

## 2.6 Mittlere jährliche Niederschlagshöhen im europäischen Alpenraum 1971–1990

### Einleitung

Die vielfältigen Einflüsse eines Gebirges auf die Prozesse der Atmosphäre verursachen grosse räumliche Variationen im Niederschlagsklima. So findet man beim mittleren Jahresniederschlag im Alpenraum auf einer Distanz von weniger als 100 km Unterschiede, die so gross sind wie zwischen Kreta und der schottischen Westküste. Die Variationen des Niederschlags sind komplex und lassen sich im Gegensatz zu denjenigen der Temperatur nur ungenau durch eine Beziehung zur Höhe über Meer beschreiben. Die Niederschlagsverhältnisse prägen den Charakter einer Landschaft und das Vorkommen natürlicher Ökosysteme; sie müssen bei der Planung ziviler Infrastrukturen, wasserwirtschaftlicher Massnahmen sowie der land-wirtschaftlichen Nutzung unbedingt mitberücksichtigt werden.

Im Alpenraum werden die Niederschläge heute in einer räumlichen Dichte erfasst wie in keinem anderen Gebirge der Welt. Die meteorologischen und hydrologischen Messnetze der Alpenländer umfassen insgesamt mehrere tausend Niederschlagsstationen mit einem mittleren Stationsabstand von 10–15 km (z. B. Tafel 2.1). Die Daten dieser hochauflösenden Netze wurden bereits für eine Reihe von nationalen Niederschlagskarten verwendet (z. B. Tafel 2.2). Für alpenweite Niederschlagsanalysen (z.B. [1,3]) standen bisher nur Daten von weniger umfangreichen Netzwerken zur Verfügung; Niederschlagskarten konnten nur durch eine umständliche Kombination von nationalen Karten erstellt werden.

In den Tafeln 2.6 und 2.7 sind die Ergebnisse klimatologischer Niederschlagsanalysen für den gesamten Alpenraum (2°– 17°E, 43°– 49°N) dargestellt. Sie basieren auf allen verfügbaren Beobachtungen aus den nationalen und regionalen Messnetzen der Alpenländer. Die Niederschlagskarten wurden mit einer speziell für die komplexe Topographie entwickelten Analyseverfahren bearbeitet. Sie zeigen die Verteilung der mittleren unkorrigierten jährlichen (Tafel 2.6) und saisonalen (Tafel 2.7) Niederschläge. Diese alpenweite Analyse ergänzt die in der Tafel 2.2 dargestellte schweizerische Niederschlagskarte, indem sie länderübergreifende Vergleiche ermöglicht und die Niederschlagsvariationen sowohl grossräumig als auch innerhalb einzelner Bergmassive und Täler aufzeigt.

### Daten

Die Niederschlagskarten der Tafeln 2.6 und 2.7 basieren auf einem umfangreichen Datensatz mit Beobachtungen von 5831 konventionellen Niederschlags-Stationen sowie von 259 Totalisatoren. Letztere wurden zur besseren Berücksichtigung der Verhältnisse in hochgelegenen Regionen einbezogen. Die Stationsdichte ist mit Ausnahme von Norditalien, wo je nach Gebiet verhältnismässig wenige Stationen zur Verfügung standen, relativ homogen. In Tabelle 1 sind die Datenquellen zusammengestellt; eine ausführliche Beschreibung des Datensatzes findet man in [4]. Wir danken den in Tabelle 1 aufgeführten Institutionen für die Benutzung ihrer umfangreichen Niederschlagsdaten.

Einige der verwendeten Messreihen decken nicht die volle Referenzperiode (1971–1990) ab. Für die vorliegenden Auswertungen wurden deshalb die mittleren Jahresniederschläge der lückenhaften Datenreihen aus den umliegenden Stationsreihen an die Referenzperiode angepasst [9], wobei mit einem Fehler der angepassten Mittelwerte von etwa 2 % zu rechnen ist [6].

Die gemessenen Niederschlagshöhen sind nicht nach dem systematischen Niederschlagsmessfehler korrigiert, wie dies bei der Tafel 2.2 geschehen ist, da die für die Korrektur benötigten Daten (Wind, Stationsexposition) nicht verfügbar waren.

## Räumliche Analyse

Die Stationsdaten wurden auf ein von den Längen- und Breitenkreisen aufgespanntes reguläres Gitter mit einer Auflösung von 1.25 Minuten interpoliert. Dazu gelangte das regressionsbasierte Modell PRISM (Parameter-elevation Regressions on Independent Slopes Model [2,8]) zur Anwendung, welches – auf der Grundlage eines digitalen Höhenmodells – aus den Stationsdaten eine statistische Beziehung zwischen dem Niederschlag und der Topographie bestimmt. Das Verfahren trägt dem Umstand Rechnung, dass diese Beziehung regional stark variieren kann. Für jeden Gitterpunkt wird eine Regression zwischen dem Niederschlag und der Höhe berechnet, wobei die Stationswerte je nach Repräsentativität für die Verhältnisse am Gitterpunkt unterschiedlich gewichtet werden. Die Gewichtung berücksichtigt Faktoren wie Entfernung und Höhenunterschied zum Gitterpunkt, aber auch Differenzen in der Exposition [2,6].

Figur 1 illustriert für zwei ausgewählte Gitterpunkte im Wallis und im Berner Oberland die Gewichtung der Stationswerte durch PRISM. Die kurze Distanz zwischen den Gitterpunkten führt dazu, dass in beiden Beispielen im wesentlichen dieselben 17 Stationen für die Interpolation berücksichtigt werden. Die Gewichtung der Stationen nach ihrer Repräsentativität für den jeweiligen Gitterpunkt beeinflusst aber die Interpolation massgeblich.

Der Interpolationsfehler von PRISM wurde in einer Kreuzvalidierung abgeschätzt. Er beträgt in der Höhenzone von 500 bis 1500 m ü. M. rund 20 %, in der Zone zwischen 1500 und 2500 m ü. M. rund 25 %. Ein Vergleich mit anderen Interpolationsverfahren hat gezeigt, dass sich PRISM durch geringe systematische Interpolationsfehler in grossen Höhen auszeichnet [6].

## Niederschlagsverteilung im Alpenraum

Grossräumig ist die Niederschlagsverteilung durch zwei ausgeprägte Niederschlagsbänder entlang des nördlichen und südlichen Randes des Alpenbogens gekennzeichnet. Diese Bänder umfassen Zonen mit grossen Niederschlagshöhen. Das südliche Band lässt sich in zwei Hauptzonen unterteilen. Im Bereich des Gotthardpasses vereinigen sich das nördliche und südliche Band; sonst sind sie durch eine inneralpine Trockenzone getrennt, die im Bereich des Tirols besonders ausgedehnt ist. Figur 2 zeigt diese Strukturen in einem Nord–Süd-Querschnitt: Die Niederschlagsbänder sind bei Höhen um 1000 m ü. M. zentriert und dehnen sich über etwa achtzig Kilometer ins umgebende Vorland aus. Gegen den Alpenhauptkamm nimmt der mittlere Jahresniederschlag trotz zunehmender Höhe des Geländes ab. So werden sogar an inneralpinen Gebirgsstationen geringere Niederschlagsmengen gemessen als typischerweise entlang des Alpenrandes.

Die vorgelagerten Mittelgebirge mit Höhen unter 1500 m ü. M. (z. B. Schwarzwald) sind trotz ihrer tiefen Lage sehr niederschlagsreich. Im Gegensatz zu den Alpen findet man hier die grössten Niederschlagswerte im Bereich der höchsten Erhebungen.

Bei einzelnen Gebirgsmassiven zeigt der Niederschlag eine Zunahme mit der Höhe. Die Grösse des Höhengradienten variiert allerdings beträchtlich: Gradienten bis zu 2 mm pro Höhenmeter findet man am nördlichen und zum Teil am südlichen Fuss der Alpen sowie in den Mittelgebirgen. Inneralpin und auf der Alpensüdseite variieren die Gradienten im Bereich zwischen 0–0.6 mm/m; es können aber sogar kleine negative Gradienten auftreten. Die räumliche Variabilität der Gradienten äussert sich in den Karten darin, dass der Zusammenhang zwischen Niederschlag und Topographie je nach Gebiet unterschiedlich ausgeprägt ist.

Obwohl die Niederschlagsmengen von Jahr zu Jahr beträchtlich schwanken können, ist das beschriebene räumliche Muster auch in den einzelnen Jahren deutlich zu erkennen. Figur 3 zeigt die relativen Abweichungen des mittleren Jahresniederschlags einzelner Fünfjahresperioden von der Referenzperiode 1971–1990. Die Abweichungen bewegen sich in einem Bereich von  $\pm 15\%$ . Dabei treten oft deutliche Unterschiede zwischen den Gebieten nördlich und südlich des Alpenhauptkammes auf. Über die vier in Figur 3 dargestellten Pentaden ist kein statistisch signifikanter Trend zu einer Zu- oder Abnahme der Niederschlagsmengen erkennbar. Im gesamten

20. Jahrhundert hingegen wurde in einzelnen Gebieten des Alpenraums eine statistisch signifikante Zunahme der Winter-niederschläge beobachtet [5,10].

## Vergleich

Ein Vergleich der vorliegenden Niederschlagskarte mit lokalen und nationalen Karten im Alpenraum zeigt qualitativ gute Übereinstimmungen. Dies gilt insbesondere auch für die in Tafel 2.2 dargestellte schweizerische Niederschlagskarte. Allerdings bestehen nennenswerte quantitative Abweichungen; so beträgt der mittlere jährliche Gebietsniederschlag für die Schweiz aufgrund der vorliegenden Analyse 1380 mm, nach Tafel 2.2 liegt er aber bei 1686 mm. Im folgenden sind mögliche Gründe für die quantitativen Unterschiede zur Tafel 2.2 aufgelistet:

Bei der Tafel 2.2 wurden die Daten nach dem systematischen Fehler der Niederschlagsmessung korrigiert. Für die vorliegende Tafel wurden hingegen unkorrigierte Werte verwendet, womit insgesamt kleinere Niederschlagshöhen resultieren. Für den mittleren Jahresniederschlag wurde der systematische Messfehler auf 5–10 % in tiefen Lagen und auf 15–30 % oberhalb 1500 m ü. M. geschätzt [7].

Die Referenzperioden der beiden Karten sind verschieden. Die Periode 1971–1990, auf der die vorliegende Tafel beruht, weist gegenüber der Periode 1951–1980 (Tafel 2.2) im Mittel für die Schweiz ca. 2.5 % mehr Niederschlag auf. Für die meisten Stationen bewegen sich die Unterschiede in einer Bandbreite von -1 % bis +5 %.

Die beiden Niederschlagskarten basieren auf unterschiedlichen Stationsdaten. Tafel 2.2 verwendet in der Schweiz 340 Stationen, Tafel 2.6 stützt sich auf 693 Stationen. In grenznahen Gebieten berücksichtigt die vorliegende Analyse in einem grösseren Umfang auch Beobachtungen der Nachbarstaaten.

Im Gegensatz zu der in Tafel 2.2 verwendeten Kriging-Interpolation mit einem einheitlichen Niederschlagsgradienten von 0.8 mm/m schätzt die hier benutzte Methode einen räumlich variablen Gradienten. Im Mittel beträgt dieser für die Schweiz 0.5 mm/m. Wendet man die Methode von Tafel 2.2 auf den für die vorliegende Tafel bereitgestellten Datensatz an, so resultiert ein um 80 mm grösseres Gebietsmittel für die Schweiz als mit der PRISM-Methode. Die methodischen Unterschiede zeigen sich auch darin, dass in Tafel 2.6 die Beziehung zwischen Niederschlag und Topographie in verschiedenen Gebieten weniger stark ausgeprägt ist.

Die Analyseverfahren basieren auf stochastischen Konzepten; jede Interpolation stellt eine Schätzung mit statistischen Unsicherheiten dar. Für die einzelnen Gitterpunkte betragen die Fehlerintervalle mit dem PRISM-Modell  $\pm 10\%$  in den Niederungen und  $\pm 20\%$  in hochalpinen Gebieten. Lokale Unterschiede zwischen den Karten können also massgeblich durch statistische Schätzfehler verursacht sein.

## Literatur

- [1] **Baumgartner, A., Reichel, E., Weber, G. (1983):** Der Wasserhaushalt der Alpen. München und Wien.
- [2] **Daly, C., Neilson, R.P., Phillips, D.L. (1994):** A statistical-topographic model for mapping climatological precipitation over mountainous terrain. In: Journal of Applied Meteorology 33:140–158, Boston.
- [3] **Fliri, F. (1974):** Niederschlag und Lufttemperatur im Alpenraum. Wissenschaftliche Alpenvereinshefte Nr. 24, Innsbruck.
- [4] **Frei, C., Schär, C. (1998):** A Precipitation Climatology of the Alps from High-Resolution Rain-Gauge Observations. In: International Journal of Climatology 18:873–900, Chichester.
- [5] **Schönwiese, C.-D. et al. (1994):** Observed climate trends in Europe 1891–1990. In: Meteorologische Zeitschrift, Neue Folge Heft 3:22–28, Berlin.
- [6] **Schwarb, M. (2000):** The Alpine Precipitation Climate. Evaluation of a high-resolution analysis scheme using comprehensive rain-gauge data. Dissertation Nr. 13911 der ETHZ, Zürich.
- [7] **Sevruk, B. (1985):** Systematischer Niederschlagsmessfehler in der Schweiz. In: Beiträge zur Geologie der Schweiz – Hydrologie, Nr. 31:65–75, Bern.
- [8] **Spatial Climate Analysis Service (Ed.) (1999):** Climate mapping with PRISM. Internal report at Oregon State University, 326 Strand Agricultural Hall, Corvallis OR 97331-2204, USA.
- [9] **Vogel, R.M., Stedinger, J.R. (1985):** Minimum Variance Streamflow Record Augmentation Procedures. In: Water Resources Research 21:715–723, Baltimore.
- [10] **Widmann, M., Schär, C. (1997):** A principal component and long-term trend analysis of daily precipitation in Switzerland. In: International Journal of Climatology 17:1333–1356, Chichester.