



Arbeitsberichte der Schweizerischen Meteorologischen Zentralanstalt
Rapports de travail de l'Institut Suisse de Météorologie
Rapporti di lavoro dell'Istituto Svizzero di Meteorologia
Working Reports of the Swiss Meteorological Institute

Zürich

No. 56

Modelle zur Berechnung der vertikalen Windkomponente
über dem Alpengebiet

als Hilfe für die Niederschlagsprognose

von

W.Kuhn, J.Quiby und P.Fink

Zürich, Januar 1976

Dynamische Meteorologie

551.509.313
551.509.324.2
551.558.2(234.3)

Zusammenfassung

Zwei feinmaschige diagnostische Modelle, ein äquivalent-barotropes und ein baroklines, wurden entwickelt. Das äquivalent-barotrope benötigt als Grundlage für seine prognostische Anwendung Gitterpunktdaten der Höhe der 500 mbar-Fläche an 10 x 11 Punkten eines normalen Prognosegitters. Das viel kompliziertere und zeitraubendere barokline Modell stützt sich auf entsprechende Daten von 4 Isobarenflächen (850, 700, 500 und 300 mbar). Die geographische Verteilung der berechneten vertikalen Windkomponente stimmt mit der Verteilung der in einem 12stündigen Zeitraum gemessenen Niederschläge einigermaßen überein, beim baroklinen Modell in der Mehrzahl der Fälle etwas besser als beim barotropen.

Résumé

Deux modèles diagnostiques à fines mailles ont été développés, l'un équivalent-barotrope, l'autre barocline. Pour être applicable à la prévision, le modèle équivalent-barotrope requiert les données de la hauteur du niveau 500 mbar en 10 x 11 points d'une grille normale de prévision numérique. Le modèle barocline, qui est beaucoup plus compliqué et plus long à calculer, est basé sur les données correspondantes de 4 niveaux (850, 700, 500 et 300 mbar). La répartition géographique des composantes verticales du vent calculées à l'aide de ces deux modèles est assez semblable à la répartition des précipitations mesurées pendant une période de 12 heures. Dans la plupart des cas, cette correspondance est légèrement meilleure avec le modèle barocline.

Riassunto

Sono stati sviluppati due modelli diagnostici, uno equivalente-barotropo e l'altro baroclinico. L'equivalente-barotropo richiede, come materiale di base per l'applicazione nelle previsioni, dati della superficie di 500 mb in 10 x 11 punti di una griglia normale per la previsione numerica. Il modello baroclinico, molto più lungo da calcolare si fonda sui dati corrispondenti di 4 superfici isobariche (850, 700, 500 e 300 mb). La distribuzione geografica delle componenti verticali del vento concorda in certo qual modo con la distribuzione delle precipitazioni misurate nell'intervallo di 12 ore.

Con il modello baroclinico la concordanza è nella maggioranza dei casi un po' migliore che con quello barotropo

Summary

Two diagnostic fine-mesh models have been developed, one equivalent-barotropic, the other baroclinic. In order to be used as a prognostic tool, the equivalent-barotropic model must be fed with height-data of the 500 mbar - level corresponding to 10 x 11 points of a normal forecasting grid. The baroclinic model which is much more complex and time consuming, is based upon similar data from 4 levels (850, 700, 500 and 300 mbar). The geographical distribution of vertical velocity computed with these models corresponds roughly to the distribution of precipitation observed during a 12 hours interval. This correspondance is generally slightly better in the case of the baroclinic model.

Vorbemerkungen

Dieser Arbeitsbericht legt Rechenschaft ab über die Studien, die von den drei Autoren von Herbst 1973 bis Herbst 1975 im Rahmen eines vom Schweizerischen Nationalfonds zur Förderung der wissenschaftlichen Forschung unterstützten Projektes durchgeführt wurden.

Unser Dank richtet sich in erster Linie an den Nationalfonds, dann an das Rechenzentrum sowie an verschiedene Institute der ETHZ und deren Mitarbeiter, die uns in irgend einer Weise geholfen haben, insbesondere an die Herren Dr. A. Elmiger vom Institut für Geodäsie und Dr. J. Waldvogel vom Institut für angewandte Mathematik. Bedanken möchten wir uns auch beim Zentralamt des Deutschen Wetterdienstes für die bereitwillige Ueberlassung von Gitterpunktdaten, die wir als Quellenmaterial für unsere Beispiele benützten.

I. Wandlung in der Zielsetzung

Zur Zeit der Einreichung des Forschungsgesuches (September 1972) stand der Einfluss der Alpen auf die horizontalen Komponenten des Windes im Vordergrund unseres Interesses. Wir erkannten jedoch bald, dass dieser Einfluss in dem für prognostische Zwecke gebrauchten Masstab gering ist, so bedeutend er auch lokal sein mag. Von da an richtete sich unser Augenmerk auf die vertikale Windkomponente. Ein ausschlaggebendes Argument für die Berechnung der Aufwinde stellt ihre bekannte Beziehung zu Bewölkung und Niederschlägen dar. Dank dieser Beziehung erscheint es sinnvoll, berechnete Aufwinde mit gemessenen Niederschlägen zu vergleichen; im Falle einer engen Korrelation besteht die Hoffnung, unsere Methode in Verbindung mit guten grossräumigen Prognosenkarten als Hilfsmittel für die quantitative Niederschlagsprognose verwenden zu können. Heute, nach Abschluss des Nationalfonds-Projektes, müssen wir feststellen, dass sich diese Hoffnung nur zum Teil erfüllt hat, doch sind die Gründe klar zutage getreten.

Das ursprünglich anvisierte Ziel wurde übrigens nicht ganz fallen gelassen, ergab sich doch bei der sogenannten Parametriesierung des Bodenvindes die Notwendigkeit, auf die Ablenkung durch das Gebirge Rücksicht zu nehmen.

II. Haupt-Etappen und Probleme unserer Untersuchung

Nachdem wir uns im Hinblick auf die zur Verfügung stehenden Mittel für ein diagnostisches Verfahren, das später auf Prognosenkarten ausländischer Herkunft angewandt werden kann, entschieden hatten, boten sich im Prinzip zwei Verfahren mit unterschiedlichen Freiheitsgraden für die Berechnung der vertikalen Windkomponente an :

(1) Das aequivalent-barotrope Verfahren, bei dem als Ausgangsmaterial die Topographie einer einzigen Isobarenfläche (500 mbar) und-unabhängig von der Wetterlage-ein mittleres Vertikalprofil der horizontalen Windstärke (Abb.1) verwendet werden. (Die Kurve A (p) stellt das normierte Windprofil von Payerne auf Grund der Messungen 1954-1973 dar; die übrigen Kurven beziehen sich auf abgeleitete Grössen, die in der aequivalent-barotropen Theorie auftreten).

(2) Ein baroklines Verfahren, bei welchem mit Hilfe der sogenannten Omegagleichung die vertikale Windkomponente im Einklang mit den Gesetzen der Hydro-und Thermodynamik aus den Topographien mehrerer Isobaren -flächen (bei uns 850, 700, 500, 300 mbar) errechnet wird.

Bei beiden Verfahren wird das horizontale Strömungsfeld aus der Topographie der Isobarenflächen nach dem geostrophischen Näherungsgesetz abgeleitet. (2) ist physikalisch differenzierter, aber auch wesentlich aufwendiger als (1).

In beiden Verfahren wird eine grossräumige, nur durch die meteorologischen Felder und nicht durch das Gelände bedingte Komponente, sowie eine geländebedingte Komponente des Aufwindes bestimmt. Die geländebedingte Komponente besteht aus einem von der Anströmung der Hänge herrührenden Term (Stau effekt) und einem reibungsbedingten Term.

Erst im Verlaufe unserer Arbeit wurde klar, dass die von uns berechneten Hauptkomponenten (die grossräumige und die geländebedingte) nicht unmittelbar miteinander vergleichbar sind, da die zugrundeliegenden Parameter in zwei Gittern mit verschiedener Maschenweite (352 km bzw. 35,2 km) gewonnen wurden. Bei der numerischen Differenzbildung nach dem Gitterpunktsverfahren werden im Vergleich zur analytischen Differentiation die Amplituden von Wellen je nach dem Verhältnis von Wellenlänge und Maschenweite verschieden stark reduziert. Ausserdem sind die Ausgangsdaten der beiden Komponenten verschieden stark geglättet. Infolgedessen müssen die beiden Komponenten zwecks linearer Kombination mit verschiedenen Gewichten ausgestattet werden. Es gelang gegen den Schluss, wenigstens das relative Gewicht des grossräumigen gegenüber dem orographischen Term empirisch durch Optimierung der Korrelation zwischen berechneten Aufwinden und beobachteten Niederschlägen zu bestimmen.

Eine weitere Schwierigkeit besteht darin, dass die grossräumigen Parameter naturgemäss weniger genau lokalisiert sind als die orographischen. Die bikubische Interpolation, die von uns zur Uebertragung der grossräumigen Parameter ins engmaschige Gitter verwendet wurde, ändert daran nichts; sie erbringt nur einen glatten Verlauf und damit eine scheinbare Genauigkeit.

Im ersten Projektjahr wurde zuerst die Modelltopographie (Abb.2) bestimmt. Hierauf wurde das aequivalent-barotrope Verfahren, und zwar zunächst noch ohne Berücksichtigung der Reibung, entwickelt. Als Ausgangsmaterial für die Durchrechnung von Beispielen standen damals nur graphische 500 mbar-Karten zur Verfügung, was sich bereits bei jenem relativ einfachen und groben Verfahren als schwerer Mangel entpuppte.

Im zweiten Projektjahr wurden zunächst die Grundschieffekte eingehend untersucht, was nach mehreren Versuchen zum Einbau eines Stau- und eines Reibungstermes auf Grund eines parametrisierten Bodenwindes führte. " Parametrisiert " heisst hier " aus geostrophischen Höhenwinden abgeleitet ". Die Parametrisierung erfolgte mit Hilfe eines höhenabhängigen Proportionalitätsfaktors, der aus einer empirischen ad hoc-Studie über den Zusammenhang von Höhen- und Bodenwinden in der Schweiz gewonnen wurde ; ausserdem wurde die Ablenkung durch das Gebirge auf Grund eines bei dieser Gelegenheit entdeckten, verblüffend einfachen Näherungsverfahrens berücksichtigt aus der begründeten Annahme heraus, dass die grossräumigen Prognosenkarten diesen Effekt nicht oder nur in ganz geringem Masse berücksichtigen. Als Ausgangswerte für die Parametrisierung der Bodenwinde wurden beim äquivalent-barotropen Modell die 500 mbar-Winde, beim baroklinen die 850 mbar-Winde gewählt.

Ein Teilproblem, das sich bereits im ersten Projektjahr gestellt hatte und das im Grunde genommen bis heute nicht restlos geklärt ist, bezieht sich auf den Faktor $\beta < 1$, mit dem die Höhe und damit auch die Steilheit des Modell-Gebirges im Stauterm reduziert werden muss. Die meisten Literaturbeiträge über den Einschluss orographischer Effekte in numerische Prognosen betonen die Notwendigkeit einer solchen Reduktion, doch werden verschiedene Begründungen angeführt. Sofern es sich nur um die Verminderung rechnerischer Instabilität beim Prognosenprozess handelt, ist die Begründung für unser diagnostisches Modell irrelevant. Der Faktor β wird aber gelegentlich auch physikalisch damit begründet, dass infolge der Ausweichmöglichkeiten (Strömung ums Gebirge, durch Täler und über Pässe) ein bedeutender Teil der Luft gar nicht an der Ueberströmung des Gebirges teilnehme. Gestützt auf diese Begründung wurde provisorisch $\beta = 0.2$ festgesetzt ; daran wurde in der Folge festgehalten. Heute müssen wir sagen, dieser Faktor erscheine mindestens zum Teil aus rechnerischen Gründen, d.h. im Hinblick auf die numerische Behandlung der horizontalen und vertikalen Differentiationen im Gitter, gerechtfertigt. Das Problem kann aber auch im Zusammenhang mit der Parametrisierung des Bodenwindes gesehen werden. Wenn wir β nicht einfach mit dem Gewicht der beiden Hauptterme (grossräumig und orographisch) verrechnen, dann geschieht das, um ein realistisches Verhältnis von Stau- und Reibungsterm zu wahren. Der Reibungsterm stützt sich bei uns auf den gleichen parametrisierten Bodenwind wie der Stauterm ; er wurde im Uebrigen in Anlehnung an eine amerikanische Publikation formuliert, wonach die Schubspannung in der Grenzschicht proportional zum Quadrat der Windgeschwindigkeit ist ; der dimensionslose Mitführungskoeffizient wurde zu $3 \cdot 10^{-3}$ veranschlagt.

Parallel zu diesen theoretischen Ueberlegungen beschafften wir uns vom Zentralamt des Deutschen Wetterdienstes Analysen von Wetterkarten in 7 Isobarenflächen (1000, 850, 700, 500, 300, 200, 100 mbar) aus einem 13 Monate umfassenden Zeitraum (Dezember 1970 bis Dezember 1971), d.h. von 2 x 396 synoptischen Terminen ; diese Daten wurden uns in digitaler Form auf 5 Magnetbändern geliefert ; sie enthielten u.a. die Höhe der Isobarenflächen auf Meter genau in den Punkten des deutschen Analysen- und Prognosengitters (Quadratgitter auf stereographischer Projektion der Nordhemisphäre mit einer Maschenweite von 381 km in 60° Breite

bzw. 352 km in 46,5° Breite). Die Analysen sind objektiv, d.h. nach einem numerischen Verfahren, hergestellt worden. Material von solcher Qualität ist eine unabdingbare Voraussetzung für eine brauchbare Lösung der Omegagleichung.

Die Periode Dezember 1970 - Dezember 1971 wurde gewählt, weil sie eine früher eingehend bearbeitete Wetterlage (22.12.70) enthält, hauptsächlich aber wegen der Niederschlagsdaten, die seit 1971 im klimatologischen Netz der Schweiz in 12-stündigen Intervallen erhoben werden und in der meteorologischen Datenbank beim Rechenzentrum der ETHZ digital gespeichert sind. Für die Austestung unserer Methoden wurden aus dem Jahr 1971 zwanzig 00z-Termine (00z = 00h Weltzeit = 01h MEZ) ausgewählt, die einen breiten Fächer verschiedener Wetterlagen repräsentieren.

Zunächst mussten nun aus den deutschen Analysen-Bändern die uns interessierenden Daten für diese 20 Termine herausgelesen werden. Wir beschränkten uns auf die Höhe der Druckflächen 850, 700, 500 und 300 mbar in einem aus 10 x 11 Punkten bestehenden, ungefähr $14 \times 10^6 \text{ km}^2$ umschliessenden Teilbereich des grobmaschigen deutschen Gitters, sowie auf gewisse Temperaturwerte. Die letzteren wurden nur für Hilfsuntersuchungen gebraucht. Aus diesen Rohdaten wurden dann mit Hilfe numerischer Differenzen-Operatoren die auf der rechten Seite der Omegagleichung auftretenden Parameter an den Punkten des grobmaschigen Gitters berechnet und hernach mittels bikubischer Interpolation auf unser feinmaschiges Gitter übertragen. Dieses feinmaschige Gitter (Maschenweite 35,2 km = 1/10 der groben Maschen) erstreckte sich über 24 x 25 Punkte, d.h. über eine annähernd quadratische Fläche von ca. 750'000 km^2 , in deren Mitte die Schweiz liegt. Beide Gitter sowie die zum Vergleich von Aufwinden und Niederschlägen benützten 47 Testpunkte innerhalb der Schweiz sind in Abb.3 wiedergegeben.

Aus der meteorologischen Datenbank wurden für 130 Klimastationen (Abb.4) die Niederschlagsdaten derjenigen Zeitintervalle, die genau symmetrisch zu den ausgewählten 00 z-Terminen liegen (jeweils 18 z des Vortages bis 06 z des Stichtages) herausgeholt und felderweise gemittelt.

Nun galt es, die Omegagleichung mit von Fall zu Fall vorgegebenen Randbedingungen innerhalb des feinmaschigen Gitters auf den inneren Druckflächen 700 mbar und 500 mbar zu lösen. Die Omegagleichung ist eine lineare partielle Differentialgleichung zweiter Ordnung für die barische Vertikalgeschwindigkeit ω in Funktion der 3 Koordinaten (x,y,p) :

$$\omega_{xx} + \omega_{yy} + c \cdot \omega_{pp} = F(x, y, p)$$

Die Randbedingungen wurden wie folgt formuliert : Auf der unteren Grenzfläche $p = 850 \text{ mbar}$ soll ω die aus den Grundschichteffekten (Stau und Reibung) errechneten Werte annehmen, wobei gegen den Rand des Gitters willkürlich ein Abklingen gegen null gefordert wird ; an der oberen Grenzfläche $p = 300 \text{ mbar}$ wird $\omega = 0$ gesetzt, was für unser rein troposphärisches Problem wohl zulässig und zweckmässig ist. An den seitlichen Rändern werden im 700- und 500 mbar-Niveau die aus dem äquivalent-barotropen Modell ohne Topographie hervorgehenden Werte vorgegeben. So erhielten wir pro Fall (Wetterlage) je ein System von $2 \times 22 \times 23 = 1012$ linearen Gleichungen entsprechend den inneren Gitterpunkten des fein -

maschigen Gitters.

Für die Lösung wurde anstelle der in der Literatur meist angegebenen Liebmann-Relaxation das Verfahren der konjugierten Gradienten verwendet; dadurch liess sich die Zahl der notwendigen Iterationen stark herabsetzen.

Für jeden der 20 Fälle wurden auch bestimmte Regressionsanalysen durchgeführt: Regression von der Vorticity-Advektion auf die Lösung der Omega-Gleichung in beiden Niveaux 700 und 500 mbar sowie von jeder dieser beiden Variablen im einen Niveau auf die entsprechende Variable im andern Niveau; überdies wurden die entsprechenden Korrelationskoeffizienten berechnet.

Aus der statistischen Bearbeitung des Zusammenhanges zwischen berechneten Aufwinden und beobachteten Niederschlägen gingen Streudiagramme wie das in Abb.9 wiedergegebene und Mittelwert-Darstellungen wie Abb.10 hervor. Auch Medianwerte wurden bestimmt. Diese Statistik stützte sich auf 16 der insgesamt 20 bearbeiteten Fälle und wurde auf Grund der vorletzten Version des baroklinen Modells (sogenanntes Modell W) angelegt.

Bei diesem Modell W hatten wir erstmals versucht, dem Effekt der statischen Stabilität der Luft Rechnung zu tragen. In der von uns verwendeten Omegagleichung war nämlich der Stabilitätskoeffizient durch einen konstanten, der Standard-Atmosphäre entsprechenden Wert ersetzt worden; bei Verwendung eines variablen Koeffizienten hätten sich bei abnehmender Stabilität grössere ω -Werte ergeben. Die Analyse von Einzelfällen unter Heranziehung des vertikalen Temperaturgefälles ($T_{850} - T_{500}$) ergab auch empirische Anhaltspunkte hierfür; ausserdem deutete diese Analyse darauf hin, dass bei geringer Stabilität dem orographischen Term im Vergleich zum grossräumigen ein grösseres Gewicht zukommen sollte. Beiden Effekten wurde versuchsweise durch variable, von ($T_{850} - T_{500}$) abhängige Gewichtsfaktoren Rechnung getragen.

Schliesslich wurde durch Optimierung der Korrelation zwischen Aufwind und Niederschlag des " richtige " Gewicht des grossräumigen gegenüber dem orographischen Term beim baroklinen Modell bestimmt; da sich bei der versuchsweisen Anwendung dieses Optimalgewichtes in Einzelfällen Schwierigkeiten ergaben, wählten wir für die letzte Version des baroklinen Modells einen etwas kleineren Wert (6,36) ohne dadurch den Korrelationskoeffizienten nennenswert herabzusetzen. Durch Anwendung der oben zitierten Regressionsergebnisse wurde dann ein entsprechender Gewichtsfaktor auch für das aequivalent-barotrope Modell berechnet. Die Beispiele der Abb. 5-8 sind auf Grund dieser letzten Version beider Modelle gezeichnet worden.

III. Resultate

In den Abb.5-8 sind die Ergebnisse von 4 der 20 untersuchten Fälle kartographisch dargestellt. Auf jedem Blatt sind links von oben nach unten die 500 mbar-, die 850 mbar- und die Bodenwetterkarte abgebildet ; rechts ist die Verteilung der vertikalen Windkomponente in barischen CGS-Einheiten ($1 \text{ dyn/cm}^2 \cdot \text{sec} = 10^{-3} \text{ mbar/sec}$ entsprechend ca. 1 cm/sec im metrischen System) auf Schweizerkärtchen dargestellt, und zwar oben nach dem aequivalent-barotropen, in der Mitte nach dem baroklinen Modell (letzte Version) ; dabei ist Aufwind durch gestrichelte Kurven ent -

sprechend negativen ω -Werten, Abwind durch ausgezogene Kurven markiert; rechts unten ist der 12-stündige Niederschlag durch Isohyeten im Abstand von 5 mm kartiert.

Es folgt zunächst eine kurze Besprechung dieser 4 Einzelfälle.

Abb.5 (22.11.71) zeigt eine Kaltfront-Passage mit stürmischen Westwinden und Niederschlägen beidseits der Alpen. Die Aufwindverteilung stimmt nach beiden Modellen qualitativ recht gut mit der Niederschlagsverteilung überein; das barokline Modell ist wegen der kleineren Abwindzone das bessere, ergibt übrigens fast doppelt so starke Aufwinde wie das aequivalent-barotrope.

In Abb.6 (15.6.71) sehen wir eine sommerliche Kaltfront-Passage mit Südwestwind in den Alpen, Föhntendenz in den Tälern der Alpennordseite. Auch hier stimmen Aufwinde und Niederschläge im allgemeinen gut überein; im Unterschied zum baroklinen gibt das aequivalent-barotrope Modell über dem St.Galler Rheintal ein kräftiges sekundäres Aufwindmaximum, dem in der Niederschlagsverteilung ein Minimum entspricht; das barokline Modell ist also auch hier das bessere.

Eine Bisenlage mit Nördstau in den Alpen finden wir in Abb.7 (15.10.71) . Hier erweist sich das aequivalent-barotrope Modell als besserer Niederschlagsprädiktor, denn die vom baroklinen Modell in der Westschweiz geforderten Abwinde vertragen sich schlecht mit den dort beobachteten Niederschlägen.

Abb.8 (18.3.71) soll dokumentieren, dass unser Verfahren auch in einem nicht ganz trivialen Fall von niederschlagsfreiem Wetter hilfreich werden kann. Das aequivalent-barotrope Modell ergibt in der ganzen Schweiz Abwind; das barokline einzig Genf leichten Aufwind. In der darauffolgenden Messperiode (18.3.71, 06 z-18 z) hat dann Genf als fast einzige Station der Alpennordseite wirklich Niederschlag erhalten !

Generell lassen sich die Ergebnisse unserer Untersuchung wie folgt zusammenfassen :

1. Graphische Unterlagen sind als Ausgangsmaterial unzulänglich. Die Höhe der Isobarenflächen sollte auf Grund einer sorgfältigen Analyse in Gitterpunktform mindestens auf Meter genau gegeben sein.
2. Bei der Lösung der Omegagleichung zeigt sich eine verhältnismässig schwache Koppelung in vertikaler und eine starke Koppelung in horizontaler Richtung. Das hat zur Folge, dass bereits in der 700 mbar-Fläche die Grundschichteffekte nur noch sehr schwach und in unrealistisch verwaschener Form zum Ausdruck kommen. Wir haben deshalb zuletzt eine Version der baroklinen Modelles bevorzugt, bei der die Omegagleichung ohne orographische Randbedingungen gelöst und zum Ergebnis einfach ein gewisser Prozentsatz des orographisch erzeugten 850 mbar-Aufwindes addiert wird. Die starke seitliche Koppelung bewirkt andererseits einen weitreichenden Einfluss der lateralen Randwerte auf die ω -Werte im Innern des Gitters. Die gegenwärtige Eingabe aequivalent-barotroper Randwerte stellt wohl nicht das Optimum dar ; bei einer künftigen Weiterentwicklung der Methode ist den seitlichen

Randwerten. grosse Aufmerksamkeit zu schenken.

3. Aus mathematischen und physikalischen Gründen muss die Modell-Geländehöhe im Stauterm reduziert werden ; der Faktor 0.2 hat sich bisher bewährt.
4. Wegen der dämpfenden Eigenschaften der Differenzen-Operatoren entsprechen die Amplituden der berechneten Parameter beim Gitterpunktverfahren nicht unbedingt der physikalischen Realität ; je nach Maschenweite der Gitter und Wellenlänge der betrachteten Phänomene müssen die einzelnen Parameter mit verschiedenen Gewichten behaftet werden, wenn eine lineare Kombination angestrebt wird.
5. Einfluss der statischen Stabilität der Luft s. Kap.II (Schluss).
6. Die bei der Kondensation freiwerdende latente Wärme wurde in unseren bisherigen Arbeiten nicht berücksichtigt. Es ist zu erwarten, dass bei Berücksichtigung der Kondensationswärme die Amplituden der Aufwinde zunehmen ohne dass die regionale Verteilung tangiert wird.
7. Zwischen der geographischen Verteilung der Aufwinde und derjenigen der Niederschläge besteht in den meisten Fällen eine befriedigende Uebereinstimmung. In der Mehrzahl der Fälle führt das barokline Modell zu etwas besseren Resultaten als das aequivalent-barotrope, doch gibt es auch Gegenbeispiele.
8. Quantitativ ist die Korrelation zwischen Aufwinden und Niederschlägen nicht sehr eng, wie man schon aus dem Streudiagramm Abb.9 ersehen kann. Hiefür können folgende Gründe namhaft gemacht werden :
 - a)Die Intensität der Kondensation in einer vertikalen Luftsäule ist nicht einfach proportional zur Stärke des Aufwindes. Die Temperatur und die Feuchtigkeit der beteiligten Luftschichten spielen auch eine Rolle. Die Feuchtigkeit wirkt sich in diesem Zusammenhang durch die vertikale Mächtigkeit der gesättigten Luftschichten aus; sie ist ihrerseits mit dem Aufwind korreliert. So erklärt sich, dass aus der Darstellung Abb. 10 andeutungsweise eine Abhängigkeit des Niederschlags vom Quadrat des Aufwindes (allerdings mit Verschiebung des Nullpunktes) hervorgeht.
 - b)Die Menge des pro Zeiteinheit auf eine bestimmte Bodenfläche fallenden Niederschlags ist natürlich nicht identisch mit der Menge des im gleichen Zeitraum über der gleichen Fläche gebildeten Kondensats. Man denke nur an den Transport des Niederschlags durch den Wind, auf den wir in unserer Arbeit nicht Rücksicht genommen haben.
 - c)Man hat sich stets zu vergegenwärtigen, dass die von uns berechneten Aufwinde einer Modell-Atmosphäre entsprechen, deren Aehnlichkeit mit der wirklichen Atmosphäre durch zahlreiche physikalische Vereinfachungen, Glättung der Topographie und mathematische Näherungen beeinträchtigt.

In Anbetracht dieses komplexen Sachverhaltes dürfen die mit der letzten Version des aequivalent-barotropen und baroklinen Modelles erhaltenen Ergebnisse als befriedigend bezeichnet werden.

IV. Praktische Anwendung

Nach dem oben Gesagten eignet sich unser Verfahren vorläufig eher zur regionalen Differenzierung als zur Quantifizierung der Niederschlagsprognosen.

Das barokline Modell ist ungleich schwieriger zu programmieren und braucht bedeutend mehr Rechenzeit als das äquivalent-barotrope, das im Hinblick auf die Niederschlagsprognose fast ebenso gute Resultate liefert. Für die praktische Anwendung mit Hilfe des METEOR-Computersystems steht deshalb einstweilen das barotrope Modell im Vordergrund.

Voraussetzung sind aber grossräumige numerische Prognosen guter Qualität in Form von Gitterpunktdaten. Da solche Daten voraussichtlich erst in einigen Jahren vom Europäischen Zentrum für Mittelfristprognosen geliefert werden, steht für die Weiterentwicklung und Programmierung der Methode noch ein gewisser Zeitraum zur Verfügung. Die bisherigen Ergebnisse lassen erkennen, wo etwa noch Verbesserungen gesucht werden können.

Verzeichnis der Abbildungen

- Abb.1 Vertikalprofil der horizontalen Windstärke und abgeleitete Grössen
- Abb.2 Modell-Topographie
- Abb.3 Grobes und feines Rechnungsgitter, Testpunkte Schweiz
- Abb.4 Stationsnetz für 12-stündige Niederschlagsmessungen und feines Gitter
- Abb.5 Wetterlage vom 22.11.71, 00 z
- Abb.6 Wetterlage vom 15. 6.71, 00 z
- Abb.7 Wetterlage vom 15.10.71, 00 z
- Abb.8 Wetterlage vom 18. 3.71, 00 z
- Abb.9 Streudiagramme (beobachteter Niederschlag und berechneter Aufwind)

- Abb.10 Mittelwert des Niederschlags R für verschiedene Stufen der vertikalen Windkomponente

Abb. 1

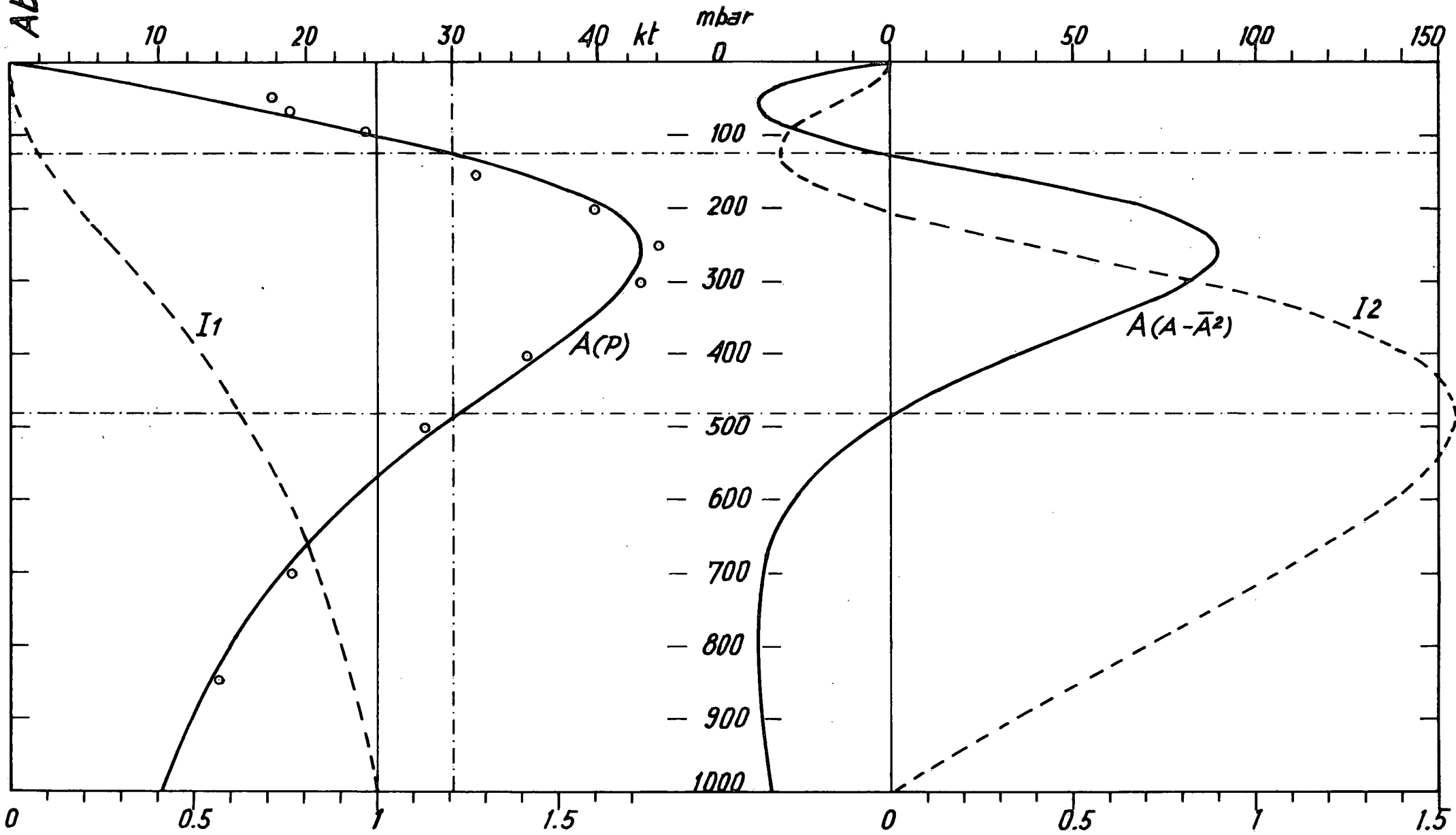


Abb. 2

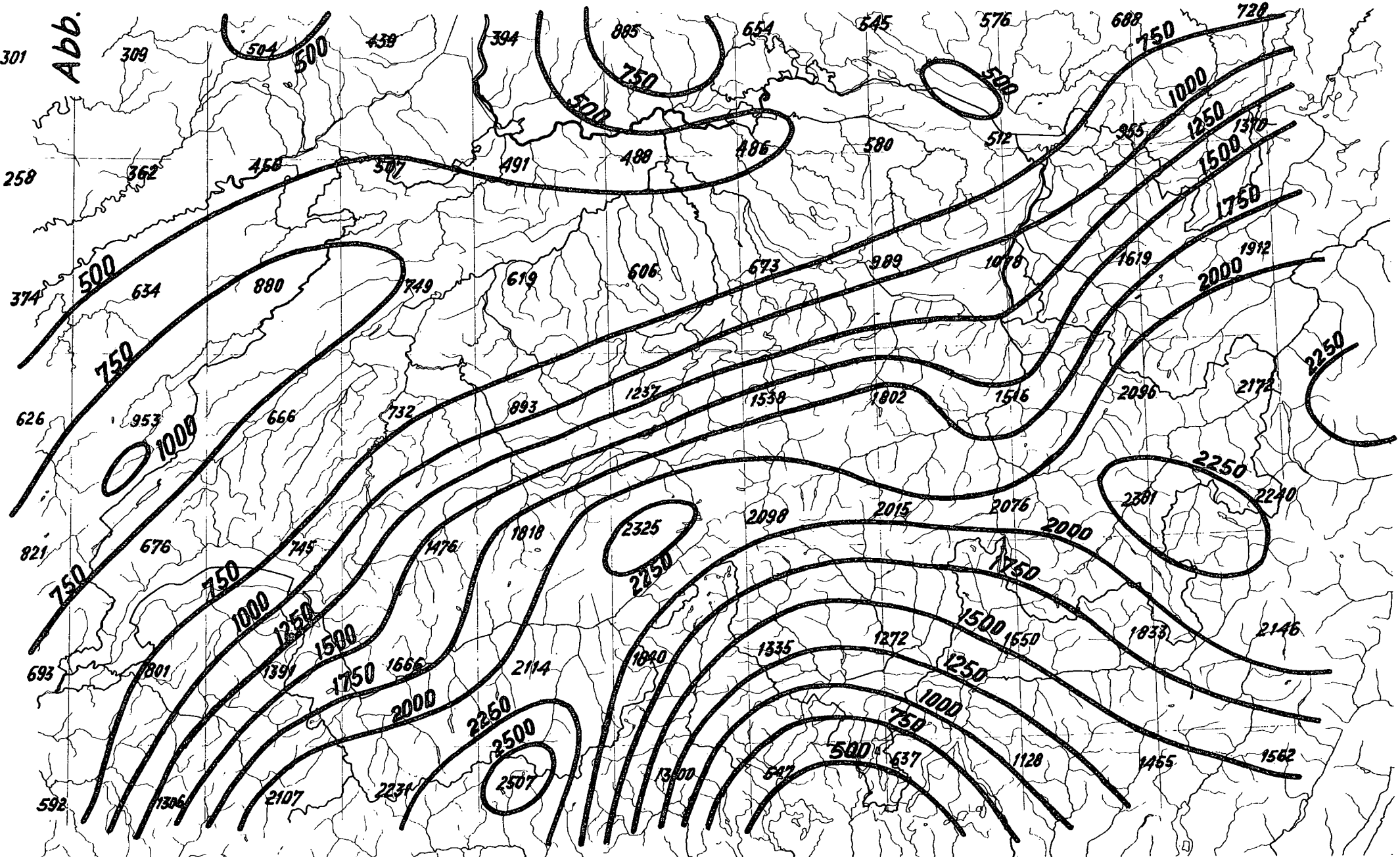


Abb. 3

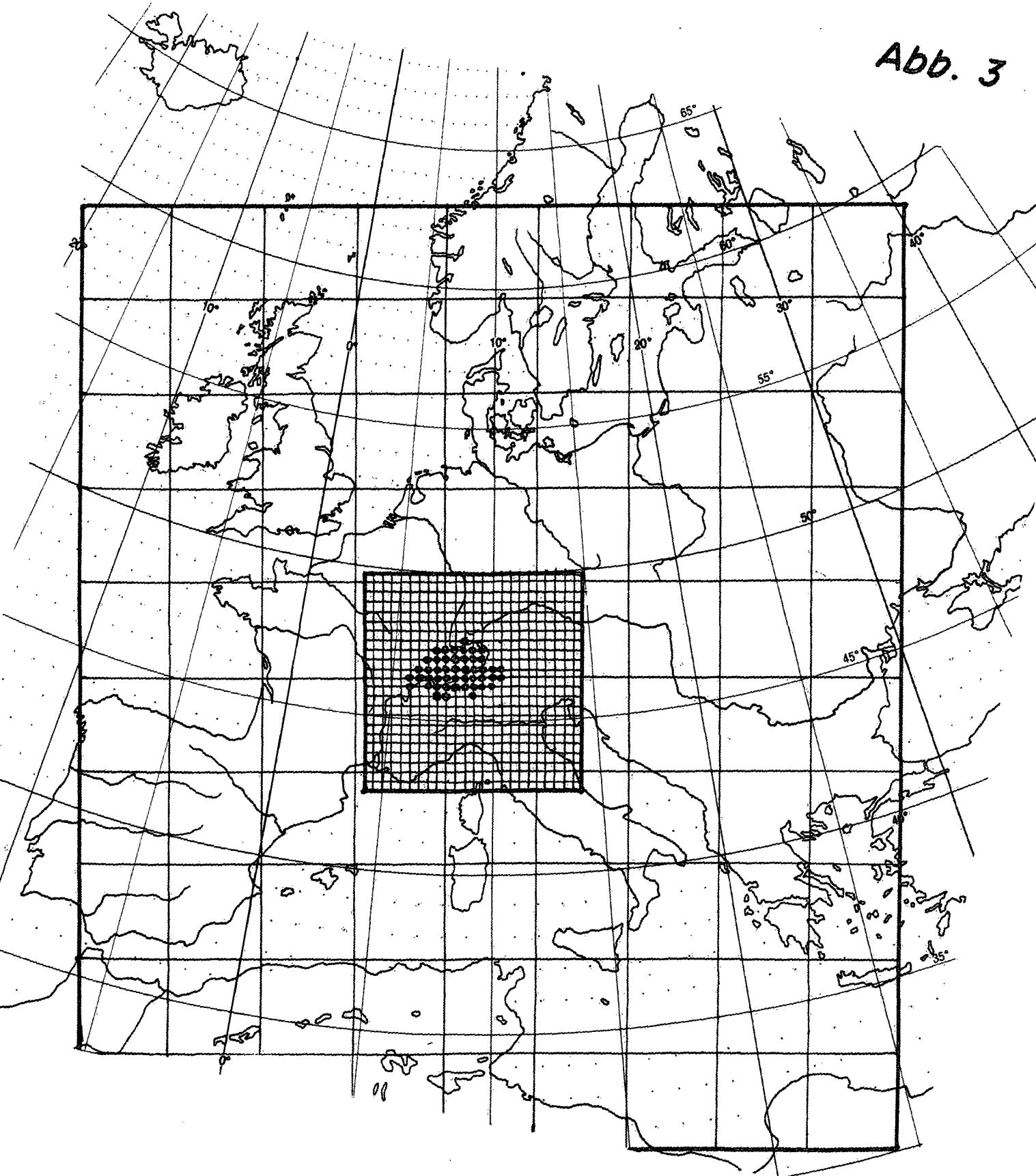


Abb. 4

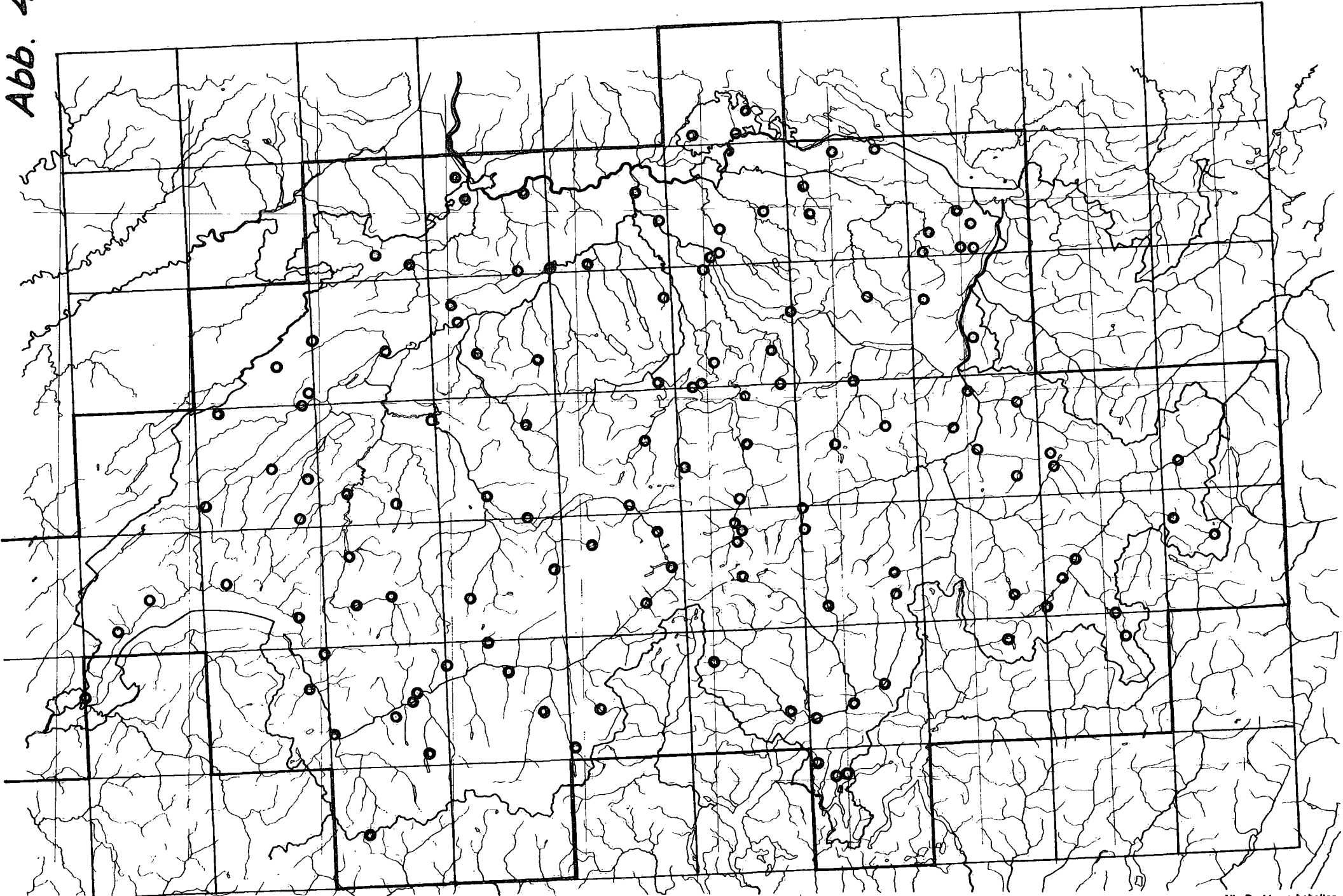


Abb. 5

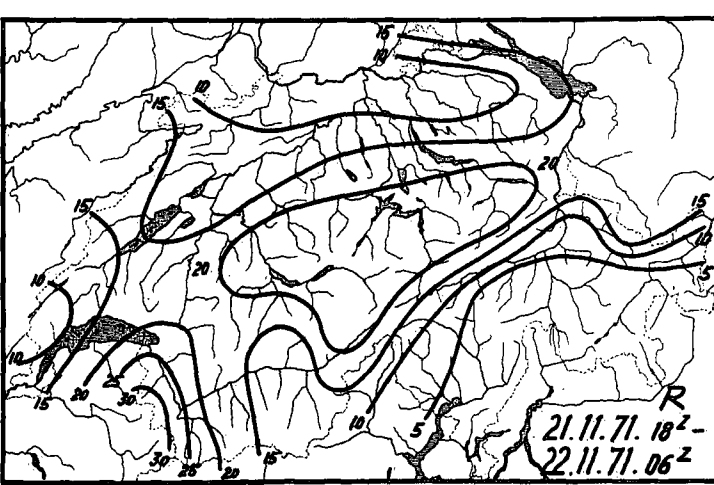
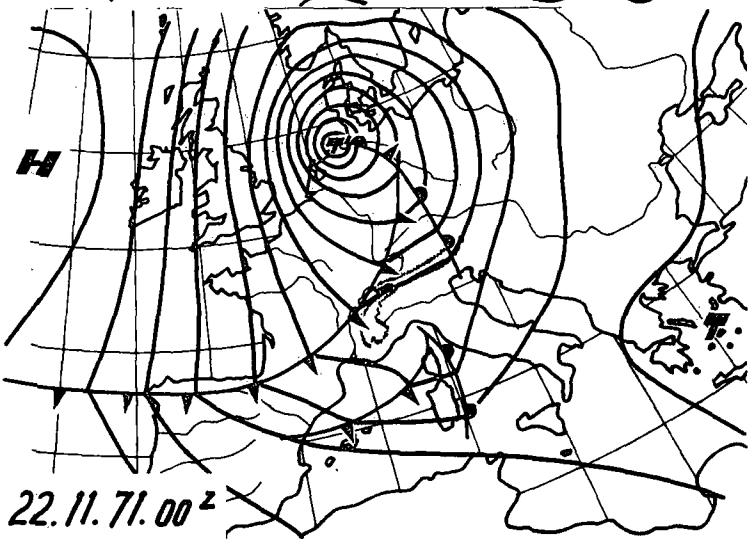
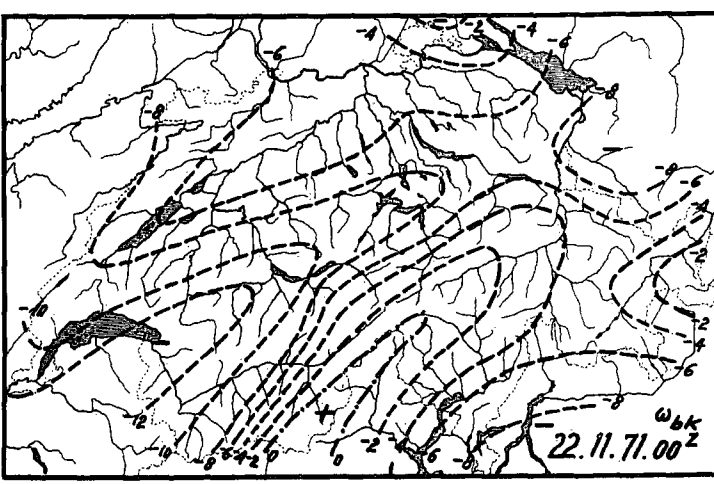
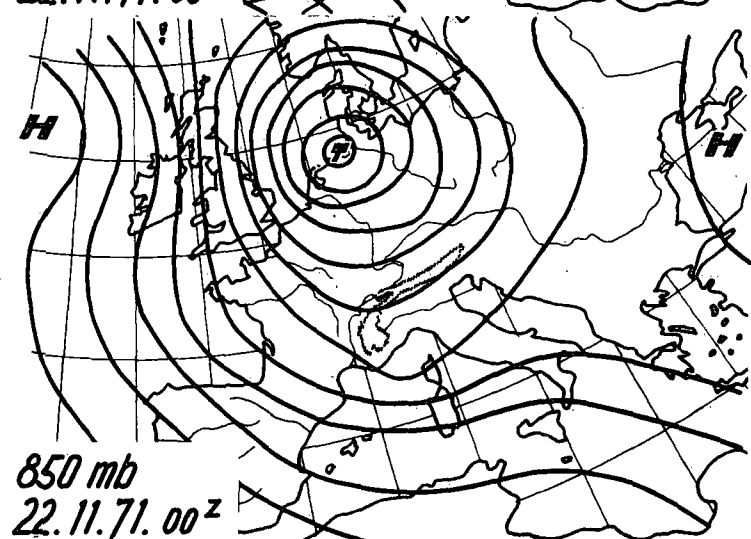
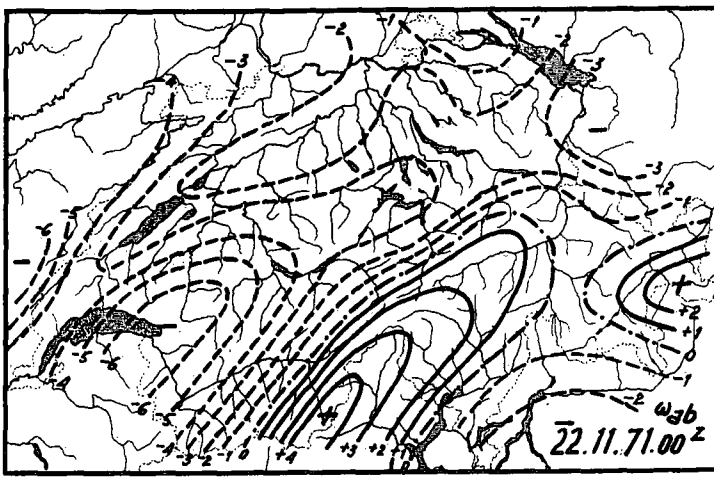
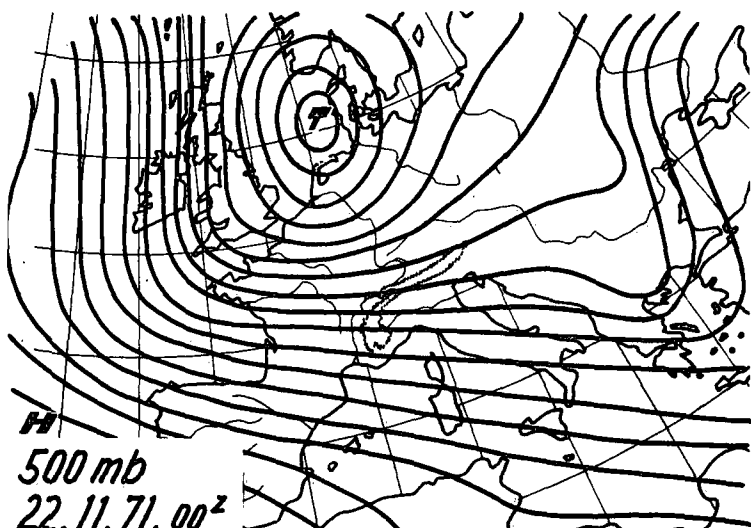


Abb. 6

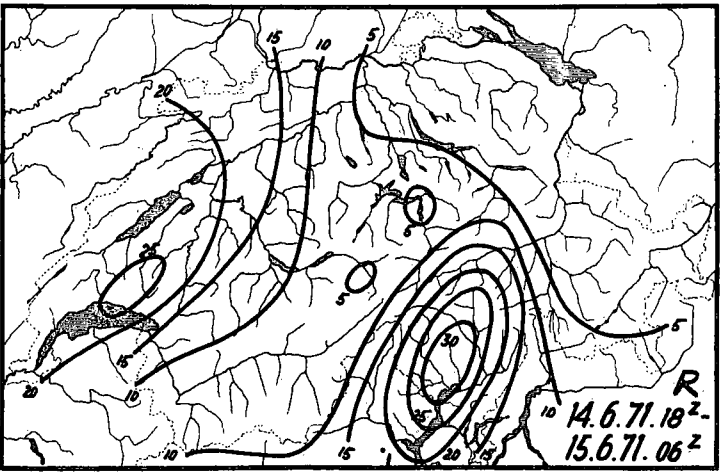
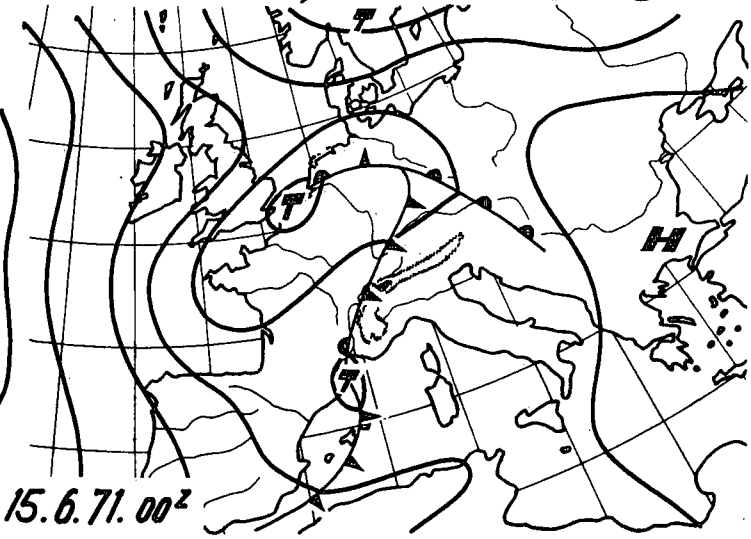
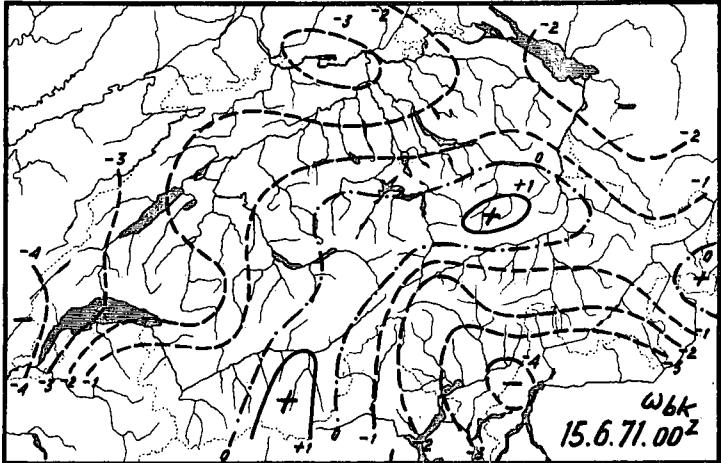
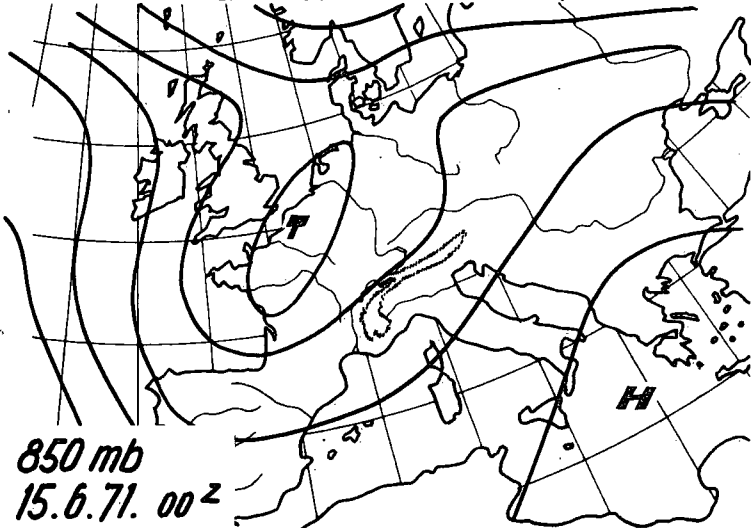
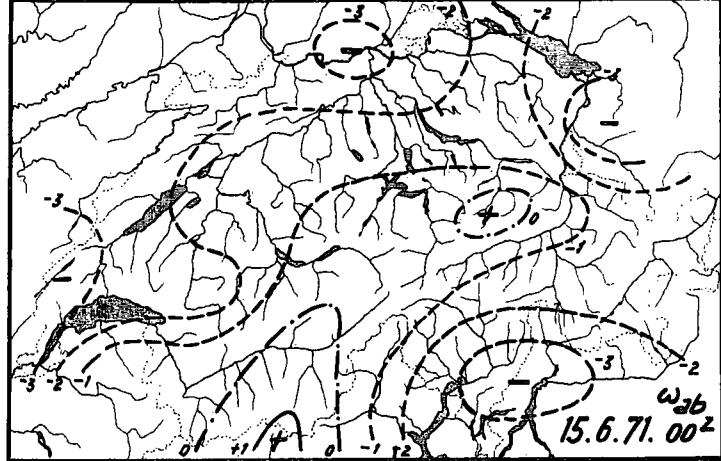
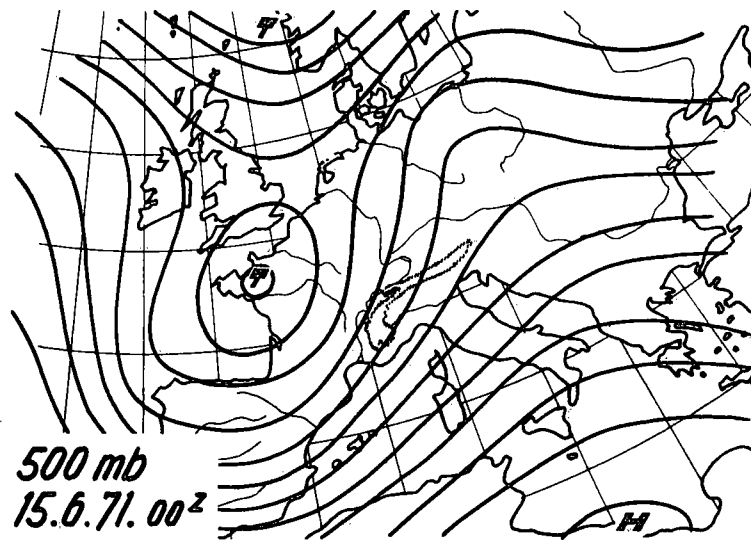


Abb. 7

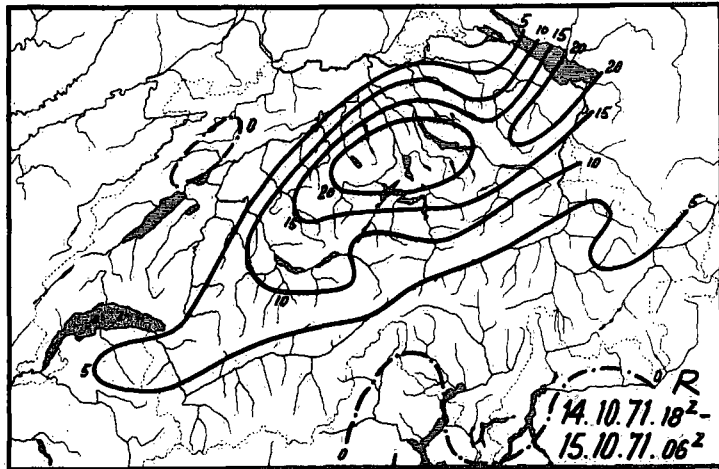
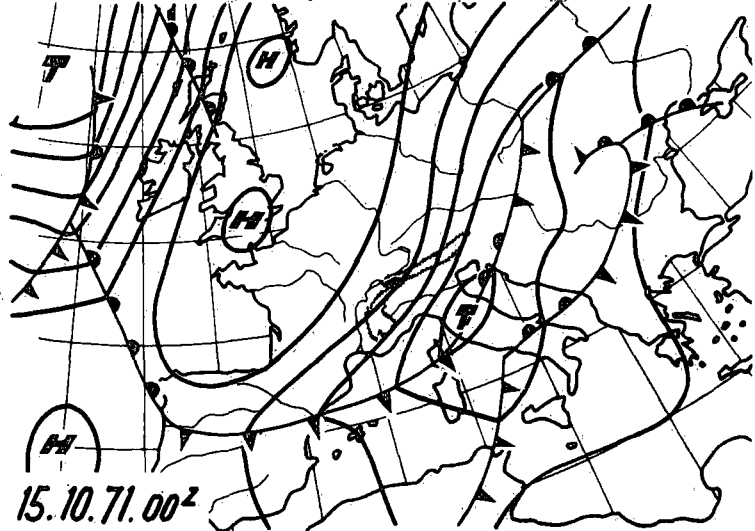
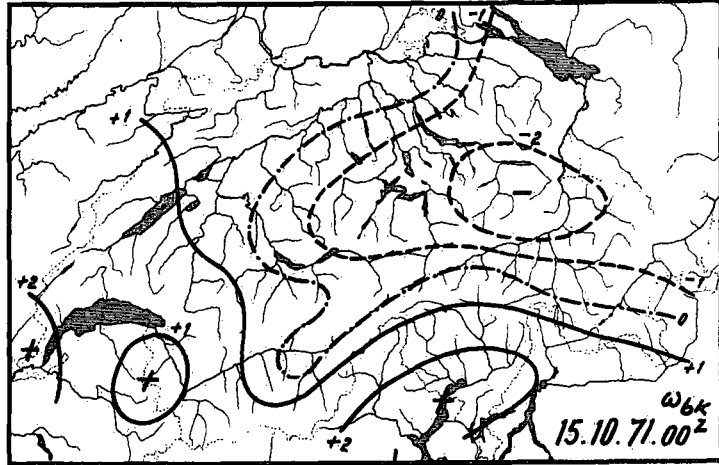
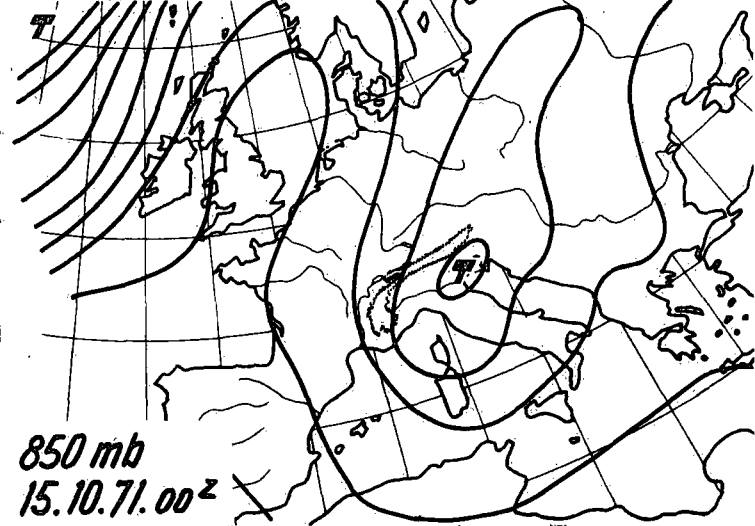
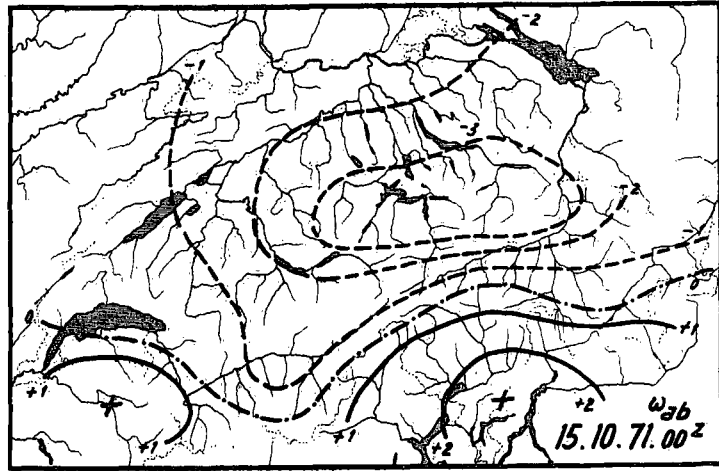
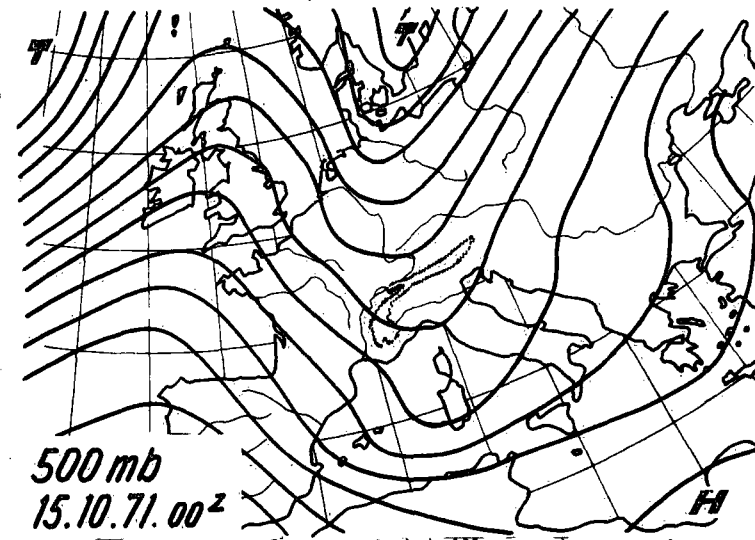


Abb. 8

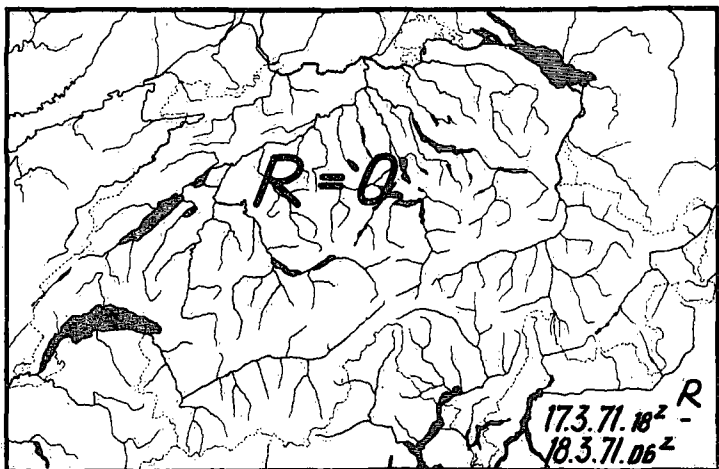
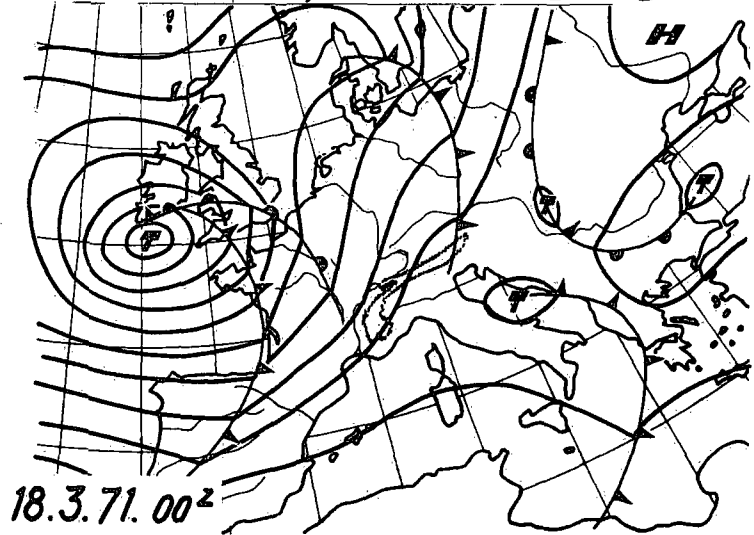
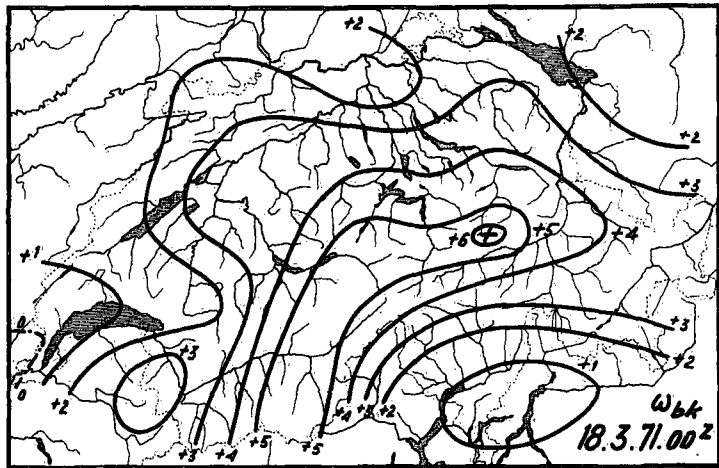
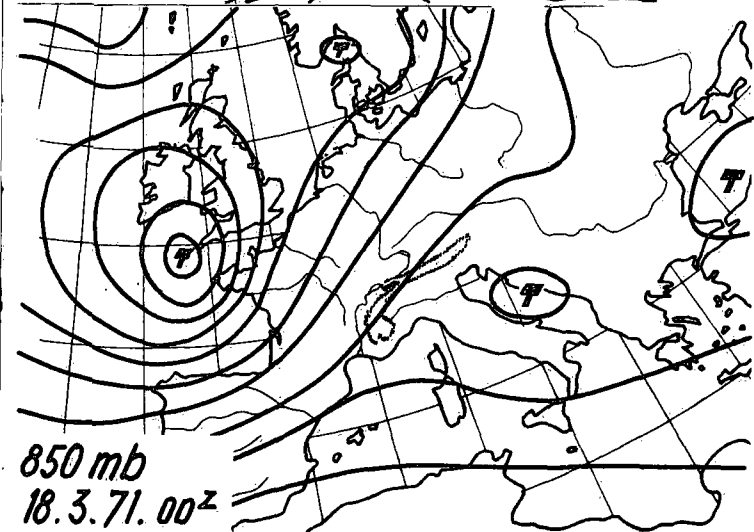
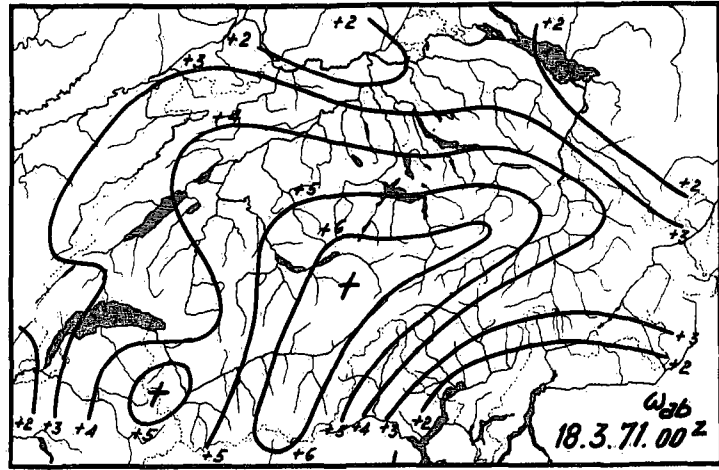
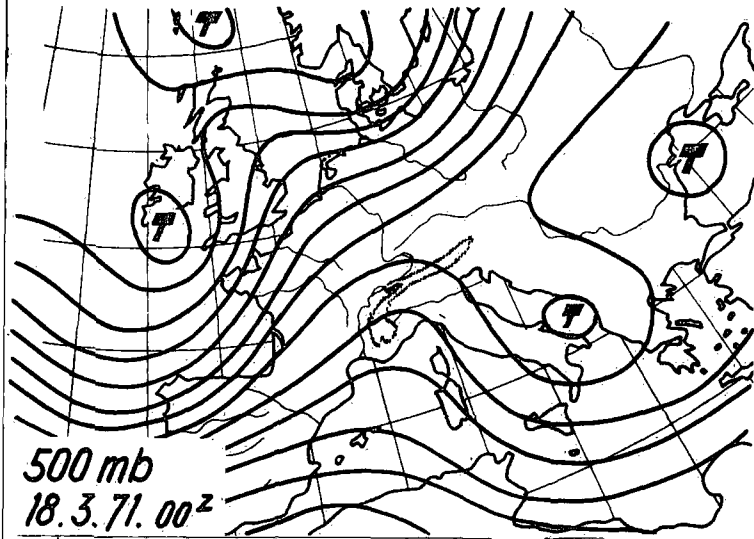
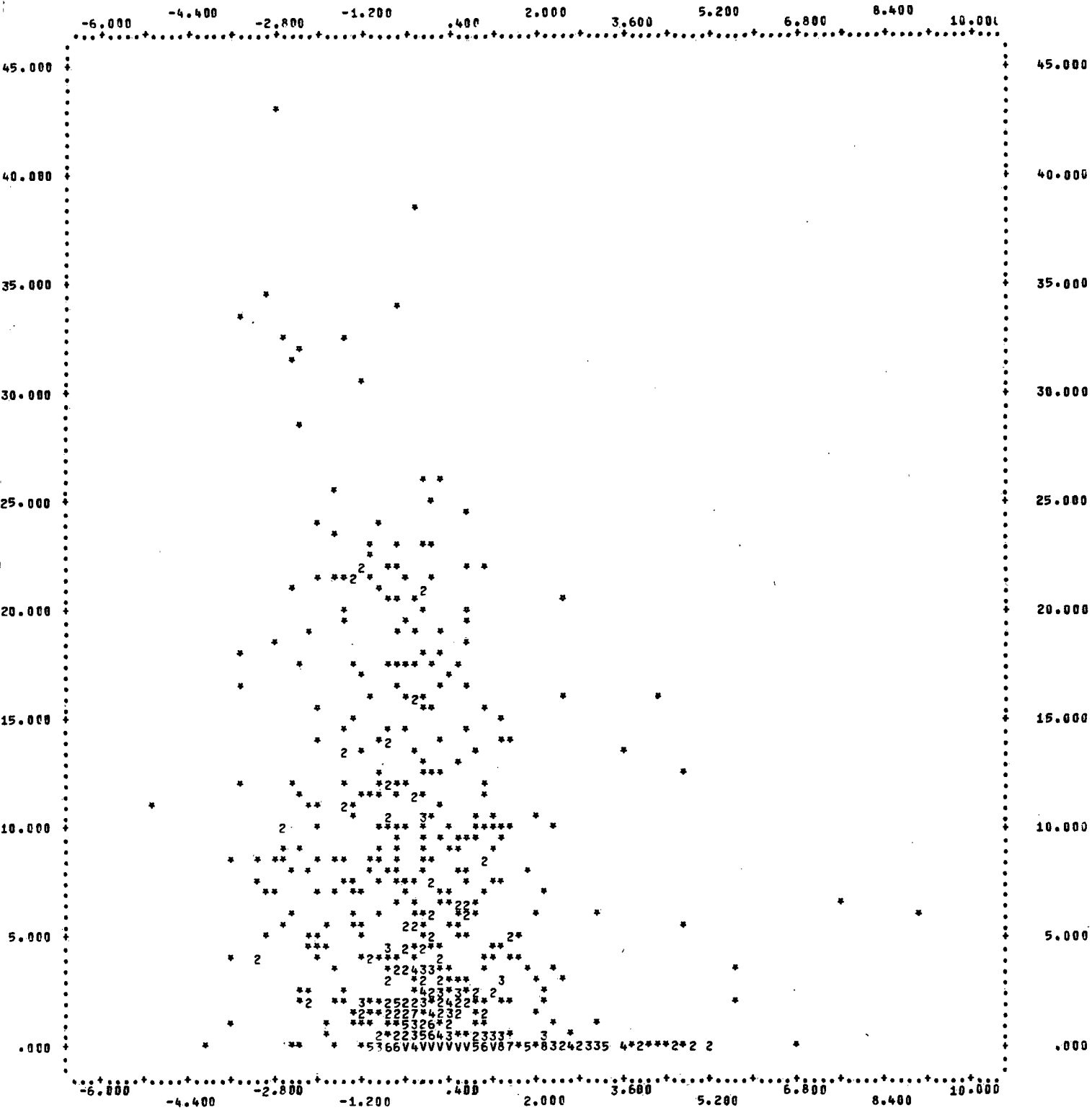


Abb. 9

NKRECHT = NIEDERSCHLAG R, WAAGRECHT = AUFWIND, FORMEL W



R (Mittelwert)

