

Abschlussbericht

Untersuchungen zum Energiezyklus im BALTEX-Gebiet

Förderkennzeichen: 01 LA 9834/0

Ausführende Stelle: Forschungsbereich 1: Ozeanzirkulation und Klima
Maritime Meteorologie
Institut für Meereskunde
Düsternbrooker Weg 20
24105 Kiel

Projektleiter: Prof. Dr. Eberhard Ruprecht

Bearbeiter: Dipl.-Met. Werner Frerichs

INHALTSVERZEICHNIS

	Seite
1. Aufgabenstellung	3
2. Voraussetzungen	3
3. Planung und Ablauf des Vorhabens	3
4. Ergebnisse	4
4.1 Strahlungshaushalt	4
4.2 Wasserkreislauf	8
4.3 Energieumsatz	11
5. Literaturverzeichnis	12

Einleitung

1. Aufgabenstellung

Ziel des Vorhabens war es, den Energiehaushalt der Atmosphäre über dem BALTEX-Gebiet besser zu verstehen. Vor allem der Einfluß der Ostsee auf den Energieumsatz des gesamten Gebietes sollte herausgearbeitet werden. Die Hauptenergiequellen und -senken lassen sich aus der Strahlungsbilanz am Oberrand der Atmosphäre ermitteln. Die Arbeiten haben sich daher im wesentlichen auf diesen Teil konzentriert. Damit sollte der regionale Einfluß auf den Energiehaushalt des BALTEX-Gebietes dargestellt werden. Die Basisdaten für diese Arbeiten waren Satellitenbeobachtungen, die in der räumlichen Auflösung von $1^\circ \times 1^\circ$ für alle 3 Stunden vorliegen (ISCCP-Datensatz, International Satellite Cloud Climatology Project) (Schiffer und Rossow, 1983).

In dem zweiten Teil sollte untersucht werden, wie die Energie des Strahlungsangebots in der Atmosphäre genutzt wird. Dazu ist als Hauptumsatz der Wasserkreislauf ausgewertet worden. Als Basisdaten wurden dabei die NCEP/NCAR-Reanalysen verwendet. Damit können sowohl Niederschlag und Verdunstung über dem BALTEX-Gebiet analysiert und der Transport von Wasserdampf (latenter Wärme) in das Gebiet hinein berechnet werden. Die Reanalysedaten liegen vor in einem $2.5^\circ \times 2.5^\circ$ – Gitter alle 6 Stunden (Kalnay et al., 1996).

2. Voraussetzungen

Das Projekt war als eine wissenschaftliche Untersuchung im Rahmen von BALTEX geplant. Während der Förderperiode sind daher vielfältige Diskussionen mit nationalen und internationalen Gruppen mit dem Ziel durchgeführt worden, wie die Ergebnisse zu dem allgemeinen Ziel von BALTEX beitragen können.

Neben dieser wissenschaftlichen gab es technische Voraussetzungen zu erfüllen, das war vor allem die Verfügbarkeit der Satellitendaten (ISCCP, SCARAB) und der Modellergebnisse von REMO.

Die höher aufgelösten ($1^\circ \times 1^\circ$) ISCCP-Daten konnten für die Jahre 1986-1993 beschafft und bearbeitet werden. SCARAB-Daten standen leider nur für einen Monat, März 1994, zur Verfügung und zudem nur in den Morgenstunden, in denen die ISCCP-Daten unvollständig sind, so dass ein Vergleich nicht möglich war. Wegen technischer Probleme am Satelliten sind weitere Daten nicht lieferbar.

Da der Zeitraum 1986-1993 nur geringe Priorität für die Modellläufe mit REMO hatte, konnten die Modellergebnisse nicht rechtzeitig geliefert werden, um sie mit den Satellitenergebnissen zu vergleichen. Daher werden die Reanalysedaten genutzt, um den Wasserkreislauf und seinen Energieumsatz zu bestimmen.

3. Planung und Ablauf des Vorhabens

Um die Strahlungsflüsse am Oberrand der Atmosphäre und am Erdboden zu bestimmen, sollten die Satellitenbeobachtungen mit einem Strahlungstransportmodell bearbeitet werden. Die Satellitendaten, globaler Datensatz vom ISCCP, wurden beschafft und für unsere Zwecke

aufbereitet (insgesamt 279 Datenbänder für den Zeitraum 1986-1993). Die Berechnung der Strahlungsflüsse wurde mit dem Strahlungstransportmodell Streamer (Key, 1996) durchgeführt. Da mit der ursprünglichen Version Probleme bei der Festsetzung der Bodenalbeden auftraten, wurde eine neuere Version (2.6.1p) beschafft und für unsere Rechnungen angepaßt. Die Berechnung der Strahlungsflüsse über dem BALTEX-Gebiet für die acht Jahre nahm auf der zur Verfügung stehenden Workstation 250 Tage CPU-Zeit in Anspruch.

Die Ergebnisse wurden anschließend einer detaillierten Analyse unterzogen.

Die Daten der NCEP/NCAR-Reanalyse lagen uns für die Jahre 1948-1999 vor, wobei die Windfelder aus der direkten Analyse der Beobachtungen entstanden sind, die Feuchte und vor allem der Niederschlag und die Flüsse an der unteren Grenzfläche der Atmosphäre mit dem Vorhersagemodell berechnet worden sind (Kalney et al., 1996).

4. Ergebnisse

4.1 Strahlungshaushalt

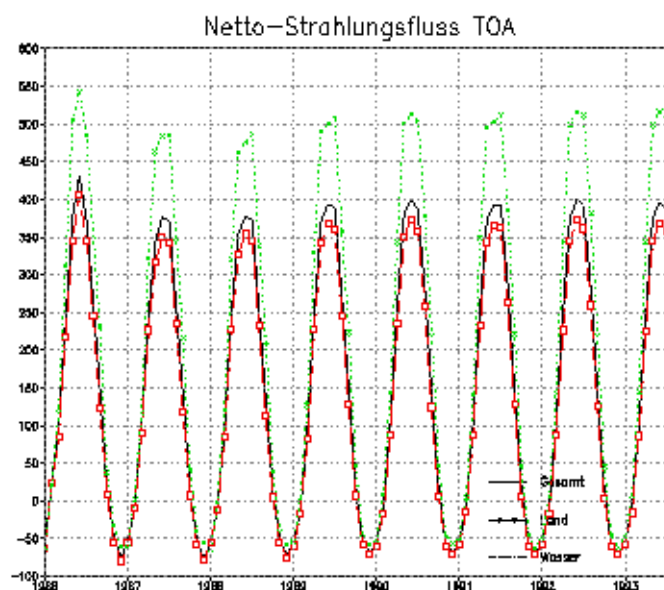


Abbildung 1: Strahlungsbilanz (W/m^2) am Oberrand der Atmosphäre: Monatsmittelwerte von Januar 1986 bis August 1993, für das gesamte BALTEX-Gebiet (schwarz), die Ostsee (grün), die Landgebiete (rot).

Ziel des Vorhabens war es, den Unterschied zwischen Ostsee und den Landregionen im Strahlungs- und Energiehaushalt herauszuarbeiten. An Hand der Monatsmittelwerte der Strahlungsbilanz am Oberrand der Atmosphäre werden diese Unterschiede deutlich (Abb. 1); im Sommerhalbjahr ist die Bilanz über der Ostsee um 100 - 150 W/m^2 höher als über den Landflächen. Auch bei der räumlichen Verteilung der Bilanz hebt sich die Ostsee deutlich von der Umgebung ab, das gilt sowohl für das langzeitliche (1986-1993) Jahresmittel (Abb. 2 links) als auch für das Junimittel über den gleichen Zeitraum (Abb. 2 rechts).

Im Winter, wo die kurzwellige Strahlung kaum eine Rolle spielt, sind die Unterschiede nicht signifikant, und die Bilanz ist im Gesamtgebiet negativ.

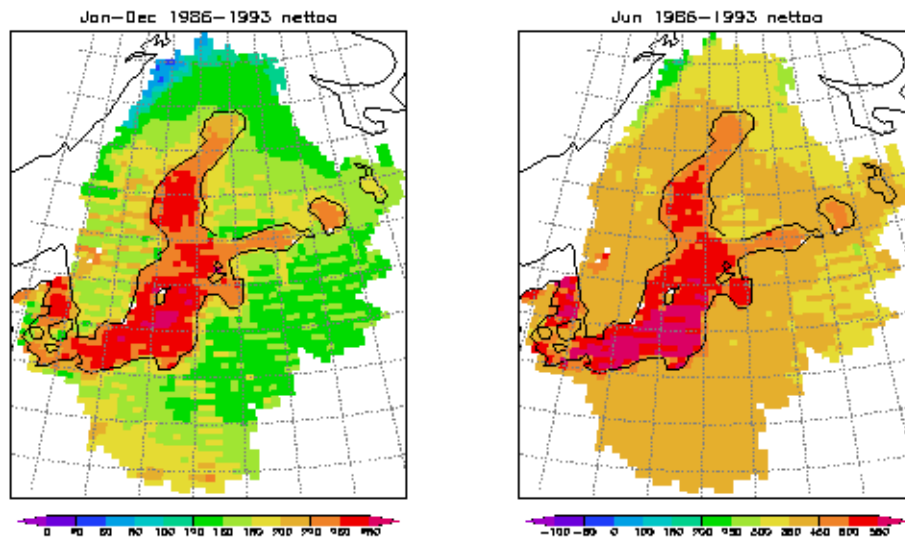


Abbildung 2: Räumliche Verteilung der Strahlungsbilanz (W/m^2) am Oberrand der Atmosphäre, Jahresmittel (links) und Junimittel (rechts) für den Zeitraum Januar 1986 bis August 1993

Einen Grund für die sommerlichen Unterschiede erkennt man schon in der Betrachtung der einzelnen Komponenten: kaum Unterschiede gibt es bei der langwelligen Ausstrahlung (Abb. 3), aber deutlich sichtbare im kurzwelligen Anteil (Abb. 4); im Sommer ist die planetare Albedo wesentlich geringer über der Ostsee als in der Umgebung. Dies Ergebnis bestätigt unsere früheren Berechnungen für die globalen Verhältnisse (Poetzsch-Heffter et al., 1995) und weitere Resultate mit den ISCCP-Daten (z.B. Rossow und Zhang, 1995).

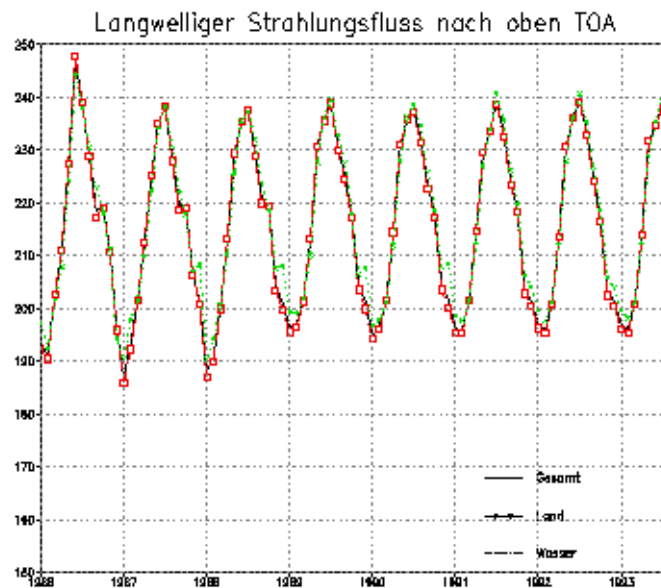


Abbildung 3: Langwellige Ausstrahlung (W/m^2) am Oberrand der Atmosphäre: Monatsmittelwerte von Januar 1986 bis August 1993 für das gesamte BALTEX-Gebiet (schwarz), die Ostsee (grün), die Landgebiete (rot).

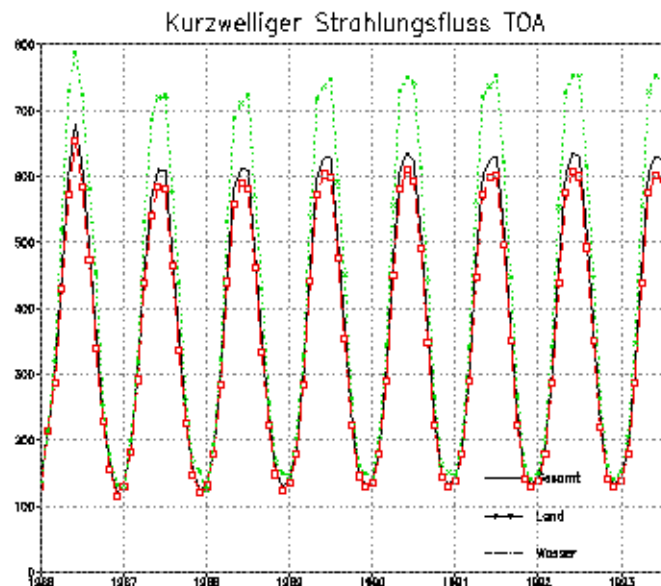


Abbildung 4: Kurzweilige Strahlungsbilanz (W/m^2) am Oberrand der Atmosphäre: Monatsmittelwerte von Januar 1986 bis August 1993 für das gesamte BALTEX-Gebiet (schwarz), die Ostsee (grün), die Landgebiete (rot)

Da Albedounterschiede hauptsächlich von der Wolkenvariabilität herrühren, wurden diese untersucht und konnten als Ursache festgemacht werden. Die Bewölkung ist sowohl im Jahres- wie im Juni-Mittel über der Ostsee geringer als über Land (Abb. 5).

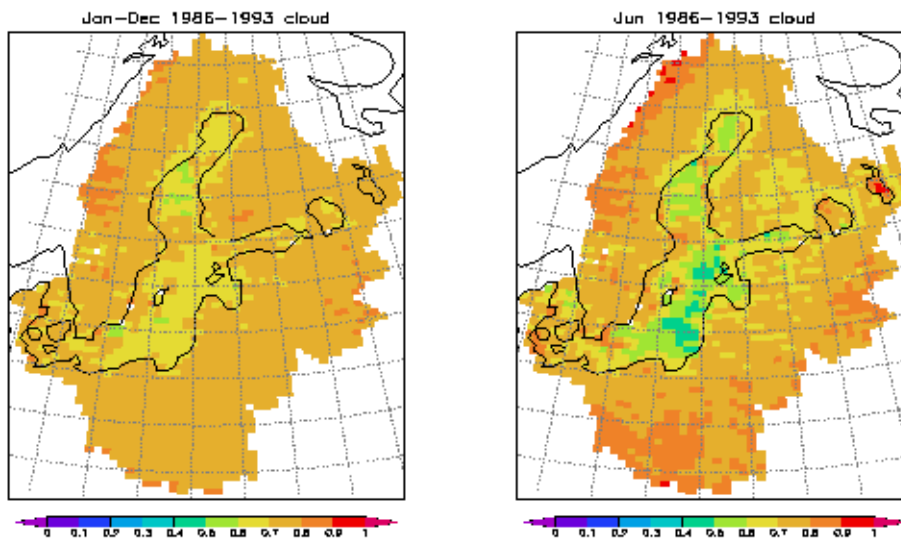


Abbildung 5: Mittlere Wolkenbedeckung (Zehntel), Jahresmittel (links), Junimittel (rechts) für den Zeitraum Januar 1986 bis August 1993

Dieser sich überraschend deutlich abhebende Unterschied zwischen Ostsee und Land in der Strahlungsbilanz an der Atmosphären-Obergrenze zeigt sich, sogar noch etwas verstärkt, in der Bilanz am Boden (Abb. 6). Drei Prozesse tragen zu der Verstärkung über der Ostsee bei: größere solare Einstrahlung am Boden, niedrigere Bodenbedo und auf Grund geringerer Wassertemperatur weniger Verlust durch langwellige Ausstrahlung. Wie die Strahlungsenergie im System umgesetzt wird, wird im folgenden Abschnitt anhand des Wasserkreislaufs gezeigt.

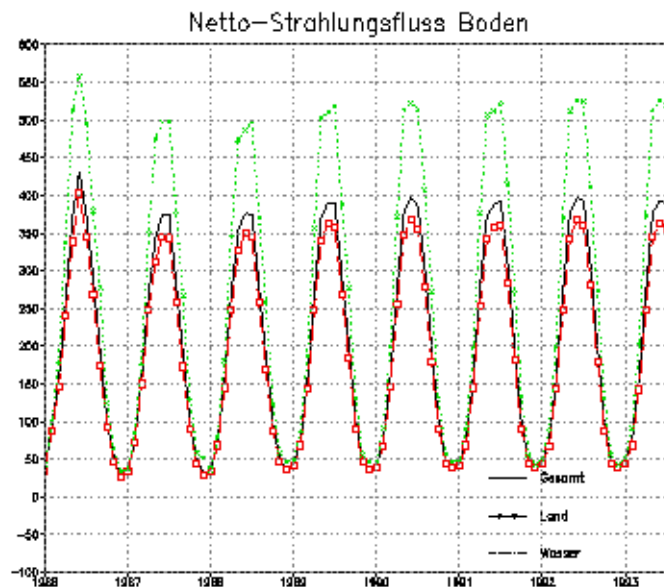


Abbildung 6: Strahlungsbilanz (W/m^2) am Boden: Monatsmittelwerte von Januar 1986 bis August 1993 für das gesamte BALTEX-Gebiet (schwarz), die Ostsee (grün), die Landgebiete rot.

4. 2 Wasserkreislauf

Der Wasserkreislauf liefert einen Einblick in den Umsatz der angebotenen Strahlungsenergie. Für die Verdunstung wird ein erheblicher Energieanteil verbraucht, andererseits wird bei Kondensation mit Niederschlag viel Energie frei.

Die Bilanz des atmosphärischen Wasserkreislaufs setzt sich aus vier Termen zusammen:

$$\frac{\delta W}{t} + \nabla \cdot Q = E - P$$

Dabei sind W der Gesamtwasserdampfgehalt der atmosphärischen Säule vom Boden bis zur Atmosphärenobergrenze (hier mit 300hPa angenommen), Q der vertikal integrierte horizontale Wasserdampftransport, E die Verdunstung und P der Niederschlag. In Tab. 1 sind die Bilanzen über das gesamte BALTEX-Gebiet gemittelt für die einzelnen Jahreszeiten aufgeführt. Im Jahresmittel überwiegt der Niederschlag; etwa 90% werden in dem Gebiet selbst verdunstet, der Rest über die seitlichen Grenzen hineintransportiert.

Der Wasserdampftransport senkrecht zu den Grenzen des BALTEX-Gebietes ist aus den Reanalysedaten berechnet worden; der langjährige Mittelwert ist in Abb. 7 dargestellt.

	P	E	E-P	%Q	dW/dt	B
DJF [mm/Monat]	41.6	20.5	-21.2	-25.2	-0.3	4.3
MAM [mm/Monat]	41.4	55.3	13.9	-6.5	2.9	17.5
JJA [mm/Monat]	88.5	86.9	-1.6	0.8	0.8	-3.2
SON [mm/Monat]	48.4	34.2	-14.2	-12.8	-3.4	2.0

Tab 1: Atmosphärische Wasserbilanz für das BALTEX-Gebiet (mm/Monat): Mittelwerte für die Jahreszeiten (P = Niederschlag, E = Verdunstung, %Q = Divergenz des vertikal-integrierten Wasserdampftransportes, W = vertikal integrierter Wasserdampfgehalt, B = Bilanz).

Die Abbildung zeigt deutlich, dass im Westen zwar eine große Menge Wasserdampf in das Gebiet hineintransportiert wird, aber gleichzeitig eine große Menge das Gebiet ostwärts verläßt. Die Konvergenz, $\nabla \cdot Q = -131.2$ mm/Jahr, weist auf den Überschuß im Import durch den westlichen Rand hin. Im Laufe des Jahres können sich die Verhältnisse erheblich ändern. Im Frühjahr überwiegt die Verdunstung den Niederschlag und im Sommer sind beide etwa gleich groß. Der Netto-Transport in das Gebiet hinein ist in den beiden Jahreszeiten vernachlässigbar klein (innerhalb der Fehlergrenzen), im Winter wird aber mehr Wasserdampf über die seitlichen Ränder als von unten durch Verdunstung in das Gebiet befördert.

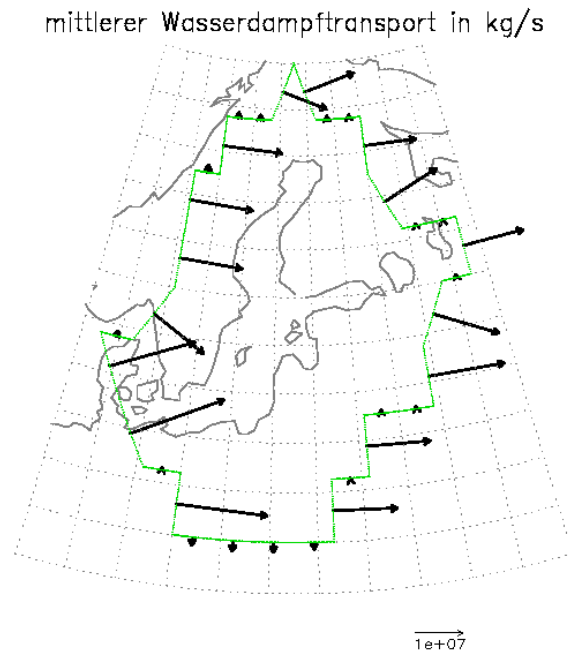


Abbildung 7: Mittlerer vertikal-integrierter Wasserdampffluß (kg/ms) über die seitlichen Ränder in das BALTEX-Gebiet

Aus der Bilanz des Wasserkreislaufs, die in der letzten Spalte in Tab. 1 gegeben ist, läßt sich der mittlere Fehler der Terme abschätzen. Die Transporte Q selbst sind zwar mit höherer Genauigkeit anzusetzen als Niederschlag P und Verdunstung E , aber der Fehler der Divergenz, im allgemeinen eine Differenz zweier großer Zahlen, ist von gleicher Größenordnung wie der von P und E . Die Monatsmittelwerte der Wasserdampfbilanz der Jahre 1986 - 1993 schwanken etwa zwischen ± 30 mm/Monat. Nimmt man diese Werte als maximalen Fehler an und verteilt ihn gleichmäßig auf die drei Terme P , E und $\nabla \cdot Q$, der Fehler von W und der zeitlichen Änderung ist sicher deutlich kleiner, kommt man zu einer Ungenauigkeit der Gebietsmittel von ± 10 mm/Monat für jeden einzelnen Term.

Die Zeitreihen über die 8 Jahre (1986-93), für die auch Satellitendaten vorlagen, lassen die Jahrgänge als dominante Variationen auch für die 3 Größen, Niederschlag, Verdunstung und Divergenz des Wasserdampftransportes erkennen (Abb. 8-10). Die Schwankungen von Jahr zu Jahr sind jedoch deutlich größer als bei den Strahlungsgrößen, das gilt besonders für den Niederschlag. Ob die interannualen Niederschlagsvariabilitäten der NCEP/NCAR Reanalysen real sind oder auf Modellfehlern beruhen, muß noch geklärt werden. Realistische Niederschlagsfelder unter anderem für solche Vergleiche sind ja eines der wesentlichen Ziele von BALTEX.

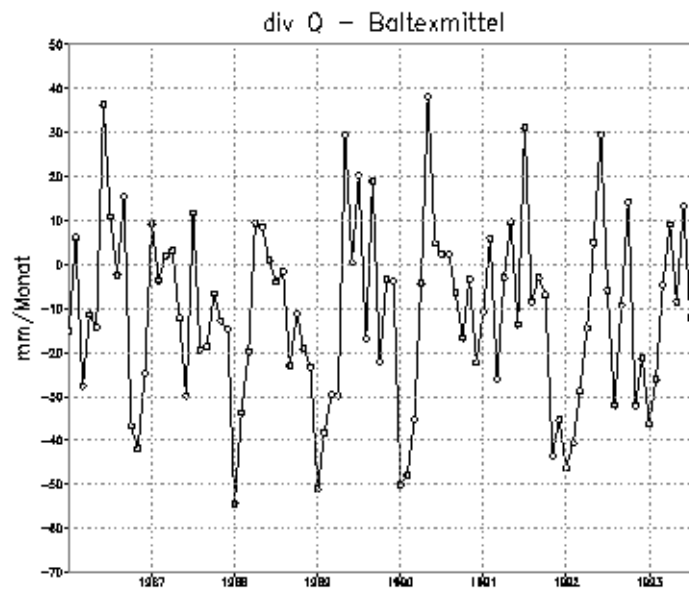


Abbildung 8: Divergenz der vertikal-integrierten Wasserdampf Flüsse (mm/Monat): Monatsmittel für den Zeitraum Januar 1986 bis August 1993

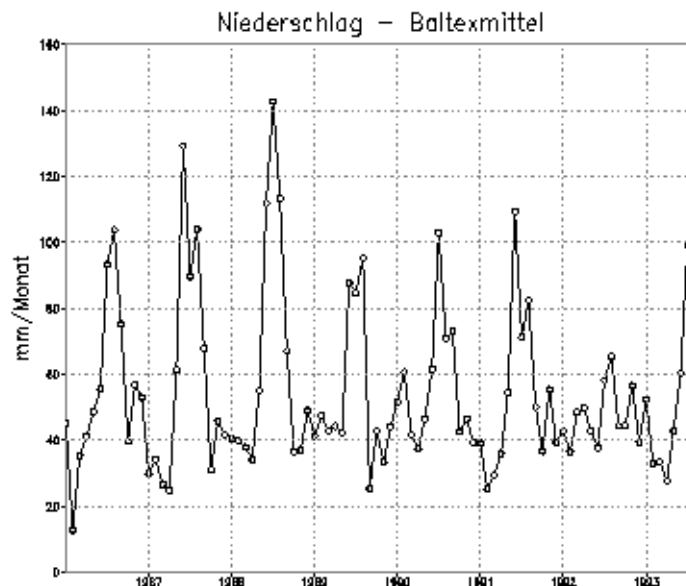


Abbildung 9: Niederschlag (mm/Monat) über dem BALTEX-Gebiet: Monatsmittelwerte für den Zeitraum Januar 1986 bis August 1993

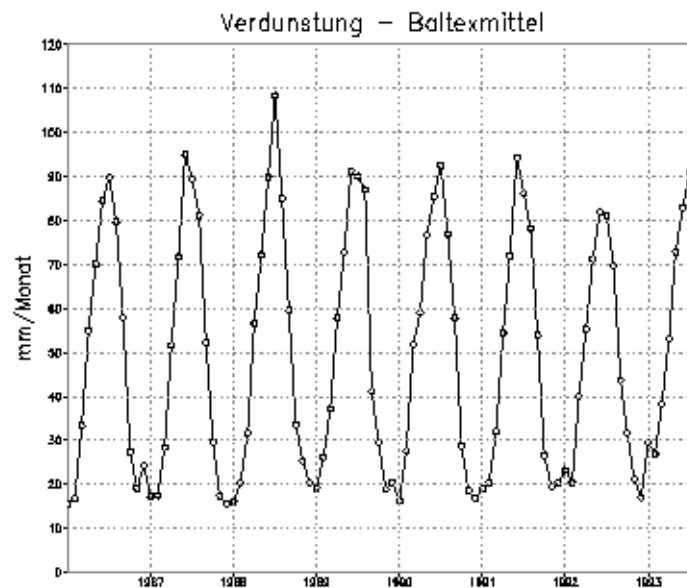


Abbildung 10: Verdunstung im BALTEX-Gebiet (mm/Monat): Monatsmittelwerte für den Zeitraum Januar 1986 bis August 1993

4.3 Energieumsatz

Um den Einfluß des Wasserkreislaufs auf den Energiehaushalt zu untersuchen, muß man den Fluss latenter Wärme im Zusammenhang mit dem Wasserdampftransport und die Energieumsetzungen bei der Phasenumwandlung (Verdunstung, Kondensation) bestimmen. In Tab. 2 sind die Energien für die drei Teilbereiche Obergrenze der Atmosphäre, Untergrenze (Boden, Wasser) und Atmosphäre für Sommer und Winter wiedergegeben. Im Winter ist die Energiebilanz durch Strahlung und Wasserkreislauf ausgeglichen, Energiequelle ist die freiwerdende latente Wärme mit 45 W/m^2 . Der bei dem Niederschlagsprozeß kondensierende Wasserdampf wird annähernd zu gleichen Teilen aus dem Transport über die seitlichen Ränder und aus der Verdunstung geliefert. Die Energie aus dem Wasserkreislauf deckt das Defizit (-20 W/m^2) der Strahlungsbilanz an der Obergrenze und gibt den Rest zum Boden oder an die Ostsee ab (30 W/m^2), wobei davon $2/3$ zur Verdunstung verwendet werden. Im Sommer gleichen sich die Energieumsetzungen im Wasserkreislauf gerade aus. Der große Überschuß der Strahlung am Oberrand erreicht die Untergrenze. Von diesem Anteil wird ein Viertel für die Verdunstung verbraucht, der Rest muß als Wärmestrom in den Boden bzw. das Wasser gehen und über die seitlichen Ränder exportiert werden, d.h. nicht nur der Wasserdampf, auch die sensible Wärme wird über die seitlichen Ränder aus dem Gebiet hinaus transportiert.

	Sommer				Winter			
	B	P	E	DQ	B	P	E	DQ
Oberrand	375				- 20			
Atmosphäre		90		- 5		45		25
Boden	375		- 90		30		- 20	

Tab. 2: Energiehaushalt des BALTEX-Gebietes für Sommer (links) und Winter (rechts); B Strahlungsbilanz, P frei-werdende latente Wärme beim Niederschlag, E Energieverbrauch für die Verdunstung, DQ Konvergenz des latenten Wärmestroms durch die seitlichen Ränder, alle Werte in W/m^2 .

Wenn man von diesen Ergebnissen ausgeht, stellen sich die energetischen Verhältnisse für das BALTEX-Gebiet wie folgt dar: Im Winter hängt das Gebiet ausschließlich von seiner Umgebung ab, die Energie, die im Innern verbraucht wird (Verdunstung, Erwärmung des Untergrundes) wird über die seitlichen Ränder herantransportiert; im Sommer liefert es wegen des großen Strahlungsüberschusses Energie an die Umgebung.

Diese Schlußfolgerung hat auch Auswirkung auf die Modellierung der Prozesse im BALTEX-Gebiet mit Regional-Modellen: Die Ergebnisse zeigen die Bedeutung der Verhältnisse an den Rändern, oben und seitlich; nur, wenn die Transporte in das Gebiet hinein bzw. hinaus richtig angegeben werden, können die energetischen Umsätze und damit alle anderen Prozesse realistisch simuliert werden.

5. Literatur

Kalnay, E. und Co-Autoren, 1996: The NCEP/NCAR 40-year Reanalysis Project. Bull. American Meteor. Soc., 77, 437-471.

Key, J., 1996: Streamer User's Guide. Technical Report 96-01. Depart. Geogr., Boston Univ., 85 S.

Poetzsch-Heffter, C., Q. Liu, E. Ruprecht und C. Simmer, 1995: Effect of Cloud Types on the Earth Radiation Budget Calculated with the ISCCP C1 Data Set: Methodology and Initial Results. J. Clim. 8, 829-843.

Rossow, W.B. und Y.-C. Zhang, 1995: Calculation of surface and top of the atmosphere radiative fluxes from physical quantities based on ISCCP data sets. 2. Validation and first results.

Schiffer, R.A. und W.B. Rossow, 1983: The International Satellite Cloud Climatology Project (ISCCP): The First Project of the World Climate Research Programme. Bull. American Meteor. Soc., 64, 779-784.