

15

**Die quantitative Niederschlagsprognose winterlicher zyklonaler
Witterungslagen auf der Alpennordseite der Schweiz**

Von

H.W. Courvoisier

Herausgegeben von J. C. Thams, Locarno-Monti

Bisher erschienen

- | | | |
|---------|--|----------|
| Nr. 1 a | Uttinger H., Die Niederschlagsstunden in Zürich.
22 Seiten, 1962 | Fr. 5.50 |
| Nr. 1 b | Ambrosetti Fl., Die Niederschlagsstunden in Locarno-Monti.
12 Seiten, 1965 | Fr. 4.50 |
| Nr. 2 | Thams J. C., unter Mitarbeit von A. Aufdermaur, P. Schmid und E. Zenone.
Die Ergebnisse des Grossversuches III zur Bekämpfung des Hagels im
Tessin in den Jahren 1957–1963.
32 Seiten, 1966 | Fr. 5.— |
| Nr. 3 | Grütter M., Die bemerkenswertesten Niederschläge der Jahre
1948–1964 in der Schweiz.
20 Seiten, 1966 | Fr. 4.— |
| Nr. 4 | Schram K. und Thams J. C., [Redaktion], 9. Internationale Tagung für Alpine
Meteorologie in Brig und Zermatt, 14.–17. September 1966.
366 Seiten, 1967 | Fr. 30.— |
| Nr. 5 | Ambrosetti Fl. und Thams J. C., Die direkte Sonnenstrahlung auf die Flächen eines
nach Süden orientierten Würfels ohne Grundfläche in Locarno-Monti.
16 Seiten, 1967 | Fr. 3.50 |
| Nr. 6 | Schram K. und Thams J. C., Der Tagesgang der Abkühlungs- und
Aufwärmungsgrösse in Locarno-Monti.
20 Seiten, 1968 | Fr. 4.— |
| Nr. 7 | Ambrosetti Fl., Schram K. und Thams J. C., Die Intensität der direkten
Sonnenstrahlung in verschiedenen Spektralbereichen in
Locarno-Monti.
13 Seiten, 1968 | Fr. 3.50 |
| Nr. 8 | Uttinger H., Die Zahl der Tage mit Windspitzen von mindestens
20 Metern pro Sekunde in Zürich (1934–1967).
22 Seiten, 1968 | Fr. 5.— |
| Nr. 9 | Mäder F., Untersuchung über die Windverhältnisse in Bodennähe
bei verschiedenen Wetterlagen.
42 Seiten, 1968 | Fr. 7.— |
| Nr. 10 | Schram K., Die Windverhältnisse in der bodennahen Luftschicht
an einem Hang von etwa 25 Grad Neigung.
13 Seiten, 1968 | Fr. 4.— |
| Nr. 11 | Schüepp M., Kalender der Wetter- und Witterungslagen von 1955 bis 1967.
44 Seiten, 1968 | Fr. 7.— |
| Nr. 12 | Ackermann P., Die neue Radiosondenstation Payerne
der Schweizerischen Meteorologischen Zentralanstalt.
36 Seiten, 1968 | Fr. 6.— |
| Nr. 13 | Junod A., Contribution à la méthodologie granulométrique
des aérosols amicroscopiques.
70 Seiten, 1969 | Fr. 9.— |

DIE QUANTITATIVE NIEDERSCHLAGSPROGNOSE WINTERLICHER ZYKLONALER WITTERUNGSLAGEN AUF DER ALPENNORDSEITE DER SCHWEIZ

Von

H. W. COURVOISIER

Wetterdienst-Abteilung der Schweizerischen Meteorologischen Zentralanstalt, Zürich

ZUSAMMENFASSUNG

Als Beitrag zum "Internationalen Hydrologischen Dezenntium" wird eine Methode der quantitativen Niederschlagsprognose winterlicher zyklonaler Witterungslagen auf der Alpennordseite der Schweiz dargelegt. Es wird die Abhängigkeit der Niederschlagsmenge von Zustandsgrößen der atmosphärischen Felder analysiert und es werden zwei geeignete Zustandsgrößen (500 mb-Windgeschwindigkeit und Taupunkte 850, 700, 500 mb) für die Anwendung in der Prognose ausgewählt.

Als weitere Prognosegrundlagen werden die numerischen Vorhersagekarten und der vom Verfasser entwickelte Index für Niederschlagsperioden verwendet. Die Prognosemethode wurde an 25 Fällen getestet und das Ergebnis kann als befriedigend bezeichnet werden.

RESUME

On décrit ici une méthode de prévision quantitative des précipitations par type de temps cyclonique. Cette méthode est applicable en hiver et se limite à la partie suisse du nord des Alpes. Il s'agit d'une contribution à la "Décennie hydrologique internationale". On a analysé la dépendance des quantités de précipitations de paramètres caractérisant les champs atmosphériques. On en a retenu deux qui sont utilisés dans l'établissement de la prévision: la vitesse du vent à 500 mb et les points de rosée à 850, 700 et 500 mb.

Comme bases de départ de la prévision, on utilise en outre les cartes-prévision numériques et l'index pour les périodes de précipitations développé ailleurs par l'auteur. La présente méthode de prévision a été appliquée à 25 cas et les résultats obtenus peuvent être qualifiés de satisfaisants.

RIASSUNTO

Viene descritto un metodo di previsione quantitativa delle precipitazioni di tipo ciclonico. Questo metodo è applicabile in inverno e limitatamente alla parte svizzera del nord delle Alpi. Si tratta d'un contributo al "Decennio idrologico internazionale". Si è analizzata la dipendenza delle quantità di precipitazioni da parametri caratterizzanti i campi atmosferici. Ne sono stati scelti due, utilizzati nella preparazione delle previsioni: la velocità del vento a 500 mb e i punti di rugiada a 850, 700 e 500 mb.

Come base di partenza per la previsione, si utilizzano inoltre le carte numeriche previste e l'indice per i periodi di precipitazioni sviluppato precedentemente dall'autore. Il metodo di previsione in questione è stato applicato a 25 casi e il risultato ottenuto può essere giudicato come soddisfacente.

SUMMARY

As a contribution to the "International hydrological decade" a method for a quantitative forecast of precipitation from cyclonic weather situations during winter on the north side of the Alps in Switzerland is presented. The dependence of the amount of precipitation on the variables of the atmospheric fields is analyzed, and two variables, (500 mb wind speed and dew points at 850, 700, 500 mb) suitable for use in making the forecast, are chosen.

Maps of the numerical forecast as well as the index for periods of precipitation, developed by the author, are used as additional bases for forecasting. The forecasting method was tested in 25 cases and the results can be designated as satisfactory.

EINLEITUNG

Am Problem der quantitativen Niederschlagsprognosen wird heute in vielen Ländern gearbeitet. Vorhersagen der Niederschlagsmenge sind vor allem für die Hydrologie, in Gebirgsländern aber auch für den Lawinenwarndienst, den Verkehr und den Tourismus von Bedeutung.

Die vorliegende Arbeit stellt das erste Resultat einer grösseren Untersuchung dar und dient als Beitrag zum "Internationalen Hydrologischen Dezennium."

Der Niederschlag ist in der Schweiz nicht nur klimatologisch, sondern auch in bezug auf seine Wetterlagenabhängigkeit eingehend untersucht worden. So sind vor allem die Entstehungsbedingungen grösserer Niederschläge in allen Gegenden der Schweiz seit Jahrzehnten untersucht und in den Annalen der Schweizerischen Meteorologischen Zentralanstalt, zuerst von R. BILLWILLER II, dann von M. GRUETTER, dargestellt worden. GRUETTER (1966) hat eine Zusammenstellung der Fälle sehr grosser Niederschlagsmengen der Jahre 1948 - 1964 gegeben. Er hat darin die Wetterlagen, die ergiebige Niederschläge begünstigen, klassifiziert und die geographische Verteilung der Niederschläge für typische Fälle in Karten dargestellt.

Dank dieser Untersuchungen sind die charakteristischen atmosphärischen Bedingungen, die grosse Niederschlagsmengen verursachen, heute bekannt. Es sind dies vor allem quasi-stationäre, wellenbildende Fronten, Staulagen (im Winter in Verbindung mit einem gegen die Alpen gerichteten Jet-Stream), quasi-stationäre Höhentiefs (Kaltlufttropfen), Vb-artige Lagen sowie starke Instabilität. Es ist auch bekannt, dass bei kombiniertem Auftreten mehrerer dieser Bedingungen besonders ergiebige Niederschläge fallen.

Die Beziehung zwischen den einzelnen Wetterlagen und der Niederschlagswahrscheinlichkeit und -menge ist von H. W. COURVOISIER (1957), M. BIDER und M. KRAMMER (1960), M. SCHÜEPP und F. FLIRI (1965, 1967) für verschiedene Gebiete der Schweiz bearbeitet worden. Das östliche Randgebiet der Schweiz ist in der "Wetterlagenkunde von Tirol" von F. FLIRI (1962) enthalten. Darin ist für alle Alpentäler die Struktur der reliefbedingten Auswirkungen der Wetterlagen auf den Niederschlag dargestellt worden.

Bei den Untersuchungen über die Beziehung zwischen Wetterlage und Niederschlagsmenge muss man sich aber im klaren sein, dass mit den Methoden der Wetterlagen-Klimatologie das Problem der quantitativen Niederschlagsprognose nur in erster Näherung gelöst ist.

PRINZIPIELLE FRAGEN ZUR QUANTITATIVEN NIEDERSCHLAGSPROGNOSE IN DER SCHWEIZ

Was uns heute an aerologischem Datenmaterial einerseits und an numerischen Vorhersagekarten andererseits zur Verfügung steht, erlaubt genauere Analysen der Niederschlagsbildung und bessere Niederschlagsmengenprognosen als dies nur aufgrund von Wetterlagen möglich ist.

Wir gehen deshalb hier zu einer Methode über, die auf der Abhängigkeit der Niederschlagsmenge von Zustandsgrössen der atmosphärischen Felder basiert. Diese Zustandsgrössen sind im Gegensatz zu einer Wetterlage quantitativ erfassbare Grössen und ermöglichen daher die Ermittlung quantitativer Beziehungen. Aufgrund der gefundenen statistischen Beziehungen zwischen Zustandsgrössen und Niederschlagsmenge können dann die numerischen Vorhersagekarten objektiv-quantitativ interpretiert werden.

Bei der Frage, welche Zustandsgrössen zur Abhängigkeitsanalyse verwendet werden sollen, muss man prinzipiell in Betracht ziehen, dass die Grössen sowohl einen physikalisch-ursächlichen Zusammenhang mit der Niederschlagsmenge aufweisen als auch vorhersagbar sein müssen.

Da die Niederschlagsmenge in erster Linie von der Vertikalbewegung der Luft abhängt, wäre für eine quantitative Beziehung die Vertikalbewegung, zusammen mit einem Feuchtigkeitsparameter, eine sehr geeignete Zustandsgrösse. Versuche zur Bestimmung der 24-stündigen Niederschlagsmenge mit Hilfe der aus aktuellen Radiosondenwerten berechneten Vertikalgeschwindigkeit sind von W. MÜLLER (1967) für ein ebenes und ein alpines Gebiet gemacht worden. Für das ebene Gebiet (Normandie und Bretagne) waren die Ergebnisse des Winterhalbjahres gut, für das alpine Gebiet (Alpen Nordseite der Schweiz) wegen des Gebirgseinflusses weniger gut.

Für die Prognose der Niederschlagsmengen für mehr als 24 Stunden können teilweise schon numerische Prognosen der Vertikalgeschwindigkeit verwendet werden (USA, England, Schweden, Bundesrepublik Deutschland). In diesen numerischen Prognosen wird aber vorläufig nur die grossräumig gemittelte Vertikalgeschwindigkeit angegeben. Dies mag für ebene Gebiete ausreichend sein, für die Schweiz als Gebirgsland jedoch nicht. Für die Schweiz wäre eine speziell auf die Gebirgseinflüsse bezogene Berechnungsmethode der Vertikalgeschwindigkeit notwendig, und hierfür müssten erst die theoretischen Grundlagen entwickelt werden.

Da die Verwendung der Vertikalgeschwindigkeit aus numerischen Prognosen heute für die Schweiz noch nicht in Frage kommt, werden hier andere Zustandsgrössen der atmosphärischen Felder zur Vorhersage der Niederschlagsmengen gebraucht. Welche Zustandsgrössen ausgewählt wurden, wird später dargelegt werden.

Weitere prinzipielle Fragen betreffen die Gebietswahl, die Jahreszeit und die Gültigkeitsdauer der quantitativen Niederschlagsprognosen. Was die Gebietswahl anbelangt, so scheint mir für den Anfang ein Gebiet wie die ganze Alpen Nordseite der Schweiz vorteilhafter zu sein als ein kleines Gebiet. Die Alpen Nordseite ist dabei im Süden durch den Waadtländer - Berner - Urner - Glarner Alpenkamm begrenzt. Bei Verwendung der ganzen Alpen Nordseite können zunächst quantitative Beziehungen allgemeiner Art ermittelt werden, was bei der Verwendung kleiner Gebiete fraglich wäre. Ausserdem ist die Chance für eine zutreffende Niederschlagsmengenprognose grösser bei Verwendung eines grossen Gebietes als eines kleinen Gebietes, da sich im grossen Gebiet die kleinräumigen Mengenunterschiede ausgleichen (Gebietsmittel).

Als Jahreszeit für quantitative Niederschlagsprognosen kommt zunächst das Winterhalbjahr in Betracht. Die advektiven Winterniederschläge sind im allgemeinen leichter vorherzusagen als die sommerlichen Niederschläge. Wenn auch vor allem bei Staulagen regionale Mengenunterschiede vorkommen, so treten doch extreme örtliche Unterschiede, wie sie im Sommer bei Gewittern typisch sind, im Winter nur selten auf. Der Instabilitätseffekt ist für die Alpen Nordseite im Winterhalbjahr von unwesentlicher Bedeutung und braucht daher hier nicht berücksichtigt zu werden.

Da besonders die Niederschlagsmengenprognose zyklonaler Witterungslagen von Interesse ist, kann hier auf der bereits seit längerer Zeit verwendeten Prognosemethode von Niederschlagsperioden (= zyklonalen Witterungslagen) aufgebaut werden (COURVOISIER 1957). Unter einer Niederschlagsperiode ist eine zyklonale Witterungslage von durchschnittlich 4 Tagen Dauer zu verstehen, wobei von den 4 Tagen mindestens 3 Niederschlagstage ($RR \geq 0.3$ mm) sein müssen und die 4-tägige Niederschlagsmenge im Gebietsmittel mindestens 10 mm betragen muss. Niederschlagsperioden können aufgrund des vom Verfasser entwickelten Index mit einer Eintreffwahrscheinlichkeit von 80 % im Winterhalbjahr vorhergesagt werden. Der Index für Niederschlagsperioden besteht aus einer Gruppe von quantitativen synoptischen Kriterien, die bei kombiniertem Auftreten eine hohe Wahrscheinlichkeit für eine Niederschlagsperiode gewähren. Wegen der durchschnittlichen Dauer der Niederschlagsperioden von 4 Tagen wurde die Gültigkeitsdauer der quantitativen Niederschlagsprognosen auf 4 Tage festgelegt.

GRUNDLAGENMATERIAL

Als Niederschlagsstationen wurden 25 Stationen auf der Alpennordseite verwendet (s. Abb. 1).

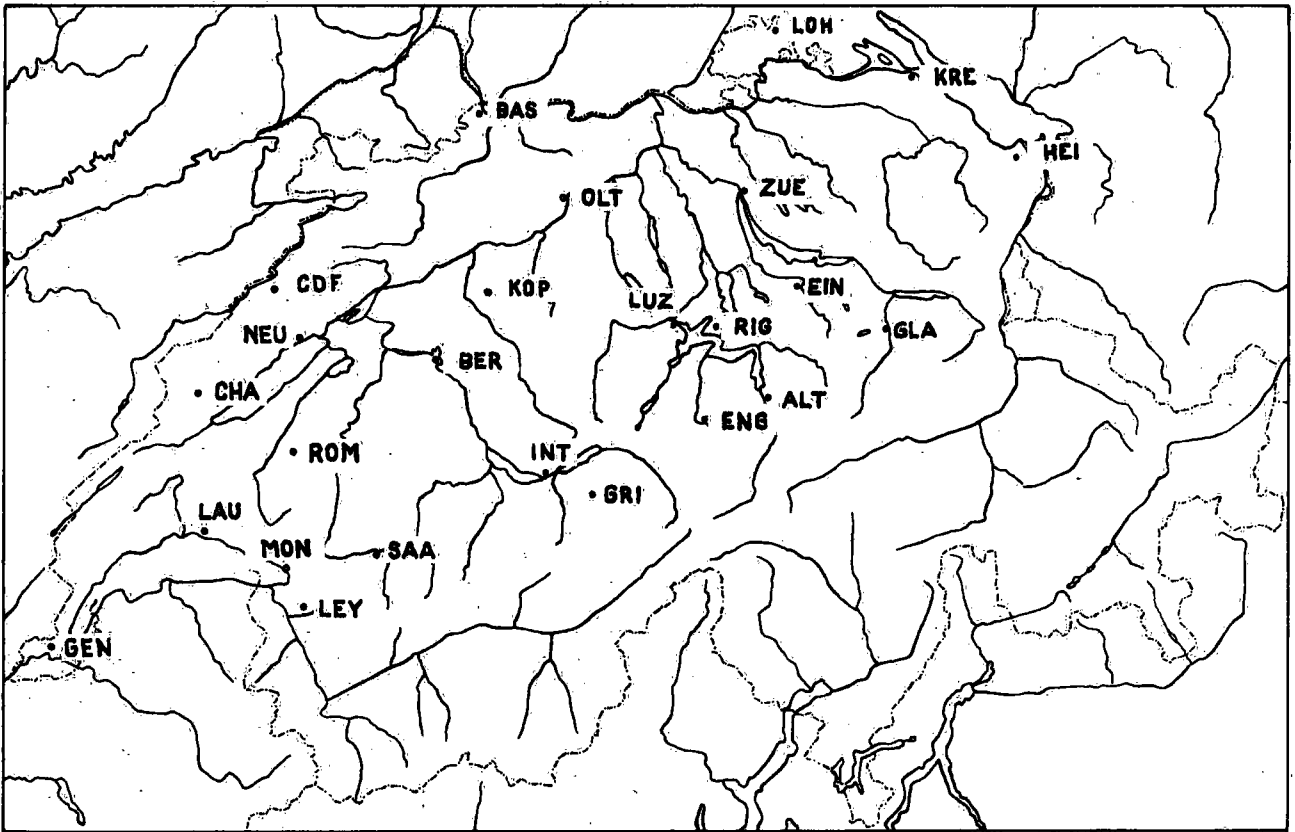


Abb. 1 Die als Grundlagenmaterial verwendeten 25 Niederschlagsstationen auf der Alpennordseite der Schweiz.

Die Niederschlagsstationen sind:

Abkürzung	Station	Höhe	Abkürzung	Station	Höhe
BAS	Basel	317 m	INT	Interlaken	574 m
OLT	Olten	413 m	GRI	Grindelwald	1040 m
CDF	Chaux-de-Fonds	990 m	LUZ	Luzern	498 m
NEU	Neuchâtel	487 m	ENG	Engelberg	1018 m
CHA	Chasseron	1601 m	RIG	Rigi-Kaltbad	1493 m
ROM	Romont	764 m	EIN	Einsiedeln	914 m
GEN	Genève-Cointrin	430 m	ALT	Altdorf	451 m
LAU	Lausanne	618 m	GLA	Glarus	490 m
MON	Montreux-Clarens	408 m	ZUE	Zürich	569 m
LEY	Leysin	1358 m	LOH	Lohn	643 m
BER	Bern	572 m	KRE	Kreuzlingen	446 m
KOP	Koppigen	482 m	HEI	Heiden	811 m
SAA	Saanen-Gstaad	1155 m			

Da alle diese Stationen unterhalb 1700 m liegen, spielen die Probleme der Niederschlagsmessung im Hochgebirge keine wesentliche Rolle. Andererseits bleibt durch diese Stationsauswahl die Gültigkeit der quantitativen Niederschlagsprognosen auf die unteren und mittleren Höhenlagen beschränkt. Was die Gebietsrepräsentation betrifft, so dürften 25 Stationen für die unteren und mittleren Lagen der Alpennordseite bei den winterlichen Advektions-Wetterlagen im allgemeinen genügen.

Die Werte der Zustandsgrößen der atmosphärischen Felder wurden zum Teil dem Kalender der Wetter- und Witterungslagen von M. SCHÜEPP (1968), zum Teil den tabellierten Radiosondenwerten von Payerne entnommen oder aus Wetterkarten bestimmt. Für die Zustandsgrößen wurden nur aktuelle Werte verwendet.

Das Niederschlagsmaterial besteht aus den 4-tägigen Niederschlagsmengen von 53 Niederschlagsperioden der Jahre 1951 - 1967 (Stichprobe). Von ursprünglich 61 Niederschlagsperioden mussten die 8 Fälle mit einer mittleren 500 mb-Windrichtung aus S bis SW ausgeschieden werden, da sie wegen des Föhneinflusses zur Untersuchung nicht geeignet sind. Von November 1965 bis März 1967 wurden alle Fälle verwendet, bei denen der Index eine Niederschlagsperiode anzeigte. Von 1958 bis Oktober 1965 wurde nur ein Teil aller Niederschlagsperioden verwendet. Die Fälle vom 18. - 21. 1. 51 und 22. - 25. 12. 54 wurden darum verwendet, weil sie wegen ihrer grossen Niederschlagsmengen die statistische Basis der Stichprobe verbreitern.

Die Daten und die 4-tägigen Niederschlagsmengen (Gebietsmittel der Alpennordseite) der 53 untersuchten Fälle sind:

Datum des Beginns der Niederschlagsperiode		18. 1. 51	14. 1. 54	5. 12. 54	22. 12. 54	6. 1. 58	
Niederschlagsmenge (mm)		53	28	19	61	46	
Datum	6. 2. 58	3. 1. 61	6. 1. 61	17. 10. 61	3. 11. 61	2. 12. 61	9. 12. 61
Menge (mm)	41	24	10	29	15	37	62
Datum	31. 12. 61	10. 1. 62	22. 1. 62	5. 2. 62	13. 2. 62	27. 3. 62	10. 12. 62
Menge (mm)	57	52	19	15	44	38	26
Datum	16. 12. 62	10. 3. 63	4. 10. 63	8. 10. 64	15. 11. 64	3. 12. 64	9. 1. 65
Menge (mm)	41	30	52	42	41	24	3
Datum	16. 1. 65	12. 11. 65	19. 11. 65	21. 11. 65	26. 11. 65	2. 12. 65	10. 12. 65
Menge (mm)	32	17	44	35	37	44	40
Datum	21. 12. 65	23. 12. 65	31. 12. 65	20. 1. 66	7. 2. 66	11. 3. 66	24. 3. 66
Menge (mm)	22	23	32	25	47	33	32
Datum	27. 3. 66	16. 11. 66	28. 11. 66	2. 12. 66	9. 12. 66	20. 12. 66	24. 12. 66
Menge (mm)	28	20	26	30	37	25	21
Datum	31. 12. 66	18. 2. 67	27. 2. 67	10. 3. 67	18. 3. 67	26. 3. 67	
Menge (mm)	34	43	29	32	39	23	

Die Häufigkeitsverteilung, der Mittelwert und die Standardabweichung der 4-tägigen Niederschlagsmengen wurden aus den Niederschlagsperioden der Zeit November 1965 bis März 1967 sowie aus den Fällen der Testprognosen von Oktober 1967 bis Anfang Dezember 1969 (insgesamt 51 Fälle) bestimmt.

Die Häufigkeitsverteilung der 4-tägigen Niederschlagsmengen zyklonaler Witterungslagen auf der Alpennordseite liegt im Signifikanzbereich einer Normalverteilung (χ^2 -Test, Signifikanzzahl 0.01). Der Mittelwert der Niederschlagsmenge beträgt 28.1 mm, die Standardabweichung 12.4 mm.

ABHAENIGKEITSANALYSE DER NIEDERSCHLAGSMENGE VON ZUSTANDSGROESSEN DER ATMOSPHAERISCHEN FELDER

Zur Abhängigkeitsanalyse wurden Zustandsgrößen des Druck-, Wind-, Temperatur- und Feuchtigkeitsfeldes verwendet. Als Arbeitsmethode wurde die Korrelations- und Regressions-technik gebraucht. Es wurden Zustandsgrößen ausgewählt, bei denen ein physikalisch-ursächlicher Zusammenhang offensichtlich ist oder zumindest angenommen werden kann. Die Zustandsgrößen werden auch Prädiktoren (= voraussagende Größen) genannt, die Niederschlagsmenge ist der Prädiktand (= vorauszusagende Größe).

Die ausgewählten Prädiktoren und die Korrelationskoeffizienten zwischen den Prädiktoren und der 4-tägigen Niederschlagsmenge sind:

- 1) Bodendruck: -0.28 *
- 2) Höhe der 850 mb-Fläche: -0.06 (nicht signifikant)
- 3) Höhe der 500 mb-Fläche: 0.12 (nicht signifikant)
- 4) Windrichtung 850 mb (nur Richtungsbereich SW-NNW): 0.00
- 5) Windrichtung 500 mb (nur Richtungsbereich WSW-NNW): 0.07 (nicht signifikant)
- 6) Windgeschwindigkeit 850 mb: 0.43 ***
- 7) Windgeschwindigkeit 500 mb: 0.55 ***
- 8) Windgeschwindigkeit 300 mb: 0.28 *
- 9) Gradient der Relativen Topographie 500/1000 mb pro 4 Grad (Thermischer Wind): 0.40 **
- 10) Mittel der Taupunktdifferenzen 850, 700, 500 mb: -0.50 ***
- 11) Taupunkt 850 mb: 0.46 ***
- 12) Taupunkt 700 mb: 0.58 ***
- 13) Taupunkt 500 mb: 0.51 ***
- 14) Mittel der Taupunkte 850, 700, 500 mb: 0.55 ***
- 15) Relative Topographie 500/1000 mb (Wärmegehalt der unteren und mittleren Troposphäre): 0.40 **
- 16) Vertikale Windrichtungsscherung zwischen 850 und 500 mb: 0.18 (nicht signifikant)
- 17) Vertikale Windgeschwindigkeitsscherung zwischen 850 und 500 mb: 0.28 *

-
- * Signifikanzzahl 0.05
** Signifikanzzahl 0.01
*** Signifikanzzahl 0.001

Eine in dieser Liste fehlende Zustandsgröße, die aufgrund theoretischer Erkenntnisse für ebene Gebiete einen Zusammenhang mit der Niederschlagsmenge zeigen sollte, nämlich die Vorticityadvektion, wurde in dieser Arbeit erst wenig untersucht. Es wurden bisher nur die Werte der Vorticityadvektion für 40 einzelne Niederschlagstage graphisch bestimmt. Das Ergebnis war nicht erfolversprechend. Die Modifikation des Druckfeldes im Alpengebiet lässt offenbar den Einfluss der Vorticityadvektion nicht genügend zur Geltung kommen. Nehmen wir zum Beispiel den Fall, dass sich ein Hochdruckkeil von Westen her auf der Alpennordseite bildet - und dies bedeutet antizyklonale Vorticityadvektion - so herrscht vielfach eine Staulage mit Niederschlägen. Aber auch im 500 mb-Niveau, das ebenfalls untersucht wurde, gibt es häufig Fälle mit geradliniger Strömung, bei denen die Vorticityadvektion null ist und doch beträchtliche Niederschläge fallen. Es wurden auch Fälle festgestellt, bei denen in Verbindung mit einem Warmfrontdurchgang aus NW im 500 mb-Niveau antizyklonale Vorticityadvektion auftrat und ebenfalls Niederschläge fielen.

Betrachten wir nun die Korrelationskoeffizienten der einzelnen Prädiktoren. Der Bodendruck zeigt mit einem Korrelationskoeffizienten von -0.28 zwar einen Zusammenhang mit der Niederschlagsmenge, jedoch keinen sehr guten. Dies war aus der Erfahrung im Wetterdienst in einem Gebirgsland zu erwarten. Beim Uebergang vom Boden zum 500 mb-Niveau wechselt der Korrelationskoeffizient das Vorzeichen. Er wird damit im 850 mb-Niveau nahezu null. Der Korrelationskoeffizient von 0.12 bei der Höhe der 500 mb-Fläche zeigt, dass kein signifikant

negativer Zusammenhang, wie beim Bodendruck, vorhanden ist. Demgegenüber fand H. MOLLWO (1961) für Frankfurt a. M. eine eindeutig negative Korrelation zwischen der 500 mb-Höhe und der Niederschlagswahrscheinlichkeit. Dazu ist zu sagen, dass wahrscheinlich weniger die Gebietsunterschiede zwischen Frankfurt und der Alpennordseite der Schweiz für die unterschiedliche Korrelation massgebend sind, sondern eher der Unterschied zwischen der Niederschlagsmenge und der Niederschlagswahrscheinlichkeit. Vermutlich gilt sowohl für Frankfurt wie für die Alpennordseite der Schweiz, dass zwar die Niederschlagswahrscheinlichkeit bei unternormaler 500 mb-Höhe grösser ist als bei übernormaler Höhe, dass aber die Mengen bei übernormaler Höhe wegen des grösseren Wärme- und Wasserdampfgehaltes der Luftmassen grösser als bei unternormaler Höhe sind.

Die Korrelationskoeffizienten der Windrichtung 850 und 500 mb, die allerdings nur die Richtungsbereiche SW-NNW (850 mb) bzw. WSW-NNW (500 mb) umfassen, sind erstaunlich klein. Die Erklärung für die kleinen Werte der Korrelationskoeffizienten bei der Höhenwindrichtung dürfte darin liegen, dass einerseits bei Nordwestlagen die gesamte Alpennordseite nicht ein ausgesprochenes Staugebiet ist, und dass andererseits auch die WSW- und Westlagen wegen des durchschnittlich höheren Wasserdampfgehaltes der Luft beträchtliche Niederschlagsmengen, zumindest im Mittelland, in der Jurazone und im Westschweizer Alpengebiet, verursachen können. Auch die Korrelation zwischen der vertikalen Windrichtungsscherung und der Niederschlagsmenge ist kleiner, als man erwarten würde. Ein möglicher Grund hierfür wäre, dass 4-tägige Mittel der Zustandsgrössen verwendet wurden, und dass damit Windrichtungsscherungen von Einzeltagen ausgeglichen werden.

Die Korrelationskoeffizienten der übrigen Prädiktoren entsprechen etwa der Erwartung. Bei der Höhenwindgeschwindigkeit nimmt der Korrelationskoeffizient deutlich zwischen dem 500 mb- und dem 300 mb-Niveau ab. Dies dürfte weniger auf Unterschiede in der Vertikalkomponente der Windgeschwindigkeit zurückzuführen sein als darauf, dass das 300 mb-Niveau mit Temperaturen von -40 bis -55° über dem "Niederschlagsproduktionsniveau" der advektiven Winterniederschläge liegt.

AUSWAHL VON PRAEDIKTOREN FÜR DIE ANWENDUNG IN DER PROGNOSE

Von den Zustandsgrössen mit einem grösseren Korrelationskoeffizienten wurden 2 als Prädiktoren für die Anwendung in der quantitativen Niederschlagsprognose ausgewählt: die 500 mb-Windgeschwindigkeit und die Taupunkte 850, 700, 500 mb. Die 500 mb-Windgeschwindigkeit zeigt nicht nur den höchsten Korrelationskoeffizienten unter den Höhenwindgeschwindigkeiten, sondern auch eine höhere Korrelation als der Gradient der Relativen Topographie 500/1000 mb; zudem ist sie mit den numerischen Prognosen gut vorhersagbar. Für die 850 mb-Windgeschwindigkeit und den Gradienten der Relativen Topographie 500/1000 mb stehen dagegen heute keine gut brauchbaren numerischen Prognosen im Routinedienst zur Verfügung. Für die 500 mb-Windgeschwindigkeit kann der physikalisch-ursächliche Zusammenhang mit der Niederschlagsmenge darin gesehen werden, dass geringe Windgeschwindigkeiten im Winter im allgemeinen frontenfreie Gebiete darstellen, während grosse Windgeschwindigkeiten Frontalzonen und damit grosse Vertikalbewegungen repräsentieren. Zudem wird mit der Höhenwindgeschwindigkeit bei den Richtungen WNW bis NNW im eigentlichen Gebirgsgebiet der Alpennordseite der orographische Effekt zum Ausdruck gebracht.

Für den zweiten Prädiktor, die Taupunkte 850, 700, 500 mb, sind zwar keine numerischen Prognosen erhältlich, doch können sie aufgrund des numerisch vorausberechneten 500 mb-Windfeldes recht gut geschätzt werden. Wenn auch die Taupunkte auf Vertikalbewegungen reagieren, so weisen sie doch verhältnismässig konservative Luftmasseneigenschaften auf, und daher können ihre Werte vom Herkunftsgebiet zum Vorhersagegebiet ohne grössere Fehler extrapoliert werden. Die Verwendung der Taupunktdifferenzen wäre dagegen ungünstiger, da erstens der Korrelationskoeffizient etwas kleiner als derjenige der Taupunkte ist, und zweitens die Taupunktdifferenzen weniger konservativ als die Taupunkte sind. Bei der Frage der Verwendung des 700 mb-Taupunktes (Korrelationskoeffizient 0.58) oder des Mittels der Taupunkte 850, 700, 500 mb (Korrelations-

koeffizient 0.55) wurde zugunsten der Taupunkte 850, 700, 500 mb entschieden, und zwar deshalb, weil zwischen Herkunftsgebiet und Vorhersagegebiet Vertikalaustausch stattfindet und daher 3 Niveaus günstiger als nur ein Niveau sein dürften.

Die zusätzliche Verwendung der Relativen Topographie 500/1000 mb als Mass für den Wärmegehalt und die Wasserdampfkapazität der Luftmassen wurde als unnötig erachtet, da mit den Taupunkten bereits ein unmittelbares Mass für den Wasserdampfgehalt erfasst wird.

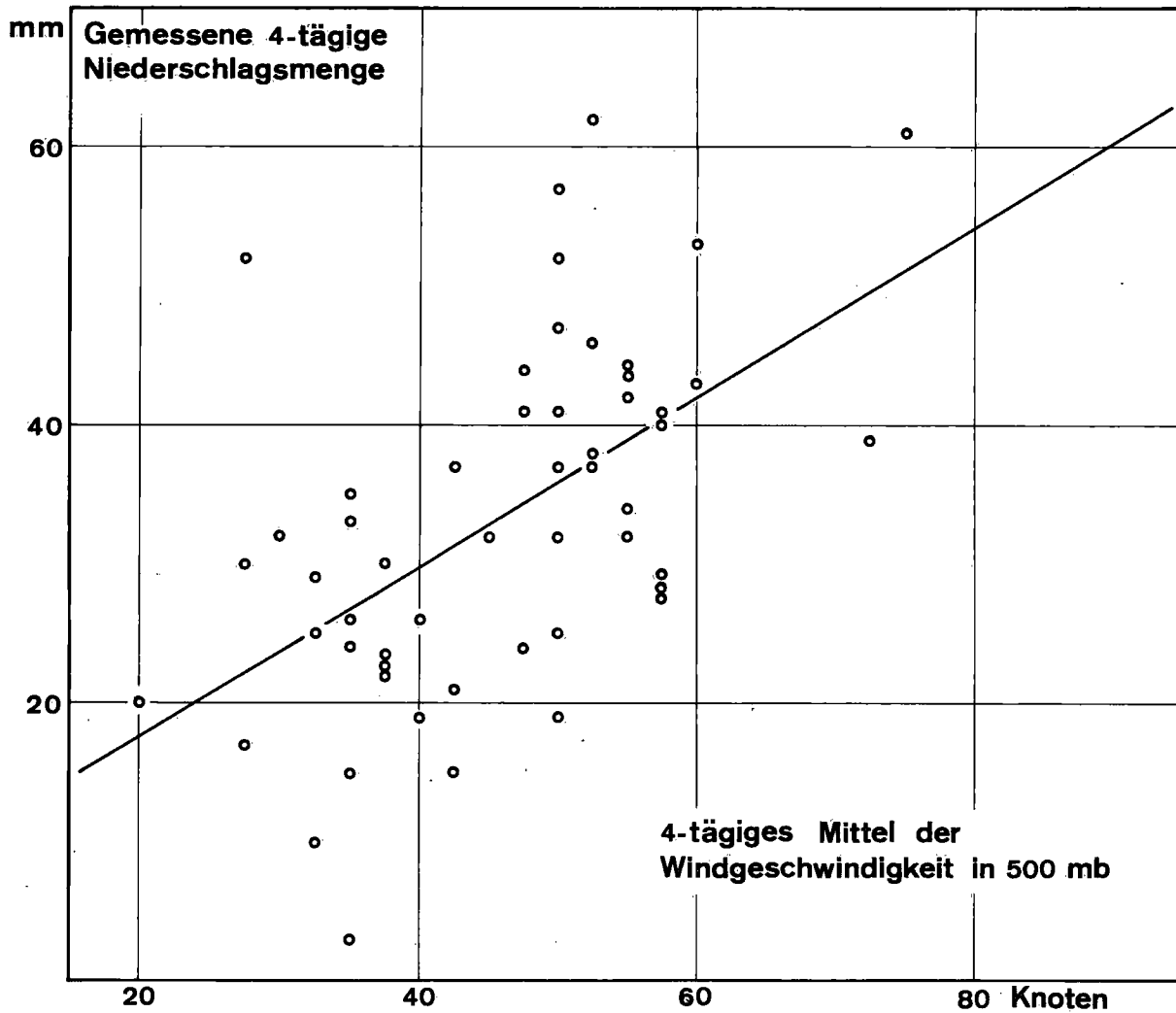


Abb. 2 Abhängigkeit der 4-tägigen Niederschlagsmenge (Gebietsmittel der Alpennordseite) vom 4-tägigen Mittel der Windgeschwindigkeit in 500 mb. Regressionsgerade.

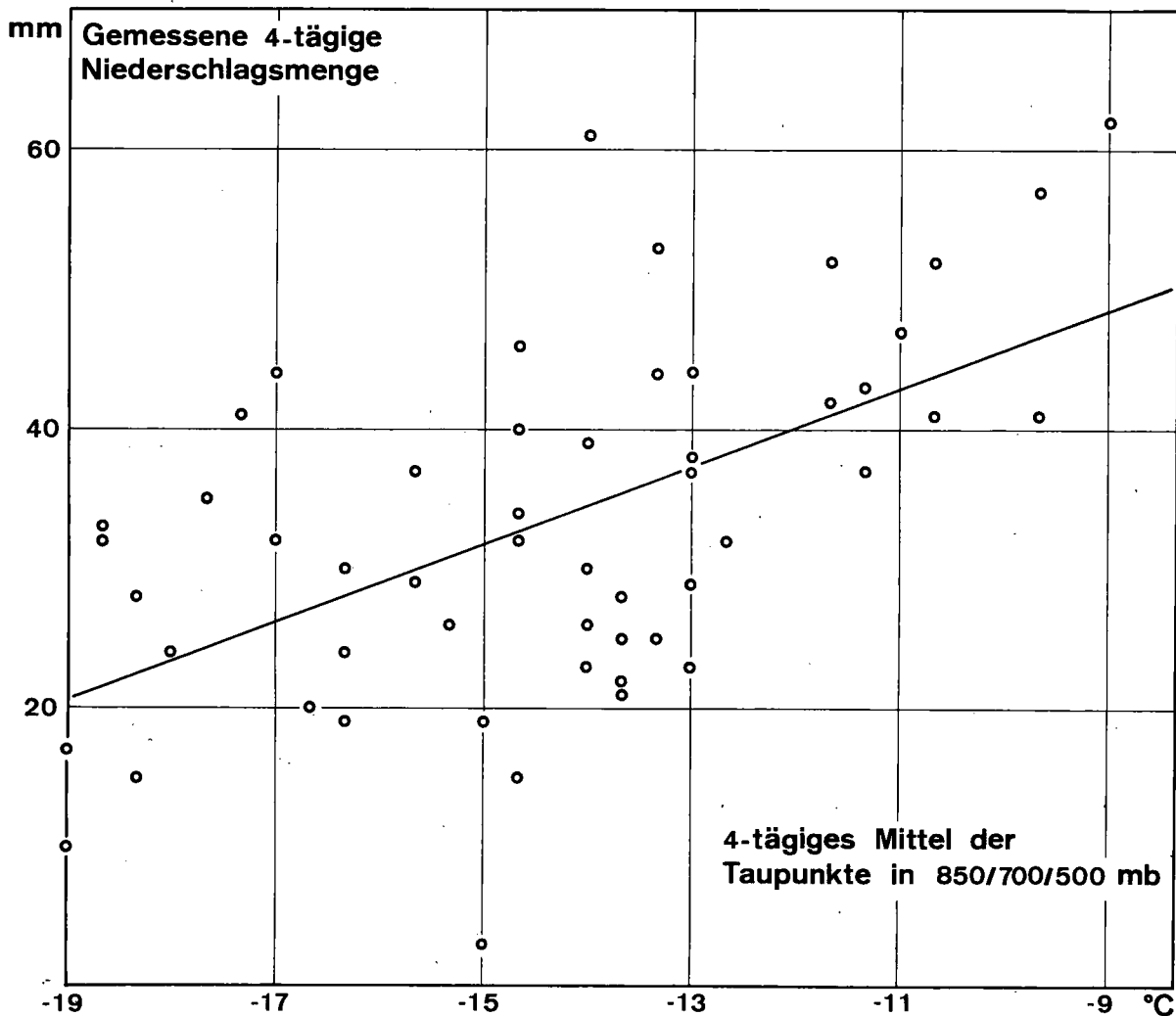


Abb. 3 Abhängigkeit der 4-tägigen Niederschlagsmenge (Gebietsmittel der Alpennordseite) vom 4-tägigen Mittel der Taupunkte in 850, 700, 500 mb, Regressionsgerade.

Für die Anwendung in der Prognose werden die Taupunkte folgendermassen bestimmt: es werden jeweils die Werte von 3 Radiosondenstationen verwendet: 1. Payerne, 2. eine erste Station stromaufwärts (bei kleineren Höhenwindstärken in 500 - 900 km Distanz, bei grösseren Höhenwindstärken in 800 - 1200 km Distanz), 3. eine weitere Station stromaufwärts (bei kleineren Höhenwindstärken in 1000 - 1500 km Distanz, bei grösseren Höhenwindstärken in 1600 - 2200 km Distanz). Die Stationen stromaufwärts werden je nach Lage des Jet-Streams in folgender Weise ausgewählt:

1. Die Schweiz liegt zu Beginn und während der Niederschlagsperiode auf der antizyklonalen (zyklonalen) Seite des Jet-Streams: Payerne und 2 Stationen auf der antizyklonalen (zyklonalen) Seite des Jet-Streams;
2. Die Schweiz liegt zunächst auf der antizyklonalen (zyklonalen) Seite, später im Jet-Stream: Payerne und 2 Stationen im Jet-Stream;
3. Die Schweiz liegt zunächst im Jet-Stream, später auf der antizyklonalen (zyklonalen) Seite: Payerne, eine Station im Jet-Stream und eine Station auf der antizyklonalen (zyklonalen) Seite;

4. Die Schweiz liegt zunächst auf der antizyklonalen (zyklonalen) Seite, dann im Jet-Stream und später auf der zyklonalen (antizyklonalen) Seite: Payerne, eine Station im Jet-Stream und eine Station auf der zyklonalen (antizyklonalen) Seite.

Es wurden nun für die 2 Prädiktoren 500mb-Windgeschwindigkeit und Mittel der Taupunkte 850, 700, 500 mb die Regressionskurven bestimmt (Abb. 2 und 3).

Die Regressionsgleichung für die Windgeschwindigkeit 500 mb lautet:

$$R = 0.610 \cdot \bar{f} + 5.28$$

und für das Mittel der Taupunkte 850, 700, 500 mb:

$$R = 2.782 \cdot \bar{T}_d + 73.45$$

(R = Mittel der 4-tägigen Niederschlagsmenge von 25 Stationen der Alpennordseite, in mm

\bar{f} = 4-tägiges Mittel der Windgeschwindigkeit in 500 mb, in Knoten

\bar{T}_d = 4-tägiges Mittel der Taupunkte in 850, 700, 500 mb, in °C)

Die Regressionen sind signifikant linear (Signifikanzzahl 0.05). Die Regressionskoeffizienten von 0.610 bzw. 2.782 in den beiden Gleichungen bedeuten, dass die 4-tägige Niederschlagsmenge bei einer Zunahme von einem Knoten des mittleren 500 mb-Windes um 0.610 zunimmt, bzw. dass sie bei einer Erhöhung von einem Grad des Mittels der Taupunkte 850, 700, 500 mb um 2.782 zunimmt.

Man kann die beiden Gleichungen in einer 2-fach-Regressiongleichung, die beide Prädiktoren enthält, zusammenfassen. Dann lautet die Gleichung:

$$R = 0.305 \cdot \bar{f} + 1.391 \cdot \bar{T}_d + 39.37$$

Dabei sind die 2 Prädiktoren wegen der Gleichheit ihrer Korrelationskoeffizienten (0.55) gleich gewichtet.

TESTPROGNOSEN

In den Winterhalbjahren 1967/68 und 1968/69 sowie von Oktober bis Anfang Dezember 1969 wurde nun die Regression durch Versuchsprognosen praktisch getestet. Und zwar wurden an Tagen, an denen aufgrund des Index eine Niederschlagsperiode zu erwarten war, die Werte der Prädiktoren aus den amerikanischen numerischen Vorhersagekarten bestimmt, in die Regressionsgleichung eingesetzt und damit die 4-tägige Niederschlagsmenge vorausberechnet. In den 4 Tagen ist der Prognosenausgabetag inbegriffen. Zur Zeit sind allerdings nur numerische Prognosen bis zu 72 Stunden Gültigkeit im Routinedienst erhältlich; das Fehlen einer 96-stündigen Vorhersagekarte hat sich jedoch als kein wesentlicher Mangel herausgestellt.

Es wurden insgesamt 25 Testprognosen erstellt. In diesen 25 Prognosen ist der Fall vom 21. - 24. September 1968 inbegriffen, da er zum Typ der Advektionslagen des Winterhalbjahres gehört und wegen seiner aussergewöhnlichen Niederschlagsmengen von Bedeutung ist. Von den vorausberechneten Werten der Niederschlagsmenge wurde ein Abzug von 1.2 mm gemacht, da die amerikanischen numerischen Vorhersagekarten bei zyklonalen Witterungslagen im Mittel 4 Knoten zu hohe Windgeschwindigkeiten über der Schweiz voraussagen.

In der folgenden Tabelle sind die Testprognosen angegeben:

Prognosenausgabetag	berechnete 4-tägige Niederschlagsmenge	gemessene 4-tägige Niederschlagsmenge	Differenz berechnet - gemessen
2. 10. 67	32.2 mm	24.2 mm	+ 8.0 mm
16. 10. 67	34.2	20.0	+ 14.2
31. 10. 67	33.0	29.8	+ 3.2
15. 11. 67	28.6	43.0	- 14.4
26. 11. 67	22.3	15.0	+ 7.3
6. 12. 67	27.2	18.5	+ 8.7
24. 12. 67	27.2	7.6	+ 19.6
29. 12. 67	21.7	28.0	- 6.3
2. 1. 68	25.9	24.0	+ 1.9
9. 1. 68	25.8	29.0	- 3.2
26. 1. 68	34.9	32.6	+ 2.3
16. 2. 68	13.8	6.4	+ 7.4
10. 3. 68	24.1	27.0	- 2.9
15. 3. 68	25.3	15.7	+ 9.6
18. 3. 68	28.9	19.6	+ 9.3
21. 3. 68	23.0	12.7	+ 10.3
21. 9. 68	41.9	74.4	- 32.5
24. 12. 68	36.7	48.5	- 11.8
7. 2. 69	13.7	11.0	+ 2.7
12. 2. 69	18.3	14.8	+ 3.5
5. 11. 69	23.9	19.1	+ 4.8
8. 11. 69	33.6	18.7	+ 14.9
12. 11. 69	33.4	38.6	- 5.2
28. 11. 69	17.7	6.8	+ 10.9
3. 12. 69	24.6	27.4	- 2.8

Der Erfolg der Prognosen ist, in Anbetracht der Schwierigkeit des Problems, befriedigend. Die mittlere Differenz zwischen der berechneten und der gemessenen 4-tägigen Niederschlagsmenge beträgt 8.7 mm. Die Standardabweichung der berechneten von der gemessenen Niederschlagsmenge beträgt 11.0 und der Quotient Standardabweichung : mittlere gemessene Niederschlagsmenge $0.45 = 45\%$.

Die Abb. 4 stellt einen Vergleich der berechneten mit den gemessenen Werten dar. Der Abstand von der 45° -Geraden ist dabei das Mass für die Differenz berechnet - gemessen. In diesem Diagramm zeigt sich, dass für kleinere gemessene Mengen meist zu hohe Werte berechnet werden, für grössere Mengen dagegen zu kleine Werte. Die berechneten Werte haben die Tendenz, sich an den Mittelwert zu halten, eine Erscheinung, die auch bei anderen Prognosenproblemen dieser Art festgestellt wurde.

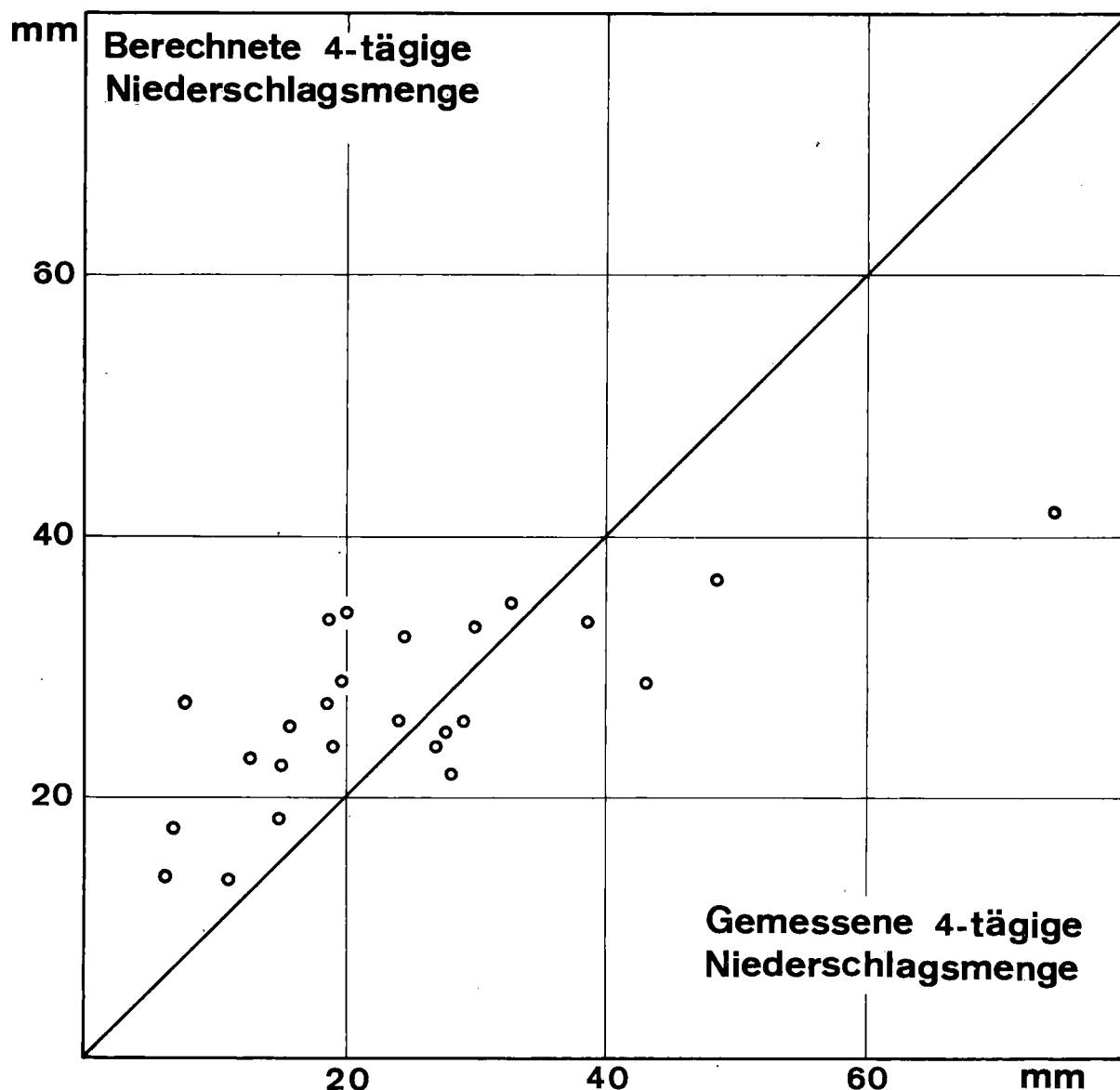


Abb. 4 Quantitative Niederschlagsprognose. Vergleich der berechneten mit den gemessenen 4-tägigen Niederschlagsmengen (Gebietsmittel der Alpennordseite). Kleine gemessene Niederschlagsmengen werden zu gross, grosse Mengen dagegen zu klein berechnet.

Die Prognosen wurden auch in Trefferprozenten bewertet, und zwar folgendermassen: war die Differenz berechnet - gemessen 0-10 mm, so wurde mit 100 % bewertet, bei einer Differenz von 10.1 - 15 mm mit 50 % und bei einer Differenz von mehr als 15 mm mit 0 %. Das Ergebnis ist ein Trefferprozentsatz von 80 %. Bei einer Prognose des klimatologischen Mittelwertes (Vorhersagewert 11.0 mm) würde man nur 56 % und bei Verwendung des Index für Niederschlagsperioden und der zugehörigen mittleren 4-tägigen Niederschlagsmenge (28.1 mm) nur 62 % Treffer erhalten. Zu dem günstigen Resultat von 80 % ist allerdings zu bemerken, dass bei erst 25 Prognosen der Trefferprozentsatz von 80 % ein Konfidenzintervall von 59 bis 93 % hat (Signifikanzzahl 0.05). Es ist also möglich, dass der Trefferprozentsatz in den nächsten Jahren etwas sinkt. Sollte dies der Fall sein, so müsste versucht werden, mit Hilfe weiterer Prädiktoren den Trefferprozentsatz wieder zu erhöhen. Ferner ist beizufügen, dass in seltenen Fällen eine Niederschlagsperiode auftritt, ohne dass sie nach dem Index zu erwarten gewesen wäre und ohne dass eine Niederschlagsmengenprognose ausgegeben worden wäre (z. Bsp. 24. - 27.11.69).

Dass für die inneren Alpengebiete (Wallis, Nord- und Mittelbünden) die für die Alpennordseite gefundene Regression nicht geeignet ist, zeigen die Testprognosen, die ebenfalls für die 25 Fälle für diese Gebiete erstellt wurden. Dabei ergab sich für das Wallis ein Trefferprozentsatz

von 40 %, für Nord- und Mittelbünden ein solcher von 50 %. Das bedeutet, dass es notwendig ist, für andere Gebiete der Schweiz spezielle Regressionen zu ermitteln. Dies gilt ganz besonders für die Alpensüdseite, die in witterungsklimatologischer Hinsicht von der Alpennordseite sehr verschieden ist.

Werden zur quantitativen Niederschlagsprognose zusätzliche Angaben über mittlere Nullgrad- und Schneefallgrenzen sowie über mittlere Windgeschwindigkeiten in höheren Lagen gewünscht, so können diese Angaben aufgrund der numerischen Vorhersagekarten für die Alpennordseite meist ziemlich gut gemacht werden.

In den weiteren Untersuchungen zur quantitativen Niederschlagsprognose sollen die übrigen Gebiete der Schweiz sowie Teilgebiete der Alpennordseite bearbeitet werden.

LITERATUR

BIDER, M. und
KRAMMER, M., 1960

Die Niederschlagsverhältnisse im Basler Jura in Abhängigkeit von verschiedenen Wetterlagen. Verhandlungen der Schweizerischen Naturforschenden Gesellschaft, p. 87 - 89.

COURVOISIER, H. W., 1957

Grosswetterverhältnisse, Entstehung und Vorauserkennung mehrtägiger Niederschlagsperioden im Westalpengebiet. Archiv für Meteorologie, Geophysik und Bioklimatologie, Serie A, Band 10, p. 43 - 65.

FLIRI, F., 1962

Wetterlagenkunde von Tirol. Tiroler Wirtschaftsstudien, Band 13, Innsbruck.

GRÜTTER, M., 1966

Die bemerkenswertesten Niederschläge der Jahre 1948 - 1964 in der Schweiz. Veröffentlichungen der Schweizerischen Meteorologischen Zentralanstalt, Nr. 3, p. 1 - 20.

MOLLWO, H., 1961

Ueber Zusammenhänge zwischen Parametern des Luftdruck- und Temperaturfeldes und dem Niederschlag. Mitteilungen des Deutschen Wetterdienstes, Nr. 25, Band 4, p. 1 - 36.

MÜLLER, W., 1967

Zur Anwendung einer quantitativen Niederschlagsprognose im Alpengebiet. 9. Internationale Tagung für Alpine Meteorologie, Brig und Zermatt, 14. bis 17. September 1966. Veröffentlichungen der Schweizerischen Meteorologischen Zentralanstalt, Nr. 4, p. 132 - 138.

SCHÜEPP, M., 1965

Probleme der Witterungsklimatologie im Alpengebiet. Bericht über die 8. Internationale Tagung für Alpine Meteorologie, Villach, 9. bis 12. September 1964, Carinthia II, 24. Sonderheft, Wien, p. 26 - 36.

SCHÜEPP, M. und
FLURI F., 1967

Witterungsklimatologie. 9. Internationale Tagung für Alpine
Meteorologie, Brig und Zermatt, 14. bis 17. September 1966.
Veröffentlichungen der Schweizerischen Meteorologischen
Zentralanstalt, Nr. 4, p. 215 - 229.

SCHÜEPP, M., 1968

Kalender der Wetter- und Witterungslagen von 1955 bis 1967.
Veröffentlichungen der Schweizerischen Meteorologischen
Zentralanstalt, Nr. 11, p. 1 - 43.

Anschrift des Verfassers:

Dr. Hans Wolfgang Courvoisier
Schweizerische Meteorologische Zentralanstalt
Krähbühlstrasse 58
CH-8044 Zürich

Nr. 14 Joss J., Sohrm K., Thams J.C., Waldvogel A., Untersuchungen zur quantitativen Bestimmung von Niederschlagsmengen mittels Radar.
37 Seiten, 1969.

Nr. 15 Courvoisier H.W., Die quantitative Niederschlagsprognose winterlicher zyklonaler Witterungslagen auf der Alpennordseite der Schweiz.
15 Seiten, 1970.

