

Masterarbeit

**Erkennung und Verfolgung von Eddies
(wirbelförmigen Meeresspiegelanomalien) durch
Kombination von Altimeterdaten und
Meeresspiegeltemperaturen**

von
Christian Schwatke

Hochschule München
Fakultät 07 Informatik/Mathematik

Erstprüfer:	Prof. Dr.-Ing. Peter Krzystek
Zweitprüfer:	Prof. Dr.-Ing. Max Fischer
Ort:	Deutsches Geodätisches Forschungsinstitut Alfons-Goppel-Str. 11 80539 München
Betreuer:	Dr.-Ing. Wolfgang Bosch
Stand:	25. August 2008

Abstrakt

Durch moderne Fernerkundungsverfahren mit Radar- und Infrarotsensoren werden sowohl die Geometrie als auch die Oberflächentemperatur des Meeresspiegels nahezu global mit hoher Wiederholrate erfasst. Meereshöhen aus der Radaraltimetrie sind bereits durch Vergleich mit einem langfristigen Mittelwert stark ausgebildete Eddies zu erkennen. Die ungünstige Abtastung auf weit auseinander liegenden Profilen, die nur alle 10-35 Tagen erneut überflogen werden, kann durch die Altimetermessungen verschiedener Satelliten bereits verbessert werden. Die Lage und die Bewegung von Eddies bilden sich aber auch in der Meeresoberflächentemperatur ab. Entsprechende Daten stehen bereits in einer zeitlichen Auflösung von einem Tag zur Verfügung. Die beiden Fernerkundungsverfahren werden in geeigneter Weise kombiniert, um die Lage von Eddies zu identifizieren und ihre Bewegungen so lange wie möglich zu verfolgen. Diese Eddies werden in dieser Arbeit erfolgreich von drei verschiedenen Segmentierungsalgorithmen lokalisiert und verfolgt. Die Eddies sind gekennzeichnet durch Parameter wie Position, Wasserstand über einem Mittelwert und durchschnittlichem Ausdehnungsradius, jeweils als Funktion der Zeit. Der Lebenszyklus der erkannten Eddies wird in Animationen in geeigneter Weise dargestellt.

Inhaltsverzeichnis

1. Einleitung	4
2. Stand der Wissenschaft	8
2.1. Erkenntnisse aus früheren Veröffentlichungen	8
3. Ziel des Projekts	10
4. Daten	11
4.1. Anforderungsprofil	11
4.1.1. Klassifizierung von Satellitendaten	12
4.2. Meeresoberflächentemperaturdaten	13
4.2.1. NCEP	13
4.2.2. AVHRR Pathfinder SST v5	14
4.2.3. OSTIA	16
4.3. Altimeterdaten	18
4.3.1. Das Messverfahren	18
4.3.2. Überblick der Missionen	18
4.3.3. GFO	19
4.3.4. Jason-1	20
4.3.5. Envisat	20
4.3.6. Fazit	21
4.3.7. Problematik	21
4.3.8. Interpolation	21
5. Segmentierung von Eddies	23
5.1. Ziel der Segmentierung	23
5.2. Merkmale von Eddies	23
5.3. Datenvorverarbeitung	24
5.3.1. Principal Component Analysis (PCA)	25
5.3.2. Trendberechnung	34
5.4. Segmentierung	36
5.4.1. Chain-Algorithmus	36
5.4.2. Watershed-Algorithmus	42

5.4.3. Flächenapproximationsverfahren	44
6. Tracking von Eddies	54
6.1. Kürzester Abstand Algorithmus	54
6.2. Ergebnis	55
7. Evaluierung der Daten	57
7.1. Evaluierung mit Argo-Floatern	57
7.2. Korrelation zwischen SST- und SLA-Daten	60
8. Ergebnisse und Ausblick	65
8.1. Die Segmentierung	65
8.1.1. "Chain"-Algorithmus	65
8.1.2. Watershed-Transformation	67
8.1.3. Flächenapproximationsverfahren	68
8.2. Das Tracking	70
8.3. Ausblick	70
8.4. Fazit	73
9. Tools	74
9.1. PCA	74
9.1.1. Anforderungen	74
9.1.2. Programmbeschreibung	74
9.2. EddyTracker	77
9.2.1. Anforderungen	77
9.2.2. Programmbeschreibung	77
10. Glossar	80

Kapitel 1

Einleitung

In der heutigen Zeit wird das Leben vieler Menschen auf der Erde von Naturkatastrophen wie Erdbeben, Tornados, Tsunamis, Überflutungen usw. maßgeblich beeinflusst. Einige dieser Ereignisse treten in den letzten Jahren und in Zukunft auf Grund des Klimawandels immer häufiger auf. Das Ziel von Wissenschaftlern ist es, möglichst genaue Modelle z.B. anhand von Satellitendaten der Erde zu entwickeln, um in Zukunft das Eintreten von Naturkatastrophen besser einschätzen zu können. Für die Verbesserung solcher Modelle kann das Wissen über die Position von Eddies nützlich sein.

Die Entstehung von Meeresströmungen in den Ozeanen hat mehrere Ursachen. Neben der Reibung des Windes auf der Meeresoberfläche und der Erwärmung der Wassermassen durch die Sonne, tragen auch die Dichte und der Salzgehalt sowie die Meerestopographie zur Entstehung von Meeresströmungen bei. Die aufgrund der Erdrotation um die Sonne entstehende Corioliskraft wirkt sich auf die bewegenden Luft- und Wassermassen der Erde aus. Sie bewirkt auf der Nordhalbkugel eine Ablenkung der Luft- und Wassermassen im Uhrzeigersinn und auf der Südhalbkugel gegen den Uhrzeigersinn. Diese kalten und warmen Strömungen bewegen sich kreisförmig. Beim Aufeinandertreffen verschiedener Strömungen kann es abhängig von der Temperatur, Geschwindigkeit, Richtung und Topographie zu Verwirbelungen kommen. Diese Verwirbelungen werden als Eddies bezeichnet. Treten in einer Meeresströmung keine Verwirbelungen auf, so ist diese Strömung laminar. Strömungen mit Verwirbelungen dagegen bezeichnet man als turbulent. Die Eddies in den Ozeanen können eine horizontale Ausdehnung von 0.1 - 300 km und eine Lebensdauer von 0.5 - 400 Tagen besitzen. Das Vorkommen dieser Eddies ist in den folgenden drei Gebieten der Erde sehr stark ausgeprägt, da dort hohe Temperaturunterschiede und Geschwindigkeiten in den Wassermassen herrschen.

- Agulhasstrom (Südostküste Afrikas)
- Nordäquatorialstrom (Ostküste Nordamerikas)
- Kuroshio-Strom (Ostküste Japans)

In dieser Masterarbeit wird auf Grund der Menge an Daten und des daraus resultierenden Rechenaufwands, mit dem Kuroshio-Strom ein kleines regionales Gebiet betrachtet bzw. ausgewertet. Das Gebiet befindet sich zwischen dem 135. und 180. Längengrad und dem 25. und 45. Breitengrad.

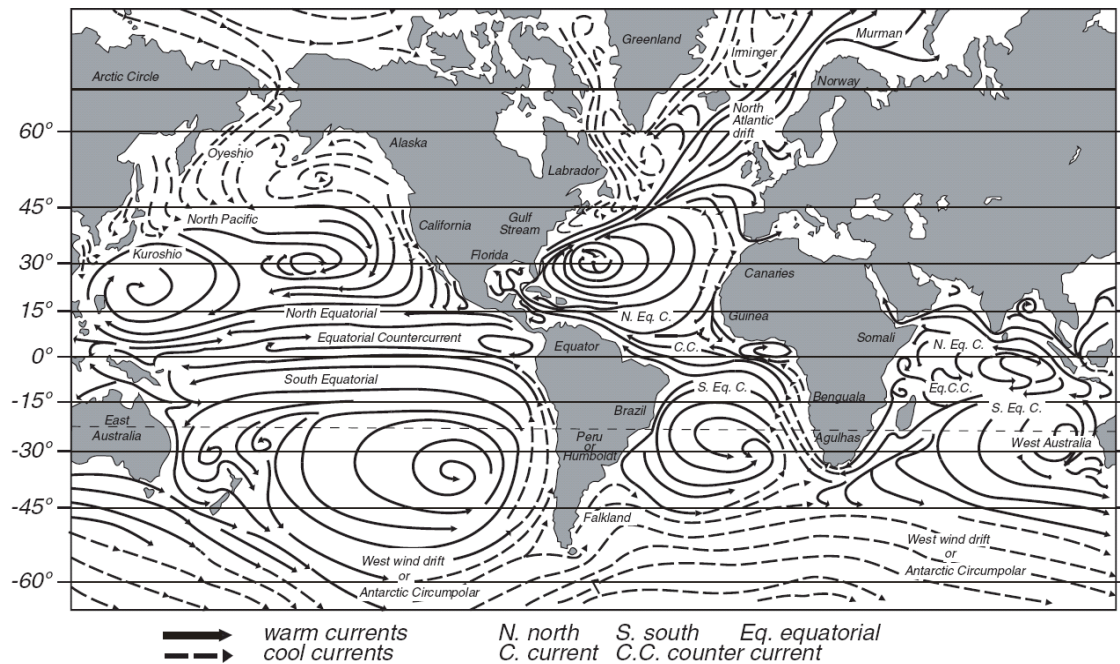


Abbildung 1.1: Strömungen in den Ozeanen [T85]

Durch die stetige Verbesserung der Sensoren von Fernerkundungssatelliten in den letzten Jahrzehnten können anhand der immer höher werdenden Auflösung heutzutage schon kleinere Strukturen, wie z.B. Eddies erkannt werden. Es besteht dadurch aus wirtschaftlicher sowie aus wissenschaftlicher Sicht ein hohes Interesse an der Lokalisierung der Eddies.

Wirtschaftliche Aspekte

Der wirtschaftliche Aspekt liegt vor allem in der industriellen Fischerei, deren Fangquoten durchaus von den Strukturen der jeweiligen Eddies in Abhängigkeit stehen. So gibt es im Allgemeinen zwei Arten von Eddies. Es gibt Eddies mit einem warmen Kern, die einen Abtrieb besitzen, und deshalb arm an Nährstoffen sind. Dagegen besitzen Eddies mit einem kalten Kern Auftrieb, und sind dadurch reich an Nährstoffen. Ein Eddy ist vergleichbar mit einem Hurrikan im Ozean. Es wird dabei zwischen zyklonischen und antizyklonischen Drehrichtungen unterschieden. Durch die Rotationsbewegung auf dem Grund des Ozeans werden Nährstoffe in Richtung Meeresoberfläche aufgetrieben. Dadurch erhöht sich an der Meeresoberfläche der Chlorophyllgehalt, wodurch die Planktonproduktion erhöht wird. In den nährstoffreichen Gebieten ist die Wahrscheinlichkeit, ein besseres Fischfangergebnis zu erzielen um einiges höher als in anderen Gebieten, in denen das Fischvorkommen niedriger ist. Dieser Effekt wird in der Fischerindustrie verwendet, um anhand von Satellitendaten geeignete Fangplätze zu finden und höhere Erträge zu erzielen. [GSFC01]

Neben dem Nutzen in der industriellen Fischerei sind diese Erkenntnisse von der Position der Eddies wichtig für Meteorologen im Bereich der Hurrikanwarnung. Im Golf von Mexiko wurde festgestellt, dass

Hurrikane stärker werden, sobald sich diese über warme Eddies bewegen. Dagegen nimmt ihre Stärke bei der Bewegung über kalte Eddies ab. Mit Hilfe dieser Erkenntnisse kann die Vorhersage im Bereich der Hurrikanwarnung verbessert werden. [NSF05]

Wissenschaftliche Aspekte

Die Altimetrie ist ein Teilgebiet der Geodäsie, die sich mit der Höhenmessung beschäftigt. Die Höhen können dabei nivellistisch, bathymetrisch, barometrisch usw. gemessen werden. In dieser Arbeit werden die Höhen mittels Fernerkundung durch die Laufzeit der Laser- oder Radarwellen von Satelliten gemessen. Mit Hilfe der Daten aus der Satellitenaltimetrie wird versucht, ein möglichst präzises Modell der Meeresoberfläche zu modellieren. Die Genauigkeit liegt dabei im Zentimeterbereich. Allerdings hat man das Problem, dass in Gebieten, in denen starke Strömungen und Eddies herrschen, bei der Berechnung des mittleren Meeresspiegels die Wahrscheinlichkeit einer höheren Fehlerquote größer als in Gebieten mit schwacher Strömung ist. Die daher entstehenden Fehler sind vorrangig auf die hohe Variabilität in diesem Gebiet und nur im geringen Maße auf Messergebnisse des Satelliten zurückzuführen. Ist die Position der einzelnen Eddies bekannt, so können diese Information in das Modell einfließen und dazu beitragen, den Fehler zu verringern und das Modell zu verbessern.

Die Einteilung der Masterarbeit erfolgt auf folgende Weise:

Das Kapitel 2 ("Stand der Wissenschaft") zeigt zunächst, welche Ansätze bereits unternommen wurden, um Eddies anhand von Satellitendaten zu erkennen.

Im folgenden Kapitel 3 ("Ziel des Projekts") wird veranschaulicht, wie das Ziel der Segmentierung und des Trackings erreicht werden soll.

Der Abschnitt 4 ("Daten") beschreibt die Anforderungen, die an die Satellitendaten bei der Suche gestellt wurden, und welche Daten bei der Suche in Betracht kamen. Zudem wird die Technik beschrieben, mit der die Daten erzeugt werden und welche letztendlich in dieser Masterarbeit Verwendung finden.

Das Kapitel 5 ("Segmentierung") ist der Schwerpunkt dieser Arbeit und beschreibt zunächst Verfahren zur Verbesserung der Daten. Desweiteren werden die folgenden drei Segmentierungsalgorithmen beschrieben, um Eddies innerhalb von Meeresspiegelanomalien-(SLA) und Meeresoberflächentemperaturdaten(SST) zu segmentieren.

- "Chain"-Algorithmus
- Watershed Transformation
- Flächenapproximationsverfahren

Im Kapitel 6 ("Tracking") wird beschrieben, wie das Verfolgen der segmentierten Eddies ermöglicht wird.

Im Kapitel 7 ("Evaluierung der Daten") wird untersucht, in welchem Zusammenhang die Meeresoberflächentemperatur- und Altimeterdaten zueinander stehen.

Im Abschnitt 8 ("Ergebnisse und Ausblick") werden die Ergebnisse dieser Arbeit beschrieben und miteinander verglichen. Zudem werden Möglichkeiten beschrieben, wie das Ergebnis in Folgearbeiten noch effizienter gestaltet werden kann.

Im letzten Abschnitt 9 ("Tools") wird das im Laufe der Masterarbeit zur Segmentierung und Verfolgung von Eddies entwickelte Programm "Eddy Tracker" beschrieben. Zudem wird ein Tool zur Berechnung der Principle Component Analysis beschrieben, welches für die Vorverarbeitung der Daten benötigt wird.

Kapitel 2

Stand der Wissenschaft

Das aktuelle Kapitel "Stand der Wissenschaft" soll zunächst einen Einblick in die Materie der Eddies geben. Auf Grund dessen, dass diese Arbeit nicht die erste ist, die sich mit dem Thema Eddies und im speziellen der Segmentierung und Verfolgung von diesen beschäftigt, werden im Folgenden Erkenntnisse aus diversen Veröffentlichungen erläutert.

2.1 Erkenntnisse aus früheren Veröffentlichungen

Die kontinuierliche Beobachtung der Ozeane seit 1991 mittels Synthetic Aperture Radar (SAR) an Board der Satelliten Almaz-1, ERS-1/2, JERS-1 und RADARSAT unterstützte die bekannte Tatsache, dass ozeanische Eddies weltweit in Ozeanen auftreten. Durch Auswertung der Fernerkundungsdaten konnten Eddies anhand von Größe, Lebensdauer, Drehrichtung und Form klassifiziert werden. [IG02]

Ein Vergleich von Daten des jährlichen Zyklus von Meereshöhen (ERS-1) und Meeresoberflächentemperaturen (ATSR) kam zu dem Ergebnis, dass zwischen 25°N und 50°N eine hohe Korrelation herrscht. In Bereichen zwischen 25°S und 50°S ist eine hohe Korrelation mit einer Phasenverschiebung von ca. einem Monat vorhanden. Dagegen ist die Korrelation in Regionen des Äquators schlecht, da der Einfluss des Windes auf die Meereshöhenvariabilität zu hoch ist. [KAK97]

In [NLDSMT03] wird erneut der Zusammenhang zwischen der Meeresoberflächentemperatur und der Meeresspiegelhöhe im Mittelmeer untersucht. Ein Ergebnis dieser Untersuchung ergibt für die Korrelation einen Koeffizienten von 0.57 zwischen den beiden Datensätzen.

Durch das Aufeinandertreffen des Südäquatorialstroms und des Ostmadagaskarstroms wird die Variabilität von Eddies anhand von Altimeterdaten im Osten Madagaskars beschrieben. [QBS04]

Die Veröffentlichung von Fernandes und Nascimento [FN06] ist eine der wenigen, die sich direkt mit der Segmentierung von Eddies anhand von Meeresoberflächentemperaturen beschäftigt. Dabei wurde ein Verfahren mit dem Namen "Random Ellipse Fitting" mit Vektorfeldern angewendet. Die Segmentierung

verwendet unvollständige (auf Grund der hohen Wolkendicht), hochaufgelöste ($1 \times 1 \text{ km}^2$ pro Pixel) und nicht interpolierte Eingangsdaten. Im ersten Schritt wird mittels eines veränderten optischen Flusses ein Vektorfeld erzeugt, welches in ein Binärbild umgewandelt wird. Es werden zufällig fünf Punkte selektiert, durch die anhand der Least Squares-Methode eine Ellipse gezeichnet wird. Ein Iterationsverfahren wird dabei solange durchgeführt bis entweder der Gradientenvektor der Punkte in die Ellipse zeigt oder der Radius der Ellipse nicht den Ausmaßen eines Eddies entspricht.

Die Veröffentlichung [FLP04] beschreibt die Möglichkeit, Eddies mittels Meeresoberflächentemperatur- und Winddaten zu entdecken. Dazu werden die Daten des Satelliten RADARSAT-1 mit Hilfe von SAR verwendet. Die Detektion erfolgt dabei über die Betrachtung der Veränderungen der Windgeschwindigkeiten auf den Temperaturgradienten. Da bereits kleinere Temperaturschwankungen der Meeresoberfläche einen Einfluss auf die Atmosphäre haben, können Windgeschwindigkeiten zur Erkennung von Eddies genutzt werden.

Unter Verwendung eines "Heat-Index" als Merkmal, wird in [BTJS03] die Entdeckung von Eddies innerhalb eines Modells vollzogen. Dabei wird mittels Bewegungsmustern anhand von Winkeln versucht, Eddies zu segmentieren.

Eine weitere Möglichkeit, Eddies zu entdecken, wird in [IM03] beschrieben. Hierbei wird ein Hochfrequenzradar verwendet, um die Wellenhöhen im Monterey Bay zu messen. Anhand dieser Messergebnisse lassen sich Eddies in einem lokalen Gebiet entdecken.

Kapitel 3

Ziel des Projekts

Das Deutsche Geodätische Forschungsinstitut (DGFI) beschäftigt sich innerhalb eines Projektes Ihres Forschungsprogramm mit der Kinematik des Meeresspiegels. Das Ziel dieses Projektes ist es, eine räumliche Beschreibung der Meeresoberfläche und ihrer zeitlichen Veränderung zu entwickeln. Dabei besteht eine Teilaufgabe darin, Gezeitenmodelle zu verbessern, deren Verwendung zur Verbesserung der Beschreibung des Meeresspiegels beitragen. Das aktuelle Gezeitenmodell weist vor allem in der Nähe der Küste und in Gebieten mit starken Strömungen größere Fehler auf. Ein Gebiet mit starken Strömungen befindet sich beispielsweise östlich von Japan, wo die warme Strömung des Kuroshio-Stroms auf die kalte Strömung des Oyashio-Stroms trifft. Hierbei entstehen beim Aufeinandertreffen der beiden Strömungen starke Verwirbelungen, die Eddies genannt werden. Das Ziel dieser Masterarbeit ist es, diese Eddies zu segmentieren und zu verfolgen. Die daraus resultierenden Ergebnisse können in weiterführenden Arbeiten für die Verbesserung von Gezeitenmodellen verwendet werden.

Als Ausgangsdaten für die Segmentierung von Eddies dienen Altimeter- und Meeresoberflächentemperaturdaten. Auf Grund der höheren Auflösung der Meeresoberflächentemperaturdaten soll durch Kombination mit den Altimeterdaten ein besseres Ergebnis erzielt werden. Die Ergebnisse der Segmentierung dienen als Grundlage zur Verfolgung von Eddies.

Zum Abschluss dieser Masterarbeit soll untersucht werden, wie Altimeter- und Meeresoberflächentemperaturdaten zusammenhängen.

Kapitel 4

Daten

Im folgenden Kapitel werden Anforderungen an die Satellitendaten, die für das Segmentieren und Verfolgen von Eddies nötig sind, erläutert. Zudem werden zur Verfügung stehende Temperatur- und Altimeterdaten verglichen, die für den Vorgang der Segmentierung und Verfolgung in Betracht kommen.

4.1 Anforderungsprofil

Im Folgenden werden allgemeine Merkmale, die für die Auswahl der Daten ausschlaggebend waren erläutert.

Räumliche Überdeckung

Die Daten sollten die wenigen Gebiete, in denen eine starke Eddy-Aktivität herrscht, überdecken. Dazu gehören Gebiete wie die Ostküste Nordamerikas, die Ostküste Japans oder die Südostküste Afrikas, da dort starke Strömungen herrschen und die Temperaturunterschiede groß sind. Die einzelnen Gebiete weisen dabei eine Größe von ca. 2000 x 4500 km auf.

Räumliche Auflösung

Die räumliche Auflösung sollte sehr hoch sein, da die Durchmesser von Eddies zwischen 0.1 und 300 km liegen. Bei einer Auflösung von 5 km entspricht ein Pixel einer Fläche von 5x5 km, was dazu führt, dass Eddies mit einem Durchmesser von 300 km von 60x60 Pixel repräsentiert werden. Dagegen werden Eddies mit einem Durchmesser von 20 km von 4x4 Pixel dargestellt, was eindeutig zu gering ist, um diese zu segmentieren, geschweige denn eine Struktur zu erkennen. Aus diesem Grund ist eine sehr hohe Auflösung von Vorteil.

Zeitliche Auflösung

Die zeitliche Auflösung sollte am Besten täglich sein, um die Bewegung der Eddies möglichst genau verfolgen zu können. Eddies haben eine Geschwindigkeit von 0 cm/s bei stehenden und bis zu 100 cm/s bei sich stark bewegendenden Eddies. Da sich mehrere Eddies nah nebeneinander befinden können, ist das Risiko der falschen Zuordnung bei geringer zeitlicher Auflösung relativ hoch.

Zeitraum

Der Zeitraum dieser Daten sollte mindestens ein Jahr betragen, da die Lebensdauer von Eddies zwischen 0.5 und 400 Tagen liegt, um genug Datensätze zur Verfolgung von Eddies zur Verfügung zu haben.

Kosten

Die verwendeten Daten sollen kostenlos zur Verfügung stehen.

4.1.1 Klassifizierung von Satellitendaten

Altimeter- und Temperaturdaten sind in der Regel einer Qualitätsklasse, genannt Level, zugeordnet. Anhand des Levels kann sich der Benutzer ein Bild darüber machen, welche Korrekturen bereits an den Daten vorgenommen wurden. Die Klassifizierung erfolgt dabei in 5 Level, die im Folgenden kurz erläutert werden. [RBLMP06]

Level 0:

Die unkorrigierten Rohdaten, die direkt vom Satelliten kommen, besitzen das Level 0.

Level 1:

Daten mit dem Level 1 sind bereits zeitlich und örtlich erfasst und in eine physikalische Einheit gewandelt. Zudem haben diese Daten die Qualitätskontrolle durchlaufen, in der Instrumentenfehler, atmosphärische Fehler und Störungen durch die Reflexion korrigiert wurden.

An Altimeterdaten werden z.B. Korrekturen der Ionosphäre (0 - 50 cm), feuchten Troposphäre (0 - 50cm) oder trockenen Troposphäre (2.3m) durchgeführt.

Level 2:

In Level 2-Daten fließen zusätzlich geophysikalische Korrekturen ein.

In der Altimetrie werden z.B. die Gezeiten (1 m im Ozean / bis zu 15 - 20 m an der Küste) anhand von Modellen korrigiert. Diese Daten sind durch eine exakte Bahnbestimmung genau lokalisiert.

Level 3:

Unter Level 3-Daten versteht man Datensätze, die bereits korrigiert wurden und im Format entlang der Bahnspur vorliegen.

Level 4

Die Kombination von mehreren Datensätzen verschiedener Satelliten zu einem entsprechen in der Regel dem Level 4. Diese Datensätze liegen im Gitterformat vor und nicht entlang der Spur.

Die im weiteren Kapitel betrachteten Datensätze sind jeweils einem dieser Levels zugeordnet.

4.2 Meeresoberflächentemperaturdaten

Auf der Suche nach geeigneten Meeresoberflächentemperaturdaten wurden die folgenden drei Datensätze auf ihre Eigenschaften untersucht.

4.2.1 NCEP

Die NCEP Reynolds Optimally Interpolated Sea Surface Temperature Produkte sind eine Kombination aus verschiedenen Quellen. Diese Daten werden vom Jet Propulsion Laboratory der NASA als Produkt 119 zur Verfügung gestellt. Sie bestehen zum einen aus Satellitendaten des NOAA Advanced Very High Resolution Radiometer (AVHRR), zum anderen werden Temperaturdaten aus Messungen von Bojen und Schiffen verwendet. [NCEP]

Eine Übersicht über die Eigenschaften der Daten bietet die folgende Tabelle.

Zeitraum	1981 - heute
Zeitl. Auflösung	wöchentlich und monatlich
Räuml. Auflösung	1 °
Räuml. Überdeckung	global
Kosten	kostenlos
Level	1-B

Tabelle 4.1: *Eigenschaften von NCEP Daten*

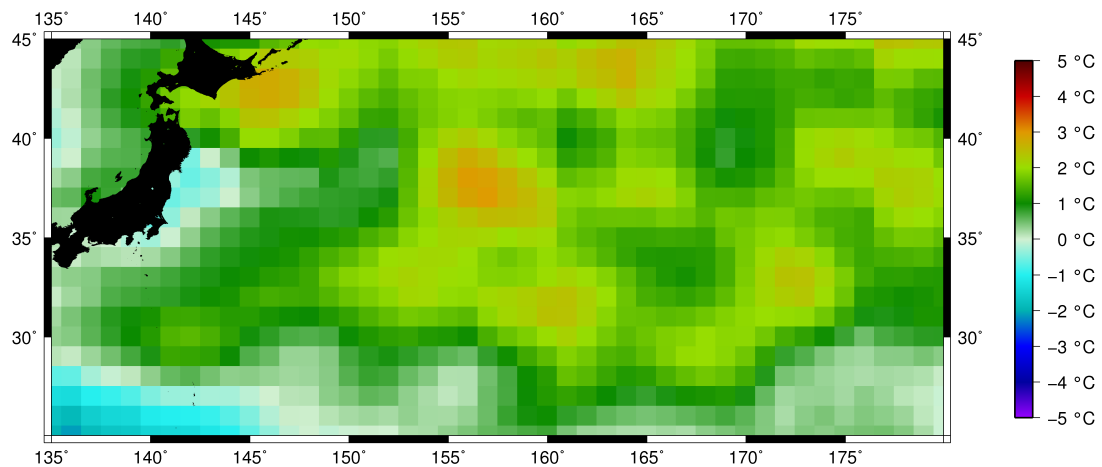


Abbildung 4.1: NCEP vom 31.05.2006 mit wöchentlichem Mittelwert

Fazit:

Im Bereich der räumlichen Überdeckung, des Zeitraums und der Kosten wären diese Daten für den Einsatz geeignet. Allerdings ist eine zeitliche Auflösung von mindestens einer Woche mit zugleich räumlicher Auflösung von 1° nicht geeignet für die Segmentierung und die Verfolgung von Eddies.

4.2.2 AVHRR Pathfinder SST v5

Die Daten des AVHRR Pathfinder SST v5 werden als Produkt 216 vom Jet Propulsion Laboratory des California Institute of Technology kostenlos zu Verfügung gestellt. Diese Daten verwenden je nach Zeitraum einen Sensor des NOAA AVHRR. [AVHRR]

Eine Übersicht über die Eigenschaften der Daten bietet die folgende Tabelle.

Zeitraum	1985 - 2006
Zeitl. Auflösung	täglich, 5-Tage, 7-Tage, 8-Tage, monatlich, jährlich
Räuml. Auflösung	4 km
Räuml. Bedeckung	global (je nach zeitl. Auflösung)
Kosten	kostenlos
Level	4

Tabelle 4.2: Eigenschaften von AVHRR Daten

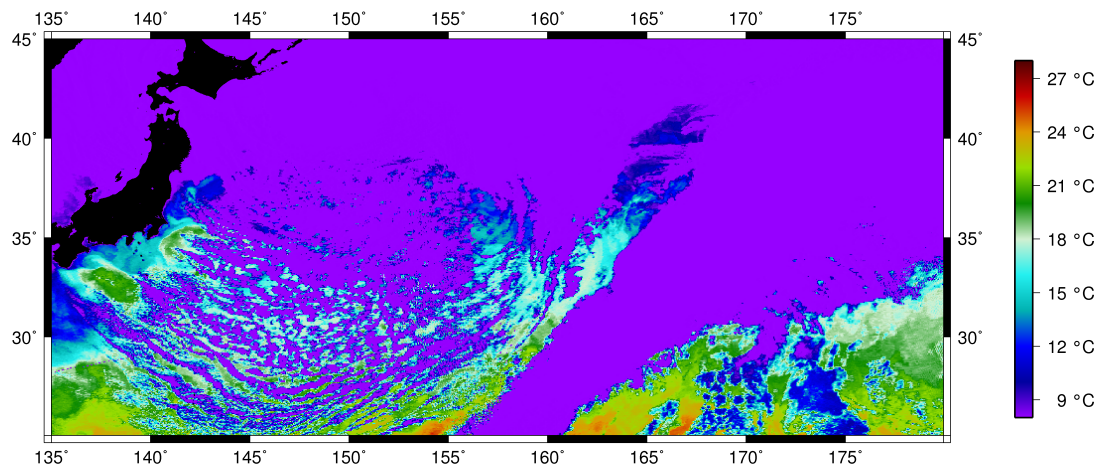


Abbildung 4.2: AVHRR vom 01.06.2006 ohne Interp. mit Lücken und deutlich sichtbaren Strukturen

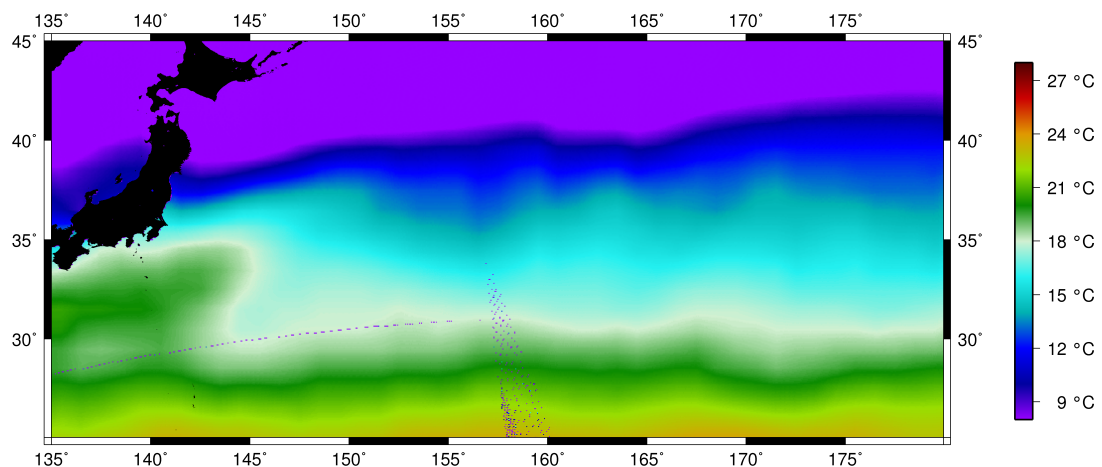


Abbildung 4.3: AVHRR vom 01.06.2006 nach Interp. ohne Lücken und keine erkennbaren Strukturen

Fazit:

Der Zeitraum der Aufzeichnung der Daten reicht von 1985 bis 2006. Zudem sind die Daten in einer räumlichen Auflösung von 4 km verfügbar, was eine gute Voraussetzung für die Erkennung von Eddies sein sollte.

Die Problematik bei der Verwendung dieser Daten liegt in der zeitlichen Auflösung. Obwohl die Daten in einer täglichen Auflösung zur Verfügung stehen, gibt es in der täglichen Auflösung keine Überdeckung in relevanten Gebieten, da der Satellit nicht jeden Punkt einmal am Tag überfliegt. Zudem können Gebiete, in denen Wolken vorkommen, nicht erfasst werden. Deshalb sind in der täglichen Auflösung

nur einzelne Spurfragmente vorhanden (siehe Abbildung 4.2). Da sich die abgedeckten Spurdaten von Tag zu Tag ändern, kann keine Segmentierung durchgeführt werden. Verwendet man stattdessen die interpolierte Methode ist die räumliche Überdeckung vollständig, allerdings so stark geglättet, dass keine Eddies mehr sichtbar sind (siehe Abbildung 4.3).

4.2.3 OSTIA

Die Daten von OSTIA stehen für Operational Sea Surface Temperature and Sea Ice Analysis. Diese Daten werden vom GODAE High Resolution Sea Surface Temperature Pilot Project (GHRSSST-PP) [GHRSSST-PP] bereitgestellt.

Zeitraum	04/2006 - heute
Zeitl. Auflösung	täglich
Räuml. Auflösung	0.05 °
Räuml. Bedeckung	global
Kosten	kostenlos
Level	4

Tabelle 4.3: *Eigenschaften von OSTIA Daten*

Diese Daten sind eine Kombination aus den verschiedensten Sensoren, wie in der folgenden Tabelle zu sehen ist.

Sensor (Plattform)	Sensortyp	Auflösung	Datenquelle	Überdeckung
AATSR (EnviSat)	Infrarot	ca. 1 km (Spur)	ESA-Medspiration	Global
AMSR-E (Aqua)	Mikrowelle	ca. 25 km (Spur)	Remote Sensing Systems	Global
AVHRR-LAC (NO-AA 17 & 18)	Infrarot	ca. 1/10 ° (Gitter)	ESA-Medspiration	NO-Atlantik und Mittelmeer
AVHRR-GAC (NO-AA 18)	Infrarot	ca. 9 km (Spur)	JPL PO-DAAC	Global
Lokale Temperatur und Salzgehalt	Schiffe, Bojen	lokal	Global Telecommunications System	Global
SSM/I (DMSP)	Mikrowelle	10 km (stereografisches Gitter)	EUMETSAT OSI-SAF	Global
SEVIRI (MSG1)	Infrarot	0.1 ° (Gitter)	ESA-Medspiration	Atlantik
TMI (TRMM)	Mikrowelle	ca. 25 km (Spur)	Remote Sensing Systems	Tropen

Tabelle 4.4: Übersicht der Sensoren in OSTIA Daten

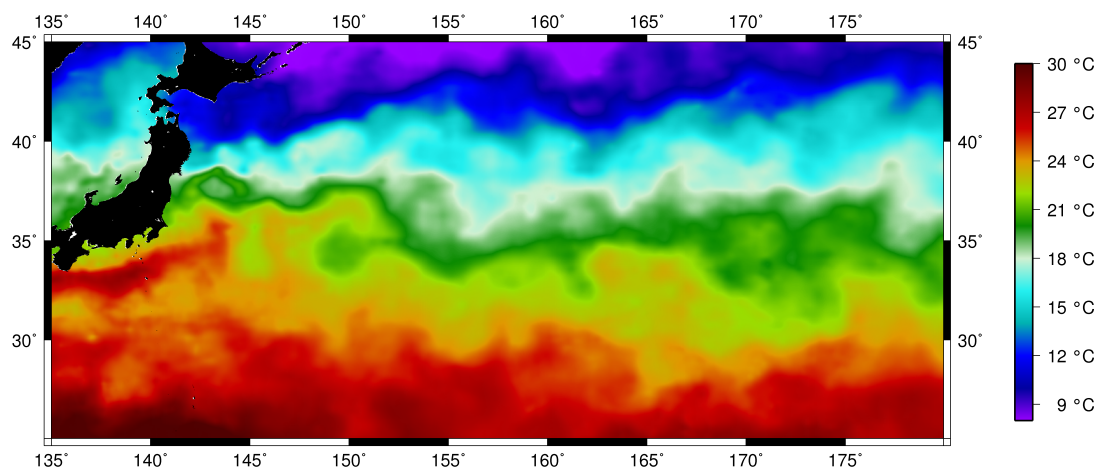


Abbildung 4.4: OSTIA vom 01.06.2006 SST

Fazit:

Auf Grund der Vielzahl an verwendeten Sensoren sind diese Daten in täglicher und globaler Auflösung vorhanden. Zudem sind die Daten kaum interpoliert, so dass die Strukturen der Eddies noch gut zu erkennen sind. Diese Temperaturdaten werden deshalb im Laufe dieser Arbeit zur Segmentierung und Verfolgung von Eddies verwendet.

4.3 Altimeterdaten

In den Altimeter- und Temperaturdaten müssen die betrachteten Gebiete zur Segmentierung der Eddies miteinander kongruent sein, um diese im weiteren Verlauf miteinander kombinieren zu können. Aus diesem Grund müssen die Altimeterdaten den Eigenschaften der zuvor gewählten Meeresoberflächentemperaturdaten entsprechen.

4.3.1 Das Messverfahren

Das Messverfahren in der Altimetrie unterscheidet sich deutlich vom Messvorgang mit dem Synthetic Aperture Radar, das in der Veröffentlichung [IG02] verwendet wird.

Das Radar-Altimeter verwendet zur Höhenmessung ein Ku-Band-Sender, der in Nadirrichtung Mikrowellen abstrahlt und die Laufzeit misst. Der Messbereich entspricht einer kreisförmigen Fläche (Footprint) von ca. 2 - 11 km Durchmesser. Die Berechnung des Mittelwertes der Laufzeiten ergibt die Höhe des Satelliten über der Meeresoberfläche. Wenn man die Höhe des Satelliten kennt, kann damit die Meereshöhe berechnet werden. Dieser Wert wird dem Mittelpunkt des Footprints zugeordnet. Somit gibt es in der Altimetrie nur Messwerte entlang der Bahnspur (Projektion der Satellitenbahn auf die Erdellipse). Da für jede Sekunde ein Mittelwert berechnet wird und ein Satellit in dieser Zeit ca. 7 km entlang der Bahnspur fliegt, gibt es ein Messwert pro Sekunde.

Bei dem Synthetic Aperture Radar wird die Erdoberfläche mit elektromagnetischen Wellen abgetastet. Die Messung liefert im Gegensatz zur Altimetrie eine flächig zweidimensionale Information (z.B. Meeresoberflächentemperaturen). Die Spurbreite kann abhängig vom Satellit ca. 100 - 300 km betragen. Wegen der Spurbreite lassen sich Eddies in diesen Daten ohne jegliche Interpolation erkennen.

4.3.2 Überblick der Missionen

In der Satellitenaltimetrie sind derzeit die Missionen ERS-2, GFO, Jason-1 und Envisat aktiv. Die Mission ERS-2 liefert allerdings seit dem 28.06.2003 keine globalen Daten mehr, da der Bandrekorder ausgefallen ist. Neben diesen gibt es die bereits beendeten Missionen Skylab, GEOS 3, Seasat, Geosat, ERS-1 und Topex/Poseidon. Die folgende Abbildung 4.5 zeigt die Zeiträume der relevanten Missionen seit 1990.

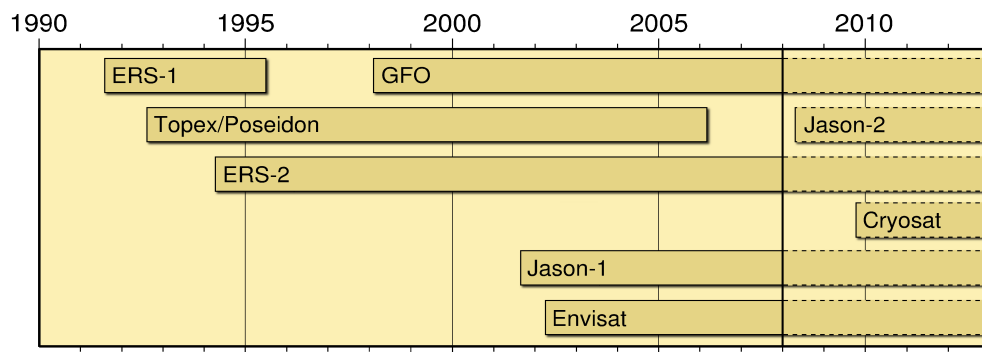


Abbildung 4.5: Übersicht von Altimetermissionen seit 1990

Da die gewählten Meeresoberflächentemperaturdaten für den Zeitraum von April 2006 bis heute vorhanden sind, müssen geeignete Altimeterdaten gefunden werden, die im gleichen Zeitraum verfügbar sind. Dafür kommen nur die Missionen GFO, Jason-1 und Envisat in Frage, die im Folgenden miteinander verglichen werden.

4.3.3 GFO

Der GFO (Geosat Follow-on) ist die Nachfolgemission von Geosat. Seine Aufgabe besteht darin, Dienste im Bereich der Satellitenaltimetrie und Ozeantopographie durchzuführen [GFO1].

An Bord befinden sich vier Instrumente:

- Radar Altimeter mit einer vertikalen Auflösung von ca. 3 cm
- Ein Mikrowellen-Radiometer zur Wasserdampf-Messung
- GPS-Empfänger zur genauen Ortsbestimmung (nicht mehr funktionsfähig)
- Doppler Peilsender zur genauen Ortsbestimmung

Betreiber	US Navy
Start	10.02.1998
Flughöhe	880 km
Wiederholungszyklus	17 Tage
Inklination	108 Grad
Abstand benachbarter Bahnspuren	ca. 165 km

Tabelle 4.5: Eigenschaften von GFO Daten

4.3.4 Jason-1

Jason-1 ist die Nachfolgemission der Topex/Poseidon Mission. Dieser Satellit wurde speziell für die Altimetrie konzipiert und besitzt keine weiteren Aufgaben, wie andere Missionen. Die Ziele sind in erster Linie die Vermessung des Meeresspiegels und die Beobachtung von Meeresströmungen, die Wellenhöhenbestimmung und die Bestimmung von Windgeschwindigkeiten.

Folgende Instrumente sind auf dem Satelliten Jason-1 vorhanden:

- Höhenmessradar Poseidon
- Jason Mikrowellenradiometer (JMR) zur Bestimmung des Wasserdampfes zur Korrektur der Höhenradardaten von Poseidon
- Doppler Orbitography and Radiopositioning integrated by Satellite (DORIS): Positionsbestimmung und Korrektur von Poseidon
- GPS-Empfänger zur Positionsbestimmung (Blackjack)
- Bodengestützte Positionsbestimmung mit Laser-Retroreflektor

Betreiber	CNES/NASA
Start	07.12.2001
Flughöhe	1336 km
Altimeter	Poseidon-2
Wiederholungszyklus	9,9156 Tage
Inklination	66,039 Grad
Messfehler	Range: 2 cm / Orbit 2-3 cm
Abstand benachbarter Bahnspuren	ca. 310 km

Tabelle 4.6: *Eigenschaften von Jason-1 Daten*

4.3.5 Envisat

Envisat ist ein Umweltsatellit mit 10 wissenschaftlichen Instrumenten an Bord. Die Aufgaben des Satelliten sind vor allem die Überwachung des Klimas, der Ozeane, der Landfläche bzw. des Ökosystems der Erde. Eines dieser Instrumente ist ein Altimeter. Envisat ist der Nachfolger der Missionen ERS-1 und ERS-2.

Betreiber	ESA
Start	01.03.2002
Flughöhe	800 km
Altimeter	RA-2 (Radar Altimeter 2)
Wiederholungszyklus	35 Tage
Inklination	98 Grad
Abstand benachbarter Bahnspuren	ca. 80 km

Tabelle 4.7: *Eigenschaften von Envisat Daten*

4.3.6 Fazit

Die Wahl der Altimeterdaten, die im Laufe dieser Arbeit verwendet werden, fiel aus den folgenden Gründen auf den Satelliten Jason-1. Das Hauptargument für Jason-1 ist sein kurzer Wiederholungszyklus von 10 Tagen. Im Vergleich zu Envisat ist Jason-1 speziell für diese eine Aufgabe konzipiert. Zudem treten bei Messungen von Envisat verstärkt Anomalien auf, die aufwändig korrigiert werden müssen. Gegen die Verwendung der Daten von GFO spricht in erster Linie das Problem der Positionsbestimmung, da zu Beginn der Mission der GPS-Empfänger ausfiel. Aus diesem Grund kann GFO nur noch mit Hilfe eines Laser Reflektors die Positionsbestimmung durchführen, wohingegen Jason-1 drei Verfahren verwenden kann. Ein weiteres Problem trat im Laufe der GFO Mission auf. Auf Grund von leeren Akkus, können nur noch Daten erfasst werden, wenn sich der Satellit auf der sonnenzugewandten Seite befindet. Aus diesen Gründen fiel die Wahl auf Jason-1.

4.3.7 Problematik

Die Problematik bei der Verwendung von Altimeterdaten zur Segmentierung und Verfolgung von Eddies liegt in den verschiedenen Eigenschaften der Daten. Zum einen besitzen die Satelliten teils sehr lange Umlaufzeiten. Zum anderen sind die Abstände zwischen den Bahnspuren relativ groß, was zu einer schlechten räumlichen Auflösung führt.

4.3.8 Interpolation

Für die Segmentierung müssen Altimeterdaten im Gitterformat vorliegen. Um anschließend die gefundenen Eddies zu verfolgen, ist zudem eine möglichst hohe zeitliche Auflösung der Daten nötig; idealerweise eine tägliche Auflösung.

Die Ausgangsdaten zur Interpolation stehen im Level 2 und nur entlang der Spur zur Verfügung. Die folgende Abbildung 4.6 zeigt für den Altimetersatelliten Jason-1 die Verteilung der Bahnspuren im Gebiet des Kuroshio.

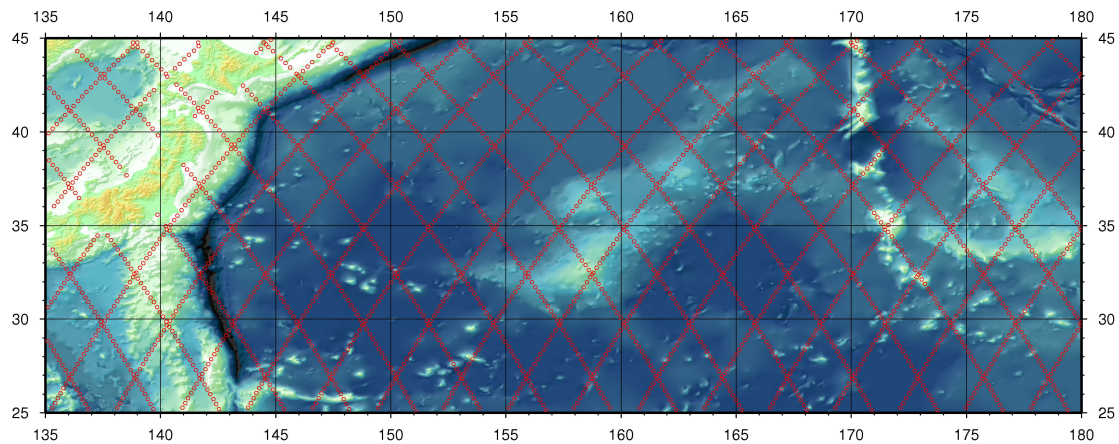


Abbildung 4.6: *Bahnspuren von Jason-1*

Die Berechnung der Daten erfolgt in zwei Interpolationsschritten. Im ersten Schritt werden die Werte auf der Bahnspur über die Zeit interpoliert. Das bedeutet, dass ein Satellit mit einer Umlaufzeit von 10 Tagen zum Zeitpunkt t_0 , t_{10} , t_{20} usw. auf einer Bahnspur über dem betrachteten Gebiet fliegt. Ziel ist es, im ersten Interpolationsschritt für jeden Zeitpunkt t_n auf der Bahnspur einen Wert mittels einer gewichteten Interpolation über die Zeit zu ermitteln.

Im zweiten Interpolationsschritt wird nicht über die Zeit, sondern über den Raum interpoliert, um für jeden Zeitpunkt t_n ein komplettes Gitter an Daten für die Segmentierung zu erhalten.

Kapitel 5

Segmentierung von Eddies

Im Kapitel "Segmentierung von Eddies" werden verschiedene Verfahren zur Verbesserung der Ausgangsdaten beschrieben. Dazu gehören die Principle Component Analyse oder die Trendberechnung, um bessere Ergebnisse bei der Segmentierung zu erzielen. Diese Verfahren werden in Kapitel 5.3 beschrieben. Neben den Verfahren zur Datenaufbereitung werden folgenden Methoden zur Segmentierung von Eddies anhand von Meeresoberflächentemperatur- und Altimeterdaten angewandt.

- "Chain"-Algorithmus
- Watershed Transformation
- Flächenapproximationsverfahren

Die Methoden zur Segmentierung werden im Abschnitt 5.4 erläutert.

5.1 Ziel der Segmentierung

Das Ziel der Segmentierung ist es, die Eddies innerhalb der Altimeter- und Meeresflächentemperaturdaten möglichst genau zu bestimmen. Dabei sollen segmentierte Eddies mit Parametern wie Position, Wasserstand über einem Mittelwert und durchschnittlichem Ausdehnungsradius erfasst werden, um anhand dieser Ergebnisse im weiteren Schritt das Verfolgen der Eddies durchführen zu können.

5.2 Merkmale von Eddies

Wie in der Veröffentlichung [IG02] bereits beschrieben wurde, gibt es viele verschiedene Arten von Eddies, die sich in den drei Eigenschaften Form, Temperatur und Größe unterscheiden. Diese Erkenntnisse konnten anhand von SAR-Aufnahmen belegt werden.

Diese Übersicht über die Arten von Eddies zeigt, wie viele unterschiedliche Arten von Eddies existieren und wie sehr sie sich in ihren Merkmalen unterscheiden. In Feldern mit ? sind keine Informationen vorhanden. Die Richtung der Rotation von Eddies ist entweder zyklonisch (C), antizyklonisch (A) oder

Art	Horizontale. Ausdehnung (km)	Vertikale Ausdehnung (km)	Lebensdauer (Tage)	Rotations- richtung
Spiralförmige Eddies auf dem offenen Ozean	1 - 30	bis 300	?	<u>C</u> ,A
Eddies in der Nähe von Inseln (stehende Eddies, Wirbelstraßen)	0.1 - 5	1 - ?	< 0.5 - ?	C,A
Eddies durch Inhomogenitäten an Küsten	1 - 100	10 - ?	0.5 - ?	C,A,dipole
Ketten von scherenden Eddies	0.02 - 100	10 - 100	3 ?	<u>C</u> ,A
Eddies durch Zusammenfluss von Strömungen	0.1 - 300	?	20 ?	C,A
Nebenwirbel	25 - 60	< 100	< 10	<u>C</u> ,A
Wirbel mit warmen/kalten Kern	90 - 300	300 - 1000	30 - 400	C,A
Verbundene Eddies	20 - 100	20 - 100	1 - 30	<u>C</u> ,A
Pilzförmige Strömungen	1 - 200	10 - 100	1 - 30	dipole

Tabelle 5.1: Klassifizierung von Eddies [IG02]

in beide Richtungen (dipole). Die unterstrichene Rotationsrichtung kommt dabei am häufigsten vor. Einige dieser Eddies lassen sich auf Grund ihrer Größe kaum in den im Laufe dieser Arbeit verwendeten Altimeter- und Meeresoberflächentemperaturdaten erkennen.

5.3 Datenvorverarbeitung

Im ersten Schritt der Segmentierung von Eddies müssen die Daten auf verschiedenste Weise aufbereitet werden, um Eddies überhaupt sichtbar zu machen oder sie hervorzuheben. Deshalb werden die folgenden zwei Verfahren vorgestellt, die verbesserte Ausgangsdaten für die Segmentierung erzeugen.

- Principle Component Analysis
- Trendberechnung

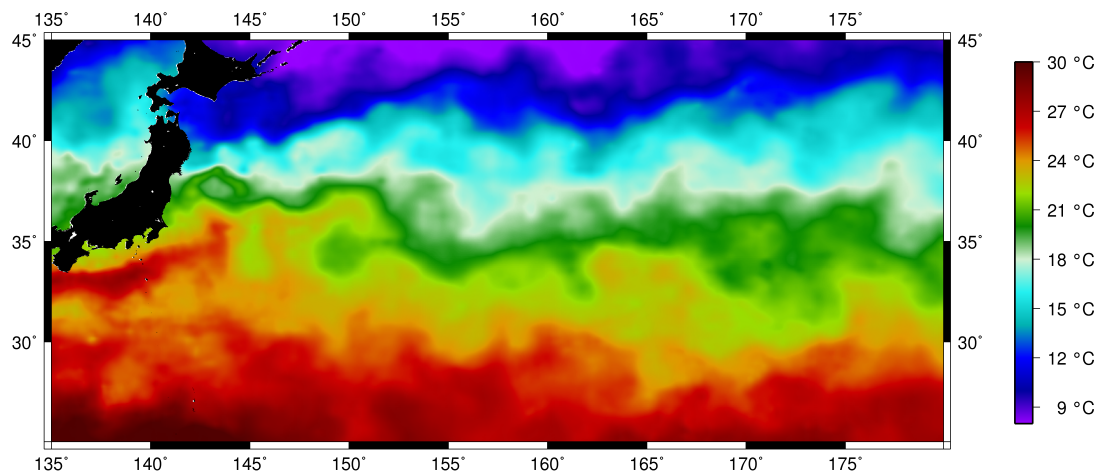


Abbildung 5.1: Originaldaten (SST) vom 01.06.2006 (Kuroshio-Strom)

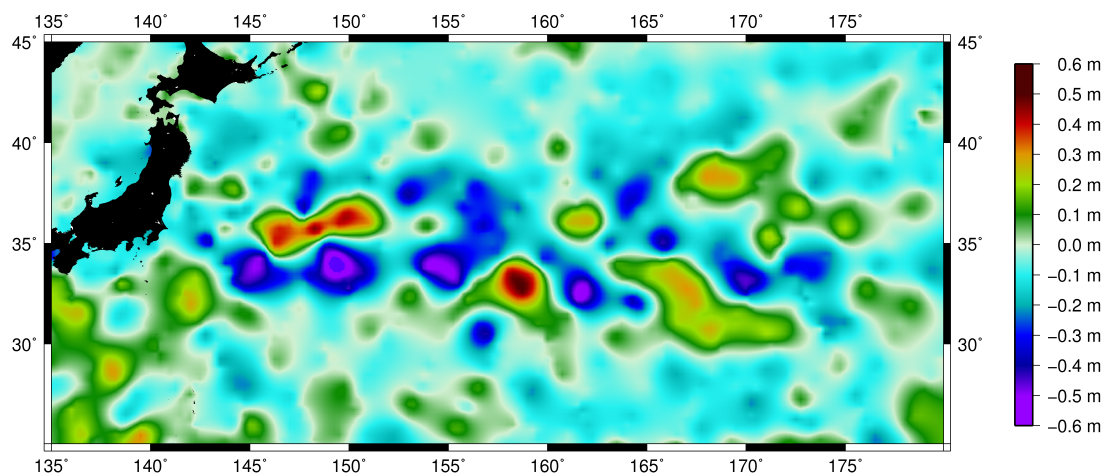


Abbildung 5.2: Originaldaten (SLA) vom 31.05.2006 (Kuroshio-Strom)

5.3.1 Principal Component Analysis (PCA)

Die PCA ist ein Verfahren der multivariaten Statistik, um Muster in großen Datensätzen zu finden. Dabei werden Datensätze nicht nur in der räumlichen, sondern auch in der zeitlichen Dimension betrachtet. Mit Hilfe der PCA können die meist großen Datensätze vereinfacht und besser veranschaulicht werden, indem die Mehrzahl an statistischen Variablen durch eine geringe Zahl von Linearkombinationen (Principle Components) ausgedrückt wird.

Das Ziel bei der Anwendung der PCA auf die Altimeter- bzw. Meeresoberflächentemperaturdaten liegt darin, die dominanten Strukturen der Variabilität zu erkennen, ohne dabei vorzugeben, welche Perioden vorliegen. Oft ergibt sich dabei, dass bestimmte Perioden (z.B. jährlich) sehr stark ausgeprägt sind, die bei einem zweiten Durchlauf der PCA mit der harmonischen Analyse herausgerechnet werden können. Dieses Verfahren ist in dieser Arbeit vor allem bei den Temperaturdaten sinnvoll, da der globale Temperaturbereich zwischen 0°C und 35°C liegt. Da die Variabilität auf Grund der Jahreszeiten relativ hoch ist, empfiehlt es sich, die saisonalen Schwingungen mit Hilfe der harmonischen Analyse herauszufiltern. Die Temperaturunterschiede können dabei örtlich zwischen Sommer und Winter um bis zu 15°C schwanken. Das aus der PCA resultierende Ergebnis ist um die dominanten Schwingungen bereinigt und besteht somit aus den Residuen, die zur späteren Segmentierung verwendet werden. Der Temperaturunterschied beträgt nach der Durchführung zwischen Sommer und Winter nur noch einige Grad. Die PCA ist in dieser Arbeit vor allem bei den Temperaturdaten sinnvoll, da dort die Variabilität im Vergleich zu den Altimeterdaten sehr hoch ist.

Algorithmus

Der Algorithmus zur Durchführung der Principle Component Analysis wird im Folgenden anschaulich beschrieben. [B01]

Aufstellen der Residuenmatrix

Als Eingangsdaten ist eine multivariante Zeitreihe gegeben, die p Orte zu q unterschiedlichen Zeitpunkten betrachtet.

$$x_{ik} \quad i = 1, \dots, p, k = 1, \dots, q \quad (5.1)$$

Die Berechnung der Residuenmatrix R erfolgt durch Subtraktion des zeitlichen Mittelwertes über alle q für jeden betrachteten Ort i .

$$r_{ik} = x_{ik} - \frac{1}{q} \sum_k x_{ik} \quad (5.2)$$

Die Matrix R besteht aus den Residuen und besitzt die Dimension $p \times q$. Dabei befinden sich in einer Zeile alle Residuen für einen Zeitpunkt eines betrachteten Punktes. In einer Spalte sind dagegen die Residuen aller Orte für einen Zeitpunkt enthalten.

Bei der Erzeugung der Residuenmatrix ist R zu beachten, dass die Orte p einen zusammenhängenden Raum aufspannen. Innerhalb des betrachteten Gebietes und der Zeitreihe dürfen Lücken auftauchen. Allerdings müssen diese Lücken konsequent vorliegen. Das heißt, sind für einen Ort p in der kompletten Zeitreihe nicht alle Werte vorhanden, so muss entweder dieser Ort oder die Zeitpunkte ohne Wert komplett entfernt werden.

In diesem Anwendungsfall wird ein zweidimensionales Gebiet mit der Größe von $10 \times 5^{\circ}$ und einer räumlichen Auflösung von 0.05° über 365 Tage betrachtet. Daraus ergibt sich eine Residuenmatrix R mit der Größe von 20000×365 .

Durchführung der PCA

Bei der Durchführung der PCA werden anhand der Residuenmatrix R die Basisvektoren (Eigenvektoren), die Hauptkomponenten und die Eigenwerte berechnet. Die Eigenwertzerlegung erfolgt unter Verwendung der Singulärwertzerlegung der Residuenmatrix R .

$$R = U \cdot S \cdot V \quad (5.3)$$

Durch die Quadratur der Singulärwerte, die sich auf der Diagonalen von S befinden, ergeben sich die Eigenwerte. Die Matrix U beinhaltet dagegen die Eigenvektoren bzw. Basisvektoren. Für die Berechnung der Hauptkomponenten ist der im Folgenden beschriebene Schritt der Analyse nötig.

$$A = U' \cdot R \quad (\text{Analyse}) \quad (5.4)$$

Die Hauptkomponenten werden durch Multiplikation der Residuenmatrix R mit der Basisvektorenmatrix U berechnet.

Nach der Durchführung der PCA stehen q (Anzahl Zeitpunkte) Eigenwerte e_q , Eigenvektoren u_q und Hauptkomponenten a_q zur Verfügung. Ein Datensatz dieser drei Komponenten nennt man Mode. Die Eigenwerte e_q werden nach ihrer Größe sortiert, da große Eigenwerte einen großen Anteil an der gesamten Varianz besitzen. Dagegen besitzen kleine Eigenwerte nur einen geringen Anteil. Die Eigenvektoren identifizieren räumliche Strukturen der Zeitreihe, wobei die mit den größten Eigenwerten am signifikantesten sind. Die Hauptkomponenten beschreiben die zeitliche Veränderung der räumlichen Strukturen.

Die Rekonstruktion der Residuenmatrix R ist mit der Synthese möglich. Dabei wird die Matrix mit den Basisvektoren U mit der Hauptkomponentenmatrix A multipliziert.

$$R = U \cdot A' \quad (\text{Synthese}) \quad (5.5)$$

Durch Anwendung der Synthese mit einem Eigenvektor u und einer Hauptkomponente a lässt sich der Anteil eines Eigenwertes am Residuum darstellen. Durch die Visualisierung der Eigenvektoren und Hauptkomponenten lassen sich Schwingungen in den Daten darstellen. Dieses Verfahren kann neben diesem Beispiel auch in der Kompression von Daten eingesetzt werden, indem man Eigenvektoren und Hauptkomponenten von kleinen Eigenwerten in der Synthese vernachlässigt.

Harmonische Analyse

Die Durchführung der harmonischen Analyse ist erst möglich, wenn man die PCA einmal durchlaufen hat und bekannt ist, welche Schwingungen in der Residuenmatrix R vorhanden sind. In Temperaturdaten sind in der Regel jährliche Schwingungen mit einer Schwingdauer T von 365.25 Tagen vorhanden. Diese Schwingung wird vor der PCA mit der harmonischen Analyse aus der Residuenmatrix R folgendermaßen herausgerechnet, so dass die jährliche Schwingung nicht mehr enthalten ist.

Im ersten Schritt wird eine Koeffizientenmatrix C aufgestellt, die die Sinus- und Cosinusanteile jeder abzuziehenden Schwingung zu jedem Zeitpunkt enthält. Möchte man die jährliche T_0 und halbjährliche T_1 Schwingung von einer Zeitreihe von 400 Tagen herausrechnen, so ergibt sich folgende Koeffizientenmatrix C .

$$C = \begin{pmatrix} \cos(\frac{2\pi}{T_0} \cdot t_0) & \sin(\frac{2\pi}{T_0} \cdot t_0) & \cos(\frac{2\pi}{T_1} \cdot t_0) & \sin(\frac{2\pi}{T_1} \cdot t_0) \\ \cos(\frac{2\pi}{T_0} \cdot t_1) & \sin(\frac{2\pi}{T_0} \cdot t_1) & \cos(\frac{2\pi}{T_1} \cdot t_1) & \sin(\frac{2\pi}{T_1} \cdot t_1) \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \cos(\frac{2\pi}{T_0} \cdot t_{400}) & \sin(\frac{2\pi}{T_0} \cdot t_{400}) & \cos(\frac{2\pi}{T_1} \cdot t_{400}) & \sin(\frac{2\pi}{T_1} \cdot t_{400}) \end{pmatrix} \quad (5.6)$$

Nach Erzeugung der Koeffizientenmatrix C muss eine Ausgleichung vorgenommen werden, um eine Residuenmatrix R_T mit den Residuen der beiden Schwingungen zu erzeugen. Ist die Inverse der Normalgleichung erzeugt worden,

$$Q = \text{inv}(C' \cdot C) \quad (5.7)$$

können die Unbekannten und die Residuenmatrix R_T berechnet werden.

$$X = Q \cdot (C' \cdot R) \quad (5.8)$$

$$R_T = X' \cdot C \quad (5.9)$$

Subtrahiert man R_T von R , erhält man eine neue Residuenmatrix, die um die jährliche und halbjährliche Schwingung bereinigt ist. Dieses Ergebnis kann zur erneuten PCA verwendet werden, um weitere Schwingungen zu finden, die vorher noch nicht erkennbar waren.

Ergebnisse

Im Folgenden werden die Ergebnisse der PCA sowohl mit als auch ohne harmonischer Analyse dargestellt. Das Beispiel analysiert dabei Meeresoberflächentemperaturdaten in einem Gebiet der Größe von $10 \times 5^\circ$ über einen Zeitraum von 23 Monaten. Die Abbildung 5.3 zeigt im Mode 1 die dominanteste Schwingung ohne harmonische Analyse. Sie besitzt einen Anteil von 93,8% an der Gesamtschwingung. Die jährliche Schwingung ist dabei deutlich zu erkennen.

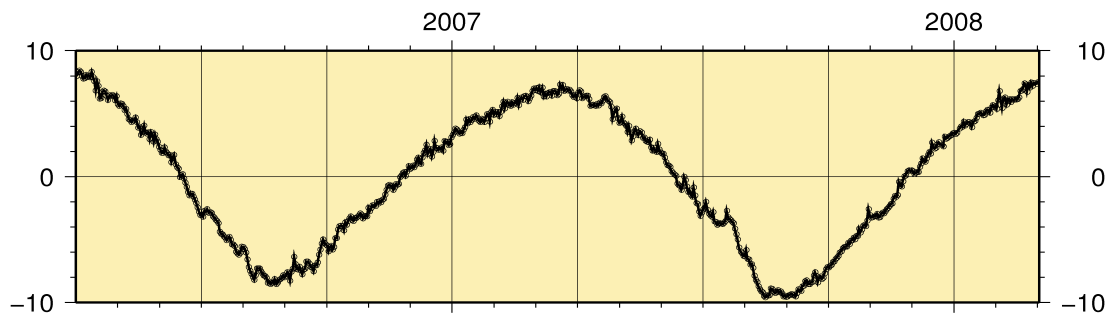


Abbildung 5.3: Hauptkomponenten von Mode 1 (93,8%) ohne harm. Analyse

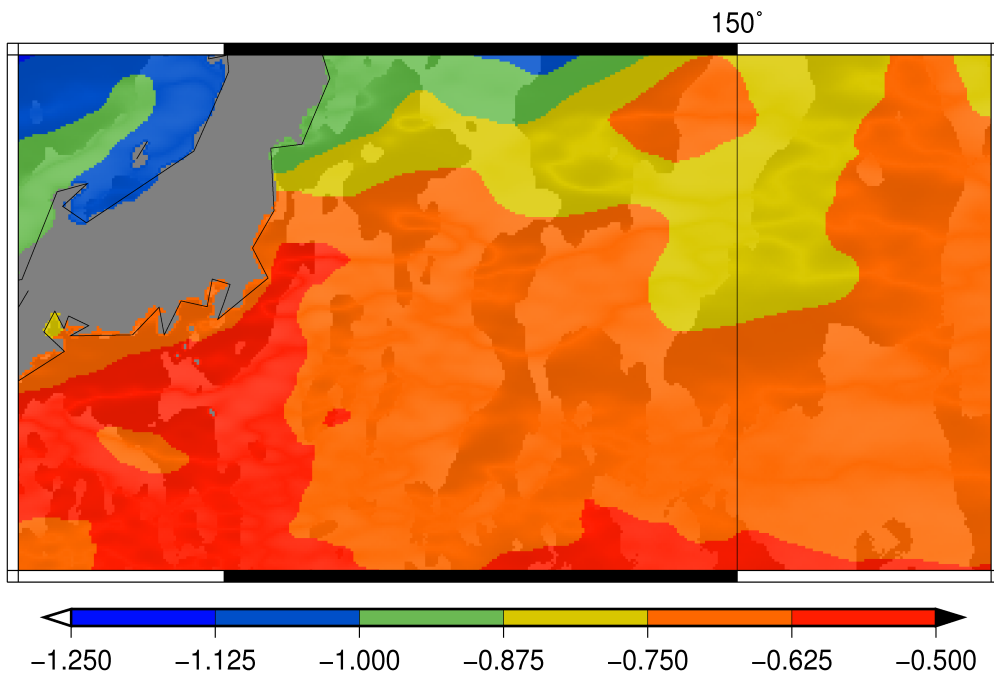


Abbildung 5.4: Eigenvektoren von Mode 1 ohne harm. Analyse

Die folgende Abbildung 5.5 zeigt den Mode 2 und somit die zweitstärkste Schwingung. Sie besitzt im Vergleich zum Mode 1 einen Anteil von nur 1,2%. Es zeigt sich dabei, dass die jährliche Schwingung in Mode 1 sehr dominant ist.

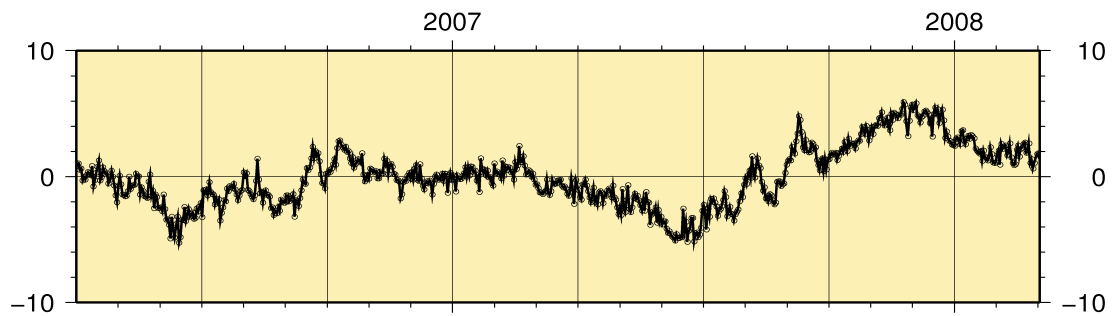


Abbildung 5.5: Hauptkomponenten von Mode 2 (1,2%) ohne harm. Analyse

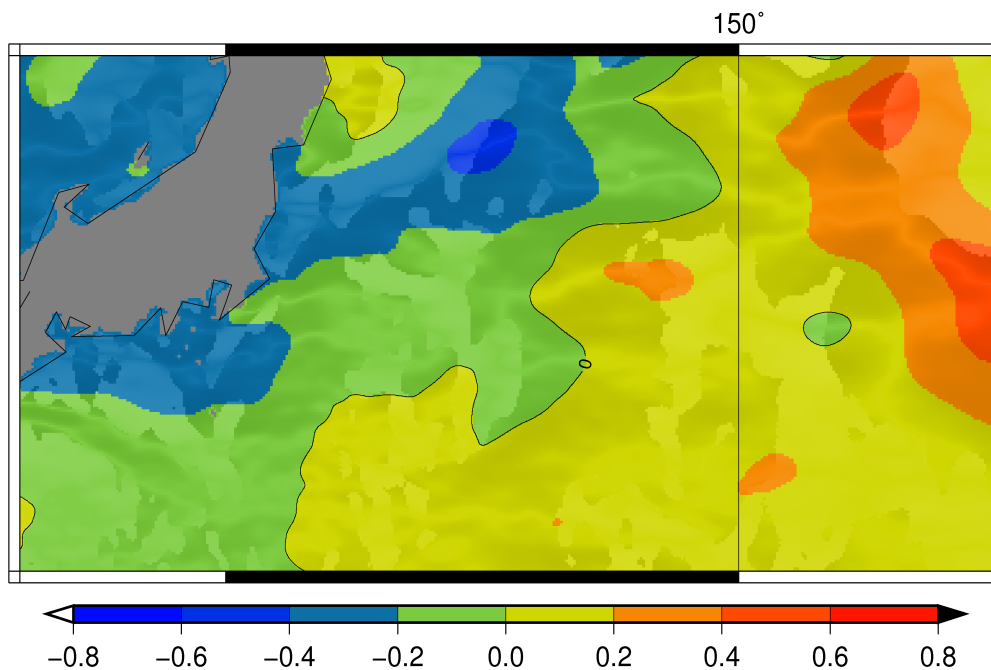


Abbildung 5.6: Eigenvektoren von Mode 2 ohne harm. Analyse

Wird die PCA erneut durchgeführt und diesmal die harmonische Analyse verwendet, ergeben sich die folgenden Ergebnisse für Mode 1 und Mode 2. Bei der harmonischen Analyse wurde die jährliche und halbjährliche Schwingung herausgerechnet. Das Ergebnis zeigt für Mode 1, dass der dominante Anteil bei 32,0% vom Gesamtsignal liegt. Für Mode 2 ergibt sich ein Anteil von 11,1%. In den Ergebnissen mit der harmonischen Analyse lassen sich keine weiteren Schwingungen erkennen.

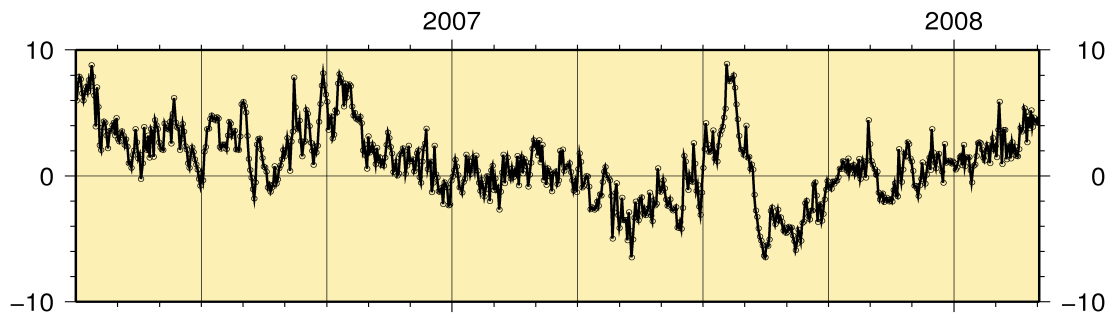


Abbildung 5.7: Hauptkomponenten von Mode 1 (32,0%) mit harm. Analyse

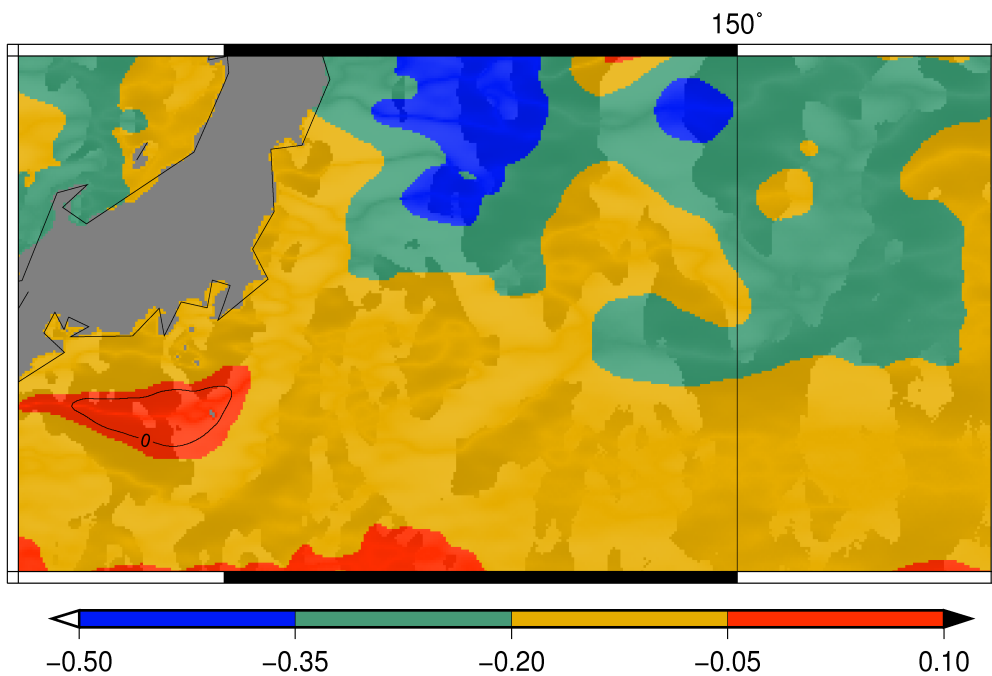


Abbildung 5.8: Eigenvektoren von Mode 1 mit harm. Analyse

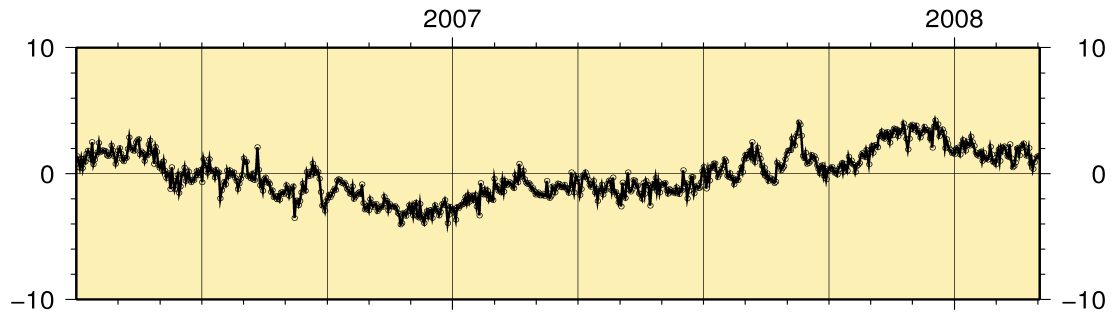


Abbildung 5.9: Hauptkomponenten von Mode 2 (11,1%) mit harm. Analyse

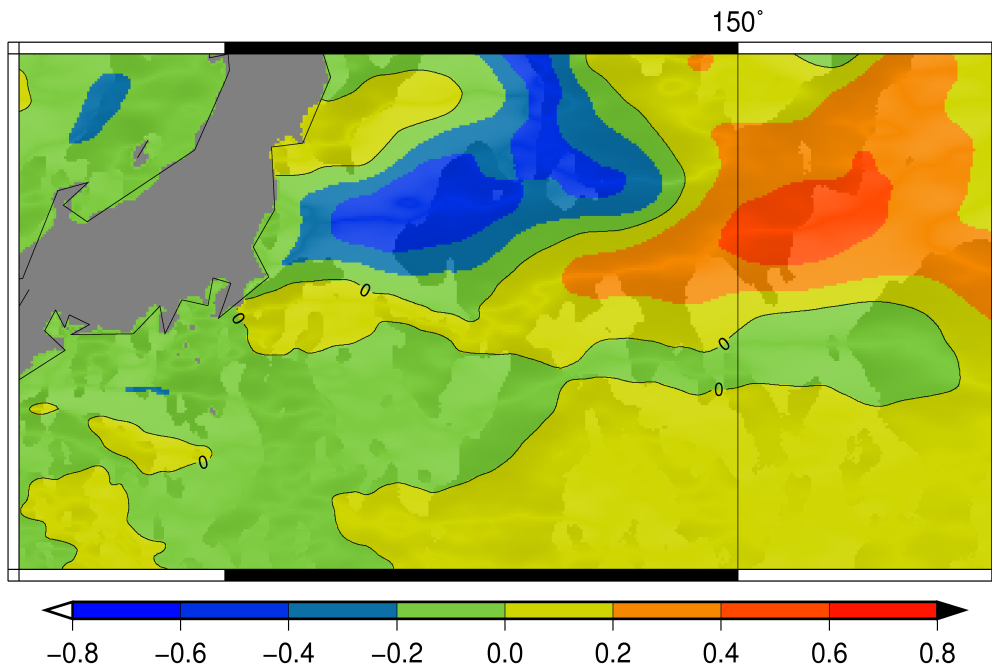


Abbildung 5.10: Eigenvektoren von Mode 2 mit harm. Analyse

Die folgende Abbildung 5.11 zeigt eine Gegenüberstellung von Ergebnissen der PCA mit und ohne harmonischer Analyse. Dabei wurden vier Datensätze in einem Abstand von 3 Monaten miteinander verglichen. Das Ergebnis nach der PCA zeigt einen deutlichen Unterschied bezüglich der jährlichen Schwingung. Anhand der vier linken Abbildungen lassen sich die Temperaturschwankungen auf Grund der Jahreszeiten deutlich erkennen, wohingegen auf der rechten Seite kaum noch jährliche Schwingungen zu erkennen sind, da diese bei der harmonischen Analyse herausgerechnet wurden.

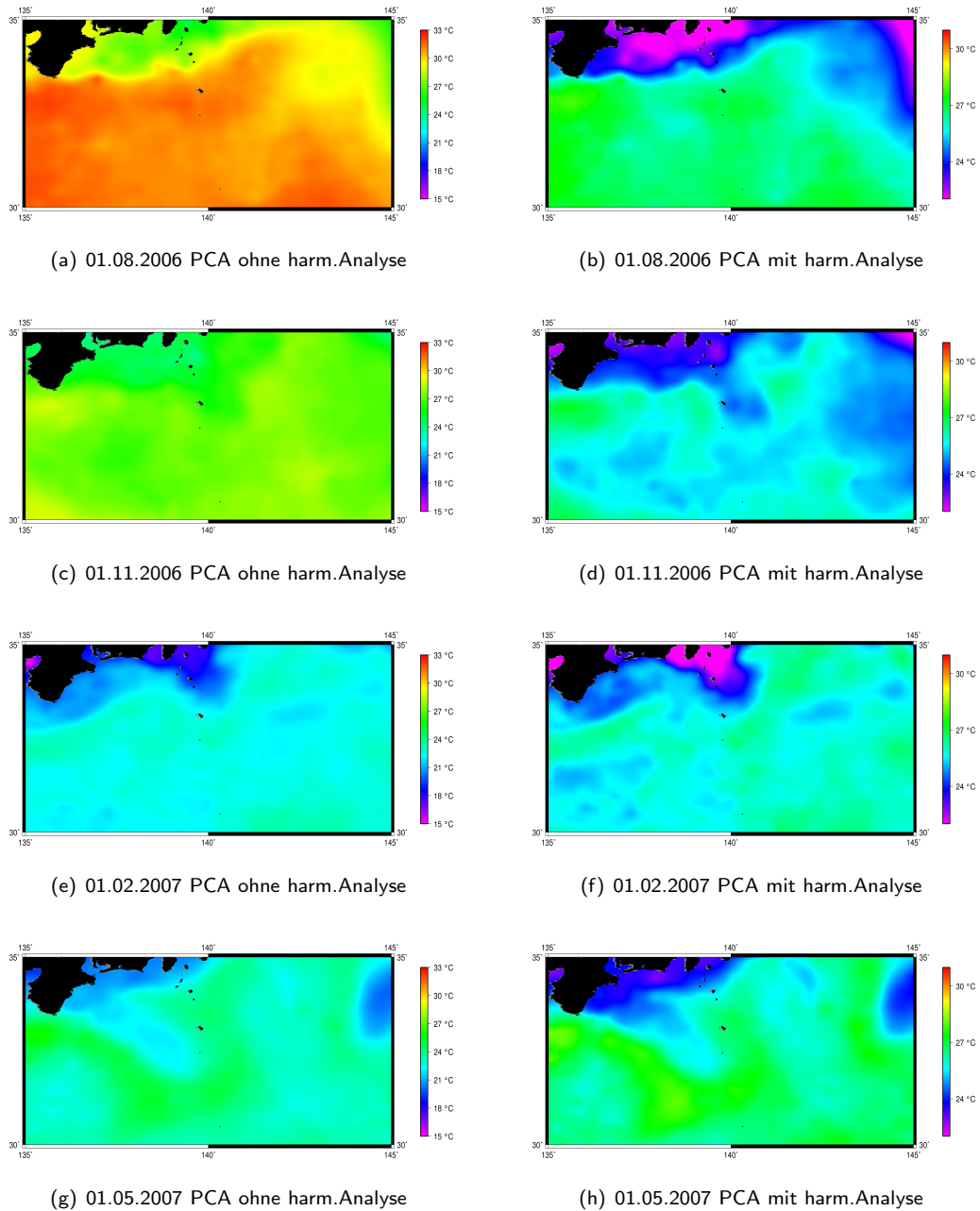


Abbildung 5.11: Vergleich der Ergebnisse der PCA mit und ohne harmonischer Analyse

5.3.2 Trendberechnung

Ein Eddy ist anhand der Temperaturdaten nur als Hügel bzw. Tal zu erkennen, wobei der Temperaturunterschied zwischen dem Rand und dem Extremum eines Eddies zwischen 0 °C und 4 °C liegt. Da die globalen Meeresoberflächentemperaturen auf der Erde zwischen 0 °C an den Polen und 35 °C am Äquator liegen, sind Eddies mit geringen Temperaturunterschieden kaum zu erkennen, wie auf Abbildung 5.12 zu sehen ist. Das Verfahren der Trendreduzierung zeigt deshalb bei Temperaturdaten einen Erfolg. Bei Altimeterdaten spielt der Trend kaum eine Rolle, weil sich die Höhen der Eddies relativ gut erkennen lassen.

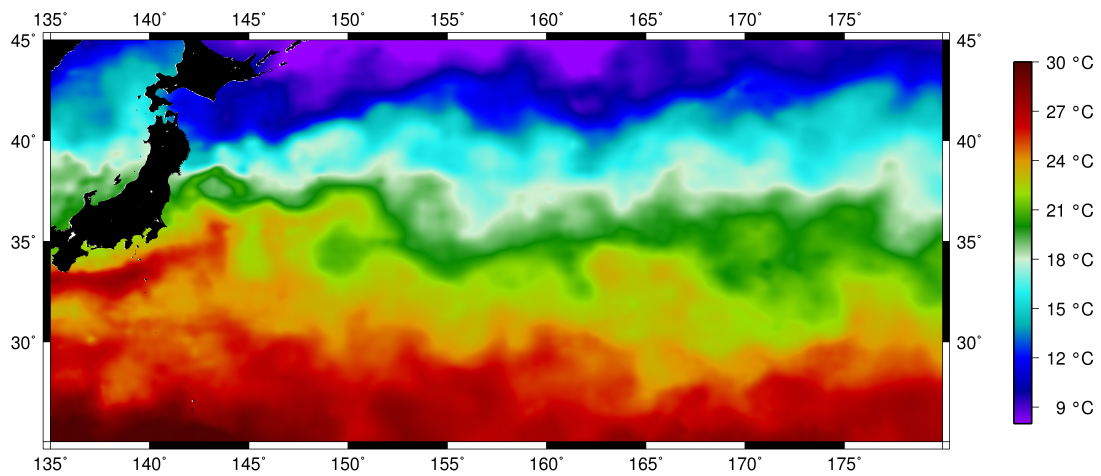


Abbildung 5.12: Originaldaten (SST) vom 01.06.2006 zeigt den Kuroshiostrom

Um die Eddies deutlicher zu erkennen, wird von den Ausgangsdaten ein Trend abgezogen. Der Trend wird mit der Methode der kleinsten Quadrate berechnet. Für die Berechnung des Trends sind als Eingangsdaten die Temperaturdaten in der Matrix gegeben. Für die Erstellung des Gleichungssystem wird auf Grund der Größe der Eingangsmatrix nur jeder fünfte Punkt verwendet. Die Trendfunktion verwendet dabei den Ansatz mit $(1xyx \cdot y)$ zur Berechnung.

$$A = \begin{pmatrix} 1 & x & y & x \cdot y \\ \dots & & & \\ \dots & & & \end{pmatrix} \quad (5.10)$$

$$t = \begin{pmatrix} S(x, y) \\ \dots \\ \dots \end{pmatrix} \quad (5.11)$$

Bei diesem Ansatz entspricht x der Spaltennummer, y der Zeilennummer und $S(x, y)$ dem Wert der Matrix mit den Eingangsdaten im Punkt (x, y) .

Mit der Formel

$$c = (A^T \cdot A)^{-1} \cdot A^T \cdot t \quad (5.12)$$

lassen sich die vier notwendigen Koeffizienten berechnen, um die quadratische Gleichung aufzustellen.

$$T(x, y) = c_0 + c_1 \cdot x + c_2 \cdot y + c_3 \cdot x \cdot y \quad (5.13)$$

Berechnet man für jeden Punkt der Ausgangsdaten den Trendwert, so erhält man als Ergebnis die folgende Abbildung 5.13 des Trends.

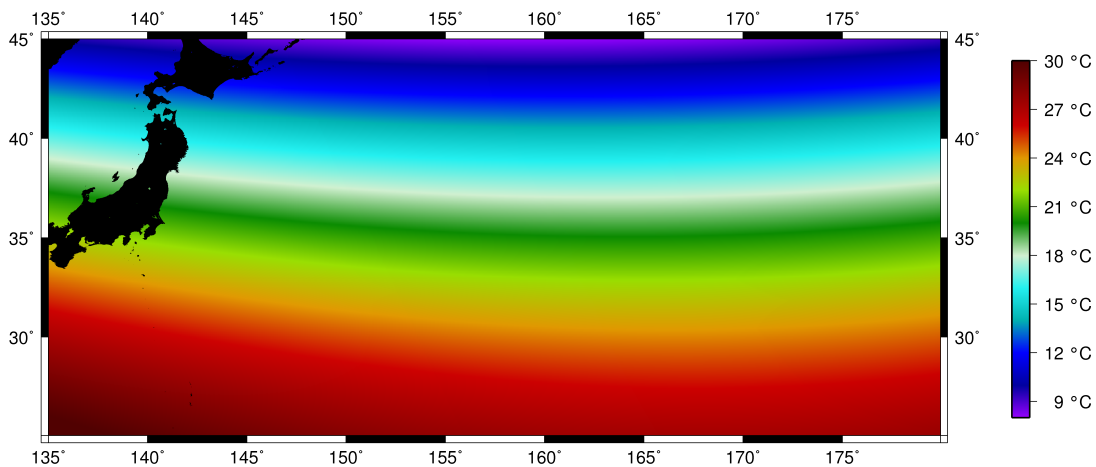


Abbildung 5.13: Darstellung des nach Methode der kleinsten Quadrate berechneten Trends

Subtrahiert man die berechnete Trendmatrix von der Eingangsmatrix, so erhält man die folgende Abbildung 5.14, die aus den Residuen besteht. Die Eddies als Maxima und Minima sind jetzt deutlich sichtbar und können jetzt anhand dieser Darstellung einfacher segmentiert werden.

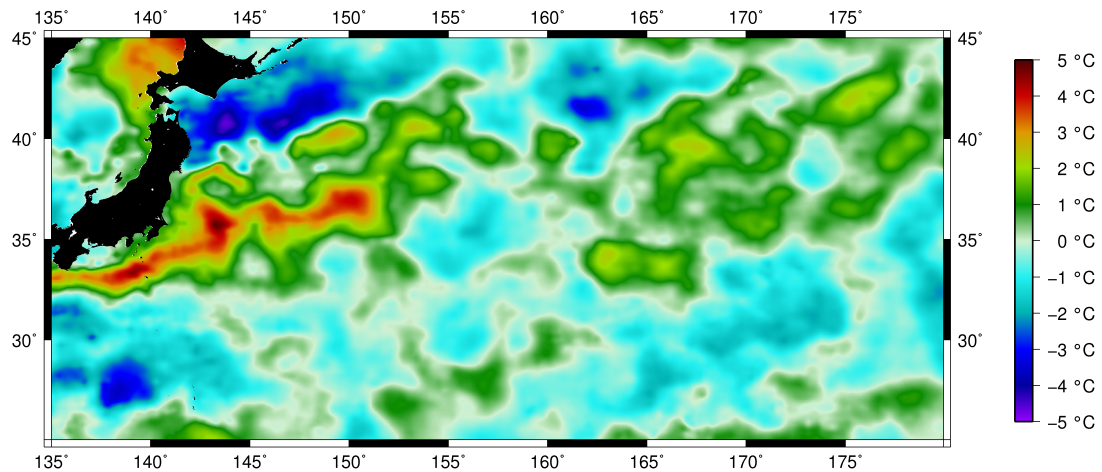


Abbildung 5.14: Darstellung nach Subtraktion des Trends vom 01.06.2006

5.4 Segmentierung

Im Punkt "Segmentierung" werden drei Algorithmen zur Segmentierung von Eddies beschrieben und die Vor- und Nachteile der einzelnen Verfahren erläutert.

5.4.1 Chain-Algorithmus

Format der Eingangsdaten

Die Eingangsdaten für die Segmentierung haben zu diesem Zeitpunkt die Vorverarbeitungsphase hinter sich, nachdem die PCA und die Trendberechnung durchgeführt wurden.

Schritt 1: Quantisierung der Eingangsdaten

Im ersten Schritt steht die Konvertierung der Eingangsdaten bevor, um in den folgenden Schritten die Höhenlinien in den Altimeterdaten und die isothermen Linien in den Meeresoberflächentemperaturen extrahieren zu können.

Die aus der Vorverarbeitungsphase resultierenden Eingangsdaten werden zunächst in diskrete Werte quantisiert. Es folgen einige verwendete Quantisierungsintervalle.

- 1.0 °C bzw. 1.0 m
- 0.5 °C bzw. 0.5 m
- 0.2 °C bzw. 0.2 m
- 0.1 °C bzw. 0.1 m
- 0.05 °C bzw. 0.05 m

Die ideale Intervallgröße ist entscheidend von den Eingangsdaten abhängig. Sind in einem kleinen Bereich der Eingangsdaten hohe Temperatur- oder Höhenunterschiede vorhanden, bietet es sich an, ein größeres Intervall zu wählen.

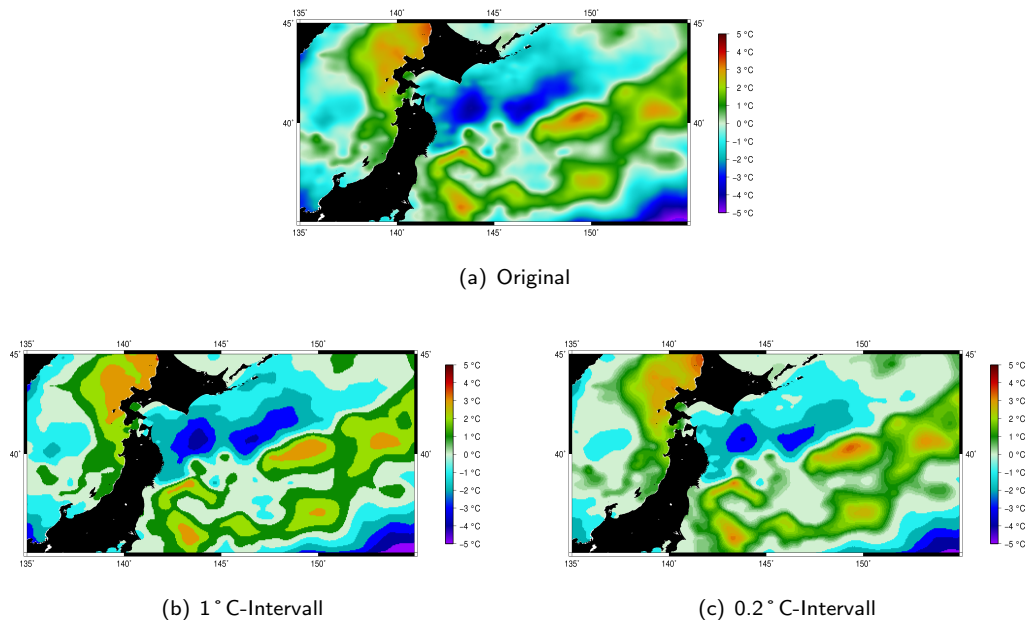


Abbildung 5.15: *Quantisierung mit 1 °C und 0.2 °C*

Die Abbildung 5.15 zeigt die Quantisierung von einem Ausgangsdatensatz mittels 1 °C und 0.2 °C Intervall.

Schritt 2: Extraktion von Isolinien

Die Extraktion der Isolinien basiert auf den quantisierten Eingangsdaten. Diese Eingangsdaten werden zunächst um den Faktor 3 vergrößert, um im folgenden Schritt ausschließen zu können, dass Isolinien direkt nebeneinander liegen oder sich in irgendeiner Weise kreuzen.

Die vergrößerten Eingangsdaten werden mit verschiedenen Mustern gefiltert, wobei eine Matrix mit den Dimensionen der Eingangsdaten entsteht. Vereinfacht ausgedrückt, wird bei diesen Filtern jeder Punkt mit jedem in seiner 8er Nachbarschaft verglichen, ob einer einen kleineren Wert besitzt, als der betrachtete Punkt. Ist dies der Fall, so bekommt der aktuelle Punkt in der Ergebnismatrix den Wert 1, ansonsten den Wert 0. Entspricht dieser Wert der 1, so gehört der Punkt zu einer Isolinie. Ist der Wert allerdings 0, so gehört dieser Punkt zu keiner Isolinie, da kein Nachbarpixel einen kleineren Wert besitzt als der betrachtete Punkt selbst. Die folgende Abbildung 5.16 zeigt für einen Ausschnitt, wie das Ergebnis der Extraktion der Isolinien aussehen könnte.

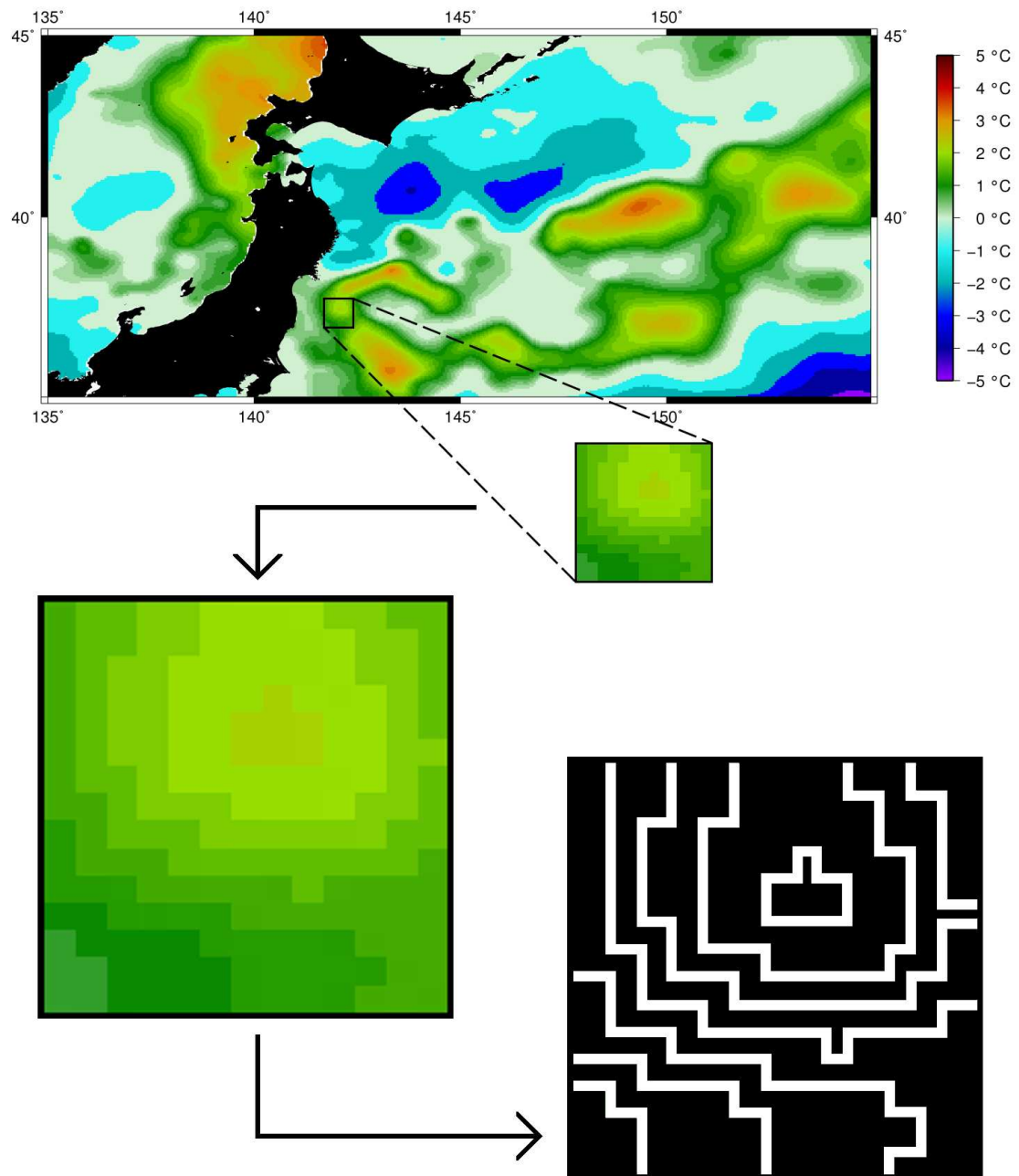


Abbildung 5.16: Schritte zur Extraktion von Isolinien

Schritt 3: Suche nach Eddies

Nach der Extraktion der Isolinien kann jetzt nach den eigentlichen Eddies gesucht werden. Dazu verwendet man die im Schritt 2 erzeugte Isolinienmatrix mit dem Wertebereich 0 und 1. Jeder Pixel in dieser Matrix wird überprüft. Besitzt der Pixel den Wert 1, so wird die Linie verfolgt, bis sie entweder

- in einen undefinierten Bereich läuft (außerhalb der Matrix, Isolinie steht orthogonal auf einem Kontinent),
- oder wieder den Ausgangspunkt erreicht.

Tritt der zweite Fall ein, dass die Isolinie den Ausgangspunkt erreicht hat, so wurde eine in sich geschlossene Isolinie (Zyklus) und somit ein Eddy entdeckt. Ob der gefundene Zyklus letztendlich als Eddy akzeptiert wird, hängt dabei von den möglichen benutzerdefinierten Einschränkungen ab.

- **Umfang:** Der Umfang spielt bei der Segmentierung der Eddies auch eine Rolle, da ein Zyklus mit einem großen Umfang nicht unbedingt auf einen Eddy schließen lässt. Zudem können kleine Zyklen auch das spätere Ergebnis verfälschen, so dass man für den Umfang ein sinnvolles Intervall von 200 - 2000 km wählt. Dies entspricht einem Radius von ca. 30 - 320 km.
- **Schwellwert:** Der Schwellwert ist neben dem Umfang ein weiteres Merkmal, das bei der Segmentierung hilfreich ist. Das bedeutet beispielsweise, dass bei Altimeterdaten ein Schwellwert von ± 20 cm oder bei Temperaturdaten $\pm 2^\circ \text{C}$ verwendet wird, so dass nur signifikante Eddies segmentiert werden. Der Schwellwert entspricht dabei der Höhe über bzw. unter dem Mittelwert des Eddies.

Unter Verwendung dieser Merkmale ergibt sich folgendes Ergebnis.

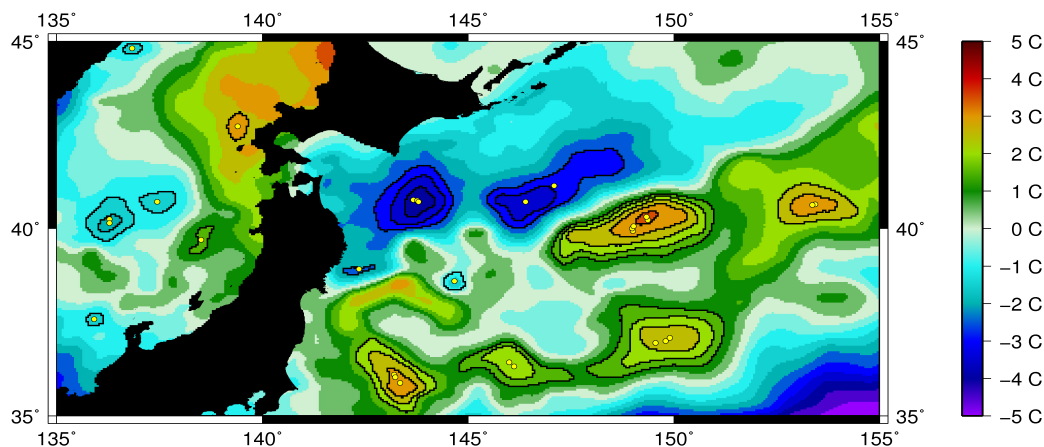


Abbildung 5.17: Darstellung von gefundenen Isolinien und deren Mittelpunkt

Schritt 4: Clustering

Beim Clustering geht es darum, die segmentierten Isolinien zu Eddies zusammenzufassen. Hierbei wird

für jede Isolinie aus dem Umfang der Schwerpunkt berechnet. Neben dem Schwerpunkt ist die Berechnung der Fläche nötig, da diese als Gewichtung beim Zusammenfassen dient, um den Fehler zu minimieren.

Das Clustern der einzelnen Schwerpunkte erfolgt hierbei über den Abstand zum nächsten Nachbarn. Für den maximalen Abstand bietet sich ein Wert von 0.5 Grad (ca. 55 km) an. Die folgende Abbildung zeigt das Resultat des Clusters, angewendet auf die im Schritt 3 gefundenen Isolinien.

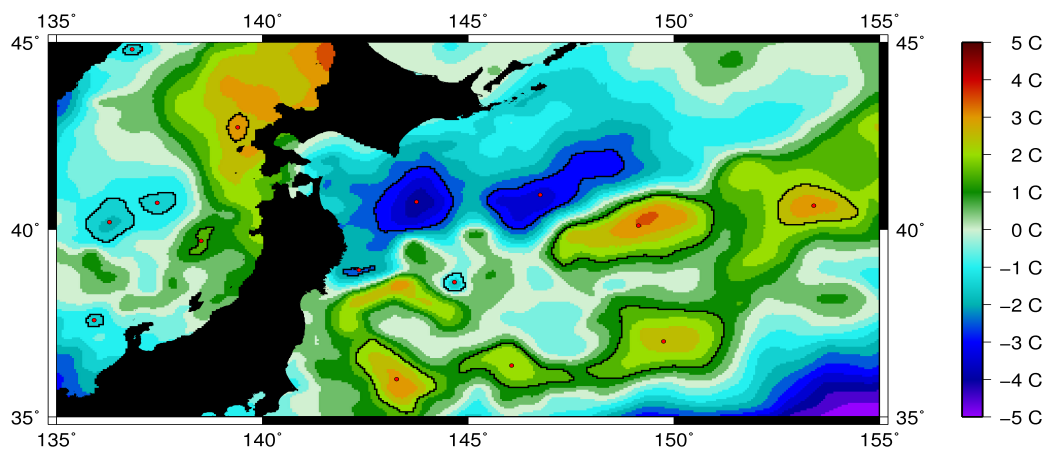


Abbildung 5.18: Darstellung der Eddies nach Clustering und deren Mittelpunkt

Ergebnisse

Das erste Ergebnis zeigt die Segmentierung mit dem Chain-Algorithmus anhand von Meeresoberflächentemperaturdaten vom 31.05.2006. Hierbei wurde ein Quantisierungsintervall von 0.2°C , ein Schwellwert von $\pm 1.5^{\circ}\text{C}$ und ein zulässiger Eddieumfang von 200 - 2000 km verwendet.

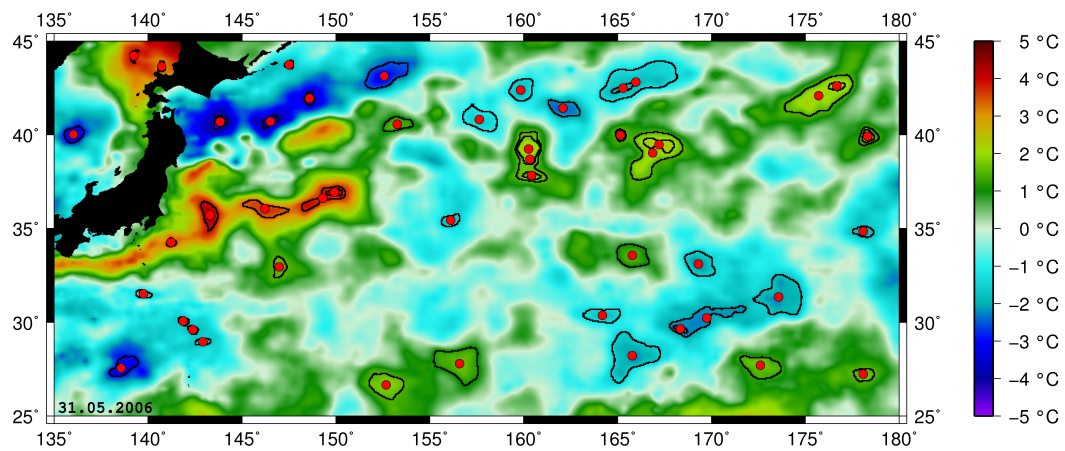


Abbildung 5.19: *Ergebnis mit Chain Algorithmus und SST-Daten*

Das folgende Ergebnis zeigt die Segmentierung anhand von Altimeterdaten vom 31.05.2006, wobei ein Quantisierungsintervall von 0.05 m verwendet wurde. Zudem wurde ein Schwellwert von ± 0.20 m und ein zulässiger Umfang von 300 - 2000 km zugelassen. Die Verwendung dieser Segmentierparameter führt zu einem erfolgreichen Ergebnis, wie in Abbildung 5.20 zu sehen ist.

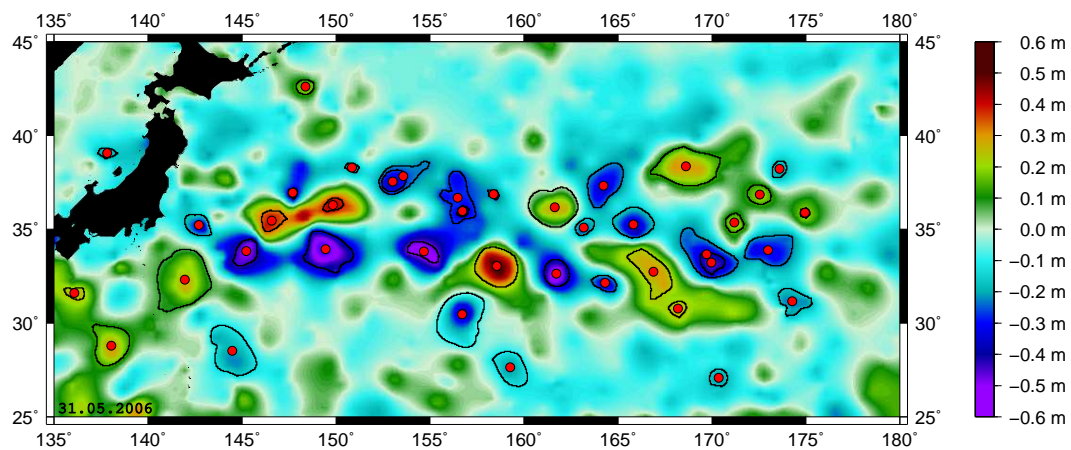


Abbildung 5.20: *Ergebnis mit Chain Algorithmus und SLA-Daten*

Die beiden Ergebnisse zeigen, dass mit dem "Chain"-Algorithmus eine erfolgreiche Segmentierung anhand von SST- und SLA-Daten durchgeführt werden kann.

5.4.2 Watershed-Algorithmus

Algorithmus

Ein weiteres Prinzip zur Segmentierung von Eddies ist der Watershed-Algorithmus. Dabei werden die Werte der Meeresoberflächentemperaturen bzw. Meereshöhenanomalien als Gebirge betrachtet. Bei diesem Algorithmus wird das Gebirge schrittweise mit Wasser gefüllt. An den Stellen, an denen zwei Täler zu einem verschmelzen, wird ein Damm errichtet, was der Begrenzung der Segmentierung entspricht. Im Gegensatz zum vorherigen "Chain"-Algorithmus ist hier keine Quantisierung nötig.

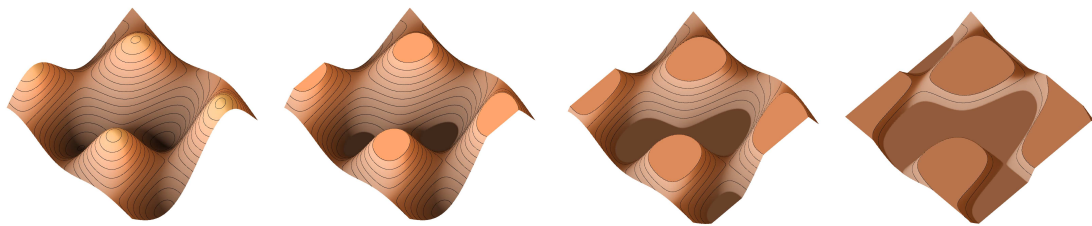


Abbildung 5.21: *Watershed Transformation mit Schwellwert*

Wie in der vorherigen Abbildung zu sehen ist, sind die segmentierten Bereiche der Eddies oft größer als der eigentliche Eddy. Es empfiehlt sich aus diesem Grund, neben dem eigentlichen Segmentierungsalgorithmus noch einen Schwellwert einzubeziehen, um unerwünschte Bereiche von der Segmentierung auszuschließen. Die folgende Tabelle zeigt geeignete Schwellwerte für ein gutes Segmentierungsergebnis.

	Wertebereich	Schwellwerte
Meeresoberflächentemperatur	$\pm 6 \text{ }^{\circ}\text{C}$	$\pm 2 \text{ }^{\circ}\text{C}$
Meereshöhenanomalien	$\pm 60 \text{ cm}$	$\pm 20 \text{ cm}$

Neben dem Schwellwert besteht die Möglichkeit, die Schrittweite bzw. Füllgeschwindigkeit einzustellen. Allerdings tritt bei der Wahl einer zu geringen Schrittweite die Gefahr der Übersegmentierung auf. Deshalb sollte die Schrittweite je nach Qualität der Eingangsdaten sinnvoll gewählt werden, da sonst bereits das Rauschen in den Daten segmentiert wird.

Ergebnisse

Die Abbildung 5.22 zeigt das Ergebnis der Watershed Transformation ohne Berücksichtigung des Umfangs oder des Schwellwertes. Der Datensatz mit Altimeterdaten stammt vom 31.05.2006.

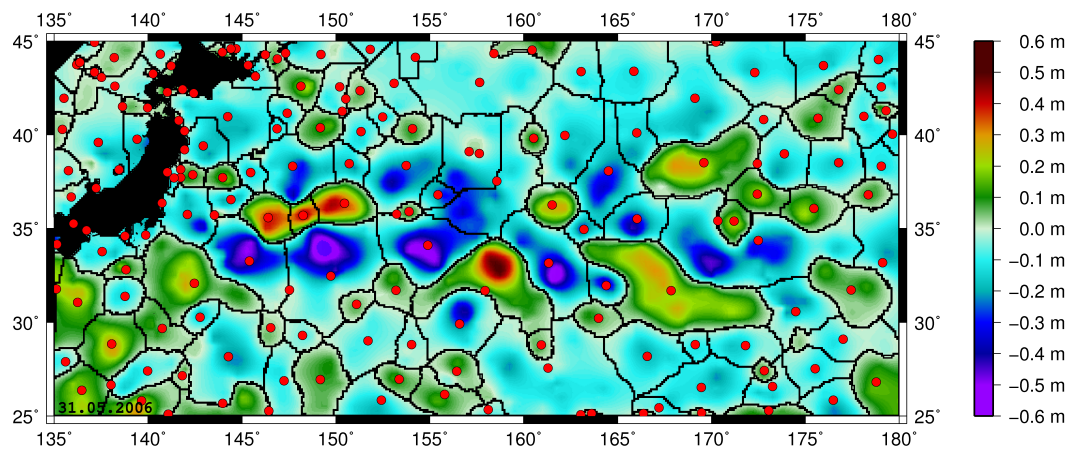


Abbildung 5.22: Segmentierungsergebnis ohne Schwellwert und Umfang mit SLA-Daten

Das Ergebnis zeigt, dass hier eine deutliche Übersegmentierung vorliegt. Dabei wurde jeder Punkt im Datensatz einem Eddy erfolgreich zugeordnet. Allerdings fließen auch Werte die nicht zu einem Eddy gehören, in das Ergebnis mit ein, da die Segmentierungsgrenzen viel größer sind als der eigentliche Eddy.

Bei dem folgenden Segmentierungsergebnis wurde der vorherige Datensatz verwendet. Zudem wurde ein Schwellwert von ± 0.2 m und ein zugelassener Umfang von 150 - 1500 km verwendet.

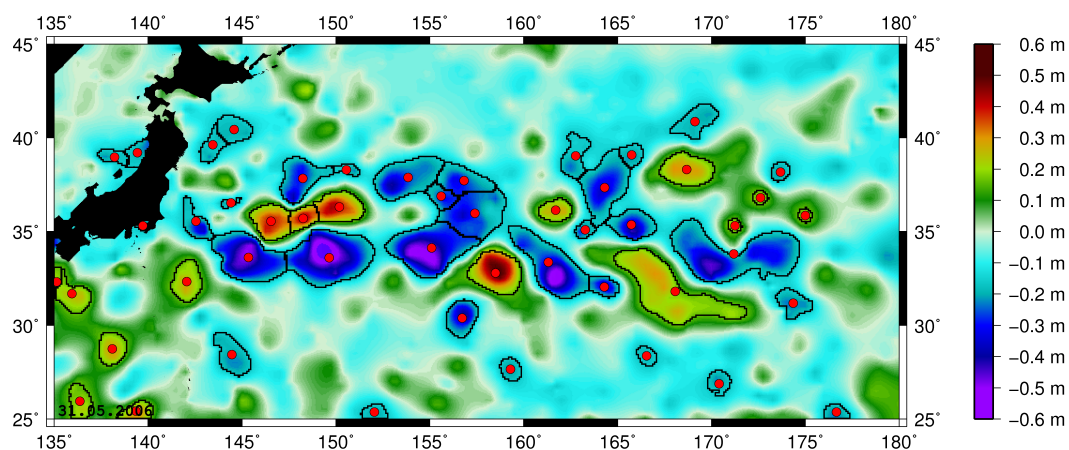


Abbildung 5.23: Segmentierungsergebnis mit Schwellwert und Umfang mit SLA-Daten

Im Vergleich zum vorherigen Segmentierungsversuch ist keine Übersegmentierung mehr vorhanden. Es wur-

den nur Eddies segmentiert, deren Maximum bzw. Minimum einen Wert größer bzw. kleiner als der Schwellwert von ± 0.2 m besitzen. Zudem tauchen nur Eddies auf, die zudem einen Umfang von 150 - 1500 km besitzen. Die Umrundungslinien grenzen die einzelnen Eddies gut ein.

5.4.3 Flächenapproximationsverfahren

Der letzte Segmentierungsalgorithmus basiert auf der Methode der kleinsten Quadrate. Dabei wird der quadratische und kubische Ansatz betrachtet und auf seine Zuverlässigkeit überprüft.

Algorithmus

Als Ausgangsdaten dient ein Datensatz von Altimeterdaten vom 01.06.2006 der in Abbildung 5.24 dargestellt ist.

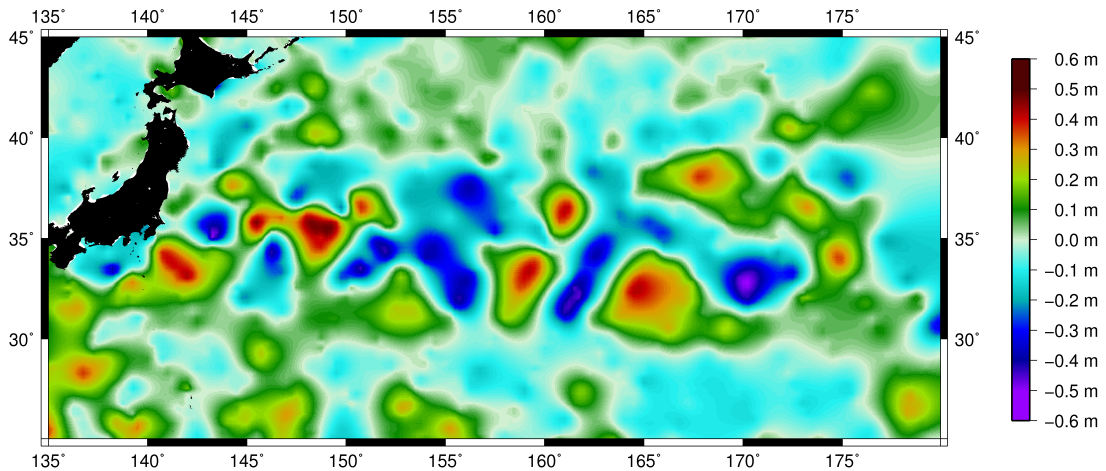


Abbildung 5.24: Original

Ein zu segmentierender Bereich wird in ein 30×30 Raster eingeteilt. Für jeden Rasterbereich wird mittels der Methode der kleinsten Quadrate eine Trendfunktion berechnet, um die Extremwerte in einem Raster zu berechnen. Dieses Raster wird dabei mit einer geeigneten Schrittweite über den Datensatz geschoben. Dieses Vorgehen ist vergleichbar mit der Filterung eines Bildes in der Bildverarbeitung. Durch anschließendes Clustering aller gefundenen Extrema ergeben sich dadurch die segmentierten Eddies.

Quadratischer Ansatz:

$$T(x, y) = c_0 + c_1 \cdot x + c_2 \cdot y + c_3 \cdot x \cdot y + c_4 \cdot x^2 + c_5 \cdot y^2 \quad (5.14)$$

Die zu schätzenden Koeffizienten berechnen sich aus der Normalengleichung 5.15.

$$c = (A^T \cdot A)^{-1} \cdot A^T \cdot t \quad (5.15)$$

Ableitung von $T(x,y)$ nach x und y :

$$T_x(x, y) = c_1 + c_3 \cdot y + 2 \cdot c_4 \cdot x \quad (5.16)$$

$$T_y(x, y) = c_2 + c_3 \cdot x + 2 \cdot c_5 \cdot y \quad (5.17)$$

Durch Lösen des Gleichungssystems ergeben sich die Punkte für die Extrema.

$$c_1 + c_3 \cdot y + 2 \cdot c_4 \cdot x = 0 \quad (5.18)$$

$$c_2 + c_3 \cdot x + 2 \cdot c_5 \cdot y = 0$$

$$Y = \frac{-c_2 - c_1 \cdot c_3 / 2c_4}{-c_3^2 / (2c_4 + 2c_5)} \quad (5.19)$$

$$X = \frac{c_1 + c_3 \cdot Y}{-2 \cdot c_4} \quad (5.20)$$

Bei dem quadratischen Ansatz ist die Trendfunktion entweder konvex oder konkav mit 0 bis 2 möglichen Lösungen. Die gefundenen Extrema sind entweder Minima oder Maxima.

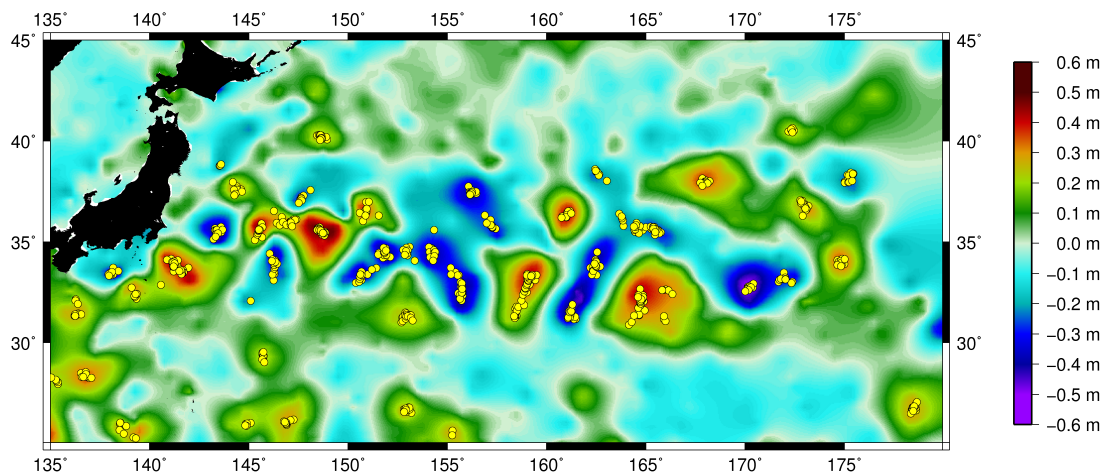


Abbildung 5.25: Ergebnis mit quadratischem Ansatz

Kubischer Ansatz:

Die Funktion für den kubischen Ansatz ist ein Polygon dritten Grades. Dabei wurde auf Summanden verzichtet die ein Produkt aus x und y besitzen. Dies würde das Ergebnis etwas verbessern, im Vergleich dazu ist der numerische Aufwand beim Auflösen der Gleichung dadurch aber enorm.

$$T(x, y) = c_0 + c_1 \cdot x + c_2 \cdot y + c_3 \cdot x^2 + c_4 \cdot y^2 + c_5 \cdot x^3 + c_6 \cdot y^3 \quad (5.21)$$

Die zu schätzenden Koeffizienten berechnen sich aus der Normalengleichung 5.22.

$$c = (A^T \cdot A)^{-1} \cdot A^T \cdot t \quad (5.22)$$

Für die Berechnung der Extrema muss zunächst die 1. Ableitung von $T(x, y)$ nach x und y gebildet werden.

$$T_x(x, y) = c_1 + 2 \cdot c_3 \cdot x + 3 \cdot c_5 \cdot x^2 \quad (5.23)$$

$$T_y(x, y) = c_2 + 2 \cdot c_4 \cdot y + 3 \cdot c_6 \cdot y^2 \quad (5.24)$$

Durch Lösen des Gleichungssystems ergeben sich die Punkte für die Extrema.

$$c_1 + 2 \cdot c_3 \cdot x + 3 \cdot c_5 \cdot x^2 = 0 \quad (5.25)$$

$$c_2 + 2 \cdot c_4 \cdot y + 3 \cdot c_6 \cdot y^2 = 0 \quad (5.26)$$

Das Lösen des Gleichungssystems ergibt vier mögliche Punktgleichungen.

Lösung 1:

$$X_1 = \frac{-c_3 - \sqrt{c_3^2 - 3 \cdot c_1 c_5}}{3 \cdot c_5} \quad (5.27)$$

$$Y_1 = \frac{-c_4 - \sqrt{c_4^2 - 3 \cdot c_2 c_6}}{3 \cdot c_6} \quad (5.28)$$

Lösung 2:

$$X_2 = \frac{-c_3 - \sqrt{c_3^2 - 3 \cdot c_1 c_5}}{3 \cdot c_5} \quad (5.29)$$

$$Y_2 = \frac{-c_4 + \sqrt{c_4^2 - 3 \cdot c_2 c_6}}{3 \cdot c_6} \quad (5.30)$$

Lösung 3:

$$X_3 = \frac{-c_3 + \sqrt{c_3^2 - 3 \cdot c_1 c_5}}{3 \cdot c_5} \quad (5.31)$$

$$Y_3 = \frac{-c_4 - \sqrt{c_4^2 - 3 \cdot c_2 c_6}}{3 \cdot c_6} \quad (5.32)$$

Lösung 4:

$$X_4 = \frac{-c_3 + \sqrt{c_3^2 - 3 \cdot c_1 c_5}}{3 \cdot c_5} \quad (5.33)$$

$$Y_4 = \frac{-c_4 + \sqrt{c_4^2 - 3 \cdot c_2 c_6}}{3 \cdot c_6} \quad (5.34)$$

Das Ergebnis dieser Lösungen muss zudem überprüft werden, da nicht alle Ergebnisse sinnvoll sind. Dies kann daran liegen, dass zum einen der gefundene Punkt komplexer Art ist, oder dass er sich nicht im betrachteten Raster befindet. Wurde allerdings ein gültiger Punkt innerhalb des Rasters gefunden, so muss anschließend überprüft werden, ob es sich dabei wirklich um ein Extremum handelt. Da es sich um einen kubischen Ansatz handelt, kann der gefundene Punkt auch ein Wendepunkt bzw. Sattelpunkt sein. Aus diesem Grund ist die Lösung der 2. Ableitung nötig, um anhand deren Ergebnis herauszufinden, ob es sich wirklich um ein Extremum handelt.

$$T_{xx}(x, y) = 2 \cdot c_3 + 6 \cdot c_5 \cdot x \quad (5.35)$$

$$T_{yy}(x, y) = 2 \cdot c_4 + 6 \cdot c_6 \cdot y \quad (5.36)$$

Besitzt die zweite Ableitung für den betrachteten Punkt den Wert 0, so handelt es sich um einen Wendepunkt bzw. Sattelpunkt. Ist der Wert ungleich 0, so handelt es sich um ein Extremum. Für die weitere Segmentierung werden deshalb nur Punkte verwendet, bei denen es sich eindeutig um ein Extremum handelt.

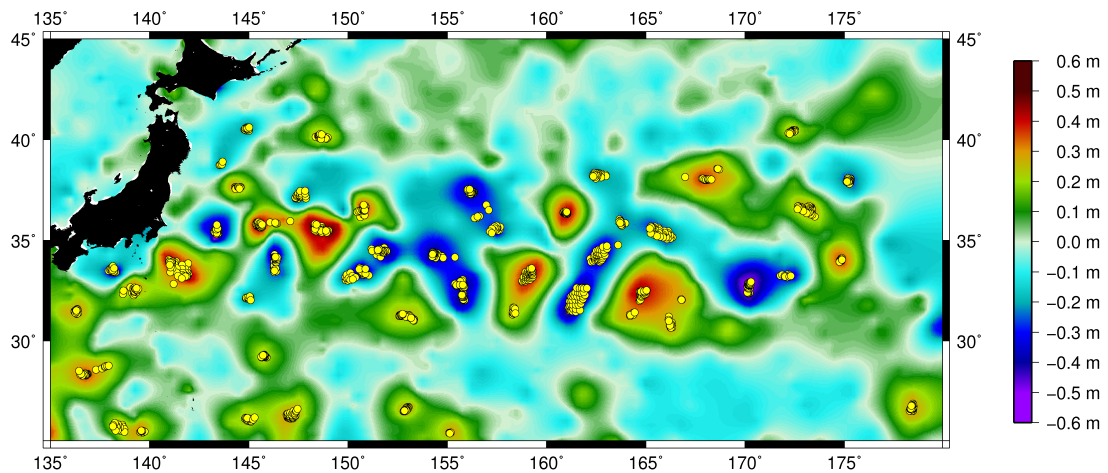


Abbildung 5.26: Ergebnis mit kubischem Ansatz

Vergleich der Ansätze:

Die Segmentierung mit dem quadratischen und kubischen Ansatz fallen doch sehr unterschiedlich aus. Im Folgenden werden einige während der Segmentierung betrachtete 30×30 Raster gegenüber gestellt, und deren Ergebnisse miteinander verglichen.

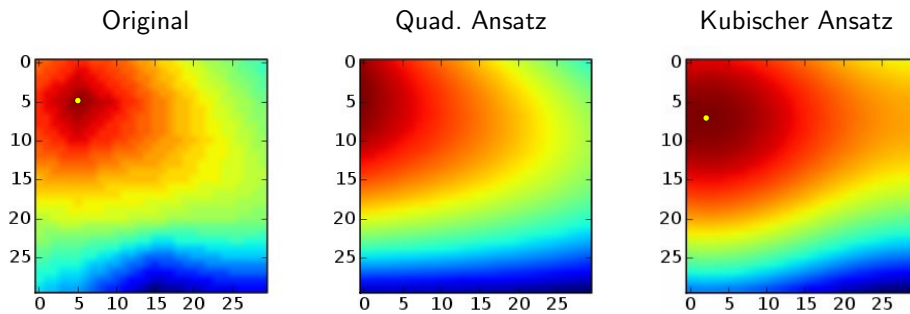


Abbildung 5.27: *Beispiel 01 - Vergleich von quad. und kubischem Ansatz*

Das erste Beispiel zeigt links Bild das Originalbild, in dem ein Extremum zu erkennen ist. Das Maximum liegt ungefähr bei (5,5). Dagegen wird mit Hilfe des quadratischen Ansatz im mittleren Bild kein Extremum gefunden. Das Ergebnis des kubischen Ansatzes findet ein Maximum bei (2.71,7.22).

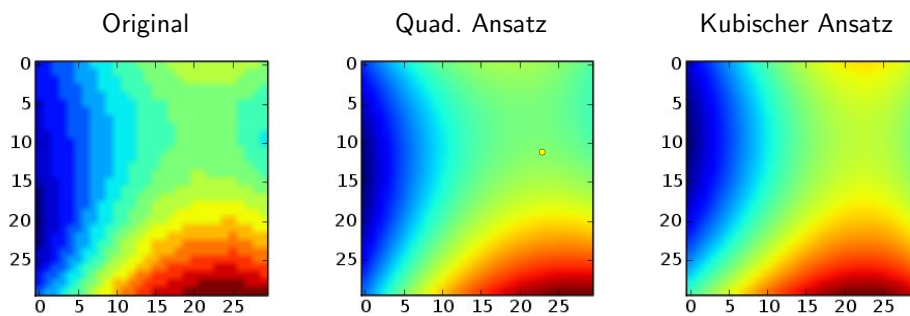


Abbildung 5.28: *Beispiel 02 - Vergleich von quad. und kubischem Ansatz*

Das zweite Beispiel zeigt im Originalbild kein Extremum sondern einen Wendepunkt. Der quadratische Ansatz erkennt in diesem Fall fälschlicher Weise bei dem Punkt (22.99,13.61) ein Extremum. Der kubische Ansatz findet korrekter Weise kein Extremum.

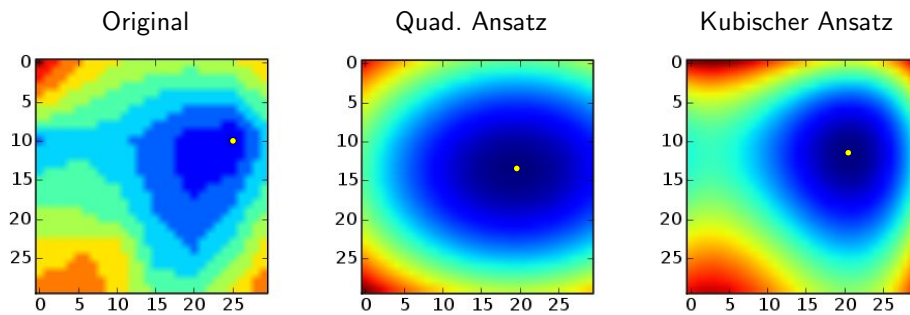


Abbildung 5.29: *Beispiel 03 - Vergleich von quad. und kubischem Ansatz*

Im nächsten Beispiel ist im Original ein Minimum bei ungefähr (25,10) vorhanden. Diesmal sind sowohl der quadratische als auch der kubische Ansatz erfolgreich. Der quadratische Ansatz findet (19.39,13.78) als Lösungspunkt. Im Vergleich dazu ist die Lösung des kubischen Ansatzes bei (20.63,11.76) zu finden. In diesem Falle waren beide Ergebnisse korrekt.

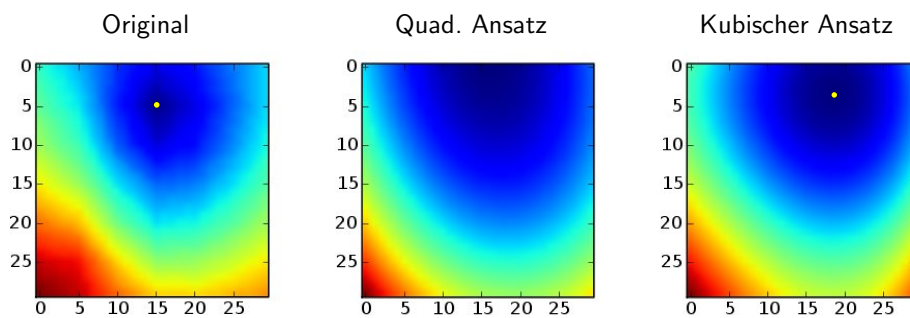


Abbildung 5.30: *Beispiel 04 - Vergleich von quad. und kubischem Ansatz*

Die Beispiele 4 und 5 sind sehr ähnlich. Bei beiden Originalbildern ist deutlich ein Extremum bei (15,5) und (5,25) zu erkennen. Diese beiden Punkte konnten mit dem quadratischen Ansatz nicht erkannt werden. Mit dem kubischen Ansatz wurde das Minimum in Beispiel 4 bei (18.55,3.27) und in Beispiel 5 bei (5.13,24.42) erkannt. Der Erfolg bei der Erkennung mit kubischem Ansatz gegenüber dem quadratischen Ansatz liegt allein an dem um ein Grad höheren Polynom.

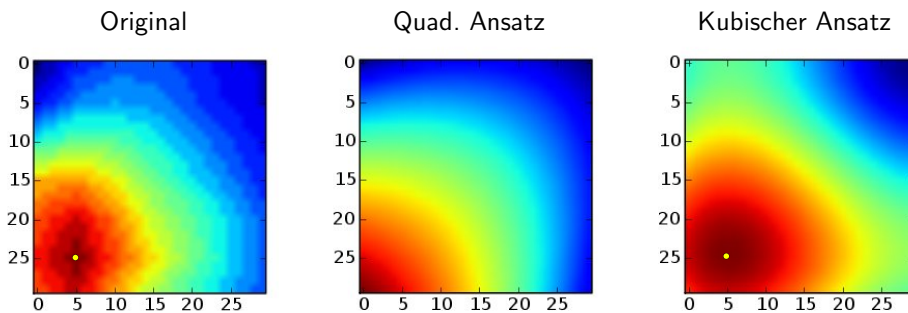


Abbildung 5.31: *Beispiel 05 - Vergleich von quad. und kubischem Ansatz*

Diese fünf Beispiele zeigen, dass die Fehler des quadratischen Ansatzes durch die Verwendung des kubischen Ansatzes deutlich minimiert werden können. Die Ergebnisse des kubischen Ansatzes stimmen dabei sehr gut mit den Soll-Ergebnissen des Originals überein.

Clustering

Das Clustering hat zum Ziel, die im vorherigen Schritt mittels Least Squares gefundenen Extrema zu einem Punkt zusammenzufassen. Der daraus resultierende Punkt soll möglichst dem Originalpunkt des Extremums entsprechen.

Der Cluster-Algorithmus verwendet als Eingangsdaten eine Liste aller im Segmentierungsschritt gefundenen Punkte. Jeder Punkt besitzt als Attribut eine X- und Y-Koordinate sowie eine ID. Die ID ist für das Clustering notwendig und besitzt standardmäßig den Wert 0.

Zu Beginn wird ein globaler Zähler mit 0 initialisiert. Während des Clusterings werden alle Punkte miteinander verglichen. Dabei wird der Abstand zwischen den beiden Punkten berechnet. Ist der Abstand kleiner als der erlaubte Maximalabstand zwischen zwei Punkten, so werden die beiden Punkte zusammengefasst.

Dabei spielt die ID eine wichtige Rolle. Sind beispielsweise die IDs beider Punkte gleich 0, so gehört zu diesem Zeitpunkt keiner der beiden Punkte einem Cluster an. In diesem Fall wird der globale Zähler inkrementiert und beide Punkte erhalten als ID den Wert des Zählers. Damit gehören beide Punkte dem gleichen Cluster an.

Für den Fall, dass ein Punkt die ID 0 und der andere Punkt eine ID größer 0 besitzt, wird der Punkt mit der ID 0 dem Cluster des anderen Punktes angeschlossen und erhält zudem dessen ID. Tritt der Fall ein, dass beide Punkte bereits einem Cluster angehören, so werden die beiden Cluster verschmolzen. Hierbei nehmen alle Punkte eines Clusters die ID des anderen Clusters an.

Nachdem alle Punkte miteinander verglichen wurden, müssen die Punkte eines Clusters zu einem Punkt zusammengefasst werden.

Besitzt ein Punkt immer noch die ID 0, konnte dieser Punkt keinem Cluster zugeordnet werden und wird deshalb als Cluster mit einem Punkt übernommen.

Erzeugung der Eddyränder

Im Vergleich zum "Chain" Algorithmus und zur Watershed-Transformation erfolgt in diesem Verfahren die Segmentierung nicht durch die Ränder sondern durch die Extrema. Aus diesem Grund müssen die Eddyränder ausgehend vom jeweiligen Minimum oder Maximum erzeugt werden.

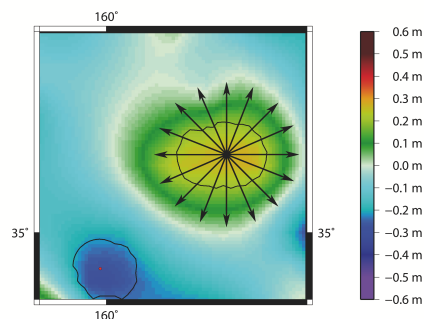


Abbildung 5.32: *Richtungen zur Berechnung der Ränder*

Es gibt zwei Anforderungen an die Eddyränder. Zum einen sollen die Isolinien bei ca. 70% des Extremwertes des Eddies liegen. Zum anderen sollen die Eddyränder möglichst glatt sein und keine Ausreißer besitzen. Im Folgenden werden die Schritte zur Erzeugung der Eddyränder beschrieben.

Im ersten Schritt werden 16 Richtungen vom Extremwert aus betrachtet (Abbildung 5.32). Dabei wird zunächst für jede Richtung der Abstand berechnet, der noch 70% des Extremwertes entspricht. Die Werte werden in einer Liste in Pixel für 0 bis 2π gespeichert. Eine Liste für den Eddy links unten sieht folgendermaßen aus.

17, 30, 30, 30, 30, 10, 9, 8, 9, 9, 10, 11, 12, 12, 13, 14

Für den linken unteren Eddy ergeben sich Radien von 8 - 30, was keinem homogenen ellipsenförmigen Eddy entspricht. Um die gewünschten Eigenschaften zu erreichen, verwendet man die Standardabweichung als Kriterium. Die Liste der Radien besitzt einen Mittelwert von 15.875 und eine Standardabweichung von 7.203. Ziel ist es, eine Liste mit einer Standardabweichung kleiner als 2.5 zu ermitteln. Dazu wird schrittweise die Liste mit einem Gaußfilter der Breite 5 gefiltert und die neue Standardabweichung berechnet und verglichen. Dieser Schritt wird so lange wiederholt bis die Standardabweichung kleiner

als 2.5 ist. Das folgende Beispiel zeigt das Verfahren an der vorher dargestellten Liste.

17	30	30	30	30	10	9	8	9	9	10	11	12	12	13	14	σ : 7.203125
20	23	27	26	21	17	13	9	9	9	10	10	11	12	13	17	σ : 5.3671875
20	22	23	22	20	17	13	11	10	9	9	10	11	12	14	17	σ : 4.5
19	20	21	20	19	16	14	12	10	9	9	10	11	12	14	17	σ : 3.7578125
18	19	19	19	18	16	14	12	10	10	9	10	11	12	14	16	σ : 3.2109375
17	17	18	18	17	15	14	12	11	10	10	10	11	12	14	15	σ : 2.5859375
16	16	17	17	16	15	13	12	11	10	10	10	11	12	13	15	σ : 2.296875

Ist die Standardabweichung der Liste kleiner als 2.5, so können mit Hilfe der Radien in der Liste die Randpunkte berechnet werden. Durch das Verbinden der Punkte ergibt sich die Umrandung der Eddies wie die Abbildung 5.32 zeigt.

Ergebnis

Mittels der im vorherigen Punkt beschriebenen Strategie des Clusterings ergeben sich durch mit dem kubischen Ansatz folgende Ergebnisse.

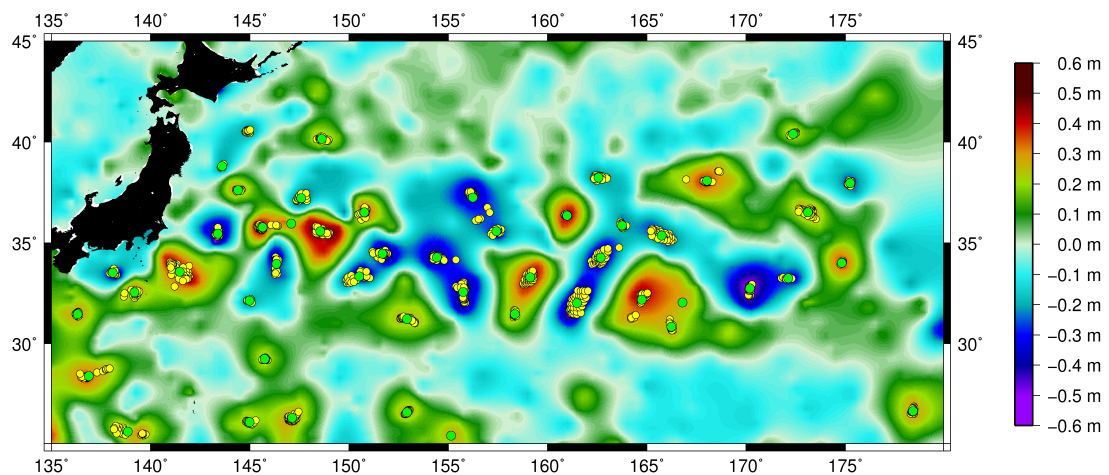


Abbildung 5.33: Ergebnis nach Clustering mit kubischem Ansatz

Parameter:

Bei der Segmentierung mittels der Least Squares Methode kann das Verfahren anhand der im folgenden beschriebenen Parameter konfiguriert werden.

- **Trendfunktion:** Die Trendfunktion ist der wichtigste Parameter bei dem Least Squares Ansatz. Wie bereits zuvor gezeigt, besteht eine große Differenz zwischen dem Ergebnis mit quadratischem und kubischem Ansatz.
- **Größe des Rasters:** Die Rastergröße ist abhängig von der Trendfunktion. Ist die Trendfunktion ein Polynom niedrigen Grades, so sollte die Rastergröße maximal einen Eddy enthalten. Wird z.B. der quadratische Ansatz verwendet, kann höchstens ein Extremum gefunden werden. Befinden sich z.B. zwei Eddies innerhalb eines Rasters, reicht der quadratische Ansatz nicht mehr aus. Für dieses Problem ist der kubische Ansatz zur erfolgreichen Segmentierung nötig. Die geeignete Rastergröße ermitteln sich am Besten nach einigen Probeläufen.
- **Schrittweite:** Je kleiner die Schrittweite ist, desto besser ist das Ergebnis der Segmentierung. Bei größerer Schrittweite kann es passieren, dass Extrema einfach übergangen und somit nicht segmentiert werden. Eine kleine Schrittweite dient dazu, dass viele Extrema gefunden werden, was beim Clustering zu einem genaueren Ergebnis führen.
- **Schwellwert:** Mit Hilfe des Schwellwertes kann festgelegt werden, dass z.B. nur signifikante Eddies mit einer höheren Variation segmentiert werden.

Durch Veränderung dieser Parameter kann das Segmentiervorgehen leicht an zukünftige Datensätze mit z.B. einer höheren Auflösung angepasst werden. Im Allgemeinen kann dieses Verfahren auf alle Datensätze angewendet werden, in denen eine Segmentierung von lokalen Extrema durchgeführt werden soll. Mit Hilfe dieses Verfahrens werden nur signifikante Extrema gefunden, wobei durch Rauschen entstandene Extrema ignoriert werden.

Kapitel 6

Tracking von Eddies

Im aktuellen Kapitel wird beschrieben, wie Eddies innerhalb einer Zeitreihe verfolgt werden können. Das Tracking von Eddies wird dabei anhand des kürzesten Abstands Algorithmus beschrieben.

6.1 Kürzester Abstand Algorithmus

Beim kürzesten Abstand Algorithmus werden die durch Segmentierung gefundenen Punkte der Eddies verwendet. Dabei wird der Abstand von jedem Punkt zum Zeitpunkt t_0 zu jedem von t_1 berechnet. Ziel dabei ist es, für jeden Punkt von t_0 den Punkt zu finden, der den minimalen Abstand zu dem Punkt aus t_1 besitzt. Wurden zwei Punkte gefunden, wird der Abstand dieser beiden Punkte zueinander untersucht.

Dieser Abstandswert basiert auf der Tatsache, dass Eddies pro Tag Strecken von bis zu maximal 85 km zurücklegen. Diese Erkenntnis, ist für diesen Algorithmus sehr wichtig, da er den Suchbereich extrem einschränkt. Der Abstand zwischen zwei Punkten darf deshalb nicht größer sein als die Strecke, die ein Eddy an einem Tag zurücklegen kann.

Für die Berechnung des Suchradius benötigt man die Auflösung in Grad pro Pixel res_{GRAD} und die maximal mögliche Strecke $smax_{KM}$, die ein Eddy innerhalb eines Tages zurücklegen kann. Daraus ergibt sich die folgende Formel:

$$Suchradius_{PIXEL} = \frac{smax_{KM}}{res_{GRAD} \cdot (6378.137km \cdot 2\pi) / 360}$$

Das folgende Beispiel soll die Berechnung des Suchradius veranschaulichen. Für eine Auflösung von $res_{GRAD} = 0.05^\circ / Pixel$ und einer zurückgelegten Strecke von $smax_{KM} = 60km$ ergibt sich laut vorheriger Formel ein Suchradius von 10.779 Pixel. Für Datensätze, wie z.B. Meeresoberflächenanomalien die eine zweitägige Auflösung besitzen, muss auch der Suchradius mit dem entsprechenden Faktor der zeitlichen Auflösung multipliziert werden. Dabei würde ein Suchradius von 21.559 Pixel anzuwenden sein.

Ist der Abstand zweier Punkte kleiner als der Suchradius, so handelt es sich mit großer Wahrscheinlichkeit um den gleichen Eddy. Ist der Abstand größer, kann es sein, dass sich der Eddy aufgelöst hat oder

nicht korrekt segmentiert werden konnte.

Fusion von Eddies

Die Fusion von Eddies ist ein Sonderfall beim Tracking, wobei sich mindestens zwei Eddies in einem gemeinsamen Suchradius befinden. Diese beiden Eddies verschmelzen dann zu einem meist größeren Eddy, wie in der folgenden Bildfolge zu sehen ist.

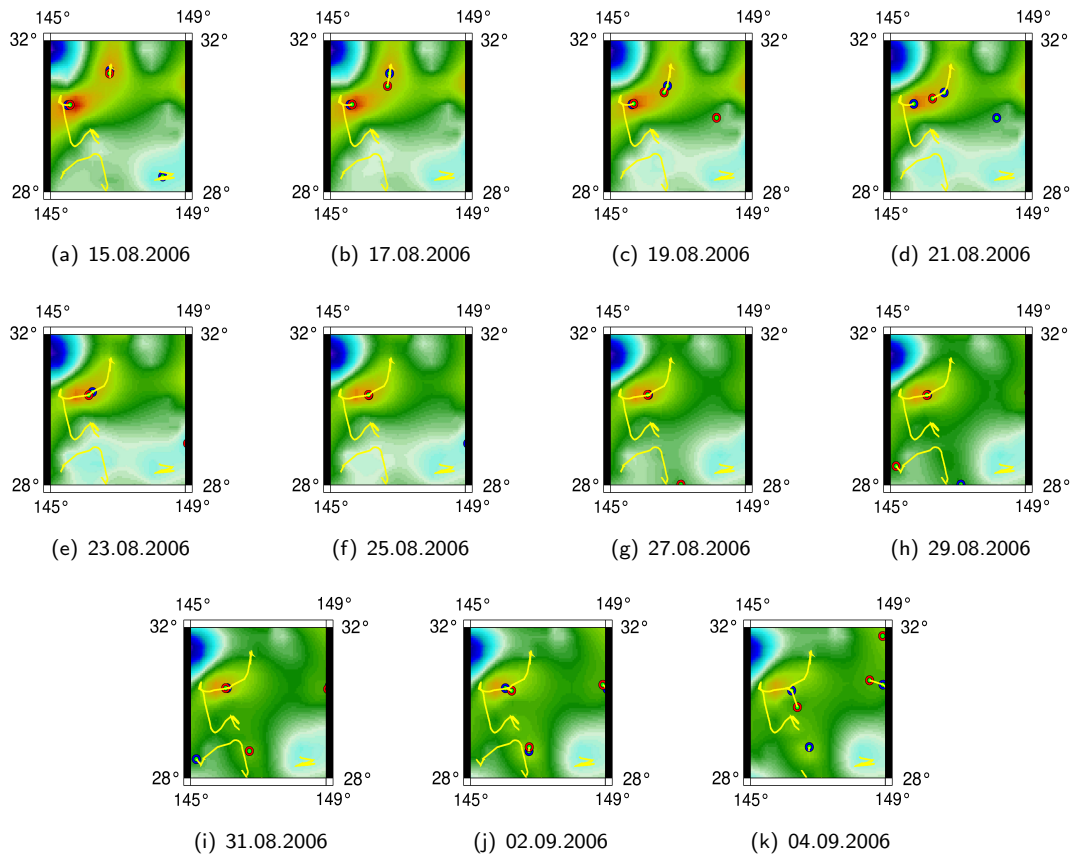


Abbildung 6.1: *Fusion von Eddies*

6.2 Ergebnis

Die Abbildung 6.2 zeigt die anhand des Flächenapproximationsverfahrens segmentierten Eddies, die mit der kürzesten Abstands Methode verfolgt wurden. Für den beobachteten Zeitraum von sechs Monaten wurde ein Auszug zu Beginn jeden Monats dargestellt. Die roten Markierungen definieren die Eddies zum Zeitpunkt t_0 . Die blauen Markierungen zeigen die Eddies zum Zeitpunkt t_{-1} .

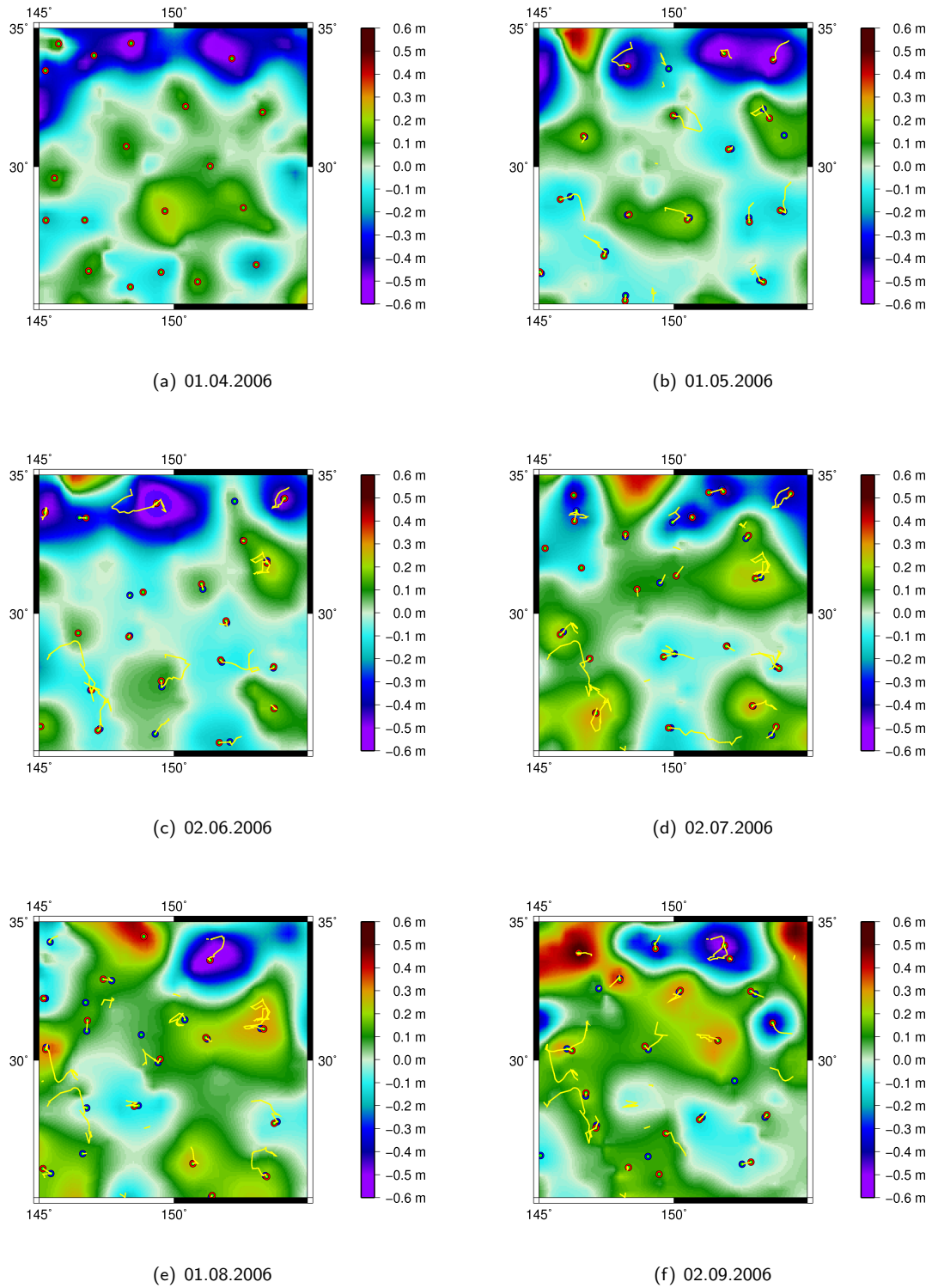


Abbildung 6.2: Tracking

Kapitel 7

Evaluierung der Daten

Im Kapitel "Evaluierung der Daten" werden die verwendeten Meeresoberflächentemperaturdaten und die Altimeterdaten miteinander verglichen. Es wird dabei die Qualität der beiden Daten unter Verwendung von ARGO-Floatern untersucht. Eine Korrelation zwischen den beiden Datensätzen soll zeigen, in welchem Zusammenhang sie zueinander stehen.

7.1 Evaluierung mit Argo-Floatern

Argo ist ein Internationales Programm, dass sich mit der Überwachung der Ozeane beschäftigt. Die Überwachung wird mit Argo-Floatern durchgeführt, die frei in den Ozeanen treiben. Am 29.Mai 2008 waren bereits 3159 Floater in den Weltmeeren unterwegs. Die folgende Abbildung zeigt alle Floater, von denen in den letzten 30 Tagen Daten empfangen wurde.

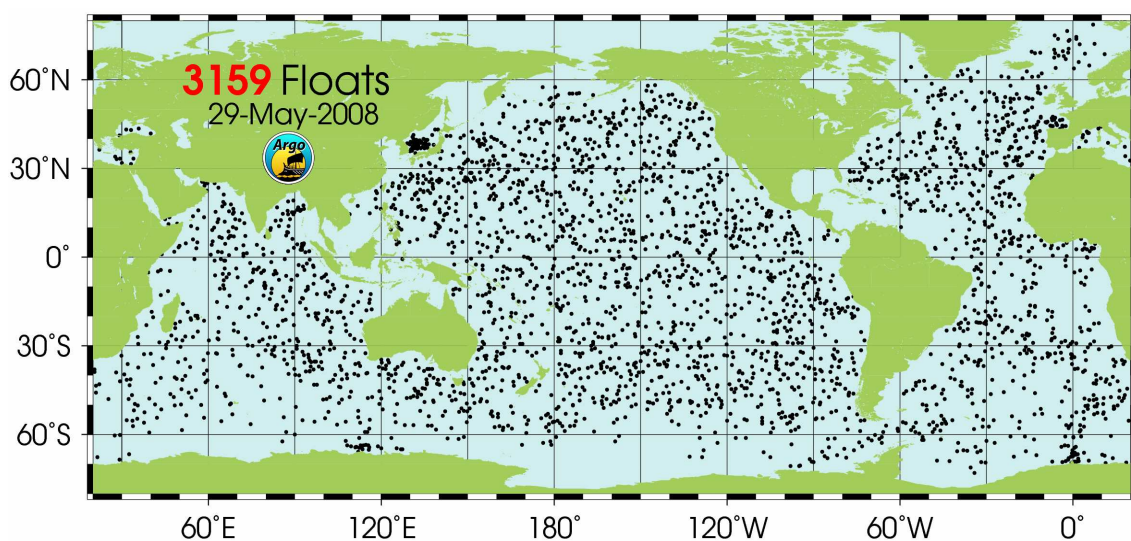


Abbildung 7.1: Übersicht der Floater [ARGO1]

Jeder dieser Floater misst die Temperatur, den Druck und den Salzgehalt. Diese Messungen werden nach einem speziellen Schema, wie in der Folgenden Abbildung 7.2 zu sehen ist, durchgeführt.

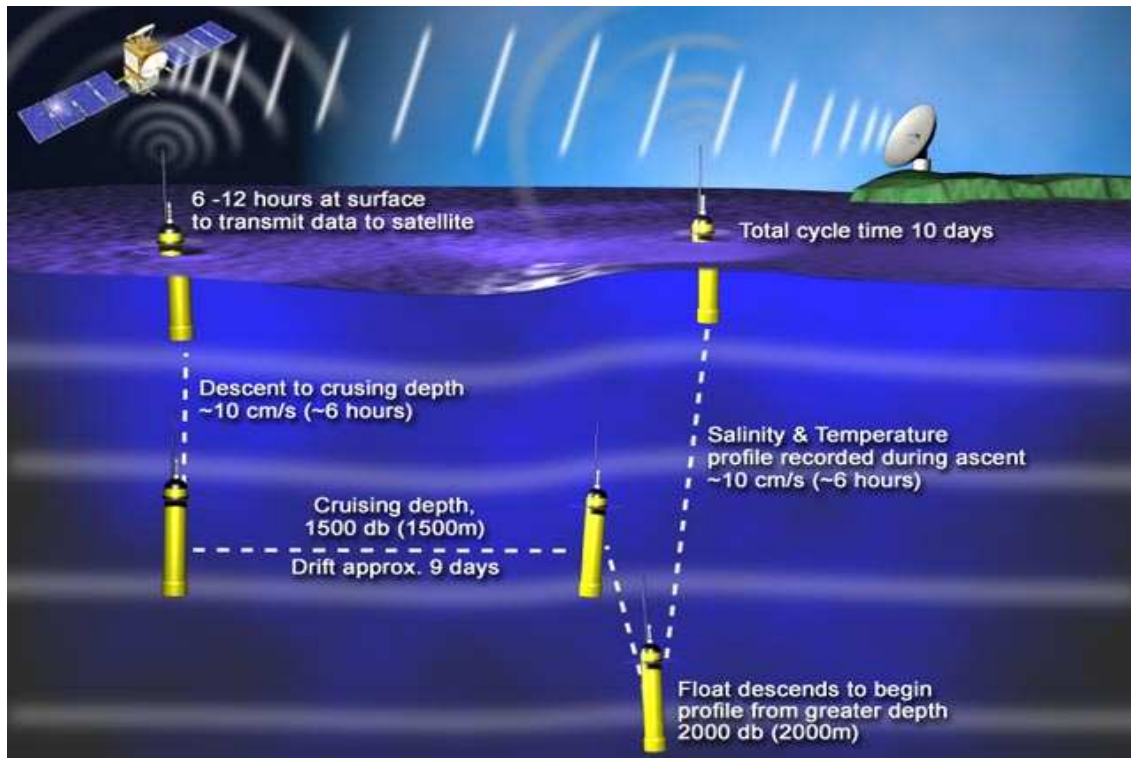
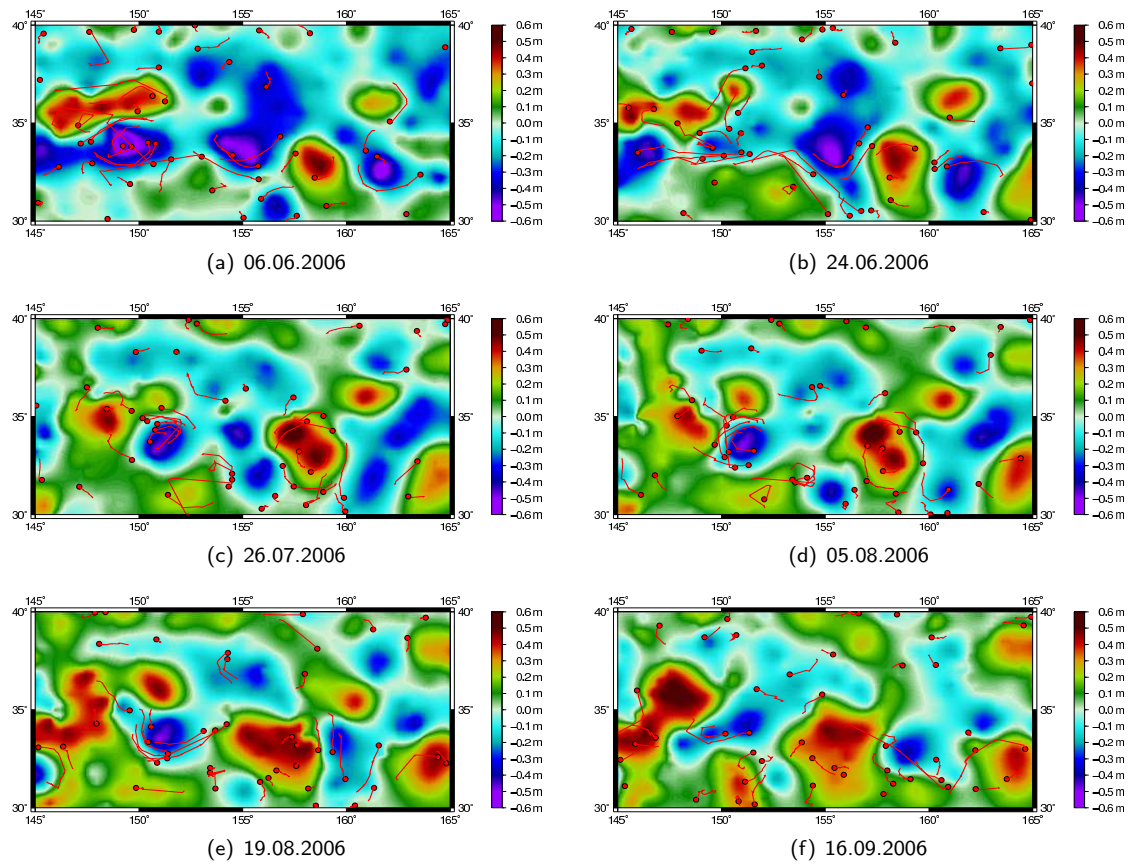


Abbildung 7.2: *Phasen eines Floaters [ARGO2]*

Ein Zyklus dauert zwischen 8 und 10 Tage und beginnt am Tag 1 an der Meeresoberfläche. Der Floater beginnt seinen Zyklus mit dem Abtauchen auf eine Tiefe von ca. 1500 Meter. In dieser Tiefe driftet der Floater ca. 9 Tage, bis er dann weiter auf ca. 2000 Meter abtaucht, um dort den Druck im Ozean zu messen. Nach Beendigung der Druckmessung steigt der Floater wieder bis zur Meeresoberfläche auf. Während des Aufstieges werden Temperatur und Salzgehalt gemessen. Nach dem Erreichen der Oberfläche sendet der Floater die gemessenen Daten via Satellit zum Argo-Rechenzentrum. Neben den Messungen sendet er zudem die Positionen des Floaters mit GPS, die nur in der 10-stündigen Auf-tauchphase vorhanden sind, da in der Tauchphase kein Kontakt zum Satelliten besteht, um die Position bestimmen zu können.

Für die Evaluierung der Ergebnisse der Segmentierung und Verfolgung werden die Positionen und Zeitpunkte benötigt. Da die Floater den Strömungen in Ozean folgen und diese auch von kleinen Strömungen wie den Eddies beeinflusst werden, zeigt der Folgende Vergleich, wie sich die Floater innerhalb des jeweiligen Datensatzes fortbewegen. Der Vorteil an Floatern ist, dass die Positionen und Zeitpunkte exakt sind und nicht wie die Altimeter- und Meeresoberflächentemperaturdaten interpoliert wurden.

Abbildung 7.3: *Floater in SLA-Daten*

Eine Animation mit Floatern in SLA-Daten befindet sich auf der beiliegenden DVD unter `/animations/floater_sla.mpg`.

Die Abbildung 7.3 zeigt die Bewegung von ARGO-Floatern im Vergleich zu SLA-Daten. Jeder Floater wird dabei durch die aktuelle Position und die zurückgelegte Strecke innerhalb der letzten 30 Tage beschrieben. Die Abbildung 7.4 zeigt dagegen die Bewegung von Floatern im Vergleich zu SST-Daten.

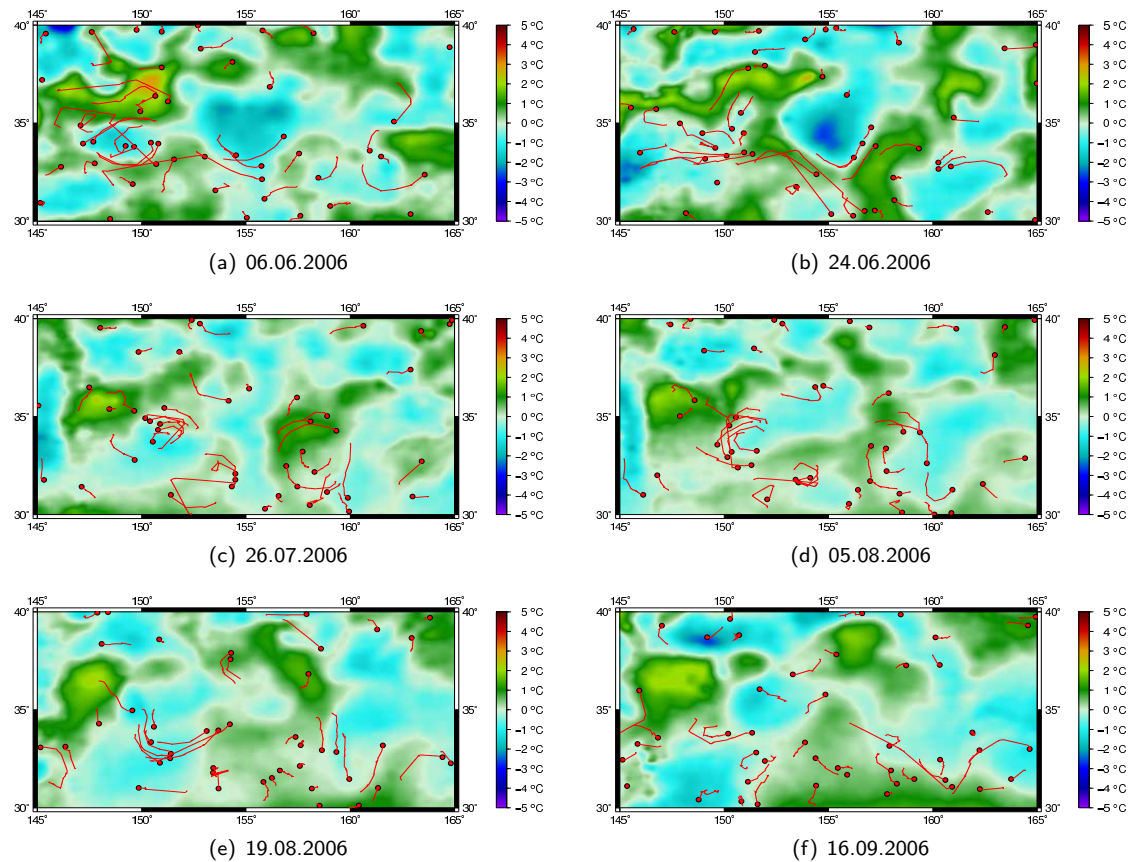


Abbildung 7.4: Floater in SST-Daten



Eine Animation mit Floatern in SST-Daten befindet sich auf der beiliegenden DVD unter /animations/floater_sst.mpg.

Beim Vergleich der beiden Zeitreihen, kann man deutlich erkennen, dass die Bewegung der Floaters mit denen der Eddies in den Altimeterdaten übereinstimmt. Da der betrachtete Ausschnitt sich auf der nördlichen Hemisphäre befindet, schwimmen die Floaters auf Grund der Corioliskraft im Uhrzeigersinn (zyklisch) um die warmen Eddies oder gegen den Uhrzeigersinn (antizyklisch) um die kalten Eddies. Betrachtet man dagegen die Floater in den Meeresoberflächentemperaturdaten, so ist ein Zusammenhang zwischen den Daten nicht so deutlich wie bei den Altimeterdaten.

7.2 Korrelation zwischen SST- und SLA-Daten

Die Erkenntnisse aus Kapitel 7.1, dass der Zusammenhang zwischen Meeresoberflächentemperaturdaten und Floatern nicht so deutlich ist wie gegenüber den Altimeterdaten, erfordert in diesem Abschnitt, die beiden Datensätze direkt gegenüber zu stellen. Vergleicht man die folgenden beiden Datensätze mit dem

bloßem Auge, so kann vor allem in den Bereichen von Extrema ein gewisser Zusammenhang erkannt werden. Dieser Zusammenhang soll in diesem Abschnitt mittels Korrelation überprüft werden.

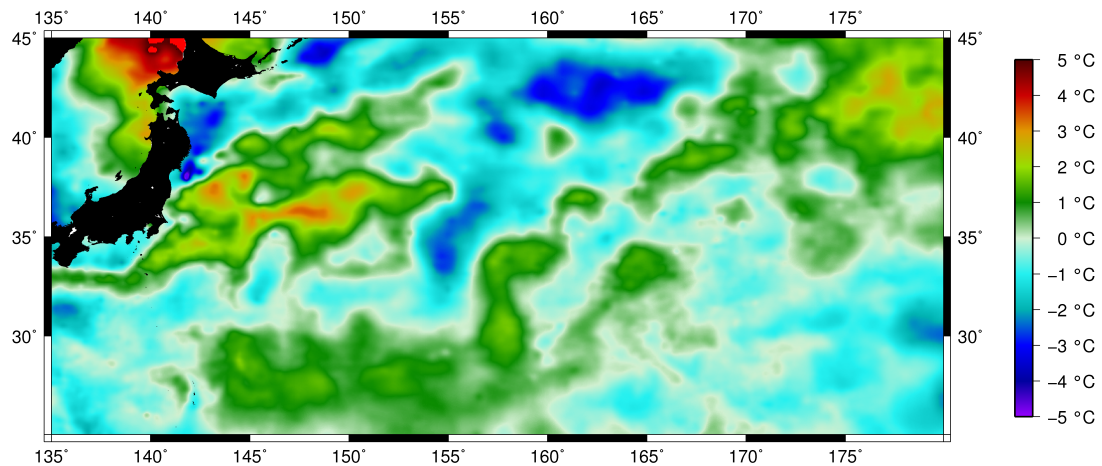


Abbildung 7.5: SST-Daten nach Trendberechnung vom 01.07.2006

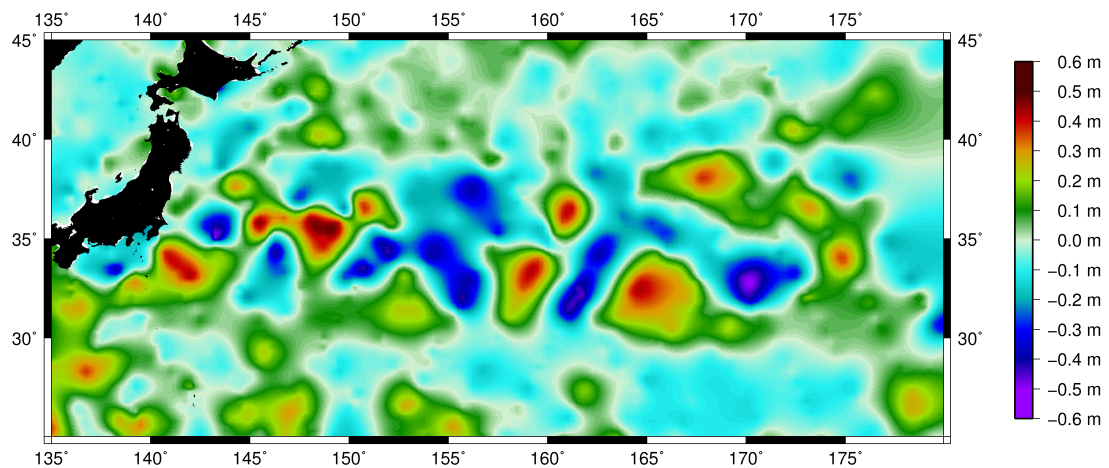


Abbildung 7.6: SLA-Daten nach Trendberechnung vom 01.07.2006

Die Korrelation zwischen den beiden Datensätzen eines Tages ist in Abbildung 7.7 dargestellt. Dabei wird jeweils ein $1 \times 1^\circ$ Block des Datengitters miteinander korreliert. Mit den folgenden Formeln lässt sich für jedes Gitterpaar der Korrelationskoeffizient berechnen. Es sind zwei Datensätze x_1, x_2, \dots, x_n und y_1, y_2, \dots, y_n gegeben. Dabei entspricht x_n beispielsweise den Altimeterdaten und y_n den Meeres-

oberflächendaten. Im ersten Schritt wird zunächst der Mittelwert für jeden Datensatz wie folgt gebildet.

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i; \quad \bar{y} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i \quad (7.1)$$

Der Korrelationskoeffizient kann dann folgendermaßen berechnet werden.

$$coeff = \frac{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\left(\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2\right)} \cdot \sqrt{\left(\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2\right)}} \quad (7.2)$$

Dabei sollte der Korrelationskoeffizient größer 0.6 bzw. kleiner -0.6 sein, um eine signifikante Aussage über den Zusammenhang beider Datensätze in einem Bereich machen zu können.

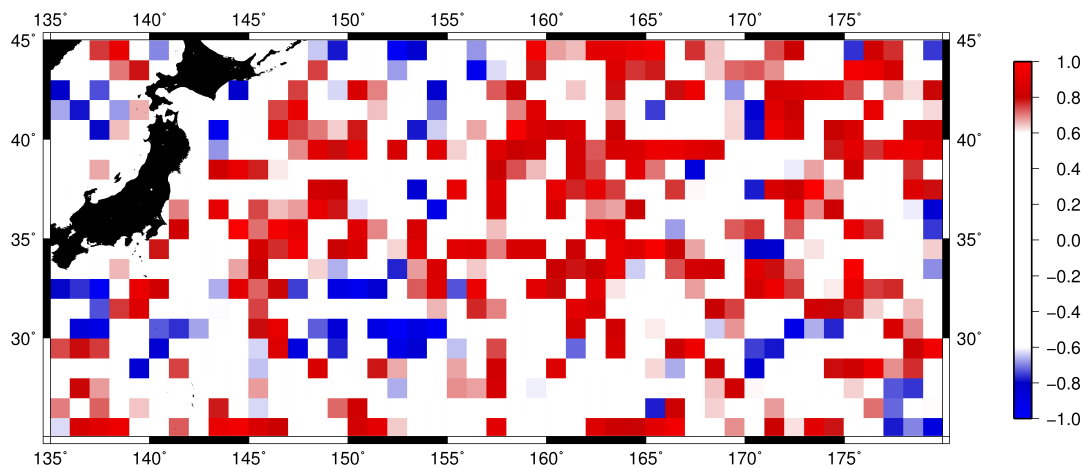


Abbildung 7.7: Korrelation zwischen SST und SLA am 01.07.2006

Das Ergebnis der Korrelation zeigt, dass bei der Korrelation eines Tages in einigen Gebieten ein deutlicher Zusammenhang besteht und in anderen nicht. Die folgende Statistik zeigt den Anteil des Korrelationskoeffizienten am gesamten Bereich.

Das Ergebnis der Korrelation zeigt, dass von den 841 betrachteten Gebieten 36.50% einen Korrelationskoeffizienten größer als 0.6 besitzen, was einen deutlichen Zusammenhang beweist. Allerdings stehen dem 10.58% gegenüber, zwischen denen eine negative Korrelation besteht. Bei den restlichen 52.91% kann kein signifikanter Zusammenhang zwischen den beiden Datensätzen festgestellt werden. Der durchschnittliche Korrelationskoeffizient liegt bei 0.23.

Die folgende Abbildung 7.8 zeigt den Mittelwert des Korrelationskoeffizienten über einen Zeitraum von

	Anzahl	Prozentanteil
Insgesamt	841	100%
Koeffizient > 0.6	307	36.50%
Koeffizient < -0.6	89	10.58%
sonst. Koeffizient	445	52.91%

Tabelle 7.1: Statistik der täglichen Korrelation

einem Monat. Dabei nimmt der Anteil der Gebiete mit einem Koeffizienten über 0.6 deutlich ab, wie die Tabelle 7.2 zeigt.

	Anzahl	Prozentanteil
Insgesamt	841	100%
Koeffizient > 0.6	139	16.52%
Koeffizient < -0.6	22	6.31%
sonst. Koeffizient	445	80.85%

Tabelle 7.2: Statistik der monatlichen Korrelation

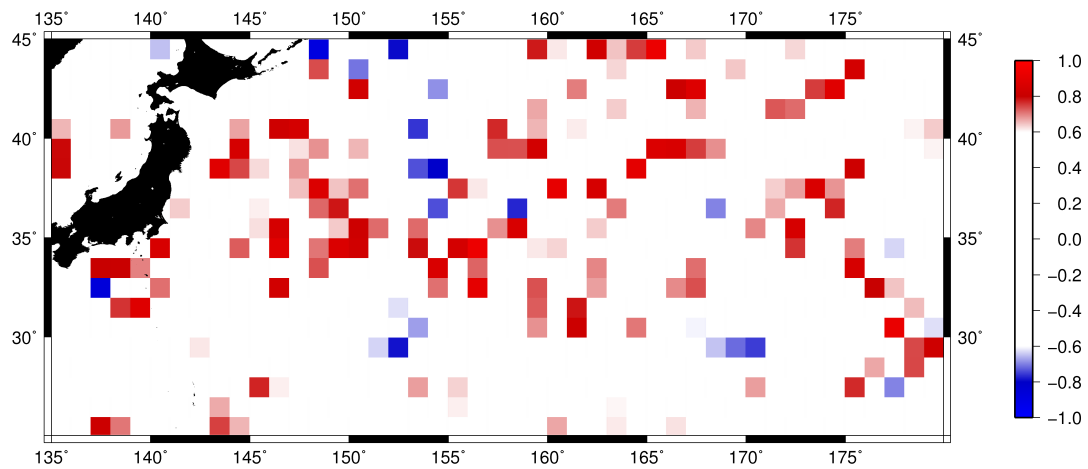


Abbildung 7.8: Korrelation zwischen SST und SLA über den Zeitraum von 01.07.2006 - 30.07.2006

Anhand dieser Erkenntnisse ist anzunehmen, dass vor allem in Gebieten, in denen wenig Variabilität herrscht, ein signifikanter Korrelationskoeffizient vorliegt. Im Bereich um 35°N/150°E zeigen Animationen, dass sich dort stehende Eddies befinden. Dort bleibt auch über einen längeren Zeitraum eine hohe Korrelation zwischen den beiden Datensätzen bestehen.

Kapitel 8

Ergebnisse und Ausblick

Die Erkenntnisse aus den vorherigen Kapiteln werden in diesem Kapitel "Ergebnisse" erläutert. Dabei werden Ergebnisse aus der Segmentierung, dem Tracking und dem Zusammenhang zwischen den Altimeterdaten und den Meeresoberflächentemperaturdaten diskutiert.

8.1 Die Segmentierung

In dieser Arbeit wurden die folgenden drei Algorithmen verwendet, um die Eddies möglichst genau zu segmentieren.

- "Chain"-Algorithmus
- Watershed Transformation
- Flächenapproximationsverfahren

Das Ergebnis zeigt, dass eine Segmentierung mit allen drei Verfahren erfolgreich durchgeführt werden konnte. Allerdings gibt es Unterschiede in den Segmentierungsergebnissen der einzelnen Verfahren, wie im Folgenden zu sehen ist.

8.1.1 "Chain"-Algorithmus

Die Ergebnisse des "Chain"-Algorithmus zeigen eine erfolgreiche Segmentierung bei SLA- und SST-Daten. Die Resultate zeigen gefundene Eddies mit einem Schwellwert von $\pm 2^\circ\text{C}$ bzw. $\pm 0.2\text{m}$ und einem Umfang von 150 - 1500 km, wobei ein Quantisierungsintervall von 0.33 bzw. 0.05 verwendet wurde.

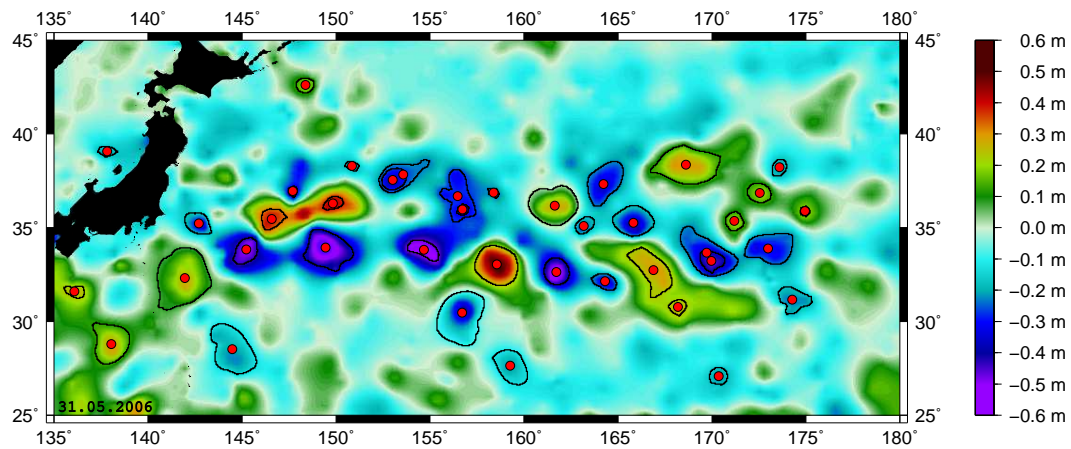


Abbildung 8.1: Ergebnis des "Chain"-Algorithmus in SLA-Daten

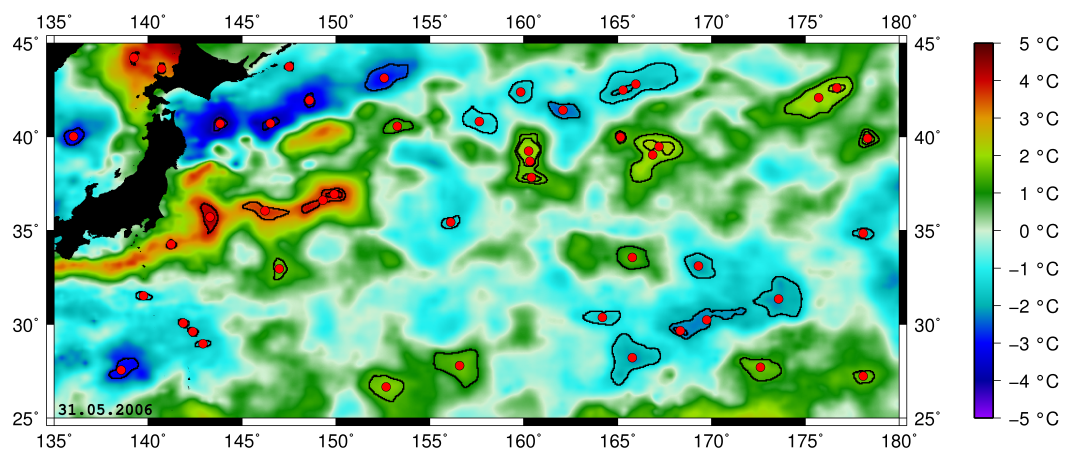


Abbildung 8.2: Ergebnis des "Chain"-Algorithmus in SST-Daten

Im Folgenden werden die Vor- und Nachteile des "Chain"-Algorithmus beschrieben.

Vorteile:

- **Genauigkeit:** Durch das geeignete Quantisierungsintervall werden je nach Größe des Eddies mehrere Isolinien gefunden, die durch Clustering zu einer verschmelzen und zu einem gefestigten Ergebnis führen.
- **Ränder:** Die Ränder der Eddies werden bereits während der Segmentierung erzeugt und müssen nicht gesondert erstellt werden. Von den drei betrachteten Algorithmen sind die Ränder des



Eine Animation der Segmentierung mit dem “Chain”-Algorithmus in SLA-Daten bzw. SST-Daten befindet sich auf der beiliegenden DVD unter /animations/chain_sla.mpg bzw. /animations/chain_sst.mpg.

“Chain”-Algorithmus am präzisesten.

- **Performance:** Der “Chain”-Algorithmus besitzt im Vergleich zu den beiden anderen Verfahren die beste Performance.

Nachteile:

- Ein schlecht gewähltes Quantisierungsintervall kann zu einem schlechten Segmentierungsergebnis führen. Für jeden Datensatz muss das geeignete Intervall erst gesucht werden.

8.1.2 Watershed-Transformation

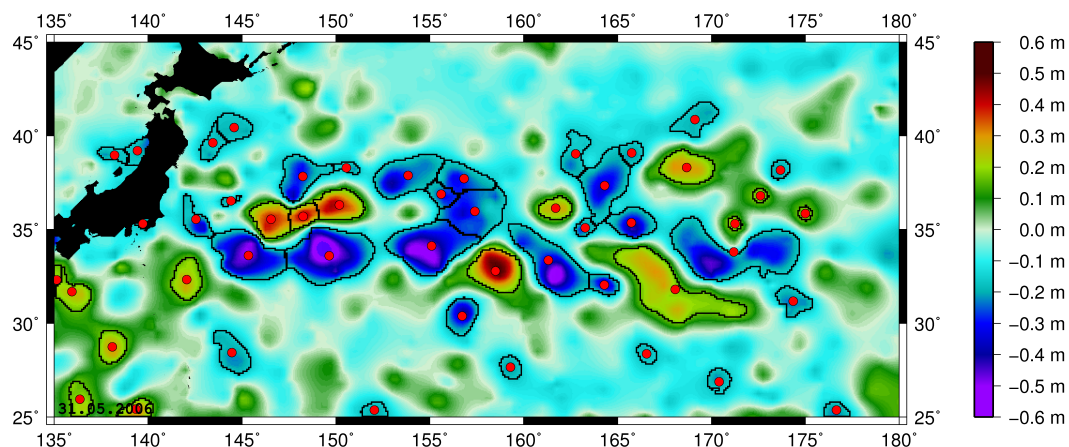


Abbildung 8.3: *Ergebnis der Watershed-Transformation in SLA-Daten*

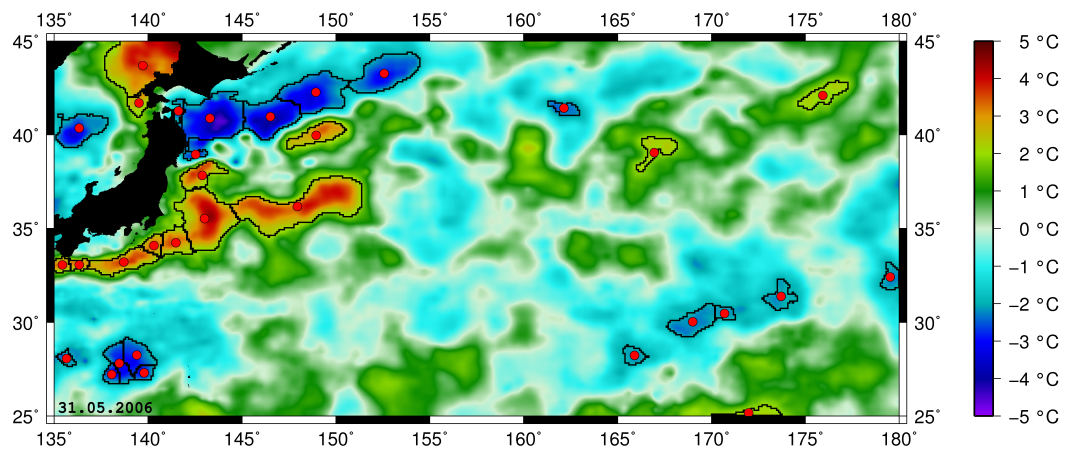


Abbildung 8.4: *Ergebnis der Watershed-Transformation in SST-Daten*



Eine Animation der Segmentierung mit der Watershed-Transformation in SLA-Daten bzw. SST-Daten befindet sich auf der beiliegenden DVD unter `/animations/watershed_sla.mpg` bzw. `/animations/watershed_sst.mpg`.

Vorteile:

- **Ränder:** Die Ränder der Eddies werden bereits während der Segmentierung erzeugt und müssen nicht gesondert erstellt werden.

Nachteile:

- **Performance:** Da die Watershed Transformation ein pixelbasierter Algorithmus ist, nimmt die Performance deutlich mit der Größe des zu segmentierenden Bereichs ab.

8.1.3 Flächenapproximationsverfahren

Die Segmentierung mit dem Flächenapproximationsverfahren brachte im Vergleich zu den beiden vorherigen Verfahren das eindeutig beste Ergebnis, wie in der Abbildung 8.5 zu sehen ist. Das Ergebnis nach dem Clustering führte zu einer fast vollständig korrekten Segmentierung.

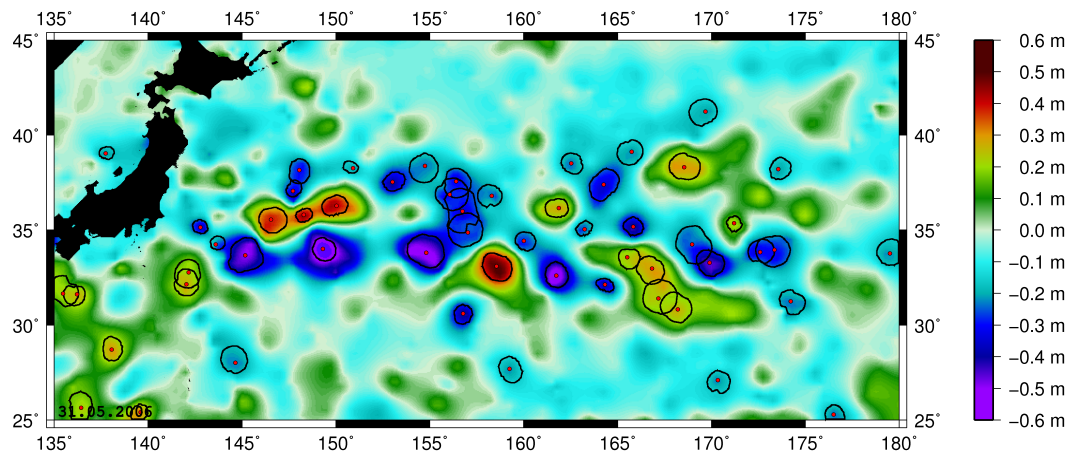


Abbildung 8.5: *Ergebnis des Flächenapproximationsverfahren in SLA-Daten*

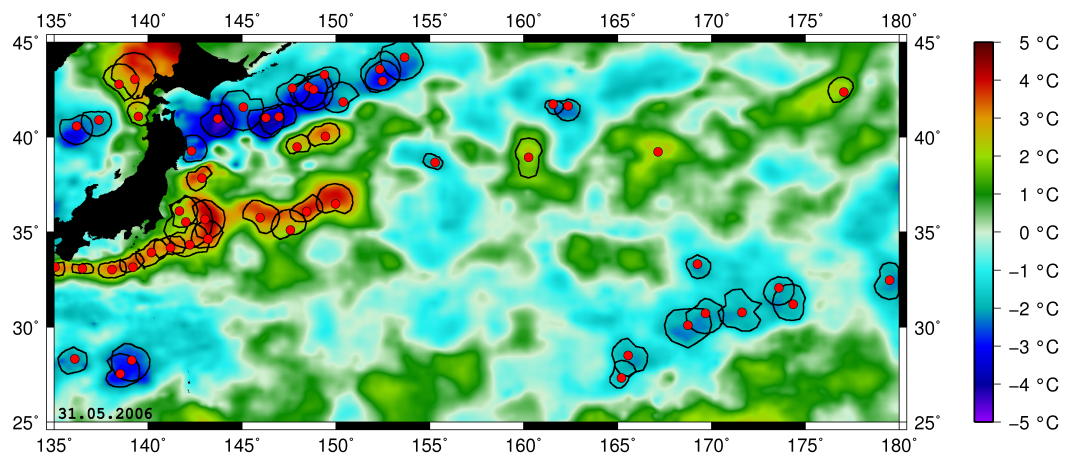


Abbildung 8.6: *Ergebnis des Flächenapproximationsverfahren in SST-Daten*

Durch die mögliche Veränderung der Parameter

- Rastergröße,
- Schrittweite,
- Schwellwert,
- Umfang,



Eine Animation der Segmentierung mit dem Flächenapproximationsverfahren in SLA-Daten befindet sich auf der beiliegenden DVD unter /animations/fav_sla.mpg.

lässt sich dieses Verfahren leicht auf zukünftige Datensätze anwenden. Somit können auch Datensätze mit einer höheren räumlichen Auflösung, die kleinere Eddies beinhalten, erfolgreich segmentiert werden.

Vorteile:

- **Genauigkeit:** Die gefundenen Zentrumsunkte entsprechen sehr exakt den Maxima oder Minima der Eddies.

Nachteile:

- **Ränder:** Die Ränder der Eddies müssen nach der Segmentierung anhand der gefundenen Extrempunkte gesondert berechnet werden.

8.2 Das Tracking

Das kürzeste Abstands Verfahren zeigt in seiner Anwendung ein sehr gutes Ergebnis bei der Verfolgung und Zuordnung von Eddies. Allerdings traten trotzdem Probleme beim Tracking auf, die nicht durch den Trackingalgorithmus verursacht wurden. Diese Probleme wurden in der Regel von den jeweiligen Schwächen der Segmentierungsalgorithmen beeinflusst. Für das Tracking werden in der Regel die Mittelpunkte der Eddies verwendet. Verändert sich die Struktur von Eddies in einem Schritt jedoch relativ stark, kann es vorkommen, dass der neue Mittelpunkt außerhalb des Suchradius liegt. Dieses Problem kann mit dem "Chain"-Algorithmus und der Watershed Transformation auftreten gelöst werden, da dort der Mittelpunkt über den Rand des Eddies erzeugt wird. Beim Flächenapproximationsverfahren werden dagegen die Extrempunkte verwendet, die sich nicht so stark bewegen. Im Punkt "Ausblick" werden Möglichkeiten erläutert, um die Ergebnisse in Zukunft zu verbessern.

8.3 Ausblick

Diese Arbeit zeigt, dass es grundsätzlich möglich ist, mit Daten der Satellitenaltimetrie oder der Meeresoberflächentemperaturen erfolgreich die Lage von Eddies zu erkennen und zu verfolgen. Da eine Verbesserung der Ergebnisse in Zukunft durchaus möglich ist, werden im Folgenden einige Aspekte zur Verbesserung des Ergebnisses beschrieben.

Verbesserung der Daten

Ein Vergleich der SLA- und SST-Daten unter Verwendung von ARGO-Floatern zeigte, dass zwischen den beiden Datensätzen kein signifikanter Zusammenhang besteht. Die segmentierten Eddies in den Altimeterdaten und den ARGO-Floatern zeigte eine gute Übereinstimmung im Bewegungsablauf. Durch

die Kombination der verwendeten Jason-1 Daten mit Altimetersatelliten wie ERS-1/2, Envisat, usw., könnten hochwertigere Daten zur Segmentierung erzeugt werden, was zu einer weiteren Verbesserung des Ergebnisses führen würde. Eine weitere Möglichkeit zur Verbesserung der Ausgangsdaten wäre die Kombination der SLA-Daten z.B. mit Winddaten, wie in der Veröffentlichung [FLP04] beschrieben ist.

Verbesserung der Segmentierung

Jeder der drei betrachteten Algorithmen brachte ein erfolgreiches Ergebnis bei der Segmentierung von Eddies. Allerdings beinhaltet jedes Verfahren seine Vor- und Nachteile. Durch Kombination geeigneter Verfahren könnten die Ergebnisse der Segmentierung besser und das Verfahren robuster werden. Werden die jeweiligen Stärken der einzelnen Verfahren berücksichtigt und aufgenommen, könnte man den "Chain"-Algorithmus für die Segmentierung der Eddieränder und das Flächenapproximationsverfahren zur Berechnung des Extremums verwenden. Dadurch ließen sich sowohl Fehler in der Segmentierung als auch beim Tracking verringern.

Konzept für "Echtzeit"-Betrieb

In der Einleitung wurde bereits beschrieben, dass neben wirtschaftlichen auch wissenschaftliche Aspekte für die Segmentierung von Eddies wichtig sind. Diese Anwendung kann z.B. für die Planung von Schiffrouten oder die Wahl von Fischfangplätzen eingesetzt werden. Aus diesem Grund sollen die Information über vorhandene Eddies möglichst in naher Echtzeit dem Kunden zur Verfügung stehen.

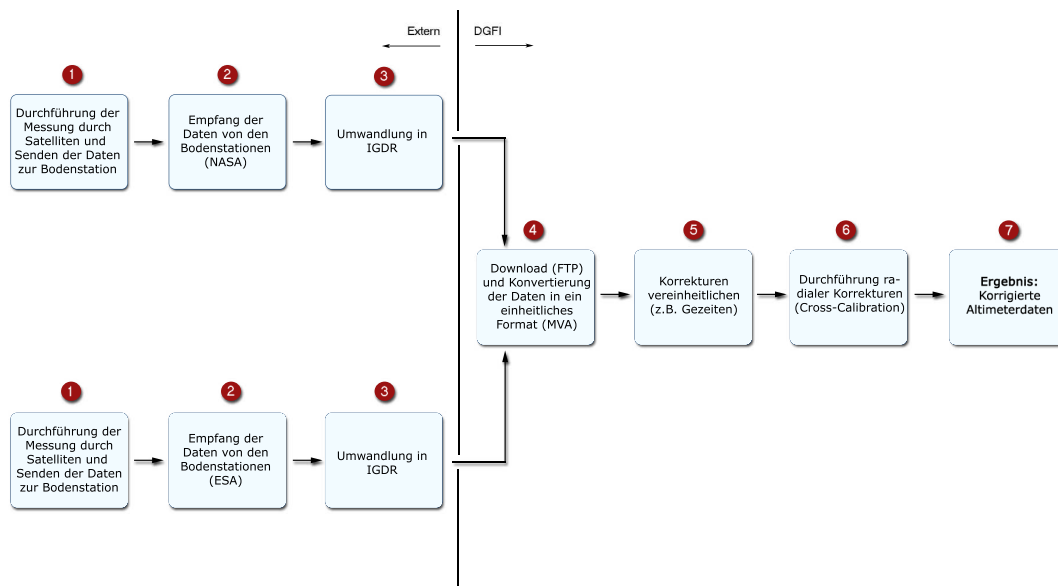


Abbildung 8.7: Konzept zur nahen Echtzeitsegmentierung - Teil 1

Die Abbildung 8.5 zeigt die Schritte von der Messung bis zu den korrigierten Altimeterdaten. Die Schritte 1 - 3 werden nicht im DGFI, sondern von den jeweiligen Organisationen (z.B. ESA oder NASA), die

die Satellitenmission betreuen, durchgeführt. Zu Beginn werden vom Satelliten die Messungen durchgeführt und an die verschiedenen Bodenstationen gesendet. Danach werden die Daten der Bodenstationen gesammelt und in das Datenformat IGDR (Immediate Geophysical Data Record) umgewandelt. Diese Daten stellt die jeweilige Organisationen zur Verfügung. Die Dauer vom Zeitpunkt der Messung bis zur Auslieferung beträgt 3 Stunden.

Ab dem vierten Schritt werden weitere Berechnungen vom DGFI durchgeführt. Die Daten der verschiedenen Missionen werden zunächst per FTP heruntergeladen und in ein einheitliches Datenformat (MVA) umgewandelt. Im Schritt 5 werden einheitliche Korrekturen auf die verschiedenen Missionen angewendet, um bei der späteren Kombination die Fehler zu minimieren. Eine Korrektur wird beispielsweise für die Gezeiten durchgeführt. Im Schritt 6 wird eine radiale Korrektur mittels Cross-Calibration angewandt, um den Fehler der Bahnsuren zu minimieren. Nach Durchführung der diversen Korrekturen erhält man für jede Mission korrigierte Altimeterdaten. Die Korrekturen in Schritt 5 und 6 benötigen jeweils eine Rechenzeit von ca. 30 Minuten, da sie global durchgeführt werden. Diese Daten werden im weiteren Verlauf für die Segmentierung verwendet.

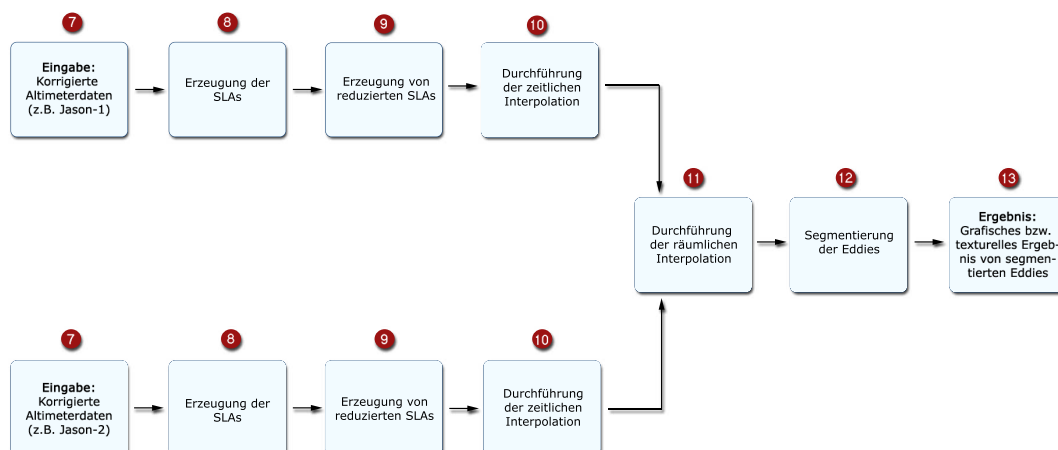


Abbildung 8.8: Konzept zur nahen Echtzeitsegmentierung - Teil 2

In Teil 2 des Konzeptes werden die Schritte von den korrigierten Altimeterdaten bis zum Ergebnis für den Kunden beschrieben. Die Eingangsdaten werden zunächst im Schritt 8 in SLA-Daten umgewandelt. Dies erfolgt durch Subtraktion der mittleren Meeresoberfläche von den Eingangsdaten. Für die Erzeugung von reduzierten SLA-Daten werden in Schritt 9 saisonale oder säkulare Entwicklungen von den SLA-Daten abgezogen. Dies erfolgt z.B. durch die Trendberechnung, PCA oder harmonische Analyse, wobei auf existierende Modelle zurückgegriffen wird. Im nächsten Schritt wird für jede Mission eine zeitliche Interpolation (z.B. 2 Tage) durchgeführt. Bei der räumlichen Interpolation werden die zeitlich

Interpolierten Daten der einzelnen Missionen kombiniert, wobei ein Gittermodell entsteht. Im Schritt 12 wird die in Kapitel 5 beschriebene Segmentierung durchgeführt. Die daraus resultierenden Segmentierungsergebnisse können grafisch oder textuell für den Kunden mit einer grafischen Benutzeroberfläche dargestellt werden.

8.4 Fazit

Diese Masterarbeit zeigt, dass eine erfolgreiche Segmentierung und Verfolgung von Eddies durchgeführt werden kann. Bei der Segmentierung von Eddies konnten die in [IG02] beschriebenen Merkmale wie Ausbreitung und Lebenszeit bestätigt werden. Allerdings konnten nicht alle Formen von Eddies, die in Tabelle 5.1 gezeigt wurden erkannt werden. Auf Grund der großen Bahnspurabstände und der Interpolation der Altimeterdaten ist es derzeit noch nicht möglich, feinere Strukturen von Eddies zu erkennen. Die Veröffentlichung [NLDSMT03] untersuchte den Zusammenhang zwischen SST- und SLA-Daten im Mittelmeer. Dabei wurde ein Korrelationskoeffizient von 0.57 festgestellt. In dieser Arbeit wurden beide Datensätze im Bereich des Kuroshio miteinander verglichen. Dabei konnte gezeigt werden, dass ca. 36.5% des betrachteten Bereiches einen Koeffizienten größer als 0.6 besitzt. Allerdings lag die durchschnittliche Korrelation bei etwa 0.23. Dieser geringe Wert hängt höchstwahrscheinlich mit der hohen Variabilität im Kuroshio zusammen. Gegenden mit wenig Eddybewegung wie z.B. das Mittelmeer weisen dagegen eine hohe Korrelation auf.

Die Ergebnisse der Segmentierung und Verfolgung anhand der Altimetermission Jason-1 zeigen, dass die Algorithmen trotz des großen Bahnspurabstandes von ca. 310 km ein gutes Resultat liefern. Durch die Kombination mehrerer Missionen wird der Bahnspurabstand deutlich reduziert, so dass bei der Segmentierung ein noch besseres Ergebnis erzielt werden kann.

Als Fazit dieser Masterarbeit zeigt es sich, dass die Ziele zur Segmentierung und Verfolgung von Eddies erfolgreich erfüllt wurden. Es besteht über die Masterarbeit hinaus noch Potential, wie im Punkt "Ausblick" beschrieben ist, um auf den bereits erzielten Ergebnissen aufbauen zu können, um eine Segmentierung der Eddies noch effizienter zu gestalten.

Kapitel 9

Tools

Im folgenden Kapitel werden die Tools PCA und EddyTracker vorgestellt, die während dieser Arbeit entwickelt wurden. Das Programm PCA ermöglicht im Schritt der Vorverarbeitung der Daten die Durchführung der Principle Component Analysis. Der EddyTracker besitzt die Fähigkeit, die Segmentierung und Verfolgung von Eddies mit den in Kapitel 5 und Kapitel 6 beschriebenen Algorithmen anhand von SST und SLA-Daten durchzuführen.

9.1 PCA

Im Schritt der Vorverarbeitung von Daten können mit Hilfe des PCA-Tools harmonische Schwingungen aus den Daten herausgerechnet werden, um z.B. saisonale Schwingungen herauszurechnen. Das Programm basiert auf den bereits in Kapitel 5.3.1 vorgestellten Algorithmen.

9.1.1 Anforderungen

Das Programm zur Berechnung der PCA benötigt einen Python-Interpreter und das Generic Mapping Tool (GMT). Für die mathematischen Berechnungen (z.B. Singulärwerzerlegung) ist die auf LAPACK basierende Python-Bibliothek Numpy nötig.

9.1.2 Programmbeschreibung

Das PCA-Tool ist in die Bereiche Analyse, Synthese und Ergebnisse aufgeteilt.

Analyse

Im Bereich Analyse wird die eigentliche Principle Component Analysis durchgeführt. Dabei kann gewählt werden, ob zudem eine harmonische Analyse durchgeführt werden soll.

Synthese

Im Bereich der Synthese können Ergebnisse der PCA rekonstruiert werden. Für die Synthese kann ein beliebiger Mode-Bereich gewählt werden. Die restlichen Modes werden in der Synthese nicht

berücksichtigt.

Ergebnisse

Die Ergebnisse der PCA lassen sich im Textformat oder grafisch darstellen. Die Abbildung 9.2a zeigt die grafische Darstellung eines Modes. Dabei werden die Hauptkomponenten als Funktion über die Zeit und Eigenvektoren in einer Karte dargestellt. Zu jedem Mode wird der Anteil an der gesamten Variation angegeben.

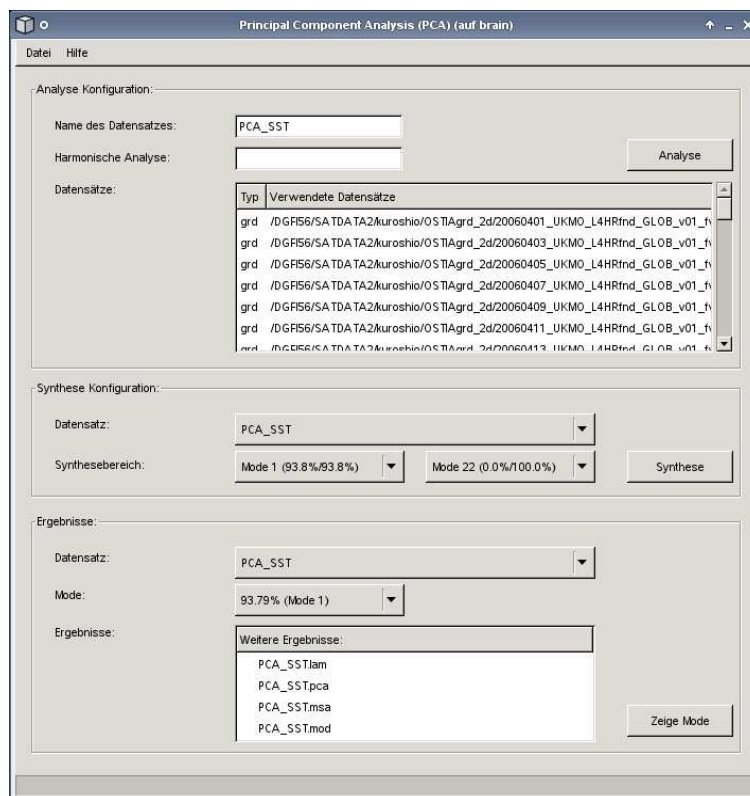


Abbildung 9.1: Hauptansicht des PCA-Tools

Neben der Darstellung der Modes können auch Ergebnismatrizen, die während der PCA berechnet wurden, betrachtet werden. Es folgt eine kurze Beschreibung der Ergebnismatrizen.

PCA-Matrix:

1.Spalte: Datum (julianisches Datum seit 2000)

ab 2.Spalte: Hauptkomponenten jedes Modes beginnend bei Mode 1 in der zweiten Spalte.

LAM-Matrix (Abbildung 9.2b) :

1.Spalte: Index von 1 bis Anzahl der Datensätze

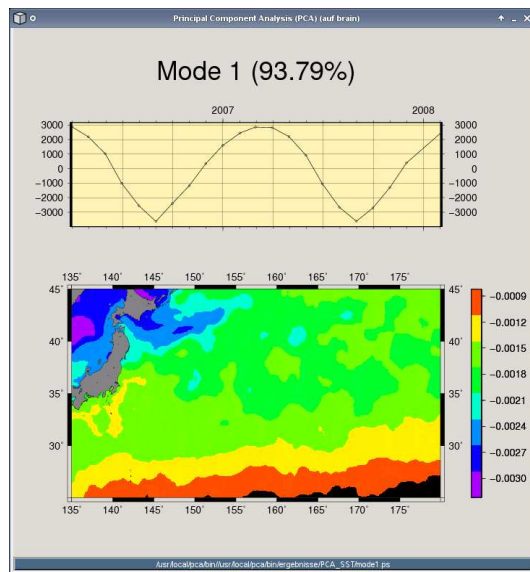
- 2.Spalte: Eigenwerte
- 3.Spalte: Anteil an der gesamten Variation
- 4.Spalte: Kummulierter Anteil der Gesamtschwingung

MSA-Matrix:

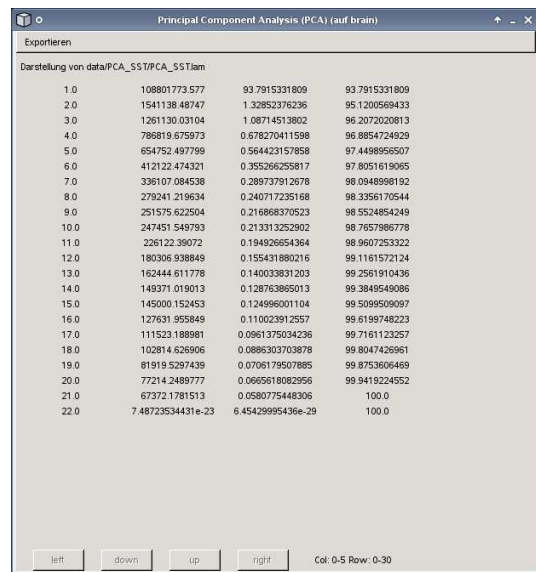
- 1.Spalte: Longitude
- 2.Spalte: Latitude
- 3.Spalte: Standardabweichung
- 4.Spalte: Mittelwert

MOD-Matrix

- 1.Spalte: Longitude
- 2.Spalte: Latitude
- ab 3.Spalte: Eigenvektoren jedes Modes beginnend bei Mode 1 in der dritten Spalte.



(a) Darstellung eines Mode 1



(b) Darstellung einer LAM-Matrix

Abbildung 9.2: Ergebnisse der PCA



Das Tool PCA befindet sich auf der beiliegenden DVD im Verzeichnis /tools/pca/.

9.2 EddyTracker

Der EddyTracker ist ein Programm zur Segmentierung und Verfolgung von Eddies. Die in den Kapiteln 5 und 6 beschriebenen Verfahren zur Segmentierung und Verfolgung von Eddies sind im EddyTracker implementiert.

9.2.1 Anforderungen

Für die Verwendung des EddyTrackers ist ein Python-Interpreter und das Generic Mapping Tool (GMT) nötig.

9.2.2 Programmbeschreibung

Im Folgenden wird der Programmablauf zu erfolgreichen Anwendung des EddyTrackers erläutert.

Schritt 1: Daten importieren

Im Menü unter Datei > Importieren müssen zunächst die SLA- oder SST-Daten importiert werden. Die importierten Daten werden auf der linken Seite des EddyTrackers angezeigt und es besteht die Möglichkeit, die gewünschten Datensätze auszuwählen.

Schritt 2: Bereich auswählen

In diesem Schritt muss der Bereich festgelegt werden, in dem die Segmentierung und das Tracking durchgeführt werden sollen.

Schritt 3: Auswahl des Segmentierverfahren

Die Auswahl der Segmentierung erfolgt zwischen den folgenden drei Verfahren:

- "Chain"-Algorithmus
- Watershed-Transformation
- Flächenapproximationsverfahren

Für jedes Verfahren lassen sich die verschiedensten Konfigurationen vornehmen, die in der Tabelle 9.1 übersichtlich aufgelistet sind.

Nach Auswahl der Konfiguration des gewählten Verfahrens, kann die Berechnung gestartet werden.

Schritt 4: Ergebnisse

Die Ergebnisse werden nach der Berechnung mit GMT dargestellt. Zudem werden die Ergebnisse in dem Verzeichnis `results/` in dem Ordner mit entsprechendem Datum und Zeit gespeichert.

	“Chain” - Algorithmus	Watershed Transform- ation	Flächenapproximations- verfahren
Datentyp	SLA/SST	SLA/SST	SLA/SST
Trend	Ja	Ja	Ja
Quantisierung	Ja	Nein	Nein
Schwellwert	Ja	Ja	Ja
Umfang	Ja	Ja	Ja
Rastergröße	Nein	Nein	Ja
Schrittweite	Nein	Nein	Ja
Floater	Ja	Ja	Ja
Clustering	Ja	Nein	Ja
Tracking	Ja	Ja	Ja
usw	usw	usw	usw

Tabelle 9.1: Übersicht der Optionen zur Konfiguration

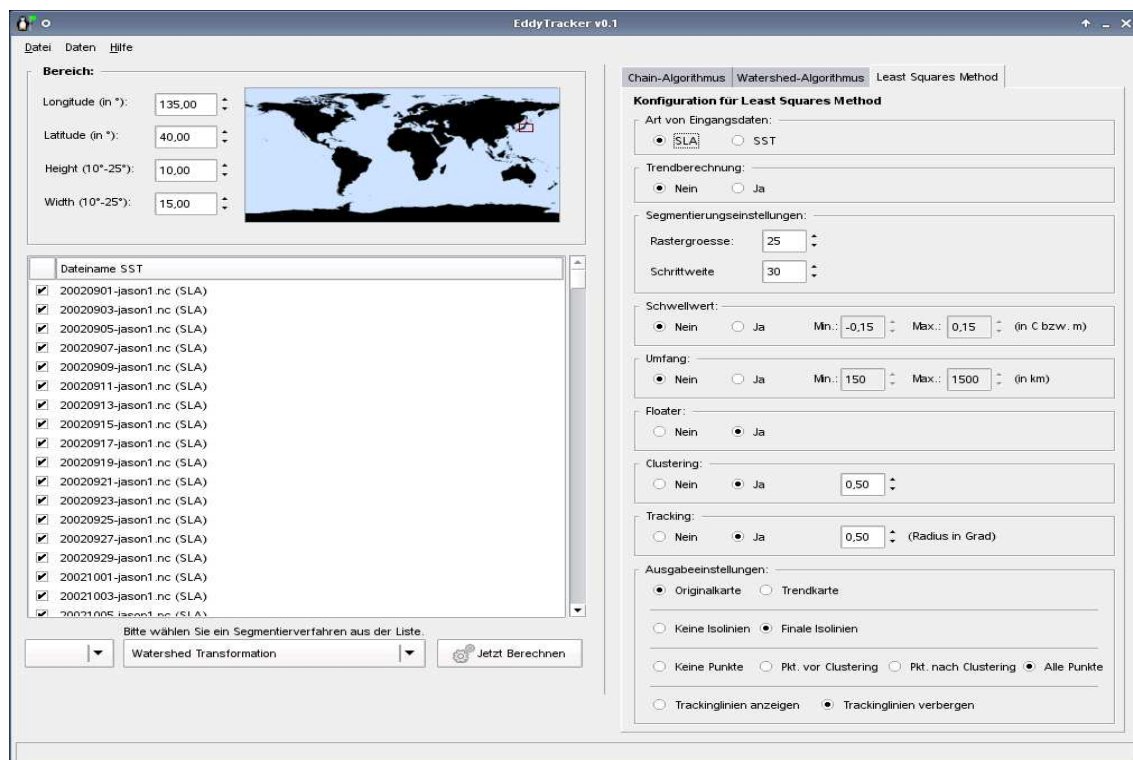


Abbildung 9.3: Hauptansicht des PCA-Tools



Das Tool EddyTracker befindet sich auf der beiliegenden DVD im Verzeichnis /tools/eddytracker/.

Kapitel 10

Glossar

ATSR	Along Track Scanning Radiometer
AVHRR	Advanced Very High Resolution Radiometer
DORIS	Doppler Orbitography and Radiopositioning Integrated by Satellite
ERS	European Remote Sensing
GFO	Geosat Follow-On
GHRSSST	GODAE High Resolution Sea Surface Temperatur
GODAE	Global Ocean Data Assimilation Experiment
JERS	Japanese Earth Resources Satallite
JMR	Jason Microwave Radiometer
NASA	National Aeronautics and Space Administration
NCEP	National Centeres for Environmental Prediction
NOAA	National Oceanic and Atmospheric Administration
OSTIA	Operational Sea Surface Temperature and Sea Ica Analysis
PCA	Principle Component Analysis
SAR	Synthetic Aperature Radar
SLA	Sea Level Anomalies
SST	Sea Surface Temperature

Literaturverzeichnis

- [P88] Preisendorfer R.W. (1988). *Principal Component Analysis in Meteorology and Oceanography* Elsevier Science Publishers B.V.
- [T85] Tolmazin D. (1985). *Elements of Dynamic Oceanography* Kluwer Academic Publishers
- [B01] Bosch W. (2001) *EOF-Analysen der Meeresspiegel-Schwankungen im Pazifik* In: Zeitschrift für Vermessungswesen (ZfV), Jg.126, Nr.2, pp. 74-81, 2001
- [B91] Beucher S. (1991) *The watershed transformation applied to image segmentation* In: Conference on Signal and Image Processing in Microscopy and Microanalysis, pp. 299-314, 1991
- [BTJS03] Balasubramanian R., Tandon A., John B., and Sood V. (2003). *Detecting and tracking of mesoscale oceanic features in the miami isopycnic circulation ocean model*. In: Proceedings of the 3rd IASTED International Conference Visualization, Imaging, and Image Processing Science, 2003
- [GLP04] Friedmann K.S., Li X., and Pichel W.G. (2004) *Eddy detection using RADARSAT-1 synthetic aperture radar* In: Geoscience and Remote Sensing Symposium, Vol 7, pp. 4707-4710, 2004
- [FN06] Fernandes A.M., and Nascimento S. (2006). *Automatic Water Eddy Detection in SST Maps Using Random Ellipse Fitting and Vectorial Fields for Image Segmentation* In: Discovery Science 2006, Lecture Notes in Computer Science 4265, pp. 77-88, Springer Verlag Berlin Heidelberg, 2006
- [GSFC01] NASA/Goddard Space Flight Center - EOS Project Science Office (2001, April 16). Satellite Spots Unique Ocean Eddy And A Bounty Of Food For Fish. *ScienceDaily*. Retrieved May 13, 2008, from <http://www.sciencedaily.com/releases/2001/04/010415224151.htm>
- [IG02] Ivanov A.Y., and Ginzburg A.I. (2002). *Oceanic eddies in synthetic aperture radar images*. In: Earth Planet Science, 111, pp. 281-295, 2002
- [IM03] Ivanov L.M., and Melnichenko O.V. (2004). *HF Radar Detects Submesoscale Spiral Eddies in Monterey Bay*. In: Geoscience and Remote Sensing Symposium, Vol. 4, pp. 2682-2684, 2003
- [KAK97] Knudson P., Andersen O.B., and Knudson T. (1997). *Annual cycles of ERS-1 altimetric sea surface height data and ATSR sea surface temperature data* In: Third ERS Symposium on Space at the service of our environment, Vol. 3, pp. 1349-1353, 1997

- [NLDSMT03] Buomgiorno Nardelli B., Larnicol G., D'Acunzo E., Santoleri R., Marullo S., and Le Traon P.Y. (2003) *Near Real Time SLA and SST products during 2-years of MFS pilot project: processing, analysis of the variability of the coupled patterns*. In: Annales Geophysicae 2003, Vol. 21, pp. 103-121, 2003
- [NSF05] National Science Foundation (2005, October 4). Gulf Warm-water Eddies Intensify Hurricane Changes. *ScienceDaily*. Retrieved May 13, 2008, from <http://www.sciencedaily.com/releases/2005/10/051004083920.htm>
- [QBS04] Quartly G.D., Buck J.J.H., and Srokosz (2004). *Eddy variability east of Madagascar*. In: Philosophical Transaction of the royal society, 363, pp. 77-79, 2004
- [SDMM07] Stark J.D., Donlon C.J., Martin M.J., and M.E. McCulloch (2007). *OSTIA: An operational, high resolution, real time, global sea surface temperature analysis system*.
- [RBLMP06] Rosmorduc V., Benveniste O., Milagro M., and Picot N. (2006). *Radar Alimetry Tutorial*. Retrieved May 14, 2008, from <http://www.altimetry.info>, 2006
- [ARGO1] ARGO - Part of the integrated global observation strategy *Übersicht von Floatern*. Received May 30, 2008, from <http://www-hrx.ucsd.edu/www-argo/statusbig.gif>
- [ARGO1] ARGO - Part of the integrated global observation strategy *Phasen des Zyklus*. Received May 30, 2008, http://www.argo.ucsd.edu/FrHow_Argo_floats.html 30.5.08
- [AVHRR] Jet Propulsion Laboratory - California Institut of Technology (NASA) *AVHRR Pathfinder SST v5* Retrieved May 14, 2008 from ftp://podaac.jpl.nasa.gov/pub/sea_surface_temperature/avhrr/pathfinder/data_v5/
- [GFO1] The GFO Spacecraft and Mission Design. Retrieved Jun 03, 2008 from <http://gfo.bmpcoe.org/Gfo/Mission/missiond.htm>
- [GHRSSST-PP] GODAE High Resolution Sea Surface Temperature Pilot Project (GHRSSST-PP). *OSTIA-Data from 2006/04 - today* Retrieved May 13, 2008 from <http://www.ghrsst-pp.metoffice.com/data/OSTIA/index.htm>
- [NECP] Jet Propulsion Laboratory - California Institut of Technology (NASA) *NCEP Reynolds Optimally Interpolated Sea Surface Temperature Data Sets* Retrieved May 14, 2008 from ftp://podaac.jpl.nasa.gov/pub/sea_surface_temperature/reynolds/oisst/

Abbildungsverzeichnis

1.1. Strömungen in den Ozeanen [T85]	5
4.1. NCEP vom 31.05.2006 mit wöchentlichem Mittelwert	14
4.2. AVHRR vom 01.06.2006 ohne Interp. mit Lücken und deutlich sichtbaren Strukturen	15
4.3. AVHRR vom 01.06.2006 nach Interp. ohne Lücken und keine erkennbaren Strukturen	15
4.4. OSTIA vom 01.06.2006 SST	17
4.5. Übersicht von Altimetermissionen seit 1990	19
4.6. Bahnsuren von Jason-1	22
5.1. Originaldaten (SST) vom 01.06.2006 (Kuroshio-Strom)	25
5.2. Originaldaten (SLA) vom 31.05.2006 (Kuroshio-Strom)	25
5.3. Hauptkomponenten von Mode 1 (93,8%) ohne harm. Analyse	29
5.4. Eigenvektoren von Mode 1 ohne harm. Analyse	29
5.5. Hauptkomponenten von Mode 2 (1,2%) ohne harm. Analyse	30
5.6. Eigenvektoren von Mode 2 ohne harm. Analyse	30
5.7. Hauptkomponenten von Mode 1 (32,0%) mit harm. Analyse	31
5.8. Eigenvektoren von Mode 1 mit harm. Analyse	31
5.9. Hauptkomponenten von Mode 2 (11,1%) mit harm. Analyse	32
5.10. Eigenvektoren von Mode 2 mit harm. Analyse	32
5.11. Vergleich der Ergebnisse der PCA mit und ohne harmonischer Analyse	33
5.12. Originaldaten (SST) vom 01.06.2006 zeigt den Kuroshio-Strom	34
5.13. Darstellung des nach Methode der kleinsten Quadrate berechneten Trends	35
5.14. Darstellung nach Subtraktion des Trends vom 01.06.2006	36
5.15. Quantisierung mit 1 °C und 0.2 °C	37
5.16. Schritte zur Extraktion von Isolinien	38
5.17. Darstellung von gefundenen Isolinien und deren Mittelpunkt	39
5.18. Darstellung der Eddies nach Clustering und deren Mittelpunkt	40
5.19. Ergebnis mit Chain Algorithmus und SST-Daten	41
5.20. Ergebnis mit Chain Algorithmus und SLA-Daten	41
5.21. Watershed Transformation mit Schwellwert	42
5.22. Segmentierungsergebnis ohne Schwellwert und Umfang mit SLA-Daten	43
5.23. Segmentierungsergebnis mit Schwellwert und Umfang mit SLA-Daten	43

5.24. Original	44
5.25. Ergebnis mit quadratischem Ansatz	45
5.26. Ergebnis mit kubischem Ansatz	47
5.27. Beispiel 01 - Vergleich von quad. und kubischem Ansatz	48
5.28. Beispiel 02 - Vergleich von quad. und kubischem Ansatz	48
5.29. Beispiel 03 - Vergleich von quad. und kubischem Ansatz	49
5.30. Beispiel 04 - Vergleich von quad. und kubischem Ansatz	49
5.31. Beispiel 05 - Vergleich von quad. und kubischem Ansatz	50
5.32. Richtungen zur Berechnung der Ränder	51
5.33. Ergebnis nach Clustering mit kubischem Ansatz	52
6.1. Fusion von Eddies	55
6.2. Tracking	56
7.1. Übersicht der Floater [ARGO1]	57
7.2. Phasen eines Floaters [ARGO2]	58
7.3. Floater in SLA-Daten	59
7.4. Floater in SST-Daten	60
7.5. SST-Daten nach Trendberechnung vom 01.07.2006	61
7.6. SLA-Daten nach Trendberechnung vom 01.07.2006	61
7.7. Korrelation zwischen SST und SLA am 01.07.2006	62
7.8. Korrelation zwischen SST und SLA über den Zeitraum von 01.07.2006 - 30.07.2006	64
8.1. Ergebnis des "Chain"-Algorithmus in SLA-Daten	66
8.2. Ergebnis des "Chain"-Algorithmus in SST-Daten	66
8.3. Ergebnis der Watershed-Transformation in SLA-Daten	67
8.4. Ergebnis der Watershed-Transformation in SST-Daten	68
8.5. Ergebnis des Flächenapproximationsverfahren in SLA-Daten	69
8.6. Ergebnis des Flächenapproximationsverfahren in SST-Daten	69
8.7. Konzept zur nahen Echtzeitsegmentierung - Teil 1	71
8.8. Konzept zur nahen Echtzeitsegmentierung - Teil 2	72
9.1. Hauptansicht des PCA-Tools	75
9.2. Ergebnisse der PCA	76
9.3. Hauptansicht des PCA-Tools	78

Tabellenverzeichnis

4.1. Eigenschaften von NCEP Daten	13
4.2. Eigenschaften von AVHRR Daten	14
4.3. Eigenschaften von OSTIA Daten	16
4.4. Übersicht der Sensoren in OSTIA Daten	17
4.5. Eigenschaften von GFO Daten	19
4.6. Eigenschaften von Jason-1 Daten	20
4.7. Eigenschaften von Envisat Daten	21
5.1. Klassifizierung von Eddies [IG02]	24
7.1. Statistik der täglichen Korrelation	63
7.2. Statistik der monatlichen Korrelation	63
9.1. Übersicht der Optionen zur Konfiguration	78

Fachhochschule München
Fachbereich 07

Schwatke Christian

(Familiennamen, Vorname)

25. August 2008

(Ort, Datum)

15.10.1980

(Geburtsdatum)

04 SS2008

(Studiengruppe / WS/SS)

Erklärung

gemäß §31, Abs. 7 der RaPO

Hiermit erkläre ich, dass ich die Masterarbeit selbständig verfasst
noch nicht anderweitig für Prüfungszwecke vorgelegt,
keine anderen als die angegebenen Quellen oder Hilfsmittel benützt
sowie wörtliche und sinngemäße Zitate als solche gekennzeichnet habe.

(Unterschrift)

Diese Erklärung ist zusammen mit der Masterarbeit beim Aufgabensteller abzugeben.