



Forschungszentrum Karlsruhe
in der Helmholtz-Gemeinschaft



Wissenschaftliche Berichte
FZKA 7042

Ergebnisbericht über Forschung und Entwicklung 2003

Institut für Meteorologie und Klimaforschung
Troposphärenforschung

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

Forschungszentrum Karlsruhe GmbH
Postfach 3640, 76021 Karlsruhe

ISSN 0948-4310
ISSN 0947-918X

Zur Parametrisierung des Alterungsvorgangs von Ruß in der verschmutzten kontinentalen Grenzschicht

Motivation

Rußpartikel sind ein wichtiger Bestandteil des atmosphärischen Aerosols. Neben ihren Auswirkungen auf die menschliche Gesundheit, spielen sie als Reaktionspartner für heterogene Reaktionen eine Rolle und absorbieren und streuen Licht. Der mittlere Durchmesser von Rußaerosolen liegt in dem so genannten Akkumulationsmode, infolgedessen sind die Depositionsgeschwindigkeiten klein, daher die Lebenszeiten in der Atmosphäre groß und somit ist ein Transport über weite Distanzen möglich. Die Hauptquelle für Rußpartikel ist die unvollständige Verbrennung von kohlenstoffhaltigem Material. Das bedeutet, dass außer der Biomassenverbrennung alle Quellen anthropogen sind. In den Ballungsgebieten auf der Nordhemisphäre ist die dominierende Quelle die Verbrennung fossiler Brennstoffe. Typische Konzentrationswerte von Ruß liegen im Bereich von wenigen Hundert Nanogramm pro m^3 in ländlichen Regionen bis zu einigen Mikrogramm pro m^3 in städtischen Gebieten.

Während frisch emittierte Rußpartikel hydrophob sind und in externer Mischung vorliegen, können durch Koagulation mit löslichen Aerosolen, Kondensation und photochemischen Prozessen ihre hygroskopischen Eigenschaften stark verändert werden. Diese bestimmen wiederum das Wachstum der Partikel, ihre optischen Eigenschaften und die Aktivierung als Kondensationskeime zur Wolkenbildung. Messungen haben gezeigt, dass der Ruß in der Atmosphäre sowohl in externer als auch in interner Mischung vorliegt, dass aber der hydrophobe Anteil signifikant mit zunehmender Quellentfernung abnimmt.

Bekannt ist, dass Rußpartikel sowohl zum direkten wie auch zum indirekten Klimaeffekt beitragen. Studien zu diesem Prozess werden häufig mit globalen Modellen durchgeführt. In diesen Modellen wird der Ruß zwar als eigene Komponente betrachtet, der Transfer von der externen Mischung in die interne Mischung wird jedoch in der Regel nicht explizit beschrieben. In einigen Modellen wird der Ruß direkt nach der Emission als hydrophil behandelt, in anderen wiederum während der gesamten Simulation als hydrophob. Häufig wird der Übergang von hydrophob zu hydrophil durch eine konstante Transferrate parametrisiert, für die man aber in der Literatur stark variierende Werte findet.

Mit dem Modellsystem KAMM/DRAIS, das zum einen die Grenzschichtprozesse detailliert beschreibt und zum anderen mittels des Aerosolmodells MADEsoot den Alterungsprozess von Ruß durch Koagulation und Kondensation explizit berechnet, wurden 3-dimensionale Simulationen für unterschiedliche synoptische Situationen durch-

geführt. Basierend auf den Ergebnissen dieser Simulationen wurden Transferraten bestimmt. Diese Transferraten können in einem globalen Modell, welches die Aerosolprozesse im Allgemeinen nur in stark vereinfachter Form beschreiben kann, zur Parametrisierung des Überganges von extern zu intern gemischtem Ruß verwendet werden.

Das verwendete Simulationsmodell

Das Aerosolmodell MADEsoot behandelt das physikalische und chemische Verhalten von sekundärem Aerosol, welches sich aus Sulfat, Ammonium, Nitrat, organischen Material und Wasser zusammensetzt. Daneben wird auch direkt emittierter Ruß betrachtet, der durch Koagulation mit anderen Partikeln und durch das Kondensieren von gasförmigen Spurenstoffen auf der Partikeloberfläche seine chemische Zusammensetzung ändern kann. Durch die Verwendung des modalen Ansatzes werden die Anzahldichte, die Oberflächendichte und die Massendichte größenabhängig bestimmt. Als Simulationsgebiet wurde Baden-Württemberg mit dem angrenzenden Elsass und den nördlichen Teilen der Schweiz gewählt. Die verwendeten horizontalen Maschenweiten betragen $4 \times 4 \text{ km}^2$. Die folgenden Ergebnisse für einen typischen Wintertag dokumentieren alle relevanten Prozesse und ihre Wirkungen.

Die Bestimmung der Transferrate

Die zeitliche Änderung der reinen Rußmasse \bar{m}_s wird in KAMM/DRAIS durch die numerische Approximation folgender Gleichung bestimmt:

$$\frac{\partial \bar{m}_s(\vec{x}, t)}{\partial t} = \bar{A}(\vec{x}, t) + \bar{S}(\vec{x}, t) + \bar{D}(\vec{x}, t) + \bar{E}(\vec{x}, t) - \bar{T}(\vec{x}, t).$$

\bar{A} steht für die Advektion, \bar{S} für die Sedimentation, \bar{D} für die turbulente Diffusion, \bar{E} für die Emission und \bar{T} für den Transfer des Rußes (Koagulation und Kondensation) von der externen Mischung in die interne Mischung. \bar{T} wird in KAMM/DRAIS an jedem Gitterpunkt explizit berechnet. Bei der Berechnung des Transfers durch Kondensation wird wie folgt vorgegangen. Zunächst kann Schwefelsäure, die durch die Oxidation von Schwefeldioxid unter Beteiligung des Hydroxyl Radikals in der Atmosphäre entsteht, auf den vorhandenen Rußpartikeln kondensieren. Wenn dies erfolgt ist, stellt sich instantan ein thermodynamisches Gleichgewicht zwischen Sulfat, Ammonium, Nitrat und Wasser im Aerosol und den Gasphasenkomponenten Salpetersäure und Ammoniak ein. Um zwischen extern und intern ge-

mischtem Ruß zu unterscheiden, wurde basierend auf Laborstudien ein Schwellenwert eingeführt. Für den Fall, dass die Trockenmasse des kondensierten Materials 5 % der Gesamtmasse überschreitet, wird das rußenthaltende Partikel dem intern gemischten Ruß zugeordnet.

Aus den so für jeden Gitterpunkt bestimmten Transferraten lassen sich durch horizontale Mittelung über das Simulationsgebiet somit die Ratenkonstanten bestimmen, die in einem größerskaligen Modell verwendet werden können, wenn man voraussetzt, dass sich der Transfer analog zu einer Reaktion erster Ordnung beschreiben lässt. Die Ratenkonstante \tilde{k} wird also nach folgender Gleichung bestimmt:

$$\tilde{k}(z, t) = \frac{\iint_A \bar{T}(x, y, z, t) dA'}{\iint_A \bar{m}_s(x, y, z, t) dA'}$$

Der Kehrwert dieser Größe ergibt dann die Lebensdauer τ des extern gemischten Rußes.

$$\tau(z, t) = \frac{1}{\tilde{k}(z, t)}$$

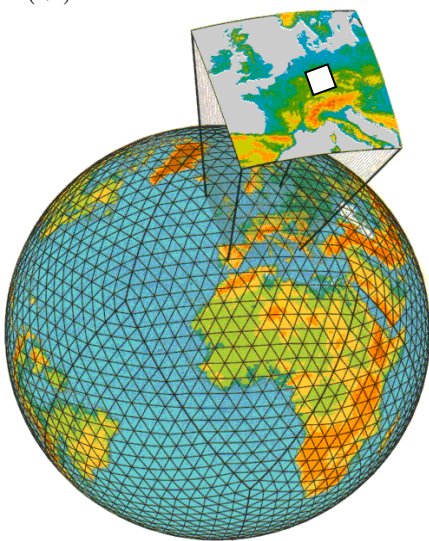


Abbildung 1: Nestung des LM-Gitters in das GME-Gitter (Quelle: Deutscher Wetterdienst). Das weiße Rechteck zeigt das Gebiet für das Rechnungen mit KAMM/DRAIS durchgeführt wurden.

Da KAMM/DRAIS in etwa die Maschenweite eines globalen Modells abdeckt (Abbildung 1) kann durch diese Vorgehensweise eine Parametrisierung für globale Modelle abgeleitet werden.

Simulationsergebnisse

Die Abbildung 2 zeigt die simulierte Horizontalverteilung des extern gemischten Rußes um 12 Uhr in 20 m über Grund für einen Wintertag. Es zeigt sich, dass zu diesem Zeitpunkt extern gemischter Ruß im Wesentlichen im Nahfeld der Quellgebiete vorliegt. Im Abstand von wenigen km

ist nahezu kein extern gemischter Ruß mehr anzutreffen.

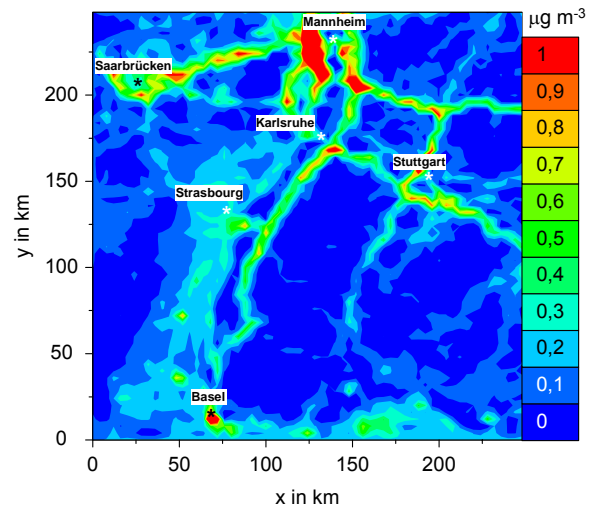


Abbildung 2: Simulierte Horizontalverteilung der Massendichte von extern gemischtem Ruß um 12 Uhr in 20 m über Grund.

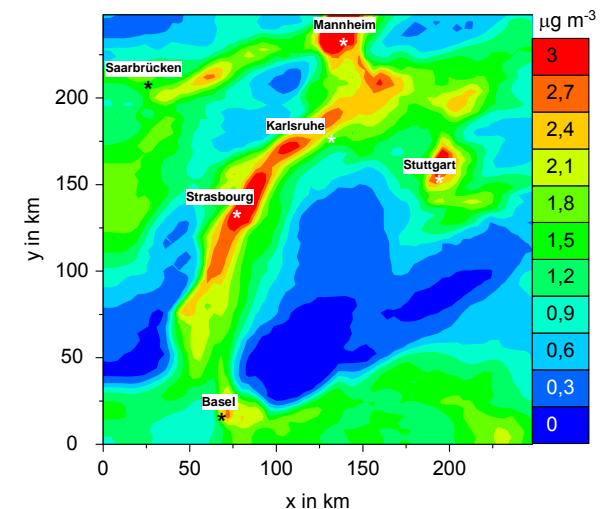


Abbildung 3: Simulierte Horizontalverteilung der Massendichte von intern gemischtem Ruß um 12 Uhr in 20 m über Grund.

Die Abbildung 3 zeigt zum gleichen Zeitpunkt und für die gleiche Höhe die Horizontalverteilung des intern gemischten Rußes. Ein Vergleich der beiden Abbildungen zeigt, dass um die Mittagstunden Ruß zum größten Teil in interner Mischung vorliegt. Insgesamt wurde gefunden, dass die Rußpartikel im Mittel etwa 8 Prozent der Gesamttrockenmasse des simulierten Aerosols ausmachen, etwa 1 Prozent der simulierten Trockenmasse besteht aus extern gemischtem Ruß.

Berechnete Transferraten

Mit der zuvor beschriebenen Vorgehensweise wurden nun Profile der Lebensdauern der reinen Rußpartikel bestimmt. Die Abbildung 4 zeigt die berechneten Vertikalprofile von τ zu verschied-

enen Zeitpunkten für den Wintertag. Um die Mittagszeit ergeben sich oberhalb von 200 m über Grund Lebensdauern kleiner als zwei Stunden. Auch unterhalb dieser Höhe liegen die Lebensdauern zwischen 2 und 10 Stunden. Lediglich in der Quellhöhe, die mit 20 m angenommen wurde und in der Rechenfläche darüber werden Lebensdauern um die 20 Stunden erreicht.

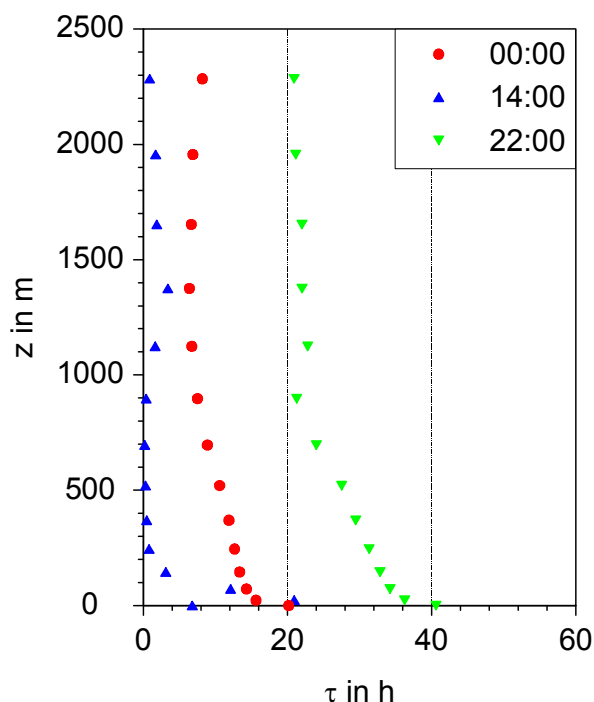


Abbildung 4: Simulierte Horizontalverteilung der Massendichte von intern gemischtem Ruß um 12 Uhr in 20 m über Grund.

Erheblich größer sind die Lebensdauern oberhalb von 200 m während der Nachtstunden. Hier liegen diese zwischen 10-15 Stunden um 00 Uhr des zweiten Simulationstages und um die 20-30 Stunden um 22 Uhr des gleichen Simulationstages.

Die Abbildung 5 zeigt Tagesgänge von τ für verschiedene Höhen über Grund. In allen Höhen zeigt sich ein ausgeprägter Tagesgang. Die größten Lebensdauern werden für die Nachtstunden berechnet. Wie bereits zuvor gesehen erreichen die Lebensdauern in Höhen von mehr als 200 m über Grund tagsüber nur Werte von wenigen Stunden. In Quellhöhe sinkt die Lebensdauer in den Vormittagstunden zwar auch auf kleine Werte, steigt dann aber in den Nachmittagstunden auf Werte von 20 und mehr Stunden an.

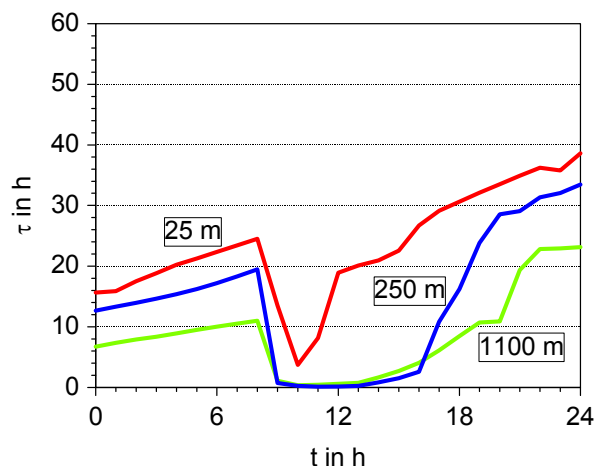


Abbildung 5: Simulierte Tagesgänge von τ in verschiedenen Höhen über Grund

Detaillierte auf den Simulationsergebnissen basierende Prozessstudien zeigen, dass die Alterung des extern gemischten Rußes im Laufe des Tages durch unterschiedliche Prozesse dominiert wird. Während der Nachtstunden kann auf Grund des Fehlens des Hydroxyl Radikals keine Schwefelsäure gebildet werden, die das Aufkondensieren von gasförmigen Verbindungen auf die in externer Mischung vorliegenden Partikel initiiert. Dadurch tritt dieser Vorgang gegenüber der Koagulation mit intern gemischten Partikeln zurück. Die Koagulation hängt unter anderem von den Anzahldichten der vorhandenen Stoßpartner ab. Es zeigt sich dass im Laufe der Simulationszeit die Anzahldichten der Partikel abnehmen. Dieser Anstieg ist für die Zunahme der Lebensdauer zwischen der Nacht des zweiten Simulationstages und der Nacht des dritten Simulationstages verantwortlich. Während der Tagstunden dominiert die Kondensation den Alterungsprozess. Durch den Anstieg des kondensierbaren Materials verringert sich die Lebensdauer des Rußes drastisch auf wenige Stunden. All dies zeigt, dass die bisher in globalen Modellen verwendete konstante Transferrate den Vorgang der Russalterung nicht richtig beschreibt. Basierend auf den hier gezeigten Ergebnissen wird zurzeit eine Parametrisierung für globale Simulationsmodelle erstellt.

[Ansprechpartner:](#)

Dr. Bernhard Vogel

Tel. 07247 824233

e-mail: bernhard.vogel@imk.fzk.de

Die Niederschlagsentwicklung in maritimen und kontinentalen konvektiven Mischwolken

Die Entwicklung von Niederschlag vollzieht sich über eine komplexe Kette von atmosphärischen Prozessen. Die naturgemäß wichtigsten Prozesse sind die, die zur Bildung und zum Wachstum von Wolkenpartikeln und schließlich von Niederschlagspartikeln führen. Infolge der Zufuhr oder des Entzugs von latenten Wärmen bei den Phasenumwandlungen des Wassers greifen wolkenmikrophysikalische Prozesse auch in die Thermo- und Hydrodynamik von Wolken ein, wodurch es zu Rückkopplungseffekten kommt: Latente Wärme, die durch Kondensation von Wolkentropfen in unteren und mittleren Schichten von Wolken freigesetzt wird, erhöht den Auftrieb und damit die Aufwindgeschwindigkeit. Infolgedessen wird mehr Wassermasse in größere Höhen transportiert, wo sich dann Eis bildet, das durch Deposition und Anfrieren von unterkühlten Tropfen wächst. Demzufolge wird wiederum Wärme zugeführt, was die Aufwindgeschwindigkeit weiter verstärkt. Andererseits sedimentieren große Niederschlagspartikel, meist eisförmige wie Graupel und Hagel, die dann in unteren Wolken schichten sublimieren, schmelzen und verdunsten, die Wolkenluft durch den Entzug latenter Wärme abkühlen und somit den Aufwind abschwächen.

Zur effektiven Simulation der wolkenmikrophysikalischen Prozesse ist es notwendig, einerseits die Tatsache zu berücksichtigen, dass die Wolken- und Niederschlagspartikel unterschiedlich groß sind (polydisperse Systeme) und entsprechend durch Größenverteilungen beschrieben werden müssen, und andererseits alle Prozesse, die die Bildung und das Wachstum aller Partikel ausmachen (Abb. 1), in handhabbarer Form zu formulieren. Insbesondere soll dabei auch der Erfahrung Rechnung getragen werden, dass kontinentale und maritime Wolken unterschiedliche Größenverteilungen haben und sich demzufolge unterschiedlich entwickeln: Maritime Wolken bestehen anfänglich aus wenigen, relativ großen Tröpfchen, kontinentale Wolken hingegen aus vielen, relativ kleinen Tröpfchen. Daher bilden sich in kontinentalen Wolken nur recht langsam größere Wolkentropfen, die dann durch Koagulation zu Regentropfen anwachsen, während in maritimen Wolken meist schon von Anfang an recht große Tropfen vorhanden sind, so dass das Wachstum von Regentropfen durch Koagulation unmittelbar einsetzt. Dieses unterschiedliche anfängliche Wachstumsverhalten hat einen massiven Einfluss auf die nachfolgend ablaufenden Eisphasenprozesse.

Am IMK ist ein Verfahren entwickelt worden, die in Abb. 1 verzeichneten Prozesse, an denen die Partikelarten Wolkentropfen, Regentropfen, Wolkeneis, Schnee und Graupel/Hagel beteiligt sind, in parametrisierter Form zu erfassen. Dabei handelt es sich um einen vollständigen Satz von prognos-

tischen Ratengleichungen für die Anzahl- und Massendichten der unterschiedlichen Partikelarten, d.h. für zwei Momente der Größenverteilungen (Zweimomenten-Verfahren). Damit wird vermieden, eine große Anzahl von Ratengleichungen, nämlich für jede Größe der unterschiedlichen Partikelarten, zu berechnen. Damit eignet sich das Zweimomenten-Verfahren auch für den Einsatz in operationellen Wettervorhersagmodellen.

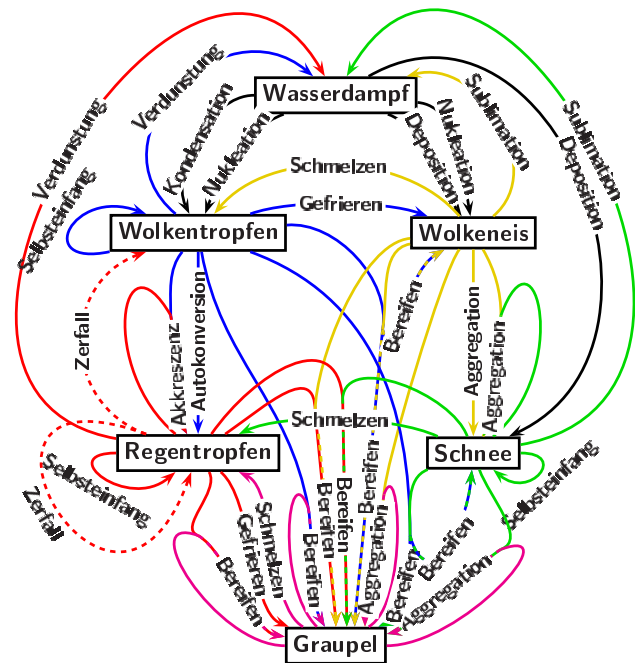


Abbildung 1: Schema wolken- und niederschlagsmikrophysikalischer Prozesse, die mit dem Zweimomenten-Verfahren erfasst werden

Durch die Kenntnis von zwei Momenten ist es andererseits möglich, Größenverteilungen zu konstruieren, deren Parameter sich durch die Momente ausdrücken lassen. Allerdings reichen speziell zur Beschreibung von Wolkentropfenverteilungen mittels z.B. einer Gammaverteilung zwei Parameter nicht aus. Der notwendige dritte Parameter ist durch eine sinnvolle Annahme vorzugeben. Zur Charakterisierung der Größenverteilungen der übrigen Partikelarten reichen zweiparametrische Verteilungen aus.

Die Freiheit der Wahl des dritten Parameters zur Beschreibung der Wolkentropfenverteilung ist somit ein entscheidender Vorteil des Zweimomenten-Verfahrens, weil damit die Kontinentalität von Wolken erfasst werden kann. Diese Eigenschaft ist in einer neuartigen Formulierung der Autokonversions- und Akkreszenzraten im Rahmen des Zweimomenten-Verfahrens berück-

sichtigt. Darüber hinaus ist der stoßinduzierte Zerfallsprozess, durch den die Zahl sehr großer Regentropfen zugunsten der Erzeugung einer größeren Zahl von kleineren Satellitentropfen abgebaut wird, neu gefasst worden.

Das Zweimomenten-Verfahren ist in das dreidimensionale atmosphärische Simulationsmodell KAMM2, das am Institut entwickelt wurde, und das zweidimensionale Wolkenmodell HUCM der Hebrew University of Jerusalem integriert worden. Letzteres arbeitet auch mit so genannter spektraler Mikrophysik, d.h. es wird eine große Zahl (i.d.R. mehr als 30) prognostischer Gleichungen für jede Größenverteilung gelöst. Dies ist nur mit einem erheblichen numerischen Aufwand möglich, so dass diese Methodik operationell nicht einsetzbar ist. Allerdings ist die spektrale Methode die detaillierteste, so dass ihre Ergebnisse als Maßstab für die Bewertung von (gröberen) Parametrisierungen, wie es das erwähnte Zweimomenten-Verfahren darstellt, dienen können.

Im Folgenden wird ein Vergleich zwischen Ergebnissen, die einerseits mit der spektralen Methode und andererseits mit dem Zweimomenten-Verfahren gewonnen wurden, präsentiert. Hierzu wurde das HUCM-Modell mit einer vertikalen Auflösung von 250 m und einer vertikalen Auflösung von 125 m bei einer maximalen Horizontalausdehnung von 128 km und einer maximalen Höhe von 15 km betrieben. Die meteorologischen Umgebungsbedingungen stammen von einem Radiosondenaufstieg, der von Bord des Forschungsschiffs QUADRA am Tag 261 des GATE Feld-experiments zur Mittagszeit in einem Seegebiet vor der westafrikanischen Küste durchgeführt wurde. Die Entwicklung des konvektiven Systems wurde im HUCM-Modell durch einen lokal begrenzten Temperaturüberschuss, der in einem gewissen Bereich der Meeresoberfläche vorgegeben wurde im HUCM-Modell durch einen lokal begrenzten Temperaturüberschuss, der in einem gewissen Bereich der Meeresoberfläche vorgegeben wurde und die anfängliche Auftriebsenergie

liefert, initiiert. Die eigentliche Konvektion entsteht dann durch die Transformation von potentieller Energie der instabilen Feuchtluft, der so genannten CAPE (convective available potential energy), in kinetische Energie.

Der GATE-Fall, der häufig untersucht wurde, ist charakteristisch für ein maritimes konvektives Wolkensystem. Es führte zu einem intensiven Niederschlagsereignis, für das das Vorhandensein einer sehr feuchten Grenzschicht und eines schwachen Westwinds Voraussetzung war. Für dieses tropische System ist zu erwarten, dass die Eisphase bei der Niederschlagsbildung nur eine untergeordnete Rolle spielt, so dass sich die Güte der Parametrisierung der Umwandlungsraten Autokonversion und Akkreszenz beurteilen lassen.

In Abb. 2 ist die Niederschlagsrate an der Meeresoberfläche in ihrer räumlichen Entwicklung über einen Simulationszeitraum von 3 Stunden dargestellt (Hovmöller-Diagramm). Die linke Abbildung zeigt Resultate, die unter Verwendung des Zweimomenten-Verfahrens erhalten wurden, die rechte Abbildung diejenigen bei Verwendung der spektralen Methode. In beiden Fällen entwickelt sich ein erstes starkes Niederschlagsereignis nach etwa 30 Minuten, wobei momentane Regenraten von bis zu 100 mm/h auftreten. Nach dem ersten Ereignis nimmt die Niederschlagsrate ab und das Niederschlagsfeld dehnt sich aus. Nach etwa 1,2 Stunden verstärkt sich der Niederschlag wieder, wobei sich ein sekundäres linienförmiges Niederschlagsfeld ausbildet: Eine so genannte Gewitterlinie (squall line) ist entstanden.

Gegen Ende der Simulationszeit zeigt sich eine mehr zellenförmige Struktur des Niederschlags. Beim Vergleich beider Abbildungen erkennt man deutlich, dass sich die Strukturen sehr ähneln und eine gute quantitative Übereinstimmung besteht.

Dieses Fallbeispiel ist eine überzeugende Demonstration für die Genauigkeit des Zweimomenten-Verfahrens, speziell der neuartigen Formulierung der Autokonversions- und Akkreszenzraten. Auch andere Modellrechnungen für zum Teil ex-

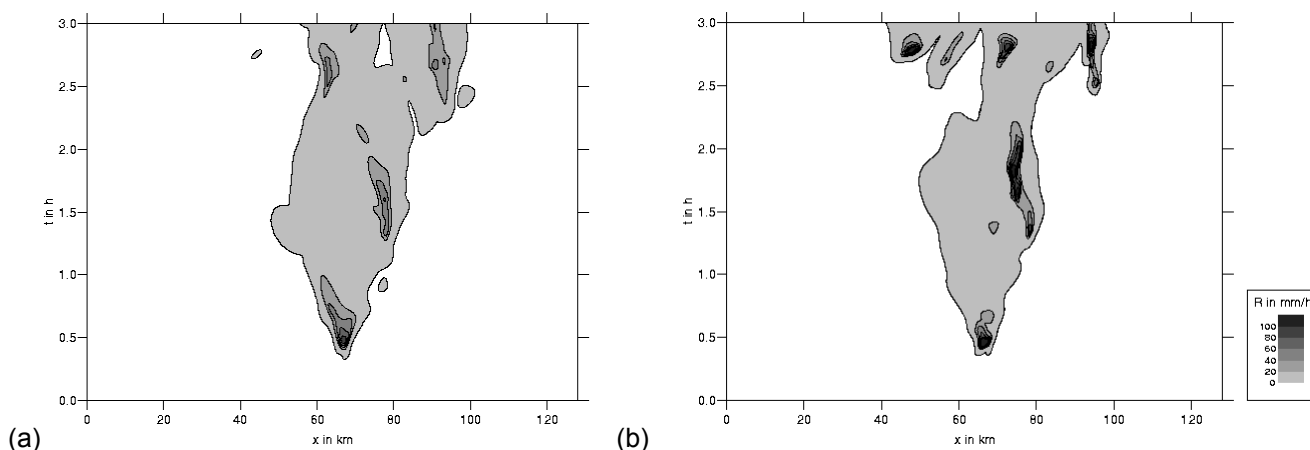


Abbildung 2: Niederschlagsrate in mm/h (siehe Grauskala) als Funktion der Zeit in h und der horizontalen Position x in km: (a) Zweimomenten-Verfahren; (b) spektrale Methode

treme Situationen zeigen ein ähnliches Bild. Schließlich soll noch hervorgehoben werden, dass der Rechenzeitbedarf bei Verwendung des Zwei-momenten-Verfahrens um einen Faktor von etwa 30 geringer ist als bei Benutzung der detaillierten Methode.

Der Einfluss der Kontinentalität der Wolkentropfen-Größenverteilungsfunktion auf die Niederschlagsentwicklung ist durch eine systematische Studie untersucht worden, wobei als maßgebliche und steuernde Umgebungsparameter unterschiedliche Temperatur- und Feuchteprofile sowie Geschwindigkeitsscherungen vorgegeben wurden. Wiedermur wurde die Konvektion durch die Vorgabe eines anfänglichen Temperaturüberschusses initiiert; die Erdoberfläche wurde als eben angenommen. Als Folge dieser meteorologischen Bedingungen entwickeln sich sehr unterschiedliche Typen konvektiver Wolken: kurzlebige Einzelzellen und längerlebige Multi- und Superzellen. Alle zeigen stark variierende räumliche und zeitliche Strukturen und Niederschlagscharakteristika, so dass sich hier besonders deutlich der Einfluss der Kontinentalität bemerkbar machen sollte. Die Kontinentalität wurde zwischen maritim und kontinental graduell variiert.

Die Ergebnisse decken auf, dass die Kontinentalität sehr verschiedene Effekte hinsichtlich der Niederschlagsentwicklung und Thermo- / Hydrodynamik der konvektiven Wolken hervorruft.

Im Fall von voll ausgebildeten Einzelzellen dominieren im oberen Wolkenbereich Graupel und im unteren Regentropfen, wenn maritime Bedingungen angenommen werden. Eine zu Anfang kontinentale Wolke entwickelt im oberen Bereich mehr Wolkeneis und Schnee, weil die Bildung und das Wachstum von Graupel deutlich reduziert ist wegen (i) der relativ geringen Größe von Wolkentropfen, die weniger wirksam von den vorhandenen Eisparkeln aufgesammelt werden, und (ii) des Fehlens von Regentropfen, aus denen sonst eine große Zahl von Eisparkeln durch heterogene Keimbildung entsteht. Die Obergrenze von kontinentalen Einzelzellen ist hingegen um 1 bis 2 km höher als bei maritimen. Auch das Niederschlags-Geschehen ist stark unterschiedlich: Während im maritimen Fall ein pulsierendes Verhalten festzustellen ist, tritt dies im kontinentalen Fall nicht auf. Dieser Unterschied ist letztendlich auf das delikate Zusammenspiel aller wolkenmikrophysikalischer Prozesse, insbesondere auf die frühe und sehr unterschiedliche Wirksamkeit der Wolkentropfen / Regentropfen - Umwandlung, und ihrer Effekte auf die Wolkendynamik zurückzuführen.

Im Gegensatz zu Einzelzellen ist die Ausbildung von Multi- bzw. Superzellen an einen starken Auftrieb und eine mittlere bzw. starke vertikale Windscherung geknüpft. Grundsätzlich führt eine stärkere Windscherung zu einer Verlängerung der Lebensdauer und des Ausmaßes solcher konvektiver Systeme. Denn eine Verstärkung der Windscherung bewirkt eine effektivere Umsetzung von

horizontaler in vertikale Vorticity, wodurch zunächst der primäre rotierende Aufwindkern eine größere Stabilität erhält und im Laufe der Zeit an den äußeren Flanken des primären Aufwindgebiets neue (sekundäre) konvektive Zellen entstehen (cell splitting) und wachsen. Somit bilden sich letztlich umfangreichere Wolkensysteme, ausgelöst durch eine einzelne starke konvektive Zelle.

Wegen der zunehmenden Komplexität der räumlichen und zeitlichen Strukturen von Multi- und Superzellen ist es schwierig, die Bedeutung einzelner Mechanismen für die auftretenden Unterschiede herauszuarbeiten. Daher werden nur Unterschiede hinsichtlich der angenommenen Umgebungsbedingungen, ausgedrückt durch die Feuchte- und Temperaturschichtung (CAPE) der Atmosphäre, als Funktion der Windscherung und der Kontinentalität betrachtet. Als Vergleichsgrößen sind zum einen die absolute Differenz des akkumulierten Niederschlags (Abb. 3) und zum anderen die der maximalen Aufwindgeschwindigkeiten gewählt worden, beides relativ zu dem Fall maritimer Verhältnisse. Der Kontinentalitäts-Parameter CCN wurde zwischen 0 (stark maritim) und 1 (stark kontinental) variiert.

In der Abb. 3 (a) kennzeichnen Parameterwerte im unteren linken Bereich Einzelzellen, die im oberen linken Bereich Multizellen und die im oberen rechten Bereich Superzellen. Man sieht, dass für Einzelzellen der kontinentale Fall zu einer Reduktion von etwa 20% führt, wobei der Einfluss der Kontinentalität für Superzellen abnimmt. Im Multizellenbereich ist der Effekt umgekehrt und kann sehr stark sein: Bei geringer Windscherung kann es bei Vorhandensein einer hohen CAPE zu einer Zunahme von 100% kommen. Während die schwache Abnahme in den Fällen von Einzel- und Superzellen durch mikrophysikalische Prozesse erklärt werden kann, ist dies im Fall der Multizellen nicht gegeben. Eine Zunahme um einen Faktor zwei kann lediglich durch eine gekoppelte Wirkung der Wolkenmikrophysik und Wolkendynamik zustande kommen. Dies zeigt auch ein Vergleich der maximalen Aufwindgeschwindigkeiten, der hier nicht dargestellt ist. Kontinentale Einzelzellen haben deutlich schwächere maximale Aufwindgeschwindigkeiten als Multi- und Superzellen. Die stärksten maximalen Aufwindgeschwindigkeiten treten bei Multizellen und solchen Bedingungen auf, bei denen die maximale Niederschlagsverstärkung stattfindet.

Der Effekt der Kontinentalität kann dadurch erklärt werden, dass unterschiedliche Mengen von latenter Wärme durch das Gefrieren von Tropfen in unterschiedlichen Höhen freigesetzt werden. Im Fall von maritimen Wolken gefriert weniger Wasser, und das in niedrigeren Niveaus, während im kontinentalen Fall fast alle Tropfen in größeren Höhen gefrieren. Damit kann auch die höhere Aufwindgeschwindigkeit im Fall maritimer Wolken verstanden werden, weil die Zufuhr von latenter Wärme in niedrigeren Höhen zu einer kräftigeren

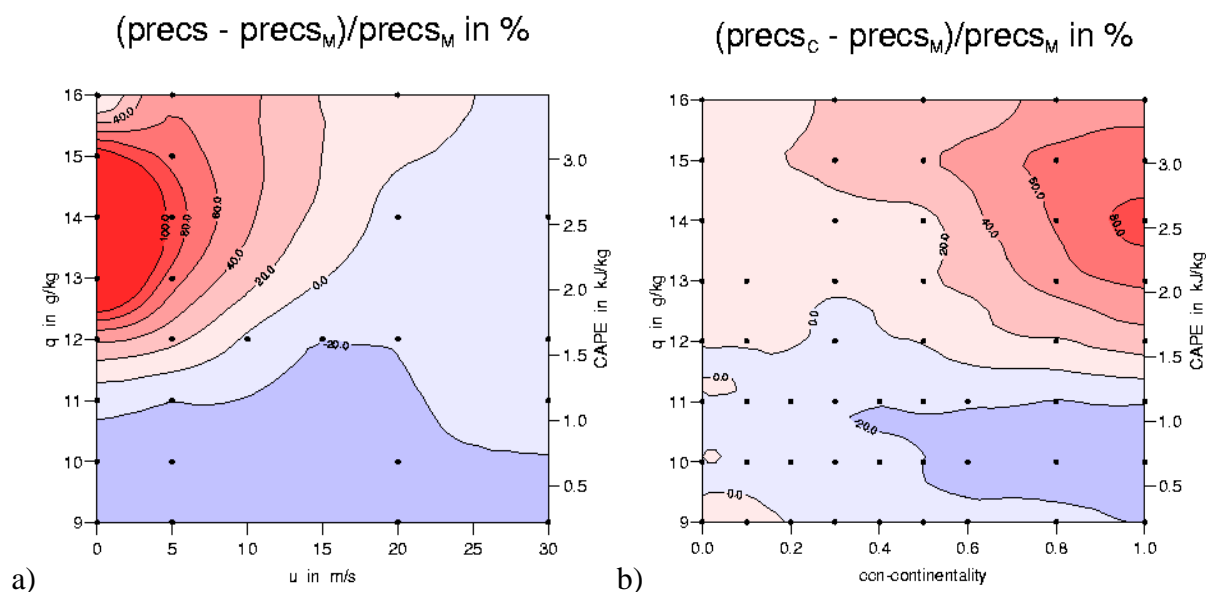


Abbildung 3: Differenz des akkumulierten Gesamtniederschlags in %, normiert mit den Werten des stark maritimen Falls, (a) für den stark kontinentalen (CCN=1) und stark maritimen (CCN=0) Fall als Funktion der Geschwindigkeit am Oberrand des Modellgebiets in m/s (Abszisse) und der CAPE (Ordinate) in J/kg bzw. des Mischungsverhältnisses q_v in g/kg und (b) für eine Windscherung, die am Oberrand des Modellgebiets in einen konstanten Horizontalwind von 5 m/s übergeht als Funktion des Kontinentalitätsparameters (Abszisse), Ordinate wie bei (a)

Wolkendynamik führt. Mit anderen Worten: In kontinentalen Wolken gefrieren viele Tropfen oberhalb des Niveaus, wo die Aufwindgeschwindigkeit maximal ist, so dass die Zufuhr latenter Wärme in größeren Höhen nur zu einem geringen Anteil zu einer Zunahme der Aufwindgeschwindigkeit beiträgt, der Rest für die Erzeugung z.B. von Schwerkeln genutzt wird.

Um diese Hypothese zu prüfen, wurden Modellrechnungen durchgeführt, indem die Freisetzung latenter Wärme durch das Gefrieren von Tropfen künstlich unterbunden wurde. Es stellte sich dabei heraus, dass die vorgenannte Erklärung, nämlich der Einfluss der Freisetzung latenter Wärmen in unterschiedlichen Höhen, zwar das Verhalten der Aufwindgeschwindigkeit beeinflusste, hingegen der Niederschlagsablauf fast unbeeinflusst davon war. Im Fall des Multizellenregimes ist also der Gefrierprozess derjenige, der den Unterschied zwischen dem maritimen und kontinentalen Fall ausmacht.

Der bislang angestellte Vergleich betrifft den Unterschied von stark kontinentalen und stark maritimen Wolken und stellt daher ein Extrem dar. Daher wurde Untersuchungen durchgeführt, bei denen der Kontinentalitätsparameter kontinuierlich verändert wurde. Für die Windscherung wurde ein mittlerer Wert angenommen. Wie an Abb. 3 (b) erkennbar ist, ist der Übergang von einem negativen zu einem positiven Kontinentalitätseffekt (bei

etwa $q_v=11\text{g/kg}$ entsprechend einer CAPE von 1000 J/kg) nahezu unabhängig von diesem Parameter. Im Detail, d.h. wenn auch noch die Windscherung variiert wird, stellt sich heraus, dass die Abnahme der Niederschlagseffektivität für Einzelzellen bei einem relativ geringen Wert des Kontinentalitätsparameters einsetzt. Im Gegensatz dazu scheint der positive Kontinentalitäts-Effekt für Multizellen eine Eigenschaft der sehr kontinentalen Bedingungen zu sein, weil nur geringe Effekte zu sehen sind, wenn der Kontinentalitätsparameter von 0,0 auf 0,5 ansteigt.

Die hier präsentierten Ergebnisse haben zu neuen Erkenntnissen über die Niederschlagsentstehung, wie sie in kontinentalen und maritimen Mischwolken abläuft, geführt. Bemerkenswert ist allerdings die starke Variabilität der Ergebnisse in Abhängigkeit von vielen Einflussfaktoren. Eine gewisse Einschränkung bei der Interpretation der Ergebnisse besteht darin, dass in den vorliegenden Untersuchungen orographische Einflüsse außer Acht gelassen wurden. Entsprechende Effekte werden in laufenden Studien genauer analysiert.

[Ansprechpartner:](#)

Prof. Dr. K. D. Beheng

Tel. 07247 82 – 2850

e-mail: Klaus.Beheng@imk.fzk.de

Auslösung von Konvektion über komplexem Gelände

Einleitung

Konvektive Systeme besitzen große Bedeutung für den Wasserkreislauf und das Klima sowie den Transport von Spurenstoffen. Konvektive Niederschläge machen weltweit etwa 70% des Gesamtniederschlags aus und können signifikant zur Auslösung von Hochwasser beitragen. Auch die mit kräftiger Konvektion einhergehenden Ereignisse wie Sturm, Hagel und Blitze und die entsprechenden Folgen für Menschen und Sachwerte machen sie zu einem wichtigen Prozess in der Atmosphäre. Hochreichende Konvektionssysteme bewirken einen sehr effektiven vertikalen Austausch von Spurenstoffen innerhalb der Troposphäre. Konvektive Prozesse können somit bei Luftschadstoffen einen entlastenden Einfluss in der atmosphärischen Grenzschicht haben, indem sie in Bodennähe eine Verdünnung bewirken.

Für die Entwicklung von Konvektion und konvektiven Niederschlägen sind zwei wesentliche Voraussetzungen notwendig: ein Auslöseprozess durch Erhitzung der Erdoberfläche oder Hebung der entsprechenden Luftmasse sowie eine ausreichende Feuchte in der Atmosphäre. Die Bereitstellung der Feuchte und die Hebung von Luftmassen erfolgt sowohl durch synoptische Systeme mit einer Ausdehnung von $d \approx 1000$ km, durch regionale Systeme ($d \approx 50$ km) als auch durch turbulente Austauschvorgänge auf der Skala von nur einigen Kilometern. Den regionalen und lokalen Systemen kommt bei konvektiven Wetterlagen häufig eine Schlüsselrolle zu, da durch sie die Konvektion nur an bestimmten Stellen ausgelöst wird, auch wenn die großräumigen Bedingungen für eine Konvektionsentwicklung weitgehend ähnlich sind.

Wichtig für die Auslösung, die zeitliche Entwicklung und die Intensität der regionalen Systeme ist, wie sich die verfügbare Strahlungsenergie am Erdboden auf den fühlbaren bzw. latenten Wärmestrom verteilt. Ersterer führt zu einer Erhöhung der Lufttemperatur, der zweite zu einer Erhöhung der Feuchte in der Atmosphäre. Die Aufteilung der Strahlungsenergie wiederum hängt von den Erdboden- und Oberflächeneigenschaften ab. Besonders markante regionale, thermisch induzierte Windsysteme entstehen in Verbindung mit der Orographie, da im Bergland die Energieumsetzung in unterschiedlichen Höhenlagen stattfindet. Dabei kommt es häufig über den Bergrücken zu Konvergenz mit starken Aufwinden und zur Auslösung von Konvektion.

Ein Vergleich der Beobachtungen mit Simulationen des Karlsruher Mesoskaligen Modells KAMM, das als Forschungsmodell besonders für Fallstudien geeignet ist, zeigt bei einer Gitterweite von 1 km, dass die regionalskaligen Windsysteme, die Temperaturdifferenz zwischen bodennaher Temperatur und Auslösetemperatur und damit

auch die Konvektion räumlich und zeitlich realistisch modelliert werden können. Derzeit werden jedoch die oben genannten regionalskaligen Prozesse durch operationelle Wettervorhersagemodelle, wie z. B. das Lokalmodell LM des Deutschen Wetterdienstes mit einer räumlichen Auflösung von 7 km, nur unzureichend erfasst. So bestehen insbesondere bei der Vorhersage der regionalskaligen Feuchte- und Windfelder deutliche Defizite. Dadurch werden auch die konvektiven Niederschläge sowohl zeitlich zu früh als auch räumlich zu großflächig vorhergesagt. Es resultiert die Hypothese, dass die reale Orographie von entscheidender Bedeutung für die Auslösung und Modifikation der Konvektion ist.

Ziel der Arbeiten ist es daher, die Prozesse der Konvektionsauslösung zu analysieren, durch Vergleiche mit Modellrechnungen die spezifischen Modelldefizite zu erkennen, um dann durch gezielte Modellverbesserungen zu einer sichereren Vorhersage der Konvektion zu gelangen.

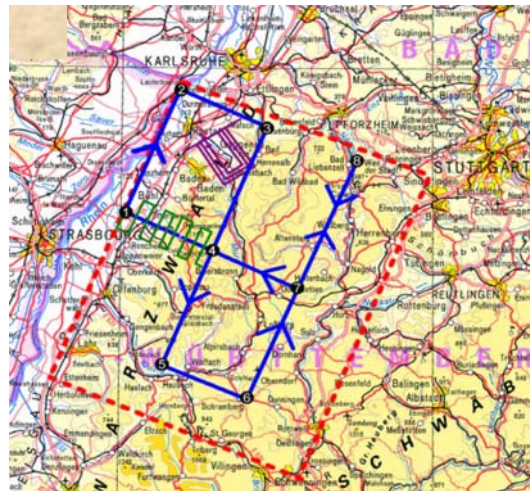


Abbildung 1: VERTIKATOR-Messgebiet (rot gestrichelte Linie) und projizierter Flugweg des Forschungsflugzeugs DO128 (blaue Linie). Die Boden-, Radiosonden- und Fernerkundungsstationen waren überwiegend entlang der Linie 1-4-7 installiert.

Messungen in der Atmosphäre

Im Mai und Juni 2002 wurde das vom BMBF geförderte Atmosphärenmessprogramm VERTIKATOR (Vertikaler Austausch und Orographie) im Schwarzwald durchgeführt.

Bodenstationen dienen der Messung aller Komponenten der Energiebilanz am Erdboden (Abb. 1). Mit Fernerkundungssystemen (Sodar, Windradar) wurde die Vertikalstruktur der regionalen Windsysteme vermessen. Um die zeitliche Entwicklung und räumliche Struktur konvektiver Elemente zu verfolgen, wurden Fallsonden von oben

in die Konvektionszellen (Cumuluswolken) abgeworfen. Die Messungen der fünf eingesetzten Messflugzeuge stellten Informationen über die räumliche Verteilung der Strahlungsbilanz und Strahlungstemperatur am Erdboden sowie über die Verteilung von Wind, Temperatur und Feuchte innerhalb und außerhalb konvektiver Zellen zur Verfügung. Mit Hilfe von Radiosonden wurde der mittlere Zustand der Troposphäre aufgezeichnet. Infrarotmessungen der Satelliten METEOSAT und NOAA schließlich erlaubten die Bestimmung der Tagesgänge der Landoberflächentemperatur (LST) für das gesamte Messgebiet.

Während der Messkampagne im Nordschwarzwald konnte ein breites Spektrum unterschiedlicher konvektiver Wettersituationen von flacher Kumuluskonvektion am 31. Mai, 1. und 3. Juni 2002 bis zu hoch reichender Konvektion am 19. Juni 2002 vermessen werden. Die unterschiedlichen Fälle werden gekennzeichnet durch die Werte der 'verfügbaren potentiellen Energie' (CAPE), einem Konvektionsmaß (Abb. 2).

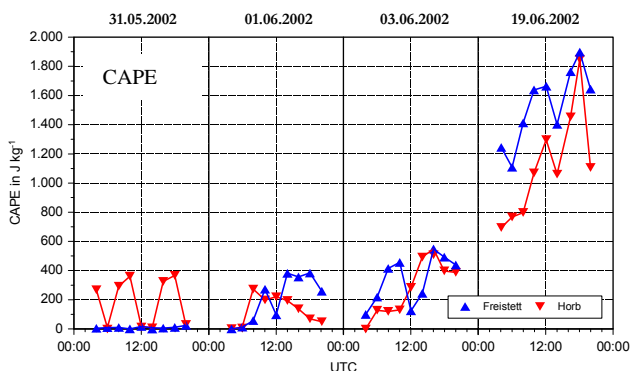


Abbildung 2: Verfügbare potentielle Energie (CAPE) an verschiedenen VERTIKATOR-Messtagen im Rheingraben (Freistett, 120 m NN) und im Schwarzwald (Horb, 515 m NN).

Die CAPE liegt beispielsweise am 19. Juni deutlich über den Werten am Anfang des Monats. Die räumlichen Unterschiede zwischen dem Rheingraben (Freistett, 120 m NN) und dem östlichen Nordschwarzwald (Horb, 515 m NN) an den einzelnen Tagen sind aber vergleichsweise gering. Konvektion trat dann allerdings fast ausschließlich über dem Nord- und Südschwarzwald und über den Vogesen auf (Abb. 3). Am Nachmittag entstand über dem oberen Murgtal eine Gewitterzelle mit Niederschlägen bis 20 mm, wie das Radarbild (Abb. 4) des Karlsruher Niederschlagsradars zeigt. Im Rheingraben fiel dagegen bis zum späten Abend kein Niederschlag.

Mit Hilfe der umfassenden VERTIKATOR-Daten wurde eine Detailanalyse vorgenommen, die die Ursachen für die Auslösung der Konvektion über dem Schwarzwald liefert.

Konvektion kann einerseits dadurch ausgelöst werden, dass die bodennahe Lufttemperatur die so genannte Auslösetemperatur erreicht oder überschreitet, so dass bodennahe Luftmassen



Abbildung 3: NOAA-Satellitenaufnahme vom Oberrheingraben am 19. Juni 2002 um 12:26 UTC. Der rote Kreis kennzeichnet den Bereich, in dem sich am Nachmittag eine Gewitterzelle mit Niederschlag bildete (s. Abb. 4).

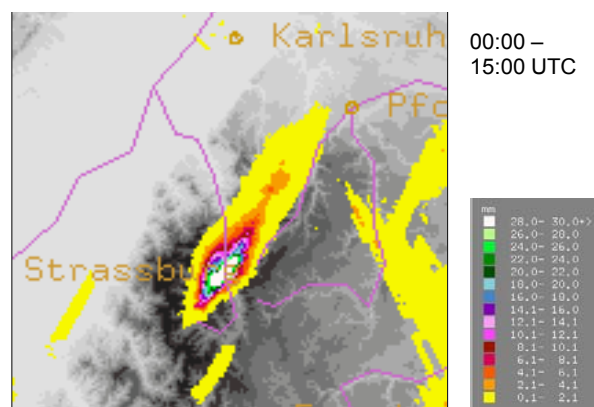


Abbildung 4: Niederschlagssumme von 0 bis 15 UTC am 19. Juni 2002, gemessen mit dem Karlsruher Niederschlagsradar am Forschungszentrum Karlsruhe.

aufsteigen können. Mit Satellitenmessungen lassen sich die Temperaturverhältnisse kontinuierlich und flächendeckend überwachen und räumliche Strukturen quantitativ erfassen. Temperaturunterschiede von mehr als 5 °C sind häufig schon über unterschiedlicher Landnutzung anzutreffen (Abb. 5). Für den 19. Juni wurde die Differenz zwischen der bodennahen Temperatur und der Auslösetemperatur, ΔT , zu verschiedenen Zeiten als Funktion der Stationshöhe berechnet (Abb. 6).

Diese Bedingung für die Auslösung von Konvektion ist um 10 und 12 UTC nur an Stationen oberhalb von etwa 850 m NN erfüllt. Außerdem zeigt die räumliche Verteilung von ΔT um 12 UTC, dass dieses Gebiet im Wesentlichen die Hornisgrinde und das obere Murgtal umfasste. Für die Auslösung von Konvektion stellte sich die Kombination

mehrerer miteinander verknüpfter Prozesse als wesentlich heraus.

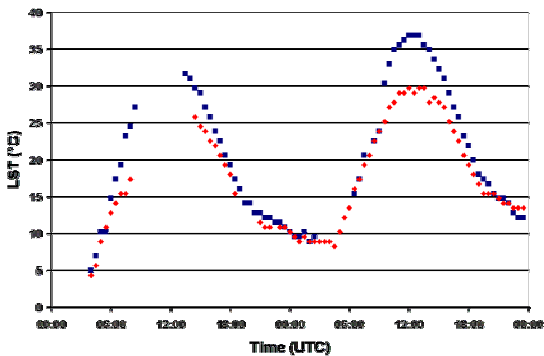


Abbildung 5: Verlauf der LST über Agrarland (blau) und Wald (rot) am 31. Mai und 1. Juni 2002 im Rheingraben; abgeleitet aus METEOSAT-Daten.

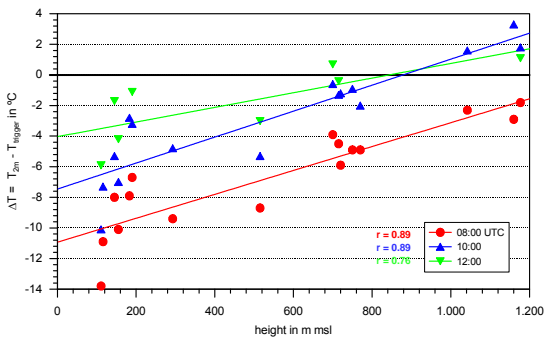


Abbildung 6: Differenz der bodennahen Temperatur (T_{2m}) und der Auslösetemperatur (ΔT) zu verschiedenen Zeiten am 19. Juni 2002 an Messstationen in unterschiedlicher Geländehöhe im VERTIKATOR-Messgebiet.

Am späten Vormittag des 19. Juni traten im Bereich des mittleren Nordschwarzwaldes über dem Gipfel der Hornisgrinde und ostwärts davon auf Teilabschnitten des Flugweges der DO 128 sehr hohe vertikale Feuchtetransporte auf (Abb. 7), was zu einer Anreicherung von Feuchte in der Grenzschicht führte. Im Rheingraben dagegen waren die vertikalen Feuchtetransporte in der entsprechenden Höhe über Grund nahezu vernachlässigbar.

Des Weiteren resultierten aus höheren Temperaturen über hochgelegenen Flächen im Vergleich zu den Temperaturen in der freien Atmosphäre thermisch induzierte Windsysteme, wie Hang- und Talwinde. Diese sind am 19. Juni im Bereich des Schwarzwaldes deutlich nachweisbar (Abb. 8). Über diese Windsysteme wird einerseits durch horizontalen Transport feuchte Luft aus dem Rhein- und Neckartal in den Schwarzwald transportiert. Die Windsysteme bilden den Nachschub für die vertikalen turbulenten Feuchtetransporte, die über dem Schwarzwald beobachtet werden (Abb. 7). Andererseits führt die Konvergenz der bodennahen Luftmassen über dem Schwarzwald-

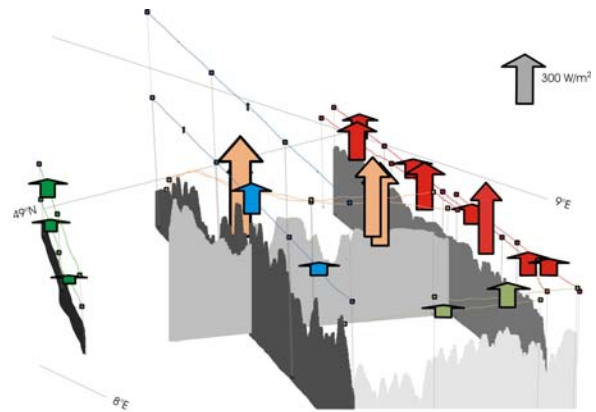


Abbildung 7: Feuchtflüsse (Pfeile) über dem Nordschwarzwald am späten Vormittag des 19. 06. 2002. Dargestellt ist eine Ansicht von Südwesten auf den Nordschwarzwald. Die turbulenten Flüsse latenter Wärme sind für Teilabschnitte der überflogenen Orographie dargestellt. Die Maximalwerte bis 607 Wm^{-2} (orange und rot) treten über der Hornisgrinde und ostwärts davon bis Horb auf. Im Rheingraben und Kinzigtal (grün) sind die Feuchtflüsse dagegen sehr gering.

kamm zur Bergventilation, einem verstärkten Vertikaltransport von Luftmassen über Bergkuppen und Bergrücken. Die Bergventilation kann, bei

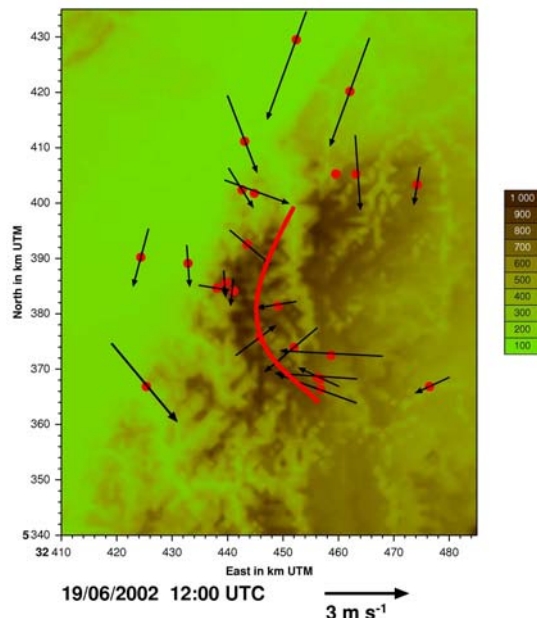


Abbildung 8: Windvektoren um 12 UTC an den Bodenstationen des erweiterten VERTIKATOR-Bodenmessnetzes im Bereich des Nordschwarzwaldes. Die rote Linie kennzeichnet eine bodennahe Konvergenz westlich des Murgtals. Bodennahe Konvergenz führt i.a. zu Bergventilation.

ausreichender Feuchte in der Atmosphäre, die hoch reichender Konvektion über den Bergkäm-

men auslösen. Der Bereich starker Bergventilation ist durch das horizontale Zusammenströmen von Luftmassen über den Kuppen gekennzeichnet. Dieser Bereich ist in Abbildung 8 durch die rote Linie (Konvergenzlinie) gekennzeichnet. Zusätzlich zu diesen Hangaufwinden werden außerdem über die Talwinde des südlich gelegenen Kinzigtals und des nördlich gelegenen Murgtals feuchtwarme Luftmassen in das Zentrum des Nordschwarzwaldes geführt. Die Daten werden eine quantitative Berechnung der damit verbundenen Feuchte- und Wärmeflüsse und einen Vergleich mit horizontal homogenen Regionen wie dem Rheingraben erlauben.

Modellrechnungen zur Konvektion

Modellrechnungen für die VERTIKATOR-Messkampagne wurden mit dem operationalen Lokal-Modell des Deutschen Wetterdienstes, dem LM, durchgeführt. Da aus den Beobachtungen hervorgeht, dass die Bedingungen für die Auslösung von Konvektion nur in den Hochlagen des Schwarzwaldes (> 850 m NN) gegeben sind (Abb. 6), wurde zunächst die im LM verwendete Orographie mit der realen Orographie verglichen. Abbildung 9 zeigt die Differenz zwischen der realen Orographie und der Modellorographie des LM in 7 km Auflösung. Die markanten Geländestrukturen des Nordschwarzwaldes, die als entscheidend für die Auslösung von Konvektion identifiziert worden sind, werden durch Verwendung einer 7 km Auflösung stark eingeebnet. Die Auslösemechanismen für Konvektion (Strahlungsmodifikation, lokale Windsysteme und Bergventilation) können sich somit im Modell nicht oder zumindest nicht zur richtigen Zeit an den richtigen Stellen entwickeln. Im Modell wird die Auslösung von Konvektion in diesem Fall für einen großen Teil der Gesamtfläche des Nordschwarzwalds oberhalb der Modellgeländehöhe von 600 bis 700 m nach 10 UTC prognostiziert (Abb. 10). In der Realität entwickelte sich gegen 14 UTC jedoch nur eine einzige eng begrenzte Konvektionszelle über dem oberen Murgtal mit einer Lebensdauer von ca. 90 Minuten (Abb. 4).

Eine Verbesserung der Vorhersagemodelle kann neben der Verwendung eines höher aufgelösten Modellgitters nur durch systematische Vergleiche von Beobachtungen und Modellvorhersagen erfolgen, um die quantitativen Beiträge der Prozesse zu bestimmen, die im Modell für eine Fehlvorhersage verantwortlich sind. Dies umfasst die Energieumsetzung am Boden, die Parametrisierung der kleinskaligen Konvektionsprozesse und die Erfassung der höchst inhomogenen Verteilung der wesentlichen atmosphärischen Parameter wie Temperatur, Feuchte und turbulenter Flüsse im Bereich der unteren Troposphäre. Diese Untersuchungen und Vergleiche sind das Ziel

der weiteren VERTIKATOR-Auswertungen und geplanter zukünftiger Forschungsprogramme.

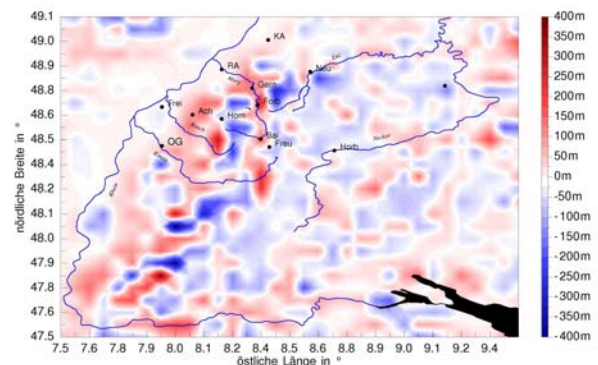


Abbildung 9: Differenz zwischen der Modellorographie des LM (7 km Auflösung) und der realen Orographie. Maximale Unterschiede mit bis zu 300 m treten speziell im Bereich des Nordschwarzwaldes auf. Das LM bewirkt in dieser Auflösung eine deutliche Glättung des hier stark strukturierten Geländes.

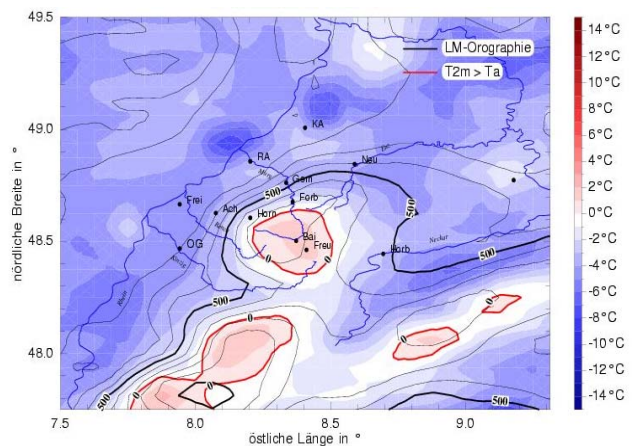


Abbildung 10: Überschreiten der Auslösetemperatur im LM (7 km) als Indikator für Konvektionsauslösung am 19. Juni 2002 um 11 UTC innerhalb der roten Isolinie. Es wird zwar Konvektionsauslösung prognostiziert, jedoch im Vergleich zur Beobachtung 1 bis 2 Stunden zu früh und für das Gebiet des gesamten Nordschwarzwalds.

Ansprechpartner:

Dr. Ulrich Corsmeier

Tel.: 07247 822843

e-mail: ulrich.corsmeier@imk.fzk.de

Dr. Norbert Kalthoff

Tel.: 07247 824230

e-mail: norbert.kalthoff@imk.fzk.de

Publikationen, Vorträge und Poster aus dem Jahre 2003

Begutachtete Publikationen

BALDAUF, M.; FIEDLER, F.

A parameterisation of the effective roughness length over inhomogeneous, flat terrain. *Boundary-Layer Meteorology*, 106 (2003), 189-216

BARTHLOTT, C., N. KALTHOFF, F. FIEDLER
Influence of high-frequency radiation on turbulence measurements on a 200 m tower
Meteorologische Zeitschrift, 12, (2003), 67-71

BARTHLOTT, C., FIEDLER, F.
Turbulence Structure in the Wake Region of a Meteorological Tower
Boundary Layer Meteorology, 108, (2003), 175-190.

BRANDELIK, A.; HÜBNER, C.
Moisture monitoring in waste disposal surface barriers.
Environmental Monitoring and Assessment, 84, (2003) 61-70

CORSMEIER, U., R. BEHRENDT, Ph. DROBINSKI, Ch. KOTTMEIER
The Mistral and its effect on air pollution transport and vertical mixing
Atmospheric Research, in press.

CROS, B., P. DURAND, H. CACHIER, Ph. DROBINSKI, E. FREIJAFON, C. KOTTMEIER, P.E. PERROS, V.-H. PEUCH, J.L. PONCHE, D. ROBIN, F. SAID, G. TOUPANCE, H. WORTHAM
The ESCOMPTE program : an overview
Atmospheric Research 69, 3-4, (2004) 241-279

GROSSMANN, D.; MOORTGAT, G.K.; KIBLER, M.; SCHLOMSKI, S.; BÄCHMANN, K.; ALICKE, B.; GEYER, A.; PLATT, U.; HAMMER, M.U.; VOGEL, B.; MIHELIC, D.; HOFZUMAHAUS, A.; HOLLAND, F.; VOLZ-THOMAS, A.
Hydrogen peroxide, organic peroxides, carbonyl compounds, and organic acids measured at Pabstthum during BERLIOZ.
Journal of Geophysical Research, 108(D4), 8250, doi:10.1029/2001JD001096, 2003

HAUCK, C. VONDER MÜHLL, D.
Inversion and interpretation of 2-dimensional geoelectrical measurements for detecting permafrost in mountainous regions.
Permafrost and Periglacial Processes, 14(4) 2003, 305-318.

HAUCK, C., VONDER MÜHLL, D., MAURER, H.
Using DC resistivity tomography to detect and characterise mountain permafrost.

Geophysical Prospecting, 51 (2003), 273-284,

HAUCK, C., VONDER MÜHLL, D.
Evaluation of geophysical techniques for application in mountain permafrost studies.
Z. Geomorph. N.F., Suppl.-Vol. 132 (2003), 161-190,

KALTHOFF, N., J. BISCHOFF-GAUß, F. FIEDLER
Regional effects of large-scale extreme wind events over orographically structured terrain
Theoretical and Applied Climatology 74 (2003), 53-67

KLEFFMANN, J.; KURTENBACH, R.; LÖRZER, J.; WIESEN, P.; KALTHOFF, N.; VOGEL, B.; VOGEL, H.
Measured and simulated vertical profiles of nitrous acid. Part I: Field measurements. *Atmospheric Environment*, 37(2003), 2949-55

KNEISEL, C., HAUCK, C.
Multi-method geophysical investigation of an isolated permafrost occurrence. *Z. Geomorph. N.F., Suppl.-Vol. 132 (2003)*, 145-159.

KOTTMEIER, CH., FREY K., HASEL M., EISEN, O.
Sea ice growth in the eastern Weddell Sea in winter
Journal of Geophysical Research, 108(C4), 3125, doi:10.1029/2001JC001087, 2003

RIEMER N., H. VOGEL, B. VOGEL, F. FIEDLER
Modeling Aerosols on the Mesoscale-□Part I: Treatment of Soot Aerosol and its Radiative Effects
Journal of Geophysical Research, 109, 4601, doi:10.1029/2003JD003448, (2003)

RIEMER, N., H. VOGEL, B. VOGEL, B. SCHELL, I. ACKERMANN, CH. KESSLER, M. HASS
The Impact of the Heterogeneous Hydrolysis of N₂O₅ on Tropospheric Chemistry and Nitrate Aerosol Formation.
Journal of Geophysical Research, 108, 4144, doi:10.1029/2002JD002436, (2003)

VOGEL, B.; VOGEL, H.; KLEFFMANN, J.; KURTENBACH, R.
Measured and simulated vertical profiles of nitrous acid. Part II. Model simulations and indications for a photolytic source.
Atmospheric Environment, 37(2003) 2957-66

Proceedings- und Buchbeiträge

HAUCK, CH., WAGNER, U.

Combining and interpreting geo-electric and seismic tomographies in permafrost studies using fuzzy logic.

Proceedings 8th Int. Conference on Permafrost, Zürich, 2003. Extended abstracts, 57-58.

HAUCK, CH., KNEISEL, C.

Application of a capacitively coupled resistivity system for mountain permafrost studies and implications for the interpretation of resistivity values.

Proceedings 8th Int. Conference on Permafrost, Zürich, 2003. Extended abstracts, 55-56.

KALTHOFF N.,

Das Sodar als Messsystem zur Analyse Mesoskaliger Meteorologischer Phänomene
Buchbeitrag, Tagungsband 2., Fachgespräch Sodar

KOTTMEIER, C.; SCHMITT, C.; SCHMOECKEL, J.; BORCHERT, A.

Sturm Lothar: Schadensanalyse und Risikokartierung aus meteorologischer Sicht.

Tetzlaff, G. [Hrsg.] 2.Forum Katastrophenvorsorge : Extreme Naturereignisse - Folgen, Vorsorge, Werkzeuge, Leipzig, 24.-26.September 2001 Bonn und Leipzig : Deutsches Komitee für Katastrophenvorsorge e.V., 2002 S.428- 32

KUNZ, M.; KOTTMEIER, C.

Starkniederschläge mit langer Andauer über Mittelgebirgen.

Tetzlaff, G. [Hrsg.] 2.Forum Katastrophenvorsorge: Extreme Naturereignisse - Folgen, Vorsorge, Werkzeuge, Leipzig, 24.-26.September 2001 Bonn und Leipzig : Deutsches Komitee für Katastrophenvorsorge e.V., 2002 S.205- 12

Eingeladene Vorträge

BEHENG, K.D.

Wolken und Niederschlag – Diagnose und Prognose

Physikalisches Kolloquium, Fachhochschule Mannheim, 03.04.2003

HAUCK, C.

Monitoring und Modellierung von Auftauprozessen in alpinen Permafrostregionen mit einem geophysikalisch-meteorologischen Ansatz.

Kolloquium Institut für Meteorologie, Klimatologie und Fernerkundung, Universität Basel, 09.12.2003.

KOTTMEIER, CH.

Anwendungsmöglichkeiten für ein neues Doppler-Lidar.

2nd Workshop of the Lidar Expert Network "Laser Remote Sensing of Water Vapor and Wind", Universität Hohenheim, 10.03.2003

KOTTMEIER, CH.

Auslösung und Entwicklung von Konvektion über Mittelgebirgen

Universität Hannover, Institut für Meteorologie und Klimatologie, Seminar 19.6.2003

KOTTMEIER, CH.

Klima und Klimaforschung

Pädagogische Hochschule Ludwigsburg, Institut für Kulturmanagement, 3.10.2003

KOTTMEIER; CH.

Flache und hochreichende Konvektion im Mittelgebirgsraum

Geophysikalisches Kolloquium, Universität Hamburg, 30.10.2003.

LUGAUER, M., BERRESHEIM, H., CORSMEIER, U., DABAS, A., DYCK, W., EMEIS, S., EGGER, J., FEHR, T., FIEDLER, F., FREUER, CH., GANTNER, L., GILGE, S., HEESE, B., HORNSTEINER, M., HÖLLER, H., JAKOBI, G., JUNKERMANN, W., KALTHOFF, N., KAMINSKI, U., KIRCHNER, M., KRÄMER, H., KÖHLER, P., KOTTMEIER, CH., LUKSCH, B., OTT, H., PLASSDÜLMER, CH., REITEBUCH, O., TAGLIAZUCCA, M., TRICKL, T., VOGT, S., WINKLER, P.

An overview of the VERTIKATOR project and results of Alpine Pumping

Internat.Conf.on Alpine Meteorology and the Mesoscale Alpine Programme Meeting (ICAM/MAP2003), Brig, CH, May 19-23, 2003

VOGEL, B.

Aerosolmodellierung auf der regionalen Skala
Kolloquium Institut für Umweltp Physik, Universität Heidelberg, 16.10.2003.

Vorträge / Poster

BALDAUF M.

Stability analysis of several time-splitting schemes for mesoscale models

LM-Anwender-Seminar, Langen 31. – 02. April 2003

BALDAUF M.

Time splitting integration methods in mesoscale models

Joint Assembly of the European Geophysical Society (EGS), the American Geophysical Union (AGU) and the European Union of Geosciences (EUG), Nice, F, April 6-11, 2003

BEHENG K.D., A. SEIFERT, A. KHAIN

Simulation of aerosol effects on mixed-phase deep convection: A comparison of spectral and two-

moment parameterized microphysics
 Joint Assembly of the European Geophysical Society (EGS), the American Geophysical Union (AGU) and the European Union of Geosciences (EUG), Nice, F, April 6-11, 2003

BEHENG K.D., A. SEIFERT, I. BERTRAM
 Cloud resolving simulations and radar measurements of mid-latitude convective storms
 Joint Assembly of the European Geophysical Society (EGS), the American Geophysical Union (AGU) and the European Union of Geosciences (EUG), Nice, F, April 6-11, 2003

BEHENG K.D., I. BERTRAM, A. SEIFERT
 Radar measurements and cloud resolving simulations of mid-latitude convective storms
 Internat.Conf.on Alpine Meteorology and the Mesoscale Alpine Programme Meeting (ICAM/MAP2003), Brig, CH, May 19-23, 2003

BEHENG, K.D.,
 Über die Bildung und Entwicklung von Niederschlagspartikeln
 Daimler Chrysler, 2.9.03

BEHENG, K.D., A. SEIFERT, A. KHAIN, D. ROSENFELD
 A numerical investigation on precipitation in the Eastern Mediterranean by cloud seeding.
 8. Statusseminars der Deutsch-Israelischen Kooperation in Wassertechnologie. En Bokek, Dead Sea, Israel, 27.-28.10.2003

BISCHOFF-GAUß I., KALTHOFF, N., FIEBIG-WITTMACK, M.
 Mesoscale Wind Systems in Chile at 30°S
 Agua para el Futuro: Sistemas en Peligro, La Serena, RCH, 4-6 Junio, 2003

BLAHAK, U., BEHENG K.D.,
 Dual Radar Analysis of Precipitation and Microwave Attenuation at C-Band in the Lago Maggiore Target Area during the MAP-SOP
 Internat.Conf.on Alpine Meteorology and the Mesoscale Alpine Programme Meeting (ICAM/MAP2003), Brig, CH, May 19-23, 2003

BRANDELIK, A.; HÜBNER, C.; SCHLAEGER, S.; STACHEDER, M.
 Determination of snow density and snow water equivalent for hydro power generation.
 5th Internat.Conf.on Electromagnetic Wave Interaction with Water and Moist Substances, Rotorua, NZ, March 24-26, 2003

BRANDELIK, A.; HÜBNER, C.; SCHUHMAN, R.; STACHEDER, M.
 Determination of snow water equivalent for hydro power generation. Energy : Perspectives for Sustainable Development ;
 4.Deutsch-Italienisches Kolloquium für die Wis-

senschaft, Trento, I, January 16-18, 2003

BRANDELIK, A.; STACHEDER, M.
 Messungen der Schneefeuchte und Schneedichte für die optimierte Auswertung von Satellitenfernerkundungsaufnahmen.
 'Innovative Feuchtemessung in Forschung und Praxis', Karlsruhe, July 3-4, 2003

BRANDELIK, A.; HÜBNER, C.; SCHLAEGER, S.; NORGREN, M.
 State of the art inversion techniques for subsurface moisture profiles.
 Progress in Electromagnetics Research Symp. (PIERS 2003), Honolulu, Hawaii, October 13-16, 2003

CANNONE, N., GUGLIELMIN, M., HAUCK, C. & VONDER MÜHLL, D.
 The impact of recent glacier fluctuation and human activities on the permafrost distribution: a case study from Stelvio Pass (Italian Central-Eastern Alps). Proceedings 8th Int. Conf. On Permafrost, Zurich, 2003, 125-130.

CORSMEIER U., CH. KOTTMEIER, P. WINKLER, M. LUGAUER, O. REITEBUCH, PH. DROBINSKI
 Flow modification and mesoscale transport caused by „Alpine Pumping“:
 A VERTIKATOR case study
 Internat.Conf.on Alpine Meteorology and the Mesoscale Alpine Programme Meeting (ICAM/MAP2003), Brig, CH, May 19-23, 2003

CORSMEIER U., M. LUGAUER, H. BERRSHEIM, A. DABAS, W. DYCK, S. EMEIS, J. EGGER, T. FEHR, F. FIEDLER, CH. FREUER, L. GANTNER, S. GILGE, B. HEESE, M. HORNSTEINER, H. HÖLLER, N. KALTHOFF, U. KAMINSIKI, M. KIRCHNER, H. KRÄMER, P. KÖHLER, CH. KOTTMEIER, H. OTT, CH. PLASSDÜLMER, O. REITEBUCH, M. TAGLIAZUCCA, T. TRICKL, S. VOGT, P. WINKLER
 An overview of the VERTIKATOR project and results of Alpine Pumping
 Internat.Conf.on Alpine Meteorology and the Mesoscale Alpine Programme Meeting (ICAM/MAP2003), Brig, CH, May 19-23, 2003

CORSMEIER, U.; GIEHL, H.; KREIPL, S.; REITEBUCH, O.; TRICKL, T.
 The VERTIKATOR field campaign in the Loisach Valley.
 1st Symp.of the European Aerosol Research Lidar Network (EARLINET), Hamburg, February 11-12, 2003

CORSMEIER, U.
 Vertical Mass Exchange and Orography-Contributions of IMK to CSIP.
 Convective Storms Initiation Project – Planning Workshop. Reading, 14/15 October 2003 UK

- DROBINSKI, B., S. BASTIN, J.L. CACCIA, B. CAMPISTRON, U. CORSMEIER, A.M. DABAS, P. DELVILLE, V. GUÉNARD, F. LOHOU, A. PROTAT, O. REITEBUCH, C. WERNER
Combined observations by airborne Doppler lidar and UHF-wind profilers of the 28 June 2001 Mistral event during the ESCOMPTE field experiment
Int. Symp. on Tropospheric Profiling, Leipzig 14.-20.09.03.
- FIEBIG, M.; GONZALEZ, E.; NOVOA, E.; KALTHOFF, N.; PIZARRO, C.
Energy and water balance studies in the arid area of Coquimbo (Chile).
Simposio de Cambio Global, Punta Arenas, RCH, 23-25 Enero, 2003
- FÖRSTNER J.
Large-eddy turbulence parametrizations in KAMM2
LM-Anwender-Seminar, Langen 31. – 02. April 2003
- FÖRSTNER J.
Large-eddy simulation of the Flow Around a Cubical Building Block Using a Compressible Atmospheric Model
Joint Assembly of the European Geophysical Society (EGS), the American Geophysical Union (AGU) and the European Union of Geosciences (EUG), Nice, F, April 6-11, 2003
- GUDE, M., HAUCK, C., KNEISEL, C., KRAUSE, S., MOLEND, R., RUZICKA, V. & ZACHARDA, M.
Evaluation of permafrost conditions in non-alpine scree slopes in central Europe by geophysical methods.
Joint Assembly of the European Geophysical Society (EGS), the American Geophysical Union (AGU) and the European Union of Geosciences (EUG), Nice, F, April 6-11, 2003
- GUDE, M., DIETRICH, S., MÄUSBACHER, R., HAUCK, C., MOLEND, R., RUZICKA, V. & ZACHARDA, M.
Permafrost conditions in non-alpine scree slopes in central Europe.
Proceedings 8th Int. Conf. On Permafrost, Zurich, 2003, 331-336.
- HANDWERKER, J.,
Statistical Analyses on Radar Observations of Thunderstorm
ISTP 2003 (Int. Symp. on Tropospheric Profiling)
- HASEL, M., CORSMEIER U., CH. KOTTMEIER
Vertical Transport by Convective Cells over Complex Terrain
- HAUCK, C., D. VONDER MÜHLL
Permafrost monitoring using time-lapse resistivity tomography
Proceedings 8th Int. Conference on Permafrost, Zürich, 2003, 361-366
5th ESCOMPTE Workshop, Toulouse, 20. – 28. Mai 2003
- HAUCK, C.,
Sequentielle Inversion von Geoelektrik- und Seismiktomographie zur Erkundung von Bodeneis.
Workshop Tomographie und Inversion, Neustadt an der Weinstraße, 9.-12.November 2003
- HAUCK, C.; GUDE, M.; KNEISEL, C.; MOLEND, R.
Looking for ground ice in lo-altitude scree slopes in central Europe using DC resistivity and refraction seismic tomography.
63.Jahrestagung der Deutschen Geophysikalischen Gesellschaft in Verbindung mit der Frühjahrstagung der Arbeitsgemeinschaft Extraterrestrische Forschung, Jena, 23.-28.Februar 2003
- HAUCK, C.
Atmosphere-ground monitoring and modelling of thaw processes in Alpine permafrost regions. Internat.Conf.on Alpine Meteorology and the Mesoscale Alpine Programme Meeting (ICAM/MAP2003), Brig, CH, May 19-23, 2003
- HAUCK, C., KNEISEL, C., BAUMANN, T. (2003)
Monitoring von Gefrier- und Tauzyklen zur Modellierung von Wechselwirkungen zwischen Atmosphäre und Boden in Gebirgsregionen.
Deutscher Geographentag, 28.9.-4.10.2003, Bern, Switzerland.
- HELBIG, N., VOGEL, H., VOGEL, B., FIEDLER, F.
Numerical Modelling of Pollen Dispersion on the Regional Scale
European Aerosol Conf.(EAC 2003), Madrid, E, August 31 - September 5, 2003
- HÖLLER, H., K. FRIEDRICH, O., REITEBUCH, J. SELTMANN, U. CORSMEIER
Vertical Transport in Thunderstorms in the Northern Alps
Internat.Conf.on Alpine Meteorology and the Mesoscale Alpine Programme Meeting (ICAM/MAP2003), Brig, CH, May 19-23, 2003
- KALTHOFF N., M. KUNZ, M. EISEMANN, CH. KOTTMEIER
A Case Study of Deep Convection Based on VERTIKATOR-Measurements and Comparison with DWD-LM Analysis Data
Internat.Conf.on Alpine Meteorology and the Mesoscale Alpine Programme Meeting (ICAM/MAP2003), Brig, CH, May 19-23, 2003
- KALTHOFF, N.,
The Influence of soil, Vegetation and Orography

on the Atmosphere.

Centro de Estudios Avanzados en Zonar Aridas (CEAZA), La Serena, RCH, 8.Oktober 2003

KALTHOFF, N.

Einsatzgebiete von Ultraschallanemometern in der Meteorologie.

8. DFMRS-Fachtagung 12.-13.02.04 Bremen

KOHLER, M., M. URIARTE MUNOZ, N. KALTHOFF

The Use of Databases for Meteorological Data Analysis in Chile

Universität La Serena, Chile, 14.11.2003

KOTTMEIER, CH.

Übersicht zu Wettergefahren

HGF-Workshop „Konzertiertes Handeln bei Naturkatastrophen“, Potsdam 16.1.2003

KOTTMEIER, CH.; HASEL, M.; CORSMEIER, U.; KALTHOFF, N.

Structure of convective turbulence and turbulent fluxes over complex terrain during VERTIKATOR. Internat.Conf.on Alpine Meteorology and the Mesoscale Alpine Programme Meeting (ICAM/MAP2003), Brig, CH, May 19-23, 2003

KOTTMEIER, CH.

Die Makrowelt – Gefahren von Wetterkatastrophen in der Region Karlsruhe

Physik vom Kleinsten zum Größten, Universität im Rathaus, 8.7.2003

KOTTMEIER, CH., CORSMEIER, U.

Possible Contributions of IMK to CSIP

Convective Storms Initiation Project (CSIP), Planning Workshop, October 14/15, 2003

KUNZ, M., CH. KOTTMEIER

Simulation of heavy precipitation with long duration over complex terrain

Joint Assembly of the European Geophysical Society (EGS), the American Geophysical Union (AGU) and the European Union of Geosciences (EUG), Nice, F, April 6-11, 2003

KUNZ, M., CH. KOTTMEIER

A diagnostic model for orographic rainfall and simulations of climatological heavy rainfall distributions

Internat. Conf. on Alpine Meteorology and the Mesoscale Alpine Programme Meeting (ICAM/MAP2003), Brig, CH, May 19-23, 2003

JAYA, M., HAUCK, C., KAUFFMANN, M.

The postgraduate college „natural disasters“ at the University of Karlsruhe.

Joint Assembly of the European Geophysical Society (EGS), the American Geophysical Union (AGU) and the European Union of Geosciences (EUG), Nice, F, April 6-11, 2003

MAURER, H.R., HAUCK, C., MUSIL, M., GREEN, A.G.

Multidisciplinary studies on alpine rock glaciers. Joint Assembly of the European Geophysical Society (EGS), the American Geophysical Union (AGU) and the European Union of Geosciences (EUG), Nice, F, April 6-11, 2003

NESTER K., CH. KOTTMEIER, H.J. PANITZ
Meso-scale chemical weather predictions based on a model network

Joint Assembly of the European Geophysical Society (EGS), the American Geophysical Union (AGU) and the European Union of Geosciences (EUG), Nice, F, April 6-11, 2003

PLAPP, T., HAUCK, C.

Das interfakultative Graduiertenkolleg Naturkatastrophen,

4. Forum Katastrophenvorsorge (Early Warning), July 2003, München, Germany.

RIEMER, N., B. VOGEL, H.VOGEL, CH. KOTTMEIER

Modelling Aerosol Influences on Temperature and Visibility as a Module for Chemical Weather Forecasts

Joint Assembly of the European Geophysical Society (EGS), the American Geophysical Union (AGU) and the European Union of Geosciences (EUG), Nice, F, April 6-11, 2003

RIEMER N., H. VOGEL, B. VOGEL

Modelling of the Ageing Process of Soot.

European Aerosol Conf.(EAC 2003), Madrid, E, August 31 - September 5, 2003

SCHMITT, C. KOTTMEIER, CH., DRINKPATER, M.

Atlas of Sea Ice Drift in the Antarctic
Joint Assembly of the European Geophysical Society (EGS), the American Geophysical Union (AGU) and the European Union of Geosciences (EUG), Nice, F, April 6-11, 2003

SCHMOECKEL, J., KOTTMEIER, CH.

Orographic influence on storm damage to forests in mountain areas by the example of windstorm "Lothar"

Joint Assembly of the European Geophysical Society (EGS), the American Geophysical Union (AGU) and the European Union of Geosciences (EUG), Nice, F, April 6-11, 2003

SCHUDEL, L., HAUCK, C., HOELZLE, M.

Permafrost monitoring on Schilthorn using geophysical methods and energy balance measurements.

Joint Assembly of the European Geophysical Society (EGS), the American Geophysical Union (AGU) and the European Union of Geosciences

(EUG), Nice, F, April 6-11, 2003

SEIFERT, A.; BERTRAM, I.; BEHENG, K.D.
 Cloud resolving simulations and radar measurements of mid-latitude convective storms.
 Joint Assembly of the European Geophysical Society (EGS), the American Geophysical Union (AGU) and the European Union of Geosciences (EUG), Nice, F, April 6-11, 2003

SEIFERT, A.; KHAIN, A.; BEHENG, K.D.
 Simulation of aerosol effects on mixed-phase deep convection: a comparison of spectral and two-moment parameterized microphysics.
 Joint Assembly of the European Geophysical Society (EGS), the American Geophysical Union (AGU) and the European Union of Geosciences (EUG), Nice, F, April 6-11, 2003

STACHEDER, M.; SCHLAEGER, S.; BRANDELIK, A.; NORGRÉN, M.
 A new in-situ sensor for large-scale snow cover monitoring: I. Principle, design, and air gap correction.
 Internat.Symp.on Snow and Avalanches, Davos, CH, June 2-6, 2003

VOGEL, H., N. RIEMER, B. VOGEL, B. SCHELL
 The Relative Importance of Temperature on Secondary Organic Aerosols in the Boundary Layer - Numerical Simulations
 Joint Assembly of the European Geophysical Society (EGS), the American Geophysical Union (AGU) and the European Union of Geosciences (EUG), Nice, F, April 6-11, 2003

VOGT, U., G. BAUMBACH, M. KOHLER, U. CORSMEIER
 Determination of traffic emissions by balancing measurements at the highway BAB656.
 ALS-Jahresbericht 2002/2003, Fachthema 2002: Feinstäube in Technik und Umwelt, Fachthema 2003: Emissionen von Luftschadstoffen: Messung-Berechnung-Überwachung-Handel.

WAGNER, U., HAUCK, C.
 Combining and interpreting geoelectric and seismic surveys in permafrost studies using fuzzy logic.
 Joint Assembly of the European Geophysical Society (EGS), the American Geophysical Union (AGU) and the European Union of Geosciences (EUG), Nice, F, April 6-11, 2003