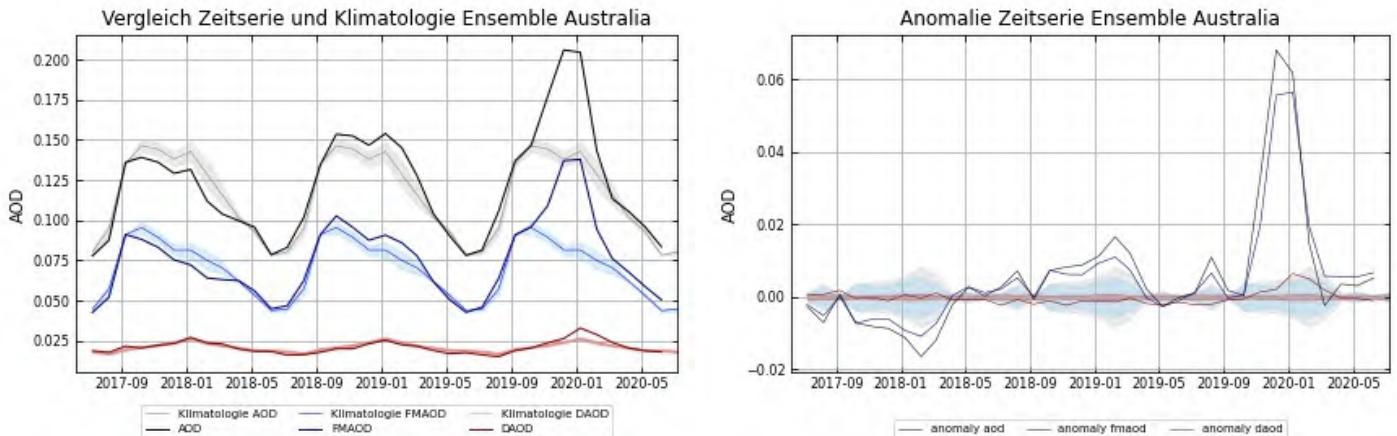


Abbildung 8.2.: Ausschnitt eines Videos „Transport Australien Feuer“ auf beiliegender CD das den Transport des Rauchs der Feuer in Australien beobachtet anhand der Anomalie der FmAOD von SWANSEA gemessen mit SLSTR.

Die Ausmaße der Feuer in Australien 2019/20 sind auch deutlich in den Monatsmitteln der AOD, FmAOD und DAOD zu sehen. Abb. 8.3a zeigt die AOD, FmAOD und DAOD im Zeitraum Juni 2017 bis Juni 2020 aus den Daten der Ensemble Algorithmen von SLSTR und IASI vor dem Hintergrund der vorliegenden Klimatologien aus diesen Instrumenten.

Hier ist deutlich zu sehen, dass die Feuer 2019/20 deutlich größere Ausmaße in Dauer und Größe aufweisen als in den Vorjahren. Vor allem in der AOD und der FmAOD zeigt sich eine deutliche Anomalie im Vergleich zu den Vorjahren.



(a) Daten gegenüber der Klimatologie

(b) Anomalie Zeitserie

Abbildung 8.3.: AOD (schwarz) und FmAO (blau) von dem Ensemble des SLSTR Instruments und DAOD (rot) von dem IASI Ensemble a) vor dem Hintergrund der Klimatologie der jeweiligen Instrumente und b) als Anomalie Zeitserie. Deutlich zu sehen ist die Anomalie in der Feuersaison 2019/20 vor allem in AOD und FmAO.

In der Anomalie Zeitserie, siehe Abb. 8.3b, ist deutlich zu erkennen, dass auch im Jahreswechsel 2018/19 größere Feuer aufgetreten sind als in dem vorherigen Jahr. Diese wiesen jedoch mit circa 0,01 erhöhter FmAO zum Mittelwert aus dem Zeitraum Mitte 2017 bis Mitte 2019 im Gegensatz zu 0,055 im folgenden Jahr ein geringes Ausmaß auf. Obwohl die durch Verbrennung entstehenden Aerosole in der Größenordnung der FmAO liegen, sind die Auswirkungen der Feuer 2019/20 auch in der DAOD zu erkennen. Dies lässt sich höchstwahrscheinlich auf Ascheteilchen und durch mit den Feuern aufsteigenden andere Aerosolteilchen erklären.

Das bisherige Bild mit Daten von SLSTR zeigt ein steigendes Ausmaß an Feuer in Australien, allerdings ist der beobachtete Zeitraum zu kurz für langfristige Aussagen. Auch im Vergleich mit Daten der anderen Dual-view-Instrumente zeigt sich das Ausmaß der Feuer 2019/2020. In Abb. 8.4 ist eine Zeitserie der FmAO über Australien zu sehen, hierbei sind bei den Daten von ATSR-2 und SLSTR, wie in Kapitel 5.3 beschrieben, Biaskorrekturen durchgeführt worden.

Die bisher größten Feuer 2019/20 [72] stechen hier deutlich heraus. Der in den Jahren 2018 bis 2020 in den Daten des SLSTR Instruments angedeutete Trend zu häufigeren und größeren Feuern in Australien kann direkt auf den Klimawandel und die daraus resultierenden höheren Temperaturen und geringeren Niederschläge in Australien zurückgeführt werden [73]. Dieser Trend zeigt sich auch schon früher in Daten des NASA Instruments MODIS [74]. Für die Betrachtung der Auswirkungen der Feuer auf die FmAO erschwert hier die Datenlücke in den Dual-view-Instrumenten diese Beobachtung.

8. Analyse und Diskussion außergewöhnlicher Episoden 2019/2020

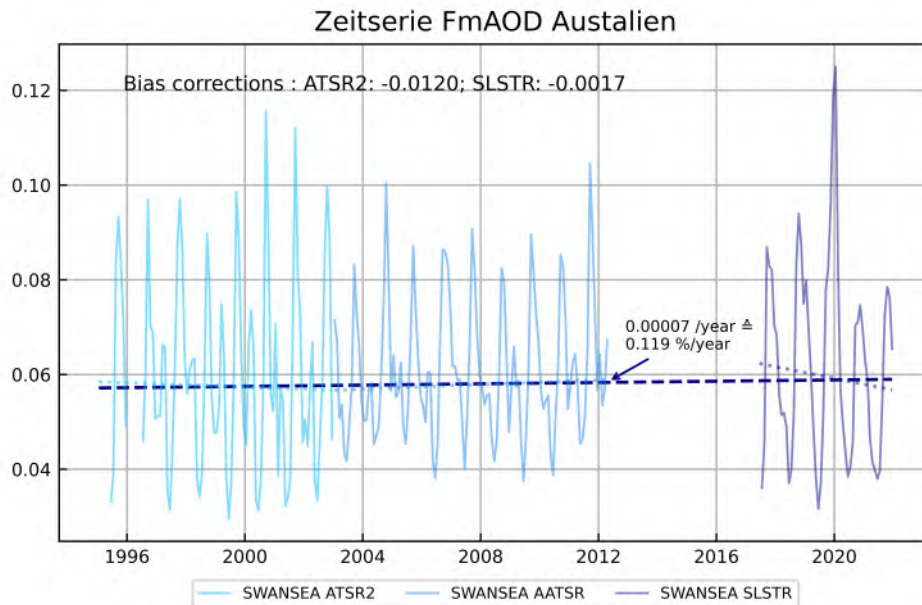


Abbildung 8.4.: FmAOD des SWANSEA Algorithmus der Dual-view-Instrumente ATSR-2, AATSR und SLSTR mit Biaskorrekturen für ATSR-2 und SLSTR. Hier sind die Feuer den Winter 2019/2020 deutlich zu sehen.

8.1.2. Brände Kalifornien (August 2019 und 2020)

Dass der Klimawandel Auswirkungen auf die Waldbrandgefahr hat, zeigt sich nicht nur in Australien, sondern sehr deutlich auch in Kalifornien [75]. In Kalifornien kommt es im Sommer beinahe jährlich zu großflächigen Bränden. In den Jahren 2017, 2018, 2020 und 2021 hatten diese Feuer ein deutlich größeres Ausmaß angenommen als in den vorherigen Jahrzehnten [75].

In der Betrachtung der FmAOD des Ensemble Algorithmus der Dual-view-Instrumente ATSR-2, AATSR und SLSTR (Abb. 8.5) ist der starke Einfluss der Feuer 2008, 2017, 2018, 2020 und 2021 auf die FmAOD über Kalifornien deutlich zu sehen. Die FmAOD liegt hier in den Monatsmitteln um 0,075 bis 0,125 höher als in den anderen betrachteten Jahren. Ein Vergleich mit der Größe der durch die Feuer pro Jahr verbrannten Fläche [76, 77] verifiziert diese durch Größe und Dauer herausstehenden Jahre. Die vergleichsweise große verbrannte Fläche bei niedriger FmAOD 2007, lässt sich durch das zeitlich ausgedehntere Maximum erklären.

Da die Datenlücke zwischen 2012 und 2017 hier die Aussagen über langfristige Trends erschwert bzw. Unsicherheiten mit sich bringt ist auch die gesonderte Betrachtung des Zeitraums 2017 bis 2021 von Interesse. Hier ist der steigende Trend sehr deutlich zu sehen. 2017, 2018 und 2020 zeigen einen steigenden Trend mit einem Ausreißer 2019, welcher auch durch die pro Jahr verbrannten Flächen bestätigt wird.

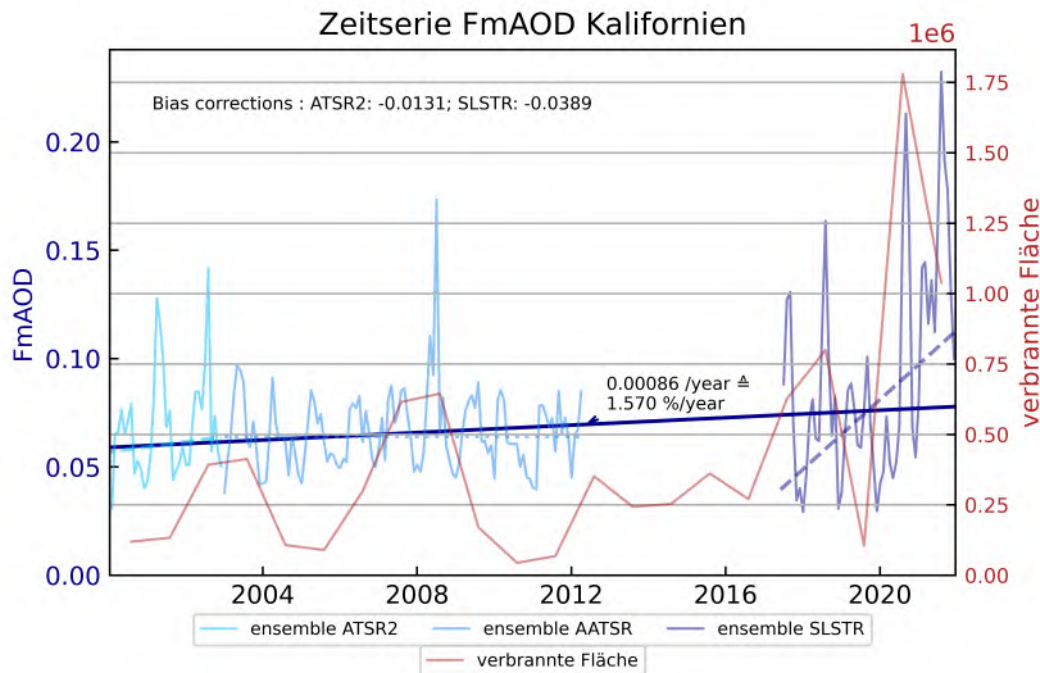


Abbildung 8.5.: FmAOD des Ensemble Algorithmus der Dual-view-Instrumente ATSR-2, AATSR und SLSTR mit Biaskorrekturen für ATSR-2 und SLSTR über Kalifornien im Vergleich zur jährlich verbrannte Fläche [76, 77]. Die Feuer 2018, 2020 und 2021 sind deutlich zu sehen.

8.2. Saharastaubereignisse in Deutschland

Beim Blick aus dem Fenster in Augsburg am 15.03.2022 war sehr deutlich eine Gelbfärbung des Himmels zu beobachten, wie in Abb. 8.6 deutlich zu sehen. Dieses Phänomen des weiten Transports von Saharastaub sorgt nicht nur in Deutschland für beeindruckende Schauspiele am Himmel, sondern ist für die Natur teilweise dringend nötig. Beispielsweise für die Versorgung von Phytoplankton im Atlantik und als Nährstofflieferanten für den Regenwaldboden am Amazonas spielt der transportierte Saharastaub eine große Rolle [14].

Im Folgenden sollen Saharastaubtransporte nach Deutschland betrachtet werden. Saharastaub ist ein Mineralstaubaerosol und kann somit am besten isoliert mit IASI Daten betrachtet werden. Da diese Daten noch größere Inkonsistenzen aufweisen, wird im Folgenden auch mit Kombinationen der Daten der unterschiedlichen Algorithmen gearbeitet. In Abb. 8.7 ist ein beispielhafter Videoausschnitt eines Saharastaubaubausbruchs über Deutschland zu sehen. Im Rahmen dieser Arbeit werden Saharastaubevents anhand einer hohen DAOD über Südeuropa (grau markiert in Abb. 8.7) und am selben oder darauffolgenden Tag über Deutschland (schwarz markiert in Abb. 8.7) detektiert. Diese Betrachtung wird für jeden Algorithmus gesondert durchgeführt, hierbei unterscheiden sich die gewählten Schwellwerte, aufgrund der Durchschnitts-AOD deutlich zwischen den Algo-

8. Analyse und Diskussion außergewöhnlicher Episoden 2019/2020



Abbildung 8.6.: Gelbfärbung des Himmels über Aindling durch Saharastaub über Süddeutschland am 15.03.2022 [78].

rithmen (IMARS: 0,075; ULB: 0,25; Ensemble: 0,3; LMD: 0,9). Ein Saharastaubevent wird dann identifiziert, wenn mehrere Tage mit einem maximalen Abstand von einem Tag ein Saharastaubevent beschreiben. Es können hier entweder die unterschiedlichen Algorithmen getrennt oder eine Kombination der Algorithmen betrachtet werden. Hierbei führen neben den Inkonsistenzen auch Datenlücken, beispielsweise durch Wolkenausmas- kierung, zu Problemen.

Als Vergleich und zur Validierung werden Bodenmessungen vom Deutschen Wetterdienst verwendet. Bis 2013 dient der Saharastaubkalender aus täglichen in-situ Messungen am Hohenpeißenberg als Referenz [79]. Hier wird ein Saharastaubevent über hohe Calcium- Ionen Konzentration und große Partikelvolumenkonzentration von Teilchen mit einem Durchmesser von 0,5 bis 7 Mikrometer identifiziert [79].

Ab 2013 liegen Daten aus Ceilometermessungen vor. Hier wird die optische Dicke und die Schichthöhe über Rückstreuprofile ermittelt. Diese Messungen werden an verschiedenen Standorten in Deutschland, von Helgoland bis ins Chiemgau, durchgeführt und zeigen somit auch die räumliche Verteilung der Saharastaubevents in Deutschland [80].

Die Kombination aus diesen beiden Saharastaubkalendern wird hier als Bodenreferenz be- zeichnet. Es werden hierbei zusätzlich gesondert die starken Saharastaubevents betrachtet, da die Vermutung naheliegt, dass diese eher von den Satelliten detektiert werden können.

Beim Vergleich der Saharastaubevents sind sowohl die Nicht-Entdeckungs-Rate als auch die Fehl-Entdeckungs-Rate wichtig um die Aussagekraft der IASI Algorithmen zur Be- stimmung von Saharastaubevents zu evaluieren.

In Abb. 8.8b ist abgebildet wie oft welcher Algorithmus ein Saharastaubevent, das aus den Bodenmessungen bekannt ist, auch abbildet. Hierbei bestätigt sich die These, dass die starken Events eher detektiert werden können. Auch, dass nicht alle Saharastaubevents aus Bodenmessungen in Algorithmen sichtbar sind, ist leicht damit zu erklären, dass durch

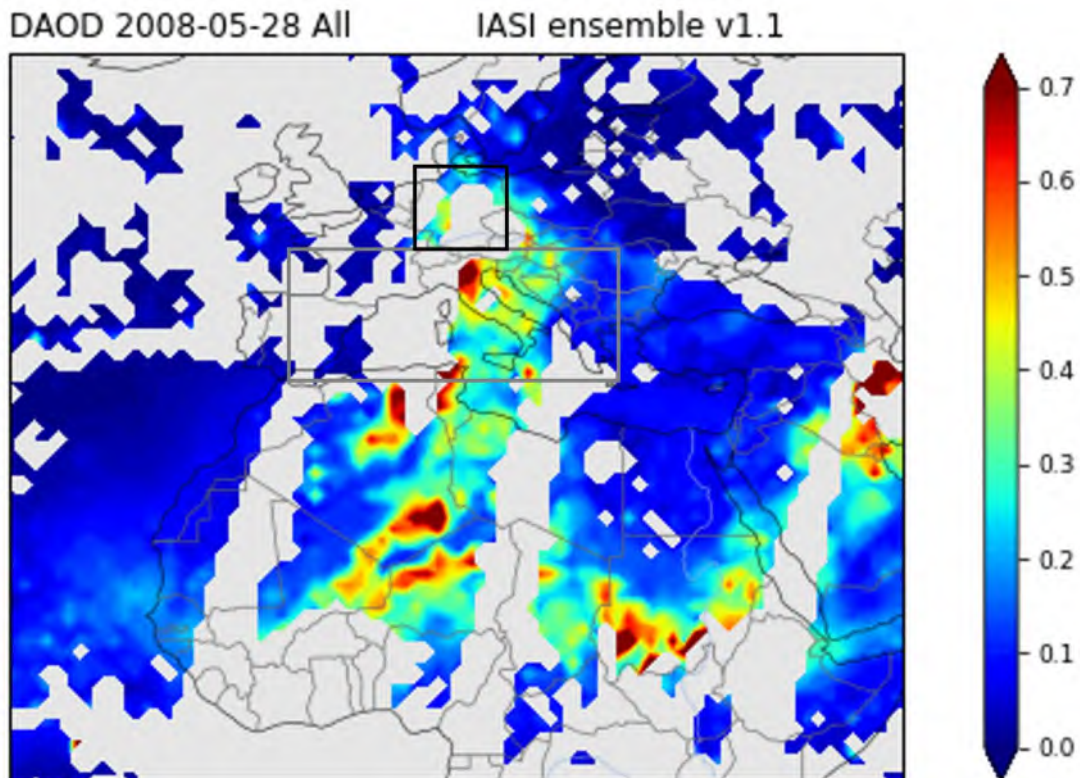


Abbildung 8.7.: Ausschnitt des Videos „Saharastaubausbruch“ auf beiliegender CD eines Saharastaubausbruchs nach Deutschland im Mai 2008 mit den Daten des Ensemble Algorithmus des IASI Instruments. In schwarz ist das Gebiet über Deutschland markiert und in grau die Region im Süden Europas, die zur Analyse verwendet wird.

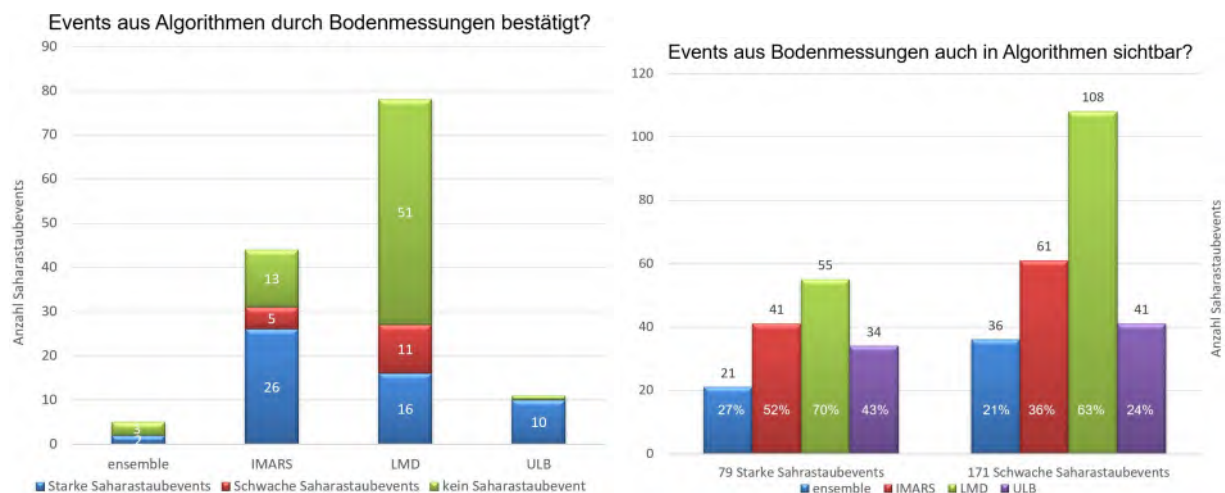
Datenlücken beispielsweise durch Wolkenmaskierungen Informationen nicht ausgewertet werden können.

Betrachtet man die Events, die ein Algorithmus detektiert, und validiert diese mit den Daten aus den Bodenmessungen, ergibt sich folgendes Bild (siehe Abb. 8.8a): ULB hat eine sehr gute Quote an richtig identifizierten Saharastaubevents, allerdings werden hier auch nur 10 der 79 starken Saharastaubevents detektiert. LMD zeigt im Gegensatz eine deutlich höhere Fehlerquote, detektiert allerdings mehr Events. Von den 44 von IMARS detektierten Saharastaubevents sind mit 13 vergleichsweise wenige Falsch detektiert worden und 26 entsprechen starken Events aus den Bodenmessungen.

Da einzelne Algorithmen keine sehr große Aussagekraft zu haben scheinen, liegt die Überlegung nahe, eine Kombination der Algorithmen könnte zuverlässigere Aussagen führen.

Mit der Anforderung, dass mindestens ein Algorithmus bei einem aus Bodenmessungen bekannten starken Saharastaubevent anschlägt, ergibt sich eine Treffer-Quote von 89%. Bei mindestens zwei Algorithmen liegt diese bei 65%. Werden alle, also auch schwächere,

8. Analyse und Diskussion außergewöhnlicher Episoden 2019/2020



- (a) Anteil der aus Daten der einzelnen Algorithmen ermittelten Saharastaubevents, die durch Bodenmessungen bestätigt wurden. (b) Anteil der aus Bodenmessungen ermittelten Saharastaubevents, die auch von den jeweiligen Algorithmen beobachtet wurden.

Abbildung 8.8.: Korrelationen zwischen Saharastaubevents in Bodenmessungen und in Satellitenmessungen mit den verschiedenen Algorithmen.

Saharastaubevents betrachtet ergibt sich mit 79% bei mindestens einem Algorithmus und 41% bei mindestens zwei Algorithmen ein ähnliches Bild. Hier ist auffällig, dass deutlich mehr Ereignisse nicht durch die Satellitenmessungen detektiert werden können oder nur ein Algorithmus anschlägt (siehe Abb. 8.9b).

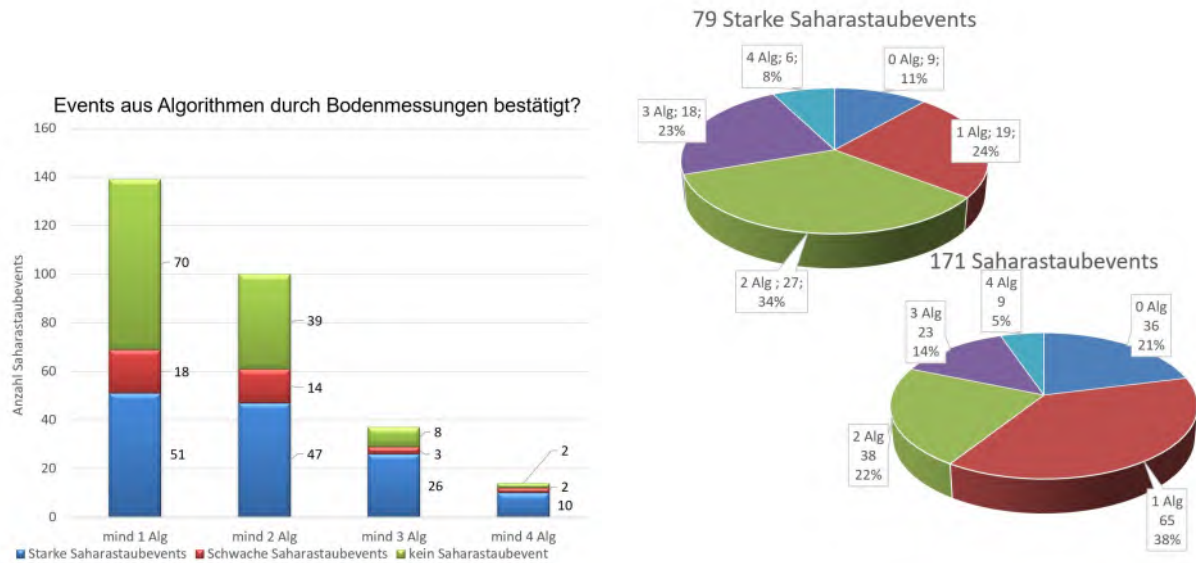
Bei der Betrachtung der durch eine Kombination aus den Algorithmen ermittelten Events zeigt sich deutlich, dass bei der Forderung von mindestens einem Algorithmus die Fehl-Entdeckungsrate bei über 50% liegt, bei mindestens zwei Algorithmen bei 39%, bei mindestens drei Algorithmen bei 21% und bei allen vier bei 14%. Jedoch detektiert die Kombination aller vier Algorithmen nur 14 Events insgesamt, was deutlich weniger ist als die 139 detektierten Events bei mindestens einem Algorithmus (siehe Abb. 8.9a).

Vor allem bei der Betrachtung der Kombination aus den Algorithmen fällt eine deutliche Verbesserung in der Nicht-Entdeckungs-Rate und in der Fehl-Entdeckungs-Rate auf. Hierbei wird deutlich, dass mit steigender Anzahl geforderter Algorithmen die Anzahl der detektierten Saharastaubevents sinkt. Dabei sinkt auch die Fehl-Entdeckungsrate. Je nach Anwendung können hier unterschiedliche Forderungen sinnvoll sein. Die Vermutung liegt nahe, dass für die meisten Fragestellungen die Kombination aus mindestens 2 Algorithmen die zuverlässigsten Ergebnisse liefern wird, da hierbei die Anzahl der identifizierten Events und die Fehl-Entdeckungsquote ein recht balanciertes Bild abgeben.

Diese Vermutung wird auch bei der Betrachtung der Trends der Häufigkeit der Saharastaubevents in Deutschland bestätigt.

Betrachtet man die jährliche Anzahl der Events von 2008 bis 2019, jeweils für die Kriterien

8.3. Diskussion der verschiedenen Ereignisse



- (a) Anzahl der aus Bodenmessungen ermittelten Saharastaubevents, die von keinem, einem, zweien, dreien oder allen vier Algorithmen in Kombination beobachtet wurden.
- (b) Anteil der aus Daten der Kombinationen aus mindestens einem, zwei, drei oder allen vier Algorithmen ermittelten Saharastaubevents, die durch Bodenmessungen bestätigt wurden.

Abbildung 8.9.: Korrelationen zwischen Saharastaubevents in Bodenmessungen und in Satellitenmessungen mit Kombinationen der verschiedenen Algorithmen.

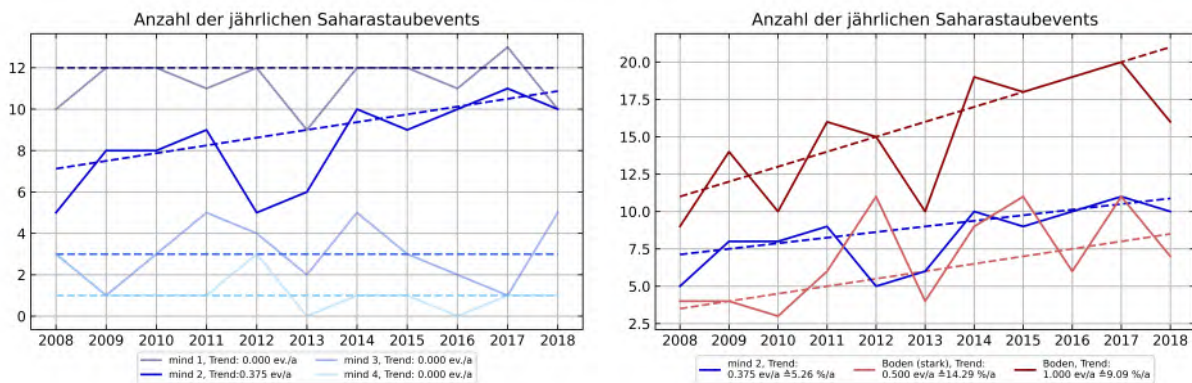
mindestens ein Algorithmus, mindestens zwei Algorithmen, mindestens drei Algorithmen und alle vier Algorithmen, zeigt sich nur in der Zeitreihe für mindestens zwei Algorithmen ein steigender Trend von 0,375 Events pro Jahr. Bei den anderen drei Optionen ist kein Trend zu beobachten (siehe Abb. 8.10a).

Auch in den Bodenmessungen ist ein steigender Trend sichtbar. Dieser ist bei der Gesamtzahl der Events bei einem Event pro Jahr und bei einer Betrachtung der starken Events bei einem Event in zwei Jahren (siehe Abb. 8.10b). Hierzu passt die Zunahme in den Analysen „aus mindestens 2 Algorithmen“ von 0.375 Ereignisse pro Jahr.

8.3. Diskussion der verschiedenen Ereignisse

Die betrachteten Feuer sind durch eine Erhöhung in der AOD und FmAOD deutlich sichtbar. Innerhalb des kurzen Zeitraums in dem Daten von SLSTR vorliegen, deutet sich hier ein deutlich steigender Trend an. Die Datenlücke von 2012 bis 2017 und die teilweise herrschenden Inkonsistenzen zwischen den Instrumenten erschweren allerdings langfristige Aussagen über diesen Zeitraum hinaus. Aus diesem Grund sind hier die Trendaussagen nur mit gewissen Unsicherheiten möglich. Der auch durch weitere Datenerhebungen bekannte Trend zu vermehrten, größeren und lang andauernden Feuern über weite Teile der

8. Analyse und Diskussion außergewöhnlicher Episoden 2019/2020



- (a) Kombinationen von mindestens einem, zwei-, (b) Kombinationen von mindestens zwei Algorithmen detektierten Saharastaubausrüchen. (blau) im Vergleich zu den von Bodenmessungen detektierten starken (hellbraun) und insgesamt (braun) beobachteten Saharastaubevents.

Abbildung 8.10.: Betrachtung der Trends in der Anzahl der beobachteten Saharastaubevents pro Jahr in Deutschland.

Erde kann auf den Klimawandel und die daraus resultierenden höheren Temperaturen und geringeren Niederschläge in diesen Gebieten zurückgeführt werden [73, 74, 81–84]. Die betrachteten Tagesdaten weisen große Datenlücken auf, was hier genauere Analysen erschwert. Hierbei könnte es hilfreich sein, eine größere temporale Abdeckung durch Satelliten und eine verbesserte Wolkenausmaskierung zu verwenden, die Fehlerkennungen von Aerosolwolken als Wasserwolken vermeidet.

Die Saharastaubevents in Deutschland, die mit IASI Daten betrachtet werden, können nur teilweise beobachtet werden. Eine große Herausforderung stellen hierbei, neben den großen Datenlücken durch Wolkenausmaskierung über Deutschland, die Inkonsistenzen zwischen den Algorithmen dar. Durch eine Kombination von mindestens zwei Algorithmen kann hier eine vergleichsweise gute Übereinstimmung mit Bodenmessungen erzielt werden. Die Saharastaubevents in Deutschland sind somit nur mit größeren Unsicherheiten mit Satellitenmessungen zu beobachten. Weitere Untersuchungen könnten hier möglicherweise eine bessere, zur Saharastaubbeobachtung geeignete Kombination aus Algorithmen identifizieren.

Bei der Analyse der verschiedenen Ereignisse wird somit deutlich, dass diese in den Aerosol-Satellitendaten sichtbar sind, es allerdings wie beschrieben teilweise noch Schwierigkeiten gibt.

9. Zusammenfassung und Ausblick

Ziel dieser Arbeit war eine Konsistenz- (Kapitel 6) und Trendanalyse (Kapitel 7) von Aerosol-Zeitreihen aus Daten von unterschiedlichen Messsatelliten und darauf aufbauend eine beispielhafte Untersuchung unterschiedlicher Ereignisse der letzten Jahre, wie den großflächigen und lange andauernden Feuern in Kalifornien und Australien (Kapitel 8.1) und Saharstaubevents in Deutschland (Kapitel 8.2). Zu diesem Zweck wurden die nötigen theoretischen Grundlagen zu Aerosolen und dem Strahlungstransport in der Atmosphäre erläutert (Kapitel 2, 3). Außerdem wurde auf die Funktionsweise der unterschiedlichen Messinstrumente, wie AERONET-Bodenmessungsstationen und die satellitengestützten Messungen der ATSR-Instrumentenserie und des IASI Instruments, und die verschiedenen zum Retrieval von Aerosoldaten aus den Satellitenmessungen verwendeten Algorithmen eingegangen (Kapitel 4). Nach einer Einführung in die verwendeten Analysemethoden, wie Zeitreihen, Trendanalysen und Biaskorrekturen, wurden diese auf die Daten der zuvor beschriebenen Instrumente angewendet.

Die Konsistenzanalysen (siehe Kapitel 6) zeigen bei den Dual-view-Instrumenten auf der Südhalbkugel und über Wüsten und Ozeanen teilweise noch Inkonsistenzen zwischen den Algorithmen. Über nicht von Wüsten bedecktem Land auf der Nordhalbkugel ist hier eine gute Übereinstimmung der Algorithmen und mit AERONET zu beobachten, was die Belastbarkeit der Daten untermauert. Zwischen den einzelnen Instrumenten der ATSR-Instrumentenserie, vor allem zwischen ATSR-2 und AATSR auf der einen und SLSTR auf der anderen Seite, treten bei einzelnen Algorithmen neben einem Bias, welcher über Biaskorrekturen behoben werden kann, auch Inkonsistenzen im Jahresgang auf. Dies ist beispielsweise bei ORAC auf der Südhalbkugel und bei SWANSEA über Wüsten in Asien und Nord Amerika der Fall. Eine Verbesserung der Kalibrierung der unterschiedlichen Messinstrumente der ATSR-Instrumentenserie untereinander oder eine dementsprechende Anpassung der Algorithmen wäre wünschenswert für weitere Betrachtungen über längere Zeiträume.

Auch zwischen den Daten der unterschiedlichen IASI Algorithmen sind größere Inkonsistenzen zu beobachten. Während im Dust Belt, also über der Sahara und Teilen Asiens, Europas und des Atlantiks, die Algorithmen im Jahresgang konsistente Daten liefern, unterscheiden diese sich in den umgebenden Gebieten in Jahresgang und absoluter Höhe der DAOD.

Nimmt man die Daten des Ensembles der Dual-view-Instrumente, des ULB Algorithmus von IASI und Reanalysen der Meersalzaerosole zusammen ergibt sich über nicht wüstenbedecktem Land und über Ozean mit wenig Meersalzaerosolen, also weniger starken Winden, eine gute Konsistenz zwischen den einzelnen Teil-AOD-Komponenten. Über Ozeanen mit hoher SSAOD und über Wüsten ergibt sich hier noch Verbesserungsbedarf.

9. Zusammenfassung und Ausblick

Die teilweise noch relativ großen Inkonsistenzen zwischen den Algorithmen und Instrumenten über anderen Gebieten, hauptsächlich über Ozean, Wüste und über der Südhalbkugel bei den Dual-view-Instrumenten und außerhalb des Dust Belts bei IASI, geben Anlass für die Entwicklung eines neuen Aerosolretrievalverfahrens, um damit die Konsistenz satellitenbasierter Aerosolzeitreihen weiter zu verbessern.

Die großen Feuer in Australien und Kalifornien (Kapitel 8.1) der letzten Jahre sind deutlich in den Monatsmitteln der FmAOD des SLSTR Instruments zu erkennen. Bei der genaueren, tageweisen Betrachtung sind teilweise große Datenlücken vorhanden, was exaktere Analysen erschwert. Der in der kurzen SLSTR Zeitreihe angedeutete Trend zu größeren und länger andauernden Feuern kann allerdings unter anderem bedingt durch die Datenlücke der Dual-view-Instrumente von 2012 bis 2017 über einen längeren Zeitraum mit diesen Methoden nicht verifiziert werden. Auch bei der Betrachtung der Saharastaubevents in Deutschland stellen die Inkonsistenzen der IASI Algorithmen noch Herausforderungen dar.

Für diese Analysen wäre somit ein, über die letzten 2-3 Dekaden konsistenter und integrierter, Datensatz Aerosol-Satellitendaten mit einer zuverlässigen und konsistenten Trennung der Teil-AOD von Aerosolkomponenten von großem Nutzen. Hier könnten beispielsweise die (im Vergleich zu NO_2 kleinen und komplexen) Veränderungen aufgrund des Lockdowns in Folge der Covid-19-Pandemie in verschiedenen Regionen betrachtet werden.

In Rahmen künftiger Arbeiten wäre die Entwicklung eines solchen Aerosolretrievals wünschenswert, das durch die Kombination der Daten unterschiedlicher Instrumente, welche in verschiedenen Spektralbereichen messen, eine genauere und über einen langen Zeitraum konsistente Bestimmung der Aerosol Optischen Dicke (AOD) ermöglichen soll. Hierbei ist auch die Unterscheidung der Teil-AOD verschiedener Aerosolkomponenten ein wichtiger und für zahlreiche Anwendungen relevanter Aspekt.

Neben den bisher betrachteten Instrumenten ATSR-2, AATSR, SLSTR und IASI ist auch die Nutzung von Instrumenten im UV Spektralbereich wie beispielsweise SCIAMACHY, GOME oder (TROP)OMI (Information zu UV-absorbierenden Aerosolen und Aerosol-Vertikalverteilung) und Multispektralinstrumenten (MERIS, OLCI) interessant. Auch die Hinzunahme geeigneter Zusatzdaten (z.B. Landcover-Klassifikationen, meteorologische Reanalysen, jahreszeitliche Klimatologien der Bodenhelligkeit/ Albedo) könnten das Aerosolretrieval eingrenzen. Weiterhin werden so eine systematische Fehlerfortpflanzung den Ausschluss von Pixeln mit hohen Unsicherheiten/ geringem Informationsgehalt der AOD ermöglichen.

Die Trennung der Teil-AOD von Aerosolkomponenten könnte die Analyse einzelner Ereignisse deutlich erleichtern, da dies die Möglichkeit bietet, unterschiedliche Einflüsse auf die Aerosoleigenschaften in der betrachteten Region separiert zu betrachten.

Abkürzungsverzeichnis

AOD	Aerosol Optische Dicke
FmAOD	Fine mode Aerosol Optische Dicke
DAOD	Dust Aerosol Optische Dicke
SSAOD	Sea Salt Aerosol Optische Dicke
ATSR	Along Track Scanning Radiometer
ATSR-2	Along Track Scanning Radiometer 2
AATSR	Advanced Along Track Scanning Radiometers
SLSTR	Sea and Land Surface Temperature Radiometer
IASI	Infrared Atmospheric Sounding Interferometer
AERONET	Aerosol Robotic Network
ORAC	Oxford-RAL Aerosol and Cloud
SWANSEA	Algorithmus der SWANSEA Universität
ADV	AATSR Dual View Algorithm
SDV	SLSTR Dual View Algorithm
IMARS	Infrared Mineral Aerosolretrieval Scheme
MAPIR	Mineral Aerosol Profiling from Infrared Radiances
ULB	Algorithmus von der Universit ´e Libre de Bruxelles
LMD	Algorithmus vom Laboratoire de M ´et ´eorologie Dynamique
WMO	Weltorganisation für Meteorologie

Literatur

- [1] H.-O. Pörtner, D. Roberts, M. Tignor, E. Poloczanska, K. Mintenbeck, A. Alegría, M. Craig, S. Langsdorf, S. Löschke, V. Möller, A. Okem und B. R. (eds.), *Climate Change 2022: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, hrsg. von IPCC (Cambridge University Press. In Press., 2022).
- [2] Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz, *Abkommen von Paris*, besucht am: 07.04.2022, <https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Artikel/Industrie/klimaschutz-abkommen-von-paris.html>.
- [3] M. Allen, O. Dube, W. Solecki, F. Aragón-Durand, W. Cramer, S. Humphreys, M. Kainuma, J. Kala, N. Mahowald, Y. Mulugetta, R. Perez, M. Wairiu und K. Zickfeld, “Global Warming of 1.5°C. An IPCC Special Report on the impacts of global warming of 1.5°C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of climate change, sustainable development, and efforts to eradicate poverty”, in, hrsg. von M.-D. V., P. Zhai, H.-O. Pörtner, D. Roberts, J. Skea, P. Shukla, A. Pirani, W. Moufouma-Okia, C. Péan, R. Pidcock, S. Connors, J. Matthews, Y. Chen, X. Zhou, M. Gomis, E. Lonnoy, T. Maycock, M. Tignor und T. Waterfield (2018) Kap. Framing and Context.
- [4] L. Sogacheva, T. Popp, A. M. Sayer, O. Dubovik, M. J. Garay, A. Heckel, N. C. Hsu, H. Jethva, R. A. Kahn, P. Kolmonen, M. Kosmale, G. de Leeuw, R. C. Levy, P. Litvinov, A. Lyapustin, P. North, O. Torres und A. Arola, “Merging regional and global aerosol optical depth records from major available satellite products”, *Atmospheric Chemistry and Physics* **20**, 2031–2056 (2020).
- [5] T. Popp, M. I. Hegglin, R. Hollmann, F. Ardhuin, A. Bartsch, A. Bastos, V. Bennett, J. Boutin, C. Brockmann, M. Buchwitz, E. Chuvieco, P. Ciais, W. Dorigo, D. Ghent, R. Jones, T. Lavergne, C. J. Merchant, B. Meyssignac, F. Paul, S. Quegan, S. Sathyendranath, T. Scanlon, M. Schröder, S. G. H. Simis und U. Willén, “Consistency of Satellite Climate Data Records for Earth System Monitoring”, *Bulletin of the American Meteorological Society* **101**, E1948–E1971 (2020).
- [6] P. Köpke, *Satellitenmeteorologie* (Ulmer, Stuttgart, 2012).
- [7] W. Roedel und T. Wagner, *Physik unserer Umwelt: Die Atmosphäre* (Springer Berlin Heidelberg, 2017).
- [8] K. Y. Kondratyev, L. S. Ivlev, V. F. Krapivin, C. A. Varostos und C. A. Varotsos, *Atmospheric Aerosol Properties* (Springer-Verlag GmbH, 10. Nov. 2005).

Literatur

- [9] O. Boucher, *Atmospheric Aerosols Properties and Climate Impacts* (Springer Netherlands, 2015).
- [10] Y. J. Kaufman, D. Tanré und O. Boucher, “A satellite view of aerosols in the climate system”, *Nature* **419**, 215–223 (2002).
- [11] J. Hansen, M. Sato und R. Ruedy, “Radiative forcing and climate response”, *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* **102**, 6831–6864 (1997).
- [12] S. Twomey, “Pollution and the planetary albedo”, *Atmospheric Environment (1967)* **8**, 1251–1256 (1974).
- [13] S. Twomey, “The Influence of Pollution on the Shortwave Albedo of Clouds”, *Journal of the Atmospheric Sciences* **34**, 1149–1152 (1977).
- [14] Deutscher Wetterdienst, *Staub aus der Sahara*, besucht am: 07.04.2022, März 2022, https://www.dwd.de/DE/wetter/thema_des_tages/2022/3/15.html;
- [15] Masson-Delmotte, V. P. Zhai, A. Pirani, S. L. Connors, C. Péan, N. C. S. Berger, L. Y. Chen, M. I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J. Matthews, T. K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu und B. Z. (eds.), “IPCC, 2021: Summary for Policymakers. In: Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on ClimateChange”, *Cambridge University Press* (2021).
- [16] D. Andrews, *An Introduction to Atmospheric Physics* (Cambridge University Press, Cambridge New York, 2010).
- [17] P. V. H. John M. Wallace, *Atmospheric Science* (Elsevier LTD, Oxford, 1. Mai 2006), 504 S., https://www.ebook.de/de/product/4444872/john_m_wallace_peter_v_hobbs_atmospheric_science.html.
- [18] D. M. Giles, A. Sinyuk, M. G. Sorokin, J. S. Schafer, A. Smirnov, I. Slutsker, T. F. Eck, B. N. Holben, J. R. Lewis, J. R. Campbell, E. J. Welton, S. V. Korkin und A. I. Lyapustin, “Advancements in the Aerosol Robotic Network (AERONET) Version 3 database – automated near-real-time quality control algorithm with improved cloud screening for Sun photometer aerosol optical depth (AOD) measurements”, *Atmospheric Measurement Techniques* **12**, 169–209 (2019).
- [19] G. de Leeuw, S. Kinne, P. Veefkind, T. Holzer-Popp, D. Stein-Zweers, D. Tanre, G. Thomas, P. North, O. Dubovik und A. Kokhanovsky, *Technical note: Aerosol models Version 1.1*, Techn. Ber. (ESA Climate Change Initiative, 2011).
- [20] D. M. Giles, *AERONET*, besucht am: 07.04.2022, Juli 2020, https://aeronet.gsfc.nasa.gov/new_web/system_descriptions_instrument.html.
- [21] B. Holben, T. Eck, I. Slutsker, D. Tanré, J. Buis, A. Setzer, E. Vermote, J. Reagan, Y. Kaufman, T. Nakajima, F. Lavenu, I. Jankowiak und A. Smirnov, “AERONET—A Federated Instrument Network and Data Archive for Aerosol Characterization”, *Remote Sensing of Environment* **66**, 1–16 (1998).

- [22] G. D. L. Alexander A. Kokhanovsky, *Satellite Aerosol Remote Sensing Over Land* (Springer Berlin Heidelberg, 20. März 2009), 408 S., https://www.ebook.de/de/product/7512895/alexander_a_kokhanovsky_gerrit_de_leeuw_satellite_aerosol_remote_sensing_over_land.html.
- [23] NASA, *Worldview*, besucht am: 07.04.2022, <https://worldview.earthdata.nasa.gov/>.
- [24] G. Mie, “Beiträge zur Optik trüber Medien, speziell kolloidaler Metallösungen”, *Annalen der Physik* **330**, 377–445 (1908).
- [25] *Envisat*, Techn. Ber. (European Space Agency, Mai 2021), <https://earth.esa.int/eogateway/missions/envisat>.
- [26] *Sentinel-3 SLSTR User Guide*, besucht am: 07.04.2022, 2021, <https://sentinel.esa.int/web/sentinel/user-guides/Sentinel-3-slstr/overview/heritage>.
- [27] G. de Leeuw, L. Sogacheva, E. Rodriguez, K. Kourtidis, A. K. Georgoulias, G. Alexandri, V. Amiridis, E. Proestakis, E. Marinou, Y. Xue und R. van der A, “Two decades of satellite observations of AOD over mainland China using ATSR-2, AATSR and MODIS/Terra: data set evaluation and large-scale patterns”, *Atmospheric Chemistry and Physics* **18**, 1573–1592 (2018).
- [28] G. Thomas, *Algorithm Theoretical Basis Document AATSR Oxford-RAL Aerosol and Cloud (ORAC) Version 3.0*, Techn. Ber. (Copernicus Climate Change Service, 2019).
- [29] A. Birks, *AATSR Product Handbook*, besucht am: 07.04.2022, ESA, VEGA Group PLC, und University of Leicester (Juli 2014), <http://envisat.esa.int/handbooks/aatsr/CNTR1.html>.
- [30] G. de Leeuw, T. Holzer-Popp, S. Bevan, W. H. Davies, J. Descloitres, R. G. Grainger, J. Griesfeller, A. Heckel, S. Kinne, L. Klüser, P. Kolmonen, P. Litvinov, D. Martynenko, P. North, B. Ovigneur, N. Pascal, C. Poulsen, D. Ramon, M. Schulz, R. Siddans, L. Sogacheva, D. Tanré, G. E. Thomas, T. H. Virtanen, W. von Hoyningen Huene, M. Vountas und S. Pinnock, “Evaluation of seven European aerosol optical depth retrieval algorithms for climate analysis”, *Remote Sensing of Environment* **162**, 295–315 (2015).
- [31] World Meteorological Organisation, *OSCAR - Observing Systems Capability Analysis and Review Tool - ATSR-2*, besucht am: 07.04.2022, https://space.oscar.wmo.int/instruments/view/atrs_2.
- [32] World Meteorological Organisation, *OSCAR - Observing Systems Capability Analysis and Review Tool - AATSR*, besucht am: 07.04.2022, <https://space.oscar.wmo.int/instruments/view/aatsr>.
- [33] World Meteorological Organisation, *OSCAR - Observing Systems Capability Analysis and Review Tool - SLSTR*, besucht am: 07.04.2022, <https://space.oscar.wmo.int/instruments/view/slstr>.
- [34] *Sentinel-3 SLSTR Technical Guide*, besucht am: 07.04.2022, Apr. 2021, <https://sentinel.esa.int/web/sentinel/user-guides/Sentinel-3-slstr/overview/heritage>.

Literatur

- [35] W. M. F. Grey und P. R. J. North, “Satellite Aerosol Remote Sensing over Land”, in , hrsg. von A. A. Kokhanovsky und G. de Leeuw (Springer Berlin Heidelberg, 20. März 2009) Kap. Aerosol optical depth from dual-view (A)ATSR satellite observations, S. 161–192, https://www.ebook.de/de/product/7512895/alexander_a_kokhanovsky_gerrit_de_leeuw_satellite_aerosol_remote_sensing_over_land.html.
- [36] L. Sogacheva, P. Kolmonen, T. H. Virtanen, E. Rodriguez, G. Saponaro und G. de Leeuw, “Post-processing to remove residual clouds from aerosol optical depth retrieved using the Advanced Along Track Scanning Radiometer”, *Atmospheric Measurement Techniques* **10**, 491–505 (2017).
- [37] T. Holzer-Popp, G. de Leeuw, J. Griesfeller, D. Martynenko, L. Klüser, S. Bevan, W. Davies, F. Ducos, J. L. Deuzé, R. G. Grainger, A. Heckel, W. von Hoyningen-Hüne, P. Kolmonen, P. Litvinov, P. North, C. A. Poulsen, D. Ramon, R. Siddans, L. Sogacheva, D. Tanre, G. E. Thomas, M. Vountas, J. Descloitres, J. Griesfeller, S. Kinne, M. Schulz und S. Pinnock, “Aerosol retrieval experiments in the ESA Aerosol_cci project”, *Atmospheric Measurement Techniques* **6**, 1919–1957 (2013).
- [38] EUMETSAT, *IASI*, besucht am: 07.04.2022, <https://www.eumetsat.int/iasi>.
- [39] D. Blumstein, G. Chalon, T. Carlier, C. Buil, P. Hebert, T. Maciaszek, G. Ponce, T. Phulpin, B. Tournier, D. Simeoni, P. Astruc, A. Clauss, G. Kayal und R. Jegou, “IASI instrument: technical overview and measured performances”, hrsg. von M. Strojnik, 10.1117/12.560907 (2004).
- [40] ESA, *About IASI*, besucht am: 07.04.2022, Apr. 2021, https://www.esa.int/Applications/Observing_the_Earth/Meteorological_missions/MetOp/About_IASI.
- [41] S. Samaras, *Algorithm Theoretical Basis Document Infrared Mineral Aerosol Retrieval Scheme (IMARS) Version 2.5a*, Techn. Ber. (Copernicus Climate Change Service, 2019).
- [42] P. North, A. Heckel, W. Davies, S. Bevan und W. Grey, *Algorithm Theoretical Basis Document Instruments: ATSR-2 and AATSR Algorithm: SU-ATSR Version: 4.3*, Techn. Ber. (Copernicus Climate Change Service, 2017).
- [43] P. North und A. Heckel, *Algorithm Theoretical Basis Document Instruments: SLSTR Algorithm: SU-SLSTR Version: 1.1a*, Techn. Ber. (Copernicus Climate Change Service, 2017).
- [44] P. Kolmonen und L. Sogacheva, *Algorithm Theoretical Basis Document AATSR Dual View Algorithm (ADV) Version 4.1*, Techn. Ber. (Copernicus Climate Change Service, 2017).
- [45] L. Sogacheva, *Algorithm Theoretical Basis Document SLSTR Dual and Single View Algorithm (SDV/SSV) Version 1.2a*, Techn. Ber. (Copernicus Climate Change Service, 2019).
- [46] V. Capelle, *Algorithm Theoretical Basis Document LMD Dust properties retrieval Algorithm Version 2.1a*, Techn. Ber. (Copernicus Climate Change Service, 2019).

- [47] S. Vandenbussche, *Algorithm Theoretical Basis Document Mineral Aerosol Profiling from Infrared Radiances (MAPIR) Version 4.1a*, Techn. Ber. (Copernicus Climate Change Service, 2019).
- [48] L. Clarisse, *Algorithm Theoretical Basis Document ULB Algorithm for IASI Instruments Version 8*, Techn. Ber. (Copernicus Climate Change Service, 2019).
- [49] T. Popp, “uncertainty corrections”, Mailverkehr, Apr. 2021.
- [50] NASA, *Panoply netCDF, HDF and GRIB Data Viewer*, besucht am: 07.04.2022, Mai 2021, <https://www.giss.nasa.gov/tools/panoply/>.
- [51] WMO, *WMO Guidelines on the Calculation of Climate Normals*, 2017.
- [52] Climate Change Service, *Calculating climatologies and anomalies*, besucht am: 07.04.2022, 2020, https://cds.climate.copernicus.eu/toolbox/doc/how-to/13_how_to_calculate_climatologies_and_anomalies/13_how_to_calculate_climatologies_and_anomalies.html.
- [53] M. Hussain und I. Mahmud, “pyMannKendall: a python package for non parametric Mann Kendall family of trend tests.”, *Journal of Open Source Software* **4**, 1556 (2019).
- [54] H. B. Mann, “Nonparametric Tests Against Trend”, *Econometrica* **13**, 245 (1945).
- [55] M. G. Kendall, *Rank correlation methods*, fourth (Griffin London, 1970).
- [56] J. Li, B. E. Carlson, O. Dubovik und A. A. Lacis, “Recent trends in aerosol optical properties derived from AERONET measurements”, *Atmospheric Chemistry and Physics* **14**, 12271–12289 (2014).
- [57] P. K. Sen, “Estimates of the Regression Coefficient Based on Kendall’s Tau”, *Journal of the American Statistical Association* **63**, 1379–1389 (1968).
- [58] R. M. Hirsch, J. R. Slack und R. A. Smith, “Techniques of trend analysis for monthly water quality data”, *Water Resources Research* **18**, 107–121 (1982).
- [59] T. Popp, “bias station statistics AOD”, Mailverkehr, Nov. 2021.
- [60] L. Sogacheva, “Comment to SDV v2.1 SLSTR AOD product”, Öffentlicher Chat auf der ATMOS, Juli 2021.
- [61] ESA, *User Guides / Sentinel-3 SLSTR / Overview / Heritage*, besucht am: 07.04.2022, <https://sentinel.esa.int/web/sentinel/user-guides/Sentinel-3-slstr/overview/heritage>.
- [62] *DIRECKE Weltatlas* (Westermann Kartographie, 2002).
- [63] D. M. Giles, *AERONET - Mission*, besucht am: 07.04.2022, <https://aeronet.gsfc.nasa.gov/>.
- [64] A. Mortier, J. Gliß, M. Schulz, W. Aas, E. Andrews, H. Bian, M. Chin, P. Ginoux, J. Hand, B. Holben, H. Zhang, Z. Kipling, A. Kirkevåg, P. Laj, T. Lurton, G. Myhre, D. Neubauer, D. Olivié, K. von Salzen, R. B. Skeie, T. Takemura und S. Tilmes, “Evaluation of climate model aerosol trends with ground-based observations over the last 2 decades – an AeroCom and CMIP6 analysis”, *Atmospheric Chemistry and Physics* **20**, 13355–13378 (2020).

Literatur

- [65] R. Wang, S. Tao, W. Wang, J. Liu, H. Shen, G. Shen, B. Wang, X. Liu, W. Li, Y. Huang, Y. Zhang, Y. Lu, H. Chen, Y. Chen, C. Wang, D. Zhu, X. Wang, B. Li, W. Liu und J. Ma, “Black Carbon Emissions in China from 1949 to 2050”, *Environmental Science & Technology* **46**, 7595–7603 (2012).
- [66] W. Qin, Y. Liu, L. Wang, A. Lin, X. Xia, H. Che, M. Bilal und M. Zhang, “Characteristic and Driving Factors of Aerosol Optical Depth over Mainland China during 1980–2017”, *Remote Sensing* **10**, 1064 (2018).
- [67] Tagesschau, *Extremhitze und Waldbrände im Westen der USA*, besucht am: 07.04.2022, Juli 2021, <https://www.tagesschau.de/ausland/amerika/waldbraende-kalifornien-nevada-101.html>.
- [68] E. Faust und M. Steuer, *Rekordschäden durch die „Black Summer“ Buschbrände in Australien*, besucht am: 07.04.2022, Juli 2020, <https://www.munichre.com/topics-online/de/climate-change-and-natural-disasters/natural-disasters/wildfires/black-summer-bushfires-in-australia.html>.
- [69] E. Faust und M. Steuer, *Klimawandel erhöht Waldbrandrisiko in Kalifornien*, besucht am: 07.04.2022, März 2019, <https://www.munichre.com/topics-online/de/climate-change-and-natural-disasters/climate-change/climate-change-has-increased-wildfire-risk.html>.
- [70] Australia Royal Commission into Natural Disaster Arrangements und M. Binskin, *Report*, besucht am: 07.04.2022, März 2022, <http://nla.gov.au/nla.obj-2916701335>.
- [71] *Brennendes Australien 2019 / 2020 → die Feuerherde*, besucht am: 07.04.2022, Jan. 2020, <https://www.fireworld.at/2020/01/06/brennendes-australien-2019-2020-%E2%86%92-die-feuerherde/>.
- [72] L. Fischer, *Warum Australiens Brände diesmal anders sind*, besucht am: 07.04.2022, Jan. 2020, <https://www.spektrum.de/wissen/warum-australiens-braende-diesmal-anders-sind/1697494>.
- [73] BBC, *Australia fires: A visual guide to the bushfire crisis*, besucht am: 07.04.2022, Jan. 2020, <https://www.bbc.com/news/world-australia-50951043>.
- [74] R. Dutta, A. Das und J. Aryal, “Big data integration shows Australian bush-fire frequency is increasing significantly”, *Royal Society Open Science* **3**, 150241 (2016).
- [75] E. Faust und M. Steuer, “New hazard and risk level for wildfires in California and worldwide”, *Munich RE* (2019).
- [76] CALFIRE, *Stats and Events*, besucht am: 07.04.2022, <https://www.fire.ca.gov/stats-events/>.
- [77] CALFIRE, *California Wildfires and Acres for all Jurisdictions*, besucht am: 07.04.2022, Aug. 2020, <https://www.fire.ca.gov/media/11397/fires-acres-all-agencies-thru-2018.pdf>.
- [78] R. Seiler, *Foto Saharastaub über Aindling 15.03.2022*, Privates Foto.

- [79] H. Flentje, B. Briel, C. Beck, M. C. Coen, M. Fricke, J. Cyrus, J. Gu, M. Pitz und W. Thomas, “Identification and monitoring of Saharan dust: An inventory representative for south Germany since 1997”, *Atmospheric Environment* **109**, 87–96 (2015).
- [80] G. Müller, *Distribution and intensity of Saharan dust in Germany*, besucht am: 07.04.2022, 2019.
- [81] R. Hahn, *Die Waldbrandsaison 2021 - Schon wieder ein Feuersommer*, besucht am: 07.04.2022, Nov. 2021, <https://www.faz.net/aktuell/wissen/erde-klima/waldbraende-sommer-2021-durch-klimawandel-wuetet-feuer-intensiver-17608499.html>.
- [82] J. Keeley und A. Syphard, “Climate Change and Future Fire Regimes: Examples from California”, *Geosciences* **6**, 37 (2016).
- [83] M. Flannigan, B. Stocks, M. Turetsky und M. Wotton, “Impacts of climate change on fire activity and fire management in the circumboreal forest”, *Global Change Biology* **15**, 549–560 (2009).
- [84] M. D. Hurteau, J. B. Bradford, P. Z. Fulé, A. H. Taylor und K. L. Martin, “Climate change, fire management, and ecological services in the southwestern US”, *Forest Ecology and Management* **327**, 280–289 (2014).
- [85] R. J. Flowerdew und J. D. Haigh, “An approximation to improve accuracy in the derivation of surface reflectances from multi-look satellite radiometers”, *Geophysical Research Letters* **22**, 1693–1696 (1995).
- [86] M. Kosmale und T. Popp, “Ensembles of satellite aerosol retrievals based on three AATSR algorithms within aerosol_cci”, *European Geosciences Union General Assembly 2016* (2016).
- [87] T. Popp, *Algorithm Theoretical Baseline Documents Aerosol products*, Techn. Ber. (Copernicus Climate Change Service, 2019).
- [88] S. M. Newman, J. A. Smith, M. D. Glew, S. M. Rogers und J. P. Taylor, “Temperature and salinity dependence of sea surface emissivity in the thermal infrared”, *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society* **131**, 2539–2557 (2005).
- [89] D. K. Zhou, A. M. Larar, X. Liu, W. L. Smith, L. L. Strow, P. Yang, P. Schlüssel und X. Calbet, “Global Land Surface Emissivity Retrieved From Satellite Ultraspectral IR Measurements”, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* **49**, 1277–1290 (2011).
- [90] N. R. Nalli, P. J. Minnett und P. van Delst, “Emissivity and reflection model for calculating unpolarized isotropic water surface-leaving radiance in the infrared I: Theoretical development and calculations”, *Applied Optics* **47**, 3701 (2008).
- [91] Copernicus Climate Change Service, *Aerosol properties gridded data from 1995 to present derived from satellite observations*, 2019.

Abbildungsverzeichnis

2.1.	Volumenverteilung der unterschiedlichen Aerosolpartikel [7]	3
2.2.	Einfluss der Aerosole auf das Klima mit teilweise großen Fehlerbereichen [15].	5
4.1.	Verteilung der AERONET-Stationen [20]	8
4.2.	Vom Satelliten detektiertes Licht hat einen unterschiedlichen Weg zurückgelegt. Zu sehen sind in a) die atmosphärischen Beiträge, b) die direkten Beiträge des Erdbodens, c) die indirekten Beiträge des Erdbodens, d) die Beiträge der umgebenden Erdoberfläche, e) andere Beiträge der Umgebung wie beispielsweise Wolken und f) die Kombination aus all diesen Beiträgen zur am Satelliten detektierten Strahlung [9].	10
4.3.	Die von der Sahara ausgehende Staubwolke ist über dem Ozean, also einer dunklen Oberfläche, wesentlich deutlicher sichtbar als über dem hellen Wüstenboden. Aufnahme des Saharasturms vom 11. Juni 2020 aufgenommen mit Modis Terra [23].	11
4.4.	AATSR Messgeometrie [29]	13
4.5.	IASI Messgeometrie [38]	14
5.1.	Beispielhafte Darstellung einiger Regionen der verwendeten Regionendefinitionen [4], Karte aus Panoply [50]	16
5.2.	Zeitserien von Nordafrika, links ohne und rechts mit Biaskorrektur.	19
6.1.	Verlauf der AOD weltweit (erste Zeile), auf der Nordhalbkugel (zweite Zeile) und auf der Südhalbkugel (dritte Zeile) ermittelt über die Algorithmen SWANSEA, ORAC, ADV/SDV und Ensemble der Dual-view-Instrumenten: ATSR-2 (links), AATSR (mitte) und SLSTR (rechts) im Vergleich mit den Daten der AERONET Bodenstationen	22
6.2.	Darstellung der ATSR-2 Daten der Algorithmen ORAC, SWANSEA, ADV und Ensemble in den vier unterschiedlichen Gebieten: Ozean Nordhalbkugel, Ozean Südhalbkugel, Wüsten und Land. Die Einzeldaten der verschiedenen zusammengefassten Regionen befinden sich im Anhang A.7.1.	24
6.3.	Darstellung der AATSR Daten der Algorithmen ORAC, SWANSEA, ADV und Ensemble in den vier unterschiedlichen Gebieten: Ozean Nordhalbkugel, Ozean Südhalbkugel, Wüsten und Industrieländer. Die Einzeldaten der verschiedenen zusammengefassten Regionen befinden sich im Anhang A.7.2.	25

6.4.	Darstellung der SLSTR Daten der Algorithmen ORAC, SWANSEA, ADV und Ensemble in den vier unterschiedlichen Gebieten: Ozean Nordhalbkugel, Ozean Südhalbkugel, Wüsten und Industrieländer. Die Einzeldaten der verschiedenen zusammengefassten Regionen befinden sich im Anhang A.7.3.	26
6.5.	Darstellung der IASI Daten der Algorithmen ULB, LMD, MAPIR, IMARS und Ensemble im Dust Belt.	27
6.6.	Beispielhafter Vergleich der Klimatologien von ATSR-2, AATSR und SLSTR Daten jeweils für einen ausgewählten Algorithmus in den vier unterschiedlichen Regionen: a) Europa (Ensemble), b) Wüste Gobi (SWANSEA), c) Pazifik3 (ADV/SDV) und d) Australien (ORAC). Die Daten der weiteren Regionen und Algorithmen befinden sich im Anhang A.7.5.	28
6.7.	Vergleich der AOD mit Fehlerbereich (Ensemble AATSR) und den AOD-Komponenten FmAOD (Ensemble AATSR), DAOD (ULB IASI), SSAOD (EAC4) und der Summe aus FmAOD, DAOD und SSAOD weltweit im Zeitraum von 2008 bis 2010.	30
6.8.	Vergleich der AOD mit Fehlerbereich (Ensemble AATSR), FmAOD (Ensemble AATSR), DAOD (ULB IASI), SSAOD (EAC4) und der Summe aus FmAOD, DAOD und SSAOD im Zeitraum von 2008 bis 2010 in den Regionen: Nord Amerika, Europa, Ozean mit wenig Meersalzaerosolen, 2 Regionen Ozean mit viel Meersalzaerosolen und Sahara.	31
7.1.	Vergleich der AOD Trends. Links sind die Daten inklusive Trends in Europa und rechts die aus Asien. In der ersten Zeile sind die Daten und Trends von 2003 bis 2012 des Ensembles von AATSR dargestellt. Zeile zwei zeigt die Trends und Daten von AERONET in diesem Zeitraum, aus [64]. In Zeile drei sind die Daten des AATSR Ensembles dargestellt, wobei hier nur die Pixel berücksichtigt werden, in denen eine AERONET Station liegt, die zu den Daten in Zeile zwei beigetragen hat.	35
7.2.	AOD Trendkarten des Ensemble Algorithmus.	36
7.3.	Vergleich der AOD Trends für Asien.	37
7.4.	Vergleich der AOD und FmAOD Trends im Westen von Nord Amerika. . .	38
7.5.	Vergleich der AOD und FmAOD Trends in Australien.	39
7.6.	DAOD Trends in Europa.	40
8.1.	Lokalisierung der Feuer in Australien im Winter 2019/2020.	44
8.2.	Ausschnitt eines Videos „Transport Australien Feuer“ auf beiliegender CD das den Transport des Rauchs der Feuer in Australien beobachtet anhand der Anomalie der FmAOD von SWANSEA gemessen mit SLSTR.	44
8.3.	AOD (schwarz) und FmAOD (blau) von dem Ensemble des SLSTR Instruments und DAOD (rot) von dem IASI Ensemble a) vor dem Hintergrund der Klimatologie der jeweiligen Instrumente und b) als Anomalie Zeitserie. Deutlich zu sehen ist die Anomalie in der Feuersaison 2019/20 vor allem in AOD und FmAOD.	45

Abbildungsverzeichnis

8.4.	FmAOD des SWANSEA Algorithmus der Dual-view-Instrumente ATSR-2, AATSR und SLSTR mit Biaskorrekturen für ATSR-2 und SLSTR. Hier sind die Feuer den Winter 2019/2020 deutlich zu sehen.	46
8.5.	FmAOD des Ensemble Algorithmus der Dual-view-Instrumente ATSR-2, AATSR und SLSTR mit Biaskorrekturen für ATSR-2 und SLSTR über Kalifornien im Vergleich zur jährlich verbrannte Fläche [76, 77]. Die Feuer 2018, 2020 und 2021 sind deutlich zu sehen.	47
8.6.	Gelbfärbung des Himmels über Aindling durch Saharastaub über Süddeutschland am 15.03.2022 [78].	48
8.7.	Ausschnitt des Videos „Saharastaubausbruch “auf beiliegender CD eines Saharastaubausbruchs nach Deutschland im Mai 2008 mit den Daten des Ensemble Algorithmus des IASI Instruments. In schwarz ist das Gebiet über Deutschland markiert und in grau die Region im Süden Europas, die zur Analyse verwendet wird.	49
8.8.	Korrelationen zwischen Saharastaubevents in Bodenmessungen und in Satellitenmessungen mit den verschiedenen Algorithmen.	50
8.9.	Korrelationen zwischen Saharastaubevents in Bodenmessungen und in Satellitenmessungen mit Kombinationen der verschiedenen Algorithmen.	51
8.10.	Betrachtung der Trends in der Anzahl der beobachteten Saharastaubevents pro Jahr in Deutschland.	52
A.1.	Darstellung des Raumwinkels $\Delta\Omega$, nach [16]	xv
A.2.	Auf dem Weg von A_1 nach A_2 wechselwirkt die Strahlung mit einem strahlungsaktiven Gas in Form von Absorption, Streuung oder Emission, nach [16].	xvi
A.3.	Strahlungsaktives Gas emittiert elektromagnetische Strahlung, welche aus dem Weg durch das Medium abgeschwächt wird, nach [16]	xvii

Tabellenverzeichnis

4.1. Spektralkanäle der ATSR Instrumente [34], *nur bei SLSTR	13
A.1. Regionendefinition, orientiert an [4]	xxi
A.2. Verwendete AERONET-Stationen in Europa und Asien [64]	xxii
A.3. Die verwendeten Versionen der dargestellten Algorithmen jeweils bezogen aus [91]	xxiii
A.4. Vergleich der Biaskorrekturen aus den Stationsstatistiken der AERONET Stationen [59] und der in Kapitel 5.3 beschriebenen Methode ohne Trend- wechsel	xxv
A.5. Vergleich der Biaskorrekturen aus den Stationsstatistiken der AERONET Stationen [59] und der in Kapitel 5.3 beschriebenen Methode ohne Trend- wechsel	xxv

A. Anhang

A.1. Aerosolquellen [9]

Maritime Aerosole Wind über dem Ozean führt zu einer Auslösung kleiner Meerwassertropfen, in welchen sich durch Verdampfen des Wassers der Salzgehalt erhöht. Damit entstehen je nach Umgebungsbedingungen mehr oder weniger hydrierte Meersalzaerosolpartikel mit einem Durchmesser von 100 nm bis zu einigen zehn μm , welche auch biologische und andere in Meerwasser enthaltene Materialien beinhalten können.

Wüstenstaubaerosole In trockenen Gebieten der Kontinente, beispielsweise in Wüsten und ariden und semiariden Regionen, in denen die Vegetation den Wind nicht verlangsamen kann, kann dieser Mineralstaub mit einer Größe von typischerweise 100 nm bis einigen zehn μm aufwirbeln. Dieser Mineralstaub wird auch als Wüstenstaubaerosole bezeichnet, ist stark abhängig von den Umgebungs- und Wetterbedingungen und kann teilweise über sehr große Entfernungen (Tausende Kilometer) transportiert werden. In Europa ist beispielsweise immer wieder eine Färbung des Himmels aufgrund von Sahara-staub zu beobachten.

Vulkanische Aerosole Bei Vulkanausbrüchen kann vulkanische Asche, bestehend aus Mineralien und Gesteinspulver von einer Größe im Bereich von Mikro- und Millimetern. Neben diesen großen Partikeln, die nur über einige hundert bis tausend Kilometer transportiert werden können bevor sie wieder zu Boden fallen, werden von einem Vulkan auch schwefelreiche Gase ausgestoßen, die in der Atmosphäre Schwefelaerosole mit einer Größe von unter einem Mikrometer, welche abhängig von der Höhe in der sie freigesetzt werden über weite Strecken und über einen langen Zeitraum in der Atmosphäre verteilt werden.

Biogene Aerosole Die Bezeichnung biogene Aerosole umfasst sowohl primäre als auch sekundäre biogene Aerosolpartikel. Beispiele für primäre biogene Aerosole, welche in Größe und Zusammensetzung stark variieren, sind: Überreste von Pflanzen und Insekten ($\geq 100 \mu\text{m}$), Pollen, Sporen, große Bakterien (1 – 100 μm), kleine Bakterien und Viren ($\leq 1\mu\text{m}$). Biologische Systeme an Land und im Meer liefern auch die Grundlage für das Entstehen weiterer Aerosole mit einer Größe von einigen 10 Mikrometern - die sogenannten sekundären biogenen Aerosole. Beispielsweise wird von einigen Phytoplanktonarten Dimethylsulfid produziert, aus welchem schwefelhaltige Aerosole entstehen können. Außerdem stoßen Pflanzen und Algen flüchtige organische Substanzen aus, welche in der Atmosphäre oxidieren und welche als atmosphärisches Aerosol vorliegt.

A.2. Herleitung Strahlungstransportgleichung

Aerosole aus Biomassenverbrennung Durch die unvollständige Verbrennung von Biomasse wird organischer Kohlenstoff ("brown carbon"), bestehend aus Wasserstoff und Sauerstoff und einem großen Anteil an schwarzem Kohlenstoff ("black carbon"), mit einer Größe von unter einem Mikrometer freigesetzt. Dieser ist in Form von Rauchwolken gut zu sehen und kann sowohl natürlich als auch anthropogene Ursachen haben.

Aerosole aus der Verbrennung von fossilen Brennstoffen Die Luftverschmutzung in Entwicklungs- und Industrieländern besteht zu einem großen Teil aus schwarzem und organischem Kohlenstoff und Schwefelaerosolen (Sulfat). Diese Partikel mit einem Durchmesser kleiner als ein Mikrometer kommen aus der Verbrennung von fossilen Brennstoffen, wie Kohle, Erdöl und Erdgas.

A.2. Herleitung Strahlungstransportgleichung

Die folgende Herleitung der Strahlungstransportgleichung orientiert sich an dem Lehrbuch „An Introduction to Atmospheric Physics“ [16].

Die Messgeräte messen mit verschiedenen Kanälen jeweils die ankommende Strahlung in einem Bereich um eine bestimmte Wellenlänge, somit monochromatische Strahlung. Diese liegen dann im Frequenzbereich $\nu + d\nu$. Aus diesem Grund wird hier vorerst die monochromatische bzw. spektrale Strahlung $L_\nu(\mathbf{r}, \mathbf{s})$ betrachtet, wobei sich die gesamte richtungsabhängige Strahlung $L(\mathbf{r}, \mathbf{s})$ dann als Integral der spektralen Strahlung über den kompletten Frequenzbereich berechnen lässt:

$$L(\mathbf{r}, \hat{\mathbf{s}}) = \int_0^\infty L_\nu(\mathbf{r}, \hat{\mathbf{s}}) d\nu \quad (\text{A.1})$$

Die spektrale Strahlungsenergieflussdichte $L_\nu(\mathbf{r}, \mathbf{s})$ ist die von einem Flächenelement ΔA am Ort \mathbf{r} in Richtung des Einheitsvektors $\hat{\mathbf{s}}$ in einen Raumwinkel $\Delta\Omega$ abgegebene Energie. Dargestellt ist dies in Abbildung A.1.

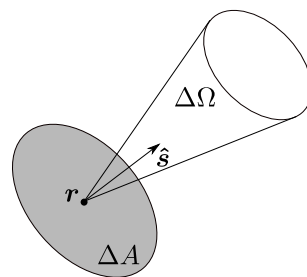


Abbildung A.1.: Darstellung des Raumwinkels $\Delta\Omega$, nach [16]

Im Folgenden wird der Durchgang dieser spektrale Strahlungsenergieflussdichte $L_\nu(\mathbf{r}, \mathbf{s})$ durch ein Medium, im konkreten Fall dann der Atmosphäre, betrachtet.

Bei dem Durchgang der monochromatischen Strahlung L_ν der Frequenz ν von einer Fläche A_1 entlang eines Weges ds zu einer Fläche A_2 durch ein Medium, wie in Abbildung A.2 dargestellt, wird diese in Abhängigkeit der Dichte des strahlungsaktiven Gases $\rho_a(s)$ und

A. Anhang

dem Weg ds absorbiert und gestreut. Als strahlungsaktives Gas wird hierbei ein Gas bezeichnet, das elektromagnetische Strahlung absorbieren, emittieren und/oder streuen kann.

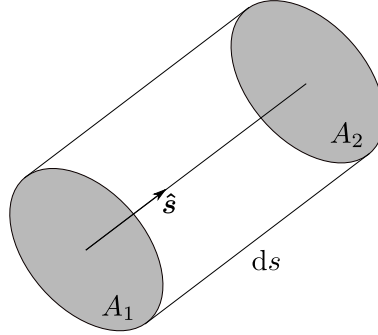


Abbildung A.2.: Auf dem Weg von A_1 nach A_2 wechselwirkt die Strahlung mit einem strahlungsaktiven Gas in Form von Absorption, Streuung oder Emission, nach [16].

Der von Temperatur und Druck abhängige monochromatische Extinktionskoeffizient k_ν , der sich als Summe aus den monochromatischen Absorptionskoeffizienten a_ν und Streukoeffizienten s_ν berechnet, beschreibt dabei die Abschwächung der ursprünglichen Strahlung dL_ν durch von Absorption und Streuung. Dies wird durch das Lambertsche Gesetz ausgedrückt:

$$dL_\nu = -k_\nu(s)\rho_a(s)L_\nu(s)ds, \quad (\text{A.2})$$

wobei hier das negative Vorzeichen die Abschwächung der Strahlung ausdrückt. Der Ausdruck $k_\nu(s)\rho_a(s)$ wird hierbei als Extinktion bezeichnet.

Zusätzlich zu Absorption und Streuung emittiert ein strahlungsaktives Gas auch selbst elektromagnetische Strahlung J_ν , welche als Zuwachs zu der ursprünglichen Strahlung L_ν auftritt. Somit ergibt sich ein zusätzlicher Quellterm:

$$dL_\nu = +k_\nu(s)\rho_a(s)J_\nu(s)ds \quad (\text{A.3})$$

Berücksichtigt man Zuwachs (Gleichung A.3) und Abschwächung (Gleichung A.2) der ursprünglichen Strahlung ergibt sich die Strahlungstransportgleichung, oder auch Schwarzschildgleichung, welche das physikalische Grundprinzip des Strahlungstransports beschreibt. Sie verknüpft die charakteristischen Größen der Atmosphäre, wie die Dichte der strahlungsaktiven Gase und seine Wechselwirkung mit elektromagnetischer Strahlung durch Emission, Streuung und Absorption, mit einer gemessenen spektralen Strahlungsenergiedichte:

$$\frac{dL_\nu}{ds} = -k_\nu\rho_a(L_\nu - J_\nu) \quad (\text{A.4})$$

Zur Lösung dieser Differentialgleichung wird häufig die Größe des optischen Weges ein-

A.2. Herleitung Strahlungstransportgleichung

geführt:

$$\chi_\nu(s) = \int_{s_0}^s k_\nu(s') \rho_a(s') ds' \quad (\text{A.5})$$

Durch Umstellen der Strahlungstransportgleichung (A.4) und Einsetzen des optischen Weges ergibt sich:

$$J_\nu = L_\nu + \frac{dL_\nu}{k_\nu \rho_a ds} = L_\nu + \frac{dL_\nu}{d\chi_\nu} \quad (\text{A.6})$$

Multipliziert man diese Gleichung mit e^{x_ν} und wendet die Produktregel des Differenzierens an ergibt sich:

$$e^{x_\nu} J_\nu = e^{x_\nu} \frac{dL_\nu}{d\chi_\nu} + e^{x_\nu} L_\nu = \frac{d}{d\chi_\nu} (L_\nu e^{x_\nu}) \quad (\text{A.7})$$

Mit der Annahme, dass am Punkt s_0 die spektrale Strahlung $L_{\nu 0}$ beträgt, ergibt sich durch Integration:

$$L_\nu(s) = \int_0^{\chi_\nu} J_\nu(\chi') e^{-(\chi_\nu - \chi')} d\chi' + L_{\nu 0} e^{-\chi_\nu} \quad (\text{A.8})$$

Bei der Betrachtung der Kanäle im sichtbaren Bereich, in dem keine Emission durch strahlungsaktive Gase und Aerosole auftritt, fällt der Quellterm weg und es ergibt sich das Beersche Gesetz:

$$L_\nu(s) = L_{\nu 0} e^{-\chi_\nu} \quad (\text{A.9})$$

Die Strahlung am Ort s ergibt sich somit aus der Strahlung, die vom Ort $s_0 = 0$ ausgehend entlang des Weges s exponentiell gedämpft wird, und der Strahlung, die in den Wegstücken ds' an den Orten s' emittiert wird und entlang des Weges $s - s'$ exponentiell gedämpft wird, wie in Abbildung A.3 dargestellt.

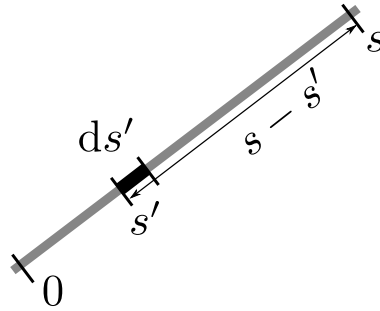


Abbildung A.3.: Strahlungsaktives Gas emittiert elektromagnetische Strahlung, welche aus dem Weg durch das Medium abgeschwächt wird, nach [16]

Dies kann ausgenutzt werden um Rückschlüsse auf die Konzentration und die Eigenschaften der Aerosole in der Atmosphäre zu ziehen.

A.3. Verschiedene Algorithmen zum Retrieval von Aerosolsatellitendaten

A.3.1. Für die Instrumente ATSR2, AATSR und SLSTR

ORAC Es wird ein Optimaler Schätzer Verfahren mit einer strikten Fehlerfortpflanzung verwendet, wobei aus anderen unabhängigen Messungen bekanntes Wissen einfließt. Für die Berücksichtigung der unterschiedlichen Bodenalbedo wird über Land, wie auch beim Algorithmus der SWANSEA Universität, die Besonderheit der Dual-view-Instrumente ausgenutzt. Hier wird die von der Erdoberfläche reflektierte Strahlung parametrisiert, in einen nur von der Beobachtungsgeometrie abhängigen und einen nur von der Wellenlänge abhängigen Anteil. Dies ermöglicht die Berechnung der Bodenalbedo. Der über Ozean angewendete Algorithmus kann gleichermaßen bei Single- und Dual-view-Instrumenten verwendet werden und verwendet die von MODIS ermittelten Daten zur Oberflächenalbedo [28].

ADV Über Ozean verwendet der ADV Algorithmus ein Modell der Ozeanoberfläche mit theoretischen und empirischen Grundlagen über das Reflexionsvermögen. Der ADV Algorithmus über Land basiert auf der Annahme, dass das Verhältnis k der Bodenreflektanz für die beiden Blickwinkel unabhängig von der Wellenlänge λ ist [85]. Mit dieser Annahme können aus den gemessenen Strahlungen sowohl Information zur Oberflächenalbedo als auch zu den atmosphärischen Aerosoleigenschaften gewonnen werden [44, 45].

SWANSEA Das Aerosolretrieval der SWANSEA Universität nutzt eine iterative Optimierung zur Berechnung der Aerosoleigenschaften. Hier werden für über Land (mit Verwendung der beiden Blickrichtungen) und für über Ozean (mit Ausnutzung der geringen reflektierten Strahlung im roten und infraroten Bereich) unterschiedliche parametrisierte Modelle verwendet [42, 43].

Ensemble Das Ensemble nutzt die Stärken der einzelnen zuvor beschriebenen Algorithmen aus und kombiniert die Daten dieser gewichtet mit ihrer Messunsicherheit. Dabei werden Korrekturfunktionen angewendet, die aus den Unsicherheiten der Algorithmen ihren Fehler im Vergleich zu Validation mit AERONET liefern [49]. Durch dieses Verfahren lässt sich die größte Übereinstimmung mit den Daten der AERONET Bodenstationen erreichen [86, 87].

A.3.2. Für das IASI Instrument

IMARS Der IMARS (Infrared Mineral Aerosol Retrieval Scheme) Algorithmus ermittelt die Dust AOD sowohl im terrestrischen infrarot als auch im sichtbaren Bereich über eine probabilistische Schätzung des atmosphärischen Zustands basierend auf einer Simulation von Pseudokanälen. Der Einfluss der Oberflächenemissivität wird über einen Vergleich und gewichten Mittelwert von unterschiedlichen Beispieloberflächen ermittelt [41].

MAPIR Der MAPIR (Mineral Aerosol Profiling from Infrared Radiances) Algorithmus des Belgian Institute For Space Aeronomy nutzt das Optimale Schätzer Verfahren für die Ermittlung von vertikalen Staubaerosolprofilen, der Oberflächentemperatur und der Dust Aerosoleigenschaften. Für die Oberflächenreflektivität werden verschieden Modelle angewendet: über dem Ozean das Modell von Newman [88] und über Land die monatsweisen Klimatologien von Zhou [47, 89].

ULB Das ULB Retrieval von der Université Libre de Bruxelles verwendet ein neuronales Netz und eine Datenbank für die Bodentemperatur um die Dust Aerosol Optische Dicke zu bestimmen. Über Land wird die Oberflächenreflektivität mit dem monatsweisen Klimatologien von Zhou [89] und über Ozean mit den Daten von Nalli [90] verwendet [48].

LMD Der LDM Retrieval von dem Laboratoire de Météorologie Dynamique nutzt einen dreistufigen Algorithmus basierend auf sogenannte Look-Up Table (LUT) Näherungen. Im ersten Schritt wird der beobachtete atmosphärische Zustand, im zweiten Schritt die AOD bei 10 μm und die mittlere Höhe der Aerosolschicht und im dritten Schritt der effektive Radius der Mineralstaubaerosole abgeschätzt. Die Oberflächenreflektivität wird mit der sogenannten Multispektralmethode aus den IASI Daten berechnet [46].

Ensemble Analog zu dem Ensemble Algorithmus bei den ATSR Instrumenten werden die Daten der zuvor beschriebenen Algorithmen mit ihrem Fehler im Vergleich zu AERONET gewichtet gemittelt, um so die größte Übereinstimmung mit den AERONET Bodenmessungen zu erreichen [49, 86, 87].

A.4. Regionendefinitionen

Region	Breitengrade	Längengrade
Welt	90°N - 90°S	180°E - 180°W
Nordhalbkugel	90°N - 0°N	180°E - 180°W
Südhalbkugel	0°N - 90°S	180°E - 180°W
Dust Belt	0°N - 40°N	80°W - 120°E
Asien	5°N - 60°N	50°E - 165°E
Nordamerika	13°N - 60°N	55°W - 135°W
Europa	36°N - 60°N	15°W - 50°E
Boreal	60°N - 85°N	180°E - 180°W
Asien, Nord	40°N - 60°N	50°E - 165°E
Asien, Ost	5°N - 41°N	100°E - 130°E
Asien, West	5°N - 41°N	50°E - 100°E
China, Süd-Ost	20°N - 41°N	103°E - 135°E
Australien	10°S - 45°S	100°E - 155°E
Afrika, Nord	12°N - 36°N	17°W - 50°E
Afrika, Süd	35°S - 12°N	17°W - 50°E
Südamerika	55°S - 5°N	35°W - 82°W
Nordamerika, West	13°N - 60°N	100°W - 135°W
Nordamerika, Ost	13°N - 60°N	55°W - 100°W
Indonesien	10°S - 5°N	90°E - 165°E
Indien	8°N - 32°N	70°E - 90°E
Sahara	17°N - 32°N	17°W - 37°E
Australische Wueste	30°S - 21°S	118°E - 144°E
Wueste Asien	35°N - 45°N	55°E - 100°E
Arabische Halbinsel	18°N - 30°N	15°E - 44°E
Kalahari	22°S - 30°S	15°E - 26°E
Gobi	36°N - 47°N	78°E - 115°E
Karakum	29°N - 47°N	53°E - 70°E
Taklamakan	37°N - 41°N	78°E - 87°E
Europa Nord	55°N - 70°N	4°E - 40°E
Europa Zentral	45°N - 55°N	8°W - 36°E
Europa Mittelmeerraum	35°N - 45°N	10°W - 32°E
Kongo	11°S - 5°N	12°E - 32°E
Sahel	16°S - 39°N	2°W - 14°E
Amazonas	10°S - 2°N	70°W - 44°W
Kanada	48°N - 70°N	140°W - 55°W
Sibirien	50°N - 77°N	59°E - 170°W
Russland	50°N - 69°N	44°E - 137°E

A.4. Regionendefinitionen

Atlantik1	50°S - 0°N	-33°W - 6°E
Atlantik2	5°N - 42°N	65°W - 118°W
Pazifik1	52°S - 5°N	175°E - 180°E
Pazifik2	52°S - 5°N	180°W - 85°W
Pazifik3	20°N - 45°N	148°E - 180°E
Pazifik4	20°N - 45°N	180°W - 134°W
Indischer Ozean	50°S - 0°N	50°E - 112°E
Brasilien	20°S - 2°S	61°W - 40°W
Argentinien	50°S - 23°S	70°W - 60°W
Suedafrika	34°S - 27°S	18°E - 32°E
Afrika Sued	25°S - 10°S	10°E - 40°E
Kalifornien	32°N - 41°N	123°W - 114°W
Ozean Salt	40°S - 40°S	20°E - 80°E
Ozean wenig Salt	20°S - 1°S	20°W - 1°W
Sahara cams	17°N - 32°N	1°E - 37°E
Nord America cams	13°N - 60°N	135°W - 55°W
Europa cams	36°N - 60°N	0°E - 50°E
Ozean Salt1	40°N - 60°N	40°W - 20°W

Tabelle A.1.: Regionendefinition, orientiert an [4]

A. Anhang

Region	Stationen
Europa	Andenes, Arcachon, Aubiere_LAMP, Autilla, Avignon, BOR-DEAUX, Barcelona, Bari_University, Bayfordbury, Belsk, Birkenes, Brussels, Bucharest_Inoe, Bure_OPE, CENER, CLUJ_UBB, Cabauw, Camborne_MO, Carpentras, Chilbolton, Coruna, Creteil, Dunkerque, EastMalling_MO, Edinburgh, Eforie, Ersa, FZJ-JOYCE, Fontainebleau, Frioul, Gotland, Hamburg, Helgoland, Helsinki, HohenpeissenbergDWD, Hyytiala, IMAA_Potenza, ISDGM_CNR, Iasi_LOASL, Ispra, Karlsruhe, Kuopio, Kyiv, LAQUILA_Coppito, Laegeren, Le_Fauga, Lecce_University, Leipzig, Lille, Loftus_MO, Madrid, Magurele_Inoe, Mainz, MetObs_Lindenberg, Minsk, Modena, Moldova, Moscow_MSU_MO, Munich_University, Napoli_CeSMA, OHP_OBSERVATOIRE, Oostende, Oxford, Palaiseau, Palencia, Paris, Poprad-Ganovce, Porquerolles, Portglenone_MO, Raciborz, Rame_Head, Rhyl_MO, Rome_La_Sapienza, Rome_Tor_Vergata, SMHI, Sevastopol, Seyssees, Sirmione_Museo_GC, Sodankyla, Stornoway_MO, Strzyzow, The_Hague, Thessaloniki, Timisoara, Toravere, Toulon, Toulouse_MF, Valladolid, Venise, Vienna_BOKU, Vienna_UNIVIE, Villefranche, Watnall_MO, Wytham_Woods, Xanthi, Zaragoza, Zvenigorod
Asien	Anmyon, Bac_Giang, Bac_Lieu, Baengnyeong, Bahrain, Beijing, Beijing-CAMS, Bhola, Chen-Kung_Univ, Chiang_Mai_Met_Sta, Chiayi, Chiba_University, Dhabi, Dhadnah, Dhaka_University, Dibругarh_Univ, Dongsha_Island, Dushanbe, EPA-NCU, Fukuoka, Gandhi_College, Gangneung_WNU, Gosan_SNU, Gual_Pahari, Gwangju_GIST, Hamim, Hankuk_UFS, Hokkaido_University, Hong_Kong_PolyU, Hong_Kong_Sheung, Irkutsk, Jaipur, Kaashidhoo, Kanpur, Kaohsiung, Karachi, Karunya_University, Kuching, Lahore, Luang_Namtha, Lumbini, MCO-Hanimaadhoo, Manila_Observatory, Masdar_Institute, Mezaira, Mukdahan, Mussafa, NCU_Taiwan, ND_Marbel_Univ, NGHIA_DO, Nha-Trang, Niigata, Nong_Khai, Noto, Osaka, Pantnagar, Pimai, Pokhara, Pontianak, Pune, Pusan_NU, Seoul_SNU, Shirahama, Silpakorn_Univ, Singapore, Son_La, Songkhla_Met_Sta, Tai_Ping, Taihu, Taipei_CWB, Tiksi, Tomsk, Tomsk_22, USM_Penang, Ubon_Ratchathani, Ussuriysk, Vientiane, XiangHe, Xinglong, Xitun, Yakutsk, Yekaterinburg, Yonsei_University

Tabelle A.2.: Verwendete AERONET-Stationen in Europa und Asien [64]

A.5. Versionen der verwendete Algorithmen

Instrument	Algorithmus	Version
ATSR2, AATSR	ORAC	v4.02
	ADV	v4.0
	SWANSEA	v4.33
	ensemble	v2.9
SLSTR	ORAC	v1.0
	SDV	v2.10
	SWANSEA	v1.12
	ensemble	v1.1
IASI	IMARS	v6.0
	MAPIR	v4.1
	ULB	v8
	LMD	v2.2
	ensemble	v1.1

Tabelle A.3.: Die verwendeten Versionen der dargestellten Algorithmen jeweils bezogen aus [91]

A.6. Bias Korrekturen

Alg	Region	Anzahl Stationen			Bias ATSR-2 - AATSR		Bias ATSR-2 - AATSR	
		ATSR-2	AATSR	SLSTR	aus [59]	nach 5.3	aus [59]	nach 5.3
ENS	Europa	3	66	86	0,0014	-0,0134	-0,0396	-0,0361
ENS	Afrika, Nord	2	17	19	-0,0798	-0,0725	0,00424	0,0869
ENS	Australien	1	4	4	-0,0525	-0,0210	0,0875	0,0108
ENS	Afrika, Süd	3	2	8	0,0017	-0,0178	-0,0462	0,0004
ENS	Boreal	1	131	19	0,0131	0,0118	-0,0164	-0,0312
ENS	Nord Amerika, Ost	19	38	56	0,0082	0,0070	-0,0690	-0,0123
ENS	Nord Amerika, West	7	27	62	-0,0510	-0,0029	-0,0757	-0,0314
SWANSEA	Europa	3	66	86	0,0079	-0,0032	-0,0527	-0,0449
SWANSEA	Afrika, Nord	2	17	19	-0,1003	-0,0917	-0,0195	0,0772
SWANSEA	Australien	1	4	4	-0,1275	-0,0204	0,0675	0,0098
SWANSEA	Afrika, Süd	3	2	8	-0,0317	-0,0180	0,0013	-0,0122
SWANSEA	Boreal	1	131	19	-0,0069	0,0042	-0,0536	-0,0469
SWANSEA	Nord Amerika, Ost	19	38	56	0,0047	0,0096	-0,0459	-0,0426
SWANSEA	Nord Amerika, West	7	27	62	-0,0365	-0,0051	-0,0883	-0,0558
ORAC	Europa	3	66	86	-0,0090	-0,0128	-0,0276	-0,0550
ORAC	Afrika, Nord	2	17	19	-0,0703	-0,0910	-0,0211	0,0136
ORAC	Australien	1	4	4	0,0100	-0,0122	0,0525	0,0331
ORAC	Afrika, Süd	3	2	8	0,0525	0,0082	-0,0550	0,0420
ORAC	Boreal	1	131	19	0,0550	0,0028	-0,0132	-0,0959
ORAC	Nord Amerika, Ost	19	38	56	0,0230	-0,0009	-0,0752	-0,0585
ORAC	Nord Amerika, West	7	27	62	0,0090	-0,0178	-0,1019	-0,0698
ADV/SDV	Europa	3	66	86	-0,0262	-0,0120	-0,0882	-0,0546
ADV/SDV	Afrika, Nord	2	17	19	-0,0685	-0,0286	-0,0562	-0,0886
ADV/SDV	Australien	1	4	4	-0,0175	-0,0250	0,0100	-0,0031
ADV/SDV	Afrika, Süd	3	2	8	0,0017	-0,0137	-0,1200	0,0075
ADV/SDV	Boreal	1	131	19	-0,0050	0,0122	-0,0829	-0,0672

ADV/SDV	Nord Amerika, Ost	19	38	56	-0,0064	-0,0098	-0,1171	-0,0393
ADV/SDV	Nord Amerika, West	7	27	62	0,0312	0,0006	-0,0904	-0,0312

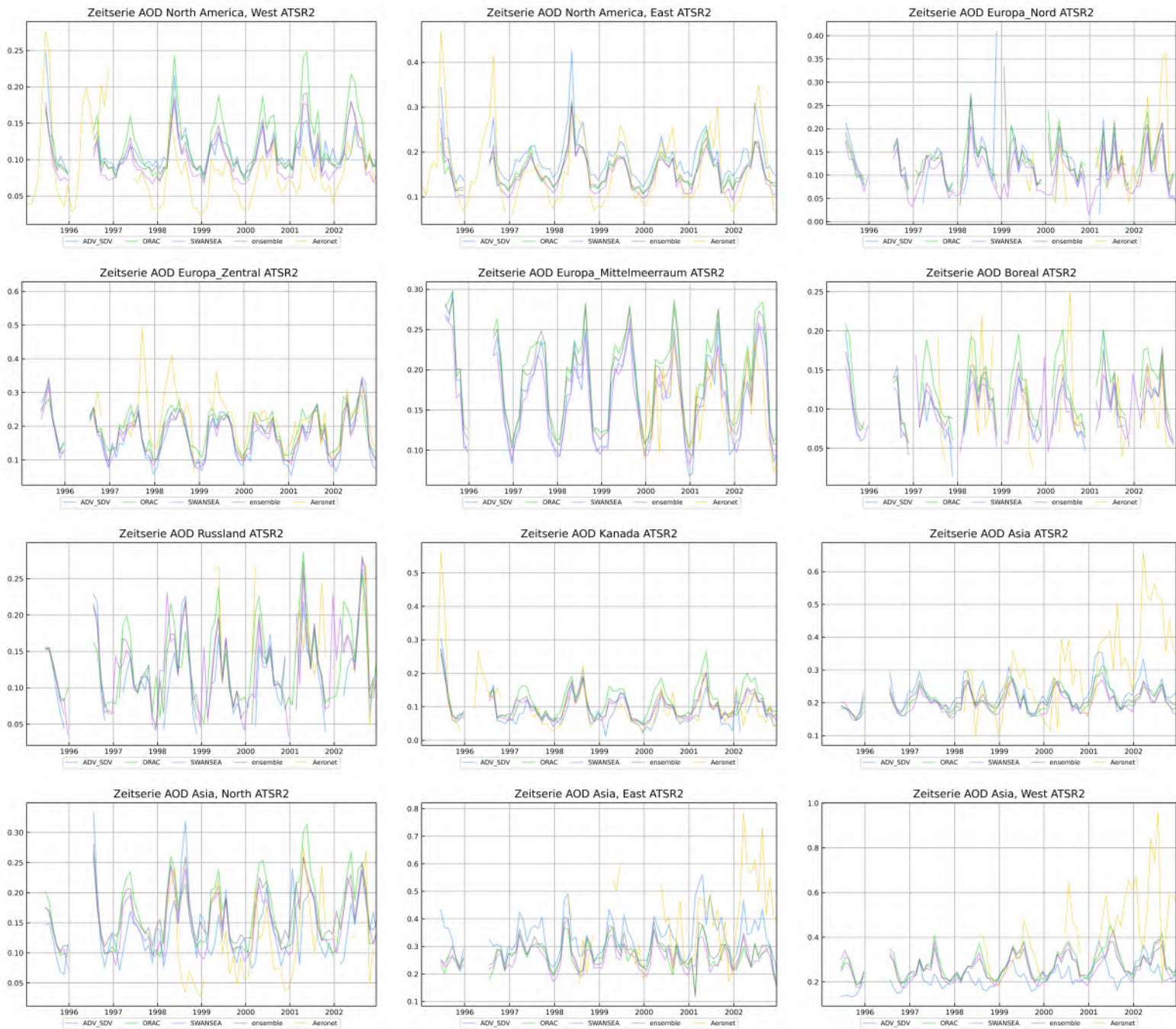
Tabelle A.4.: Vergleich der Biaskorrekturen aus den Stationsstatistiken der AERONET Stationen [59] und der in Kapitel 5.3 beschriebenen Methode ohne Trendwechsel

Alg	Region	Anzahl Stationen			Bias ATSR-2 - AATSR		Bias ATSR-2 - AATSR	
		ATSR-2	AATSR	SLSTR	aus [59]	nach 5.3	aus [59]	nach 5.3
ENS	Asien	4	57	48	0,0193	-0,0026	-0,0053	-0,0084
ENS	China, Süd-Ost	1	21	17	0,0371	0,0230	-0,0252	0,1089
SWANSEA	Asien	4	57	48	0,0393	-0,0018	-0,0148	-0,0018
SWANSEA	China, Süd-Ost	1	21	17	0,0895	0,0048	-0,0422	0,0368
ORAC	Asien	4	57	48	0,0202	-0,0118	0,0456	-0,0370
ORAC	China, Süd-Ost	1	21	17	0,0722	0,0150	0,0575	0,0994
ADV/SDV	Asien	4	57	48	-0,0148	-0,0199	-0,1319	0,0093
ADV/SDV	China, Süd-Ost	1	21	17	0,0043	-0,0017	-0,1098	0,1967

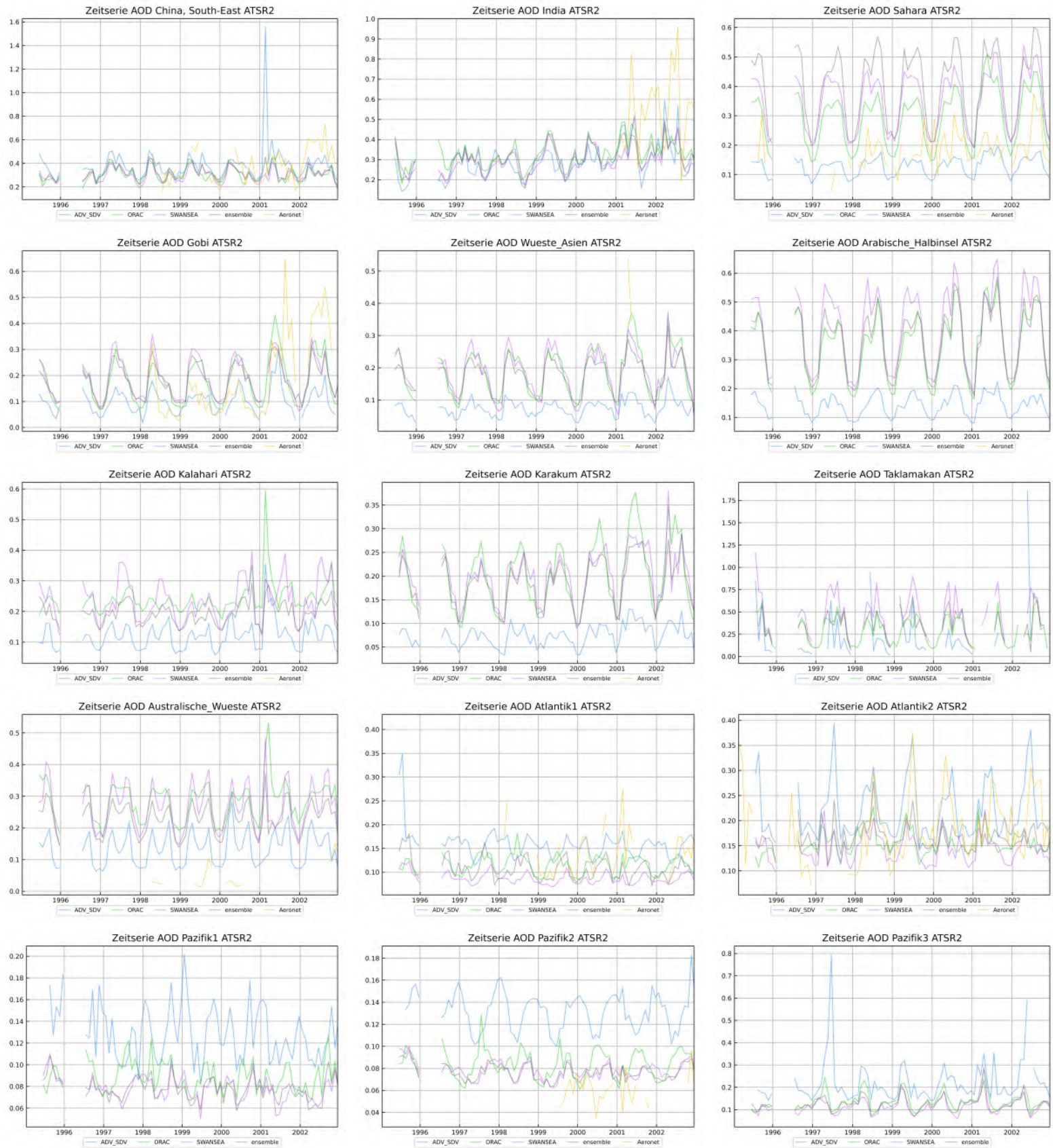
Tabelle A.5.: Vergleich der Biaskorrekturen aus den Stationsstatistiken der AERONET Stationen [59] und der in Kapitel 5.3 beschriebenen Methode ohne Trendwechsel

A.7. Konsistenzbetrachtungen

A.7.1. Vergleich der ATSR-2 Algorithmen in regionalen Zeitserien

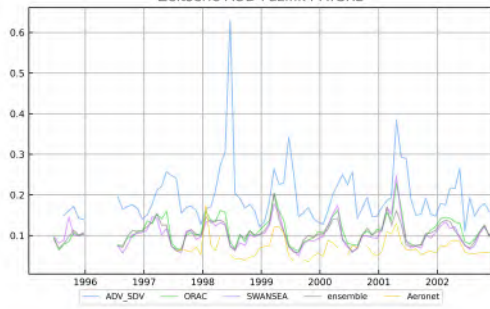


A.7. Konsistenzbetrachtungen

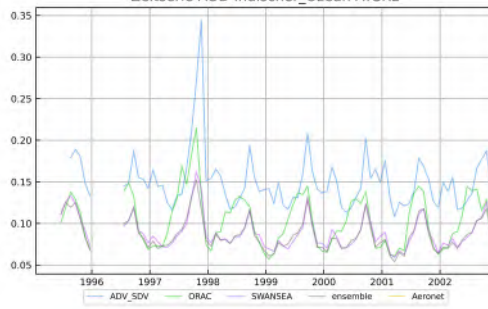


A. Anhang

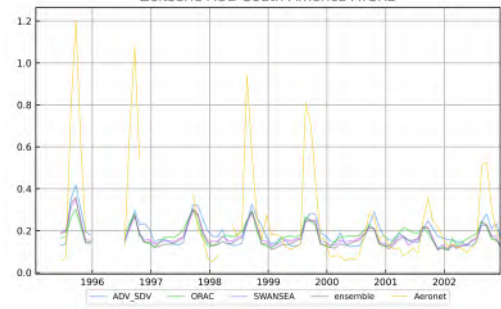
Zeitreihe AOD Pazifik4 ATSR2



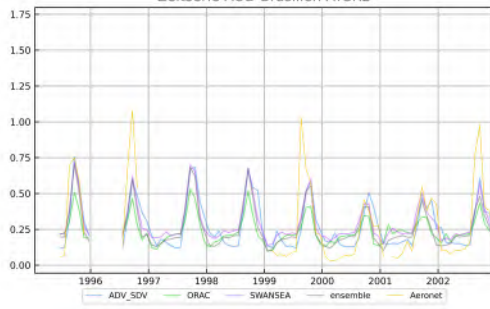
Zeitreihe AOD Indischer_Ozean ATSR2



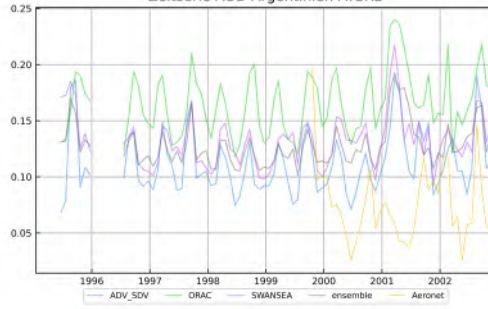
Zeitreihe AOD South America ATSR2



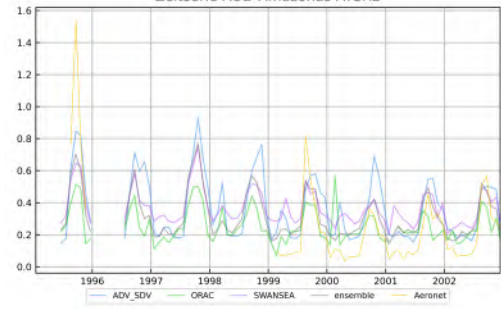
Zeitreihe AOD Brasilien ATSR2



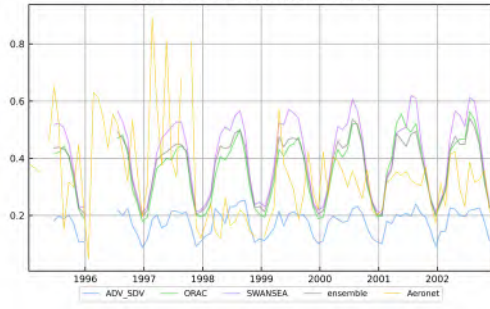
Zeitreihe AOD Argentinien ATSR2



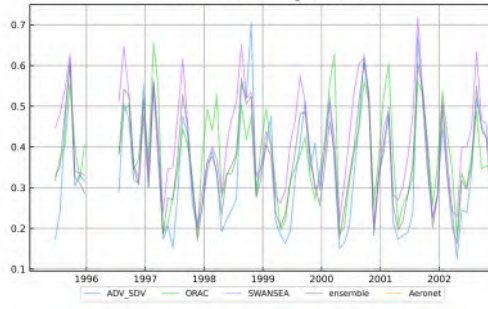
Zeitreihe AOD Amazonas ATSR2



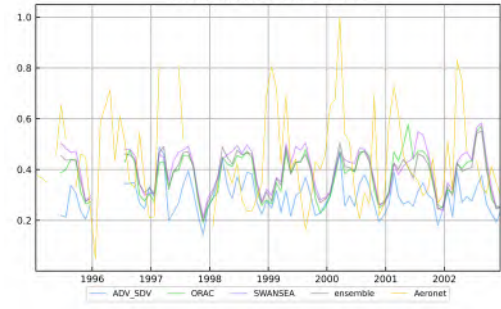
Zeitreihe AOD Africa, North ATSR2



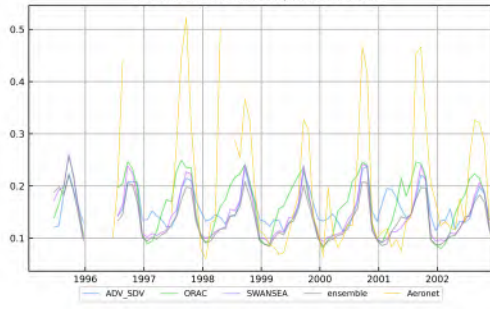
Zeitreihe AOD Kongo ATSR2



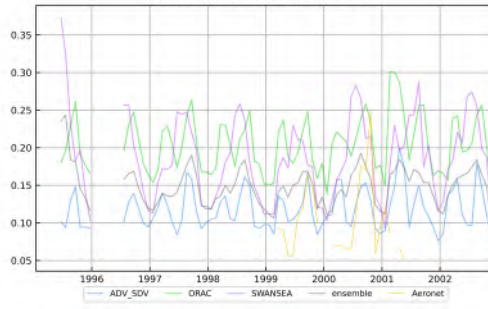
Zeitreihe AOD Sahel ATSR2



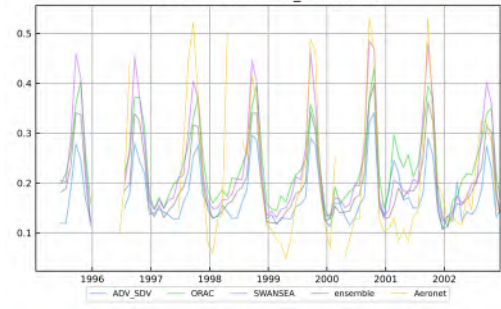
Zeitreihe AOD Africa, South ATSR2



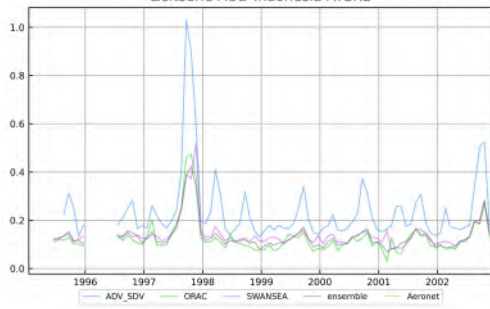
Zeitreihe AOD Suedafrika ATSR2



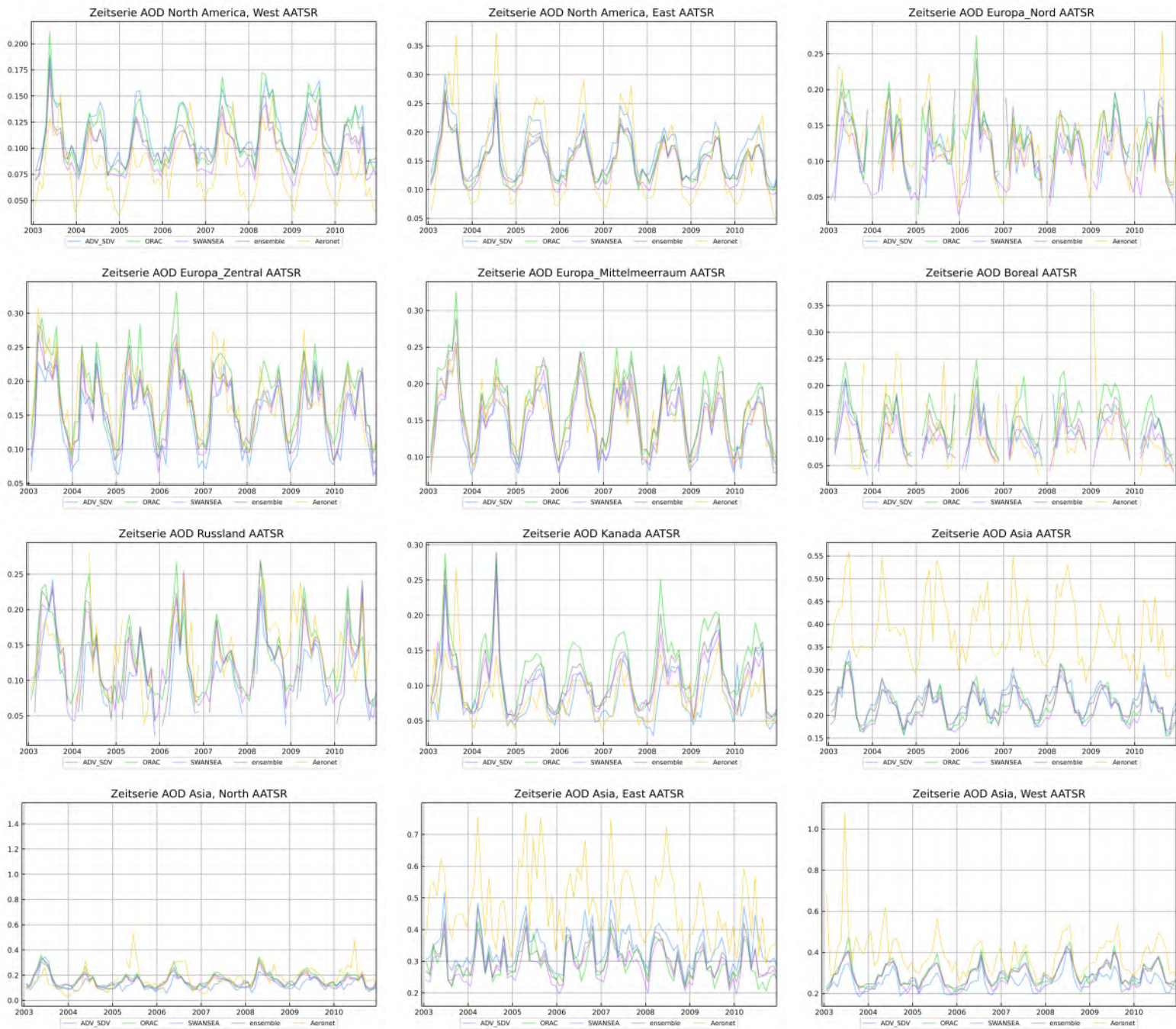
Zeitreihe AOD Afrika_Sued ATSR2



Zeitreihe AOD Indonesia ATSR2

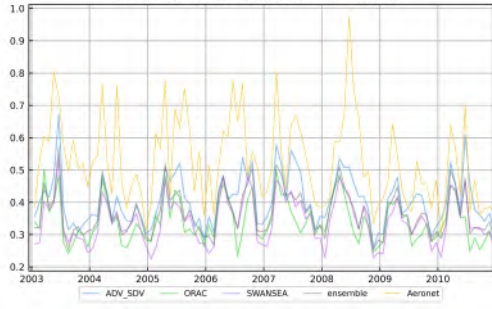


A.7.2. Vergleich der AATSR Algorithmen in regionalen Zeitserien

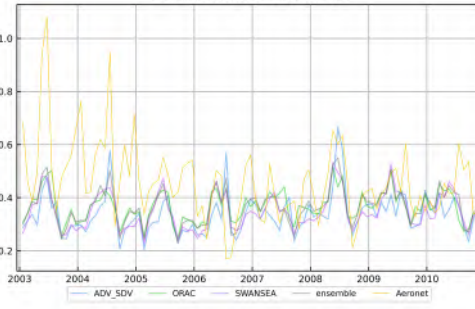


A. Anhang

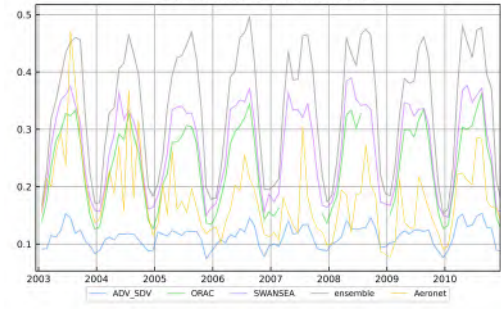
Zeitserie AOD China, South-East AATSR



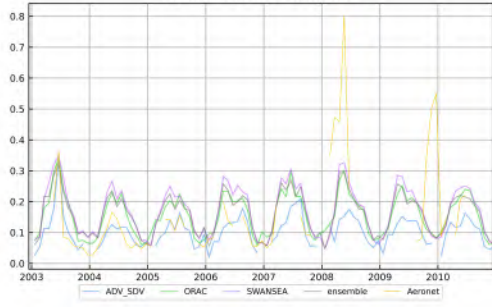
Zeitserie AOD India AATSR



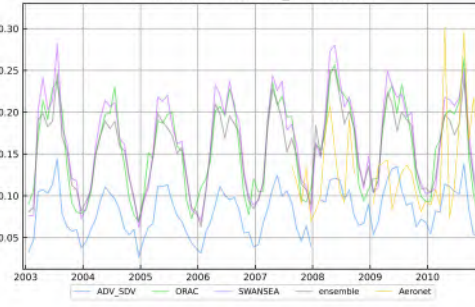
Zeitserie AOD Sahara AATSR



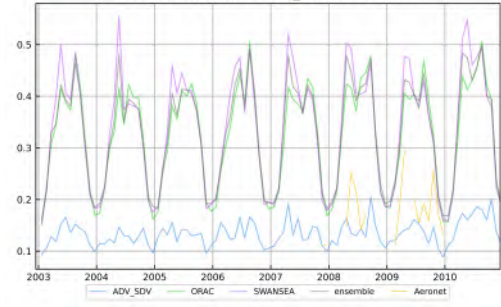
Zeitserie AOD Gobi AATSR



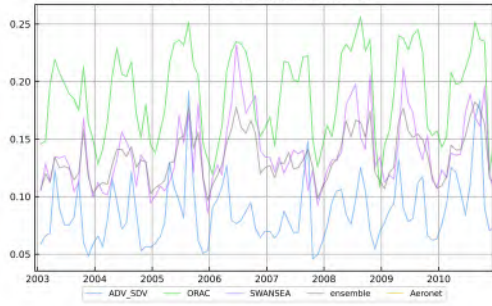
Zeitserie AOD Wueste_Asien AATSR



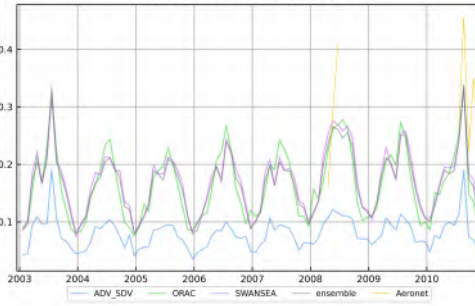
Zeitserie AOD Arabische_Halbinsel AATSR



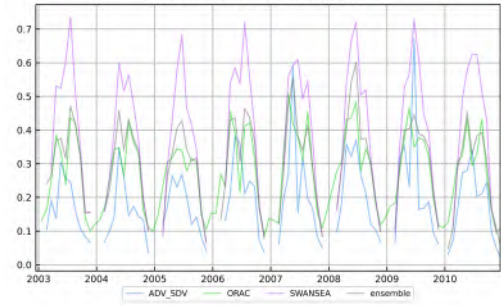
Zeitserie AOD Kalahari AATSR



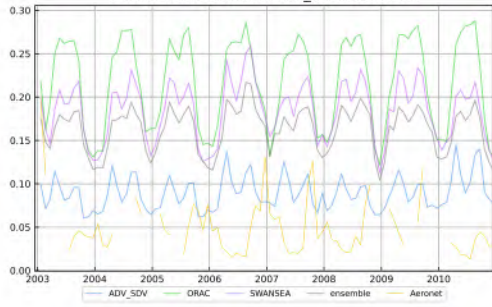
Zeitserie AOD Karakum AATSR



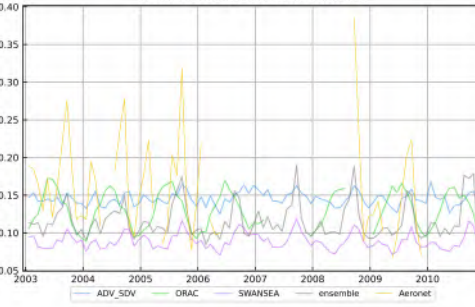
Zeitserie AOD Taklamakan AATSR



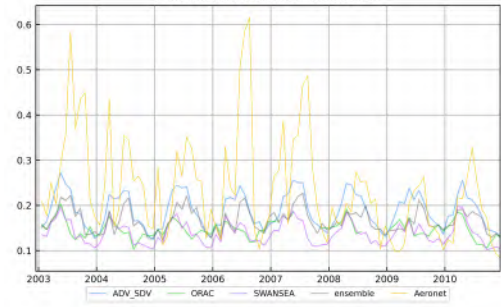
Zeitserie AOD Australische_Wueste AATSR



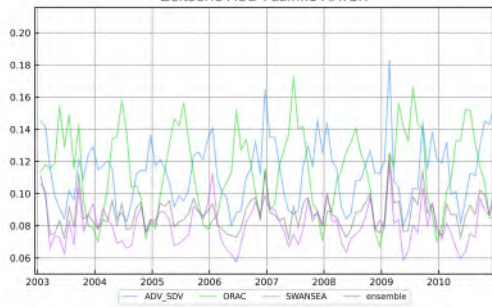
Zeitserie AOD Atlantik1 AATSR



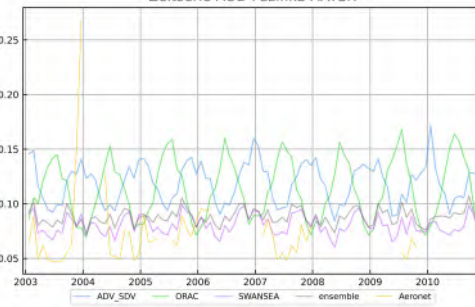
Zeitserie AOD Atlantik2 AATSR



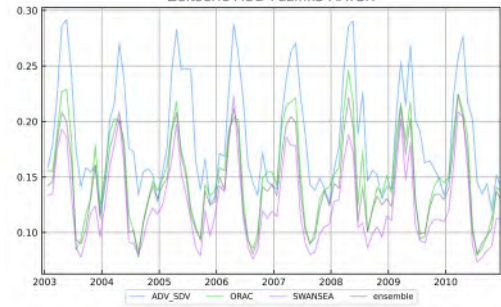
Zeitserie AOD Pazifik1 AATSR



Zeitserie AOD Pazifik2 AATSR

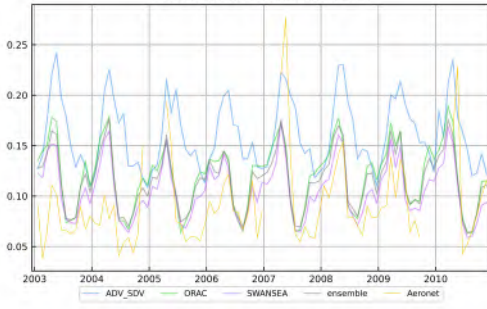


Zeitserie AOD Pazifik3 AATSR

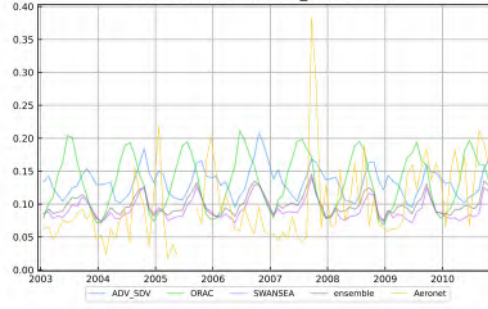


A.7. Konsistenzbetrachtungen

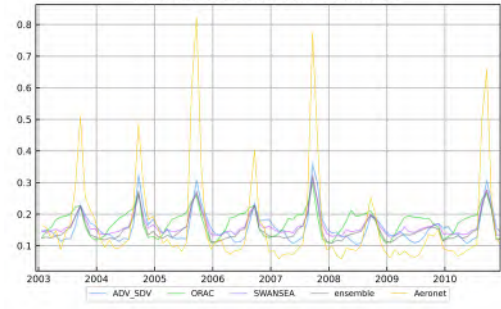
Zeitserie AOD Pazifik4 AATSR



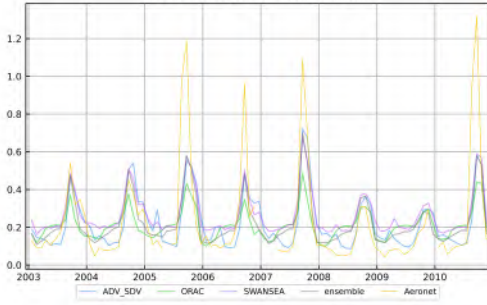
Zeitserie AOD Indischer_Ozean AATSR



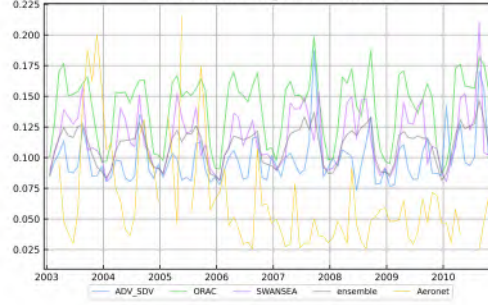
Zeitserie AOD South America AATSR



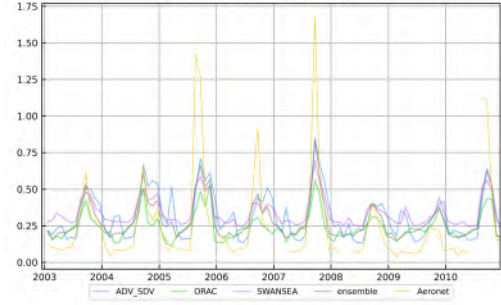
Zeitserie AOD Brasilien AATSR



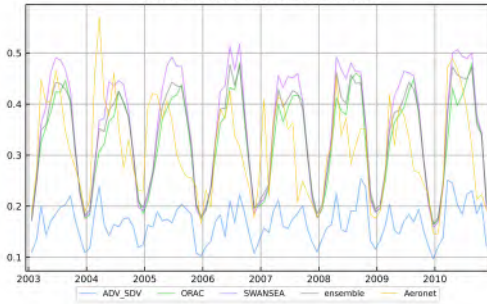
Zeitserie AOD Argentinien AATSR



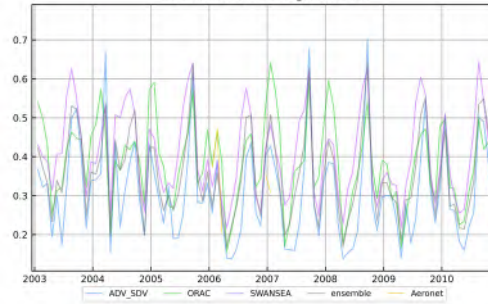
Zeitserie AOD Amazonas AATSR



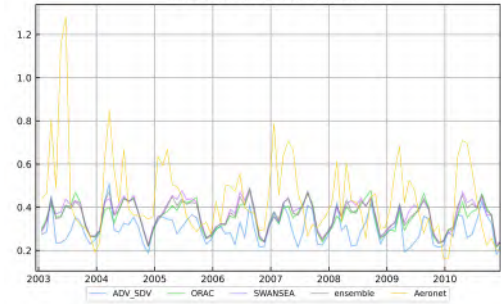
Zeitserie AOD Africa, North AATSR



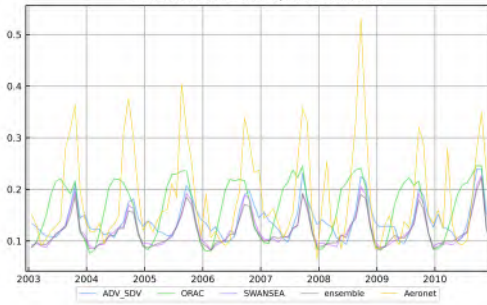
Zeitserie AOD Kongo AATSR



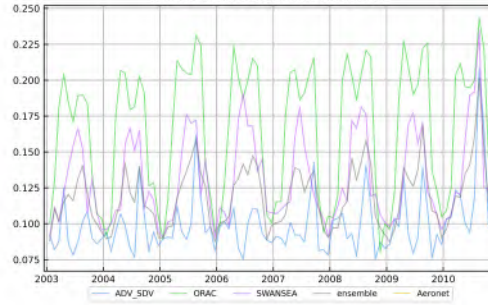
Zeitserie AOD Sahel AATSR



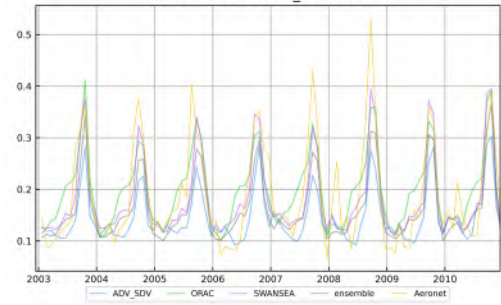
Zeitserie AOD Africa, South AATSR



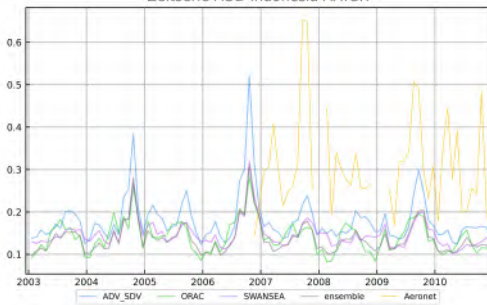
Zeitserie AOD Suedafrika AATSR



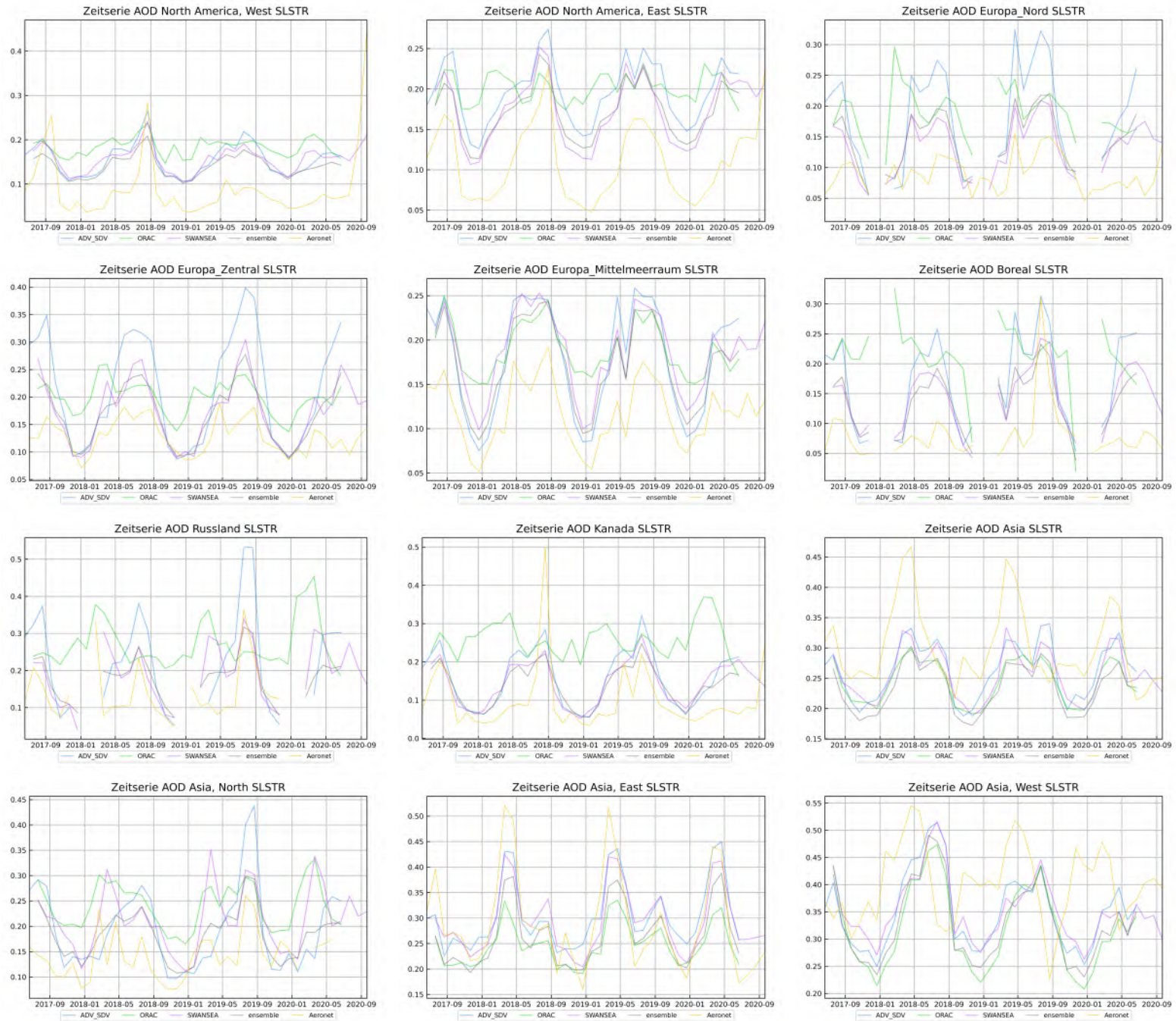
Zeitserie AOD Afrika_Sued AATSR



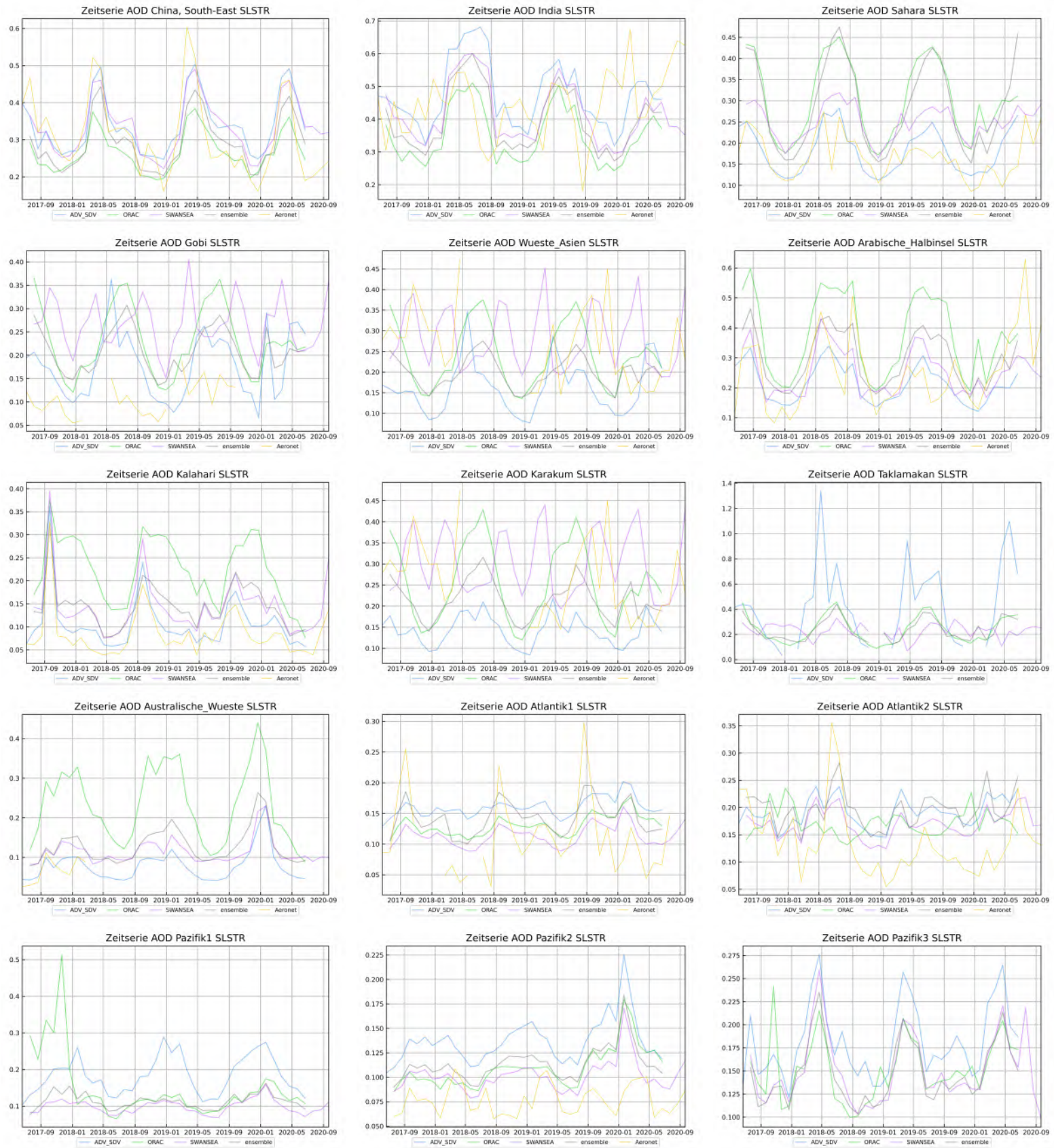
Zeitserie AOD Indonesia AATSR



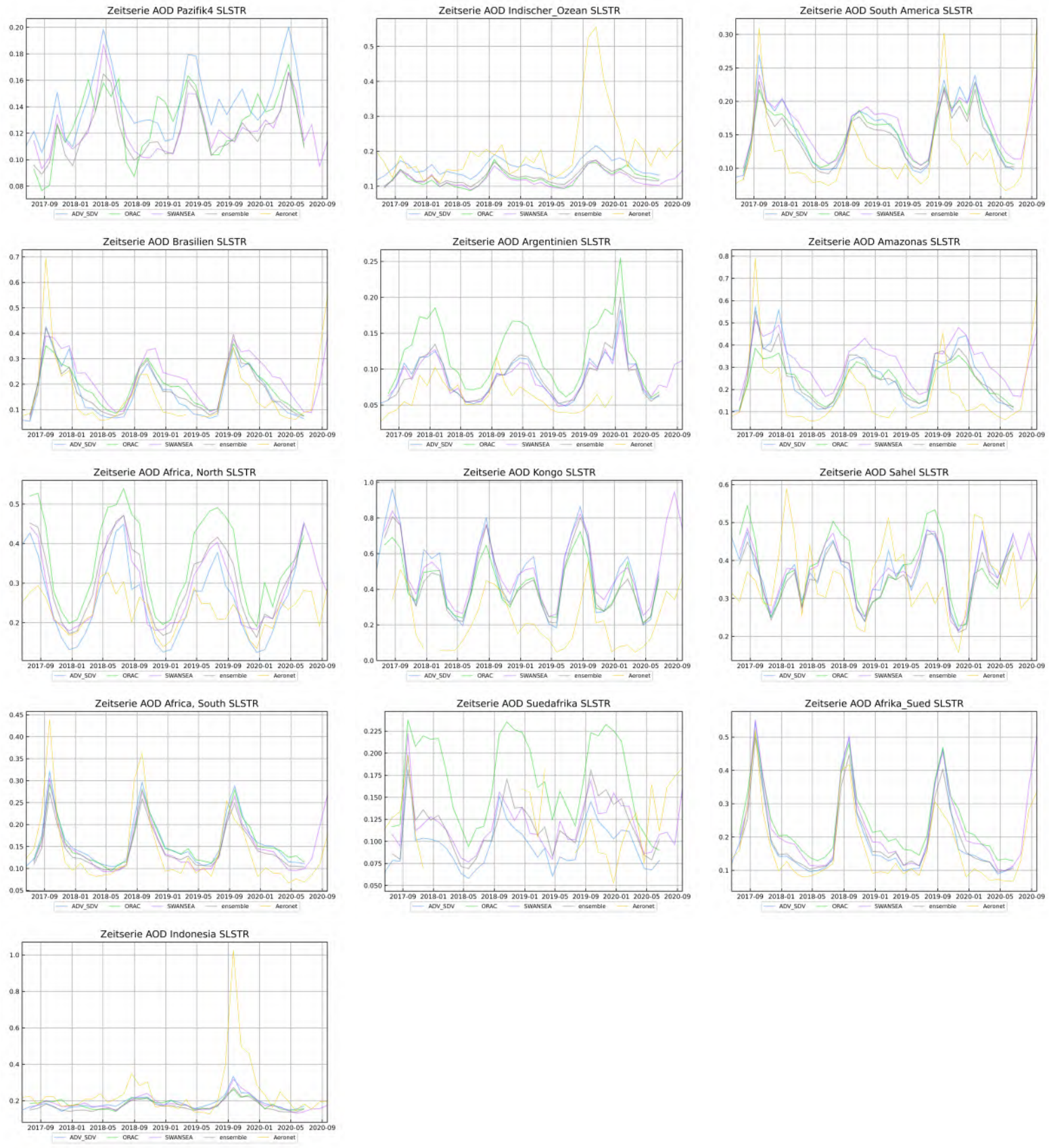
A.7.3. Vergleich der SLSTR Algorithmen in regionalen Zeitserien



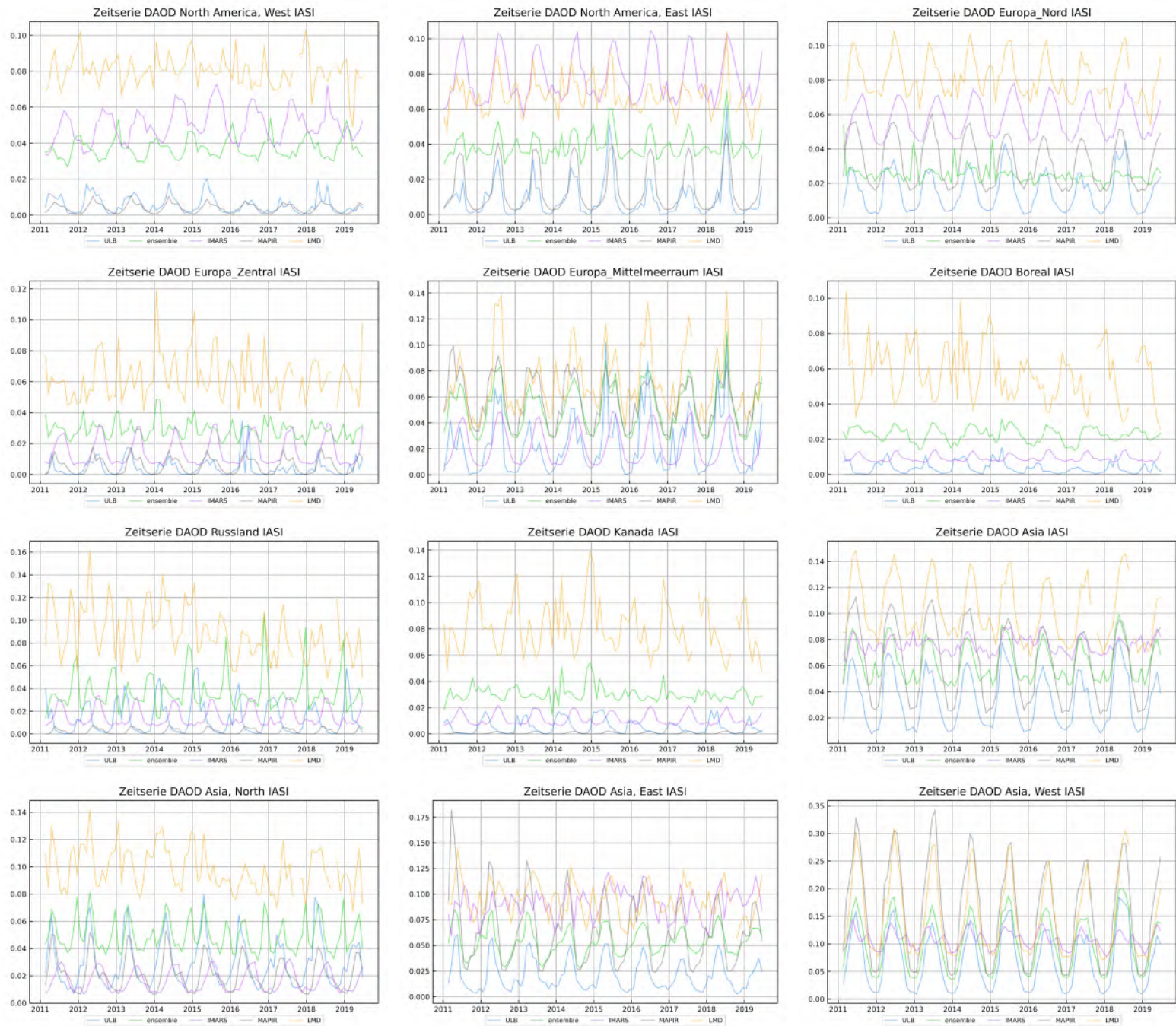
A.7. Konsistenzbetrachtungen



A. Anhang

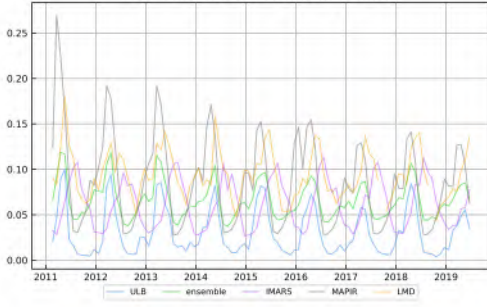


A.7.4. Vergleich der IASI Algorithmen in regionalen Zeitserien

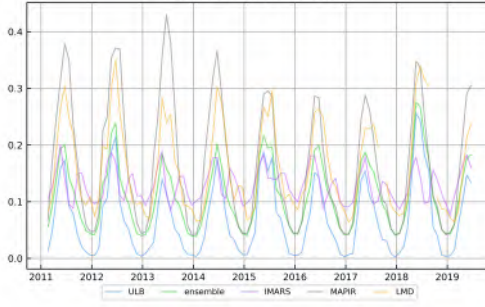


A. Anhang

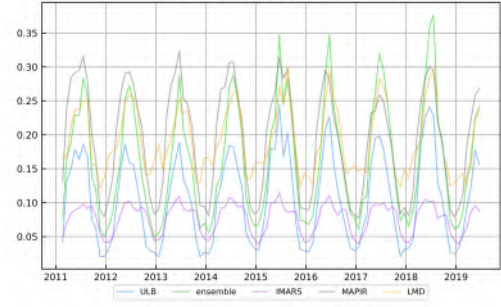
Zeitreihe DAOD China, South-East IASI



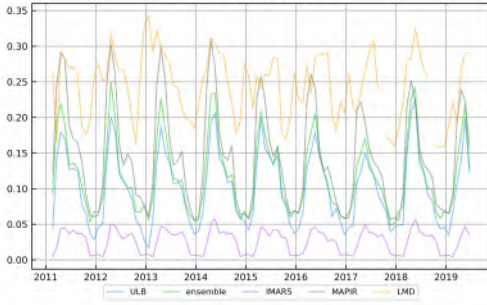
Zeitreihe DAOD India IASI



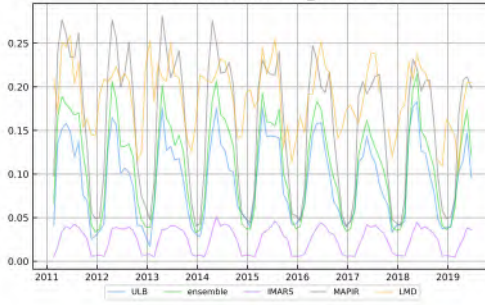
Zeitreihe DAOD Sahara IASI



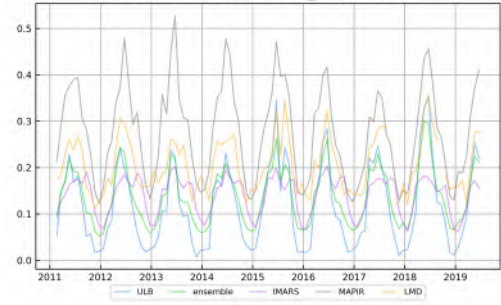
Zeitreihe DAOD Gobi IASI



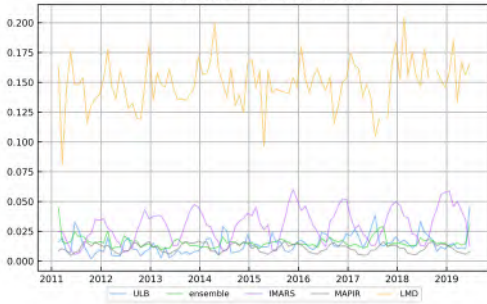
Zeitreihe DAOD Wueste_Asien IASI



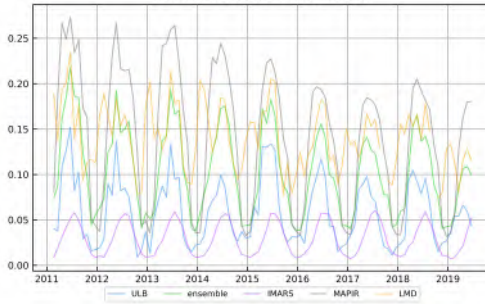
Zeitreihe DAOD Arabische_Halbinsel IASI



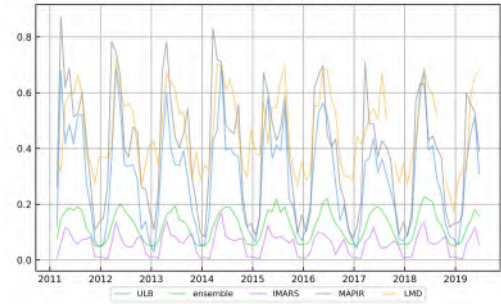
Zeitreihe DAOD Kalahari IASI



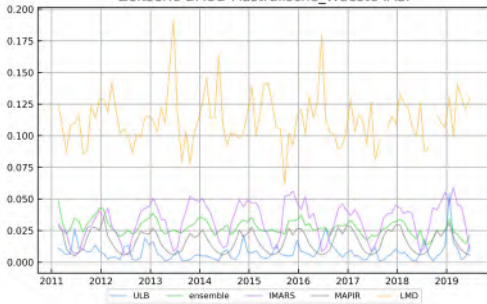
Zeitreihe DAOD Karakum IASI



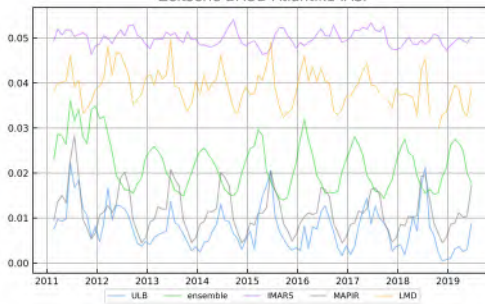
Zeitreihe DAOD Taklamakan IASI



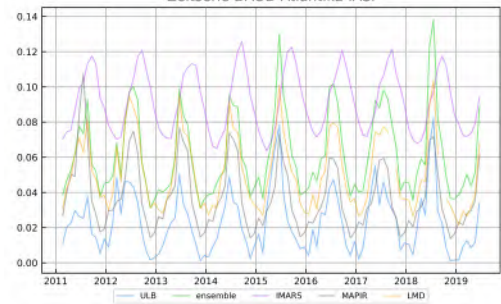
Zeitreihe DAOD Australische_Wueste IASI



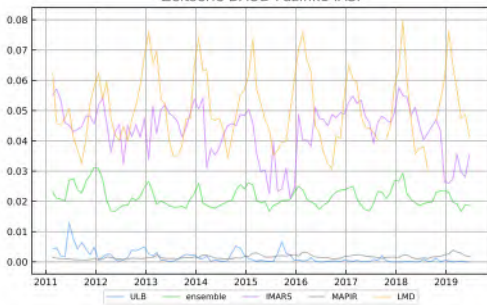
Zeitreihe DAOD Atlantik1 IASI



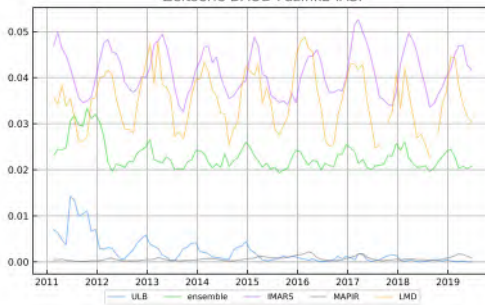
Zeitreihe DAOD Atlantik2 IASI



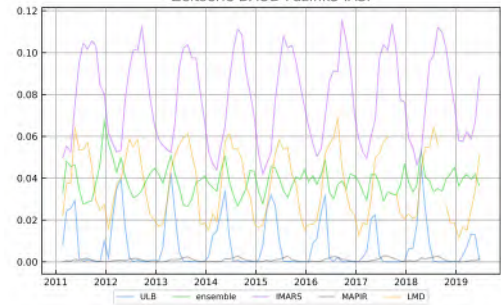
Zeitreihe DAOD Pazifik1 IASI



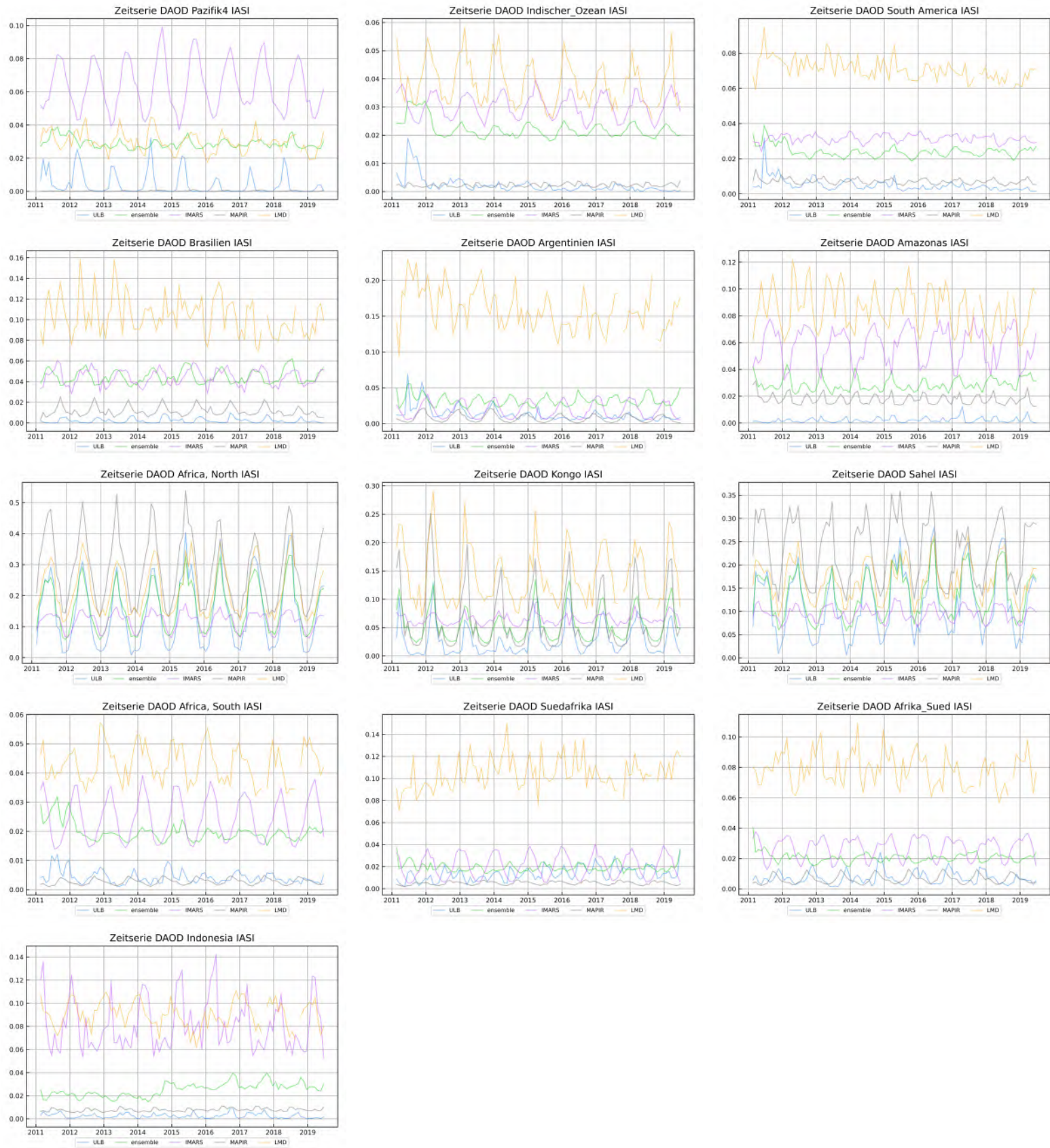
Zeitreihe DAOD Pazifik2 IASI



Zeitreihe DAOD Pazifik3 IASI

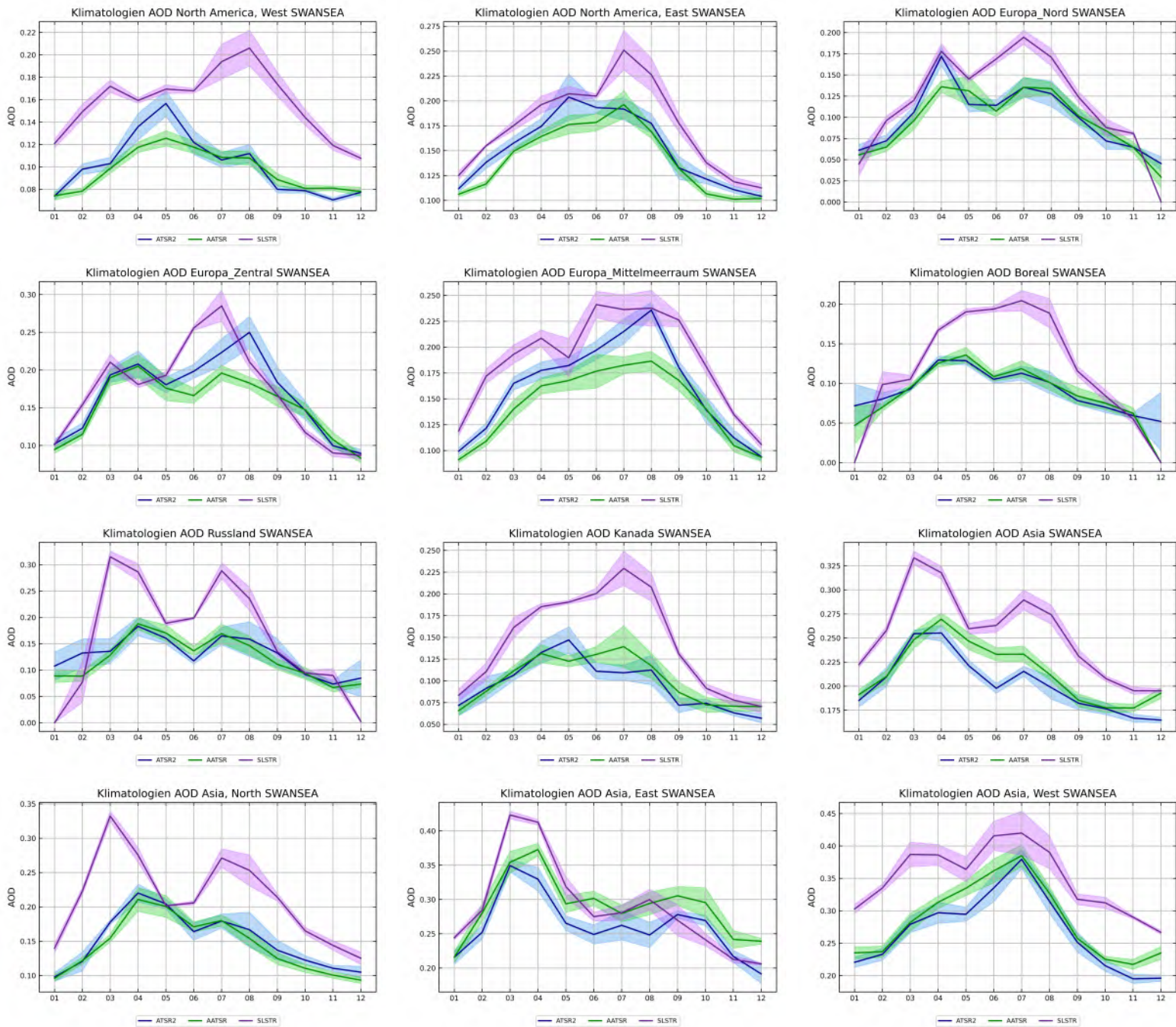


A.7. Konsistenzbetrachtungen

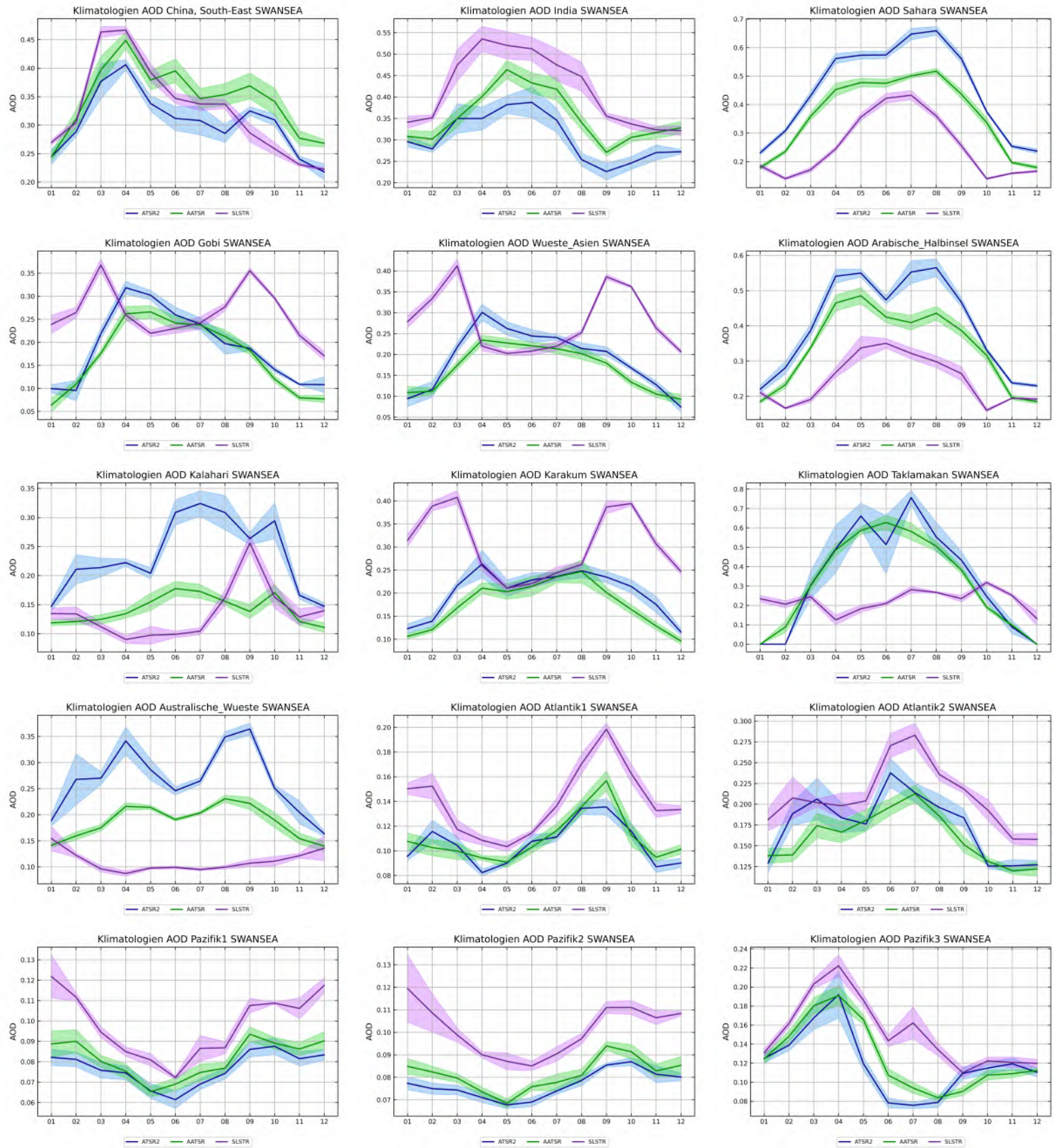


A.7.5. Vergleich der regionalen Klimatologien der Dual-view-Instrumenten

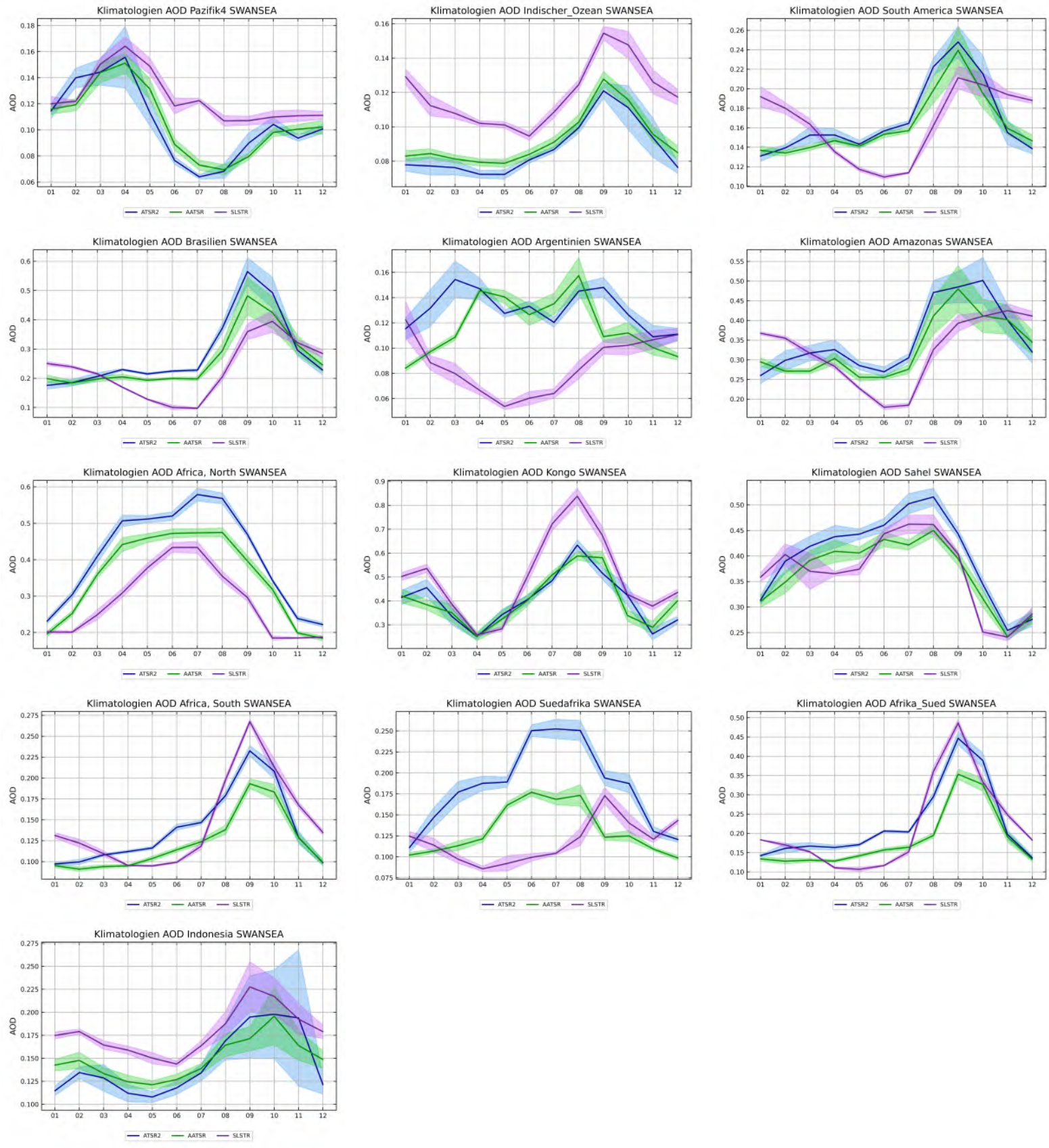
SWANSEA



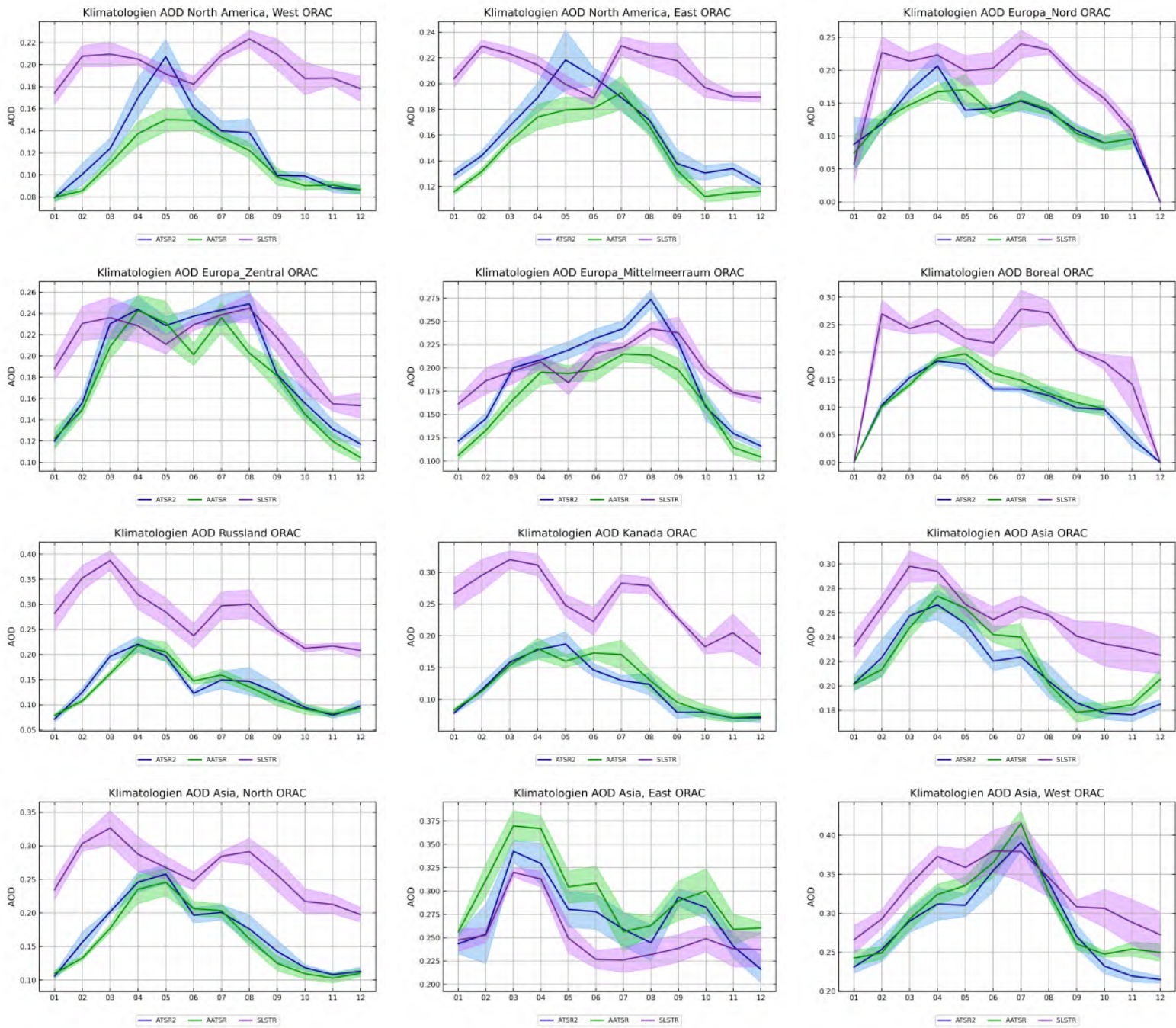
A.7. Konsistenzbetrachtungen



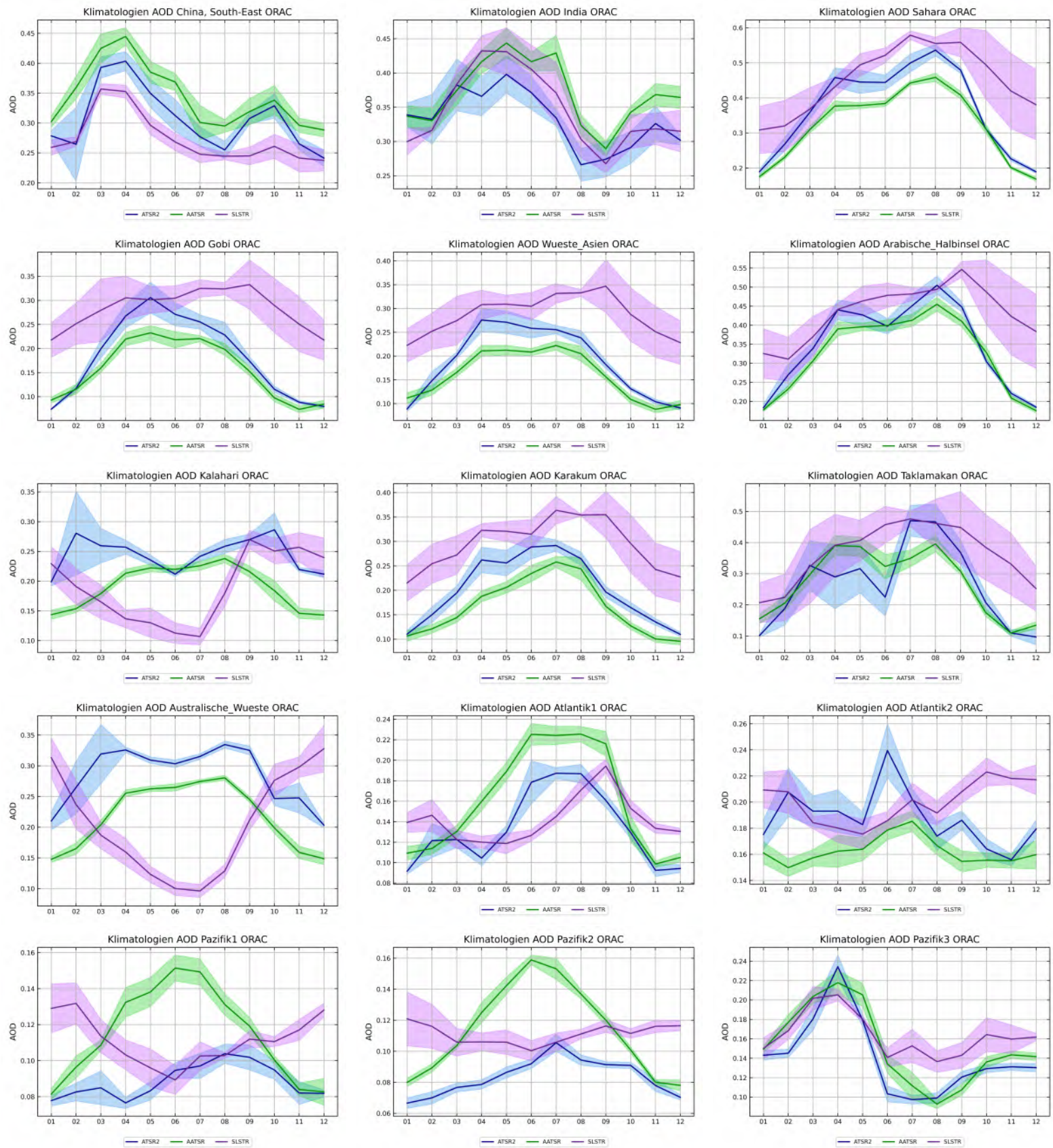
A. Anhang



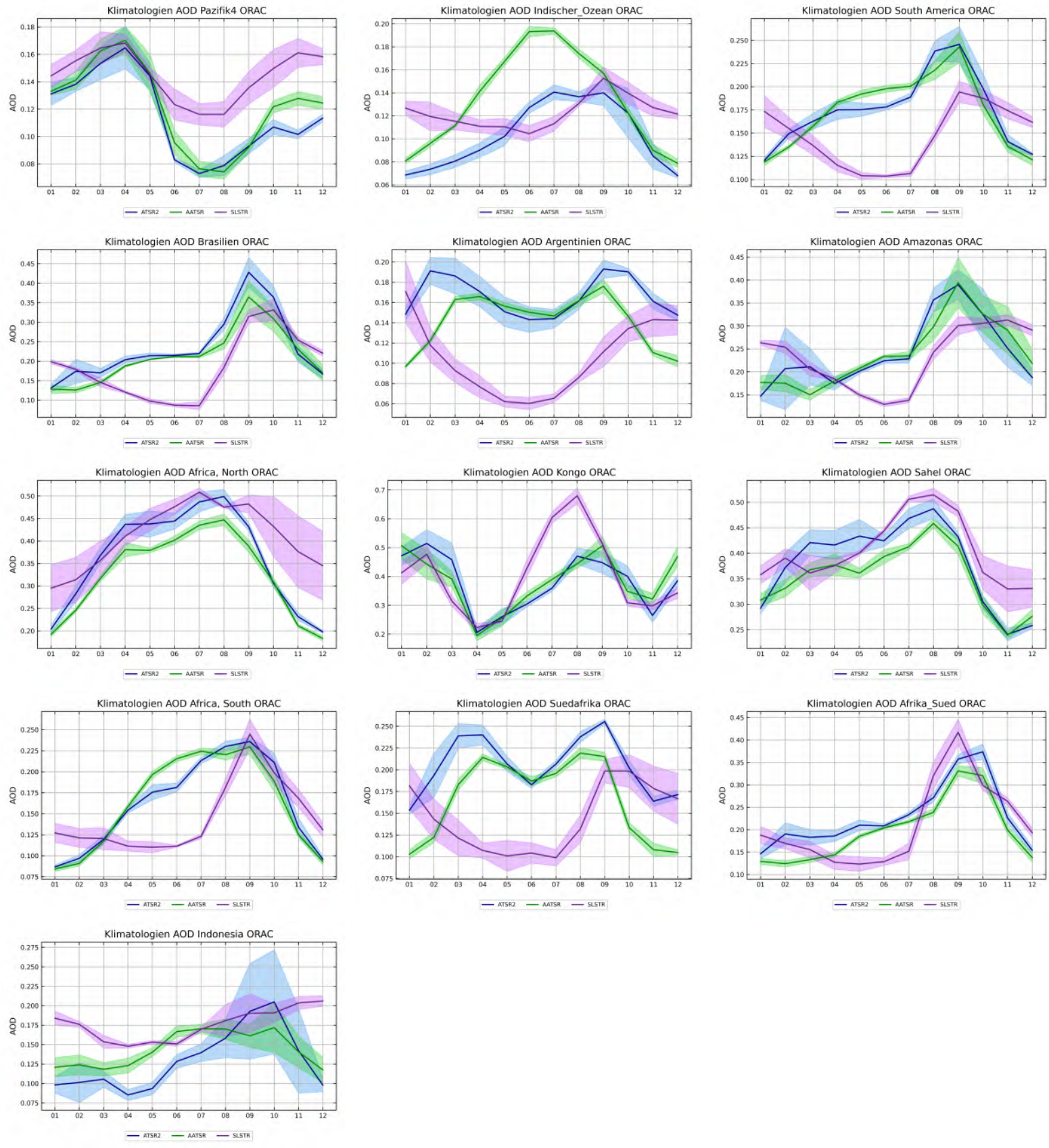
ORAC



A. Anhang

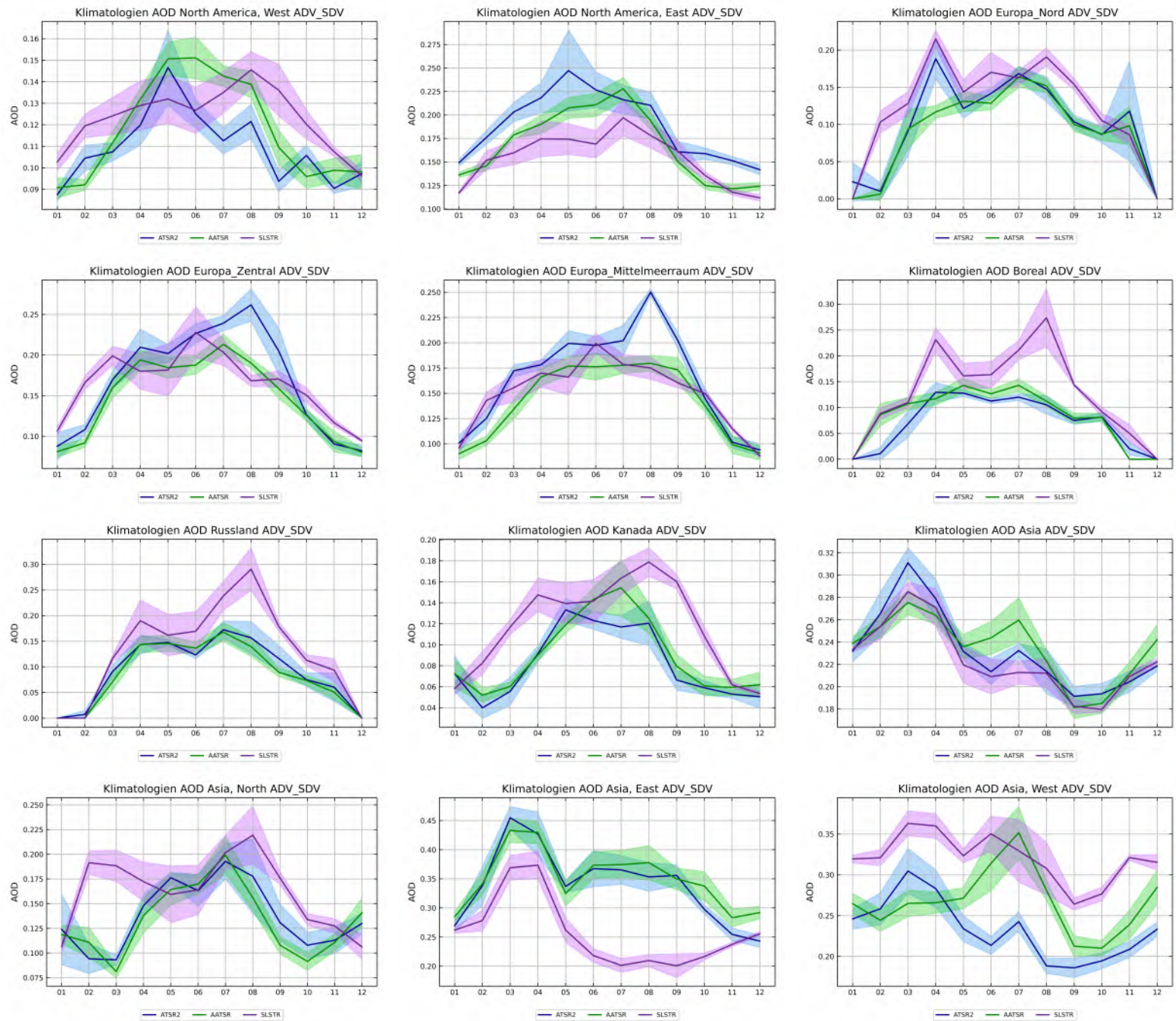


A.7. Konsistenzbetrachtungen

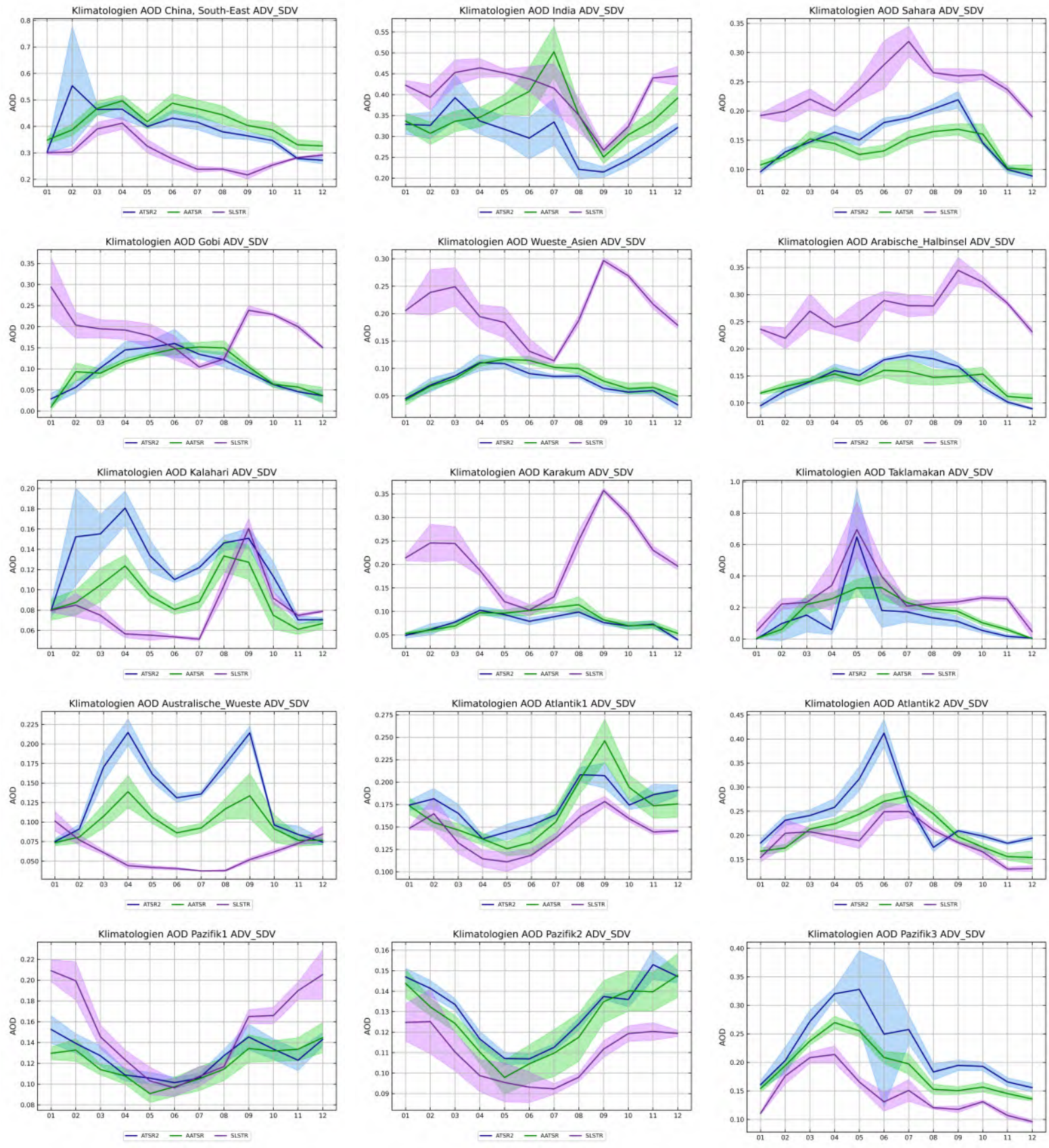


A. Anhang

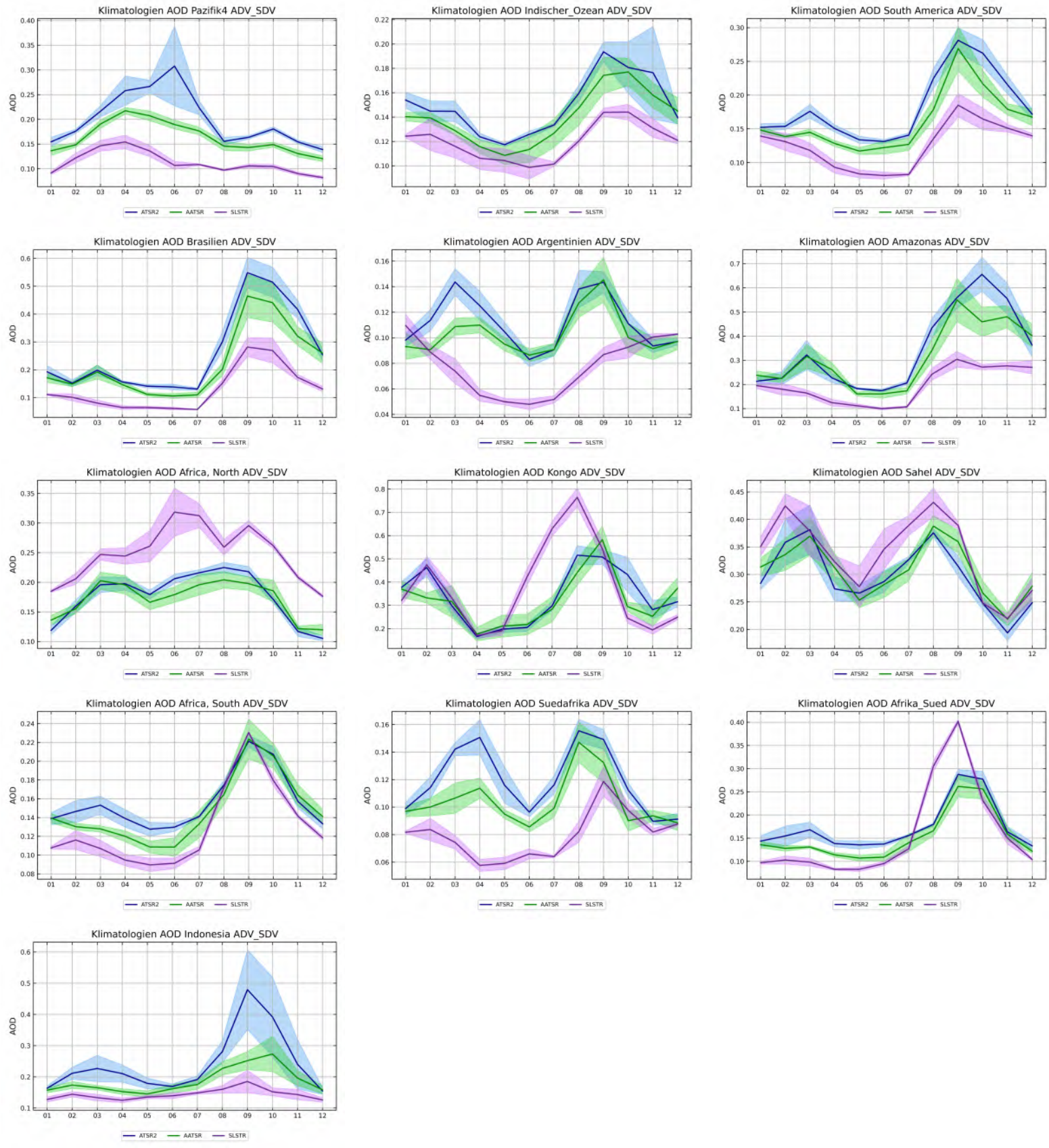
ADV/SDV



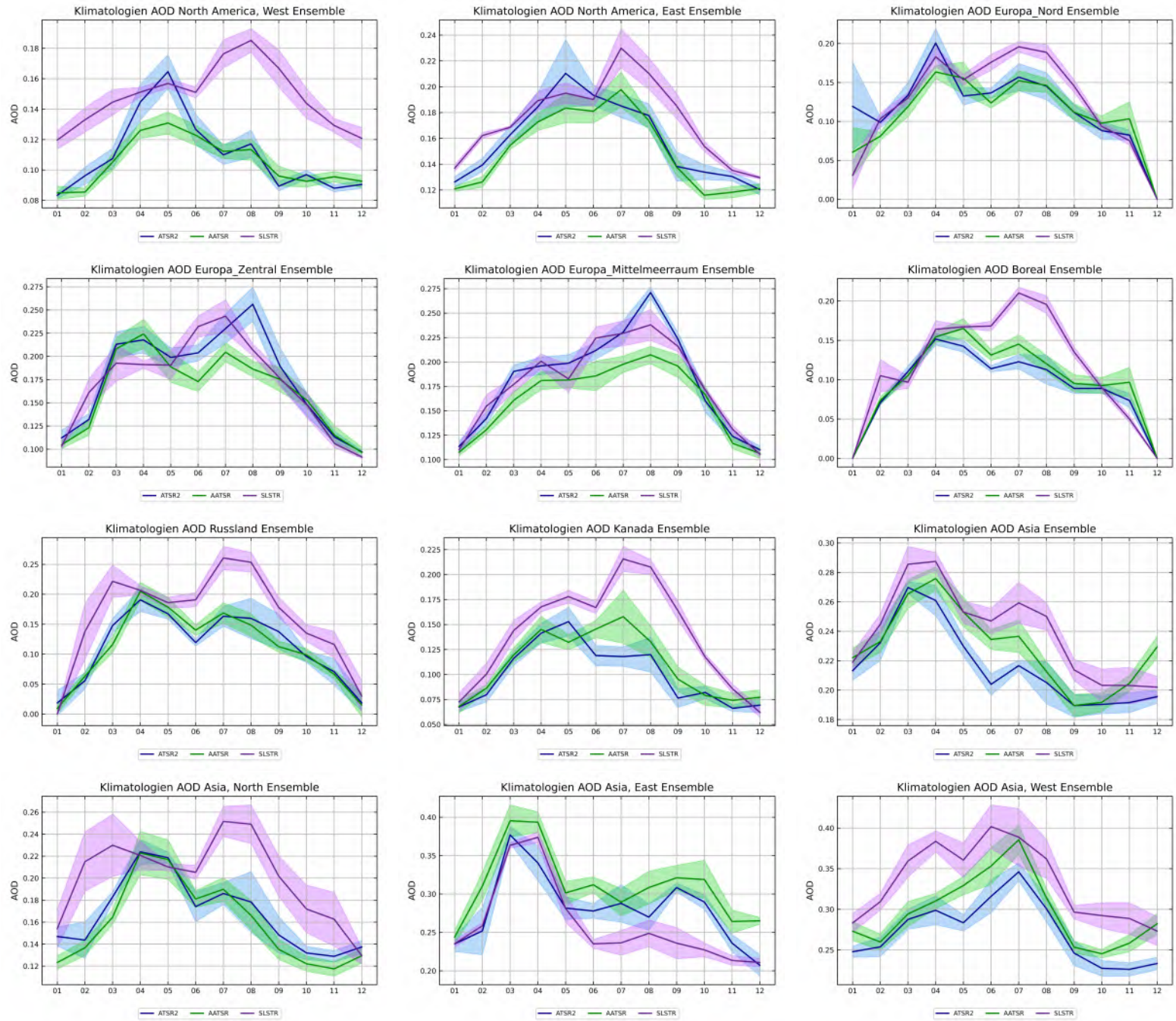
A.7. Konsistenzbetrachtungen



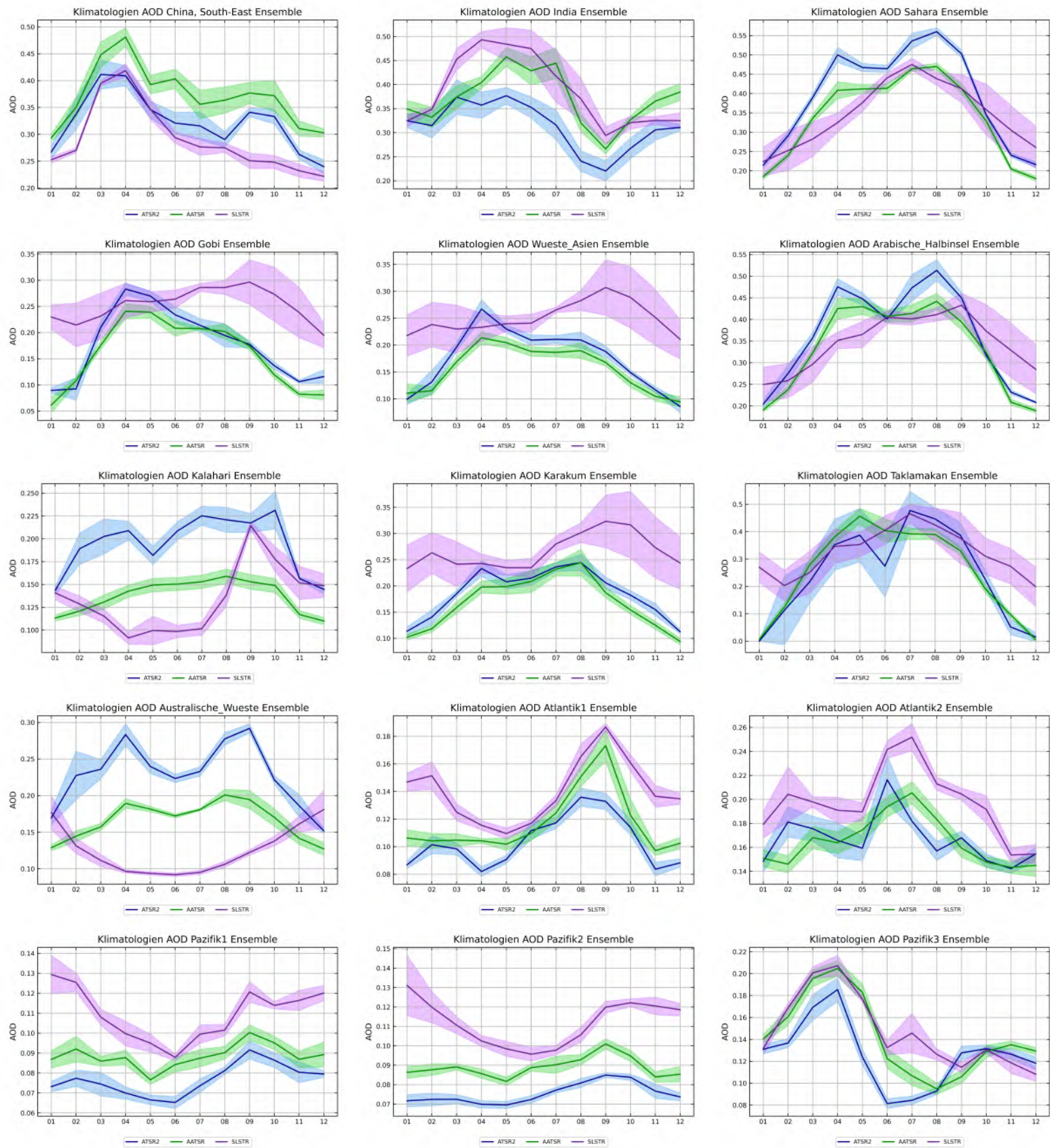
A. Anhang



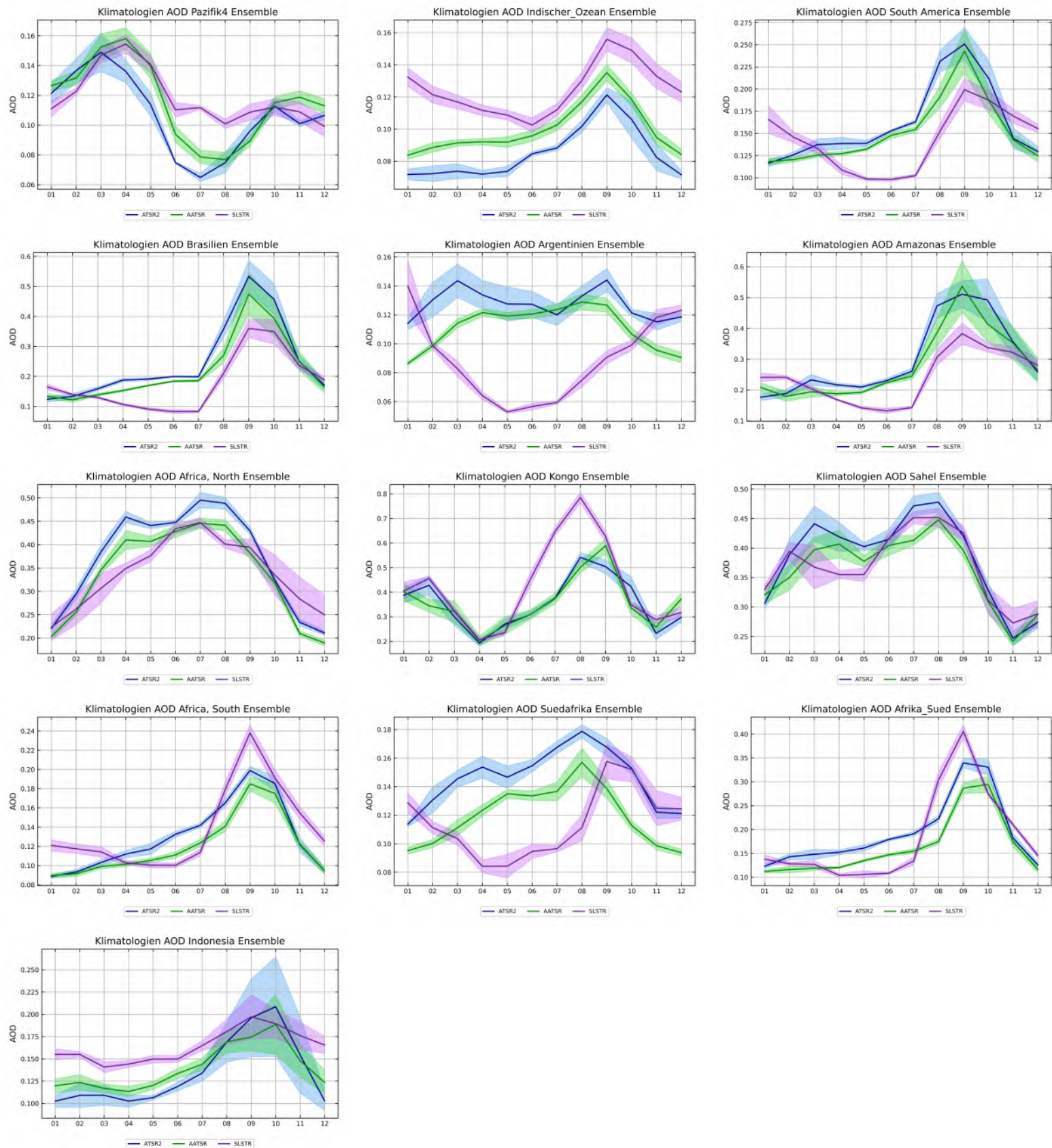
Ensemble



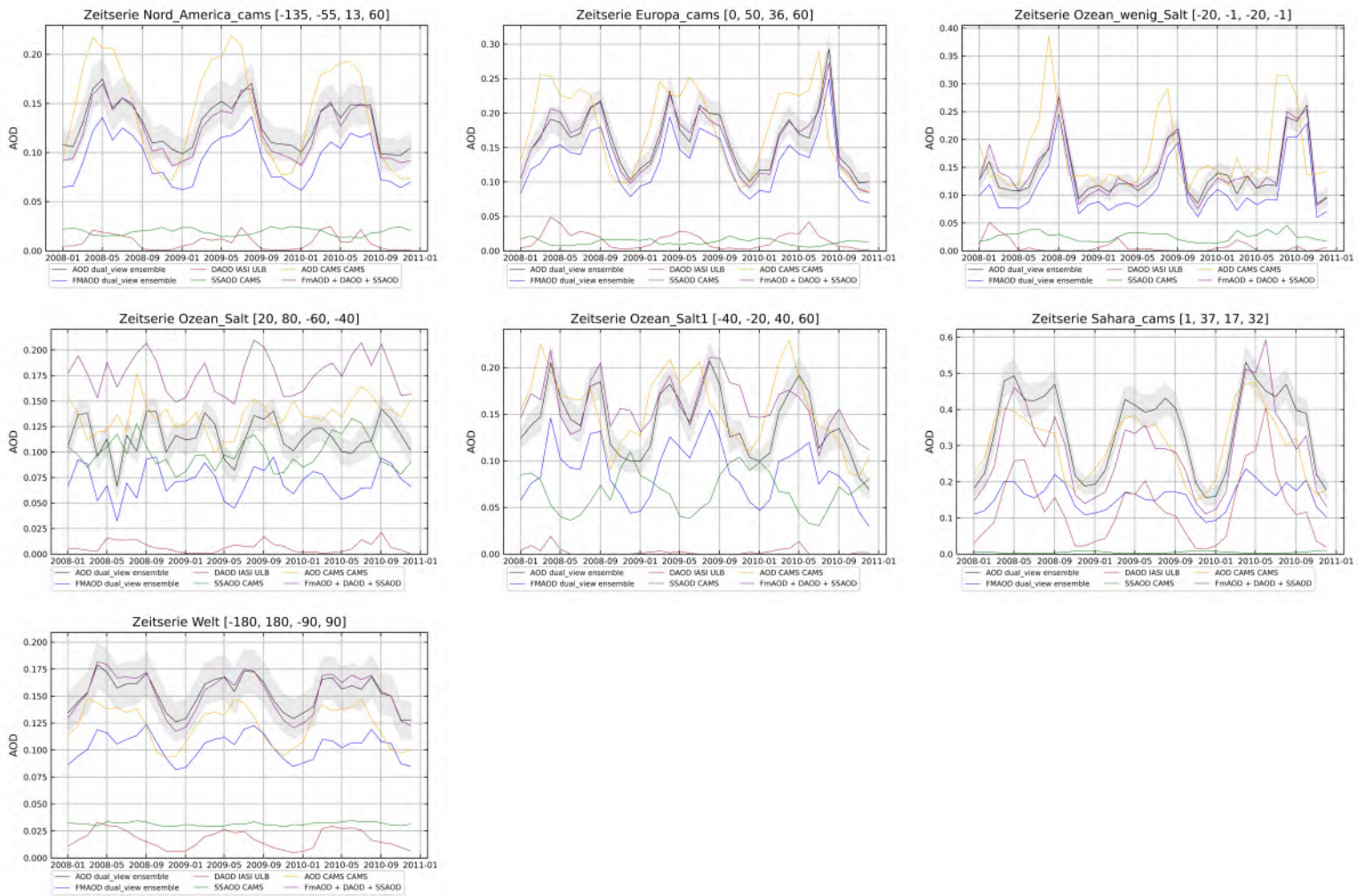
A. Anhang



A.7. Konsistenzbetrachtungen



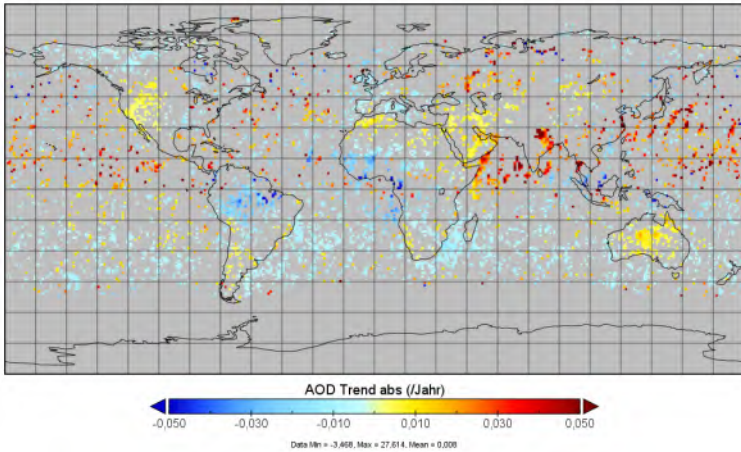
A.7.6. Konsistenz der unterschiedlichen Teil-AOD Komponenten



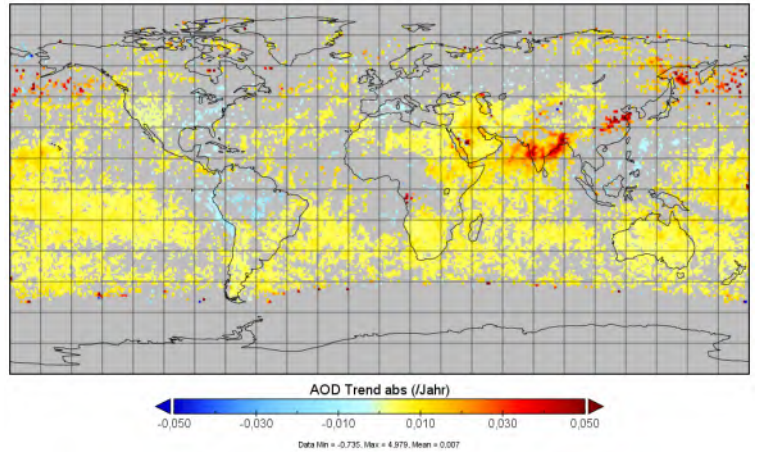
A.8. Trendbetrachtungen

A.8.1. Trendkarten

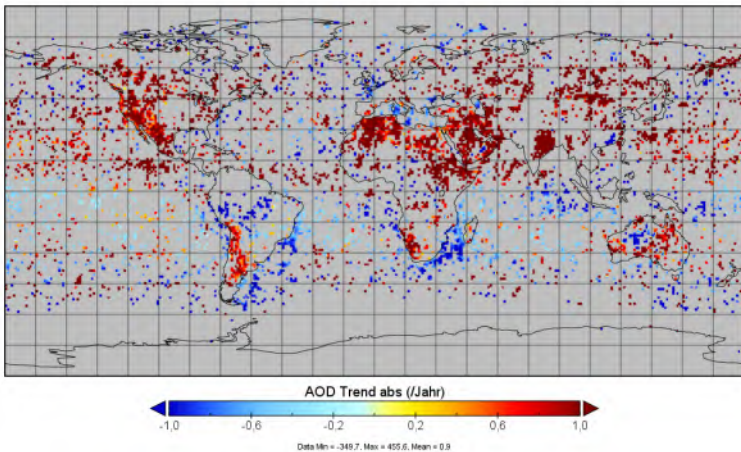
AOD Trend ADV ATSR-2



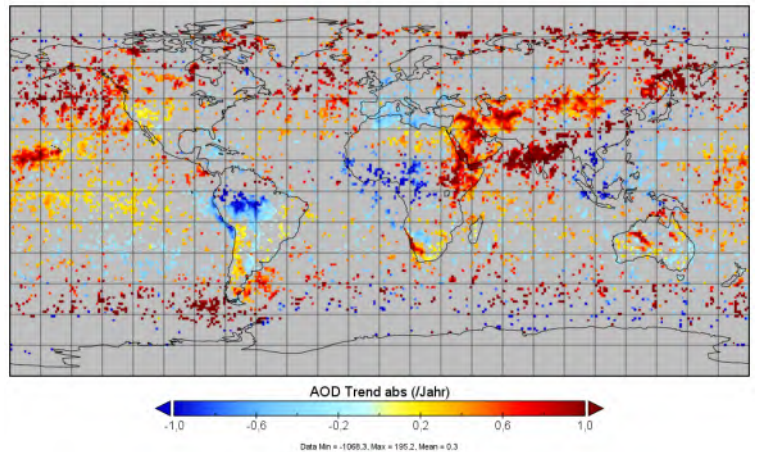
AOD Trend ADV AATSR



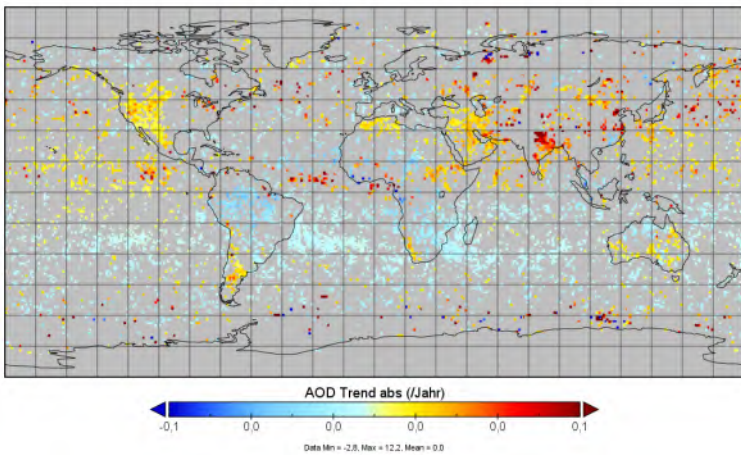
AOD Trend ORAC ATSR-2



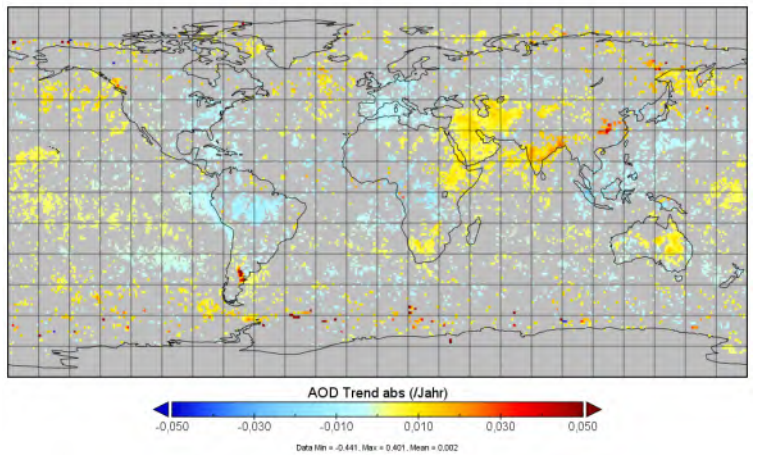
AOD Trend ORAC AATSR



AOD Trend SWANSEA ATSR-2

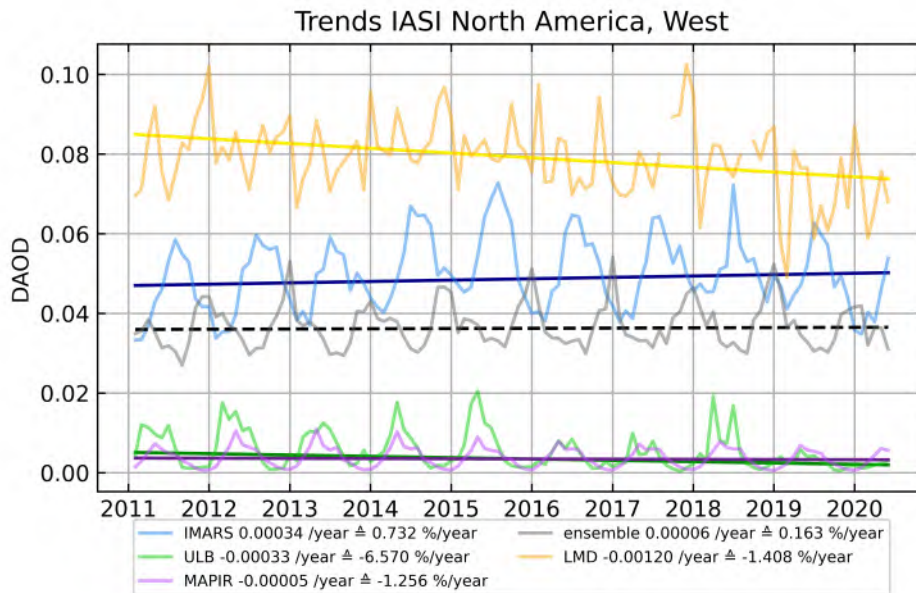


AOD Trend SWANSEA AATSR

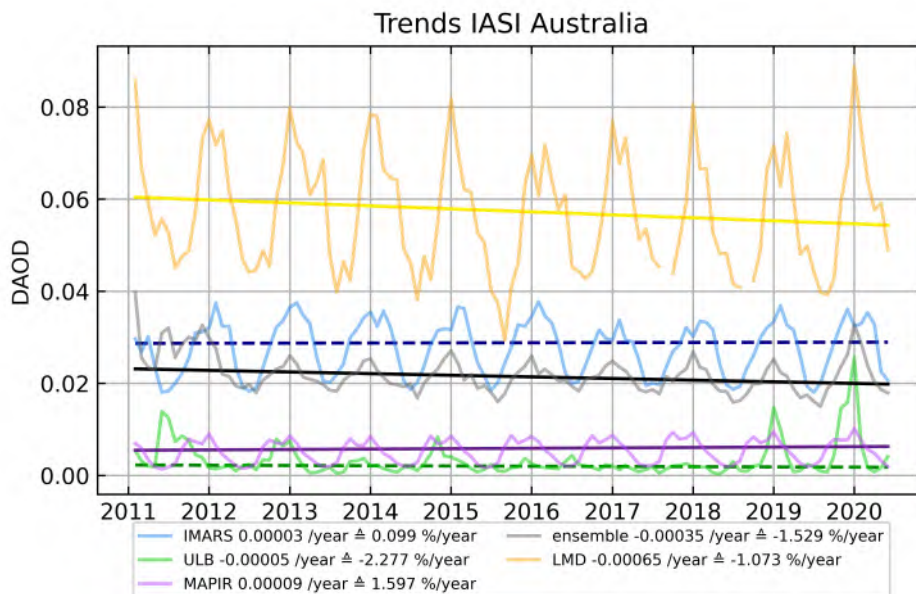


A.8.2. Regionale Trends

Westen von Nord Amerika

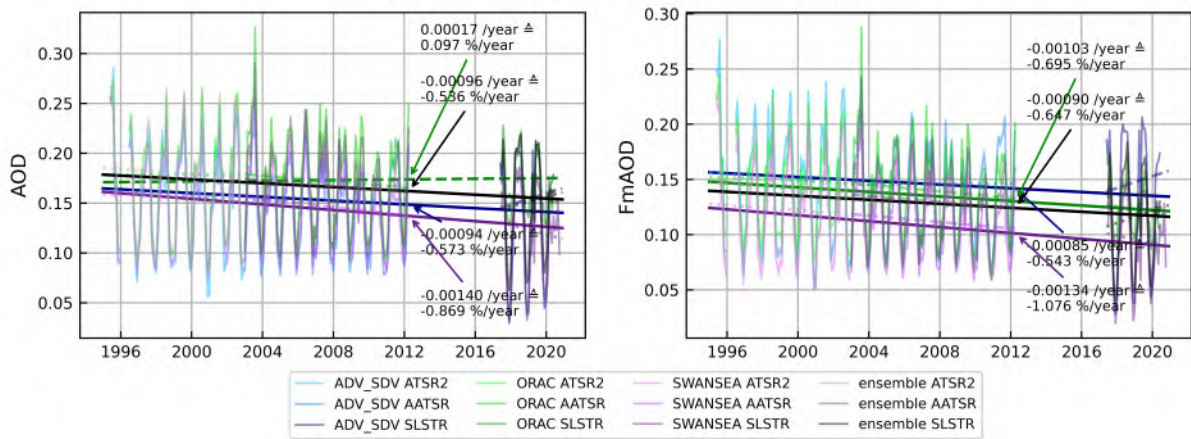


Australien

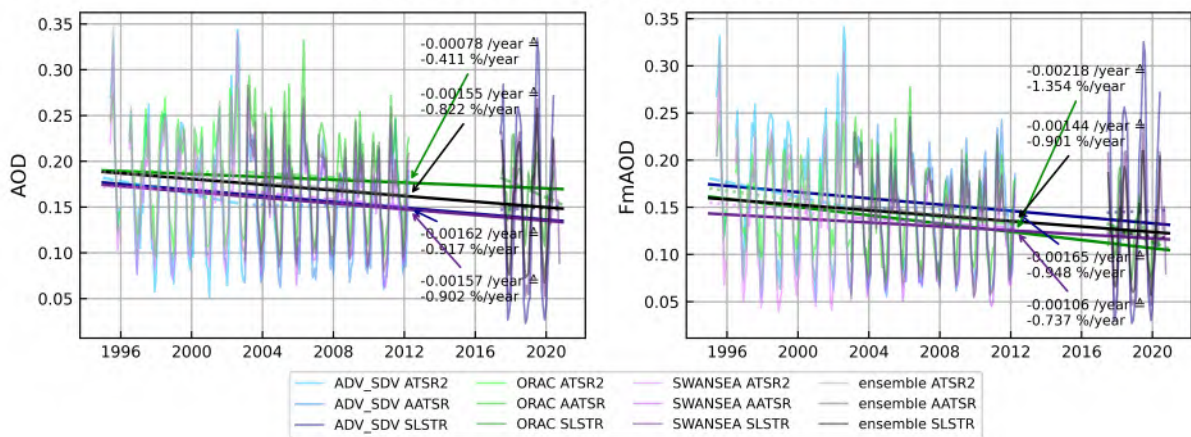


Europa

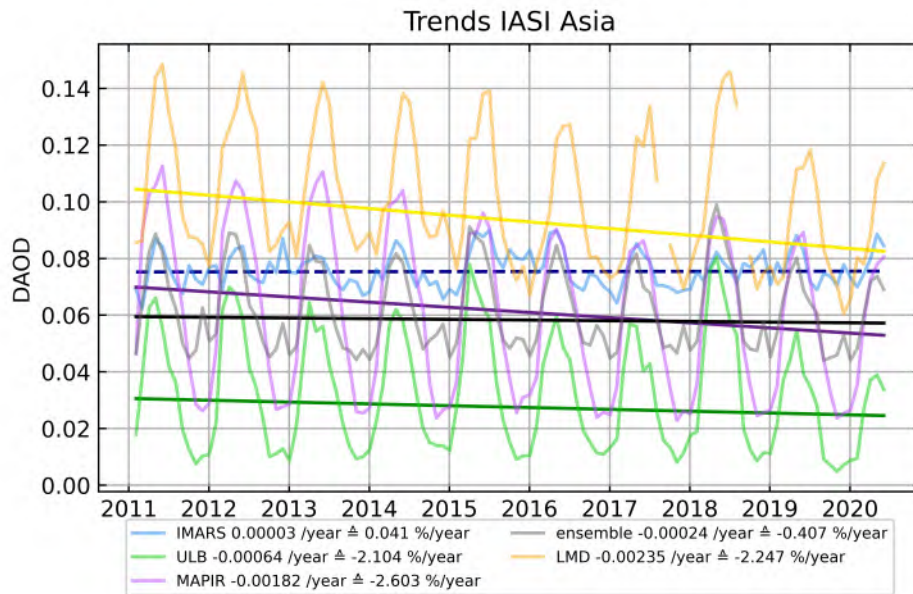
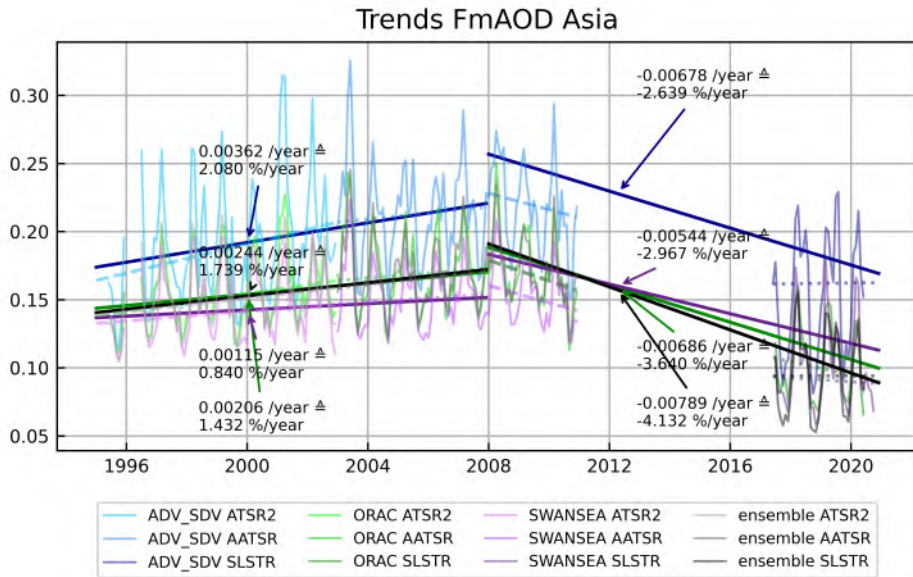
Trends AOD und FmAOD Europa_Mittelmeerraum



Trends AOD und FmAOD Europa_Zentral



Asien



B. Inhalt der beiliegenden CD

Aufgrund der großen Datenmenge werden aus Teilen der Bilder, die für die Analysen der verschiedenen Ereignisse verwendet werden, Videos erstellt. Diese sind auf der beiliegenden CD gespeichert und mit allen gängigen Programmen abspielbar. Die Masterarbeit in digitaler Form liegt ebenfalls auf der CD vor.

C. Danksagung

Für das Erwecken meines Interesses an der Atmosphärenphysik, die Übernahme des Erstgutachtens und die freundliche Aufnahme in der Abteilung Atmosphäre des deutschen Fernerkundungsdatenzentrums am Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt möchte ich mich herzlich bei Prof. Dr. Michael Bittner bedanken.

Bei Prof. Dr. Achim Wixforth möchte ich mich für die Übernahme des Zweitgutachtens und für sein Interesse an meiner Arbeit im Bereich der Atmosphärenphysik bedanken.

Für die stets sehr gute Betreuung und Aufnahme in das Team Aerosole möchte ich Dr. Thomas Popp danken. Auch für die Einführung in die wissenschaftliche Welt des Forschungsgebiets und die Motivation und Ermutigung mich hier einzubringen bin ich ihm sehr dankbar.

Diana Dermann danke ich ganz herzlich für die sehr angenehme und gute Betreuung, ganz viel Motivation und Unterstützung, besonders dann wenn meine eigene Motivation mal nicht ganz so wollte.

Auch den anderen beiden Mitgliedern des Teams Aerosole Dr. Stefanos Samaras und Thomas Offenwanger möchte ich danken. Ich hab mich, trotz der schwierigen Umstände durch Pandemiebedingungen und Homeoffice, sehr willkommen im Team gefühlt.

Danken möchte ich auch meinen Ehrenamtlichen Kollegen im Vorstand und in der Jugend des Deutschen Alpenvereins der Sektion Augsburg, die mir die Freiheiten gegeben haben mich hier aus der Arbeit zurückzuziehen und mich auf die Fertigstellung meiner Masterarbeit zu konzentrieren und hier Verständnis gezeigt haben.

Darüber hinaus möchte ich mich bei meinen Eltern, meinem Freund und meinen Freunden für Motivation, Unterstützung und teilweise die Ablenkungen, wenn sie nötig waren, danken.