

Diss. ETH No. 9908

**Aspects of precipitation simulation in
numerical weather prediction**

Towards an operational mesoscale NWP model

A dissertation submitted to the
Swiss Federal Institute of Technology Zurich

for the degree of
Doctor of Natural Sciences

presented by
Peter Binder
Dipl. Phys. ETH
born 6 December 1957
citizen of Zofingen AG and Strengelbach AG

accepted on the recommendation of
Prof. H.C. Davies, examiner
Prof. R.A. Houze, co-examiner

Zurich, 1992

Abstract

A study is made of the impact of enhanced horizontal resolution and cumulus parameterization on the simulation of precipitation by a numerical weather prediction (NWP) model. In particular theoretical, observational and modelling aspects related to a meso- β -scale NWP model are considered. In models of this scale precipitation is formally separated into an unresolved convective part and a grid-resolvable part, and there is a need for an appropriate method to parameterize the unresolved component. The study falls into three distinct, but related parts.

In the first part the concept of convective adjustment parameterization is investigated in detail. Here the basic assumption is that a quasi-equilibrium thermodynamic structure – the convectively adjusted atmospheric state – exists and that this can be represented by a so-called deep-convection reference profile. In this context the thermodynamic structure related to mid-latitude continental summer convection is examined for a set of upper air ascents of the sounding station Payerne in Switzerland and examined in relation to the convective adjustment scheme proposed by Betts (1986) (– which was based primarily on tropical data). It is shown that, given a proper set for the adjustable parameters derived from the observations, the deep-convection reference profile of Betts characterizes well the convectively adjusted atmosphere of the extra-tropical continental environment exemplified by the Payerne data. In comparison with the reference profile determined by Betts and Miller (1986) the derived temperature structure is found to be even more unstable below melting level. Also the humidity profile exhibits some distinctive physical characteristics. Given these characteristic features, the standard reference profiles available for numerical experimentation are not entirely satisfactory. In addition the convective adjustment scheme is shown to be fundamentally different from the alternative so-called mass flux approach. In general there is no mass flux that can produce the equivalent vertical heat and moisture transports and it is also impossible to determine condensation rates associated with the adjustment process.

In the second part the dependency of precipitation simulation on horizontal resolution and on the specification of the deep-convection reference profile and the adjustment time scale is systematically investigated. The original mesh width (~ 60 km) of an existing hydrostatic meso- α -scale limited area model is successively reduced by a factor two and four. It is demonstrated that the resulting fine-mesh model versions can improve the simulation of precipitation events, particularly their temporal and spatial structure. The capability of the high-resolution models to better represent external forcing (e.g. orography) is a crucial factor. In convectively dominated weather situations the simulation results are extremely sensitive to the choice of the cumulus parameterization scheme with the precipitation amounts and intensities systematically increasing with decreasing mesh width. Enhanced grid-scale precipitation due to intensified vertical grid-scale circulation is identified as a cause. A second result is that convective precipitation increases as a consequence of the required reduction of the adjustment time scale. However, due to interactions the two contributions can not in general be linearly combined. The parameterization of convection proves to be important for a timely initiation of precipitation events and furthermore it counteracts the occurrence of grid point storms. Weather radar data are utilized to provide a first qualitative comparison of simulated and observed horizontal precipitation field pat-

terns. Thereafter quantitative assessment of model results is made by means of radar data and measurements of the automatic surface network. The two types of observations can yield substantially differing estimates and it is appropriate to use both sources of observational data for model verification. Partitioning of precipitation into its parameterized convective and grid-scale parts and consideration of their horizontal structures and time variation provide valuable insights into the life cycle of simulated convective precipitation events.

In the third part a diagnostic tool is developed to evaluate the contributions to the evolution of the model atmosphere made by all processes represented in the model. The standard formalism for heat and moisture budgets, frequently used for diagnostic studies of observations, is carefully adapted to the governing equations of NWP models. One difficulty is that in the particular model considered condensation rates are never explicitly calculated. The condensation is treated as an internal process, since the prognostic thermodynamic and moisture variables are total enthalpy and total specific water content. These predicted values are inserted into temperature and water vapour equations and the condensation rates appear as residuals. Diagnosis of a simulated convective precipitation event reveals the predominance of the convective tendencies in the early stage of development. In the mature stage grid-scale condensation and precipitation-forming processes provide the strongest forcing for the development of the model atmosphere. Since convective adjustment schemes take only static properties of the atmosphere into account the amplitudes of the associated tendencies primarily depend on the adjustment time scale. In contrast, grid-scale condensation and precipitation are largely determined by grid-scale vertical moisture transport and therefore corresponding tendencies strongly depend on the mesh size. Furthermore, a pronounced dependency is diagnosed of the vertical structure of the apparent heat source and the apparent moisture sink on the deep-convection reference profile.

Zusammenfassung

In dieser Studie wird der Einfluss von erhöhter horizontaler Auflösung und des Parametrisierungsverfahrens für die Konvektion auf die Niederschlagssimulation mit einem numerischen Wettervorhersage (NWV) Modell untersucht. Insbesondere werden Aspekte der Theorie, der Beobachtung und der Modellierung im Zusammenhang mit einem meso- β -skaligen NWV Modell betrachtet. In Modellen von dieser Auflösung wird der Niederschlag formal in einen subskaligen konvektiven und einen vom Modellgitter auflösbaren Anteil aufgetrennt. Eine geeignete Methode zur Parametrisierung des nicht aufgelösten Anteils ist notwendig. Die Arbeit ist in drei eigenständige, aber miteinander in Beziehung stehende Teile gegliedert.

Im ersten Teil wird das Konzept der konvektiven Anpassung als Verfahren zur Parametrisierung der Konvektion eingehend untersucht. Hier wird die grundlegende Annahme gemacht, dass ein Quasi-Gleichgewichtszustand der thermodynamischen Struktur der Atmosphäre existiert, nämlich der konvektiv angepasste Zustand der Atmosphäre, der durch ein sogenanntes Referenzprofil für hochreichende Konvektion dargestellt werden kann. Die thermodynamische Struktur der Atmosphäre im Zusammenhang mit sommerlicher Konvektion in kontinentalen Verhältnissen der mittleren Breiten wird mittels einer Reihe von Radiosondenaufstiegen der Station Payerne in der Schweiz untersucht, und es wird die Beziehung zu dem von Betts (1986) vorgeschlagenen Anpassungsverfahren, das vorwiegend auf tropischen Daten gründet, überprüft. Wenn ein geeigneter aus Beobachtungen abgeleiteter Satz von Werten für die freien Parameter verwendet wird, zeigt es sich, dass das Referenzprofil für hochreichende Konvektion nach Betts die extra-tropische, kontinentale, konvektiv angepasste Atmosphäre, hier am Beispiel der Payerne Daten, gut charakterisiert. Im Vergleich zu dem von Betts und Miller (1986) bestimmten Referenzprofil erweist sich die aus dem vorliegenden Datensatz abgeleitete Temperaturstruktur unterhalb der Nullgradgrenze als feuchtlabiler. Ausserdem zeigt das Feuchteprofil einige Besonderheiten von physikalischer Bedeutung. In Anbetracht dieser Charakteristika vermögen die für die numerischen Simulationen zur Verfügung stehenden Referenzprofile nicht vollständig zu befriedigen. Zusätzlich wird gezeigt, dass sich Anpassungsverfahren zur Parametrisierung der Konvektion fundamental vom alternativen, sogenannten Massenflussansatz unterscheiden. Im allgemeinen existiert kein Massenfluss, der gleichwertige vertikale Wärme- und Feuchtetransporte bewirken kann. Ebenso ist es unmöglich, durch die konvektive Anpassung verursachte Kondensationsraten zu bestimmen.

Im zweiten Teil wird die Abhängigkeit der Niederschlagssimulation von der Maschenweite und von der Spezifikation des Referenzprofils für die hochreichende Konvektion und der Anpassungszeit systematisch untersucht. Die ursprüngliche Maschenweite (~ 60 km) eines existierenden hydrostatischen, meso- α -skaligen Ausschnittmodells wird schrittweise um einen Faktor zwei und vier verkleinert. Es wird gezeigt, dass die feinmaschigen Modellversionen die Simulation von Niederschlagsereignissen, besonders deren räumliche und zeitliche Struktur, verbessern können. Die Möglichkeit der hochauflösenden Modelle zur detaillierteren Darstellung der externen Antriebe, zum Beispiel der Orographie, ist ein ausschlaggebender Faktor. In konvektiven Wetterlagen erweisen sich die Simulationsergebnisse als äusserst empfindlich auf die Wahl der Konvektionsparametrisierung, wobei Niederschlagsmenge und -intensität mit kleiner werdender Maschenweite

systematisch zunehmen. Verstärkte skalige Niederschlagsproduktion durch die Intensivierung der skaligen Vertikalzirkulation lässt sich als eine Ursache feststellen. Zweitens nimmt der konvektive Niederschlag durch die notwendige Verkürzung der Anpassungszeit zu, wobei sich die beiden Beiträge aufgrund der bestehenden Wechselwirkungen im allgemeinen nicht additiv verhalten. Die Parametrisierung der Konvektion erweist sich als wichtig im Hinblick auf die zeitlich korrekte Auslösung eines Niederschlagsereignisses, ausserdem dämmt sie das Auftreten von Gitterpunktstürmen ein. Wetterradar Daten werden benützt für einen ersten qualitativen Vergleich von simulierten und beobachteten Strukturen von Niederschlagsfeldern. Eine quantitative Einschätzung der Modellresultate wird mit Hilfe von Radar Daten und Beobachtungen des automatischen Bodenmessnetzes gemacht. Die beiden Beobachtungsarten können stark divergierende Resultate liefern und es ist deshalb angezeigt, für die Verifikation von Modellresultaten beide Messdatenquellen beizuziehen. Die Betrachtung der horizontalen Strukturen und der zeitlichen Entwicklung von konvektiven und skaligen Modellniederschlagsanteilen liefert wertvolle Einsichten in den Lebenszyklus von simulierten konvektiven Niederschlagsereignissen.

Im dritten Teil wird ein diagnostisches Werkzeug entwickelt, das die eingehende Untersuchung der Beiträge zur Entwicklung der Modellatmosphäre aller im Modell dargestellten Prozesse ermöglicht. Der übliche Budgetformalismus für Wärme und Feuchte, der häufig für diagnostische Studien mit Beobachtungsdaten angewendet wird, wird sorgfältig auf die allgemeinen Grundgleichungen numerischer Wettervorhersagemodelle angepasst. Eine Schwierigkeit mit dem speziell betrachteten Modell besteht darin, dass die Kondensationsrate nie explizit berechnet wird. Die Kondensation wird als interner Prozess behandelt, da die prognostischen thermodynamischen und Feuchtegrössen die Enthalpie und der totale spezifische Wassergehalt sind. Diese vorhergesagten Werte werden in Gleichungen für die Temperatur und den spezifischen Wasserdampfgehalt eingesetzt, in denen die Kondensationsrate als Residuum erscheint. Die Diagnose eines simulierten konvektiven Niederschlagsereignisses zeigt die Dominanz der konvektiven Tendenzen im frühen Stadium der Entwicklung auf. Im voll entwickelten Stadium liefern die skaligen Niederschlagsprozesse und die Kondensation die stärksten Antriebe für die Entwicklung der Modellatmosphäre. Da das konvektive Anpassungsverfahren nur die statischen Eigenschaften der Atmosphäre berücksichtigt, hängen die Amplituden der Quellterme vorwiegend von der gesetzten Anpassungszeit ab. Dagegen werden die Kondensation und die skaligen Niederschlagsprozesse wesentlich vom vertikalen Feuchtetransport bestimmt, woraus die vorwiegende Abhängigkeit der Tendenzen von der Maschenweite folgt. Zudem zeigt sich, dass die vertikale Struktur der konvektiven Wärme- und Feuchtequellen stark vom gewählten Referenzprofil für die hochreichende Konvektion abhängt.

Résumé

Une étude de l'impact d'une augmentation de la résolution horizontale et de la paramétrisation de la convection sur la simulation des précipitations par un modèle numérique de prévision du temps est réalisée dans ce travail. En particulier des aspects liés à la théorie, à l'observation et à la modélisation en relation avec un modèle d'échelle méso- β sont étudiés. Pour un tel modèle, les précipitations sont formellement décomposées en une partie convective dont l'échelle caractéristique est inférieure à celle de la maille du modèle, et une partie résoluble sur cette même grille; une méthode appropriée pour paramétriser la composante non résoluble est alors nécessaire. L'étude ici présentée est structurée en trois parties distinctes, mais reliées entre elles.

Dans la première partie le concept d'ajustement convectif appliqué à la paramétrisation de la convection est examiné en détail. L'hypothèse fondamentale faite ici est celle de l'existence d'un état en quasi-équilibre de la structure thermodynamique de l'atmosphère, appelé état convectivement ajusté, qui peut être représenté par un "profil de référence de convection profonde". Dans ce contexte, la structure thermodynamique de l'atmosphère aux latitudes moyennes pour des situations de convection estivales continentales est examinée à partir d'un ensemble de sondages aérologiques de la station de Payerne en Suisse; au vu de ces sondages, le schéma d'ajustement convectif proposé par Betts (1986), basé avant tout sur des données tropicales, est alors contrôlé. Pour autant que les paramètres libres du modèle soient ajustés convenablement à partir des observations, on montre que le profil de référence de convection profonde de Betts caractérise bien l'état convectivement ajusté de l'atmosphère extra-tropicale continentale, tel que représenté par les données de Payerne. En comparaison avec le profil de référence déterminé par Betts et Miller (1986), il apparaît cependant que la structure de la température déterminée à partir de ces données est encore plus instable en dessous de la limite du zéro degré. En outre le profil d'humidité présente quelques particularités physiques remarquables. En considération de ces caractéristiques, les profils de référence à disposition pour les expériences numériques ne sont pas entièrement satisfaisants. En outre on montre que le schéma d'ajustement convectif est fondamentalement différent de l'approche basée sur le schéma du flux de masse. En général il n'y a pas de flux de masse qui puisse reproduire des transports verticaux de chaleur et d'humidité équivalents. D'autre part il est impossible de déterminer les taux de condensation associés au schéma d'ajustement convectif.

Dans la deuxième partie on étudie de manière systématique la dépendance des précipitations simulées par rapport à la dimension horizontale de la maille du modèle et par rapport au choix du profil de référence de convection profonde et du temps d'ajustement. On considère un modèle hydrostatique existant à aire limitée et d'échelle méso- α , dont la maille (~ 60 km) est successivement réduite par un facteur deux, puis par un facteur quatre. On montre que les versions du modèle ayant une maille plus fine peuvent améliorer la simulation des événements "précipitation", particulièrement leurs structures temporelles et spatiales. Le fait que les modèles à haute résolution ont la capacité de mieux représenter les contraintes extérieures (p.ex. orographie) est un facteur crucial. Lors de situations météorologiques convectives les résultats de la simulation sont extrêmement sensibles au choix de la paramétrisation de la convection, la quantité et l'intensité des précipitations augmentant systématiquement avec la diminution de la maille du modèle. Une première cause à ce

comportement est l'augmentation des précipitations à l'échelle de la maille due à une intensification de la circulation verticale à cette même échelle. Deuxièmement, du fait de la nécessaire diminution du temps d'ajustement, les précipitations convectives croissent. Notons que ces deux contributions ne peuvent en général pas être combinées linéairement de par l'existence d'interactions entre ces phénomènes. La paramétrisation de la convection se révèle être importante par rapport à l'horaire du déclenchement des événements "précipitation", en outre elle diminue le déclenchement de tempêtes liées à un point de grille. Des données provenant d'un radar météorologique sont utilisées pour faire une première comparaison qualitative entre la structure simulée et la structure observée du champ de précipitation. Une évaluation quantitative des résultats du modèle est en suite obtenue à l'aide des données provenant du radar et du réseau automatique d'observations au sol. Comme ces deux méthodes d'observation peuvent fournir des estimations substantiellement différentes, il est judicieux de les utiliser parallèlement lors de la vérification du modèle. La partition d'un événement "précipitation" en une composante convective et une composante dont l'échelle est la maille du modèle, puis l'étude de la structure horizontale et du développement temporel de chacune de ces deux composantes fournissent des informations de valeur sur le cycle de vie des précipitations convectives simulées.

Dans la troisième partie un outil diagnostique permettant d'évaluer la contribution de chacun des processus du modèle à l'évolution de l'atmosphère simulée est développé. Le formalisme standard associé à l'étude du budget du modèle pour la chaleur et l'humidité, fréquemment utilisé lors d'études diagnostiques des observations, est soigneusement adapté aux équations gouvernant les modèles de prévision numérique du temps. Une difficulté rencontrée est que le taux de condensation n'est jamais explicitement calculé dans le modèle particulier utilisé ici. En effet, la condensation est traitée comme un processus interne, les variables prévisionnelles pour les processus thermodynamiques et humides étant l'enthalpie et le contenu spécifique total en eau; ces valeurs prévues sont insérées dans les équations gouvernant la température et le contenu en vapeur d'eau, le taux de condensation apparaissant alors comme résidu. Le diagnostique d'un événement simulé "précipitation convective" révèle la prédominance de la tendance convective durant la phase initiale du développement de la précipitation; par la suite les précipitations à l'échelle de la maille et les processus de condensation sont les facteurs dominant l'évolution de l'atmosphère. Comme le modèle d'ajustement convectif ne prend en considération que les propriétés statiques de l'atmosphère, l'amplitude des tendances associées dépend principalement du temps d'ajustement. Par contre, les précipitations à l'échelle de la maille et les processus de condensation sont principalement déterminés par le transport vertical d'humidité à cette échelle, et, par conséquent, les tendances correspondantes dépendent fortement de la taille de la maille du modèle. Enfin, une forte dépendance de la structure verticale des sources apparentes de chaleur et d'humidité par rapport au profil de référence de convection profonde est mise en évidence.

Riassunto

La presente ricerca analizza l'influsso che una maggiore risoluzione orizzontale e un processo di parametrizzazione della convezione hanno sulla simulazione delle precipitazioni per mezzo di un modello di previsione numerica (NWP). In particolare vengono considerati gli aspetti teorici, dell'osservazione e della modellizzazione in relazione a un modello numerico a mesoscala- β . Nei modelli di questa risoluzione le precipitazioni vengono formalmente divise in una componente convettiva non risolta a subscala e in una parte risolvibile dalla maglia del modello. È così necessario un appropriato metodo di parametrizzazione della componente non risolta. Il lavoro è suddiviso in tre parti distinte, ma in relazione tra di loro.

Nella prima parte viene analizzato in dettaglio il concetto dell'adattamento convettivo come processo di parametrizzazione della convezione. A questo punto viene fatto il presupposto fondamentale che esiste uno stato di quasi-equilibrio della struttura termodinamica dell'atmosfera, cioè lo stato dell'atmosfera adattato convettivamente, che può essere rappresentato da un cosiddetto profilo di referenza di convezione profonda. Viene poi analizzata la struttura termodinamica dell'atmosfera in relazione con la convezione estiva in condizioni continentali a medie latitudini, con l'aiuto di una serie di radiosondaggi della stazione aerologica svizzera di Payerne e verificata la relazione con la procedura di adattamento proposta da Betts (1986), la quale essenzialmente si basa su dati rilevati nei tropici. Sull'esempio dei dati di Payerne si è potuto dimostrare che, quando viene usata una serie adeguata di valori derivati da osservazioni per i parametri variabili, il profilo di referenza di convezione profonda secondo Betts caratterizza bene l'atmosfera extra-tropicale, continentale e adattata convettivamente. Paragonato al profilo di referenza determinato da Betts e Miller (1986), l'andamento della temperatura derivato dalla serie di dati a disposizione è risultato di labilità satura al di sotto dell'isoterma di zero gradi. Inoltre l'andamento dell'umidità presenta alcune particolarità di importanza fisica. Considerando queste caratteristiche, i profili di referenza a disposizione per le simulazioni numeriche non sembrano soddisfare completamente. Viene inoltre mostrato che la procedura di aggiustamento per la parametrizzazione della convezione differisce fundamentalmente dall'approccio alternativo con il cosiddetto flusso di massa. In generale non esiste nessun flusso di massa che può produrre un trasporto verticale di calore e umidità dello stesso tenore ed è pure impossibile determinare i tassi di condensazione provocati dall'adattamento della convezione.

Nella seconda parte viene analizzata sistematicamente la dipendenza della simulazione delle precipitazioni dalla distanza orizzontale dei punti di griglia, dalle specificazioni del profilo di referenza per la convezione profonda e dal tempo di adattamento. La distanza originale dei punti di griglia (60km) di un modello idrostatico a mesoscala- α ad area limitata già esistente viene ridotta progressivamente di un fattore due e poi di quattro. Viene così mostrato che la versione del modello a maglie ravvicinate può migliorare la simulazione degli eventi di precipitazione, soprattutto per quanto concerne la loro distribuzione spaziale e temporale. La possibilità del modello ad alta risoluzione di riprodurre in modo dettagliato i propulsori esterni, come per esempio l'orografia, è un fattore determinante. In situazioni meteorologiche convettive, i risultati delle simulazioni si sono dimostrati estremamente sensibili rispetto alla scelta della parametrizzazione della convezione, con la quantità e l'intensità delle precipitazioni in sistematico aumento con la riduzione della di-

stanza dei punti di griglia. Un primo motivo per l'aumento della produzione delle precipitazioni a livello della griglia può essere attribuito all'intensificazione della circolazione verticale a scala della griglia. Inoltre le precipitazioni convettive aumentano a causa dell'inevitabile riduzione del tempo di adattamento, anche se in generale i due contributi, a causa delle interazioni esistenti, non si sommano. La parametrizzazione della convezione si è dimostrata importante nell'ottica di un corretto inizio nel tempo degli eventi di precipitazione, oltre a mitigare la manifestazione di tempeste sui punti di griglia. I dati dei radar meteorologici vengono utilizzati per un primo paragone qualitativo della struttura dei campi di precipitazioni simulati e osservati. Una valutazione quantitativa dei risultati del modello viene invece fatta, oltre che con i dati dei radar, con i dati forniti dalle stazioni di rilevamento al suolo della rete automatica. Dato che due sistemi di rilevamento possono fornire risultati molto differenti tra di loro, per la verifica dei risultati del modello è perciò appropriato considerare entrambe le fonti di misure. L'esame della struttura orizzontale e lo sviluppo temporale delle componenti convettive a livello dei punti di griglia delle precipitazioni fornisce una preziosa visione del ciclo di vita degli eventi di precipitazione simulati.

Nella terza parte viene sviluppato uno strumento diagnostico che permette di analizzare in dettaglio i contributi all'evoluzione del modello dell'atmosfera di tutti i processi rappresentati nel modello. Il normale formalismo del bilancio del calore e dell'umidità, che spesso viene applicato negli studi diagnostici con dati misurati, viene adattato accuratamente alle equazioni di base generali del modello numerico di previsioni meteorologiche. Una difficoltà del particolare modello considerato consiste nel fatto che il tasso di condensazione non viene mai esplicitamente calcolato. La condensazione viene trattata come un processo interno, in quanto le grandezze termodinamiche e di umidità sono rappresentate dall'entalpia e dal contenuto totale di umidità specifica. Questi valori previsti vengono inseriti nelle equazioni della temperatura e dell'umidità specifica, nelle quali il tasso di condensazione appare come residuo. La diagnosi di un evento di precipitazioni convettive simulate mostra una predominanza della tendenza convettiva negli stadi iniziali dello sviluppo. Nello stadio di pieno sviluppo, i processi di precipitazione a livello dei punti di griglia e la condensazione forniscono gli impulsi più forti per l'evoluzione dell'atmosfera modellata. Dal momento che la procedura di adattamento convettivo considera solo le proprietà statiche dell'atmosfera, l'amplitudine delle sorgenti termiche dipende essenzialmente dai tempi di adattamento stabiliti. La condensazione e le precipitazioni a livello dei punti di griglia vengono invece per lo più determinati dal trasporto verticale di umidità, per cui la prevalente dipendenza delle tendenze segue la distanza dei punti di griglia. Inoltre è dimostrato che la struttura verticale delle sorgenti di calore e di umidità dipende fortemente dai profili di referenza scelti per la convezione profonda.