

**Numerische Untersuchungen zur  
Niederschlagsbeeinflussung im östlichen  
Mittelmeerraum: Fallstudie für eine reale  
Land-See-Wind-Zirkulation**

Diplomarbeit im Fach Meteorologie

Simon Jandt

INSTITUT FÜR METEOROLOGIE UND KLIMAFORSCHUNG  
KARLSRUHER INSTITUT FÜR TECHNOLOGIE (KIT)



# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einleitung</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>Das COSMO-Modell</b>	<b>3</b>
2.1	Der Grundzustand und das Koordinatensystem . . . . .	3
2.2	Horizontale und vertikale Gitterstruktur . . . . .	5
2.3	Numerische Integration . . . . .	7
2.4	Prozesse in den Wolken . . . . .	7
2.5	Das Zwei-Momenten-Schema . . . . .	8
2.5.1	Nukleation von Wolkentropfen . . . . .	11
2.5.2	Nukleation von Wolkeneis . . . . .	11
2.5.3	Gefrieren von Wolkentropfen . . . . .	12
2.5.4	Wasserdampfdeposition an Wolkeneis / Schnee / Graupelpartikeln . . . . .	12
2.5.5	Selbsteinfang von Wolkeneis und Schnee, Einfang von Wolkeneis durch Schnee; Selbsteinfang von Graupel, Einfang von Wolkeneis und Schnee durch Graupel . . . . .	12
2.5.6	Nasses Wachstum von Graupel zu Hagel, Einfang von Wolkeneis und Schnee durch Hagel . . . . .	12
2.5.7	Bereifen von Wolken- und Regentropfen an Wolkeneis und Schnee . . . . .	13
2.5.8	Bereifen von Wolken- und Regentropfen an Graupel und Hagel . . . . .	13
2.5.9	Gefrieren von Regentropfen zu Wolkeneis, Graupel oder Hagel . . . . .	14
2.5.10	Schmelzen von Eis , Schnee, Graupel und Hagel . . . . .	14
2.5.11	Verdunsten von Graupel (33), Hagel (53) und Schnee (32) . . . . .	14
2.5.12	Selbsteinfang von Wolkentropfen und Autokonversion (34), Akkreszenz (35) und Selbsteinfang von Regentropfen . . . . .	14
<b>3</b>	<b>Einstellungen für die Modellläufe</b>	<b>17</b>
3.1	Die Wetterlage des Simulationszeitraumes . . . . .	18
3.2	Das Modellgebiet . . . . .	19
3.3	Parameterwahl im Zwei-Momenten-Schema . . . . .	20
3.4	Einteilung der Umwandlungsprozesse in Gruppen . . . . .	23
<b>4</b>	<b>Ergebnisse</b>	<b>25</b>
4.1	Vergleich des 1. mit dem 3. Niederschlagszeitraum . . . . .	25
4.2	Niederschlagsverteilung im Zeitraum 7.1.2007 4:30 Uhr UTC bis 7.1.2007 8:30 Uhr UTC	29
4.3	Masse der in der Atmosphäre befindlichen Partikel . . . . .	30
4.4	Umwandlungsprozesse bei niedriger CCN-Konzentration . . . . .	31
4.5	Läufe mit höherer CCN-Konzentration von Aerosol . . . . .	39
<b>5</b>	<b>Zusammenfassung</b>	<b>51</b>
<b>A</b>	<b>Anhang</b>	<b>55</b>

---

A.1	Umwandlungsprozesse und deren Einteilung in Gruppen . . . . .	55
A.2	10m-Windfeld und 2m-Temperatur und 2m-Taupunkttemperatur . . . . .	61
A.3	Bodenkarten vom Deutschen Wetterdienst (DWD) im Zeitraum der Modellläufe . . . . .	65
A.4	Niederschlagsverteilung für den Zeitabschnitt 5h – 9h für niedrige CCN-Konzentration	67
A.5	Wind- und Temperaturfeld in 2250m Höhe für 19h . . . . .	68
A.6	Niederschlagsverteilung für den Zeitraum 16h 30min – 20h 30min für höhere CCN-Konzentrationen . . . . .	69
A.7	Umwandlungsprozesse bei hohen und sehr hohen CCN-Konzentrationen . . . . .	72
A.7.1	Wasserdampf . . . . .	73
A.7.2	Wolkentropfen . . . . .	74
A.7.3	Wolkeneis . . . . .	75
A.7.4	Schnee . . . . .	76
A.7.5	Graupel . . . . .	77
A.7.6	Regentropfen . . . . .	78
A.7.7	Hagel . . . . .	79

# 1 Einleitung

Der Mensch ist auf die Verfügbarkeit von Wasser angewiesen. Durch die steigende Bevölkerung und die veränderte Landnutzung kommt es in vielen Regionen der Erde zu Wasserknappheit. Entweder bleiben Niederschläge aus, oder der vorhandene Niederschlag reicht nicht mehr, um die Einwohner und die bewirtschafteten Flächen mit ausreichend Wasser zu versorgen. Nicht jeder Niederschlag ist aber erwünscht. In schweren Gewittern können Hagelunwetter die Ernte auf den Feldern vernichten, und Starkniederschläge können Überschwemmungen auslösen.

Schaefer (1946) und Vonnegut (1947) haben entdeckt, dass durch Zugabe von Eis das in einer Wolke enthaltene unterkühlte Wasser gefriert. Seit ihrer Entdeckung wurden unterschiedliche Konzepte entwickelt, in denen durch Einbringen von Partikeln in Wolken Niederschlag erhöht bzw. modifiziert werden soll. Diese Konzepte basieren zum Einen auf Beobachtungen der großräumigen Wetterlage und zum Anderen auf einer Annahme der ablaufenden Prozesse in den Wolken (Bruitjes, 1999; Cotton und Pielke, 1995). Die ersten Konzepte waren das Impfen von Mischwolken, womit das Einbringen von Eiskeimen in Wolken, in denen unterkühlte Tropfen und Eispartikel koexistieren, gemeint ist. Es wird vor allem an hochreichenden konvektiven Wolken durchgeführt. Dabei wird zwischen dem statischen und dem dynamischen Impfen unterschieden (Braham, 1986).

Bei dem statischen Impfen soll in der Wolke ausgebrachtes Trockeneis oder Silberjodid mit vorhandene unterkühlten Tropfen Eiskristalle bilden, die durch Kollisionen anwachsen. (Smith and al., 1984). Durch Sedimentation in wärmere Bereiche sollen diese Partikel schmelzen und schließlich als flüssiger Niederschlag auf den Erdboden treffen. Beim dynamischen Impfen werden in Mischwolken große Mengen an Eiskeimen ausgebracht, um die Tropfen möglichst schnell gefrieren zu lassen. Die dabei freiwerdende latente Wärme lässt in der Wolke Bereiche mit Aufwinden entstehen. Dadurch kann die Wolke stärker wachsen und mehr Wasserdampf aus der Atmosphäre entnehmen (Simpson et al., 1967). Ein weiterer Ansatz der Niederschlagsbeeinflussung ist das Impfen von warmen Wolken (hygroskopisches Impfen). Hierbei werden Aerosole in die Atmosphäre eingebracht, an denen Wolkentropfen nukleieren sollen. Das hygroskopische Impfen ist nicht auf eine Wolkenart oder bei der Wahl der Aerosole beschränkt. Bei den meisten Untersuchungen soll durch die eingebrachten Kondensationskerne (CCN) die Nukleation von Wolkentropfen so modifiziert werden, dass sich deren Größenverteilung soweit ändert, dass die Koaleszenz von Tropfen beschleunigt wird und früher Niederschlag fällt. Wie effektiv Niederschlag gebildet wird, hängt von der Größe und Anzahldichte der Kondensationspartikel ab (Lahav, 2005). Die am häufigsten verwendeten Impfverfahren sind das Zerstäuben von Wasser, das Einbringen von Salzlösungen und das Ausbringen von fein gemahlenem Salz (Biswas und Dennis 1971; Murty 1989; Czys und Bruitjes 1994). Häufig werden in diesen Untersuchungen Salzpartikel mit  $10\ \mu\text{m}$  Durchmesser verwendet, an denen große Wolkentropfen entstehen. Die optimale Größe der Impfpartikel hängt von der Aufwindgeschwindigkeit, der Höhe der Wolkenuntergrenze und von der Wolkenhöhe ab. Außerdem ist sie abhängig von dem Bereich in der Wolke, in dem geimpft wird (Rokicki und Young, 1978).

Eine Weiterentwicklung des hygroskopischen Impfens ist das Einbringen von Salzpartikeln durch das Abbrennen von Fackeln, die an den Tragflächen von Flugzeugen angebracht werden. Bei diesem Verfahren entstehen Partikel von etwa  $0,5\ \mu\text{m}$  (Bruitjes, 1999). Im Vergleich zu den übrigen Verfahren braucht man bei diesem weniger Impfmasse.

Von den vielen Experimenten, die in der Niederschlagsbeeinflussung durchgeführt wurden, haben nur

einige wenige gezeigt, dass durch Impfen in Wolken mehr Niederschlag produziert wurde. In einigen Fällen wurde der Niederschlag sogar reduziert. Es gibt einige Hinweise, dass bei winterlichen Wetterlagen über Gebirgsketten durch Impfen der Niederschlag erhöht werden kann (WMO, 2009).

Noppel et al. (2009b) hat an einer winterlichen Wetterlage über dem östlichen Mittelmeerraum den Einfluss von hygroskopischem Impfen auf den Niederschlag numerisch untersucht. Es wurden semi-idealisierte Simulationen durchgeführt, die sich auf eine Wetterlage bezogen, bei der ein Tief über Zypern wetterbestimmend war. Diese Wetterlage hat in den Wintermonaten für die Region den höchsten Anteil am Gesamtniederschlag (Sasse, 2004). In den Wintermonaten bildet sich aufgrund des Temperaturgegensatzes zwischen der kalten Landoberfläche und dem wärmeren Mittelmeer eine Land-See-Windzirkulation aus. Da sie durch das die Wetterlage bestimmende Zyperntief von einem Westwind großräumig überlagert wird, bildet sich bodennah 10 bis 50 km von der Küste entfernt eine Konvergenzzone aus. Dort bilden sich regelmäßig Wolken, die meist zu Niederschlag über See führen. Noppel et al. (2009b) untersuchten nun, ob es möglich ist, die Niederschlagsentwicklung so zu verzögern, dass ein Großteil des Niederschlags der durch die Konvergenzzone entstehenden Wolken auf das Land verlagert wird. Die Simulationen zeigen, dass durch das Impfen der Wolken in Abhängigkeit von der CCN-Konzentration der Aerosole der Anteil des Niederschlags über Land erhöht werden kann. Dayan et al. (2008) zeigen, dass während dieser Wetterlagen die Konzentration der Aerosole durch Transporte von Saharastaub stark ansteigt.

In der vorliegenden Arbeit wird – im Gegensatz zu den idealisierten Simulationen von Noppel et al. (2009b) – eine reale Situation numerisch behandelt. Basierend auf den Einstellungen für das Impfen sowie für die CCN-Konzentrationen (Noppel et al., 2009b) wird in dieser Arbeit eine ähnliche Wetterlage für einen realen Fall numerisch untersucht. Dafür wird das COSMO-Modell des Deutschen Wetterdienstes (Schättler, Doms und Schraff, 2009), kombiniert mit dem 2-Momenten-Schema zur Parametrisierung der Wolkenmikrophysik von Seifert und Beheng (2006), verwendet. Der Schwerpunkt dieser Arbeit liegt in der Herausarbeitung der Unterschiede zwischen den Umwandlungsprozessen der sechs definierten Partikelklassen (Wolkentropfen, Regentropfen, Wolkeneis, Schnee, Graupel und Hagel) sowie Wasserdampf für die geimpften und ungeimpften Läufe bei unterschiedlicher Konzentration von Impfparkeln. In Kapitel 2 werden die Grundgleichungen des COSMO-Modells und ihre numerische Umsetzung samt Beschreibung von Wolkenprozessen präsentiert. Es folgen technische Details über die Initialisierung mit meteorologischen Daten und die Simulation des Impfprozesses (Kapitel 3). Kapitel 4 umfasst die Ergebnisse in Form von Quantifizierungen von mikrophysikalischen Umwandlungsraten. Zum Schluß wird eine Zusammenfassung präsentiert.

## 2 Das COSMO-Modell

**COSMO** steht für „Consortium for small-scale modelling“. Das COSMO-Modell ist ein mesoskali- ges Modell, mit dem eine kompressible, nichthydrostatische Strömung in einer feuchten Atmosphäre beschrieben wird. Die folgende Beschreibung des COSMO-Modells hält sich in weiten Teilen an die Dokumentation von Schättler, Doms und Schraff (2009).

### 2.1 Der Grundzustand und das Koordinatensystem

Die Zustandsgrößen werden im COSMO-Modell als Summe aus einem höhenabhängigen Referenzwert und einer zeit- und ortsabhängigen Störung dargestellt. Die Einführung eines Grundzustandes vermindert numerische Fehler, die bei der Berechnung des Druckgradienten auf krummlinigen, geländefolgen- den Koordinaten auftreten. Der Grundzustand definiert eine zeitunabhängige, trockene Atmosphäre, die sich im hydrostatischem Gleichgewicht befindet, und die horizontal homogen und stratiform geschichtet ist. Der Druck  $p$ , die Temperatur  $T$  und die Dichte  $\rho$  können dargestellt werden durch

$$\begin{aligned} T(x, y, z, t) &= T_0(z) + T'(x, y, z, t) \\ p(x, y, z, t) &= p_0(z) + p'(x, y, z, t) \\ \rho(x, y, z, t) &= \rho_0(z) + \rho'(x, y, z, t) \end{aligned} \quad (2.1)$$

$T_0(z)$ ,  $p_0(z)$  und  $\rho_0(z)$  hängen über die hydrostatische Approximation

$$\frac{\partial p_0}{\partial z} = -g\rho_0 = -\frac{gp_0}{R_d T_0} \quad (2.2)$$

und der Gleichung für ideale Gase zusammen. Das vertikale Profil der Temperatur  $T_0(z)$  kann frei ge- wählt werden, da die Modellgleichungen nicht bezüglich des Grundzustandes linearisiert werden. Die Zunahme der Temperatur wird in Bezug zu  $\ln(p)$  aus praktischen Gründen als konstant angenommen (Dudhia, 1993)  $\partial T_0 / \partial \ln p_0 = \beta$ . So liefert die Integration der hydrostatischen Gleichung mit den Randbedingungen  $p_{SL} = p_0(z=0)$  und  $T_{SL} = T_0(z=0)$  im Meeresniveau  $z=0$  das Vertikalprofil des Referenzzustandes:

$$p_0(z) = \begin{cases} p_{SL} \exp \left\{ -\frac{T_{SL}}{\beta} \left( 1 - \sqrt{1 - \frac{2\beta gz}{R_d T_{SL}^2}} \right) \right\} & \text{wenn } \beta \neq 0 \\ p_{SL} \exp \left\{ -\frac{gz}{R_d T_{SL}} \right\} & \text{wenn } \beta = 0 \end{cases} \quad (2.3)$$

$$T_0(z) = T_{SL} \sqrt{1 - \frac{2\beta gz}{R_d T_{SL}^2}} \quad (2.4)$$

Für die drei Größen, die den Grundzustand bestimmen,  $p_{SL}$ ,  $T_{SL}$  und  $\beta$ , benutzen wir die Grundeinstel- lungen  $p_{SL} = 1000hPa$ ,  $T_{SL} = 288.15K$  und  $\beta = 42K$ .

Die Modellgleichungen sind im rotierten Koordinatensystem formuliert, wobei  $\lambda$  die geographische Länge und  $\phi$  die geographische Breite ist. An den geographischen Polen konvergieren die Meridiane, während am Äquator die Meridiane parallel sind. Da man für die numerischen Berechnungen ein quasi-rechtwinkeliges Gebiet braucht, wird im Modell der Nordpol so verschoben, dass der Äquator durch das Modellgebiet führt. In der Vertikalen benutzen wir eine generalisierte geländefolgende Höhenkoordinate  $\zeta$ , die eine eindeutige Funktion der geometrischen Höhe  $z$  ist. Da  $\zeta$  keinerlei Zeitabhängigkeit besitzt, spannen  $\lambda, \phi, \zeta$  ein formtreues Koordinatensystem auf, und die Flächen von konstantem  $\zeta$  sind ortsfest. Dagegen zeigen druckbasierte Koordinatensysteme, welche in den meisten hydrostatischen Modellen benutzt werden, keine ortsfesten Flächen der vertikalen Raumkoordinate auf, da diese von dem sich ändernden Bodendruck abhängen. Die Transformation der Modellgleichungen aus dem orthogonalen  $(\lambda, \phi, z)$ -Systems in das nicht-orthogonale geländefolgende  $(\lambda, \phi, \zeta)$ -System wird durch folgende drei Elemente der inversen Jacobi-Matrix  $\mathcal{J}^z$  definiert.

$$J_\lambda \equiv J_{13}^z = \left( \frac{\partial z}{\partial \lambda} \right)_\zeta, \quad J_\phi \equiv J_{23}^z = \left( \frac{\partial z}{\partial \phi} \right)_\zeta, \quad J_\zeta \equiv J_{33}^z = \left( \frac{\partial z}{\partial \zeta} \right) = -\sqrt{G} \quad (2.5)$$

Man muss beachten, dass der Wert von der  $\zeta$ -Koordinate mit abnehmender Höhe  $z$  zunimmt. Daher ist  $J_\zeta$  immer negativ und identisch mit dem negativen absoluten Wert ( $\sqrt{G} = |\det(\mathcal{J}^z)|$ ) der Determinante der inversen Jacobi Matrix.

Nach der Transformation der Grundgleichungen in das von  $(\lambda, \phi, \zeta)$  aufgespannte Koordinatensystem und der Berücksichtigung des definierten Grundzustandes erhalten wir folgende prognostische Gleichungen für die drei Komponenten des Windvektors  $u$ ,  $v$  und  $w$ , für den Stördruck  $p'$ , die Temperatur  $T$ , die Luftfeuchte  $q^v$  sowie die Größen für die flüssigen und eisförmigen Beimischungen  $q^l$  bzw.  $q^f$ :

$$\begin{aligned} \frac{\partial u}{\partial t} + \mathbf{v} \cdot \nabla u - \frac{uv}{a} \tan \phi - fv &= -\frac{1}{\rho a \cos \phi} \left( \frac{\partial p'}{\partial \lambda} + \frac{J_\lambda}{\sqrt{G}} \frac{\partial p'}{\partial \zeta} \right) + M_u \\ \frac{\partial v}{\partial t} + \mathbf{v} \cdot \nabla v - \frac{u^2}{a} \tan \phi + fu &= -\frac{1}{\rho a} \left( \frac{\partial p'}{\partial \phi} + \frac{J_\phi}{\sqrt{G}} \frac{\partial p'}{\partial \zeta} \right) + M_v \\ \frac{\partial w}{\partial t} + \mathbf{v} \cdot \nabla w &= \frac{1}{\rho \sqrt{G}} \frac{\partial p'}{\partial \zeta} + B + M_w \\ \frac{\partial p'}{\partial t} + \mathbf{v} \cdot \nabla p' - g \rho_0 w &= -(c_{pd}/c_{vd}) p D \\ \frac{\partial T}{\partial t} + \mathbf{v} \cdot \nabla T &= -\frac{p}{\rho c_{vd} D} + Q_T \\ \frac{\partial q^v}{\partial t} + \mathbf{v} \cdot \nabla q^v &= -(S^l + S^f) + M_{q^v} \\ \frac{\partial q^{l,f}}{\partial t} + \mathbf{v} \cdot \nabla q^{l,f} + \frac{1}{\rho \sqrt{G}} \frac{\partial p_{l,f}}{\partial \zeta} &= S^{l,f} + M_{q^{l,f}} \end{aligned} \quad (2.6)$$

Hierbei ist die Kontinuitätsgleichung durch eine Gleichung für die Druckstörung  $p'$  ersetzt worden. In Gl. 2.6 ist  $a$  der Radius der Erde,  $c_{pd}$  und  $c_{vd}$  sind die spezifische Wärmen für trockene Luft bei konstantem Druck bzw. bei konstantem Volumen,  $g$  ist die Schwerebeschleunigung,  $f$  ist der Coriolisparameter,  $R_v$  und  $R_d$  sind die Gaskonstanten für Wasserdampf und trockene Luft.  $\rho$  ist die Dichte von feuchter

Luft, die als diagnostische Variable aus der Gasgleichung abgeleitet wird.

$$\rho = pR_d(1 + (R_v/R_d - 1) q^v - q^l - q^f)T^{-1} \quad (2.7)$$

Hierbei ist  $q^v$  die spezifische Feuchte,  $q^l$  beschreibt den spezifischen Gesamtwassergehalt der Wolkentropfen bzw. Regentropfen und  $q^f$  beschreibt den spezifischen Gesamtwassergehalt von Wolkeneis, Schnee und Graupel. Die zugehörigen Niederschlagsflussdichten sind aufgeführt durch  $P_l$  und  $P_f$ . Die Terme  $M_\Phi$ , welche in den drei Komponenten der Impulsbilanzgleichung und in den Bilanzgleichungen der Feuchte  $q^v$  sowie der flüssigen und festen Beimischungen  $q^l$  und  $q^f$  vorkommen, berücksichtigen den Einfluss von subskaligen Prozessen wie z. B. Konvektion, und  $Q_T$  fasst die durch diese Prozesse verursachten diabatischen Wärmeraten zusammen. In den Gleichungen für die Feuchtevariablen werden sämtliche Quellen und Senken, die aufgrund von mikrophysikalischen Prozessen auftreten, in  $S^l$  und  $S^f$  zusammengefasst. Die Berechnung aller Variablen, die auf subskaligen Prozessen basieren, übernehmen physikalische Parametrisierungsschemen.

Der Term  $B$  aus der vertikalen Komponente der Impulsbilanzgleichung ist die Auftriebsbeschleunigung, die durch

$$B = g \frac{\rho_0}{\rho} \left\{ \frac{T - T_0}{T} - \frac{p'T_0}{p_0T} + \left( \frac{R_v}{R_d} - 1 \right) q^v - q^l - q^f \right\} \quad (2.8)$$

beschrieben wird. Der Advektionsoperator ist in geländefolgenden Koordinaten wie folgt definiert:

$$\mathbf{v} \cdot \nabla = \frac{1}{a \cos \varphi} \left( u \frac{\partial}{\partial \lambda} + v \cos \varphi \frac{\partial}{\partial \varphi} \right) + \dot{\zeta} \frac{\partial}{\partial \zeta} \quad (2.9)$$

Die kontravariante Vertikalgeschwindigkeit  $\dot{\zeta}$  ist im  $\zeta$ -System gegeben als

$$\dot{\zeta} = \frac{1}{\sqrt{G}} \left( \frac{J_\lambda}{a \cos \varphi} u + \frac{J_\varphi}{a} v - w \right) \quad (2.10)$$

In der Gleichung für die Druckstörung  $p'$  beschreibt  $D$  die Divergenz des dreidimensionalen Windfeldes:

$$D = \frac{1}{a \cos \varphi} \left\{ \frac{\partial u}{\partial \lambda} + \frac{J_\lambda}{\sqrt{G}} \frac{\partial u}{\partial \zeta} + \frac{\partial}{\partial \varphi} (v \cos \varphi) + \cos \varphi \frac{J_\varphi}{\sqrt{G}} \frac{\partial v}{\partial \zeta} \right\} - \frac{1}{\sqrt{G}} \frac{\partial w}{\partial \zeta} \quad (2.11)$$

Bei der Herleitung der prognostischen Gleichung für den Stördruck aus der Kontinuitätsgleichung wird ein Quellterm für die diabatischen Wärmeübergänge vernachlässigt. Für die meisten meteorologischen Anwendungen ist dieser Term sehr viel kleiner als der Einfluss durch den Divergenzterm. Auch viele andere nichthydrostatische Modelle machen von dieser Approximation Gebrauch.

## 2.2 Horizontale und vertikale Gitterstruktur

Zur Lösung der Modellgleichungen (2.6) verwendet man die Finite-Differenzen-Methode. Mit dieser Technik werden raumabhängige Differentialoperatoren durch geeignete finite Differenzenoperatoren ersetzt. Über die Zeit wird mit dem festen Zeitschritt  $\Delta t$  integriert.

Das geländefolgende Koordinatensystem mit der generalisierten Vertikalkoordinate  $\zeta$  bietet die Möglichkeit, das irreguläre Gitter, das aus dem geländefolgenden System im physikalischen Raum resultiert, in ein rechtwinkeliges und übliches Modellgitter zu überführen. Die diskreten Koordinatenwerte sind

$\Delta \lambda$  : Maschenweite in Richtung der Längengrade

$\Delta \varphi$  : Maschenweite in Richtung der Breitengrade

$\Delta \zeta$  : Maschenweite in  $\zeta$  Richtung ( $\Delta \zeta = 1$ )

Auf ihnen ist das Modellgebiet basiert. Zur Vereinfachung wird die vertikale Maschenweite auf 1 gesetzt. Der zugrunde liegende dreidimensionale  $(\lambda, \varphi, \zeta)$ -Raum, in dem die Modellgleichungen gelöst werden soll, wird durch eine finite Anzahl von Gitterpunkten  $(i, j, k)$  definiert.  $i$  stellt die Anzahl der Gitterpunkte in  $\lambda$ -Richtung,  $j$  in  $\varphi$ -Richtung und  $k$  in  $\zeta$ -Richtung dar. Die Lage eines Gitterpunktes im Modellgebiet ist definiert durch

$$\begin{aligned} \lambda_i &= \lambda_0 + (i-1)\Delta\lambda, i = 1, \dots, N_\lambda \\ \varphi_j &= \varphi_0 + (j-1)\Delta\varphi, j = 1, \dots, N_\varphi \\ \zeta_k &= 1, k, k = 1, \dots, N_\zeta \end{aligned} \quad (2.12)$$

$N_\lambda$  steht für die Anzahl der Gitterpunkte in  $\lambda$ -Richtung,  $N_\varphi$  steht für die Anzahl von Gitterpunkten in  $\varphi$ -Richtung und  $N_\zeta$  für die Anzahl der Gitterpunkte in  $\zeta$ -Richtung.  $\lambda_0$  und  $\varphi_0$  definieren die süd-westliche Ecke des Modellgebietes in Bezug auf die rotierten geographischen Koordinaten  $(\lambda, \varphi)$ . So liegen die Gitterpunkte mit  $i = 1$  bzw.  $i = N_\lambda$  am westlichen bzw. dem östlichen Rand des Modellgebietes. Entsprechend gilt für den nördlichen bzw. Rand des Modellgebietes  $j = 1$  bzw.  $j = N_\varphi$ .

Jeder Gitterpunkt  $(i, j, k)$  repräsentiert den Mittelpunkt einer Gitterbox, deren Volumen durch die Kantenlängen  $\Delta \lambda, \Delta \varphi$  und  $\Delta \zeta$  vorgegeben wird. Die Seitenflächen einer Gitterbox befinden sich immer jeweils auf halber Strecke zu dem Gitterpunkt einer benachbarten Gitterbox, z.B. bei  $\lambda_{i\pm 1/2}, \varphi_{j\pm 1/2}, \zeta_{k\pm 1/2}$ . Entlang der Vertikalkoordinate werden die Seitenflächen einer Gitterbox Halblevel genannt, während sich die Level in den Mittelpunkten der Gitterboxen befinden. Von den Variablen der Modellgleichungen werden nach der Vorlage eines Arakawa-C/Lorenz-Gitters die skalaren Größen (Temperatur-, Druck- und Feuchtevariablen) an den Mittelpunkten der Gitterboxen definiert, während die vektoriellen Größen (z.B. die Windgeschwindigkeit) bzw. deren Komponenten in Normalenrichtung zu den jeweiligen Seitenflächen definiert werden. An den Rändern des Modellgebietes wird das Modellgitter an äußere Antriebsdaten, die üblicherweise in einem groberen Gitter als das Modellgitter vorliegen, gekoppelt. Hier kommt es bei der Interpolation von den Modellvariablen auf das feinere Modellgitter zu Fehlern. Um diese Bedingungen an den Außengrenzen des Modellgebietes zu berücksichtigen, und um die Aufteilung des Modellgebietes zur Berechnung an Parallelrechnern zu vereinfachen, verkleinert man die horizontalen Ausmaße des Gebietes, so dass einige Gitterpunkte am Rand ausgespart bleiben. An diesen Gitterpunkten am Rand werden zwar alle Modellvariablen definiert, aber nur für die Gitterpunkte im Inneren des verkleinerten Modellgebietes werden dynamische Berechnungen vorgenommen. Dieser sogenannte Offset wird berechnet zu

$$\begin{aligned} N_{\text{off}}\Delta\lambda - \Delta\lambda/4 & \quad \text{in } \lambda\text{-Richtung und} \\ N_{\text{off}}\Delta\varphi - \Delta\varphi/4 & \quad \text{in } \varphi\text{-Richtung} \end{aligned}$$

Hierbei bestimmt  $N_{\text{off}}$  die Anzahl der Gittermaschen die Lage der seitlichen Ränder des zu berechnenden Modellgebietes, bezogen auf das gesamte Modellgebiet.

## 2.3 Numerische Integration

Die zugrunde liegenden nicht-hydrostatischen Gleichungen beschreiben eine kompressible Modellatmosphäre. Aufgrund dessen erhält man auch meteorologisch unwichtige Schallwellen als Lösung der Gleichungen. Da die Schallwellen die höchste Phasengeschwindigkeit aller im System auftretenden Wellen haben, begrenzen sie den Zeitschritt der expliziten Zeitintegrationsschritte (CFL-Kriterium). Um die numerische Effizienz zu verbessern, werden die prognostischen Gleichungen in die Terme aufgeteilt, die direkt von Modi der akustischen Wellen abhängen, und in Terme, die sich direkt auf geringere Phasengeschwindigkeiten beziehen. Die akustischen Wellen werden dann mit einem speziellen numerischen Schema berechnet. Für die Berechnungen in dieser Arbeit wurde im COSMO-Modell ein 2-Zeitschritt Runge-Kutta-Schema verwendet, wobei das Runge-Kutta-Schema hierbei die „total variation diminishing“(TVD) Variante der 3.Ordnung ist (Liu, Osher und Chan 1992).

Es wurde das horizontale Advektionsschema 5. Ordnung und das vertikale Advektionsschema 3. Ordnung benutzt. Als vertikales Advektionsschema wird ein Crank-Nicholson Schema mit Zentralfdifferenzen verwendet. Für Feuchtegrößen wurde als Advektionsschema 'Bott\_2' benutzt.

In dieser Arbeit wird näher auf die Parametrisierung der Wolkenmikrophysik eingegangen. Die Aufgabe der Parametrisierung der Wolkenmikrophysik ist es, die Prozesse der Umwandlung der vorkommenden Partikel untereinander zu berücksichtigen und in letzter Konsequenz eine bessere Voraussage des am Boden auftreffenden Niederschlags zu liefern. Hierbei gibt es verschiedene Schemata, die die Mikrophysik mithilfe der Einführung von Partikelklassen und deren Wechselwirkungen beschreiben. Die Wechselwirkungen der Kategorien untereinander werden über den Massenaustausch zwischen den Kategorien in verschiedene mikrophysikalische Prozesse unterteilt, die wiederum eine Rückkopplung auf die gesamte Thermo- und Hydrodynamik haben.

## 2.4 Prozesse in den Wolken

Wenn Wasser als Wasserdampf und, als ein weiterer Aggregatzustand, als Flüssigwasser (Wolkentropfen und Regentropfen) oder Eis (Wolkeneis, Schnee, Graupel und Hagel) gleichzeitig in der Atmosphäre auftritt, stellt Wasser immer ein Gleichgewicht zwischen Wasserdampf und dem Flüssigwasser oder Eis her. Hierbei diffundiert Wasser entweder von der flüssigen bzw. festen zur gasförmigen Phase und umgekehrt. Den Gleichgewichtsdampfdruck des Wasserdampfes nennt man Sättigungsdampfdruck. Der Sättigungsdampfdruck ist über unterkühltem Flüssigwasser höher als über Eis. Dies bedeutet, dass über Eis weniger Wasser in der Dampfphase verbleibt als über der flüssigen Phase. Angenommen, Wasser tritt in allen drei Aggregatzuständen gleichzeitig auf, so ist nur am Tripelpunkt ein Gleichgewicht zwischen allen drei Phasen. Bei Temperaturen unterhalb der Tripelpunkttemperatur ist der Wasserdampf über Flüssigwasser gesättigt, über Eis aber übersättigt. So tritt dann ein Phasenübergang zwischen der Dampfphase und der Eisphase auf, bis der Sättigungsdampfdruck über Eis erreicht ist. Der Wasserdampfdruck ist niedriger geworden, und somit ist über Flüssigwasser der Wasserdampf untersättigt. Es tritt wieder ein Phasenübergang auf, diesmal von der flüssigen zur gasförmigen Phase, bis wieder der Sättigungsdampfdruck über Flüssigwasser erreicht ist. Nun ist der Wasserdampfdruck wieder gestiegen und damit ist Wasserdampf über Eis übersättigt. Folglich beginnt der Zyklus wieder von Neuem. Er endet erst, wenn sämtliches Flüssigwasser über die Dampfphase zu Eis geworden ist. Der Sättigungsdampfdruck von Wasserdampf über Flüssigwasser und Eis ist abhängig von der Temperatur. Über Flüssigwasser, speziell über Tropfen, ist der Sättigungsdampfdruck abhängig vom Krümmungseffekt (Radius des Tropfens) und dem Lösungseffekt (Anteil der chemischen Zusammensetzung des Aerosolkerns an der Gesamtmasse), was sich in der Köhlerkurve ausdrückt. Über Eis,

speziell Eispartikel, ist die Abhängigkeit des Dampfdruckes von der Form der Oberfläche und von dem Anteil der chemischen Zusammensetzung des Aerosolkerns an der Gesamtmasse noch weitgehend unbekannt. Die Differenz zwischen dem Sättigungsdampfdruck über Flüssigwasser und über Eis ist ebenfalls abhängig von der Temperatur und für den Bergeron-Findeisen-Prozess verantwortlich.

Der Phasenübergang zwischen zwei Aggregatzuständen ist immer mit dem Frei- oder Gebundenwerden von Energien verknüpft. Anhand der Struktur der Wassermoleküle wird dies anschaulich. In Eis bewegen sich die einzelnen Wassermoleküle kaum relativ zueinander. Sie bilden eine Kristallstruktur aus und sind untereinander fest verbunden. In Flüssigwasser sind die einzelnen Moleküle beweglich zueinander. Es wirken Kräfte, durch die die Moleküle aneinander gehalten werden, sogenannte Van-der-Waals-Kräfte. In Wasserdampf bewegen sich die Moleküle so stark, dass sie nicht mehr untereinander gebunden sind. Je stärker sich die Wassermoleküle bewegen, desto mehr Energie ist auch in ihren Bewegungen gespeichert. So ist folglich in Eis weniger Energie gespeichert als in Flüssigwasser und in Flüssigwasser weniger Energie als in Wasserdampf. Wenn nun Wasser aus einem Aggregatzustand in einen anderen wechselt, dann wird diese Energie entweder benötigt oder frei. In der verwendeten Modellvorstellung einer Wolke wird diese Energie in Form von Wärmeenergie aus der Luft, die das Partikel umgibt, entnommen oder eingebracht. Die Änderung der Wärmeenergie führt zu einer Temperaturabnahme oder -zunahme der Luft.

In einer Wolke spielen bei der Bildung, dem Wachstum und der Umwandlung von Wasser- oder Eispartikeln nicht nur die Phasenübergänge von Wasser eine Rolle, sondern vor allem Kollision und Koagulation zwischen den Partikeln. Das verwendete mikrophysikalische Schema beschreibt alle diese Effekte. Es wird „Zwei-Momenten-Schema“ genannt nach dem Verfahren, mit dem die Partikel und Umwandlungsprozesse in einer Wolke beschrieben werden (Seifert und Beheng, 2006). In dieser Arbeit werden in dem Schema folgende sechs Partikelarten unterschieden: Wolkentropfen, Regentropfen, Wolkeneis, Schnee, Graupel und Hagel (Blahak, 2010 in Vorbereitung). Während Wolkentropfen und Regentropfen die flüssige Phase von Wasser beschreiben, unterscheiden wir bei Wolkeneis, Schnee, Graupel und Hagel zwischen den verschiedenen Formen, in denen gefrorenes Wasser vorkommt. Jede Partikelart wird sowohl über die Verteilung ihrer Partikelgröße beschrieben als auch über die obere und untere Grenze ihrer mittleren Masse, ihre mittlere geometrische Form, ihre mittlere Fallgeschwindigkeit und über den mittleren Ventilationskoeffizienten von Wärme und Wasserdampf, der bei oben genannten Phasenübergängen eine Rolle spielt.

## 2.5 Das Zwei-Momenten-Schema

Die Anzahl- und die Massendichte der Partikel einer Klasse werden über Momente berechnet. Diese hängen von der Größenverteilung der Partikel in Form einer Anzahldichtefunktion ab. Es werden für alle Partikelklassen Anzahldichtefunktionen definiert. Exemplarisch wird auf die Momente der Tropfenanzahlfunktion  $f_w(x)$  eingegangen. Eine nähere Beschreibung des Zwei-Momenten-Schema geben Seifert (2002) und Seifert und Beheng (2006). Allgemein ist das k-te Moment

$$M_w^k = \int_0^\infty x^k f_w(x) dx \quad (2.13)$$

Dabei ist  $x$  die Masse eines Partikels. Das nullte Moment ( $k=0$ ) ist dann die Anzahl von Tropfen pro Volumen:

$$M_w^0 = \int_0^\infty f_w(x) dx \equiv N_w \quad (2.14)$$

Das erste Moment stellt die Masse pro Volumen dar. Sie drückt den Flüssigwassergehalt bzw. die Partikeldichte von Wasser aus.

$$M_w^1 = \int_0^{\infty} x f_w(x) dx \equiv L_w \equiv \rho_w \quad (2.15)$$

Das zweite Moment als

$$M_w^2 = \int_0^{\infty} x^2 f_w(x) dx = Z_w \quad (2.16)$$

und ist proportional zur Radarreflektivität, wenn für den Rückstreuquerschnitt die Rayleigh-Approximation angenommen wird.

Nach Messungen von Marshall und Palmer (1948) lässt sich eine Regentropfengrößenverteilung durch eine Exponentialfunktion folgender Form approximieren:

$$f_w(D) = N_0 e^{-\lambda D} \quad (2.17)$$

$N_0$  wird als näherungsweise konstant angenommen und  $\lambda$  ist eine Funktion der Regenrate. Das Zwei-Momenten-Schema basiert auf dieser Tropfenanzahldichteverteilung, nimmt aber an, dass sie bimodal verteilt ist. Kessler (1969) war der erste, der diese Verteilung in zwei partielle Verteilungsspektren aufteilte und beide Partikelklassen als Wolkentropfen bzw. Regentropfen definierte. Die beiden Partikelklassen können in Prozessen nur dann getrennt voneinander untersucht werden, wenn ihre Größenverteilungen nicht überlappen, d.h. ein Tropfen eindeutig einer Partikelklasse zugeordnet werden kann. Deswegen wird angenommen, dass eine Trennmasse  $x^*$  die beiden partiellen Tropfenverteilungsfunktionen voneinander trennt. Dies wird ausgedrückt durch (Index 'c' = Wolkentropfen, Index 'r' = Regentropfen)

$$f_c(x) = \begin{cases} f_w(x), & x < x^* \\ 0, & x \geq x^* \end{cases} \quad (2.18)$$

$$f_r(x) = \begin{cases} 0, & x < x^* \\ f_w(x), & x \geq x^* \end{cases} \quad (2.19)$$

Die Anzahldichtefunktion von Regentropfen wird weiterhin als Exponentialfunktion ausgedrückt.  $N_0$  wird aber als variabel angenommen. Formulieren wir die Anzahldichtefunktion in Abhängigkeit von der Masse  $x$ , erhalten wir mit der Beziehung  $f_r(D) dD = f_r(x) dx$  eine Verteilung in Form einer Gammaverteilung.

$$f_r(D) = N_0 e^{-\lambda_r D} \quad (2.20)$$

$$f_r(x) = \frac{2N_0}{\pi\rho_w} \left( \frac{6}{\pi\rho_w} \right)^{-2/3} x^{-2/3} e^{\left(-\frac{6}{\pi\rho_w}\right)^{1/3} \lambda x^{1/3}} = N_r^* x^{-2/3} e^{-\lambda_r^* x^{1/3}}$$

Hierbei sind  $A_r = \frac{2N_0}{\pi\rho_w} \left( \frac{6}{\pi\rho_w} \right)^{-2/3}$  und  $\lambda_r^* = \left( \frac{6}{\pi\rho_w} \right)^{1/3} \lambda$ . In Abhängigkeit der Masse  $x$  hat die Anzahldichtefunktion für Regentropfen die Form einer Gammaverteilung.

$$f_i(x) = A_i x^{v_i} e^{-\lambda_i^* x^{u_i}} \quad (2.21)$$

Durch Vergleich der Gln. 2.20 und 2.21 (Index  $i = r$ ) erhält man  $\mu_r = 1/3$  und  $v_r = -2/3$ . Für Wolkentropfen (Index  $i = c$ ) wird von vorneherein für die Anzahldichteverteilung eine Gammaverteilung (Index  $i = c$ ) als Ansatz gewählt. Berücksichtigt man die Trennmasse bei der Berechnung der Momente

ein, ergeben sich für Wolken- und Regentropfen folgende Beziehungen:

$$M_c^k = \int_0^{x^*} x^k f_w(x) dx = \int_0^\infty x^k f_c(x) dx \quad (2.22)$$

$$M_r^k = \int_0^{x^*} x^k f_w(x) dx = \int_0^\infty x^k f_r(x) dx \quad (2.23)$$

Mit den nullten Momenten  $M_c^0$  und  $M_r^0$  sind die Anzahldichten  $N_c$  und  $N_r$ , die ersten Momente  $M_c^1$  und  $M_r^1$  die Massendichten  $L_c$  und  $L_r$  beschrieben. Mit der Anzahldichte und Massendichte lässt sich die mittlere Masse eines Partikels bestimmen.

$$\bar{x}_{c,r} = \frac{L_{c,r}}{N_{c,r}} \quad (2.24)$$

Für die angenommenen Anzahldichtefunktionen lassen sich die Momente mithilfe der Gammafunktion analytisch ausdrücken:

$$M_c^k = \frac{A_c}{\mu_c} \frac{\Gamma\left(\frac{k+v_c+1}{\mu_c}\right)}{\lambda_*^* \frac{k+v_c+1}{\mu_c}} \quad M_r^k = \frac{A_r}{\mu_r} \frac{\Gamma\left(\frac{k+v_r+1}{\mu_r}\right)}{\lambda_*^* \frac{k+v_r+1}{\mu_r}} \quad (2.25)$$

Für jede Partikelklasse ( $i = r, c$ ) erhält man jeweils zwei Gleichungen (für die Momente  $N_i$  und  $L_i$ ) mit jeweils vier Unbekannten ( $\mu_i$ ,  $v_i$ ,  $\lambda_i^*$  und  $A_i$ ). Werden  $\mu_i$  und  $v_i$  konstant gesetzt, sind  $\lambda_i^*$  und  $A_i$  durch die Momente  $N_i$  und  $L_i$  festgelegt. Diese werden vom Modell prognostisch berechnet. Die zeitliche Änderung für das  $k$ -te Moment wird durch die Bilanzgleichung des  $k$ -ten Momentes berechnet. Die Bilanzgleichungen drücken die Umwandlungsprozesse zwischen den Partikelklassen aus, die in diesem Schema die Kollision und Koagulation sowie Bereifprozesse als auch Phasenübergänge von Wasser in der Atmosphäre beschreiben:

$$\frac{\partial N_i}{\partial t} = -\nabla \cdot [N_i \mathbf{v}] - \nabla \cdot [N_i \bar{\mathbf{v}}_T] + \left. \frac{\partial N_i}{\partial t} \right|_{\text{coag.,riming,etc}} \quad (2.26)$$

$$\frac{\partial L_i}{\partial t} = -\nabla \cdot [L_i \mathbf{v}] - \nabla \cdot [L_i \hat{\mathbf{v}}_T] + \left. \frac{\partial L_i}{\partial t} \right|_{\text{coag.,riming,etc}} \quad (2.27)$$

mit  $\bar{\mathbf{v}}$  und  $\hat{\mathbf{v}}$  = anzahl- bzw. massendichtegemittelte Fallgeschwindigkeiten der  $i$ -ten Partikelklasse. Das Zwei-Momenten Verfahren besteht darin, dass zwei der Parameter von Gl.2.21 als räumlich und zeitlich variabel angenommen werden. Die entsprechenden prognostischen Gleichungen finden sich in Seifert und Beheng (2006). Als Schließungsbedingung wird eine approximierte Form der Kollisions- bzw. Koagulationsfunktion verwendet. Die exakte Form dieser Funktion lautet (Pruppacher und Klett, 1997), wobei keine hydrodynamischen (Um-)Strömungseffekte berücksichtigt sind,

$$K_g^\circ(m', m'') = \pi(r' + r'')^2 |v_T(r') - v_T(r'')| = K_g^\circ(r', r'') \quad (2.28)$$

Dabei sind  $m'$  und  $m''$  die Massen der beiden Stoßpartner und  $r'$  und  $r''$  deren Radien. Außerdem hängt die Koagulationsfunktion von der Sedimentationsgeschwindigkeit  $v_T$  der Partikel ab. Long (1974) näherte die Koagulationsfunktion Gl. 2.28 durch folgende Funktionen an:

$$\tilde{K}(x, y; k_c, k_r) = \begin{cases} k_c(x^2 + y^2), & x, y < x^* \\ k_r(x + y), & \text{sonst} \end{cases} \quad (2.29)$$

$x$  und  $y$  sind Massen der beiden Stoßpartner,  $k_c$  und  $k_r$  sind numerische Parameter für die Wechselwirkung von Wolkentropfen bzw. von Regentropfen untereinander. Zusätzlich zu den sechs Partikelklassen werden im Modell die Einflüsse des Wasserdampfes und des Aerosols in der Atmosphäre berücksichtigt. Abbildung 2.1 stellt die Umwandlungsprozesse zwischen den verschiedenen Partikelklassen dar, wie sie Seifert (2004) und Blahak (2010) entwickelt haben. Jeder Pfeil symbolisiert einen Umwandlungsprozess von einer Partikelklasse zu einer anderen bzw. zur gleichen. Die in der Auswertung berücksichtigten Prozesse werden mit einer Nummer versehen.

### 2.5.1 Nukleation von Wolkentropfen

Wenn Wasserdampf in einer beliebigen Höhe übersättigt ist, können Wolkentropfen entstehen. Die Höhe über Grund, in der die ersten Wolkentropfen entstehen, wird als Wolkenuntergrenze/ Wolkenbasis definiert. Der Wasserdampf lagert sich hier an vorhandene Aerosole an und wird dabei flüssig. Es bilden sich Wolkentropfen. Man nimmt an, dass die Anzahldichte der nukleierten Wolkentropfen einerseits von der Konzentration der Aerosolpartikel und der vertikalen Windgeschwindigkeit an der Wolkenbasis abhängt und andererseits von Parametern, die die Anzahldichtefunktion (Größenspektrum) des Aerosols beschreiben. Für das Modell werden die Werte aus den Ergebnissen von Segal und Khain (2006) verwendet, die die Nukleation von Tropfen durch Seesalz untersucht haben.

Durch Impfen will man die Nukleation von Wolkentropfen beeinflussen und setzt dabei zusätzliche Aerosole an der Wolkenbasis frei. Im Modell wird die Anzahldichte der Aerosole erhöht, wobei die Eigenschaften des Größenspektrums der Aerosole unverändert bleiben. Im Modell kann frei gewählt werden, in welchem Maße und welcher Höhe über Grund die Anzahldichte der Aerosole verändert werden soll.

### 2.5.2 Nukleation von Wolkeneis

Wasserdampf nukleiert in der Atmosphäre zu Wolkeneis, wenn die Umgebungstemperatur der Luft in einer beliebigen Höhe unter dem Gefrierpunkt liegt und der Wasserdampf über Eis übersättigt ist. Es gibt verschiedene Modellvorstellungen, wie Wasserdampf zu Wolkeneis nukleiert. Die Nukleation der Wolkeneispartikel hängt nach dem Ansatz von Fletcher (1968) von der Umgebungstemperatur ab. Der Ansatz von Meyers (1992) berücksichtigt neben der Umgebungstemperatur zusätzlich die Übersättigung über Eis. Beide Ansätze haben gemein, dass sie keinerlei Parameter der Aerosole bei dem Nukleationsprozess berücksichtigen.

Bei den in dieser Arbeit durchgeführten Berechnungen wurde eine Kombination aus den Ansätzen von Fletcher und von Meyers verwendet. Hierbei wird die Anzahldichte des nukleierten Wolkeneises mithilfe des Ansatzes von Meyers bestimmt, kann aber maximal nur das zehnfache, bzw. minimal nur ein zehntel des Wertes aus den Berechnungen mit dem Ansatz von Fletcher annehmen.

Es wird bei diesen Ansätzen die gesamte nukleierbare Masse von Wolkeneis berechnet. Anschließend wird von diesem berechneten Wert die Summe der Anzahldichte von dem schon vorhandenen Wolkeneis und Schnee abgezogen. So werden nur die neu entstandenen Eispartikel berücksichtigt. Diese Eispartikel haben jeweils das voreingestellte minimale Gewicht, das Eispartikel haben können. Die Gesamtmasse aller entstandenen Eispartikel kann höchstens dem vorhandenen Wasserdampf entsprechen. Tritt der Fall ein, dass die entstehenden Eispartikel einer größeren Gesamtmasse entsprechen als der vorhandene Wasserdampf, würde die Anzahl zwar gleichbleiben, aber die neu nukleierten Eispartikel würden eine geringere Masse als die voreingestellte minimale Masse haben.

### 2.5.3 Gefrieren von Wolkentropfen

Beim Gefrieren von Wolkentropfen in Wolkeneis wird nur homogenes Gefrieren berücksichtigt. Es ist so definiert, dass unterhalb einer Temperatur von  $-50\text{ °C}$  die vorhandenen Wolkentropfen komplett gefrieren. Bei Temperaturen unterhalb von  $-30\text{ °C}$  wird mithilfe eines Ansatzes von Jeffrey und Austin (1997) wie auch bei Cotton und Field (2001) der Anteil der Massendichte der Wolkentropfen berechnet, die homogen gefriert. Heterogenes Gefrieren wird bei diesem Prozess nicht berücksichtigt. Es kann maximal nur die vorhandene Massendichte von Wolkentropfen gefrieren.

### 2.5.4 Wasserdampfdeposition an Wolkeneis / Schnee / Graupelpartikeln

Bereits gebildete Wolkeneis-, Schnee- und Graupelpartikel können durch Wasserdampfdeposition wachsen. Als Voraussetzung muss die Umgebungstemperatur kleiner  $0\text{ °C}$  und der Wasserdampf bezüglich der Eis- oder Schneepartikel übersättigt sein. Bei der Berechnung spielt die Differenz zwischen den Sättigungsdampfdrücken von Wasserdampf über Flüssigwasser und Wolkeneis eine Rolle.

### 2.5.5 Selbsteinfang von Wolkeneis und Schnee, Einfang von Wolkeneis durch Schnee; Selbsteinfang von Graupel, Einfang von Wolkeneis und Schnee durch Graupel

Selbsteinfang und Einfang sind definiert als die Kollision und das Zusammenwachsen zweier Partikel, in diesem Fall Eispartikel. Bei Selbsteinfang gehören beide Partikel derselben Klasse an, bei Einfang dagegen unterschiedlichen Klassen. Damit diese Prozess stattfinden, müssen beide Partikel eine von der Klasse abhängige Größe erreicht haben. Bei dem Selbsteinfang von Wolkeneis entsteht Schnee, bei Selbsteinfang von Schnee und Einfang von Wolkeneis wächst Schnee. Bei den übrigen drei Prozessen wachsen Graupelpartikel. Bei Temperaturen über dem Tripelpunkt führen alle Kollisionen zum Selbsteinfang der Partikel. Unterhalb der Tripelpunkttemperatur wachsen nur bei einem Anteil der Kollisionen die Partikel zusammen, die Effizienz des Selbsteinfangs ist somit kleiner eins. Die Effizienz nimmt mit sinkender Temperatur ab. Beim Selbsteinfang von Graupel bleibt die Effizienz sowohl bei höheren als auch niedrigeren Temperaturen als der Tripelpunkt konstant, steigt zu höheren Temperaturen hin aber am Tripelpunkt sprunghaft an. Der Selbsteinfang und Einfang von Eispartikeln ist ebenso abhängig von dem mittleren Durchmesser, der mittleren Sedimentationsgeschwindigkeit und der Anzahldichte. Mit größerem Durchmesser und größerer Anzahldichte wächst die Anzahldichte der eingefangenen, also abgebauten Eispartikel, quadratisch an. Die Massendichte verändert sich dabei in gleicher Weise quadratisch. Bei größerer Sedimentationsgeschwindigkeit steigt die Anzahl- und Massendichte bei Selbsteinfang von Graupel linear an, bei allen anderen betrachteten Einfang- und Selbsteinfangprozessen quadratisch.

### 2.5.6 Nasses Wachstum von Graupel zu Hagel, Einfang von Wolkeneis und Schnee durch Hagel

Graupel kann bei Temperaturen, die niedriger als der Tripelpunkt sind, durch nasses Wachstum zu Hagel anwachsen. Ist der Durchmesser eines Graupelpartikels größer als ein definierter Wert, entsteht Hagel. Dieser Wert ist abhängig von der Massendichte der Flüssigwasserpartikel und der Eispartikel, sowie

von der Temperatur und dem Druck der umgebenden Luft.

Die Einfangprozesse von Wolkeneis und Schnee durch Hagel hängen, wie bei den Einfangprozessen im vorigen Abschnitt, von der Effizienz des Prozesses, der Größe und Masse der kollidierenden Partikel ab und von der Sedimentationsgeschwindigkeit. Die Effizienz ist bei Temperaturen oberhalb der Tripelpunkttemperatur ebenso gleich eins, während sie unterhalb des Tripelpunktes exponentiell abfällt. Die Größe und Masse der kollidierenden Partikel und die Sedimentationsgeschwindigkeit gehen allesamt quadratisch in die Berechnung der Prozesse des Selbsteinfanges und Einfangs ein. Dabei vergrößert sich die umgesetzte Anzahl und Masse der bei diesem Prozess beteiligten Partikel mit ansteigender Sedimentationsgeschwindigkeit.

### 2.5.7 Bereifen von Wolken- und Regentropfen an Wolkeneis und Schnee

Die Voraussetzung des Bereifens ist die Kollision eines flüssigen Partikels mit einem Wolkeneis- oder Schneepartikel. Ist die Umgebungstemperatur über der Tripelpunkttemperatur und das Eispartikel größer als das Flüssigwasserpartikel, dann zerplatzt das flüssige Partikel am Eispartikel in viele kleine Tropfen. Das Eispartikel bleibt unbeeindruckt von dieser Kollision. Nehmen wir an, dass bei gleicher Umgebungstemperatur das Flüssigwasserpartikel größer als das Eispartikel ist, dann wird das Eispartikel schmelzen. Ist die Umgebungstemperatur während der Kollision niedriger als die Tripelpunkttemperatur, so wird das Eispartikel durch das Flüssigwasserpartikel bereift. Das flüssige Partikel friert von aussen nach innen durch. Da sich Wasser beim Gefrieren ausdehnt, splintern während des Durchfrierens Teile der Oberfläche des Partikels ab. Es entstehen kleine Wolkeneispartikel. Dieser Prozess wird Eismultiplikation genannt.

Die Partikelklasse des bereiften Eispartikels kann sich während des Bereifens ändern. Dabei unterscheiden wir zwischen zwei Typen. Betrachten wir als erstes ein Wolkeneis- oder Schneepartikel, das durch Depositionswachstum (s.u.) viel stärker als durch Bereifen gewachsen ist. Es wird seine Partikelklasse nach dem Bereifen nicht ändern. Das Schnee- oder Eispartikel ist trotz des Bereifens mit Regen- oder Wolkentropfen aufgrund seiner durch Deposition gewachsenen Größe noch als solches erkennbar. Als zweiten Typ stellen wir uns ein Wolkeneis- oder Schneepartikel vor, das viel stärker durch Bereifen gewachsen ist als durch Deposition. Bei ihm wird das Wolkeneis- oder Schneepartikel während des Bereifens zu Graupel.

Die Anzahl und Masse der Partikel, die bei dem Bereifprozessen umgewandelt werden, hängt von der Sedimentationsgeschwindigkeit, dem mittleren Durchmesser und von der Anzahldichte der kollidierenden Partikel ab.

### 2.5.8 Bereifen von Wolken- und Regentropfen an Graupel und Hagel

Wenn Wolken- oder Regenpartikel an Graupel- oder Hagelpartikeln bereifen, wachsen diese, und die flüssigen Partikel gefrieren dabei vollständig. Wenn die Umgebungstemperatur niedriger als die Tripelpunkttemperatur ist, dann vollzieht sich der Prozess der Eismultiplikation. Ist die Umgebungstemperatur dagegen größer als die Tripelpunkttemperatur, dann schmilzt ein Teil der zuvor gebildeten Hagel- und Graupelpartikel zu Regentropfen. Dieser Prozess wird „enhanced melting“ genannt. Ein anderer Teil des Hagels bzw. Graupels wird bei gleicher Temperatur lediglich angeschmolzen. Auf der Oberfläche der Partikel bildet sich ein Film aus Flüssigwasser, von dem sich Regentropfen ablösen. Dieser Prozess heißt „graupel shedding“ bzw. „hail shedding“.

Die Masse und Anzahl der Partikel unterliegt den gleichen Bedingungen wie bei Wolkeneis und Schnee.

### **2.5.9 Gefrieren von Regentropfen zu Wolkeneis, Graupel oder Hagel**

Ein Teil der Massendichte von Regentropfen gefriert bei einer Umgebungstemperatur von unter  $0^{\circ}\text{C}$ . Wenn die Umgebung kälter als  $-40^{\circ}\text{C}$  ist, dann nehmen wir an, dass sämtliches Wasser ausgefroren ist. Zwischen  $0^{\circ}\text{C}$  und  $-40^{\circ}\text{C}$  gefrieren Regentropfen erst ab einer bestimmten mittleren Masse. In diesem Temperaturbereich ist der Anteil des gefrierenden Regens an der Gesamtmasse abhängig von der Differenz der Umgebungstemperatur zu  $0^{\circ}\text{C}$  und von der Dichte des Flüssigwassers. Je nach Größe der gefrierenden Tropfen bildet sich entweder Wolkeneis, Graupel oder Hagel.

### **2.5.10 Schmelzen von Eis , Schnee, Graupel und Hagel**

Die Eispartikel schmelzen, wenn die Umgebung wärmer ist als  $0^{\circ}\text{C}$ . Wenn Wolkeneis größer ist als die mittlere maximale Masse von Wolkentropfen, dann schmilzt es zu Regentropfen. Kleinere Partikel schmelzen zu Wolkentropfen. Die Modellausgabe des Schmelzens von Wolkeneis unterscheidet nicht, ob Wolkentropfen oder Regentropfen entstehen. Auch bei schmelzendem Schnee, Graupel und Hagel entstehen Regentropfen. Die Anzahl und Masse der Regentropfen ist abhängig vom mittleren Durchmesser des Eispartikels, vom Sättigungsdampfdruck über Flüssigwasser, der mittleren Sedimentationsgeschwindigkeit der Partikel und der Differenz zwischen Umgebungs- und Gefrieretemperatur. Mit höheren Werten der Variablen nimmt die Schmelze der Partikel zu. Schneepartikel werden bei  $10^{\circ}\text{C}$  und wärmer allesamt zu Regen.

### **2.5.11 Verdunsten von Graupel (33), Hagel (53) und Schnee (32)**

Die Sublimation von Eispartikeln ist möglich bei Temperaturen über  $0^{\circ}\text{C}$ . Das hängt ab von der Übersättigung von Wasserdampf über Flüssigwasser, dem mittleren Durchmesser, der mittleren Reynoldszahl, dem mittleren Ventilationskoeffizienten und der mittleren Sedimentationsgeschwindigkeit. Mit höheren Werten der Parameter werden bei diesem Prozess höhere Massen- und Anzahlichten umgesetzt.

### **2.5.12 Selbsteinfang von Wolkentropfen und Autokonversion (34), Akkreszenz (35) und Selbsteinfang von Regentropfen**

Führt die Kollision von zwei Wolkentropfen zur Koaleszenz, also dem Zusammenfließen der beiden, entsteht ein größerer Wolkentropfen. Überschreitet die Größe des Tropfens einen bestimmten Wert, entsteht ein Regentropfen. Die Prozesse heißen Autokonversion bzw. Selbsteinfang von Wolkentropfen. Kollidiert ein Regentropfen mit einem Wolkentropfen und kommt es zur Koaleszenz, dann wächst der Regentropfen. Dieser Prozess heißt Akkreszenz. Der Selbsteinfang von Regentropfen bildet aus zwei Regentropfen einen größeren.





### 3 Einstellungen für die Modellläufe

Wie schon in Kapitel 1 beschrieben, bietet im östlichen Mittelmeer die winterliche Wetterlage mit bestimmendem Tief über Zypern eine günstige Situation, um Wolkenimpfen mit dem Ziel der Niederschlagsverzögerung durchzuführen. Die Suche nach einer geeigneten Wetterlage ergab, dass der Zeitraum vom 6.-21.1.2007 passend war. Aus diesem Zeitraum wurden der 6.1.2007 12:00 Uhr UTC - 8.1.2007 12:00 Uhr UTC ausgewählt. In diesem Zeitraum bildet sich eine Land-See-Wind-Zirkulation aus, und eine Konvergenzlinie über dem Meer entlang der Küste Israels führt zur Wolkenbildung.

Für den 6.1. 18:00Uhr ist in Abbildung 3.1 ein Satellitenbild aus dem Wellenlängenbereich von 11 - 13  $\mu$  Wellenlänge dargestellt. In diesem Wellenlängenbereich wird die Infrarotstrahlung kaum von der Atmosphäre absorbiert und man erkennt Teile der Landoberfläche und Bewölkung. Die Farben beziehen sich auf die Strahlungstemperatur der Oberflächen. Kalte Flächen werden hell dargestellt, warme dunkel. Anhand der Bewölkung erkennt man, dass sich das Zentrum des Tiefdrucksystems östlich von Zypern vor der Küste Libanons befindet. Vor der Küste Israels befindet sich hochreichende Bewölkung, die hell dargestellt ist.

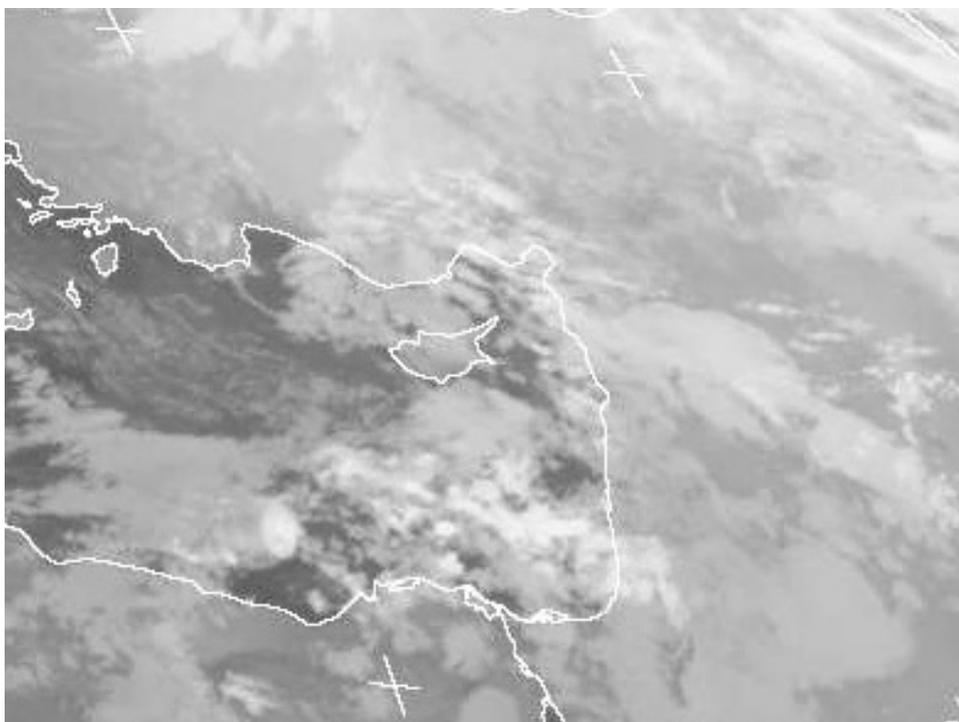


Abbildung 3.1: Meteosat Bild vom östlichen Mittelmeer im Wellenlängenbereich von 11-13  $\mu$  am 6.1.2007 um 18:00Uhr UTC.

### 3.1 Die Wetterlage des Simulationszeitraumes

Ein kurzweiliger, aber langgestreckter Höhentrog ist am 5.1. über das östliche Mittelmeer gezogen. Im Laufe des 5.1. steigt das Geopotential im Bereich des Troges an, und er liegt am 6.1. mit seiner Achse über dem Irak. Im Laufe des 6.1. schwenkt ein weiterer, aber schwächer ausgebildeter, kurzweiliger Trog über das östliche Mittelmeer hinweg. In Abbildung 3.2 wird der Bodendruck und das Geopotential am 7.1. um 0:00 Uhr UTC angegeben. Der Achse des Troges liegt am 7.1. um 0:00 Uhr UTC westlich von Zypern. Im Laufe des 7.1. zieht der kurzweilige Trog nach Osten ab und liegt am 8.1. um 0:00 Uhr UTC mit seiner Trogachse über Syrien.

Am Boden liegt am 5.1. unterhalb des Troges ein Tief, das sich im Laufe des Tages vor der Küste

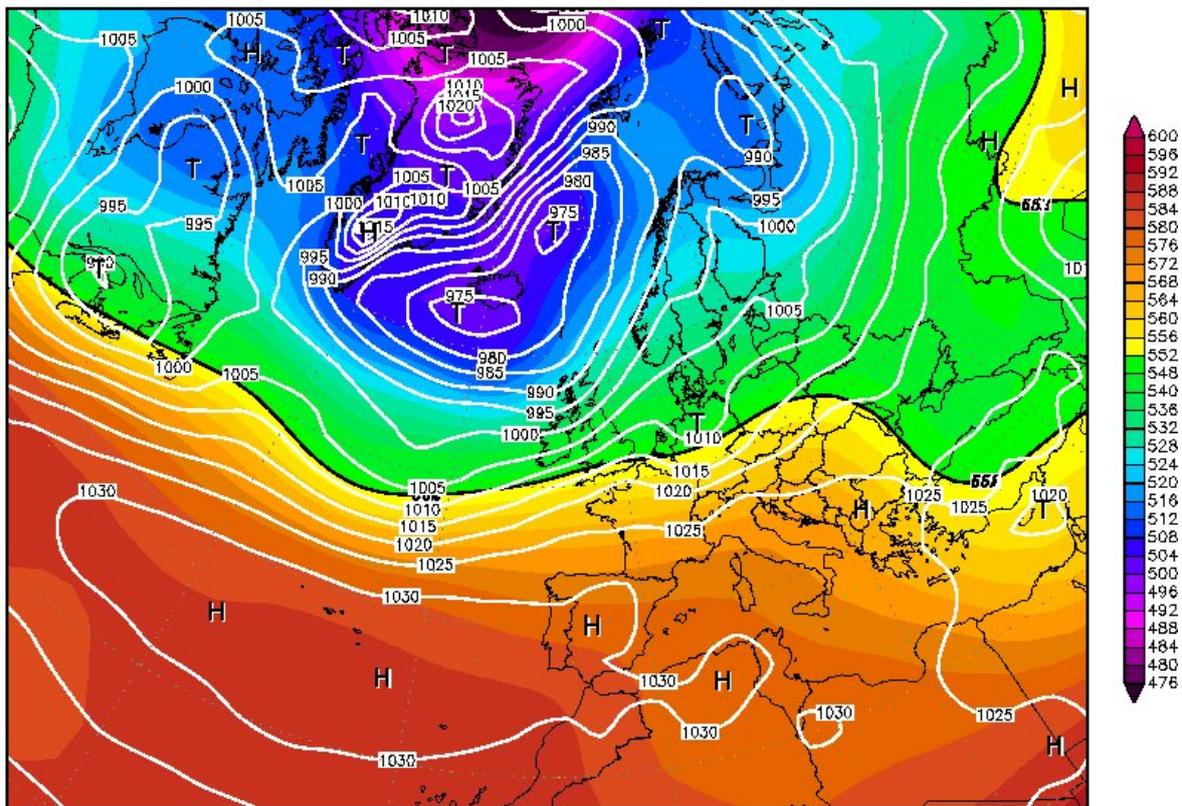


Abbildung 3.2: Isobaren des Bodendruck in hPa, farbig unterlegt mit dem Geopotential der 500 hPa Druckfläche in  $m^2s^{-2}$  für Europa am 7.1. um 0:00 Uhr UTC, das Untersuchungsgebiet liegt am rechten unteren Rand

Israels mit einem Kerndruck von unter 1010 hPa positioniert und sich dort abschwächt.

Am 6.1. verändert es seine Position kaum und schwächt sich bis 18:00 Uhr UTC weiter auf einen Kerndruck von etwa 1020 hPa ab. In Abbildung 3.3 wird der Bodendruck zum Zeitpunkt 18 Uhr UTC dargestellt. Das Zentrum des Tiefs befindet sich vor der Küste von Zypern. Der Druckgradient ist in dem Bereich des Tiefs nur schwach ausgeprägt, und es sind keine Fronten verzeichnet. Ab etwa 18:00 Uhr kommt das Bodentief in den Einfluss des kurzweiligen Troges und beginnt sich wieder zu verstärken. Um 0:00 Uhr UTC am 7.1. liegt das Zentrum des Bodentiefs östlich von Zypern vor der Küste von Israel (Bodenkarte in Anhang A.9) Um 6:00 Uhr UTC ist das Tief über die libanesische Küste gezogen (Bodenkarte in Anhang A.10). Das Untersuchungsgebiet befindet sich südlich von dem

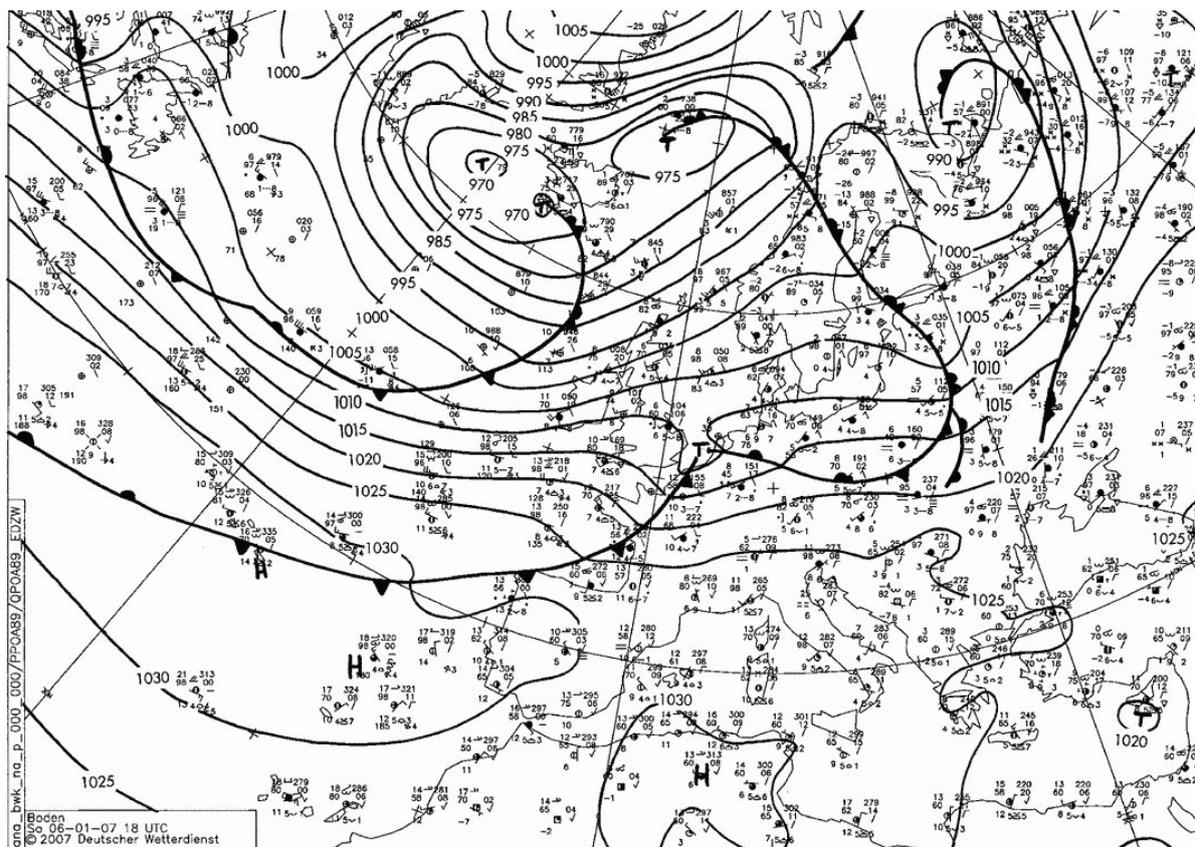


Abbildung 3.3: Bodenkarte des DWD für den 6.1.2007 18:00 Uhr UTC

Tief. Im Laufe des 7.1. zieht sein Kern mit der großräumigen Strömung nach Osten ab (A.11). Während um 0:00 Uhr UTC am 5.1. sich die Küste von Israel noch vorderseitig des langgestreckten Troges befindet und somit südwestliche Windrichtungen in der Höhe der freien Atmosphäre vorherrschen, dreht der Wind nach Abzug dieses Troges auf westliche Richtungen. Aus diesen weht er am 6. und 7.1., bis das Bodentief mit der kurzen Welle nach Osten abzieht und sich im Laufe des 7.1. nordwestliche Strömung durchsetzt.

Im Laufe des 5.1. transportiert das Tiefdrucksystem Kaltluft an die Küste Israels, die der langgestreckte Trog zuvor über Osteuropa in die Ägäis eingebracht hat. In der 850 hPa Druckfläche zeigt die Temperatur am 6.1. um 0:00 Uhr UTC zwischen  $0^{\circ}\text{C}$  und  $2^{\circ}\text{C}$  an. Im Laufe des 6.1. wird sowohl durch das sich abschwächende Tief vor der Küste Israels als auch durch ein Tiefdruckgebiet, das sich südlich der Peloponnes über dem Mittelmeer befindet, wärmere Luft aus südlichen Richtungen in den Bereich des östlichen Mittelmeeres transportiert. Am 7.1. um 0:00 Uhr UTC liegt in 850hPa die Temperatur bei  $2^{\circ}\text{C}$  -  $4^{\circ}\text{C}$  (Abbildung 3.4).

## 3.2 Das Modellgebiet

Für die Simulationsläufe wurde das Modellgebiet so angepasst, dass die Küste Israels mittig im Gebiet lag. Bevor in dem Modellgebiet die Läufe gestartet werden konnten, mussten an den Rändern des Gebie-

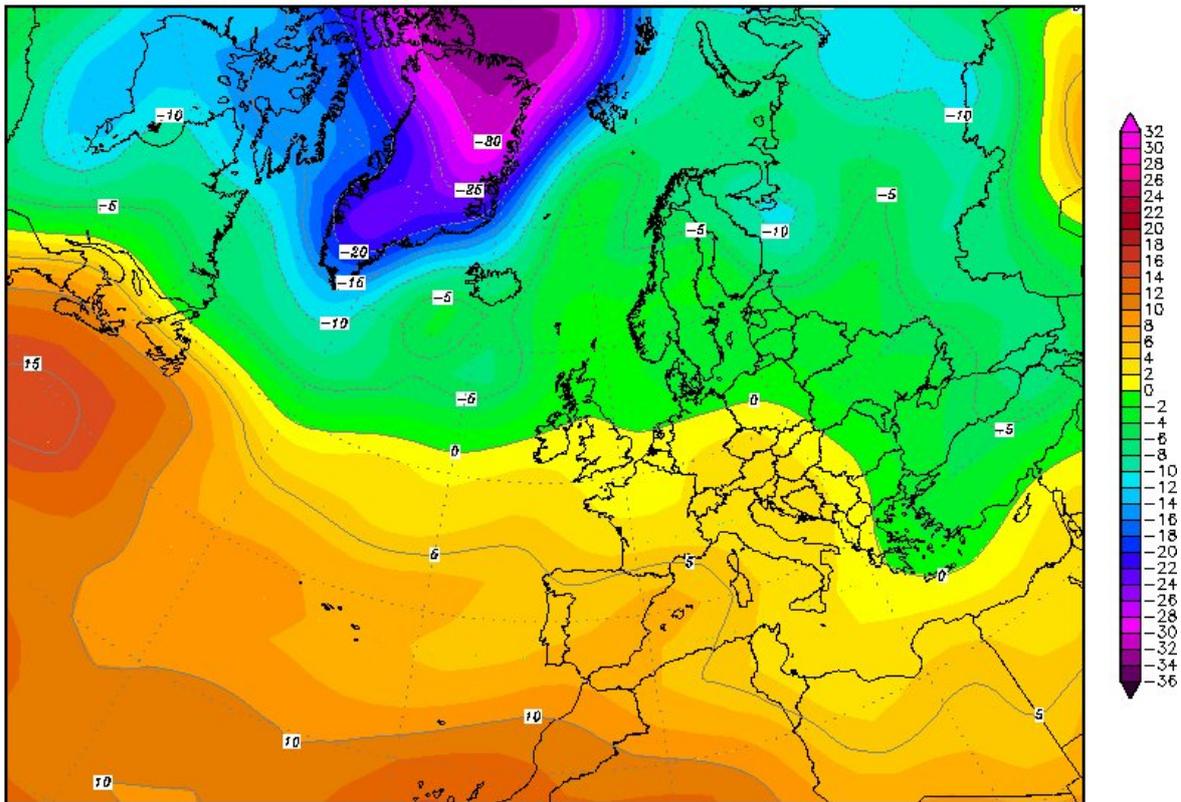


Abbildung 3.4: wie Abbildung 3.2, aber für die Temperatur der 850 hPa Druckfläche in C°

tes die Werte von verschiedenen Modellvariablen berechnet werden, die von außen in das Modellgebiet übergeben werden. Hierfür wurde vom gröber aufgelösten COSMO-EU-Modell ( $\Delta x = 0,675^\circ \hat{=} 7\text{km}$  für den Startzeitpunkt der Modellläufe auf das finite Gitter des ausgewählten Modellgebietes mit  $0.018^\circ \hat{=} 2\text{km}$  Maschenweite interpoliert (Kapitel 2.2). Es wurde mit Hilfe des COSMO Unterprogramms INT2LM durchgeführt. Für die folgenden Zeitpunkte wurden jeweils die Ränder berechnet. Der Äquator wurde so verschoben, dass der Schnittpunkt von Äquator und Nullmeridian bei  $32^\circ \text{ N}$  und  $34,5^\circ \text{ O}$  liegt. Dieser Punkt befindet sich im Modellgebiet. Die Verlagerung des Äquators in das Modellgebiet führt zur Reduzierung der Krümmungseffekte durch Kugelkoordinaten (Kapitel 2.1). Das Modellgebiet reicht im Westen vom Rand des Nildeltas bis zum Ostjordanischen Bergland im Osten, von der Küste der Halbinsel Sinai im Süden bis zur israelisch-libanesischen Grenze im Norden. Die Gittermaschenweite ist  $0.018^\circ \hat{=} 2\text{km}$  (Abbildung 3.5). Das Gitter hat  $143 \times 143 \times 50$  Gitterpunkte. Die Orographie ist ebenfalls mit  $0.018^\circ$  aufgelöst. Für die Simulationsläufe wird der Zeitschritt  $\Delta t = 10\text{s}$  gewählt, um dem CFL-Kriterium zu genügen (siehe Kapitel 2.3).

### 3.3 Parameterwahl im Zwei-Momenten-Schema

In den Simulationen soll der Einfluss von Nukleationskernen (CCN) in der Atmosphäre auf die Niederschlagsbildung und die Umwandlungsprozesse untersucht werden. Die Nukleation von Wolkentropfen wird in der verwendeten Version des Zwei-Momenten-Schemas mithilfe von Wertetabellen von Segal

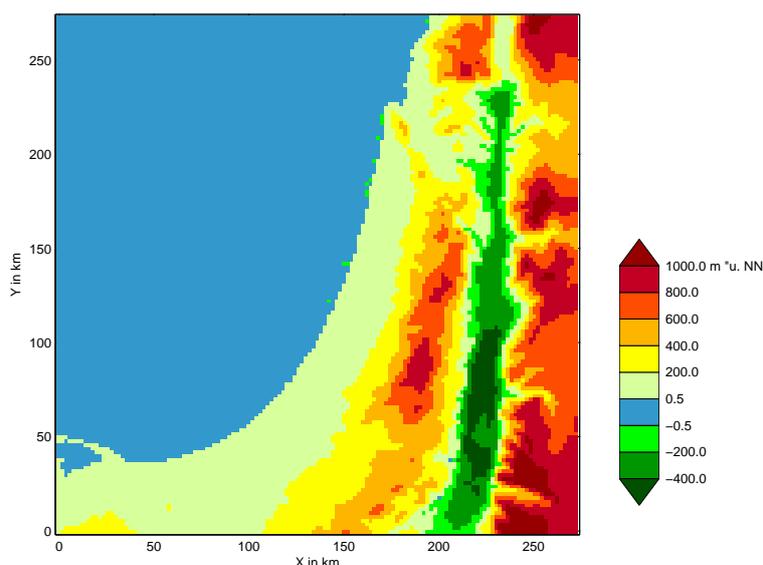


Abbildung 3.5: Darstellung der Orographie des Modellgebietes mit einer Auflösung von 143x143 Gitterpunkten

und Khain (2004) beschrieben. Sie hängt von verschiedenen Parametern der CCN sowie der Vertikalgeschwindigkeit an der Wolkenbasis ab. Noppel et al. (2009a) berücksichtigt vier Klassen verschiedener CCN Konzentration in Abhängigkeit der Parameter aus Segal und Khain (2004).

In dieser Arbeit werden Simulationen mit Eigenschaften dieser vier Klassen gerechnet. Das Hauptunterscheidungsmerkmal zwischen diesen ist die Anzahldichte der CCN  $N_{cn,0}$ . Horizontal und vertikal bis in Höhen von 2000m Höhe ist die Anzahldichte  $N_{cn,0}$  konstant, darüber nimmt sie mit  $1/e$  ab. In Abbildung 3.1 sind jeweils der Name wie auch die Anzahldichte  $N_{cn,0}$  für die Klassen der CCN Konzentration angegeben.

In den Simulationen, in denen Impfen von Wolken simuliert wird, wird in den Einstellungen für die

Tabelle 3.1: Name und Anzahldichte der verschiedenen Klassen der CCN Konzentrationen

Name der Klasse	$N_{cn,0}$ ( $10^6 \text{ m}^{-3}$ )
Niedrig	100
Mittel	500
Hoch	1700
Sehr Hoch	3200

Nukleation von Wolkentropfen nur die Anzahldichte  $N_{cn,0}$  verändert. In Noppel et al. (2009a) wird dabei in einer Höhe von 500m bis 3000m die Anzahldichte der CCN um  $300 \text{ cm}^{-3}$  in dem gesamten Modellgebiet erhöht. Diese Einstellungen werden in dieser Arbeit übernommen. Mithilfe der Wertetabellen von Segal und Khain (2004) werden aber nur die Anzahldichten der nukleierten Tropfen bestimmt. Dabei wird der Einfluss der Aerosole auf die Größenverteilung der Wolkentropfen nicht berücksichtigt. In Noppel et al. (2009a) wird bei der Simulation von Wolkenimpfen eine modifizierte Anzahldichtefunktion für Wolkentropfen angenommen, um den Einfluss von den zusätzlich nukleierten Wolkentropfen in der Größenverteilung zu berücksichtigen. In Tabelle 3.2 werden für alle im Zwei-Momenten-Schema definierten Partikelklassen die Parameter  $\mu$  und  $\nu$  der Anzahldichtefunktion (Gleichung 2.21) sowie die maximale und minimale Partikelmasse  $x_{max}$  und  $x_{min}$  angegeben. Für die Wolkentropfen sind dabei

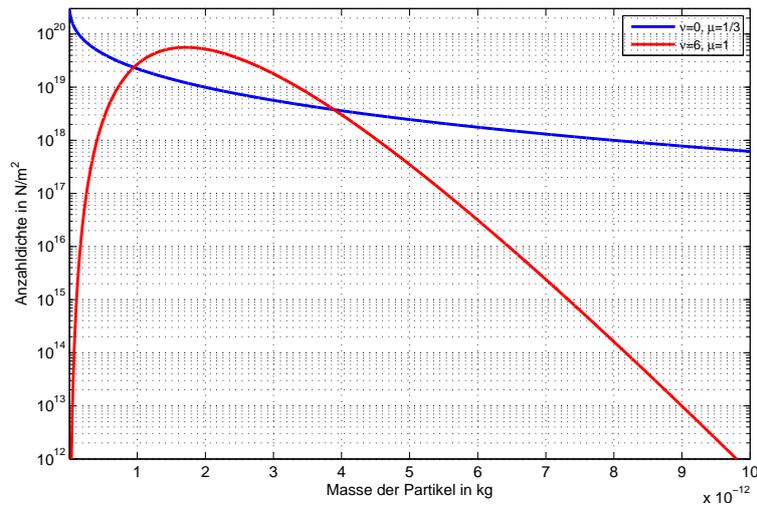


Abbildung 3.6: Anzahldichtefunktionen von Wolkentropfen in  $\#/cm^{-3}$  als Funktion der Partikelmasse in  $10^{-12}$  kg, rote Kurve: geimpfter Fall, blaue Kurve: ungeimpfter Fall

einerseits die Parameter  $\mu$  und  $\nu$  der Anzahldichtefunktion für die Simulationen mit Impfen angegeben, andererseits die für die Simulationen ohne Impfen. Diese gelten auch in den Simulationen mit Wolkenimpfen in Höhen unterhalb von 500m und oberhalb von 3000m, in denen nicht geimpft wird.

Die Konstanten  $\nu$  und  $\mu$  definieren die Form der Anzahldichtefunktion (Gleichung 2.21 auf Seite 9).

Tabelle 3.2: Einstellungen der Konstanten  $\mu$  und  $\nu$  der Anzahldichteverteilungen und der minimalen und maximalen Masse der Partikel

Partikelklasse	$\nu$	$\mu$	xmin in kg	xmax in kg
Wolkentropfen ohne Impfen	0.0	0.33	$4.2 \cdot 10^{-15}$	$2.6 \cdot 10^{-10}$
Wolkentropfen durch Impfen	6.0	1.00	$4.2 \cdot 10^{-15}$	$2.6 \cdot 10^{-10}$
Regentropfen	0.0	0.33	$2.6 \cdot 10^{-10}$	$3.0 \cdot 10^{-6}$
Wolkeneis	0.0	0.33	$1.0 \cdot 10^{-12}$	$1.0 \cdot 10^{-7}$
Schnee	0.0	0.5	$1.0 \cdot 10^{-10}$	$2.0 \cdot 10^{-5}$
Graupel	1.0	0.33	$1.0 \cdot 10^{-9}$	$5.0 \cdot 10^{-4}$
Hagel	1.0	0.33	$2.6 \cdot 10^{-9}$	$5.0 \cdot 10^{-4}$

Je größer der Wert für  $\nu$  ist, desto steiler ist in der Größenverteilung der Abfall zu kleinen Partikeln. Je größer der Wert für  $\mu$  ist, desto steiler ist der Abfall zu größeren Partikeln hin. In Abbildung 3.6 sind die Anzahldichtefunktionen der Wolkentropfen für die Simulationen mit und ohne Impfen dargestellt. Es werden für die Anzahldichte der Wolkentropfen (Gl. 2.23)  $N_c = 10^8 m^{-3}$  und für die mittlere Masse (Gl. 2.24)  $\bar{x} = 2 \cdot 10^{12} kg$  angenommen. Man erkennt, dass das Massenspektrum der Wolkentropfen im geimpften Fall schmäler ist als im ungeimpften: Im geimpften Fall fällt es zu großen und kleinen Tropfenmassen hin stärker ab als im ungeimpften. Das bedeutet, dass im geimpften Fall die Variation der Partikelmassen und damit der Sedimentationsgeschwindigkeiten kleiner ist. Da die Koagulation von Wolkentropfen von der Differenz der Sedimentationsgeschwindigkeit der Stoßpartner abhängt (Gl. 2.28), ist sie und damit der Selbsteinfang und die Autokonversion von Wolkentropfen im geimpften Fall

verringert.

Insgesamt werden in dieser Arbeit acht Simulationsläufe gerechnet. Zu jeder CCN-Konzentration wird in dem Modellgebiet jeweils ein Lauf mit Wolkenimpfen und ein Lauf ohne Wolkenimpfen gerechnet. Am Unterschied zwischen den verschiedenen CCN-Konzentrationen soll der Einfluss des Impfens auf den Niederschlag untersucht werden. Außerdem soll eine Übersicht der Umwandlungsprozesse zwischen den Partikelklassen gegeben werden, an denen die Unterschiede innerhalb der Wolken zwischen den Simulationsläufen mit und ohne Wolkenimpfen dargestellt werden können.

### 3.4 Einteilung der Umwandlungsprozesse in Gruppen

Die Umwandlungsprozesse zwischen den Partikelklassen beschreiben die Änderung der Massendichte  $L_i$  und der Anzahldichte  $N_i$  (Kapitel 2.5). Bei jedem Prozess, an dem eine Partikelklasse beteiligt ist, nimmt ihre Massendichte und/oder Anzahldichte zu oder ab. Die Änderung der Massendichte wird im Zwei-Momenten-Schema für die allermeisten Umwandlungsprozesse als Modellvariable ausgegeben. In dieser Arbeit sind es 53 Umwandlungsprozesse, für die die Änderung von  $L_i$ , integriert über das Modellgebiet, zu jedem Zeitschritt als Masse ausgegeben wird.

Um einen Überblick über die Umwandlungsprozesse zu bekommen, die zur Zunahme oder Abnahme der Masse einer Partikelklasse führen, wurden anfangs für alle Partikelklassen diejenigen Umwandlungsprozesse herausgesucht, an denen die Partikelklasse beteiligt ist. Danach wurde jeweils zwischen Umwandlungsprozessen unterschieden, die zur Zunahme der Massendichte der Partikelklasse oder zur Abnahme führen. In einem dritten Schritt wurde untersucht, bei welchen Umwandlungsprozessen sich nur die Massendichte  $L_i$  ändert und bei welchen sich zusätzlich die Anzahldichte  $N_i$  ändert. Dabei hat sich gezeigt, dass diese Unterscheidung bei den Prozessen, die zu einer Zunahme der Massendichte einer Partikelklasse beitragen, sinnvoll ist, während sie bei den Prozessen, die zu einer Abnahme führen, nicht zur Übersichtlichkeit beiträgt.

Somit werden die Prozesse jeweils in drei Gruppen unterteilt. Die Prozesse, die zur Zunahme der Massendichte einer Partikelklasse beitragen und neben der Änderung der Massendichte auch eine Änderung der Anzahldichte zur Folge haben, werden in der Gruppe der Bildungsprozesse zusammengefasst. Die Prozesse, die nur zu einer Zunahme der Massendichte einer Partikelklasse beitragen, werden zu Wachstumsprozessen gruppiert. Sämtliche Prozesse, die zu einer Abnahme der Massendichte einer Partikelklasse führen, gehören zur Gruppe der Abbauprozesse. Für Wasserdampf werden ebenfalls die Prozesse in Gruppen eingeteilt. Da es sich um ein Gas handelt, kann sich nur die Massendichte ändern. Deshalb wird bei Wasserdampf nur zwischen Bildungs- und den Abbauprozessen unterschieden. Ab jetzt umschließt der Begriff „Partikelklasse“ der Einfachheit halber auch Wasserdampf.

In Anhang A.1 sind für jede Partikelklasse alle Prozessgruppen mit den zugehörigen Umwandlungsprozessen aufgelistet. Dabei wird zusätzlich unterschieden, welche weitere Partikelklasse an einem Prozess beteiligt ist. Alle Prozesse treten mindestens zweimal auf, zum Einen als Abbauprozess der einen Partikelklasse, zum Anderen als Bildungs- oder Wachstumsprozess der anderen Partikelklasse. Besonders bei den Bereifungsprozessen und den mit ihnen verbundenen Prozessen der Eismultiplikation, des verstärkten Schmelzens und des Abtropfens von Wasser, können mehr als zwei Partikelklassen an einem Prozess beteiligt sein. Bei den Bereifprozessen von Regentropfen an Wolkeneis bzw. Schnee zu Graupel nimmt die Massen- und Anzahldichte von Graupel zu, während sie bei beiden Stoßpartnern abnimmt. Bei Prozessen, die mit Bereifen zusammenhängen, wird in Abhängigkeit von verschiedenen Eigenschaften (Kapitel 2.5.7) in jedem Zeitschritt entschieden, ob die Massen- und Anzahldichte der einen oder der anderen Partikelklasse geändert wird. In der Auswertung wurden die Prozesse über vier Stunden akkumuliert. Somit tritt eine Reihe von Prozessen auf, bei denen die Massendichte von zwei

verschiedenen Partikelklassen zunimmt bzw. abnimmt. Die im Modell ausgegebene Masse ist dann die Summe aus der Veränderungen in beiden betroffenen Partikelklassen. Im Anhang A.1 sind diese Prozesse mit  $1/2$  gekennzeichnet. Es wird angenommen, dass den zwei Partikelklassen jeweils die Hälfte der bei dem Prozess ausgegebenen Masse abgezogen bzw. hinzuaddiert wird. Dies ist natürlich nur eine Näherung. Wie sich herausstellt, fallen die betroffenen Prozesse im Vergleich zu anderen Prozessen nicht ins Gewicht.

## 4 Ergebnisse

In diesem Kapitel wird für Zeitraum von 48h (6.1.2007 12 UTC bis 8.1.2007 12 UTC) an insgesamt acht Simulationen (Kapitel 3.3) der Einfluss des Impfens mit dem Ziel der Niederschlagsverzögerung analysiert und quantifiziert. Die Simulationen teilen sich auf in vier mit Wolkenimpfen und vier ohne Wolkenimpfen. Es werden vier verschiedene CCN-Konzentrationen angenommen (Kapitel 3.3). Dabei wird der Zeitraum gesucht, in dem der Großteil des Niederschlags fällt. Die ersten 3 Stunden werden nicht in die Untersuchung mit einbezogen, da durch die Initialisierung der Simulationsläufe mit Randdaten Effekte auftreten, die die Resultate verfälschen (Kapitel 3.2). Zwischen 3h - 25h nach der Initialisierung des Modelllaufes fällt ein Großteil des Niederschlags. Nach 25h Simulationszeit (7.1.2007 13 UTC) fallen keine nennenswerten Niederschlagsmengen mehr.

Der Untersuchungszeitraum umfasst somit zunächst 22 Zeitstunden (6.1.2007 15:00 UTC – 7.1.2007 13:00 UTC). Für diesen Zeitraum ist in Abbildung 4.1 der über je 30 min akkumulierte Niederschlag dargestellt. Es werden die Ergebnisse bei niedriger CCN-Konzentration verglichen. In der oberen Graphik sind sowohl der Gesamtniederschlag als auch der Niederschlag über Meer und Land, bezogen auf das Modellgebiet, für den Simulationslauf ohne Impfen angegeben. In der unteren Grafik wird dieser Niederschlag mit dem des Modelllaufes mit zusätzlichem Impfen verglichen. Der gesamte dargestellte Zeitraum kann in drei Niederschlagsereignisse eingeteilt werden:

1. 5 h - 13 h Modellzeit (Zeitraum 1)
2. 13 h - 16 h 30 min Modellzeit (Zeitraum 2)
3. 16 h 30 min -25 h Modellzeit (Zeitraum 3)

Während des 1. Zeitraums fällt der meiste Niederschlag, gefolgt von 3. Zeitraum mit weniger Niederschlag. Der 2. Zeitraum weist lediglich ein paar schwächere Niederschläge auf. Man erkennt, dass im ersten Zeitabschnitt der Anteil des Niederschlags über Land am Gesamtniederschlag wesentlich höher ist als im dritten Zeitabschnitt. In Kapitel 4.1 werden Unterschiede zwischen dem 1. und 3. Niederschlagszeitraum an den Simulationen mit niedriger CCN-Konzentration näher untersucht. In Kapitel 4.2 wird innerhalb des 3. Zeitraum der vierstündige Zeitabschnitt 16h30-20h30 ausgewählt. In diesem Zeitabschnitt werden die Niederschlagsmengen und -verteilungen für alle 8 Läufe verglichen. Um die Unterschiede der Zusammensetzung der Partikel in den Wolken zwischen den Simulationen darzustellen, werden in Kapitel 4.3 die in dem Modellgebiet vorhandenen Massen der Partikelklassen untersucht. Mit der in Kapitel 3.4 vorgenommenen Einteilung der Prozesse zwischen den Partikelklassen werden in Kapitel 4.4 für die Simulationen bei niedriger CCN-Konzentration die Unterschiede der Niederschlagsbildung in der Simulation mit Impfen und ohne Impfen untersucht. Anhand der in Kapitel 4.4 gemachten Beobachtungen werden in Kapitel 4.5 die Unterschiede der Prozesse in Abhängigkeit von der CCN-Konzentration untersucht.

### 4.1 Vergleich des 1. mit dem 3. Niederschlagszeitraum

In der unteren Grafik von Abbildung 4.1 wird die Differenz der Niederschlagsmenge zwischen den Simulationen mit und ohne Impfen bei niedriger CCN-Konzentration angegeben. Anhand dieser Grafik

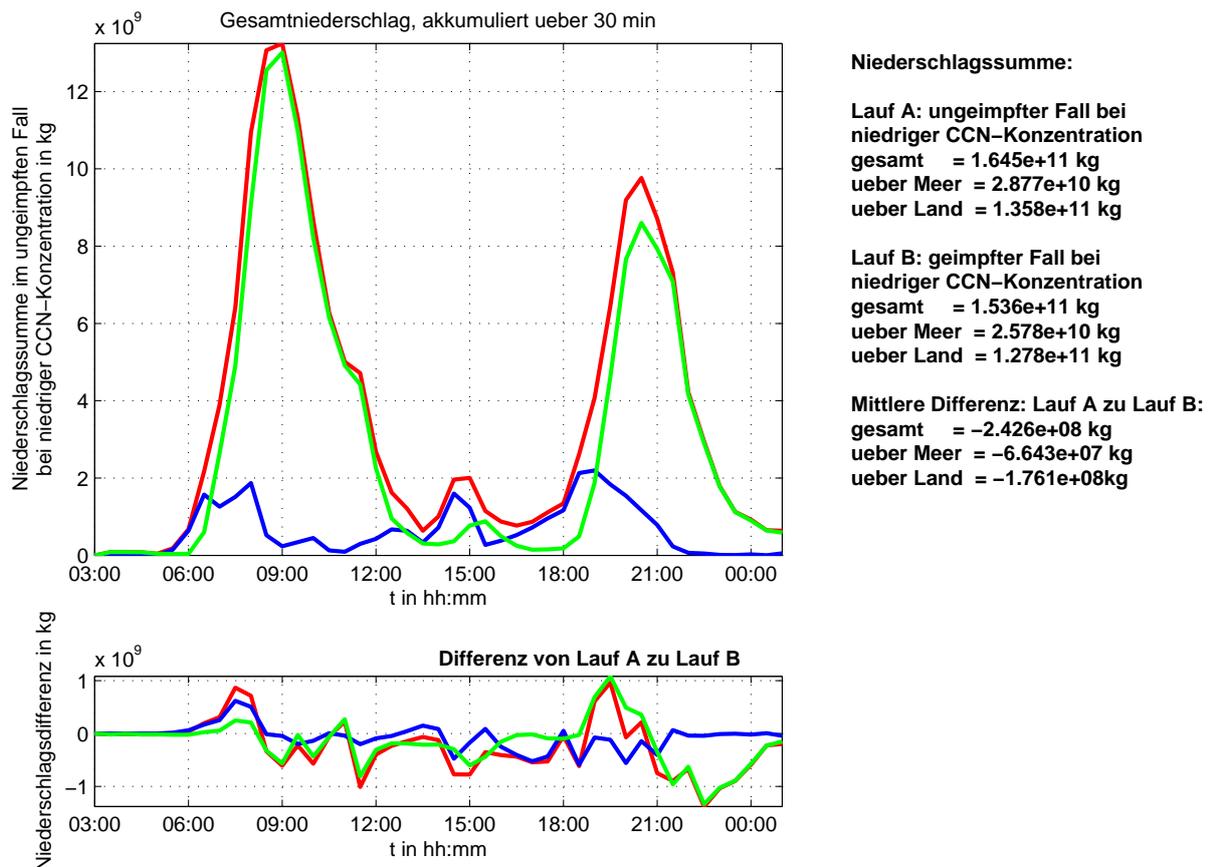


Abbildung 4.1: Halbstündig akkumulierter Niederschlag in  $10^9$  kg als Funktion der Simulationszeit in h. In der oberen Grafik ist Lauf A dargestellt. In der unteren Grafik wird die Differenz von Lauf A zu Lauf B angegeben. Die grüne Kurve stellt den Niederschlag über Land dar, die blaue Kurve den Niederschlag über Meer. Die rote Kurve stellt die Summe aus dem Niederschlag über Meer und Land dar.

lassen sich die Niederschlagsmengen zwischen der Simulation mit Impfen und ohne Impfen verglichen. Man sieht, dass die Maximalwerte des halbstündigen Niederschlags sowohl im ersten als auch im dritten Niederschlagszeitraum eine Grenze markieren. Während vor diesem Zeitpunkt mehr Niederschlag im Simulationslauf mit Impfen fällt, fällt mehr Niederschlag in der Simulation ohne Wolkenimpfen, nachdem das Niederschlagsmaximum erreicht wird. Vergleicht man jeweils die ersten Hälften der Niederschlagszeiträume, so ist im dritten Zeitraum mit Impfen der Zugewinn an Niederschlag über Land größer als im ersten Zeitraum. Gleichzeitig ist im ersten Zeitraum mit Impfen der Zuwachs an Niederschlag über Meer größer als im dritten Zeitraum. In der ersten Hälfte des dritten Zeitraums nimmt mit Impfen der Niederschlag über Meer sogar vorwiegend ab. Zusammenfassend lässt sich sagen, dass sich der Zeitraum 16h 30min - 20h 30min (1. Hälfte des 3. Zeitabschnittes) zum Impfen wesentlich besser eignet als der Zeitraum 5h - 9h (1. Hälfte des 1. Zeitraums).

Im Folgenden werden in diesen beiden Zeiträumen die 2m- Temperatur, die 2m- Taupunkttemperatur und das 10m-Windfeld untersucht. Sie werden im Anhang A.2 in den Abbildungen A.1 - A.8 für die Simulation mit Impfen und ohne Impfen für die Zeitpunkt 7h 30min und 19h angegeben. Als erstes werden die Simulationen ohne Impfen untersucht. Zum Zeitpunkt 7h 30min erkennt man im Windfeld über der Küste eine Konvergenzzone. Aus westlichen Richtungen wird über das Meer milde feuchte Luft Richtung Küste transportiert. Die Luft ist über dem Meer etwa 5 K wärmer als über Land. Über

Land ist die Taupunktstemperatur ebenfalls etwa 5 K niedriger als über Meer. Die Konvergenzzone bildet sich dort, wo der größte Gradient der Temperatur und der Taupunktstemperatur ist. Das bedeutet, dass die Konvergenzzone im 1. Zeitraum frontal geprägt ist.

In den Abbildungen A.5 - A.8 für den Zeitpunkt 19h liegt eine Konvergenzzone etwa 30 km vor der Küste. Über Meer weht der Wind aus westlichen Richtungen, im nördlichen Bereich des Modellgebietes dreht er auf südwestliche Richtungen. Nahe der Küste weht ein ablandiger Wind aus südlichen Richtungen. Auch zu diesem Zeitpunkt ist die Temperatur über Meer etwa 5 K höher als über Land. Der Gradient der Temperatur ist im Vergleich zu 7h 30min kleiner. Die Taupunktstemperatur hat zu diesem Zeitpunkt über Land und über Meer ähnliche Werte. Der Bereich der höchsten Taupunktstemperaturen liegt an der Küste nahe der Konvergenzzone. Die Gradienten der Temperatur und der Taupunktstemperatur im Bereich der Konvergenzzone sind nicht stärker ausgebildet als im übrigen Modellgebiet. Im 3. Zeitraum ist die Konvergenzzone nicht frontal geprägt. Im Anhang A.5 wird für die Simulationen mit und ohne Impfen in Abbildung A.14 und A.15 das Windfeld für 19h in einer Höhe von 2250m angegeben. In beiden Simulationen dreht der Wind in einer Höhe von 1500m über der Küste auf westliche Richtungen. Dies gibt Aufschluss darüber, dass sich im dritten Zeitraum ein Landwind ausbildet. Außerdem erkennt man, dass im Bereich der Konvergenzzone die Temperatur höher ist als in der Umgebung. Die 0° C Grenze liegt im Bereich der Konvergenzzone in einer Höhe zwischen 2000 – 2250m.

Es bildet sich eine Land-See-Windzirkulation aus, wenn das Meer 5 - 10°C wärmer ist als das Land. Aufgrund der Isthmischen Unterschiede zwischen Meer und Land sinkt Luft über dem „kühlen“ Land ab, während sie über dem „warmen“ Meer aufsteigt. Aufgrund der Massenerhaltung strömt bodennah kühle Luft vom Land auf das Meer. In der Höhe wird Luft vom Meer über das Land transportiert. Die Wetterlage im Zeitraum 16h 30min - 20h 30min entspricht den Vorgaben, mit denen bei Noppel et al. (2009) die semi-idealisierten Simulationen berechnet wurden. Der Vergleich der Simulationen mit und ohne Impfen zeigt, dass um 19h die Konvergenzzone bei Impfen näher an der Küste liegt als bei der Simulation ohne Impfen. Um 7h 30min dagegen verlagert sich die Konvergenzzone bzw. Front durch Impfen nicht.

In den Abbildungen 4.2 und 4.3 wird die Verteilung im Modellgebiet des über den Zeitraum 16h 30min – 20h 30min akkumulierten Gesamtniederschlags für die Simulationen mit und ohne Impfen bei niedriger CCN-Konzentration dargestellt. In der Modellausgabe zeigt sich, dass der Niederschlag fast ausschließlich als Regen fällt. Die Anteile von Graupel und Hagel am Gesamtniederschlag können vernachlässigt werden. Das Gebiet, in dem Niederschlag fällt, erstreckt sich vom Bereich der Konvergenzzone bis zum Jordangraben im Osten. Man erkennt, dass sich bei Impfen mit der Konvergenzzone auch der Niederschlag in Richtung Küste verschoben hat (Abbildung 4.3). Es wird die Aussage aus Abbildung 4.1 verdeutlicht, dass mit Impfen weniger Niederschlag über Meer fällt, dafür aber mehr Niederschlag über Land. In Anhang A.4 wird in Abbildungen A.4 und A.4 die Verteilung des akkumulierten Gesamtniederschlags für den Zeitraum 5h - 9h für die gleichen Simulationen dargestellt. In diesem Zeitraum verlagert sich der Niederschlag durch Impfen nicht über Land.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass in den beiden untersuchten Zeiträumen sich der Niederschlag nur dann in Richtung Küste verlagert, wenn sich die Konvergenzzone verlagert. Zur weiteren Untersuchung wird nur der Zeitraum 16h 30min – 20h 30min ausgewählt, weil er die gesuchte Wetterlage hat.

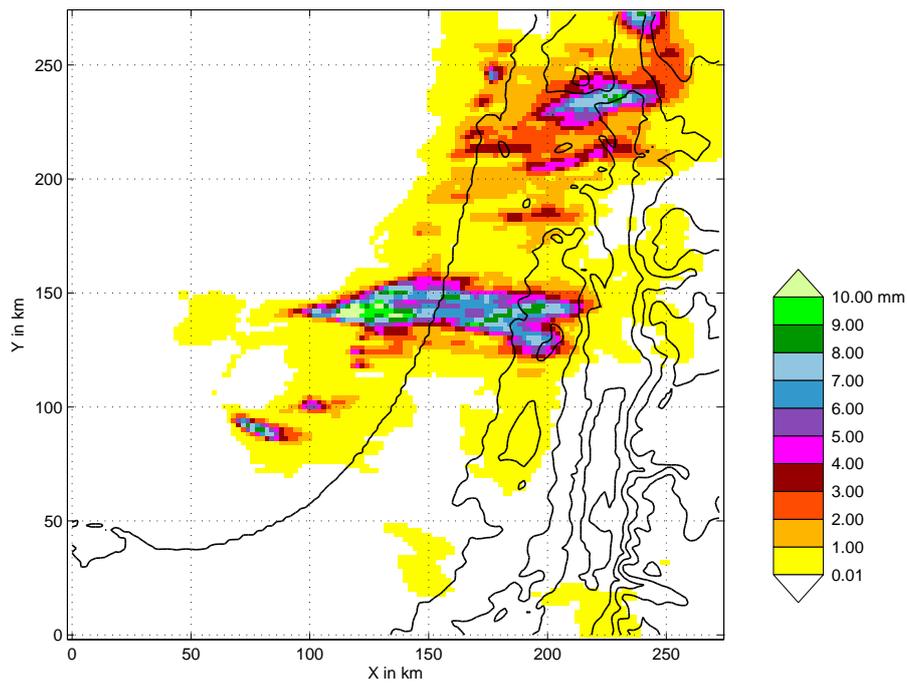


Abbildung 4.2: Simulation ohne Impfen bei niedriger CCN-Konzentration: über den Zeitraum 16h 30min – 20h 30min akkumulierter Niederschlag in mm

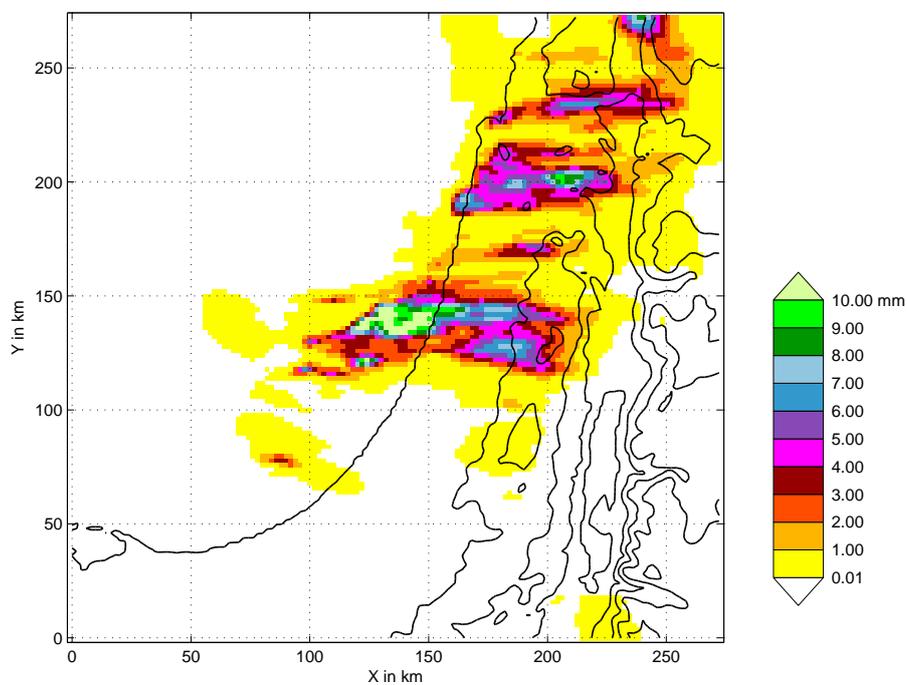


Abbildung 4.3: Simulation mit Impfen bei niedriger CCN-Konzentration: über den Zeitraum 16h 30min – 20h 30min akkumulierter Niederschlag in mm

## 4.2 Niederschlagsverteilung im Zeitraum 7.1.2007 4:30 Uhr UTC bis 7.1.2007 8:30 Uhr UTC

Jetzt wird der akkumulierte Gesamtniederschlag im den Zeitraum 16h 30min – 20h 30min für alle 8 Simulationen verglichen. In Anhang A.6 ist für die mittlere, hohe und sehr hohe CCN-Konzentration in den Abbildungen A.16 – A.21 jeweils der im Modellgebiet akkumulierte Niederschlag dargestellt. Im Vergleich zu 4.2 und 4.3 sieht man, dass der Gesamtniederschlag mit höherer CCN-Konzentration abnimmt. In den Simulationen mit Impfen nimmt der Gesamtniederschlag dabei stärker ab als in den Simulationen ohne Impfen. Unabhängig von der CCN-Konzentration wird der Niederschlag durch Impfen in Richtung Küste auf Land verschoben. In Tabelle 4.1 sind die akkumulierten Niederschlagssummen für die 8 Simulationen in  $10^9$  kg angegeben. Es wird neben dem Gesamtniederschlag auch der Niederschlag über Meer und über Land angegeben. Die Werte bestätigen die gemachten Beobachtungen. Es zeigt sich, dass der Effekt der Abnahme des Gesamtniederschlags größer ist als die Verlagerung des Niederschlags über Land. Somit wird nur bei niedriger CCN-Konzentration mit Impfen eine effektive Niederschlagszunahme über Land erreicht.

Tabelle 4.1: Der akkumulierte Gesamtniederschlag im Modellgebiet zwischen den Modellzeitpunkten 16 h 30 min und 20 h 30 min

Simulation	Niederschlag Gesamt in $10^9$ kg	Niederschlag über Land in $10^9$ kg	Niederschlag über Meer in $10^9$ kg
niedrige CCN-Konzentration ohne Impfen	32,46	21,06	11,40
niedrige CCN-Konzentration mit Impfen	32,56	23,41	9,15
mittlere CCN-Konzentration ohne Impfen	32,26	20,81	11,38
mittlere CCN-Konzentration mit Impfen	26,99	20,35	6,63
hohe CCN-Konzentration ohne Impfen	29,78	20,55	9,23
hohe CCN-Konzentration mit Impfen	20,22	14,88	5,34
sehr hohe CCN-Konzentration ohne Impfen	26,82	17,18	9,64
sehr hohe CCN-Konzentration mit Impfen	16,96	12,12	4,89

### 4.3 Masse der in der Atmosphäre befindlichen Partikel

Um die Unterschiede in der Niederschlagsverteilung und -menge zu verstehen, werden für jede Partikelklasse und Wasserdampf die Umwandlungsprozesse untersucht. Zuvor wird die Masse der Partikel betrachtet, die sich im Modellgebiet zu Beginn und zum Ende des Untersuchungszeitraumes in der Atmosphäre befinden. Vergleicht man in Tabelle 4.2 den Gesamtzuwachs von den Partikeln aller Klassen während des Untersuchungszeitraumes von 16 h 30 min bis 20 h 30 min Modellzeit, so fällt auf, dass mit höherer CCN-Konzentration eine größere Masse an Partikeln in der Atmosphäre verweilt. Während

Tabelle 4.2: Masse der Partikel in der Atmosphäre zu Beginn und zum Ende des Untersuchungszeitraumes, sowie der Zuwachs der Partikel im Gesamten und in den einzelnen Klassen für die acht Läufe mit und ohne Impfen bei unterschiedlicher CCN-Konzentration des Aerosols

Partikel- klasse	Zeit- Punkt	Masse der Partikelklasse in $10^9$ kg in der Simulation							
		niedrig		mittel		hoch		sehr hoch	
		ohne Impfen	mit Impfen	ohne Impfen	mit Impfen	ohne Impfen	mit Impfen	ohne Impfen	mit Impfen
Wolken- tropfen	16 h 30 min	0,579	1,159	0,817	1,226	0,986	1,390	1,046	1,403
	20 h 30 min	2,416	4,626	3,340	6,046	4,984	7,233	5,556	8,394
	<b>Zuwachs</b>	<b>1,837</b>	<b>3,467</b>	<b>2,523</b>	<b>4,820</b>	<b>3,998</b>	<b>5,843</b>	<b>4,510</b>	<b>6,991</b>
Regen- tropfen	16 h 30 min	0,929	0,252	0,652	0,298	0,428	0,233	0,466	0,262
	20 h 30 min	6,063	2,118	4,327	1,570	3,275	1,293	3,164	1,230
	<b>Zuwachs</b>	<b>5,134</b>	<b>1,866</b>	<b>3,675</b>	<b>1,272</b>	<b>2,847</b>	<b>1,060</b>	<b>2,698</b>	<b>0,968</b>
Wolken- eis	16 h 30 min	0,022	0,020	0,033	0,027	0,026	0,033	0,028	0,043
	20 h 30 min	0,220	0,448	0,350	0,461	0,397	0,512	0,417	0,528
	<b>Zuwachs</b>	<b>0,198</b>	<b>0,428</b>	<b>0,317</b>	<b>0,437</b>	<b>0,371</b>	<b>0,479</b>	<b>0,389</b>	<b>0,485</b>
Schnee	16 h 30 min	0,005	0,014	0,015	0,007	0,009	0,020	0,010	0,027
	20 h 30 min	0,072	0,634	0,235	0,664	0,306	0,914	0,291	0,675
	<b>Zuwachs</b>	<b>0,067</b>	<b>0,620</b>	<b>0,220</b>	<b>0,657</b>	<b>0,297</b>	<b>0,894</b>	<b>0,281</b>	<b>0,648</b>
Graupel	16 h 30 min	0,380	0,049	0,373	0,209	0,158	0,157	0,170	0,183
	20 h 30 min	1,792	2,064	2,144	2,004	1,932	1,804	1,651	1,503
	<b>Zuwachs</b>	<b>1,412</b>	<b>2,015</b>	<b>1,771</b>	<b>1,795</b>	<b>1,774</b>	<b>1,647</b>	<b>1,481</b>	<b>1,320</b>
Hagel	16 h 30 min	0,020	0,000	0,014	0,005	0,002	0,001	0,004	0,010
	20 h 30 min	0,006	0,016	0,012	0,025	0,009	0,032	0,011	0,031
	<b>Zuwachs</b>	<b>0,014</b>	<b>0,016</b>	<b>-0,002</b>	<b>0,020</b>	<b>0,007</b>	<b>0,031</b>	<b>0,007</b>	<b>0,021</b>
<b>Zuwachs der Hydrometeormasse</b>		<b>8,662</b>	<b>8,412</b>	<b>8,504</b>	<b>9,001</b>	<b>9,294</b>	<b>9,954</b>	<b>9,366</b>	<b>10,433</b>

bei maritimer CCN-Konzentration die Gesamtmasse in den Simulationen mit Impfen niedriger ist als in denen ohne Impfen, ist mit höherer CCN-Konzentration die Gesamtmasse durch Impfen stets höher. Mit höherer CCN-Konzentration steigt vor allem die Masse von Wolkentropfen stark an. In den Simulationen mit Impfen befindet sich mehr Wolkentropfenmasse als in den ohne Impfen. Mit der Regentropfenmasse verhält es sich umgekehrt. Sowohl mit steigender CCN-Konzentration als durch Impfen verringert sich die Masse von Regentropfen. Bei Wolkeneis und Schnee zeigt sich, dass mit höherer CCN-Konzentration in Simulationen ohne Impfen ihre Massen deutlich ansteigen. Trotzdem sind die Massen von Wolkeneis und Schnee durch Impfen stets größer. Mit höherer CCN-Konzentration verändern sie sich aber kaum. Bei Graupel zeigt die Masse in den Simulationen ohne Impfen mit hö-

herer CCN-Konzentration keine eindeutige Tendenz, während durch Impfen die Masse von Graupel mit höherer CCN-Konzentration geringer wird. Der Zuwachs von Hagel ist in allen Simulationen um mindestens eine Größenordnung geringer als in den anderen Partikelklassen. Ein größerer Zuwachs einer Partikelklasse muss bedeuten, dass entweder mehr gebildet wird oder weniger abgebaut wird. Die auffälligsten Änderungen durch Impfen bei höherer CCN-Konzentration zeigen sich bei Graupel. Bei niedriger und mittlerer CCN-Konzentration befindet sich durch Impfen mehr Masse von Graupel in der Atmosphäre, bei hoher und sehr hoher CCN-Konzentration hingegen weniger.

## 4.4 Umwandlungsprozesse bei niedriger CCN-Konzentration

In den folgenden Abschnitten werden im Untersuchungszeitraum die Umwandlungsprozesse zwischen den Partikelklassen untersucht, um Rückschlüsse auf die sowohl durch Impfen als auch durch unterschiedliche CCN-Konzentration veränderte Niederschlagsbildung zu ziehen. Hierfür wurden die 53 berücksichtigten Prozesse für jede Partikelklasse in Gruppen zusammengefasst. Wie in Kapitel 3.4 beschrieben, wird zwischen Bildungs-, Wachstums- und Abbauprozessen unterschieden. In Anhang A.1 werden für jede Partikelklasse die Prozesse der drei Prozessgruppen aufgelistet.

Zunächst werden Unterschiede zwischen den Simulationen mit und ohne Impfen bei niedriger CCN-Konzentration untersucht. In Kapitel 4.5 werden die dabei ermittelten Ergebnisse mit höheren CCN-Konzentrationen verglichen.

In Abbildung 4.4 sind die Prozesse dargestellt, an denen Regentropfen beteiligt sind. Im Folgenden werden die Prozesse für jede Partikelklasse an solch einer Abbildung untersucht. Diese Abbildungen sind folgendermaßen zu lesen: In den großen Pfeilen sind die Massensummen angegeben, die entweder durch Bildungs- und Wachstumsprozesse zu Regentropfen umgewandelt werden oder durch Abbauprozesse aus Regentropfen in andere Partikelklassen umgewandelt werden (Anhang A.1). Dabei beziehen sich die Werte in den oberen bzw. linken Pfeilen auf die Simulation ohne Impfen, in den unteren bzw. rechten Pfeilen auf die Simulationen mit Impfen. In den kleinen Pfeilen werden für jede Prozessgruppe die Anteile der beteiligten Partikelklassen dargestellt. Für Bildung und Wachstum werden die Partikelklassen angegeben, aus denen Masse in Regentropfen umgewandelt wird. Für Abbau werden die Partikelklassen angegeben, in denen Masse von Regentropfen umgewandelt wird. Die fett hervorgehobenen Pfeile kennzeichnen die Prozesse, bei denen die umgewandelte Masse zwischen den Simulationen mit und ohne Impfen eine Differenz von mehr als  $0,5 \times 10^9 \text{ kg}$  aufweist.

Vergleichen wir als erstes die Summen der Prozesse, die zur Bildung, zum Wachstum und Abbau beitragen. Bei allen drei Prozessgruppen wird in der Simulation ohne Impfen mehr Masse umgesetzt als in der mit Impfen. Durch Impfen verbleibt auch viel weniger Regenmasse in der Atmosphäre als in der Simulation ohne Impfen. Es wird durch Impfen ebenfalls viel weniger Regentropfenmasse durch Abbau in andere Partikelklassen umgewandelt. Vor allem durch Verdunstung zu Wasserdampf und durch Umwandlung zu Graupel wird die Regentropfenmasse reduziert.

Bei der Bildung von Regentropfen gibt es zwischen den Simulationen mit und ohne Impfen große Unterschiede. In der Simulation ohne Impfen wandelt sich aus Wolkentropfen wesentlich mehr Masse in Regentropfen um als durch Impfen. Die Autokonversion von Wolkentropfen ist durch Impfen sehr stark reduziert. Durch Impfen wird etwa eine Größenordnung weniger an Masse von Regentropfen aus Wolkentropfen produziert.

Im gleichen Zeitraum wird in der Simulation mit Impfen aber mehr Regenmasse durch die Umwandlung von Graupelpartikeln gebildet. Zu diesem Übergang tragen zwei Prozesse bei, bei denen aber vor allem das Schmelzen von Graupel die Differenz zwischen beiden Simulationen ausmacht. In den Ab-

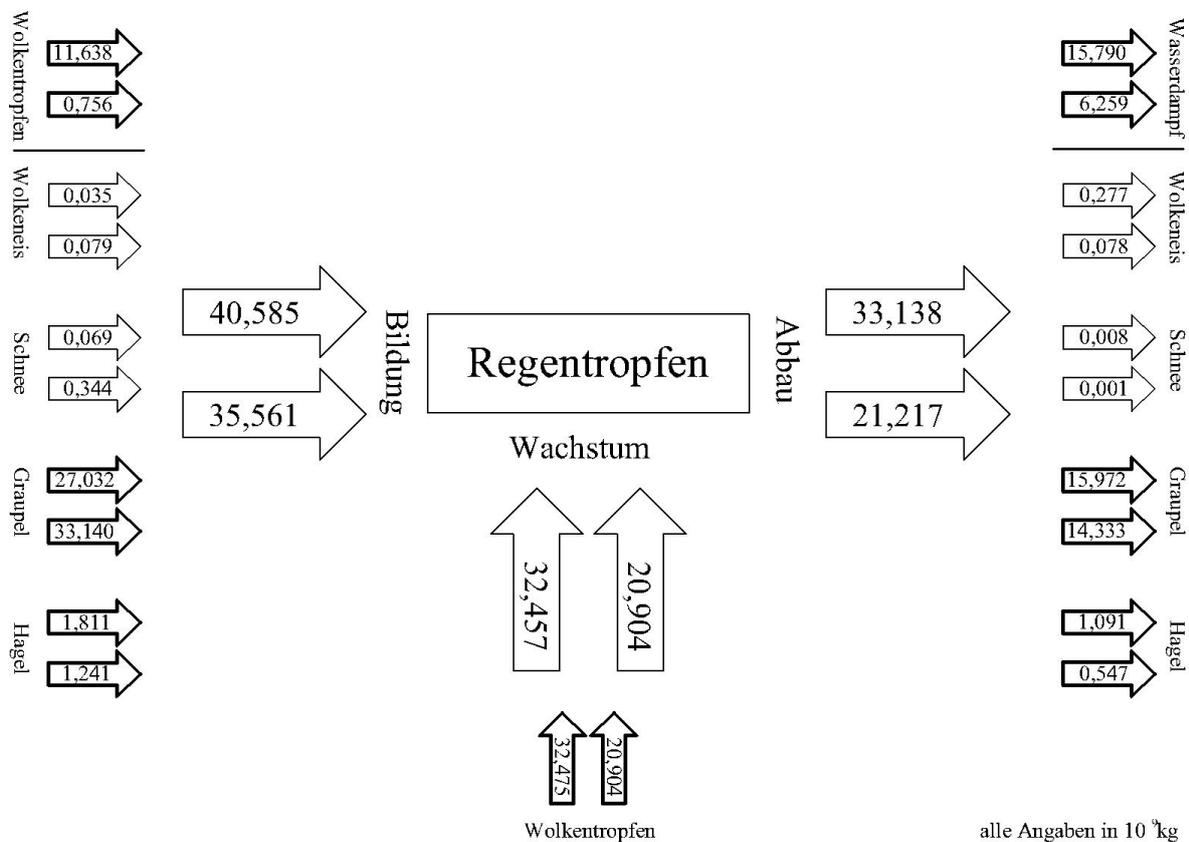


Abbildung 4.4: niedrige CCN-Konzentration: Bildungs-, Wachstums und Abbauprozesse von Regentropfen und die Anteile der an ihnen beteiligten Partikelklassen, akkumuliert über den Zeitraum von 16 h 30 min bis 20 h 30 min in 10<sup>9</sup>kg. Die Werte der jeweils oberen Pfeile beziehen sich auf die Simulation ohne Impfen, die Werte der unteren Pfeile auf die Simulation mit Impfen. Ist die Differenz zwischen den Werten zweier zusammengehöriger Pfeile größer als 0,5 x 10<sup>9</sup>kg, sind die betreffenden Pfeile fett unterlegt.

Abbildungen A.14 und A.15 (Anhang A.5) sieht man, dass die 0° C Grenze knapp unterhalb von 2250m liegt. Aus Graupelpartikeln werden durch Impfen etwa 5 x 10<sup>9</sup>kg mehr Regentropfen gebildet, während durch Autokonversion etwa 11 x 10<sup>9</sup>kg weniger gebildet werden. Ebenfalls weniger Masse bildet sich durch das Schmelzen von Hagel aus. Die Größenordnung dieses Übergangs ist aber um eine Größenordnung geringer als das Schmelzen von Graupel. Im Wesentlichen tragen die Umwandlungen aus Wolkentropfen und Graupel zur Differenz zwischen den beiden Simulationen bei. Beim Wachstum von Regentropfen durch Akkreszenz von Wolkentropfen wird weniger Masse durch Impfen zu Regentropfen umgewandelt. Auch diese Reduzierung hängt mit der durch Impfen veränderten Anzahldichtefunktion zusammen. Zusammenfassend ist für Regentropfen zu sagen, dass durch Impfen weniger Masse durch Autokonversion und Akkreszenz umgewandelt wird, als durch Graupelpartikel zusätzlich gewonnen wird. Gleichzeitig wird durch Impfen weniger Masse in andere Partikelklassen umgewandelt, und es verbleibt am Ende des untersuchten Zeitraumes weniger Masse von Regentropfen in der Atmosphäre.

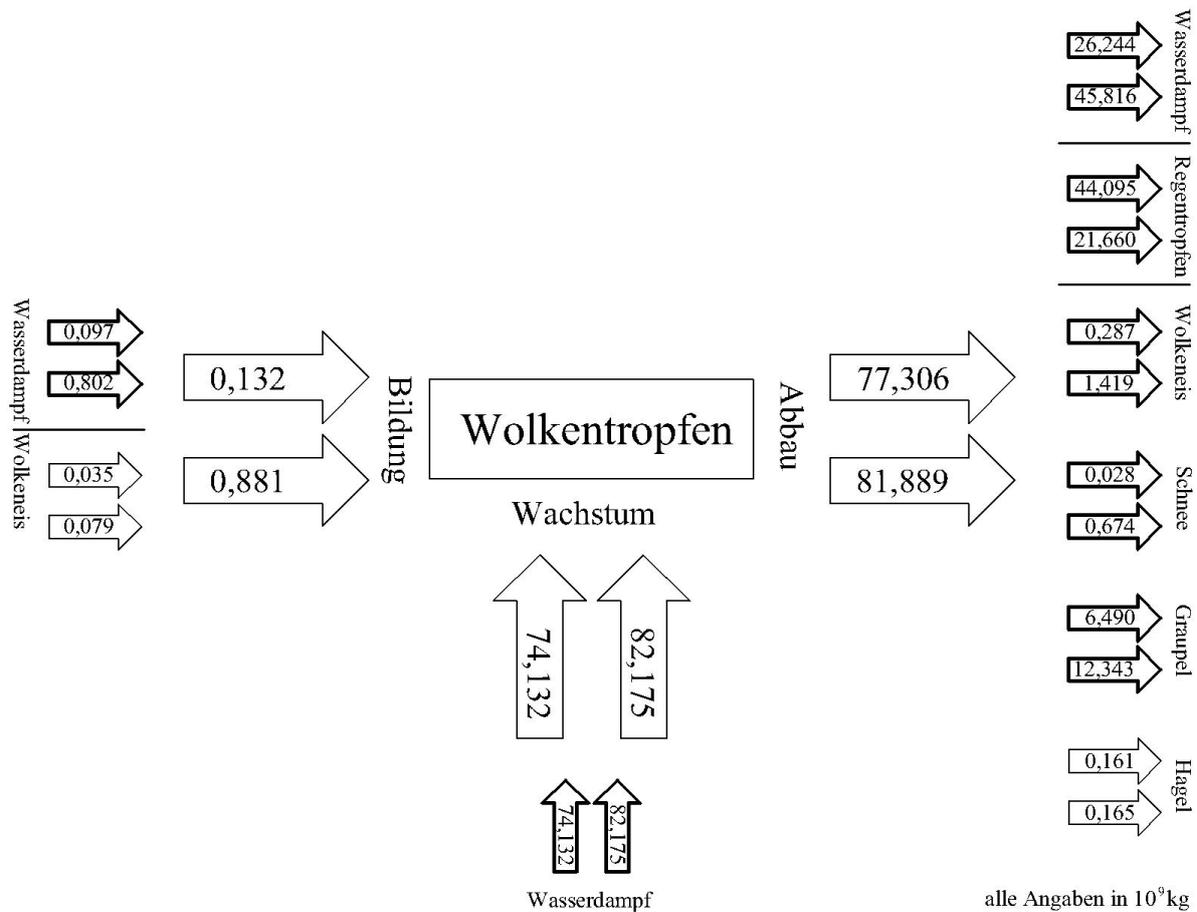


Abbildung 4.5: wie Abbildung 4.4 hier für Wolkentropfen bei niedriger CCN-Konzentration

Bilanziert man für Regentropfen die Prozessgruppen mit der Niederschlagsmenge und dem Anteil der Regentropfenmasse, die in Atmosphäre verbleibt, dann ist diese Bilanz nicht geschlossen. Ein Hauptgrund ist, dass der Transport von Hydrometeoren verschiedener Klassen über den Rand des Modellgebietes hinweg nicht berücksichtigt wird. Dazu kommt, dass das verwendete COSMO-Modell an sich nicht massenerhaltend ist. Für die Regentropfenmasse beträgt diese Fehlmasse in Simulationen ohne Impfen  $2,3 \times 10^9$  kg und durch Impfen  $0,9 \times 10^9$  kg. Von der gesamten in Bildungs- und Wachstumsprozessen produzierten Masse beträgt dieser Anteil 3,2% bzw. 1,5%. Bei den übrigen Partikelklassen kann dieser Anteil teilweise höher sein, hängt aber jeweils von den beiden aufgeführten Faktoren ab.

Wenn durch Impfen bedeutend weniger Wolkentropfen durch Autokonversion und Akkreszenz zu Regentropfen werden, welche Prozesse sind dann für den Abbau, aber auch für die Bildung und das Wachstum signifikant? Hierfür sind in Abbildung 4.5 die Massen angegeben. In Bezug auf die Massen dominieren bei Wolkentropfen die Wachstums- und Abbauprozesse. Bei den Bildungsprozessen ist die Gesamtmasse im Vergleich klein, aber die Differenz zwischen den Simulationen mit und ohne Impfen sticht hier hervor. Durch Impfen werden wesentlich mehr Wolkentropfen nukleiert als in der Simulation ohne Impfen. Da alle Wolkentropfen mit der Masse  $x_{min}$  nukleieren, lässt sich direkt auf die Anzahldichte der neu entstandenen Aerosolteilchen zurückschließen. Durch Impfen entstehen demnach achtmal so viele Wolkentropfen durch Nukleation wie in der Simulation ohne Impfen. Da in der Höhe

zwischen 500 und 3500 m beim Impfen die Anzahldichte der Aersole von  $100 \text{ cm}^{-1}$  auf  $400 \text{ cm}^{-1}$  erhöht wird, kann ein Grund der erhöhten Nukleation in der Verfügbarkeit von Aerosolen in dieser Höhe liegen.

Der andere bei der Bildung von Wolkentropfen mitwirkende Prozess, das Schmelzen von Wolkeneis, ist einer der Prozesse, bei denen angenommen wird, dass die entstehenden Partikel jeweils zur Hälfte verschiedenen Partikelklassen angehören. In diesem Fall werden durch Schmelzen zur Hälfte Wolkentropfen und zur anderen Hälfte Regentropfen erzeugt. Dieser Prozess bildet in der Simulation ohne Impfen ein Viertel der Wolkentropfen, während er durch Impfen nur ein Zehntel der Tropfen erzeugt. Zudem ist die Größe der entstehenden Tropfen abhängig von der Größe der schmelzenden Wolkeneispartikel. Da das  $x_{\text{min}}$  von Wolkeneis um drei Größenordnungen höher ist als das  $x_{\text{min}}$  von Wolkentropfen, entstehen bei gleicher Menge durch das Schmelzen wenigstens um einen Faktor 1000 weniger Teilchen als bei der Nukleation von Wolkentropfen. So fällt also das Schmelzen von Wolkeneis bei der Anzahl von neugebildeten Wolkentropfen nicht ins Gewicht.

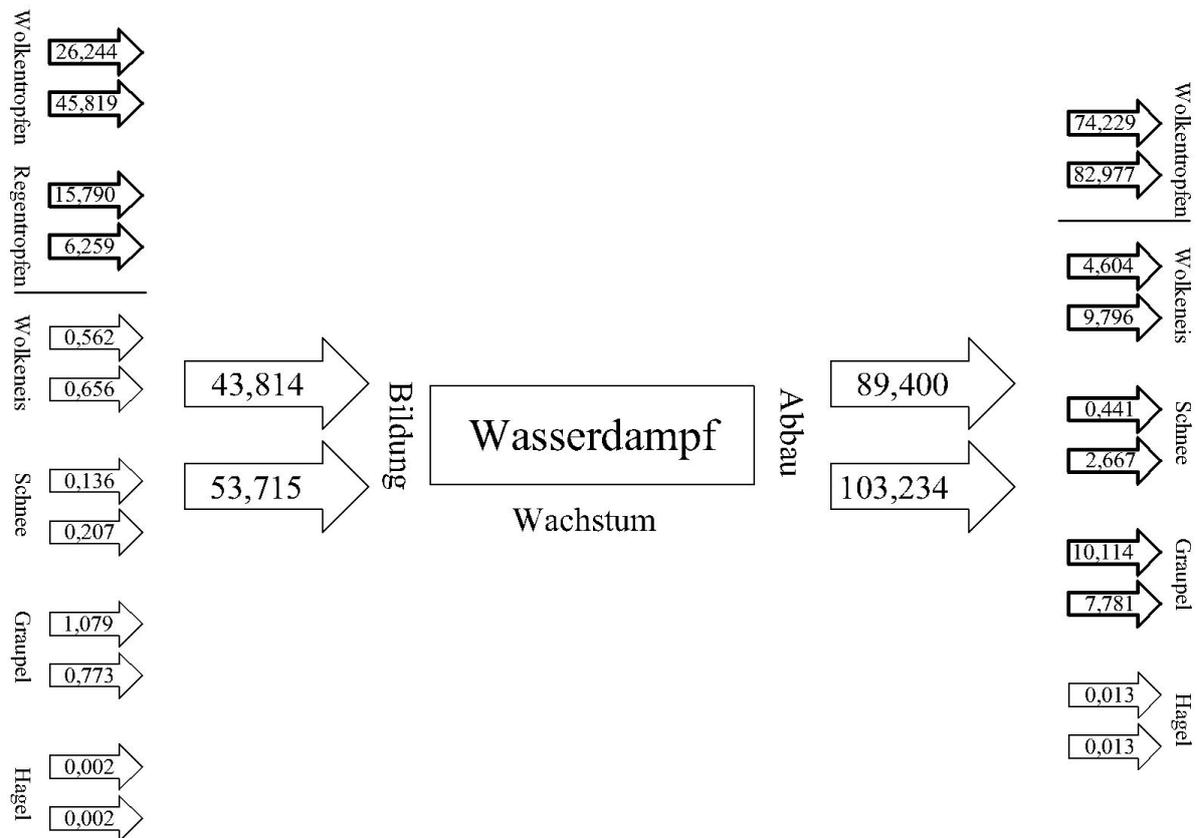
Bei dem Vergleich von Bildung und Wachstum mit dem Abbau fällt auf, dass in der Simulation ohne Impfen mehr Masse abgebaut wird, als durch Wachstum und Bildung produziert wird. Es verbleibt aber auch mehr Masse an Wolkentropfen in der Atmosphäre.

Das Wachstum von Wolkentropfen geschieht durch Deposition von Wasserdampf an den Tröpfchen. Dies ist der Prozess, in dem die größte Masse umgewandelt wird. Durch Impfen kann also der Wasserdampf an einer wesentlich höheren Anzahl von Wolkentropfen deponiert werden. Die Masse des deponierten Wasserdampfes bleibt nahezu gleich.

Der Abbau von Wolkentropfen in andere Partikelklassen wird in der Simulation ohne Impfen von den Umwandlungsprozessen in Regentropfen geprägt. Das Verdunsten von Wolkentropfen hat den zweitgrößten Anteil. Ebenfalls hat der Abbau zu Graupel einen nennenswerten Anteil am Gesamtabbau. Durch Impfen steigt der Anteil der Verdunstung im Vergleich um etwa  $19.6 \times 10^9 \text{ kg}$  an und stellt damit den größten Anteil am Abbau von Wolkentropfen dar. Die Umwandlungsprozesse zu Regentropfen sind währenddessen um etwa  $22,4 \times 10^9 \text{ kg}$  niedriger. Zudem steigen durch Impfen die Umwandlungsprozesse zu Wolkeneis, Schnee und Graupel an. Insgesamt werden zu diesen drei Partikelklassen etwa  $7,6 \times 10^9 \text{ kg}$  mehr Wolkentropfen abgebaut. Die Umwandlung zu Graupel umfasst davon allein knapp  $5.9 \times 10^9 \text{ kg}$ . Schnee und Wolkeneis haben nur einen geringen Anteil an der Gesamtmenge des Abbaus. Dabei nimmt die Masse der zu Wolkeneis umgewandelten Wolkentropfen aber durch Impfen um etwa das fünffache zu und die Masse der Umwandlungsprozesse zu Schnee sogar um das 24-fache. In den Prozessen, die Wolkeneis bzw. Schnee betreffen, nehmen diese Umwandlungsprozesse wichtige Positionen ein. Bevor nun näher auf die Prozesse dieser beiden Partikelklassen eingegangen wird, untersuchen wir als nächstes die Prozesse, die mit dem Wasserdampf verbunden sind.

Bei Wasserdampf gibt es keinerlei Wachstumsprozesse, da er gasförmig ist (Abbildung 4.6). In beiden Simulationen sind die Mengen der Abbauprozesse wesentlich höher als die Bildungsprozesse. Bildet man die Differenz von Abbau- zu Bildungsprozessen, so erhält man die Masse, die im untersuchten Zeitraum aus der Atmosphäre entnommen wurde. Diese Masse ist durch Impfen größer. Dies bedeutet, dass durch Impfen von dem schon vorhandenen Wasserdampf aus der Atmosphäre mehr entnommen wird als in der Simulation ohne Impfen. Spaltet man die Bildungsprozesse nach den Beiträgen einzelner Partikelklassen auf, so ist ein Unterschied vor allem an den Verdunstungsprozessen von Wolkentropfen und Regentropfen erkennbar. Wie oben beschrieben, verdunstet durch Impfen wesentlich mehr Masse von Wolkentropfen, aber gleichzeitig weniger von Regentropfen. Des weiteren sublimiert durch Impfen zwar mehr Wolkeneis und Schnee, aber weniger Graupel.

Bei den Abbauprozessen dominieren die Umwandlungsprozesse zu Wolkentropfen. Durch Impfen wird  $8,7 \times 10^9 \text{ kg}$  mehr Wasserdampfmasse an Wolkentropfen deponiert. Daneben werden noch größere Mengen zu Wolkeneis und Graupel abgebaut. Es wird ebenfalls mehr Wasserdampf zu Wolkeneis und Schnee umgewandelt als in der Simulation ohne Impfen. Durch Impfen wird zu Schnee sechsmal so viel



alle Angaben in  $10^9$  kg

Abbildung 4.6: wie Abbildung 4.4 hier für Wasserdampf bei niedriger CCN-Konzentration

Masse umgewandelt. An Graupel wird aber durch Impfen weniger Masse deponiert. Zusammengefasst wird an Schnee und Wolkeneis durch Impfen etwa  $7,4 \times 10^9$  kg mehr Wasserdampf deponiert, während zu Graupel etwa  $2,3 \times 10^9$  kg weniger deponiert wird.

Als erstes werden nun in Abbildung 4.7 die Prozesse für Wolkeneis näher untersucht und die Mengen, die umgesetzt werden, dargestellt. Von den drei Prozessgruppen werden bei Wolkeneis vor allem über das Wachstum und den Abbau Massen umgesetzt. Durch Impfen ist der Massenzuwachs durch Wachstum der Wolkeneispartikel mehr als doppelt so groß wie in der Simulation ohne Impfen. Durch Abbauprozesse ist die zu anderen Partikelklassen umgewandelte Wolkeneismasse durch Impfen ebenfalls doppelt so hoch. Mit der Bildung von Wolkeneis verhält es sich wie mit der Bildung von Wolkentropfen. Es werden viele kleine Partikel gebildet, die als Summe aber eine kleine Masse bilden. Vor allem durch Gefrieren von Wolkentropfen und Regentropfen wird Wolkeneis gebildet. Der Beitrag von Graupel berücksichtigt die Wirkung von Eismultiplikationsprozessen, die sich beim Bereifen vollziehen. Ein Unterschied zwischen den beiden Simulationen ist nur im Gefrieren von Regentropfen erkennbar.

Die wichtigsten Prozesse, die zum Wachstum des Wolkeneises beitragen, sind die Deposition von Wasserdampf und das Bereifen von Wolkeneis mit Wolkentropfen. Hierbei steuert die Deposition von Wasserdampf mehr Masse bei als das Bereifen von Wolkentropfen. Die Differenz zwischen den Simulationen mit und ohne Impfen wird ebenfalls vor allem durch die stärker ausgeprägte Deposition von

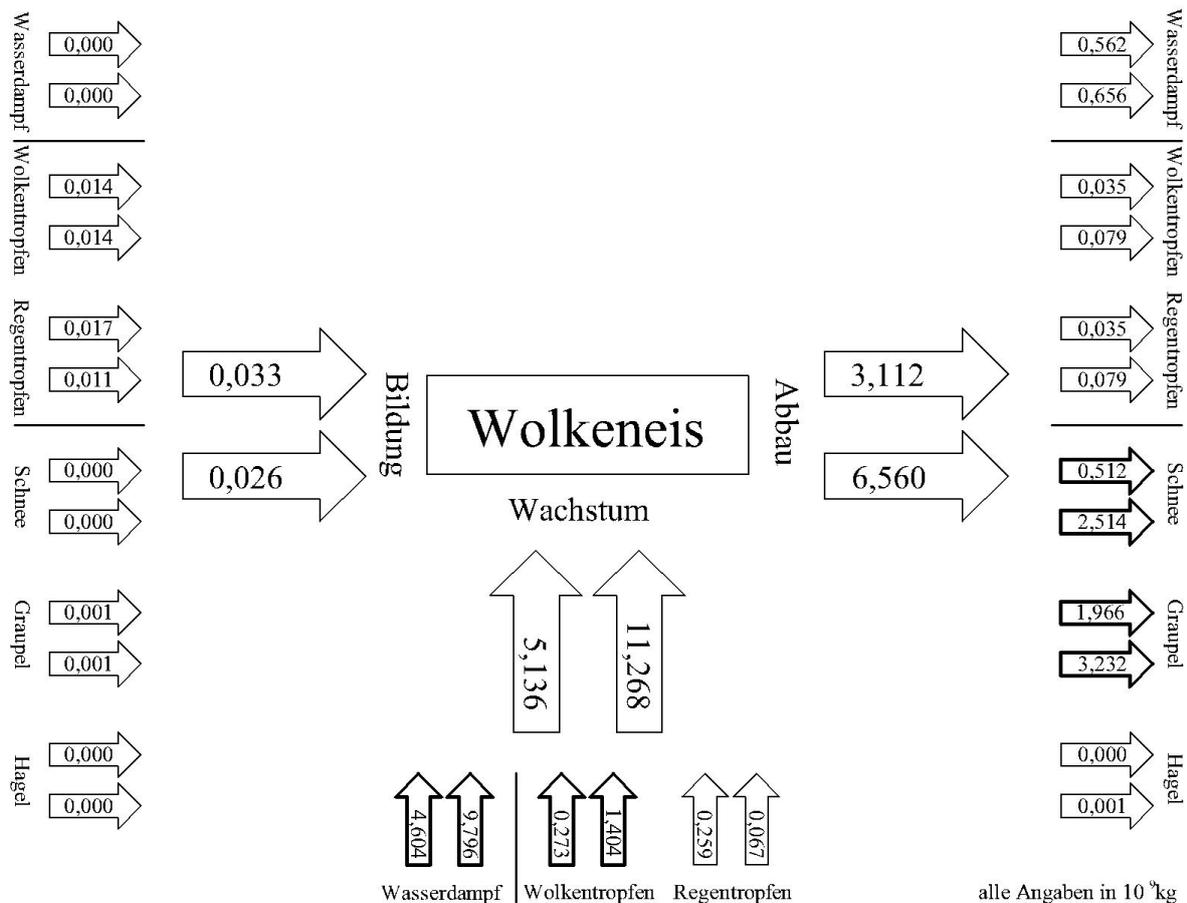


Abbildung 4.7: wie Abbildung 4.4 hier für Wolkeneis bei niedriger CCN-Konzentration

Wasserdampf hervorgerufen. Abgebaut wird Wolkeneis vorwiegend zu Graupel, Schnee und Wasserdampf. Die Differenz der Simulation ohne Impfen zu der mit Impfen wird vor allem durch stärkere Umwandlung zu Schnee und Graupel verursacht. So wird durch Impfen fünfmal mehr Wolkeneis in Schnee umgewandelt. Das heißt, dass das durch Impfen verstärkte Wachstum durch Deposition zu einem großen Teil durch verstärkte Umwandlung in Schnee und Graupel kompensiert wird. Der Anteil von Wolkeneis, der am Ende des untersuchten Zeitraumes in der Atmosphäre verbleibt, ist in der Simulation mit Impfen größer als in der ohne Impfen.

In Abbildung 4.8 werden die Prozesse für Schnee vorgestellt. Die Beiträge durch Wachstumsprozesse sind in beiden Simulationen größer als die durch Bildungsprozesse. Bei allen drei Prozessgruppen gibt es bei Schnee sichtbare Unterschiede zwischen dem ungeimpften und dem geimpften Lauf. Durch Impfen wird dreimal soviel Schneemasse gebildet wie in Simulationen ohne Impfen. Die Bildung von Schnee läuft über den Selbsteinfang von Wolkeneis. Der Unterschied zwischen den beiden Simulationen ist beim Wachstum sogar größer. So ist der Beitrag durch die Deposition von Wasserdampf, Bereifen mit Wolkentropfen sowie Einfang von Wolkeneis durch Impfen wesentlich größer. Den größten Beitrag macht die Deposition von Wasserdampf aus. Der Beitrag des Bereifens von Schnee mit Regentropfen ist dagegen vom Anteil her vernachlässigbar gering. Beim Abbau von Schnee dominiert die Umwandlung zu Graupel. Durch Impfen steigt die Masse von den Umwandlungsprozessen zu Graupel um etwa das

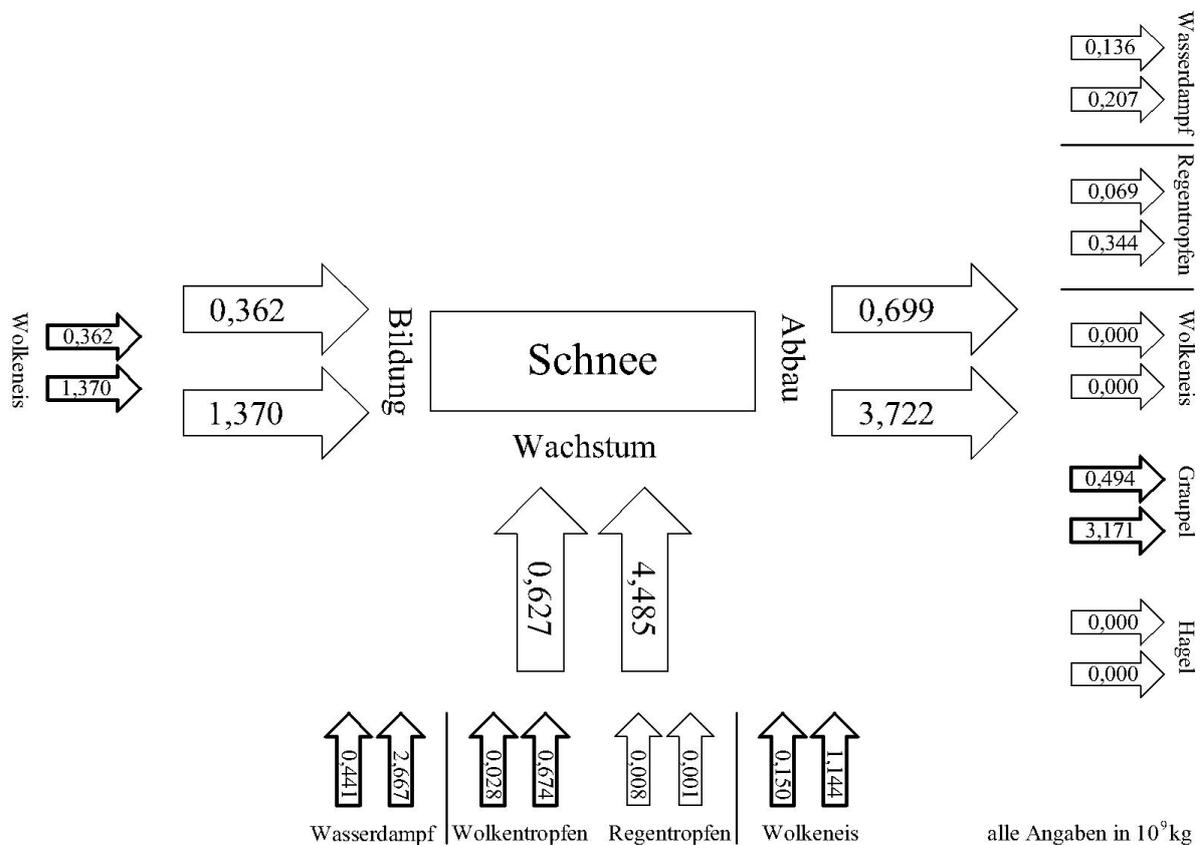


Abbildung 4.8: wie Abbildung 4.4 hier für Schnee bei niedriger CCN-Konzentration

sechsfache an und produziert somit etwa  $2,5 \times 10^9$  kg mehr Graupelmasse. Bemerkenswert ist zudem der Unterschied zwischen den beiden Simulationen bei dem Abbau zu Regentropfen, also dem Schmelzen von Schnee. So ist die Masse zwar im Vergleich zu Graupel gering, aber durch Impfen wird etwa fünfmal soviel Schneemasse geschmolzen wie in Simulationen ohne Impfen. Die Masse von Schnee, die am Ende des Untersuchungszeitraumes in der Atmosphäre verbleibt, ist durch Impfen größer als in der Simulation ohne Impfen.

Wie gezeigt wurde, wird durch Impfen mehr Masse aus Wolkentropfen, Wolkeneis und Schnee zu Graupel umgewandelt als in der Simulation ohne Impfen. Wie sich diese Umwandlungsraten in die übrigen Prozesse einfügen, die Graupel betreffen, stellt sich in Abbildung 4.9 dar. Ähnlich wie bei Wolkentropfen, Wolkeneis und Schnee werden auch bei Graupel wesentlich größere Massen durch Wachstum als durch Bildung produziert. Zwischen den Simulationen mit und ohne Impfen gibt es in den Umwandlungsprozessen zur Bildung von Graupel nur geringe Unterschiede. Etwa zu gleich großen Anteilen entsteht Graupel aus Regentropfen und Wolkeneis. Durch Impfen ist zudem der Anteil der Bildung aus Schnee größer. Bei den Wachstumsprozessen wird in beiden Modellläufen ein Großteil aus Wasserdampf, Wolkentropfen und Regentropfen umgewandelt. Durch Impfen verstärkt sich das Wachstum von Graupel. Die zusätzlich zu Graupel umgewandelte Masse kommt vor allem durch das stärkere Bereifen von Wolkentropfen und die Umwandlung von Wolkeneis und Schnee. Es wird durch Deposition

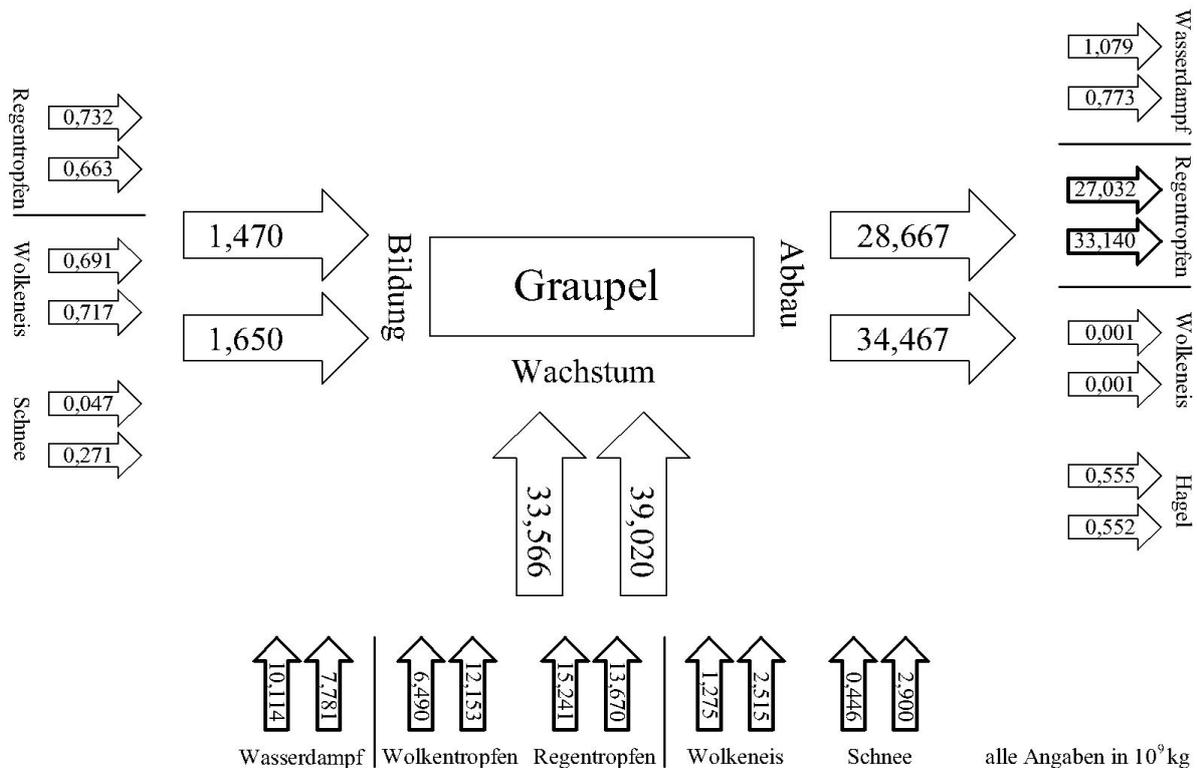


Abbildung 4.9: wie Abbildung 4.4 hier für Graupel bei niedriger CCN-Konzentration

von Wasserdampf und das Bereifen von Regentropfen an Graupel etwa  $3,9 \times 10^9$  kg weniger Graupel erzeugt, durch das Bereifen von Wolkentropfen an Graupel aber zusätzlich  $5,7 \times 10^9$  kg in Graupel umgewandelt. Darüber hinaus wird durch den Einfang von Wolkeneis und Schnee durch Impfen  $3,7 \times 10^9$  kg mehr Masse erzeugt. Der Abbau von Graupel wird durch die Umwandlung zu Regentropfen dominiert. Durch Impfen wird etwa  $6,1 \times 10^9$  kg mehr Masse in Regentropfen umgewandelt.

Hiermit ist der Kreis zu den Regentropfen fast geschlossen. Als verbleibende Partikelklasse werden nun die Prozesse für Hagel in Abbildung 4.10 dargestellt. Am Ende des untersuchten Zeitraumes verbleibt sehr wenig Hagelmasse in der Atmosphäre. Die Masse, die durch Bildung und Wachstum an Hagelmasse erzeugt wird, wird fast vollständig wieder in andere Partikel, vor allem Regentropfen abgebaut. Der Hauptanteil des produzierten Hagels wird durch nasses Wachstum von Graupel gebildet und durch Bereifen von Regentropfen an Hagel vergrößert. Der Vergleich zwischen den Simulationen mit und ohne Impfen zeigt, dass durch Impfen weniger Masse durch Wachstum erzeugt wird und auch weniger Masse abgebaut wird. Hierbei sind vor allem die Umwandlungen von und zu Regentropfen verantwortlich.

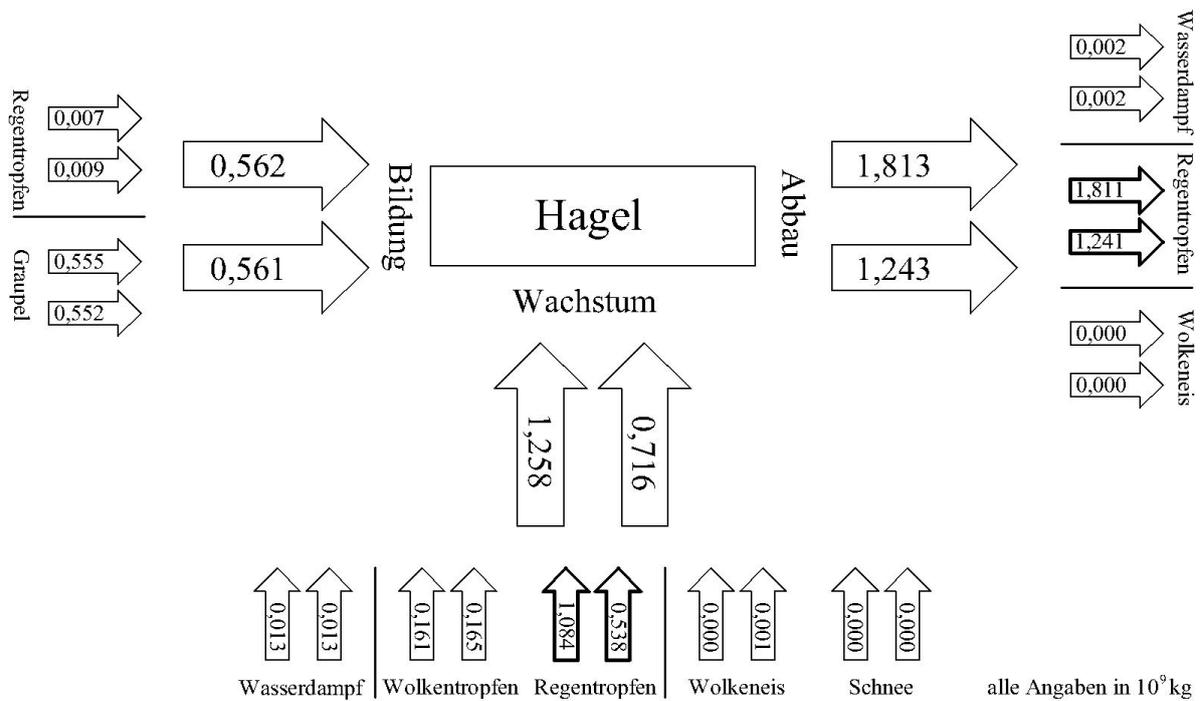


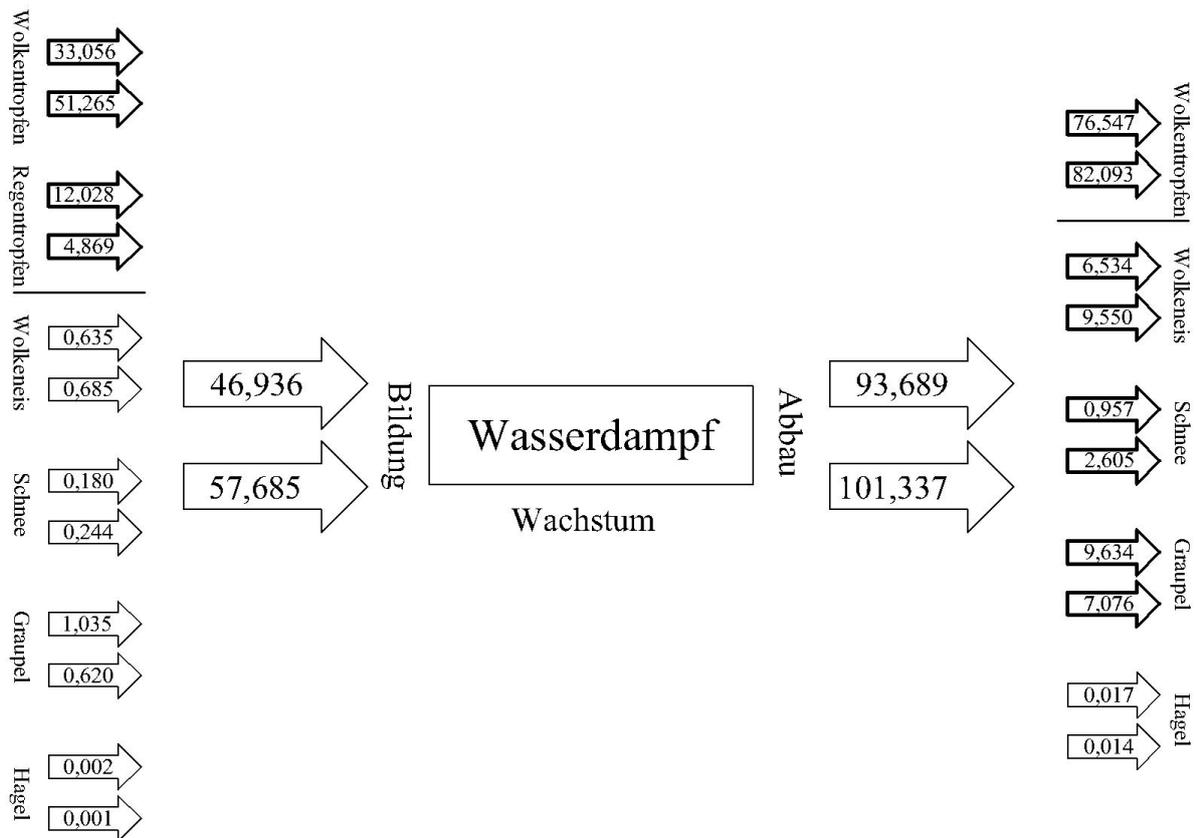
Abbildung 4.10: wie Abbildung 4.4 hier für Hagel bei niedriger CCN-Konzentration

## 4.5 Läufe mit höherer CCN-Konzentration von Aerosol

Um den Einfluss der Konzentration des Aerosols auf die sich durch Impfen verändernden Prozesse aufzuzeigen, werden die Ergebnisse aus den Simulationen mit niedriger CCN-Konzentration mit denen mit mittlerer, hoher und sehr hoher Aerosolhintergrundkonzentration verglichen. Anhand der Darstellungen der Prozesse für die Simulationen mit mittlerer CCN-Konzentration werden die Unterschiede zwischen den verschiedenen CCN-Konzentrationen herausgearbeitet. Die Prozesse für die hohe und die sehr hohe CCN-Konzentration finden sich in Anhang A.7. Bei einzelnen Prozessen wird im Folgenden auf sie verwiesen.

Die Anzahldichte  $N_{cn,0}$  beträgt bei mittlerer CCN-Konzentration  $500 \text{ cm}^{-3}$ . In der Simulation mit Impfen bei niedriger CCN-Konzentration beträgt die Anzahldichte  $N_{cn,0}$  in 500 – 3000m Höhe  $400 \text{ cm}^{-3}$ . Im Folgenden werden die einzelnen Partikelklassen und die von ihnen abhängenden Prozesse nacheinander besprochen.

Fangen wir bei diesen Simulationen mit der Vorstellung von Wasserdampf an. In Abbildung 4.11 ähneln die Zahlen der Abbildung 4.6, dennoch gibt es einige Unterschiede. Es wird generell bei mittlerer CCN-Konzentration mehr Wasserdampf gebildet. Im ungeimpften Lauf wird im Vergleich zur niedrigeren CCN-Konzentration mehr Wasserdampf abgebaut. Im geimpften Fall dagegen wird



alle Angaben in  $10^9$  kg

Abbildung 4.11: wie Abbildung 4.4 hier für Wasserdampf bei mittlerer CCN-Konzentration

im Vergleich mit der niedrigen CCN-Konzentration weniger Wasserdampf abgebaut. Vergleicht man die Differenz zwischen den Massen für Bildung und Abbau für die Simulationen ohne Impfen, so ist diese bei mittlerer CCN-Konzentration etwas größer als bei niedriger CCN-Konzentration. Es wird bei mittlerer und niedriger CCN-Konzentration etwa ähnlich viel Wasserdampf abgebaut, welcher aus der Atmosphäre entnommen wird und nicht durch Umwandlungsprozesse produziert wird. Durch Impfen ist bei niedriger CCN-Konzentration die Differenz zwischen Abbau und Bildung größer als bei mittlerer CCN-Konzentration. Darüber hinaus ist bei niedriger CCN-Konzentration die Differenz zwischen der Masse, die gebildet und abgebaut wird, durch Impfen größer. Bei mittlerer CCN-Konzentration ist hingegen die Differenz in der Simulation ohne Impfen größer als in der mit. Dies bedeutet, dass durch Impfen nur bei niedriger CCN-Konzentration mehr Wasserdampf aus der Atmosphäre entnommen wird. Dies kann bereits in der Atmosphäre vorhandener Wasserdampf oder in das Modellgebiet advehierter Wasserdampf sein. Der Vergleich mit den hohen und sehr hohen CCN-Konzentrationen (siehe Anhang A.7.1) zeigt, dass mit steigender CCN-Konzentration der Abbau von bereits in der Atmosphäre vorhandenem Wasserdampf bei den Simulationen mit Impfen stark vermindert wird. Im Gegensatz dazu ist die Masse des Wasserdampfes, die aus der Atmosphäre entnommen wird, bei allen Simulationen ohne Impfen ähnlich.

Stellen wir nun die Masse des aus der Atmosphäre entnommenen Wasserdampfes der Masse des aus

der Atmosphäre fallenden Niederschlags gegenüber. Der Wert, der sich aus der Differenz ergibt, sollte die Summe aus Tabelle 4.2 ergeben, nämlich den Anteil der neugebildeten Partikel, die am Ende des Untersuchungszeitraumes in der Atmosphäre sind. In Tabelle 4.3 ist neben der berechneten Differenz zwischen Abbau und Bildung von Wasserdampf und der Gesamtmenge des Niederschläge aus Tabelle 4.1 die Differenz aus beiden Größen angegeben. Vergleicht man diese Werte mit denen aus Tabelle

Tabelle 4.3: Gegenüberstellung von dem Gesamtniederschlag mit dem aus der Atmosphäre entnommenen Wasserdampf während des Untersuchungszeitraumes

Impfen	CCN-Konzentration	Gesamtmenge des aus der Atmosphäre entnommenen Wasserdampfes in $10^9$ kg	Gesamtmenge des Niederschlages in $10^9$ kg	Differenz zwischen dem entnommenen Wasserdampf und dem Niederschlag in $10^9$ kg
nein	niedrig	45,586	32,463	13,123
nein	mittel	46,753	32,258	14,495
nein	hoch	45,655	29,783	15,872
nein	sehr hoch	42,063	26,815	15,248
ja	niedrig	49,519	32,561	16,958
ja	mittel	43,652	26,988	16,664
ja	hoch	37,869	20,215	17,654
ja	sehr hoch	34,163	16,963	17,180

4.2, so sind sie etwa um den Faktor 1,5 - 2,0 größer. Das bedeutet, dass von den im Untersuchungszeitraum gebildeten Partikeln etwa 2/5 bis 1/3 durch Transportprozesse oder numerische Effekte aus dem Modellgebiet entfernt werden. Vor allem in den Abbildungen für Wolkeneis und Schnee fällt auf, dass die Summe von Bildung und Wachstum von der Summe von Abbau und der in der Atmosphäre befindlichen Partikelmasse stark abweicht.

Kommen wir zu den Unterschieden der Bildungs- und dem Abbauprozesse von Wasserdampf zwischen den Simulationen bei mittlerer und bei niedriger CCN-Konzentration des Aerosols. In den Simulationen bei mittlerer CCN-Konzentration wird mehr Wasserdampf durch das Verdunsten von Wolkentropfen produziert, aber weniger durch das Verdunsten von Regentropfen im Vergleich zu den Simulationen mit niedriger CCN-Konzentration. Dabei sind die Unterschiede zwischen beiden Simulationsläufen bei mittlerer CCN-Konzentration bei dem Verdunsten von Wolkentropfen größer als bei niedriger CCN-Konzentration. Beim Verdunsten von Regentropfen sind diese Unterschiede niedriger.

Beim Abbau von Wolkentropfen zeigt der Vergleich von mittlerer mit niedriger CCN-Konzentration, dass in den Simulationen ohne Impfen mehr Wolkentropfen, Wolkeneis und Schnee produziert werden, aber weniger Graupel. Durch Impfen werden sowohl etwas weniger Wolkentropfen, Wolkeneis und Schnee, als auch Graupel produziert. Die  $400 \text{ cm}^{-3}$  höhere CCN-Konzentration produziert im ungeimpften Fall mehr „kleine“ Partikel wie Wolkeneis, Wolkentropfen und Schnee, aber weniger große wie Graupel und Regentropfen. Beziehen wir die Darstellungen für die Simulationen mit hoher und sehr hoher CCN-Konzentration aus Anhang A.7.6 mit den Abbildungen A.24 und A.25 ein. Auch in diesen beiden Fällen setzt sich der Trend fort. Bei den Simulationen ohne Impfen werden mit ansteigender CCN-Konzentration mehr Wolkentropfen, Wolkeneis und Schnee gebildet. Es fällt auf, dass neben der Bildung aus Wolkentropfen auch der Abbau zu Wolkeneis bei höherer CCN-Konzentration ähnlich stark ansteigt. Die Masse von Graupel verringert sich. Durch Impfen werden bei hoher CCN-Konzentration ähnlich viele Wolkentropfen gebildet wie in den Simulationen mit mittlerer und maritimer CCN-

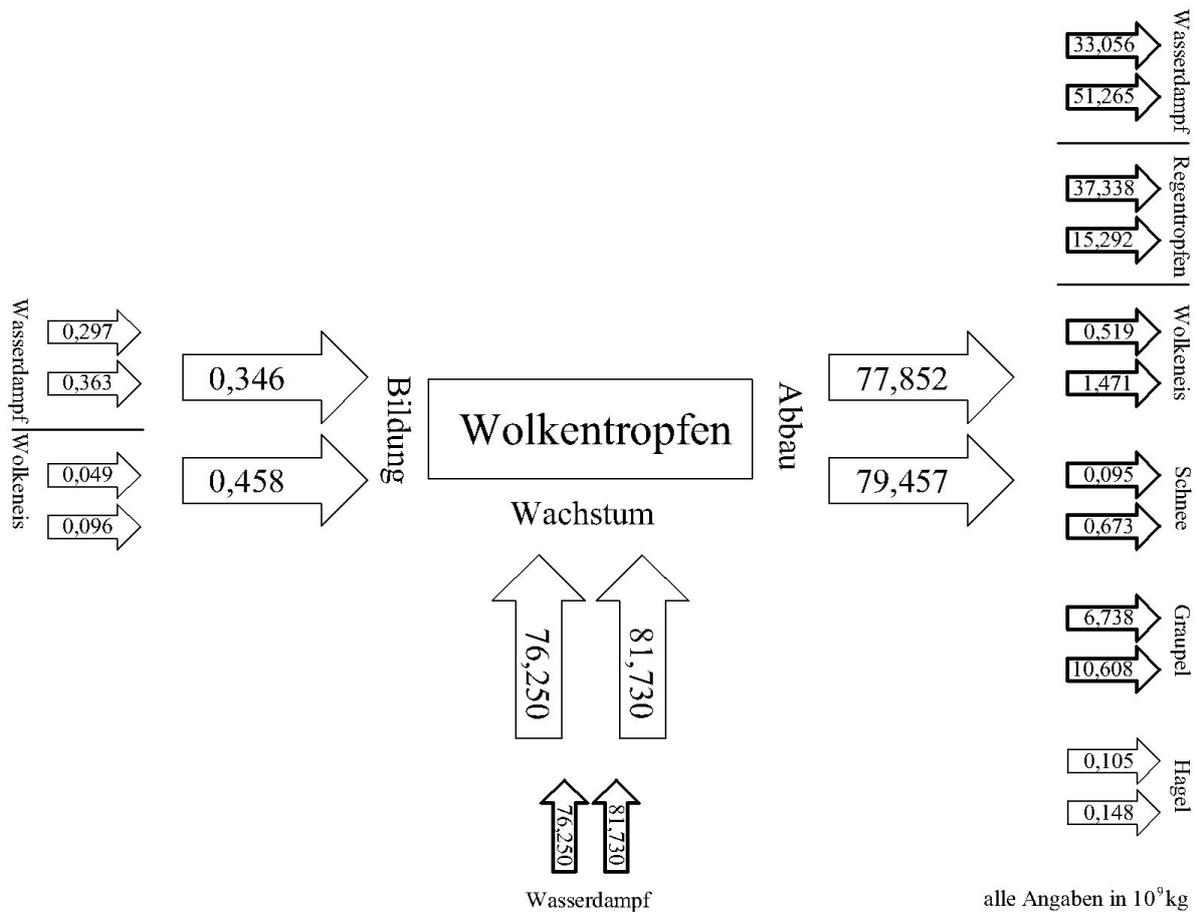


Abbildung 4.12: wie Abbildung 4.4 hier für Wolkentropfen bei mittlerer CCN-Konzentration

Konzentration. Bei sehr hoher CCN-Konzentration wird durch Impfen mehr Wolkentropfenmasse produziert. Gleichzeitig wird durch Impfen bei allen CCN-Konzentrationen etwa gleich viel Wasserdampfmasse in Wolkeneis und Schnee umgewandelt. Durch Impfen sind die Werte hierbei stets höher als in den Simulationen ohne Impfen, wobei die Differenz zu höheren CCN-Konzentrationen abnimmt. Durch Impfen sind die Werte der Umwandlung zu Graupel bei höheren CCN-Konzentrationen niedriger. Die Differenz zwischen der Umwandlung zu Graupel in den Simulationen mit und ohne Impfen ist bei höherer CCN-Konzentration wie bei Wolkeneis und Schnee ebenfalls geringer. Durch Impfen wird bei höherer CCN-Konzentration im Vergleich weniger Wasserdampf abgebaut, aber zeitgleich mehr durch das Verdunsten von Wolkentropfen produziert.

Nun werden die Prozesse, die die Wolkentropfen betreffen, für die mittlere CCN-Konzentration untersucht. Im Vergleich zu den Simulationen bei niedriger Aerosolkonzentration wird bei mittlerer Aerosolkonzentration (Abbildung 4.12) bei der Simulation ohne Impfen mehr Wolkentropfenmasse durch Kondensation von Wasserdampf produziert als bei niedriger CCN-Konzentration. Es wird nur etwas mehr Wolkentropfenmasse in Umwandlungsprozessen wieder abgebaut. Durch Impfen wird im Vergleich mit niedriger CCN-Konzentration bei mittlerer CCN-Konzentration sowohl weniger Masse durch Kondensation produziert als auch weniger Masse durch Abbauprozesse zu anderen Partikelklassen umgewandelt. Im Vergleich der mittleren CCN-Konzentration mit der niedrigeren

CCN-Konzentration wird in den Simulationen ohne Impfen mehr Masse zu Wolkentropfen, Wolkeneis, Schnee und Graupel umgewandelt. Gleichzeitig wird aber weniger Masse zu Regentropfen umgewandelt. Durch Impfen wird ebenfalls mehr Masse zu Wolkentropfen und etwa gleich viel Masse zu Wolkeneis und Schnee. Sowohl zu Regentropfen als auch zu Graupel wird bei mittlerer CCN-Konzentration weniger Masse abgebaut. Vergleicht man die Prozesse von dem geimpften und dem ungeimpften Lauf bei mittlerer CCN-Konzentration miteinander, so sind die Unterschiede sowohl bei Bildung, Wachstum, als auch beim Abbau nicht so groß wie bei niedriger CCN-Konzentration. Besonders bei der Bildung von Wolkentropfen aus Wasserdampf fällt dies auf. Auch bei dem Wachstum durch Deposition von Wasserdampf, dem Abbau zu Wolkeneis und zu Graupel werden die Differenzen kleiner. Bei dem Abbau zu Wasserdampf und zu Regentropfen hat sich die absolute Differenz zwischen beiden Simulationen nur wenig verändert.

Vergleichen wir nun die Massen für die Abbauprozesse zu Wasserdampf und zu Regentropfen miteinander. Hierfür werden wieder die Prozesse für die Läufe bei hoher und sehr hoher Aerosolkonzentration in Anhang A.7.2 mit einbezogen. Es fällt auf, dass mit steigender CCN-Konzentration die Massen des Abbaus zu Wasserdampf steigen, während die Massen des Abbaus zu Regentropfen fallen. In allen untersuchten CCN-Konzentrationen ist bei dem Abbau zu Regentropfen die Masse durch Impfen zwischen  $21,0 \times 10^9$  -  $22,4 \times 10^9$  kg kleiner als in der Simulation ohne Impfen. Gleichzeitig ist die zu Wasserdampf umgewandelte Masse durch Impfen im Bereich  $18,2 \times 10^9$  -  $20,2 \times 10^9$  kg größer als in der Simulation ohne Impfen. Bei niedriger und mittlerer CCN-Konzentration wird in den Simulationen ohne Impfen durch Autokonversion und Akkreszenz von Wolkentropfen mehr Masse in Regentropfen umgewandelt, als dass Wasserdampf durch Verdunsten gebildet wird. In den Simulationen mit Impfen wird stets mehr Wolkentropfenmasse zu Wasserdampf verdunstet, als dass Regentropfenmasse durch Autokonversion und Akkreszenz gebildet wird. Der Anteil der Autokonversion und Akkreszenz an der Summe des Abbaus zu Regentropfen und Wasserdampf wird mit höherer CCN-Konzentration in den Simulationen mit Impfen sehr gering. Durch Impfen bei sehr hoher CCN-Konzentration ist das Verhältnis von Verdunsten zu der Summe aus Autokonversion und Akkreszenz 7:1. Dies ist eine der Hauptunterscheidungsmerkmale zwischen den Simulationen bei unterschiedlichen CCN-Konzentrationen. Bei dem Vergleich von allen CCN-Konzentrationen fallen beim Abbau von Wolkentropfen auch die Differenzen bei der Umwandlung zu Graupel auf. So fällt die Masse durch Abbau zu Graupel zu höheren CCN-Konzentrationen in den Simulationen mit Impfen höher aus als in den Simulationen ohne Impfen. Wie wir bei dem Vergleich der verschiedenen CCN-Konzentrationen für die Prozesse von Graupel sehen werden, spielt bei diesem Prozess die geringe Differenz zwischen den Simulationen mit und ohne Impfen eine Rolle.

Zunächst untersuchen wir die Prozesse für Wolkeneis (Abbildung 4.13). Bei mittlerer CCN-Konzentration fällt im Vergleich zu der niedrigen CCN-Konzentration auf, dass die Masse der Bildungsprozesse sowohl für die Simulationen mit und ohne Impfen geringer sind. Dabei ist das Gefrieren von Wolkentropfen zu Wolkeneis gleich. Bei mittlerer CCN-Konzentration gefrieren weniger Regentropfen als bei niedriger CCN-Konzentration. Bei Wachstum und Abbau von Wolkeneis sind die Unterschiede zwischen den Simulationen mit und ohne Impfen bei mittleren CCN-Konzentrationen niedriger. Bei hoher und sehr hoher CCN-Konzentration (Anhang A.7.3) sind die Unterschiede bei Wachstum und Abbau zwischen den Simulationen mit und ohne Impfen noch geringer. Dabei wird in den Simulationen ohne Impfen im Vergleich die durch Wachstumsprozesse produzierte Masse und die bei Abbauprozessen umgewandelte Masse mit höherer CCN-Konzentration größer. Die Massen, die in den Simulationen mit Impfen produziert und abgebaut werden, ändern sich in Abhängigkeit von der CCN-Konzentration nicht stark und vor allem nicht eindeutig. In den Wachstumsprozessen wird der größte Anteil durch Deposition von Wasserdampf gebildet. Auf diesen Prozess wurde schon bei der Untersuchung von Wasserdampf näher eingegangen. Das Bereifen von Wolkentropfen an Wolkeneis hat einen wesentlich geringeren Anteil an den Wachstumsprozessen und ihren Unterschieden. Bei den

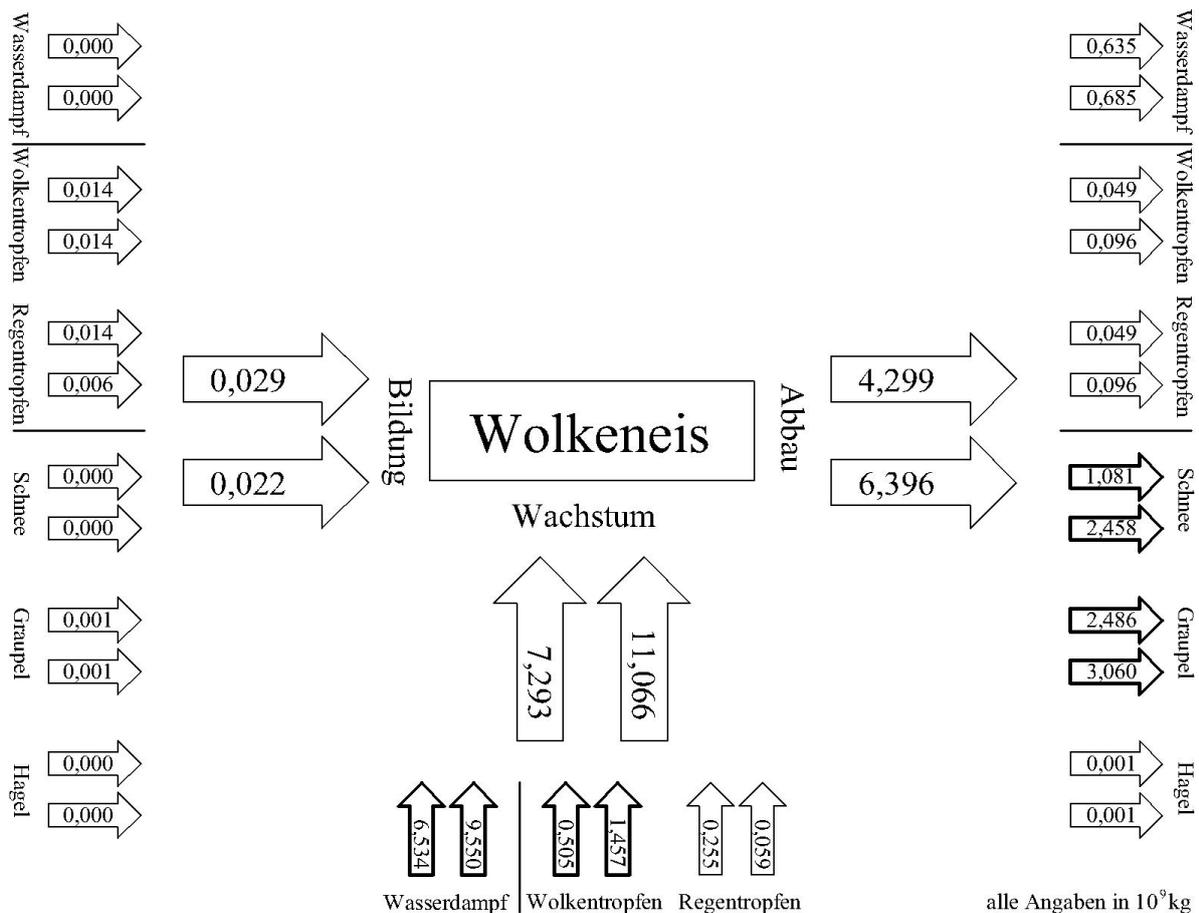


Abbildung 4.13: wie Abbildung 4.4 hier für Wolkeneis bei mittlerer CCN-Konzentration

Abbauprozessen zeigen sich in den Umwandlungen zu Schnee und zu Graupel die stärksten Unterschiede zwischen den CCN-Konzentrationen. Je höher die CCN-Konzentration ist, desto kleiner wird der Unterschied zwischen dem ungeimpften und dem geimpften Lauf in Bezug auf die abgebauten Massen. Im Allgemeinen werden bei den Simulationen ohne Impfen bei höherer CCN-Konzentration die zu Schnee und Graupel abgebauten Massen größer, während in den Simulationen mit Impfen die zu Schnee abgebaute Masse ähnlich ist und die zu Graupel abgebaute Masse weniger wird. Das bedeutet, dass bei höherer CCN-Konzentration der Anteil der zu Schnee abgebauten Masse im Vergleich zum Abbau zu Graupel größer wird. Es entstehen im Verhältnis zueinander mehr (kleine) Schneepartikel als (große) Graupelpartikel.

Untersuchen wir nun die Prozesse für Schnee (Abbildung 4.14). Im Vergleich der mittleren CCN-Konzentration mit der maritimen CCN-Konzentration steigt in dem ungeimpften Lauf der mittleren CCN-Konzentration die Masse sowohl bei Bildung und Wachstum als auch bei Abbau an. Durch Impfen zeigen sich in Abhängigkeit von der CCN-Konzentration keine großen Unterschiede. Die Wachstumsprozesse hängen durch Impfen von der Deposition von Wasserdampf und dem Bereifen von Wolkentropfen an Schnee ab. Die Abbauprozesse hängen von der Umwandlung zu Graupel und zu Regentropfen ab. In den Simulationen mit Impfen wird etwa 1,9 mal mehr Schnee aus Wolkeneis gebildet, 3,1 mal mehr Schneemasse durch Wachstumsprozesse produziert und 2,7 mal mehr Masse zu

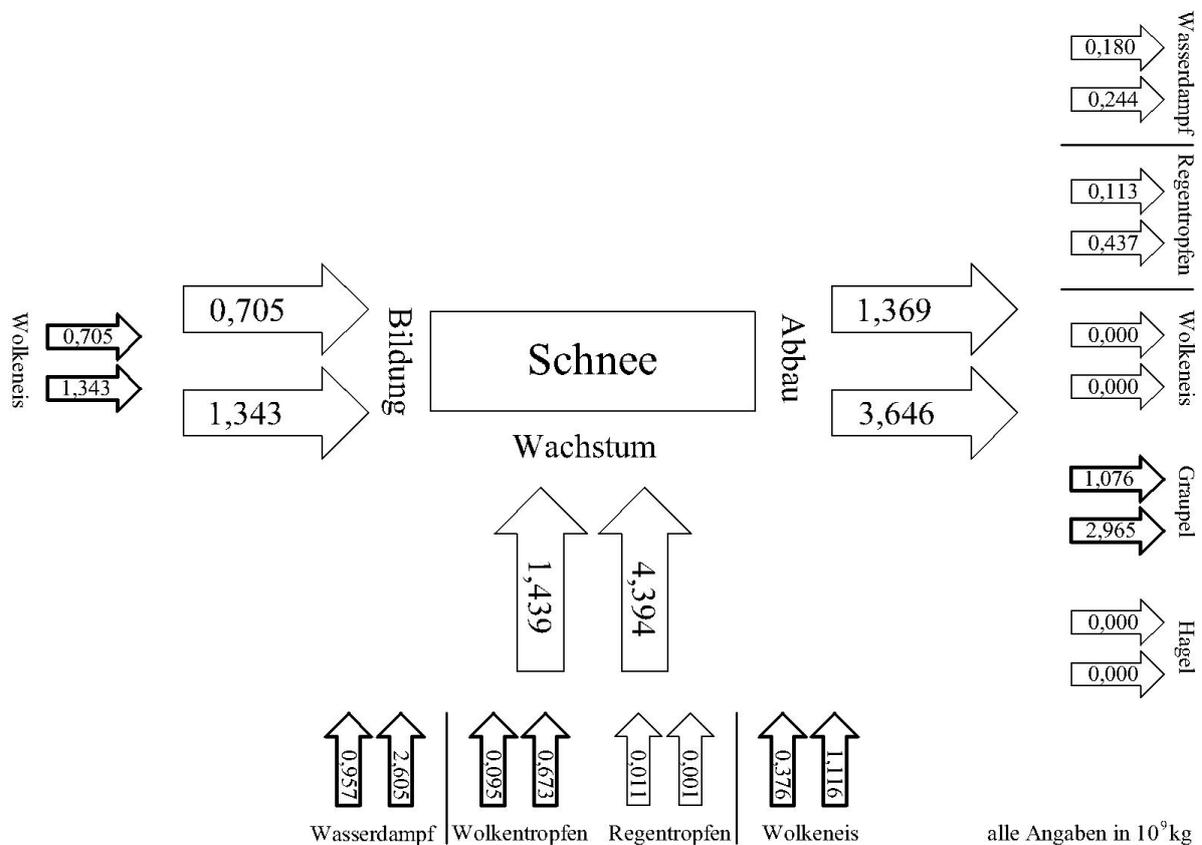


Abbildung 4.14: wie Abbildung 4.4 hier für Schnee bei mittlerer CCN-Konzentration

andere Partikelklassen abgebaut. Im Detail zeigt sich, dass in Simulationen ohne Impfen bei mittlerer CCN-Konzentration die Deposition von Wasserdampf den größten Anteil an dem Massenzuwachs hat. Bei den Abbauprozessen wird der Massenzuwachs vor allem durch eine erhöhte Umwandlung zu Graupel verursacht. Beziehen wir die Läufe mit höherer CCN-Konzentration mit ein (Anhang A.7.4), wird jedoch durch Impfen bei hoher CCN-Konzentration mehr Schneemasse als in den anderen drei CCN-Konzentrationen durch die Deposition von Wasserdampf erzeugt. Abgesehen davon schwächen sich die Unterschiede zwischen den Simulationen mit und ohne Impfen weiter ab. Die mit steigender CCN-Konzentration höhere Wachstumsmasse in den Simulationen ohne Impfen auch bei hoher und sehr hoher CCN-Konzentration des Aerosols hängt vor allem von der Deposition von Wasserdampf ab. In den Simulationen mit Impfen hängt das Wachstum des Schnees neben der Deposition von Wasserdampf auch von dem Bereifen von Wolkenneis ab. Die Deposition von Wasserdampf ist aber der dominierende Prozess. Bei den Abbauprozessen wird in Simulationen ohne Impfen mit höherer CCN-Konzentration mehr Graupel gebildet. Im geimpften Fall nimmt die zu Graupel abgebaute Masse hingegen mit höherer CCN-Konzentration ab.

In Abbildung 4.15 werden die Prozesse für Graupel bei mittlerer CCN-Konzentration dargestellt. In Simulationen ohne Impfen wird bei mittlerer CCN-Konzentration im Vergleich mehr Graupel gebildet, aber weniger Graupelmasse durch Wachstum produziert und schließlich auch weniger Graupel

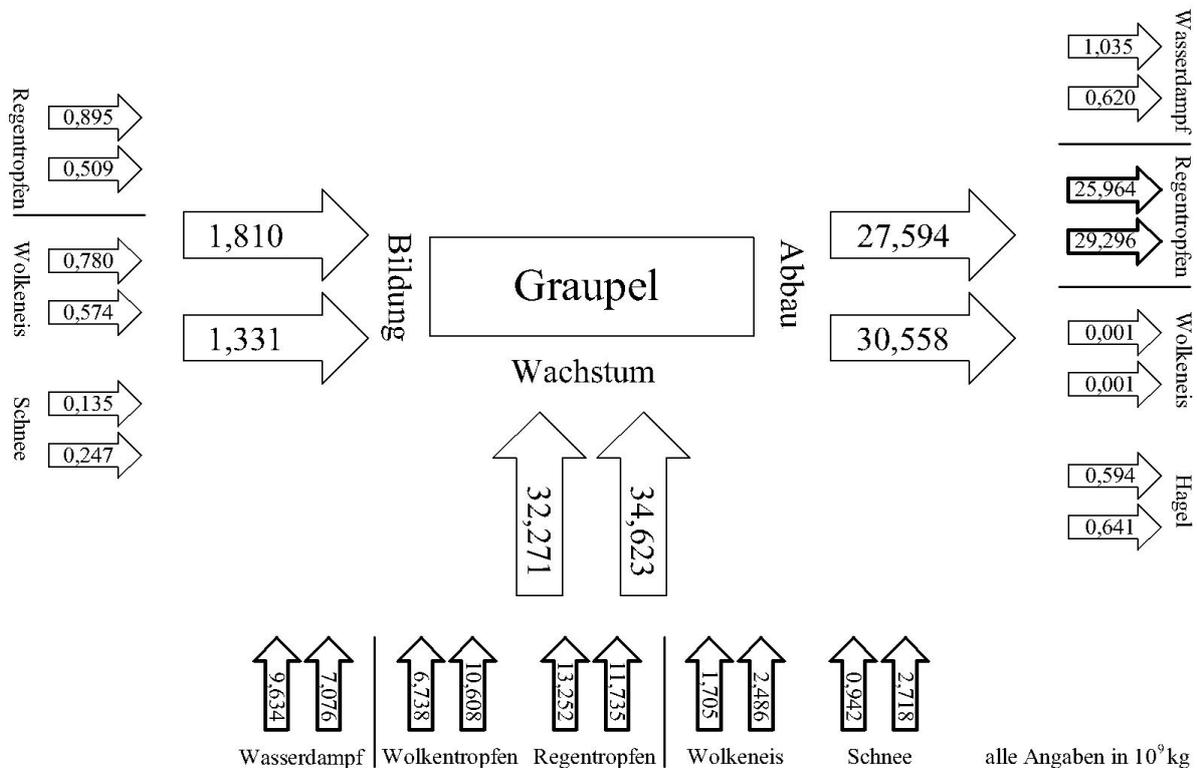


Abbildung 4.15: wie Abbildung 4.4 hier für Graupel bei mittlerer CCN-Konzentration

pelmasse in andere Partikelklassen abgebaut. Bei den Simulationen mit Impfen wird bei mittlerer CCN-Konzentration weniger Graupel durch Bildungs- und Wachstumsprozesse produziert und durch Abbauprozesse umgewandelt.

Untersuchen wir nun die einzelnen Partikelklassen, aus denen Graupel durch Wachstum gebildet wird. In den Simulationen ohne Impfen wird bei mittlerer CCN-Konzentration im Vergleich zur niedrigen CCN-Konzentration weniger Wasserdampfmasse und Regentropfenmasse zu Graupel umgewandelt. Aus Wolkentropfen, Wolkeneis und Schnee wird währenddessen mehr Masse zu Graupel umgewandelt. Beim Vergleich der ungeimpften Läufe bei maritimer und mittlerer CCN-Konzentration zeigt sich, dass aus allen Partikelklassen weniger Masse zu Graupel umgewandelt wird. Im Vergleich ist bei dem Bereifen von Regentropfen an Graupel der Unterschied am größten.

Bei allen Wachstumsprozessen ist die Differenz zwischen den Simulationen mit und ohne Impfen bei mittlerer CCN-Konzentration geringer als bei maritimer. Die Massen sind durch Impfen bei allen Wachstumsprozessen größer als in der Simulation ohne Impfen.

Bei mittlerer CCN-Konzentration wird in Simulationen ohne Impfen mehr Graupelmasse durch Bildung produziert als durch Impfen. Die Größe der in Simulationen ohne Impfen mehr, bzw. durch Impfen weniger gebildeten Graupelmasse ist kleiner als Veränderungen in den Wachstumsprozessen von Graupel. Die Abbauprozesse von Graupel werden auch bei mittlerer CCN-Konzentration in beiden Simulationen

von dem Schmelzen zu Regentropfen dominiert. Im Vergleich zu maritimer CCN-Konzentration wird sowohl im geimpften als auch in Simulationen ohne Impfen weniger Graupelmasse zu Regentropfen abgebaut.

Vergleichen wir nun diese Beobachtungen mit den Simulationen bei hoher und sehr hoher CCN-Konzentration (Anhang A.7.5). Bei den Bildungsprozessen setzt sich der Trend fort, dass bei höherer CCN-Konzentration in den Simulationen ohne Impfen mehr Masse und in den Simulationen mit Impfen weniger Masse gebildet wird.

Bei den Wachstumsprozessen wird sowohl bei den ungeimpften als auch bei den Simulationen mit Impfen weniger Masse produziert. Bei der hohen und sehr hohen CCN-Konzentration wird im geimpften Fall sogar durch die Wachstumsprozesse weniger Masse zu Graupel umgewandelt als in den Simulationen ohne Impfen. Wie beim Vergleich von mittlerer mit niedriger CCN-Konzentration schon festgestellt, wird in den Simulationen ohne Impfen die aus Wasserdampf und Regentropfen produzierte Graupelmasse mit höherer CCN-Konzentration geringer. Im Gegensatz zum Lauf bei mittlerer CCN-Konzentration wird bei noch höheren Konzentrationen weniger Graupelmasse aus Regentropfen und Wolkeneis produziert. Die aus Schnee produzierte Graupelmasse vergrößert sich bei höherer CCN-Konzentration. Bei den Simulationen mit Impfen verringert sich aus allen Partikelklassen außer Schnee die zum Wachstum von Graupel erbrachte Masse, wenn die CCN-Konzentration des Aerosols ansteigt. Die aus Schnee zu Graupel umgewandelte Masse verändert sich mit höherer CCN-Konzentration nicht eindeutig.

Bei hoher und sehr hoher CCN-Konzentration wird der Abbau von Graupel wie bei den geringeren CCN-Konzentrationen ebenfalls vor allem durch Schmelzen zu Graupel vollzogen. Je höher die CCN-Konzentration der Aerosole ist, desto weniger Graupel wird zu Regentropfen umgewandelt. Gleichzeitig wird bei hoher und sehr hoher CCN-Konzentration im ungeimpften Lauf mehr Graupelmasse zu Regentropfen als durch Impfen.

Als nächstes untersuchen wir die Prozesse von Regentropfen bei mittlerer CCN-Konzentration (Abbildung 4.16). Im Vergleich mit dem ungeimpften Lauf bei niedriger CCN-Konzentration wird in Simulationen ohne Impfen bei mittlerer CCN-Konzentration in Bildung, Wachstum und Abbau weniger Masse umgesetzt. Es fällt auf, dass die Differenz zwischen den beiden CCN-Konzentrationen bei den Bildungs- und Abbauprozessen größer ist als bei den Wachstumsprozessen. Bei den Bildungsprozessen wird die Differenz zwischen den Simulationen ohne Impfen bei verschiedener CCN-Konzentration vor allem durch geringere Autokonversion von Wolkentropfen ausgelöst. Einen weiteren Beitrag liefert auch das Schmelzen von Graupel. Ferner ist auch das Schmelzen von Hagel in den Simulationen ohne Impfen bei höherer CCN-Konzentration schwächer ausgeprägt. Die Unterschiede in den Abbauprozessen zwischen den Simulationen ohne Impfen liegen in der geringeren Verdunstung von Regentropfen und an der geringeren Bildung von Graupel. Auch hier spielt der geringere Abbau zu Hagel eine untergeordnete Rolle.

Vergleicht man zwischen den Simulationen mit Impfen bei mittlerer und niedriger CCN-Konzentration, dann wird ebenfalls in Bildung, Wachstum und Abbau weniger Masse umgesetzt. Die Differenzen zwischen den Simulationen mit Impfen mittlerer und niedriger CCN-Konzentration sind bei den Bildungs- und Abbauprozessen kleiner als bei dem Wachstumprozess von Regentropfen. Bei der Bildung von Regentropfen tritt bei den Simulationen mit Impfen der größte Unterschied zwischen der mittleren und niedrigeren CCN-Konzentration bei dem Schmelzen von Graupel auf. Die Autokonversion, die ohnehin in den Simulationen mit Impfen nur wenig Masse umsetzt, ist bei mittlerer CCN-Konzentration auf niedrigem Niveau noch schwächer ausgeprägt. Bei den Abbauprozessen sind im geimpften Lauf bei mittlerer CCN-Konzentration die Umwandlungsprozesse zu Wasserdampf und Graupel, wie bei den Simulationen mit Impfen, ebenfalls schwächer ausgeprägt. Das Wachstum von Regentropfen durch Akkreszenz ist bei dem geimpften Lauf bei mittlerer CCN-Konzentration wesentlich schwächer ausgeprägt als im Lauf bei niedriger CCN-Konzentration.

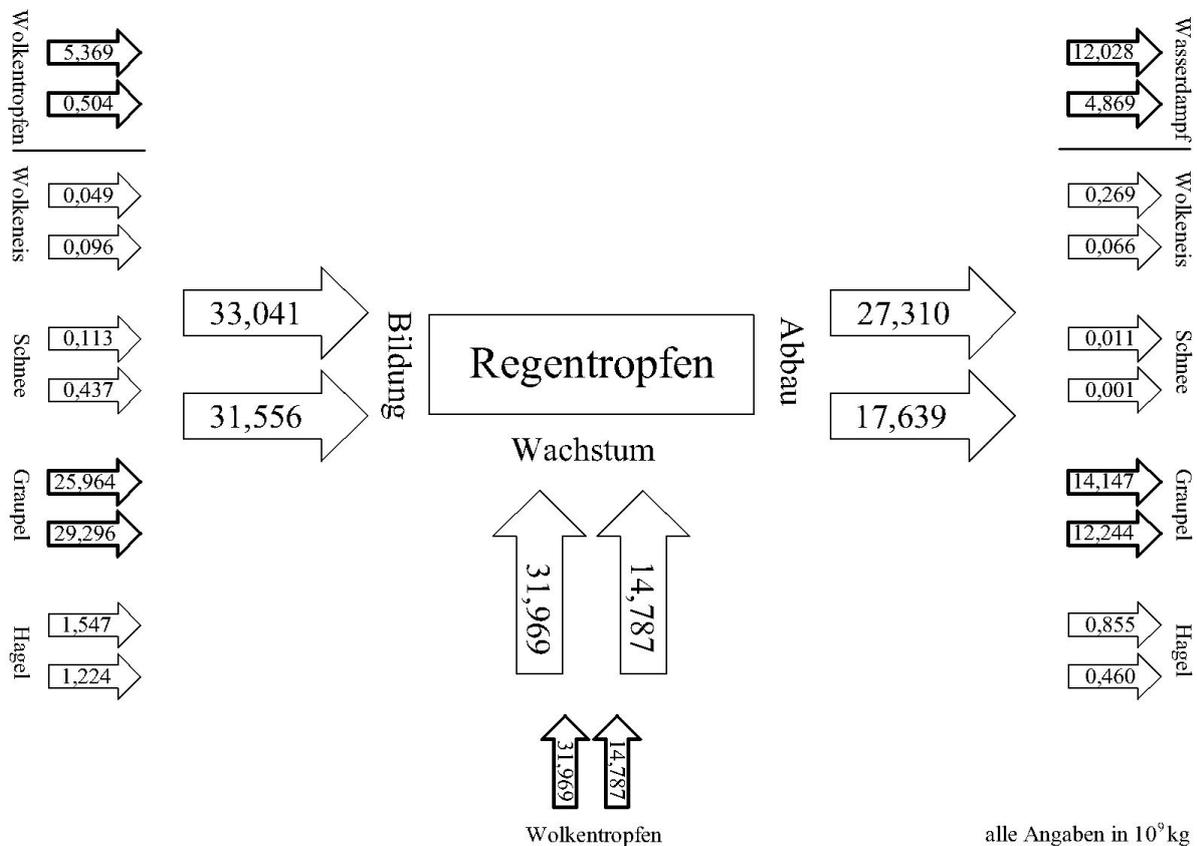


Abbildung 4.16: wie Abbildung 4.4 hier für Regen bei mittlerer CCN-Konzentration

Die Differenz zwischen den Simulationen mit und ohne Impfen ist für die Bildungs- und Wachstumsprozesse kleiner als in den Simulationen bei niedriger CCN-Konzentration. Die Differenz bei der Akkreszenz von Wasserdampf zwischen beiden ist dagegen größer bei der höheren CCN-Konzentration. Bei der Bildung von Regentropfen fällt auf, dass bei mittlerer CCN-Konzentration die Differenz zwischen den beiden Simulationen bei der Autokonversion geringer ist, da sie in Simulationen ohne Impfen stärker abgenommen hat. Die Differenz beim Schmelzen von Graupel ist etwa gleich groß geblieben. Bei dem Abbau von Regentropfen zu Wasserdampf wird die Differenz zwischen dem ungeimpften und dem geimpften Lauf ebenfalls geringer. Bei dem Abbau zu Graupel hingegen wird die Massendifferenz zwischen den beiden Simulationen bei mittlerer CCN-Konzentration größer.

Beziehen wir wieder die Prozesse für Regentropfen bei hohen und sehr hohen CCN-Konzentrationen ein, so setzen sich die beobachteten Tendenzen mit höherer CCN-Konzentration fort. Es wird bei allen drei Gruppen, Bildung, Wachstum und Abbau, weniger Masse umgewandelt.

Der Abbau wird bei den höheren CCN-Konzentrationen vor allem durch die Prozesse des Verdunstens zu Wasserdampf und dem Bereifen an Graupel repräsentiert. Es fällt auf, dass mit steigender CCN-Konzentration im geimpften Fall das Bereifen von Hagel wesentlich stärker abnimmt als die Verdunstung. Im ungeimpften Lauf nehmen beide Prozesse in ähnlicher Stärke ab. Hinzu kommt, dass die Abnahme der beiden Prozesse in Simulationen ohne Impfen wesentlich schwächer ausgeprägt ist

als durch Impfen.

Beim Wachstum von Regentropfen zeigt sich ein ähnliches Bild. Wie zuvor beschrieben, nimmt die Akkreszenz in den Simulationen mit Impfen mit steigender CCN-Konzentration viel stärker ab als in den Simulationen ohne Impfen.

Vergleichen wir die Werte der Massen, die bei Wachstum und Abbau umgesetzt werden, so sind diese in den Simulationen mit Impfen bei höherer CCN-Konzentration ähnlich. In den Simulationen ohne Impfen nimmt währenddessen der Wert des Wachstums weniger ab als der Wert der Abbauprozesse. Dies bedeutet, dass in den Simulationen mit Impfen die mit steigender CCN-Konzentration sehr schwach werdende Akkreszenz die Gesamtmenge des Niederschlags stark beeinflusst. Dieser Effekt kann nicht durch die ebenfalls schwächer ausgeprägten Abbauprozesse ausgeglichen werden.

Im Vergleich zu dem Abbau und Wachstum nimmt die Bildung von Regentropfen mit steigender CCN-Konzentration durch Impfen schwächer ab. Der Abbau und das Wachstum in den Simulationen ohne Impfen ist wesentlich schwächer ausgeprägt, deshalb ist bei ihnen die stärkste Abnahme bei den Bildungsprozessen festzustellen. Die Abnahme der neugebildeten Regentropfenmasse wird in den Simulationen mit Impfen vor allem durch die zuvor beschriebene, mit höheren CCN-Konzentrationen schwächer ausgeprägte, Graupelschmelze hervorgerufen. Im ungeimpften Lauf wird der Abbau der neugebildeten Masse zwar im Bezug auf die Masse auch durch die schwächer ausgeprägte Graupelschmelze bedingt. Auffälliger aber ist der starke Rückgang der Bildung von Regentropfen durch Autokonversion von Wolkentropfen mit steigender CCN-Konzentration.

Als letzte Partikelklasse wird jetzt Hagel für die mittlere CCN-Konzentration untersucht (Abbildung 4.17). Die Massen, die bei der Bildung, dem Wachstum und dem Abbau von Hagel umgesetzt werden, sind auch bei mittlerer CCN-Konzentration viel kleiner als bei den anderen Partikelklassen. So werden an dieser Stelle ebenfalls die Prozesse von Hagel für die hohe und sehr hohe CCN-Konzentration (Anhang A.7.7) verglichen. Vergleichen wir nun mit den Prozessen für Hagel die Läufe mit den vier CCN-Konzentrationen miteinander. Im ungeimpften Lauf wird bei höherer CCN-Konzentration etwa gleichviel Hagel durch Bildungsprozesse gebildet, aber weniger durch Wachstumsprozesse produziert. Somit wird weniger Hagel in andere Partikelklassen abgebaut. In den Simulationen mit Impfen wird mit ansteigender CCN-Konzentration mehr Hagel gebildet, weniger Hagel durch Wachstumsprozesse produziert und etwa gleich viel Hagel in andere Partikelklassen umgewandelt. Abgesehen von dem schon besprochenen Bereifen von Hagel mit Regentropfen und dem Abbau von Hagel zu Regentropfen, die bei maritimer CCN-Konzentration bemerkenswerte Unterschiede zwischen dem geimpften und dem ungeimpften Fall aufweisen, gibt es bei höheren CCN-Konzentrationen keine Prozesse, die hervorstechen.

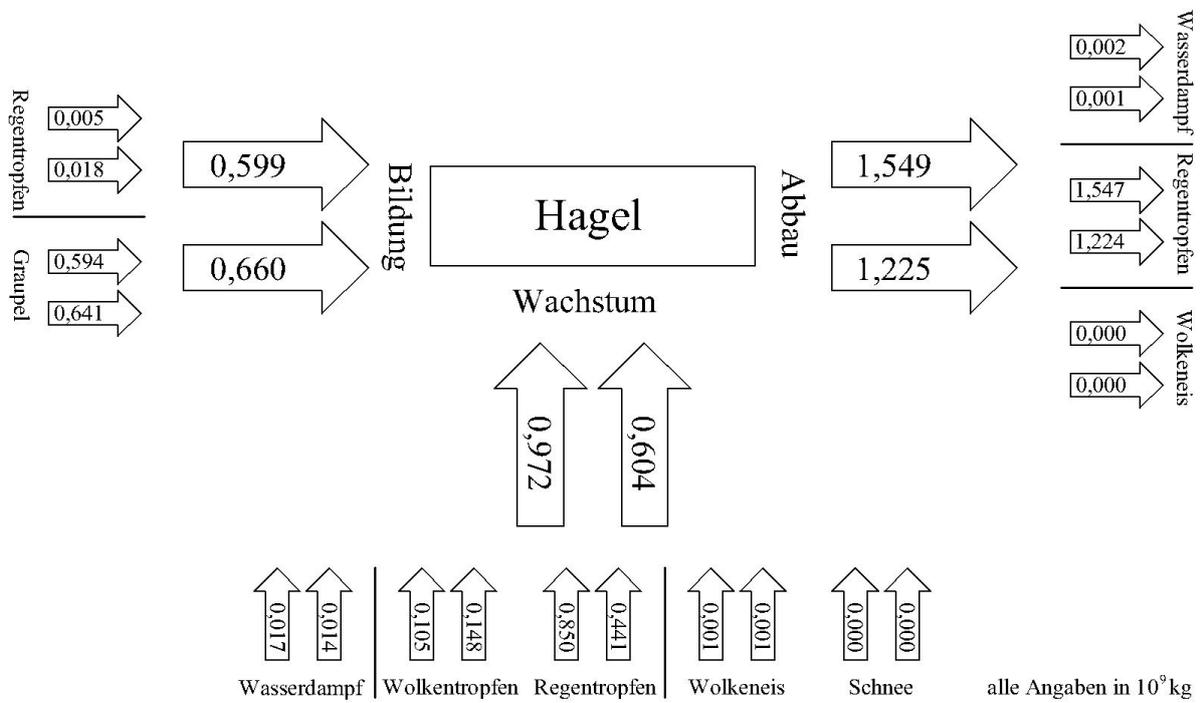


Abbildung 4.17: wie Abbildung 4.4 hier für Hagel bei mittlerer CCN-Konzentration

## 5 Zusammenfassung

In vielen Regionen leiden Menschen unter Wasserknappheit. Die Beeinflussung der Niederschlagsbildung durch Wolkenimpfen kann eine Möglichkeit bieten, den Niederschlag zu verstärken oder zeitlich und räumlich zu verlagern, und somit diesen Regionen zusätzlichen Niederschlag zu bringen.

In dieser Arbeit wird anhand einer typischen winterlichen Wetterlage im östlichen Mittelmeerraum die Verzögerung und räumliche Verlagerung von Niederschlag durch Wolkenimpfen simuliert, mit dem Ziel, den Niederschlag über dem Küstenstreifen von Israel zu erhöhen. Dabei wurde das COSMO-Modell des Deutschen Wetterdienstes in der Version 4.0 mit einer Implementierung des Zwei-Momenten-Schemas für die Parametrisierung der Wolkenmikrophysik verwendet (Seifert und Beheng, 2006).

Aufbauend auf die Ergebnisse der semi-idealisierten Simulationen für diese Wetterlage von Noppel et al. (2009b) wurde nach einer realen Wetterlage gesucht, in der Wind aus westlichen Richtungen, großräumig gekoppelt an ein Tiefdrucksystem über Zypern, an der Küstenlinie Israels von einer Land-See-Wind-Zirkulation überlagert wird. Für die Simulation wurde der Zeitraum 6.1.2007 12:00 UTC – 8.1.2007 12:00 UTC ausgewählt. Es wurden insgesamt 8 Simulationen gerechnet, jeweils eine mit Wolkenimpfen und eine ohne, für vier verschiedene CCN-Konzentrationen. Die Einstellungen für das Wolkenimpfen sowie für die verschiedenen CCN-Konzentrationen wurden von Noppel et al. (2009a) übernommen.

Nach Untersuchungen der Niederschlagsmenge und -verteilung sowie den Feldern für die 2m-Temperatur, 2m-Taupunkttemperatur und des 10m-Windes für niedrige CCN-Konzentration erwies sich innerhalb des Simulationszeitraums der Zeitabschnitt 16h 30min – 20h 30min (7.1.2007 4:30 UTC – 7.1.2007 8:30 UTC) als geeignete Wetterlage. Zunächst wurde der Einfluss des Wolkenimpfens bei verschiedenen CCN-Konzentrationen anhand der Niederschlagsmenge und ihrer Verteilung untersucht. In den Simulationen zeigt sich, dass durch Impfen der Niederschlag bei jeder untersuchten CCN-Konzentration in Richtung Küste über das Land verlagert wird. Außerdem sieht man, dass bei höherer CCN-Konzentration die Gesamtniederschlagsmenge abnimmt. Dabei nimmt durch Impfen die Gesamtniederschlagsmenge mit höherer CCN-Konzentration stärker ab als in den Simulationen ohne Impfen. Es zeigt sich, dass der Effekt der Abnahme des Gesamtniederschlags größer ist als die Verlagerung des Niederschlags über Land. Somit weist in dem untersuchten Zeitabschnitt allein das Impfen bei geringer CCN-Konzentration eine Zunahme des über Land fallenden Niederschlags auf. Diese Ergebnisse decken sich mit denen von Noppel et al. (2009b). Weiterführend wurde im ausgewählten Zeitabschnitt untersucht, welche Prozesse innerhalb der Wolken einen Einfluss auf die Niederschlagsbildung haben können. Dazu wurden die vom Zwei-Momenten-Schema berücksichtigten Prozesse zwischen den 6 definierten Partikelklassen (Wolkentropfen, Regentropfen, Wolkeneis, Schnee, Graupel und Hagel) + Wasserdampf untersucht (Seifert, 2002; Blahak, 2010). Für jeden Prozess wurde die Masse dargestellt, die von einer Partikelklasse in eine andere umgewandelt wurde, akkumuliert über den Zeitabschnitt und das Modellgebiet. Um eine Übersicht über die 53 berücksichtigten Prozesse zu erhalten, wurden für jede Partikelklasse die Prozesse zu Gruppen zusammengefasst, die zur Neubildung, Wachstum und Abbau der Partikel führen.

Die Gesamtmasse der Partikel, die während des Zeitraums in der Atmosphäre gebildet werden und dort verbleiben, nimmt mit höherer CCN-Konzentration zu. Im Vergleich zwischen den Simulationen mit und ohne Impfen verbleibt bei niedriger CCN-Konzentration weniger Masse in der Atmosphäre, bei

mittlerer CCN-Konzentration und höher jedoch mehr.

Zunächst wurden für niedrige CCN-Konzentrationen die Unterschiede zwischen den Simulationen mit und ohne Impfen untersucht. Durch Impfen wird, wie erwartet, vor allem die Autokonversion von Wolkentropfen zu Regentropfen stark verringert. Die Akkreszenz verringert sich ebenfalls, aber nicht im gleichen Maße. Es wird mehr Wolkentropfen- und Wasserdampfmasse zu Wolkeneis und Schnee und dann größtenteils zu Graupel umgewandelt. Die zusätzlich produzierte Masse an Graupel führt zu stärkerem Abbau von Graupel zu Regentropfen. Die durch das Schmelzen von Graupel zusätzlich entstehende Masse an Regentropfen gleicht einen Teil der verringerten Umwandlung von Wolkentropfen zu Regentropfen aus. Ein weiterer Teil wird durch die geringere Verdunstung von Regentropfen ausgeglichen. Deswegen ist bei niedriger CCN-Konzentration der Gesamtniederschlag in den Simulationen mit und ohne Impfen annähernd gleich.

Im nächsten Schritt wurden die Simulationen bei niedriger CCN-Konzentration mit denen bei höherer CCN-Konzentration verglichen. In den Simulationen ohne Impfen verringert sich mit höherer CCN-Konzentration die Autokonversion von Wolkentropfen, während mehr Wolkentropfenmasse verdunstet. Durch Impfen schwächt sich mit steigender CCN-Konzentration die Akkreszenz von Wolkentropfen wesentlich stärker ab als in den Simulationen ohne Impfen. In beiden Simulationen nimmt die Umwandlung von Wolkentropfen und Wasserdampf zu Schnee und Wolkeneis zu. Außerdem erhöht sich der Wasserdampf die Deposition an Wolkentropfen. Die Abbauprozesse zu Graupel nehmen hingegen ab. Es fällt auf, dass mit höherer CCN-Konzentration Prozesse, die zur Bildung oder Wachstum von kleinen Partikeln wie Wolkentropfen, Wolkeneis oder Schnee beitragen, entweder gleich bleiben oder sogar mehr Masse umsetzen, während der Umsatz der Prozesse, die zur Bildung oder Wachstum von großen Partikeln wie Regentropfen oder Graupel führen, abnehmen. Insgesamt nimmt die Bildung und das Wachstum von Regentropfen mit höherer CCN-Konzentration ab. In den Simulationen mit Impfen ist diese Abnahme größer als in den Simulationen ohne Impfen. Die mit höherer CCN-Konzentration verzögerten Abbauprozesse zu Wasserdampf und Graupel können die geringere Produktion von Regentropfen nicht ausgleichen. Somit nimmt durch Impfen der Gesamtniederschlag mit höherer CCN-Konzentration stärker ab als ohne Impfen.

In dieser Arbeit wird für die Simulation einer realen Wetterlage gezeigt, dass Wolkenimpfen in Abhängigkeit von der CCN-Konzentration zu einer Verlagerung von Niederschlag führt. Das bestätigen die Ergebnisse von Noppel et al. (2009b).

## Literaturverzeichnis

- [1] K. R. Biswas and A. S. Dennis. Formation of rain shower by salt seeding. *J. Appl. Meteor.*, 10:780–784, 1971.
- [2] U. Blahak. Towards a better representaton of hail in a state-of-the-art two-moment bulk micro-physical scheme, part I: Description. in progress, 2010.
- [3] R. R. Braham Jr. Precipitation enhancement – a scientific challenge. In *Precipitation Enhancement – A Scientific Challenge, Meteor. Monogr*, number 43, pages 1–5. Amer. Meteor. Soc., 1986.
- [4] R. T. Bruintjes. A review of cloud seeding experiments to enhance precipitation and some new propects. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 80:805–820, 1999.
- [5] R. J. Cotton and P. R. Field. Ice nucleation characteristics of an isolated wave cloud. 128:2417–2437, 2002.
- [6] W. R. Cotton and R. A. Pielke. *Human Impacts on Weather and Climate*. Cambridge University Press, 1995.
- [7] R. R. Czys and R. T. Bruintjes. A review of hygroscopic seeding experiments to enhance rainfall. *J. Wea. Mod.*, 26:41–52, 1994.
- [8] U. Dayan, B. Ziv, T. Shoob, and Y. Enzel. Suspended dust over southeastern mediterranean and its relation to atmospheric circulations. *Int. J. Climatol.*, 28:915–924, 2008.
- [9] G. Doms, U. Schättler, and C. Schraff, 2009.
- [10] N. H. Fletcher. Ice nucleation behavior of silver iodide smokes containing a soluble component. *J. Atmos. Sci.*, 25:1058–1060, 1968.
- [11] C. A. Jeffrey and P. H. Austin. Homogenous nucleation of supercooled water: results from a new equation of state. *J. Geophys. Res.*, 102:25269–25279, 1997.
- [12] E. Kessler. On the distribution and continuity of water substance in atmospheric circulations. *Met. Monograph.*, 10(32), 1969. American Meteorological Society, Boston.
- [13] R. Lahav and D. Rosenfeld. Search of the optimal size of hygroscopic seeding particles. In *16<sup>th</sup> Conf. on Wea. Mod. San Diego, CA*, 2005.
- [14] X.-D. Liu, S. Osher, and T. Chan. Weighted essentially non-oscillatory schemes. *J. Comput. Phys.*, 115(1):200, 1994.
- [15] J. S. Marshall and W. M. K. Palmer. The distribution of raindrops with size. *J. Meteor*, 5:165–166, 1948.
- [16] M. P. Meyers, P. J. Dermott, and W. R. Cotton. New primary ice-nucleation parameterizations in an explicit cloud model. *J. Appl. Meteor.*, 31:708–721, 1992.
- [17] A. S. R. Murty. An overview of warm cloud modification research in india. In *Proc. Fifth WMO Conf. on Weather Modification and Applied Cloud Physics*, pages 521–524, Beijing, China, 1989. World Meteorological Organization.

- [18] H. Noppel, U. Blahak, A. Seifert, and K. D. Beheng. Simulations of a hailstorm and the impact of CCN using an advanced two-moment cloud microphysical scheme. *Atmos. Res.*, 2009.
- [19] H. Noppel, A. Pokrovsky, B. Lynn, A. P. Khain, and K. Beheng. A spatial shift of precipitation from the sea to the land caused by introducing submicron soluble aerosols: numerical modeling. *J. Geophys. Res.*, page accepted, 2009.
- [20] H. R. Pruppacher and J. D. Klett. *Microphysics of clouds and precipitation*. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 1997.
- [21] M. L. Rockicki and K. C. Young. The initiation of precipitation in updrafts. *J. Appl. Meteor.*, 17:745–754, 1978.
- [22] R. Sasse. Beziehung zwischen Niederschlag und synoptisch-skaligen Prozessen im östlichen Mittelmeer. Master's thesis, Universität Karlsruhe (TH), 2004.
- [23] V. Schaefer. The production of clouds containing supercooled water droplets or ice crystals under laboratory conditions. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 29:175–182, 1948.
- [24] Y. Segal and A. Khain. Dependence of droplet concentration on aerosol conditions in different cloud types: Application to droplet concentration parameterization of aerosol conditions. *J. Geophys. Res.*, 111:D15240, 2006.
- [25] A. Seifert. *Parametrisierung wolkenmikrophysikalischer Prozesse und Simulationen konvektiver Mischwolken*. PhD thesis, Universität Karlsruhe (TH), 2002.
- [26] A. Seifert and K. D. Beheng. A two-moment cloud microphysics parameterization for mixed-phase clouds. Part 1: Model description. *Meteorol. Atmos. Phys.*, 92:45–66, 2006.
- [27] J. Simpson, G. W. Brier, and R. H. Simpson. Stormfury cumulus seeding experiment 1965: Statistical analysis and main results. *J. Atmos. Sci.*, 23(5):508–521, September 1984.
- [28] P. L. Smith, A. S. Dennis, B. A. Silverman, A. B. Super, E. W. Holroyd III, W. A. Cooper, P. W. Mielke Jr., K. J. Berry, H. D. Orville, and J. R. Miller Jr. HIPLEX-1: Experimental design and response variables. *J. Climate Appl. Meteor. Soc.*, 23:497–512, 1984.
- [29] B. Vonnegut. The nucleation of ice formation by silver iodide. *J. Appl. Phys.*, 18:593–595, 1947.
- [30] World Meteorological Organization. *Annex II: Statement on the present state of knowledge and possible practical benefits in some fields of weather modification*, resolutions of congress and the executive council edition, 2009. WMO-No. 508.

## Anhang A

### Anhang

#### A.1 Umwandlungsprozesse und deren Einteilung in Gruppen

Die Umwandlungsprozesse, die in der Datei *src\_seifert.F90* eine Ausgabevariable zugewiesen bekommen, sind hier in Bezug auf die Bildung, das Wachstum und den Abbau der Partikelklassen in Gruppen eingeteilt. Die Gruppierung der ausgegebenen Prozesse des 2-Momentenschema für Läufe mit *ice\_typ = 2* in die Prozessgruppen: Bildung, Wachstum und Abbau für die sechs Partikelklassen plus Wasserdampf, die Angabe von (1/2) bedeutet, dass nur die Hälfte der bei dem Prozesses umgewandelten Masse berücksichtigt wird.

<b>Partikel- klasse</b>	<b>Prozess- gruppe</b>	<b>Partikelklasse, mit der Masse ausgetauscht wird</b>	<b>Name des Prozesses</b>
Wasserdampf	Bildung	Wolkentropfen	Verdunsten
		Wolkeneis	Sublimation
		Regentropfen	Verdunsten
		Schnee	Sublimation
		Graupel	Sublimation
		Hagel	Sublimation
	Abbau	Wolkentropfen	Nukleation
		Wolkentropfen	Kondensation
		Wolkeneis	Nukleation
		Wolkeneis	Deposition
		Schnee	Deposition
		Graupel	Deposition
		Hagel	Deposition
		Wolkentropfen	Bildung
$\frac{1}{2}$ Wolkeneis	Schmelzen		
Wachstum	Wasserdampf		Kondensation
Abbau	Wasserdampf		Verdunsten
	Wolkeneis		Gefrieren
	Wolkeneis		Bereifen von Wolkentropfen an Wolkeneis inkl. Eismultiplikation
	Regentropfen		Autokonversion

*Weiter auf der nächsten Seite*

<b>Partikel- klasse</b>	<b>Prozess- gruppe</b>	<b>Partikelklasse, mit der Masse ausgetauscht wird</b>	<b>Name des Prozesses</b>
		Regentropfen	Akkreszens
		Schnee	Bereifen von Wolkentropfen an Schnee
		Graupel	Bereifen von Wolkentropfen an Graupel
		Hagel	Bereifen von Wolkentropfen an Hagel
Wolkeneis	Bildung	Wasserdampf	Eisnukleation
		Wolkentropfen	Gefrieren
		Regentropfen	Gefrieren
		Schnee	Bereifen von Wolkentropfen: an Schnee: Eismultiplikation
		$\frac{1}{2}$ Schnee	Bereifen von Regentropfen an Schnee: Eismultiplikation
		Graupel	Bereifen von Wolkentropfen am Graupel: Eismultiplikation
		Graupel	Bereifen von Regentropfen an Wolkeneis: Eismultiplikation
		$\frac{1}{2}$ Graupel	Bereifen von Regentropfen an Schnee: Eismultiplikation
		Graupel	Bereifen von Regentropfen an Graupel: Eismultiplikation
		Hagel	Bereifen von Wolkentropfen an Hagel: Eismultiplikation
		Hagel	Bereifen von Regentropfen an Hagel: Eismultiplikation
	Wachstum	Wasserdampf	Deposition
		Wolkentropfen	Bereifen von Wolkentropfen an Wolkeneis: inkl. Eismultiplikation
		Regentropfen	Bereifen von Regentropfen an Wolkeneis
	Abbau	Wasserdampf	Sublimation
		$\frac{1}{2}$ Wolkentropfen	Schmelzen

*Weiter auf der nächsten Seite*

<b>Partikel- klasse</b>	<b>Prozess- gruppe</b>	<b>Partikelklasse, mit der Masse ausgetauscht wird</b>	<b>Name des Prozesses</b>
		$\frac{1}{2}$ Regentropfen	Schmelzen
		Schnee	Einfang durch Schnee
		Schnee	Selbsteinfang
		Graupel	Einfang durch Graupel
		Graupel	Bereifen von Wolkentropfen
		$\frac{1}{2}$ Graupel	Bereifen von Regentropfen an Wolkeneis
		Hagel	Einfang durch Hagel
Regentropfen	Bildung	Wolkentropfen	Autokonversion
		$\frac{1}{2}$ Wolkeneis	Schmelzen
		Schnee	Schmelzen
		Graupel	Bereifen von Wolkentropfen an Graupel: verstärktes Schmelzen
		Graupel	Bereifen von Wolkentropfen ab Graupel: Abtropfen von Schmelzwasser
		Graupel	Bereifen von Regentropfen an Graupel: verstärktes Schmelzen
		Graupel	Bereifen von Regentropfen an Graupel: Abtropfen von Schmelzwasser
		Graupel	Schmelzen
		Hagel	Bereifen von Wolkentropfen an Hagel: verstärktes Schmelzen
		Hagel	Bereifen von Wolkentropfen an Hagel: Abtropfen von Schmelzwasser
		Hagel	Bereifen von Regentropfen an Hagel: verstärktes Schmelzen
		Hagel	Bereifen von Regentropfen an Hagel: Abtropfen von Schmelzwasser
		Hagel	Schmelzen
	Wachstum	Wolkentropfen	Akkreszens
	Abbau	Wasserdampf	Sublimation
		Wolkeneis	Gefrieren
		Wolkeneis	Bereifen
		Schnee	Bereifen

*Weiter auf der nächsten Seite*

<b>Partikel- klasse</b>	<b>Prozess- gruppe</b>	<b>Partikelklasse, mit der Masse ausgetauscht wird</b>	<b>Name des Prozesses</b>
		$\frac{1}{2}$ Graupel	Bereifen von Regentropfen an Wolkeneis
		$\frac{1}{2}$ Graupel	Bereifen von Regentropfen an Schnee
		Graupel	Bereifen von Regentropfen an Graupel
		Graupel	Gefrieren
		Hagel	Gefrieren
		Hagel	Bereifen
Schnee	Bildung	Wolkeneis	Selbsteinfang von Wolkeneis
	Wachstum	Wasserdampf	Deposition
		Wolkentropfen	Bereifen von Wolkentropfen an Schnee
		Wolkeneis Regentropfen	Einfang von Wolkeneis Bereifen von Regentropfen an Schnee
	Abbau	Wasserdampf Wolkeneis	Sublimation Bereifen von Wolkentropfen an Schnee
		$\frac{1}{2}$ Wolkeneis	Bereifen von Regentropfen an Schnee
		Regentropfen Graupel Graupel	Eismultiplikation Schmelzen Einfang durch Graupel
	Graupel	Bereifen von Wolkentropfen an Schnee	
	Graupel	Bereifen von Regentropfen an Schnee	
	Hagel	Einfang durch Hagel	
Graupel	Bildung	Wolkeneis	Bereifen von Wolkentropfen an Wolkeneis
		$\frac{1}{2}$ Wolkeneis	Bereifen von Regentropfen an Wolkeneis
		$\frac{1}{2}$ Regentropfen	Bereifen von Regentropfen an Wolkeneis
		$\frac{1}{2}$ Regentropfen	Bereifen von Regentropfen an Schnee
		Regentropfen Schnee	Gefrieren Bereifen von Wolkentropfen an Schnee

*Weiter auf der nächsten Seite*

<b>Partikel- klasse</b>	<b>Prozess- gruppe</b>	<b>Partikelklasse, mit der Masse ausgetauscht wird</b>	<b>Name des Prozesses</b>
		$\frac{1}{2}$ Schnee	Bereifen von Regentropfen an Schnee
	Wachstum	Wasserdampf Wolkentropfen	Deposition Bereifen von Wolkentropfen an Graupel
		Wolkeneis Regen	Einfang von Wolkeneis Bereifen von Regentropfen an Graupel
		Schnee	Einfang von Schnee
	Abbau	Wasserdampf Wolkeneis	Sublimation Bereifen von Wolkentropfen an Schnee: Eismultiplikation
		Wolkeneis	Bereifen von Wolkentropfen an Graupel: Eismultiplikation
		Wolkeneis	Bereifen von Regentropfen an Wolkeneis: Eismultiplikation
		$\frac{1}{2}$ Wolkeneis	Bereifen von Regentropfen an Schnee: Eismultiplikation
		Wolkeneis	Bereifen von Regentropfen an Graupel Eismultiplikation
		Regentropfen	Bereifen von Wolkentropfen an Graupel: Verstärktes Schmelzen
		Regentropfen	Bereifen von Wolkentropfen an Graupel: Abtropfen von Schmelzwasser
		Regentropfen	Bereifen von Regentropfen: an Graupel: Verstärktes Schmelzen
		Regentropfen	Bereifen von Regentropfen an Graupel: Abtropfen von Schmelzwasser
		Regentropfen Hagel	Schmelzen Nasses Wachstum von Graupel
Hagel	Bildung	Regentropfen Graupel	Gefrieren Nasses Wachstum von Graupel

*Weiter auf der nächsten Seite*

<b>Partikel- klasse</b>	<b>Prozess- gruppe</b>	<b>Partikelklasse, mit der Masse ausgetauscht wird</b>	<b>Name des Prozesses</b>
	Wachstum	Wasserdampf Wolkentropfen	Sublimation Bereifen von Wolkentropfen an Hagel
		Wolkeneis Regentropfen	Einfang von Wolkentropfen Bereifen von Regentropfen an Hagel
		Schnee	Einfang von Schnee
	Abbau	Wasserdampf Wolkeneis	Sublimation Bereifen von Wolkentropfen an Hagel
		Eismultiplikation Wolkeneis	Bereifen mit Regentropfen an Hagel: Eismultiplikation
		Regentropfen	Bereifen von Wolkentropfen an Hagel:
		Verstärktes Schmelzen Regentropfen	Bereifen von Wolkentropfen an Hagel: Abtropfen von Schmelzwasser
		Regentropfen	Bereifen von Regentropfen an Hagel: Verstärktes Schmelzen
		Regentropfen	Bereifen von Regentropfen an Hagel: Abtropfen von Schmelzwasser Schmelzen

## A.2 10m-Windfeld und 2m-Temperatur und 2m-Taupunkttemperatur

Für die Zeitpunkte 19:30 Uhr UTC am 6.1.2007 (Modellzeit 7 h 30 min ) und 7:00 Uhr UTC am 7.1.2007 (Modellzeit 19 h 30 min ) wird das 10m-Windfeld mit Windpfeilen unterlegt mit der 2m-Temperatur bzw. der 2m-Taupunkttemperatur dargestellt.

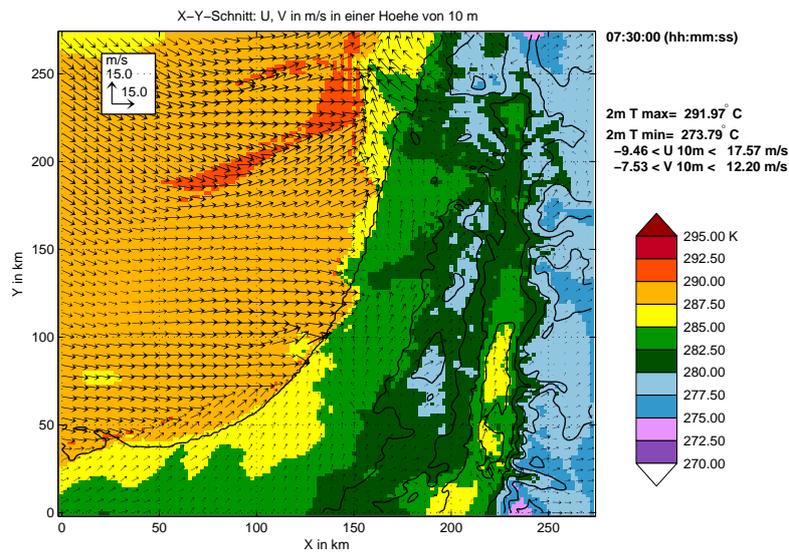


Abbildung A.1: Simulation von niedriger CCN-Konzentration ohne Impfen: 2m-Temperatur und der 10m-Wind für 7h 30min

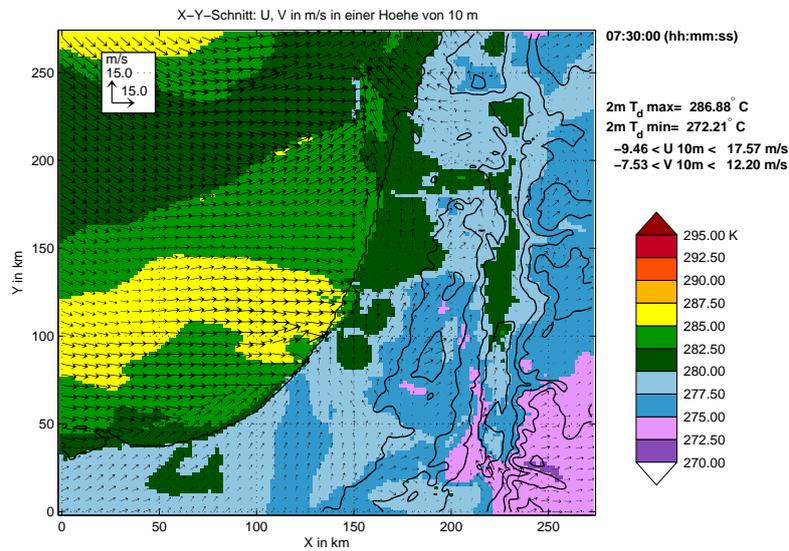


Abbildung A.2: Simulation von niedriger CCN-Konzentration ohne Impfen: 2m-Taupunkttemperatur und der 10m-Wind für 7h 30min

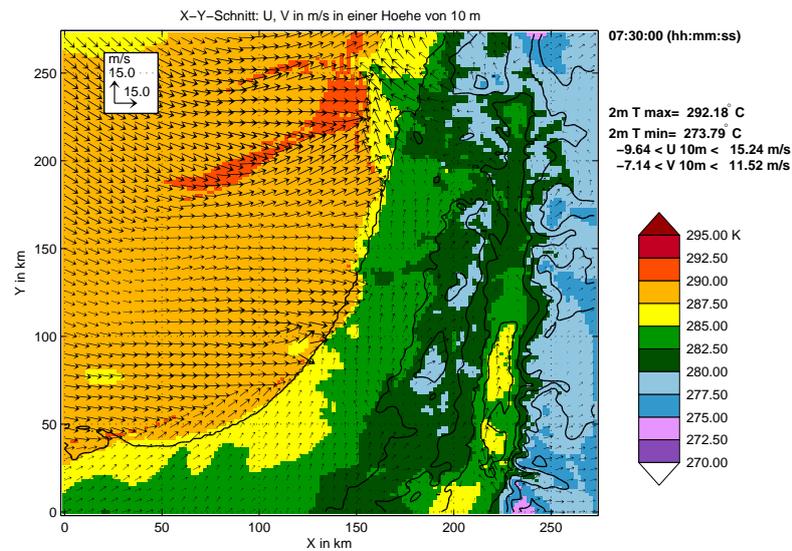


Abbildung A.3: Simulation von niedriger CCN-Konzentration mit Impfen: 2m-Temperatur und der 10m-Wind für 7h 30min

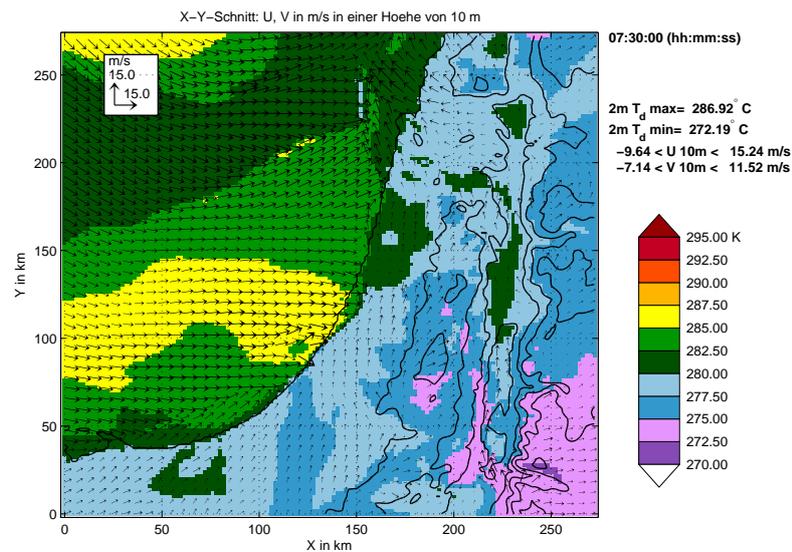


Abbildung A.4: Simulation von niedriger CCN-Konzentration mit Impfen: 2m-Taupunktstemperatur und der 10m-Wind für 7h 30min

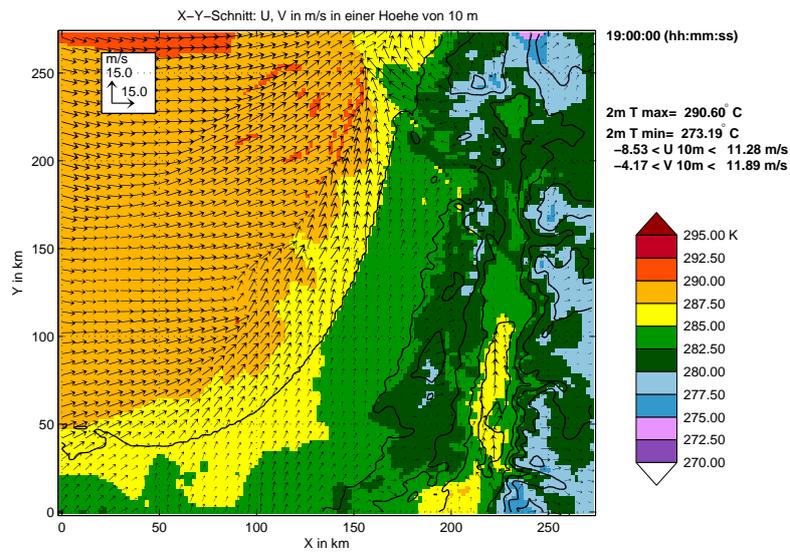


Abbildung A.5: Simulation von niedriger CCN-Konzentration ohne Impfen: 2m-Temperatur und der 10m-Wind für 19h

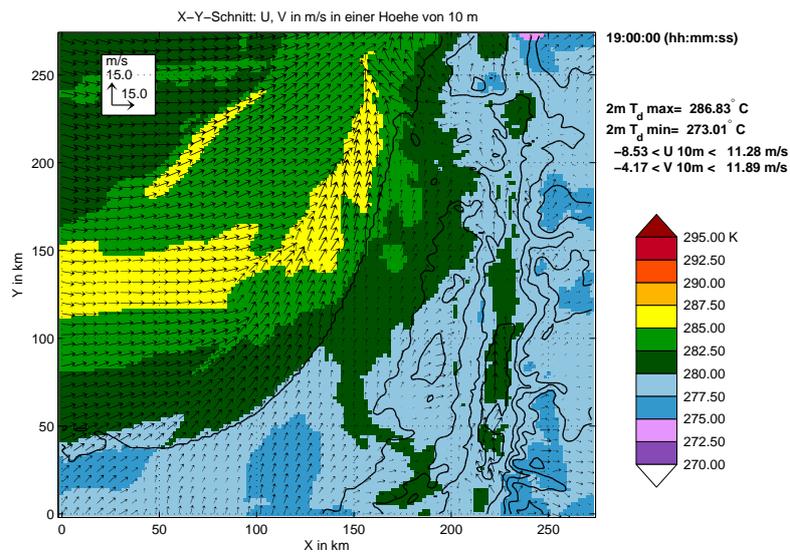


Abbildung A.6: Simulation von niedriger CCN-Konzentration ohne Impfen: 2m-Taupunkttemperatur und der 10m-Wind für 19h

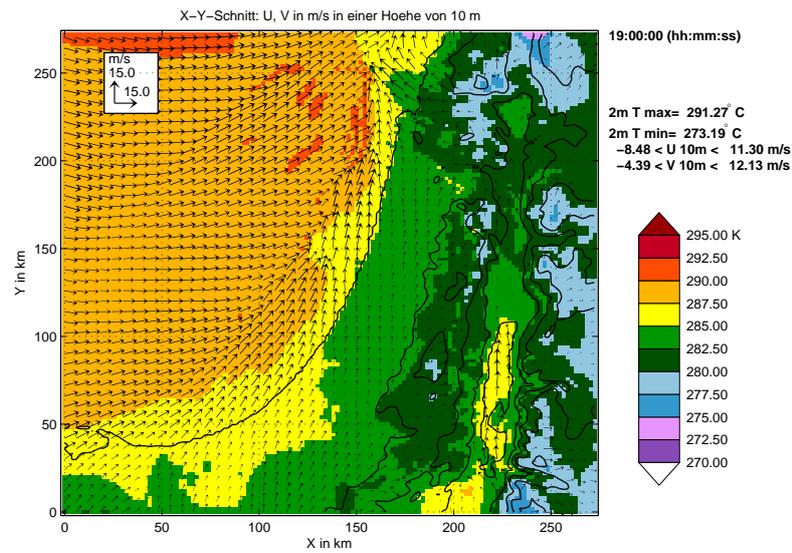


Abbildung A.7: Simulation von niedriger CCN-Konzentration mit Impfen: 2m-Temperatur und der 10m-Wind für 19h

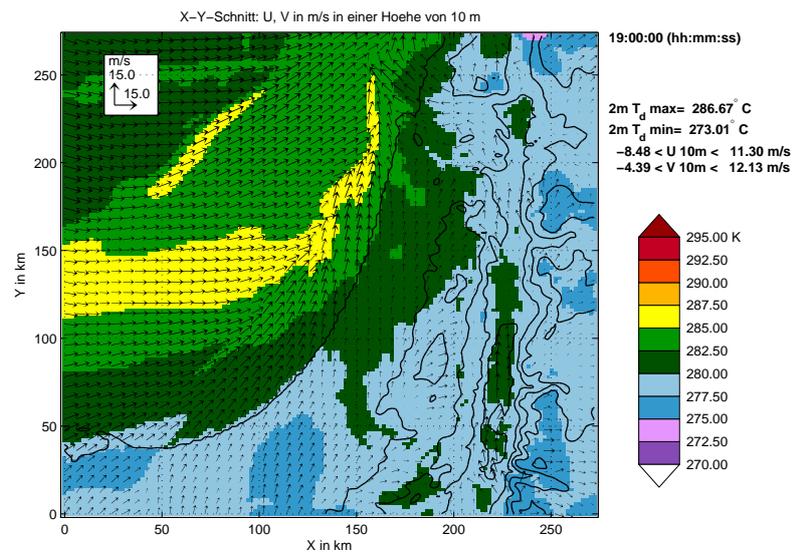


Abbildung A.8: Simulation von niedriger CCN-Konzentration mit Impfen: 2m-Taupunktstemperatur und der 10m-Wind für 19h



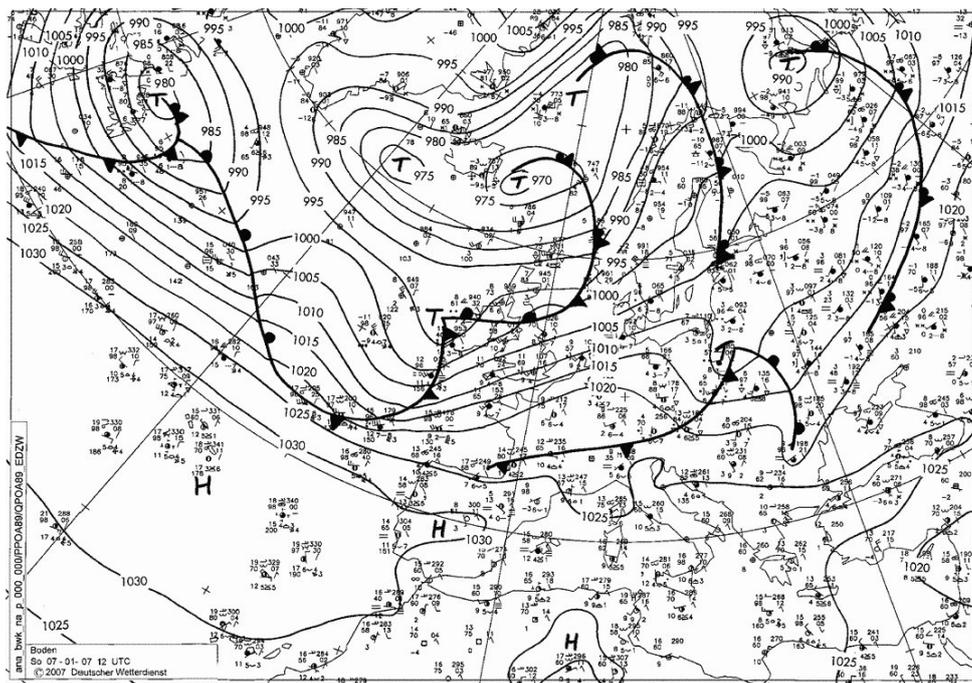


Abbildung A.11: Bodenkarte des DWD für den 7.1.2007 12:00 Uhr UTC

## A.4 Niederschlagsverteilung für den Zeitabschnitt 5h – 9h für niedrige CCN-Konzentration

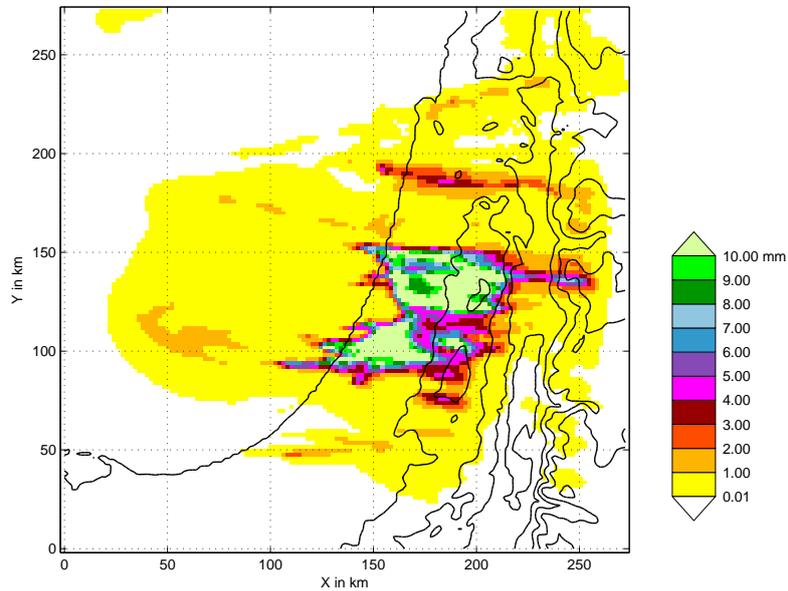


Abbildung A.12: Simulation ohne Impfen bei niedriger CCN-Konzentration: über den Zeitraum 5h – 9h akkumulierter Niederschlag in mm

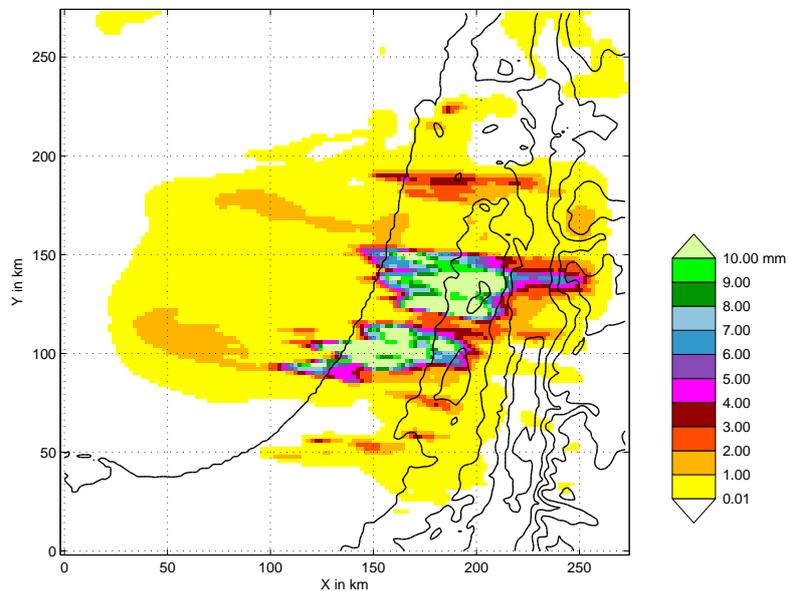


Abbildung A.13: Simulation mit Impfen bei niedriger CCN-Konzentration: über den Zeitraum 5h – 9h akkumulierter Niederschlag in mm

## A.5 Wind- und Temperaturfeld in 2250m Höhe für 19h

Für die Simulationen mit und ohne Impfen bei niedriger CCN-Konzentration ist das Wind- und Temperaturfeld in 2250m Höhe im Modellgebiet dargestellt.

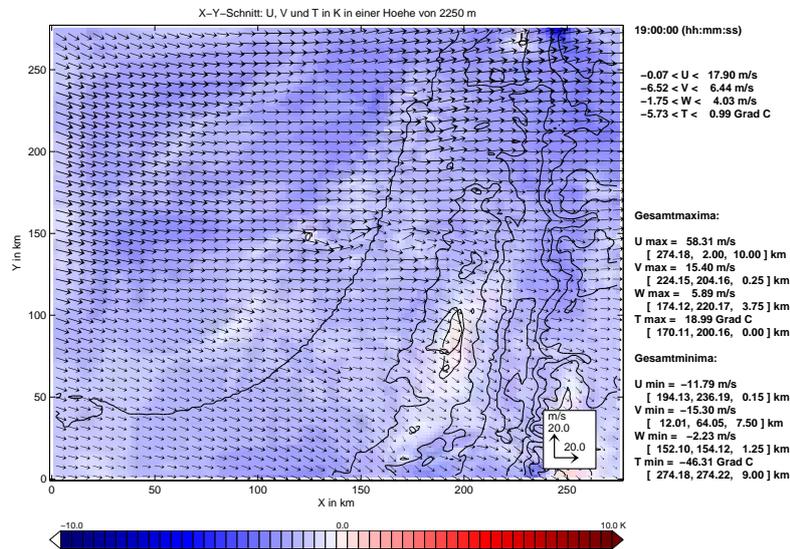


Abbildung A.14: Horizontales Windfeld mit farbig dargestellten Werten der Temperatur in einer Höhe von 1500m für den ungeimpften Modelllauf bei maritimer CCN-Konzentration des Aerosols für 19h Modellzeit

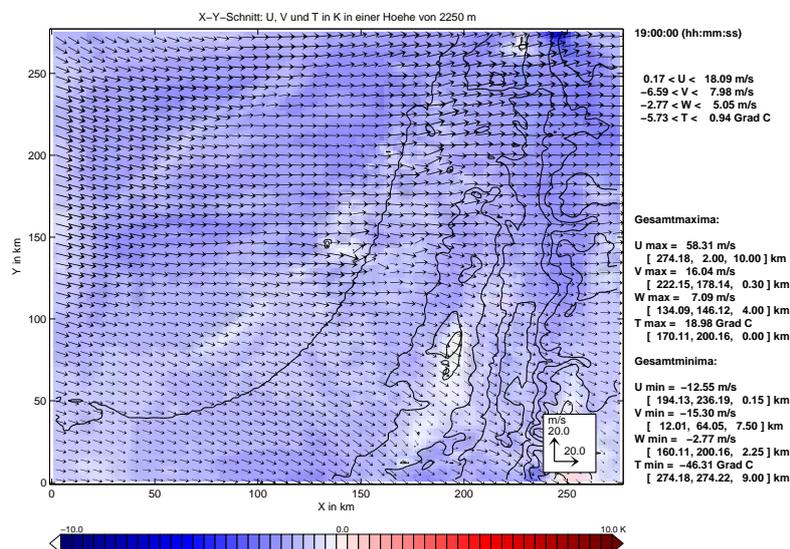


Abbildung A.15: Horizontales Windfeld mit farbig dargestellten Werten der Temperatur in einer Höhe von 2250m für den ungeimpften Modelllauf bei maritimer CCN-Konzentration des Aerosols für 19h Modellzeit

## A.6 Niederschlagsverteilung für den Zeitraum 16h 30min – 20h 30min für höhere CCN-Konzentrationen

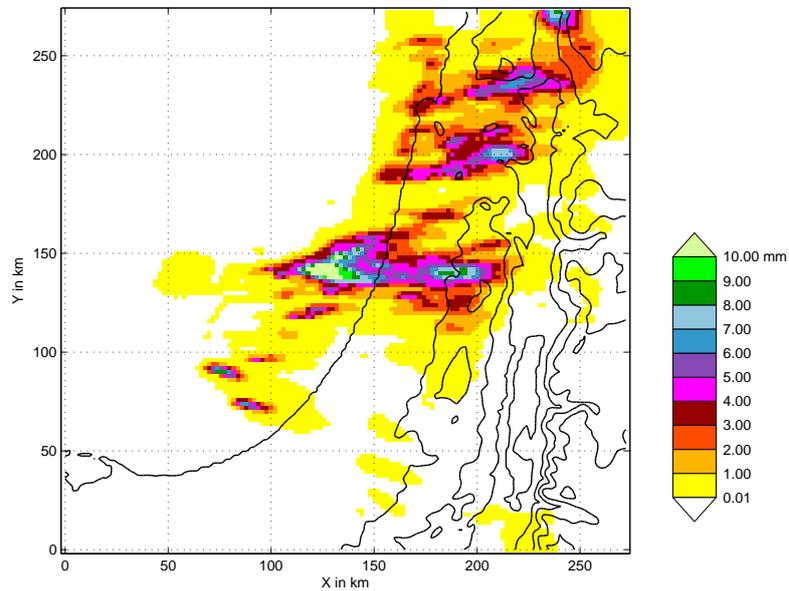


Abbildung A.16: Simulation ohne Impfen bei mittlerer CCN-Konzentration: über den Zeitraum 16h 30min – 20h 30min akkumulierter Niederschlag in mm

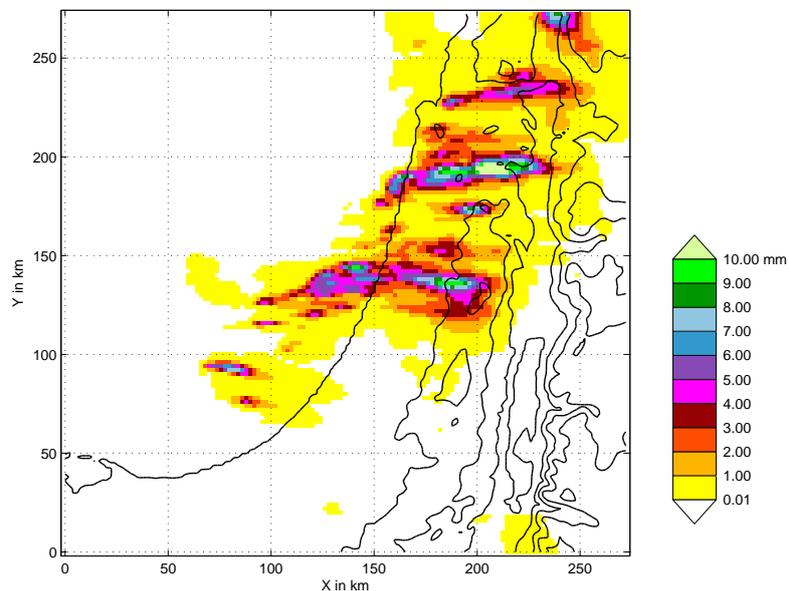


Abbildung A.17: Simulation mit Impfen bei mittlerer CCN-Konzentration: über den Zeitraum 16h 30min – 20h 30min akkumulierter Niederschlag in mm

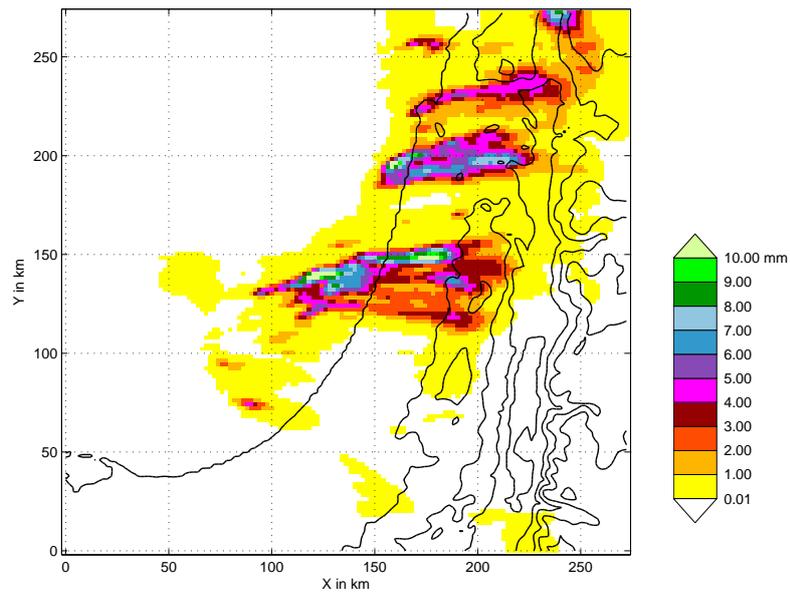


Abbildung A.18: Simulation ohne Impfen bei hoher CCN-Konzentration: über den Zeitraum 16h 30min – 20h 30min akkumulierter Niederschlag in mm

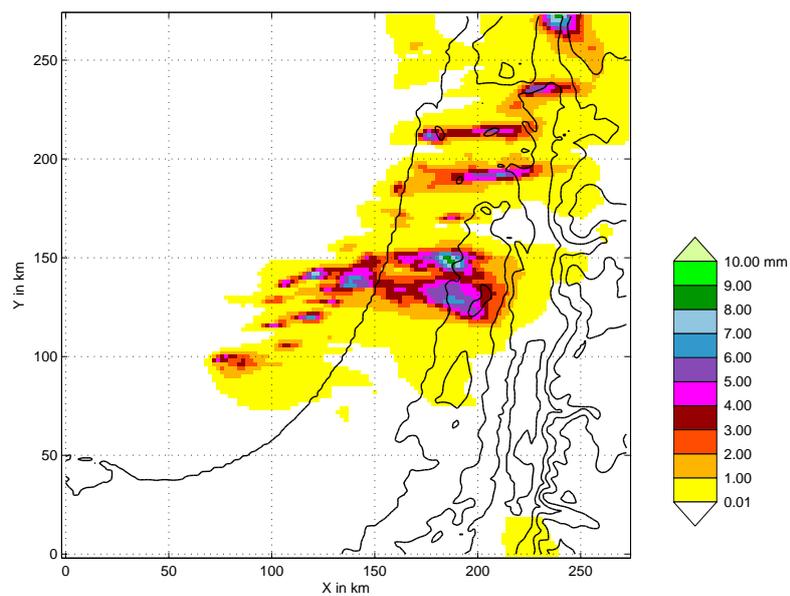


Abbildung A.19: Simulation mit Impfen bei hoher CCN-Konzentration: über den Zeitraum 16h 30min – 20h 30min akkumulierter Niederschlag in mm

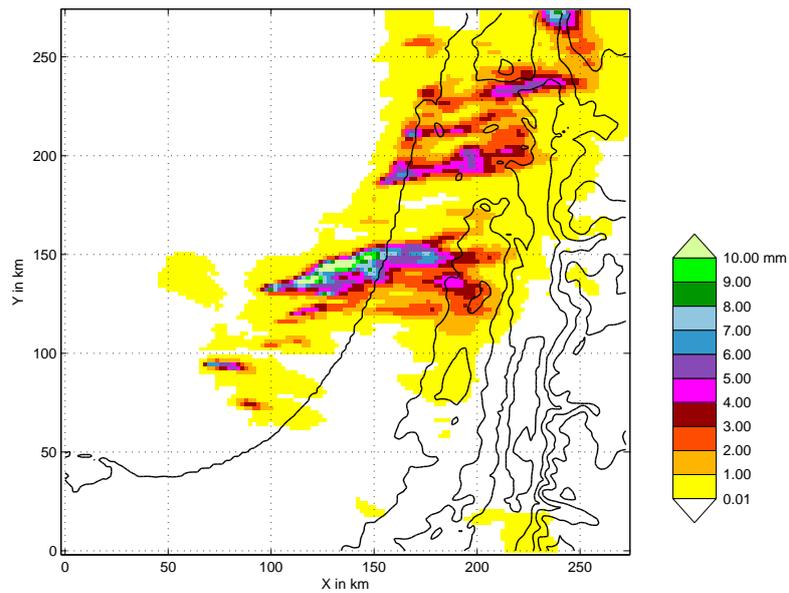


Abbildung A.20: Simulation ohne Impfen bei sehr hoher CCN-Konzentration: über den Zeitraum 16h 30min – 20h 30min akkumulierter Niederschlag in mm

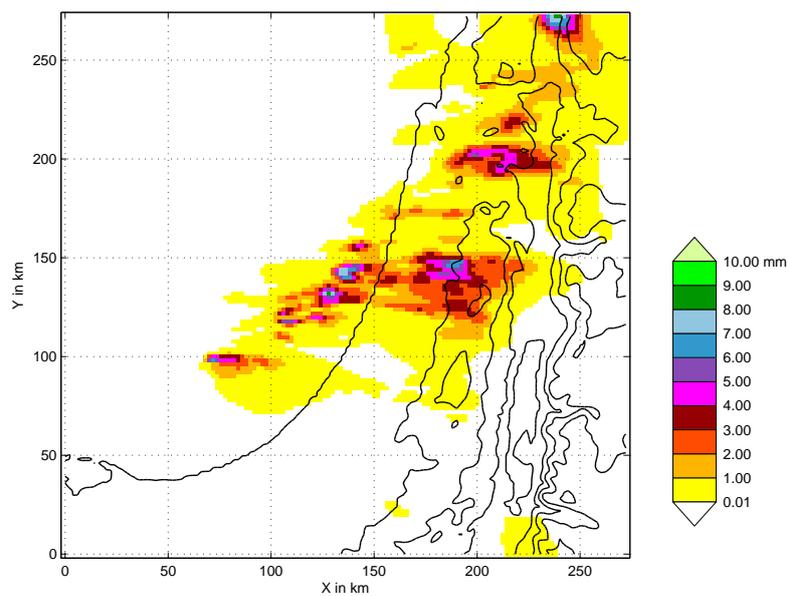


Abbildung A.21: Simulation mit Impfen bei sehr hoher CCN-Konzentration: über den Zeitraum 16h 30min – 20h 30min akkumulierter Niederschlag in mm

## **A.7 Umwandlungsprozesse bei hohen und sehr hohen CCN-Konzentrationen**

Die Umwandlungsprozesse, die die Prozessgruppen bilden, sind in Anhang A.1 angegeben. In jedem Schaubild sind jeweils die Massen durch die Umwandlungsprozesse für zwei verschiedene Läufe angegeben. Die unteren bzw. rechten Pfeile beziehen sich auf die Simulationen mit Impfen, die oberen bzw. linken Pfeile beziehen sich auf die Simulationen ohne Impfen. Ist die Differenz innerhalb einer Prozessgruppe zwischen den Simulationen mit und ohne Impfen größer als  $0,5 \times 10^9 \text{kg}$ , dann sind die betreffenden Pfeile hervorgehoben.

**A.7.1 Wasserdampf**

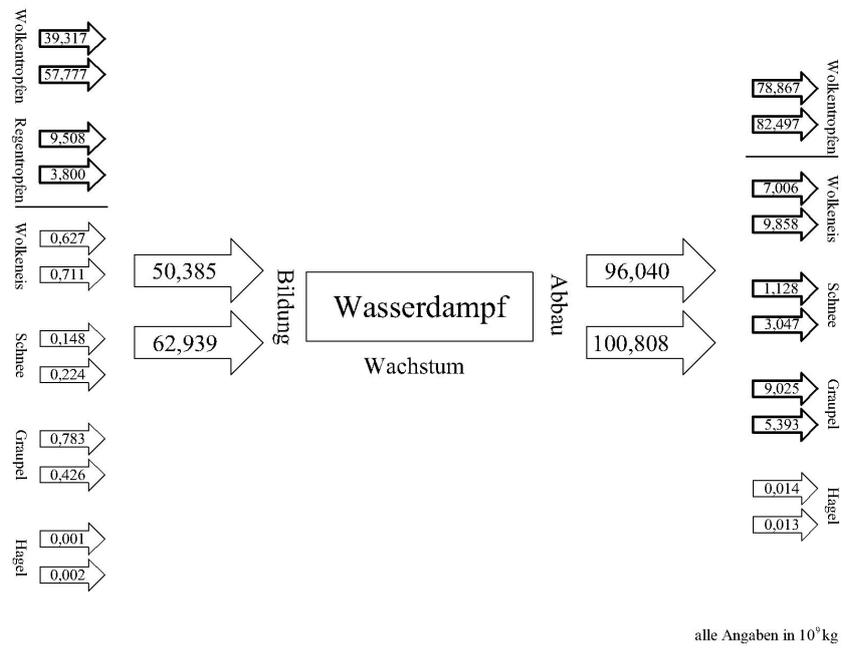


Abbildung A.22: Prozessgruppen von Wasserdampf für hohe CCN-Konzentration von Aerosolen

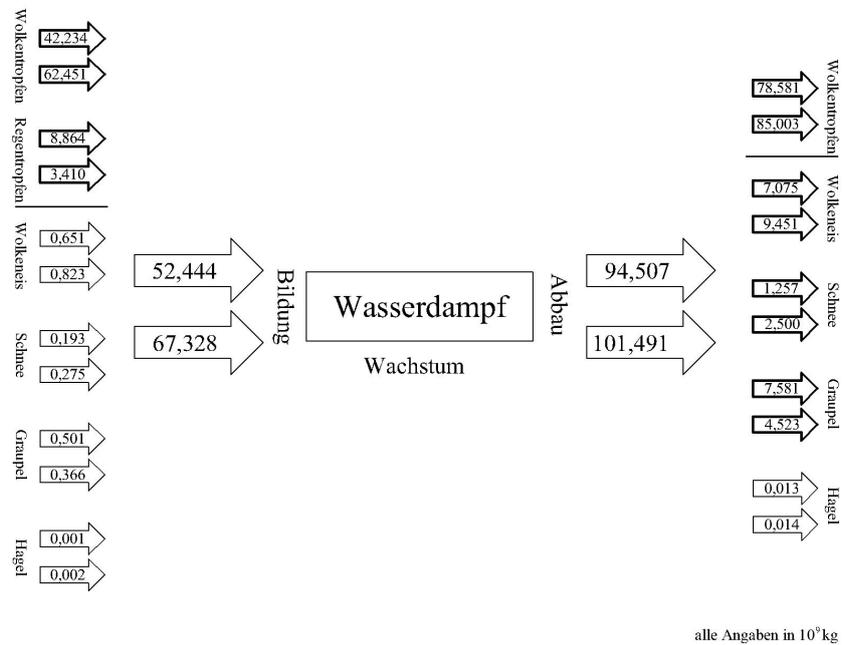


Abbildung A.23: Prozessgruppen von Wasserdampf für sehr hohe CCN-Konzentration von Aerosolen

### A.7.2 Wolkentropfen

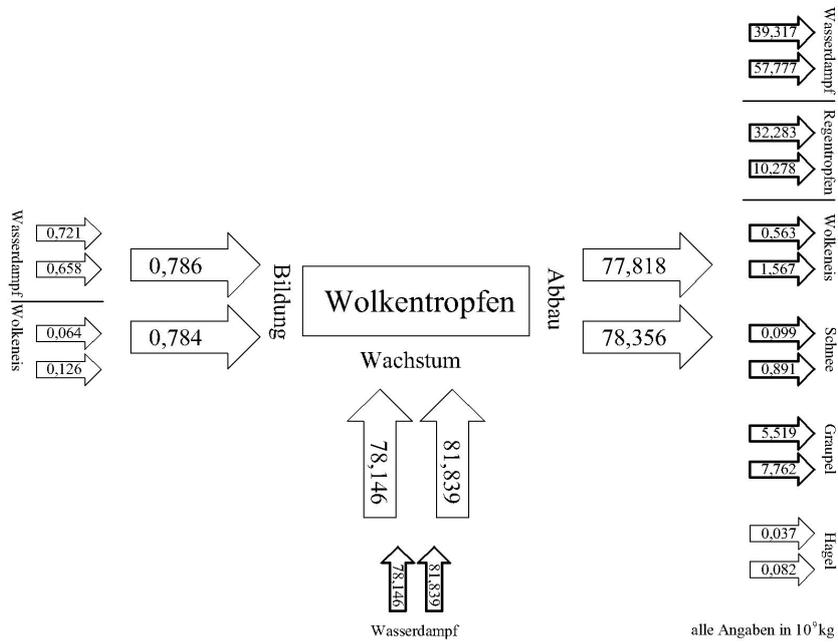


Abbildung A.24: Prozessgruppen von Wolkentropfen für hohe CCN-Konzentration von Aerosolen

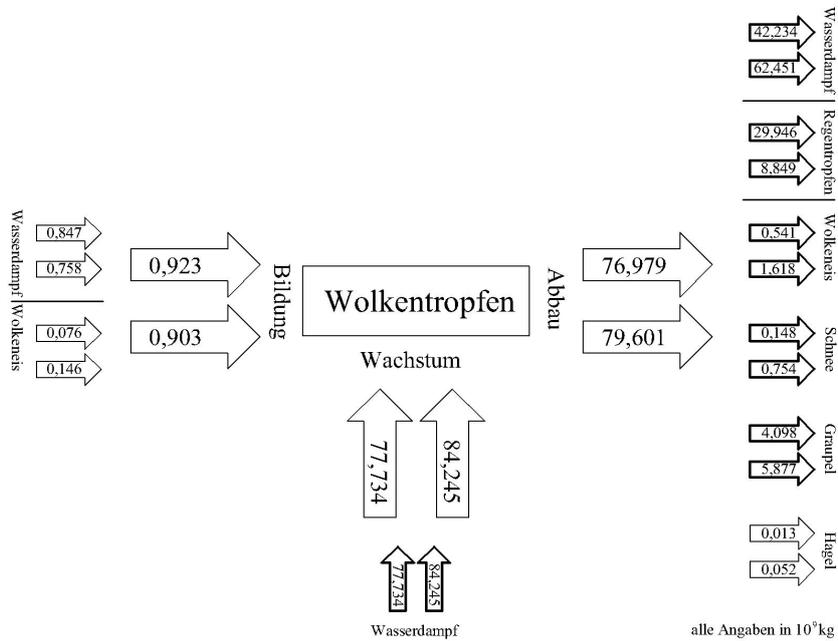


Abbildung A.25: Prozessgruppen von Wolkentropfen für sehr hohe CCN-Konzentration von Aerosolen

**A.7.3 Wolkeneis**

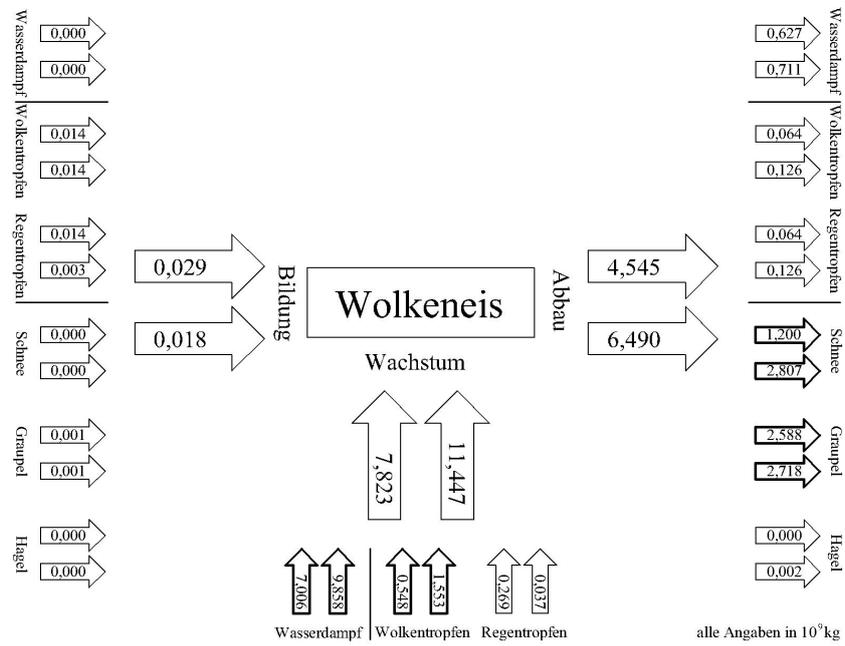


Abbildung A.26: Prozessgruppen von Wolkeneis für hohe CCN-Konzentration von Aerosolen

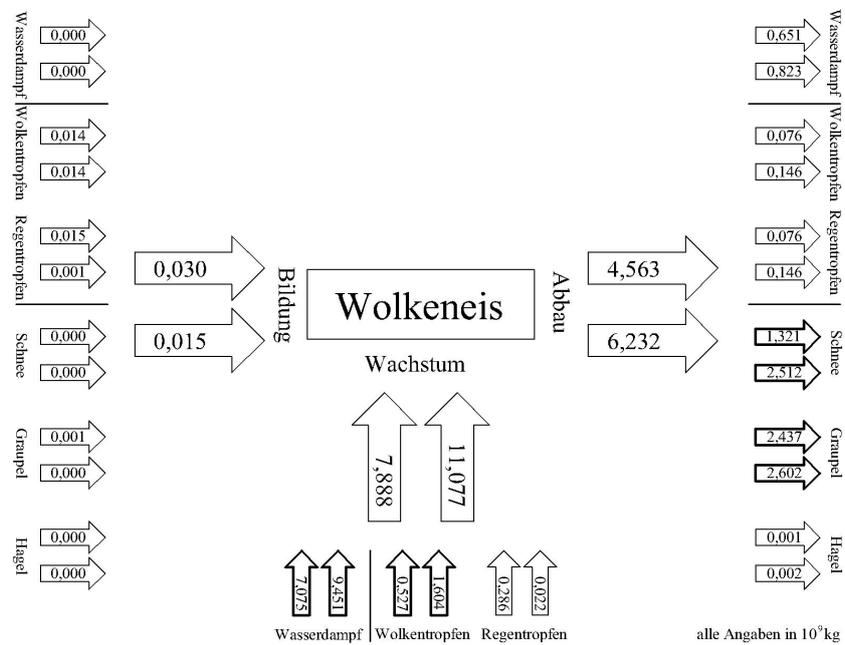


Abbildung A.27: Prozessgruppen von Wolkeneis für sehr hohe CCN-Konzentration von Aerosolen

A.7.4 Schnee

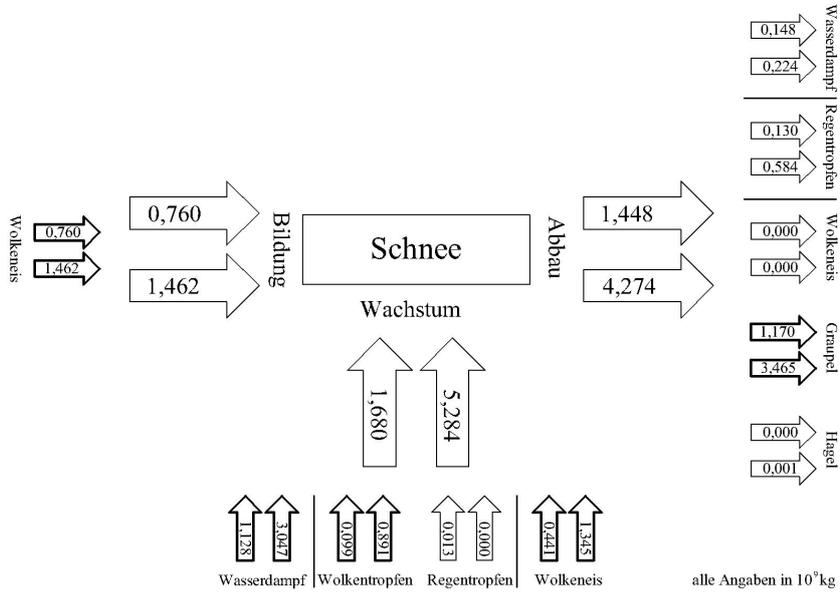


Abbildung A.28: Prozessgruppen von Schnee für hohe CCN-Konzentration von Aerosolen

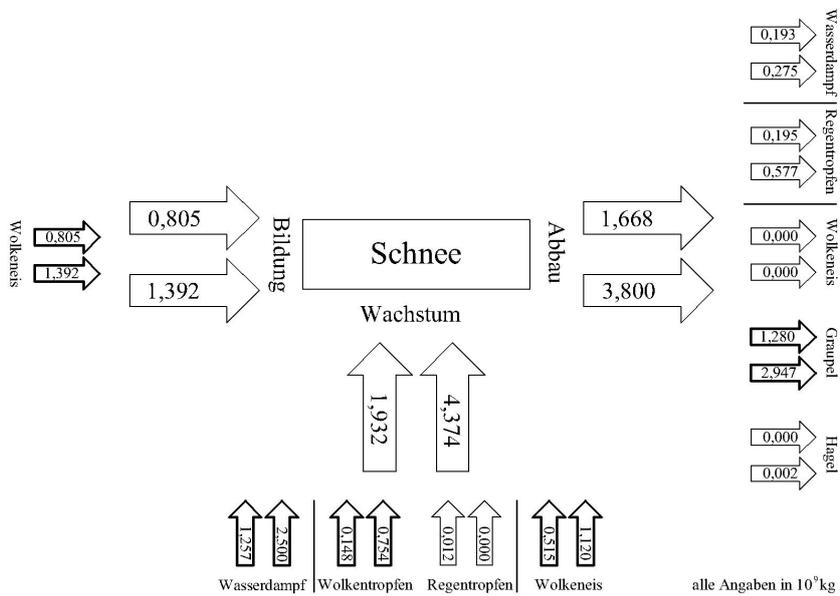


Abbildung A.29: Prozessgruppen von Schnee für sehr hohe CCN-Konzentration von Aerosolen

**A.7.5 Graupel**

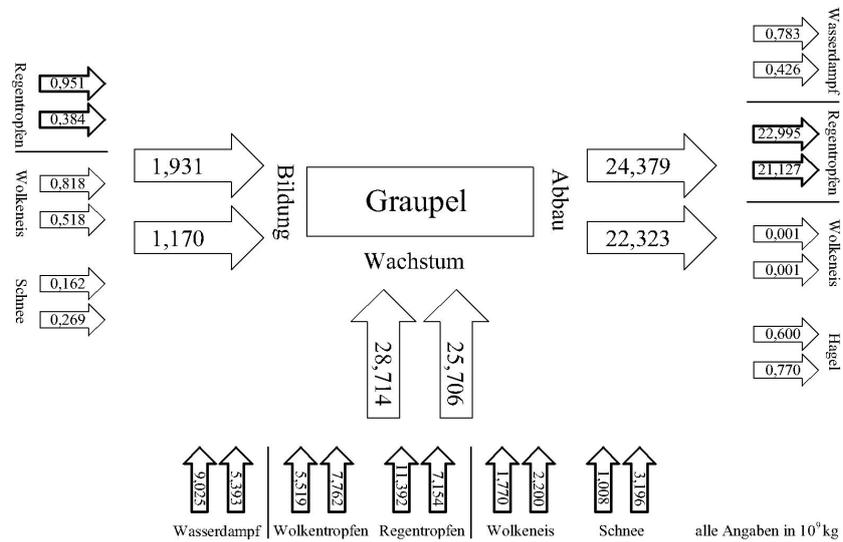


Abbildung A.30: Prozessgruppen von Graupel für hohe CCN-Konzentration von Aerosolen

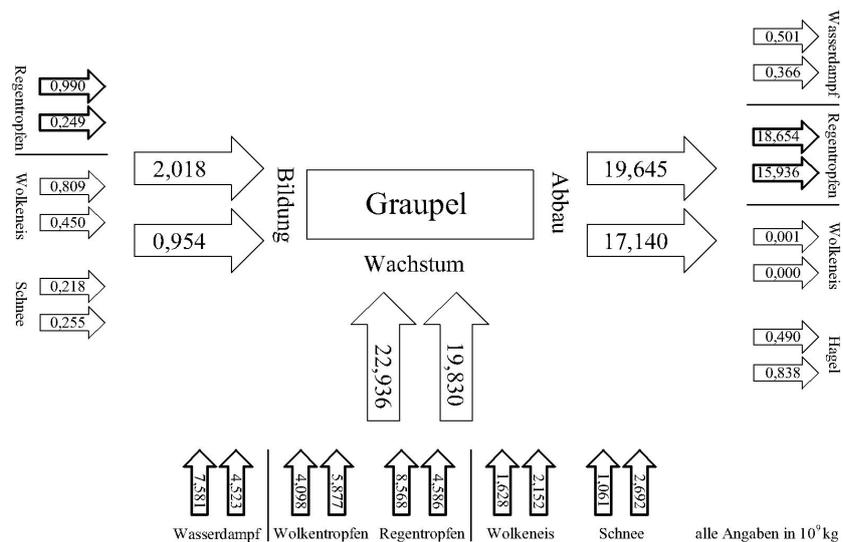


Abbildung A.31: Prozessgruppen von Graupel für sehr hohe CCN-Konzentration von Aerosolen

## A.7.6 Regentropfen

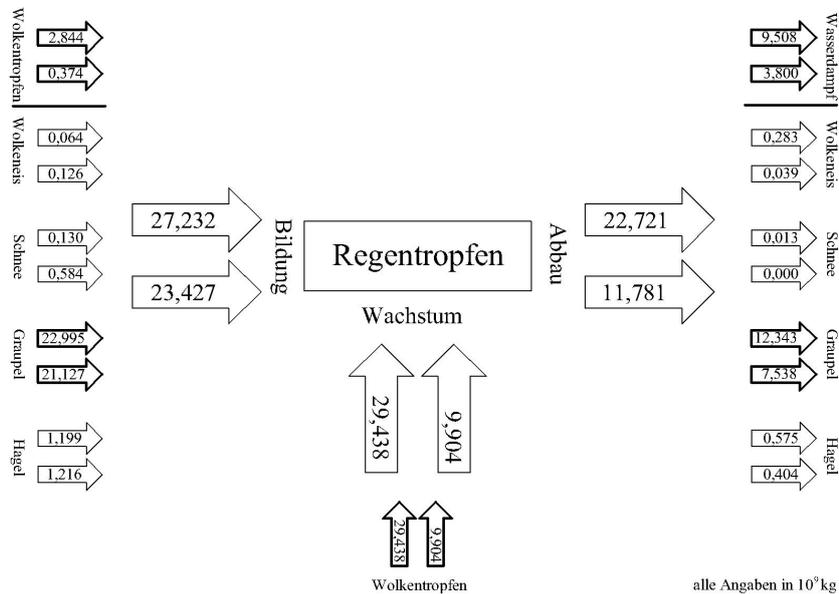


Abbildung A.32: Prozessgruppen von Regentropfen für hohe CCN-Konzentration von Aerosolen

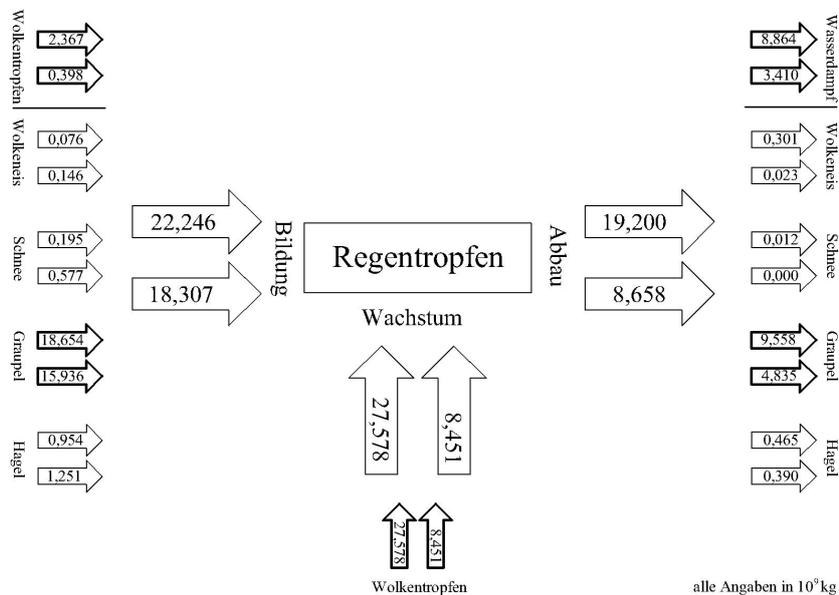


Abbildung A.33: Prozessgruppen von Regentropfen für sehr hohe CCN-Konzentration von Aerosolen

**A.7.7 Hagel**

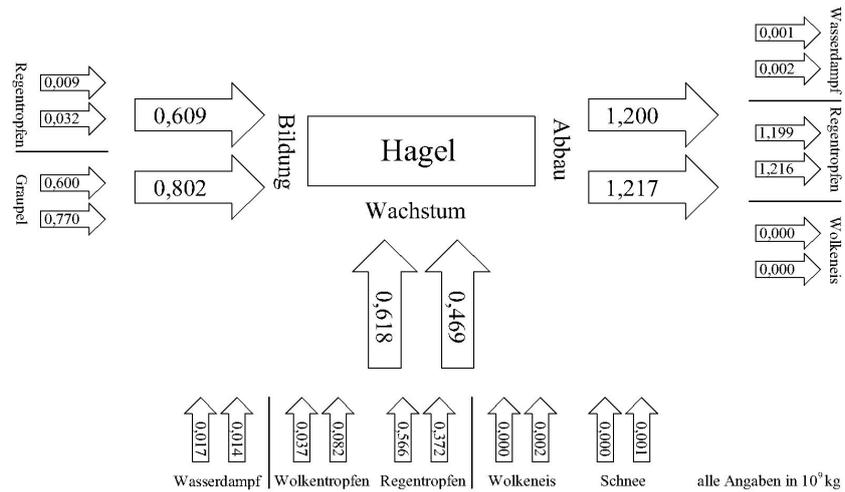


Abbildung A.34: Prozessgruppen von Hagel für hohe CCN-Konzentration von Aerosolen

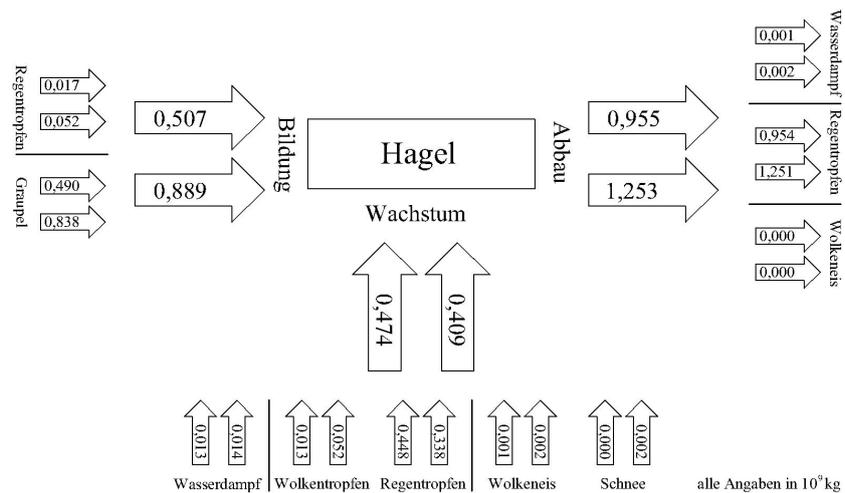


Abbildung A.35: Prozessgruppen von Hagel für sehr hohe CCN-Konzentration von Aerosolen



## **Dankesworte**

Meinem Betreuer Herrn Prof. Dr. Klaus Dieter Beheng danke ich für seine umfassende Unterstützung während der Fertigstellung dieser Arbeit. Bei Frau Prof. Dr. Sarah Jones bedanke ich mich für die Übernahme des Korreferats. Mein Dank geht an meine Betreuerin Frau Dr. Heike Noppel und an meinen Zimmerkollegen Herrn Dr. Ulrich Blahak für die Zusammenarbeit und die angenehme Arbeitsatmosphäre in unserem Zimmer. Der gesamten Arbeitsgruppe möchte ich für den guten Zusammenhalt danken. Meinen Freunden danke ich für ihre Ratschläge und ihre Nachsicht für die vertagten Treffen, Urlaube und anderen Planungen. Ich bedanke mich bei meiner ganzen Familie für die moralische Unterstützung. Meinem Bruder Clemens Jandt danke ich zudem für seine Unterstützung bei der Fertigstellung dieser Arbeit. Schließlich möchte ich mich bei meinen Eltern Beate und Wolfgang Jandt bedanken, die am Ende meiner Diplomarbeitszeit vom frühen Morgen bis in den späten Abend hinein Korrektur gelesen haben.



Hiermit versichere ich die vorliegende Arbeit selbstständig angefertigt, alle dem Wortlaut oder Sinn nach entnommenen Inhalte anderer Werke an den entsprechenden Stellen unter Angabe der Quellen kenntlich gemacht und keine weiteren Hilfsmittel verwendet zu haben.

Karlsruhe, den 03.Mai 2010 .....