

# Analyse der Verwendbarkeit von Schwebstoffdaten aus MERIS/ENVISAT-Szenen im Bereich des Wattenmeers

(Vom Prüfungsausschuß Geographie der Universität Hamburg als Bachelorarbeit angenommene Arbeit)

F. Wallasch



# **Analyse der Verwendbarkeit von Schwebstoffdaten aus MERIS/ENVISAT-Szenen im Bereich des Wattenmeers**

(Vom Prüfungsausschuß Geographie der Universität Hamburg als Bachelorarbeit angenommene Arbeit)

**F. Wallasch**

---

Die HZG Reporte werden kostenlos abgegeben.  
HZG Reports are available free of charge.

Anforderungen/Requests:

Helmholtz-Zentrum Geesthacht  
Zentrum für Material- und Küstenforschung GmbH  
Bibliothek/Library  
Max-Planck-Straße 1  
21502 Geesthacht  
Germany  
Tel.: +49 4152 87-1690  
Fax.: +49 4152 87-1717  
E-Mail: [bibliothek@hzg.de](mailto:bibliothek@hzg.de)

*Druck: HZG-Hausdruckerei*

Als Manuskript vervielfältigt.  
Für diesen Bericht behalten wir uns alle Rechte vor.

ISSN 2191-7833

Helmholtz-Zentrum Geesthacht  
Zentrum für Material- und Küstenforschung GmbH  
Max-Planck-Straße 1  
21502 Geesthacht

[www.hzg.de](http://www.hzg.de)

## Analyse der Verwendbarkeit von Schwebstoffdaten aus MERIS/ENVISAT-Szenen im Bereich des Wattenmeers

*(Vom Prüfungsausschuß Geographie der Universität Hamburg als Bachelorarbeit angenommene Arbeit)*

Fabian Wallasch

*51 Seiten mit 11 Abbildungen und 6 Tabellen*

### Zusammenfassung

In dieser Arbeit sollte die Verwendbarkeit von Schwebstoffdaten aus MERIS/ENVISAT-Szenen im Bereich des Wattenmeers untersucht werden. Schwebstoffe haben eine große Bedeutung für Küstenökosysteme und die Satellitenfernerkundung bietet die Möglichkeit, ihre Konzentrationen und Verteilungen großflächig zu bestimmen.

Für die Analyse wurden Schwebstoffkonzentrationen in  $\text{g}/\text{m}^3$  des Satelliten mit in situ Trübungswerten in der Standardeinheit Formazine Turbidity Unit (FTU) zweier Messpfähle des Helmholtz-Zentrums Geesthacht (im Folgenden HZG) verglichen. Die Schwebstoffkonzentrationen errechnet die ESA mit einem für Küstengewässer allgemeingültigen Faktor aus den von MERIS gemessenen Streukoeffizienten (in  $1/\text{m}$ ) der Schwebstoffe. Die ausgewählten Pfahlstandorte sind das Hörnumtief und der Jadebusen. Die hier gemessenen Trübungswerte können ebenfalls in Schwebstoffkonzentrationen in  $\text{g}/\text{m}^3$  umgerechnet werden. Der Faktor ist in diesem Fall ortsspezifisch.

Nach der qualitativen Überprüfung der Daten und der Auswahl zeitlich übereinstimmender Pfahl- und Satellitenwerte wurde für beide Standorte eine separate Korrelationsanalyse durchgeführt. Für die anschließende gemeinsame Korrelationsanalyse wurden die Trübungswerte der Pfähle in Schwebstoffkonzentrationen umgerechnet. Diese Analyse ergab einen hochsignifikanten starken statistischen Zusammenhang. Zur weiteren Verbesserung dieses Zusammenhangs wurden anschließend die Schwebstoffkonzentrationen des Satelliten ortsabhängig neu aus den Streukoeffizienten berechnet. Die Korrelationsanalyse mit diesen Werten ergab einen hochsignifikanten sehr starken statistischen Zusammenhang.

Die Verwendbarkeit von MERIS-Schwebstoffdaten wurde also in diesen beiden Fällen bestätigt. Die Analyse hat jedoch gezeigt, dass es im Wattenmeer nötig ist, die MERIS-Daten durch in situ Messungen zu validieren und gegebenenfalls neue ortsabhängige Zusammenhänge zwischen den Streukoeffizienten und den Schwebstoffkonzentrationen zu finden.

## Analysis of the Applicability of Suspended Matter Data from MERIS / ENVISAT Scenes in the Wadden Sea Area

### Abstract

In this work, the applicability of suspended matter data from MERIS / ENVISAT scenes in the Wadden Sea was investigated. Suspended matter is important for coastal ecosystems and satellite remote sensing offers the opportunity to determine their concentrations and distributions over a large area.

For the analysis, suspended matter concentrations were compared with in situ turbidity data of two measuring poles of the HZG. The space borne suspended matter concentrations are calculated by the ESA from the measured scattering coefficients of suspended matter. Therefore, a generic factor, determined for coastal waters is used. The selected pole locations are the Hörnum Deep and the Jade Bay. The turbidity values can also be converted in suspended matter concentrations by using a site-specific factor.

---

After the quality check and the selection of pole and satellite values, which are matching in time, a separate correlation analysis was performed for both locations. For the subsequent joint correlation analysis, the turbidity values of the poles were converted in suspended matter concentrations. This analysis showed a highly significant strong statistical relationship. To enhance this relationship, the space borne suspended matter concentrations were site-specific recalculated from the scattering coefficients. The correlation analysis with these values showed a highly significant very strong statistical relationship.

The applicability of suspended matter data from MERIS was confirmed in both cases. The analysis has shown that in the Wadden Sea, it is necessary, to validate the MERIS data with in situ measurements and to find new site-specific relationships between the scattering coefficients and the suspended matter concentration.

*Manuscript received / Manuskripteingang in Druckerei: 3. September 2013*

# Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis .....	ii
Tabellenverzeichnis.....	ii
1. Einleitung .....	1
2. Grundlagen .....	3
2.1 Die Bedeutung von Schwebstoffen für die Küstenforschung.....	3
2.2 Satellitenfernerkundung von Wasserkörpern.....	4
3. Methodik .....	7
3.1 Das MERIS-Instrument am Umweltsatelliten ENVISAT .....	7
3.2 Die Messpfähle .....	9
3.3 Trübung-TSM-Beziehung.....	10
4. Analyse und Ergebnisse .....	13
4.1 Auslesen der TSM-Daten von MERIS und Untersuchung der Flags .....	13
4.2 Ausreißer und Extremwerte .....	18
4.3 Die Korrelation von Pfahl- und Satellitenwerten.....	20
4.4 Die Regression von TSM nach $b_{TSM}$ .....	26
5. Diskussion und Aussichten .....	31
6. Fazit.....	37
Literatur .....	38
A SEAPOINT Turbidity-Meter Datenblatt.....	42
B ESA SENTINEL-3 Datenblatt.....	44

## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Messpfahl Hörnum.....	9
Abbildung 2: Beispiele für durch Biofouling verfälschte Trübungswerte.....	19
Abbildung 3: Häufigkeitsverteilung (absolut) der MERIS-TSM-Werte Hörnum .....	20
Abbildung 4: Häufigkeitsverteilung (absolut) der Pfahl-Trübungswerte Hörnum .....	21
Abbildung 5: Punkstreuungsdiagramm Hörnum .....	22
Abbildung 6: Punkstreuungsdiagramm Jade1 .....	23
Abbildung 7: Punkstreuungsdiagramm Hörnum und Jade1 .....	24
Abbildung 8: Regressionsgerade Hörnum .....	27
Abbildung 9: Regressionsgerade Jade1.....	27
Abbildung 10: Punkstreuungsdiagramm Hörnum und Jade1 .....	29
Abbildung 11: Abbildung 10 nach Jahren eingefärbt .....	34

## Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Anzahl verfügbarer MERIS-Szenen [...]	14
Tabelle 2: Zentralmaße der TSM-Werte verschiedener Flagvarianten.....	15
Tabelle 3: Ergebnis des F-Tests für Hörnum .....	16
Tabelle 4: Ergebnis des F-Tests für Jade1 .....	16
Tabelle 5: Ergebnisse der t-Tests .....	17
Tabelle 6: Vergleich der verschiedenen $TSM_M$ -Werte und Hörnum- $TSM_P$ -Werte.....	28

# 1. Einleitung

Die European Space Agency (ESA) startete 2002 den Umweltsatelliten ENVISAT (Environmental Satellite), welcher bis April 2012 im Einsatz war. An Bord dieses Satelliten befand sich neben weiteren Instrumenten auch das Medium Resolution Imaging Spectrometer (MERIS). Mit diesem ist es möglich, aus der Ozeanfarbe die Konzentrationen von Schwebstoffen abzuleiten.

Schwebstoffe haben in der Küstenforschung eine große Bedeutung, da an ihnen Schadstoffe adsorbieren und so transportiert und abgelagert werden können. Des Weiteren tragen sedimentierende Schwebstoffe z. B. nach Sturmfluten zum Höhenwachstum von Marschböden bei. Schwebstoffmessungen werden vor allem von Schiffen und fest eingerichteten Messstationen durchgeführt. Durch die Satellitenfernerkundung mit Instrumenten wie MERIS ist es im Gegensatz zu diesen Methoden möglich, Schwebstoffe über große Flächen gleichzeitig zu bestimmen. Für den offenen Ozean ist diese Methode bereits gut in der Wissenschaft etabliert. In Küstennähe hingegen, wo die Konzentration der Schwebstoffe deutlich höher ist und ihre Zusammensetzung stärker variiert, ist es weiterhin eine Herausforderung, Fortschritte bei diesem Thema zu machen (vgl. ROBINSON 2010: 487f., 517ff.; RUDDICK *et al.* 2008: 80f.). An diesem Punkt setzt die folgende Forschungsarbeit ein. Ziel ist es, am Beispiel des Deutschen Wattenmeers eine Aussage über die Verwendbarkeit der von MERIS gemessenen Schwebstoffkonzentrationen in Küstennähe zu treffen. Zu diesem Zweck werden die Werte mit denen von im Hörnumtief und Jadebusen installierten Messpfählen des HZG verglichen.

Eine ähnliche Arbeit wurde bisher nur von GEMEIN *et al.* (2006) durchgeführt. Hier wurden fünf aus Probennahmen von Schiffskampagnen stammende Schwebstoffwerte eines Zeitraumes von drei Jahren verglichen. Eines der Wertepaare hatte dabei einen zeitlichen Unterschied zwischen Probennahme und Satellitenüberflug von zwei Tidezyklen (GEMEIN *et al.* 2006: 184). Die folgende Arbeit versucht ebenfalls anhand von *in situ* Messungen, aber mit einem systematischeren Ansatz und höherer angestrebter Signifikanz, die Verwendbarkeit von MERIS-Schwebstoffdaten zu überprüfen.

Der hohe Stellenwert des Themas Schwebstoffe und ihrer Bestimmung mit Hilfe von Satellitenbildern war auch bei der Literaturrecherche merkbar. Sehr viele Wissenschaftler beschäftigen sich mit diesem Thema und vor allem auch explizit mit dem MERIS-Instrument. Die zur Verfügung stehende und verwendete Literatur reicht von Monographien über Zeitschriftenartikel bis zu kleinen Veröffentlichungen und Produkthandbüchern (z. B. der ESA).

Die Ergebnisse dieser Arbeit sollen als Ausgangspunkt für weitere wissenschaftliche Arbeiten über das Thema Schwebstoffe und die Verlässlichkeit von MERIS-Daten in Küstennähe dienen.

Ein weiterer wichtiger Punkt ist, dass diese Arbeit in Absprache mit den Abteilungen Küstenozeanographische Messsysteme und Fernerkundung des Instituts für Küstenforschung am HZG angefertigt wird, da das Institut das Projekt COSYNA (Coastal Observation System for Northern and Arctic Seas) koordiniert. Ziel dieses Projekts ist es, ein auf kontinuierlicher Beobachtung und Modellierung beruhendes Analysesystem für den Umweltzustand der Nordsee und der arktischen Küstengewässer zu etablieren. Neben dem HZG sind u. a. die Hamburg Port Authority (HPA), das Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie (BSH) und der Landesbetrieb für Küstenschutz, Nationalpark und Meeresschutz Schleswig-Holstein beteiligt (HZG o. J.: 2).

Die in dieser Arbeit untersuchten Messpfähle und das MERIS-Instrument sind Teil des für COSYNA eingerichteten Netzwerks von Messinstrumenten, zu welchem u. a. Forschungsschiffe und Unterwassermessstationen gehören. Da das Wattenmeer ein wichtiger Bestandteil der Nordsee ist, sind die Ergebnisse dieser Arbeit von Bedeutung für dieses Projekt, vor allem vor dem Hintergrund der Planung eines MERIS- bzw. ENVISAT- Nachfolgers in den nächsten Jahren.

Bevor die eigentliche Analyse mit anschließender kritischer Diskussion der Ergebnisse erfolgt, soll zunächst eine Einführung in die Thematik der Schwebstoffe und der Fernerkundung gegeben werden. Außerdem sollen kurz die verwendeten Messsysteme hinsichtlich ihrer Messmethoden und der Unterschiede zwischen diesen erläutert werden.

## 2. Grundlagen

Schwebstoffe haben eine große Bedeutung für die Küstenforschung. Im Folgenden soll dies näher erläutert werden. Außerdem soll eine Einführung in das Thema Satellitenfernerkundung gegeben werden, in welcher auch die Besonderheiten bei der Fernerkundung von Wasserkörpern dargestellt werden.

### 2.1 Die Bedeutung von Schwebstoffen für die Küstenforschung

Als Schwebstoffe werden im Allgemeinen alle organischen und anorganischen Teilchen bezeichnet, welche in ungelöster Form im Wasser vorkommen und aufgrund ihrer Größe und ihres Gewichts in der Wassersäule „schweben“. Dabei wird zwischen chlorophyllhaltigen und nichtchlorophyllhaltigen Schwebstoffen unterschieden (SCHMITZ-PFEIFFER 1986: 20). Die in dieser Arbeit untersuchten Schwebstoffkonzentrationen aus MERIS-Szenen und Pfahlmessungen beziehen sich nur auf die nichtchlorophyllhaltigen Schwebstoffe. Diese sind definiert als Teilchen, die größer als 0,47 µm sind (DOERFFER 1992: 220). Im offenen Ozean bestehen sie größtenteils aus Abbauprodukten von Phytoplankton. In Küstennähe hingegen sind sie meist mineralischen Ursprungs (GORDON; MOREL 1983 nach SCHMITZ-PFEIFFER 1986: 21). Dort bestehen sie aus z. B. durch Tidenströmungen aufgewirbelten Sedimenten oder aus Einträgen durch Flüsse und Atmosphäre. Auch äolisch transportierte Wüstensande können den mineralischen Schwebstoffgehalt des Wassers erhöhen (DOERFFER 1997: 9). Bedingt durch die erhöhte Anzahl von Schwebstoffquellen, vor allem durch die aufgewirbelten Sedimente, ist der Schwebstoffgehalt in Küstennähe um ein Vielfaches höher als im offenen Meer. Zusätzlich variiert die Schwebstoffkonzentration in Gebieten mit Tidenströmungen, wie z. B. dem Deutschen Wattenmeer, teilweise erheblich (vgl. RUDDICK *et al.* 2008: 80f.).

Für die Küstenforschung sind Schwebstoffe u. a. deshalb von Bedeutung, weil im Wasser befindliche Schadstoffe wie z. B. Polycyclische Aromatische Kohlenwasserstoffe an ihnen adsorbieren (HEEMKEN *et al.* 1998: 15ff.). Deshalb dienen sie in der Praxis der Bestimmung von Schadstofftransportraten und damit verbundenen Risikogebietsklassifizierungen. So ist es z. B. für Flüsse wie die Elbe möglich, anhand von bekannten Größen, wie dem Durchfluss an einem bestimmten Querprofil, der Schadstoffkonzentration in frischem Sediment sowie der Schwebstoffkonzentration, Schadstofffrachten zu berechnen (HEISE *et al.* 2005: 8).

Eine weitere wichtige Funktion erfüllen Schwebstoffe in Bezug auf die Küstenmorphologie und das Ökosystem z. B. der Nordsee. In tidebeeinflussten Gebieten profitieren Überflutungsflächen von sedimentierenden Schwebstoffen, welche beispielsweise das Wachstum von Salzwiesen und Brackröhrichten fördern können (REISE 1995: 36) oder im Falle überfluteter Halligen das Wachstum der Halligmarsch (DEICKE 2007: 95).

Die aufgeführten Beispiele für die Relevanz von Schwebstoffen in der Küstenforschung haben gezeigt, dass sie auch für das Wattenmeer eine große Bedeutung haben. Das Wattenmeer bzw. der gesamte Küstenbereich der Nordsee gehört zu den Gebieten mit den höchsten Schwebstoffkonzentrationen dieser Region. Die Einträge in Küstennähe stammen aus dem Atlantik, der Ostsee, den Flüssen wie z. B. der Elbe, aus Küsten- und Meeresbodenerosion oder Nassbaggerungen. Die dadurch bedingten Schwebstoffkonzentrationen können bis zu 500-mal höher sein als z. B. in der offenen Nordsee, fern von der Küste (RUDDICK *et al.* 2008: 80f.). Aber auch im Wattenmeer gibt es große Unterschiede zwischen den Konzentrationen. Dies stellt eine große Herausforderung für die Fernerkundung dar, da die Methoden der Konzentrationsbestimmung an die jeweiligen lokalen Gegebenheiten angepasst werden müssen, was in der Analyse (Abschnitt 4) gezeigt werden soll.

## **2.2 Satellitenfernerkundung von Wasserkörpern**

Bei der Satellitenfernerkundung wird zwischen unterschiedlichen Satellitenorbits unterschieden. Die meisten der für geowissenschaftliche Disziplinen eingesetzten Umweltsatelliten verfolgen eine sonnensynchrone oder polare Umlaufbahn. Sie umkreisen den Planeten auf Höhen zwischen 500 und 1000 km und stehen immer ungefähr zur selben Tageszeit über dem gleichen Gebiet, je nach Breite auch mehrmals am Tag. Alternativ werden auch geostationäre Satelliten eingesetzt. Diese beobachten kontinuierlich dasselbe Gebiet aus Höhen zwischen 30.000 bis 50.000 km (COMISO 2010: 75f.).

Die eigentlichen Messungen eines Satelliten werden von den an ihm angebrachten Sensoren durchgeführt. Diese lassen sich auf verschiedene Art und Weise klassifizieren (KRAMER 1994: 469), z. B. nach:

- dem Anwendungsgebiet (z. B. Meteorologie oder Atmosphärenforschung usw.).
- dem primären Beobachtungsziel (z. B. Land, Eis, Ozeane oder Küstenbereiche usw.).

- dem beobachteten Frequenzbereich des elektromagnetischen Spektrums (z. B. sichtbares Licht oder Mikrowellen usw.). Der für diese Arbeit relevante Bereich ist der des sichtbaren Lichts und des Nahen Infrarot.
- dem Messmechanismus (passiv oder aktiv). Passive und aktive Sensoren unterscheiden sich darin, dass passive Sensoren nur eingehende elektromagnetische Strahlung messen, während aktive Sensoren diese zunächst generieren und dann das eingehende Echo messen (ebd.: 483ff.).
- dem Instrumententyp (z. B. Altimeter, Spektrometer oder Radiometer usw.).
- der Messgenauigkeit (z. B. Auflösungen). Es wird zwischen geometrischer, spektraler, radiometrischer und zeitlicher Auflösung unterschieden (ebd.: 480f.).

Die satellitengestützte Fernerkundung der Ozeane begann 1978. Die ersten zu diesem Zweck von der National Aeronautics and Space Administration (NASA) gestarteten Satelliten waren SEASAT und NIMBUS-7 (GOWER 2010: 1, 14). Diese beiden gehören zu den Satelliten mit sonnensynchroner oder polarer Umlaufbahn. (COMISO 2010: 77). NIMBUS-7 trug das CZCS-Instrument (Coastal Zone Color Scanner). Mit diesem Ozeanfarbensensor war es zum ersten Mal möglich, die Verteilung von (u. a.) Chlorophyll über die Farbe des Wassers zu bestimmen. CZCS hatte eine geometrische Auflösung von ca. 875 m (KRAMER 2002: 24f.). Das in dieser Arbeit untersuchte MERIS-Instrument von 2002 erreicht dagegen schon eine maximale Auflösung von ca. 300 m.

Bei der Fernerkundung der Ozeanfarbe wird zwischen sogenanntem Case-1 und Case-2-Wasserkörpern unterschieden. Die Farbe von Ersterem wird nur durch Phytoplankton (Chlorophyll) und seine Abbauprodukte bestimmt. Bei Case-2-Wasser wird die Farbe von anderen Partikeln anstelle von oder zusammen mit Phytoplankton dominiert, vor allem von mineralischen Schwebstoffen (ROBINSON 2010: 517).

Ein großer Vorteil der Satellitenfernerkundung ist die Möglichkeit, innerhalb kurzer Zeit große Gebiete beproben zu können (vgl. MÜLLER 2010: 8). So geben z. B. *in situ* Messungen aufgrund ihrer geringen räumlichen Abdeckung gegenüber Satellitenmessungen nur bedingt brauchbare Informationen über räumliche Muster (vgl. RUDDICK *et al.* 2008: 85f.).

Beschränkungen in der Satellitenfernerkundung entstehen z. B. durch Bewölkung, die Messungen verhindern kann, vor allem aber durch die Streuung des Lichts innerhalb der Atmosphäre. Dies geschieht auf zwei verschiedene Arten: Licht, das von außerhalb des Sichtfeldes des Sensors in das Sichtfeld gestreut wird und umgekehrt. Beides wird durch die sogenannte Atmosphärenkorrektur in die Messergebnisse mit einberechnet (ROBINSON 2010: 32). Des

Weiteren können Sensoren, wie z. B. MERIS, nur die obersten Meter der Wassersäule beproben, darunter ablaufende Prozesse können so übersehen werden. (vgl. RUDDICK *et al.* 2008: 88).

Ein weiterer wichtiger Punkt ist die notwendige Validierung der Satellitendaten. Hierbei muss vor allem der zeitliche Aspekt berücksichtigt werden. Sind die Proben z. B. von einem Schiff genommen worden, ist eine zeitliche Übereinstimmung mit dem Satellitenüberflug nicht immer gewährleistet. In Gebieten mit Tidenströmung können schon Unterschiede von ca. 30 Minuten den direkten Vergleich solcher Messungen unbrauchbar machen (DOERFFER 1992: 232ff.). Da diese Arbeit eine solche Validierung darstellt, sollen in der Analyse und Diskussion (Abschnitt 4 und 5) noch weitere problematische Aspekte aufgezeigt werden.

### 3. Methodik

Die in dieser Arbeit analysierten Schwebstoff- und Trübungsdaten stammen vom MERIS-Instrument des ENVISAT und den Trübungssensoren an den Unterwassereinheiten der Messpfähle des HZG. Im folgenden Abschnitt soll die Messmethodik beider Systeme sowie die Beziehung zwischen den vom MERIS-Instrument gemessenen Schwebstoffkonzentrationen und der von den Pfählen gemessenen Trübung erläutert werden.

#### 3.1 Das MERIS-Instrument am Umweltsatelliten ENVISAT

Das passive Medium Resolution Imaging Spectrometer MERIS befindet sich am im März 2002 gestarteten und bis zum April 2012 im Einsatz gewesenen ENVISAT Umweltsatelliten der ESA. Der Grund für das Ende des Einsatzes war der ungeplante vollständige Zusammenbruch des Kontakts mit dem Satelliten.

ENVISAT hat eine polare Umlaufbahn in ca. 782 km Höhe (COMISO 2010: 77). MERIS dient primär der Beobachtung der Ozeanfarbe im offenen Meer und in den Küstenbereichen (ESA 2006b: 11) und verfügt zu diesem Zweck über 15 Spektralbänder im Bereich von 390 bis 1040 nm (ebd.: 16f.). Der Blickwinkel erfasst  $68,5^\circ$  um Nadir, was eine Bildbreite von 1150 km ergibt (ESA 2006a: 8f.). Die volle Auflösung beträgt  $290 \times 260$  m, die reduzierte  $1200 \times 1040$  m, wobei die Messungen immer in voller Auflösung durchgeführt werden. Die reduzierte Auflösung ist das Ergebnis von Mittelungen. Ein Pixel der reduzierten Auflösung enthält dabei den Mittelwert von 16 Pixeln in voller Auflösung (ESA 2006b: 17). Die zeitliche Auflösung beträgt für die Deutsche Bucht ein oder zwei Tage. MERIS überfliegt an diesen Tagen ungefähr zwischen 10 und 11 Uhr morgens die Deutsche Bucht und nimmt dabei mehrere Bilder auf. Für eine Abbildung der gesamten Erde benötigt MERIS drei Tage (ebd.: 11).

Die öffentlich zugängliche Datenprozessierungskette besteht aus drei verschiedenen Produktlevels, wobei Level 2 für diese Arbeit relevant ist. Die Produkte dieses Levels enthalten aus den vorherigen Prozessierungsstufen abgeleitete Werte für z. B. Chlorophyll a, Gelbstoff und Schwebstoff (vgl. ESA 2006b: 35). Die Schwebstoffkonzentrationen werden aus dem Streukoeffizienten  $b_{TSM}$  ( $m^{-1}$ ) errechnet. Dieser ist das Ergebnis einer multiplen nichtlinearen Regression eines im MERIS-Prozessor implementierten künstlichen Neuronalen Netzwerkes, welches mit einer großen Menge simulierter Strahlungs- und Wasserbeschaffenheitswerte

trainiert wurde (DOERFFER; SCHILLER 2007: 519f.; DOERFFER 2011: 1f.). Stark vereinfacht sieht eine Messung des Streukoeffizienten folgendermaßen aus:

$$\text{Reflexionen des Wassers} \rightarrow \boxed{\text{Neuronales Netzwerk}} \rightarrow b_{TSM}$$

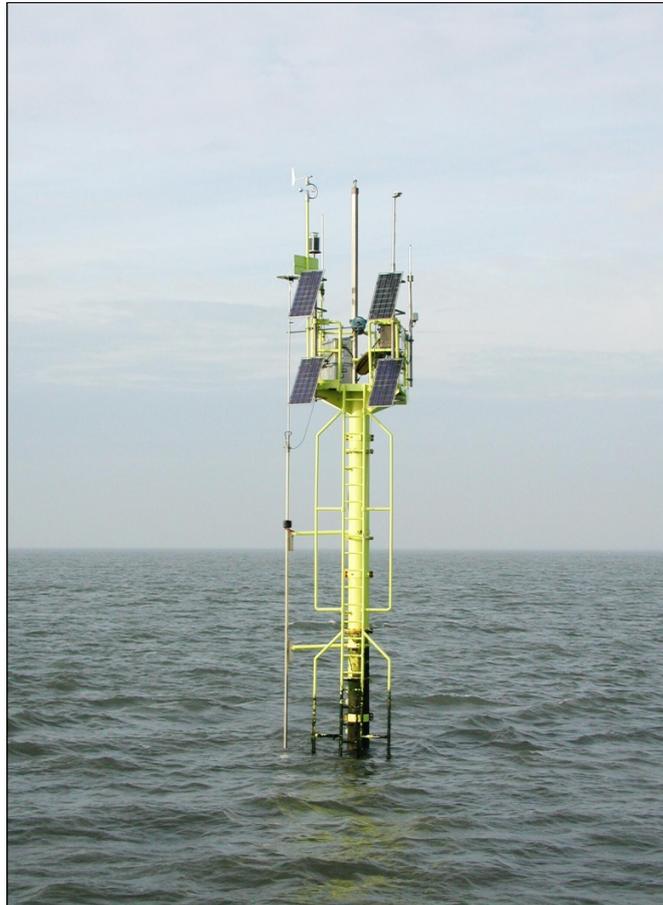
Für Case-2-Wasser wurde anhand von *in situ* Messungen in der südlichen Nordsee eine empirische Abhängigkeit zwischen  $b_{TSM}$  und der Schwebstoffkonzentration TSM (Total Suspended Matter) in  $\text{g/m}^3$  gefunden. Sie wird durch eine einfache Gleichung beschrieben:

$$TSM \left[ \frac{\text{g}}{\text{m}^3} \right] = 1,73 * b_{TSM}$$

Der Umrechnungsfaktor der Gleichung kann bzw. soll vom Endnutzer an lokale Gegebenheiten angepasst bzw. ausgetauscht werden (DOERFFER; SCHILLER 2007: 523ff.), was auch notwendig ist, da verschiedene Teilchen unterschiedlich streuen können. Ohne eine angepasste Umrechnung in Konzentrationen kann dies zu falschen Ergebnissen führen (vgl. ROBINSON 2010: 518).

Die von der ESA bereitgestellten MERIS-Szenen enthalten neben den Messwerten noch diverse Quality-Flags (im Folgenden: Flags), welche für jeden einzelnen Pixel bestimmt werden. Wird ein Flag positiv für einen Pixel gesetzt, bedeutet dies, dass die im Flag enthaltenen Informationen an dieser Stelle zutreffen. Es gibt Klassifikationsflags, wie z. B. das Wasser- oder das Land-Flag und Flags zur Vertrauenswürdigkeit von Produkten. Hiervon sind zwei Flags für diese Arbeit relevant: PCD\_1\_13, welches allgemein auf negative Reflexionswerte, die durch ein Rauschen um den virtuellen Nullpunkt entstehen, hinweist und PCD\_16, welches auf Reflektanzspektren der Schwebstoffe außerhalb des Trainingsbereichs des Neuronalen Netzwerks hinweist. Werden diese beiden positiv gesetzt, bedeutet dies, dass der betreffende Pixel nicht vertrauenswürdig ist. Der Algorithmus zur Bestimmung, ob eines der Flags für einen Pixel positiv gesetzt wird oder nicht, wurde 2004 und 2005 sowie zuletzt 2012 geändert. Die Änderung im letzten Jahr diente dazu, den Anteil falsch-positiv gesetzter Flags zu verringern. Mit diesem veränderten Algorithmus wurden dann sämtliche Daten erneut prozessiert (ESA 2006b: 76,87; ESA 2011: 74ff.).

### 3.2 Die Messpfähle



**Abbildung 1: Messpfahl Hörnum (Quelle: HORST GARBE, HZG)**

Die von MERIS ermittelten Schwebstoffkonzentrationen werden in dieser Arbeit anhand von Trübungswerten validiert, die von zwei Messpfählen (siehe Abbildung 1) des Instituts für Küstenforschung am HZG stammen. Die beiden hier verwendeten Pfähle sind Hörnum und Jade1. Ausgewählt wurden diese aufgrund ihrer langen Standzeit (Hörnum steht seit über 10 Jahren) und dem Status der Datenaufbereitung, d. h., die Daten befinden sich in einem Dateiformat, mit welchem eine Qualitätskontrolle (siehe Abschnitt 4.2) durchgeführt werden kann.

Der Pfahl Hörnum wird seit 2002 im Hörnumtief, einem Priel südöstlich von Sylt eingesetzt. Die genauen Koordinaten des Standortes sind  $54^{\circ} 47' 40,57''$  Nord,  $8^{\circ} 27' 6,74''$  Ost. Der Messpfahl Jade1 stand von 2007 bis 2011 im Jadebusen an der Position  $53^{\circ} 30' 59,64''$  Nord,  $8^{\circ} 11' 17,40''$  Ost.

(Die folgenden Informationen zum Einsatz der Pfähle stammen, sofern keine andere Quelle angegeben ist, aus einem Gespräch mit dem für die Pfähle zuständigen Techniker HORST GARBE, da Literatur über die Pfähle zum Teil nicht dem aktuellen Stand entspricht). Die Pfäh-

le werden im Frühjahr aufgestellt und bis zum Herbst eingesetzt. Versuche, sie ein gesamtes Jahr stehen zu lassen, scheiterten im Winter mehrfach an Eisgang, der den Pfahl beschädigte. Die für diese Arbeit relevante Trübung wird vom Turbidity-Meter von SEAPOINT (siehe Anhang A) gemessen. Dieser Sensor befindet sich an der Unterwassereinheit der Pfähle, welche auf einer Höhe von ca. einem bis anderthalb Metern über dem Meeresgrund angebracht ist. Bei Niedrigwasser sitzt sie ca. anderthalb Meter unter der Wasseroberfläche bzw. einen Meter bei extremem Niedrigwasser. Das Turbidity-Meter misst die Rückstreuung des Lichts durch Schwebstoffe und gibt diese in der Standardeinheit für Trübung FTU (Formazine Turbidity Unit) aus (siehe Anhang A). Wegen der Limitierung des Übertragungsweges (Mobilfunk) der Daten an Land werden nicht die alle zehn Sekunden gemessenen Werte, sondern der Median eines Zehn-Minuten-Intervalls übertragen (vgl. ONKEN *et al.* 2007: 1661). Die Richtigkeit der Trübungswerte wurde vom HZG mit diversen *in situ* Messungen (manuelle Probennahmen direkt am Pfahl) bestätigt und sind somit für die Validierung von MERIS-Schwebstoffdaten in dieser Arbeit geeignet.

Die Pfähle werden alle ein bis zwei Wochen gewartet. Bei dieser Wartung wird u. a. die Unterwassereinheit gereinigt. Dafür wird sie aus dem Wasser genommen. Dementsprechend sind Trübungswerte, die während einer Wartung vom Turbidity-Meter gemessen werden, bei der späteren Überprüfung aus den Datensätzen zu entfernen (ebd.: 2007: 1660f.)

### **3.3 Trübung-TSM-Beziehung**

Das MERIS-Instrument des ENVISAT-Satelliten gibt Schwebstoffkonzentrationen als TSM-Werte in der Einheit  $\text{g/m}^3$  an. Die Messpfähle des HZG geben Schwebstoffkonzentrationen dagegen als Trübung in der Einheit FTU an. Im Folgenden soll nun erläutert werden, in welcher Beziehung TSM und Trübung zueinander stehen.

TSM gibt die Konzentration aller nichtchlorophyllhaltigen Teilchen, deren Größe zwischen  $50 \mu\text{m}$  und  $0,47 \mu\text{m}$  liegt, an (vgl. ESA 2006b: 119; DOERFFER 1992: 220). Wie schon in Abschnitt 3.1 erwähnt, handelt es sich bei den TSM-Werten des MERIS-Instruments um aus Reflexionen abgeleitete Werte. Dieser Ableitung zugrunde liegt der Streuungskoeffizient der Schwebstoffe  $b_{TSM}$  ( $\text{m}^{-1}$ ). Er wird direkt in TSM ( $\text{g/m}^3$ ) umgerechnet.

Die Trübungssensoren der Pfähle messen ebenfalls die Streuung der Teilchen und geben diese in der Einheit FTU an. Bezüglich der Datenverarbeitung stehen also der Streuungskoeffizient  $b_{TSM}$  und die Trübung auf einer Stufe bzw. eine Stufe unter den Konzentrationswerten. Für

den Vergleich der Trübungswerte eines Pfahls und der zugehörigen MERIS-Messungen ist dieser Unterschied in der Stufe der Datenverarbeitung nicht relevant. Sollen jedoch die Werte mehrerer Pfähle für den Vergleich mit MERIS-Daten zusammengefasst werden, ist zu beachten, dass die Beziehung zwischen FTU und TSM von den örtlichen Gegebenheiten der Pfahlumgebung abhängig ist, da unterschiedliche Schwebstoffteilchen und Korngrößen das Licht auf verschiedene Art und Weise streuen (ROBINSON 2010: 514), d. h., dass dieselben FTU-Werte beispielsweise im Jadebusen andere TSM-Werte ergeben können als im Hörnumtief. Die hierfür von FLÖSER *et al.* (2011) gefundenen Regressionsgleichungen lauten:

$$\text{Hörnum: } TSM \left[ \frac{g}{m^3} \right] = 1,894 + 1,336 * \text{Trübung [FTU]} \text{ mit } R^2 = 0,752$$

$$\text{Jade1: } TSM \left[ \frac{g}{m^3} \right] = 0,633 + 1,445 * \text{Trübung [FTU]} \text{ mit } R^2 = 0,856$$

Diese Gleichungen sind jeweils für die gesamte Standzeit eines Pfahls gültig (FLÖSER *et al.* 2011: 16f.; die Fundiertheit der Gleichungen wurde von den Verfassern persönlich bestätigt.) Die Basis dieser Regressionsanalyse waren Schwebstoffkonzentrationen aus *in situ* Messungen. Die Informationen darüber, wie diese gewonnen wurden, stammen aus einem persönlichen Gespräch mit der zuständigen Labortechnikerin KARIN WIRTH: Mit einem Schiff an den Pfahlstandorten genommene Wasserproben wurden durch einen gewogenen Whatman GF/C Glasfaserfilter gespült. Anschließend wurde der Filter getrocknet und nochmals gewogen. Nach Abzug des reinen Filtergewichts ergab dies das Schwebstoffgewicht pro Wasservolumen, welches in g/m<sup>3</sup> umgerechnet wurde.

Die Umrechnung von Trübung in TSM wird in Abschnitt 4.3 durchgeführt.

Auch die Beziehung des Streukoeffizienten  $b_{TSM}$  zu TSM ist lokal unterschiedlich. Deshalb ist es wie bereits erwähnt auch vorgesehen, dass der Endnutzer den allgemeinen Umrechnungsfaktor 1,73 an die lokalen Gegebenheiten anpasst. Dieser Umstand wird in Abschnitt 4.4 näher betrachtet.



## 4. Analyse und Ergebnisse

Das Vorgehen zur Überprüfung der hier gestellten Forschungsfrage nach der Verwendbarkeit von MERIS-Szenen im Bereich des Wattenmeers setzt sich aus mehreren Schritten zusammen. Kurz beschrieben umfasst die Analyse folgende Schritte:

Die TSM-Daten müssen aus den MERIS-Szenen extrahiert werden. Das dafür benötigte Programm wird von W. SCHÖNFELD von der Abteilung für Fernerkundung des HZG bereitgestellt. Dieses sucht in den Szenen für jeden Pfahl den Pixel, welcher die Koordinaten des Pfahls enthält und schreibt folgende Daten heraus:

- Zeit der Messung (UTC),
- TSM-Wert,
- Wert des PCD\_1\_13-Flags,
- Wert des PCD\_16-Flags.

Vor der Korrelationsanalyse werden die Daten hinsichtlich Wolkenbedeckung und Zeitdopplung bereinigt. Anschließend wird der Einfluss der Flags auf die Werte untersucht. Nach der Entscheidung über die Einbeziehung der Flags werden die zu den ausgewählten Szenen zeitlich passenden Trübungswerte der Pfähle herausgefiltert. Mit diesen Wertepaaren wird dann die Korrelationsanalyse durchgeführt, um den statistischen Zusammenhang zwischen Pfahl- und Satellitenwerten herauszufinden.

Im Anschluss an die Korrelation wird im Falle eines bewiesenen statistischen Zusammenhangs geprüft, ob sich dieser durch ortsabhängige Regressionen von Pfahlwerten nach Satellitenwerten verbessern lässt.

### 4.1 Auslesen der TSM-Daten von MERIS und Untersuchung der Flags

Zunächst werden die TSM-Werte aus den originalen, von der ESA bereitgestellten MERIS-Szenen ausgelesen. Dies geschieht, indem das Programm den Pixel sucht, der die Koordinaten eines Pfahls enthält und aus diesem Pixel den TSM-Wert, die Uhrzeit (UTC), sowie die bereits erwähnten (sowohl positiv als auch negativ gesetzten) Flags PCD\_1\_13 (negative Reflexionen) PCD\_16 (Reflektanzspektren außerhalb des Trainingsbereichs des Neuronalen Netzwerks) ausliest. Das Programm wird für alle verfügbaren niedrigaufgelösten Szenen (1200 x 1040 m) ausgeführt. Die vollaufgelösten Szenen (290 x 260 m) werden zuvor aufgrund der

für sie benötigten Rechenzeit manuell vorsortiert (Bewölkung unter 60 % und nur ein Bild pro Tag).

Im zweiten Arbeitsschritt werden mit einem weiteren Programm alle Werte aussortiert, die durch Wolkenverdeckung entstanden sind (TSM sowie beide Flags gleich null), dann werden die TSM-Werte und Uhrzeiten der Szenen gemittelt, welche bei einem Überflug kurz hintereinander aufgenommen wurden (dies entfällt bei den vorausgewählten hochaufgelösten Szenen).

Der nächste Schritt ist die Frage nach der Berücksichtigung der positiven Flags, was die Anzahl der für die Korrelation verfügbaren Szenen erheblich verringert (siehe Tabelle 1). Werden die Flags miteinbezogen, so muss ein TSM-Wert, der mit einem positiven Flag versehen wurde, als ungültig betrachtet werden.

**Tabelle 1: Anzahl verfügbarer MERIS-Szenen bei verschiedener Auflösung & Berücksichtigung der Flags**

	Keine Flags	PCD_16	PCD_1_13	Beide Flags
Hörnnum (red.)	602	397	152	136
Hörnnum (voll)	110	49	33	26
Jade1 (red.)	475	295	51	47
Jade1 (voll)	95	22	9	6

Die Auswahl nach Übereinstimmung mit den Zeiten, zu denen der jeweilige Pfahl stand, ist noch nicht enthalten. Dies wird die Anzahl der Szenen ebenfalls verringern, was die Überlegung, welche Flags berücksichtigt werden sollten, noch wichtiger macht, um später eine aussagekräftige Korrelation zu erhalten.

Da trotz des neuen Algorithmus eine falschpositive Setzung der Flags möglich ist (vgl. Abschnitt 3.1), soll ermittelt werden, wie sich die Flags auf die TSM-Werte auswirken. Dafür sollen die Mittelwerte ( $\bar{x}$ ) der einzelnen Varianten berücksichtigter Flags für jeden Pfahl mit dem t-Test überprüft werden, um herauszufinden, ob diese sich signifikant unterscheiden. Hierfür wurde aufgrund der größeren Anzahl verfügbarer Szenen die reduzierte Auflösung gewählt.

**Tabelle 2: Zentralmaße der TSM-Werte verschiedener Flagvarianten**

	Zentralmaß	Keine Flags	PCD_16	PCD_1_13	Beide Flags
Hörnum (red.)	Mittelwert	15,70	15,35	13,32	12,36
	Median	12,21	12,48	10,95	10,18
	Modalwert	15,17	23,45	15,17	7,09
Jade1 (red.)	Mittelwert	23,03	23,62	22,18	21,65
	Median	19,56	22,38	21,03	21,03
	Modalwert	72,16	21,03	21,03	21,03

In der Tabelle 2 werden die Zentralmaße sämtlicher TSM-Werte der vier verschiedenen Flagvarianten gezeigt. Diese deuten darauf hin, dass die Werte, außer für die Varianten Jade1 PCD\_1\_13 und Jade1 „Beide Flags“, nicht normalverteilt sind (vgl. BAHRENBURG 1999: 48f). Da  $n$  jedoch überall  $> 30$  ist, entfällt die Voraussetzung der Normalverteilung für den t-Test (SCHÖNWIESE 2006: 126). Zu überprüfen ist aber noch, ob sich die Standardabweichungen ( $s_1$  und  $s_2$ ) der jeweils miteinander zu vergleichenden Möglichkeiten signifikant unterscheiden, da dies essentiell für die Auswahl der Formel zur Berechnung der Prüfgröße  $t_p$  des t-Tests ist (ebd.: 124ff.). Dies soll mit dem Varianz-Quotienten- bzw. F-Test überprüft werden. Der Test wird immer zwischen den Flagvarianten durchgeführt, deren Standardabweichungen sich am wenigsten voneinander unterscheiden. Sind diese Unterschiede signifikant, ist der Test zwischen zwei Standardabweichungen größeren Unterschieds redundant.

Der F-Test besagt, dass die Nullhypothese ( $H_0: s_1^2 = s_2^2$ ) angenommen wird, wenn die aus den Varianzen errechnete Prüfgröße  $F_p$  kleiner dem kritischen Wert der F-Verteilung für die Irrtumswahrscheinlichkeit  $\alpha$  ist, also wenn gilt:  $F_p \leq F$ . Der F-Test ist, ebenso wie der t-Test ein parametrischer Test, der normalverteilte Stichproben voraussetzt. Er ist in diesem Fall trotzdem anwendbar, da er bei großen Stichprobenumfängen mit  $n \geq 100$  als annähernd verteilungsfrei gilt (ebd.: 127). Für die TSM-Werte von Jade1 für die Varianten positive PCD\_1\_13 und „Beide Flags“ positiv gilt dies strenggenommen nicht, da hier aber  $Median \approx Modalwert \approx Mittelwert$  ist (siehe Tabelle 2), wird für diese beiden Fälle die Normalverteilung angenommen (BAHRENBURG 1999: 48f.).

Tabelle 3 zeigt die Ergebnisse des F-Tests für die TSM-Werte am Pfahl Hörnum für verschiedene Flagkombinationen.

**Tabelle 3: Ergebnis des F-Tests für Hörnum ( $\alpha = 0,01$ , einseitiger Test)**

	$n_1$	$n_2$	$s_1$	$s_2$	$F_P$	$F$
1: Keine Flags 2: PCD_16	602	397	13,54	10,32	3,96	1,39
1: PCD_16 2: PCD_1_13	397	152	10,32	8,74	9,54	1,52
1: PCD_1_13 2: Beide Flags	152	136	8,74	8,17	1,43	1,60

Die Ergebnisse des F-Tests zeigen, dass sich die Varianzen zwischen den TSM-Werten ohne berücksichtigte Flags und mit berücksichtigtem Flag PCD\_16 hochsignifikant ( $\alpha = 0,01$ ) unterscheiden. Dies gilt ebenso für die unterschiedlichen Varianzen der TSM-Werte mit je einem berücksichtigten Flag. Für  $\alpha = 0,01$  wird die Nullhypothese also bei beiden Fällen abgelehnt. Beim Vergleich zwischen Flag PCD\_1\_13 und der Variante „beide Flags“ wird die Nullhypothese beibehalten, die Unterschiede sind also nicht hochsignifikant. Für  $\alpha = 0,05$  ist F hier 1,39. Die Unterschiede sind also trotzdem signifikant.

Tabelle 4 zeigt die Ergebnisse für die TSM-Werte am Pfahl Jade1. Hier verhält es sich fast gleich, mit dem Unterschied, dass für den Vergleich zwischen und PCD\_16 und der Variante „beide Flags“ hier auch bei erhöhter Irrtumswahrscheinlichkeit  $\alpha = 0,05$  keine signifikanten Unterschiede zu finden sind.

**Tabelle 4: Ergebnis des F-Tests für Jade1 ( $\alpha = 0,01$ , einseitiger Test)**

	$n_1$	$n_2$	$s_1$	$s_2$	$F_P$	$F$
1: Keine Flags 2: PCD_16	475	295	18,49	11,87	6,30	1,39
1: PCD_16 2: PCD_1_13	295	51	11,87	9,00	59,11	1,87
1: PCD_1_13 2: Beide Flags	51	47	9,00	9,10	0,87	2,01

Außer für die beiden gerade genannten Fälle muss für den t-Test also eine angepasste Formel für signifikant unterschiedliche Varianzen angewendet werden (SACHS 2002: 356).

$$tp = \frac{|\bar{x}_1 - \bar{x}_2|}{\sqrt{\frac{s_1^2}{n_1} + \frac{s_2^2}{n_2}}} \quad \text{mit} \quad FG = n_2 - 1 \quad \text{für} \quad n_1 \geq n_2$$

Für die Zahl der Freiheitsgrade (FG) wird die oben stehende Formel genommen, um die Irrtumswahrscheinlichkeit  $\alpha$  garantieren zu können, bzw. einen liberalen Test zu vermeiden (ebd.: 357).

**Tabelle 5: Ergebnisse der t-Tests ( $\alpha = 0,25$ , einseitiger Test)**

		Keine Flags	PCD_16	PCD_1_13	Beide Flags
Hörnum	Keine Flags	-	<b>H<sub>0</sub></b>	H <sub>A</sub>	H <sub>A</sub>
	PCD_16	-	-	H <sub>A</sub>	H <sub>A</sub>
	PCD_1_13	-	-	-	H <sub>A</sub>
Jade1	Keine Flags	-	<b>H<sub>0</sub></b>	<b>H<sub>0</sub></b>	H <sub>A</sub>
	PCD_16	-	-	H <sub>A</sub>	H <sub>A</sub>
	PCD_1_13	-	-	-	<b>H<sub>0</sub></b>

In Tabelle 5 werden die Ergebnisse der t-Tests gezeigt, bzw. ob die Nullhypothese beibehalten oder die Alternativhypothese angenommen wurde. Um einen Fehler 2. Art - die Annahme einer falschen Nullhypothese - zu vermeiden, wurde  $\alpha$  auf 0,25 erhöht (vgl. BAHRENBERG 1999: 131). Die Ergebnisse zeigen, dass sich die Mittelwerte bei verschiedenen berücksichtigten Flags in den meisten Fällen signifikant voneinander unterscheiden. Es werden somit in der Analyse beide Flags mit einbezogen, da die von der ESA als ungültig geflaggtten Werte die Mittelwerte anscheinend signifikant verändern, wenn man sie trotzdem mit einbezieht. Für die weitere Arbeit gilt also, dass die in die Analyse einfließenden TSM-Werte des MERIS-Instruments weder mit einem positiven PCD\_16- noch mit einem positiven PCD\_1\_13-Flag versehen wurden. Außerdem wird die Analyse aufgrund des nun geringen Stichprobenumfangs bei voller Auflösung auf den Szenen mit reduzierter Auflösung basieren. Ab hier gilt also, dass stets diese Auflösung gemeint ist. Ergebnisse aus Analysen der vollaufgelösten Szenen werden explizit gekennzeichnet.

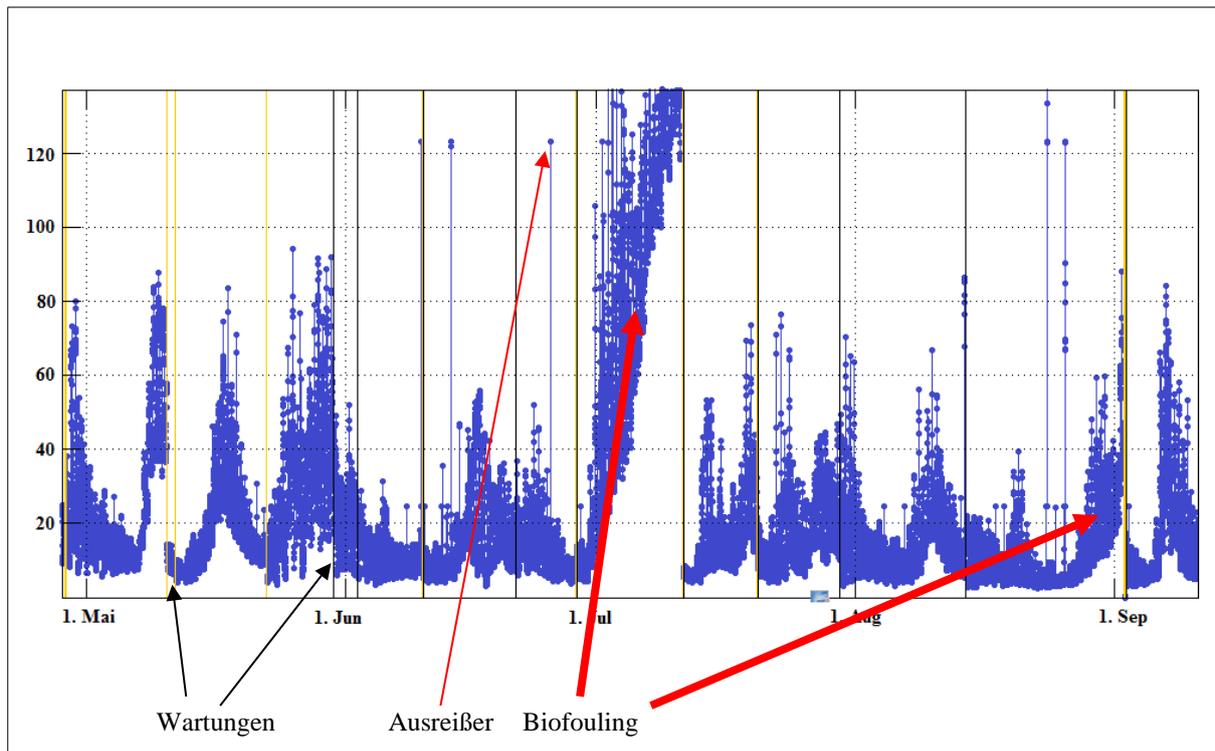
## 4.2 Ausreißer und Extremwerte

Da Ausreißer und Extremwerte zu über- bzw. unterschätzen Korrelationskoeffizienten führen können, müssen diese, sofern möglich, vor der eigentlichen Korrelationsanalyse ausgeschlossen werden (BAHRENBERG 1999: 198f.).

Für einen von MERIS gemessenen TSM-Wert bedeutet das, dass er dann ausgeschlossen wird, wenn er außerhalb des Intervalls  $\bar{x} \mp 4 \times s$  liegt (ebd.: 198). Dies wird für jeden Wert der Datenreihen Hörnum und Jade1 überprüft. Da der Großteil der Ausreißer und Extremwerte schon durch die Einbeziehung der beiden Flags entfernt wurde, liegt insgesamt nur ein Wert außerhalb des genannten Intervalls.

Die Trübungswerte der Pfähle haben bereits einen automatischen Prozess zum Erkennen falscher Werte durchlaufen. Hierbei wurde u. a. überprüft, ob sie außerhalb einer aufgrund vorhergegangener Messungen festgelegten Spannweite liegen (für Hörnum 0 bis 250 FTU, für Jade 0 bis 500 FTU), ob sie während einer Wartung gemessen wurden und somit ungültig sind und ob sich der Trübungssensor „aufgehängt“ hat, also ob die Werte über einen Zeitraum von einer Stunde exakt gleich bleiben.

Um die Trübungswerte nun für die Korrelationsanalyse verwendbar zu machen, müssen die Datenreihen beider Pfähle noch manuell für jedes Jahr getrennt überprüft werden. Zu diesem Zweck wurde ein Programm von R. RIETHMÜLLER verwendet. Wie bei den Satellitendaten werden hier Werte außerhalb des Intervalls  $\bar{x} \mp 4 \times s$  als Ausreißer betrachtet. Da hier jedoch deutlich mehr Werte betrachtet werden (jeweils bis zu einem Jahr mit Daten im Abstand von zehn Minuten), die sowohl jahreszeitlichen Schwankungen als auch täglichen Tide- und Wetterschwankungen unterliegen, darf dieses Intervall nicht über die gesamte Zeitreihe errechnet werden. Stattdessen werden Mittelwert und Standardabweichung jeweils für 24 Stunden berechnet und Ausreißer so Tag für Tag ausgeschlossen. Nach diesem Schritt folgt noch die Überprüfung der Daten auf *Biofouling*, also den Bewuchs durch Organismen wie z. B. Algen und eine damit verbundene Funktionsstörung des Sensors. Bei höheren Temperaturen kann der Trübungssensor auf diese Weise innerhalb einer Woche zuwachsen, was zu scheinbar überhöhten Trübungswerten führt (vgl. ONKEN *et al.* 2007: 1661). Bei Betrachtung der Daten ist vor einigen Wartungen ein extremer Anstieg der Trübung zu erkennen, der nach einer Wartung schlagartig abfällt. Ist dies der Fall, müssen die Werte innerhalb dieses Anstiegs ausgeschlossen werden. In Abbildung 2, welche die Trübungsdaten und Wartungen des Hörnumpfahls in 2011 zeigt, sind zwei Beispiele hierfür markiert.



**Abbildung 2: Beispiele für durch Biofouling verfälschte Trübungswerte (eigene Abbildung)**

Vor einem Ausschluss solcher Werte ist zusätzlich zu beachten, ob ein Teil dieses Anstiegs auf ein Sturmereignis zurückzuführen ist, das die Trübungswerte erhöht. Um einen falschen Ausschluss zu vermeiden, werden also die Trübungswerte vor den Wartungen unter Berücksichtigung von Temperatur und Windgeschwindigkeit betrachtet.

All diese Schritte sind derzeit nicht durch den automatischen Prozess zu realisieren und damit der Grund für die Notwendigkeit der manuellen Überprüfung. Nach Ende der manuellen Überprüfung sind die Daten beider Messgeräte für den Vergleich bereit. Insgesamt sind ca. drei Prozent der Werte des Pfahls Jade1 und ca. sieben Prozent der Werte des Hörnumpfahls bei der Kontrolle ausgeschlossen worden.

### 4.3 Die Korrelation von Pfahl- und Satellitenwerten

Für die Korrelationsanalyse werden zunächst die Pfahldaten herausgesucht, die zeitlich mit den MERIS-Szenen übereinstimmen. Dafür werden die Trübungswerte genommen, die von den Pfählen in einem Zeitraum von zehn Minuten vor bzw. nach Entstehung einer Szene gemessen wurden. Da die Pfahlmessungen einen zeitlichen Abstand von zehn Minuten haben, liegen in diesem Intervall normalerweise zwei Trübungswerte vor, welche zeitlich zu einem TSM-Wert einer MERIS-Szene passen. Von diesen wird dann der Mittelwert genommen. Da die Pfähle meist nicht das ganze Jahr über verwendet werden, stehen nach der zeitlichen Zuordnung für Hörnum 87 und für Jade1 20 Wertepaare für die Korrelationsanalyse zur Verfügung.

Da weder die ausgewählten TSM- noch die Trübungswerte normalverteilt sind (siehe Abbildung 4 und Abbildung 5), wird die nicht-parametrische Rangkorrelationsrechnung nach SPEARMAN (1908) durchgeführt. Die korrigierte Formel nach KENDALL (1968) ist nicht nötig, da die Anzahl gleicher Rangplätze aufgrund übereinstimmender Werte  $< 25\%$  ist (SCHÖNWIESE 2006: 178ff.).

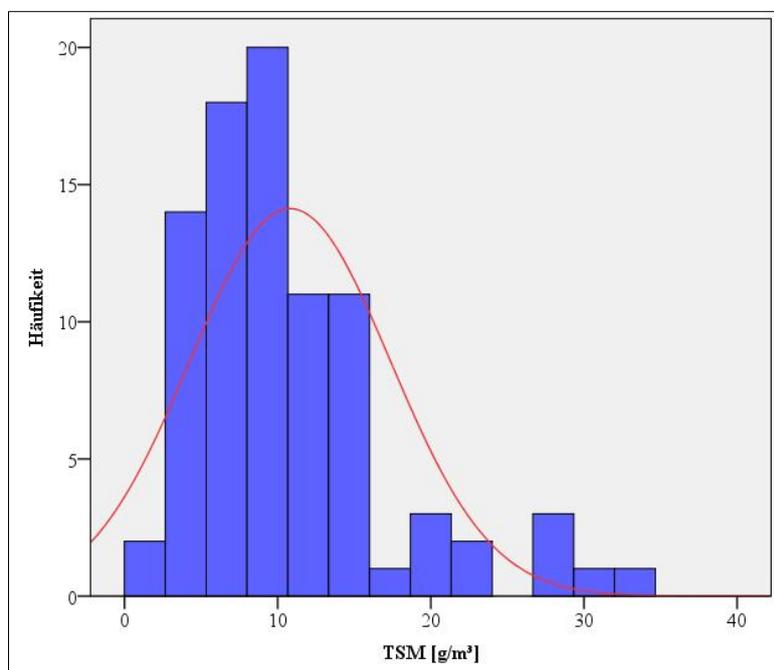
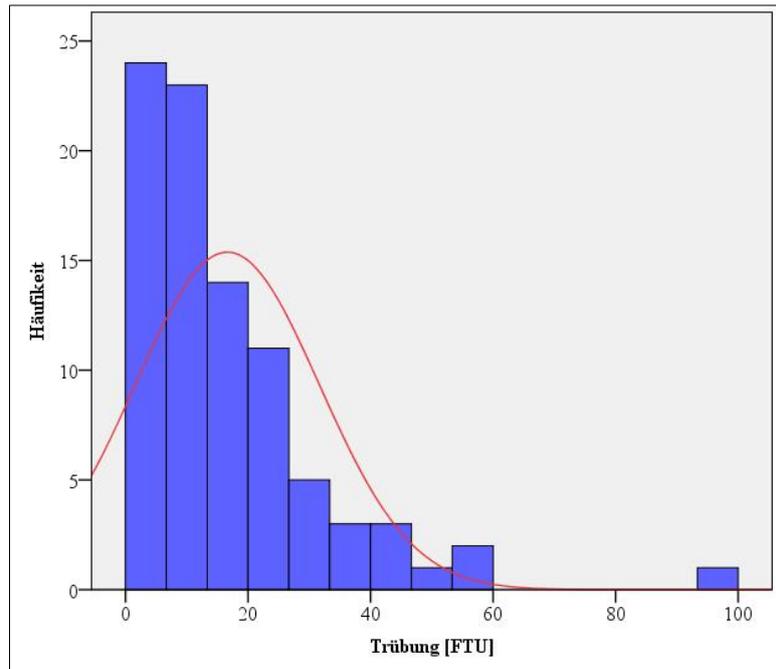


Abbildung 3: Häufigkeitsverteilung (absolut) der MERIS-TSM-Werte Hörnum (eigene Abbildung)



**Abbildung 4: Häufigkeitsverteilung (absolut) der Pfahl-Trübungswerte Hörnum (eigene Abbildung)**

Die Korrelationsanalyse fordert des Weiteren unabhängige Stichproben (ebd. 165f.). Diese Forderung erfüllen die vorliegenden Wertepaare nicht (vgl. PAPULA 2008: 564). Da aber das damit verbundene Problem einer eventuellen Überschätzung der Korrelation für die untersuchte Fragestellung irrelevant ist, wird dieser Punkt hier nicht weiter beachtet.

Im Folgenden werden die Ergebnisse der Korrelation der drei zu analysierenden Wertepaareihen vorgestellt. Dabei wird der Korrelationskoeffizient  $r$  angegeben, sowie der Mutungsbereich  $M_\rho$  des prozentualen Bestimmtheitsmaßes, d. h. der Bereich, in dem die durch die Korrelation erklärte relative Varianz der Werte mit der Irrtumswahrscheinlichkeit  $\alpha$  liegt. Da wie bereits eingangs erwähnt keine Normalverteilung vorliegt, muss  $r$  zuvor nach FISHER (1970) transformiert werden, somit gilt:

$$M_\rho = \dot{r} \mp \frac{z_\alpha}{\sqrt{n-3}} \quad \text{mit} \quad \dot{r} = \tanh^{-1} r$$

Die Grenzen des Mutungsbereichs werden anschließend mit  $r = \tanh \dot{r}$  detransformiert (SCHÖNWIESE 2006: 177f.).  $Z_\alpha$  ist in diesem Fall für die Irrtumswahrscheinlichkeit  $\alpha = 0,05$  gleich 1,960 bzw. für  $\alpha = 0,01$  gleich 2,576 (ebd. 98).

Die Interpretation der Stärke des statistischen Zusammenhangs richtet sich nach BARTHEL (1974):

$0,75 \leq R^2 \leq 0,99$  oder  $0,87 \leq r \leq 0,99 \rightarrow$  *sehr starker Zusammenhang*

$0,50 \leq R^2 \leq 0,75$  oder  $0,71 \leq r \leq 0,86 \rightarrow$  *starker Zusammenhang*

$0,25 \leq R^2 \leq 0,50$  oder  $0,50 \leq r \leq 0,70 \rightarrow$  *mittlerer Zusammenhang*

$0,00 \leq R^2 \leq 0,25$  oder  $0,00 \leq r \leq 0,50 \rightarrow$  *schwacher Zusammenhang*

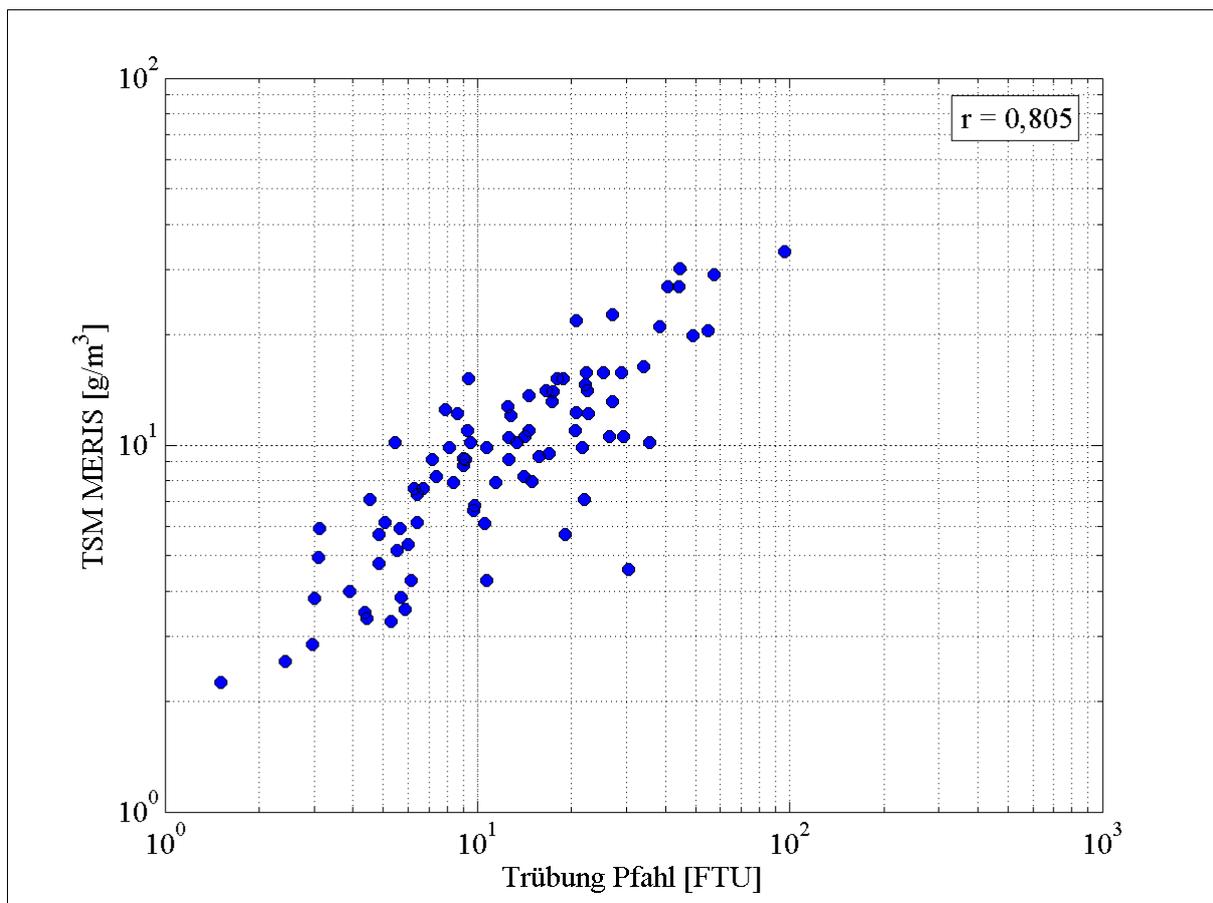


Abbildung 5: Punktstreudiagramm Hörnum (eigene Abbildung)

Abbildung 5 zeigt ein Punktstreudiagramm der MERIS-TSM-Werte gegen die Trübungswerte des Hörnumpfahls. Zur besseren Übersicht sind die Achsen logarithmisch dargestellt (Logarithmus zur Basis 10). Der in diesem Fall ( $\alpha = 0,01$ ) hochsignifikante Korrelationskoeffizient  $r$  liegt bei 0,805. Es liegt also ein starker statistischer Zusammenhang vor. Die relative erklärte Varianz liegt mit einer Irrtumswahrscheinlichkeit von  $\alpha = 0,05$  zwischen 75,41 % und 51,22 % bzw. für  $\alpha = 0,01$  zwischen 78,14 % und 46,42 %. Der Mutungsbereich zeigt ein „Unschärfe“-Intervall (ebd. 175) mit einer Breite von ca. 32 Prozentpunkten. Trotz-

dem liegt die relative erklärte Varianz mindestens im Bereich eines mittleren statistischen Zusammenhangs.

In Abbildung 6 ist ein Punktstreuungsdiagramm für den Jade1-Pfahl zu sehen. Aufgrund der geringeren Einsatzzeit dieses Pfahls von fünf Jahren sind hier nur 20 Wertepaare für die Analyse verfügbar. Verglichen mit denen des Hörnumpfahls, liegen diese in einem insgesamt trüberen Bereich und auch in einem Bereich höherer MERIS-TSM-Werte.

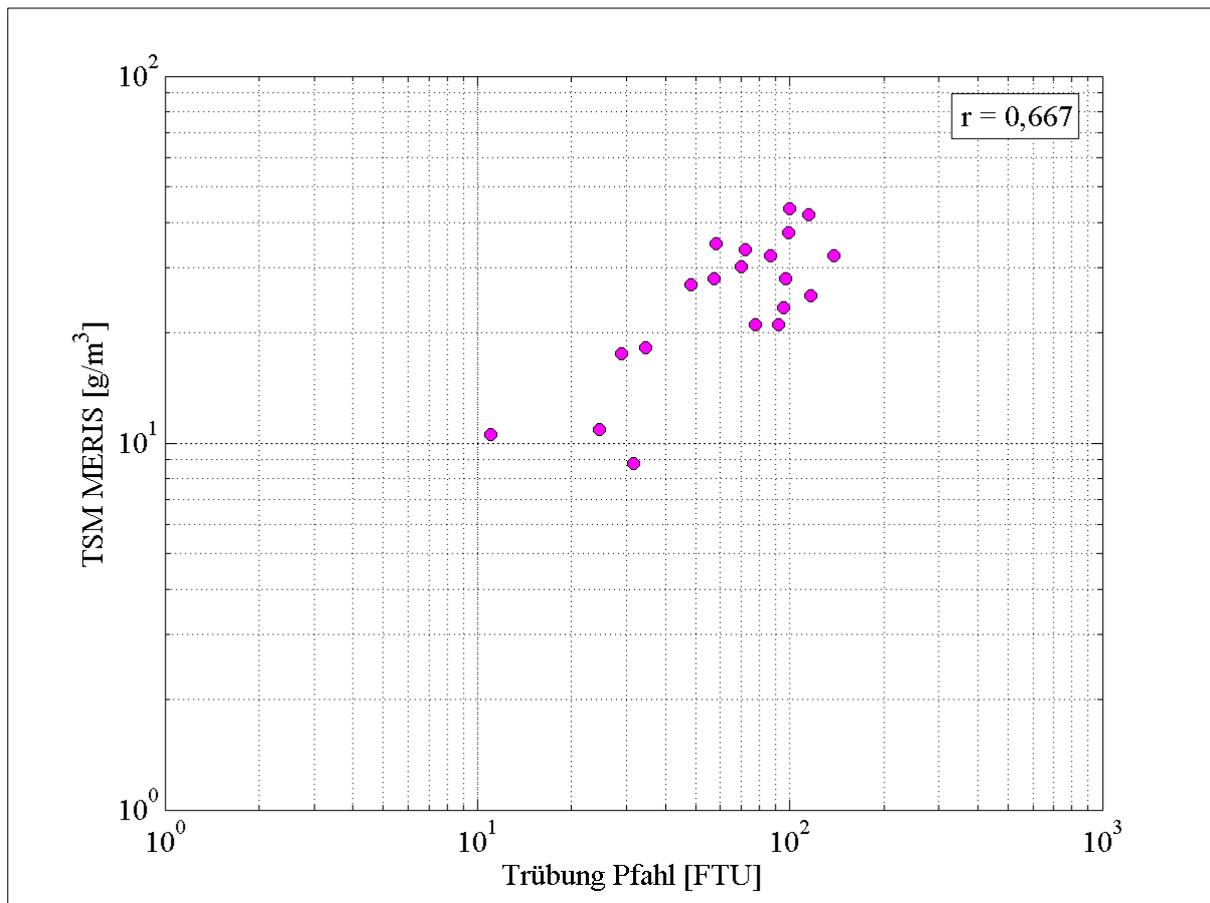


Abbildung 6: Punktstreuungsdiagramm Jade1 (eigene Abbildung)

Der Korrelationskoeffizient  $r$  liegt bei 0,667. Es liegt also ein mittlerer statistischer Zusammenhang vor, der aber ebenfalls hochsignifikant ist. Die relative erklärte Varianz liegt für  $\alpha = 0,05$  zwischen 73,39 % und 10,14 % und für  $\alpha = 0,01$  zwischen 79,51 % und 3,19 %. Das Unschärfe-Intervall ist hier so groß, da der Mutungsbereich stark vom Stichprobenumfang  $n$  abhängt, welcher hier sehr klein ist. Die errechnete relative erklärte Varianz ist somit nur wenig aussagekräftig.

Um einerseits dieses Problem zu mindern und andererseits eine ortsunabhängige Korrelationsanalyse durchzuführen, werden die TSM-Trübungswertepaare für beide Pfähle zusam-

mengefasst. Da aber, wie bereits in Abschnitt 3.3 angeführt, die Beziehung von Trübung zu TSM ortsabhängig ist, würde eine einfache Zusammenfassung die Ergebnisse einer solchen Analyse verfälschen. Deswegen werden zunächst die Trübungswerte beider Pfähle von FTU in TSM umgerechnet. Zur Wiederholung hier noch einmal die zugehörigen Gleichungen:

$$\text{Hörnum: } TSM = 1,894 + 1,336 * \text{Trübung [FTU]} \text{ mit } R^2 = 0,752$$

$$\text{Jade1: } TSM = 0,633 + 1,445 * \text{Trübung [FTU]} \text{ mit } R^2 = 0,856$$

Die folgende Abbildung zeigt das Punktstreuungsdiagramm für die TSM-Werte der Pfähle (im Folgenden nun  $TSM_P$ ) gegen die TSM-Werte des MERIS-Instruments (im Folgenden nun  $TSM_M$ ) nach der ortsabhängigen Umrechnung. Es ist gut zu sehen, dass die  $TSM_P$ -Werte beider Pfähle ungefähr auf einer Linie liegen, die Werte des Jadepfahls jedoch insgesamt höher sind.

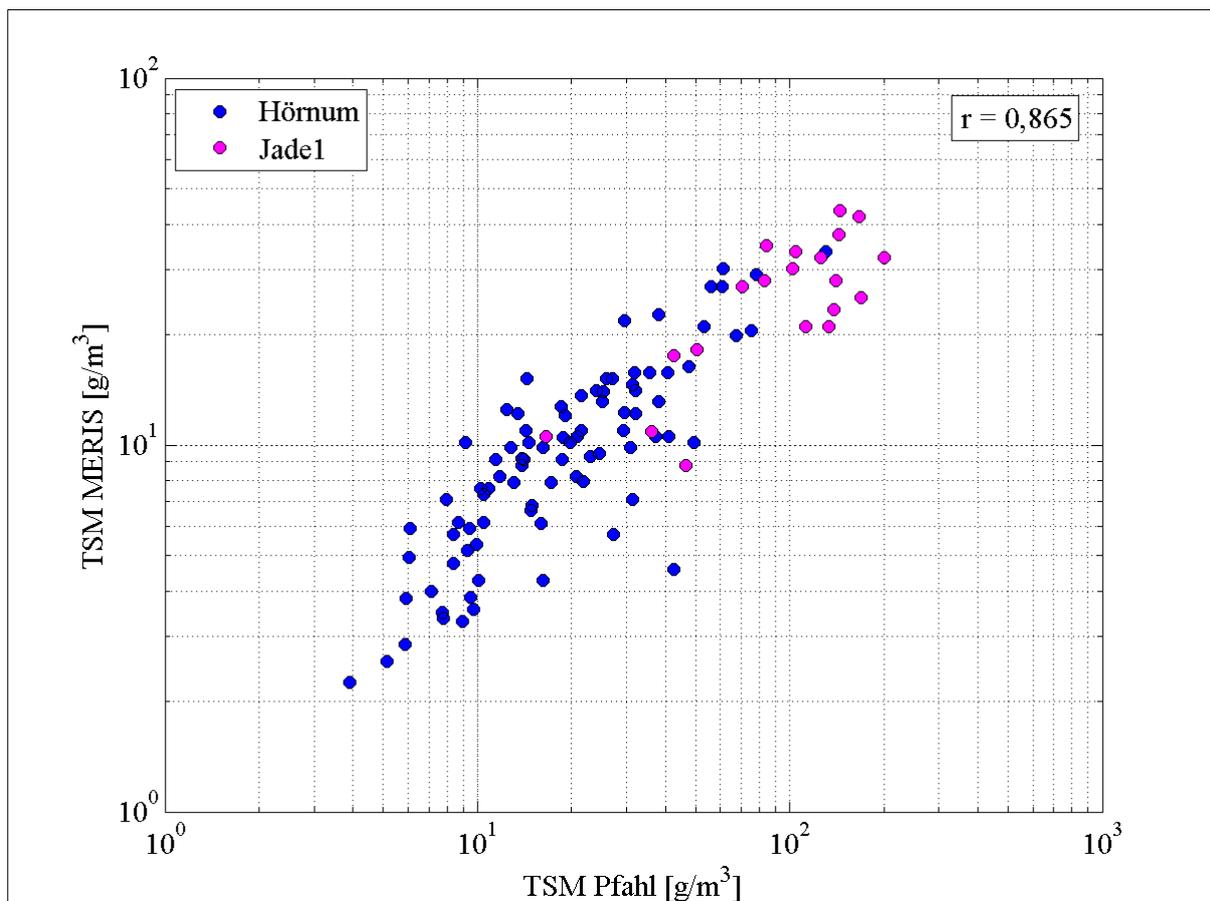


Abbildung 7: Punktstreuungsdiagramm Hörnum und Jade1 (eigene Abbildung)

Die Analyse ergibt einen hochsignifikanten Korrelationskoeffizienten  $r$  von 0,865. Dieser liegt auf der Grenze zwischen einem starken und einem sehr starken statistischen Zusammenhang. Aufgrund des nun erhöhten Stichprobenumfangs  $n = 107$  ist der Mutungsbereich deutlich enger. Die durch die Korrelation relative erklärte Varianz liegt nun für  $\alpha = 0,05$  zwischen 82,09 % und 65,25 % und für  $\alpha = 0,01$  zwischen 83,96 % und 61,74 %, also mindestens im Bereich eines starken Zusammenhangs.

Da vergleichsweise wenige vollaufgelöste Szenen (20 für Hörnum und eine für Jade1) bereitstehen, kann hier kein aussagekräftiger Mutungsbereich angegeben werden. Für die Vollständigkeit sollen hier aber kurz die Ergebnisse der Korrelationsanalyse angegeben werden.

Für die Trübungswerte des Hörnumpfahls und die  $TSM_M$ -Werte liegt  $r$  bei 0,550. Dieser Korrelationskoeffizient ist hochsignifikant und zeigt einen mittleren statistischen Zusammenhang. Die relative erklärte Varianz liegt hier für  $\alpha = 0,05$  zwischen 65,47 % und 1,25 % und für  $\alpha = 0,01$  zwischen 73,51 % und 0,22 %.

Aufgrund der Tatsache, dass es für Jade1 nur eine auswertbare vollaufgelöste Szene gibt, wird das zugehörige Wertepaar mit denen des Hörnumpfahls zusammengefügt. Zuvor werden wieder die Trübungswerte in TSM umgerechnet. Für die nun 21 Wertepaare liegt  $r$  bei 0,603. Hierbei handelt es sich ebenfalls um einen hochsignifikanten Korrelationskoeffizienten. Die relative erklärte Varianz liegt hier für  $\alpha = 0,05$  zwischen 68,88 % und 4,20 % und für  $\alpha = 0,01$  zwischen 76,06 % und 0,29 %.

Die Korrelationsanalyse hat gezeigt, dass bei beiden Pfählen mittlere bis starke statistische Zusammenhänge zwischen Pfahl- und Satellitenwerten vorliegen. Den Mutungsbereichen mangelt es jedoch aufgrund des teilweise sehr niedrigen Stichprobenumfangs an Aussagekraft. Am Beispiel des Hörnumpfahls ( $n = 87$ ) sowie der Zusammenfassung beider Pfähle in dieser Auflösung ( $n = 107$ ) wird aber deutlich, dass bei steigendem Stichprobenumfang der Mutungsbereich enger und somit aussagekräftig wird. Bei einer erhöhten Anzahl verfügbarer MERIS-Szenen für den Jadepfahl und die vollaufgelösten Szenen würden sich also ebenfalls engere Mutungsbereiche ergeben.

Das MERIS-Instrument liefert also durchaus verwertbare Ergebnisse für die Schwebstoffkonzentrationen im Küstenbereich. Jedoch werden die TSM-Werte durchweg unterschätzt. Deshalb soll nun eine Regressionsanalyse durchgeführt werden, um von den unterschätzten auf die tatsächlichen Werte schließen zu können. Diese soll im nächsten Abschnitt dieser Arbeit vorgestellt werden.

#### 4.4 Die Regression von TSM nach $b_{TSM}$

Abschnitt 3.1 hat die Methodik der Schwebstoffmessungen durch das MERIS-Instrument vorgestellt. Aus dem Streuungskoeffizienten  $b_{TSM}$  in  $m^{-1}$  wird die Schwebstoffkonzentration in  $g/m^3$  errechnet. Der Umrechnungsfaktor ist in diesem Fall jedoch nicht ortsabhängig, sondern ein für alle MERIS-Werte allgemeingültiger Faktor. Um also eine ortsabhängige Regression von TSM nach  $b_{TSM}$  durchzuführen, muss zunächst die von der ESA durchgeführte Umrechnung rückgängig gemacht werden, diese lautet:

$$TSM_M \left[ \frac{g}{m^3} \right] = 1,73 * b_{TSM}$$

Dies ist nur eine Annäherung an die höheren TSM-Werte im Wattenmeer. Um nun die Ausgangswerte bzw. das Produkt  $b_{TSM}$  nutzen zu können, werden alle  $TSM_M$ -Werte durch den Faktor 1,73 geteilt.

Der nun naheliegende Weg ist die Analyse des Zusammenhangs zwischen  $b_{TSM}$  und TSM durch eine lineare Einfachregression auf Basis der  $TSM_P$ -Werte.

Für Hörnum ergibt die Analyse eine Regressionskonstante von -3,710 und einen Regressionskoeffizienten von 4,448. Die Regressionsgleichung lautet somit:

$$TSM \left[ \frac{g}{m^3} \right] = -3,710 + 4,448 * b_{TSM}$$

$R^2$  liegt bei 0,703. Die Regression erklärt also ca. 70,30 % der Varianz der Werte. Somit liegt ein starker statistischer Zusammenhang vor. Abbildung 8 zeigt die Streuung der Werte um die Regressionsgerade.

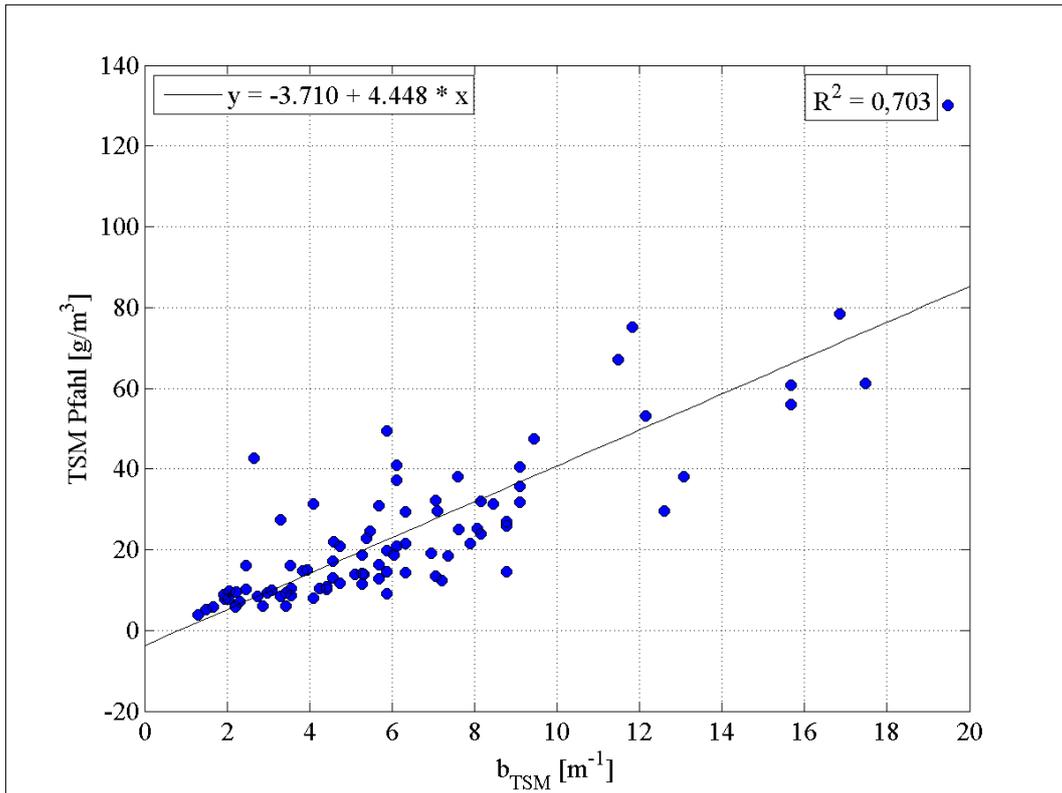


Abbildung 8: Regressionsgerade Hörnum (eigene Abbildung)

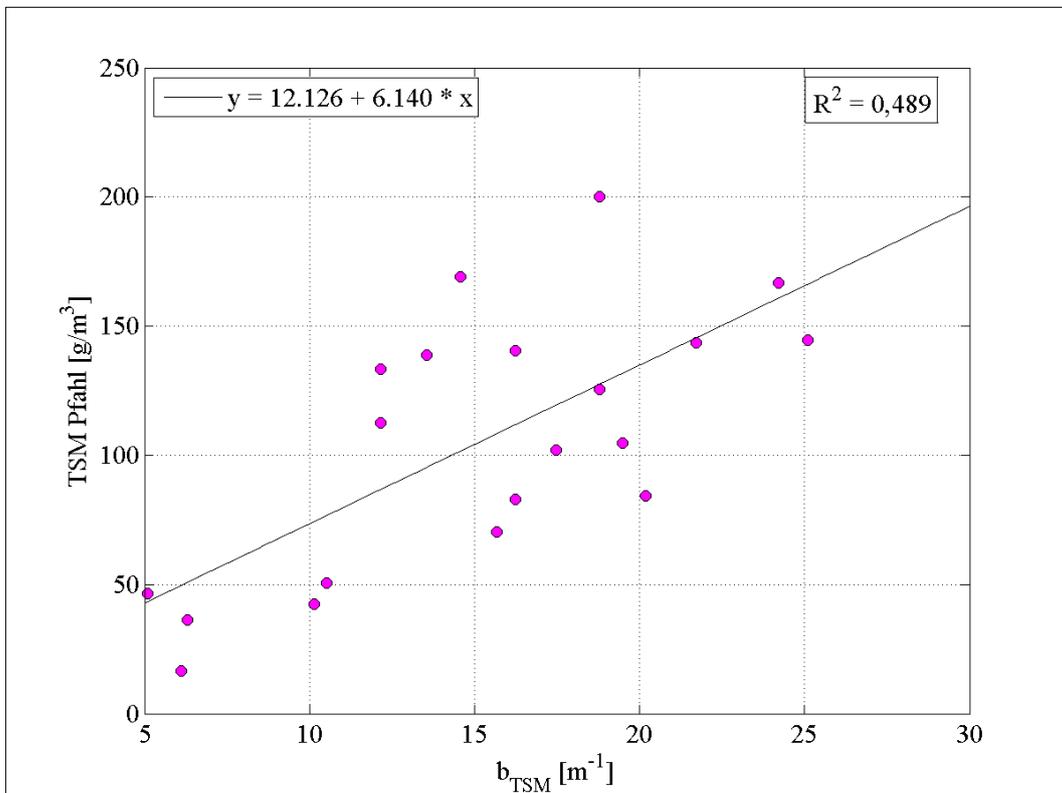


Abbildung 9: Regressionsgerade Jade1 (eigene Abbildung)

Abbildung 9 zeigt die Regressionsgerade für Jade1 mit der Regressionsgleichung:

$$TSM \left[ \frac{g}{m^3} \right] = 12,126 + 6,140 * b_{TSM}$$

Die Regressionskonstante für Jade1 ist erwartungsgemäß höher. Sie liegt bei 12,126. Auch der Regressionskoeffizient ist mit 6,140 höher.  $R^2$  liegt bei 0,489, was bedeutet, dass durch die Regression nur ca. 48,90 % der Varianz erklärt werden. Für Jade1 besteht somit nur ein mittlerer statistischer Zusammenhang, was wie schon bei der Korrelationsanalyse auf den geringen Stichprobenumfang zurückzuführen ist.

Durch die Regression sind die  $TSM_M$ -Werte nun deutlich dichter an den  $TSM_P$ -Werten, als sie es zuvor mit dem Umrechnungsfaktor der ESA waren. Tabelle 6 soll dies anhand der ersten zehn der insgesamt 87 Hörnum-Werte verdeutlichen.

**Tabelle 6: Vergleich der verschiedenen  $TSM_M$ -Werte und Hörnum- $TSM_P$ -Werte**

$TSM_M$ [g/m <sup>3</sup> ] (ESA)	$TSM_P$ [g/m <sup>3</sup> ] Hörnum	$TSM_M$ [g/m <sup>3</sup> ] (eigene Regression)
3,83	5,90	6,13
8,19	20,78	17,35
20,47	75,11	48,92
5,70	8,38	10,95
15,73	35,59	36,75
9,82	12,79	21,54
15,73	31,78	36,75
7,09	31,33	14,51
5,34	9,94	10,03
2,86	5,86	3,65

Eine erneute Korrelationsanalyse mit den eben errechneten  $TSM_M$ -Werten würde für den Hörnum- oder Jade1-Pfahl einzeln betrachtet keinen Unterschied ergeben. Aufgrund der nun unterschiedlichen Berechnungsweise von  $TSM_M$  aus dem MERIS-Produkt  $b_{tsm}$  macht eine wiederholte Korrelationsanalyse für die Zusammenfassung der Wertepaare beider Pfähle aber durchaus Sinn.

Die Abbildung 10 zeigt wieder ein Punkstreuungsdiagramm mit logarithmierten Skalen für die reduzierte Auflösung. Zur Erinnerung: Der Korrelationskoeffizient  $r$  lag für die Zusammenfassung beider Pfähle zuvor bei 0,865. Die relative erklärte Varianz lag für  $\alpha = 0,05$  zwi-

schen 82,09 % und 65,25 % und für  $\alpha = 0,01$  zwischen 83,96 % und 61,74 %. Nach der neuen Berechnungsweise der  $TSM_M$ -Werte ergibt die Korrelationsanalyse einen Koeffizienten  $r$  von 0,878. Es liegt nun ein sehr starker statistischer Zusammenhang vor. Das Unschärfeintervall der relativen erklärten Varianz ist aufgrund des gleichgroßen Stichprobenumfangs zwar genauso breit wie vorher, befindet sich nun aber in einem etwas höheren Bereich: für  $\alpha = 0,05$  zwischen 83,77 % und 68,19 % und für  $\alpha = 0,01$  zwischen 85,48 % und 64,90 %.

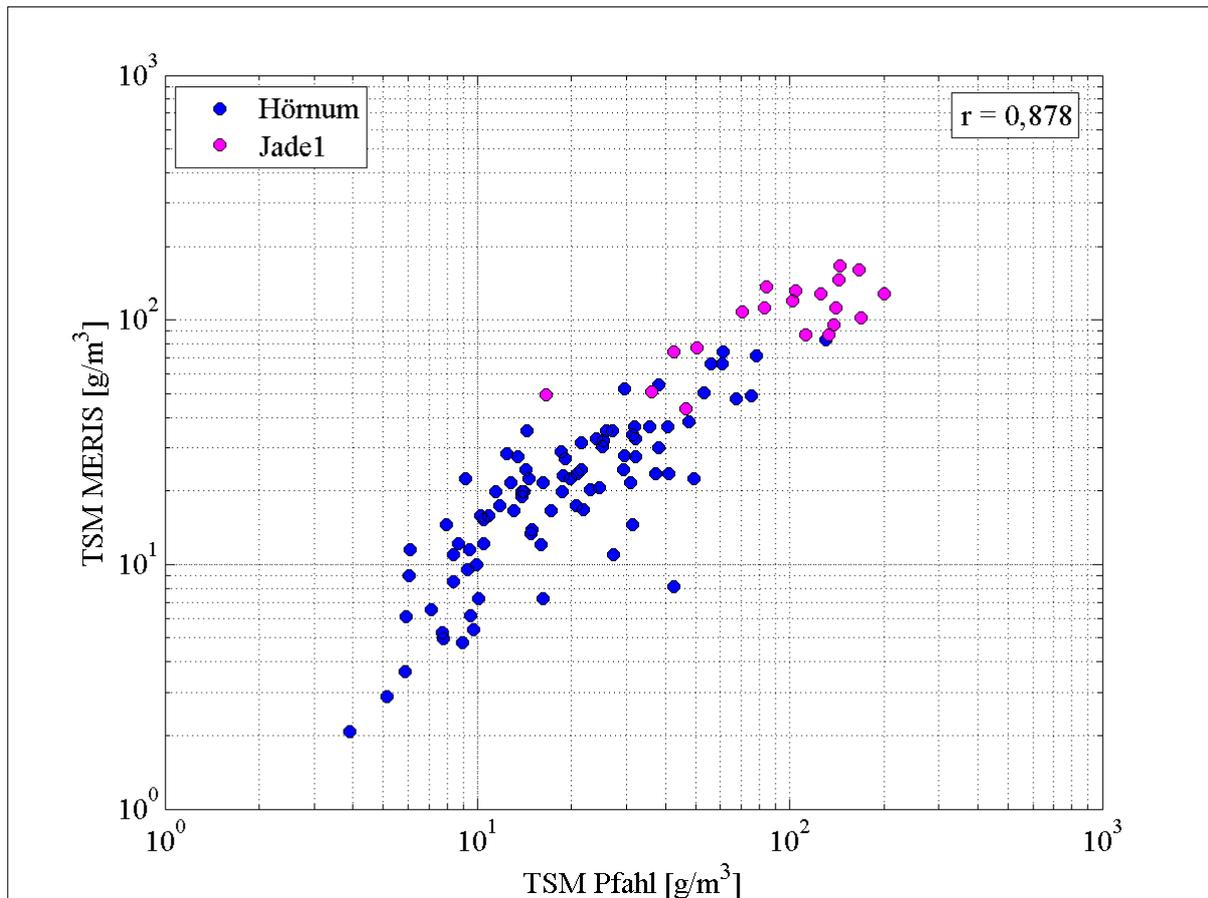


Abbildung 10: Punktstreudiagramm Hörnum und Jade1 (eigene Abbildung)

Ebenso wie das Unschärfeintervall für die Wertepaare bei reduzierter Auflösung ist auch das Intervall für die Wertepaare beider Pfähle bei voller Auflösung gleich breit geblieben. Aufgrund des geringen Stichprobenumfangs ist es also immer noch nicht aussagekräftig (vgl. Abschnitt 4.3). Zum Vergleich soll hier trotzdem der zugehörige Korrelationskoeffizient aufgeführt werden: Dieser ist von 0,603 auf 0,606 angestiegen.

Nun soll geprüft werden, ob das Verhältnis des Streukoeffizienten  $b_{tsm}$  zur Schwebstoffkonzentration TSM in  $g/m^3$  durch eine nichtlineare Regression besser erklärt werden kann. Zu diesem Zweck wird eine Kurvenanpassung mit SPSS durchgeführt.

Beim Vergleich der R<sup>2</sup>-Werte der verschiedenen Möglichkeiten fällt zuerst auf, dass durch eine nichtlineare Regression etwas höhere Anteile der Varianz erklärt werden können. Für Hörnum wird der größte R<sup>2</sup>-Wert bei einer kubischen Regression erreicht. Die durch sie erklärte Varianz liegt bei 74,90 % und somit um 3,60 Prozentpunkte höher als bei der linearen Regression. Die zugehörige Gleichung lautet:

$$TSM_P \left[ \frac{g}{m^3} \right] = -2,710 + 6,112 * b_{TSM} - 0,471 * b_{TSM}^2 + 0,023 * b_{TSM}^3$$

Für Jade1 wird der größte R<sup>2</sup>-Wert durch eine exponentielle Regression erreicht. Gegenüber der linearen Regression, welche einen Anteil von 48,90 % an der Gesamtvarianz der Werte erklärt, wird durch sie ein Anteil von 55,50 % erklärt. Die zugehörige Regressionsgleichung lautet:

$$TSM_P \left[ \frac{g}{m^3} \right] = 25,874 * e^{0,082 * b_{TSM}}$$

Eine erneute Korrelationsanalyse mit den anhand der nicht linearen Regressionen errechneten TSM<sub>M</sub>-Werten und den TSM<sub>P</sub>-Werten führt zu einem Koeffizienten r von 0,878. Dieses Ergebnis entspricht exakt dem der vorherigen Korrelationsanalyse mit den linear errechneten TSM<sub>M</sub>-Werte, und dies trotz der höheren R<sup>2</sup>-Werte der nichtlinearen Regressionen. Der Mutungsbereich ist aufgrund dessen, dass r und n übereinstimmen ebenfalls exakt gleich.

Eine erneute Korrelationsanalyse für die Wertepaare der vollaufgelösten MERIS-Szenen ergibt ebenfalls dieselben Ergebnisse, wie für die durch lineare Regression bestimmten Werte. Der durch nichtlineare Regressionen von TSM-Werten nach  $b_{TSM}$  erklärte Varianzanteil ist somit zwar höher, der Korrelationskoeffizient r für die zusammengefassten Paare der Pfahl- und Satelliten-TSM-Werte bleibt jedoch gleich. Dies führt zu der Vermutung, dass r = 0,878 das Maximum der Einfachkorrelation zwischen den vorliegenden Werten ist. Wie dies zu interpretieren ist, soll im folgenden Abschnitt diskutiert werden. Festzuhalten bleibt, dass ein sehr starker statistischer Zusammenhang zwischen Pfahl- und Satellitenwerten besteht, die MERIS-Schwebstoffdaten im Wattenmeer also verwendbar sind.

## 5. Diskussion und Aussichten

Bevor die Diskussion der Ergebnisse folgt, soll kurz der Nachfolger des MERIS-Instruments vorgestellt werden, da auf diesen in der Diskussion eingegangen wird bzw. viele Punkte, die genannt werden, auch hier gelten werden.

Der Einsatz von ENVISAT und somit auch von MERIS endete 2012 abrupt durch den Verlust des Kontakts mit dem Satelliten. Der Nachfolger von MERIS wird das Ocean and Land Colour Instrument (OLCI) an den beiden Umweltsatelliten SENTINEL-3 sein. Diese sind ein Paar baugleiche Satelliten, die ursprünglich 2011 oder 2012 starten sollten, was auf voraussichtlich 2014 verschoben wurde (ESA 2013: 1; AGUIRRE *et al.* 2007: 25). SENTINEL-3 verfolgt wie ENVISAT eine polare Umlaufbahn, jedoch auf 814 km Höhe. Durch die zeitgleiche Verwendung zweier Satelliten ist eine komplette Abbildung der Erde schon nach zwei Tagen möglich, im Gegensatz zu drei Tagen bei ENVISAT (AGUIRRE *et al.* 2007: 27; DRINKWATER; REBHAN 2007: iv). Das OLCI-Instrument hat eine 300-m-Auflösung und verfügt über 21 Spektralbänder im Bereich von 400 bis 1020 nm (siehe Anhang B). Diese zusätzlichen Bänder sollen die Atmosphärenkorrektur gegenüber der von MERIS verbessern (AGUIRRE *et al.* 2007: 28; DRINKWATER; REBHAN 2007: 43f.).

Nun zu den Ergebnissen. Die Korrelationsanalyse hat gezeigt, dass mit  $r = 0,878$  zwischen den aus dem Streuungskoeffizienten  $b_{TSM}$  des MERIS-Instruments und den aus der Trübung der Pfähle gewonnen TSM-Werten ein sehr starker statistischer Zusammenhang besteht. Dass das Ergebnis keinen Korrelationskoeffizienten von  $r = 1$  ergibt, wird schon durch die Bestimmtheitsmaße der Regressionen von TSM nach  $b_{TSM}$  und nach Trübung erklärt, da diese ebenfalls nicht 100 % der Varianz erklären können. Für den Vergleich der Analyse mit der in der Einleitung erwähnten Arbeit von GEMEIN *et al.* (2006) ist festzuhalten, dass diese nur auf fünf Wertepaaren beruhte. Ein Mutungsbereich für eine solche Analyse wäre so breit, dass auch ein hoher Korrelationskoeffizient keine Aussage über den statistischen Zusammenhang zulassen würde.

Die nichtlineare Regression von TSM nach  $b_{TSM}$  erreicht zwar höhere Bestimmtheitsmaße für Hörnum und Jade1, vermutlich liegt aber ein linearer Zusammenhang vor, wie bei der Regression von  $TSM_P$  nach Trübung, welcher eine deutlich größere Datenmenge zugrunde liegt, (vgl. FLÖSER *et al.* 2011: 16f.). Aufgrund des geringen Stichprobenumfangs hat die in dieser Arbeit aufgeführte lineare Regression jedoch ein niedrigeres Bestimmtheitsmaß als die nicht-

lineare Regression. Bei einem größeren Stichprobenumfang würde sich der Einfluss einzelner Werte auf die Regressionsgleichung vermindern und so eine sichere Aussage über den tatsächlichen Zusammenhang treffen lassen können. Ein größerer Stichprobenumfang könnte ebenfalls dazu führen, dass sich für Hörnum keine negativen Regressionskonstanten mehr ergeben. Diese haben den Effekt, dass sehr kleine Streuungskoeffizienten negative Schwebstoffkonzentrationen ergeben. Wenn bei einem größeren Stichprobenumfang auch sehr kleine Streuungskoeffizienten vorkämen, würde sich die Regressionsgleichung dementsprechend so ändern, dass auch diese positive Schwebstoffkonzentrationen ergeben. Aufgrund des Einflusses des Stichprobenumfangs, der sich in dieser Arbeit nun oft gezeigt hat, soll hier kurz erläutert werden, warum dieser hier so gering ist.

Bei einer durchschnittlichen Pfahlstandzeit von Mitte März bis Mitte November und einem theoretischen MERIS-Überflug ca. alle 1,5 Tage müssten pro Jahr ca. 163 TSM<sub>M</sub>- und Pfahl-Trübungswerte einander zugeordnet werden können. Für den seit 2002 eingesetzten Hörnumpfahl hätten also theoretisch ca. 1793 Wertepaare für die Analyse zur Verfügung stehen müssen, für den von 2007 bis 2011 eingesetzten Pfahl Jade1 ca. 815. Tatsächlich standen für die Analyse nur 87 Wertepaare für den Hörnumpfahl sowie 20 für den Pfahl Jade1 zur Verfügung.

Während seiner Einsatzzeit von 2002 bis 2012 hat ENVISAT die Nordsee ca. 2455 Mal überflogen, d. h., es müssten 2455 (reduziert aufgelöste) MERIS-Szenen zur Verfügung stehen, welche die aus den Level-1- abgeleiteten Level-2-Produkte enthalten. Die Level-2-Produkte aus den Jahren 2002, 2006 und 2007 sind jedoch (noch) nicht verfügbar. Somit liegt die Anzahl tatsächlich zur Verfügung stehender MERIS-Szenen bei 1924. Je nach Position der Deutschen Bucht in diesen Szenen ist es möglich, dass die Pfahlstandorte nicht abgebildet sind. Werden diese Szenen aussortiert, sind 1360 Szenen auf den der Pfahl Hörnum und 1293 Szenen, auf denen der Pfahl Jade1 abgebildet ist übrig. Nach Ausschluss jener Szenen, welche nicht während der Pfahlstandzeiten aufgenommen wurden bzw. denen kein Pfahlwert zuzuordnen ist, sind noch 816 Szenen für Hörnum und 711 für Jade1 verfügbar, davon 375 bzw. 261 ohne Wolken über den Pfahlstandorten. Nach Einbeziehung der beiden relevanten Flags reduziert sich die Anzahl weiter auf 88 für Hörnum und 20 für Jade1. Hiervon muss ein Wert der Hörnumdaten als Ausreißer ausgeschlossen werden. Somit bleiben für die Analyse 87 bzw. 20 MERIS-Szenen.

Die vorgenommenen Ausschlüsse waren alle notwendig und begründet, jedoch ist eine Erhöhung der Szenenanzahl möglich, sobald die Jahre 2002, 2006 und 2007 zur Verfügung stehen. Bei einer derzeitigen Verfügbarkeit von Szenen aus insgesamt 85 Monaten würde sich die

Anzahl der analysierbaren Szenen durch die Hinzunahme von 36 weiteren Monaten um ca. 42 % erhöhen. Der Effekt auf die berechneten Korrelationskoeffizienten lässt sich zwar nicht abschätzen, die Mutungsbereiche würden jedoch etwas enger werden.

Ein Beispiel: Für die am Ende von Abschnitt 4.4 durchgeführte Korrelationsanalyse mit den an die Standortumgebungen angepassten neu (linear) berechneten  $TSM_M$ -Werte ergab sich ein Korrelationskoeffizient von 0,878. Der durch die Korrelation erklärte Varianzanteil lag für  $\alpha = 0,05$  zwischen 83,77 % und 68,19 % und für  $\alpha = 0,01$  zwischen 85,48 % und 64,90 %. Angenommen, der Korrelationskoeffizient wäre unter Hinzunahme der fehlenden drei Jahre gleich, so ergäbe sich für  $n \approx 107 + 42 \% \approx 152$  eine durch die Korrelation relative erklärte Varianz für  $\alpha = 0,05$  zwischen 82,81 % und 69,82 % und für  $\alpha = 0,01$  zwischen 84,33 % und 67,19 %. Die Mutungsbereiche sind also ca. drei Prozentpunkte enger als zuvor.

Während der Verlust verwendbarer Szenen durch Bewölkung auch bei dem kommenden Sensor OLCI nicht zu vermeiden ist, so ist hier jedoch eine Verbesserung bei den durch die Flags ausgeschlossenen Szenen möglich. Die Ansatzpunkte hierfür wären der Trainingsbereich des Neuronalen Netzwerkes und die Algorithmen der Flags selbst. Letzteres wäre auch rückwirkend für die MERIS-Daten möglich und wurde wie bereit in Abschnitt 3.1 erwähnt schon mehrfach durchgeführt (ESA 2011: 74ff.). Des Weiteren ist es auch möglich, dass OLCI aufgrund der gleichzeitigen Nutzung von zwei Satelliten eine höhere zeitliche Auflösung erreicht und jeden Tag die Deutsche Bucht überfliegt (vgl. DRINKWATER; REBHAN 2007: 31).

Nach der Erläuterung der Quantität der Daten soll nun die Qualität der Daten sowie der Ergebnisse diskutiert werden. Hier gibt es mehrere Dinge zu beachten, z. B. die Auflösung. Für diese Analyse wurde hauptsächlich die reduzierte Auflösung von 1040 x 1200 m verwendet. Diese müsste theoretisch der vollen Auflösung von 260 x 290 m unterlegen sein. Da ein Pixel der reduzierten Auflösung aus 16 mit voller Auflösung besteht, wurden in dieser Analyse Schwebstoffwerte von 15 Pixeln miteinbezogen, welche sich weiter vom Pfahlstandort entfernt befinden und in die gleiche Analyse, bei ausschließlicher Verwendung der vollaufgelösten Bilder, nicht eingeflossen wären. Wegen der hohen Variabilität der Schwebstoffkonzentration, z. B. aufgrund des Transports durch Tideströmung, ist die Vermutung gerechtfertigt, dass sich mithilfe der vollaufgelösten Szenen höhere Bestimmtheitsmaße für die Regressionsgleichungen sowie höhere Korrelationskoeffizienten finden lassen würden, da hier die von MERIS ermittelten Werte räumlich näher an denen der Pfähle sind (vgl. RUDDICK *et al.* 2008: 80f.; ROBINSON 2010: 485; DOERFFER *et al.* 2010: 1). Da OLCI voraussichtlich nur die volle Auflösung unterstützt, entfällt eine solche Unterscheidung hier und die Schwebstoffkonzent-

rationen sollten bei einem ähnlichen Vergleich besser mit denen aus *in situ* Messungen korrelieren.

Des Weiteren ist zu beachten, dass es von dem Prozessor, in welchem das Neuronale Netzwerk implementiert ist, verschiedene Version gibt. Dem in der Analyse verwendeten Streukoeffizienten  $b_{TSM}$  liegen mehrere davon zugrunde. Diese Tatsache stellt die Konsistenz der Daten in Arbeiten wie dieser in Frage (vgl. MÜLLER 2010: 11). Für jeden verwendeten Wert die Prozessorversion herauszufinden, ist nicht möglich, da diese zu Beginn nicht mit ausgelesen wurden, weswegen Folgendes Aufschluss über den Einfluss verschiedener Prozessorversion auf das Ergebnis geben soll.

Beim Vergleich der Jahre, für welche MERIS-Szenen verfügbar sind, fällt auf, dass in jedem Jahr mehrere verschiedene Prozessorversionen eingesetzt wurden. Die Prozessorzusammensetzungen variieren von Jahr zu Jahr leicht, 2003 und 2004 wurden jedoch ganz andere Prozessoren eingesetzt als in den Folgejahren. Die folgende Abbildung enthält deshalb die Wertepaare nach der linearen Neuberechnung der  $TSM_M$ -Werte, ebenso wie Abbildung 10, diesmal jedoch nach Jahren eingefärbt.

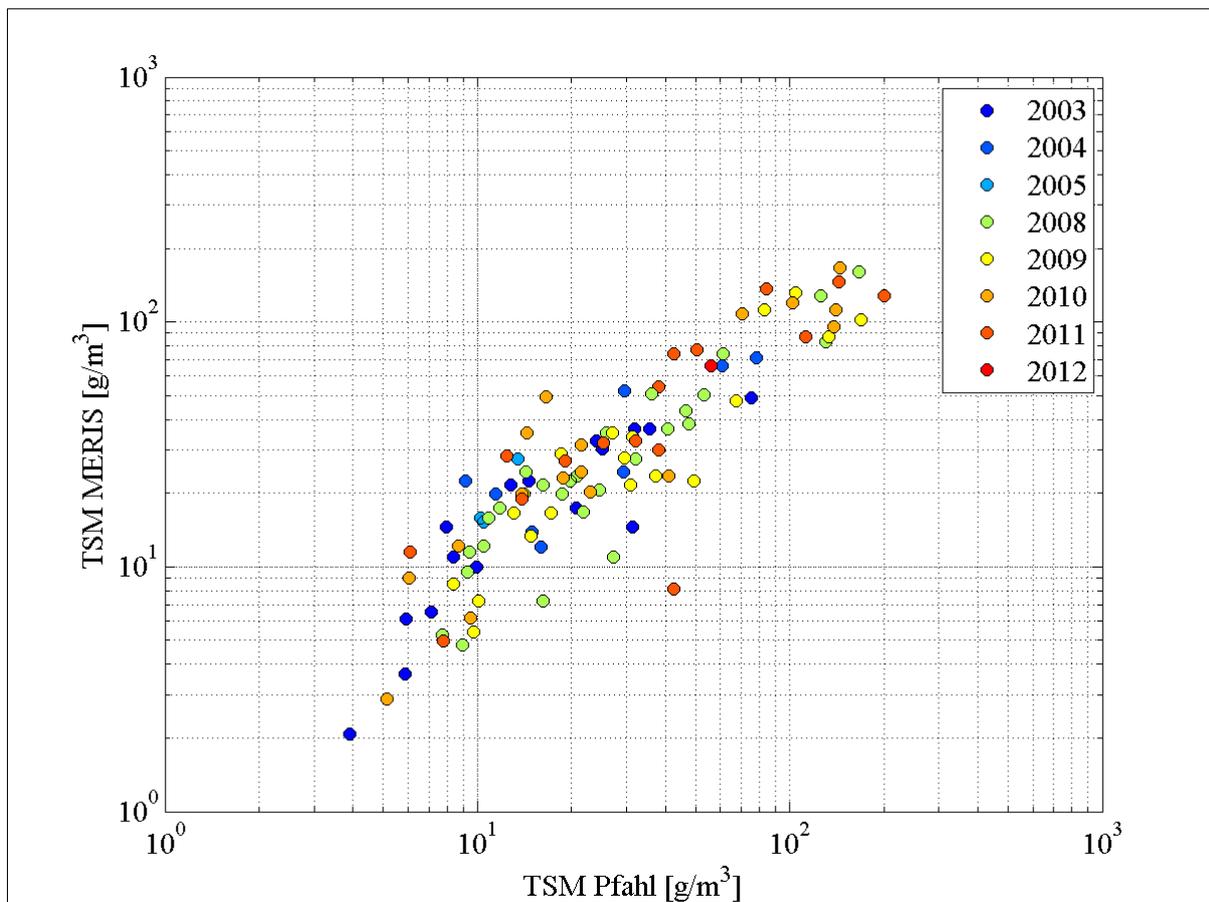


Abbildung 11: Abbildung 10 nach Jahren eingefärbt (eigene Abbildung)

Zu erkennen ist, dass die Unterschiede zwischen den Jahren keinen offensichtlichen Einfluss auf die Lage der Werte im Punkstreuungsdiagramm haben. Dass in den Jahren 2008 bis 2011 höhere TSM-Werte erreicht werden, liegt an den generell höheren Jade1-Werten, welche aus diesen Jahren stammen.

Eine weitere mögliche Einflussvariable ist die Messtiefe. Während MERIS nur die oberen Meter der Wassersäule messen kann, sitzen die Trübungssensoren der Pfähle ca. einen Meter über dem Meeresgrund bzw. bei Niedrigwasser ca. 1,5 m unter der Wasseroberfläche. Die Wassersäule im Wattenmeer gilt jedoch als das ganze Jahr über von guter Durchmischung geprägt (vgl. RUDDICK *et al.* 2008: 80). Außerdem treten hohe Differenzen zwischen den Messtiefen nur bei Hochwasser auf, zu diesem Zeitpunkt ist die Durchmischung aber aufgrund der Wasserbewegung bei Flut besonders gut (vgl. ROBINSON 2010: 487). Dies lässt die Vermutung zu, dass die Unterschiede zwischen den Messtiefen bei den untersuchten Beispielen keinen relevanten Einfluss auf die Ergebnisse hatten.

Ein weiterer zu beachtender Punkt sind die saisonalen Unterschiede in den Schwebstoffkonzentrationen sowie in der Zusammensetzung der Schwebstoffe (RUDDICK *et al.* 2008: 80f.). Da Letzteres einen erheblichen Einfluss auf die Umrechnung von sowohl Trübung als auch  $b_{TSM}$  in TSM hat, ist es noch zu untersuchen, ob zu den verschiedenen Jahreszeiten verschiedene Regressionsgleichungen gefunden werden können.

Gleiches gilt auch für die Verwendbarkeit von MERIS-Schwebstoffmessung in anderen Küstenabschnitten. Um diese zu gewährleisten, müssten extensive *in situ* Messungen durchgeführt werden und Gebiete gleicher Schwebstoffzusammensetzung klassifiziert werden, für welche dann spezifische Regressionsanalysen durchgeführt werden können (ROBINSON 2010: 518).

Ist dies geschehen, ist es möglich, großflächige Schwebstoffmessungen durchzuführen; mit MERIS nur noch rückwirkend, aber zukünftig mit OLCI in regelmäßigen Abständen. Dabei ist zu beachten - und dies ist der letzte wichtige Punkt in dieser Diskussion - dass durch Satellitenfernerkundung Schwebstoffe zwar großräumig bestimmt werden können, jedoch nur mit sehr geringer zeitlicher Auflösung. Da die Satelliten aber immer ungefähr zur gleichen Zeit über der Nordsee stehen, während sich die Tidephasen zeitlich verschieben, ist es möglich, auch mit solchen zeitlich auseinanderliegenden Messungen Rückschlüsse auf Schwebstofftransport und Konzentration zu verschiedenen Situationen zu ziehen. Dies wäre beispielsweise ein Ansatzpunkt für auf dieser Arbeit aufbauende Forschung.



## 6. Fazit

Die Frage, ob Schwebstoffkonzentrationen aus MERIS-Szenen im Wattenmeer verwendbar sind, kann nach der Analyse mit Ja beantwortet werden. Da die aus MERIS-Szenen stammenden Schwebstoffkonzentrationen in Küstennähe jedoch alle mit dem allgemeinen Umrechnungsfaktor 1,73 aus den Streuungskoeffizienten abgeleitet wurden, muss diesem „ja“ eine Einschränkung beigefügt werden: Die Verwendbarkeit ist nur dann gesichert, wenn die Werte für den Standort, für welchen sie verwendet werden sollen, durch *in situ* Messungen validiert worden sind und gegebenenfalls ein angepasster ortsspezifischer Zusammenhang zwischen Streuungskoeffizient und Schwebstoffkonzentration gefunden wurde. In den untersuchten Fällen Hörnumtief und Jadebusen passte die eigene Umrechnung der Streuungskoeffizienten in Konzentrationen besser. Dies muss aber nicht zwingend im gesamten Wattenmeerbereich der Fall sein.

Abschließend ist festzuhalten, dass die Satellitenfernerkundung eine große Unterstützung für die Erforschung von Schwebstoffen darstellt, in Küstennähe aber intensive und extensive *in situ* Messungen erfordert, um verlässliche Daten zu liefern. Sollte im Wattenmeer so großflächig verfahren werden, wäre es möglich, rückwirkend für die letzten 11 Jahre die Schwebstoffkonzentrationen und Verteilungen durch Auswertung der MERIS-Szenen zu bestimmen. Für die Zukunft würde dies bedeuten, dass durch OLCI ab 2014 eine kontinuierliche großflächige Beobachtung der Schwebstoffe im Wattenmeer möglich wäre. Dies stellt einen wichtigen Schritt für das Projekt COSYNA und generell für die Forschung im Wattenmeer dar.

## Literatur

AGUIRRE, M.; BERRUTI, B.; BEZY, J.-L.; DRINKWATER, M. R.; HELIERE, F.; KLEIN, U.; MAVROCORDATOS, C.; SILVESTRIN, P. (2007): Sentinel-3 – The Ocean and Medium-Resolution Land Mission for GMES Operational Services. –In: ESA bulletin. Bd. 131. S. 24-29. [http://www.esa.int/Our\\_Activities/Observing\\_the\\_Earth/ESA\\_i\\_Bulletin\\_i\\_131\\_August\\_2007](http://www.esa.int/Our_Activities/Observing_the_Earth/ESA_i_Bulletin_i_131_August_2007) 08.06.2013.

BAHRENBERG, G.; GIESE, E.; NIPPER, J. (1999): Univariate und bivariate Statistik. 4. Auflage. Stuttgart. (Statistische Methoden in der Geographie. Bd.1)

BARTHEL, H. (1974): Statistik I für Psychologen, Pädagogen und Sozialwissenschaftler. Stuttgart.

COMISO, J. (2010): Polar Oceans from Space. New York. (Atmospheric and Oceanographic Sciences Library. Bd. 41)

DEICKE, M; KARIUS, V.; JAHNKE, W.; KALLWEIT, W.; REBENS, M.; REYER, D. (2007): Charakterisierung von Sturmflutablagerungen auf Hallig Hooge – Quantifizierung des Sedimentwachstums seit 1914. –In: GÖNNERT, G.; PFLÜGER, B.; BREMER, J.-A. (Hrsg.): Von der Geoarchäologie über die Küstendynamik zum Küstenzonenmanagement. Leiden. (Coastline Reports 9/2007). S. 93-102.

DOERFFER, R. (1992): Imaging Spectroscopy for Detection of Chlorophyll and Suspended Matter. –In: TOSELLI, F.; BODECHTEL, J. (Hrsg.): Imaging Spectroscopy: Fundamentals and Prospective Applications. Brüssel. S. 215-257.

DOERFFER, R.; SCHILLER, H. (1997): Algorithm Theoretical Basis Document 2.12. Pigment index, sediment and gelbstoff retrieval from directional water leaving radiance reflectances using inverse modelling technique. [https://earth.esa.int/instruments/meris/atbd/atbd\\_2.12.pdf](https://earth.esa.int/instruments/meris/atbd/atbd_2.12.pdf) 30.05.2013

DOERFFER, R.; SCHILLER, H. (2007): The MERIS Case 2 water algorithm. –In: International Journal of Remote Sensing. 28. Jg. Bd. 3-4. S. 517-535.

DOERFFER, R.; SCHILLER, H.; KRASEMANN, H.; HEYMANN, K.; CORDES, W.; SCHÖNFELD, W.; RÖTTGERS, R.; BEHNER, I.; KIPP, P. (2010): MERIS Case 2 Water Validation – Early Results North Sea / Helgoland / German Bight.

[https://earth.esa.int/pub/ESA\\_DOC/envisat\\_val\\_1202/proceedings/MERIS/25\\_doeffer.pdf](https://earth.esa.int/pub/ESA_DOC/envisat_val_1202/proceedings/MERIS/25_doeffer.pdf).  
10.06.2013.

DOERFFER, R. (2011): MERIS Algorithm Theoretical Basis Document 2.25. Alternative Atmospheric Correction Procedure for Case 2 Water Remote Sensing using MERIS.  
[https://earth.esa.int/instruments/meris/atbd/abtd\\_2.25\\_v1.0.pdf](https://earth.esa.int/instruments/meris/atbd/abtd_2.25_v1.0.pdf). 25.05.2013

DRINKWATER, M. R.; REBHAN, H. (2007): Sentinel-3 – Mission Requirements Document.  
[http://esamultimedia.esa.int/docs/GMES/GMES\\_Sentinel3\\_MRD\\_V2.0\\_update.pdf](http://esamultimedia.esa.int/docs/GMES/GMES_Sentinel3_MRD_V2.0_update.pdf).  
08.06.2013.

EUROPEAN SPACE AGENCY (ESA) (2006a): MERIS Detailed Instrument Description Issue 1.0.  
[https://earth.esa.int/pub/ESA\\_DOC/ENVISAT/MERIS/meris.DetailedInstrumentDescription.1\\_0.pdf](https://earth.esa.int/pub/ESA_DOC/ENVISAT/MERIS/meris.DetailedInstrumentDescription.1_0.pdf). 01.05.2013

EUROPEAN SPACE AGENCY (ESA) (2006b): MERIS Product Handbook. Issue 2.1.  
[https://earth.esa.int/pub/ESA\\_DOC/ENVISAT/MERIS/meris.ProductHandbook.2\\_1.pdf](https://earth.esa.int/pub/ESA_DOC/ENVISAT/MERIS/meris.ProductHandbook.2_1.pdf).  
30.04.2013

EUROPEAN SPACE AGENCY (ESA) (2011): MERIS 3rd data reprocessing - Software and ADF updates. Issue 1.0.  
[http://earth.eo.esa.int/pcs/envisat/meris/documentation/meris\\_3rd\\_reproc/A879-NT-017-ACR\\_v1.0.pdf](http://earth.eo.esa.int/pcs/envisat/meris/documentation/meris_3rd_reproc/A879-NT-017-ACR_v1.0.pdf). 08.06.2013

EUROPEAN SPACE AGENCY (ESA) (2013): Sentinel-3.  
[http://www.esa.int/Our\\_Activities/Observing\\_the\\_Earth/GMES/Sentinel-3](http://www.esa.int/Our_Activities/Observing_the_Earth/GMES/Sentinel-3). 08.06.2013

FLÖSER, G.; RIETHMÜLLER R.; WIRTH, K. (2011): Wadden Sea Poles. –In: COSYNA Progress Report 2011. S. 16-17.  
[http://www.hzg.de/imperia/md/content/gkss/institut\\_fuer\\_kuestenforschung/kok/icon/progress\\_report2011\\_web.pdf](http://www.hzg.de/imperia/md/content/gkss/institut_fuer_kuestenforschung/kok/icon/progress_report2011_web.pdf). 14.06.2013

GEMEIN, N.; STANEV, E.; BRINK-SPALINK, G.; WOLFF, J.-O.; REUTER, R. (2006): Patterns of Suspended Matter in the East Frisian Wadden Sea: Comparison of Numerical Simulations with MERIS Observations. –In: European Association of Remote Sensing Laboratories (EARSeL) eProceedings 2/2006. S. 180-198.

[http://www.eproceedings.org/static/vol05\\_2/05\\_2\\_gemein1.pdf](http://www.eproceedings.org/static/vol05_2/05_2_gemein1.pdf). 30.05.2013

GOWER, J. F. R. (2010): Oceans from Space, a Once-a-Decade Review of Progress: Satellite Oceanography in a changing World. –In: BARALE, V.; GOWER, J.F.R.; ALBEROTANZA, L. (Hrsg.): Oceanography from Space. Dordrecht.

HEEMKEN, O.P.; THEOBALD, N.; STACHEL, B. (1998): Verteilung von organischen Kontaminanten zwischen wäßriger und partikulärer Phase in der Elbe und der Deutschen Bucht. Fachbericht der Flussgebietsgemeinschaft Elbe.

[http://www.fgg-elbe.de/dokumente/fachberichte.html?file=tl\\_files/Download-Archive/Fachberichte/Schadstoffmonitoring\\_allgemein/98Verteilungsko.pdf](http://www.fgg-elbe.de/dokumente/fachberichte.html?file=tl_files/Download-Archive/Fachberichte/Schadstoffmonitoring_allgemein/98Verteilungsko.pdf). 30.05.2013

HEISE, S.; CLAUS, E.; HEININGER, P.; KRÄMER, T.; KRÜGER, F.; SCHWARTZ, R.; FÖRSTNER, U. (2005): Studie zur Schadstoffbelastung der Sedimente im Elbeeinzugsgebiet – Ursachen und Trends. Studie der Flussgebietsgemeinschaft Elbe im Auftrag der Hamburg Port Authority. [http://www.fgg-elbe.de/hintergrundinformationen.html?file=tl\\_files/Downloads/EG\\_WRRL/hgi/hgd/studie\\_schadstoffbel\\_dez\\_2005.pdf](http://www.fgg-elbe.de/hintergrundinformationen.html?file=tl_files/Downloads/EG_WRRL/hgi/hgd/studie_schadstoffbel_dez_2005.pdf). 30.5.2013

HELMHOLTZ-ZENTRUM GEESTHACHT (HZG) (o.J.): COSYNA Coastal Observation System for Northern and Arctic Seas. Broschüre. Geesthacht.

[http://www.hzg.de/imperia/md/content/gkss/institut\\_fuer\\_kuestenforschung/kok/icon/cosyna\\_brochure\\_web.pdf](http://www.hzg.de/imperia/md/content/gkss/institut_fuer_kuestenforschung/kok/icon/cosyna_brochure_web.pdf). 27.05.2013

KRAMER, H. J. (1994): Observation of the Earth and Its Environment – Survey of Missions and Sensors. 2. Auflage. Berlin.

KRAMER, H. J. (2002): Observation of the Earth and Its Environment – Survey of Missions and Sensors. 4. Auflage. Berlin.

MÜLLER, D. (2010): Geostatistische Analyse der Chlorophyllverteilung in der Nordsee basierend auf MERIS-Satellitendaten. Dissertation. Hamburg.

ONKEN, R.; CALLIES, U.; VAESSEN, B.; RIETHMÜLLER R. (2007): Indirect determination of the heat budget of tidal flats. –In: Continental shelf research. Bd. 27. S. 1656 - 1676.

PAPULA, L. (2008): Mathematik für Ingenieure und Naturwissenschaftler. Band 3. Vektoranalysis, Wahrscheinlichkeitsrechnung, Mathematische Statistik, Fehler- und Ausgleichsrechnung. 5. Auflage. Wiesbaden.

REISE, K. (1995): Wattökologische Folgen bei Änderung von Klima und Küste. –In: Schriftenreihe der Schutzgemeinschaft Deutsche Nordseeküste. 1/1996. Wilhelmshaven. S. 29-41.

ROBINSON, I. S. (2010): Discovering the Ocean from Space - The Unique Applications of Satellite Oceanography. Heidelberg.

RUDDICK, K.; LACROIX, G.; LANCELOT, C.; NECHAD, B.; PARK, Y.; PETERS, S.; VAN MOL, B. (2008): Optical Remote Sensing of the North Sea. –In: BARALE, V.; GADE, M. (Hrsg.): Remote Sensing of the European seas. New York. S. 79-90.

SACHS, L. (2002): Angewandte Statistik. Anwendung statistischer Methoden. 10. Auflage. Berlin.

SCHMITZ-PFEIFFER, A. (1986): Fernerkundung ozeanischer Schwebstoffe mit flugzeuggetragenen Lasern und Satellitenradiometern. Dissertation. Kiel.

SCHÖNWIESE, C.-D. (2006): Praktische Statistik für Meteorologen und Geowissenschaftler. 4. Auflage. Berlin.

# Seapoint Turbidity Meter



## Features

- wVery low power requirements
- wSmall size
- w6000 m depth capability
- wOptically confined sensing volume
- wInsensitive to ambient light
- wLinear output over more than 5 decades
- wFour programmable sensitivity options
- wOptical feedback compensates for temperature coefficient and aging of optical components
- wVery low offset voltage does not require adjustment
- wInterfaces easily with data acquisition systems
- wRugged, corrosion-free materials
- wPin compatible with Seapoint Chlorophyll Fluorometer

## Applications

- wPollution Monitoring
- wWater and Wastewater Quality
- wSediment Transport
- wOcean Profiling
- wRiver and Stream Monitoring

## Description

The Seapoint Turbidity Meter detects light scattered by particles suspended in water, generating an output voltage proportional to turbidity or suspended solids. The low power requirements make it ideal for applications where battery drain is a concern. Sensitivity is selected by two digital lines which can be hard wired or microprocessor controlled, thereby choosing the appropriate range and resolution for measurement

of extremely clean to very turbid waters. The offset voltage is within 1 mV of zero and requires no adjustment across gains. The unique optical design confines the sensing volume to within 5 cm of the sensor allowing near-bottom measurements and minimizing errant reflections in restricted spaces. The sensor is easily interfaced with data acquisition packages; a 5 ft pigtail is supplied. Custom configurations are available.

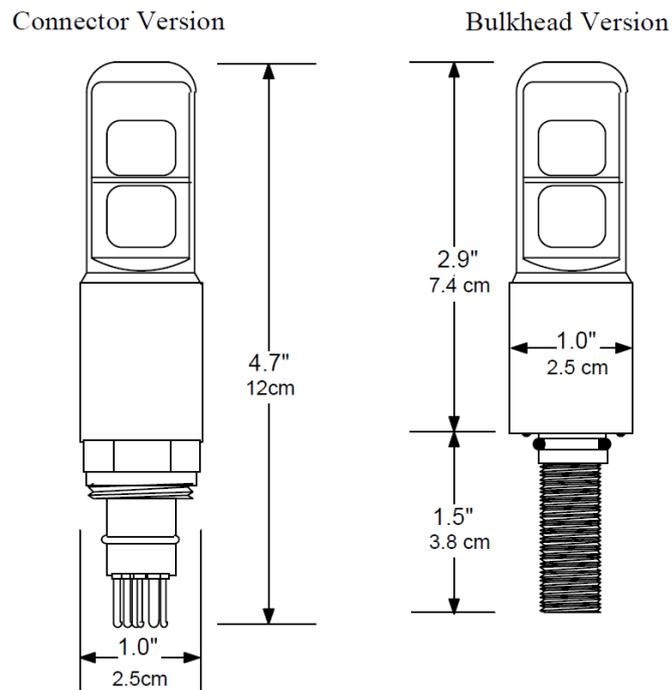


87 North Road w Kingston, NH 03848-3056 w USA  
Tel: (603) 642-4921 w Fax: (603) 642-4922  
seapoint@seapoint.com w www.seapoint.com

## Specifications

wPower Requirements:	7-20 VDC, 3.5 mA avg, 6 mA pk															
wOutput	0-5.0 VDC															
wOutput Time Constant	0.1 sec															
wRMS Noise	< 1 mV															
wPower-up Transient Period	< 1 sec															
wLight Source Wavelength	880 nm															
wSensing Distance (from windows)	< 5 cm (approx.)															
wLinearity	< 2% deviation 0-750 FTU															
wSensitivity/Range	<table border="1"> <thead> <tr> <th>Gain</th> <th>Sensitivity (mV/FTU)</th> <th>Range (FTU)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>100x</td> <td>200</td> <td>25</td> </tr> <tr> <td>20x</td> <td>40</td> <td>125</td> </tr> <tr> <td>5x</td> <td>10</td> <td>500</td> </tr> <tr> <td>1x</td> <td>2</td> <td>**</td> </tr> </tbody> </table> <p>(** output is non-linear above 750 FTU)</p>	Gain	Sensitivity (mV/FTU)	Range (FTU)	100x	200	25	20x	40	125	5x	10	500	1x	2	**
Gain	Sensitivity (mV/FTU)	Range (FTU)														
100x	200	25														
20x	40	125														
5x	10	500														
1x	2	**														
wTemperature Coefficient	< 0.05%/°C															
wDepth Capability	6000 m (19,685 ft)															
wWeight (dry)	86 g (3.0 oz)															
wOperating Temperature	0°C to 65°C (32°F to 149°F)															
wMaterial	ABS plastic, epoxy															
wUnderwater Connector	Impulse AG-306/206 (others available on request)															

## Dimensions



8/00

Quelle: SEAPOINT (2013): [http://www.seapoint.com/pdf/stm\\_ds.pdf](http://www.seapoint.com/pdf/stm_ds.pdf). 25.06.2013

## B ESA SENTINEL-3 Datenblatt



# sentinel-3

→ GMES MEDIUM RESOLUTION LAND AND OCEAN MISSION

*Last update March 2012*

### MISSION OBJECTIVES

European global land and ocean monitoring mission. It provides 2 day global coverage Earth observation data (with 2 satellites) for sea and land applications with real-time products delivery in less than 3 hours. These services include applications such as:

- > sea and land colour data, in continuation of MERIS (Envisat)
- > sea and land surface temperature, in continuation of AATSR (Envisat)
- > sea-surface and land-ice topography, in continuation of Envisat altimetry
- > along-track SAR for coastal zones, in-land water and sea ice topography
- > vegetation products through synergy between optical instruments

### MISSION PROFILE

- > Launch: 2013
- > Launch vehicle:
  - S3A: Rockot from Plesetsk; S3B: Vega from Kourou
- > 7 year lifetime (consumables for 12 years)
- > Sun-synchronous orbit @ 814.5 km over geoid
- > Mean LST: 10:00 at Descending Node
- > 27-days repeat cycle (14+7/27 orbits per day)
- > Inclination 98.65°
- > Operational configuration comprises 2 satellites

### SATELLITE PLATFORM

- > Gyroless, 3 axis stabilized platform with 3 star tracker heads, 4 reaction wheels and magnetic off-loading
- > Geodetic pointing and yaw steering
- > 8x1N hydrazine thrusters for in-plane & out-of-plane manoeuvres
- > 3 m accuracy real-time onboard orbit determination based on GPS and Kalman filtering
- > Launch Mass: 1250 kg (with maturity and system margins, and fuel)
- > Stowed dimensions (mm): (H) 3710, (W) 2202, (L) 2207
- > Power: 2.1 kW rotary wing with 10 m<sup>2</sup> triple junction GaAs European solar cells; Li Ion Battery Capacity: 160 Ah
- > Communication links:
  - > 64 kbps uplink, 1 Mbps downlink S-band command and control link (with ranging)
  - > 2 x 280 Mbps X-band science data downlink
  - > 384 Gbit solid state mass memory
- > Autonomy: position timeline and onboard sun ephemeris for greater than 2 weeks nominal autonomous operations

### SATELLITE PAYLOAD

- OLCI** (Ocean and Land Colour Instrument)
  - > Swath width: 1270 km, with 5 tilted cameras
  - > Spatial sampling: 300 m @ SSP
  - > Spectrum: 21 bands [0.4-1.02] μm
  - > Radiometric accuracy: 2% abs, 0.1% rel
- SLSTR** (Sea and Land Surface Temperature Radiometer)
  - > Swath width: dual view scan, 1420 km (nadir) / 750 km (backwards)
  - > Spatial sampling: 500 m (VIS, SWIR), 1 km (MWIR, TIR)
  - > Spectrum: 9 bands [0.55-12] μm
  - > Noise equivalent dT: 50 mK (TIR) at 270K
- SRAL** (Sentinel-3 Ku/C Radar Altimeter)
  - > Radar measurement modes: LRM and SAR
  - > Tracking modes: closed and open-loop
  - > Pulse repetition frequency: 1.9 KHz(LRM), 17.8 KHz (SAR)
  - > Total range error: 3 cm
- MWR** (MicroWave Radiometer)
  - > dual 23.8/36.5 GHz
  - > Radiometric accuracy 3K absolute (0.6 K relative)
- POD** (Precise Orbit Determination)
  - > GPS, LRR and DORIS (3 cm final accuracy after processing)

[www.esa.int/gmes](http://www.esa.int/gmes) European Space Agency

Quelle: ESA (2013): [http://esamultimedia.esa.int/docs/S3-Data\\_Sheet.pdf](http://esamultimedia.esa.int/docs/S3-Data_Sheet.pdf). 25.06.2013

## **Danksagungen**

Ich möchte mich hiermit herzlich bei meinem Betreuer Dr. Götz Flöser bedanken, ohne den dieses Thema wohl nicht zustande gekommen wäre und der mich erfolgreich in die Matlab-Programmierung eingeführt hat. Außerdem ermöglichte er es mir, meine Bachelorarbeit hier am HZG zu schreiben. Des Weiteren möchte ich mich bei Prof. Dr. Gabriele Gönnert und Prof. Jürgen Böhner dafür bedanken, dass sie mir alle Freiheiten gelassen haben, diese Arbeit so durchzuführen, wie ich es für richtig hielt.

Ebenso muss ich mich bei Wolfgang Schönfeld von der Abteilung für Fernerkundung dafür bedanken, dass er mir sein Programm zum Auslesen der MERIS-Daten bereitgestellt hat und immer Zeit für fachliche Fragen bezüglich der Fernerkundung mit MERIS hatte. Weiterer Dank gilt Horst Garbe und Karin Wirth für die Informationen, welche ich von ihnen in persönlichen Gesprächen erhielt (im Text als solche gekennzeichnet) und Rolf Riethmüller, der mir das Programm zur Qualitätssicherung der Pfahldaten zur Verfügung gestellt hat.

Zuletzt muss ich mich noch bei Martina Heineke dafür bedanken, dass sie immer ein offenes Ohr hatte und ein guter Motivator war.





