



Einfluss der synoptischen Situation auf die Validierung von Niederschlägen aus Satellitendaten über der Ostsee

Bachelor-Arbeit

im

– **Bachelorstudiengang (B. Sc.), Physik des Erdsystems** –

Meteorologie, Ozeanographie, Geophysik

der Mathematisch-Naturwissenschaftlichen Fakultät

der Christian-Albrechts-Universität zu Kiel

vorgelegt von

Rebekka Mecking

Referent: Dr. K. Bumke

Co-Referentin: Dr. S. Tegtmeier

Kiel, den 29.06.2011

Kurzfassung

Ziel dieser Arbeit ist es, den qualitativen und quantitativen Einfluss des Wetters auf Niederschlagsdaten über der Ostsee, ermittelt von der Klimatologie HOAPS (Hamburg Ocean Atmosphere Parameters and fluxes from Satellite Data), zu verifizieren und synoptische Phänomene zu untersuchen, die die Wahrscheinlichkeit beeinflussen, dass HOAPS Niederschlag erkennt.

Dazu stehen zum einen die aus Satellitenmessungen abgeleiteten Niederschlagsdaten der HOAPS-Klimatologie, zum anderen in-situ-Niederschlagsmessungen mit Schiffsregenmessern auf Handelsschiffen, beide aus dem Zeitraum von 1995 bis 1997, zur Verfügung. Die Daten sind in kollokierter Form vorhanden; die HOAPS- und zugehörigen Schiffsmessungen eines Niederschlagsereignisses liegen maximal 30 Minuten und 25 Kilometer auseinander. Zur Analyse der Wetterlage werden das prognostische Europamodell des DWD sowie Bodendruckkarten und Satellitenbilder hinzugezogen.

HOAPS erkennt durchschnittlich 55% der Niederschlagsereignisse mit Niederschlagsraten größer gleich 0,3mm/h, die der Schiffsregenmesser erkannt hat.

Aus Vergleichen der Niederschlagsdaten folgt, dass HOAPS den gemessenen Niederschlag unterschätzt; die Einbeziehung von Wetterkarten und Satellitenbildern ergibt, dass das unabhängig von der Art des Niederschlags geschieht. Zudem steigt die Wahrscheinlichkeit, dass HOAPS Niederschlag erkennt, mit zunehmender Niederschlagsrate.

Die Untersuchung der Bedeckungsarten, Druckgebiete und Frontdurchgänge ergibt, dass die Wahrscheinlichkeit der Niederschlagsidentifizierung durch HOAPS bei konvektiver Bewölkung geringer als bei stratiformer ist; dementsprechend verringert sich bei Durchzug einer Kaltfront die Wahrscheinlichkeit, dass Niederschlag erkannt wird.

Aus diesen Ergebnissen kann gefolgert werden, dass HOAPS Schauer und kurzzeitige Niederschläge seltener als länger anhaltenden, gleichmäßigen Regen erkennt.

Abstract

The objective of this thesis is to verify the qualitative and quantitative influence of the weather on precipitation data over the Baltic Sea, derived from the HOAPS climatology ((**H**amburg **O**cean **A**tmosphere **P**arameters and fluxes from **S**atellite **D**ata), and to analyze the synoptic phenomena that may influence the probability of HOAPS to detect precipitation.

For this purpose, precipitation data of the HOAPS climatology derived from satellite measurements as well as in-situ-precipitation measurements by ship rain gauges on board of merchant ships, both taken in a period between 1995 and 1997, are available. The data set is collocated; the HOAPS- and the rain gauge measurements are separated by 30 minutes and 25 kilometers at most. In order to analyze the weather conditions, the prognostic Europamodell of the DWD as well as surface pressure charts and satellite images were used.

On average, HOAPS detects 55% of all precipitation events having precipitation rates greater equal 0.3mm/h that are identified by the ship rain gauges as well.

The comparison of the precipitation data leads to the conclusion that HOAPS underestimates the measured precipitation; the inclusion of weather charts and satellite images shows that this is independent of the type of precipitation. Moreover, the probability of HOAPS to identify precipitation rises when precipitation rates rise.

The investigation of cloud types, pressure fields and frontal systems shows that the probability of HOAPS to detect precipitation is smaller during convective than during stratiform clouds; correspondingly, a passage of a cold front also decreases the probability of HOAPS to identify precipitation.

Thus, it may be concluded that HOAPS misses short-period precipitation like showers more often than long-lasting, stratiform precipitation.

Inhalt

Kurzfassung.....	2
Abstract	3
Inhalt.....	4
1. Einleitung	5
1.1 Wolken und Niederschlag	6
1.2 Fronten und Frontalzonen	7
2. Methoden.....	8
2.2 Messgeräte.....	8
2.2.1 SSM/I - Special Sensor Microwave/Imager.....	8
2.2.2 Schiffsregenmesser.....	9
2.3 Datenverarbeitung	11
2.3.1 HOAPS.....	11
2.3.2 Schiffsmessungen.....	11
2.3.3 Europamodell (EM).....	12
2.3.4 Betrachtung von Satellitenbildern.....	13
2.3.5 Betrachtung von Bodendruckkarten.....	13
3. Ergebnisse	14
3.1 Vergleich der Niederschlagsmengen.....	14
3.2 Vergleich mit dem Europamodell	18
3.2.1 Bedeckungsgrad	18
3.2.2 Niederschlag und Niederschlagsarten	22
3.2.3 Meeresoberflächen- und Lufttemperatur.....	23
3.2.4 Luftfeuchtigkeit	24
3.3 Vergleich mit Satellitenbildern	26
3.4 Vergleich mit Wetterkarten.....	28
3.5 Erweitern der räumlichen und zeitlichen Differenzen	32
3.6 Betrachtung eines Fallbeispiel: 05. bis 09.09.1997.....	33
4. Diskussion	38
Anhang	42
I. Tabelle der Niederschlagsereignisse.....	42
II. Satellitenbilder.....	45
III. Bodendruckkarten	52
IV. Abkürzungen.....	57
V. Abbildungsverzeichnis	58
VI. Tabellenverzeichnis	59
VII. Quellen.....	60

1. Einleitung

Das Klima der Erde wird maßgeblich durch die Ozeane beeinflusst, die insgesamt etwa 70% der Erde bedecken. Austauschprozesse an der Grenzfläche Ozean-Atmosphäre bilden einen wichtigen Antrieb für groß- und kleinskalige Zirkulationen und einen Großteil des weltweiten Frischwasserflusses sowie einen bedeutenden Teil des Energiehaushalts. Zur kurzfristigen Wettervorhersage und zur Vorhersage langfristiger Klimaänderungen sind zeitlich und räumlich hoch aufgelöste Messungen von Verdunstung und Niederschlag notwendig.

In-situ-Daten, z.B. solche von Schiffsmessungen, sind kaum verfügbar und werden in der Regel nur im Rahmen von Messkampagnen gewonnen. Ein Grund dafür ist, dass es kaum Geräte gibt, die auf einem schwankenden Schiff auch bei hohen Windgeschwindigkeiten noch zuverlässige Niederschlagsraten liefern. So wurden auch die in dieser Arbeit verwendeten Daten während einer Langzeiterprobung zwischen 1995 bis 1997 des damals entwickelten Schiffregenmessers gewonnen (Großklaus, 1996). Inter- bzw. Extrapolation von an Land gemessenen Niederschlägen auf Gebiete über See sind selbst für Randmeere wie Nord- oder Ostsee problematisch, für Ozeane unmöglich.

Globale, flächendeckende, hochaufgelöste Niederschlagsfelder können daher nur mit Hilfe von Fernerkundungsverfahren gewonnen werden. So messen z.B. passive Mikrowellenradiometer (SSM/I - Special Sensor Microwave/Imager) auf Satelliten die einfallende elektromagnetische Strahlung bei verschiedenen Frequenzen im Mikrowellenbereich. Aus den gemessenen Helligkeitstemperaturen der verschiedenen Kanäle lässt sich der Niederschlag ableiten. Die Verwendung von Mikrowellen hat den Vorteil, dass sie auch durch Wolken hindurch Niederschlag erfassen können (Hollinger, 1990)

Eine Reihe von Klimatologien arbeitet mit den so gewonnenen Daten, darunter HOAPS (**H**amburg **O**cean **A**tmosphere **P**arameters and Fluxes from **S**atellite **D**ata), das zusätzlich noch mit einem AVHRR (**A**dvanced **V**ery **H**igh **R**esolution **R**adiometer) Pathfinder SST (**S**ea **S**urface **T**emperature) die Meeresoberflächentemperatur misst und sie in ihre Berechnungen einbezieht. HOAPS liegt derzeit in der dritten Version vor (Andersson, 2009).

Vergleiche der HOAPS-Klimatologie mit in-situ-Messungen ergaben, dass HOAPS in einem Drittel der Niederschlagsereignisse des auf Schiffen gemessenen Niederschlags größer gleich 0,01mm/h ebenfalls Niederschlag erkannt hat; beschränkte man sich auf Niederschlagsereignisse von größer gleich 0,3mm/h, da die aus den SSM/I-Daten abgeleiteten

Niederschlagsraten auf Grund des Rausch-zu-Signalverhältnisses keine geringeren Niederschlagsraten erfassen können, so wurden immerhin 59% der gemessenen Niederschlagsereignisse erkannt. In mehr als einem Drittel der Fälle errechnete HOAPS keinen Niederschlag (Strehz und Bumke, 2010).

Ziel dieser Arbeit ist es, die Identifizierung von Niederschlag durch die HOAPS-Klimatologie mit möglichen synoptischen Phänomenen zu verknüpfen. Dazu werden Niederschlagsdaten über der Ostsee im Zeitraum von Februar 1995 bis Oktober 1997 betrachtet. Zum Vergleich mit der HOAPS-Klimatologie liegen in-situ-Messungen von denen zwischen 1995 und 97 auf Handelsschiffen angebrachten Schiffsregenschirmern vor. Zur Analyse des Wetters wurden das Europamodell (DWD, 1995-97), Satellitenbilder der Dundee Satellite Receiving Station (Dundee Satellite Receiving Station, 1995-97) sowie Wetterkarten des europäischen Wetterberichts (DWD, 1995-97) herangezogen.

1.1 Wolken und Niederschlag

Die primäre Hypothese dieser Arbeit ist es, dass die Identifizierung des Niederschlags von der Form des Niederschlags abhängt. Kurze Schauer sollen demnach schwieriger zu erkennen sein als lang anhaltender, gleichmäßiger Regen. Um dies zu untersuchen, müssen die Bedeckungsarten identifiziert werden, aus denen der entsprechende Niederschlag fallen kann.

Wolken werden grob in zwei Kategorien eingeteilt: konvektive und stratiforme. Dabei unterscheiden sie sich nicht nur hinsichtlich Form und Ort ihrer Entstehung sondern auch hinsichtlich ihres Aussehens. Stratiforme Wolken oder Schichtwolken sind weitgehend strukturlos und meist lückenlos über große Flächen ausgebreitet. Aus ihnen fällt vorwiegend gleichmäßiger Regen. Zu dieser Kategorie zählen Stratus (St), Cirrostratus (Cs), Nimbostratus (Ns) und Altostratus(As). Schichtwolken entstehen beispielsweise beim Aufgleiten einer Warmfront auf eine Kaltfront. Bei der Hebung der warmen Luft entstehen durch Kondensation zunächst Ns, dann St und As sowie Cs in großer Höhe. Vor allem aus den Nimbostrati fällt gleichmäßiger, langanhaltender Regen.

Die zweite Kategorie bilden konvektive Wolken. Sie sind meist kleinskalig und stark strukturiert. Kleine Haufenwolken wechseln sich mit Wolkenlücken ab. Zu ihnen gehören Cumuli (Cu), Cumulonimbi (Cb) und Altocumuli(Ac).

Konvektive Wolken entstehen meist bei thermischer oder orographischer Hebung oder an einer Kaltfront, an der kalte Luft sich unter warme schiebt. Dort entstehen durch die

Labilisierung der Luftmassen Cumuli, die häufig Schauer und Gewitter bringen, kurzzeitige und räumlich eng begrenzte Niederschläge also.

Es wird vermutet, dass zu Zeitpunkten, an denen HOAPS keinen Niederschlag erkennt, vorwiegend konvektive Bewölkung zu finden ist, die zu kurzen Schauern führt, während es vor allem Niederschlag aus stratiformer Bewölkung relativ genau berechnet. Dies soll anhand des prognostischen Europamodells und anhand von Satellitenbildern untersucht werden.

1.2 Einfluss von Fronten

Fronten sind Orte, die meist durch einen massiven Wetterumschwung gekennzeichnet sind. So kommt es an Kaltfronten häufig zu Schauern und Gewittern; eine heranziehende Warmfront bringt bevorzugt gleichmäßigen Regen. Ein zweiter Punkt, der untersucht werden soll, ist folglich, inwiefern die Identifizierung des Niederschlags vom Durchzug unterschiedlicher Frontenarten abhängt. Dazu werden vornehmlich Bodendruckkarten und Satellitenbilder betrachtet.

Des Weiteren wird untersucht, ob die Erkennung von Niederschlag durch HOAPS saisonale Präferenzen zeigt, von der Temperatur oder Luftfeuchte abhängt und unterschiedliche Wetterlagen, die die Wahrscheinlichkeit der Niederschlagserkennung durch HOAPS beeinflussen könnten, eher im Sommer als im Winter vorkommen.

2. Methoden

2.2 Messgeräte

Es gibt eine Vielzahl von Geräten, um Niederschlag zu messen. Man unterscheidet zwischen Fernerkundung und in-situ-Messungen. In der Fernerkundung wird Niederschlag vor allem per Niederschlagsradar über Land und per Radiometermessungen über dem Ozean gemessen. Diese Arbeit nutzt Niederschlagsdaten, die mit Hilfe des SSM/I für die HOAPS-Klimatologie gesammelt wurden.

In-situ-Messungen erfolgen über Land durch Geräte, die den Niederschlag in einem Behälter sammeln oder optisch erfassen. Über dem Ozean gibt es, wie bereits in der Einleitung erwähnt, nur sehr wenige Messungen. Deswegen werden aus Fernerkundungsdaten abgeleitete Niederschlagsraten über dem Ozean in der Regel mit Hilfe von Messungen auf Inseln validiert (Bidwell et al., 2003).

2.2.1 SSM/I - Special Sensor Microwave/Imager

Die Parameter für die HOAPS-Klimatologie liefert ein DMSP(Defense Meteorological Satellite Program)-Satellit. Er führt ein passives Mikrowellen-Radiometer-System (SSM/I) mit sich, das Mikrowellenenergie in vier Frequenzintervallen (mittlere Frequenzen: 19,35GHz; 22,235GHz; 37GHz; 85,5GHz) über eine Messfühlerantenne aufzeichnen kann; passiv heißt, dass das SSM/I keine elektromagnetische Strahlung sendet, sondern nur empfängt. Die einfallende elektromagnetische Strahlung unterschiedlicher Frequenz und Intensität wird über die Antennentemperatur in eine Helligkeitstemperatur (brightness temperature (TB)) umgerechnet (Andersson, 2009). Anhand des Energiespektrums kann qualitativ und quantitativ auf Niederschlag geschlossen werden (Bauer und Schlüssel, 1993). Diese Messungen bilden die Grundlage der HOAPS-Klimatologie.

Das SSM/I kann Niederschlag nur in ausreichendem Küstenabstand, größer gleich 50km, zuverlässig aufzeichnen. Auch Meereis führt zu Messfehlern, die korrigiert werden müssen.

Im Messzeitraum von 1995 bis 1997 befanden sich stets mindestens zwei DMSP-Satelliten mit einem SSM/I im Orbit, die Daten für HOAPS aufgezeichnet haben. Die Satelliten bewegen sich auf einem nahezu kreisförmigen, sonnensynchronen Orbit mit einer Inklination von 98,9° und einer Flughöhe von ca. 860km. Die Satelliten umrunden die Erde täglich 14,1 mal, was einer Periodendauer von 102min entspricht. Mit Ausnahme eines kleinen Streifens

an den Polen wird die Erde innerhalb von zwei bis drei Tagen vollkommen abgedeckt (Andersson, 2009).

Zusätzlich misst der DSMP-Satellit über einen AVHRR Pathfinder SST die Meeresoberflächentemperatur, die auch als Parameter in die HOAPS-Klimatologie eingeht (Andersson, 2009).

2.2.2 Schiffsregenschmesser

Zur in-situ-Niederschlagsmessung auf der Ostsee wurden Schiffsregenschmesser auf Handelsschiffen installiert, die am IfM-Geomar speziell zur Niederschlagsmessung bei hohen Windgeschwindigkeiten auf offener See entwickelt wurden. Einem vertikalen Auffangbehälter wurde ein horizontaler hinzugefügt, der die horizontal einfallende Wassermenge misst (Großklaus, 1996).

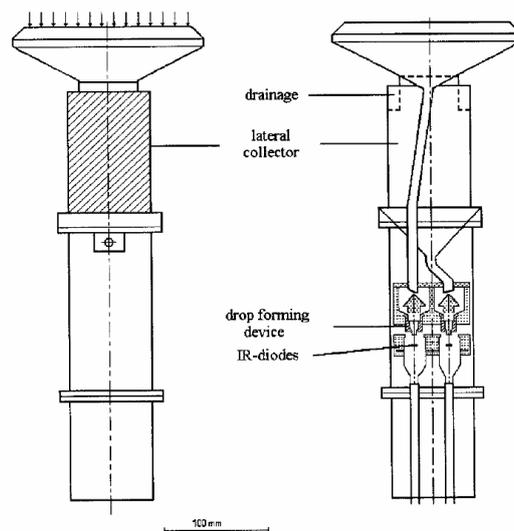


Abb. 1: Schiffsregenschmesser (Großklaus, 1996)

Neben dem Verdunstungsfehler und Benetzungsfehler macht sich auf Schiffen insbesondere der Umströmungsfehler durch den Regenschmesser selbst sowie die Umströmung des Schiffes bemerkbar (Sevruk und Zahlavova, 1994). Grund dafür sind die über See relativ hohen Windgeschwindigkeiten und der Fahrtwind des Schiffes. Bewegungen des Schiffes aufgrund von Seegang führen zu weiteren Fehlern. Um auch bei hohen Windgeschwindigkeiten relativ zum Schiffsregenschmesser zuverlässig die Niederschlagsrate bestimmen zu können, wurde eine seitliche Auffangfläche hinzugefügt. Sie misst den Flüssigwassergehalt (LWC - Liquid Water Content) des Luftvolumens, aus dem sich die Niederschlagsrate ableiten lässt. Bei relativen Windgeschwindigkeiten größer 11m/s wird nur die vertikale Auffangfläche zur

Niederschlagsmessung genutzt. Bei Windgeschwindigkeiten kleiner 9m/s wird allein der horizontale Kollektor genutzt, bei größer 9 und kleiner 11m/s relativer Windgeschwindigkeit werden beide Kollektoren, linear gewichtet mit der Windgeschwindigkeitsdifferenz, genutzt.

Die folgenden Formeln beschreiben die abhängig von der Windgeschwindigkeit ermittelten Regenraten (Clemens, 2003).

1. Regenrate ermittelt aus der horizontalen Sammelfläche (für Windgeschwindigkeiten kleiner 9m/s):

$$RR_h = C_h \cdot N_h \cdot (1 + c_1 \cdot 10^{-3} \cdot U^{c_2})$$

mit

$$c_1 = 8,5 \cdot 10^{-3}$$

$$c_2 = 1,7$$

C_h ist die Eichkonstante des horizontalen Tropfenformers, N_h die an der horizontalen Sammelfläche gemessene Tropfenzahl, U ist die relative Windgeschwindigkeit.

2. Regenrate ermittelt aus der vertikalen Sammelfläche (für Windgeschwindigkeiten größer 11m/s):

$$RR_v = 24,6 \cdot LWC^{1,3}$$

mit

$$LWC = c_1 + C_v \cdot \frac{N_v}{U} \cdot (1 + c_2 \cdot U^{c_3})$$

$$c_1 = 0,026$$

$$c_2 = 4 \cdot 10^{-4}$$

$$c_3 = 2,0$$

C_v ist die Eichkonstante des vertikalen Tropfenformers, N_v die an der vertikalen Sammelfläche gemessene Tropfenzahl.

3. Regenrate für Windgeschwindigkeiten von 9m/s bis 11m/s:

$$RR = \left(1 - \frac{U - U_{min}}{U_{max} - U_{min}} \cdot RR_h + \frac{U - U_{min}}{U_{max} - U_{min}} \cdot RR_v\right)$$

mit

$$U_{min} = 9 \frac{m}{s}$$

$$U_{max} = 11 \frac{m}{s}$$

2.3 Datenverarbeitung

2.3.1 HOAPS

HOAPS ist eine Klimatologie zur Berechnung von Frischwasserflüssen aus von Satelliten gemessenen Parametern. Sie ist global für den Ozean im Zeitraum zwischen Juli 1987 und Dezember 2005 verfügbar und liegt derzeit in ihrer dritten Version vor (Andersson, 2009).

Aus den vom SSM/I gemessenen Helligkeitstemperaturen und vom AVHRR Pathfinder SST gemessenen Meeresoberflächentemperaturen können Niederschlag, Wassergehalt der Luftsäule, Flüssigwassergehalt der Wolken und die bodennahe Windgeschwindigkeit berechnet werden (Andersson, 2009).

In dieser Arbeit werden mit Schiffsmessungen kollokierte Niederschlagsdaten analysiert, die entsprechend der aus allen verfügbaren Schiffsmessungen ermittelten Korrelationslängen maximal 30min und 25km auseinander liegen (Strehz und Bumke, 2010). Die Niederschlagsereignisse liegen zwischen 56,2 und 59,4°N bzw. 17,5 und 21,5°O. Niederschlagsereignisse näher als 50km zur nächsten Küste werden nicht in den Datensatz einbezogen, da auch vom Satelliten in dieser Region keine Niederschlagsdaten geliefert werden.

Für einige Betrachtungen wird ein kollokiertes Datensatz verwendet, der zeitliche Differenzen von 2 Stunden und räumliche von 100km zulässt, außerdem ein nicht kollokiertes Datensatz, der alle HOAPS-Niederschläge enthält, unabhängig davon, ob ein Schiff in der Nähe Niederschlag gemessen hat oder nicht.

HOAPS erkennt Niederschlag ab einer Rate größer gleich 0,3mm/h. Darunter ist das Rausch-zu-Signalverhältnis so schlecht, dass keine verlässliche Aussage über Niederschlag getroffen werden kann (Andersson, 2009).

2.3.2 Schiffsmessungen

Die Schiffsmessungen liegen kollokiert mit den HOAPS-Daten vor. Sie wurden im Zeitraum von 1995 bis 1997 auf Handelsschiffen auf der Ostsee mit einer zeitlichen Auflösung von 8 Minuten aufgenommen. Als Messgerät diente der in Kapitel 2.2.2 erläuterte Schiffsregenmesser. In dieser Arbeit sollen die Schiffsmessungen als Referenz verwendet werden; es wird vorausgesetzt, dass der so gemessene Niederschlag auf jeden Fall stattgefunden hat.

2.3.3 Europamodell (EM)

Das Europamodell des Deutschen Wetterdienstes ist ein numerisches Klimamodell, das die Größen Bedeckungsgrad, Bodentemperatur, Lufttemperatur, spezifische Feuchte, Bodendruck, Windrichtung und -geschwindigkeit sowie Niederschlag (fest und flüssig) für 24 Stunden im 6-Stundenintervall berechnet. Alle Zeitangaben sind in UTC. Es hat eine räumliche Auflösung von $0,5^\circ \times 0,5^\circ$ und deckt den gesamten Europaraum ab (Doms, 1996). Das EM dient in dieser Arbeit zur Ermittlung von Wetterparametern, die die Funktionalität von HOAPS beeinflussen. Da es sich lediglich um eine Prognose handelt, sind die festgestellten Abhängigkeiten eher als Tendenz anzusehen.

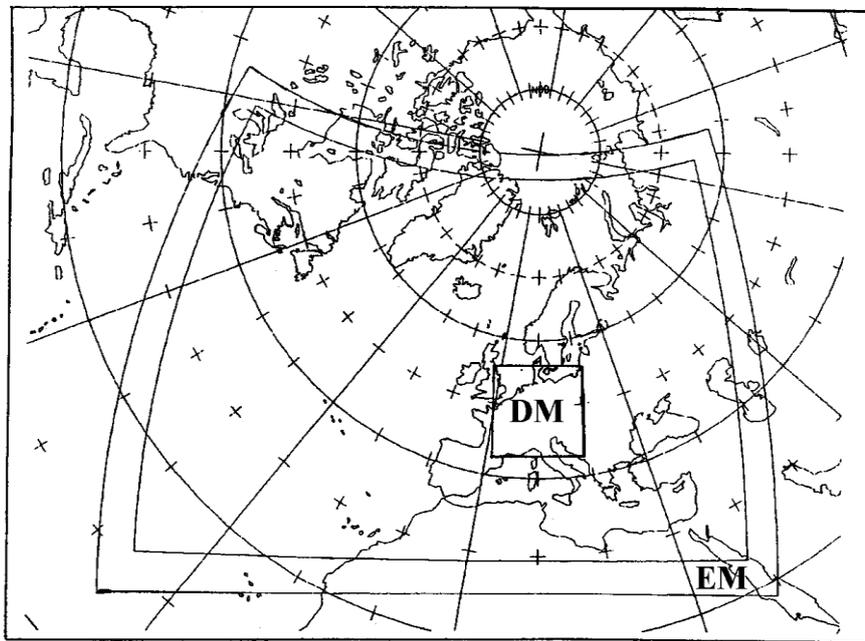


Abb. 2: Geltungsbereich des Europamodells (Doms, 1996)

Das Europamodell wird auf zwei verschiedene Arten in die Analyse eingebracht. Zum einen wird jedes Niederschlagsereignis der Schiffsmessung größer gleich $0,3\text{mm/h}$ mit einer Karte überdeckt, die jeweils den räumlichen Zustand eines prognostizierten Werts darstellt, beispielsweise die Druckverteilung im Ostseeraum. Die Werte, deren räumliche Verteilung signifikante Unterschiede zwischen den Fällen zeigt, in denen HOAPS Niederschlag erkennt, und jenen, in denen es keinen erkennt, werden in der Auswertung näher betrachtet.

Zum anderen wird der EM-Datensatz für den Zeitpunkt des Ereignisses für den Ort der HOAPS-Niederschlagsmessung per Interpolation berechnet, sodass die Werte nun für einen festen Punkt und eine feste Zeit vorliegen und zur Ermittlung ihres Einflusses auf die Identifizierung von Niederschlag miteinander verglichen werden können.

Es ist anzumerken, dass die Daten vom 23.11.1995 in der Interpolationsbetrachtung nicht berücksichtigt werden, da ihre Interpolation nur fehlerhafte Werte ergab. Betrachtungen mit Hilfe der interpolierten Werte werden folglich nur 82 Niederschlagsereignisse berücksichtigen.

2.3.4 Betrachtung von Satellitenbildern

Zur Betrachtung der Wetterlage wurden Satellitenbilder der Dundee Satellite Receiving Station herangezogen (Dundee Satellite Receiving Station, 1995-97). Der Satellit liefert zweimal täglich, etwa um 1 und um 12 Uhr UTC, Bilder von Europa. Für die Auswertung wurden thermische Infrarotbilder mit einer Wellenlänge von 10,3 bis 11,3 μ m verwendet. Auf diesen hob sich die Bedeckung deutlich sichtbar vom Boden ab. Anhand der Bilder soll festgestellt werden, inwieweit die Erkennung des Niederschlags durch HOAPS von konvektiver und stratiformer Bewölkung abhängt.

Da die Bilder stets aus einer anderen Position aufgenommen wurden, wurden sie zunächst gedreht und zurechtgeschnitten, sodass nur die Ostsee mit dem 20. Längengrad als Senkrechte zu sehen ist. Für ein Niederschlagsereignis wurde jeweils die Karte eines Tages gewählt, die zeitlich am nächsten zum Ereignis lag.

2.3.5 Betrachtung von Bodendruckkarten

Um Niederschlagsereignisse mit bestimmten Wetterlagen in Verbindung zu bringen, werden Bodenwetterkarten und in diesen insbesondere Frontenbewegungen betrachtet. Dazu steht der europäische Wetterbericht (DWD, 1995-1997) zur Verfügung. Karten sind jeweils für 0 und 12 Uhr UTC vorhanden. Anhand der Frontenbewegung und Lage der Druckgebiete wird untersucht, welche Niederschlagsart während der Niederschlagsereignisse (stratiform oder konvektiv) vorgekommen ist und welche Wetterlage die Niederschlagserkennung durch HOAPS begünstigt.

3. Ergebnisse

Der Vergleich der Schiffsmessungen mit den HOAPS-Berechnungen basiert auf 83 Ereignissen mit Niederschlägen größer gleich 0,3mm/h im Zeitraum Februar 1995 bis Oktober 1997. In 46 Fällen (55%) hat HOAPS ebenfalls Niederschlag erkannt. Im Anhang sind die Niederschlagsereignisse in zeitlicher Abfolge aufgelistet.

3.1 Vergleich der Niederschlagsmengen

Betrachtet man die Niederschlagsmenge, so misst der Schiffsregenmesser durchschnittlich mehr Niederschlag als HOAPS. Geht man von einem gemessenen Mindestniederschlag bei beiden von 0,3mm/h aus, so misst der Schiffsregenmesser durchschnittlich 1,64mm/h, HOAPS 0,86mm/h. HOAPS unterschätzt also den Niederschlag gravierend.

Um dies weiter zu untersuchen, werden die unterschiedlichen Bedeckungsarten in Satellitenbildern betrachtet. Es wird eine Einteilung in stratiforme, konvektive und nicht eindeutige Bewölkung vorgenommen. Für diese Einteilung werden erneut die durchschnittlichen Niederschläge berechnet. Sie sind in der folgenden Tabelle dargestellt.

	Stratiform [mm/h]	Konvektiv [mm/h]	Nicht eindeutig [mm/h]
HOAPS	0,86	0,91	0,9
Schiffsregenmesser	1,32	1,34	2,71

Tab. 1: Durchschnittsniederschlag für vorwiegend stratiforme und konvektive Bewölkung im Bereich der Niederschlagsmessung, abgeleitet aus Satellitenbildern, ausgehend davon, dass sowohl HOAPS als auch der Schiffsregenmesser Niederschlag $\geq 0,3\text{mm/h}$ erkennen

Offensichtlich wird der Niederschlag recht unabhängig von der Art der Bewölkung unterschätzt. Der hohe Durchschnittswert in der "Nicht Eindeutig"-Spalte stammt vom Niederschlag am 17.07.1995, der von HOAPS stark unterschätzt wurde. Da an diesem Tag eine Menge Regen fiel (4 Ereignisse größer 10mm/h, HOAPS ermittelte 1,5 bis 2,5mm/h), erscheint der Unterschied zwischen HOAPS-Durchschnittswert und Schiffsregenmesser hier signifikant, ist jedoch nicht repräsentativ.

In einer weiteren Betrachtung werden die Ereignisse des Schiffsregenmessers hinsichtlich der Niederschlagsmenge mit denen verglichen, bei denen HOAPS Niederschlag erkannt bzw. nicht erkannt hat. Daraus ergibt sich, dass größere Niederschlagsmengen die Wahrscheinlichkeit, dass HOAPS Niederschlag erkennt, offensichtlich erhöhen.

Für die Fälle, in denen HOAPS keinen Niederschlag erkannt hat, liegt der Durchschnittsniederschlagswert des Schiffsregennessers bei 0,97mm/h, für die Fälle, in denen beide Niederschlag erkannt haben, bei 1,64mm/h.

Dies wird durch folgende Abbildung unterstützt, die den jährlichen Niederschlag darstellt (K. Bumke, persönliche Mitteilung). Der Niederschlag wurde nach der Kriging-Methode interpoliert, die die Werte abhängig vom Abstand zum Messpunkt wichtet (Clemens, 2003).

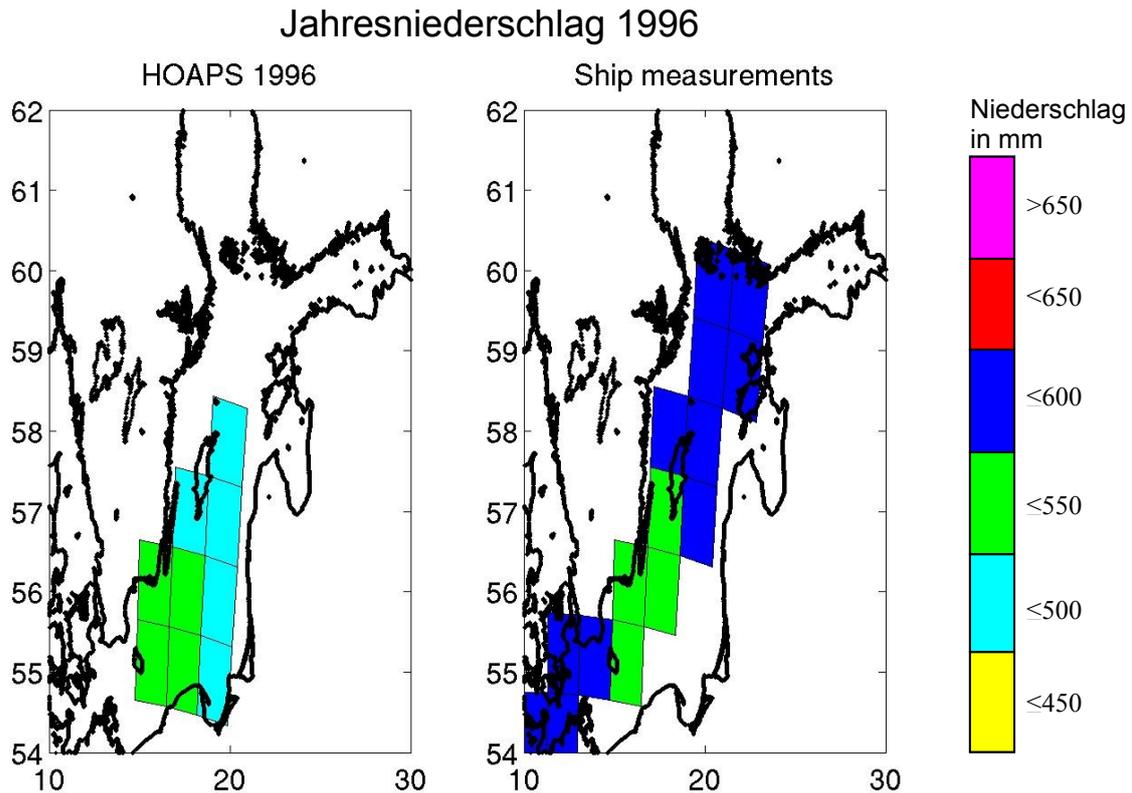


Abb. 3: Interpolierter Jahresniederschlag von HOAPS berechnet und von den Schiffsregennessern gemessen (Abb. von Bumke, persönliche Mitteilung), ein Feld sind $1^\circ \times 1^\circ$

In einem kleinen Bereich der südlichen Ostsee stimmen HOAPS- und Schiffsmessung recht gut überein. Zwischen 57 und 59°N gibt es jedoch große Abweichungen. Grundsätzlich unterschätzt HOAPS den Niederschlag.

Der Fehler der Interpolation der HOAPS-Berechnung und der Schiffsmessung ist in Abbildung 4 dargestellt.

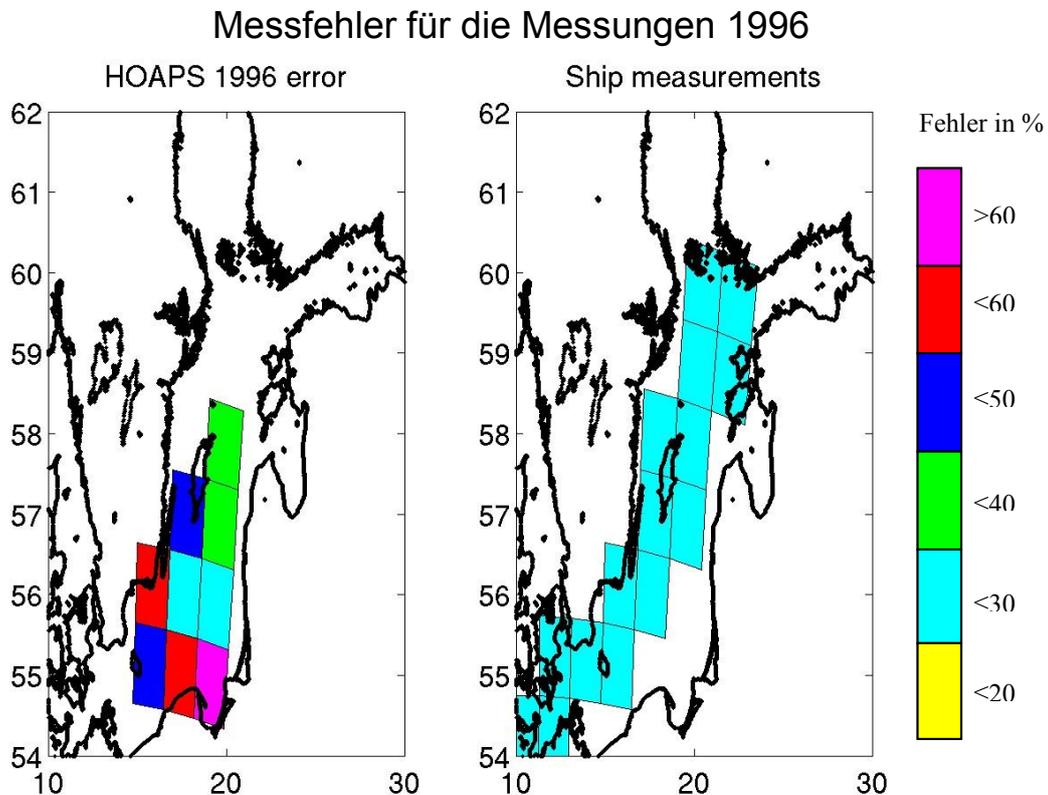


Abb. 4: Samplingfehler des interpolierten Jahresniederschlags für HOAPS und die Schiffsmessungen (Abb. von Bumke, persönliche Mitteilung), ein Feld sind $1^\circ \times 1^\circ$

Während die Schiffsmessung einen Interpolationsfehler von weniger als 30% hat, so ist er bei HOAPS in einem Drittel der Fälle sogar größer als 50%. Die Interpolation für die HOAPS-Daten ist also recht ungenau. Dies liegt u. a. daran, dass die Satelliten die Ostsee nur wenige Male am Tag überqueren. Es werden folglich zeitlich weit auseinander liegende Werte interpoliert. Es kommt demnach zu einem großen zufälligen Fehler.

Der Niederschlag wird durch HOAPS nicht nur unterschätzt; je geringer er ist, desto weiter sinkt auch die Wahrscheinlichkeit, dass er erkannt wird. Dies zeigt Abbildung 5.

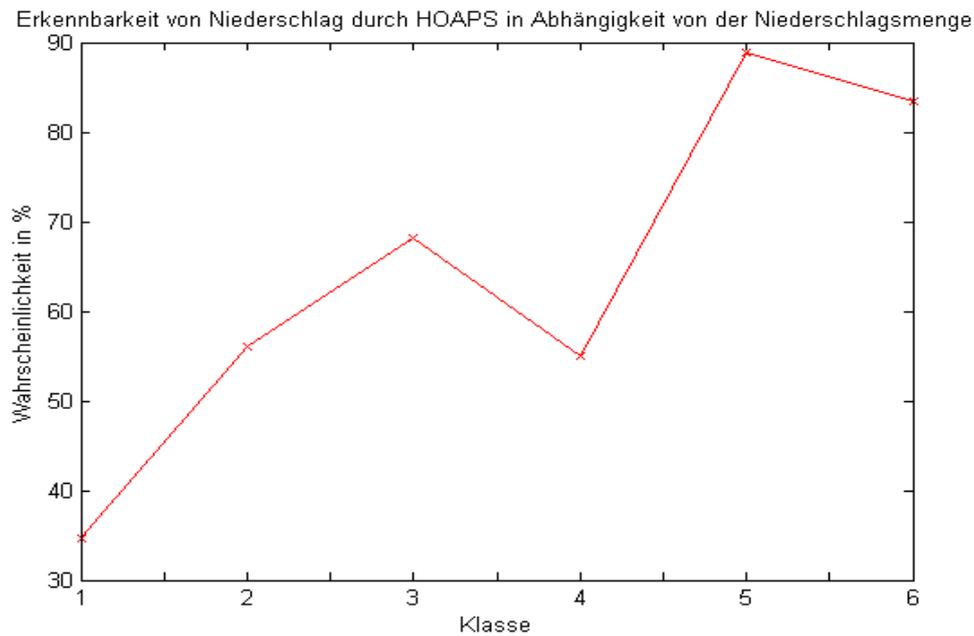


Abb. 5: Wahrscheinlichkeit der Niederschlagserkennung durch HOAPS in Abhängigkeit von der Niederschlagsmenge; die Niederschlagsmenge ist in Klassen eingeteilt (siehe Tab. 2)

Der Niederschlag in Abbildung 5 ist in einzelne Klassen unterteilt:

Klasse	Niederschlag R [mm/h]
1	$0,1 \leq R \leq 0,5$
2	$0,5 \leq R \leq 1$
3	$1 \leq R \leq 3$
4	$3 \leq R \leq 5$
5	$5 \leq R \leq 10$
6	≥ 10

Tab. 2: Klasseneinteilung zu Abb.6; jede Klasse repräsentiert einen Niederschlagsbereich

Die Wahrscheinlichkeit, Niederschlag zu erkennen, wächst offensichtlich stark mit der Niederschlagsmenge (der Abfall der Erkennbarkeit bei Klasse 4 ist auf die geringere Anzahl an Niederschlagsereignissen bei steigender Niederschlagsmenge zurückzuführen).

3.2 Vergleich mit dem Europamodell

Um einen Anhaltspunkt zu bekommen, wie gut die Prognose des Europamodells ist, wird zunächst die Niederschlagsmessung des Schiffregenmessers mit der Vorhersage des Modells verglichen. In 67 von 83 Ereignissen, in denen die Schiffsmessung Niederschlag größer gleich 0,3mm/h gemessen hat, wird er auch vom Modell vorhergesagt, was einer Übereinstimmung von 81% entspricht.

Im Folgenden soll nun anhand der Prognose des EM ein Zusammenhang zwischen synoptischen Größen und der Identifizierung von Niederschlag durch die HOAPS-Klimatologie gefunden werden. Dazu wurden die Niederschlagsmessungen von Schiff und HOAPS zusammen mit in 6-stündige Intervalle eingeteilte 24-Stunden-Prognosen verschiedener Größen des EM dargestellt, die möglicherweise einen Einfluss auf die Erkennung des Niederschlags haben.

3.2.1 Bedeckungsgrad

Der Bedeckungsgrad des EM nimmt Werte zwischen 0 (wolkenlos) und 1 (bewölkt) an. Untersucht werden nicht nur die Bewölkung am Ort des Niederschlags, sondern auch die der Umgebung. Das soll eine erste Einschätzung liefern, welche Arten der Bedeckung dazu führen, dass die Schiffsmessung, nicht aber HOAPS, Niederschlag meldet.

Die folgende Abbildung zeigt zwei Beispiele für den Bedeckungsgrad, vorhergesagt vom EM-Modell. In einem Fall hat HOAPS Niederschlag erkannt, im anderen nicht.

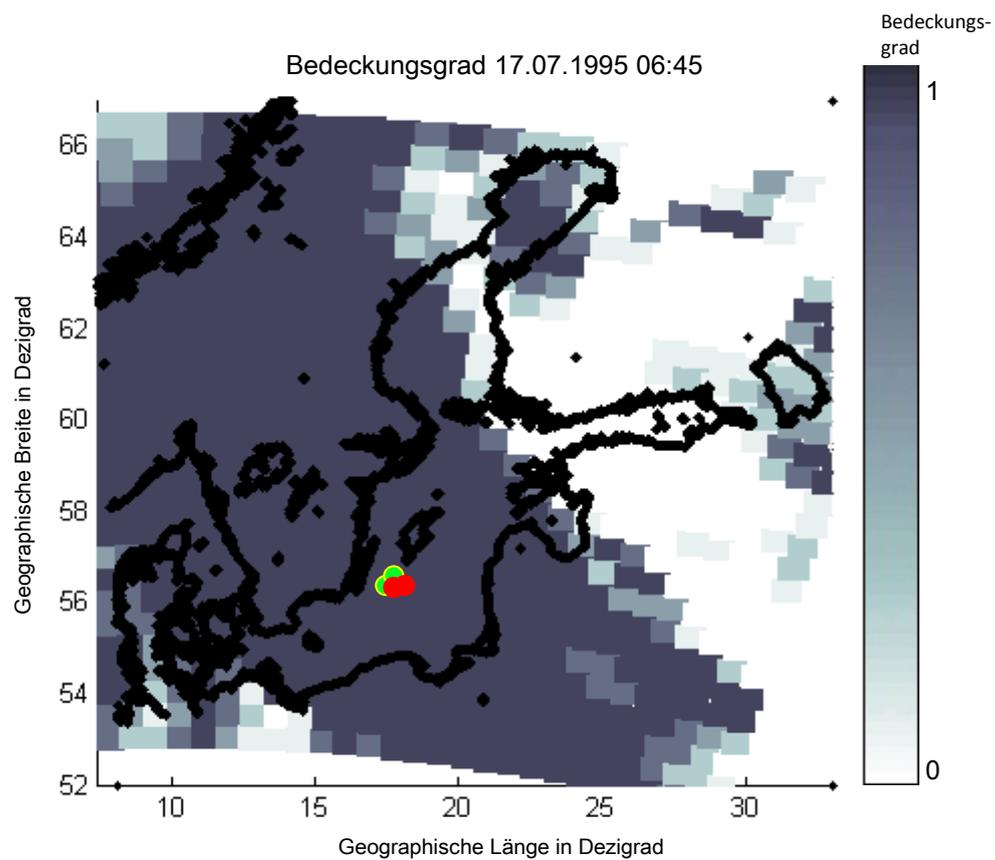
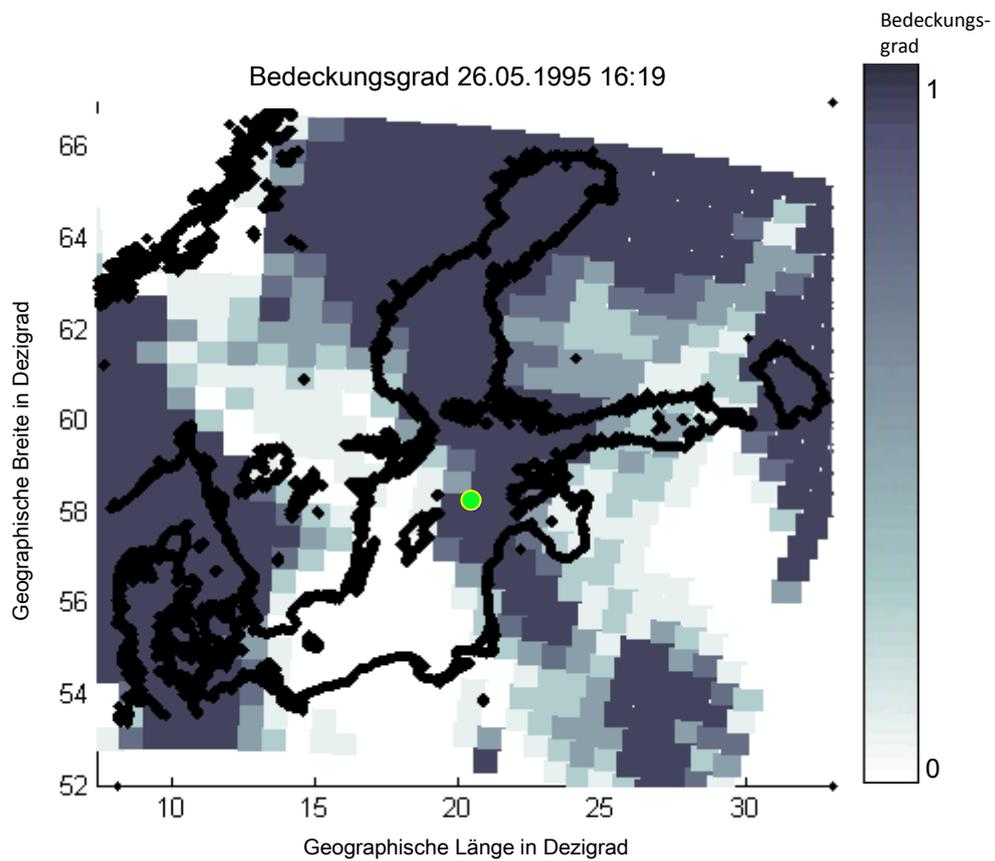


Abb. 4: Bedeckungsgrad über der Ostsee für den 26.05.1995 und den 17.07.1995; Niederschlagsmessung des Schiffsmessers (grün); HOAPS-Niederschlagsmessung, falls vorhanden (rot); Bedeckungsgrad entsprechend Farbskala; Küstenlinie (schwarz)

Jedes Ereignis wird in eine der drei folgenden Kategorien eingeteilt:

1. Das EM zeigt keine oder sehr wenig Bewölkung in der Umgebung des Ereignisses (F)
2. Das Niederschlagsereignis befindet sich in einem Bereich großräumiger Bewölkung (mindestens 1,5°/~165km in alle Richtungen bis zur Wolkenlücke) (B)
3. Das Ereignis findet in bewölkter Umgebung, jedoch in der Nähe von wolkenlosen oder teilweise bewölkten Gebieten statt (G)

Bei 37 der 83 Ereignisse, in denen Niederschlag größer gleich 0,3mm/h gefallen ist, zeigt HOAPS keinen Niederschlag. Die folgende Tabelle zeigt, abhängig von der Kategorie, die Ereignisse, bei denen HOAPS Niederschlag erkannt bzw. nicht erkannt hat.

HOAPS-Niederschlag	F	B	G	Gesamt
HOAPS $\geq 0,3$ mm/h	0 (0%)	34 (74%)	12 (26%)	46 (100%)
Kein Niederschlag	5 (13,5%)	13 (35%)	19 (51,5%)	37 (100%)

Tab. 3: Fallunterscheidung im Bewölkungsgrad für die 83 Ereignisse, in denen der Schiffsregenschirm Niederschlag gemessen hat; in der ersten Zeile die Ereignisse für: HOAPS $\geq 0,3$ mm/h, in der zweiten: HOAPS erkennt keinen Niederschlag; F=weitgehend freier Himmel, B=größtenteils bedeckt; G=abwechselnd bedeckt/nicht bedeckt bzw. Wolkenlücken in der Nähe

Werden die Prognosen des EM als real vorausgesetzt, so besteht ein Zusammenhang zwischen der Dichte/Art der Bewölkung und der Fähigkeit von HOAPS, Niederschlag zu erkennen. In 74% der Niederschlagsereignisse, die HOAPS erkennt, ist die Region großräumig mit Wolken bedeckt, in 26 % liegt eine Mischung aus Wolken und freiem Himmel vor. In 65% der Ereignisse, in denen HOAPS keinen Niederschlag erkennt, liegt der Niederschlag in der Nähe von Wolkenlücken oder unter freiem Himmel; 35% der Ereignisse werden trotz voller Bedeckung nicht erkannt. HOAPS hat offensichtlich größere Schwierigkeiten bei durchbrochener als bei geschlossener Bedeckung Niederschlag zu erkennen. Angenommen eine durchbrochene Wolkendecke bedeutet eher konvektive Bewölkung, so folgt, dass HOAPS besonders konvektiven Niederschlag nicht zuverlässig erkennt, während stratiformer Niederschlag eher wahrgenommen wird. Diese Hypothese soll in den folgenden Vergleichen weiter untersucht werden.

Um konkrete Vergleichswerte zu erhalten, wird zusätzlich der Bedeckungsgrad für den Niederschlagsort und den Zeitpunkt des Ereignisses mit dem Delaunay-Triangulationsverfahren interpoliert. Dabei werden Punkte im zweidimensionalen Raum so vernetzt, dass Dreiecke entstehen, deren Umkreise keine zusätzlichen Punkte enthalten. Der Mittelpunkt des Umkreises bildet einen interpolierten Wert (Lee, 1980). Die Daten am 23.11.1995 konnten nicht interpoliert werden, sie werden daher bei

Interpolationsbetrachtungen nicht berücksichtigt. Die Anzahl der Niederschlagsereignisse bei der Betrachtung der interpolierten Daten verringert sich damit auf 82.

Es ist zu beachten, dass Niederschlagsereignisse, die aus mehreren Messungen bestehen, nur mit einer Messung eingehen. Liegt eine Mischung aus Messungen vor, in denen HOAPS aufgrund räumlicher Entfernungen Niederschlag erkannt bzw. nicht erkannt hat, so wird die Messung gewählt, bei der HOAPS Niederschlag erkannt hat. Existieren noch immer mehrere Messungen, wird die gewählt, die den höchsten Schiffsregennesserniederschlag aufweist. Es wird auf einen Messwert pro Ereignis verdichtet, damit die interpolierten Werte eines Ereignisses, für das viele Messungen vorliegen, nicht überproportional ins Gewicht fallen. Für den Zeitpunkt der Ereignisse wurde die HOAPS-Uhrzeit gewählt, da alle zugehörigen Messungen sich in einem Zeitfenster von 30 Minuten um diese Uhrzeit befinden müssen.

Die folgende Graphik zeigt die Bedeckungsgrade, der Größe nach sortiert.

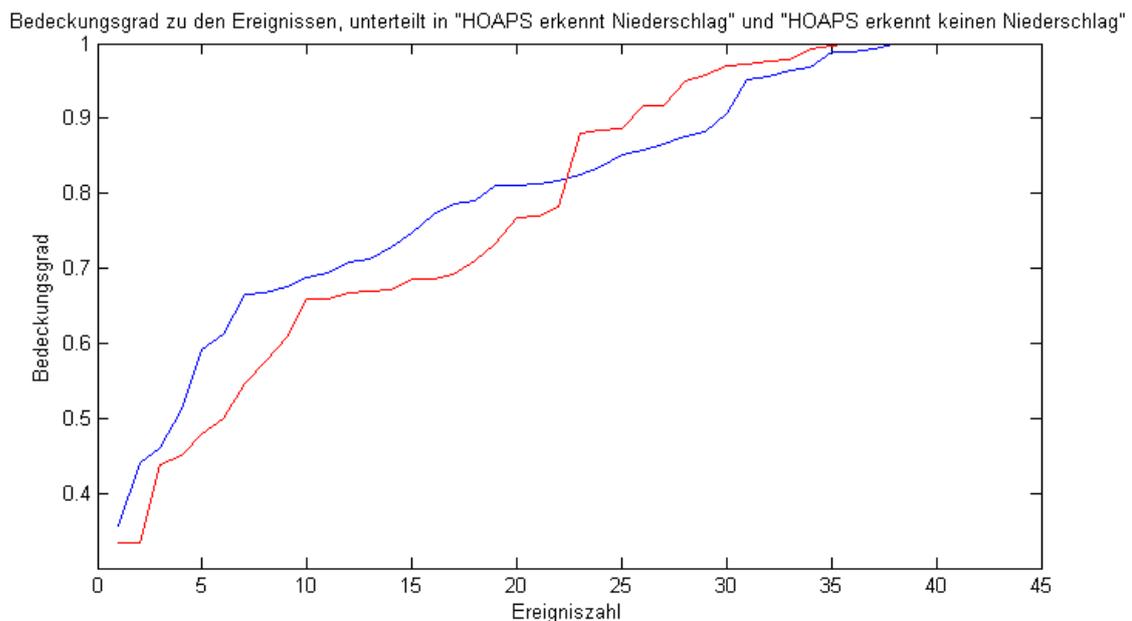


Abb. 5: Bedeckungsgrad für alle Ereignisse gegen die Ereigniszahl aufgetragen, unterteilt in die Fälle: HOAPS $\geq 0,3\text{mm/h}$ (blau) und HOAPS erkennt keinen Niederschlag (rot)

Im Durchschnitt liegt der Bedeckungsgrad bei HOAPS-Niederschlagsereignissen größer gleich $0,3\text{mm/h}$ bei 81%, bei keiner Niederschlagserkennung durch HOAPS bei 75%. Dieser Unterschied unterstützt zwar das Ergebnis der räumlichen Betrachtung, erscheint jedoch nicht signifikant. Zudem ist zu beachten, dass die Interpolation auf einem 6-Stunden-Intervall basiert, in dem sich die Bewölkung räumlich und zeitlich stark ändern kann. Die räumliche Betrachtung erscheint daher sinnvoller.

3.2.2 Niederschlag und Niederschlagsarten

Das EM prognostiziert vier Formen des Niederschlags: Regen und Schnee, jeweils unterteilt in stratiformen und konvektiven. Die in Kapitel 3.2.1 genutzte Methode zur Untersuchung der Abhängigkeit der Niederschlagserkennung vom Bedeckungsgrad wurde nun auch zur Untersuchung der Form des Niederschlags angewendet. Bei der räumlichen Betrachtung wurde zwischen stratiformem und konvektivem Niederschlag unterschieden. Da das EM jedoch in den meisten Fällen sowohl konvektiven als auch stratiformen Niederschlag prognostiziert, lassen sich hier keine brauchbaren Aussagen gewinnen.

Die interpolierten Regenmengen zeigen, dass die prognostizierte Niederschlagsmenge im Falle einer Identifizierung durch HOAPS durchschnittlich höher liegt als bei Nicht-Identifizierung. Das stützt das Ergebnis des Vergleichs in Kapitel 3.1, dass die Wahrscheinlichkeit der Niederschlagsidentifizierung durch HOAPS mit der Niederschlagsmenge steigt.

HOAPS-Niederschlag	Stratiform [mm/h]	Konvektiv [mm/h]
HOAPS $\geq 0,3$ mm/h	1,39	1,73
Kein Niederschlag	0,87	1,48

Tab. 4: Durchschnittliche Niederschlagsprognose des EM für die Fälle, dass HOAPS Niederschlag erkennt bzw. nicht erkennt

Die Interpolation der EM-Daten zeigt außerdem, dass HOAPS Schwierigkeiten hat, Schnee zu identifizieren. Bei 6 von 17 Ereignissen (35%), in denen stratiformer Schnee prognostiziert wurde, hat HOAPS Niederschlag größer gleich 0,3mm/h ermittelt. Konvektiver Schneefall wurde überhaupt nicht erkannt (7 prognostizierte Ereignisse).

3.2.3 Meeresoberflächen- und Lufttemperatur

Bevor der Einfluss der Temperaturen auf die Erkennung von Niederschlag untersucht wird, wird zunächst die Verteilung der Niederschlagsereignisse über das Jahr betrachtet.

HOAPS-Niederschlag	Dezember - März	April - September
HOAPS $\geq 0,3\text{mm/h}$	15	31
Kein Niederschlag	17	20

Tab. 5: Saisonale Verteilung der Niederschlagsereignisse für die Fälle, dass HOAPS Niederschlag erkennt bzw. nicht erkennt

Im Winterhalbjahr liegt die Erkennung von Niederschlag durch HOAPS bei 47%, im Sommerhalbjahr bei 61%. HOAPS liefert im Sommer offensichtlich bessere Ergebnisse. Es ist anzumerken, dass drei Wintermonate fehlen, betrachtet wird der Zeitraum zwischen Februar 1995 und Oktober 1997. Dies hat zwar keinen Einfluss auf das Verhältnis der Fälle, in denen HOAPS Niederschlag erkennt bzw. nicht erkennt, reduziert die bereits geringe Anzahl der Ereignisse aber weiter.

Eine Temperaturabhängigkeit der Niederschlagserkennung durch HOAPS wird erneut anhand von Abbildungen, entsprechend dem Schema in Kapitel 3.2.1, untersucht. Es gibt kein Anzeichen dafür, dass eine bestimmte Temperaturverteilung um den Messpunkt vorteilhaft für die Erkennung von Niederschlag durch HOAPS ist.

Die Betrachtung der interpolierten Daten zeigt, dass die durchschnittliche Luft- und Bodentemperatur in den Fällen, in denen HOAPS Niederschlag erkennt, um ca. 3°C höher liegt als in den Fällen, in denen HOAPS keinen Niederschlag erkennt.

HOAPS-Niederschlag	Lufttemperatur [°C]	Oberflächentemperatur [°C]
HOAPS $\geq 0,3\text{mm/h}$	11,2	12,7
Kein Niederschlag	7,9	9,8

Tab. 6: Durchschnittstemperaturen für Luft und Boden, prognostiziert vom EM, für die Fälle, dass HOAPS Niederschlag erkennt bzw. nicht erkennt

Der Unterschied der Durchschnittstemperatur der Fälle, HOAPS $\geq 0,3\text{mm/h}$ und HOAPS erkennt keinen Niederschlag, lässt darauf schließen, dass entweder eine saisonale Abhängigkeit, hervorgerufen durch unterschiedliche Wetterlagen im Sommer und Winter, einen Unterschied in der Erkennbarkeit von Niederschlag durch HOAPS verursacht, oder aber die Luft- und Oberflächentemperatur selbst einen Einfluss auf die Funktionalität des Modells haben. Um die saisonale Variabilität zu untersuchen, wurden die Ereignisse jeweils in die

Monate April bis September sowie Dezember bis März aufgespalten und die entsprechenden Temperaturen erneut gemittelt.

	HOAPS-Niederschlag	Lufttemperatur [°C]	Oberflächentemperatur [°C]
Sommer	HOAPS $\geq 0,3\text{mm/h}$	13,1	14,2
	Kein Niederschlag	11,0	11,7
Winter	HOAPS $\geq 0,3\text{mm/h}$	7,3	9,7
	Kein Niederschlag	3,8	7,5

Tab. 7: Saisonale Durchschnittstemperaturen für Luft und Boden, prognostiziert vom EM, für die Fälle, dass HOAPS Niederschlag erkennt bzw. nicht erkennt

Nach wie vor unterscheiden sich die Mittelwerte der Temperaturen für die Fälle, dass HOAPS Niederschlag erkannt bzw. nicht erkannt hat. Dies kann nun nicht mehr auf saisonale Variabilität zurückgeführt werden. Es ist also davon auszugehen, dass die Temperatur einen Einfluss auf die Erkennbarkeit von Niederschlag durch HOAPS hat. Ob dieser Einfluss mit höheren Temperaturen einer bestimmten Wetterlage zusammenhängt, die die Erkennbarkeit von Niederschlag begünstigt, konnte nicht ermittelt werden.

3.2.4 Luftfeuchtigkeit

Ein weiterer signifikanter Unterschied zwischen Fällen, in denen HOAPS Niederschlag erkennt bzw. nicht erkennt, zeigt sich bei der spezifischen Luftfeuchte (siehe Abb. 6).

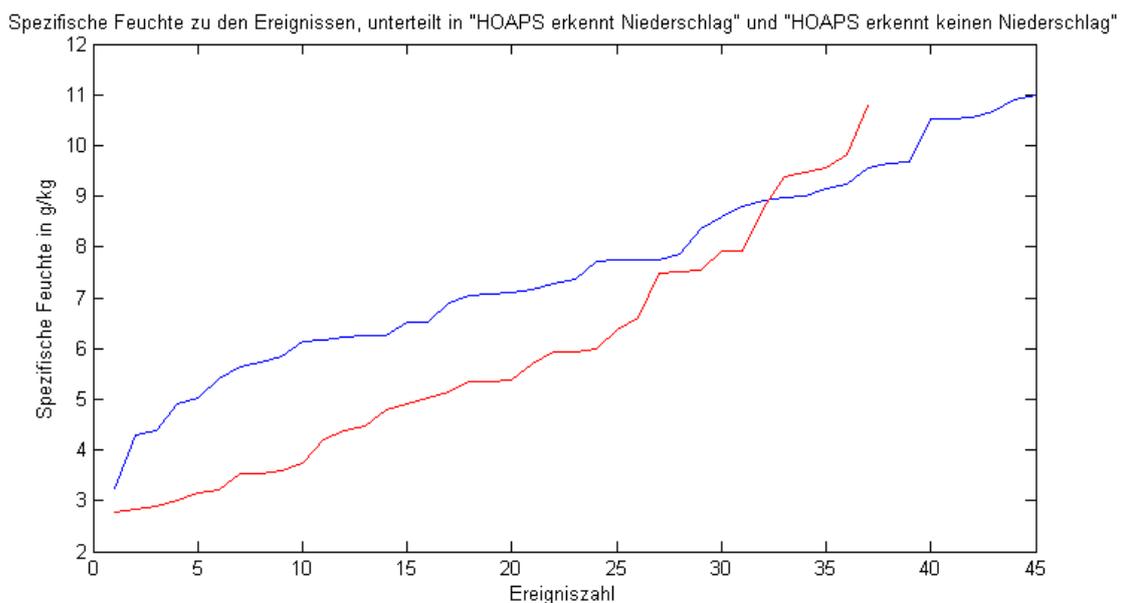


Abb. 6: Spezifische Feuchte für alle Ereignisse gegen die Ereigniszahl aufgetragen, unterteilt in die Fälle: HOAPS $\geq 0,3\text{mm/h}$ (blau) und HOAPS erkennt keinen Niederschlag (rot)

So liegt die durchschnittliche spezifische Feuchte für Ereignisse, in denen HOAPS Niederschlag erkennt, bei 7,53g/kg, für die, in denen es keinen erkennt, bei 5,94g/kg.

Es wurde erneut in Sommer- und Winterereignisse aufgeteilt, um festzustellen, ob das nur an der höheren spezifischen Feuchten in den Sommermonaten liegt.

	HOAPS-Niederschlag	Spezifische Feuchte [g/kg]
Sommer	HOAPS $\geq 0,3$ mm/h	8,25
	Kein Niederschlag	7,13
Winter	HOAPS $\geq 0,3$ mm/h	6,05
	Kein Niederschlag	4,40

Tab. 8: Saisonale, durchschnittliche spezifische Feuchte, prognostiziert vom EM, für die Fälle, dass HOAPS Niederschlag erkennt bzw. nicht erkennt

Auch hier zeigt sich, dass die Feuchte in den Fällen, in denen HOAPS keinen Niederschlag erkennt, deutlich geringer ist als in solchen mit Niederschlagserkennung.

Es kann ebenfalls nicht ermittelt werden, ob die Feuchte einen direkten Einfluss auf die Erkennbarkeit von Niederschlag hat, oder, ob beispielsweise kalte, trockene Luft mit einer bestimmten Wetterlage verbunden ist, bei der HOAPS dazu neigt, keinen Niederschlag zu erkennen.

Der Einfluss von Druck und Windgeschwindigkeit auf die Erkennbarkeit von Niederschlag wird ebenfalls untersucht. Weder ihre räumliche Betrachtung noch die Betrachtung der interpolierten Daten zeigen Einfluss auf die Niederschlagserkennung durch HOAPS.

3.3 Vergleich mit Satellitenbildern

Die Satellitenbilder für die Tage, an denen ein oder mehrere Niederschlagsereignisse stattgefunden haben, befinden sich im Anhang. Im Folgenden wird untersucht, bei welchen Niederschlagsereignissen konvektive bzw. stratiforme Bewölkung vorherrschen. Die Bilder werden in drei Gruppen eingeteilt:

1. Stratiform
2. Konvektiv bzw. bewölkungsarm
3. Nicht eindeutige Fälle, in denen eine Mischung aus beiden Wolkenformen vorliegt

Konvektiv und bewölkungsarm werden in einem Punkt zusammengefasst, da Niederschlag bei fehlender Bewölkung meist auf kurze Schauer aus kleinen Wolkenansammlungen zurückzuführen ist. Die Satellitenbilder haben einen etwa halbtägigen Abstand, konvektive Wolken können sehr viel schneller entstehen und sich auflösen. Da der Niederschlag bei fehlender Bewölkung meist schauerartig durch die Übersättigung einer Luftmasse (durch Hebung oder Mischung mit anderen Luftmassen) ausfällt, wird in diesen Fällen von konvektiver Bewölkung ausgegangen.

Abbildung 7 zeigt beispielhaft Fälle für konvektive und stratiforme Bewölkung.

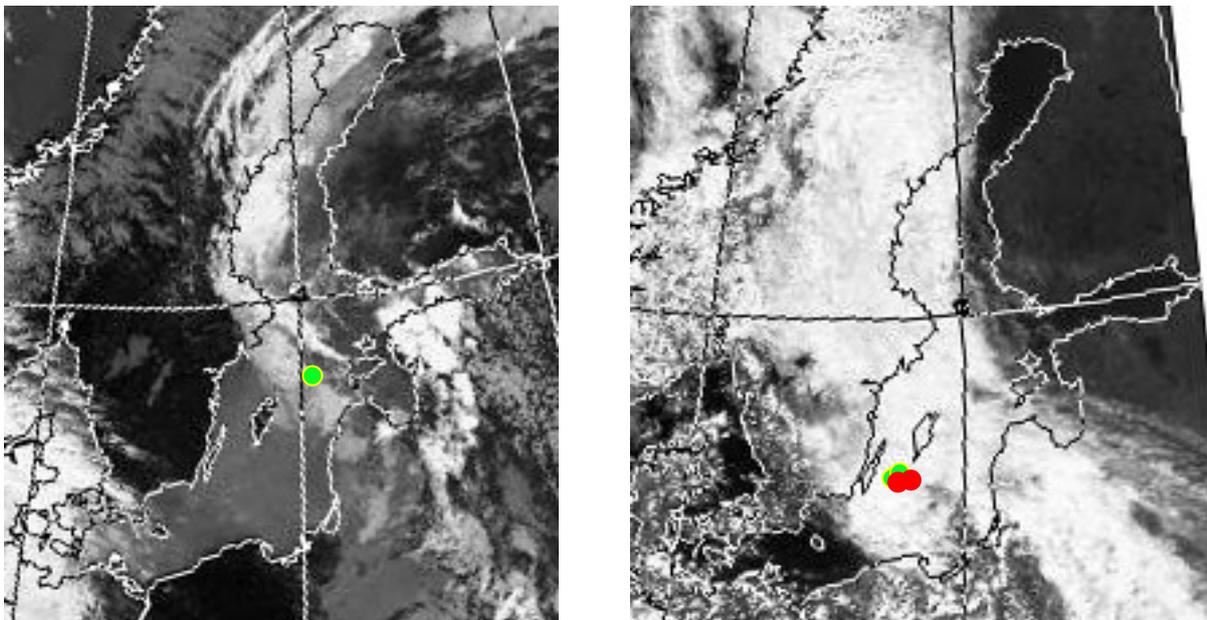


Abb. 7: Satellitenbilder für den 26.05.1995 als Beispiel konvektiver Bewölkung (links) und für den 17.07.1995 (rechts) als Beispiel für stratiforme Bewölkung (Dundee Satellite Receiving Station, 1995), Schiffsmesserniederschlag $\geq 0,3\text{mm/h}$ (grün), HOAPS-Niederschlag $\geq 0,3\text{mm/h}$ (rot)

In diesen Bildern sind die gleichmäßige Struktur der stratiformen Wolken sowie die kleinen Anhäufungen der konvektiven Wolken gut erkennbar. Am 26.05.1995 hat HOAPS keinen Niederschlag ermittelt, am 17.07.1995 dagegen schon. Es wird nun anhand anderer Satellitenbilder untersucht, ob sich dieses Muster fortsetzt (siehe Tab. 9).

HOAPS-Niederschlag	Stratiform	Frei/Konvektiv	Nicht eindeutig	Gesamt
HOAPS $\geq 0,3$ mm/h	34 (74%)	3 (6%)	9 (20%)	46 (100%)
Kein Niederschlag	8 (22%)	19 (51%)	10 (27%)	37 (100%)

Tab. 9: Einteilung der Ereignisse nach Art der Bedeckung für die Fälle, dass HOAPS Niederschlag erkennt bzw. nicht erkennt

Etwa ein Viertel der Satellitenbilder zeigt eine Mischung aus konvektiver und stratiformer Bewölkung sowie Wolkenlücken und kann daher nicht eindeutig zugeordnet werden. Die übrigen Bilder bestätigen überwiegend die Erwartungen. 74% der Ereignisse, bei denen HOAPS Niederschlag erkennt, finden bei stratiformer Bewölkung statt. Dagegen erkennt HOAPS bei geringer oder konvektiver Bewölkung keinen Niederschlag in 51% der Fälle. In 34 von 42 stratiformen Fällen erkennt HOAPS Niederschlag (81%), in 19 von 22 konvektiven Fällen erkennt HOAPS keinen Niederschlag (86%).

Nach Kapitel 3.1.3 erkennt HOAPS im Sommer eher Niederschlag als im Winter. Die Einteilung in Bedeckungsarten wird weiter in Sommer- und Wintermonate unterteilt, um festzustellen, ob ein Bedeckungsgrad in einer Saison bevorzugt vorkommt und sich so die saisonale Variabilität der Erkennbarkeit von Niederschlag durch HOAPS erklären lässt.

	HOAPS-Niederschlag	Stratiform	Frei/Konvektiv	Nicht eindeutig	Gesamt
Sommer	HOAPS $\geq 0,3$ mm/h	23(74%)	2(6,5%)	6(19,5%)	31(100%)
	Kein Niederschlag	5(25%)	6(30%)	9(45%)	20(100%)
Winter	HOAPS $\geq 0,3$ mm/h	11(73%)	1(7%)	3(20%)	15(100%)
	Kein Niederschlag	3(18%)	12(70%)	2(12%)	17(100%)

Tab. 10: Saisonale Einteilung der Ereignisse nach Art der Bedeckung für die Fälle, dass HOAPS Niederschlag erkennt bzw. nicht erkennt

Aus dieser Tabelle wird ersichtlich, dass vor allem im Winter die konvektive Bewölkung negativen Einfluss auf die Erkennbarkeit von Niederschlag durch HOAPS hat. In 70% der Fälle, in denen HOAPS keinen Niederschlag erkennt, ist konvektive Bewölkung zwischen Oktober und März vorhanden. Für den Sommer lässt sich dagegen keine eindeutige Aussage darüber machen, welche Bedeckungsart Einfluss auf die Wahrscheinlichkeit der Niederschlagserkennung hat.

3.4 Vergleich mit Wetterkarten

Um den Einfluss von Fronten zu untersuchen, werden im Folgenden Bodendruckkarten mit eingezeichneten Frontverläufen betrachtet. Abbildung 8 zeigt Karten für den 26.05.1995 und 17.07.1995.

Anhand der Bodendruckkarten wird der Einfluss von Fronten sowie Hoch- und Tiefdruckgebieten auf die Niederschlagserkennung untersucht. Die beiden Beispielkarten gehören zu einem Niederschlagsereignis mit HOAPS-Niederschlagserkennung (17.07.1995) bzw. einem ohne HOAPS-Niederschlagserkennung (26.05.1995).

Am 26.05.1995 herrscht ein Tiefdruckgebiet über der Ostsee, dessen Warm- und Kalt-Front sich bereits im Nordwesten zur Okklusion zusammengeschlossen haben. Die Mischung aus konvektiver und stratiformer Bewölkung entlang dieser Front ist auch im Satellitenbild zu erkennen (siehe Abb.7). Es ist anzunehmen, dass sie der Ursprung des Niederschlags ist, der vom Schiffsregenschirm gemessen wurde. Die Okklusion hat im Hinblick auf die Jahreszeit und die mäßig bis warmen Temperaturen eher Kaltfrontcharakter. Es ist also davon auszugehen, dass der Niederschlag in Form von Schauern fiel.

Am 17.07.1995 herrschen ein Hoch östlich der Ostsee und ein Tief über Skandinavien, zu dem eine ostwärts propagierende Okklusion gehört. Im Satellitenbild (siehe Abb. 7) lässt sich das Hoch deutlich am wolkenfreien Himmel östlich der Ostsee ausmachen. Die stark stratiforme Bewölkung stammt von den beiden Tiefdruckwirbeln, die sich um 0:00 noch im Ostseebereich befinden. Auf der 12:00-Karte ist nur noch das Tief über Skandinavien zu sehen. Auch in diesem Fall liegt das Niederschlagsgebiet in der Nähe einer Okklusion, doch wird dieses Mal der Niederschlag von HOAPS erkannt.

Inwiefern die Niederschlagserkennung von Frontdurchläufen und Druckgebieten abhängt, wird im Folgenden untersucht. Dazu werden die Bodendruckkarten aller Tage mit Niederschlagsereignissen auf Frontdurchläufe und Druckgebiete untersucht.

Die Bodendruckkarten liegen im Zwölfstundenintervall vor. Es werden jeweils die Karten vor und nach dem Niederschlagsereignis betrachtet, bei Unklarheiten hinsichtlich der Verschiebung von Druckgebieten und Fronten auch weitere.

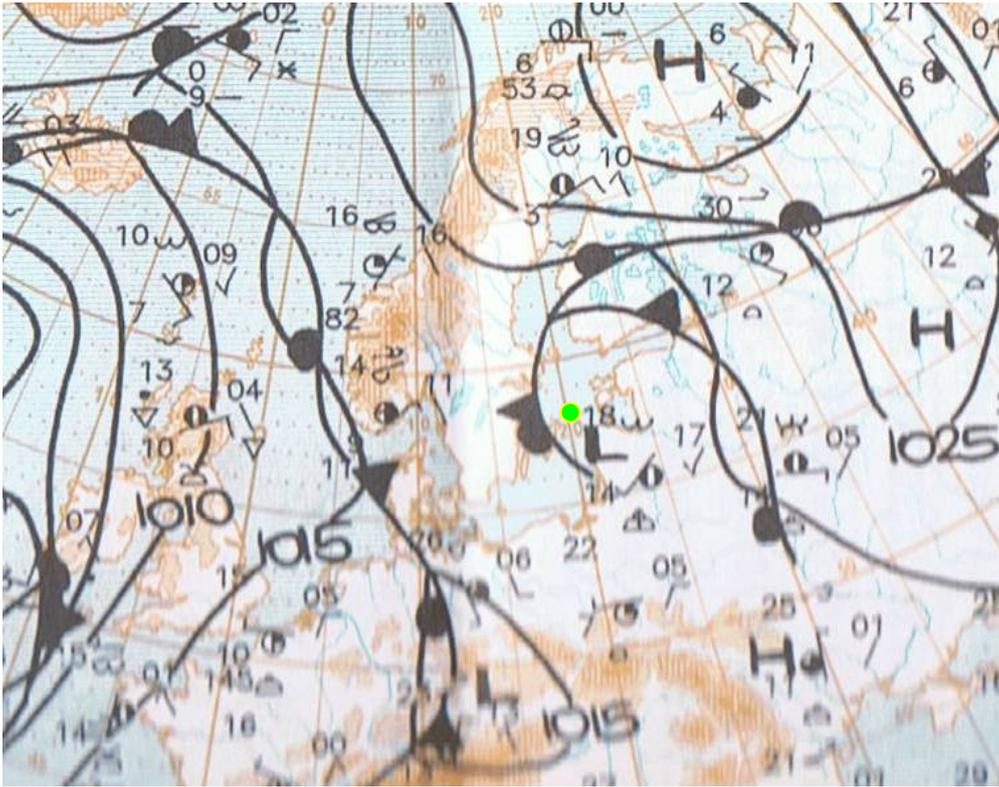


Abb. 8: Bodendruckkarte für den 26.05.1995 12:00 sowie den 17.07.1995 12:00 mit eingezeichneten Frontverläufen (DWD, 1995); Ort der Schiffsregenmesserniederschlags-erkennung (grün); Ort der HOAPS-Niederschlags-erkennung (falls vorhanden) (rot)

In folgender Tabelle sind die Niederschlagsereignisse, unterteilt in solche mit HOAPS-Erkennung bzw. ohne HOAPS-Erkennung, nach Frontenarten sortiert, die das Wettergeschehen über dem Niederschlagsort im entsprechenden Zeitraum beeinflussten.

HOAPS-Niederschlag	Keine Front	Kaltfront	Warmfront	Okklusion	Gesamt
HOAPS $\geq 0,3$ mm/h	7 (15%)	6 (13%)	7 (15%)	26 (57%)	46 (100%)
Kein Niederschlag	13 (35%)	18 (49%)	0 (0%)	6 (16%)	37 (100%)

Tab. 11: Einteilung der Ereignisse in Fälle, in denen HOAPS Niederschlag erkennt bzw. nicht erkennt, nach Art des Frontendurchlaufs im Niederschlagsgebiet

Bei den Niederschlagsereignissen mit HOAPS-Erkennung fällt vor allem auf, dass bevorzugt Okklusionen im Niederschlagsgebiet liegen, während alle anderen Fälle gleichermaßen vertreten sind. Die Okklusionen werden jahreszeitabhängig in solche mit Kalt- und solche mit Warmfrontcharakter eingeteilt, um festzustellen, welcher Niederschlag aus ihnen bevorzugt gefallen ist. Dabei ergeben sich 19 Kaltfrontokklusionen und 7 Warmfrontokklusionen, was im Falle der ersteren eher auf schauerartigen Niederschlag schließen lässt. Zu beachten ist allerdings, dass eine Okklusion meist mit der Auflösung eines Tiefdruckwirbels und daher mit großflächig stratiformer Bewölkung verbunden ist, aus der wiederum eher stratiformer Niederschlag fällt.

Die Niederschlagsereignisse ohne HOAPS-Erkennung zeigen ein gegensätzliches Bild. Hier dominieren die Kaltfronten, ein weiteres Indiz dafür, dass HOAPS Probleme mit der Erkennung von schauerartigem Niederschlag hat. Warmfronten sind kein einziges Mal im Niederschlagsbereich zu finden. Darüber hinaus scheint zu einer auffällig großen Anzahl von Niederschlagsereignissen keine Front das Wettergeschehen beeinflusst zu haben.

Zusammengefasst bestätigt die Betrachtung der Bodendruckkarten die Hypothese. In der Hälfte der Niederschlagsereignisse ohne HOAPS-Erkennung herrschen im Niederschlagsgebiet Kaltfronten, die vorwiegend mit konvektiven Niederschlägen verbunden sind.

Eine Aufteilung der Ereignisse in Sommer- und Wintermonate zeigt folgende Tabelle:

	HOAPS-Niederschlag	Keine Front	Kaltfront	Warmfront	Okklusion	Gesamt
Sommer	HOAPS $\geq 0,3$ mm/h	6 (19%)	4 (13%)	2 (6,5%)	19 (61,5%)	31 (100%)
	Kein Niederschlag	7 (35%)	9 (45%)	0 (0%)	4 (20%)	20 (100%)
Winter	HOAPS $\geq 0,3$ mm/h	1 (7%)	2 (13%)	5 (33%)	7 (47%)	15 (100%)
	Kein Niederschlag	6 (35%)	9 (53%)	0 (0%)	2 (12%)	17 (100%)

Tab. 12: Saisonale Einteilung der Ereignisse für die Fälle, dass HOAPS Niederschlag erkennt bzw. nicht erkennt, nach Art des Frontendurchlaufs im Niederschlagsgebiet

Die Unterschiede zwischen Sommer und Winter sind im Falle der Nichterkennung durch HOAPS nicht wesentlich. Zwar liegt der prozentuale Anteil an Kaltfronten im Winter bei HOAPS-Nichterkennung etwas höher, doch im Hinblick auf die geringe Anzahl der Messwerte ist dieser Anteil nicht signifikant. Eine saisonale Abhängigkeit der Niederschlagserkennung von der Frontenart lässt sich daher nicht ableiten.

Daher wurden die Wetterkarten zusätzlich auf Hoch- und Tiefdruckeinflüsse untersucht.

	HOAPS-Niederschlag	Hoch	Tief	Kein Druckeinfluss	Gesamt(%)
Sommer	HOAPS $\geq 0,3$ mm/h	2 (6%)	18 (58%)	11 (35%)	31 (100%)
	Kein Niederschlag	1 (5%)	17 (85%)	2 (10%)	20 (100%)
Winter	HOAPS $\geq 0,3$ mm/h	2 (13%)	12 (80%)	1 (7%)	15 (100%)
	Kein Niederschlag	1 (6%)	13 (76%)	3 (18%)	17 (100%)
Gesamt	HOAPS $\geq 0,3$ mm/h	4 (9%)	30 (65%)	12 (26%)	46 (100%)
	Kein Niederschlag	2 (5%)	30 (81%)	5 (14%)	37 (100%)

Tab. 13: Einteilung der Ereignisse in Sommer, Winter und ganzjährig für die Fälle, dass HOAPS Niederschlag erkennt bzw. nicht erkennt, nach beeinflussenden Druckgebieten

Alle Niederschlagsereignisse sind überwiegend tiefdruckbeeinflusst. Im Fall, dass HOAPS keinen Niederschlag erkennt, herrscht zu 81% Tiefdruckeinfluss; im Fall, dass HOAPS Niederschlag erkennt, zu 65%. Bei der saisonalen Betrachtung fällt auf, dass im Sommer ein Tief eher bedeutet, dass Niederschlag nicht erkannt wird (85%), während im Winter eine etwa 50-prozentige Wahrscheinlichkeit der Niederschlagserkennung bei Tiefdruckeinfluss besteht.

3.5 Erweitern der räumlichen und zeitlichen Differenzen

In 46 von 83 Fällen erkennt HOAPS Niederschlag, wenn der Schiffsregenmesser Niederschlag gemessen hat; dabei liegen zwischen den beiden Messungen maximal 30min bzw. 25km. In dem nun betrachteten Datensatz liegen maximal 120min bzw. 100km zwischen Schiffs- und Satellitenmessung.

Mit diesem Datensatz werden die 37 Fälle analysiert, in denen HOAPS keinen Niederschlag erkannt hat. Durch die größer gewählte räumliche und zeitliche Korrelationslänge (100km bzw. 120min) wird nun in 23 der 37 Fälle Niederschlag durch HOAPS erkannt. Die Erkennbarkeit von Niederschlag durch HOAPS steigt damit auf 83%, allerdings zu Lasten der Genauigkeit, da mit steigendem räumlichen und zeitlichen Abstand die Korrelation der Niederschlagsereignisse exponentiell abnimmt (Strehz und Bumke, 2010).

Die 23 Ereignisse werden nun hinsichtlich ihrer Wetterlagen untersucht. Dazu werden erneut die Satellitenbilder und die Bodendruckkarten benutzt.

Konvektiv	Stratiform	Nicht eindeutig
9 (39%)	7 (30,5%)	7 (30,5%)

Tab. 14: Auswertung der Satellitenbilder, Einteilung in konvektive, stratiforme und nicht eindeutige Bedeckung für die 23 Ereignisse, in denen HOAPS nach Erhöhung der zeitlichen und räumlichen Abstände Niederschlag erkannt hat

Werden nur die 23 Ereignisse betrachtet, so scheint HOAPS durch die Erweiterung der räumlichen und zeitlichen Abstände, unabhängig von der Wetterlage, Niederschlag zu erkennen. Es ist aber zu bedenken, dass nur in 8 von 37 Fällen, in denen HOAPS bei der Betrachtung der Ereignisse mit kleinen Abständen (25km bzw. 30min) keinen Niederschlag erkennt, stratiforme Bewölkung vorherrscht, und HOAPS nun in 7 von 8 Ereignissen durch Erweiterung des räumlichen und zeitlichen Abstands Niederschlag erkennt. Das lässt wiederum darauf schließen, dass HOAPS Schwierigkeiten mit der Erkennung des konvektiven Niederschlags hat.

Zu beachten ist, dass die Erweiterung der Abstände lediglich verdeutlicht, dass HOAPS bevorzugt stratiformen Niederschlag erkennt. Die Erkennbarkeit von Niederschlag wird dadurch nicht verbessert. Die Wahrscheinlichkeit, dass derselbe Niederschlag, den der Schiffsregenmesser erkannt hat, auch von HOAPS erkannt wird, wird mit größerem räumlichen und zeitlichen Abstand geringer. Mit der Entfernung zum Messpunkt des Schiffsregenmessers wird die Wahrscheinlichkeit größer, dass HOAPS ein anderes Niederschlagsereignis erkennt.

3.6 Betrachtung eines Fallbeispiel: 05. bis 09.09.1997

Im Zeitraum vom 05. bis 09.09.1997 hat der Schiffsregenmesser 10 Niederschlagsereignisse mit Niederschlag größer gleich 0,3mm/h aufgenommen; 5 davon wurden von HOAPS erkannt.

Datum	Uhrzeit (UTC)	Geogr. Breite [°]	Geogr. Länge [°]	Niederschlag Schiffsmessung [mm/h]	Niederschlag HOAPS [mm/h]
05.09.1997	08:35	58,03	20,05	1,22	1,16
05.09.1997	15:15	57,93	20,08	0,91	1,36
05.09.1997	16:31	58,23	20,52	0,59	0,75
05.09.1997	18:29	57,98	20,13	0,40	0,49
06.09.1997	15:03	58,87	21,22	24,25	11,24
06.09.1997	16:18	58,70	20,97	1,14	0
09.09.1997	07:24	59,38	21,58	0,49	0
09.09.1997	07:45	59,38	21,58	0,49	0
09.09.1997	17:19	58,20	20,47	0,63	0,41
09.09.1997	17:40	58,35	20,67	0,72	0,53

Tab. 15: Niederschlagsereignisse zwischen dem 05.09. und 09.09.1997; Ereignisse, bei denen HOAPS Niederschlag $\geq 0,3\text{mm/h}$ erkennt hat (rot); Ereignisse, bei denen HOAPS keinen Niederschlag erkennt (schwarz)

Im Folgenden wird untersucht, wie sich das Wetter in diesem Zeitraum geändert hat. Dazu werden die Bodendruckkarten sowie die Satellitenbilder des entsprechenden Tages betrachtet. Die Satellitenbilder zeigen vom 05.09.1997 06:40 bis zum 06.09.1997 13:10 stratiforme Bewölkung; sie weicht bis zum 07.09.1997, 11:20 mehr und mehr konvektiver Bewölkung. Am 06.09.1997 15:03 wird ein sehr großes Niederschlagsereignis sowohl vom Schiffsregenmesser als auch von HOAPS gemessen; dabei unterschätzt HOAPS den Niederschlag um 50%. Das Niederschlagsereignis eine gute Stunde später wird nur vom Schiff wahrgenommen. Im betreffenden Zeitraum zieht eine Okklusion über die Ostsee. Die Lufttemperatur liegt bei 18,8°C, die Oberflächentemperatur bei 20°C. Die warmen Temperaturen deuten auf eine Okklusion mit Kaltfrontcharakter hin, wobei dies ohne Kenntnisse der Temperaturentwicklung mit der Höhe nicht eindeutig festgestellt werden kann. Diese Front kann zwar auch stratiformen Regen hervorbringen, neigt jedoch zu schauerartigem Niederschlag. Dies könnte erklären, warum der Niederschlag von HOAPS trotz stratiformer Bewölkung stark unterschätzt bzw. nicht wahrgenommen wird. Der 06.09.1995 wird zusätzlich anhand des gesamten HOAPS-Datensatzes untersucht. Die Untersuchung ergibt für den Zeitraum um 16:18, in dem nur das Schiff Niederschlag gemessen hat, starken Niederschlag ca. 30km nordöstlich der Schiffsmessung, also etwas

außerhalb des Radius der Kollokierung. Dies unterstützt die Vermutung, dass es sich bei dem Niederschlag um lokale Schauer handelt.

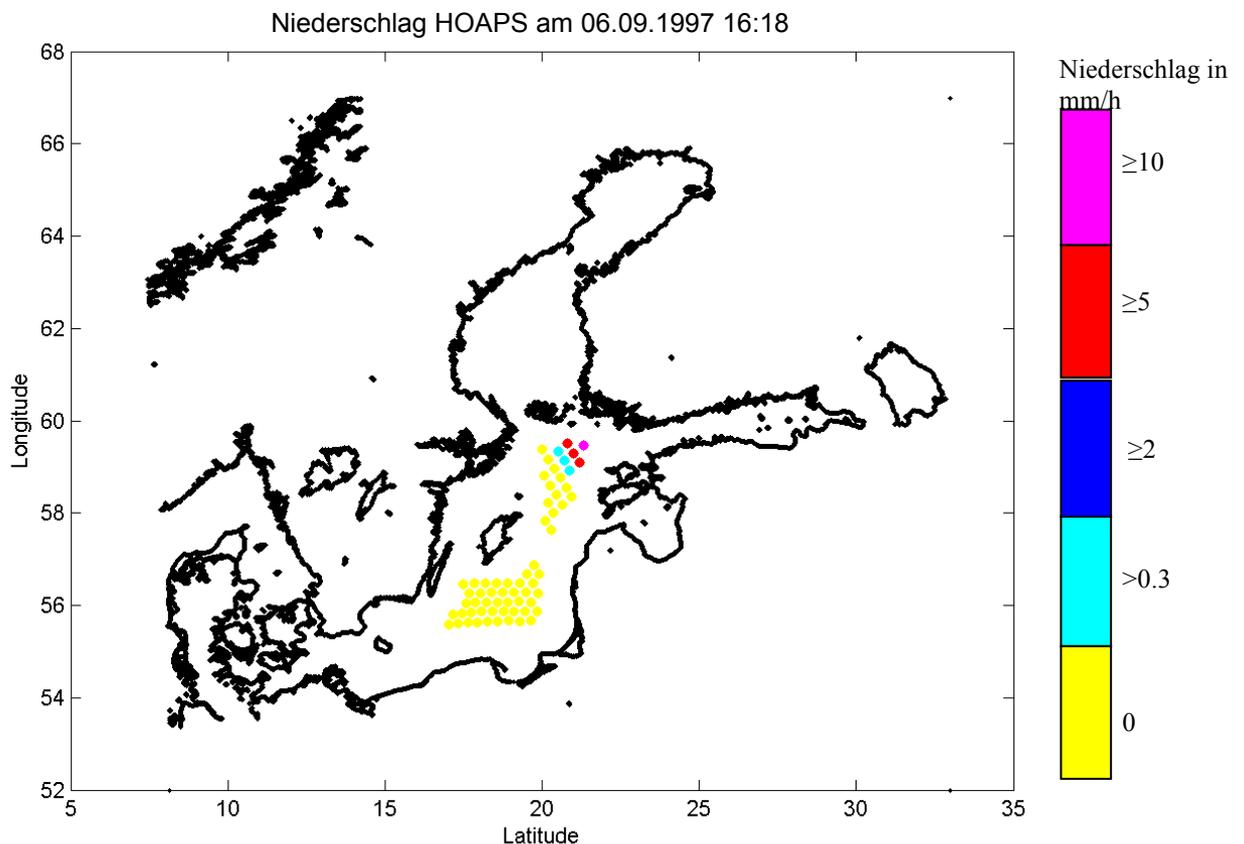


Abb. 9: Niederschlag über der Ostsee am 06.09.1997 16:18 gemessen von HOAPS; die Punkte geben den Ort der Niederschlagsmessung an, ihre Farbe drückt die Niederschlagsrate aus

Am 07. und 08.09.1997 herrscht konvektive Bewölkung vor. Es gibt keine Schiffsmessungen mit Niederschlag größer gleich 0,1mm/h. Der nicht kollokierte HOAPS-Datensatz zeigt dagegen eine Reihe von Niederschlagsereignissen, die ausnahmslos nicht in der Nähe der Schiffsmessungen liegen.

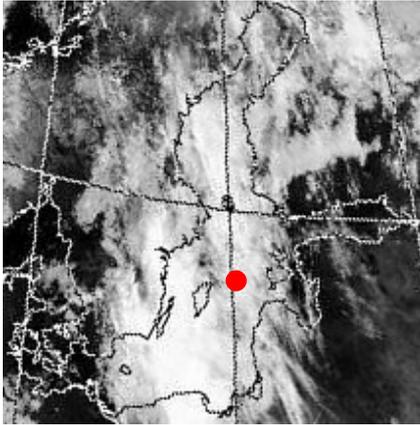
Am 09.09.1997 zeigen die Satellitenbilder eine Mischung aus konvektiver und stratiformer Bewölkung; im Niederschlagsgebiet herrscht stratiforme vor. Sie gehört zu einem älteren Tiefdruckgebiet, das sich nordöstlich der Ostsee befindet. Warm- und Kaltfront sind bereits über die Ostsee gezogen und vereinigen sich zur Okklusion. Um 12:00 sind das Tief und die Fronten weiter nach Osten gezogen. Im Ostseeraum befinden sich keine Fronten, die Ursache für den Niederschlag um 07:24 und 07:45 sein können. Außerdem ist in diesem Zeitraum an keinem Ort der Ostsee Niederschlag von HOAPS im kollokierten Datensatz verzeichnet. Es ist anzumerken, dass die vom Schiffsregensmesser gemessenen Niederschlagsraten klein sind (0,49mm/h). Wie bereits in Kapitel 3.1 erwiesen, steigt die Erkennbarkeit von Niederschlag

durch HOAPS mit der Niederschlagsmenge; kleine Regenraten haben also eine höhere Wahrscheinlichkeit von HOAPS nicht erkannt zu werden.

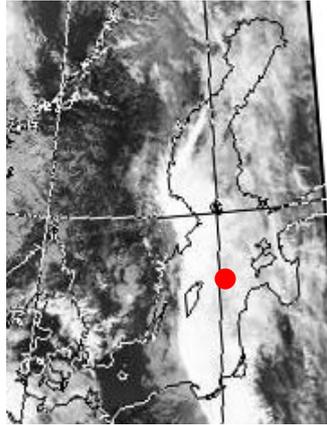
Am Nachmittag des 09.09.1997 zeigt das Satellitenbild mehr Bewölkung als am Morgen; die Mischung aus stratiformer und konvektiver Bewölkung ist nach wie vor vorhanden. Das Tief verschiebt sich weiter nach Osten. Die noch vorhandene Bewölkung ist auf das weiter gezogene Tiefdruckgebiet zurückzuführen. Der vom Schiffsregenschiff gemessene Niederschlag ist höher als am Morgen; HOAPS erkennt den Niederschlag, unterschätzt ihn jedoch.

Zusammengefasst zeigt das Fallbeispiel recht deutlich die Schwächen von HOAPS; bei teilweise konvektiver Bewölkung wird nur noch die Hälfte der Ereignisse wahrgenommen, die Hälfte, die erkannt wird, wird in ihrer Niederschlagsmenge stark unterschätzt.

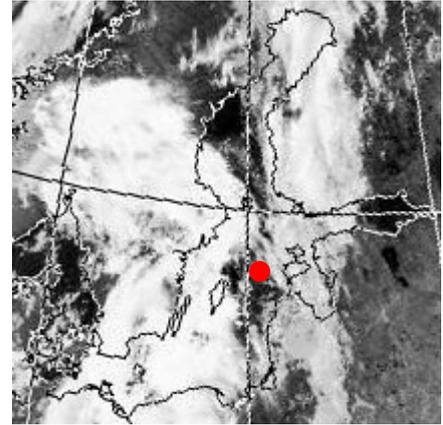
Abbildung 9 zeigt, dass HOAPS schauerartige Niederschläge erkennen kann, allerdings nicht zuverlässig.



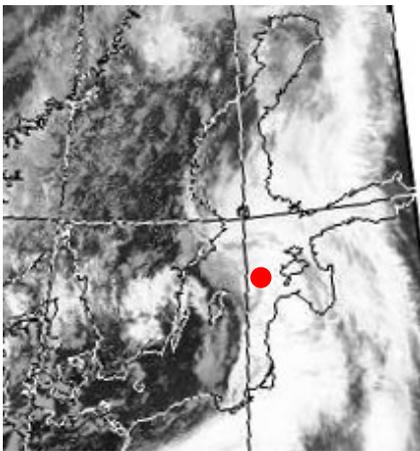
05.09.1997 06:40



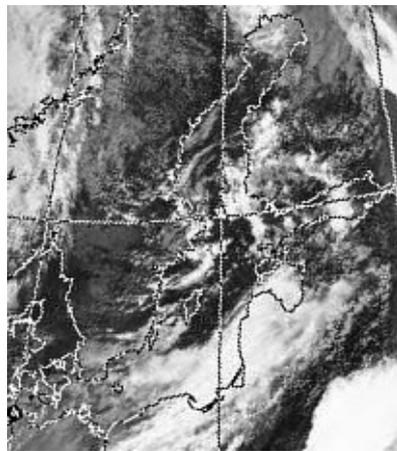
05.09.1997 13:21



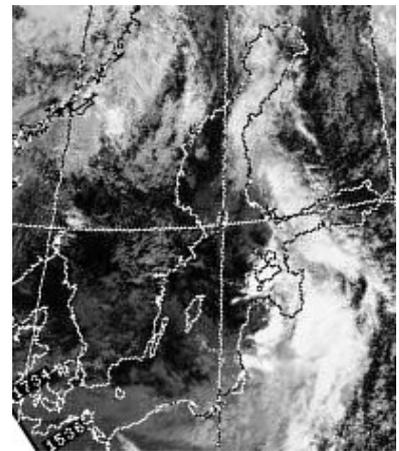
06.09.1997 01:34



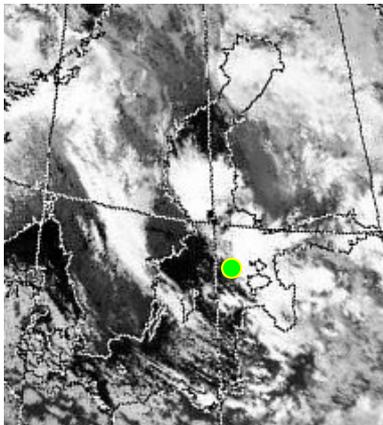
06.09.1997 13:10



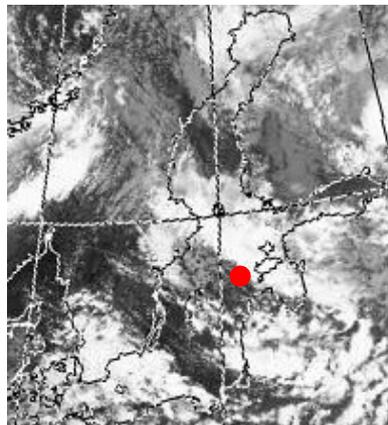
07.09.1997 11:20



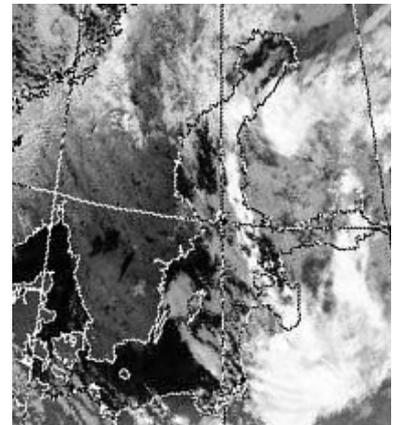
08.09.1997 11:09



09.09.1997 06:52



09.09.1997 12:37



10.09.1997 02:32

Abb. 10: Satellitenbilder vom 05. bis 10.09.1997(Dundee Sattelite Receiving Station, 1997); Niederschlagsregionen für HOAPS und das Schiff (rot), Niederschlagsregionen, bei denen nur der Schiffsregensmesser Niederschlag erkannt hat (grün)

In Abbildung 11 sind die Bodendruckkarten des 05.09.1997 0:00 und 12:00 zu sehen. Weitere Bodendruckkarten bis zum 10.09.1997 befinden sich im Anhang.

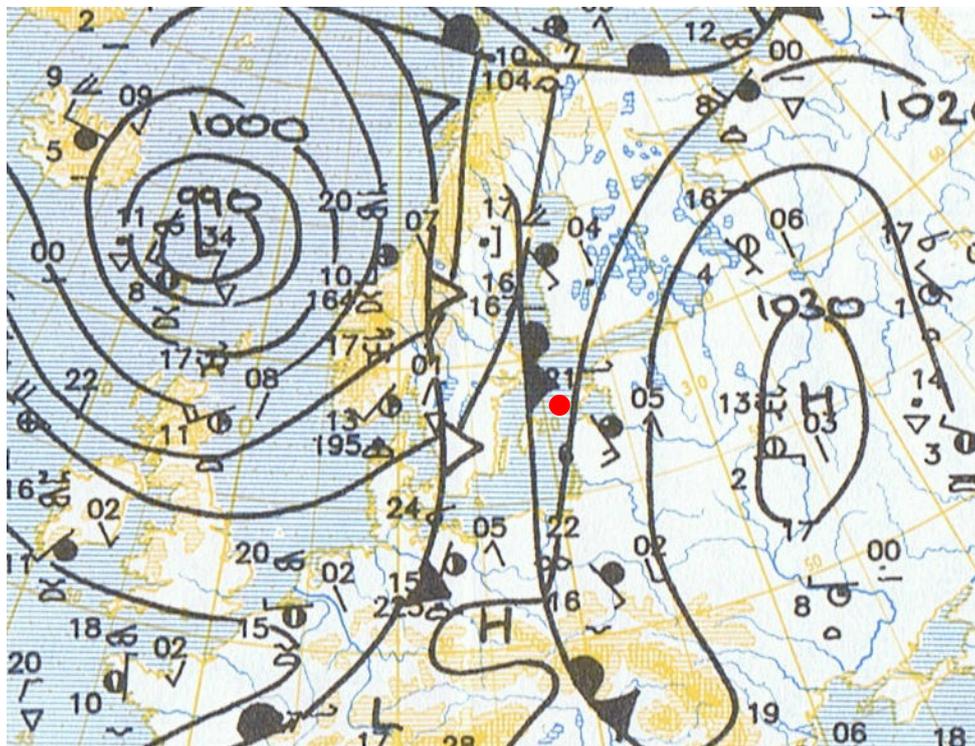
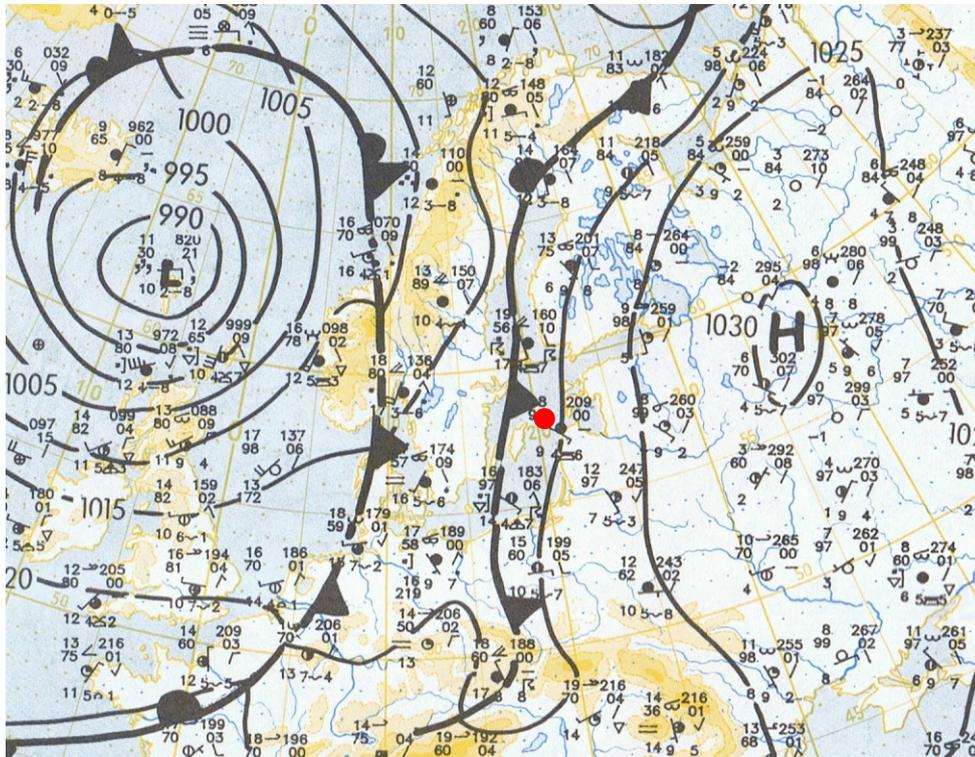


Abb. 11: Bodendruckkarte für den 05.09.1997 00:00(oben) und 12:00 (unten), mit eingezeichneten Fronten (DWD, 1997); Niederschlagsort HOAPS/Schiff(rot)

4. Diskussion

In dieser Arbeit wurde der Einfluss von Wettererscheinungen auf die Identifizierung von Niederschlag anhand von Satellitendaten untersucht. Die primäre Hypothese war, dass die aus Satellitendaten ermittelte Klimatologie HOAPS nur eingeschränkt dazu in der Lage ist, kurzzeitigen bzw. räumlich eng begrenzten Niederschlag zu erkennen. Da Schauer vorwiegend aus konvektiver Bewölkung fallen, wurden Satellitenbilder zum Zeitpunkt der Niederschlagsereignisse auf Bedeckungsarten untersucht. Dabei wurde zwischen stratiformer und konvektiver Bewölkung unterschieden. In einer dritten Bedeckungsart wurden alle Ereignisse zusammengefasst, die nicht eindeutig einer Art zugeordnet werden konnten. Bodendruckkarten wurden hinsichtlich des Frontenverlaufs untersucht, da die Frontenart meist mit einer charakteristischen Niederschlagsart verbunden ist; kurze Schauer gibt es vorwiegend bei Kaltfronten, länger anhaltenden, gleichmäßigen Regen im Bereich von Warmfronten. Eine Okklusion hat, je nach vertikalem Temperaturprofil, Kaltfront- oder Warmfrontcharakter. Im Sommer ähnelt sie bezüglich der Wettererscheinungen eher einer Kaltfront, im Winter eher einer Warmfront. Zudem befindet sich das zugehörige Tiefdruckgebiet meist in Auflösung. Die stratiforme Bewölkung eines Tiefdruckwirbels ist hier oft noch vorhanden, was eher auf stratiformen Niederschlag hindeutet.

Die Untersuchung der Daten des Europamodells für den Bedeckungsgrad ergab, dass Niederschlagsereignisse in der Nähe von Wolkenlücken eine geringere Wahrscheinlichkeit haben, von HOAPS erkannt zu werden, als Ereignisse im Bereich weiträumiger Bedeckung. Über 60% der Ereignisse, die HOAPS nicht erkannt hat, befanden sich in Regionen lückenhafter Bewölkung oder unter freiem Himmel; 74% der erkannten Ereignisse fanden bei voller Bedeckung statt. Diese Betrachtungsweise sagt noch nichts darüber aus, welche Form der Bedeckung vorherrschte. Außerdem ist zu beachten, dass das EM lediglich eine Prognose über 24 Stunden macht, die in 6-Stunden-Intervalle unterteilt ist.

Die Betrachtung interpolierter Bedeckungsgrade am Ort des HOAPS-Niederschlags ergab nur ein Plus von 6% Bedeckungsgrad für die Fälle, in denen HOAPS Niederschlag erkennt, gegenüber denen der Nichterkennung. Da der interpolierte Bedeckungsgrad jedoch noch weniger aussagekräftig hinsichtlich Art der Bedeckung ist, hat diese Betrachtung kaum Relevanz.

Das Ergebnis der Untersuchung der Satellitenbilder auf vorherrschende Bedeckungsarten für Fälle, dass HOAPS Niederschlag erkennt bzw. nicht erkennt, unterstützt die Hypothese und

hat eine höhere Signifikanz als das Ergebnis der Auswertung der Daten des EM, da es sich bei den Satellitenbildern um reale Aufnahmen handelt. Demnach herrschte in über 50% der Fälle konvektive Bewölkung, wenn HOAPS keinen Niederschlag erkennt; wenn es Niederschlag erkennt, war die Bedeckung zu 74% stratiform. Es ist anzumerken, dass die Satellitenbilder nur alle 12 Stunden verfügbar sind. Es wurde stets das Bild gewählt, das zeitlich näher am Niederschlagsereignis lag. Trotzdem bestand ein zeitlicher Versatz, in dem sich das Wolkenbild geändert haben kann.

Auch die Betrachtung der Wetterkarten bestätigte die Hypothese. In 49% der Fälle, in denen HOAPS keinen Niederschlag erkannte, befanden sich Kaltfronten im Niederschlagsgebiet, die meist konvektiven Niederschlag bringen. Eine Warmfront, die meist stratiformen Niederschlag bringt, gab es in keinem Fall im Niederschlagsgebiet. Da die Wetterkarten nur alle 12 Stunden vorliegen, und sich in dieser Zeit eine Front stark verschieben kann, sind auch diese Aussagen mit einer gewissen Unsicherheit verbunden.

Zusammengefasst bestätigte die Betrachtung der Bedeckung die Hypothese. Zwar kann HOAPS auch konvektiven Niederschlag wahrnehmen, jedoch steigt für diese Niederschlagsart die Wahrscheinlichkeit der Nichterkennung. Aus der Betrachtung des Fallbeispiels vom 05. bis 09.09.1997 ging hervor, dass die Erkennung von Niederschlagsfeldern häufig lückenhaft ist. So wurde zwar am 06.09.1997 16:18 innerhalb des 25km-Radius um das Schiff kein Niederschlag gemessen, nicht weit außerhalb davon hat HOAPS jedoch viel Niederschlag erkannt.

Darüber hinaus wird der Niederschlag von HOAPS grundsätzlich unterschätzt. Ein Beispiel dafür ist ein Ereignis am 06.09.1997, an dem vom Schiffsregenmesser eine Niederschlagsrate von 24,25mm/h verzeichnet wurde, während HOAPS nur 11,24mm/h ermittelt hat. Durchschnittlich liegt die Unterschätzung des Niederschlags durch HOAPS für den Fall, dass beide Niederschlag $\geq 0,3$ mm/h erkannt haben, bei knapp 50%; sowohl stratiformer als auch konvektiver Niederschlag werden von HOAPS gleichermaßen unterschätzt. Dieser Vergleich ist jedoch auf Grund der kurzen Korrelationslängen von Niederschlägen als problematisch anzusehen (Strehz und Bumke, 2010). Für einen korrekten Vergleich müssten alle vorhandenen Informationen, auch die nicht kollokierten, mit Hilfe eines Analyseverfahrens auf ein regelmäßiges Gitter interpoliert werden (siehe Abb. 3). Für 1996 und 97 ergibt sich daraus eine Unterschätzung von 30% (Bumke, persönliche Mitteilung); 10% davon können auf das Fehlen von Niederschlägen kleiner 0,3mm/h im HOAPS-Datensatz zurückgeführt werden (Strehz und Bumke, 2010), sodass die reale Unterschätzung bei etwa 20% liegt.

Die Untersuchung auf saisonale Unterschiede ergab, dass HOAPS im Sommer eher Niederschlag erkennt als im Winter. Bei der Untersuchung der Bedeckung ließ sich das im Wesentlichen auf die größere Anzahl an Fällen mit konvektiver Bedeckung im Winter zurückführen. In den betrachteten Winterhalbjahren (September bis März) gab es 12 Ereignisse konvektiver Bedeckung mit Nichterkennung durch HOAPS (70%), in den Sommerhalbjahren (April bis September) 6 Ereignisse (30%). Das Auftreten konvektiver Bewölkung konnte anhand der Bodendruckkarten nicht eindeutig Wettererscheinungen zugeordnet werden. Im Sommer wie im Winter bedeuten Kaltfronten eher, dass HOAPS keinen Niederschlag erkennt. Aus der Betrachtung des Druckeinflusses lässt sich schließen, dass ein Tiefdruckgebiet im Sommer eher dazu führt, dass Niederschlag nicht erkannt wird, als im Winter; 85% der Niederschlagsereignisse, die HOAPS nicht erkannt hat, fanden im Sommer unter Tiefdruckeinfluss statt, im Winter waren es 50%. Da die Druckgebiete ständig in Bewegung sind und zwischen den betrachteten Wetterkarten jeweils 12 Stunden liegen, ist diese Einteilung der Wetterkarten nach Druckeinflüssen ungenau. Der Ursprung der konvektiven Bewölkung konnte also nicht eindeutig geklärt werden. Sie bewirkt jedoch die saisonale Variabilität in der Erkennung von Niederschlag durch HOAPS.

Beim Vergleich der HOAPS- und der Schiffsmessungen mit dem EM fielen insbesondere die Unterschiede der Luft- und Bodentemperatur sowie der spezifischen Luftfeuchte zwischen den Fällen, dass HOAPS Niederschlag erkennt bzw. nicht erkennt, auf. Im Winter wie im Sommer waren die Luft- und Bodentemperatur sowie die spezifische Feuchte in den Fällen, in denen HOAPS Niederschlag erkennt, durchschnittlich höher als in denen ohne Niederschlagserkennung. Das ließ sich nicht auf bestimmten Wetterphänomenen zurückführen. Es ist somit weiterhin offen, ob diese Größen selbst einen Einfluss auf die Niederschlagserkennung durch HOAPS haben, oder, ob sie lediglich Wettererscheinungen begleiten, die diesen Einfluss haben.

Dass HOAPS konvektiven Niederschlag mit geringerer Wahrscheinlichkeit wahrnimmt als stratiformen, liegt möglicherweise daran, dass sich der Satellit nur wenige Minuten über der Ostsee befindet. Das Messintervall des Schiffsregennessers beträgt 8 Minuten. Ein Schauer hält oft nur kurze Zeit (Sekunden oder wenige Minuten) an, kann in dieser Zeit aber zu ergiebigen Niederschlägen führen. Überquert der Satellit also die Ostsee zu Beginn eines Messintervalls der Schiffsmessung und beginnt ein Schauer erst später innerhalb dieses Intervalls, so erkennt HOAPS den Schauer nicht, da der Satellit nur etwas mehr als eine Minute über der Ostsee verweilt und sich zum Niederschlagszeitpunkt nicht mehr im

Niederschlagsbereich befindet. Die zu geringe Datendichte könnte beispielsweise durch den Einsatz von zusätzlichen Satelliten oder Satelliten auf geostationärem Orbit vergrößert werden, um Niederschlagserkennung durch HOAPS zu verbessern.

HOAPS unterschätzt den Niederschlag über der Ostsee grundsätzlich. In den Tropen wird der von HOAPS ermittelte Niederschlag dagegen überschätzt (Klepp und Böttcher, persönliche Mitteilung). Da die Unterschätzung des Niederschlags über der Ostsee keiner bestimmten Niederschlagsart zugeordnet werden konnte, bleibt die Erklärung dieses Phänomens offen.

In dieser Arbeit wurden die HOAPS-Niederschlagswerte nur mit Messungen von Schiffsregenschirmen verglichen. Die Anzahl der Messungen ist limitiert; die Messungen wurden nur entlang fester Routen durchgeführt und enthalten keine regelmäßig aufgenommenen Werte für einen Ort. Eine Validierung der HOAPS-Daten ist folglich nur begrenzt möglich. Um die Zahl der Vergleichsdaten zu erhöhen, könnten Niederschlagsdaten aus Radarmessungen oder aus Landmessungen in Küstennähe hinzugezogen werden, wobei letztere nur bedingt für einen Vergleich mit HOAPS geeignet sind, da es nur den Niederschlag über dem Meer in ausreichendem Küstenabstand misst.

Zusammengefasst konnte die primäre Hypothese bestätigt werden, dass HOAPS konvektiven Niederschlag mit geringerer Wahrscheinlichkeit erkennt als stratiformen. Weiterhin senkt die Kaltfront eines Tiefdruckgebiets offensichtlich die Wahrscheinlichkeit einer Niederschlagserkennung durch HOAPS. Zudem wurde festgestellt, dass HOAPS die Niederschlagsmenge unterschätzt, und zwar unabhängig von der Art des Niederschlags.

Anhang

I. Tabelle der Niederschlagsereignisse

Die Spalten 1 bis 4 der Tabelle beschreiben Zeitpunkt und Ort der Niederschlagsereignisse. Ein Kreuz in Spalte 5 gibt an, dass HOAPS Niederschlag erkannt hat. Die Uhrzeit beschreibt lediglich einen Zeitpunkt im Intervall, in dem Niederschlag vom Schiffsregenschirm erkannt wurde. Die Uhrzeiten, in denen der Schiffsregenschirm Niederschlag erkannt hat, liegen innerhalb von +/-30min. Die Ortsangaben gelten ebenfalls für die HOAPS-Messungen, unabhängig davon, ob zum Messzeitpunkt Niederschlag von HOAPS gemessen wurde oder nicht; die zugehörigen Schiffsmessungen haben in einem maximalen Abstand von 25km zur HOAPS-Messung stattgefunden.

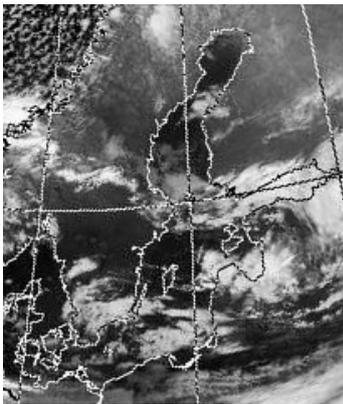
Datum	Uhrzeit (UTC)	Geogr. Breite [°]	Geogr. Länge [°]	Niederschlag HOAPS
07.02.1995	04:59	58,45	20,65	x
07.02.1995	06:40	58,02	20,05	
21.03.1995	05:49	58,93	20,45	
07.04.1995	15:21	57,88	20,03	x
06.05.1995	20:29	58,65	21,13	
14.05.1995	19:35	58,18	20,57	x
26.05.1995	16:19	58,20	20,48	
02.06.1995	19:32	58,22	20,50	
02.06.1995	19:33	58,22	20,50	
19.06.1995	16:05	58,18	20,45	x
23.06.1995	20:06	57,85	19,97	x
30.06.1995	19:44	58,02	20,22	x
01.07.1995	09:27	56,35	17,47	x
01.07.1995	15:08	58,37	20,53	
03.07.1995	16:22	58,22	20,30	x
17.07.1995	06:45	56,43	17,67	x
17.07.1995	16:38	58,22	20,32	x
15.08.1995	05:23	58,65	21,10	
15.09.1995	06:58	56,37	17,48	x
28.09.1995	04:52	58,18	20,52	x
28.09.1995	04:53	58,22	20,55	x
15.10.1995	19:46	58,22	20,52	x
16.11.1995	05:08	58,35	20,70	x
17.11.1995	04:57	58,37	19,82	x
23.11.1995	06:50	58,53	20,53	x
13.12.1995	04:46	57,95	19,97	x
30.04.1996	19:50	58,73	21,00	
25.05.1996	19:54	58,95	20,28	

25.05.1996	19:55	58,95	20,28	
28.05.1996	19:59	58,18	20,45	
30.06.1996	09:23	56,38	17,53	x
30.06.1996	19:10	58,95	20,27	
10.07.1996	20:30	58,48	20,68	
30.07.1996	16:53	57,88	20,02	x
30.07.1996	19:53	58,37	20,73	x
30.08.1996	20:05	58,53	21,00	x
08.09.1996	20:19	58,35	20,70	x
12.09.1996	05:37	58,68	21,18	
28.09.1996	17:00	57,93	19,95	x
29.09.1996	19:11	58,18	20,47	x
01.10.1996	04:46	56,38	17,52	x
18.10.1996	20:45	58,35	20,70	
20.10.1996	19:41	58,23	20,52	x
29.10.1996	05:51	58,03	20,27	x
29.10.1996	15:46	58,4	20,72	x
05.11.1996	06:07	58,67	21,17	
10.11.1996	05:07	58,00	19,97	
19.11.1996	04:59	58,65	21,12	x
28.11.1996	04:51	59,17	21,55	
03.12.1996	05:31	58,45	20,10	
15.12.1996	19:56	58,42	20,78	
29.12.1996	09:24	56,35	17,50	
28.01.1997	06:01	58,65	21,13	
28.01.1997	06:53	58,65	21,13	
19.02.1997	04:57	58,48	19,78	
10.04.1997	04:57	58,37	20,70	
06.05.1997	04:45	58,38	20,72	x
17.06.1997	04:41	58,53	20,95	x
22.06.1997	08:51	56,42	17,65	x
28.07.1997	16:50	58,72	21,02	x
28.07.1997	18:05	58,50	20,70	
29.07.1997	04:37	58,50	20,95	x
05.09.1997	08:35	58,03	20,05	x
05.09.1997	15:15	57,93	20,08	x
05.09.1997	16:31	58,23	20,52	x
05.09.1997	18:29	57,98	20,13	x
06.09.1997	15:03	58,87	21,22	x
06.09.1997	16:18	58,70	20,97	
09.09.1997	07:24	59,38	21,58	
09.09.1997	07:45	59,38	21,58	
09.09.1997	17:19	58,20	20,47	x
09.09.1997	17:40	58,35	20,67	x
14.09.1997	18:19	58,68	21,15	

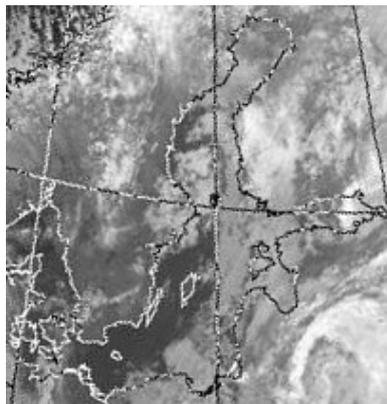
21.09.1997	15:23	57,88	20,03	
02.10.1997	04:55	58,40	20,75	
09.10.1997	05:11	58,37	20,73	x
11.10.1997	14:43	58,87	21,22	x
11.10.1997	16:53	58,37	20,52	x
11.10.1997	17:49	58,23	20,33	x
12.10.1997	17:37	58,42	20,78	
13.10.1997	17:25	58,52	20,75	
22.10.1997	18:56	58,65	19,83	
25.10.1997	18:18	58,03	20,07	

II. Satellitenbilder

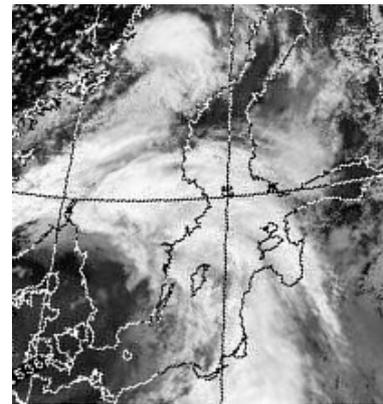
Die Satellitenbilder für die Fälle, in denen der Schiffsregenmesser Niederschlag größer gleich 0,3mm/h gemessen hat (Dundee Satellite Receiving Station, 1995-1997). Die Bilder wurden mit der Grafiksoftware GIMP auf den Ostseeraum zugeschnitten und gedreht, sodass der 20. Längengrad möglichst senkrecht im Bild steht. Das Datum der Aufnahme ist unter dem Bild eingetragen; ein rotes Datum kennzeichnet ein Ereignis, bei dem HOAPS ebenfalls Niederschlag erkannt hat.



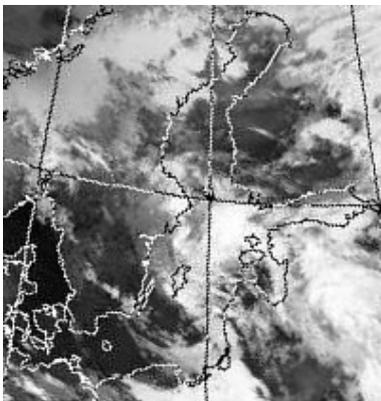
07.02.1995 11:08



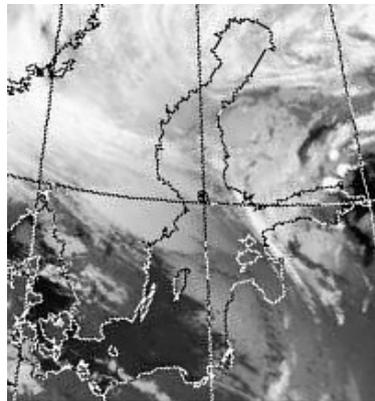
21.03.1995 02:03



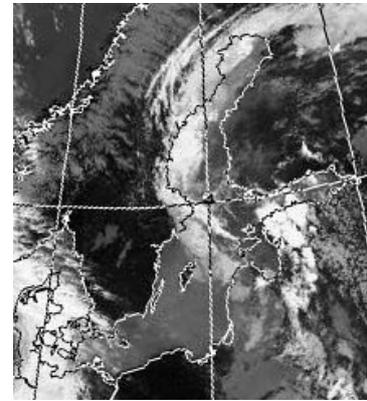
07.04.1995 11:08



07.05.1995 02:00



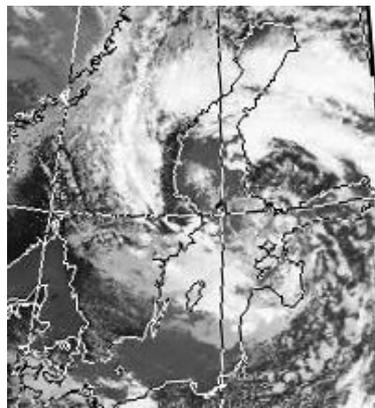
15.05.1995 02:14



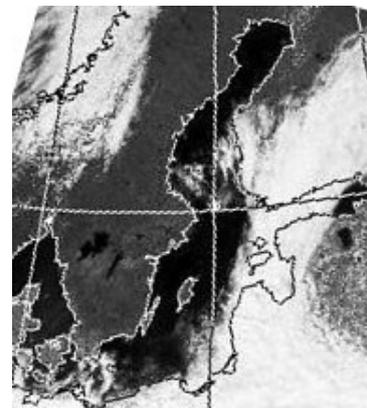
26.05.1995 11:50



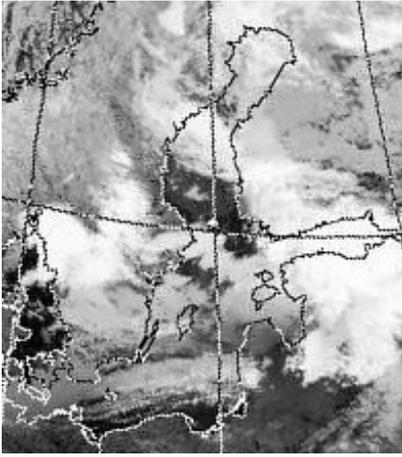
03.06.1995 02:10



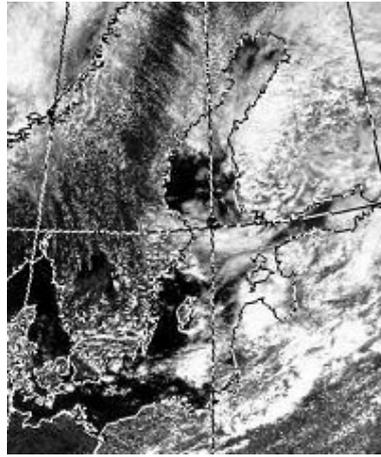
19.06.1995 12:33



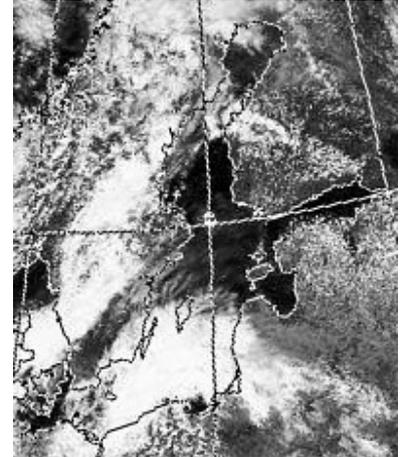
23.06.1995 11:50



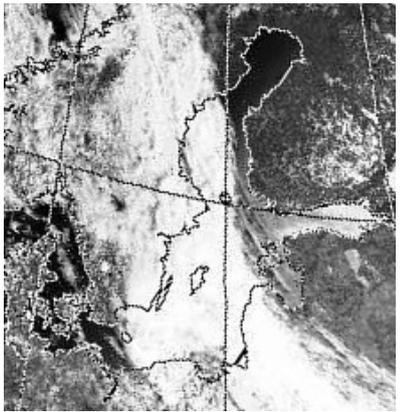
01.07.1995 02:10



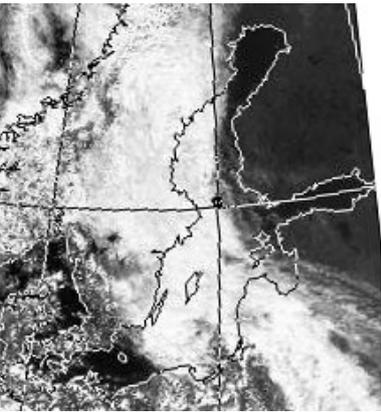
01.07.1995 12:04



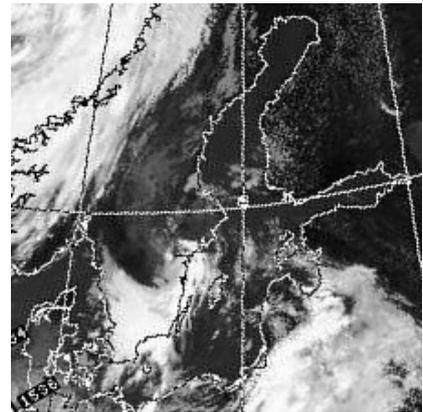
03.07.1995 11:43



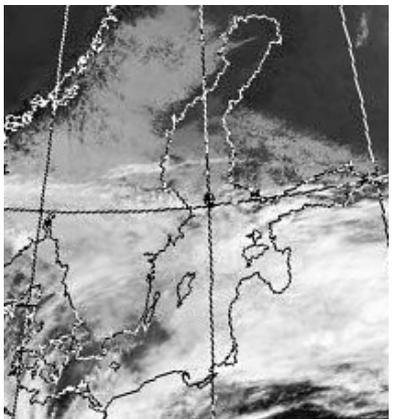
17.07.1995 07:35



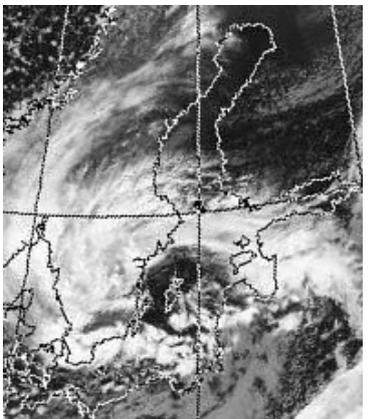
17.07.1995 12:33



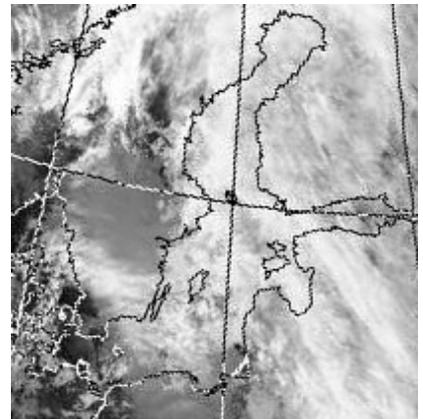
15.08.1995 10:41



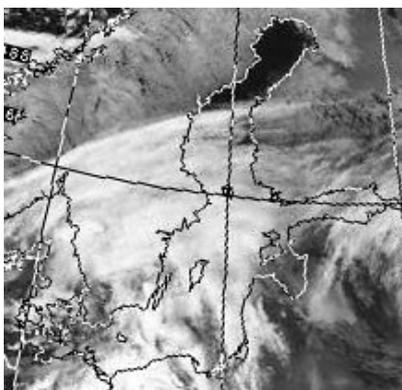
15.09.1995 11:48



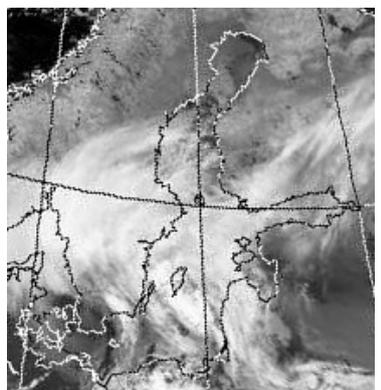
28.09.1995 11:08



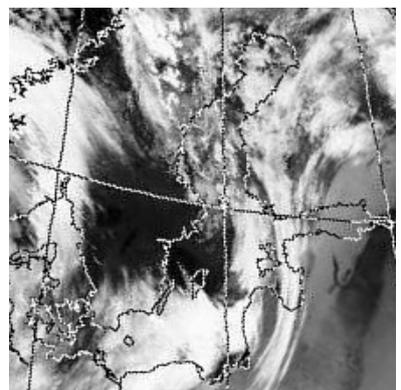
16.10.1995 01:19



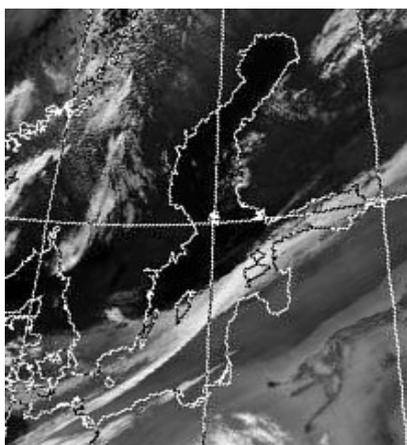
16.11.1995 00:45



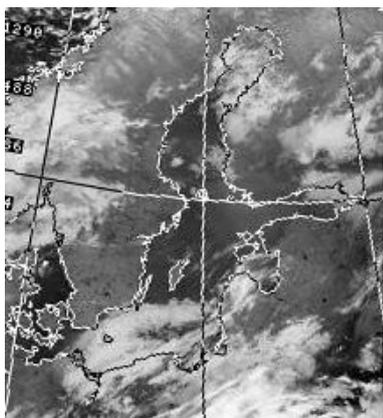
17.11.1995 02:16



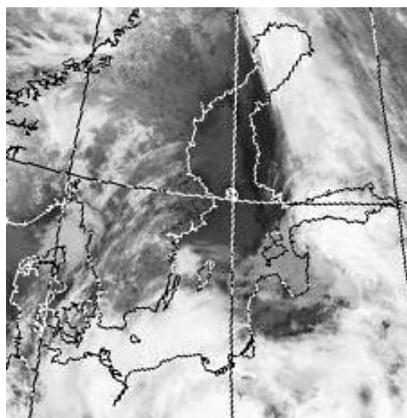
23.11.1995 07:28



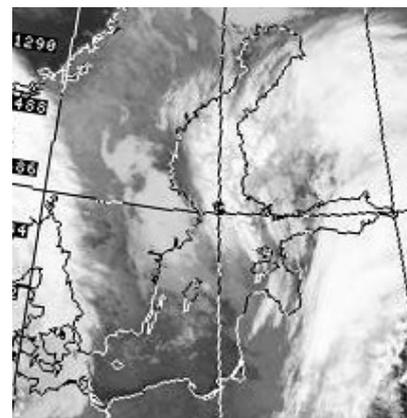
13.12.1995 10:51



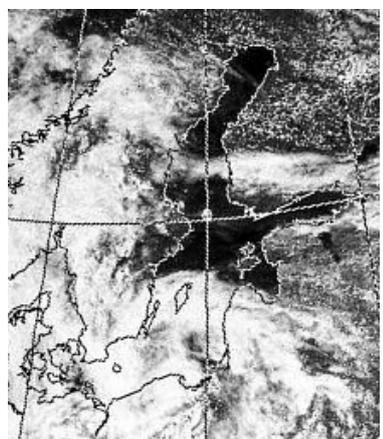
01.05.1996 00:44



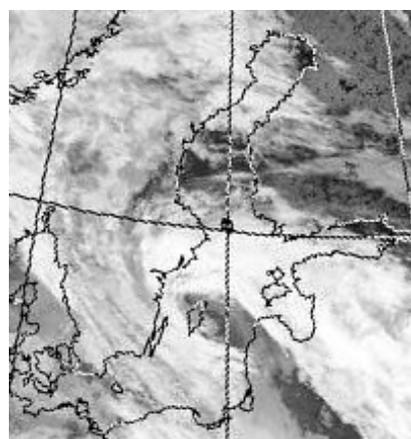
26.05.1996 01:15



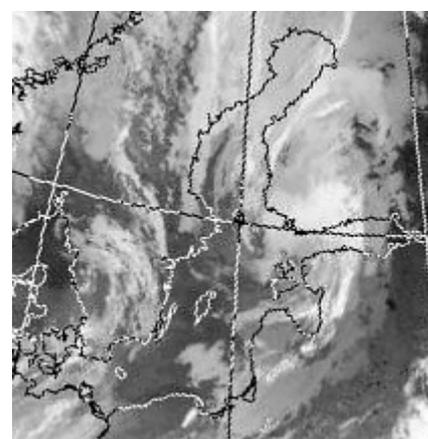
29.05.1996 00:41



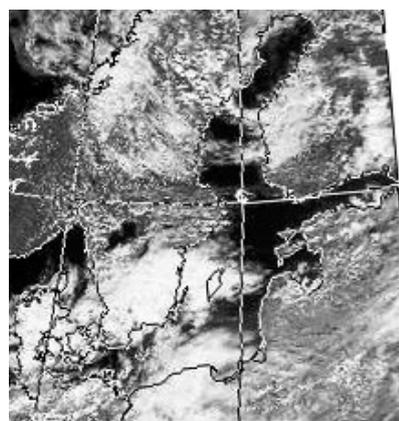
30.06.1996 11:32



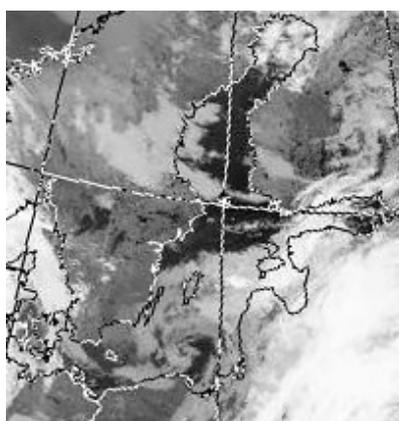
01.07.1996 01:26



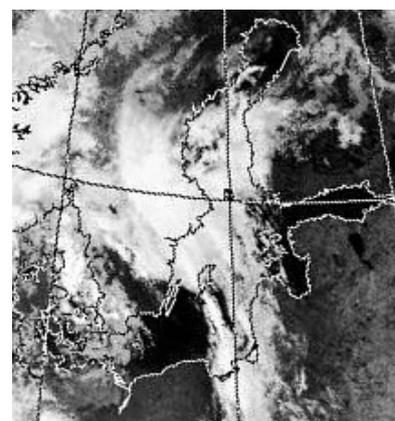
11.07.1996 01:17



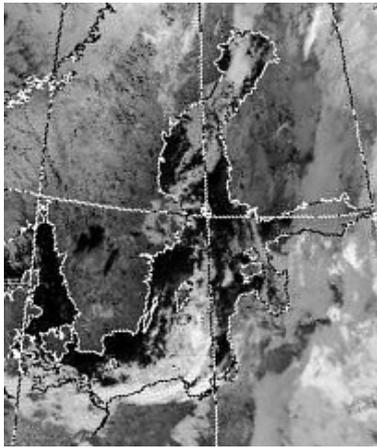
30.07.1996 120:48



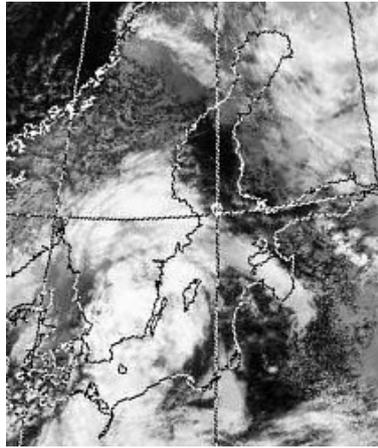
31.07.1996 01:01



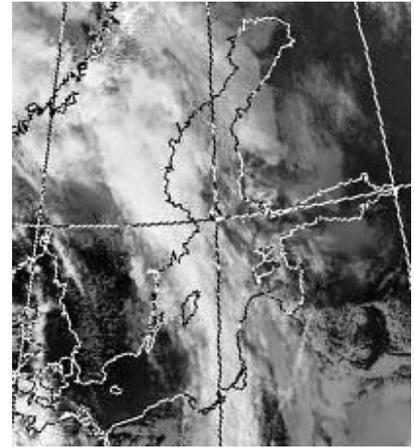
31.08.1996 02:07



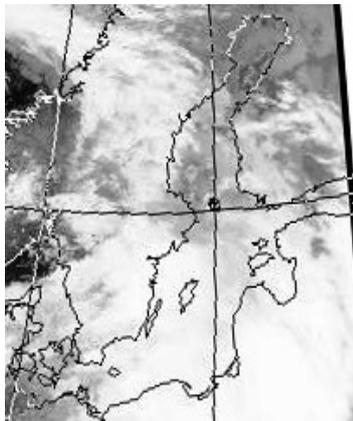
09.09.1996 02:09



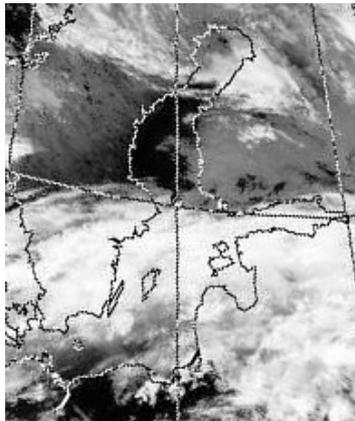
12.09.1996 11:32



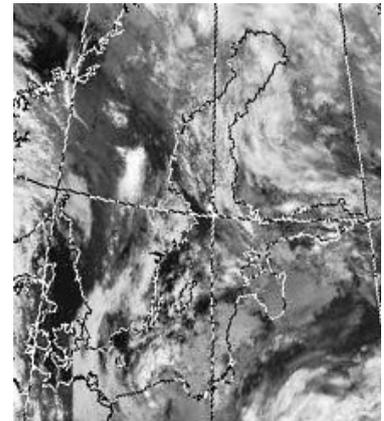
28.09.1996 11:58



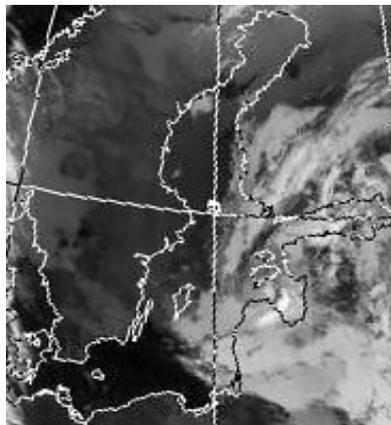
29.09.1996 17:53



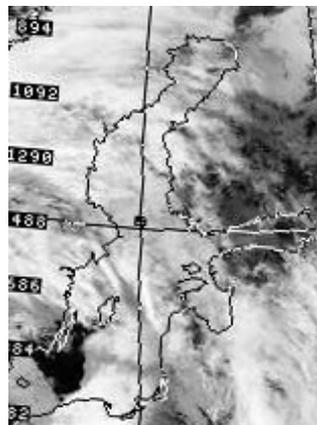
01.10.1996 07:02



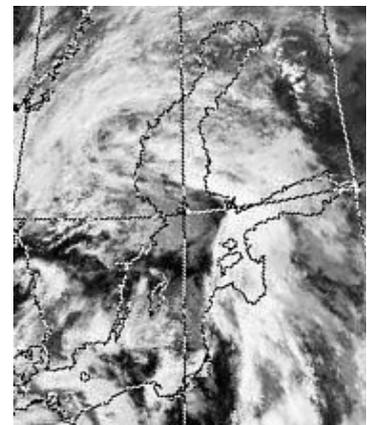
19.10.1996 01:35



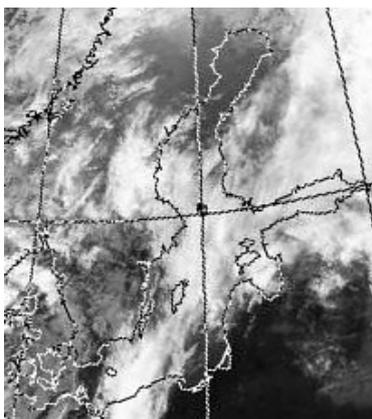
21.10.1996 01:13



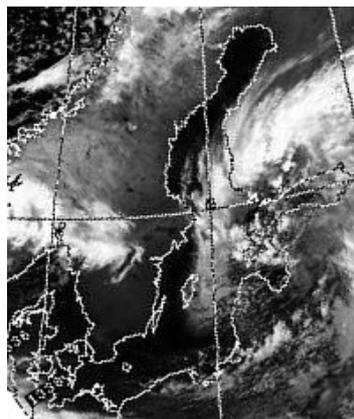
29.10.1996 05:08



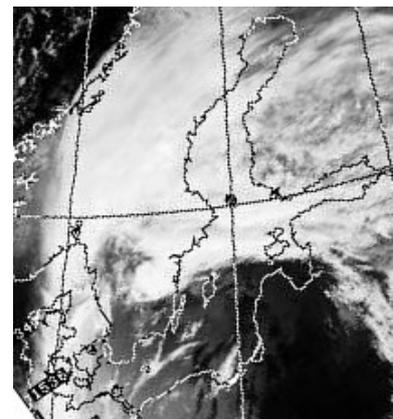
29.10.1996 11:23



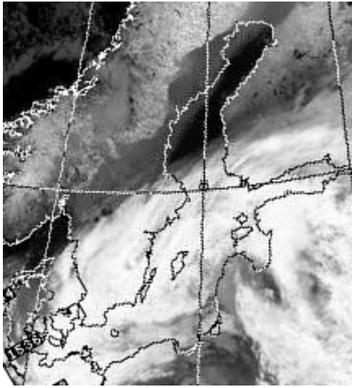
05.11.1996 11:47



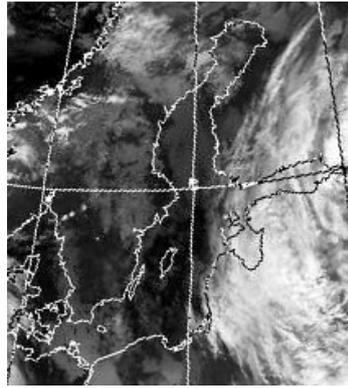
10.11.1996 10:53



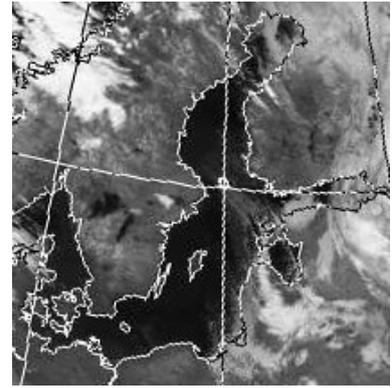
19.11.1996 10:55



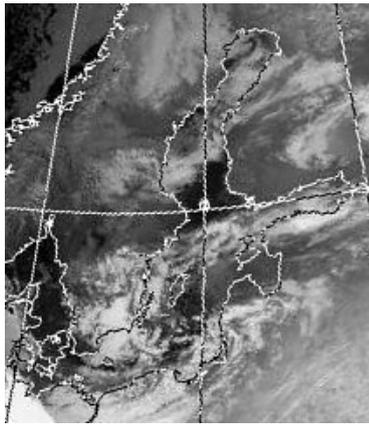
28.11.1996 10:58



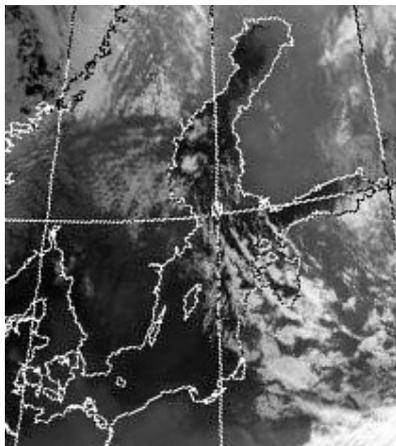
03.12.1996 11:43



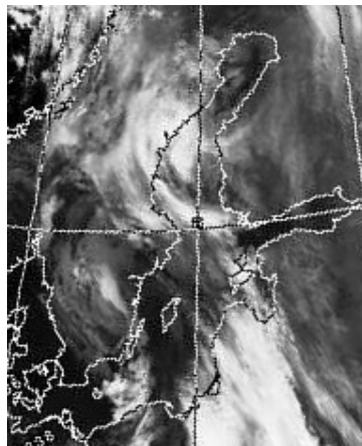
16.12.1996 01:06



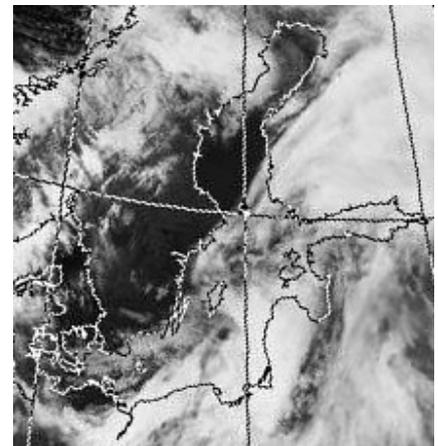
29.12.1996 12:01



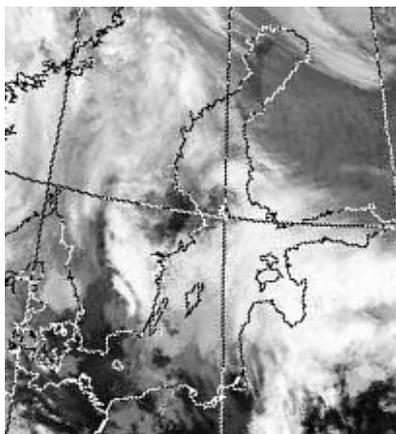
28.01.1997 11:35



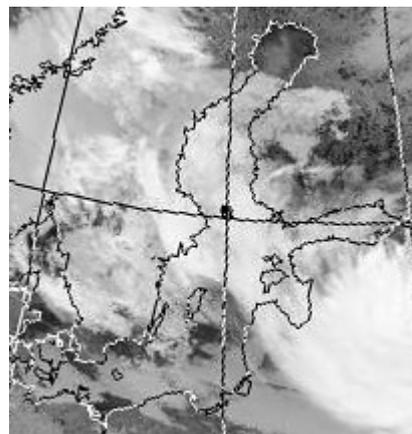
19.02.1997 10:57



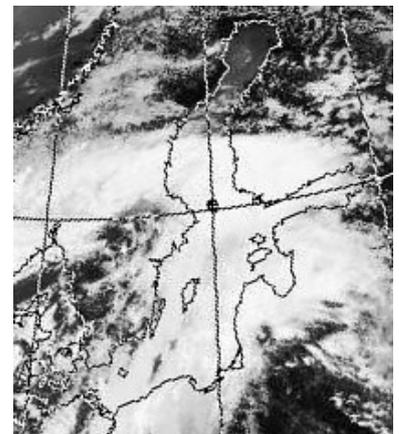
10.04.1997 01:58



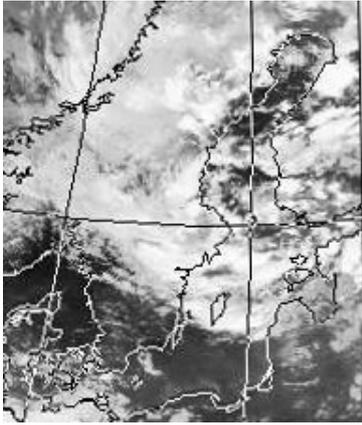
06.05.1997 02:15



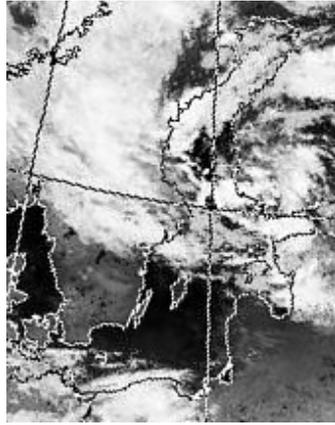
17.06.1997 01:17



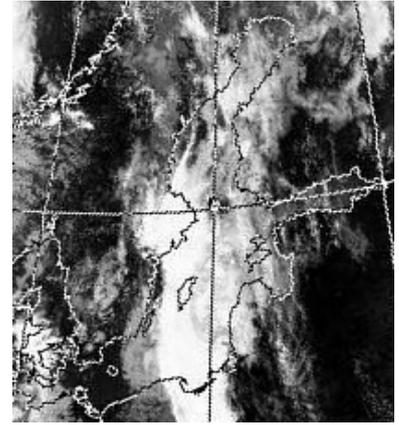
22.06.1997 11:58



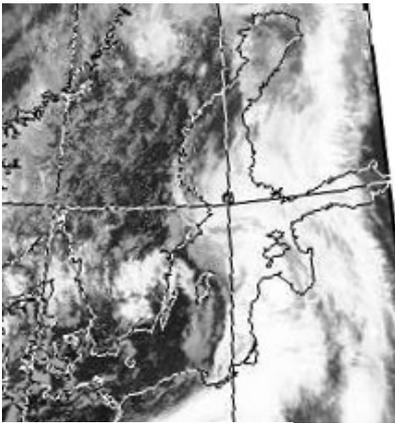
28.07.1997 17:25



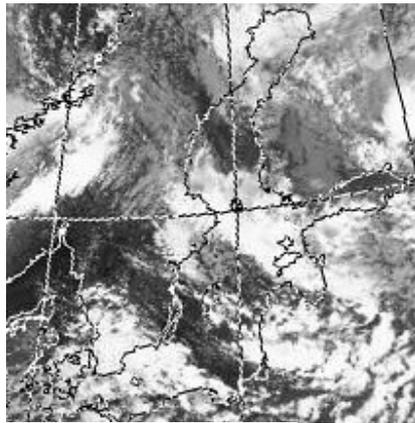
29.07.1997 02:00



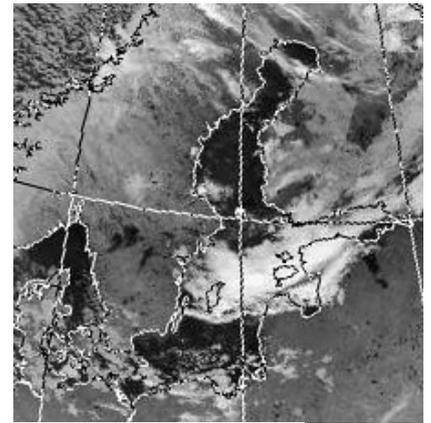
05.09.1997 11:41



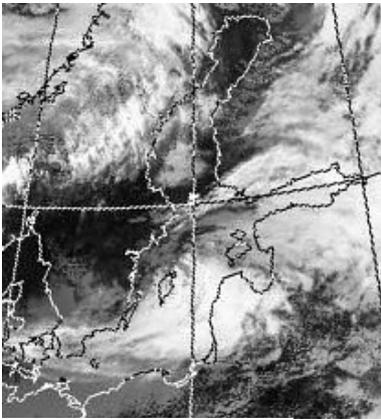
06.09.1997 13:10



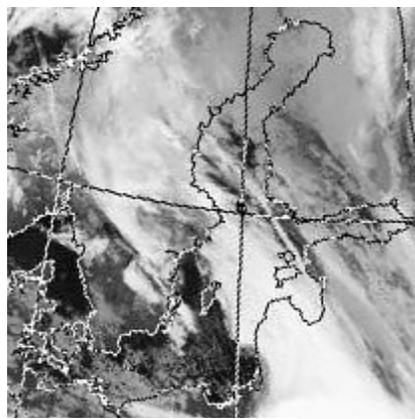
09.09.1997 12:37



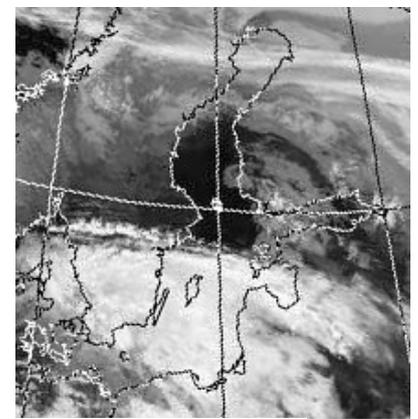
15.09.1997 01:36



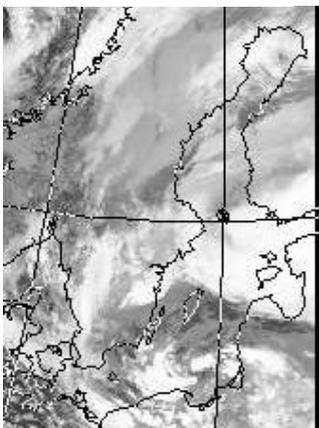
21.09.1997 12:07



02.10.1997 01:51



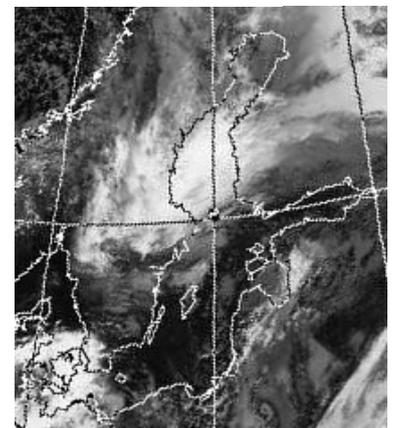
09.10.1997 02:15



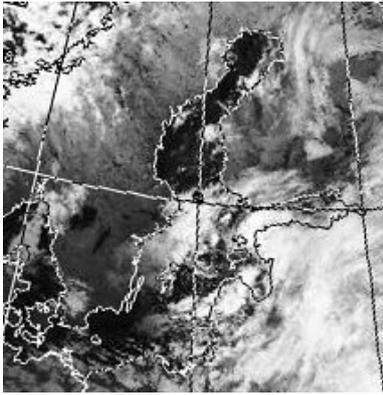
11.10.1997 13:28



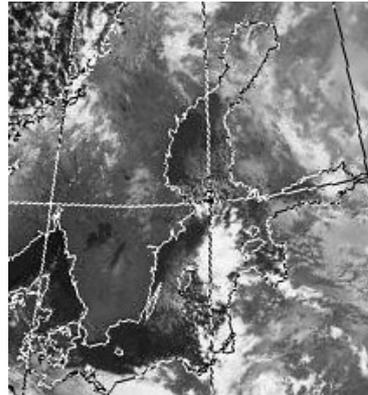
12.10.1997 11:38



13.10.1997 11:27

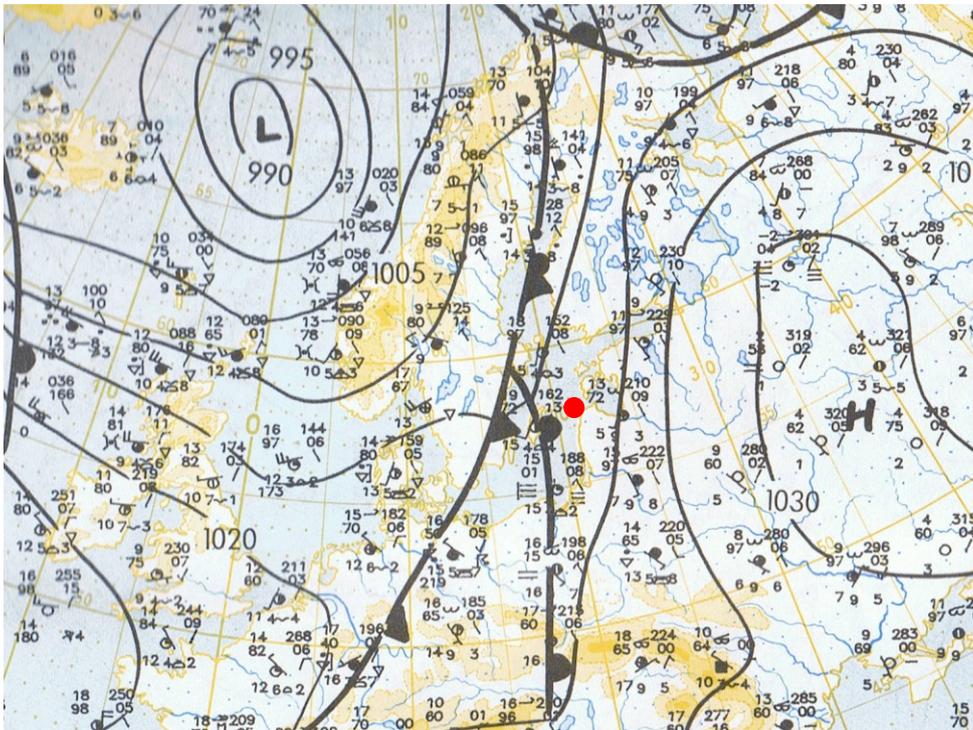


23.10.1997 01:21

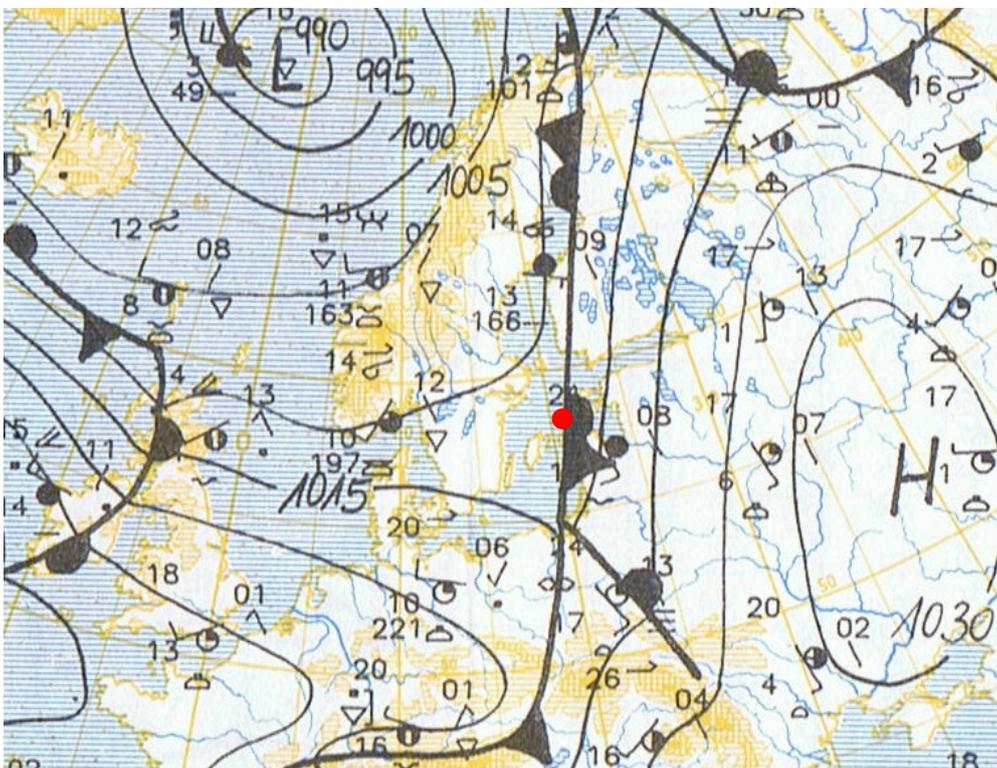


26.10.1997 02:30

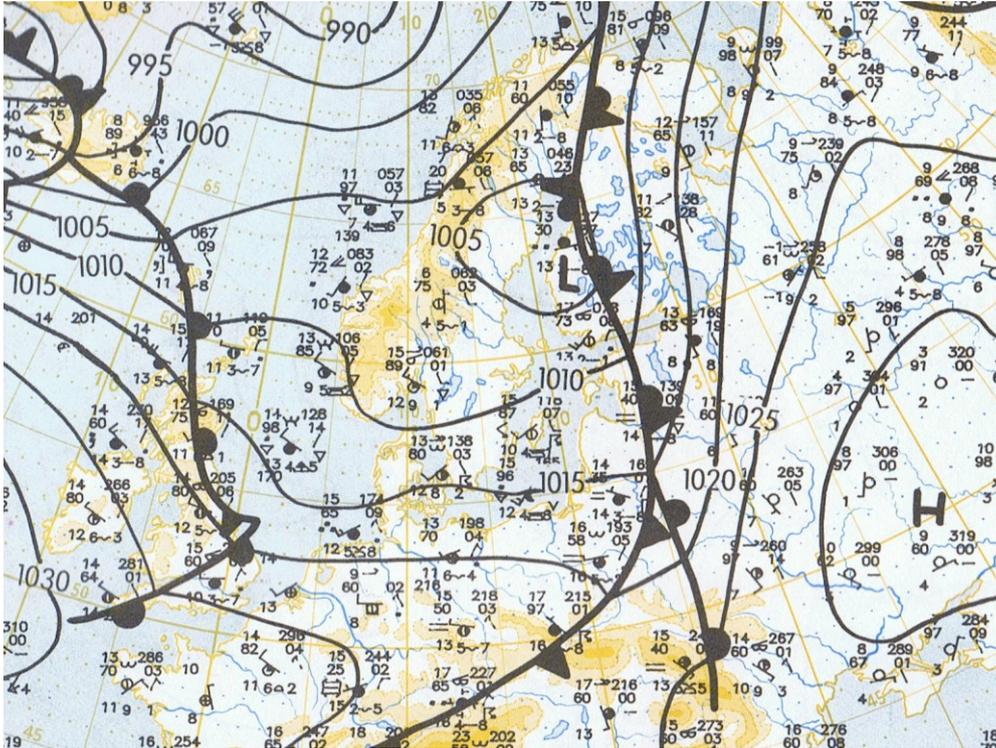
III. Bodendruckkarten



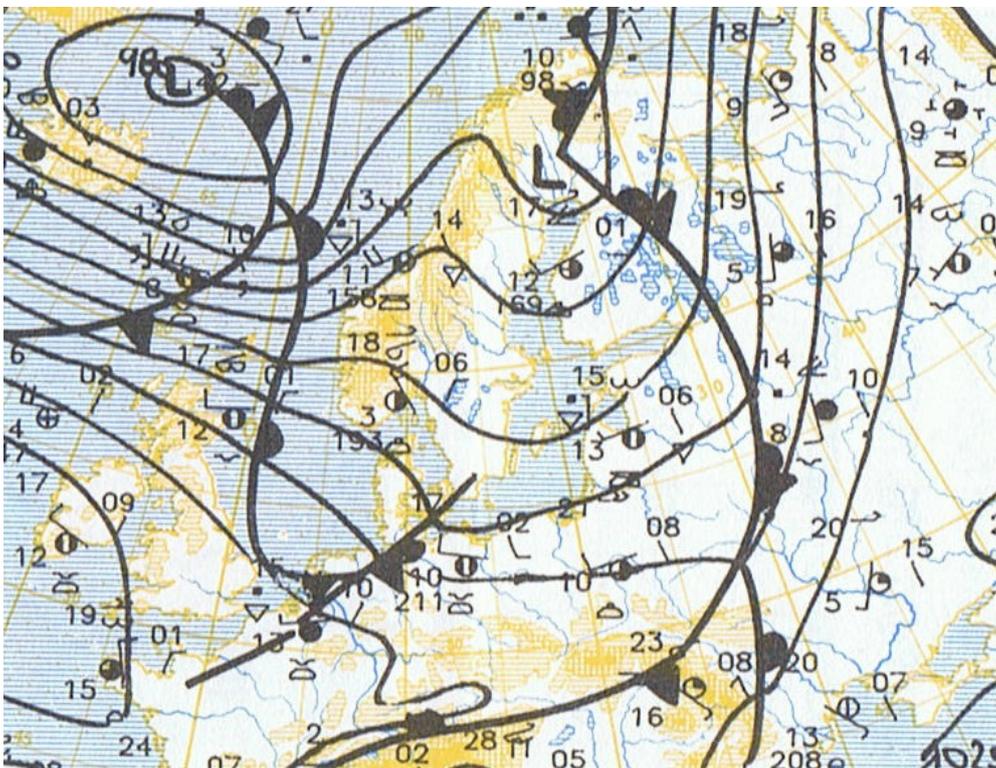
III.1: Bodendruckkarte für den 06.09.1997 00:00, mit eingezeichneten Fronten (DWD, 1997); Niederschlagsort HOAPS/Schiff(rot)



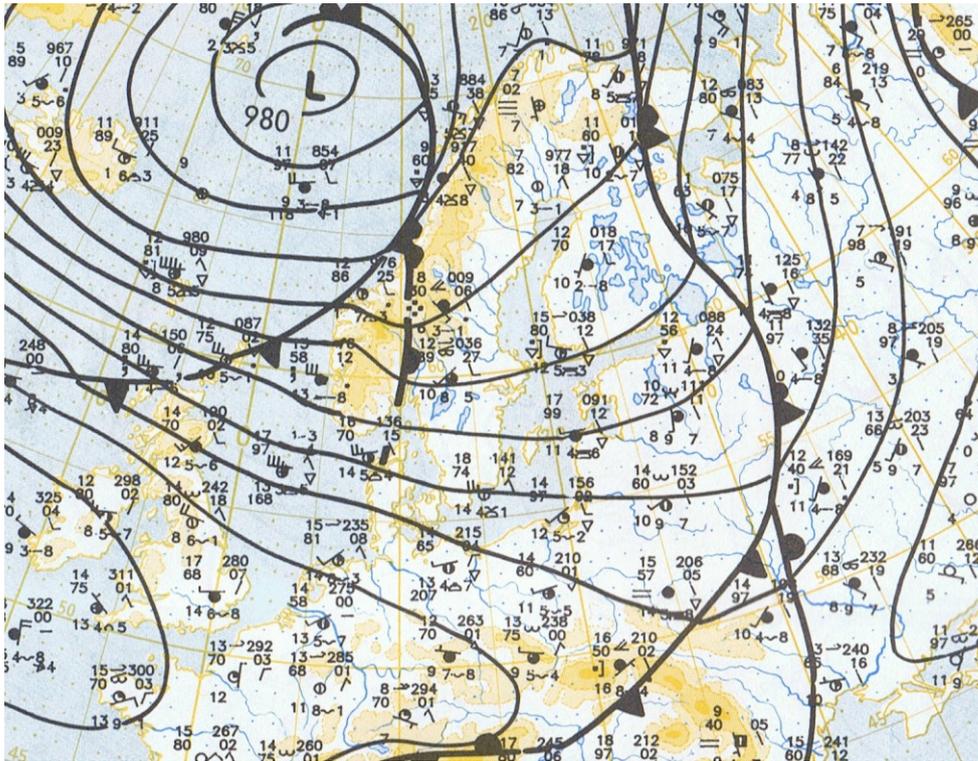
III.2: Bodendruckkarte für den 06.09.1997 12:00, mit eingezeichneten Fronten (DWD, 1997); Niederschlagsort HOAPS/Schiff(rot)



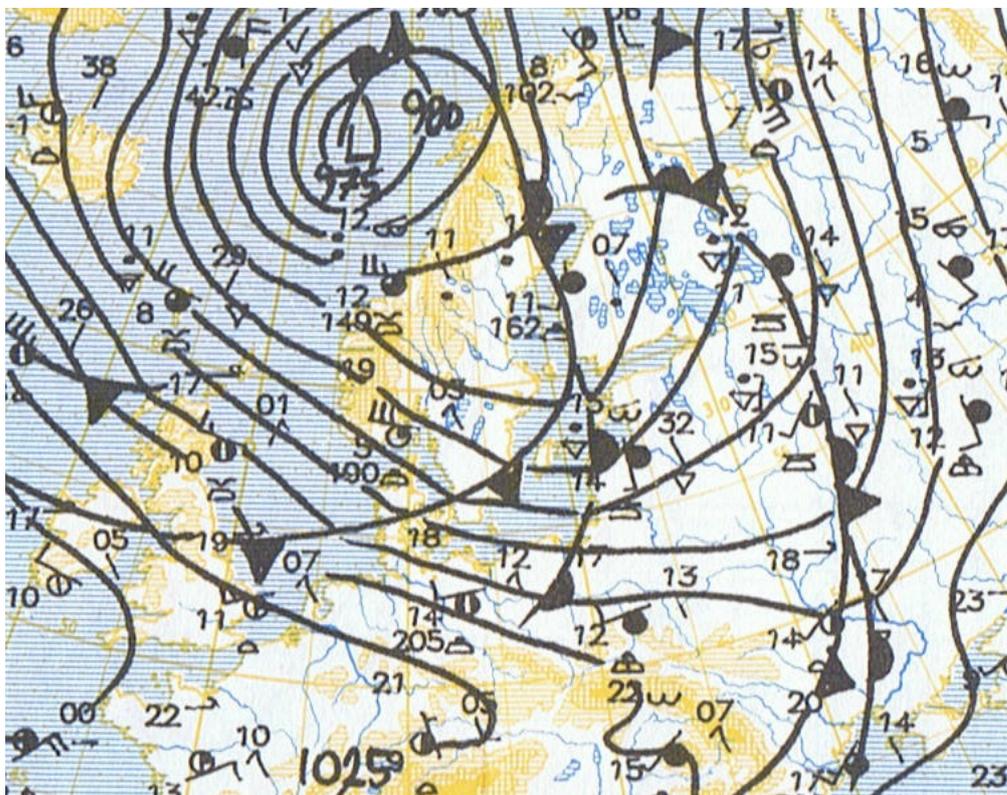
III.3: Bodendruckkarte für den 07.09.1997 00:00, mit eingezeichneten Fronten (DWD, 1997); kein Niederschlag



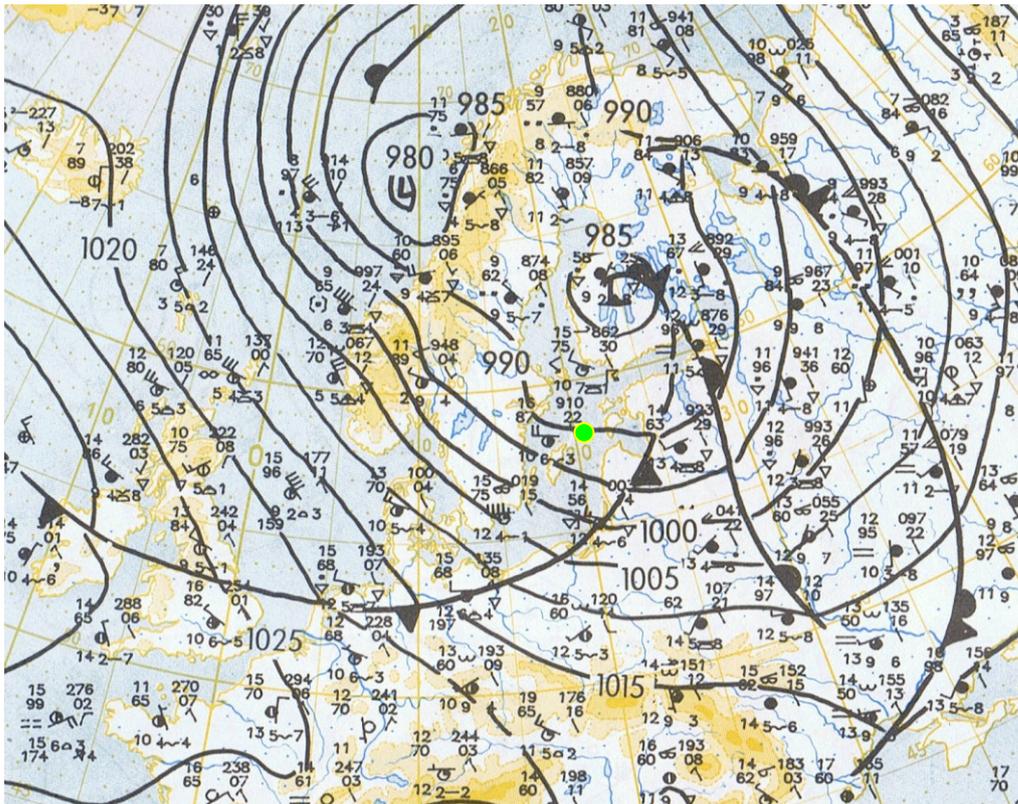
III.4: Bodendruckkarte für den 07.09.1997 12:00, mit eingezeichneten Fronten (DWD, 1997); kein Niederschlag



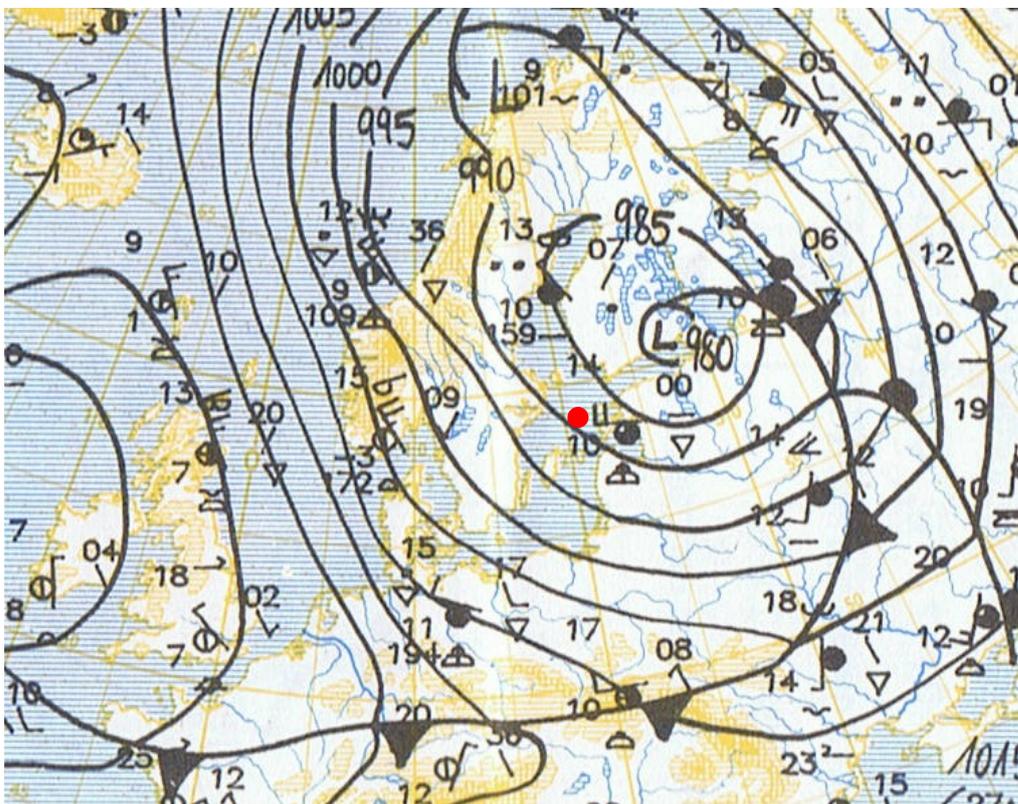
III.5: Bodendruckkarte für den 08.09.1997 00:00, mit eingezeichneten Fronten (DWD, 1997); kein Niederschlag



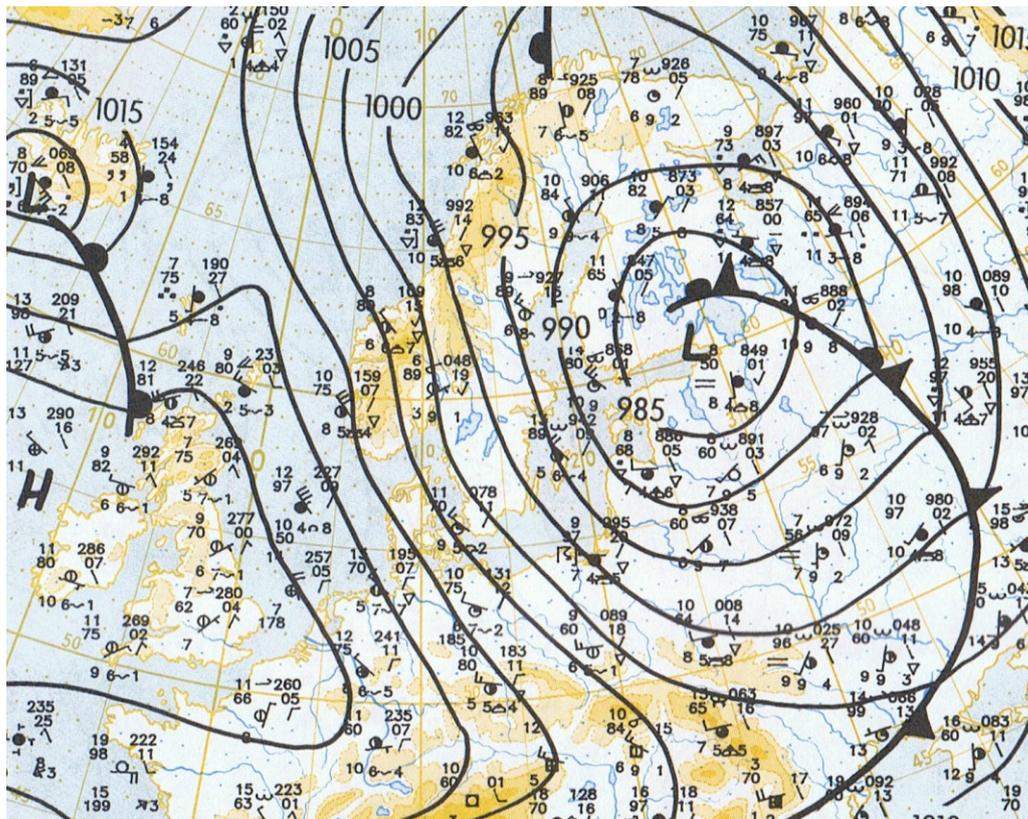
III.6: Bodendruckkarte für den 08.09.1997 00:00, mit eingezeichneten Fronten (DWD, 1997); kein Niederschlag



III.7: Bodendruckkarte für den 09.09.1997 00:00, mit eingezeichneten Fronten (DWD, 1997); Niederschlagsort Schiff(**grün**), kein HOAPS-Niederschlagsereignis



III.8: Bodendruckkarte für den 09.09.1997 12:00, mit eingezeichneten Fronten (DWD, 1997); Niederschlagsort HOAPS/Schiff(**rot**)



III.9: Bodendruckkarte für den 10.09.1997 00:00, mit eingezeichneten Fronten (DWD, 1997); kein Niederschlag

IV. Abkürzungen

AVHRR	Advanced Very High Resolution Radiometer
Ac	Altostratus
As	Altostratus
Cb	Cumulonimbus
Cs	Cirrostratus
Cu	Cumulus
DMSP	Defense Meteorological Satellite Program
HOAPS	Hamburg Ocean Atmosphere Parameters and fluxes from Satellite Data
LWC	Liquid Water Content
Ns	Nimbostratus
SSM/I	Special Sensor Microwave/Imager
St	Stratus

V. Abbildungsverzeichnis

<i>Abb. 1: Schiffsregenschmesser (Großklaus, 1996)</i>	9
<i>Abb. 2: Geltungsbereich des Europamodells (Doms, 1996)</i>	12
<i>Abb. 3: Interpolierter Jahresniederschlag von HOAPS berechnet und von den Schiffsregenschmessern gemessen (Abb. von Bumke, 2011)</i>	15
<i>Abb. 4: Bedeckungsgrad über der Ostsee für den 26.05.1995 und den 17.07.1995</i>	19
<i>Abb. 5: Bedeckungsgrad für alle Ereignisse gegen die Ereigniszahl aufgetragen</i>	21
<i>Abb. 6: Spezifische Feuchte für alle Ereignisse gegen die Ereigniszahl aufgetragen</i>	24
<i>Abb. 7: Satellitenbilder für den 26.05.1995 und den 17.07.1995 (Dundee Sattelite Receiving Station, 1995)</i>	26
<i>Abb. 8: Bodendruckkarte für den 26.05.1995 12:00 sowie den 17.07.1995 12:00 mit eingezeichneten Frontverläufen (DWD, 1995)</i>	29
<i>Abb. 9: Niederschlag über der Ostsee am 06.09.1997 16:18 gemessen von HOAPS</i>	34
<i>Abb. 10: Satellitenbilder vom 05. bis 10.09.1997(Dundee Sattelite Receiving Station, 1997)</i> 36	
<i>Abb. 11: Bodendruckkarte für den 05.09.1997 00:00 und 12:00 , mit eingezeichneten Fronten (DWD, 1997)</i>	37

VI. Tabellenverzeichnis

<i>Tab. 1: Durchschnittsniederschlag für vorwiegend stratiforme und konvektive Bewölkung im Bereich der Niederschlagsmessung</i>	<i>14</i>
<i>Tab. 2: Klasseneinteilung zu Abb.6.....</i>	<i>17</i>
<i>Tab. 3: Fallunterscheidung im Bewölkungsgrad für die 83 Ereignisse, in denen der Schiffsregenschirm Niederschlag gemessen hat</i>	<i>20</i>
<i>Tab. 4: Durchschnittliche Niederschlagsprognose des EM für die Fälle, dass HOAPS Niederschlag erkennt bzw. nicht erkennt</i>	<i>22</i>
<i>Tab. 5: Saisonale Verteilung der Niederschlagsereignisse für die Fälle, dass HOAPS Niederschlag erkennt bzw. nicht erkennt</i>	<i>23</i>
<i>Tab. 6: Durchschnittstemperaturen für Luft und Boden, prognostiziert vom EM, für die Fälle, dass HOAPS Niederschlag erkennt bzw. nicht erkennt.....</i>	<i>23</i>
<i>Tab. 7: Saisonale Durchschnittstemperaturen für Luft und Boden, prognostiziert vom EM, für die Fälle, dass HOAPS Niederschlag erkennt bzw. nicht erkennt</i>	<i>24</i>
<i>Tab. 8: Saisonale, durchschnittliche spezifische Feuchte, prognostiziert vom EM, für die Fälle, dass HOAPS Niederschlag erkennt bzw. nicht erkennt</i>	<i>25</i>
<i>Tab. 9: Einteilung der Ereignisse nach Art der Bedeckung für die Fälle, dass HOAPS Niederschlag erkennt bzw. nicht erkennt</i>	<i>27</i>
<i>Tab. 10: Saisonale Einteilung der Ereignisse nach Art der Bedeckung für die Fälle, dass HOAPS Niederschlag erkennt bzw. nicht erkennt.....</i>	<i>27</i>
<i>Tab. 11: Einteilung der Ereignisse in Fälle, in denen HOAPS Niederschlag erkennt bzw. nicht erkennt, nach Art des Frontendurchlaufs im Niederschlagsgebiet</i>	<i>30</i>
<i>Tab. 12: Saisonale Einteilung der Ereignisse für die Fälle, dass HOAPS Niederschlag erkennt bzw. nicht erkennt, nach Art des Frontendurchlaufs im Niederschlagsgebiet.....</i>	<i>31</i>
<i>Tab. 13: Einteilung der Ereignisse in Sommer, Winter und ganzjährig für die Fälle, dass HOAPS Niederschlag erkennt bzw. nicht erkennt, nach beeinflussenden Druckgebieten.....</i>	<i>31</i>
<i>Tab. 14: Auswertung der Satellitenbilder, Einteilung in konvektive, stratiforme und nicht eindeutige Bedeckung für die 23 Ereignisse, in denen HOAPS nach Erhöhung der zeitlichen und räumlichen Abstände Niederschlag erkannt hat</i>	<i>32</i>
<i>Tab. 15: Niederschlagsereignisse zwischen dem 05. 09.09.1997</i>	<i>33</i>

VII. Quellenverzeichnis

Andersson, A., 2009: The HOAPS Climatology - Evaluation and Applications, Hamburg University, 20146 Hamburg, 172p.

Bauer, P. und P. Schlüssel, 1993: Rainfall, total water, ice water, and water-vapor over sea from polarized microwave simulations and special sensor microwave imager data, Journal of Geophysical Research, vol. 98, no. D11, p. 20, 737-20, 759

Bidwell et al., 2003: 2003 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, IGARSS '03. Proceedings, vol. 5, p. 3136-3138

Clemens, M., 2003: Machbarkeitsstudie zur räumlichen Niederschlagsanalyse aus Schiffsmessungen über der Ostsee, Berichte aus dem Institut für Meereskunde an der Christian-Albrechts-Universität Kiel, no. 327, 176p.

Deutscher Wetterdienst, 1995: Europäischer Wetterbericht, vol. 20, no. 1-365

Deutscher Wetterdienst, 1996: Europäischer Wetterbericht, vol. 21, no. 1-366

Deutscher Wetterdienst, 1997: Europäischer Wetterbericht, vol. 22, no. 1-365

Dundee Satellite Receiving Station, 1995-1997: Satellitenbilder (thermal infra-red, 10.3-11.3 μ m), <http://www.sat.dundee.ac.uk>

Doms, G., 1996: Europa-Modell (EM) and Deutschland-Modell (DM), Quarterly Report of the Operational NWP-Models of the Deutscher Wetterdienst, no. 6, <http://www.pa.op.dlr.de/cleocd/dwdmod/s.htm>

Großklaus, M., 1996: Niederschlagsmessung auf dem Ozean von fahrenden Schiffen, Berichte aus dem Institut für Meereskunde an der Christian-Albrechts-Universität Kiel, no. 278, 97p.

Hollinger, J., J. L. Peirce, G. A. Poe, 1990: SSM/I Instrument Evaluation, IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, vol. 8, issue 5, p. 781-790

Lee, D. T. und B. J. Schachter, 1980: Two algorithms for constructing a Delaunay triangulation, International Journal of Parallel Programming, vol. 9, no. 3, p. 219-242

Majewski, D., 1991: The Europa-Modell of the Deutscher Wetterdienst. Seminar proceedings ECMWF, vol. 2, p. 147-191

Strehz, A. und K. Bumke, 2010: Development and application of collocation software for buoy, ship and satellite measurements (KollSat), Final Report, p. 34-37

Sevruk, B. und L. Zahlavova, 1994: Classification system of precipitation gauge site exposure: Evaluation and application, International Journal of Climatology, vol. 14, issue 6, p. 681-689

Erklärung

Hiermit erkläre ich, dass ich die vorliegende Arbeit selbständig und ohne fremde Hilfe angefertigt und keine anderen als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel verwendet habe. Die eingereichte schriftliche Fassung der Arbeit entspricht der auf dem elektronischen Speichermedium. (Name der Datei: *Bachelor-Arbeit-Rebekka-Mecking-29062011.pdf*)

Weiterhin versichere ich, dass diese Arbeit noch nicht als Abschlussarbeit an anderer Stelle vorgelegen hat.

Ort, Datum

Unterschrift