

Commission internationale de l'Hydrologie du bassin du Rhin

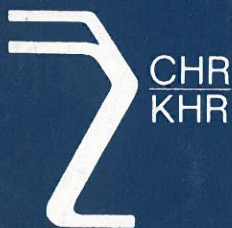
Internationale Kommission für die Hydrologie des Rheingebietes

Prévisions objectives et quantitatives
des précipitations dans le bassin du
Rhin.

Etat de la question en 1982

Objektive, quantitative Niederschlags-
vorhersagen im Rheingebiet.
Stand 1982

D. Grebner



rapport no. 1-1 de la CHR
Bericht Nr. 1-1 der KHR

Commission internationale de l'Hydrologie du bassin du Rhin

Internationale Kommission für die Hydrologie des Rheingebietes

Prévisions objectives et quantitatives
des précipitations dans le bassin du
Rhin.

Etat de la question en 1982

Objektive, quantitative Niederschlags-
vorhersagen im Rheingebiet.

Stand 1982

D. Grebner
Versuchsanstalt für
Wasserbau, Hydrologie
und Glaziologie
ETH-Zürich



Secretariaat CHR | KHR
Hoofthoofdskade 1

Postbus 20907
2500 EX 's-Gravenhage
Pays-Bas | Niederlande

rapport no. I-1 de la CHR
Bericht Nr. I-1 der KHR

langue originale: allemand
Originalsprache: Deutsch

© 1982, CHR/KHR

PRÉFACE

La Décennie Hydrologique Internationale (DHI/IHD), conduite par l'UNESCO au cours des années 1965 à 1974, comptait parmi les objectifs principaux de son programme, celui d'améliorer la coopération internationale à l'échelle régionale, dans le domaine de l'hydrologie. Les Etats riverains du Rhin se sont groupés dans le cadre de ce programme, comme d'autres Etats l'ont fait dans d'autres régions, et ils ont fondé ensemble en 1970 la «Commission internationale de l'Hydrologie du bassin du Rhin» (CHR/KHR). Le Gouvernement des Pays-Bas s'est acquis la gratitude de ses partenaires en mettant à leur disposition un secrétariat permanent, chargé de la conduite des travaux. Aux côtés des Pays-Bas, la République fédérale d'Allemagne, la France, l'Autriche et la Suisse collaborent aux travaux de la CHR. Le premier résultat concret de cette activité a été la publication en 1978 d'une «Monographie hydrologique», ouvrage monumental décrivant les aspects géographiques et hydrologiques du bassin du Rhin, au travers d'un texte richement illustré, accompagné de cartes et de diagrammes sous forme d'atlas. Les données hydrologiques les plus importantes, provenant de stations de mesure sélectionnées, sont présentées dans un volume annexé, sous forme de tableaux. La «Monographie» se veut un inventaire de tout ce qui a trait à l'hydrologie dans le bassin du Rhin.

Lors de sa réunion plénière à Boppard (RFA) en 1978, la Commission a pris la décision de poursuivre la coopération sur la base de cet inventaire. Elle désire se consacrer à des questions pratiques importantes et par dessus tout à l'amélioration des échanges d'information et de données au travers des frontières entre Etats. Un des projets mis sur pied dans ce sens est dédié aux problèmes liés à la prévision hydrologique et comprend les projets partiels suivants:

- prévisions opérationnelles des niveaux d'eau et des débits
- étude des rapports coûts-bénéfices des prévisions des étiages
- prévisions quantitatives des précipitations.

Un «groupe de contact» a été constitué en vue de l'exécution de ces tâches et un rapporteur a été désigné pour s'occuper de la question des prévisions quantitatives des précipitations. Depuis assez longtemps déjà, des modèles hydrologiques sont mis en œuvre pour la prévision des niveaux d'eau et des débits dans le bassin du Rhin. La plupart de ces modèles utilisent comme données d'entrée des valeurs de précipitation, ainsi que des valeurs de niveau et de débit relevées à des stations limnimétriques situées en amont.

Au moment où une prévision doit être établie, les données d'entrée nécessaires sont demandées par le sys-

VORWORT

Im Rahmen der in den Jahren 1965 bis 1974 von der UNESCO durchgeführten Internationalen Hydrologischen Dekade (IHD) galt einer der Schwerpunkte des Programms der Verbesserung der regionalen internationalen Zusammenarbeit auf dem Gebiet der Hydrologie. Wie in anderen Regionen haben sich in diesem Programm auch die Rheinanliegerstaaten zusammengefunden und im Jahre 1970 die »internationale Kommission für die Hydrologie des Rheingebiets« (CHR/KHR) gegründet. Dabei stellte die niederländische Regierung dankenswerterweise ein ständiges Sekretariat für die Durchführung der Arbeiten zur Verfügung. Neben den Niederlanden arbeiten in der KHR die Bundesrepublik Deutschland, Frankreich, Österreich und die Schweiz mit. Als erstes Arbeitsergebnis veröffentlichte die KHR im Jahre 1978 eine umfangreiche hydrologische Monographie, in der die geographischen und hydrologischen Verhältnisse im Rheingebiet in einem Kartenwerk und einem Textteil dargestellt sind. Die wichtigsten hydrologischen Daten von ausgewählten Meßstellen sind in einem der Monographie beigelegten Tabellenteil aufgeführt. Die Monographie versteht sich als Inventar.

Auf ihrer Plenarsitzung im Jahre 1978 in Boppard/Bundesrepublik Deutschland hat die KHR die Fortsetzung der Zusammenarbeit auf der Grundlage dieses Inventars beschlossen. Dabei will sie sich wichtigen praktischen Fragen widmen, um vor allem den Informations- und Datenaustausch über die Landesgrenzen hinweg zu verbessern. Eines der Projekte widmet sich dem Problemkreis der hydrologischen Vorhersagen mit den Teilprojekten:

- operationelle Wasserstands- und Abflußvorhersage
- Kosten-Nutzen Analyse von Niedrigwasservorhersagen
- quantitative Niederschlagsvorhersagen

Für diese Arbeiten wurde eine Kontaktgruppe eingerichtet, sowie ein Rapporteur zur Frage der quantitativen Niederschlagsvorhersagen benannt. Hydrologische Modelle zur Vorhersage des Wasserstandes und des Abflusses sind im Rheingebiet schon seit längerer Zeit im Einsatz. Die meisten dieser Modelle verwenden als Eingabedaten Niederschlagswerte, sowie Wasserstands- und Abflußwerte von im Oberlauf gelegenen Pegeln.

Zum Vorhersagezeitpunkt werden die benötigten Eingangsdaten eingeholt. Diese sind meist schon einige

tème. Celles-ci sont la plupart du temps déjà vieilles de quelques heures quand elles entrent dans le processus de calcul de la prévision. Il est bien connu que plus le laps de temps couvert par la prévision est court, plus exactes sont les prévisions. Une perte d'information est liée à la perte de temps que constitue la recherche des données. En outre, la plupart des modèles mathématiques sont conçus de façon à ce que les précipitations, qui interviendraient à partir du moment où s'établit la prévision, ne soient plus prises en considération. Jusqu'à ces derniers temps, les services météorologiques n'étaient pas en mesure d'établir des prévisions quantitatives des précipitations. A défaut de telles prévisions, il est préférable d'admettre que les dernières averses se poursuivent ou alors que la valeur moyenne des précipitations observées au cours du dernier intervalle de prévision est encore valable pour le suivant, plutôt que de supposer l'arrêt des précipitations à l'instant même où l'on établit la prévision. De telles valeurs moyennes de précipitations doivent alors être introduites dans le calcul prévisionnel. Confrontés à cette absence de prévisions quantitatives des précipitations, certains centres de prévision hydrologique se sont occupés eux-mêmes du problème et ont mis au point des modèles mathématiques simples qui, pour la plupart, décrivent les relations, établies par régression, qui peuvent exister entre les précipitations tombant dans le bassin versant et d'autres variables météorologiques mesurées aux stations synoptiques lointaines. Les prévisions quantitatives des précipitations ainsi établies ont occasionnellement pu trouver accès aux modèles de prévisions hydrologiques.

Entre-temps, des développements techniques nouveaux ont vu le jour et les services météorologiques ont maintenant à leur disposition de plus puissants ordinateurs, leur permettant de construire de grands modèles mathématiques de l'atmosphère, englobant généralement tout l'hémisphère nord. Avec ces modèles, des prévisions quantitatives des précipitations sont aujourd'hui possibles. Cependant la largeur des mailles qu'utilisent ces modèles est trop vaste pour permettre d'obtenir une précision suffisante pour les besoins de l'hydrologie. Néanmoins, la possibilité de pouvoir utiliser ces prévisions quantitatives représente un progrès considérable par rapport aux méthodes appliquées jusqu'ici, et il faut espérer qu'au cours du temps le maillage des modèles atteindra une densité satisfaisante et que les prévisions parviendront à une plus grande précision.

Le compte rendu préparé par le rapporteur de la CHR et qui vous est présenté ici, donne une vue d'ensemble des possibilités actuelles en matière de prévision des précipitations.

Le présent rapport est le premier d'une série de publications de la CHR (série I). Outre les publications officielles de la CHR, une deuxième série de rapports sera publiée sous l'égide de la CHR (série II).

PDoz. Dr. H. -J. Liebscher
Président de la CHR

Stunden alt, bevor sie in die Vorhersageberechnungen eingehen. Je kürzer der Vorhersagezeitraum ist, desto genauer sind bekanntlich die Vorhersagen. Mit dem Verlust der mit der Dateneinholung benötigten Zeit ist auch ein Informationsverlust verbunden. Ferner sind die meisten mathematischen Modelle so konzipiert, daß ab dem Vorhersagezeitraum fallende Niederschläge nicht mehr berücksichtigt werden. Die meteorologischen Dienste waren bis vor kurzem nicht in der Lage, quantitative Niederschlagsvorhersagen zu erstellen. Es ist bei Ermangelung quantitativer Niederschlagsvorhersagen möglicherweise besser, statt von der Annahme, daß ab dem Vorhersagezeitpunkt kein Niederschlag mehr fällt, davon auszugehen, daß der letzte Niederschlag oder der mittlere Niederschlag der letzten Vorhersageintervalle sich über den Zeitpunkt des Beginns der Vorhersagerechnung fortsetzt. Diese Werte sind in die Vorhersageberechnung mit einzubeziehen. In Ermangelung quantitativer Niederschlagsvorhersagen haben sich in einigen Fällen hydrologische Vorhersagezentralen mit quantitativen Niederschlagsvorhersagen befaßt und kleinere mathematische Modelle aufgestellt, die meist die Zusammenhänge zwischen Niederschlagswerten im Einzugsgebiet des Vorhersagepegels und anderen meteorologischen Meßwerten weit abgelegener synoptischer Stationen durch Regressionsbeziehungen beschreiben. Die mit diesen relativ einfachen Modellansätzen ermittelten quantitativen Niederschlagsvorhersagen fanden vereinzelt Eingang in die hydrologischen Vorhersagemodelle.

In der Zwischenzeit ist die Entwicklung weitergegangen und die Verfügbarkeit größter Rechenanlagen hat die meteorologischen Dienste in die Lage versetzt, große, meist die gesamte nördliche Hemisphäre umspannende mathematische Modelle aufzustellen. Mit diesen Modellen sind heute quantitative Niederschlagsvorhersagen möglich. Die Maschenweite dieser Modelle ist jedoch zu weit, um mit ihnen für hydrologische Zwecke befriedigend genaue quantitative Niederschlagsvorhersagen zu erhalten. Trotzdem stellt die Möglichkeit der Heranziehung dieser Vorhersagen gegenüber dem bisher praktizierten Methoden einen wesentlichen Fortschritt dar und es bleibt zu hoffen, daß im Laufe der Zeit die Maschenweite der Modelle eine befriedigende Dichte und die Vorhersage eine größere Genauigkeit erhält.

Der von dem KHR-Rapporteur über »quantitative Niederschlagsvorhersagen« erarbeitete Bericht gibt einen Überblick über die augenblicklichen Möglichkeiten der Vorhersagen von Niederschlägen.

Der vorliegende Bericht eröffnet eine Reihe (I) von KHR-Veröffentlichungen. Neben den offiziellen KHR-Veröffentlichungen wird eine zweite Reihe (II) von Berichten unter der Schirmherrschaft der KHR veröffentlicht.

PDoz. Dr. H. -J. Liebscher
Vorsitzender der KHR

TABLE DES MATIÈRES

Préface

1.	Introduction	5
2.	Processus de formation des précipitations	7
2.1	Formation des précipitations dans l'atmosphère	7
2.2	Modélisation des processus de formation des précipitations	8
2.2.1	Modèles statistiques synoptiques	8
2.2.2	Modèles dynamiques	10
2.2.3	Modèles statistiques dynamiques	14
3.	Répertoire des modèles	16
3.1	Modèles statistiques synoptiques	17
3.2	Modèles statistiques dynamiques	22
3.3	Modèles dynamiques	23
3.4	Indices de convection	31
3.5	Prévisions quant à la nature physique des précipitations	32
4.	Des prévisions et comparaisons entre modèles	33
5.	Développement futur des prévisions quantitatives de précipitations	37
6.	Recommandations	40
7.	Résumé (français, allemand, néerlandais, anglais)	42
	Bibliographie	45

INHALT

Vorwort

1.	Einleitung	5
2.	Niederschlagsprozeß	7
2.1	Niederschlagsprozeß in der Atmosphäre	7
2.2	Niederschlagsprozeß im Modell	8
2.2.1	Synoptisch-statistische Modelle	8
2.2.2	Dynamische Modelle	10
2.2.3	Dynamisch-statistische Modelle	14
3.	Verzeichnis der Modelle	16
3.1	Synoptisch-statistische Modelle	17
3.2	Dynamisch-statistische Modelle	22
3.3	Dynamische Modelle	23
3.4	Konvektionsindizes	31
3.5	Aggregatzustand von vorhergesagten Niederschlägen	32
4.	Verifikation, »Intercomparison«	33
5.	Künftige Entwicklung in der quantitativen Niederschlagsvorhersage	37
6.	Empfehlungen	40
7.	Zusammenfassung (französisch, deutsch, niederländisch, englisch)	42
	Literaturverzeichnis	45

1. INTRODUCTION

Dans le présent rapport, on a cherché à donner un aperçu sur l'état des procédés permettant d'établir des prévisions quantitatives concernant les précipitations. Une enquête par questionnaires de la Commission pour les Sciences de l'Atmosphère de l'OMM (CSA) effectuée en 1976 a eu le même but. Le résultat de cette enquête est résumé dans un rapport de l'OMM – «Operational Models of Quantitative Precipitation Forecasts for Hydrological Purposes and Possibilities of an Intercomparison» [BELLOCQ, 1980].

Les précieuses informations du rapport de l'OMM ont été reprises et complétées. Des procédés qui ne sont pas ou qui ne sont plus utilisés, mais qui peuvent constituer des solutions tout à fait praticables pour prévoir quantitativement des précipitations sont aussi discutés [FULKS, 1935; LETTAU, 1948; KUHN, 1953; WILSON, 1961; HARLEY, 1963; SCHÄFER, 1965; FRANKE et SIEBER, 1968]. On s'est toutefois limité à quelques exemples, le but étant de donner un aperçu du grand nombre de procédés, de procédés partiels et de propositions de procédés.

La bibliographie a été limitée aussi en ce sens que, d'une part, les modèles n'y figurent qu'avec une seule référence et que, d'autre part, on a renoncé dans toute la mesure du possible à répéter des informations contenues dans les publications existantes.

La récapitulation des modèles dans le chapitre 3 est précédée d'une courte description, dans le chapitre 2, de leur structure et de leurs propriétés. Ainsi, sont données, pour autant que cela soit nécessaire, outre les caractéristiques des modèles, en style télégraphique (chap. 3), une information supplémentaire sur les possibilités, actuelles et futures, en matière de prévisions quantitatives des précipitations. Peut-être cela servira-t-il aussi lors du rapprochement nécessaire entre l'offre possible de la météorologie et la demande de l'hydrologie [ROTH, 1979, remarques finales].

Les méthodes de prévisions quantitatives des précipitations à l'aide d'observations par satellites ou de sondages par radar prennent une position spéciale parmi les autres procédés car elles sont soumises à d'importantes restrictions (installations techniques, durée de la période de prévisions, portée du radar, signification de la relation entre l'information fournie par l'image, le signal et la quantité de précipitation, etc.) Pour ces raisons, elles ne figurent donc pas dans les descriptions qui suivent. Il faut constater aussi que ces méthodes ne sont pas contenues dans les réponses aux questionnaires de l'OMM [BELLOCQ, 1980, annexe III, pp. 1...40]. Des méthodes destinées à déterminer les indices d'instabilité qui servent à prévoir des précipitations convectives et dont les indications représentent en premier lieu une

1. EINLEITUNG

Im vorliegenden Bericht wird angestrebt, einen Überblick über den Stand der Verfahren für quantitative Niederschlagsvorhersagen zu geben. Dem gleichen Ziel diene eine Fragebogenaktion der »Commission for Atmospheric Sciences« der WMO (CAS) aus dem Jahr 1976. Das Ergebnis dieser Aktion ist in einem Bericht der WMO – »Operational Models of Quantitative Precipitation Forecasts for Hydrological Purposes and Possibilities of an Intercomparison« – [BELLOCQ, 1980] zusammengefaßt.

Die wertvollen Informationen des WMO-Berichtes werden übernommen und ergänzt. Dabei kommen auch Verfahren zur Sprache, die zwar nicht oder nicht mehr angewendet werden, aber durchaus praktikable Lösungen zur quantitativen Niederschlagsvorhersage darstellen können [FULKS, 1935; LETTAU, 1948; KUHN, 1953; WILSON, 1961; HARLEY, 1963; SCHÄFER, 1965; FRANKE und SIEBER, 1968]. Die Anzahl ihrer Beispiele ist jedoch gering gehalten. Sie sollen vor allem als Hinweis auf eine Vielzahl ähnlicher Verfahren, Verfahrensteile und Verfahrensvorschläge dienen.

Das Literaturverzeichnis wurde ebenfalls begrenzt gehalten indem einerseits Modelle nur mit einer Angabe erscheinen und andererseits indem auf die Wiederholung von bereits in den Artikeln vorhandenen Literaturangaben möglichst verzichtet wurde.

Der Zusammenstellung der Modelle in Kapitel 3 geht mit Kapitel 2 eine kurze Beschreibung über Aufbau und Eigenschaften voran. Damit besteht, sofern nötig, neben der stichwortartigen Modellcharakteristik (Kap. 3) eine zusätzliche Information über die gegenwärtigen und kommenden, prinzipiellen Möglichkeiten bei der quantitativen Niederschlagsvorhersage. Vielleicht hilft dies auch bei der notwendigen Annäherung zwischen möglichem Angebot der Meteorologie und Nachfrage der Hydrologie [ROTH, 1979, Schlußbemerkungen].

Methoden zur quantitativen Niederschlagsvorhersage mit Hilfe von Satellitenaufnahmen oder Radar-sondierungen nehmen unter den übrigen Verfahren eine Sonderstellung ein, da sie u. a. wesentlichen Einschränkungen unterliegen (technische Einrichtung, Länge der Vorhersageperiode, Reichweite des Radars, Signifikanz der Beziehung zwischen Bildinformation bzw. Signal und Niederschlagsmenge, usw.). Sie wurden deshalb in die folgenden Beschreibungen nicht aufgenommen. Es ist festzustellen, daß diese Methoden auch in den beantworteten Fragebogen der WMO nicht enthalten sind [BELLOCQ, 1980, Anlage III, Seiten 1...40]. Methoden zur Bestimmung von Labilitätsindizes, die zur Vorhersage von konvektiven Niederschlägen dienen und deren Aussagen in erster Linie eine »Ja-Nein-Ent-

«décision par oui ou par non», mais qui dans des conditions déterminées, peuvent aussi être quantifiées d'une manière plus subtile, ne sont mentionnées dans le chapitre 3 qu'à titre de complément. Ces méthodes n'apparaissent pas non plus dans les réponses aux questionnaires de l'OMM [BELLOCQ, 1980, annexe III, pp. 1...40].

Dans ce document l'intérêt se portait vers des méthodes qui sont applicables aussi universellement que possible, qui permettent des prévisions à courte échéance, c'est-à-dire de 1 à 4 jours environ et qui sont utilisées ou peuvent l'être dans la région du bassin versant du Rhin. Elles peuvent être classées dans les 3 catégories suivantes: modèles statistiques synoptiques; modèles dynamiques; modèles statistiques dynamiques [cf. BELLOCQ, 1980, annexe I, p. 9]. Le procédé mentionné dans le rapport de l'OMM sous la désignation de «dynamique-synoptique» n'a pas été repris ici. Il est cependant appliqué d'une manière opérationnelle pour la prévision des débits à court terme du Rhin à Rheinfelden et livre des résultats qui ne sont pas plus mauvais que ceux donnés par des méthodes complètement objectives [VAW, 1979]. Mais le procédé n'est pas totalement objectif, c'est-à-dire que son application dépend de la personne qui l'utilise; il sort donc du cadre des procédés universellement applicables.

Pour caractériser les modèles, il faut encore définir deux notions, les termes entre parenthèses étant ceux utilisés dans [BELLOCQ, 1980]:

- Portée de la prévision («validity of forecasts»): Intervalle de temps pour lequel la quantité de précipitations est prévue, exprimé en heures; on commence de compter les heures au moment où les données les plus récentes sont disponibles.
- Sous-périodes («period covered»): Subdivision de la portée de la prévision en intervalles de temps plus courts, par exemple 6 ou 12 heures, pour chacun desquels la somme des précipitations est prévue.

scheidung» darstellen, unter bestimmten Bedingungen aber auch feiner quantifizierbar sind, werden in Kapitel 3 nur als Ergänzung erwähnt. Diese Methoden erscheinen ebenfalls nicht in den beantworteten Fragebogen der WMO [BELLOCQ, 1980, Anlage III, Seiten 1...40].

Im Mittelpunkt des Interesses standen Methoden, die möglichst universell anwendbar sind, die Vorhersagen im Kurzfristbereich, d.h. für 1 bis etwa 4 Tage liefern, und die im Bereich des Rheineinzugsgebietes eingesetzt werden oder werden können. Sie lassen sich folgenden drei Kategorien zuordnen: synoptisch-statistische Modelle; dynamische Modelle; dynamisch-statistische Modelle [siehe auch BELLOCQ, 1980, Anlage, Seite 9]. Das im Bericht der WMO unter der Bezeichnung »synoptisch-dynamisch« geführte Verfahren wird hier nicht übernommen. Es steht zwar für die kurzfristigen Abflußprognosen für den Rhein bei Rheinfelden im operationellen Einsatz und liefert brauchbare, den rein objektiven Methoden nicht unterlegene Ergebnisse [VAW, 1979]. Das Verfahren ist aber nicht geschlossen objektiv, d.h. es ist in der Ausführung personenbezogen und fällt somit nicht in den Rahmen der universellen Anwendbarkeit.

Für die Charakterisierung der Modelle sind noch zwei Begriffe zu definieren, in den Klammern stehen die in [BELLOCQ, 1980] verwendeten Ausdrücke:

- Gültigkeitsdauer («validity of forecasts»): Zeitraum, für den Niederschlag quantitativ vorhergesagt wird, ausgedrückt in Stunden; die Zählung der Stunden beginnt mit dem Zeitpunkt, von dem die jüngsten Inputdaten stammen.
- Teilperiode («period covered»): Auflösung der Gültigkeitsdauer in kürzere Zeitabschnitte, z.B. 6 oder 12 Stunden, für welche die Niederschlagssumme vorhergesagt wird.

2. PROCESSUS DE FORMATION DES PRÉCIPITATIONS

2.1 Formation des précipitations dans l'atmosphère

L'apparition de précipitations au-dessus d'un endroit fixe ou dans une région est, principalement, une conséquence du mouvement de l'air et de sa vapeur d'eau. Si la direction du mouvement conduit un volume d'air déterminé dans une zone voisine dont la pression d'air diminue, la pression de ce volume s'adaptera d'une manière continue à celle de la zone. Le volume se dilate. Selon la loi de la conservation de l'énergie, ce phénomène enlève de la chaleur au volume et provoque ainsi un refroidissement continu de l'ensemble dudit volume, donc aussi de la vapeur d'eau qu'il transporte. Au cours de ce refroidissement, la température peut s'abaisser si fortement que la pression de vapeur qui règne correspond précisément à la pression de vapeur maximum possible à cette température (= pression de vapeur de saturation, «saturation vapor pressure»). Tout nouvel abaissement de la température provoque de la condensation, resp. de la sublimation dans le domaine des températures négatives. Ses conséquences visibles sont du brouillard, des nuages ou des précipitations.

La direction décrite du mouvement correspond à la composante verticale positive ($v_z > 0$) de la circulation d'air tridimensionnelle (v_x, v_y, v_z). Dans le cas d'une composante verticale négative ($v_z < 0$), c'est-à-dire d'une circulation dirigée vers une pression d'air supérieure, l'évolution va en sens inverse: dissipation du brouillard et des nuages ainsi que freinage de la formation de précipitations.

La répartition des causes des mouvements verticaux [ROTH, 1979] donne en même temps une indication sur la structure et la possibilité d'utilisation des modèles.

a) Cause d'origine dynamique: la composante verticale du mouvement tridimensionnel de la circulation d'air à grande échelle. En font partie tous les processus de mouvement qui sont représentés sur les cartes météorologiques journalières par les structures des circulations (régions de haute pression, régions de basse pression, fronts, etc.). L'ordre de grandeur¹⁾ typique des longueurs est de 1000 km (= «synoptic scale»). Les précipitations se produisent en général sur l'ensemble de grandes régions et sont réparties uniformément sur celles-ci. leur durée s'étend de plusieurs heures jusqu'au delà de plusieurs jours.

b) Cause d'origine thermique: la composante verticale

¹⁾ Par «ordre de grandeur» il faut entendre les longueurs comprises entre deux puissances de 10 consécutives.

2. NIEDERSCHLAGSPROZESS

2.1. Niederschlagsprozeß in der Atmosphäre

Die Erscheinung Niederschlag über einem festen Ort oder einem Gebiet ist im wesentlichen eine Folge der Bewegung der Luft und ihres Wasserdampfes. Führt die Bewegungsrichtung ein Luftvolumen in eine Umgebung mit abnehmendem Luftdruck, so wird sich der Druck des Volumens stetig der Umgebung angleichen. Das Volumen dehnt sich aus. Dieser Vorgang entzieht nach dem Energieerhaltungssatz dem Volumen Wärme und führt damit zur ständigen Abkühlung des gesamten Volumens, also auch des mitgeführten Wasserdampfes. Im Verlauf dieser Abkühlung kann die Temperatur soweit absinken, daß der herrschende Dampfdruck gerade dem bei dieser Temperatur maximal möglichen Dampfdruck (= Sättigungsdampfdruck, »saturation vapor pressure«) entspricht. Jeder weitere Temperaturrückgang führt zu Kondensation bzw. im Bereich negativer Temperatur zu Sublimation. Die sichtbaren Folgen sind Nebel, Wolken oder Niederschlag.

Die beschriebene Bewegungsrichtung wird durch die positive vertikale Komponente ($v_z > 0$) der dreidimensionalen Luftströmung (v_x, v_y, v_z) erfüllt. Im Fall einer negativen Vertikalkomponente ($v_z < 0$), d.h. einer zum höheren Luftdruck hin gerichteten Strömung kehren sich die Entwicklungen um: Auflösung von Nebel und Wolken und Hemmung der Niederschlagsbildung.

Die Gliederung der Ursachen der Vertikalbewegungen [ROTH, 1979] gibt gleichzeitig einen Hinweis auf den Aufbau und auf die Verwendbarkeit der Modelle:

a) Dynamisch bedingte Ursache: Vertikale Komponente des dreidimensionalen Verlaufs der großräumigen Luftströmung. Dazu gehören alle Bewegungsabläufe, welche durch die Bewegungsstrukturen in den täglichen Wetterkarten dargestellt werden (Hochdruckgebiete, Tiefdruckgebiete, Fronten usw.). Die typische Größenordnung¹⁾ der Länge beträgt 1000 km (= »synoptic scale«). Der Niederschlag tritt im allgemeinen über größeren Gebieten geschlossen und gleichmäßig auf. Seine Dauer reicht von mehreren Stunden bis über mehrere Tage.

b) Thermisch bedingte Ursache: Vertikalkomponente

¹⁾ Unter »Größenordnung« ist der Bereich von einer ganzzahligen Potenz von 10 bis zur nächsthöheren ganzzahligen Potenz von 10 zu verstehen.

du renversement convectif des masses d'air instables stratifiées. Les précipitations se produisent sous forme d'averses ou d'orages. L'extension d'une cellule convective (averse, orage) est de l'ordre de grandeur de 10 km; l'extension d'une zone dans laquelle des cellules convectives se produisent peut s'étendre jusqu'à 100 km.

- c) Cause d'origine orographique: le mouvement vertical forcé de l'air lors de son écoulement au-dessus d'élévations orographiques. L'ordre de grandeur de la zone de précipitation – généralement fermée – est comprise aussi entre 10 et 100 km.

Pour mieux comprendre les problèmes qui influencent le degré de puissance des modèles pour la prévision quantitative des précipitations, il faut encore mentionner ce qui suit:

- a) Les précipitations sont un phénomène qui, d'une part dépend de beaucoup de facteurs, tous d'importance plus ou moins égale, et qui d'autre part exerce à son tour une influence sur ceux-ci.
- b) Le mouvement vertical, qui est l'un des facteurs importants, n'est pas une grandeur mesurable. Il doit être remplacé ou calculé à l'aide de variables auxiliaires [cf. LETTAU, 1948; FRANKE et SIEBER, 1968; KUHN et QUIBY, 1976; RAGETTE, 1978 et 1979]. L'incertitude est importante dans chaque cas.
- c) Le taux de formation des précipitations diminue en principe avec l'accroissement de l'altitude, resp. avec l'abaissement de la température. Mais la diminution peut varier fortement à un moment bien déterminé ou à un pas de temps du calcul du modèle.
- d) Seule une partie de la vapeur d'eau condensée ou sublimée tombe sous forme de précipitations.
- e) En tombant, les précipitations peuvent s'évaporer ou sublimer à nouveau en partie ou totalement lorsqu'elles traversent des couches sèches.

2.2 Modélisation des processus de formation des précipitations

La description des équations utilisées dans les modèles pour les prévisions quantitatives de précipitations nécessite une répartition des modèles en divers types [cf. BELLOCQ, 1980, annexe I, p. 9].

2.2.1 Modèles statistiques synoptiques

La caractéristique principale de ces modèles-là est que le processus des précipitations n'y est pas simulé. On utilise, en revanche, le fait que des phénomènes météorologiques du futur, comme par exemple les précipi-

der konvektiven Umlagerung labil geschichteter Luftmassen. Niederschlag tritt in Schauern und Gewittern auf. Die Ausdehnung einer konvektiven Zelle (Schauer, Gewitter) liegt in der Größenordnung von 10 km; die Ausdehnung einer Zone, in der konvektive Zellen auftreten, liegt im Bereich von 100 km.

- c) Orographisch bedingte Ursache: Erzwungene Vertikalbewegung der Luft beim Überströmen orographischer Erhebungen. Die Größenordnung der meist geschlossenen Niederschlagszone liegt ebenfalls im Bereich von 10 bis 100 km.

Zum weiteren Verständnis der Probleme, die sich auf den Leistungsgrad der Modelle für quantitative Niederschlagsvorhersagen auswirken, sei noch folgendes erwähnt:

- a) Niederschlag ist eine Erscheinung, die von vielen, in ihrer Bedeutung ähnlichen Faktoren abhängt und auf diese Faktoren wieder zurückwirkt.
- b) Die Vertikalbewegung als einer der wichtigen Faktoren liegt nicht als Meßgröße vor. Sie muß durch Hilfsvariablen ersetzt oder berechnet werden [siehe LETTAU, 1948; FRANKE und SIEBER, 1968; KUHN und QUIBY, 1976; RAGETTE, 1979]. Die Unsicherheit ist in jedem Fall beträchtlich.
- c) Die Bildungsrate für Niederschlag nimmt grundsätzlich mit zunehmender Höhe, bzw. abnehmender Temperatur ab. Die Abnahme kann aber zu einem festen Zeitpunkt oder während eines Zeitschrittes der Modellrechnung erheblich variieren.
- d) Nur ein Teil des kondensierenden oder sublimierenden Wasserdampfes fällt als Niederschlag aus.
- e) Ausfallender Niederschlag kann auf seinem Weg durch trockene Schichten teilweise oder ganz wieder verdunsten.

2.2 Niederschlagsprozeß im Modell

Die Beschreibung der in den Modellen verwendeten Ansätze zur Vorhersage von Niederschlagsmengen legt eine Gliederung der Modelle nahe [siehe BELLOCQ, 1980, Anlage I, Seite 9].

2.2.1 Synoptisch-statistische Modelle

Charakteristisch dafür ist, daß der Niederschlagsprozeß nicht nachvollzogen wird. In den Modellen wird die Tatsache ausgenützt, daß künftige Wettererscheinungen, z.B. die Niederschlagsmengen, vom Zustand

tations, dépendent quantitativement de l'état de l'atmosphère, ainsi que des modifications de cet état, durant la période de temps précédant le démarrage du modèle. La dépendance peut être exprimée soit par des relations de régression [cf. BUELL, 1954; MOLLWO, 1961; COURVOISIER, 1970; ZAWADSKI et RO, 1978; ALTHERR, e.a., 1978; WMO, 1981], soit à l'aide d'une hypothèse de similitude [cf. WEHRY, 1968; DUBANT, 1970, 1980; HOLGATE, 1973; BELLOCQ, 1980, annexe III, p. 18; WMO, 1981]. Cette hypothèse consiste à admettre que deux cas indépendants l'un de l'autre, – qui sont semblables en se fondant sur des critères de comparaison déterminés – se développent de façon semblable et produisent des phénomènes météorologiques, semblables, par exemple des quantités de précipitations.

a) Modèles de régression

Avantages:

- Utilisables indifféremment, que les précipitations soient d'origine dynamique à grande échelle, thermique ou orographique;
- faibles exigences quant aux capacités des ordinateurs;
- brefs temps de calcul;
- en général, facilité de se procurer les données d'entrée;
- la portée de la prévision pouvant être choisie à volonté pour autant qu'une relation significative puisse être trouvée entre les prédicteurs (grandeurs mesurées) et les prédictees (grandeurs prévues);
- applicables aussi aux cartes de prévisions numériques (CPN).

Inconvénients:

- Limitation opérationnelle rapide de l'affinement du modèle, c'est-à-dire qu'une relation de régression utilisable peut déjà être obtenue à l'aide d'un petit nombre de variables faciles à obtenir, tout nouveau développement de la structure du modèle n'apportant en général que des améliorations de peu d'importance tout en exigeant un travail croissant rapidement pour se procurer les variables supplémentaires;
- limitation rapide de l'affinement, tenant au principe même du modèle, c'est-à-dire qu'un nombre élevé de classes de précipitations et un nombre élevé de variables conduisent à un nombre de possibilités qui, en raison de la taille réduite de l'échantillon, ne permet plus d'obtenir de relation significative; à cela s'ajoute l'influence croissante des erreurs de mesure ou l'absence de valeurs mesurées ainsi que la corrélation partielle dégressive entre d'autres variables et les quantités de précipitations;
- la dispersion reste grande;
- la portée de la prévision n'est pas divisible en sous-

der Atmosphäre oder von der Änderung des Zustandes in der Vorperiode bis zum Modellstart abhängen. Die Abhängigkeit kann entweder durch Regressionsbeziehungen [z.B. BUELL, 1954; MOLLWO, 1961; COURVOISIER, 1970; ZAWADSKI und RO, 1978; ALTHERR u.a., 1978; WMO, 1981] oder durch eine Ähnlichkeitshypothese [z.B. WEHRY, 1968; DUBANT, 1970, 1980; HOLGATE, 1973; BELLOCQ, 1980, Anlage III, Seite 18; WMO, 1981] ausgedrückt werden. Letztere besteht in der Annahme, daß sich zwei voneinander unabhängige Fälle, die sich aufgrund bestimmter Vergleichskriterien ähnlich sind, ähnlich weiterentwickeln und ähnliche Wettererscheinungen, z.B. Niederschlagsmengen, aufweisen.

a) Regressionsmodelle

Vorteile:

- Gleichmaßen anwendbar auf großräumig-dynamisch, thermisch und orographisch bedingte Niederschläge;
- geringe Ansprüche an Computerkapazitäten;
- kurze Rechenzeiten;
- meist einfache Beschaffung der Eingangsvariablen;
- Gültigkeitsdauer beliebig wählbar, sofern ein signifikanter Zusammenhang zwischen Prediktoren (gemessenen Größen) und Predictees (vorhergesagten Größen) gefunden werden kann;
- auch auf numerische Vorhersagekarten (NVK) anwendbar.

Nachteile:

- Rasche, operationelle Begrenzung der Modellverfeinerung, d.h. eine brauchbare Regressionsbeziehung kann bereits mit wenigen, gut erhältlichen Variablen erreicht werden, jeder weitere Modellausbau bringt i.a. nur geringfügige Verbesserungen bei gleichzeitig rasch zunehmendem Aufwand für die Beschaffung der zusätzlichen Variablen;
- rasche, prinzipielle Begrenzung der Modellverfeinerung, d.h. eine hohe Anzahl von Niederschlagsklassen und eine hohe Anzahl von Variablen führen zu einer Anzahl Möglichkeiten, die bei einer vergleichsweise kleinen Stichprobe keine signifikanten Beziehungen mehr zuläßt; hinzukommt der zunehmende Einfluß von Meßfehlern und von fehlenden Meßwerten sowie die abnehmende partielle Korrelation weiterer Variablen mit der Niederschlagsmenge;
- die Streuung bleibt groß;
- die Gültigkeitsdauer ist aufgrund der beschriebenen Begrenzungen mit den Prediktoren eines Ausgangszeitpunktes nicht in Teilperioden unterteil-

périodes étant donné les restrictions décrites en ce qui concerne les prédicteurs à disposition lors du commencement d'un calcul; c'est avant tout pour cette raison que les sommes de précipitations ne peuvent être données que pour 24 heures ou des plus longues durées;

- une répartition dans l'espace ne peut être obtenue qu'au moyen de plusieurs équations, chacune de celles-ci se rapportant à une partie d'une région;
- les équations dépendent de la saison.

b) Modèles de similitude

Avantages:

- Ils offrent une information directe sur la répartition spatiale des quantités de précipitations;
- principalement utilisables pour des précipitations d'origine dynamique à grande échelle;
- par le choix de plusieurs cas semblables dans la période de référence, il est possible d'établir une prévision sur la quantité probable de précipitations et l'intervalle de variation se rapportant spécialement à la situation considérée;
- chaque cas semblable choisi permet des déterminations quantitatives de précipitations à l'aide d'équations de régression, ce qui peut donner, en comparant le calcul et l'observation, des indications sur les propriétés particulières des cas considérés;
- applicables aussi aux cartes de prévisions numériques (CPN).

Inconvénients:

- Des problèmes se posent lors du choix des critères de similitude;
- à des situations initiales semblables ne s'ensuivent pas forcément des évolutions semblables [BÖTTGER, 1976];
- nécessitent l'emploi d'ordinateurs de grande capacité, grandes mémoires pour les cas de référence;
- peu indiqués pour des précipitations thermiques convectives;
- portée de la prévision pour un calcul, en général 24 ou 48 heures; une subdivision en intervalles inférieurs à 24 heures n'est pas rationnelle;
- les cas comportant de grandes quantités de précipitations ne sont pas traités de manière satisfaisante étant donné leur faible fréquence (cf. fig. 4), à moins que les procédés destinés à choisir n'aient été développés spécialement pour les cas extrêmes, sous forme de modèle à valeurs-seuils [WEHRY, 1968; HOLGATE, 1973].

2.2.2 *Modèles dynamiques*

Si l'on veut procéder ici à une classification, celle-ci doit être effectuée du point de vue des techniques de tra-

bar, vor allem deshalb sind die Niederschlagssummen nur für 24 Stunden oder längere Zeitschritte angebbar;

- eine räumliche Gleiderung läßt sich nur mit mehreren Gleichungen erreichen, wobei sich dann jede auf einen Teil eines Gebietes bezieht;
- die Gleichungen sind jahreszeitabhängig.

b) Ähnlichkeitsmodelle

Vorteile:

- Bieten direkte Information über die räumliche Verteilung der Niederschlagsmengen;
- hauptsächlich geeignet für großräumig-dynamisch bedingte Niederschläge;
- durch Auswahl mehrerer ähnlicher Fälle aus der Referenzperiode ist eine speziell auf die vorliegende Situation bezogene Aussage über die wahrscheinliche Niederschlagsmenge und die Variationsbreite möglich;
- jeder ausgewählte ähnliche Fall erlaubt quantitative Niederschlagsbestimmungen mit Hilfe von Regressionsgleichungen, dies kann durch Vergleich zwischen Rechnung und Beobachtung Hinweise auf besondere Eigenschaften der Fälle geben;
- auch auf die numerischen Vorhersagekarten (NVK) anwendbar.

Nachteile:

- Probleme bei der Festlegung der Ähnlichkeitskriterien;
- ähnlichen Ausgangszuständen folgen nicht notwendigerweise ähnliche Weiterentwicklungen [BÖTTGER, 1976];
- erhebliche Anforderungen an die Computeranlage, großes Speichervolumen für die Referenzfälle;
- geringe Eignung für thermisch konvektive Niederschläge;
- Gültigkeitsdauer für einen Ausgangstermin im allgemeinen 24 oder 48 Stunden, eine Unterteilung in Teilperioden von weniger als 24 Stunden ist nicht sinnvoll;
- Fälle mit großen Niederschlagsmengen werden wegen deren geringer Häufigkeit (siehe Abb. 4) schlecht erfaßt, es sei denn, die Auswahlverfahren sind speziell für Extremfälle in Form von Schwellenwert-Modellen entwickelt worden [WEHRY, 1968; HOLGATE, 1973].

2.2.2 *Dynamische Modelle*

Will man hier eine Unterteilung vornehmen, so ergibt sich diese aus der arbeitstechnischen Sicht. Trotz

vail. Malgré la puissance croissante des ordinateurs, on a utilisé jusqu'à dans les années 1960 à 1970 des méthodes conventionnelles de prévision. Il s'agit là de procédés de calcul qui, à partir d'un mouvement vertical approché, de la vapeur d'eau existante («precipitable water») et de l'advection thermique donnaient les quantités de précipitation pour une zone réduite située aux alentours de la station utilisée de radiosondes [WILSON, 1961]; ou bien il s'agit de procédés de calcul graphique utilisant les mêmes variables que celles indiquées ci-dessus. En se fondant sur traitement par champs des variables, ces procédés renseignent sur la quantité des précipitations y compris leur répartition dans l'espace [HARLEY, 1963] représentée aussi dans [SCHÄFER, 1965] avec des références à d'autres publications et [KUHN, 1953]. Tous ces modèles ont l'avantage de pouvoir être réalisés avec peu de données d'entrée et d'exiger l'emploi d'ordinateurs de puissance faible à moyenne seulement. Plus exactement, ils ont été développés en tant que procédés manuels. Comme inconvénients, il faut citer le fait qu'ils n'atteignent qu'une portée de la prévision de 24 heures au maximum, sans subdivision en sous-périodes ainsi que le fait qu'ils ne sont indiqués en général que pour des précipitations dues à des phénomènes dynamiques à grande échelle, ceci à cause des fortes simplifications physiques et mathématiques qu'ils impliquent.

Les concepts de base de ces procédés conventionnels sont aujourd'hui des éléments des modèles numériques dynamiques. Dans [RAGETTE, 1979] se trouve un aperçu chronologique de l'évolution allant des procédés manuels aux procédés numériques complexes.

Les modèles numériques dynamiques sont opérationnels depuis la fin des années cinquante – ils sont à vrai dire, encore «secs», c'est-à-dire sans les processus relatifs à la vapeur d'eau –, et ils ont été continuellement développés depuis. L'évolution consista en particulier à passer aussi au modèle «humide», car les conséquences physiques de la présence de vapeur d'eau atmosphérique jouent un rôle important dans les modèles numériques d'une portée de prévision de plusieurs jours. A cause de l'important travail de développement, comme aussi des grands besoins en données et en ordinateurs qu'ils nécessitent, ces modèles numériques dynamiques ont besoin du potentiel des grands services centraux météorologiques.

Dans les modèles numériques dynamiques, l'évolution des températures, celle des courants à grande échelle et celle de la répartition de l'humidité sont calculées à partir d'un état initial de l'atmosphère. Dans ce but, on utilise un système d'équations différentielles partielles, non linéaires, qui exprime la conservation des quantités de mouvement, de la masse et de l'énergie [cf. BURRIDGE et GADD, 1975; GERRETY Jr., 1978; COIFFIER e.a., 1979; EDELMANN, 1979]. De nombreux modèles tiennent déjà compte, au moins de manière rudimentaire ou à

zunehmender Leistungsfähigkeit der Computer wurden bis in die sechziger Jahre konventionelle Vorhersagemethoden angewendet. Dabei handelt es sich entweder um rechnerische Verfahren, die aus angenäherter Vertikalbewegung, dem vorhandenen Wasserdampf («precipitable water») und thermischer Advektion Niederschlagsmengen für eine begrenzte Umgebung der verwendeten Radiosondenstation liefern [WILSON, 1961]; oder es handelt sich um rechnerisch-graphische Verfahren mit ähnlichen Variablen wie oben. Diese Verfahren geben aufgrund ihrer feldmäßigen Bearbeitung der Variablen Auskunft über die Niederschlagsmenge einschließlich der räumlichen Verteilung [HARLEY, 1963]; auch dargestellt in [SCHÄFER, 1965] mit weiteren Literaturhinweisen und [KUHN, 1953]. All diese Modelle haben den Vorteil, daß sie mit wenig Input und geringen bis mäßigen Anforderungen an die Computerranlagen auskommen. Genauer, sie sind als manuelle Verfahren entwickelt worden. Als Nachteile sind zu erwähnen, daß sie nur eine Gültigkeitsdauer bis höchstens 24 Stunden, ohne Unterteilung in Teilperioden, erreichen, und daß sie wegen starker physikalischer und mathematischer Vereinfachungen im wesentlichen für großräumig dynamisch bedingte Niederschläge geeignet sind.

Die Konzepte dieser konventionellen Verfahren sind heute Bestandteile der dynamisch-numerischen Modelle. In [RAGETTE, 1979] ist ein chronologischer Überblick über die Entwicklung von den manuellen zu den komplexen numerischen Verfahren zu finden.

Die dynamisch-numerischen Modelle werden etwa seit Ende der fünfziger Jahre, – allerdings damals noch »trocken«, d.h. ohne Wasserdampfprozesse –, operationell betrieben und laufend ausgebaut. Der Ausbau galt insbesondere auch dem Übergang zum »feuchten« Modell, da die physikalischen Auswirkungen des atmosphärischen Wasserdampfes ein wesentliches Glied in numerischen Modellen mit mehrtägiger Gültigkeitsdauer sind. Wegen der aufwendigen Entwicklungsarbeit und wegen des großen Daten- und Computerbedarfs sind diese dynamisch-numerischen Modelle auf das Potential großer Wetterzentralämter angewiesen.

In den dynamisch-numerischen Modellen werden von einem Anfangszustand der Atmosphäre die Entwicklung von Temperatur, großräumiger Strömung und Feuchte berechnet. Man verwendet dazu ein System von partiellen, nichtlinearen Differentialgleichungen, das die Erhaltung von Impuls, Masse und Energie beschreibt [z.B. BURRIDGE und GADD, 1975; GERRETY Jr., 1978; COIFFIER u.a., 1979; EDELMANN, 1979]. In zahlreichen Modellen sind bereits auch Wärme- und Wasserhaushalt der Erdoberfläche und deren Koppelung

l'aide de relations statistiques, des bilans thermiques et hydriques de la surface terrestre et de leur interaction avec l'atmosphère, ainsi que de l'influence de l'orographie, des flux turbulents dans l'atmosphère resp. des frottements internes et externes, de même que des échanges de chaleur et d'humidité.

Le continuum espace-temps de l'atmosphère est remplacé dans la plupart des modèles par une grille espace-temps. Depuis 15 ans environ, on développe, en plus de ces modèles à points discrets, des modèles spectraux [SELA, 1980]. Horizontalement, l'atmosphère y est représentée par des séries harmoniques; verticalement, en revanche, on procède par surfaces discrètes comme dans le cas des modèles à points discrets. Les modèles à grande échelle simulent l'atmosphère d'un hémisphère jusqu'au voisinage de l'équateur [cf. BURRIDGE et GADD, 1975; COIFFIER e.a., LEPAS, e.a., 1979; EDELMANN, 1979] ou, de manière de plus en plus fréquente, l'atmosphère de l'ensemble du globe [BURRIDGE et HASELER, 1977; TIEDTKE, e.a., 1979; SELA, 1980]. La résolution horizontale de ces modèles à la latitude 60°N est comprise entre 100 et 380 km environ. La discrétisation verticale est réalisée à l'aide d'un nombre de surfaces allant de 3 [BENGSSON et MOEN, 1971] à 15 [BURRIDGE et HASELER, 1977]. Le pas de temps, qui dépend de la dimension des mailles, est compris entre 3 et 20 minutes. Actuellement la portée maximale des prévisions est de 168 h (= 7 jours) [BURRIDGE et HASELER, 1977; TIEDTKE e.a., 1979].

Les précipitations d'origine dynamique sont provoquées, lorsque, par suite du transport tridimensionnel d'humidité en un point de la grille, une sursaturation de la teneur en vapeur d'eau se produit. En chaque point de la grille, la quantité d'eau précipitée par condensation ou par sublimation doit être rendue égale à la sursaturation par rapport à la température initiale augmentée des apports dus à la chaleur latente de condensation, resp. de sublimation. Ce test de saturation commence aux points de la grille situés dans la surface la plus élevée, dans laquelle de l'humidité peut encore exister et est poursuivi en descendant graduellement. Si une précipitation du modèle traverse dans sa chute, une surface non saturée, alors elle s'évapore en partie ou entièrement selon le déficit de saturation qui correspond à la température résultante. La somme des quantités d'eau condensées ou sublimées résultant du passage à travers toutes les surfaces et durant plusieurs pas de temps est enfin attribuée à la surface du sol en tant que précipitation. Ce processus de précipitation repose sur les suppositions suivantes: la température de la vapeur d'eau et celle de l'air sont les mêmes; le processus de précipitation par pas de temps a lieu instantanément.

Pour simuler les précipitations d'origine thermique-convective, on teste en chaque point de la grille la stabilité statique de l'atmosphère du modèle. Dans ce but, on élève un volume d'air d'une surface à celle

mit der Atmosphäre, die Orographie, turbulente Flüsse in der Atmosphäre, bzw. innere und äußere Reibung sowie Quellen und Senken für Wärme und Feuchte zumindest ansatzweise oder durch statistische Beziehungen enthalten.

Das Raum-Zeit-Kontinuum der Atmosphäre wird bei den meisten Modellen durch ein Raum-Zeit-Gitter ersetzt. Seit ca. 15 Jahren entwickelt man neben diesen Gitterpunkt-Modellen auch spektrale Modelle [SELA, 1980]. Hier wird die Atmosphäre in der Horizontalen durch harmonische Reihen dargestellt; die vertikale Modellierung erfolgt jedoch, wie bei den Gitterpunkt-Modellen, durch diskrete Flächen. Die großräumigen Modelle bilden die Atmosphäre einer Hemisphäre bis in Äquatornähe [z.B. BURRIDGE und GADD, 1975; COIFFIER u.a., LEPAS u.a., 1979; EDELMANN, 1979] oder, in zunehmender Zahl, der gesamten Erde ab [BURRIDGE und HASELER, 1977; TIEDTKE u.a., 1979; SELA, 1980]. Die horizontale Auflösung in den verschiedenen Modellen liegt, bezogen auf 60°N , ungefähr zwischen 100 km und 380 km. Vertikal erfolgt die Diskretisierung durch 3 [BENGSSON und MOEN, 1972] bis 15 [BURRIDGE und HASELER, 1977; TIEDTKE u.a., 1979] Flächen. Der von der Maschenweite abhängige Zeitschritt beträgt zwischen 3 bis 20 Minuten. Gegenwärtig werden Vorhersagen bis auf 168 Stunden (= 7 Tage) hinaus gerechnet [BURRIDGE und HASELER, 1977; TIEDTKE u.a., 1979].

Dynamisch bedingter Niederschlag wird dabei erzeugt, wenn durch den dreidimensionalen Feuchtetransport an einem Gitterpunkt Übersättigung des Wasserdampfgehaltes entsteht. Es muß soviel Wasserdampf kondensieren oder sublimieren und als Niederschlag ausfallen, bis die Übersättigung bezüglich der Bilanztemperatur aus Gitterpunkttemperatur plus Zuschuß aus der Kondensations- bzw. Sublimationswärme abgebaut ist. Dieser Sättigungstest beginnt an den Gitterpunkten der obersten Fläche, in der noch Feuchtigkeit zugelassen ist und wird graduell nach unten fortgesetzt. Fällt ein Modellniederschlag durch eine ungesättigte Fläche, so wird er teilweise oder ganz verdunstet, je nach Sättigungsdefizit, das sich bei der entstehenden Bilanztemperatur ergibt. Die resultierende Summe der Kondensations- oder Sublimationsmenge über alle Flächen und mehrere Zeitschritte wird schließlich der Erdoberfläche als Niederschlag zugeordnet. Diesem Niederschlagsvorgang liegen folgende Annahmen zugrunde: die Temperatur des Wasserdampfes und der Luft sind gleich; der Niederschlagsprozeß pro Zeitschritt erfolgt zeitlos.

Zur Simulation des thermisch-konvektiv bedingten Niederschlages wird in jedem Gitterpunkt die statische Stabilität der Modellatmosphäre getestet. Zu diesem Zweck hebt man ein Luftvolumen von einer Fläche

située immédiatement au-dessus et on compare l'humidité qu'il a apportée et la température modifiée adiabatiquement avec l'état existant dans les nouveaux alentours. L'opération peut impliquer différents processus physiques. Pour qu'il se forme des précipitations, il faut qu'une saturation de la vapeur d'eau se produise dans le volume ascendant sous l'effet du refroidissement adiabatique, mais qu'en même temps sa température soit supérieure à celle des masses environnantes. Le test part des couches inférieures pour se poursuivre aux couches plus élevées. En cas d'équilibre instable, un certain échange a lieu entre la masse d'air ascendante (chaleur, humidité) et ses nouveaux environs qu'il faut simuler avant le test avec la paire de surfaces immédiatement supérieures («entrainment»). De même, il existe une liaison entre la convection et le courant à grande échelle. La somme de la vapeur d'eau condensée ou sublimée (multipliée par un facteur d'instabilité) de toutes les couches situées aux niveaux où la convection a lieu donne en définitive la quantité de précipitation (mm/pas de temps) d'origine thermique. Comme dans le cas à grande échelle, les précipitations qui tombent sont exposés à être évaporées au cours de leur chute. Mais, étant donné la caractère d'averse, l'évaporation doit être diminuée par un certain facteur.

Il est évident que la grandeur des mailles de la grille spatiale a une importance décisive quant à la précision des prévisions quantitatives des précipitations. Mais les possibilités d'affiner les modèles à grande échelle sont limitées par le temps de calcul d'ordinateur nécessaire. Ainsi une réduction de moitié des dimensions horizontales et verticales des mailles nécessite, sans autre modification du modèle, une masse de calculs 16 fois plus grande. De plus, une grille plus fine demande aussi une description plus détaillée des processus physiques et un réseau d'observation plus serré en ce qui concerne l'état initial. En outre, l'influence des erreurs de mesure augmente.

Comme la connaissance et la formulation des processus physiques ne constituent encore que le moindre des problèmes rencontrés, la mise en œuvre du modèle avec une maille beaucoup plus fine est effectuée en se limitant à une zone restreinte de l'hémisphère (fig. 2, fig. 3). De tels modèles emboîtés («nestling») ou «à rattachement local» sont décrits par exemple dans [BELLOCQ, 1980, annexe III, p. 39] pour des mailles mobiles, variant de 60 à 100 km, dans [KUHN et QUIBY, 1976] pour des mailles de 35 km, dans [BELL, 1978] pour des mailles de $3\frac{1}{3}$ km; consulter également [BURRIDGE et GADD, 1975], [COIFFIER e.a., LEPAS e.a., 1979] et [ETLING, 1981]. Les conditions de l'atmosphère aux limites des modèles emboîtés, variables dans le temps, sont fournies par un modèle à grande échelle.

Avantages des modèles dynamiques:

- Simulation des phénomènes vrais;

zur nächst höheren an und vergleicht seine mitgebrachte Feuchte und die adiabatisch geänderte Temperatur mit dem bestehenden Zustand in der neuen Umgebung. Der Ablauf kann in unterschiedlichen physikalischen Prozessen erfolgen. Für die Entstehung von Niederschlag ist wichtig, ob im angehobenen Volumen aufgrund seiner adiabatischen Abkühlung Wasserdampfsättigung eintritt und ob seine Temperatur höher ist als die der Umgebung. Der Test verläuft von den tieferen zu den höheren Schichten. Im labilen Fall findet vor dem Test mit dem nächst höheren Flächenpaar noch ein gewisser Luftmassenaustausch (Wärme, Feuchte) zwischen dem Volumen und seiner neuen Umgebung statt («entrainment»). Ebenso besteht eine Koppelung zwischen der Konvektion und der großräumigen Strömung. – Die Summe des kondensierten oder sublimierten Wasserdampfes, multipliziert mit einem Labilitätsfaktor, über alle Schichten im Höhenbereich der Konvektion liefert schließlich die thermisch bedingte Niederschlagsmenge (mm pro Zeitschritt). Der fallende Niederschlag ist, wie im großräumigen Falle, einer möglichen Verdunstung ausgesetzt. Sie wird aber angesichts des Schauercharakters mit einem Faktor gedämpft.

Es ist offensichtlich, für quantitative Niederschlagsvorhersagen besitzt die Maschenweite des räumlichen Gitters eine entscheidende Bedeutung. Einer Verfeinerung der großräumigen Modelle in dieser Hinsicht werden durch die Rechengeschwindigkeiten der Computer Grenzen gesetzt. Eine Halbierung der bestehenden horizontalen und vertikalen Maschenweiten hat beispielsweise, ohne sonstige Änderung des Modells, den 16-fachen Rechenaufwand zur Folge. Ein feineres Gitter verlangt aber auch eine feinere Beschreibung der physikalischen Prozesse und ein feineres Meßnetz für den Anfangszustand. Im weiteren gewinnen Meßfehler zunehmend an Bedeutung.

Da die Kenntnis und Formulierung der Physik noch die geringsten Probleme bieten, wird die Modellrechnung in zum Teil wesentlich engmaschigeren Gittern dadurch erreicht, daß man sich auf einen kleinen Teil der Hemisphäre beschränkt (Abb. 2, Abb. 3). Solche »Nestling«-Modelle oder »lokale Anschlußmodelle« sind beispielsweise beschrieben in [BELLOCQ, 1980, Anlage III, Seite 39] für ein mobiles Gitter mit variierender Maschenweite von 60 bis 100 km, in [KUHN und QUIBY, 1976] für eine Maschenweite von 35 km, in [BELL, 1978] für eine Maschenweite von $3\frac{1}{3}$ km; siehe auch [BURRIDGE und GADD, 1975], [COIFFIER u.a., LEPAS u.a., 1979] und [ETLING, 1981]. Die zeitlich veränderlichen Zustände der Atmosphäre am Rand dieser Modelle liefern im allgemeinen großräumige Modelle.

Vorteile der dynamischen Modelle:

- Simulation der wahren Vorgänge;

- possibilités de développement «presque» sans limites (concept physique, caractéristique de la grille, portée de la prévision), en fait les limites des modèles sont données par l'état de la technique (capacité des ordinateurs, réseau de mesures, précision des mesures, transmission des données, analyse des données) et de la science (physique);
 - sous-périodes inférieures à 1 jour (aujourd'hui par exemple 6 h ou 12 h);
 - indépendance de la fréquence statistique des quantités de précipitations (c'est-à-dire que de grandes quantités de précipitations sont aussi données comme valeurs discrètes et non comme éléments d'une très large classe);
 - indépendance du modèle par rapport à un bassin versant particulier, car généralement le modèle opère pour tout un hémisphère ou même pour le globe entier;
 - extension spatiale et quantité des précipitations à grande échelle souvent déjà très satisfaisantes;
 - prise en considération des trois causes de précipitations, y compris leurs interactions mutuelles.
- »fast« unbegrenzte Ausbaumöglichkeiten (Physik, Gitter, Gültigkeitsdauer), d.h. Grenzen der Modelle werden durch den technischen und wissenschaftlichen Stand abgesteckt (Computerkapazität, Meßnetze, Meßgenauigkeit, Datenübertragung, Datenanalyse, bzw. Physik);
 - Teilperioden kürzer als 1 Tag (heute z.B.: 6 Stunden oder 12 Stunden);
 - Unabhängigkeit von der statistischen Häufigkeit von Niederschlagsmengen, d.h. auch große Niederschlagsmengen werden als diskrete Werte und nicht als Element einer sehr breiten Klasse angegeben;
 - nicht auf einzelne Einzugsgebiete beschränkt, da im allgemeinen hemisphärisch oder global gerechnet wird;
 - räumliche Ausdehnung und Menge des großräumigen Niederschlages vielfach schon sehr zufriedenstellend;
 - Berücksichtigung aller drei Niederschlagsursachen, einschließlich ihrer Rückkoppelungen.

Inconvénients des modèles dynamiques:

- Exigences très grandes et croissant avec l'évolution des modèles, quant à la quantité et la précision des mesures et aussi à la qualité des transmissions et des moyens de calcul;
- espacement des précipitations ponctuelles (actuellement encore) trop grande et de ce fait mauvaise définition des limites des champs de précipitations de petite et moyenne étendue;
- champs de précipitations trop petits en raison des tendances systématiques à la contraction des zones de pression (par exemple des zones de basse pression), provoquées par le formalisme du calcul;
- simulation encore insuffisante des précipitations d'origine convective et orographique.

2.2.3 Modèles statistiques dynamiques

La séparation entre modèles statistiques synoptiques et modèles statistiques dynamiques n'est pas toujours univoque. Par conséquent, les appréciations des types de modèles peuvent être différentes. C'est ainsi par exemple que dans le rapport de l'OMM, le modèle 7 [BELLOCQ, 1980, publ. 1, annexe III, p. 18] est désigné comme étant du type statistique dynamique. Dans la description par contre, ce modèle procédant par similitude est classé plutôt dans la climatologie synoptique et donc dans la catégorie des modèles statistiques synoptiques.

Actuellement, la méthode statistique dynamique est surtout connue dans la littérature américaine sous le nom de «model output statistics» (MOS). [WMO, 1981, Part VI] On opère comme suit: à l'aide d'un modèle dynamique, on calcule des paramètres diagnostiques [cf.

Nachteile der dynamischen Modelle:

- Hohe, mit der Entwicklung der Modelle zunehmende Anforderungen an die Menge, Übertragung und Genauigkeit der Meßdaten sowie an die Rechenanlagen;
- Gitterpunkt-Niederschlag (gegenwärtig noch) zu weitmaschig und damit verschwommene Grenzen von mittleren bis kleineren Niederschlagsfeldern; zu kleine Niederschlagsfelder aufgrund von systematischen, verfahrenbedingten Schrumpfungstendenzen von Drucksystemen (z.B. von Tiefdruckgebieten);
- konvektiv und orographisch bedingte Niederschläge noch ungenügend simuliert.

2.2.3 Dynamisch-statistische Modelle

Die Trennung zwischen synoptisch-statistischen und dynamisch-statistischen Modellen ist nicht immer eindeutig. Entsprechend können auch Beurteilungen des Modelltyps unterschiedlich ausfallen. So wird beispielsweise im Bericht der WMO das Modell 7 [BELLOCQ, 1980, Anlage III, Seite 18] als dynamisch-statistisch bezeichnet. Die Beschreibung hingegen ordnet dieses Modell (Ähnlichkeitsverfahren) eher der synoptischen Klimatologie und damit der synoptisch-statistischen Kategorie zu.

Das dynamisch-statistische Verfahren ist heute vor allem in der amerikanischen Literatur, unter dem Namen »Modell Output Statistics« (MOS), bekannt, [WMO, 1981, Part VI]. Man beschreitet dabei folgenden Weg: Mit Hilfe eines dynamischen Modells werden diagnos-

annexe III, p. 1, p. 20, p. 28] qui sont en relation directe avec les précipitations, par exemple teneur en vapeur d'eau, «saturation-thickness», mouvement vertical. Mais le passage de ces paramètres à la quantité de précipitation durant un intervalle de temps déterminé est réalisé par des moyens statistiques.

Dans ce cadre, le paramètre central est évidemment le mouvement vertical. Une partie de la bibliographie très volumineuse consacrée à ce sujet se trouve dans les références mentionnées dans le présent rapport, par exemple dans les publications [LETTAU, 1948; FRANKE et SIEBER, 1968; KUHN et QUIBY, 1976; RAGETTE, 1979].

Avantage des modèles statistiques dynamiques:

- Ils utilisent et livrent des paramètres qui sont en relation plus étroite avec les quantités de précipitations que ceux des modèles statistiques synoptiques;
- la portée de la prévision correspondant en général à celle des modèles dynamiques;
- généralement bonne prévision sur l'extension dans l'espace des précipitations d'origine dynamique et orographique [cf. SANDERS et OLSON, 1967; KUHN et QUIBY, 1976];
- les procédés conviennent aussi comme modèles de rattachement locaux.

Inconvénients des modèles statistiques dynamiques:

- Ils ne peuvent être réalisés qu'en relation directe avec les modèles à grande échelle (avec advection de la vapeur d'eau), car la forme que nécessitent les données d'entrée ne correspond pas avec celle qui est diffusée normalement [cf. KUHN et QUIBY, 1976; BELLOCQ, 1980, annexe III, p. 28];
- importantes exigences imposées aux calculateurs électroniques;
- résultats moins utilisables lors de précipitations d'origine thermique;
- la relation entre le mouvement vertical sec et la quantité de précipitations présente une grande dispersion [KUHN et QUIBY, 1976; EDELMANN, 1976]; en voici les raisons: a) manque d'apport complémentaire au mouvement vertical du fait de l'instabilité latente libérée [SANDERS et OLSON, 1967], b) le mouvement vertical ne provoque pas la condensation dans chacune des couches superposées, c) absence de perte par évaporation des précipitations qui tombent;
- de fortes précipitations de faible fréquence ne peuvent être prévues d'une manière satisfaisante à l'aide du seul mouvement vertical.

1980, Anlage III, Seite 1, Seite 20, Seite 28] Parameter berechnet, die mit dem Niederschlag in direktem Zusammenhang stehen, z.B. Wasserdampfgehalt, Sättigungsdicke, Vertikalbewegung. Der Schritt von diesen Parametern zur Niederschlagsmenge während eines bestimmten Zeitabschnittes erfolgt aber dann mit statistischen Mitteln.

Der zentrale Parameter ist in diesem Zusammenhang offensichtlich die Vertikalbewegung. Ein Teil der sehr umfangreichen Literatur dazu ist in den Hinweisen der im vorliegenden Bericht erwähnten Literaturangaben zu finden, so z.B. in [LETTAU, 1948; FRANKE und SIEBER, 1968; KUHN und QUIBY, 1976; RAGETTE, 1978 und 1979].

Vorteile der dynamisch-statistischen Modelle:

- Es werden Parameter zugänglich gemacht und verwendet, die in engerer Beziehung zur Niederschlagsmenge stehen als die der synoptisch-statistischen Modelle;
- Gültigkeitsdauer im allgemeinen entsprechend derjenigen der dynamischen Modelle;
- meist gute Aussage über die räumliche Ausdehnung des dynamisch und orographisch bedingten Niederschlages [z.B. SANDERS und OLSON, 1967; KUHN und QUIBY, 1976];
- die Verfahren eignen sich als lokale Anschlußmodelle.

Nachteile der dynamisch-statistischen Modelle:

- Nur in direkter Verbindung mit den großräumigen Modellen (mit Wasserdampf-Advektion) durchführbar, da die Eingangsdaten in der benötigten Form nicht allgemein verfügbar sind [z.B. KUHN und QUIBY, 1976; BELLOCQ, 1980, Anlage III, Seite 28];
- erhebliche Ansprüche an die Computeranlagen;
- weniger brauchbare Ergebnisse bei thermisch bedingten Niederschlägen;
- die Beziehung zwischen trockener Vertikalbewegung und Niederschlagsmenge besitzt eine erhebliche Streuung [KUHN und QUIBY, 1976; EDELMANN, 1976]. Gründe dafür sind: a) fehlender Zuschuß zur Vertikalbewegung durch frei werdende latente Labilität [SANDERS und OLSON, 1967], b) Vertikalbewegung führt nicht in jeder Höschicht zur Kondensation, c) fehlender Verdunstungsverlust des ausfallenden Niederschlages;
- große Niederschlagsmengen mit geringer Häufigkeit werden anhand der Vertikalbewegung allein nicht befriedigend vorhergesagt.

3. RÉPERTOIRE DES MODÈLES

Dans ce chapitre seront brièvement caractérisés des modèles utilisés d'une manière opérationnelle dans la région du Rhin. En outre, on citera des modèles qui représentent d'intéressantes solutions à la prévision quantitative des précipitations, indépendamment du fait qu'ils soient en service ou non et concernent directement le bassin versant du Rhin ou pas. Le classement a lieu sous les formes déjà introduites: modèles statistiques synoptiques, statistiques dynamiques, et dynamiques. Comme quatrième groupe est ajoutée une liste de méthodes destinées à déterminer les indices de convection, de labilité et d'averses [cf. aussi BUELL, 1954; RUPRECHT, 1971; GANTER, 1971; KRECHETOV, 1977; ZAWADSKI, 1978; STEINACKER, 1978]. Il s'agit de procédés de prévision concernant l'apparition de précipitations dues à des causes thermiques, sans prévisions quantitatives. Mais au moyen de méthodes statistiques, on peut en tirer et développer des procédés statistiques, avant tout dans les régions orographiquement simples.

La manière suivante de caractériser les modèles exposée plus loin s'appuie sur celle adoptée dans le rapport de l'OMM [BELLOCQ, 1980, annexe I]. En se limitant aux modèles importants pour le Rhin, les modèles suivants parus dans le rapport de l'OMM ne seront pas cités davantage:

- 1) Annexe III, No. 1 (Australie)
- 2) Annexe III, No. 2 (Canada)
- 3) Annexe III, No. 4 (France)
 - n'est plus en service
- 4) Annexe III, No. 5 (Japon)
- 5) Annexe III, No. 6 (Japon)
- 6) Annexe III, No. 7 (RDA)
 - trop éloigné du bassin du Rhin
 - en tant que modèle statistique synoptique, son extension spatiale au Rhin reviendrait pratiquement à la construction d'un nouveau modèle
- 7) Annexe III, No. 9 (Suède)
 - trop éloigné du bassin du Rhin
- 8) Annexe III, No. 10 (Suisse)
 - non entièrement objectif, dépend de la personne qui l'applique
- 9) Annexe III, No. 13 (USA)
- 10) Annexe III, No. 14 (USA)
- 11) Annexe III, No. 15 (USA)

Notons encore qu'en laissant de côté les onze modèles énumérés ci-dessus, on n'omet aucun processus qui soit fondamentalement différent de ceux utilisés dans la liste de modèles qui va suivre. Cette liste représente donc l'état intégral actuel des possibilités offertes.

Les tableaux suivants (chap. 3.1; 3.2; 3.3) contiennent des modèles qui diffèrent pour la plupart de ceux

3. VERZEICHNIS DER MODELLE

In diesem Kapitel werden Modelle kurz charakterisiert, die im Bereich des Rheins operationell betrieben werden. Außerdem werden Modelle erwähnt, die interessante Lösungen zur quantitativen Niederschlagsvorhersage darstellen, unabhängig davon, ob sie in Betrieb sind oder unmittelbar das Rheineinzugsgebiet erfassen. Die Gliederung erfolgt in der bereits eingeführten Form: synoptisch-statistische, dynamisch-statistische, dynamische Modelle. Als vierte Gruppe schließt sich eine Zusammenstellung von Methoden zur Bestimmung von Konvektions-, Labilitäts- und Schauerindizes an [siehe dazu auch BUELL, 1954; RUPRECHT, 1971; GANTER, 1971; KRECHETOV, 1977; ZAWADSKI, 1978; STEINACKER, 1978]. Es handelt sich dabei um Vorhersageverfahren für das Auftreten von thermisch bedingten Niederschlägen ohne Mengenaussage. Mit statistischen Mitteln können aber daraus, vor allem in orographisch einfachen Gebieten, quantitative Verfahren entwickelt werden.

Die nachfolgende Modell-Charakterisierung erfolgt in Anlehnung an die Darstellungsform im Bericht der WMO [BELLOCQ, 1980, Anlage I]. Aufgrund der Beschränkung auf Modelle, die für den Rhein von Bedeutung sind, werden folgende im Bericht der WMO erschienene Modelle nicht weiter erwähnt.

- 1) Anlage III, Nr. 1 (Australien)
- 2) Anlage III, Nr. 2 (Canada)
- 3) Anlage III, Nr. 4 (Frankreich)
 - nicht mehr in Betrieb
- 4) Anlage III, Nr. 5 (Japan)
- 5) Anlage III, Nr. 6 (Japan)
- 6) Anlage III, Nr. 7 (DDR)
 - das Rheingebiet liegt außerhalb seiner Reichweite
 - als synoptisch-statistisches Modell würde seine räumliche Ausdehnung zum Rhein einem Modellneubau gleichkommen
- 7) Anlage III, Nr. 9 (Schweden)
 - das Rheingebiet liegt außerhalb seiner Reichweite
- 8) Anlage III, Nr. 10 (Schweiz)
 - nicht geschlossen objektiv, personenabhängig
- 9) Anlage III, Nr. 13 (USA)
- 10) Anlage III, Nr. 14 (USA)
- 11) Anlage III, Nr. 15 (USA)

Es sei noch erwähnt, daß durch die Vernachlässigung der elf Modelle kein Verfahren unterschlagen wird, das sich grundsätzlich von der nachfolgenden Zusammenstellung unterscheidet. Der Stand der Möglichkeiten wird somit uneingeschränkt wiedergegeben.

In den nachfolgenden Tabellen (Kap. 3.1; 3.2; 3.3) werden überwiegend andere Modelle beschrieben als in

décrits dans les tableaux de [BELLOCQ, 1980, annexe I, pp. 1...8]. Afin que les deux rapports puissent être utilisés de façon complémentaire, on a repris ici la même disposition des tableaux et la même terminologie anglaise que celles adoptées dans le rapport de l'OMM [BELLOCQ, 1980].

den Tabellen von [BELLOCQ, 1980, Anlage I, S. 1...8]. Damit beide Berichte in gegenseitig ergänzender Weise verwendet werden können, wurden außer der Tabellenform auch die englischen Stichworte von [BELLOCQ, 1980] übernommen.

Name of model	nom du modèle	Modell-Name
Period covered	sous-période	Teilperiode
Validity of forecasts	portée de la prévision	Gültigkeitsdauer
Forecast scale and representative area	résolution spatiale des prévisions et leur domaine de validité	räumliche Auflösung der Vorhersage, Vorhersagegebiet
Type of model	type de modèle	Modell-Typ
Principal characteristics of the model	principales caractéristiques du modèle	wesentliche Eigenschaften des Modells
Input data	données d'entrée	Eingabe-Daten
Output data	données de sortie (résultats)	Ausgabe-Daten (Ergebnisse)
Probability limits attached to forecast	limites de confiance (probabilistes) caractérisant les prévisions	Wahrscheinlichkeitsangaben zur Prognose
Remarks	remarques	Bemerkungen

Tab 1 Signification des termes anglais utilisés dans les tableaux des pages suivantes

Tab 1 Bedeutung der in den nachfolgenden Tabellen verwendeten englischen Stichworte

3.1 Modèles statistiques synoptiques

3.1 Synoptisch-statistische Modelle

	1. SUISSE	1. SCHWEIZ
Name of model	Institut Suisse de Météorologie (Zürich) [COURVOISIER, 1970]	Schweizerische Meteorologische Anstalt (Zürich) [COURVOISIER, 1970]
Period covered	96 heures (4 jours)	96 Stunden (4 Tage)
Validity of forecasts	96 heures (4 jours); 6.00 heures TU ² du jour de l'émission jusqu'à 6.00 + 96 heures TU	96 Stunden (4 Tage); 6.00 Uhr GMT ² des Ausgabetales bis 6.00 + 96 Stunden GMT
Forecast scale and representative area	moyenne des précipitations du bassin versant suisse du Rhin (environ 30.000 km ²)	Gebietsmittel für das Rheineinzugsgebiet in der Schweiz (etwa 30.000 km ²)
Type of model	statistique synoptique; modèle de régression	synoptisch-statistisch; Regressionsmodell

Principal characteristics of the model	applicable seulement durant le semestre d'hiver lors de situations spéciales avec courants du nord-ouest	nur anwendbar im Winterhalbjahr bei besonderen nordwestlichen Strömungslagen
Input data	vitesse du vent à 500 mb, points de rosée à 850, 700, 500 mb	Windgeschwindigkeit in 500 mb; Taupunkte in 850, 700, 500 mb
Output data	somme des précipitations durant 4 jours; disponible entre 8.30 heures et 9.00 heures TU environ (= 9.30 heures et 10.00 heures HEC)	4-tägige Niederschlagssumme; verfügbar etwa zwischen 8.30 Uhr und 9.00 Uhr GMT
Probability limits attached to forecasts	non	nein
Remarks	avantages: – grande portée de la prévision – peu de travail inconvénients: – subdivision grossière dans l'espace et le temps des précipitations – utilisable seulement dans des cas particuliers comportant des précipitations d'origine dynamique à grande échelle et orographique (Alpes)	Vorteile: – lange Gültigkeitsdauer – geringer Aufwand Nachteile: – grobe räumliche und zeitliche Auflösung der Niederschläge – nur in besonderen Fällen mit großräumig-dynamisch und orographisch (Alpen) bedingten Niederschlägen anwendbar.

²⁾ TU = HEC – 1 heure

²⁾ GMT = MEZ – 1 Stunde

	2. SUISSE	2. SCHWEIZ
Name of model	Institut Suisse de Météorologie (Genève) [ALTHERR et al, 1978]	Schweizerische Meteorologische Anstalt (Genf) [ALTHERR u.a., 1978]
Period covered	24 heures	24 Stunden
Validity of forecasts	actuellement: 168 heures (= 7 jours) au maximum, c'est-à-dire de 6.00 heures TU du 1 ^{er} jour suivant le jour d'émission des prévisions, jusqu'à 6.00 heures de 8 ^{ème} jour dans son principe: applicable aux cartes de prévisions numériques établies pour n'importe quel terme	gegenwärtig: maximal 168 Stunden (= 7 Tage), d.h. von 6.00 Uhr GMT des 1. Folgetages nach der Prognoseausgabe bis 6.00 Uhr GMT des 8. Folgetages prinzipiell: auf jeden Termin der zugrundeliegenden kartenmäßig dargestellten numerischen Druckfeldvorhersagen (500 mb) anwendbar
Forecast scale and representative area	prévisions ponctuelles pour 3 stations dans le bassin versant suisse du Rhin	Punktvorhersagen für 3 Stationen im Rheineinzugsgebiet der Schweiz
Type of model	statistique synoptique; analyse discriminante	synoptisch-statistisch; Diskriminanzanalyse

Principal characteristics of the model	une équation par station et par mois; a partir de 80 grandeurs mesurées admises dans une grille de 16 points, 5 sont utilisés par équation; les prédicteurs sont: a) géopotentiel de la surface de 500 mb, b) différence de géopotentiel entre 2 points à 500 mb, c) cyclonalité à 500 mb	pro Station und Monat 1 Gleichung; von 80 Prädiktoren, die in einem Gitter mit 16 Punkten zugelassen sind, werden pro Gleichung 5 verwendet; als Prädiktoren dienen a) Geopotential der 500 mb-Fläche, b) Geopotentialdifferenz zweier Punkte in 500 mb, c) Zyklonalität in 500 mb
Input data	cartes des prévisions numériques (CPN) de la surface de 500 mb aux échéances suivantes: a) CPN du Service météorologique des USA: 00Z + 24 heures, 00Z + 48 heures, ..., 00Z + 120 heures TU b) CPN du Service météorologique des USA: 12Z + 24 heures, 12Z + 48 heures TU c) CPN du Service météorologique européen: 12Z + 24 heures, 12Z + 48 heures, ..., 12Z + 168 heures TU (00Z = début du jour d'émission des prévisions, TU)	numerische Vorhersagekarten (NVK) der 500 mb Fläche zu folgenden Terminen: a) NVK des US-Wetterdienstes: 00Z + 24 Stunden, 00Z + 48 Stunden, ..., 00Z + 120 Stunden GMT b) NVK des US-Wetterdienstes: 12Z + 24 Stunden, 12Z + 48 Stunden GMT c) NVK des Europäischen Wetterdienstes: 12Z + 24 Stunden, 12Z + 48 Stunden, ..., 12Z + 168 Stunden GMT (00Z = Beginn des Ausgabetales, GMT)
Output data	probabilités correspondant aux 3 classes: »pas de pluie«, »1 à 9 mm«, »≥ 10 mm«, pour les périodes suivantes: – avec l'»input« (a): 18–42 heures, ..., 114–138 heures – avec l'»input« (b): 30–54 heures, 54–78 heures – avec l'»input« (c): 30–54 heures, ..., 174–198 heures ces valeurs de probabilité étant disponibles environ entre: a) 6.00 et 9.00 heures TU b,c) 18.00 et 26.00 heures TU (heure 00Z = début du jour d'émission des prévisions, TU)	Wahrscheinlichkeiten zu den 3 Klassen: »no rain«, »1...9 mm«, »≥ 10 mm« für die Perioden: – mit »Input« (a): 18–42 Stunden, ..., 114–138 Stunden – mit »Input« (b): 30–54 Stunden, 54–78 Stunden – mit »Input« (c): 30–54 Stunden, ..., 174–198 Stunden verfügbar etwa zwischen: a): 6.00 und 9.00 Uhr GMT b, c): 18.00 und 26.00 Uhr GMT (Stunde 00Z = Beginn des Ausgabetales, GMT)
Probability limits attached to forecast	voir »Output data«	siehe »Output data«

Remarks	avantages: – émission journalière – grande portée de la précision – subdivision en sous-périodes (24 heures) inconvénients: – aucune prévision avant un délai de 18 heures, à partir du moment de l'émission de la CPN utilisée – classes grossières de précipitations, avant tout au-dessus de 9 mm – les prévisions ponctuelles ne peuvent être transposées sur une région voisine plus grande (selon une étude, GREBNER, VAW 1980, non publiée) – peu indiqué pour des précipitations d'origine thermique	Vorteile: – tägliche Ausgabe – lange Gültigkeitsdauer – unterteilt in Teilperioden (24 Stunden) Nachteile: – keine Aussage bis 18 Stunden nach dem Ausgabetermin der verwendeten NVK – grobe Niederschlagsklassen vor allem oberhalb 9 mm – Punktvorhersagen, lassen sich nicht auf ein größeres Umgebungsgebiet übertragen (gemäß einer nicht publizierten Untersuchung, GREBNER, VAW, 1980) – wenig geeignet für thermisch bedingte Niederschläge.
---------	---	---

	3. FRANCE	3. FRANKREICH
Name of model	Electricité de France, PRHI (hiver), PRET (été); [DUBAND, 1970, 1980]	Electricité de France, PRHI (Winter), PRET (Sommer); [DUBAND, 1970, 1980]
Remarks	Le modèle ne touche pas le bassin du Rhin. Cependant, il est un bon exemple des modèles du type de similitude, dans la catégorie des modèles statistiques synoptiques. Une description détaillée se trouve dans le rapport de l'OMM [BELLOCQ, 1980, annexe I, p 2].	Das Modell bezieht sich nicht auf das Einzugsgebiet des Rheins. Es ist aber im Rahmen der synoptisch-statistischen Modelle ein interessantes Beispiel für den Typ des Ähnlichkeitsmodellen. Eine ausführliche Darstellung findet sich im Bericht der WMO [BELLOCQ, 1980, Anlage I, Seite 2].

	4. ALLEMAGNE	4. DEUTSCHLAND
Name of model	Institut de Météorologie et de Géophysique de l'Université Libre de Berlin [WEHRY, 1968]	Institut für Meteorologie und Geophysik an der Freien Universität Berlin [WEHRY, 1968]
Period covered	24 heures	24 Stunden
Validity of forecasts	24 heures, c.à.d. pour l'intervalle de temps compris entre 24 jusqu'à 48 heures TU, compté à partir du jour de l'émission	24 Stunden, d.h. für den Zeitraum 24 bis 48 Stunden vom Ausgabetag gerechnet

Forecast scale and representative area	dans une région de 50 × 50 km ² au minimum, 50 mm au moins doivent tomber en 24 heures; région correspondant à peu près à l'Europe centrale	auf einem Gebiet von mindestens 50 × 50 km ² müssen innerhalb 24 Stunden mindestens 50 mm fallen; Gebiet etwa Mitteleuropa
Type of model	statistique synoptique; procédé par similitude	synoptisch-statistisch; Ähnlichkeitsverfahren
Principal characteristics of the model	à l'aide de combinaisons d'observations ponctuelles des surfaces de 500 mb et 1000 mb, la situation actuelle est comparée avec 5 types différents de cartes moyennes avec fortes précipitations	aktuelle Wetterlage wird anhand von Kombinationen aus aktuellen Punktbeobachtungen von 500 mb und 1000 mb Fläche verglichen mit 5 verschiedenen Typen von Mittelkarten mit Starkniederschlag
Input data	mesures ponctuelles choisies au niveau 500 mb; mesures ponctuelles choisies au niveau 1000 mb	ausgewählte Punktmessungen des 500 mb-Niveaus; ausgewählte Punktmessungen des 1000 mb-Niveaus
Output data	reconnaissance du type de la situation météorologique; décision à l'aide de valeurs-seuils	Typ-Erkennung der Wetterlage; Schwellenwertentscheidung
Probability limits attached to forecast	non	nein
Remarks	avantages: – procédé susceptible de développement (avec utilisation d'ordinateurs) – spécifique pour de grandes quantités de précipitations – applicable à des cartes de prévisions numériques inconvénients: – localisation imprécise de l'événement attendu – prévision seulement dans des cas particuliers – pas en service	Vorteile: – ausbaufähiges Verfahren (unter Verwendung von Computer) – spezifisch für große Niederschlagsmengen – auch auf numerische Vorhersagekarten anwendbar Nachteile: – ungenaue Lokalisierung des erwarteten Ereignisses – Aussagen nur in besonderen Fällen – nicht in Betrieb

	5. ANGLETERRE	5. ENGLAND
Name of model	Office Météorologique Principal à Preston [HOLGATE, 1973]; vérification dans [NICHOLASS, 1975]	Main Meteorological Office at Preston; [HOLGATE, 1973]; Verifikation in [NICHOLASS, 1975]
Period covered	quelques heures; jusqu'à 24 heures	Stundenbereich, bis ca. 24 Stunden
Validity of forecasts	voir «Period covered»	siehe »Period covered«

Forecast scale and representative area	précipitations moyennes des bassins versants de l'Angleterre du nord-ouest et du nord du Pays de Galles	Gebietsmittel für die Einzugsgebiete im Bereich Nordwest-England und Nord-Wales
Type of model	statistique synoptique; procédé par similitude	synoptisch-statistisch; Ähnlichkeitsverfahren
Principal characteristics of the model	examen de la situation météorologique actuelle au moyen de règles dérivées de situations riches en précipitations	Prüfung der aktuellen Wetterlage mit Regeln, die von niederschlagsreichen Lagen abgeleitet wurden
Input data	cartes météorologiques actuelles avec données sur la température et l'humidité au sol, ainsi qu'aux niveaux 700 et 500 mb; radiosondages à partir de la région	aktuelle Wetterkarten mit Temperatur- und Feuchteangaben im Boden-, 700- und 500 mb-Niveau; Radiosondenaufstiege aus dem Gebiet
Output data	seuils critiques des intensités horaires pour les bassins versants	kritische Schwellenwerte von Stundenintensitäten für die Einzugsgebiete
Probability limits attached to forecast	non	nein
Remarks	avantages: – application simple – spécifique pour des précipitations très intenses inconvénients: – peu indiqué pour des régions continentales (éloignées des côtes) – prévisions seulement dans certains cas, surtout pour les précipitations d'origine dynamique à grande échelle et orographique – pas développé pour le bassin du Rhin	Vorteile: – einfache Anwendung – spezifisch für große Niederschlagsintensitäten Nachteile: – wenig geeignet für kontinentale (nicht küstennahe) Gebiete – Aussagen nur in besonderen Fällen, insbesondere mit großräumig-dynamisch und orographisch bedingten Niederschlägen – nicht für das Rheingebiet entwickelt.

3.2 Modèles statistiques dynamiques

3.2 Dynamisch statistische Modelle

	6. SUISSE	6. SCHWEIZ
Name of model	Institut Suisse de Météorologie [KUHN et QUIBI, 1976]	Schweizerisch Meteorologische Anstalt [KUHN und QUIBY, 1976]
Remarks	– n'est pas en service – une description détaillée se trouve dans le rapport de [l'OMM, annexe I, p. 6]	– nicht in Betrieb – ausführliche Darstellung in [WMO, Anlage I, Seite 6]

	7. ALLEMAGNE	7. DEUTSCHLAND
Name of model	Mouvement vertical influençant le temps [LETTAU, 1948]	Wetterwirksame Vertikalbewegung; [LETTAU, 1948]
Remarks	– n'est pas en service – il s'agit là d'un procédé destiné à déterminer la composante verticale de courants dynamiques à grande échelle; pour de grands bassins versants sans influences orographiques spéciales, la détermination des précipitations est possible, comme dans le modèle 6 (Suisse), à l'aide de relations statistiques – besoin en calculateur électronique: ordinateur de table	– nicht in Betrieb – es handelt sich hierbei um ein Verfahren zur Bestimmung der Vertikalkomponente der großräumig dynamischen Strömung. Für große Einzugsgebiete ohne besondere orographische Einflüsse ist, ähnlich wie in Modell 6 (Schweiz), die Niederschlagsbestimmung mit Hilfe statistischer Beziehungen möglich. – Computerbedarf: Tischcomputer

	8. ALLEMAGNE	8. DEUTSCHLAND
Name of model	Mouvements verticaux dans la troposphère inférieure; [FRANKE et SIEBER, 1968]	Vertikalbewegungen in der unteren Troposphäre; [FRANKE und SIEBER, 1968]
Remarks	– n'est pas en service – il s'agit là d'un procédé destiné à déterminer la composante verticale de courants dynamiques à grande échelle; pour de grands bassins versants sans influences orographiques spéciales, la détermination des précipitations est possible, comme dans le modèle 6 (Suisse), à l'aide de relations statistiques	– nicht in Betrieb – es handelt sich hierbei um ein Verfahren zur Bestimmung der Vertikalkomponente der großräumig dynamischen Strömung. Für große Einzugsgebiete ohne besondere orographische Einflüsse ist, ähnlich wie in Modell 6 (Schweiz), die Niederschlagsbestimmung mit Hilfe statistischer Beziehungen möglich.

3.3 Modèles dynamiques

3.3 Dynamische Modelle

	9. ALLEMAGNE	9. DEUTSCHLAND
Name of model	Modèle BKF, Service météorologique allemand; [EDELMAHNN, 1979], (BKF: barocline humide)	BKF-Modell, Deutscher Wetterdienst; [EDELMAHNN, 1979; und briefliche Mitteilungen] (BKF: Baroklin feucht)
Period covered	(par exemple) 6 heures	(z.B.) 6 Stunden
Validity of forecasts	(possible) 96 heures (6, 12, 18,...96 heures)	(möglich) 96 Stunden (6, 12, 18,...96 Stunden)

Forecast scale and representative area	grille: 254 km; recouvre (aussi) tout le bassin du Rhin (voir fig. 1)	Gitter: 254 km; überdeckt (auch) das gesamte Rheingebiet (siehe Abb. 1)
Type of model	hémisphérique, dynamique, pronostique	hemisphärisch, dynamisch, prognostisch
Principal characteristics of the model	modèle à 9 niveaux, description supplémentaire voir chap. 2.2.2	vertikal 9 Modellflächen; weitere Beschreibung siehe Kap. 2.2.2
Input data	données synoptiques et radiosondes resp. leurs analyses dans l'hémisphère nord	Synop- und Radiosondendaten bzw. deren Analysen auf der Nordhemisphäre
Output data	– somme des précipitations toutes les 6 heures aux points de la grille; émission 2 fois par jour – sommes des précipitations en 24 heures (00...24 heures, 24...48 heures, 48...72 heures TU) sous forme de cartes d'isohyètes; parution 8.20 heures TU	– 6-stündige Niederschlagssummen an den Gitterpunkten; Berechnung 2x täglich – 24-stündige Niederschlagssummen (6...30 Uhr, 30...54 Uhr, 54...78 Uhr GMT) in Form von Isohyetenkarten; Ausgabe 8.20 Uhr GMT (per Faximile)
Probability limits attached to forecast	non	nein
Remarks	un modèle de prévision avec une maille réduite de moitié (127 km) est en cours de développement, pour la région Europe-Atlantique.	mit der Entwicklung eines Vorhersagemodelles mit halbierten Maschenweite (127 km) für den europäisch-atlantischen Raum ist begonnen worden.

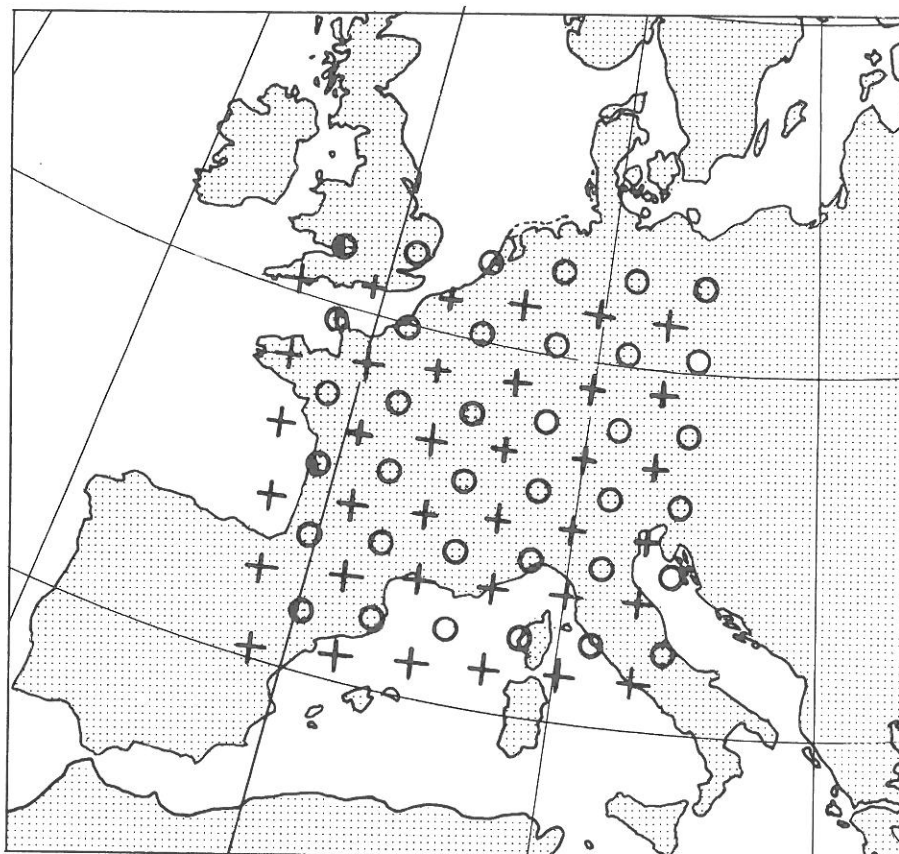


Fig. 1: Situation générale des mailles de la grille du modèle BKF, du Service météorologique allemand (DWD). La grille est déplacée alternativement d'une demi-diagonale, à chaque pas de temps (grille de Eliassen). Par exemple pour les pas de temps pairs, les noeuds de la grille occupent les positions «○» et pour les pas de temps impairs, les positions «+». Pour une maille de 254 km, la résolution effective est 180 km.

Abb. 1: Lage der Gitterpunkte des BKF-Modelles (Deutscher Wetterdienst) über Mitteleuropa. Das Modellgitter wird von Zeitschritt zu Zeitschritt um eine halbe Maschendiagonale verschoben (»Eliassen-Gitter«); z.B. »○«: Lage des Gitters zu den geraden Zeitschritten; »+«: Lage des Gitters zu den ungeraden Zeitschritten. Gitterkonstante: 254 km; effektive Auflösung: 180 km.

	10. FRANCE	10. FRANKREICH
Name of model	Météorologie Française, AMETHYSTE [COIFFIER e.a., 1979; LEPAS e.a., 1979]	Météorologie Française, AMETHYSTE [COIFFIER u.a., 1979; LEPAS u.a., 1979]
Period covered	12 heures	12 Stunden
Validity of forecasts	modèle A (quasi-hémisphérique): 96 heures modèle B (Europe/Atlantique): 48 heures	Modell A (quasi-hemisphärisch): 96 Stunden Modell B (Europa/Atlantik): 48 Stunden
Forecast scale and representative area	maille du modèle A: 250 km maille du modèle B: 150 km (voir fig. 2)	Gitter von Modell A: 250 km Gitter von Modell B: 150 km (siehe Abb. 2)

Type of model	modèle A: hémisphérique, dynamique, pronostique modèle B: domaine limité de l'hémisphère, dynamique, pronostique	Modell A: hemisphärisch, dynamisch, prognostisch Modell B: hemisphärischer Ausschnitt, dynamisch, prognostisch
Principal characteristics of the model	modèles A et B à 10 niveaux; description complémentaire, voir chap. 2.2.2	beide Modelle: vertikal 10 Flächen; weitere Beschreibung siehe Kap. 2.2.2
Input data	données synoptiques et radiosondages, resp. leurs analyses dans l'hémisphère nord; frontière du modèle B: valeurs prévues par le modèle A	Synop- und Radiosondendaten bzw. deren Analysen auf der Nordhemisphäre; Rand von Modell B: vom Modell A vorhergesagte Werte
Output data	sommes des précipitations aux points de la grille; émission 2 fois par jour (00 heures TU, 12 heures TU)	Niederschlagssummen an den Gitterpunkten; Ausgabe 2x täglich (00 Uhr, 12 Uhr GMT)
Probability limits attached to forecast	non	nein

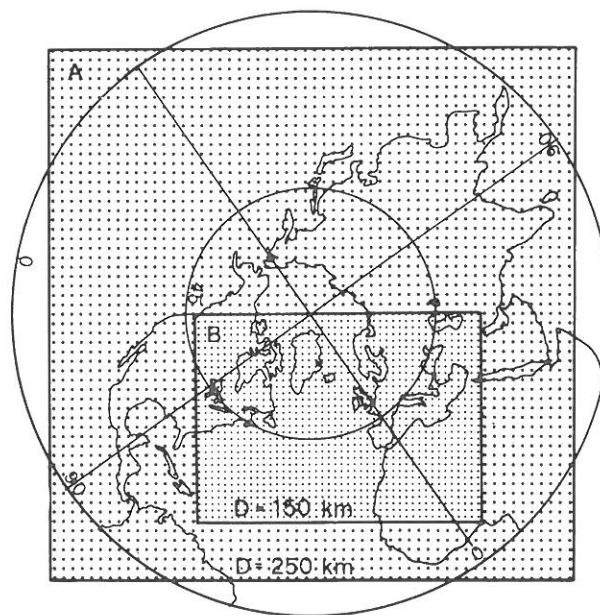


Fig. 2: Exemple d'échelonnement des dimensions de la maille de la grille, permettant avec la capacité d'ordinateur disponible, d'obtenir une résolution plus fine dans le domaine couvert par les prévisions (Météorologie Nationale de France).
Domaine A: maille de 250 km.
Domaine B: maille de 150 km.

Abb. 2: Beispiel für die Abstufung der Gitterkonstanten, um mit der vorhandenen Computerkapazität über dem interessierenden Vorhersagegebiet mit feinerer Auflösung rechnen zu können (Französischer Wetterdienst).
Bereich A: Gitterkonstante 250 km
Bereich B: Gitterkonstante 150 km.

	11. GRANDE BRETAGNE	11. GROSSBRITANNIEN
Name of model	The Meteorological Office Operational 10-Level Numerical Weather Prediction Model; [BURRIDGE et GADD, 1975]	The Meteorological Office Operational 10-Level Numerical Weather Prediction Model; [BURRIDGE und GADD, 1975]

Period covered	00...24 heures; 24...36 heures TU selon [BURRIDGE et GADD, 1975] et [WICKHAM, 1974] (une documentation plus récente n'a pas encore pu être obtenue)	00 Uhr...24 Uhr; 24 Uhr...36 Uhr GMT, gemäß [WICKHAM, 1974] und [BURRIDGE und GADD, 1975] (neuere Literatur konnte noch nicht beigezogen werden)
Validity of forecasts	36 heures (voir «period covered»)	36 Stunden (siehe »Period covered«)
Forecast scale and representative area	grille à grandes mailles: 300 km; grille à mailles étroite: 100 km (aussi) bassin du Rhin (voir fig. 3)	Grobmaschiges Gitter: 300 km, (auch) Rheingebiet; feinmaschiges Gitter: 100 km; (auch) Rheingebiet; (siehe Abb. 3)
Type of model	hémisphérique, dynamique, pronostique	hemisphärisch, dynamisch, prognostisch
Principal characteristics of the model	modèle à 10 niveaux; description complémentaire, voir chap. 2.2.2	vertikal 10 Modellflächen; weitere Beschreibung siehe Kap. 2.2.2
Input data	données synoptiques et radiosondages, resp. leurs analyses dans l'hémisphère nord	Synop- und Radiosondendaten bzw. deren Analysen auf der Nordhemisphäre
Output data	sommes des précipitations aux points de la grille; émission 2 fois par jour (00 heures, 12 heures TU)	Niederschlagssummen an Gitterpunkten; Ausgabe 2x täglich (00 Uhr, 12 Uhr GMT)
Probability limits attached to forecast	non	nein
Remarks	vérification de la version avec mailles fines (grille de 100 km) voir [WICKHAM, 1974]	Verifikation zur Fine-Mesh Version (= 100 km Gitter) siehe [WICKHAM, 1974]

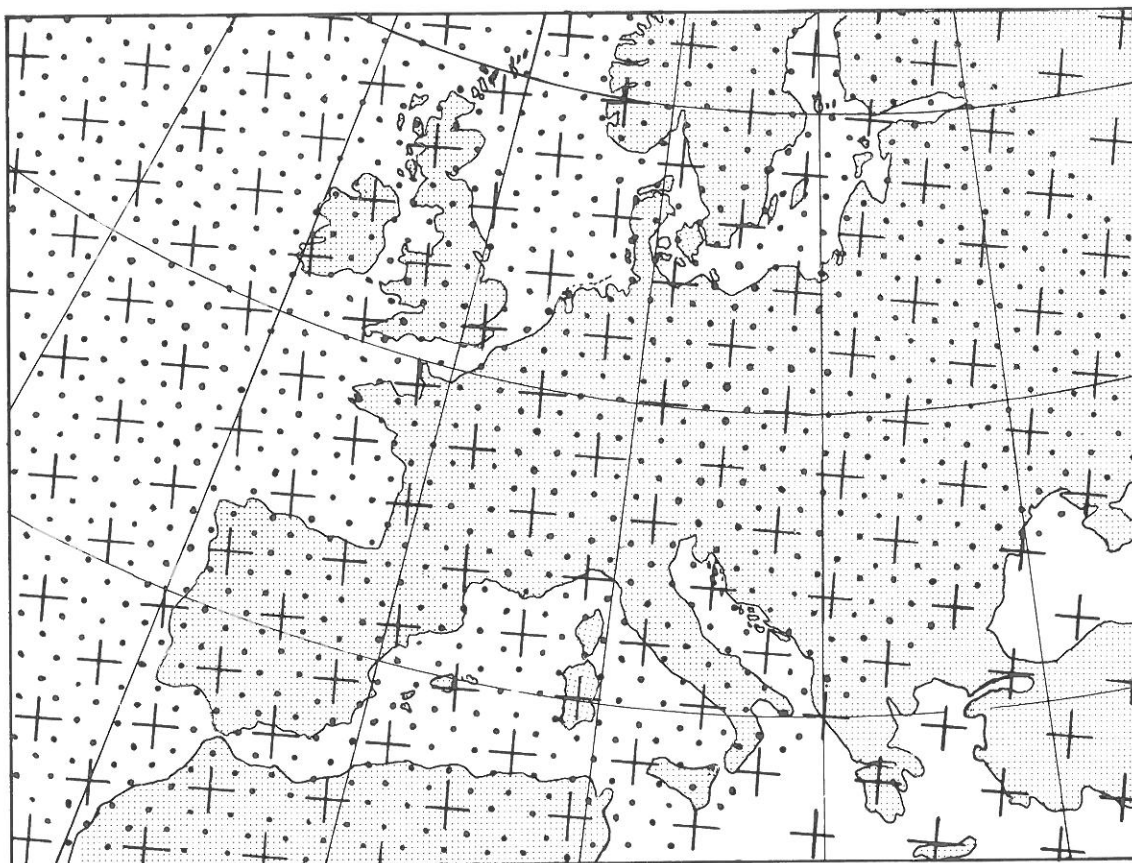


Fig. 3: Exemple d'échelonnement des dimensions des mailles pour obtenir une résolution plus fine dans le domaine concerné par les prévisions, en utilisant au mieux la capacité d'ordinateur disponible (Service Météorologique Britannique).
Réseau étendu: maille 300 km.
Réseau proche: maille 100 km.
(Source de la figure 3: documents du Service Météorologique Britannique).

Abb. 3: Beispiel für die Abstufung der Gitterkonstanten, um mit der vorhandenen Computerkapazität über dem interessierenden Vorhersagegebiet mit feinerer Auflösung rechnen zu können (Wetterdienst von Großbritannien). – Weiter Raster: Gitterkonstante 300 km; enger Raster: 100 km. (Quellennachweis: Unterlagen des Wetterdienstes von Großbritannien)

	12. GRANDE BRETAGNE	12. GROSSBRITANNIEN
Name of model	Meteorological Office, Bracknell [BELL, 1978]	Meteorological Office, Bracknell; [BELL, 1978]
Period covered	1 heure	1 Stunde
Validity of forecast	36 heures (voir «input data»)	36 Stunden (siehe »Input data«)
Forecast scale and representative area	grille: $3\frac{1}{3}$ km; région: centre de l'Angleterre, Pays de Galles (comparable au modèle 5)	Gitter: $3\frac{1}{3}$ km; Gebiet: Zentral-England, Wales (vergleichbar mit Modell 5)
Type of model	régional, dynamique, diagnostique	regional, dynamisch, diagnostisch
Principal characteristics of the model	la grille fine permet une description détaillée des processus physiques relatifs aux nuages comme aussi des effets orographiques	das feine Gitter läßt eine feine Beschreibung der wolkenphysikalischen Prozesse und der orographischen Effekte zu

Input data	observations aux points de la grille de la version à mailles fines du modèle à 10 niveaux (voir modèle 11)	Gitterpunktwerte der Fine-Mesh Version des 10-Level Modells (siehe Modell 11)
Output data	sommes horaires ou valeurs accumulées durant plusieurs heures	Stundensummen oder mehrstündig akkumulierte Werte
Probability limits attached to forecast	non	nein
Remarks	analyse très fine de l'orographie	sehr feine Auflösung der Orographie

	13. GRANDE BRETAGNE/ CENTRE MÉTÉOROLOGIQUE EUROPÉEN	13. GROSSBRITANNIEN/ EUROPÄISCHES WETTER- ZENTRUM
Name of model	ECMW-Global medium-range forecasting model [BURRIDGE et HASELER, 1977; TIEDTKE e.a., 1979]	ECMW-Global medium-range forecasting model [BURRIDGE und HASELER, 1977; TIEDTKE u.a., 1979]
Period covered	(par exemple) 6 heures	(z.B.) 6 Stunden
Validity of forecasts	168 heures	168 Stunden
Forecast scale and representative area	grille: 1.875°; globe entier	Gitter: 1.875°; gesamte Erde
Type of model	pour globe entier, dynamique, pronostique	global, dynamisch, prognostisch
Principal characteristics of the model	modèle à 15 niveaux; description complémentaire, voir chap. 2.2.2	vertikal 15 Modellflächen; weitere Beschreibung siehe Kap. 2.2.2
Input data	données synoptiques et radiosondages, resp. leurs analyses pour l'ensemble du globe	Synop- und Radiosondendaten bzw. deren Analysen, global
Output data	sommes des précipitations toutes les 6 heures aux points de la grille; émission 2 fois par jour	6-stündige Niederschlagssummen an den Gitterpunkten
Probability limits attached to forecast	non	nein

	14. USA	14. USA
Name of model	Spectral Model of National Meteorological Center [SELA, 1980]	Spectral Model of National Meteorological Center [SELA, 1980]
Period covered	(par exemple) 6 heures	(z.B.) 6 Stunden

Validity of forecasts	globe entier: 48 heures hémisphère: 48... 144 heures	global: 48 Stunden hemisphärisch: 48... 144 Stunden
Forecast scale and representative area	la résolution correspond à celle d'un modèle basé sur une grille à mailles d'environ 200 km; globe entier, resp. hémisphère nord	die Auflösung entspricht derjenigen eines Gitterpunktmodelles mit ca. 200 km Maschenweite; gesamte Erde bzw. Nordhemisphäre
Type of model	pour globe entier, spectral, dynamique, pronostique	global, spektral, dynamisch, prognostisch
Principal characteristics of the model	modèle spectral avec 30 ondes et 12 niveaux; la grille recouvrant l'ensemble du globe comprend 96×76 points	spektrales Modell mit 30 Wellen und 12 Schichten; das Berechnungsgitter umfaßt global 96×76 Gitterpunkte
Input data	données synoptiques et radiosondages, resp. leurs analyses pour l'ensemble du globe	Synop- und Radiosondendaten bzw. deren Analysen, global
Output data	sommes des précipitations toutes les 6 heures aux points de la grille	6-stündige Niederschlagssummen an den Punkten des Berechnungsgitters
Probability limits attached to forecast	non	nein

	15. USA	15. USA
Name of model	pas de dénomination [HARLEY, 1963; SCHÄFER, 1965]	keine Benennung [HARLEY, 1963; SCHÄFER, 1965]
Remarks	– pas en service – procédé utilisable pour de grands bassins versants lors de précipitations d'origine dynamique – besoin en calculateurs électroniques: ordinateur de table	– nicht in Betrieb – anwendbares Verfahren für ausgedehnte Einzugsgebiete bei dynamisch bedingten Niederschlägen – Computerbedarf: Tischcomputer

	16. USA	16. USA
Name of model	pas de dénomination [WILSON, 1961]	keine Benennung [WILSON, 1961]
Remarks	– pas en service – procédé simple, applicable à des régions sans influences orographiques particulières lors de précipitations d'origine dynamique – besoin en calculateurs électroniques: ordinateur de table ou de poche – essai d'utilisation, voir [MÜLLER, 1966]	– nicht in Betrieb – einfaches, anwendbares Verfahren für Gebiete ohne besondere orographische Einflüsse bei dynamisch bedingten Niederschlägen – Computerbedarf: Tisch- oder Taschencomputer – Anwendungsversuch siehe [MÜLLER, 1966]

3.4 Indices de convection

Les indices de convection et d'instabilité atmosphérique sont des valeurs scalaires qui permettent de quantifier la tendance aux averses. Faciles à déterminer, ce sont des outils de travail dans les mains des prévisionnistes. Ils n'ont généralement de validité que pour le jour même d'émission de la prévision.

Si, pour un état particulier de l'atmosphère, l'indice se situe en dessous d'une valeur critique, caractéristique de la méthode de calcul considérée, alors on peut admettre qu'il ne se produira pas de précipitations convectives. Si par contre l'indice dépasse sa valeur critique, alors on peut s'attendre à des précipitations convectives. Sous cette forme, les indices de convection représentent un domaine à la limite de la prévision quantitative des précipitations. Sous certaines conditions, ces indices permettent aussi des prévisions quantitatives quelque peu améliorées. Pour cette raison, il était nécessaire d'évoquer les différentes méthodes de détermination d'indices de convection, en complément aux chapitres 3.1 à 3.3.

- a) Indice SIMILA (1949): Stabilité statique entre 850 mb et 500 mb (méthode slice) en admettant la saturation de la vapeur d'eau à 850 mb.
- b) Indice FAUST (1950): Combinaison d'humidité verticale relative moyenne avec la stabilité statique.
- c) Indice SHOWALTER (1953): Stabilité statique entre 850 mb et 500 mb (méthode des tranches) en utilisant le degré réel de saturation en vapeur à 850 mb.
- d) Indice GALWAY (1956): Indice SHOWALTER dans lequel l'état de la température et celui de l'humidité à 3000 pieds (env. 850 mb) sont introduits à titre de pronostics en tenant compte du réchauffement de la journée.
- e) Indice RACKLIFF (1962): Stabilité statique entre 900 mb et 500 mb, en utilisant la température potentielle du thermomètre humide.
- f) Indice JEFFERSON (1963): (1) Indice RACKLIFF avec température moyenne pondérée du thermomètre humide à 900 mb; (2) comme (1), avec prise en considération supplémentaire de l'humidité à 700 mb.
- g) Indice BOYDEN (1967): Degré de stabilité en comparant l'épaisseur de la couche comprise entre 1000 mb et 700 mb avec la température à 700 mb.
- h) Indice DARKOW (1968): Degré de stabilité en comparant les énergies totales à 850 mb et 500 mb (énergie totale = énergie interne + énergie potentielle + énergie latente).

3.4. Konvektionsindizes

Konvektions- und Labilitätsindizes sind Maßzahlen, welche die Schauerneigung der Atmosphäre quantifizieren. Sie sind leicht bestimmbare Hilfsmittel für den Prognosedienst und gelten im allgemeinen nur für den Ausgabetag der Prognose.

Liegt der Index für einen bestimmten Zustand der Atmosphäre unter einem für das betreffende Berechnungsverfahren kritischen Wert, dann kann angenommen werden, daß keine Konvektionsniederschläge auftreten. Übersteigt der Index seinen kritischen Wert, dann sind Konvektionsniederschläge zu erwarten. In dieser Form stellen die Konvektionsindizes den Grenzbereich der quantitativen Niederschlagsvorhersage dar. Unter bestimmten Bedingungen lassen sie auch etwas feinere quantitative Aussagen zu. Deshalb sollen als Ergänzung zu den Kapiteln 3.1 bis 3.3 die verschiedenen Methoden zur Bestimmung der Konvektionsindizes erwähnt werden:

- a) SIMILA – Index (1949): Statische Stabilität zwischen 850 mb und 500 mb (Slice-Methode) unter der Annahme von Wasserdampfsättigung in 850 mb.
- b) FAUST – Index (1950): Kombination aus vertikal gemittelter relativer Feuchte und statischer Stabilität.
- c) SHOWALTER – Index (1953): – Statische Stabilität zwischen 850 mb und 500 mb (Slice-Methode) unter Verwendung des wahren Sättigungszustandes in 850 mb.
- d) GALWAY – Index (1956): SHOWALTER-Index, in dem der Temperatur- und Feuchtezustand in 3000 Fuß (etwa 850 mb) unter Berücksichtigung der Tageserwärmung prognostisch eingesetzt wird.
- e) RACKLIFF – Index (1962): Statische Stabilität zwischen 900 mb, – unter Verwendung der potentiellen Temperatur des Feuchtthermometers –, und 500 mb.
- f) JEFFERSON – Index (1963): (1) RACKLIFF – Index mit gewichteter potentieller Temperatur des Feuchtthermometers in 900 mb.
(2) wie (1), mit zusätzlicher Berücksichtigung der Feuchtigkeit in 700 mb.
- g) BOYDEN – Index (1967): Stabilitätsmaß durch Vergleich zwischen der Schichtdicke zwischen 1000 mb und 700 mb und der Temperatur in 700 mb.
- h) DARKOW – Index (1968): Stabilitätsmaß durch Vergleich der totalen Energien in 850 mb und 500 mb (totale Energie = innere + potentielle + latente Energie).

3.5 Prévisions, quant à la nature physique des précipitations

La distinction entre état liquide et état solide (pluie, resp. neige) des précipitations prévues n'est possible implicitement que dans les modèles numériques dynamiques. Il est possible toutefois d'obtenir cette information avec une sûreté généralement suffisante, en admettant que le changement de phase se produit aux environs de $+2^{\circ}\text{C}$ (la grêle n'est pas considérée ici). Une possibilité supplémentaire est offerte par l'établissement d'une régression entre l'état de la précipitation et l'épaisseur de la couche comprise entre 1000 mb et 500 mb. Une méthode approchée pour déterminer l'altitude de la limite des phases en fonction de l'intensité des précipitations est donnée dans [GREBNER, 1978].

3.5 Aggregatzustand von vorhergesagten Niederschlägen

Die Unterscheidung zwischen flüssigem und festem Zustand (Regen bzw. Schnee) von vorhergesagtem Niederschlag ist implizit nur in den dynamisch-numerischen Modellen möglich. Diese Information ist jedoch in meist genügender Genauigkeit auch zu erreichen, wenn bei ca. $+2^{\circ}\text{C}$ der Phasenwechsel angenommen wird (Hagel wird hier nicht berücksichtigt). Eine weitere Möglichkeit bietet die Regression zwischen Aggregatzustand des Niederschlages in Bodennähe und der Schichtdicke zwischen 1000 mb und 500 mb. Eine Näherungsmethode zur Höhenbestimmung der Phasengrenze in Abhängigkeit von der Niederschlagsintensität ist in [GREBNER, 1978] angegeben.

4. VALIDITE DES PREVISIONS ET COMPARAISONS ENTRE MODELES

Les modèles, qu'ils soient de nature objective ou subjective, sont des représentations approximatives des phénomènes réels se produisant dans l'atmosphère. L'approximation peut se faire selon diverses voies, avec une finesse plus ou moins grande. Le choix de l'une ou l'autre de ces voies dépend des buts attribués au modèle, mais aussi des possibilités techniques et scientifiques. Pour pouvoir juger du succès de la prévision, il faut être en mesure de résoudre les problèmes suivants:

- 1) Définir la précipitation vraie que l'on cherche à prévoir.
- 2) Comparer la précipitation vraie avec celle prévue par le modèle (Vérification).
- 3) Comparer les résultats obtenus avec différents modèles, en tenant compte de leur caractère propre.

La solution des problèmes 1) et 2) est une des conditions nécessaires au développement de modèles de prévision.

Problème 1): Dans le cas de modèles fournissant des prévisions ponctuelles (ALTHERR et al, 1978), la définition de la précipitation vraie ne présente pas de difficulté; d'éventuelles erreurs de mesure peuvent être négligées. En revanche, pour les modèles destinés à prévoir des précipitations régionales, la définition de la précipitation vraie est beaucoup plus délicate. Il existe de nombreuses méthodes de calcul pour la moyenne régionale, allant de la simple moyenne arithmétique aux méthodes statistiques de «Krigage», en passant par la méthode particulièrement laborieuse consistant à planimétrer les isohyètes (MENDEL, 1977). Mais dans de nombreux cas, la moyenne arithmétique suffit largement.

Une discussion plus approfondie de cette question n'est pas nécessaire ici.

Problème 2): Comme des prévisions quantitatives de précipitations ne sont possibles dans l'état actuel qu'avec une erreur plus ou moins grande, on ne peut prendre position sur cette question sans tenir compte du but en vue duquel elles seront utilisées.

Dans le cas des modèles statistiques synoptiques en particulier, et dans une certaine mesure également dans le cas des modèles statistiques dynamiques, les tests de vérification ne donnent que des résultats sans grande signification si l'on n'a pas auparavant, et indépendamment du développement du modèle examiné, spécifié certaines largeurs de classes ou certains seuils, par exemple seuils d'alarme [HOLGATE, 1973]. En général, l'ampleur de la précision d'estimation admise est

4. VERIFIKATION, »INTERCOMPARISON«

Modelle, seien sie objektiver oder subjektiver Art, sind approximative Darstellungen der wahren Vorgänge in der Atmosphäre. Bei der Approximation können verschiedene Wege mit unterschiedlicher Feinheit beschrieben werden. Die Wahl hängt von der Zielsetzung für ein Modell und von den wissenschaftlichen und technischen Möglichkeiten ab. Um den Erfolg beurteilen zu können, müssen folgende Aufgaben gelöst werden:

- 1) Definition des vorherzusagenden wahren Niederschlages
- 2) Vergleich zwischen wahren und vorhergesagtem Niederschlag für ein Modell (Verifikation)
- 3) Vergleich der Verifikationsergebnisse und der Eigenschaften verschiedener Modelle (»Intercomparison«)

Die Aufgaben 1) und 2) sind eine bei der Entwicklung von Vorhersagemodellen unumgängliche Voraussetzung.

Zu 1): Im Falle von Modellen für Punktvorhersagen (ALTHERR u.a., 1978) stellt die Definition des wahren Niederschlages wenig Probleme. Meßfehler dürfen in diesem Zusammenhang vernachlässigt werden. Für Modelle zur Vorhersage von Gebietsniederschlägen ist die Bestimmung des wahren Niederschlages wesentlich schwieriger. Es existieren dafür zahlreiche Methoden vom einfachen arithmetischen Mittel aus den Stationsmessungen über das aufwendige Planimetrieren von Isohyeten bis hin zu den statistischen Krigin-Methoden (Mendel, 1977). In vielen Fällen genügt bereits das arithmetische Mittel. Eine weitergehende Diskussion dieser Frage ist hier nicht erforderlich.

Zu 2): Da quantitative Niederschlagsvorhersagen beim gegenwärtigen Stand nur mit einem mehr oder weniger großen Fehler möglich sind, ist eine Stellungnahme zu Frage 2) ohne Berücksichtigung des Verwendungszweckes nicht angebracht.

Insbesondere bei synoptisch-statistischen und zum Teil auch bei dynamisch-statistischen Modellen sind Verifikationstests wenig aussagekräftig, sofern nicht Klassenbreiten oder Schwellenwerte, z.B. Alarmschwellen [HOLGATE, 1973] unabhängig von der Modellentwicklung gefordert worden sind. Im allgemeinen werden jedoch die Breiten der zugelassenen Trefferbereiche aufgrund von Signifikanzuntersuchungen für ein bereits optimal formuliertes Modell festgelegt. Für me-

fixée sur la base de recherches de signification pour un modèle déjà formulé d'une manière optimale. Ces modèles rendent de précieux services pour des buts météorologiques. Ici il s'agit de préciser et d'objectiver les prévisions météorologiques obtenues en service de routine. En cas d'utilisations des prévisions quantitatives de précipitations en hydrologie, en particulier pour les prévisions de débits, on admet des largeurs de classes déterminées par des conditions externes, par exemple l'état «hydrologique» de la nature, la sensibilité et la précision des modèles hydrologiques, les circonstances provoquant des inondations, etc. Les conditions de vérification sont notablement plus sévères car elles sont formulées indépendamment du modèle de précipitation et doivent répondre à des exigences de précision plus strictes.

L'expérience, acquise au cours de nombreuses années, à dans l'établissement de prévisions quantitatives de précipitations et leur application aux prévisions de débit (Rhin/Rheinfelden) à la VAW³⁾ de l'EPF⁴⁾ à Zürich a montré que les critères habituels de vérification n'indiquent qu'imparfaitement le plus souvent la qualité des prévisions de précipitations; ces critères sont habituellement les suivants:

- 1) La persistance en tant que mesure de comparaison;
- 2) Le coefficient de corrélation;
- 3) Les tables de contingences;
- 4) L'indice de vérification [BELLOCQ, 1980, p. 3]; par exemple utilisé dans [ROUSSEAU, 1980].

La prévision de persistance est la forme la plus simple de prévision dans le court terme, jusqu'à 24 heures, et elle est meilleure qu'une prévision basée sur des probabilités climatiques. Un modèle utilisable de précipitations doit donc donner de meilleurs résultats. Le coefficient de corrélation linéaire ne constitue pas un critère très judicieux, étant donné d'une part la grande fréquence des petites quantités, relativement bien prévisibles, mais peu importantes et l'abondance des cas sans précipitations. La corrélation n'est pas indiquée non plus à cause de la dispersion non symétrique des valeurs mesurées autour des valeurs prévues [DUBAND, 1970]; il en est de même en ce qui concerne les tables de contingences et les indices de vérification. En tout cas, les tables et les indices doivent être établis pour des classes de répartition et non pour des seuils.

Les critères de vérification, resp. les conditions exigibles d'un modèle de précipitations indiqué aux besoins de l'hydrologie doivent être définis avant tout en se fondant sur la sensibilité des modèles de débits aux

teorologische Zwecke leisten diese Modelle gute Dienste. Hier geht es um Präzisierung und Objektivierung der qualitativen Wettervorhersagen im Routinedienst. Bei einer Verwendung der quantitativen Niederschlagsvorhersagen in der Hydrologie, im speziellen für Abflußprognosen, werden Klassenbreiten von äußeren Bedingungen vorausgesetzt, z.B. »hydrologischer« Zustand der Natur, Empfindlichkeit und Genauigkeit der hydrologischen Modelle, Bedingungen die zu Überschwemmungen führen, usw. Die Verifikationsbedingungen werden wesentlich strenger, da sie unabhängig vom Niederschlagsmodell formuliert werden und höheren Genauigkeitsanforderungen folgen müssen.

Die langjährige Erfahrung in der Erstellung von quantitativen Niederschlagsprognosen und deren Verwendung für Abflußvorhersagen (Rhein/Rheinfelden) an der VAW³⁾ der ETH⁴⁾ Zürich hat gezeigt, daß die üblichen Verifikationskriterien die Niederschlagsprognosen meist unvollständig qualifizieren; üblich sind:

- 1) Persistenz als Vergleichsmaß;
- 2) Korrelationskoeffizient;
- 3) Kontingenztafeln;
- 4) Verifikationsindex [BELLOCQ, 1980, Seite 3] z.B. angewendet in [ROUSSEAU, 1980].

Die Persistenzprognose ist die einfachste Form einer Kurzfristprognose bis 24 Stunden und sie ist besser als eine Prognose aufgrund klimatologischer Wahrscheinlichkeiten. Ein verwendbares Niederschlagsmodell muß bessere Ergebnisse aufweisen. Die lineare Korrelation eignet sich wenig als Testmaß, wegen der großen Häufigkeit von verhältnismäßig gut vorhersagbaren, aber wenig bedeutenden, kleinen Mengen und von niederschlagsfreien Fällen und wegen der unsymmetrischen Streuung der Messungen um die Vorhersagen [DUBAND, 1970]; gleiches gilt für Kontingenztafeln und Verifikationsindizes. Die Tafeln und die Indizes müssen auf jeden Fall für Klassen, nicht für Schwellen, erstellt werden.

Die für hydrologische Belange geeigneten Verifikationskriterien bzw. Forderungen an ein Niederschlagsmodell müssen vielmehr aufgrund der Empfindlichkeit der Abflußmodelle auf mengenmäßige, räum-

³⁾ = Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie (Laboratoires de recherches hydrauliques, hydrologiques et glaciologiques).

⁴⁾ = Ecole Polytechnique Fédérale

³⁾ = Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie.

⁴⁾ = Eidgenössische Technische Hochschule.

erreurs affectant les précipitations estimées, en quantité, en position, et dans le temps, resp. les largeurs de classes et leur modification en fonction de la portée croissante de la prévision.

Problème 3): La multiplicité des constructions de modèles destinés à prévoir quantitativement les précipitations exige en principe l'emploi d'un test uniforme de comparaison. Dans ce but, on peut imaginer deux variantes: a) la comparaison est faite dans un seul bassin versant, le jeu de données existantes doit satisfaire à toutes les exigences des différents modèles; b) la comparaison est effectuée en utilisant les modèles dans leurs bassins versants originaux, les jeux de données doivent satisfaire au moins à toutes les exigences posées par chacun des différents modèles dans son bassin versant [cf. BELLOCQ, 1980, p. 4 et 5]. Disons d'emblée qu'exception faite des modèles dynamiques à grande échelle, il existe une contradiction entre le résultat espéré et les remarques faites à propos du problème 2):

Les modèles statistiques synoptiques [WEHRY, 1968; DUBAND, 1970; COURVOISIER, 1970; HOLGATE, 1973; ALTHERR, e.a., 1978] fournissent des informations locales ou régionales et constituent donc un compromis entre la destination de l'application, les quantités disponibles et le volume de travail pouvant être effectué. S'il existe plusieurs modèles pour un même bassin versant, leurs résultats ne sont pas comparables, en raison des pondérations différentes qu'impliquent ces trois conditions aux limites. On peut remarquer l'aspect peu réaliste de ces comparaisons avec de telles conditions limites: il faudrait disposer de données qui en principe ne sont pas disponibles.

L'application d'un modèle statistique synoptique à un bassin versant étranger, uniforme pour tous les modèles, revient à construire un nouveau modèle. Les résultats ne disent rien ou peu de chose sur la capacité du modèle dans la région d'origine. Des considérations semblables sont valables en ce qui concerne les modèles statistiques dynamiques, resp. les modèles dynamiques de type «nestling», les modèles de type rattachement local ou topographiques [BENGTTSSON et MOEN, 1971; KUHN et QUIBY, 1976; GERRETY Jr., 1978; BELL, 1978]. Ici, en cas de comparaison dans un seul et même bassin versant de référence, il faut encore déterminer à quelle grille des modèles dynamiques à grande échelle ils doivent être reliés.

Les modèles dynamiques à grande échelle présentent les meilleures conditions pour une comparaison. Ici se pose toutefois la question de la valeur d'une telle comparaison. A l'inverse des modèles statistiques synoptiques, les modèles dynamiques connaissent un intense développement. Une comparaison ne peut donc représenter que l'état momentané.

liche und zeitliche Niederschlagsfehler bzw. Klassenbreiten und deren Änderung mit zunehmender Gültigkeitsdauer definiert werden.

Zu 3): Die Vielfalt der Modellkonstruktionen zur quantitativen Niederschlagsvorhersage legt prinzipiell einen einheitlichen Vergleichstest nahe. Dazu sind zwei Varianten denkbar: a) Der Vergleich wird in einem einzigen Einzugsgebiet durchgeführt; der bereitgestellte Datensatz muß sämtliche durch die verschiedenen Modelle auftretenden Anforderungen erfüllen; b) Der Vergleich wird durch Anwendung der Modelle in ihren Originaleinzugsgebieten durchgeführt; die Datensätze müssen mindestens sämtliche durch die verschiedenen Modelle im jeweiligen Einzugsgebiet auftretenden Anforderungen erfüllen [siehe dazu BELLOCQ, Seiten 4 und 5]. Es sei vorweggenommen, daß abgesehen von den großräumig-dynamischen Modellen, ein Widerspruch zwischen dem erhofften Resultat und den zu Frage 2) gemachten Bemerkungen besteht:

Synoptisch-statistische Modelle [z.B. WEHRY, 1968; DUBAND, 1970; COURVOISIER, 1970; HOLGATE, 1973; ALTHERR u.a., 1978] liefern lokale oder regionale Informationen und stellen einen Kompromiß dar aus Zielsetzung, verfügbaren Daten und Arbeitsaufwand. Liegen für ein Einzugsgebiet verschiedene Modelle vor, so sind ihre Ergebnisse aufgrund verschiedener Gewichtung dieser drei Randbedingungen nicht vergleichbar. Es ist in Bezug auf die drei Randbedingungen der Modelle unrealistisch, daß für einen Vergleich Daten bereit gestellt werden die für den Routinenbetrieb nicht zur Verfügung stehen.

Die Anwendung eines synoptisch-statistischen Modells auf ein fremdes, für alle Modelle einheitliches Einzugsgebiet ist gleichbedeutend mit einem Modellneubau. Die Ergebnisse sagen nichts oder wenig aus über die Modelleistung im Originalgebiet. Ähnliche Überlegungen gelten für dynamisch-statistische oder dynamische Nestling-, bzw. lokale Anschluß-, topographische Modelle [z.B. BENGTTSSON und MOEN, 1971; KUHN und QUIBY, 1976; GERRETY Jr., 1978; BELL, 1978]. Hier ist im Vergleichsfall für das ausgewählte Einzugsgebiet noch festzulegen, an welches Gitter der großräumig-dynamischen Modelle sie angeschlossen werden sollen.

Die besten Voraussetzungen für einen Vergleich besitzen die großräumig-dynamischen Modelle. Hier stellt sich allerdings die Frage nach dem Wert eines Vergleichs. Im Gegensatz zu den synoptisch-statistischen Modellen unterliegen die dynamischen Modelle einer intensiven Weiterentwicklung. Ein Vergleich kann deshalb nur den momentanen Stand wiedergeben.

Les résultats des modèles dynamiques à grande échelle peuvent être utilisés non seulement pour leur comparaison réciproque mais également pour une comparaison avec les résultats obtenus à l'aide d'autres types de modèles. En particulier, les portées de prévision très différentes des divers modèles de prévision peuvent être composées à partir des courts intervalles avec quantités partielles des modèles dynamiques (6 heures). En particulier, les problèmes suivants doivent être résolus:

- a) Comparaison de la valeur en un point de la grille avec celles des précipitations régionales ou locales estimées statistiquement.
- b) Comparaison de la valeur en un point de la grille avec celles de points de grille d'un autre modèle dynamique.

Les tableaux des caractéristiques des modèles, tels qu'ils sont donnés dans le rapport de l'OMM [BELLOCQ, 1980, annexe I, II] ainsi que dans le chapitre 3 du présent rapport, représentent un important travail préliminaire en vue d'une comparaison générale des modèles. Ces caractéristiques constituent des critères de sélection qui suffisent aux besoins de la plupart des utilisateurs pour le choix d'un modèle de précipitations approprié. Car le nombre de modèles de précipitations pouvant être pris en considération dans chaque cas particulier est fortement limité par la sensibilité individuelle des modèles hydrologiques. Cette sensibilité est en effet liée aux caractéristiques suivantes des modèles de précipitations:

- l'exactitude de la répartition spatiale: grands bassins, subdivision en sous-bassins;
- l'exactitude de la répartition temporelle: grandes portées de la prévision, subdivision en sous-périodes;
- l'exactitude de la quantité: grandes et petites quantités avec des limites d'erreur proportionnellement petites.

Die Ergebnisse der großräumig-dynamischen Modelle eignen sich außer für einen Vergleich untereinander auch für einen Vergleich mit Ergebnissen anderer Modelltypen. Insbesondere lassen sich die sehr unterschiedlichen Gültigkeitsdauern der verschiedenen Vorhersagemodelle aus den kurzen Teilperioden der dynamischen Modelle (6 Stunden) zusammensetzen. Im einzelnen müssen folgende Probleme gelöst werden:

- a) Vergleich eines Gitterpunktwertes mit statistisch gewonnenen regionalen oder lokalen Niederschlagswerten;
- b) Vergleich eines Gitterpunktwertes mit Gitterpunktwerten eines anderen dynamischen Modelles;

Die tabellarische Darstellung der Modellcharakteristika, wie sie im Bericht der WMO [BELLOCQ, 1980, Anlage I und II] und im Kapitel 3 des vorliegenden Berichtes gegeben sind, stellen eine wertvolle Vorarbeit für einen allgemeinen Modellvergleich dar. Für zahlreiche Benützer sind solche Charakteristika bereits eine hinreichende Entscheidungshilfe bei der Auswahl eines geeigneten Niederschlagsmodelles, da die unterschiedliche Empfindlichkeit der hydrologischen Modelle auf die wesentlichen Eigenschaften der Niederschlagsmodelle ein strenges Filter bilden. Diese Eigenschaften sind:

- räumliche Aussagefähigkeit: große Gebiete, Gliederung in Teilgebiete;
- zeitliche Aussagefähigkeit: lange Gültigkeitsdauer, Gliederung in kurze Teilperioden;
- Mengen-Aussagefähigkeit: große und kleine Mengen mit proportional engen Fehlergrenzen.

5. DÉVELOPPEMENT FUTUR DES PRÉVISIONS QUANTITATIVES DE PRÉCIPITATION

Le développement des modèles de précipitations quantitatives, tel qu'il serait nécessaire pour les modèles de débits, a déjà été mentionné à la fin du chapitre 4: prévisions plus détaillées dans le temps, l'espace et, quantitativement, tout en assurant une portée de la prévision de plusieurs jours autant que possible, et également des résultats plus précis pour les grandes quantités. L'évolution que peuvent connaître les divers procédés peut déjà être déduite de la description donnée dans le chapitre 2.2. Les améliorations en cours de certains modèles, de même que celles auxquelles on peut raisonnablement s'attendre, sont énumérées ci-dessous. Cette revue ne peut cependant être que qualitative. En effet, des mesures visant à améliorer un modèle ne peuvent pas affecter celui-ci et il est guère possible d'en évaluer à l'avance les conséquences.

Parmi les modèles statistiques synoptiques, les modèles de régression ne peuvent être affinés que dans une faible mesure. Un affinement dans le temps et l'espace pourrait être obtenu, dans certaines conditions, au moyen d'un processus additionnel comme cela est décrit dans [GREBNER et JENSEN, 1979], c'est-à-dire par une répartition dans l'espace et le temps, (par exemple de prévisions de 24 heures de précipitations régionales à l'aide de champs moyens typiques de précipitations). Il existe une possibilité supplémentaire d'affinement dans le temps de 24 à 12 heures des sous-périodes – par exemple dans le modèle 2 [ALTHERR, e.a., 1978] et le modèle 3 [DUBAND, 1970] dans la mesure où les cartes correspondantes de prévisions numériques sont disponibles. Une nouvelle subdivision en sous-périodes n'est pas à considérer en raison de l'absence de mesures de précipitations au pas de temps correspondant de la période de référence. En ce qui concerne les fortes précipitations, il ne semble pas possible d'émettre des prévisions plus élaborées. A ce sujet, la faible fréquence des précipitations supérieures à 10 mm en 24 heures est déterminante. Ainsi, dans le bassin versant suisse du Rhin, le seuil de 10 mm en moyenne (arithmétique) a été dépassé que dans 9% des cas pour des précipitations journalières dans une période décennale de référence (1969...1978) et le seuil de 20 mm dans environ 20% des cas (voir fig. 4). En ce qui concerne les modèles analogiques, on peut s'attendre à une amélioration de l'exactitude des prévisions si l'on accroît le nombre des cas de comparaison, pour autant que l'on rende simultanément plus sévères les critères de sélection et réduise la dimension des mailles de la grille pour laquelle les valeurs numériques des champs météorologiques sont stockées. Pour le bassin versant du Rhin, aucun indice ne permet d'espérer que l'on puisse améliorer le modèle.

Par contre, le développement des modèles numériques dynamiques est poursuivi intensivement. L'évo-

5. KÜNFTIGE ENTWICKLUNG IN DER QUANTITATIVEN NIEDERSCHLAGSVORHERSAGE

Die Entwicklung der quantitativen Niederschlagsmodelle, wie sie für Abflußmodelle notwendig wäre, ist am Ende von Kap. 4 bereits umschrieben: zeitlich, räumlich und mengenmäßig feiner gegliederte Vorhersagen bei einer möglichst mehrtägigen Gültigkeitsdauer, insbesondere genauere Angaben bei großen Mengen. Welcher Ausbau in den einzelnen Verfahren möglich ist, läßt sich schon aus der Beschreibung in Kap. 2.2 erkennen. Die laufenden und zu erwartenden Modellverbesserungen sind nachfolgend zusammengestellt. Dieser Überblick kann jedoch nur qualitativ gegeben werden. Verbesserungsmaßnahmen sind nämlich nicht ohne Eingriffe in das jeweilige Modell möglich, sodaß die Auswirkungen vorher kaum abgeschätzt werden können.

Von den synoptisch-statistischen Modellen lassen sich vor allem die Regressionsmodelle nur geringfügig verfeinern. Eine zeitliche und räumliche Verfeinerung wäre unter Umständen durch ein zusätzliches Verfahren zu erreichen, wie es in [GREBNER, und JENSEN, 1979] beschrieben ist, d.h. durch die räumliche und zeitliche Verteilung von z.B. 24-stündigen Vorhersagen von Gebietsniederschlägen mit Hilfe von mittleren Niederschlagsfeldern. Eine weitere Möglichkeit der zeitlichen Verfeinerung von 24- auf 12-stündige Teilperioden wäre denkbar, – beispielsweise bei Modell 2 [ALTHERR u.a., 1978] und Modell 3 [DUBAND, 1970] – wenn die entsprechenden 12-stündigen numerischen Vorhersagekarten zur Verfügung stehen würden. Eine nochmalige Unterteilung der Teilperioden wird jedoch an den fehlenden Niederschlagsmessungen mit entsprechendem Zeitschritt in der Referenzperiode scheitern. Verfeinerungen in der Vorhersage großer Niederschlagsmengen scheinen kaum möglich zu sein. Ausschlaggebend dafür ist die geringe Häufigkeit von Niederschlägen über 10 mm pro 24 Stunden. Im Einzugsgebiet des Rheins in der Schweiz wird im arithmetischen Gebietsmittel die 10 mm-Schwelle nur von ca. 9% der Tagesniederschläge in einer zehnjährigen Referenzperiode (1969...1978) überschritten. In rund 2% aller Fälle treten mehr als 20 mm auf (siehe Abb. 4). Bei den Ähnlichkeitsmodellen ist mit zunehmender Anzahl Vergleichsfälle eine Verbesserung der Genauigkeit zu erwarten, sofern gleichzeitig die Auswahlkriterien verschärft und das Gitter zur digitalen Speicherung der meteorologischen Felder für die gesamte Stichprobe verfeinert werden. Für das Rheineinzugsgebiet konnten keine Hinweise auf Verfahrensverbesserungen gefunden werden.

Demgegenüber werden die dynamisch-numerischen Modelle intensiv weiterentwickelt. Der Modell-

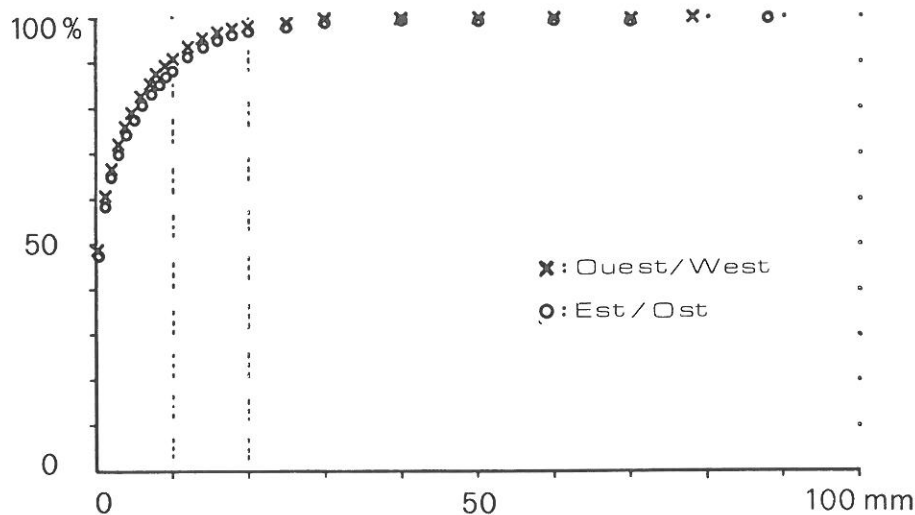


Fig. 4: Fréquences cumulées des précipitations régionales journalières dans les parties occidentales (x-x-x) et orientales (o-o-o) du bassin versant suisse du Rhin; période de référence 1969...1978. Les valeurs régionales ont été obtenues par la moyenne arithmétique des valeurs aux stations représentées dans la figure 5.

Abb. 4: Summenhäufigkeit der täglichen Gebietsniederschläge im westlichen (x-x-x) und im östlichen (o-o-o) Teil des Rheineinzugsgebietes der Schweiz; Referenzperiode 1969...1978. Als Gebietsniederschlag wurde das arithmetische Mittel aus den Tagesniederschlägen der in Abb. 5 dargestellten Stationen verwendet.

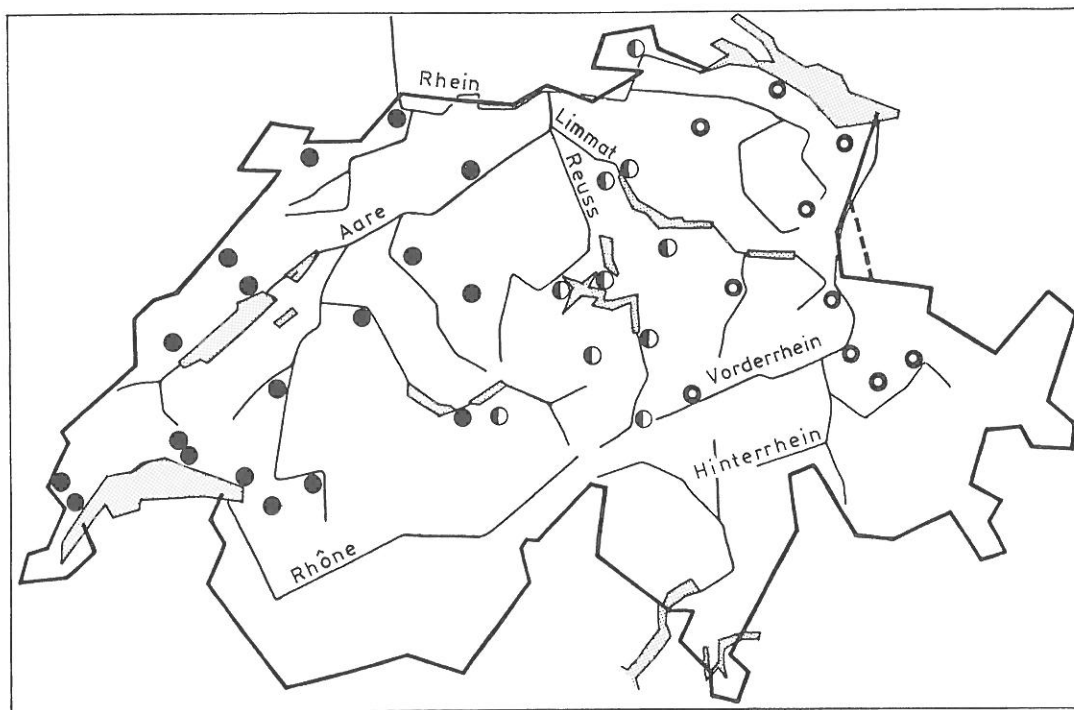


Fig. 5: ● ○: 28 stations de référence pour la partie occidentale de Suisse;
● ○: 21 stations de référence pour la partie orientale de la Suisse.
Les stations communes aux deux parties sont pondérées dans le calcul de la moyenne.

Abb. 5: ● ○: 28 Referenzstationen im westlichen Teil der Schweiz;
● ○: 21 Referenzstationen im östlichen Teil der Schweiz.
Die in beiden Teilen verwendeten Stationswerte wurden bei der Mittelbildung gewichtet.

lution de ces modèles porte aussi bien sur la simulation des processus physiques que sur l'affinement de la grille. A titre d'exemples, on peut citer la gradation des dimensions de la grille dans le modèle 10 [COIFFIER e.a., LEPAS e.a., 1979] (fig. 2), dans le modèle 11 [BURRIDGE et GADD, 1975] (fig. 3) et surtout l'évolution du modèle 11 au modèle 12 [BELL, 1978]. Le modèle 9 [EDELMAAN, 1979] également est actuellement en cours de développement, avec la création d'un modèle complémentaire, dont la maille est réduite de moitié pour la partie de l'hémisphère couvrant l'Atlantique et l'Europe. D'autre part, on s'efforce d'étendre le domaine de calcul de l'hémisphère au globe dans son entier [BURRIDGE et HASELER, 1977; TIEDTKE, e.a., 1979; SELA, 1980]. Les améliorations des modèles dynamiques agissent donc sur la précision des prévisions dans l'espace, dans le temps et aussi quantitativement.

Les modèles statistiques dynamiques bénéficient, directement de l'amélioration des modèles dynamiques. En particulier, un nouveau développement du modèle 6 [KUHN et QUIBY, 1976] est prévu sur la base d'une simulation améliorée de l'influence des reliefs montagneux sur l'atmosphère; de plus il doit être réadapté à une grille de grande échelle, car celle des mailles du modèle allemand amélioré a été réduite de 360 à 250 km. Pour ces raisons notamment, le modèle 6 ne peut pas être mis en service pour le moment.

ausbau gilt sowohl den physikalischen Prozessen, als auch der Verfeinerung der Gitternetze. Beispiele dafür sind die Abstufungen der Maschenweiten im Modell 10, Abb. 2 [COIFFIER, u.a., LEPAS u.a., 1979], im Modell 11, Abb. 3 [BURRIDGE und GADD, 1975] und vor allem vom Modell 11 zum Modell 12 [BELL, 1978]. Auch zum Modell 9 [EDELMAAN, 1979] ist mit der Entwicklung eines zusätzlichen Modells, mit halber Maschenweite, für den hemisphärischen Ausschnitt »Atlantik-Europa« begonnen worden. Außerdem wird die Ausdehnung des Kalkulationsbereiches der grobmaschigen Modelle von der Hemisphäre auf die gesamte Erde angestrebt [BURRIDGE und HASELER, 1977; TIEDTKE u.a., 1979; SELA, 1980]. Diese Verbesserungen der dynamischen Modelle wirken sich somit auf die räumliche, zeitliche und mengenmäßige Genauigkeit der Vorhersagen aus.

Die dynamisch-statistischen Modelle profitieren zunächst von der Verbesserung der dynamischen Modelle. Im einzelnen ist eine Weiterentwicklung von Modell 6 [KUHN und QUIBY, 1976] durch eine verbesserte Simulation des Gebirgseinflusses auf die Atmosphäre vorgesehen; außerdem muß es neu an ein großräumiges Gitter angepasst werden, da die Maschenweite des verbesserten deutschen Modells von 360 auf ca. 250 km reduziert wurde. Das Modell 6 kann unter anderem aus diesen Gründen vorläufig nicht in Betrieb genommen werden.

6. RECOMMANDATIONS

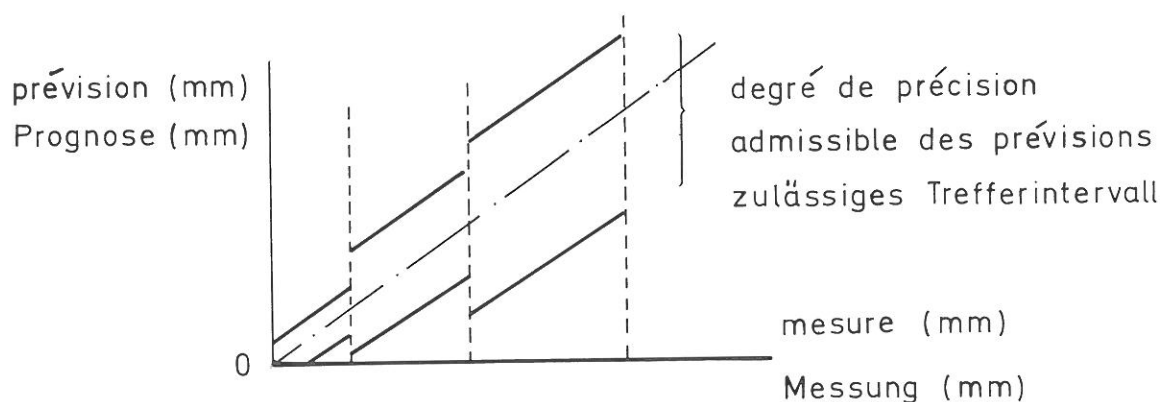
Le présent rapport donne un aperçu des modèles de prévisions quantitatives des précipitations utilisés ou utilisables dans le bassin du Rhin. En même temps, on a essayé de représenter l'éventail des principales possibilités dans ce domaine. Il en résulte qu'un meilleur contact entre les météorologues et les hydrologues ne devrait pas avoir d'influence sur la qualité actuelle des prévisions quantitatives de précipitations. Par contre, une meilleure coordination et une meilleure information mutuelle entre ces deux spécialités peut se révéler utile. Quelques suggestions à ce sujet sont formulées dans les remarques suivantes:

- Il convient d'examiner, si l'un des modèles simplifiés décrits ci-dessus, mais non utilisés dans le bassin du Rhin (par exemple pour des régions étendues, orographiquement simples, modèles 5, 13, 14) ne pourrait pas donner des résultats utilisables.
- Il convient d'examiner, si l'utilisation simultanée de plusieurs modèles de prévisions de précipitations peut mieux satisfaire aux exigences relatives à la fois de leur utilisation journalière et de prévisions plus différenciées dans tout le domaine des précipitations quantitatives.
- Il convient de contrôler, si l'utilisation simultanée des valeurs aux points des grilles des modèles allemands, anglais, français et suédois peut apporter un gain d'information.
- Les critères de vérification de la prévision quantitative des précipitations doivent être formulés par les utilisateurs; les utilisations potentielles des prévisions peuvent être au premier abord, identifiées par l'examen des caractéristiques des modèles, comme par exemple celles citées à la fin du chapitre 4 et représentées dans le chapitre 3 ainsi que dans [BELLOCQ, 1980, annexe I, II]. Pour contrôler le degré de précision des quantités prédites, il est proposé d'utiliser le procédé représenté dans l'esquisse ci-dessous.

6. EMPFEHLUNGEN

Der vorliegende Bericht verschafft einen Überblick über die im Rheingebiet betriebenen oder anwendbaren Modelle zur quantitativen Niederschlagsvorhersage. Gleichzeitig wird versucht, das Spektrum der prinzipiellen Möglichkeiten auf diesem Gebiet darzustellen. Es zeigt sich dabei, daß ein verstärkter Kontakt zwischen dem meteorologischen und hydrologischen Fachbereich keinen Einfluß auf die gegenwärtige Qualität der quantitativen Niederschlagsvorhersagen haben kann. Eine bessere Abstimmung und Transparenz der auf beiden Seiten gegebenen Möglichkeiten kann sich jedoch als nützlich erweisen. Einige Anregungen dafür sind in den nachfolgenden Bemerkungen zusammengestellt:

- Es ist zu prüfen, ob eines der beschriebenen, aber im Rheingebiet nicht betriebenen Modelle (z.B. für ausgedehnte, orographisch einfache Gebiete, – Modelle 5, 13, 14) bereits brauchbare Resultate liefern kann.
- Es ist zu prüfen, ob die gleichzeitige Verwendung mehrerer Niederschlagsmodelle die Anforderungen hinsichtlich täglicher Verwendbarkeit sowie differenzierter Aussagen im gesamten Bereich der Niederschlagsmengen besser erfüllen kann.
- Es ist zu überprüfen, ob die gleichzeitige Verwendung der Gitterpunktwerte des deutschen, englischen, französischen und schwedischen Modells einen Informationsgewinn bringt.
- Die Verifikationskriterien für die quantitative Niederschlagsvorhersage sind seitens der Benützer zu formulieren; die Verwendbarkeit der Vorhersagen läßt sich dann schon weitgehend aus den Charakteristika der Modelle, – wie am Ende von Kap. 4 erwähnt und im Kap. 3 sowie in [BELLOCQ, 1980, Anlage I und II] dargestellt –, erkennen. Zur Verifikation der vorhergesagten Mengen wird das in untenstehender Skizze dargestellte Verfahren vorgeschlagen.



- e) Les modèles de débits sont établis en utilisant les précipitations observées; il convient d'examiner si ces modèles ne devraient pas être modifiés de façon à être mieux adaptés aux possibilités des prévisions météorologiques.
- f) Avant de tenter d'effectuer une telle adaption, il convient d'examiner la sensibilité d'un modèle hydrologique, en particulier d'un modèle de débit, à des écarts entre les quantités prévues et les quantités mesurées tant dans l'espace, que le temps.
- g) Un contact plus étroit entre les spécialistes des deux domaines mentionnés peut permettre une meilleure utilisation des informations météorologiques existantes, par exemple certains résultats intermédiaires issus des modèles numériques.

Remarque:

Je tiens à remercier MM. J. D. Altherr, Dr. H. W. Courvoisier et J. Quiby de l'Institut suisse de météorologie et M. Dr. H. Lang des Laboratoires de recherches hydrauliques, hydrologiques et glaciologiques à l'Ecole Polytechnique Fédérale à Zürich pour leurs suggestions complémentaires.

- e) Abflußmodelle werden unter Verwendung von gemessenen Niederschlägen erstellt; es ist zu überprüfen, ob diese Modelle anschließend so modifiziert werden sollten, daß sie jeweils den meteorologischen Vorhersagemöglichkeiten besser angepasst sind.
- f) Eine solche Anpassung setzt eine Rechenschaft darüber voraus, wie empfindlich ein hydrologisches, im besonderen ein Abflußmodell auf räumliche, zeitliche und mengenmäßige Abweichungen zwischen Vorhersagen und Messung reagiert.
- g) Ein verstärkter Kontakt zwischen den angesprochenen Fachgebieten kann dazu führen, daß die bestehenden meteorologischen Informationen, z.B. Zwischenergebnisse aus den numerischen Verfahren, besser genutzt werden.

Bemerkung:

Für die ergänzenden Hinweise zu diesem Bericht danke ich den Herren J. D. Altherr, Dr. H. W. Courvoisier und J. Quiby von der Schweizerischen Meteorologischen Anstalt und Herrn PD Dr. H. Lang von der Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie an der Eidgenössischen Technischen Hochschule in Zürich.

7. RÉSUMÉ

Les précipitations sont le résultat de processus complexes se déroulant dans l'atmosphère. De nombreuses variantes de modèles pour la prévision quantitative des précipitations ont été établies. Le grand nombre de ces variantes résulte de nos connaissances limitées sur les phénomènes physiques du milieu atmosphérique, et surtout de nos possibilités restreintes d'acquisition et de traitement de données sur l'état de l'atmosphère. Ces modèles peuvent être classés en trois groupes:

1. Les modèles statistiques synoptiques, qui utilisent des relations statistiques entre les phénomènes synoptiques et les quantités de précipitations.
2. Les modèles dynamiques, qui calculent les quantités de précipitations par simulation numérique des processus physiques aboutissant aux précipitations.
3. Les modèles statistiques dynamiques, qui utilisent des relations statistiques entre les résultats obtenus par les modèles dynamiques et les quantités de précipitations.

Des modèles appartenant à chacun de ces trois groupes existent pour le bassin du Rhin, modèles effectivement utilisés ou pouvant l'être sous certaines conditions. Ils sont présentés dans le présent rapport avec leurs principales caractéristiques. Dans ce rapport, les modèles dynamiques sont considérés comme les plus importants. Ils représentent l'état actuel de nos possibilités. Ce sont eux qui sont développés actuellement de la façon la plus intensive. Ils fournissent des prévisions quantitatives des précipitations ainsi que des données utilisables par les modèles des deux autres groupes.

Les modèles de précipitations se distinguent les uns des autres par le travail nécessaire à leur mise en œuvre opérationnelle, ainsi que par la finesse des résultats obtenus en ce qui concerne la quantité des précipitations et leur répartition dans l'espace et le temps. Les deux types de modèles statistiques sont liés à des bassins versants déterminés. Il n'est donc pas possible, d'une façon générale, de les comparer entre eux («intercomparison»). Pour juger de la valeur des résultats fournis par des modèles particuliers (vérification), il faudrait se baser sur des critères dépendant de la sensibilité du modèle hydrologique à appliquer.

7. ZUSAMMENFASSUNG

Niederschlag ist das Ergebnis komplexer Vorgänge in der Atmosphäre. Begrenzte Kenntnis der physikalischen Abläufe und vor allem begrenzte Möglichkeiten bei der Messung des Zustandes der Atmosphäre sowie bei der Beschaffung und Verarbeitung dieser Daten führten in der quantitativen Niederschlagsvorhersage zu zahlreichen Modellvarianten. Die Modelle lassen sich in drei Gruppen zusammenfassen:

1. Synoptisch-statistische Modelle. Diese Modelle verwenden statistische Beziehungen zwischen synoptischen Phänomenen und Niederschlagsmengen.
2. Dynamische Modelle. Die Niederschlagsmenge wird hier durch numerische Simulation des physikalischen Niederschlagsprozesses berechnet.
3. Dynamisch-statistische Modelle. Diese Modelle verwenden statistische Beziehungen zwischen Ergebnissen aus dynamischen Modellen und Niederschlagsmengen.

Im Einzugsgebiet des Rheins lassen sich zu jeder Gruppe Modelle finden, die entweder betrieben werden oder unter bestimmten Bedingungen eingeführt werden könnten. Diese Modelle sind mit ihren wesentlichen Merkmalen im vorliegenden Bericht zusammengestellt worden. Den dynamischen Modellen kommt dabei die größte Bedeutung zu. Sie verkörpern den gegenwärtigen Stand der Möglichkeiten, sie erfahren die intensivste Weiterentwicklung, sie liefern selbst quantitative Niederschlagsvorhersagen und sie erzeugen Unterlagen, mit denen Modelle der beiden anderen Gruppen betrieben werden können.

Die Niederschlagsmodelle unterscheiden sich im Betriebsaufwand sowie in der mengenmäßigen, räumlichen und zeitlichen Auflösung ihrer Ergebnisse. Die beiden statistischen Modellgruppen sind auf bestimmte Einzugsgebiete festgelegt. Ein allgemeiner Modellvergleich (»Intercomparison«) ist demzufolge nicht durchführbar. Die Beurteilung der Ergebnisse einzelner Modelle (Verifikation) sollte auf Kriterien basieren, die von der Empfindlichkeit des zu betreibenden hydrologischen Modelles abhängen.

7. SAMENVATTING

Neerslag is het gevolg van ingewikkelde processen in de atmosfeer. Er zijn talrijke verschillende modellen voor quantitative neerslagvoorspellingen ontwikkeld. Onze beperkte kennis van de fysische verschijnselen in de atmosfeer en vooral ook de beperkte mogelijkheden op het gebied van het inwinnen en verwerken van gegevens over de atmosferische omstandigheden hebben dit grote aantal verschillende modellen tot gevolg.

Deze modellen kunnen in drie groepen ingedeeld worden:

1. Statistisch-synoptische modellen. Deze modellen zijn gebaseerd op de statistische relaties tussen de synoptische verschijnselen en de neerslaghoeveelheden.
2. Dynamische modellen. Bij deze modellen worden de neerslaghoeveelheden berekend door middel van numerieke simulatie van het fysische neerslagproces.
3. Dynamisch-statistische modellen. Deze modellen berusten op de statistische relaties tussen de resultaten die de dynamische modellen opleveren en neerslaghoeveelheden.

In het stroomgebied van de Rijn zijn modellen uit iedere groep te vinden. Deze modellen zijn hetzij operationeel, hetzij onder bepaalde voorwaarden operationeel te maken. In dit rapport worden deze modellen en hun voornaamste eigenschappen beschreven. De meeste aandacht wordt daarbij besteed aan de dynamische modellen, want deze modellen geven het beste inzicht in de huidige mogelijkheden. Zij zijn het best ontwikkeld en leveren quantitative neerslagvoorspellingen en invoergegevens voor de modellen in de twee andere groepen.

De voorspellingsmodellen verschillen in de hoeveelheid werk die nodig is om ze te laten functioneren, en geven verschillende resultaten voor wat betreft de hoeveelheden neerslag en de verdeling daarvan in ruimte en tijd. De beide groepen van modellen zijn slechts voor bepaalde stroomgebieden geschikt. Een algemene vergelijking van de modellen («intercomparison») is daardoor niet zinvol. De beoordeling van de resultaten van de modellen apart (verifikatie) dient te geschieden aan de hand van criteria die van de gevoeligheid van het beschouwde hydrologische model afhangen.

7. SUMMARY

Precipitation is the result of complex processes in the atmosphere. Numerous different models for quantitative precipitation forecasting have been developed. Our limited knowledge of the physical phenomena in the atmosphere and especially the limited possibilities of collection and processing of data about the atmospheric circumstances resulted in this great number of various models.

These models can be classified in three groups:

1. Statistical-synoptical models. In these models, the statistical relations between the synoptical phenomena and the quantities of precipitation are used.
2. Dynamical models. In these models, the quantities of precipitation are calculated by numerical simulation of the physical precipitation process.
3. Dynamical-statistical models. In these models, the statistical relations between the results, obtained from the dynamical models, and the quantities of precipitation, are used.

In the Rhine catchment, models – in operational use or applicable under certain circumstances – of each group can be found. In this report, in which the most attention is paid to the dynamical models, these models and their principal characteristics are presented. The dynamical models embody the actual possibilities; they are developed most intensively and they provide us with quantitative precipitation forecasts and with input data for the models in the two other groups.

The different precipitation models demand various conditions for their practical application and show diverse quantitative, spatial and temporal results. Both groups of statistical models are suited for certain basins only. Therefore, a general intercomparison of these models is not possible. To estimate the value of the results of the specific models (verification) one should use criteria that are depending on the sensitivity of the considered hydrological model.

BIBLIOGRAPHIE:

LITERATURVERZEICHNIS:

- ALTHERR, J. D.; DUPANLOUP, M.; GANTER, Y.; JUNET, E. (1978): Préviation objective des hauteurs de pluie basée sur une méthode d'analyse discriminante. *Arbeitsberichte der Schweizerischen Meteorologischen Zentralanstalt*. Nr. 82.
- BELL, R. S. (1978): The Forecasting of Orographically Enhanced Rainfall Accumulations Using 10-Level Model Data. *Meteorological Magazine* 107 (113...124).
- BELLOCO, A. (1980): Operational Models of Quantitative Precipitation Forecasts for Hydrological Purposes and Possibilities of an Intercomparison; WMO, ANNEX, R/NWP/5.
- BENGTTSSON, L.; MOEN, L. (1971): An operational system for numerical weather prediction; Satellite and Computer Applications to Meteorology, WMO 283 (63...88).
- BÖTTGER, H. (1976): Ähnliche Wetterlagen sind nicht gleich. *Beilage zur Berliner Wetterkarte*. SO 7/76.
- BUELL, C. E. (1954): The Relation Between the Temperature Differences Between the 700-Mb and 500-Mb Levels and Thunderstorm Rainfall. *Bulletin of American Meteorological Society*, Vol. 35, Nr. 10 (476...477).
- BURRIDGE, D. M.; GADD, A. J. (1975): The Meteorological Office Operational 10-Level Numerical Weather Prediction Model. *Scientific Paper, Meteorological Office*, Nr. 34.
- BURRIDGE, D. M.; HASELER, J. (1977): A Model for Medium Range Weather Forecasting – Adiabatic Formulation. *European Centre for Medium Range Weather Forecasts, Technical Report No. 4*, March 1977.
- COIFFIER, J.; DECAM, D.; JOURDAN, R.; LEPAS, J.; PHAM, H. L.; ROUSSEAU, D. (1979): *Projet Améthyste – Le modèle de prévision en points de grille, Partie dynamique*. Ministère des Transports, Direction de la Météorologie. *Note Technique de l'Etablissement d'Etudes et de Recherches Météorologiques*, No. 36 Nouvelle série, Oct. 1979.
- COURVOISIER, H. W. (1970): Die quantitative Niederschlagsprognose winterlicher zyklonaler Witterungslagen auf der Alpennordseite der Schweiz. *Veröffentlichung der Schweizerischen Meteorologischen Zentralanstalt*, Nr. 15.
- DUBAND, D. (1970): Reconnaissance dynamique de la forme des situations météorologiques, à la prévision quantitative de précipitations. EDF, Service de la production hydraulique, Division technique générale.
- DUBAND, D. (1980): Dynamic selection of analogue flow patterns to produce quantitative precipitation forecasts. WMO, Symposium on probabilistic and statistical methods in weather forecasting, Nice, 8...12 Sept. 1980.
- EDELMANN, W. (1976): Über den Zusammenhang der Vertikalgeschwindigkeitsvorhersagen des baroklinen Modells mit beobachteten Niederschlägen. *Meteorologische Rundschau* 19 (44...49).
- EDELMANN, W. (1979): Die Vorhersagemodelle des Deutschen Wetterdienstes. *Deutsche Meteorologische Gesellschaft, Fortbildungsveranstaltung über numerische Wettervorhersage* (75...134).
- ETLING, D. (1981): *Meso-Scale Modelle: Promet 1*.
- FRANKE, M.; SIEBER, P. (1968): Ein Modell zur kurzfristigen Vorhersage der Vertikalbewegungen in der unteren Troposphäre als Prognosenhilfe für die Beratungspraxis. *Fachliche Mitteilungen (Inspektion Geophysikalischer Beratungsdienst der Bundeswehr im Luftwaffenamt) Reihe I*, Nr. 137.
- FULKS, J. R. (1935): Rate of precipitation from adiabatically ascending air. *Monthly Weather Review*, Vol. 63, Nr. 10 (291...294).
- GANTER, Y. (1971): La prévision des orages à l'aide d'indices d'instabilité dans la partie suisse du nord des Alpes. *Arbeitsbericht der Schweizerischen Meteorologischen Zentralanstalt*, Nr. 31.

- GERRETY JR. J. P. (1978): The LFM Model – 1976; A Documentation. NOAA Technical Memorandum NWS NMC 60.
- GREBNER, D. (1978): Zur Berechnung der Höhenlage des Überganges vom festen in flüssigen Niederschlag. Arbeiten aus der Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik, Heft 31.
- GREBNER, D.; JENSEN, H. (1979): Der räumlich-zeitliche Ablauf von Niederschlagsfeldern im schweizerischen Rheingebiet. Mitteilungen der Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie, Nr. 41 (45...57).
- HAMMERSTRAND, U. (1980): A Model to Predict the Probability of Precipitation. Monthly Weather Review 108, June 1980 (793...803).
- HARLEY, W. S. (1963): Quantitative Precipitation Forecasting. Ibid., CJR-3805, TEC-456.
- HOLGATE, H. T. D. (1973): Rainfall Forecasting for River Authorities. Meteorological Magazine 102 (33...48).
- KRECHETOV, A. A. (1977): Technique for Determining Index of Thunderstorm Activity. Soviet Meteorology and Hydrology, Nr. 2 (80...81).
- KUHN, P. M. (1953): A Generalized Study of Precipitation Forecasting, Part II. Monthly Weather Review 81, (222...232).
- KUHN, W.; QUIBY, J. (1976): Dynamical-statistical Methods of Meso-scale Precipitation Forecasting over Mountainous Terrain. Pageoph, Vol. 114 (945...964).
- LEPAS, J.; LE GOFF, G.; DE MOOR, G.; MUSSON GENON, L.; PIERRARD, M. C.; ROCAFORT, J.-P.; ROUSSEAU, D. (1979): Projet Améthyste – Le modèle de prévision, Partie physique. Ministère des Transports, Direction de la Météorologie, Note Technique de l'Etablissement d'Etudes et de Recherches Météorologiques, No. 37 Nouvelle série, Oct. 1979.
- LETTAU, H. (1948): Über wetterwirksame Vertikalbewegungen und ihre Ermittlung aus dem Druckfeld. 1. Teil: Meteorologische Rundschau, Heft 9/10 (257...261). 2. Teil: Meteorologische Rundschau, Heft 17/18 (519...523).
- MENDEL, H. G. (1977): Die Berechnung von Gebietsniederschlägen; Deutsche Gewässerkundliche Mitteilungen, 21. Jg. Heft 6, (129...141).
- MOLLWO, H. (1961): Über Zusammenhänge zwischen Parametern des Luftdruck- und Temperatur-Feldes und dem Niederschlag. Mitteilungen des Deutschen Wetterdienstes, Nr. 25.
- MÜLLER, W. (1966): Zur Anwendung einer quantitativen Niederschlagsprognose im Alpengebiet. 9. Internationale Tagung für Alpine Meteorologie, 14...17 Sept. 1966, (132...138).
- NICHOLASS, C. A. (1975): A note on the accuracy of rainfall forecasting using existing techniques in the river Dee catchment area. Meteorological Magazine, Vol. 104, Nr. 1241 (345...349).
- RAGETTE, G. (1978/1979): Methoden zur Bestimmung von Vertikalbewegungen. Wetter und Leben, Jahrgang 30, Heft 1 (10...23), 1978/Ergänzende Bemerkungen zum Aufsatz »Methoden zur Bestimmung von Vertikalbewegungen«. Wetter und Leben, Jahrgang 31, Heft 1 (39), 1979.
- RAGETTE, G. (1979): Ein Vergleich verschiedener Methoden der Feuchte- und Niederschlagsprognose. Wetter und Leben, Jahrgang 31, Heft 1 (31...38).
- ROTH, R. (1979): Vorhersage von Starkniederschlägen. DVWK Fortbildungskurs für Hydrologie, »Hochwasserschutz«, Braunschweig 15...19. Okt. 1979.

- ROUSSEAU, D. (1980): Contrôle des prévisions, Partie II – Vérification des prévisions de l'occurrence d'un phénomène. Application aux prévisions de précipitations. Ministère des Transports, Direction de la Météorologie, Note Technique de l'Etablissement d'Etudes et de Recherches Météorologiques, No. 80 Nouvelle série, Sep. 1980.
- RUPRECHT, E. (1971): Eine Untersuchung über den Zusammenhang zwischen den Schauerhöhen und dem Zustand der Atmosphäre. Meteorologische Rundschau, Heft 2 (34...42).
- SANDERS, F.; OLSON, D. A. (1967): The Release of Latent Heat of Condensation in a Simple Precipitation Forecast Model. Journal of Applied Meteorology, Vol. 6 (229...236).
- SCHÄFER, TH. (1965): Über W. S. HARLEY's Methode zur Praxis der quantitativen Niederschlagsvorhersage. Fachliche Mitteilung (Inspektion Geophysikalischer Beratungsdienst der Bundeswehr im Luftwaffenamt), Reihe I, Nr. 115.
- SELA, J. G. (1980): Spectral Modeling at NMC. National Meteorological Center, National Weather Service, NOAA, Washington, D.C. 20233, Jan. 1980.
- STEINACKER, R. (1978): Möglichkeiten von Gewitterprognosen im Gebirge. Wetter und Leben. (150...156).
- TIEDTKE, M.; GELEYN, J. F.; HOLLINGSWORTH, A.; LOUIS, J. F. (1979): ECMWF Model, Parameterization of Sub-Grid Scale Processes. European Centre for Medium Range Weather Forecasts, Technical Report Nr. 10, Jan. 1979.
- VAW (1979): Jahresbericht der Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie (36...38).
- WEHRY, W. (1968): Synoptisch-statistische Untersuchungen zu Starkregen-Wetterlagen in Mitteleuropa. Meteorologische Abhandlungen (Institut für Meteorologie und Geophysik der Freien Universität Berlin), Band LXXXVI Heft 3.
- WICKHAM, P. G. (1974): Some examples of the rainfall forecasts produced by the fine-mesh version of the 10-level model. Meteorological Magazine Vol. 103, Nr. 1225 (209...224).
- WILSON, J. W. (1961): A model for predicting precipitation amounts in Seattle and western Washington; Contract Nr. AF 19 (602), 5192.
- WMO Symposium (1981): On Probabilistic and Statistical Methods in Weather Forecasting; Nice, 8...12 Sept. 1980.
- ZAWAIZKI, J. J.; RO, C. U. (1978): Correlations Between Maximum Rate of Precipitation and Mesoscale Parameters. Journal of Applied Meteorology, (1327...1334).

