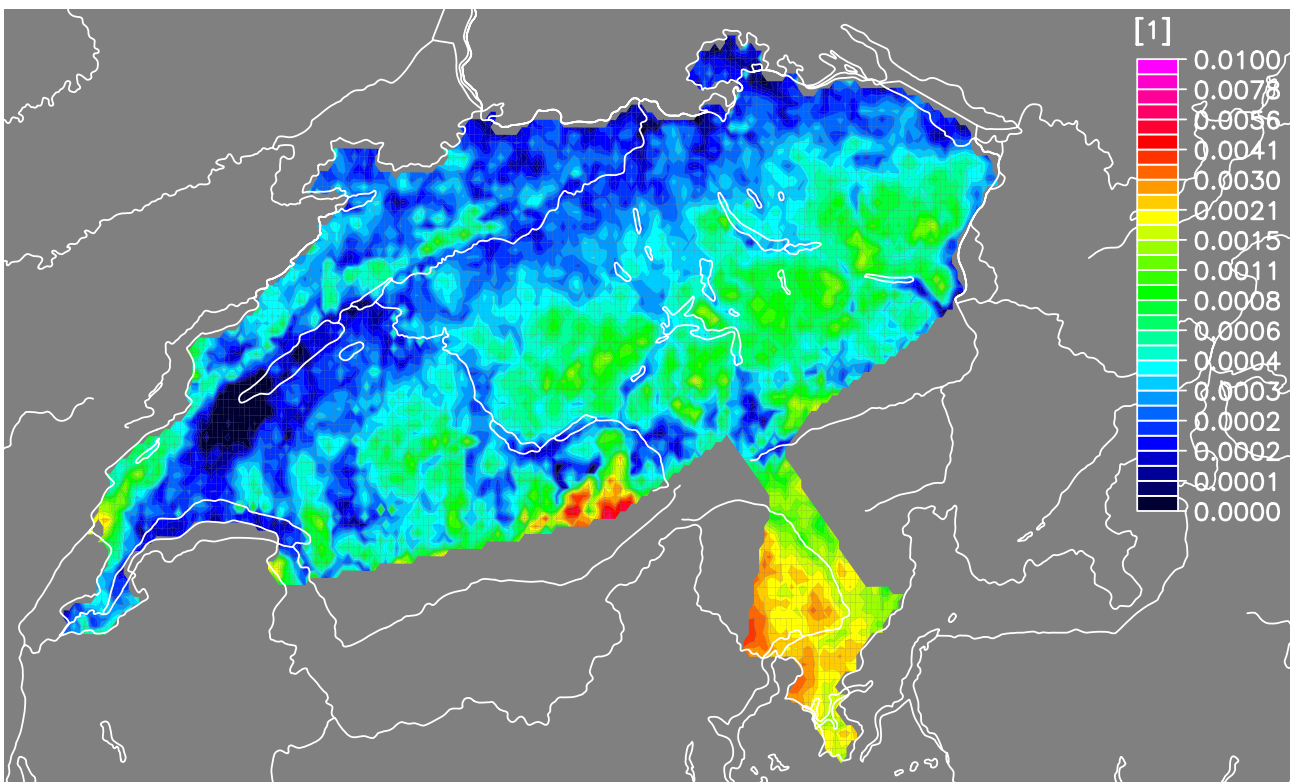


KOMBINATION VON RADAR- UND PLUVIOMETERDATEN ZU STÜNDLICHEN NIEDERSCHLAGSFELDERN FÜR DIE SCHWEIZ

VALIDIERUNG UND KLIMATOLOGISCHE AUSWERTUNG



DIPLOMARBEIT VON MICHAEL LITSCHI

INSTITUT FÜR ATMOSPHERE UND KLIMA, ETH ZÜRICH, WINTERSEMESTER 2004/05

BETREUUNG: DR. MARC WÜEST, DR. CHRISTOPH FREI
LEITUNG: PROF. DR. CHRISTOPH SCHÄR

INHALTSVERZEICHNIS

Inhaltsverzeichnis.....	2
Danksagung	4
Zusammenfassung.....	5
Abstract.....	6
1 Einleitung.....	7
1.1 Motivation.....	7
1.2 Radar.....	8
1.2.1 Streuung	8
1.2.2 Prinzip des inkohärenten, gepulsten Radars.....	9
1.2.3 Schwierigkeiten bei der Interpretation von Radardaten.....	9
1.3 Niederschlagsmessung am Boden.....	10
1.3.1 Messgeräte	10
1.3.2 Fehlerquellen bei der Ermittlung des Gebietsniederschlags	11
2 Daten.....	12
2.1 Niederschlagsmessung	12
2.2 Monatliche Niederschlagsklimatologie	12
2.2.1 PRISM – Precipitation-elevation Regressions on Independent Slopes Model	12
2.2.2 Hochaufgelöste Klimatologie	13
2.3 Radar.....	14
3 Methodik	16
3.1 Berechnung von CH02D.....	16
3.2 Berechnung von CH02H.....	16
3.2.1 Koordinatentransformation	17
3.2.2 Aufbereiten der Radarbilder.....	17
3.2.3 Aggregation der Radarbilder	18
3.2.4 Disaggregation	19
3.2.5 Schwierigkeiten bei der Berechnung von CH02H.....	20
3.3 Methoden zur Validierung von CH02H.....	22
3.3.1 Kritische Niederschlagsmenge.....	26
3.3.2 Besonderheit Tagesbeginn	26
3.3.3 Verschiedene Kartenausschnitte.....	27
4 Resultate.....	28
4.1 Verfügbarkeit der Radardaten.....	28
4.1.1 Stunden ohne Radardaten.....	28
4.1.2 Gelöschte Tage	29
4.1.3 Niederschlagsfreie Stunden	30
4.1.4 Abschattung.....	31

4.2 Validierung	32
4.2.1 Zeitreihen	32
4.2.2 Saisonale Niederschlagshäufigkeitsverteilung	35
4.2.3 Vergleich von CH02H mit ANETZ-Stationen anhand statistischer Kennzahlen	38
4.2.4 Mittlere Niederschlagsfelder	48
4.3 Maskierung	50
4.4 Beispiel: stündliche Niederschlagsfelder	50
4.5 Klimatologische Analysen	52
4.5.1 Niederschlagsintensität und -häufigkeit.....	52
4.5.2 Starkniederschläge.....	55
4.5.3 Quantile	60
4.5.4 Tagesgänge	65
5 Schlussfolgerungen.....	72
6 Referenzen.....	76
Anhang	77

DANKSAGUNG

Meinen herzlichsten und aufrichtigsten Dank möchte ich an dieser Stelle an Marc Wüest und Christoph Frei aussprechen, deren hervorragende Betreuung keine Wünsche offen liess und diese Diplomarbeit zur erfreulichsten und interessantesten Tätigkeit meiner ganzen bisherigen Ausbildungszeit werden liess.

ZUSAMMENFASSUNG

Hydrologische Modelle benötigen Niederschlagsdaten mit laufend besserer räumlicher und zeitlicher Auflösung als wichtige Eingangsgrösse, Wettervorhersagemodelle zur Validierung. Niederschlagsmessungen am Boden erzielen zwar eine hohe Genauigkeit, ermöglichen allerdings nur eine geringe räumliche und zeitliche Auflösung. Wetterradare dagegen bieten die erforderliche Auflösung, weisen aber einen hohen Unsicherheitsgrad hinsichtlich der Niederschlagsraten auf.

Der in dieser Arbeit weiterentwickelte, validierte und klimatologisch ausgewertete Datensatz, CH02H, enthält stündliche Niederschlagsfelder auf einem geographischen Gitter mit einer Maschenweite von nur $0.021 \times 0.021^\circ$. Er entsteht durch Disaggregation eines analogen Datengitters, das interpolierte Tagesniederschlagsfelder enthält, wobei die Gewichtung über Radarmessungen erfolgt.

Die Validierung von CH02H verläuft in drei Schritten, bei welchen einzelne Gitterflächen von CH02H mit Niederschlagsmessungen an ANETZ-Stationen (insgesamt 72 automatische Klimastationen mit zehnminütiger Auflösung für den Niederschlag) verglichen werden. Als erstes werden einander Stichproben der Zeitreihen gegenübergestellt, daraufhin die kumulativen, normierten Niederschlagshäufigkeitsverteilungen untersucht. Abschliessend erfolgt ein Vergleich für zusammenfassende statistische Grössen: normierte Intensitätsverhältnisse, Verhältnisse der Niederschlagshäufigkeiten für bestimmte stündliche Regen- bzw. Schneemengen, RMS (Root Mean Square) und AMD (Absolute Mean Deviation).

Die klimatologischen Analysen setzen sich aus einer Untersuchung der räumlichen Verteilung von Starkniederschlägen und wichtiger Quantile (Median, 99%-Quantil und Quartilsdifferenz) auf der Basis von Stundenwerten zusammen. Ausserdem wird der saisonale bzw. ganzjährige, mittlere Tagesgang von CH02H eingehend betrachtet.

Insgesamt ist CH02H für weite Teile der Alpennordseite bis hin zum Alpennordrand und für die südliche Hälfte des Tessins ein verlässlicher Datensatz. Die als Folge der Stationsinterpolation auf Gitterflächen erwartete Unterschätzung der Niederschlagsspitzen bzw. die Überschätzung der Niederschlagshäufigkeit halten sich in Grenzen, die Übereinstimmung mit den Messreihen ist im Allgemeinen gut gewährleistet. Wenig vertrauenswürdig präsentiert sich CH02H nur in den Kantonen Graubünden und Wallis, weil in diesen Gebieten die Radarabschattungseffekte und damit die Unterschiede zu den Niederschlagsmessungen stark zunehmen.

CH02H bietet also für weite Teile der Schweiz stündliche Niederschlagsfelder der Jahre 1992 bis 2003 für den Einsatz in hydrologischen Studien und Abflussklimatologien, zur Validierung quantitativer Niederschlagsprognosen sowie für Radarstudien.

ABSTRACT

Hydrological models need precipitation data in high spatial and temporal resolution as an important input parameter. The refining of the grid of weather forecast models starts to require similar resolution for validation purposes. Precipitation measurements at the ground provide high accuracy, but allow only poor spatial and temporal resolution. Weather radars on the other hand offer the necessary resolution, however, exhibit a high uncertainty regarding the precipitation rates.

The validated and climatologically evaluated dataset developed in this work, CH02H, contains hourly precipitation fields on a geographical grid with a mesh size of only $0.021 \times 0.021^\circ$. It results from disaggregation of interpolated daily precipitation fields which are thereby weighted by radar measurements.

The validation of CH02H follows three steps comparing single grid surfaces of CH02H with precipitation measurements at ANETZ stations (72 automatic climate stations with precipitation records at ten minute intervals). First of all, samples of the time series are compared with each other, then the cumulative, normalized precipitation frequency distributions are examined. Finally the ratios of the following statistical key figures are compared: normalized intensity, frequency of given hourly precipitation quantities, RMS (root mean square) and AMD (absolute mean deviation).

The climatological analyses consist of an investigation of the spatial distribution of strong precipitation events and important quantiles (median, 99%-quantile and quartile difference) on the basis of hourly values. In addition, the seasonal and yearly, average diurnal variation of CH02H is investigated in detail, respectively.

Altogether for wide areas of Switzerland north of the Alps and for the southern side (canton Ticino) CH02H turns out to be a reliable dataset. The underestimation of precipitation peaks expected as consequence of the interpolation of station data on grid surfaces and the overestimation of precipitation frequency are limited, respectively, the agreement with the series of measurements is generally good. Only in Grisons and Valais CH02H becomes unreliable, because in these areas the radar shading effects and therefore the differences to the precipitation measurements strongly increase.

CH02H offers for large regions of Switzerland hourly precipitation fields from 1992 to 2003 for use in hydrological studies and runoff climatologies, for validating quantitative precipitation forecasts as well as for radar studies.

1 EINLEITUNG

1.1 MOTIVATION

Für die täglichen Wetterprognosen, für Abflussmodellierungen und Hochwasserwarnungen, zur Erstellung von Gefahrenkarten in der Umgebung von Flussgebieten sowie für zahlreiche weitere Aufgaben werden laufend neue hydrologische und atmosphärenphysikalische Modelle entwickelt. Als wichtige Eingangsgrösse beziehungsweise zur Validierung werden unter anderem sowohl räumlich, als auch zeitlich möglichst hoch aufgelöste Niederschlagsdaten benötigt, welche aber leider nur in den seltensten Fällen zur Verfügung stehen.

Ziel dieser Diplomarbeit und der ihr vorangegangenen Semesterarbeit von Adrian Altenhoff war es daher, einen Datensatz, der diese Kriterien möglichst gut erfüllt, aus den gegenwärtig vorhandenen Niederschlagsdaten zu erstellen und dessen Zuverlässigkeit zu überprüfen. Zu diesem Zweck wurden zwei voneinander unabhängige Methoden der Niederschlagsmessung miteinander kombiniert.

Die MeteoSchweiz registriert den in der Schweiz fallenden Niederschlag auf zwei grundsätzlich verschiedene Arten: einerseits wird der täglich auf den Boden gelangende Niederschlag an rund 450, über das ganze Land verteilten Standorten gemessen, andererseits betreibt die MeteoSchweiz drei Wetterradare auf La Dôle, dem Albis und dem Monte Lema, welche zusammen alle 5 Minuten ein Bild der in der Atmosphäre vorhandenen Niederschlagspartikel liefern.

Der Vorteil der Niederschlagsmessung am Boden liegt in der relativ hohen Genauigkeit, obwohl Messfehler von einigen Prozenten durchaus möglich sind. Ihr Nachteil besteht in der geringen zeitlichen und vor allem räumlichen Auflösung. Anders verhält es sich bei den Radarbildern: ihre zeitliche Auflösung von 5 Minuten und die erreichte räumliche Auflösung von typischerweise 2 x 2 km erfüllen die gestellten Anforderungen bei weitem. Allerdings stellt die Entwicklung eines Verfahrens, mit welchem sich die tatsächlich gefallenen Niederschlagsmengen aus Radarbildern exakt genug ermitteln lassen, gegenwärtig noch immer eine grosse wissenschaftliche Herausforderung dar (z.B. Hagen, 1999 und persönliche Kommunikation).

Eine geeignete Kombination dieser beiden Messmethoden, welche einen Datensatz mit der Genauigkeit von Niederschlagsmessern und der Auflösung von Radarbildern erstellt, könnte also die für Modellvalidierungen gewünschten Niederschlagsdaten liefern. Aufbauend auf der Arbeit von Adrian Altenhoff unternimmt die vorliegende Diplomarbeit den Versuch, dieses Ziel mittels Disaggregation zu realisieren, indem die täglichen Niederschlagsmengen auf 24 Stundenwerte verteilt und mit der jeweils über eine Stunde aufsummierten Intensität der Radarechos gewichtet werden. Der resultierende Datensatz trägt den Namen **CH02H** – CH als Abkürzung für die Schweiz, 02 für die räumliche Auflösung von rund 2 x 2 km und H (hourly) für die erzielten stündlichen Niederschlagsfelder. Anschliessend an die Berechnung wurde CH02H validiert, überdies liessen sich erste klimatologische Analysen verwirklichen.

1.2 RADAR

RADAR ist eine Abkürzung für **Radio Detection and Ranging**. Ein Radar sendet elektromagnetische Wellen aus und empfängt die von einem Objekt zurück gestreute Strahlung wieder. Aus dem empfangenen Signal lässt sich dann auf bestimmte Eigenschaften des streuenden Objektes, insbesondere dessen Grösse, schliessen.

In der Meteorologie werden Radare zur Erfassung von Ereignissen in der Atmosphäre in einem Umkreis von rund 10 bis 100 km eingesetzt. Der wesentliche Vorteil solcher **Wetterradare** besteht in der hohen räumlichen und zeitlichen Auflösung, mit der Wetterphänomene beobachtet werden können.

1.2.1 STREUUNG

Ist der Durchmesser eines Teilchens viel kleiner als die Wellenlänge elektromagnetischer Strahlen, werden diese vom Teilchen nicht reflektiert, sondern gestreut. Dabei wird ein Energiequant vom Streuer aufgenommen und sofort, ohne Veränderung der Wellenlänge, in alle Richtungen wieder abgestrahlt.

Unter dem Streuquerschnitt eines Objekts σ versteht man die Fläche, welche dieses Objekt haben müsste, wenn man das entsprechende Streuphänomen durch Reflexion erklären wollte. Bei der Rayleigh-Streuung ist er gegeben durch

$$\sigma = \pi^5 \cdot |\kappa|^2 \cdot \frac{D^6}{\lambda^4} \quad (1)$$

und somit proportional zur sechsten Potenz des Durchmessers D bzw. umgekehrt proportional zur vierten Potenz der Wellenlänge der elektromagnetischen Strahlung λ .

$|\kappa|^2$ ist eine Funktion der Dielektrizitätszahl ϵ und beträgt für alle in der Troposphäre zu erwartenden Temperaturen, sowie sämtliche Wellenlängen im Bereich der Mikrowellen für Wasser ~ 0.9 , für Eis 0.176. Eis ist folglich, ganz im Gegensatz zu Wasser, für die Mikrowellen des Radars fast unsichtbar, wodurch Schnee und Eispartikel vom Wetterradar im Vergleich zu flüssigem Wasser unterschätzt werden.

Dieser Unterschied der Streukoeffizienten ist zudem verantwortlich für das auf Radarbildern im Bereich der Schmelzzone häufig beobachtete „**helle Band**“. In der Schweiz wird selbst im Sommer sämtlicher Niederschlag über die Eisphase gebildet (*kalter Regen*). Erreichen die verästelten Eisaggregate die Nullgradgrenze, beginnen sie zu schmelzen. Dabei bildet sich um die Schneeflocken herum zunächst eine Wasserhaut, wodurch die Wasser-Eis-Partikel einerseits den grossen Durchmesser von Schneeflocken, andererseits aber den höheren Streukoeffizienten von Wasser aufweisen. Das Ergebnis ist eine stark erhöhte Reflektivität.

Im Mie-Bereich hat der Streuquerschnitt eine viel komplexere, oszillierende Abhängigkeit von der Grösse der Teilchen, so dass zu jedem σ mehrere mögliche Teilchengrössen existieren. Die Wellenlänge des Radars wählt man deshalb im Bereich von ungefähr 5 cm, weil man so einerseits immer im Rayleigh-Bereich bleibt und andererseits die bei noch grösseren Wellenlängen deutlich abnehmende Signalstärke vermeidet.

1.2.2 PRINZIP DES INKOHÄRENTEN, GEPULSTEN RADARS

Die für diese Diplomarbeit verwendeten Radarbilder stammen von gepulsten Wetterradaren. Ein solches Radar strahlt Mikrowellenpulse mit einer Leistung von rund 1 MW über seine Antenne ab und empfängt die von verschiedenen Objekten in der Atmosphäre zurück gestreuten Signale, deren Energie durchschnittlich rund 10^{18} mal geringer ist.

Die **Distanz** zwischen Radar und Streukörper r berechnet sich aus der Laufzeit t welche der Radarimpuls für die Strecke zum streuenden Objekt und wieder zurück zur Antenne benötigt:

$$r = \frac{t \cdot c}{2} \quad (2)$$

Dabei steht $c \approx 3 \cdot 10^8 \frac{m}{s}$ für die Fortpflanzungsgeschwindigkeit elektromagnetischer Wellen. Eine Laufzeit von 1 μs bedeutet somit eine Entfernung von 150 m.

Zwischen den einzelnen Radarpulsen verstreicht, gemessen an deren Dauer von 1 μs , notwendigerweise eine relativ lange Zeit (in der Grössenordnung von 1 ms), während der die Echos erwartet werden. Erreichen Echos das Radar nämlich erst, nachdem schon der nächste Puls ausgesandt wurde, lässt sich die Distanz eines Objekts nicht mehr eindeutig bestimmen: das Echo könnte das Resultat des an einem weit entfernten Objekt gestreuten ersten Pulses oder aber des an einem nahen Objekt gestreuten zweiten Pulses sein. Die maximal eindeutig messbare Distanz wird daher von der Wartezeit zwischen den Pulsen bestimmt, oder anders gesagt, von der so genannten **Puls-Repetitions-Frequenz PRF**:

$$r_{\max} = \frac{c}{2 \cdot PRF} \quad (3)$$

1.2.3 SCHWIERIGKEITEN BEI DER INTERPRETATION VON RADARDATEN

Jedes Radarbild ist das Resultat von Volumenmessungen in der Atmosphäre, wobei das so genannte Pulsvolumen die Form eines Kugelschalensegments hat und mit zunehmender Entfernung zur Antenne wächst, während parallel dazu die Auflösung abnimmt. Abhängig von der jeweiligen Antenne und von der Distanz zum Radar hat ein Radarpuls ein Volumen in der Grössenordnung von 1 km³. Folglich empfängt ein Wetterradar nicht nur das Signal eines einzelnen Objekts, sondern die gestreuten Echos einer ganzen Reihe von Hydrometeoren. Deswegen ist jede Radarmessung von zahlreichen Unsicherheitsfaktoren geprägt (Wüest et al., 2005):

- Veränderungen des Radarstrahls bei seiner Ausbreitung (siehe unten)
- Unterschiede in der Geometrie des Pulsvolumens in Ausbreitungsrichtung sowie in der Verteilung der Wasser- oder Eispartikel darin
- Unkenntnis bezüglich Aggregatzustand, Form und Grösse der Hydrometeore.

Speziell in Bezug auf die Regenintensitäten wird man mit den folgenden Problemen konfrontiert:

1. Radarstrahlen überschneiden bodennahe Echos in grösserer Entfernung einerseits wegen der *Erdkrümmung*, andererseits wegen des Elevationswinkels der Radarantenne. Je weiter sich der Radarpuls von der Antenne entfernt, umso grösser wird seine Distanz zur Erdoberfläche. Für seine Höhe in einer Entfernung r von der Radarantenne gilt

$$h(r) = h_0 + r \tan \lambda + \sqrt{R^2 + r^2} - R \quad (4)$$

Dabei stehen h_0 für die Höhe der Radarantenne, λ für den Elevationswinkel und R für den Erdradius.

2. Der Radarstrahl erfasst den Niederschlag in einer gewissen Höhe über dem Boden. Die Niederschlagsintensität in dieser Höhe kann aber, beispielsweise infolge Verdunstung, deutlich von derjenigen am Boden abweichen.
3. Die Niederschlagsmenge kann unterhalb des Radarstrahls aber nicht nur ab-, sondern als Folge orographisch induzierter Kondensation auch zunehmen.
4. Objekte mit sehr hoher Reflektivität schatten die Regionen hinter sich ab. Die offensichtlichsten Hindernisse sind Berge, aber bereits intensive Niederschläge, oder sogar das helle Band bei geringeren Niederschlagsintensitäten, können soviel Leistung absorbieren, dass schwächere Ereignisse dahinter kaum mehr erfasst werden.
5. Nieselregen ist gekennzeichnet durch sehr kleine Regentropfen, welche aufgrund ihrer grossen Anzahl zwar eine beachtliche Regenintensität erreichen können, vom Radar aber kaum erfasst werden, da die Intensität der reflektierten Radarstrahlen proportional zur sechsten Potenz des Durchmessers der streuenden Teilchen ist.
6. Radarstrahlen können an Luftmassengrenzen gebeugt werden. In der Folge lässt sich die Herkunft des Echos nicht mehr bestimmen. Im Extremfall kann der Radarstrahl sogar wieder auf den Boden auftreffen.

Ein Ziel der Radarmessungen ist es, die Niederschlagsrate R aus der Reflektivität z abzuleiten. Die Erfahrung hat aber gezeigt, dass die theoretische Herleitung einer Beziehung zwischen diesen beiden Grössen zu komplex ist. Die MeteoSchweiz verwendet daher für ihre Radare die empirische Beziehung

$$z = 300 \cdot R^{1.5} \quad (5)$$

Dass der Exponent von R entgegen den Erwartungen nicht gleich zwei ($R \sim D^3$, $z \sim D^6$), sondern kleiner gewählt wird, hat seine Ursachen in den oben erwähnten Fehlerquellen.

1.3 NIEDERSCHLAGSMESSUNG AM BODEN

1.3.1 MESSGERÄTE

Die Niederschlagsmessung am Boden erfolgt mit Regenschneidern oder Regenschreibern. In **Regenschneidern** wird der Niederschlag in einem Sammelgefäss aufgefangen und dann bis zu zweimal am Tag gemessen. Zu dieser Gruppe gehören etwa die im Schweizer Mittelland weit verbreiteten Hellmann-Regenschneider. Der Niederschlagsmessung über längere Zeiträume dienen die in den Alpen häufig anzutreffenden Totalisatoren. Im Gegensatz dazu registrieren **Regenschreiber** den Niederschlag mittels Schwimmer, Wippe oder Waage kontinuierlich. Dadurch können zugleich der zeitliche Verlauf der Niederschlagsintensität und die Niederschlagsdauer erfasst werden. Das automatische Messnetzwerk der MeteoSchweiz, bestehend aus den so genannten ANETZ-Stationen, ist mit solchen Regenschreibern ausgestattet.

1.3.2 FEHLERQUELLEN BEI DER ERMITTLUNG DES GEBIETSNIEDERSCHLAGS

Die Genauigkeit der aus konventionellen Niederschlagsmessungen abgeleiteten Gebietsniederschläge leidet einerseits unter den systematischen Fehlern, welche bei den einzelnen Punktmessungen begangen werden, andererseits unter der begrenzten räumlichen Auflösung, welche mit denselben erreicht wird.

Verantwortlich für Fehler bei der Niederschlagsmessung sind die Ablenkung von Niederschlagspartikeln im Windfeld über der Öffnung des Messgeräts, die Benetzung der Gefässwände, die Verdunstung aus dem Auffangbehälter und Schneverwehungen ins Messgerät hinein. Am bedeutendsten sind die windbedingten Verluste, von welchen eine Unterschätzung der tatsächlich gefallenen Niederschlagsmengen von bis zu einigen 10 Prozent ausgehen kann. Das Ausmass hängt ab von der Windgeschwindigkeit, von der Verteilung der Tropfengrössen und damit der Niederschlagsintensität, sowie vom Niederschlagstyp (Regen oder Schnee) (Frei und Schär, 1998).

Zwar existieren Korrekturverfahren für solche Messfehler (z.B. Sevruk, 1985), allerdings sind dazu Wind- und Temperaturdaten in einer möglichst hohen zeitlichen Auflösung, sowie genaue Angaben über das Messgerät und den Messstandort notwendig. CH02D – D (daily) steht für tägliche Niederschlagsfelder – als Grundlage von CH02H (siehe Kap. 3.1) wird daher mit nicht korrigierten Niederschlagsdaten berechnet.

Im Jahresmittel ist für Hellmann-Regenmesser von einer systematischen Unterschätzung des Niederschlags von rund 7% für Standorte im Flachland und an windgeschützten Stellen und von bis zu 25% für windexponierte und höhere Lagen, d.h. vor allem bei einem signifikanten Schneeanteil, auszugehen. Die Abweichungen zeigen einen eindeutigen Jahresgang mit einem Maximum von rund 8 bzw. 30% im Winter und einem Minimum von ungefähr 5 bzw. 10% im Sommer an geschützten resp. exponierten Stellen. Im Mittel werden die jährlichen Niederschlagsmengen in der Schweiz um circa 8% unterbewertet (Sevruk, 1985).

Die hohe räumliche Variabilität von Regen- und Schneefällen führt, zusammen mit der beschränkten räumlichen Auflösung der Niederschlagsmessungen, zu weiteren Fehlern bei der Berechnung von Gebietsniederschlägen. Eine besondere Fehlerquelle ist die oft ungleichmässige Verteilung der Niederschlagsmesser: aus der nicht repräsentativen Anhäufung von Messstationen in geringen Höhen (z.B. in Alpentälern) resultiert infolge der häufig beobachteten Zunahme des mittleren Niederschlags mit der Höhe eine systematische Unterschätzung der Niederschlagsmengen. Mit geeigneten Analyseverfahren können die Effekte dieser Fehlverteilung allerdings reduziert werden (Frei und Schär, 1998).

Trotz all dieser Einschränkungen sind punktuelle Niederschlagsmessungen und daraus abgeleitete Gebietsniederschläge für Gebiete grösser als 100 km² dennoch bedeutend genauer als etwa die Bestimmung der Niederschlagsintensität mittels Radar.

2 DATEN

2.1 NIEDERSCHLAGSMESSUNG

Die MeteoSchweiz betreibt drei Arten von Beobachtungsstationen:

1. 72 automatische Klimastationen, die so genannten *ANETZ-Stationen*, erfassen im Abstand von 10 Minuten unter anderem den Niederschlag, die Lufttemperatur, die Windgeschwindigkeit, die Sonnenscheindauer, die Globalstrahlung und die relative Luftfeuchtigkeit.
2. Konventionelle *Klimastationen* registrieren ausgewählte Klimavariablen täglich zu festgelegten Zeitpunkten: die Niederschlagssumme wird zweimal am Tag um 7:00 und um 19:00 Lokalzeit abgelesen.
3. Zur Niederschlagsmessung wird ausserdem ein Netz von *Tagessammlern* betrieben. Die Ablesung erfolgt jeweils um 5:40 UTC.

Zusammengenommen ergibt dies rund 450 Messstationen, mit welchen in der Schweiz die täglichen Niederschlagsmengen auf 0.1 mm genau bestimmt werden (Abb. 2-1). Wegen des Einsatzes der Tagessammler wird im Folgenden jeweils die Zeit von 5:40 UTC bis 5:40 UTC am nächsten Tag als ein Tag betrachtet.

Obwohl die Messdichte in den Alpen gegenüber dem Flachland der Alpennordseite und dem Tessin abnimmt, liegt die durchschnittliche Distanz zwischen zwei Messstationen bei rund 10 bis 15 km.



Abb. 2-1: Das Niederschlagsmessnetzwerk in der Schweiz und im benachbarten Ausland.

2.2 MONATLICHE NIEDERSCHLAGSKLIMATOLOGIE

2.2.1 PRISM – PRECIPITATION-ELEVATION REGRESSIONS ON INDEPENDENT SLOPES MODEL

Die folgenden Ausführungen über PRISM wurden grösstenteils von Daly et al. (1994, 2002) adaptiert.

An einem Gebirgshang nimmt der mittlere Niederschlag typischerweise mit der Höhe zu. Abhängig von ihrer Grösse und Orientierung können Berge oder Gebirgsketten nämlich die Intensität advektiver Nieder-

schläge durch Verlangsamung der Zugbahngeschwindigkeit ganzer Tiefdruckwirbel oder Fronten sowie durch Auslösen verstärkter Hebungsbewegungen steigern. Im Sommer kann der Einfluss der Orographie zudem konvektive Instabilitäten in sonst stabilen Luftmassen hervorrufen.

In vielen Gegenden der Erde zeigt die lokale Zunahme der Niederschläge mit der Höhe eine annähernd lineare Form. Solche Beziehungen können mit Hilfe von DEMs (Digital Elevation Models) zur Interpolation von Punktmessungen genutzt werden. PRISM ist ein Verfahren, welches diese Beziehungen aus den Daten schätzt und die Niederschlagsmengen an Punkten ohne Messung interpoliert.

Die Höhenabhängigkeit des mittleren Niederschlags kann aber von Gebirgshang zu Gebirgshang erheblich variieren, da sie unter anderem von Unterschieden in der Hangneigung, von topographischen Hindernissen sowie von der Orientierung des Geländes beeinflusst wird. Um den Niederschlag in einem komplexen Terrain möglichst genau zu interpolieren, wird die Gebirgslandschaft von PRISM in eine Reihe topographischer Flächen [Facets: Aspekte] unterteilt. Von diesen wird angenommen, dass sie alle einem unterschiedlichen, orographischen Regime ausgesetzt sind, wohingegen jede topographische Fläche für sich ein aus benachbarten Gitterzellen bestehendes, zusammenhängendes Gebiet darstellt, in welchem die Hangneigung, die Geländeorientierung und ebenso die Beziehung zwischen Niederschlag und Höhe mehr oder weniger konstant sind.

Nach der Festlegung der topographischen Flächen werden alle Messstationen erfasst, welche innerhalb einer bestimmten Entfernung zur jeweiligen Gitterzelle liegen. Davon werden diejenigen, welche sich nicht auf der gleichen topographischen Fläche befinden, weggelassen. Falls die Zahl der übrig bleibenden Stationen unter ein vorgegebenes Minimum fällt, versucht PRISM mehr Stationen mit einzubeziehen, indem es ein stärker gefiltertes Gitter verwendet. Die räumliche Ausdehnung einer topographischen Fläche kann nämlich durch Anwendung eines Fünfpunkt-Filters, der die Höhe jeder Gitterzelle gemäss

$$h_{ij} = 0.5 \cdot h_{ij} + 0.125 \cdot (h_{i+1,j} + h_{i-1,j} + h_{i,j+1} + h_{i,j-1}) \quad (6)$$

berechnet, erweitert werden.

Insgesamt werden sechs verschiedene Gitter erstellt: ein ungefiltertes, und je eines mit 8, 16, 24, 32 und 40 Filterdurchgängen. Falls auch auf dem höchsten Filterniveau keine Station auf der gleichen topographischen Fläche verfügbar ist, wird diejenige Station ausgewählt, welche am nächsten bei der betreffenden Gitterzelle liegt, ungeachtet der topographischen Fläche, auf der sie sich befindet.

Danach werden monatliche oder jährliche, lineare Regressionsfunktionen für die Höhenabhängigkeit des Niederschlags aus dem Datensatz aller für die jeweilige Gitterzelle erfassten Stationen generiert. Und darin liegt der wesentliche Vorteil von PRISM: es verwendet nicht nur eine einzige Funktion, um die Höhenabhängigkeit des Niederschlags zu beschreiben, sondern passt diese laufend an die sich verändernden Bedingungen an.

2.2.2 HOCHAUFGELOSTE KLIMATOLOGIE

Schwarb et al. (2001) verwendeten PRISM um eine hoch aufgelöste Niederschlagsklimatologie des gesamten Alpenraums für jeden Monat des Jahres zu entwickeln, welche auf unkorrigierten Niederschlagsdaten der Jahre 1971 bis 1990 basiert. Die Auflösung des geographischen Gitters ist bei einer Maschenweite von nur $0.020833 \times 0.020833^\circ$ – dies entspricht ungefähr 1.55×2.31 km – derjenigen der Radarbilder der MeteoSchweiz mit 2×2 km ziemlich ähnlich (Abb. 2-2).

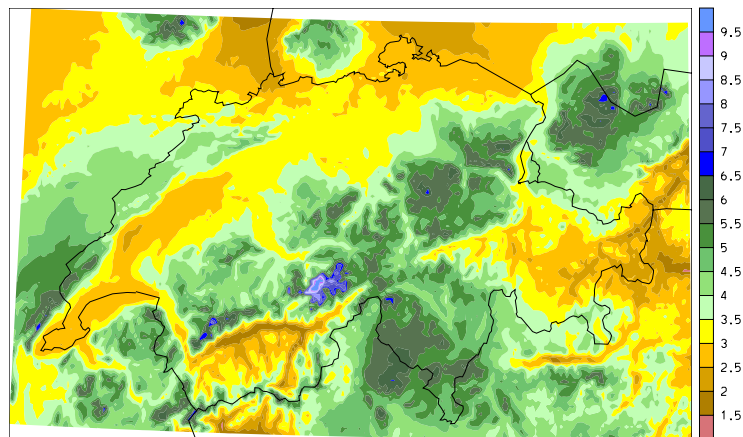


Abb. 2-2: Die Graphik zeigt den Ausschnitt der Schweiz aus der hoch aufgelösten Niederschlagsklimatologie von Schwarb et al. (2002). Dargestellt ist der mittlere Niederschlag der Jahre 1971 bis 1990 in mm/d.

2.3 RADAR

Die MeteoSchweiz setzt Wetterradare seit den frühen 1980er Jahren im operationellen Dienst ein. Aufgrund der grossen Datenmengen, welche dabei anfallen, bestand aber erst seit den frühen 1990er Jahren die notwendige Infrastruktur, um die Radardaten elektronisch archivieren zu können (Wüest et al., 2005). Für die Jahre davor existieren zwar Aufnahmen auf Mikrofilm, welche allerdings zuerst noch aufbereitet werden müssen. Deshalb beschränkt sich die vorliegende Arbeit auf die Jahre 1992 bis 2003 für die Alpennordseite bzw. auf die Zeit seit dem 24. Oktober 1994 für die Alpensüdseite, weil das dritte Radar auf dem Monte Lema erst seit diesem Datum regelmässig in Betrieb ist.

Die drei Wetterradare der MeteoSchweiz decken die Fläche der Schweiz gut ab, können allerdings infolge der Geometrie nicht in die Alpentäler hineinsehen. Je mehr ein Tal von hohen Bergen umgeben ist, umso höher liegt die tiefste, repräsentative Ebene eines Radarscans. Abhängig von der Art und der Höhenlage eines Niederschlagsystems kann dies zu bedeutenden quantitativen Fehlern führen, weil allenfalls die höheren Wolkenregionen und damit ein früher Entwicklungsstand der Niederschlagspartikel, nicht aber die schliesslich zu Boden fallenden Regentropfen oder Schneeflocken beobachtet werden können (Wüest et al., 2005). Im konvektiven Fall, wenn die Wolkenbildung meist in relativ geringer Höhe einsetzt, dürfte in vielen Fällen sogar nicht einmal die frühe Entstehungsphase sichtbar werden.

Als Grundlage für die Disaggregation dienen die TODAY-Radarbilder der MeteoSchweiz. Sie geben die Niederschlagsrate auf einem Gitter in Schweizer Koordinaten mit einer horizontalen Auflösung von 2 x 2 km wieder. Die Niederschlagsrate ist in sieben logarithmische Klassen eingeteilt: 0, 0 bis 1, 1 bis 3.1, 3.1 bis 10, 10 bis 31, 31 bis 100 und >100mm/h.

Die Wetterradare der MeteoSchweiz führen alle fünf Minuten eine Messung mit 20 verschiedenen Elevationswinkeln zwischen -0.3 und 45° durch. TODAY löst diese allerdings nicht auf, sondern verwendet an jedem Gitterpunkt nur den maximalen Reflexionswert der 20 Messungen (Joss et al., 1998; Wüest et al., 2005). Obwohl heute mit RAIN ein Radarprodukt mit einer deutlich besseren Auflösung von 1 x 1 km zur Verfügung steht, welches überdies genau auf die Bedürfnisse der Niederschlagsmessung abgestimmt ist (Joss et

al., 1998), fiel die Wahl auf TODAY, weil nur diese Bilder für die Zeitspanne von 1992 bis 2003 erhältlich sind, während RAIN eine Entwicklung jüngerer Datums darstellt. Gerade für die klimatologischen Untersuchungen im Rahmen der Validierung sind längere Zeiträume aber eine Voraussetzung.

Infolge der in Kapitel 1.2.3 erwähnten Schwierigkeiten stützt sich diese Arbeit auf Radardaten hinsichtlich der zeitlichen und räumlichen Verteilung auf dem 2 x 2 km Gitter sowie der relativen Niederschlagsraten, wie sie durch die sieben logarithmischen Klassen aufgelöst werden, nicht aber bezüglich der absoluten Mengen in mm/h. Letztere werden von den Niederschlagsmessungen am Boden übernommen.

3 METHODIK

3.1 BERECHNUNG VON CH02D

Die räumliche Interpolation der punktuell erfassten Niederschlagsdaten auf einem regulären Gitter erfolgt mit Hilfe einer modifizierten Version des SYMAP-Algorithmus von Shepard (1968, 1984) (siehe auch Frei und Schär, 1998). SYMAP schätzt ein lokales Gebietsmittel, indem die Beobachtungen aller Messstationen, welche innerhalb eines bestimmten Suchradius um die jeweilige Gitterfläche liegen, angemessen gewichtet werden. Die Gewichtung erfolgt in der Regel umgekehrt proportional zur Distanz; für diese Analyse wurde jedoch eine flache, begrenzte Distanzgewichtungsfunktion benutzt.

Gemäss Frei und Schär (1998) sind zwei Merkmale von SYMAP besonders vorteilhaft. Erstens hängt das Gewicht, welches ein Messpunkt erhält, nicht nur von der Entfernung zwischen Messstandort und Gitterzelle ab, sondern berücksichtigt auch die Isolation einzelner Stationen gegenüber anderen in der betreffenden Suchumgebung. Anhäufungen von Beobachtungen auf einer Seite eines Gitterelements erhalten dementsprechend weniger Gewicht. Zweitens lässt sich der Suchradius an die lokale Stationsdichte anpassen, so dass stets ein Minimum an Messstandorten in die Berechnungen mit einbezogen wird. Die regionale Anpassung der Suchumgebung führt allerdings zu Variationen der effektiven Auflösung im betrachteten Gebiet (Frei und Schär, 1998): nur in Regionen mit hoher Stationsdichte wird die volle Auflösung des zugrunde liegenden Gitters erreicht, wohingegen gewisse kleinräumigere Phänomene in Gegenden mit niedriger Beobachtungsdichte nicht mehr aufgelöst werden.

Zur Berechnung möglichst genauer, täglicher Niederschlagsfelder werden in einem ersten Schritt die Abweichungen der rund 450 punktuellen Niederschlagsmessungen vom jeweiligen monatlichen Mittel mit Hilfe von SYMAP auf einem geographischen Gitter interpoliert. Für jeden Gitterpunkt werden dabei die Messreihen von mindestens drei Stationen herangezogen. Anschliessend wird die Anomalie an jedem Gitterpunkt mit der mittels PRISM erstellten, monatlichen Niederschlagsklimatologie von Schwarb et al. multipliziert. Der resultierende Datensatz, CH02D, umfasst die täglichen Niederschlagsfelder der Jahre 1992 bis 2003 auf dem PRISM-Gitter.

3.2 BERECHNUNG VON CH02H

Für die Disaggregation der Tagesniederschlagsmengen von CH02D zu den stündlichen Werten von CH02H müssen die folgenden Arbeitsschritte ausgeführt werden (Altenhoff, 2004):

- Koordinatentransformation von den Schweizer Koordinaten der Radarbilder zu den geographischen Koordinaten von CH02D
- Aufbereiten der Radarbilder
- Summieren der vom Radar alle zehn Minuten gemessenen Niederschlagsintensitäten zu Stunden- und Tageswerten und schliesslich
- Disaggregation der beobachteten Tagesniederschläge zu Stundenwerten

3.2.1 KOORDINATENTRANSFORMATION

Die Radardaten werden von der MeteoSchweiz auf einem Gitter in Schweizer Koordinaten mit einer Auflösung von 2 x 2 km dargestellt. Demgegenüber verwendet CH02D ein geographisches Gitter mit einer Maschengrösse von 0.020833 x 0.020833°, was im Mittel einer Fläche von 1.55 x 2.31 km entspricht. Zudem ist der Kartenausschnitt der Tagesniederschlagsfelder deutlich kleiner als jener der Radarbilder.

In einem ersten Schritt müssen daher die Radarbilder in das geographische Koordinatensystem von CH02D transformiert werden. Dies geschieht mit Hilfe eines *Zeiger-Arrays*, welches für jede Gitterzelle im geographischen Koordinatensystem das passende Pixel auf dem Radarbild auswählt. Zu diesem Zweck wird zunächst jede Zelle des geographischen Gitters in Schweizer Koordinaten umgerechnet. Anschliessend wird mit Hilfe des Programms `nearest_neighbor` dasjenige Radarbildelement ermittelt, dessen Schweizerkoordinaten die kleinste Differenz zu denjenigen des jeweiligen geographischen Gitterelements aufweisen.

3.2.2 AUFBEREITEN DER RADARBILDER

Vor seiner Verwendung zur Disaggregation durchläuft jedes Radarbild den folgenden Aufbereitungsprozess im Programm `read_radar`. Das Radarprodukt TODAY weist oben und auf der rechten Seite je einen schmalen Bildabschnitt auf, in welchem ein Vertikalschnitt der maximalen Reflektivität im gesamten Radarbereich in West-Ost- resp. Nord-Süd-Richtung dargestellt ist; dazwischen befinden sich ausserdem Datums- und Zeitangaben (Abb. 3-1, linke Seite). Nach dem Einlesen der GIF-Bilder werden zunächst diese Bildteile entfernt, indem nur die restlichen Bilddaten in Form von Farbcodes (Tabelle 1) in ein Array geschrieben werden. Danach werden sämtliche Geographiedaten, wie Seen, Flüsse oder die Landesgrenzen, welche auf den Radarbildern als punktierte, weisse Linien erscheinen, maskiert (d.h. den entsprechenden Pixeln wird vom Programm der Wert -1 zugewiesen) und später aus benachbarten Gitterelementen interpoliert (Abb. 3-1, rechte Seite). Analog verfährt man mit dem Bildbereich, in welchem die Farblegende der Niederschlagsintensität plaziert ist, sowie mit sämtlichen Gitterzellen im Umkreis von 130 km (65 Zellen) um eine Radarstation, welche zum jeweiligen Zeitpunkt nicht in Betrieb war, – vorausgesetzt, die betroffenen Gitterzellen liegen nicht im Einflussbereich eines zweiten, während dieser Zeit aktiven Radars.

Für die restlichen Gitterflächen werden die diskreten Regenraten, R , wieder zu Radarreflektivitäten, z , zurückgerechnet:

$$z = 300 \cdot R^{1.5} \quad (7)$$

Davon werden dann unter Verwendung des zuvor erstellten Zeiger-Arrays die für die Disaggregation benötigten Zellen ausgewählt.

Farbe	Farbcode	Regenrate [mm/h]	verwendete Regenrate [mm/h]
schwarz	0	0.0	0.00
grau	1	$< 10^0 = 1.0$	$10^{-0.25} = 0.56$
gelb	2	$< 10^{0.5} = 3.1$	$10^{0.25} = 1.78$
violett	3	$< 10^{1.0} = 10.0$	$10^{0.75} = 5.62$
blau	4	$< 10^{1.5} = 31.6$	$10^{1.25} = 17.78$
grün	5	$< 10^{2.0} = 100.0$	$10^{1.75} = 56.23$
rot	6	$\geq 10^{2.0} = 100.0$	$10^{2.25} = 177.83$

Tab. 3-1: Die Farben auf den Radarbildern und die bei der Disaggregation verwendeten Regenraten.

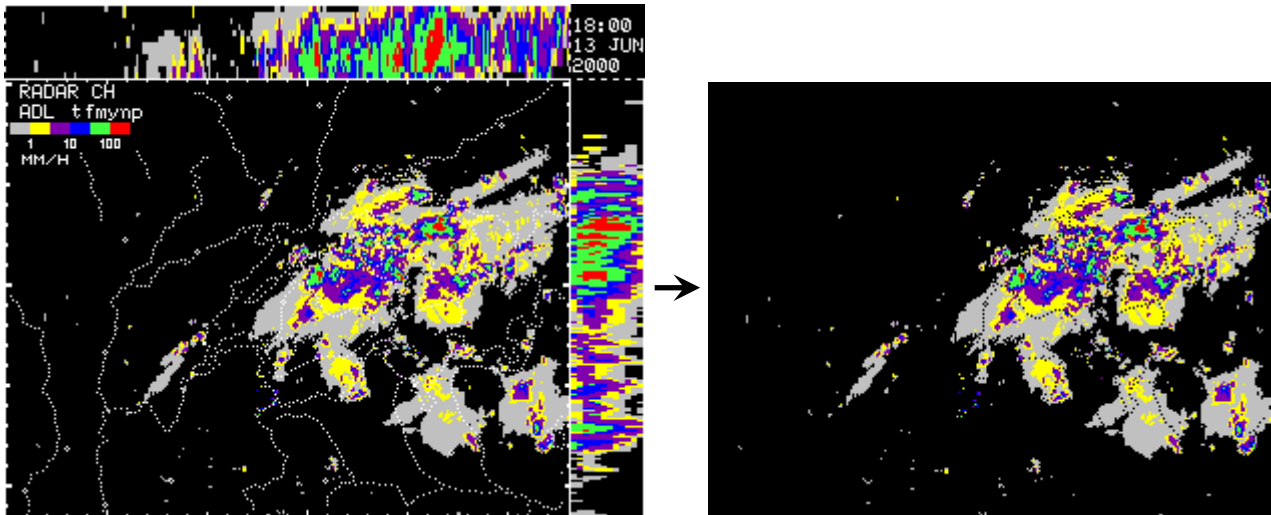


Abb. 3-1: TODAY-Radarbild der MeteoSchweiz vor und nach der Aufbereitung durch `read_radar`

3.2.3 AGGREGATION DER RADARBILDER

Nach dem Aufbereiten der Radarbilder werden die Reflektivitäten von mindestens einem, in der Regel aber sechs Bildern von `singlehour_rainrate` Gitterpunkt für Gitterpunkt zu Stundenwerten aufsummiert:

$$Z_{xy} = \sum_t^6 Z_{xyt} \quad (8)$$

Weil Radare eigentlich Reflektivitäten messen, müssen diese und nicht die bereits daraus abgeleiteten Niederschlagsraten aufaddiert werden. Erst aus den aggregierten Reflektivitäten wird dann am Ende wieder eine Regenrate ermittelt (Altenhoff, 2004).

Bereits bei der Aufbereitung der Radarbilder wurden verschiedentlich Radarechos gelöscht; teilweise waren sie auf den Bildern auch gar nie vorhanden, weil sie von Geographiedaten verdeckt waren. Daneben wurden aber auch falsche Echos aufgezeichnet, beispielsweise von Flugzeugen, Vogel- oder in der Nähe der Radare sogar Insektenschwärmen.

Diese nur einzelne Bildpunkte grossen Zusatzechos werden, ebenso wie die in der Regel nicht grösseren „Löcher“, welche die gepunkteten Linien der Geographiedaten hinterliessen, aus den Stundenbildern herausgefiltert. Dies geschieht erst an dieser Stelle und nicht schon bei den einzelnen Radarbildern, damit sich der Einfluss der Filter möglichst wenig auf die Niederschlagsintensitäten auswirkt.

Weil nur isolierte Echopixel eliminiert und allenfalls die Randgebiete von Echoregionen geglättet, deren Intensitäten aber auf keinen Fall ausgeglichen werden sollen, wird mit `five_neighbor_filter` ein Programm verwendet, welches nur auf einzelne Gitterpunkte wirkt (Altenhoff, 2004). Zeigen weniger als 5 der 8 möglichen Nachbarzellen eines Gitterelements gültige Regendaten, wobei in diesem Zusammenhang auch 0 erlaubt ist, wird es maskiert.

In einem letzten Schritt setzt das Programm `fill_holes5` für sämtliche maskierten Gitterzellen den Median der 8 Nachbarzellen ein, sofern mindestens 5 davon nicht ebenfalls schon gelöscht worden sind. Dieser Filter dient hauptsächlich der Interpolation von Niederschlagsraten an jenen Gitterpunkten, welche Geographiedaten enthalten haben. Die Wirkung der beiden Filter wird in Abbildung 3-2 verdeutlicht.

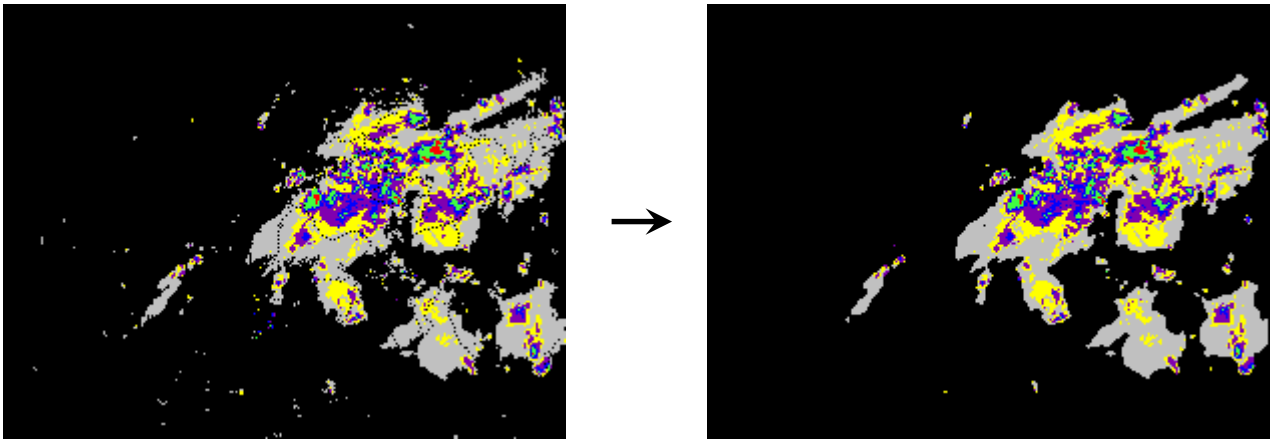


Abb. 3-2: Aufbereitetes Radarbild vor und nach der Anwendung von five_neighbor_filter und fill_holes5

3.2.4 DISAGGREGATION

Abschliessend werden die disaggregierten, stündlichen Niederschlagswerte, S_{xy} , als gewichtete Anteile am Tagesniederschlag am betreffenden Gitterpunkt, T_{xy} , berechnet, wobei die Gewichtung anhand der Radarmessungen, R_{xyt} , erfolgt:

$$S_{xy} = \frac{R_{xyt}}{\sum_t R_{xyt}} T_{xy} \quad (9)$$

Nun kann es aber vorkommen, dass ein Radar ausfällt oder keinen Niederschlag misst, während CH02D Regen meldet, oder umgekehrt, dass CH02D keinen Niederschlag registriert, das Radar aber dennoch Echos verzeichnet. Insgesamt lassen sich so neun mögliche Fälle unterscheiden, welche Altenhoff (2004) in drei Klassen einteilt (Abb. 3-3).

		Niederschlagsmessung		
		Missing	0	>0
Radarmessung	Missing			
	0			
	>0			

Abb. 3-3: Bei der Disaggregation können neun verschiedene Konstellationen auftreten.

Der *grüne Bereich* stellt den oben mathematisch beschriebenen, einfachen Fall dar, in welchem die Disaggregation problemlos vonstatten gehen kann. Der *rote Bereich*, der eigentlich nicht auftreten sollte, be-

deutet, dass ohne Niederschlagsdaten auch keine Disaggregation durchgeführt werden kann. Der *blaue Bereich* schliesslich beinhaltet die komplizierteren Fälle, in welchen zwar Niederschläge beobachtet wurden, das Radar aber keine Echos aufweist – sei es, dass es ausgeschaltet war, sei es, dass eine Abschattung vorlag. Dieser Fall wird in zwei Versionen des Programms `disaggregation` unterschiedlich behandelt. Eine Variante verteilt den gemessenen Niederschlag gleichmässig auf alle 24 Stunden des entsprechenden Tages und stellt damit sicher, dass die disaggregierten Niederschlagsmengen immer noch der beobachteten Gesamtmenge entsprechen und kein Wasser verloren geht. Dies ist vor allem für hydrologische Anwendungen von grösster Wichtigkeit. Umgekehrt ist dieses Vorgehen für die Validierung atmosphärenphysikalischer Modelle ungünstig, da für diese Aufgabe möglichst genaue, stündliche Niederschlagsmengen erforderlich sind. Die zweite Variante von `disaggregation` maskiert daher die Daten eines ganzen Tages, an welchem auch nur eine einzige Stundensumme der Radarintensitäten fehlt, für sämtliche betroffenen Gitterpunkte.

Anmerkung. Der Wert -1 als Platzhalter für fehlende Daten wird von den Validierungsprogrammen (siehe Kap. 3.3), sobald es sinnvoll erscheint, durch den Ausdruck `NaN` (not a number) ersetzt, um Fehler bei Berechnungen zu vermeiden. Es empfiehlt sich allerdings nicht, -1 schon beim Erstellen von CH02H durch `NaN` zu ersetzen, da eine negative Zahl als Informationsträger für fehlende Daten im Kontext stets positiver Niederschlagsmengen beim Programmieren wesentlich einfacher zu handhaben ist.

3.2.5 SCHWIERIGKEITEN BEI DER BERECHNUNG VON CH02H

Bei ihrer Aufbereitung muss für sämtliche Radarbilder geprüft werden, ob die Radarstationen zum jeweiligen Zeitpunkt in Betrieb waren oder nicht. Dies lässt sich nur anhand der Radarbilder selbst feststellen: auf jedem Radarbild werden nämlich die Anfangsbuchstaben der drei Radarstationen weiss angezeigt, wenn diese eingeschaltet sind – vor Inbetriebnahme von Monte Lema (1994) sogar noch die ganzen Namen.

Die einzige Möglichkeit zur Kontrolle der Radarverfügbarkeit, besteht also darin, zu prüfen, ob diese Buchstaben erscheinen oder nicht. Dazu wird der Wert von drei Pixeln, welche üblicherweise zu je einem der drei Buchstaben gehören, eingelesen. Die Koordinaten können relativ einfach mit Hilfe eines Zeichenprogramms aus den Radarbildern herausgelesen werden. Sind die fraglichen Werte gleich -1, bedeutet dies, dass die betreffenden Buchstaben angezeigt wurden, die Radars folglich in Betrieb waren, denn beim Löschen der Geographiedaten werden sämtliche weissen Pixel im Radarbild mit -1 überschrieben. Beträgt der Wert eines oder mehrerer der drei Pixel dagegen 0 (Farbcode für schwarz), wurde der dazu gehörige Buchstabe nicht angezeigt – das entsprechende Radar war ausgeschaltet.

In diesem Zusammenhang kam es anfänglich zu Problemen, weil die MeteoSchweiz das Aussehen der Radarbilder im Verlauf der 12 Jahre von 1992 bis 2003 dreimal verändert hat. Bis am 24. Oktober 1994, 13.⁵⁰ UTC waren nur die beiden Radare, La Dôle und Albis, vorhanden, deren Namen (DOLE + ALBIS) auf dem Radarbild ausgeschrieben erschienen (Abb. 3-4). Um 14.40 des gleichen Tages nahm das dritte Radar, Monte Lema, definitiv seinen Betrieb auf, weshalb der Schriftzug der Radarverfügbarkeit zu A + D + L geändert wurde (Abb. 3-5). Die zweite Umstellung erfolgte am 29. Mai 1995 zwischen 6.⁴⁰ und 6.⁵⁰ UTC: aus A + D + L wurde ADL, wobei der Schriftzug neben jenem von RADAR CH positioniert war (Abb. 3-6). Am 16. Juni 1998 zwischen 10.⁰⁵ und 10.¹⁰ UTC schliesslich wanderte der Schriftzug ADL unter denjenigen von RADAR CH (Abb. 3-7). Insgesamt musste das Programm `read_radar` also derart angepasst werden, dass es vier verschiedene Generationen von Radarbildern korrekt auf die Radarverfügbarkeit überprüfen konnte.

Anmerkung: Seit dem 18. Juli 1995, 0.⁰⁰ UTC führen die drei Wetterradare der MeteoSchweiz ihre Messungen in 5-Minuten-Intervallen durch, vorher betrug der Zeitraum zwischen zwei Messungen jeweils 10 Minuten. Diese Veränderung hat zwar keine Auswirkungen auf die gegenwärtige Disaggregation, welche genau aus diesem Grund nur 6 Bilder pro Stunde verwendet. Bei einer allfälligen Erweiterung der Disaggregation von Stunden- auf 10-Minuten-Werte dürfte dieser Umstand allerdings an Bedeutung gewinnen.

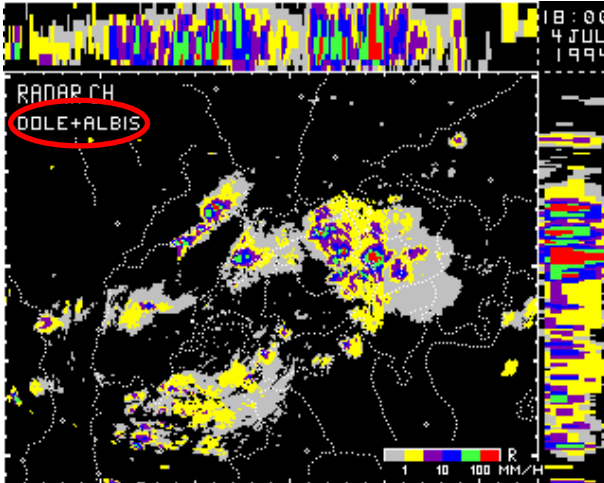


Abb. 3-4: Am 4. Juli 1994 um 18:00 UTC beobachten La Dôle und Albis (DOLE + ALBIS) starke Gewitter über dem Jura, im Aargau und im Raum Luzern-Zug-Zürich

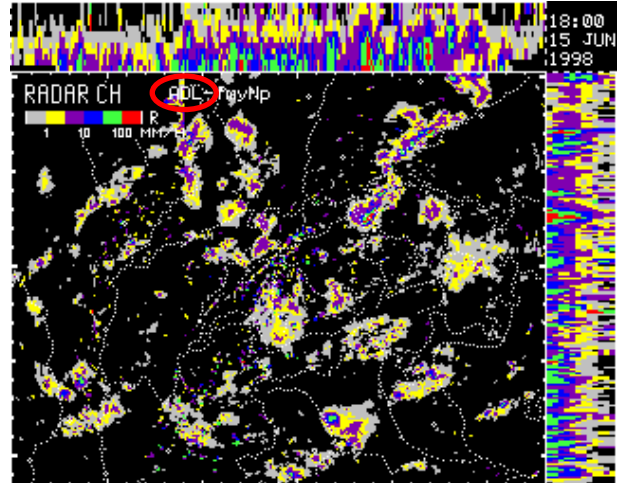


Abb. 3-6: Isolierte Gewitterzellen über der Schweiz, registriert von den Wetterradars Albis, La Dôle und Monte Lema (ADL neben RADAR CH) am 15. Juni 1998 um 18.00 UTC.

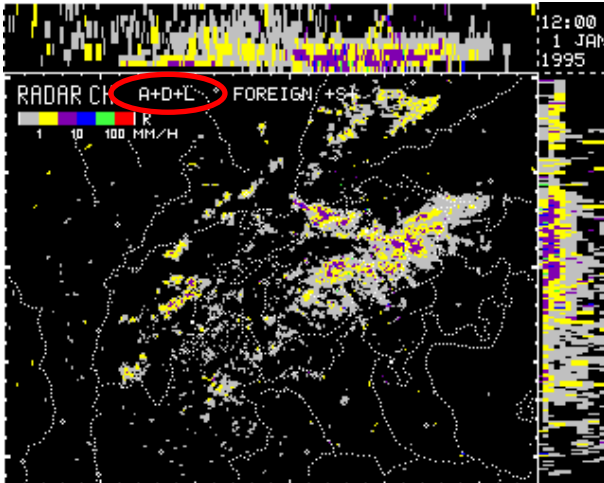


Abb. 3-5: Schwache bis mässige Niederschläge entlang den östlichen Voralpen und im Raum Basel-Aargau: am 1. Januar 1995 um 12:00 UTC sind alle Wetterradars aktiv (A + D + L).

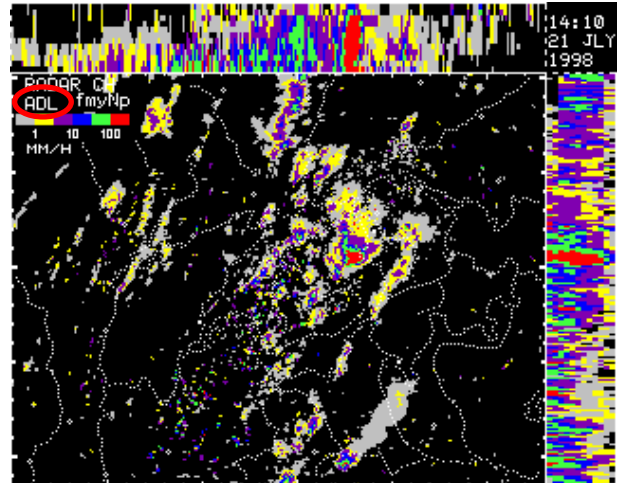


Abb. 3-7: Radarbild des heftigen Hagelgewitters über der Agglomeration Luzern am 21. Juli 1998. Um 14.10 UTC sind alle drei Wetterradars in Betrieb (ADL unterhalb RADAR CH).

Eine weitere Schwierigkeit ergab sich beim Wiederauffüllen der gelöschten Geographiedaten. Wie oben bereits erwähnt, füllt `fill_holes5` eine gelöschte Gitterzelle nur dann auf, wenn mindestens fünf gültige Nachbarzellen vorhanden sind. Weil CH02D und die Radarbilder den gleichen Kartenausschnitt mit einer unterschiedlichen Auflösung darstellen, kann es aber vorkommen, dass die weissen Punkte der Geographiedaten bei der Koordinatentransformation gedehnt werden, sodass sie nicht mehr nur ein, sondern zwei Pixel gross sind, welche anschliessend beide gelöscht werden. Abbildung 3-8 kann eine gewisse Vorstellung davon vermitteln. In bestimmten Fällen lagen diese Pixel nun gerade so nebeneinander, dass gewisse Zellen

nicht mehr über fünf gültige Nachbarzellen verfügten, wodurch CH02H an den betreffenden Stellen Lücken aufwies (Abb. 3-9). Diese Stellen wurden deshalb in der Folge vom Five-Neighbour-Filter ausgenommen, wodurch sich ihre Anzahl markant verringerte: nur zwei Pixel der Lücke La Dôle, sowie die Lücke GR 3 liessen sich mit dieser Massnahme nicht verhindern (vgl. Tab. A-1 im Anhang).

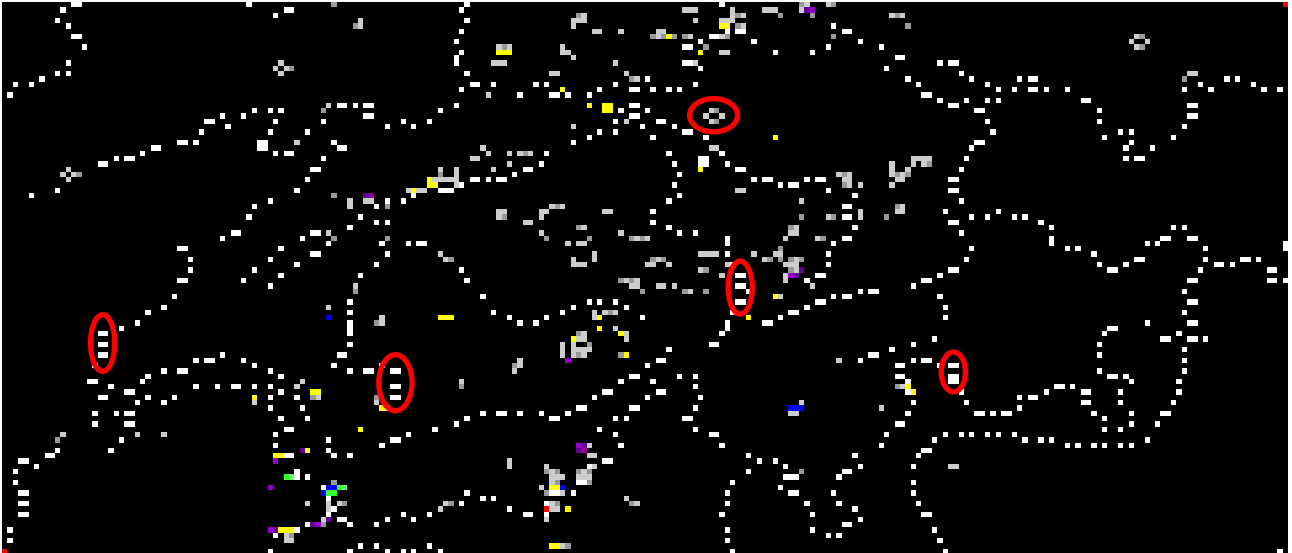


Abb. 3-8: Ungefähr so muss man sich das Radarbild nach der Koordinatentransformation vorstellen. Die rot eingekreisten Bereiche können beim folgenden Durchgang des Five-Neighbour-Filters zu Datenlücken führen.

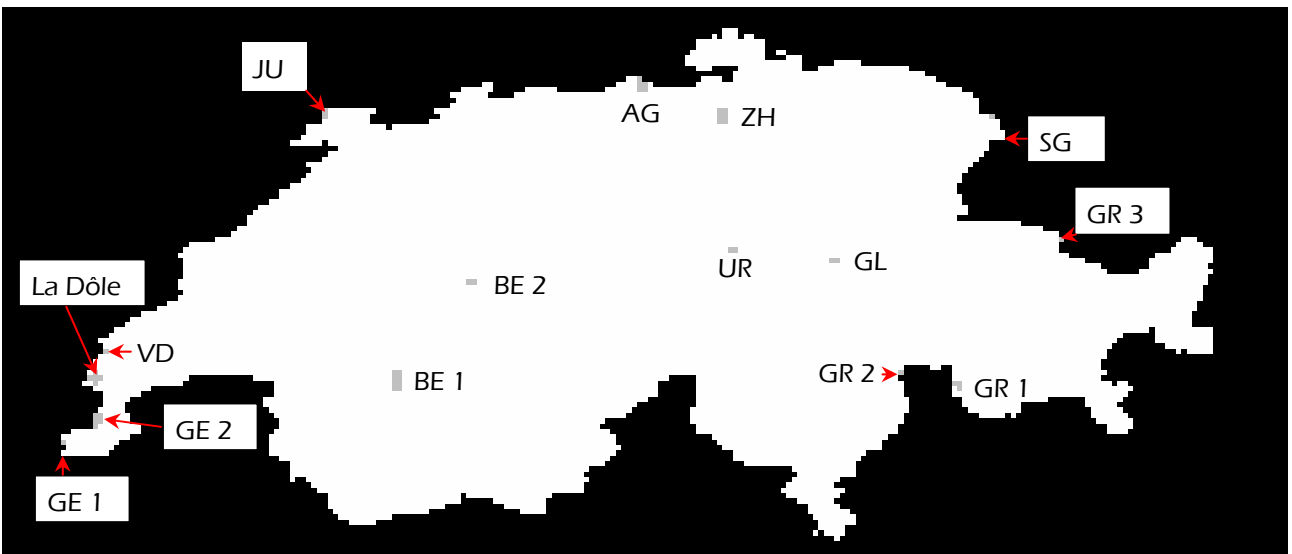


Abb. 3-9: Die grauen Bereiche kennzeichnen die Lücken im ursprünglichen Datensatz.

3.3 METHODEN ZUR VALIDIERUNG VON CH02H

Einerseits zur Qualitätskontrolle, andererseits, um eine erste Vorstellung der Möglichkeiten zu erhalten, welche CH02H bietet, wurden neun Module erstellt, welche im Folgenden kurz erläutert werden sollen. Eine Übersicht über wiederholt verwendete Parameter und eine kurze Beschreibung dazu verschafft Tabelle 3-2.

Parameter	Bezeichnung	Beschreibung
I	Niederschlagsintensität	Mittelwert der Niederschlagsraten aller Niederschlagsstunden. In dieser Arbeit werden aus Gründen der Messgenauigkeit nur Stunden mit mindestens 0.1 mm Niederschlag als Niederschlagsstunden angesehen.
M	mittlerer Niederschlag	Mittelwert der Niederschlagsmengen sämtlicher, auch niederschlagsfreier, Stunden mit vorhandenen Daten
F _x	Niederschlagshäufigkeit	Häufigkeit von Niederschlägen mit mindestens x mm/h, wobei im Allgemeinen x = 0.1, 1.0, 5.0, 10.0 mm/h gewählt wird
d	stündliche Niederschlagsmenge der Disaggregation	
a	stündliche Niederschlagsmenge an einer ANETZ-Station	

Tab. 3-2: Die verwendeten Parameter und ihre Bedeutung.

Während der Berechnung der Disaggregation wurden für jede Gitterzelle die Anzahl Stunden und Tage, an welchen keine Radar­daten verfügbar waren, gezählt und in einem Array gespeichert. Auf die gleiche Weise wurde mit der Anzahl Stunden verfahren, an welchen bei vorhandenen Radar­bildern keine Niederschläge gefallen sind, sowie – zur Abschätzung der Radar­abschattung – mit der Anzahl Tage an welchen laut CH02D Niederschlag gefallen sein muss, das Radar aber keinen Niederschlag gemeldet hat. `ch02h_modul_1` normiert die Zählungen fehlender Radar­bilder mit der Anzahl möglicher Stunden oder Tage im betreffenden Zeitraum, respektive mit der Anzahl Stunden oder Tage mit vorhandenen Radar­daten im Falle der niederschlagsfreien Stunden und der Zählung der Radar­abschattung, und stellt dies auf einer Karte dar.

`ch02h_modul_2` zeichnet für eine beliebige Anzahl Tage zwischen dem 1. Januar 1992 und dem 31. Dezember 2003 die Niederschlagsmessungen an einer ANETZ-Station und die Niederschlagsdaten des entsprechenden Gitterelements von CH02H in Form von *Zeitreihen*. Damit lässt sich die Qualität des neuen Datensatzes zumindest an 68 Gitterpunkten visuell mit den tatsächlich gemessenen Werten vergleichen. Vier ANETZ-Stationen lassen allerdings keinen Vergleich zu: auf Jungfrau­joch, Hörnli und Lägern werden keine Niederschlagsmessungen durchgeführt, und La Dôle fällt genau in eine der beiden noch verbleibenden Datenlücken.

Zusätzlich erstellt das Programm eine *Zeitreihe der Differenzen* zwischen den beiden Datensätzen, sowie *Histogramme* mit der Stunden­zahl, in welchen eine bestimmte Niederschlagsmenge gefallen ist, unterteilt in Klassen mit Breiten von 1.0 bzw. 0.1 mm/h. Zur Kontrolle lassen sich auf Wunsch ausserdem die *Tagessummen* aller Datensätze, d.h. von CH02D, ANETZ-Station und CH02H, auf den Bildschirm ausgeben.

Mit `ch02h_modul_3` bietet sich wiederum die Möglichkeit zum Vergleich mit ANETZ-Stationen. Das Programm berechnet für jeweils eine der 68 ANETZ-Stationen mit Niederschlagsmessung und das entsprechende Gitterelement von CH02H die Anzahl Stunden mit einer gewissen Niederschlagsmenge und zeichnet davon ein Histogramm bzw. die kumulative, normierte und bezüglich der Mittelwertsdifferenzen korrigierte Niederschlagshäufigkeitsverteilung – je mit Klassenbreiten von 0.1 mm/h. Im Gegensatz zu Modul 2 erzeugt Modul 3 ausschliesslich *saisonale* Diagramme, wobei der Begriff *saisonal* hier und im weiteren meteorologisch, nicht astronomisch verstanden wird, d.h. der Winter dauert von Dezember bis Februar, der Frühling von März bis Mai, der Sommer von Juni bis August und der Herbst von September bis November.

Weil visuelle Vergleiche allein zur Qualitätskontrolle nicht ausreichen, ermöglicht **ch02h_modul_4** einen Vergleich von CH02H mit den ANETZ-Messungen unter Verwendung statistischer Prinzipien. Es handelt sich deshalb um das eigentliche Kernstück der Validierung. Die folgenden Grössen werden jeweils für Stundenwerte, Drei- und Sechs-Stunden-Mittel berechnet und mit Symbolen, welche sich nach dem Betrag des Resultats richten, auf Karten dargestellt:

- *Verhältnis der normierten Intensitäten:*

$$\frac{I_D/M_D}{I_A/M_A} \quad (10)$$

I: Mittel sämtlicher Niederschlagsstunden

M: Mittel sämtlicher Stunden mit Daten

Index D: Disaggregation

Index A: ANETZ-Station

Dieser Grösse lässt sich entnehmen, welchen Anteil der Niederschlagsstunden, die an einer ANETZ-Station registriert werden, CH02H tatsächlich abdeckt. Je näher dieses Verhältnis bei 1 zu liegen kommt, als umso genauer kann die Disaggregation eingeschätzt werden. Wird der Bruch > 1 , erfasst die Disaggregation eine zu geringe Anzahl Niederschlagsstunden und gelangt daher, durch die Verteilung der vorhandenen Niederschlagsmengen auf diese, zu einer überhöhten Intensität. Umgekehrt bedeutet ein Wert < 1 , dass die Disaggregation von zu vielen Niederschlagsstunden ausgeht, weshalb die Niederschlagsraten zu gering ausfallen. Die Division durch M erfolgt, damit sich systematische Unterschiede zwischen den punktuellen ANETZ-Messungen und den Gitterflächen von CH02H nicht auf das Ergebnis auswirken.

- *Verhältnis der Niederschlagshäufigkeiten für 0.1, 1, 5 und 10 mm/h:*

$$F_D/F_A \quad (11)$$

F: Anzahl Stunden, an welchen mehr als 0.1, 1, 5 bzw. 10 mm Niederschlag gefallen sind

Im Gegensatz zum Verhältnis der normierten Intensitäten gibt diese Beziehung an, welche Niederschlagsraten in CH02H infolge der Disaggregation unter- oder übervertreten sind. Nimmt der Bruch den Wert 1 an, wird durch die Disaggregation keine Niederschlagsintensität benachteiligt. Ein Ergebnis > 1 dagegen bedeutet, dass die betreffenden Niederschlagsraten bei der Disaggregation häufiger generiert werden, als sie in Wirklichkeit auftreten, während ein Resultat < 1 darauf verweist, dass die entsprechenden Niederschlagsintensitäten in CH02H zu selten vorkommen.

- *Root Mean Square (RMS):*

$$RMS = \sqrt{\left(\frac{d_i}{I_D} - \frac{a_i}{I_A}\right)^2} \quad (12)$$

d: Niederschlagsmenge der Disaggregation zum Zeitpunkt i

a: Niederschlagsmenge der ANETZ-Station zum Zeitpunkt i

RMS ist ein Mass für die Ähnlichkeit zweier Zeitreihen. Je mehr diese miteinander übereinstimmen, umso kleiner wird RMS. RMS gleich null bedeutet, dass zwei Zeitreihen identisch sind. In Bezug auf CH02H misst RMS also den Grad der zeitlichen Übereinstimmung der disaggregierten Niederschlagsmengen an gewissen Gitterpunkten mit den betreffenden ANETZ-Messungen. Die Stundenwerte werden dabei durch die mittleren Intensitäten dividiert, um zu verhindern, dass deren Differenzen, welche bereits zuvor mit dem Verhältnis der normierten Intensitäten untersucht wurden, die RMS erneut beeinflussen.

➤ *Absolute Mean Deviation (AMD):*

$$AMD = \left| \frac{d_i}{I_D} - \frac{a_i}{I_A} \right| \quad (13)$$

AMD macht eine ähnliche Aussage wie RMS, ist allerdings weniger anfällig gegenüber zeitlichen Verschiebungen, weil das Quadrieren mit anschliessendem Radizieren durch den Absolutbetrag ersetzt wird. Auf diese Weise fallen vereinzelte, grosse Abweichungen gegenüber zahlreichen kleineren weniger stark ins Gewicht.

ch02h_modul_5 berechnet für jede Gitterzelle von CH02H den *mittleren, saisonalen Niederschlag (M)*, die *saisonale Niederschlagsintensität (I)* und die *relative Niederschlagshäufigkeit (F_{0,1})* pro Anzahl Stunden mit verfügbaren Daten). Danach werden die berechneten Grössen auf dem Bildschirm in Form von Karten ausgegeben.

ch02h_modul_6 zeichnet auf der Grundlage von CH02H für einen beliebig wählbaren Zeitraum *stündliche Niederschlagskarten der Schweiz* und abschliessend die gesamte in dieser Zeit gefallene Niederschlagsmenge.

ch02h_modul_7 dient bereits zum Überprüfen, welche Möglichkeiten CH02H bietet. Mit diesem Programm lassen sich für jedes Gitterelement die Stunden aufsummieren, an welchen die Niederschlagsspitze einen vom Benutzer vorgegebenen Wert überschritten hat. Danach wird diese Summe mit der Anzahl möglicher Stunden, d.h. Stunden mit vorhandenen Radardaten, normiert und auf einer Karte eingezeichnet.

Analog können die Tage mit einer frei wählbaren Mindestniederschlagsmenge gezählt werden, wobei ausserdem die Möglichkeit besteht, CH02H mit den CH02D-Daten zu kontrollieren.

ch02h_modul_8 berechnet für jeden Gitterpunkt die folgenden saisonalen und ganzjährigen *Quantile* der Niederschlagsmengen und stellt sie anschliessend graphisch auf je einer Karte dar: $\alpha_{10\%}$, $\alpha_{20\%}$, $\alpha_{25\%}$, $\alpha_{30\%}$, $\alpha_{40\%}$, $\alpha_{50\%}$, $\alpha_{60\%}$, $\alpha_{70\%}$, $\alpha_{75\%}$, $\alpha_{80\%}$, $\alpha_{90\%}$, $\alpha_{95\%}$, $\alpha_{99\%}$, $\alpha_{99.5\%}$ und $\alpha_{99.9\%}$, sowie die Quartilsdifferenz ($\alpha_{75\%} - \alpha_{25\%}$). Damit die zeitaufwendige Berechnung aber überhaupt erst vorgenommen wird, müssen pro Gitterpunkt für die ganzjährigen Quantile pro Jahr mindestens 2000, für die saisonalen Quantile pro Saison mindestens 500 Stunden mit gültigen Daten vorhanden sein. Dies entspricht jeweils rund einem Viertel der gesamthaft möglichen Stundenzahl.

Mit Hilfe von **ch02h_modul_9** schliesslich lassen sich folgende vier Formen des saisonalen bzw. ganzjährigen, täglichen Niederschlagsverlaufs (*Tagesgang*) darstellen: der Vergleich zwischen einer ANETZ-Station

und dem entsprechenden Gitterelement, der Tagesgang an jedem beliebigen Gitterpunkt, der über sämtliche Gitterzellen gemittelte Tagesgang, sowie der über alle ANETZ-Stationen und die entsprechenden Gitterpunkte gemittelte Tagesgang. Für jede Art der Berechnung stehen erneut vier verschiedene Auswahlkriterien zur Verfügung: Mittelwert über sämtliche, d.h. auch niederschlagsfreie, Tage, Durchschnitt über alle Niederschlagstage, Mittel aller Tage, an welchen die Niederschlags*spitze* einen bestimmten Wert überschritten hat, oder Durchschnitt aller Tage, an welchen die Niederschlags*menge* über einem frei wählbaren Betrag zu liegen kam.

3.3.1 KRITISCHE NIEDERSCHLAGSMENGE

Infolge der Disaggregation enthält CH02H zahlreiche Stundenwerte mit extrem kleinen Niederschlagsmengen, welche weit unterhalb der Messgenauigkeit der ANETZ-Stationen von gegenwärtig 0.1 mm/h liegen. Besonders beim Berechnen von Histogrammen, kumulativen Verteilungen, Quantilen oder anderen statistischen Grössen, wie RMS, können solche Artefakte die Resultate erheblich verzerren. Davon betroffen sind hauptsächlich die Module 2, 3, 4 und 8. In diesen Programmen wurde daher an geeigneter Stelle ein Filter eingebaut, welcher dafür sorgt, dass sämtliche Niederschlagsmengen kleiner als 0.1 mm/h für die nachfolgenden Berechnungen nicht herangezogen und die entsprechenden Stunden als niederschlagsfrei angesehen werden.

3.3.2 BESONDERHEIT TAGESBEGINN

Weil die Niederschlagsmenge an den Tagessammlern der MeteoSchweiz jeweils um 5:⁴⁰ UTC abgelesen wird, ist der Tagesbeginn von CH02D und damit auch von CH02H auf diesen Zeitpunkt festgelegt. Demgegenüber führt die MeteoSchweiz die ANETZ-Daten für einen bestimmten Tag stets um 0:⁰⁰ UTC beginnend auf. In Anbetracht dessen, dass nur Stundenwerte betrachtet werden, bedeutet dies, dass die beiden Datensätze um sechs Stunden gegeneinander verschoben sind, was es sowohl beim Programmieren, als auch bei der Interpretation von Vergleichen zwischen ANETZ-Daten und CH02H zu berücksichtigen gilt.

Während aber beim Schreiben eines Programms lediglich die Verschiebung um sechs Einheiten nicht vergessen werden darf, was, ausser im Bereich der Jahreswechsel, keinen Mehraufwand darstellt, sind die Auswirkungen auf die Interpretation schwerwiegender, weil nicht wirklich eine Verschiebung um exakt sechs Stunden vorliegt. Die aufgerundeten 20 Minuten implizieren die Möglichkeit, dass die stündlichen Niederschlagsmengen in CH02H gegenüber den ANETZ-Stationen a priori um eine Stunde verschoben sein können, nämlich dann, wenn Niederschlagsereignisse in den letzten 20 Minuten einer Stunde einsetzen oder nachlassen oder sich ausschliesslich auf diese Zeitspanne beschränken. Aus dem gleichen Grund können auch die Tagessummen mehr oder minder stark voneinander abweichen.

3.3.3 VERSCHIEDENE KARTENAUSSCHNITTE

Von 1992 bis 1999 deckt CH02D einen Ausschnitt der Erdoberfläche von 5.75 bis 10.75°E und 45.75 bis 47.875°N ab. Seit 2000 dagegen sind die Daten nur noch für das Gebiet der Schweiz vorhanden. Aber schon in den Jahren vor 2000 waren die Daten in den Randbereichen aufgrund fehlender oder unzureichender Radarabdeckung mit grossen Unsicherheiten behaftet, wie sich spätestens bei der Berechnung der Quantile herausstellte. An vielen in den Randzonen gelegenen Gitterpunkten wären demgemäss im gesamten Zeitraum von 8 Jahren nur an einigen wenigen Stunden überhaupt Niederschläge registriert worden.

Um die Einheit und damit die Vergleichbarkeit der Daten zu gewährleisten sowie um Fehlern, welche aus mangelnder Radarabdeckung resultieren, vorzubeugen, gelangt deshalb in den meisten Programmen, welche Karten der Schweiz zeichnen, eine Maske zur Anwendung. In einer ersten Phase liess diese, abgesehen von den östlichsten Regionen Graubündens, wo gar nie Radardaten vorhanden sind, die gesamte Schweiz unberührt, während sämtliche anderen Bereiche entfernt wurden. Mit der Zeit stellte sich eine Erweiterung der Maske um einige grössere Gebiete innerhalb der Landesgrenzen allerdings als unausweichlich heraus (siehe Kapitel 4.3).

Später konnte diese Maske dann relativ einfach für die einzelnen Grossregionen des Landes – Jura, Mittelland, Alpen und Alpensüdseite – modifiziert werden.

4 RESULTATE

4.1 VERFÜGBARKEIT DER RADARDATEN

4.1.1 STUNDEN OHNE RADARDATEN

Abbildung 4-1 zeigt den Anteil derjenigen Stunden im gesamten Zeitraum von 1992 bis 2003, während denen eines oder mehrere Radare der MeteoSchweiz kein einziges Bild geliefert haben. Demzufolge ist das Albis-Radar mit nicht einmal 5% Ausfällen am zuverlässigsten, gefolgt vom Radar auf La Dôle mit rund 10% fehlenden Stunden. Am schlechtesten schneidet hier das Radar auf dem Monte Lema ab, welches gegen 25% Ausfälle verzeichnet. Dies ist allerdings nicht weiter verwunderlich, war dieses Radar in den ersten drei Jahren der betrachteten Zeitspanne doch noch gar nicht in Betrieb.

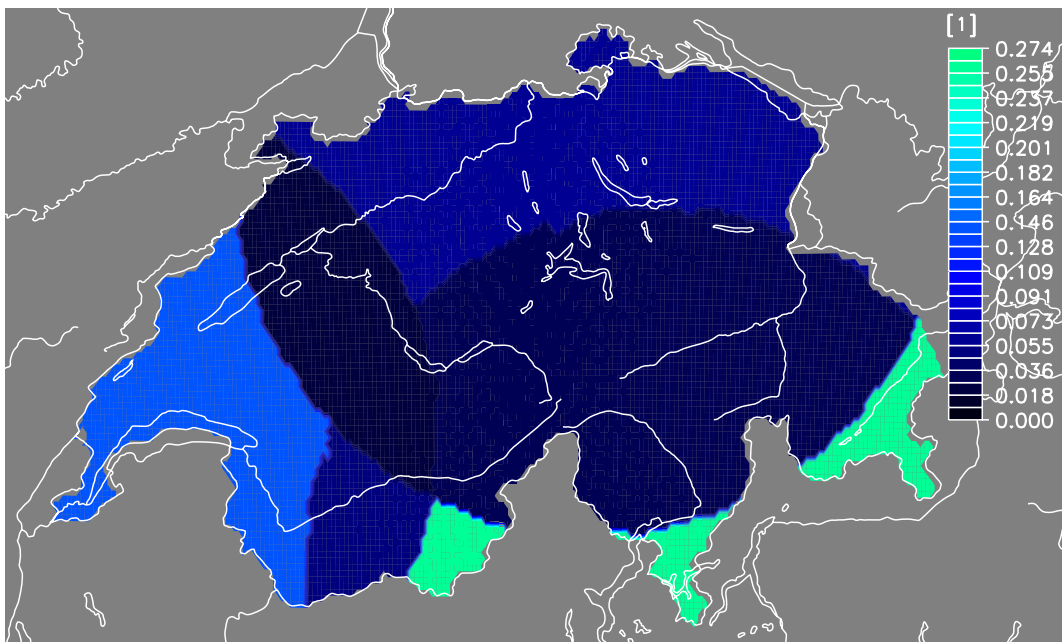


Abb. 4-1: Die Karte zeigt für jeden Gitterpunkt den Anteil der Stunden ohne Radardaten an den insgesamt 105192 Stunden zwischen dem 1. Januar 1992, 5:⁴⁰ UTC und dem 1. Januar 2004, 4:⁴⁰ UTC. 0.0 bedeutet, dass die Radardaten für den gesamten Zeitraum lückenlos vorhanden sind, 1.0 dagegen, dass für die betreffenden Gitterelement gar keine Radarmessungen zur Verfügung stehen.

Ein Vergleich mit Abbildung 4-2 macht schnell klar, dass das Monte-Lema-Radar seit seiner Inbetriebnahme im Oktober 1994 nicht häufiger ausgeschaltet war als das Albis-Radar. Dagegen liefert La Dôle auch in diesem Zeitintervall während ungefähr 10% aller Stunden keine Daten, womit es insgesamt das Radar mit den meisten Ausfällen ist.

Die beste Abdeckung bezüglich Radarverfügbarkeit – nämlich fast 100% – besteht zweifelsohne in den Überschneidungszonen der Sichtbereiche der drei Radare, was zudem bedeutet, dass so gut wie nie alle drei Radare gleichzeitig ausser Betrieb sind.

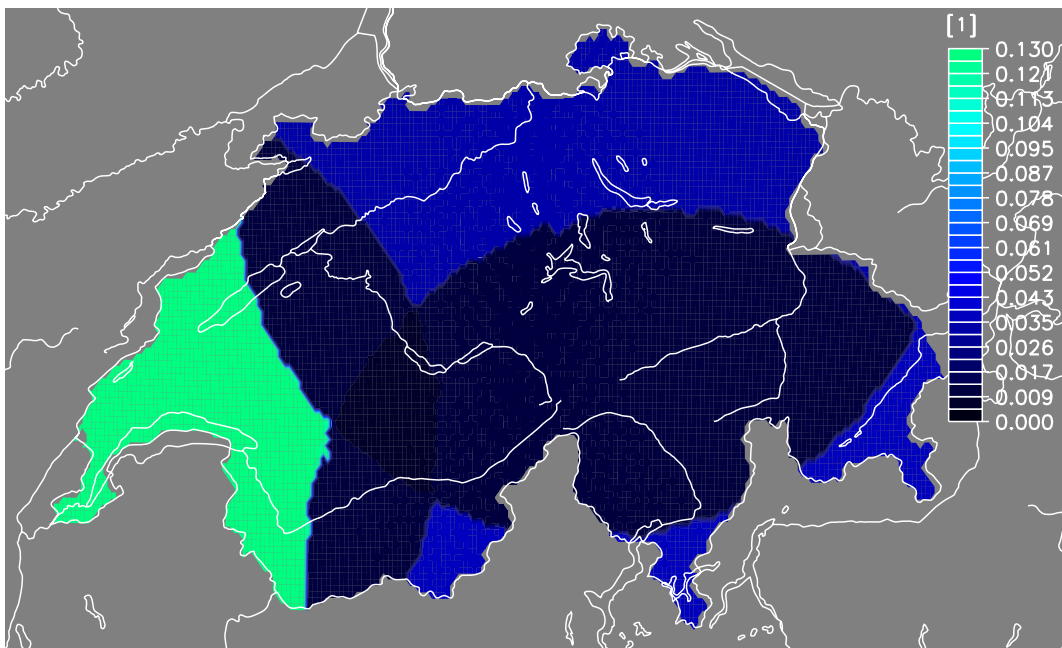


Abb. 4-2: Analog zu Abb. 4-1, aber für das Zeitintervall vom 1. Januar 1995, 5:⁴⁰ UTC bis zum 1. Januar 2004, 4:⁴⁰ UTC (gesamthaft 78888 Stunden), damit die Ausfallanfälligkeit des Monte-Lema-Radars, welches erst am 24. Oktober 1994 seinen Betrieb aufnahm, mit derjenigen der anderen Radars verglichen werden kann.

4.1.2 GELOESCHTE TAGE

Eine der beiden Varianten von *disaggregation* löscht die Daten eines ganzen Tages an sämtlichen Gitterpunkten, für welche auch nur während einer einzigen Stunde des betreffenden Tages keine Radardaten vorhanden sind. Den Anteil solcher Tage an der gesamten Zeitspanne zwischen 1992 und 2003 präsentiert Abbildung 4-3. Die Differenzen zwischen den einzelnen Radars fallen hier sichtlich geringer aus. Im Überlappungsbereich von Albis- und La Dôle-Radar müssen weniger als 7% aller Tage gelöscht werden, in jenen von Albis und Monte Lema bzw. La Dôle und Monte Lema je zwischen 7 und 10.5%. In der Nordschweiz, welche nur vom Albis-Radar allein abgedeckt wird, fallen zwischen 10.5 und 14% der Tage dieser Massnahme zum Opfer, in der Westschweiz (nur La Dôle) etwas mehr als 20% und auf der Alpensüdseite (nur Monte Lema) über 30%.

Eine Beschränkung auf die Jahre 1995 bis 2003 bringt wiederum eine deutliche Verbesserung für den gesamten Abdeckungsbereich des Monte-Lema-Radars, andererseits – und dies vermag in Anbetracht der Beobachtungen unter 4.1.1 eher zu erstaunen – in geringerem Ausmass auch für denjenigen von La Dôle. In sämtlichen Regionen, in welchen sich die Einflussbereiche der drei Radare überschneiden, geht daher der Anteil gelöschter Tage auf weniger als 3.5% zurück. Auf der Alpensüdseite müssen nur noch 10 bis 14% aller Tage bereinigt werden, in der Westschweiz zwischen 15 und 20% (Abb. 4-4). Offenbar sind die Stunden, an welchen das Radar auf La Dôle im Laufe eines Jahres ausgeschaltet bleibt, ab 1995 auf eine geringere Anzahl Tage konzentriert als vorher.

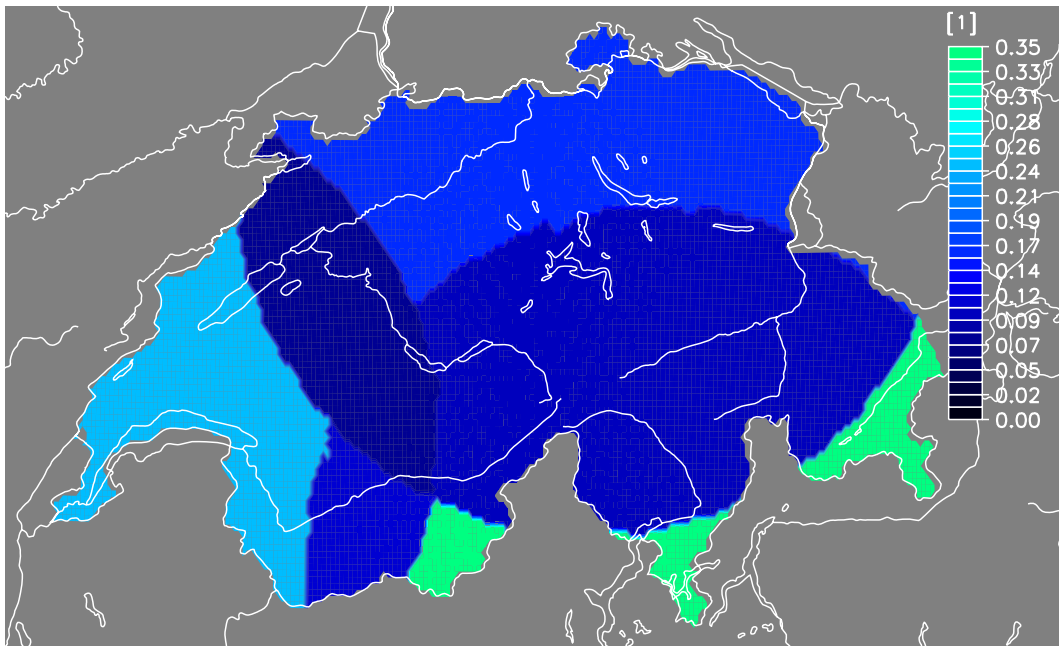


Abb. 4-3: Dargestellt ist der Anteil der total 4383 Tage vom 1. Januar 1992 bis am 31. Dezember 2003, an welchen ein Radar zumindest während einer ganzen Stunde ausser Betrieb war, und die deswegen bei einer Variante von CH02H gelöscht werden. 1.0 heisst, dass für die entsprechende Gitterzelle sämtliche Tage infolge mangelnder Radardaten gelöscht werden, während 0.0 für vollständige Daten steht.

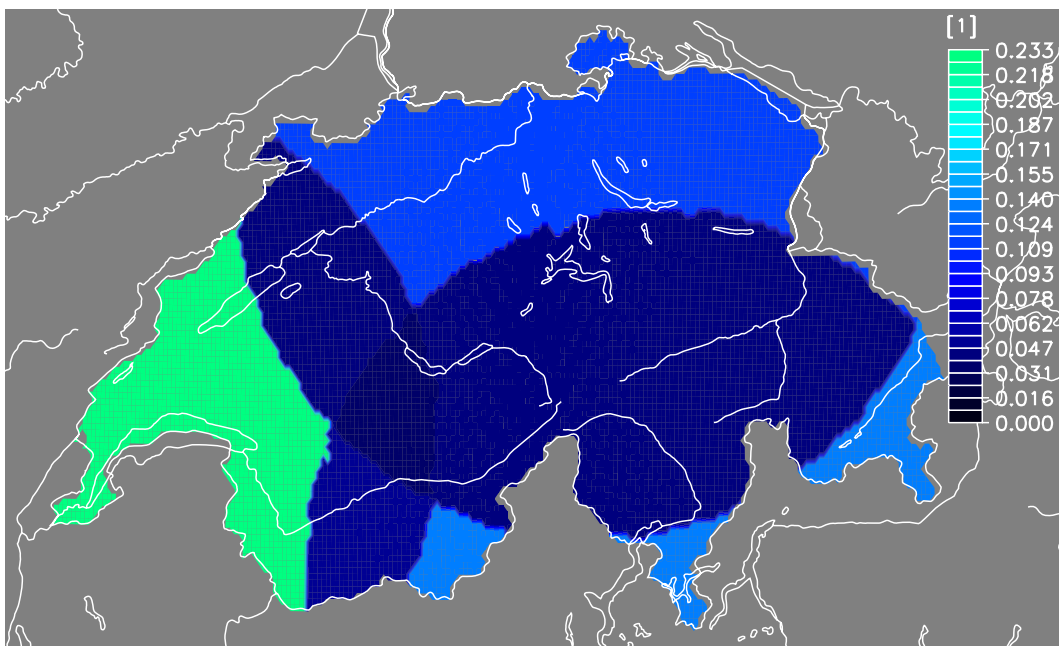


Abb. 4-4: Wie Abb. 4-4, aber für die Anzahl Tage vom 1. Januar 1995 bis zum 31. Dezember 2003 (insgesamt 3287 Tage). Auf dieser Graphik bleiben die annähernd drei Jahre, während denen das Radar auf dem Monte Lema noch nicht in Betrieb war, unberücksichtigt, wodurch ein direkter Vergleich mit den anderen Radars auf dem Albis und auf La Dôle besser möglich wird.

4.1.3 NIEDERSCHLAGSFREIE STUNDEN

Diese Zählung verfolgte in einer früheren Fassung von disaggregation zwei verschiedenen Ziele. Einerseits sollte damit bis zu einem gewissen Grad auf die Radarabschattung bestimmter Gebiete geschlossen werden können, andererseits bestand tatsächlich die Absicht, die Verteilung der Niederschlagshäufigkeit zu erfassen.

Weil die neueste Version von disaggregation als Folge zahlreicher Veränderungen inzwischen für jeden Gitterpunkt auch die Tage zählt, an welchen CH02D zwar Niederschlag meldet, sämtliche Radarbilder trotz eingeschaltetem Radar aber keine Reflektivitäten zeigen (siehe Kapitel 4.1.4), entfällt der erste Verwendungszweck weitestgehend.

Abbildung 4-5 zeigt für jede Gitterzelle den Anteil der niederschlagsfreien Stunden an der Gesamtzahl der Stunden mit vorhandenen Radardaten. Obwohl die Angaben über den Alpen und vor allem für das Wallis und Graubünden trotz der Normierung noch mit einer beträchtlichen Unsicherheit behaftet sind, bestätigt diese Karte doch ziemlich eindeutig die in Kapitel 4.5.1 noch ausführlicher besprochene Zweiteilung der Schweiz in Bezug auf die Niederschlagshäufigkeit. Im Wallis, im Tessin und in Graubünden ist die Zahl der Niederschlagsstunden markant geringer als in weiten Teilen des Mittellands und des Juras. Besonders niederschlagsreich scheinen dagegen der Berner Jura und die Jungfrauregion. Während die Spitzenwerte der Jungfrauregion sich aber aus den monatlichen Niederschlagsklimatologien erklären lassen, ist im Berner Jura eher das Gegenteil der Fall – hier dürfte ein nicht unbedeutender Anteil an der hohen Niederschlagshäufigkeit auf Bodenechos zurückzuführen sein, wofür diese Gegend unter Radarfachleuten bekannt ist (persönliche Kommunikation mit Willi Schmid).

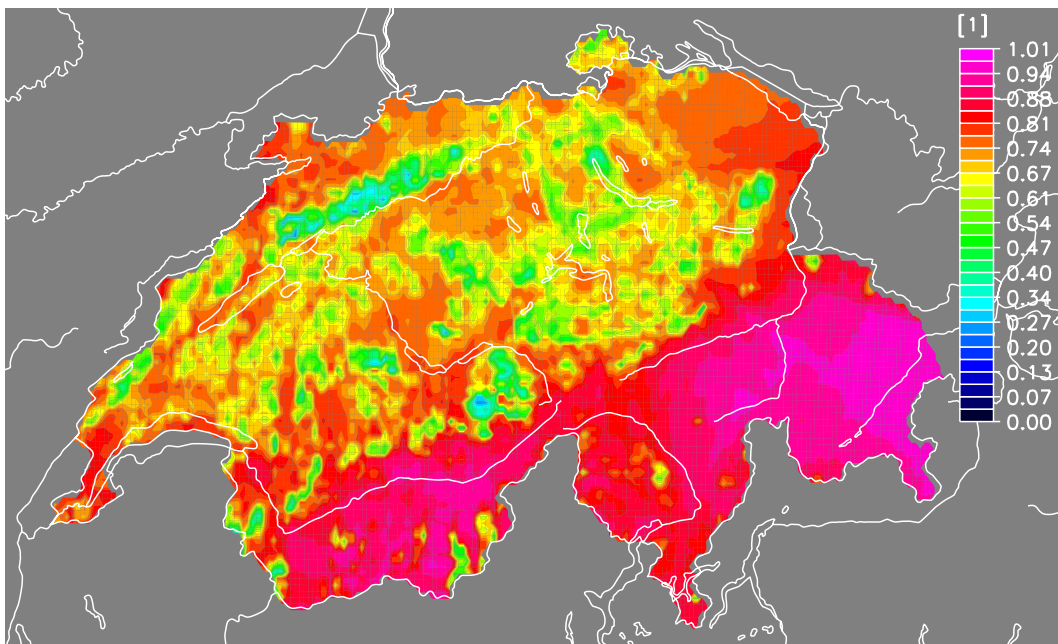


Abb. 4-5: Auf dieser Graphik ist für jede Gitterfläche die Zählung der Stunden abgebildet, an welchen es zwischen dem 1. Januar 1992, 5:40 UTC und dem 1. Januar 2004, 4:40 UTC gemäss CH02H nicht geregnet hat. Die Summen sind normiert mit der Zahl der Stunden, an welchen Radarinformationen vorliegen.

4.1.4 ABSCHATTUNG

In den obigen Abschnitten wurde bereits verschiedentlich auf das Problem der Abschattung gewisser Regionen gegen Radarstrahlen hingewiesen. Davon besonders betroffen sind Täler, die von hohen Bergen umgeben sind, wodurch die tieferen Atmosphärenschichten dort für das Radar unsichtbar bleiben und Informationen erst für höhere Lagen in der Troposphäre, d.h. bei grösseren Elevationswinkeln der Antenne, erhältlich sind. Messen lässt sich das genaue Ausmass der Abschattung mit Hilfe von CH02H nicht, immerhin kann sie aber abgeschätzt werden, indem für jede Gitterfläche die Tage gezählt werden, an welchen gemäss

CH02D Niederschlag gefallen sein müsste, während sämtliche Radarbilder in diesen 24 Stunden trotz aktivem Radar keine Reflektivitäten aufweisen.

Einen solchen Versuch stellt Abbildung 4-6 für die Jahre 1992 bis 2003 dar. Gemäss dieser Darstellung sollte die ganze Schweiz von Abschattungseffekten betroffen sein, was nicht nur höchst unwahrscheinlich, sondern geradezu unmöglich ist, zumal alle drei Wetterradare der MeteoSchweiz an erhöhten Lagen aufgestellt sind. Die Beobachtung lässt sich am plausibelsten mit der kombinierten Wirkung der Programme `five_neighbor_filter` und `fill_holes5` vor der Disaggregation sowie des SYMAP-Algorithmus beim Berechnen der CH02D-Daten erklären. Erstere filtern Radarechos, welche auf dem GIF-Bild nur ein Pixel gross sind, heraus, letzterer interpoliert die Messreihen benachbarter Niederschlagsmesser an Gitterflächen ohne eigenen Messstandort. Folglich dürfte es sich frühestens ab den auf der Karte hellblau bis türkis eingefärbten Flächen um wahrhaftig abgeschattete Regionen handeln. Wesentlich unter der Abschattung leidet CH02H demnach hauptsächlich in grossen Teilen Graubündens, ausserdem im Monte-Rosa-Gebiet und im Obergoms.

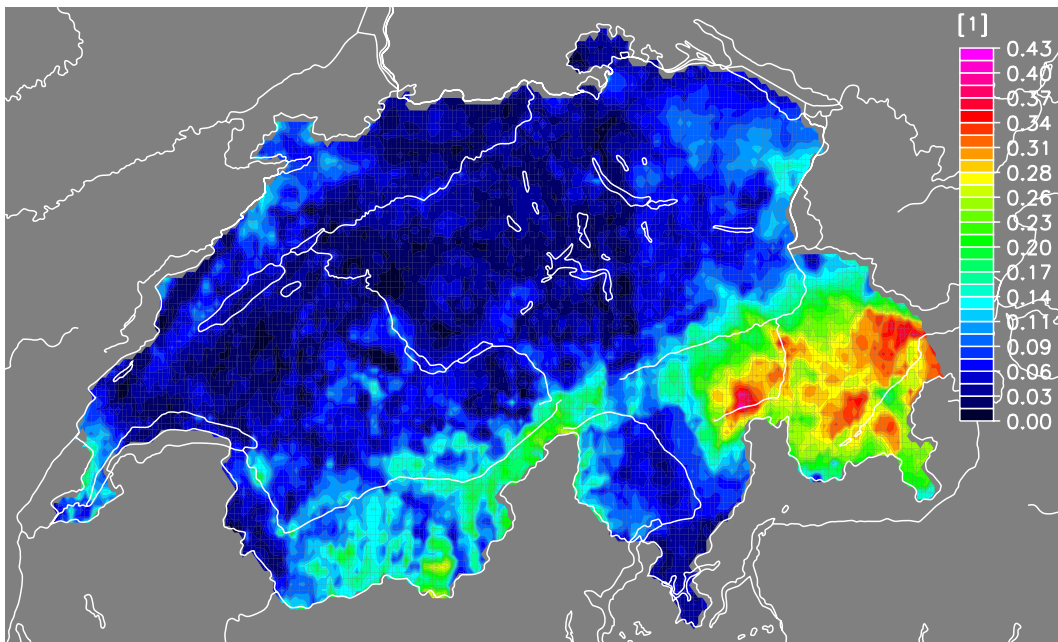


Abb. 4-6: Diese Karte ist das Resultat einer Zählung der Tage, an welchen es gemäss CH02 geregnet hat, während das eingeschaltete Radar keine Echos meldet. Sie kann daher zur Abschätzung der Radarabschattung benutzt werden. Eingezeichnet ist für jeden Gitterpunkt der Anteil solcher Tage an der Gesamtzahl der Tage mit vollständigen Radardaten vom 1. Januar 1992 bis zum 31. Dezember 2003.

4.2 VALIDIERUNG

4.2.1 ZEITREIHEN

Am Anfang der Validierung steht ein Vergleich der Zeitreihen von Niederschlagsmessungen an einzelnen ANETZ-Stationen mit denjenigen der entsprechenden Gitterpunkte von CH02H. In qualitativer Hinsicht stimmen diese an vielen Standorten erfreulich gut überein: nur in seltenen Fällen zeigt CH02H Niederschläge, während die betreffende ANETZ-Station gar keine registriert, oder verpasst ansehnliche Regen- bzw.

Schneefälle, welche das ANETZ erfasst (Abb. 4-7, linke Seite). Zudem erscheinen die grossen Niederschlags-
spitzen meistens im gleichen Zeitintervall – nur gelegentlich zeigt einer der beiden Datensätze eine beachtli-
che stündliche Niederschlagsmenge ohne zumindest eine minimale Entsprechung im anderen.

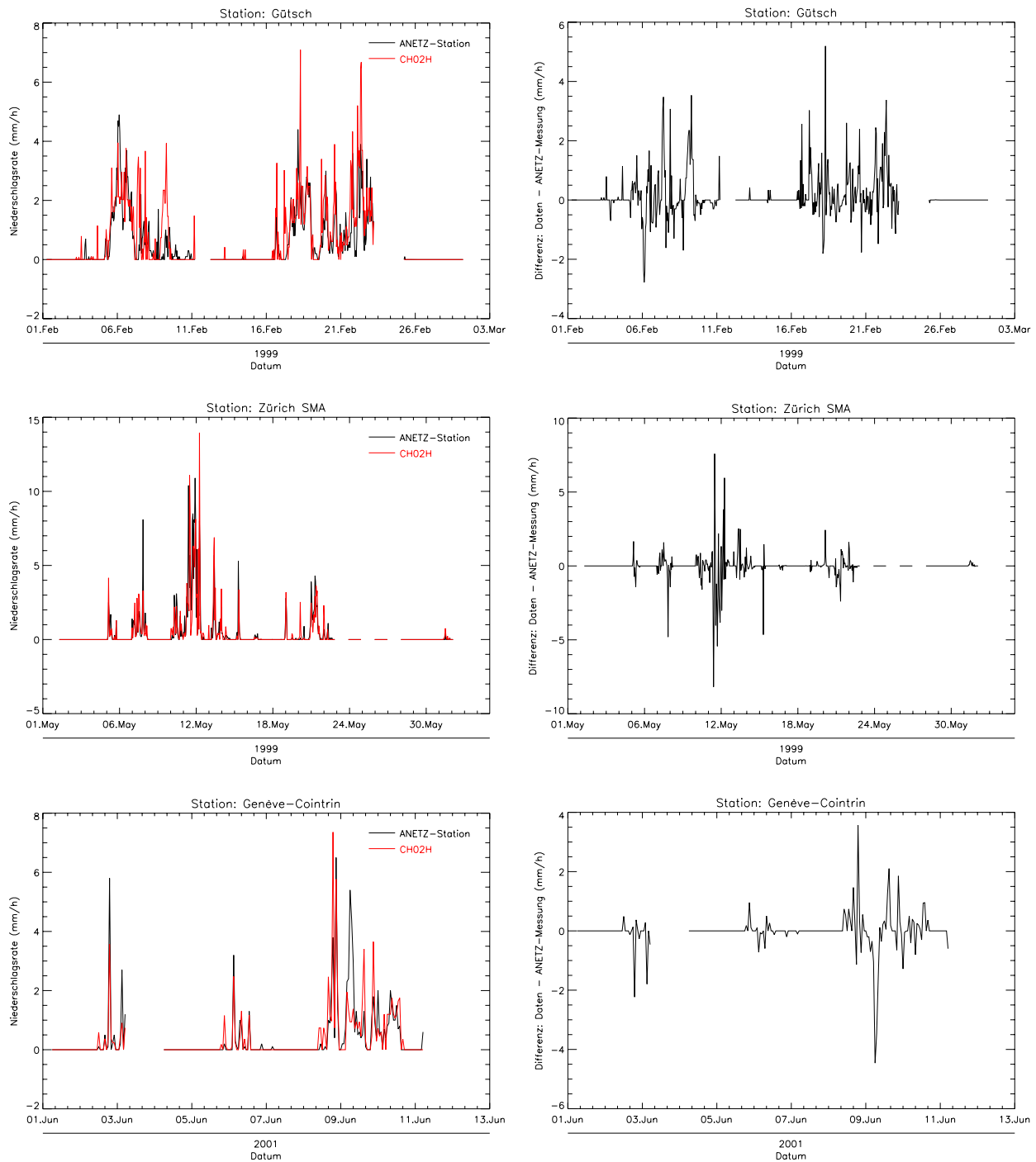


Abb. 4-7: Die drei Diagramme auf der linken Seite zeigen je die Zeitreihe einer ANETZ-Messung – Gütisch (oben), Zürich SMA (Mitte) und Genève-Cointrin (unten) – in schwarz und diejenige der entsprechenden Gitterfläche von CH02H in rot. Die Abszisse dient als Zeitachse, auf der Ordinate ist die stündliche Regenrate in mm/h abgetragen. Die rechte Seite gibt jeweils die Differenzen (in mm/h) zwischen den beiden Zeitreihen wieder.

Quantitativ dagegen können die beiden Datensätze zum Teil erheblich divergieren. So offenbaren die zeitli-
chen Differenzen der obigen Vergleichsreihen auf Abbildung 4-7 (rechts) Unterschiede von bis zu ± 8 mm/h.
Obwohl vielfach eine stark positive auf eine ausgeprägt negative Abweichung folgt (oder umgekehrt), was

immerhin teilweise durch die in Kapitel 3.3.2 beschriebenen zeitlichen Verschiebungen erklärt werden kann, sind die teils beträchtlichen Differenzen doch nicht von der Hand zu weisen.

Die Ursachen dafür sind sicher partiell in den unter Kapitel 1.2.3 aufgeführten Schwierigkeiten im Umgang mit Radardaten und den sich daraus ergebenden Unsicherheiten zu suchen. Ausserdem wird mit TODAY ein relativ einfaches Radarprodukt verwendet, welches nur die maximalen Reflektivitäten aller Elevationen wiedergibt. Diese werden besonders bei stratiformen Niederschlägen oftmals im Bereich des hellen Bandes erreicht, wodurch das Radarbild also häufig die Niederschlagsintensität auf Höhe der Schmelzzone widerspiegelt und nicht etwa diejenige in Bodennähe, wo sich die Pluviometer befinden. Zwischen diesen beiden Niveaus können sich die Niederschlagsmengen infolge Kondensation und Verdunstung allerdings noch erheblich verändern.

Hinzu kommt die Tatsache, dass die einzelnen Gitterzellen, auch wenn eine perfekte, auf fehlerfreien und komplexeren Radarbildern basierende Disaggregation möglich wäre, nicht den Messungen an den ANETZ-Standorten entsprechen müssten, weil infolge der Anwendung von PRISM und SYMAP jeder Gitterpunkt von mehreren Messreihen beeinflusst wird – nicht nur von der nächstliegenden ANETZ-Station. Dies bestätigt auch ein Vergleich der Tagessummen von ANETZ-Messung, CH02D und CH02H (Abb. 4-8). Letztere stimmen in diesem Fall sogar exakt überein, wenngleich kleinere Abweichungen aufgrund fehlender Radardaten möglich wären, weichen aber beizeiten um mehr als 10 mm am Tag von den ANETZ-Daten ab. Nichtsdestoweniger lässt der jeweilige zeitliche Verlauf von CH02D eine grosse Ähnlichkeit mit den meisten ANETZ-Tagessummen erkennen.

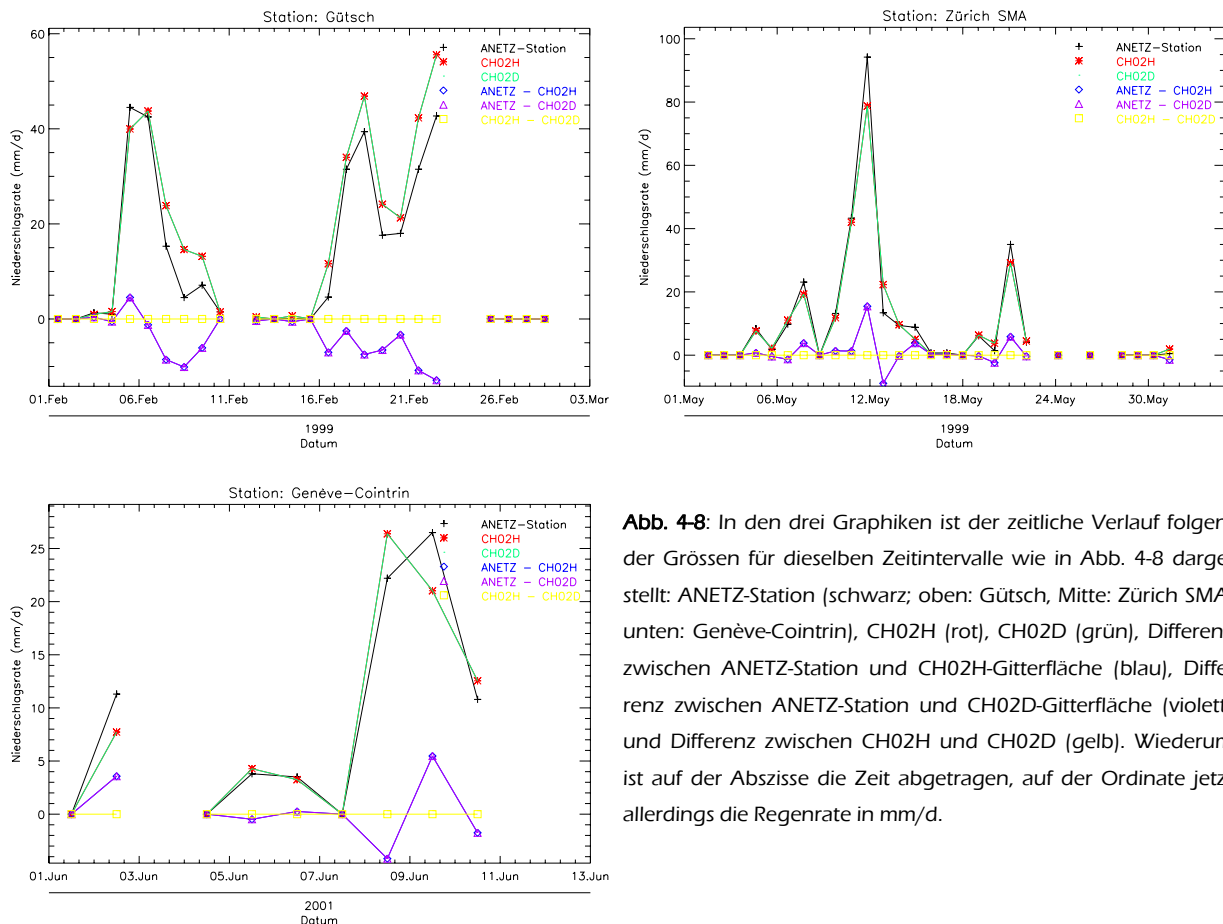


Abb. 4-8: In den drei Graphiken ist der zeitliche Verlauf folgender Grössen für dieselben Zeitintervalle wie in Abb. 4-8 dargestellt: ANETZ-Station (schwarz; oben: Güttsch, Mitte: Zürich SMA, unten: Genève-Cointrin), CH02H (rot), CH02D (grün), Differenz zwischen ANETZ-Station und CH02H-Gitterfläche (blau), Differenz zwischen ANETZ-Station und CH02D-Gitterfläche (violett) und Differenz zwischen CH02H und CH02D (gelb). Wiederum ist auf der Abszisse die Zeit abgetragen, auf der Ordinate jetzt allerdings die Regenrate in mm/d.

Ferner darf nicht vergessen werden, dass sowohl jedes Radarbild-Pixel, als auch jedes Gitterelement von CH02D und damit sämtliche Gitterzellen von CH02H eine Fläche von rund 4 km² repräsentieren, wohinge-

gen ANETZ-Messungen stets punktuell erfolgen. Einerseits kann daher selbst innerhalb dieses relativ kleinen Gebiets die räumliche Niederschlagsverteilung noch erheblich variieren, andererseits dauert es länger, bis eine Niederschlagszone die gesamte Fläche überquert hat als nur den Messstandort. Dieser Umstand gewinnt vor allem in den Sommermonaten an Bedeutung, wenn ein Grossteil der gesamten Niederschlagsaktivität auf relativ kleinräumigen, konvektiven Gewitterzellen beruht.

4.2.2 SAISONALE NIEDERSCHLAGSHÄUFIGKEITSVERTEILUNG

Weil visuelle Zeitreihenvergleiche nur Stichproben im 12-jährigen Datensatz erlauben, werden einander in einem nächsten Schritt die kumulativen, normierten Niederschlagshäufigkeitsverteilungen der ANETZ-Daten und der entsprechenden Gitterflächen von CH02H gegenübergestellt, welche ausserdem für jede Jahreszeit separat berechnet werden und so zugleich auf allfällige saisonale Besonderheiten hinweisen.

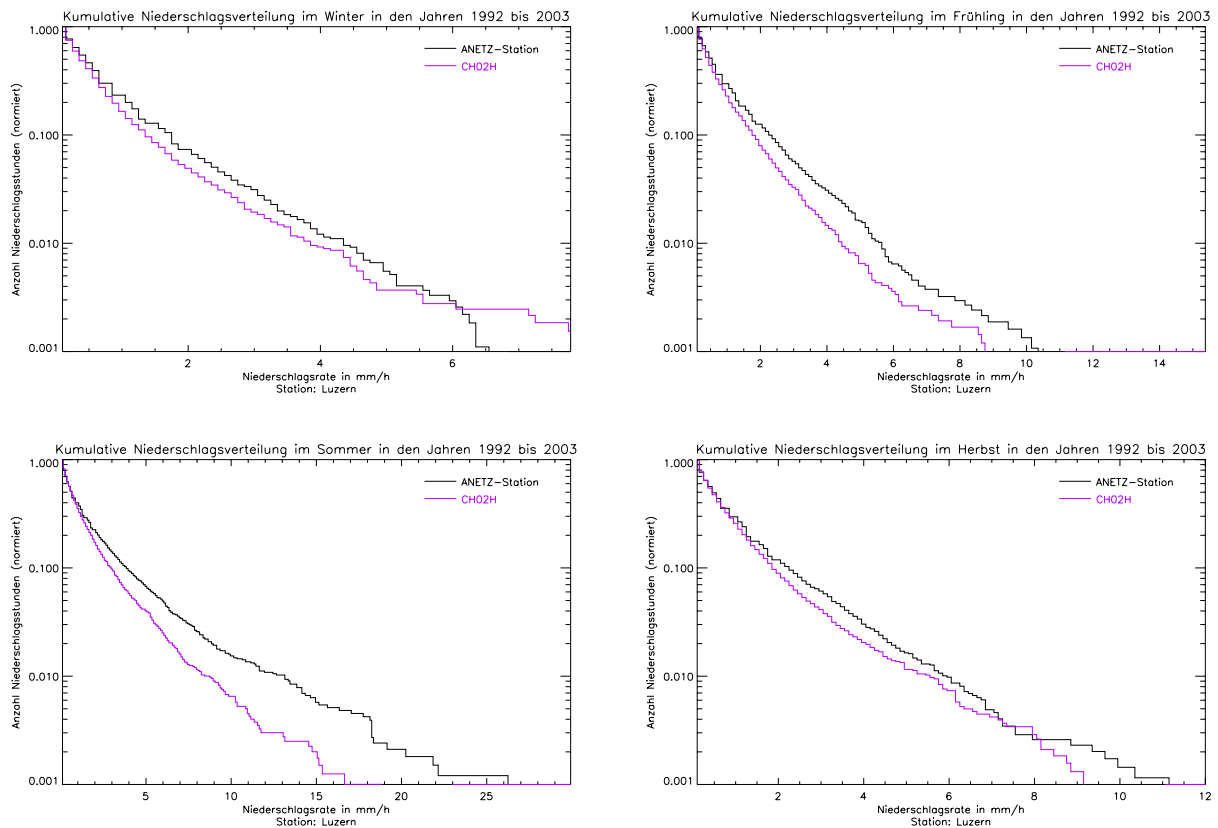


Abb. 4-9: Bei den vier Diagrammen handelt es sich um kumulative, normierte Niederschlagsverteilungen, welche aus den Messungen der ANETZ-Station Luzern (schwarz) bzw. aus der zugehörigen Gitterzelle von CH02H (violett) jeweils für die Wintermonate Dezember bis Februar (oben links), die Frühlingsmonate März bis Mai (oben rechts), die Sommermonate Juni bis August (unten links) und die Herbstmonate September bis November (unten rechts) der Jahre 1992 bis 2003 berechnet wurden. Auf der Abszisse erscheint die Regenrate in mm/h, auf der logarithmischen Ordinate die kumulative, normierte Anzahl der Niederschlagsstunden, wobei die Niederschlagsmengen der Disaggregation ausserdem für die Differenz ihres Mittelwerts zu demjenigen der ANETZ-Messungen korrigiert sind.

Im Flachland und bis in die Voralpen hinein hat CH02H die Tendenz, die Niederschlagsintensität mehr oder weniger ausgeprägt zu unterschätzen, wie den stellvertretend aufgeführten Niederschlagshäufigkeitsverteilungen für den Vergleich mit den ANETZ-Stationen Luzern und Buchs-Suhr leicht entnommen werden kann (Abb. 4-9 und 4-10). Besonders gross werden die Abweichungen oftmals im Sommer, wenn CH02H die

mehrheitlich auf konvektive Gewitteraktivitäten zurückzuführenden, hohen Niederschlagsintensitäten nur ungenügend erfasst.

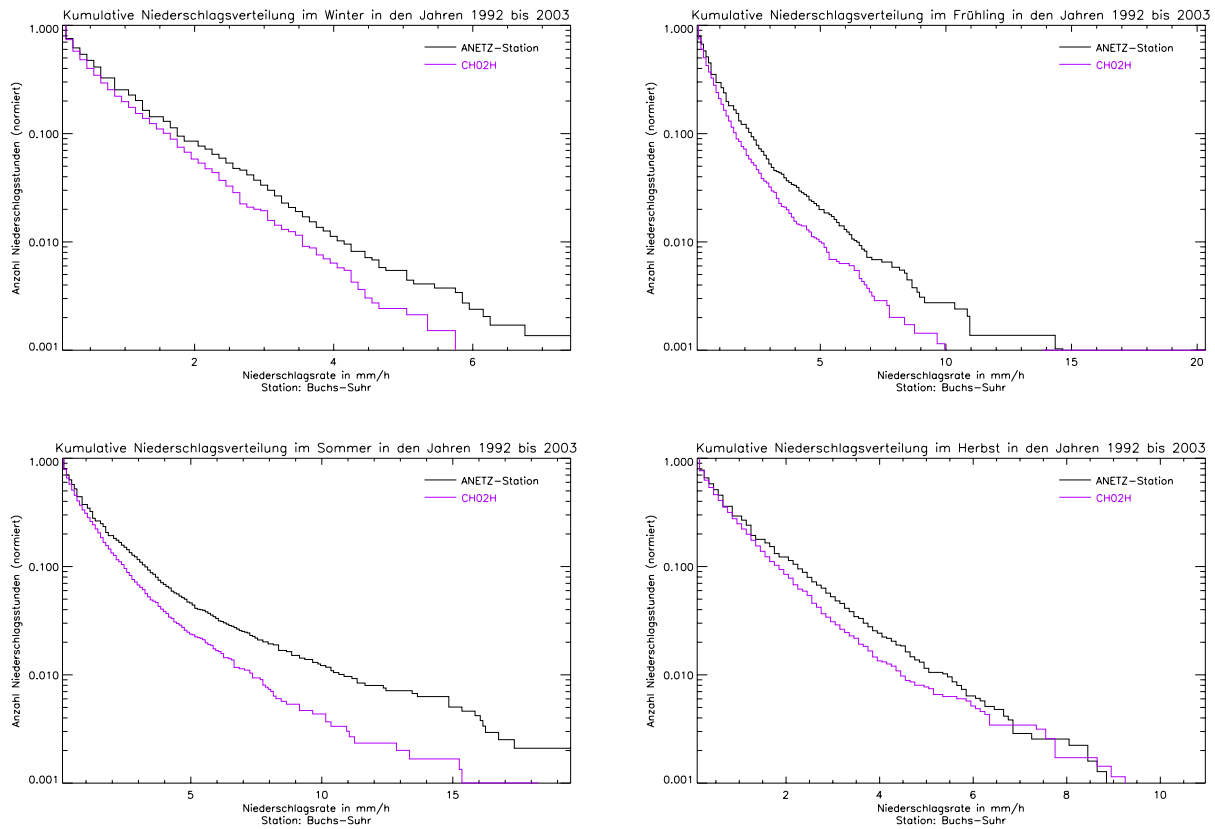


Abb. 4-10: Wie Abb. 4-10, aber für die ANETZ-Station Buchs-Suhr (schwarz) und die passende Gitterfläche von CH02H (violett).

Weil es sich um normierte Stundenzahlen handelt, die überdies für systematische Abweichungen ihrer Mittelwerte korrigiert sind, können dafür allerdings weder das Löschen sämtlicher Tage ohne vollständige Radardaten während der Disaggregation, noch die in Kapitel 3.3.1 erwähnte Herausfilterung kleinster Niederschlagsmengen vor der Berechnung und Darstellung der kumulativen Niederschlagshäufigkeitsverteilung verantwortlich gemacht werden. Stattdessen dürfte die Hauptursache im bereits in Kapitel 4.2.1 erwähnten Unterschied zwischen einer ANETZ-Messung und den auf PRISM und SYMAP beruhenden CH02D-Gitterflächen bestehen. Daneben ist die relativ geringe Auflösung der Niederschlagsrate auf den Radarbildern in nur 7 Klassen ein weiterer möglicher Grund für diese Differenzen. Mit anderen Worten verteilt die Disaggregation die von CH02D vorgegebene Tagesniederschlagsmenge zumindest im Flachland in der Regel nicht nur auf zu viele Stunden, sondern ausserdem zu gleichmässig, woraus eine im Mittel zu geringe und zu ausgeglichene Niederschlagsintensität hervorgeht.

Gegen den Alpenrand hin verschwindet dieser Trend zusehends und bei Vergleichen mit einigen inneralpinen Stationen verhält es sich häufig umgekehrt – als Beispiel sei hier das Grimsel-Hospitz erwähnt (Abb. 4-11). Vor allem im Winter ist hier eine zum Teil massive Überschätzung der Niederschlagsintensitäten zu beobachten, während die Abweichungen in den Sommermonaten meist minimal werden. Eine denkbare Erklärung hierfür sind Abschattungseffekte durch näher bei den Radarstationen gelegene Alpengipfel (vgl. Kapitel 4.1.4).

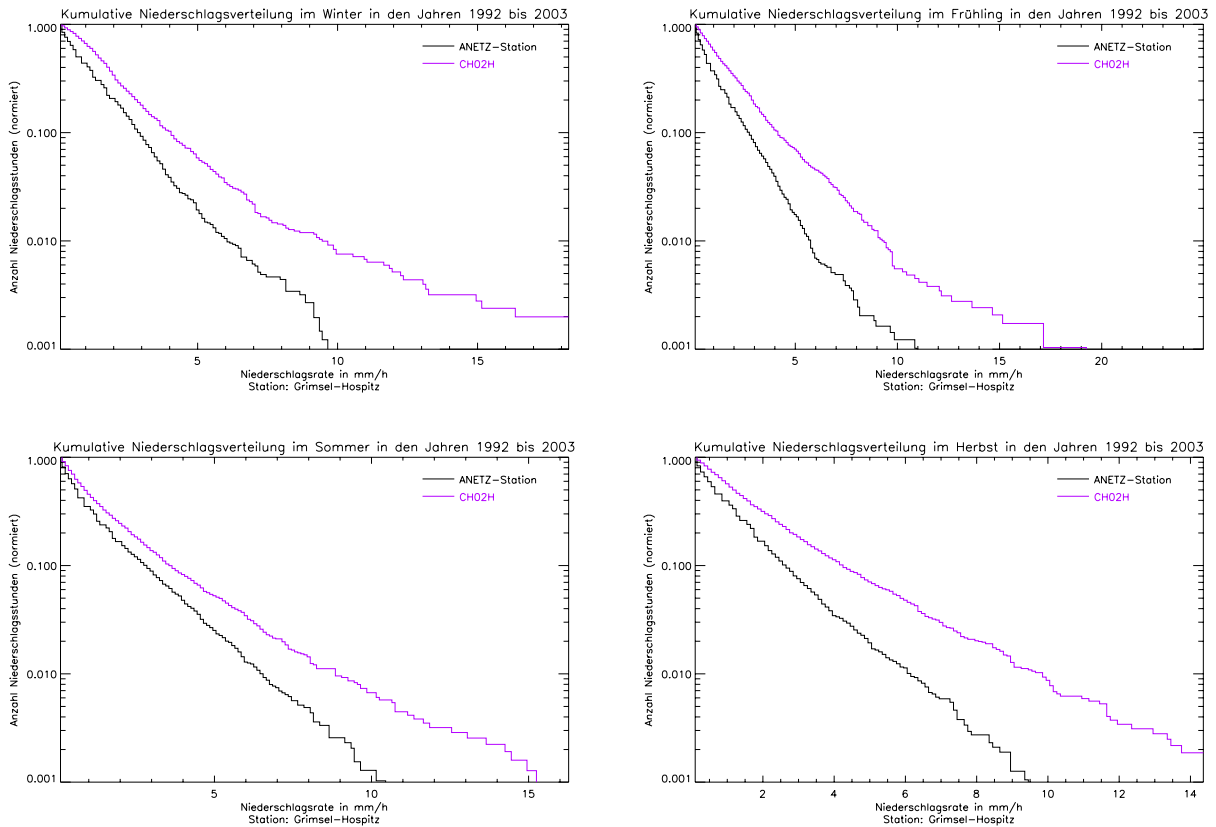


Abb. 4-11: Wie Abb. 4-10, aber für die ANETZ-Station Grimsel-Hospiz (schwarz) und die entsprechende Gitterfläche von CH02H (violett).

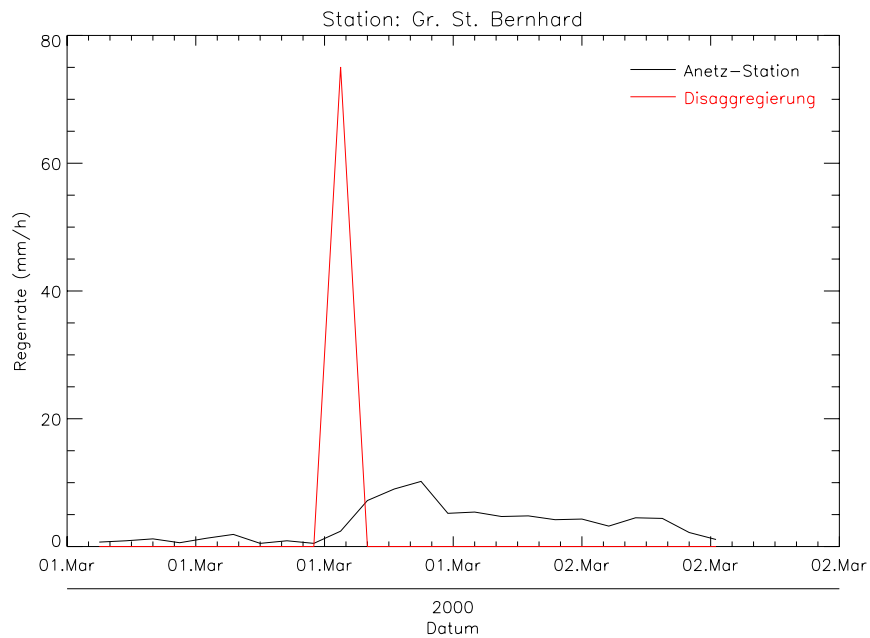


Abb. 4-12: Diese Graphik offenbart beispielhaft, was bei der Disaggregation an Gitterpunkten geschieht, wo häufig Radarabschattungseffekte vorliegen. Auf der Abszisse ist die Zeit abgetragen, auf der Ordinate die Regenrate in mm/h. Der gesamte Tagesniederschlag des 1. März 2000, ungefähr 75 mm, fällt gemäss CH02H (rot) während einer einzigen Stunde, weil offenbar nur in dieser Zeit Radarechos empfangen werden. Demgegenüber zeigt die ANETZ-Station Gr. St. Bernhard (schwarz) einen relativ ausgeglichenen Niederschlagsverlauf mit Spitzenwerten von höchstens 15 mm/h.

Eine Abschattung bewirkt in diesem Zusammenhang, dass das Radar nur hohe Wolkenpartien erfasst. Insbesondere in den Wintermonaten, wenn die überwiegend stratiformen Wolken auf tiefere Atmosphärenschichten begrenzt bleiben und häufig Schnee mit seiner geringeren Mikrowellenreflektivität fällt, werden Niederschlagssysteme vom Radar daher vielfach gar nicht wahrgenommen. Folglich werden an gewissen Tagen, wenn überhaupt, dann nur während einzelnen Stunden Radarechos aus den sonst verdeckten Gitterzellen empfangen. Weil die Radare aber eigentlich in Betrieb sind, werden die Daten der betreffenden Gitterpunkte bei der Disaggregation nicht gelöscht, so dass der gesamte Tagesniederschlag auf eine einzige Stunde entfällt (Abb. 4-12). Dies führt zu den dargestellten, übersteigerten Häufigkeiten heftiger Regen- oder vor allem Schneefälle in diesen Regionen, derweil die schwachen Niederschläge untervertreten sind.

4.2.3 VERGLEICH VON CH02H MIT ANETZ-STATIONEN ANHAND STATISTISCHER KENNZAHLEN

Bedeutete bereits der Übergang von den Zeitreihen zu den kumulativen Verteilungen eine erhebliche Vereinfachung, schreitet die Komprimierung der Daten hier weiter voran: an die Stelle von Diagrammen mit kumulativen Niederschlagshäufigkeitsverteilungen treten jetzt Karten mit statistischen Kennzahlen für das Verhältnis der Daten an den entsprechenden Gitterelementen von CH02H zu den Messungen an den ANETZ-Standorten.

4.2.3.1 Verhältnis der normierten Intensitäten

Alpennordseite: Wie bereits in Kapitel 3.3 erwähnt wurde, kann man davon ausgehen, dass die Qualität von CH02H umso besser ist, je näher das Verhältnis der normierten Intensitäten bei 1 liegt. Dies ist in den Jahren 1992 bis 2003 für die Alpennordseite inklusive Voralpen insgesamt verhältnismäßig gut erfüllt (Abb. 4-13): mit vier Ausnahmen liegen sämtliche Gegenüberstellungen mit ANETZ-Stationen im Bereich zwischen 0.75 und 1, wobei eine dieser Ausnahmen, der Vergleich mit der Messstation Säntis, nur knapp darüber liegt (1.0185). Grössere Abweichungen zeigen auf der Alpennordseite einzig Moleson, Payerne und erstaunlicherweise auch Zürich SMA – sie liegen zwischen 0.5 und 0.75. Insgesamt tendiert CH02H auf der Alpennordseite also zur Unterschätzung der Niederschlagsintensitäten bzw. zur Überschätzung der Anzahl Niederschlagsstunden.

In den Wintermonaten präsentiert sich die Lage weitgehend unverändert (Abb. 4-14, oben links). Im Raum Zürich werden die Niederschlagsintensitäten offenbar weniger stark unterschätzt, dafür sind die Abweichungen zu den Messungen in Altdorf und am PSI in Würenlingen grösser. Auf dem Pilatus dagegen überschätzt CH02H die Niederschlagsintensitäten. Weil dies nur im Winter vorkommt, bietet sich die Niederschlagsform als plausibelste Erklärung an: von Dezember bis Februar dominieren auf dem Pilatus Schneefälle das Niederschlagsgeschehen. Schnee wird in seiner Intensität vom Radar wegen der niedrigen Reflektivität aber stets unterschätzt, wodurch die Tagesniederschläge vermutlich auf eine zu geringe Stundenzahl disaggregiert werden. Sofern nicht eine Abschattung dafür verantwortlich gemacht werden muss, könnten damit auch die meist zu hohen Verhältnisse der anderen Gebirgsstationen erklärt werden.

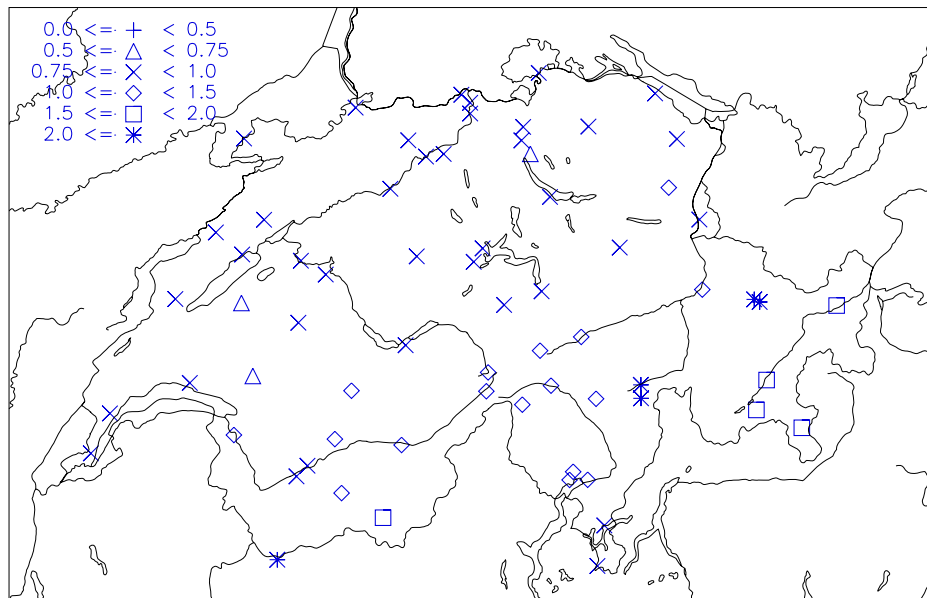


Abb. 4-13: Auf der Karte sind die normierten Verhältnisse der Niederschlagsintensitäten vom 1. Januar 1992 bis am 31. Dezember 2003 (Ausnahme: PSI Würenlingen erst ab dem 1. April 1992) zwischen 68 ANETZ-Stationen (A) und den betreffenden Gitterelementen von CH02H (D) in Form von Symbolen dargestellt. Diese verweisen auf folgende Werte von $\frac{I_{D||A}}{M_{D||MA}}$: + unterhalb von 0.5, Δ zwischen 0.5 und 0.75, × von 0.75 bis 1.0, ◇ zwischen 1.0 und 1.5, □ von 1.5 bis 2.0 und * ab 2.0 oder grösser.

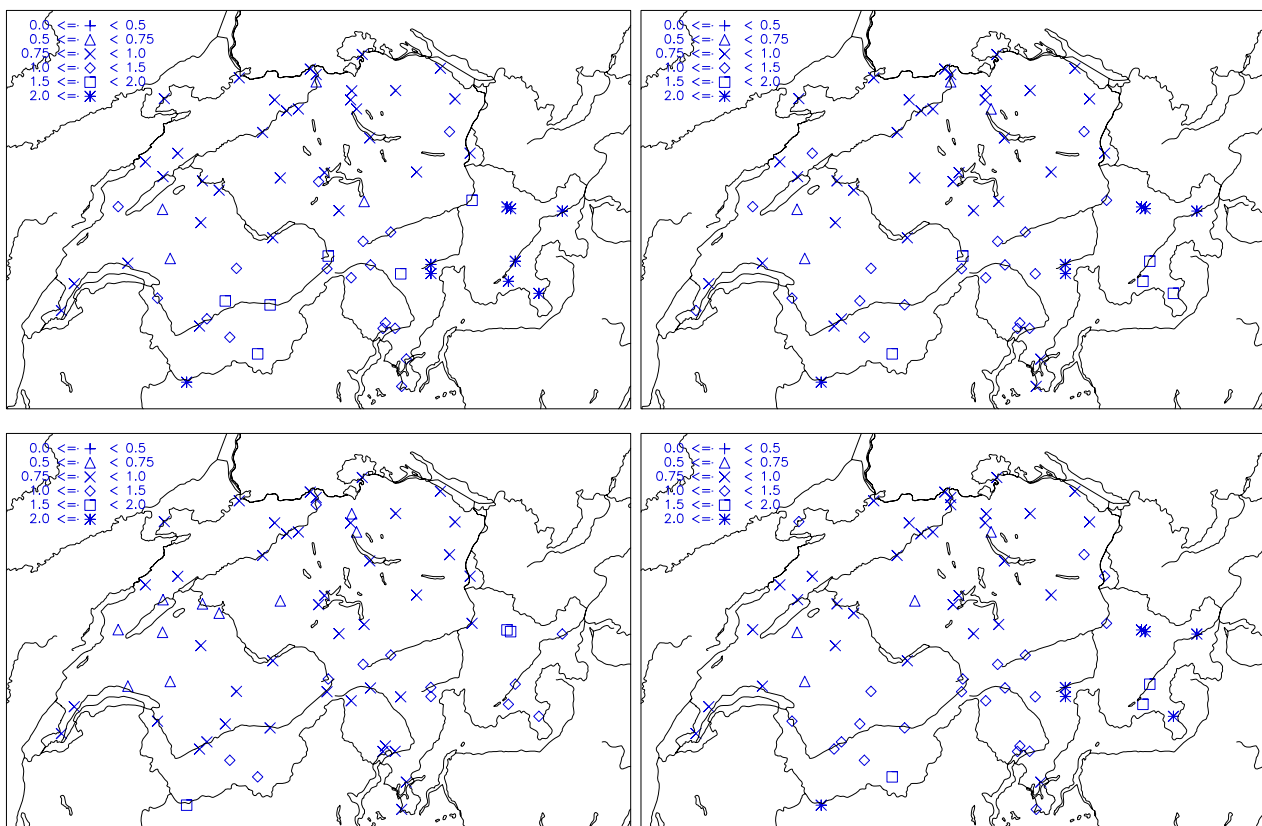


Abb. 4-14: Wie Abb. 4-14, aber separat für die Wintermonate Dezember, Januar und Februar 1992/93 bis 2002/03 (oben links), die Frühlingsmonate März, April und Mai 1992 bis 2003 (oben rechts), die Sommermonate Juni, Juli und August 1992 bis 2003 (unten links) und die Herbstmonate September, Oktober und bis November 1992 bis 2003 (unten rechts).

Im Frühling und im Herbst sind Abweichungen vom ganzjährigen Wert ebenfalls auf einzelne Stationen beschränkt, wobei die Differenzen in der Regel relativ gering bleiben (Abb. 4-14, oben bzw. unten rechts). Für die Sommermonate zeichnet sich vor allem in der Westschweiz und im Raum Zürich ein Trend hin zur Unterschätzung der Niederschlagsintensitäten durch CH02H ab (Abb. 4-14, unten links). Sämtliche Vergleiche, ausser demjenigen mit der Messstation PSI Würenlingen, welcher jetzt im Gegensatz zu den anderen Jahreszeiten plötzlich grösser als eins wird, erzielen ein Verhältnis der normierten Intensitäten kleiner als 1, einige davon sogar kleiner als 0.75.

Nichtsdestoweniger dürfte sich CH02H punkto Niederschlagsintensitäten auf der Alpennordseite als ziemlich zuverlässig erweisen.

Wallis, Graubünden und Alpensüdseite: In diesen Regionen fällt die Bilanz wesentlich durchzogener aus: im Tessin, im Wallis entlang des Rhonetals und in einem Gebiet um Grimsel und Gotthard liegen die Werte ganzjährig nahe bei 1 (Abb. 4-13), wobei CH02H die Niederschlagsintensität gerade in den Bergregionen in der Regel eher über- bzw. die Anzahl der Niederschlagsstunden unterschätzt. Demgegenüber zeigen die Vergleiche mit den ANETZ-Stationen im südlichen Wallis (Grosser Sankt Bernhard, Zermatt) und in weiten Teilen Graubündens (unter anderen San Bernardino, Davos, Scuol, Samedan-St. Moritz, Corvatsch) grösstenteils markante Abweichungen mit einem Verhältnis der normierten Intensitäten von mehr als 2.0. Das bedeutet, dass an den entsprechenden Gitterpunkten nicht einmal die Hälfte der tatsächlichen Niederschlagsstunden erfasst wird, oder aber dass umgekehrt mehr als doppelt so hohe Niederschlagsraten wie in natura ausgegeben werden.

Hauptverantwortlich für diese enormen Abweichungen müssen gerade in Anbetracht der betroffenen Landesgegenden einmal mehr Radarabschattungseffekte gemacht werden, wodurch zu hohe Niederschlagsmengen auf zuwenig Stunden verteilt werden. Für das Wallis und Graubünden weist dies auf eine eher begrenzte Einsetzbarkeit von CH02H hin.

In den Wintermonaten verschlechtert sich die Situation verglichen mit dem ganzen Jahr nochmals (Abb. 4-14, oben links): mit Ausnahme von Disentis (> 1) und Chur-Ems (> 1.5) überschreiten nun sämtliche Vergleiche mit Bündner Stationen die Marke von 2.0, betroffen sind aber ebenso, wenn auch meist in geringerem Ausmass, das Wallis und die Gegend um Grimsel und Gotthard. Frühling und Herbst zeigen ein ähnliches Bild wie die Jahreswerte (Abb. 4-14, oben bzw. unten rechts).

Eindeutig besser sieht die Situation im Sommer aus (Abb. 4-14, unten links): in den Monaten Juni bis August befinden sich, mit Ausnahme der Vergleiche mit Davos, Weissfluhjoch und Grossem Sankt Bernhard, sämtliche Verhältnisse der normierten Intensitäten in einem Bereich zwischen 0.75 und 1.5 – also in der Nähe von 1. Während also der Sommer auf der Alpennordseite am schlechtesten abschneidet, ist er im Wallis, im Tessin und in Graubünden diejenige Jahreszeit mit den kleinsten Intensitätsunterschieden zu den ANETZ-Stationen. Möglicherweise liegt diese bessere Übereinstimmung in der im Sommer deutlich gesteigerten Gewitteraktivität begleitet von hoher Bewölkung begründet.

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass CH02H bezüglich Niederschlagsintensität auf der Alpennordseite überwiegend ansprechende Resultate erbringt, wohingegen in den Alpen und auf der Alpensüdseite Vorsicht angebracht erscheint.

Weil die vorliegende Diplomarbeit sich in erster Linie mit der Erstellung und der Validierung eines Datensatzes mit stündlichen Niederschlagswerten befasst, wird die Berechnung der statistischen Grössen anhand von 3- und 6-Stunden-Mitteln im Folgenden nur kurz dargelegt – dennoch sollen die wichtigsten Punkte erwähnt werden.

Wie kaum anders zu erwarten, stimmen Vergleiche von CH02H mit ANETZ-Messungen unter Verwendung von mehrstündigen Mittelwerten beider Datensätze in aller Regel entschieden besser überein als solche auf der Basis von Stundenwerten, d.h. die Verhältnisse der normierten Intensitäten liegen näher bei 1. Eine sichtbare Annäherung der beiden Datensätze findet für die ganzjährigen Untersuchungen bereits mit dem Einsatz von 3-Stunden-Mitteln statt, während bei den saisonalen Differenzen erst die Mittelwertbildung über 6 Stunden einen offenkundigen Erfolg zeitigt. Besonders im Winter hält sich die Verbesserung eher in Grenzen, und für gewisse Stationen im Mittelland und entlang den Voralpen können die Unterschiede zwischen ANETZ und CH02H bei der Benutzung 3-stündiger Mittelwerte sogar zunehmen. Eine einleuchtende Erklärung für dieses Phänomen scheint nicht zu existieren.

4.2.3.2 Verhältnis der Niederschlagshäufigkeiten

Alpennordseite: Der Befund bestätigt weitgehend die bereits oben angestellte Vermutung, wonach die Disaggregation in vielen Fällen die von CH02D vorgegebenen Tagesniederschläge auf eine zu grosse Anzahl Stunden verteilt und damit eine zu geringe und zu ausgeglichene Niederschlagsintensität erreicht.

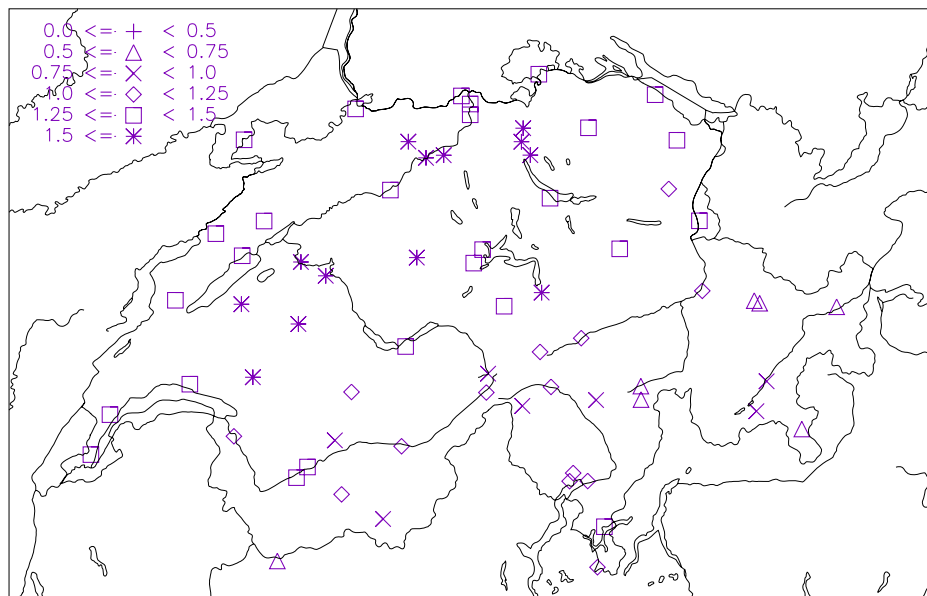


Abb. 4-15: Diese Karte zeigt die Verhältnisse der Frequenzen von Niederschlägen mit einer Intensität von 0.1 mm/h oder mehr ab dem 1. Januar 1992 bis am 31. Dezember 2003 (Ausnahme: PSI Würenlingen erst ab dem 1. April 1992) zwischen 68 ANETZ-Stationen (A) und den jeweiligen Gitterzellen von CH02H (D). Die verwendeten Symbole geben wiederum einen Anhaltspunkt für den Betrag F_D/F_A : + unterhalb von 0.5, Δ zwischen 0.5 und 0.75, \times von 0.75 bis 1.0, \diamond zwischen 1.0 und 1.25, \square von 1.25 bis 1.5 und * ab 1.5 und darüber.

So überschätzt CH02H ganzjährig die Häufigkeit von Niederschlägen mit einer Intensität von mehr als 0.1 mm/h im Vergleich zu ausnahmslos jeder ANETZ-Station auf der Alpennordseite (Abb. 4-15). Die geringste Differenz besteht zu den Messungen auf dem Säntis mit einem Verhältnis zwischen 1.0 und 1.25, ansonsten

übersteigen die Abweichungen durchweg den Faktor 1.25, besonders gegenüber den Mittellandstationen sogar häufig 1.5. Am besten erfasst werden auf der Alpennordseite ohne Zweifel Niederschlagsraten grösser 1 mm/h (Abb. 4-16): in diesem Bereich liegt der Quotient der Niederschlagsfrequenzen an einer ANETZ-Station und an der betreffenden Gitterfläche mit Ausnahme von Vaduz und Moleson, wo immer noch eine relative grosse Überschätzung vorliegt, stets im zwischen 0.75 und 1.25. Der Übergang zu Niederschlagsereignissen mit mehr als 5 mm/h ist dagegen von einem deutlichen Absinken dieses Verhältnisses begleitet (Abb. 4-17). Rund um den Genfersee, entlang dem Jura und in Bodenseenähe beträgt es noch ungefähr 1, in weiten Teilen des Mittellandes unterschreitet es aber die Marke von 0.75. Das heisst, der Überschätzung der kleinen Niederschlagsintensitäten entsprechend zeigt CH02H jetzt eine Unterschätzung der grossen. Dieser Trend bestätigt sich weitgehend im Bereich von Niederschlagsraten über 10 mm/h, insbesondere im Sommer, während in den übrigen Jahreszeiten aufgrund der geringen Stundenzahlen mit solchen Niederschlagsmengen auch der eine oder andere Ausreisser nach oben beobachtet werden kann.

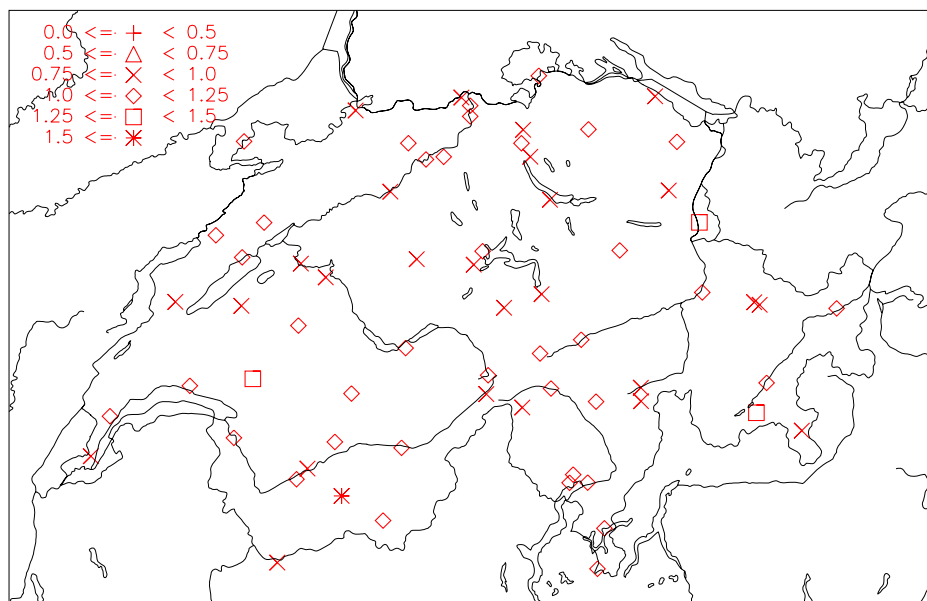


Abb. 4-16: Abgebildet sind die Verhältnisse der Frequenzen von Niederschlägen mit einer Intensität von mindestens 1 mm/h oder höher vom 1. Januar 1992 bis am 31. Dezember 2003 (Ausnahme: PSI Würenlingen erst ab dem 1. April 1992) zwischen 68 ANETZ-Stationen (A) und den jeweiligen Gitterzellen (D). Für das Verhältnis F_D/F_A gilt dabei: + kleiner als 0.5, \triangle zwischen 0.5 und 0.75, \times von 0.75 bis 1.0, \diamond zwischen 1.0 und 1.25, \square von 1.25 bis 1.5 und * grösser oder gleich 1.5.

Sowohl die Differenzen der saisonalen Vergleiche untereinander, als auch deren Unterschiede zu den Jahreswerten halten sich dagegen in relativ engen Grenzen – grössere Abweichungen sind die Ausnahme und auf einzelne Messstandorte bzw. Gitterzellen beschränkt (Abb. 4-18 und 4-19). Durch eine gewisse Inhomogenität zeichnen sich in diesem Rahmen einzig diejenigen Karten aus, welche die Verhältnisse der Häufigkeit von Niederschlägen mit mehr als 5 mm/h aufzeigen (Abb. 4-20). Insbesondere im Winter zählt CH02H entlang den Voralpen und in der Genferseeregion eher zu viele solcher Ereignisse, wohingegen im Mittelland Gitterflächen mit Unter- und Überschätzung nahe beieinander liegen. Eine wahrscheinliche Erklärung liefert in dieser Jahreszeit mitunter ein Blick auf die Karte der Frequenzen von Niederschlägen mit über 10 mm/h: zahlreiche Vergleiche mit dieser Niederschlagsstärke konnten gar nicht durchgeführt werden, weil entweder die ANETZ-Station oder CH02H an der betreffenden Stelle in den ganzen 12 Jahren im Winter nie solche Niederschläge registriert hat. Vermutlich ist die Datenmenge bereits im Bereich grösser 5 mm/h so spärlich,

dass grosse Abweichungen schnell einmal möglich sind. Für die anderen Jahreszeiten stellt dieses Argument allerdings keine befriedigende Begründung dar, denn von Frühling bis Herbst finden sich im Verlauf der 12 Jahre für alle Gitterpunkte einige Dutzend, wenn nicht sogar einige hundert Stunden, an welchen diese Niederschlagsintensität auch in CH02H erreicht wurde.

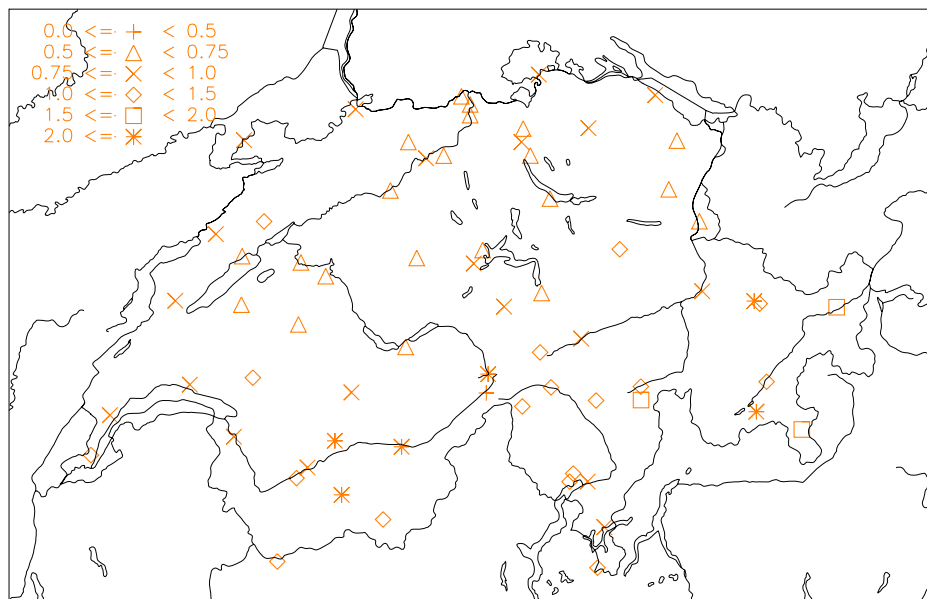


Abb. 4-17: Diese Karte präsentiert die Verhältnisse der Frequenzen von Niederschlägen mit einer Intensität von mindestens 5 mm/h oder mehr in der Zeit vom 1. Januar 1992 bis zum 31. Dezember 2003 (Ausnahme: PSI Würenlingen erst ab dem 1. April 1992) zwischen 68 ANETZ-Stationen (A) und den entsprechenden Gitterzellen von CH02H (D). Die Symbole stehen für folgende Ergebnisse von F_D/F_A : + bis 0.5, \triangle zwischen 0.5 und 0.75, \times von 0.75 bis 1.0, \diamond zwischen 1.0 und 1.5, \square von 1.5 bis 2.0 und * ab 2.0.

Wallis, Graubünden und Alpensüdseite: In diesen Regionen trifft man auf eine vollkommen andere, fast gegenteilige Situation. Abgesehen von den Talstationen Lugano, Sion und Fey überschätzt CH02H im Mittel über das ganze Jahr die Häufigkeit geringer Niederschlagsintensitäten (grösser 0.1 mm/h) kaum, jedoch wird sie an einigen Stationen, wie Davos, Scuol oder San Bernardino, sogar zu tief eingeschätzt (Abb. 4-15). Am erfolgreichsten werden allerdings auch in der südlichen Hälfte der Schweiz Niederschläge mit mehr als 1 mm/h erfasst – nur gerade im Vergleich zu Evolène und Samedan-St. Moritz lässt sich in diesem Bereich eine zu hohe Frequenz feststellen (Abb. 4-16). Bei grösseren Intensitäten macht sich eine Zweiteilung bemerkbar (Abb. 4-17): vermutlich in erster Linie wegen der Abschattung von Radarstrahlen enthält CH02H gegenüber den ANETZ-Stationen in den Gebirgstälern zu viele Stundenwerte im Bereich von über 5 mm, hingegen werden Niederschläge dieser Grössenordnung besonders im Tessin offenbar erstaunlich gut aufgelöst. Diese Tendenz verstärkt sich bei Niederschlagsraten von mehr als 10 mm/h sogar noch: nur gerade in der Südhälfte des Tessins und – eher überraschend – entlang dem Alpenhauptkamm liegt ein Grossteil der Verhältnisse zwischen ANETZ-Messung und CH02H in der Nähe von 1, während ihre Häufigkeit in weiten Teilen des Wallis und Graubündens um mehr als einen Faktor 5, gelegentlich sogar mehr als zehnfach, überschätzt wird. Auch diese Beobachtung kann kaum anders als durch Radarabschattung begründet werden.

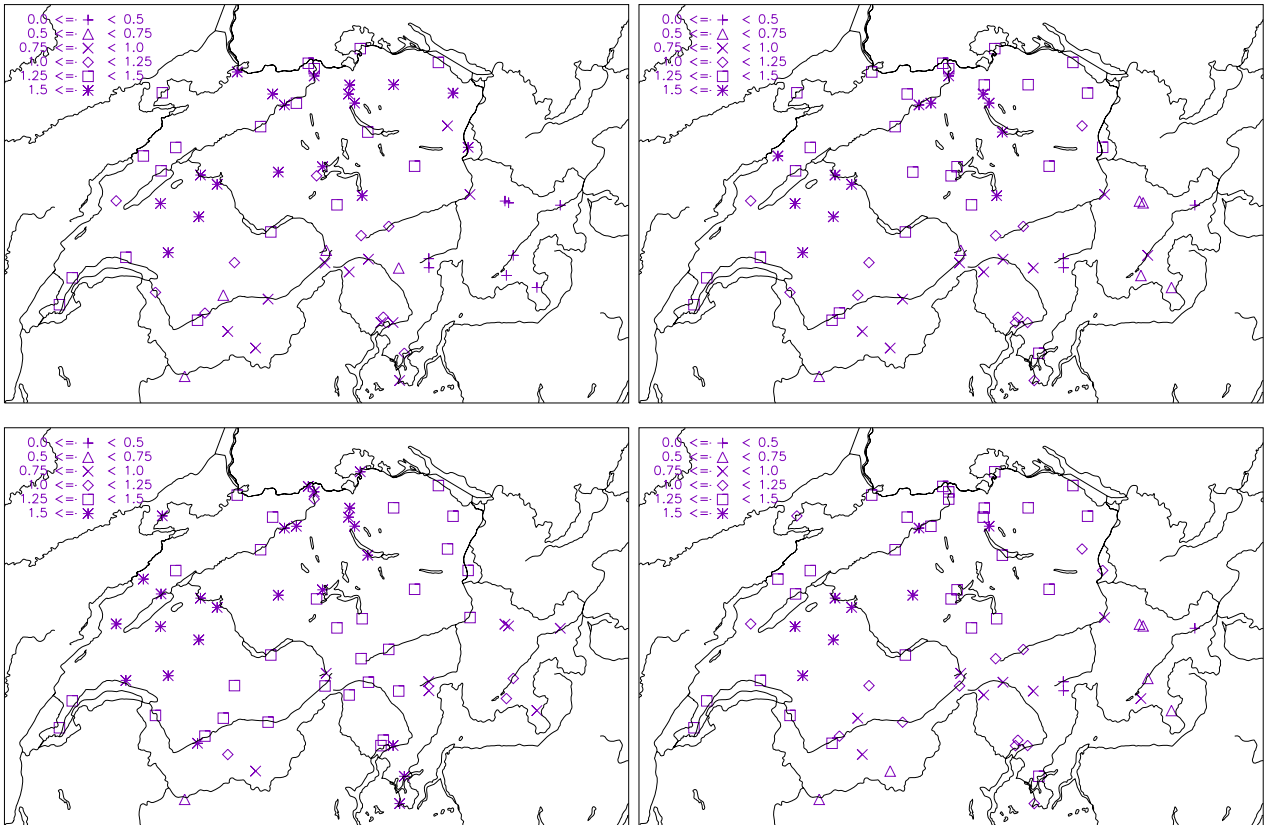


Abb. 4-18: Wie Abb. 4-16, aber nach Jahreszeiten gesondert: Winter 1992/93 bis 2002/03 (oben links), Frühling 1992 bis 2003 (oben rechts), Sommer 1992 bis 2003 (unten links) und die Herbst 1992 bis 2003 (unten rechts).

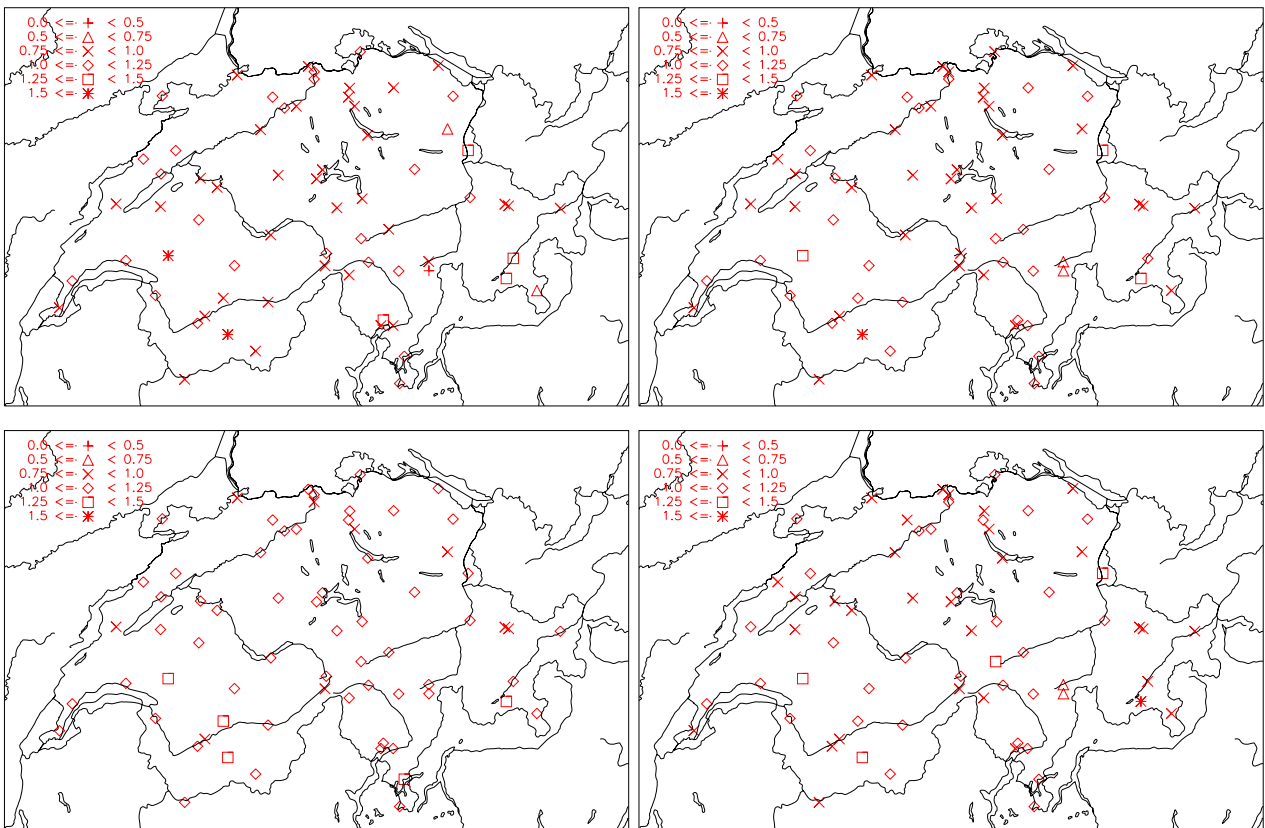


Abb. 4-19: Wie Abb. 4-17, aber je einzeln für Dezember bis Februar 1992/93 bis 2002/03 (oben links), März bis Mai 1992 bis 2003 (oben rechts), Juni bis August 1992 bis 2003 (unten links) und September bis November 1992 bis 2003 (unten rechts).

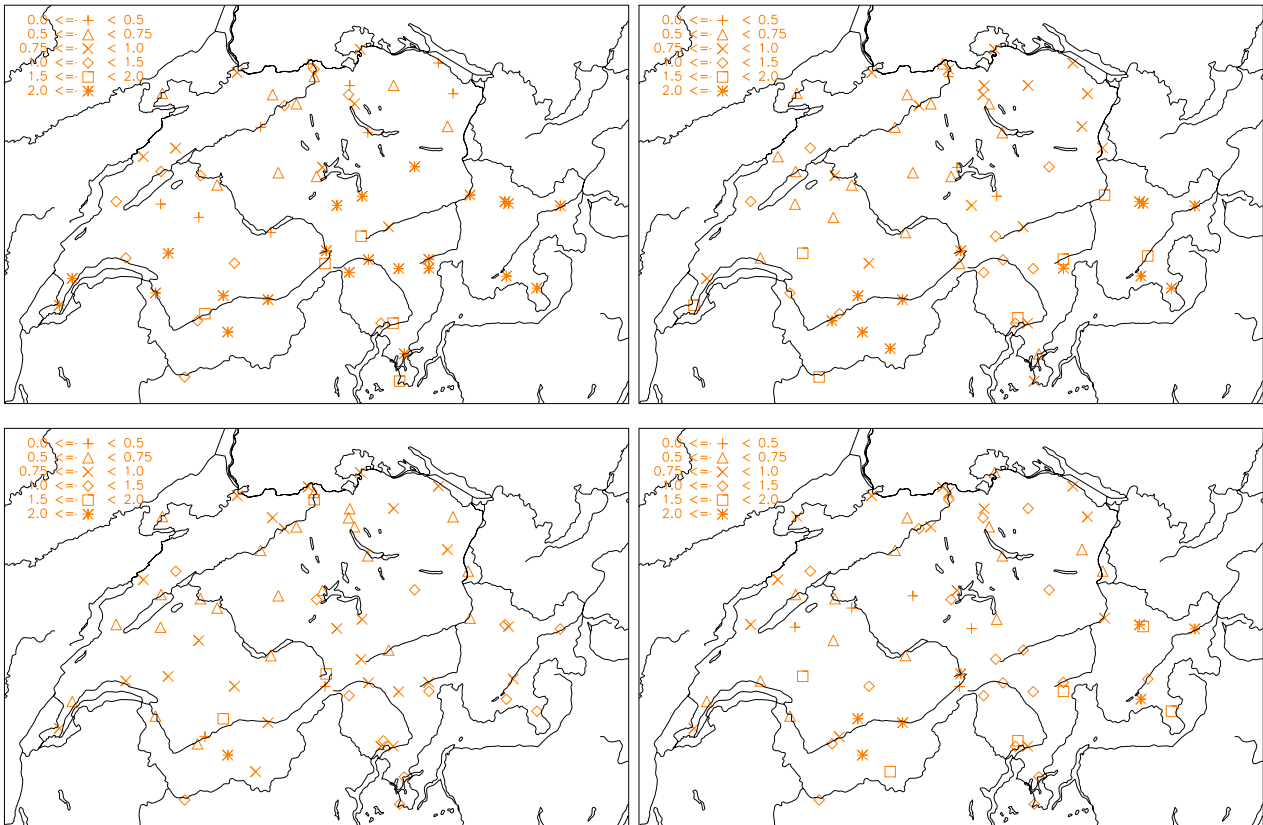


Abb. 4-20: Wie Abb. 4-18, aber saisonal getrennt: Winter 1992/93 bis 2002/03 (oben links), Frühling 1992 bis 2003 (oben rechts), Sommer 1992 bis 2003 (unten links) und Herbst 1992 bis 2003 (unten rechts).

Im Gegensatz zur Alpennordseite besteht entlang dem Alpenhauptkamm, im Wallis und im Tessin ein deutlich stärker ausgeprägter Jahresgang der berechneten Vergleiche zwischen ANETZ und CH02H. Die einzelnen Jahreszeiten offenbaren teils erhebliche Abweichungen von den ganzjährigen Ergebnissen und unterscheiden sich daher auch untereinander nicht selten beträchtlich (Abb. 4-18 bis 4-20). Im Winter wird die Häufigkeit kleiner Niederschlagsintensitäten generell tiefer angenommen als über das ganze Jahr gesehen. Während dies im Tessin und im Rhonetal eine Annäherung an die ANETZ-Messungen bewirkt, bedeutet es in den Bergregionen des Wallis und vor allem in Graubünden eine deutliche Unterschätzung geringer Stundenwerte. Im Frühling und im Herbst entsprechen die Verhältnisse grossmehrheitlich denjenigen des gesamten Jahres, nur in Graubünden liegen sie von September bis November näher bei 1. Im Sommer vermindert die häufig hohe, konvektive Bewölkung offensichtlich den Einfluss der Radarabschattung, so dass die Disaggregation jetzt fast in der ganzen Schweiz die täglichen Niederschlagsmengen auf eine zu grosse Stundenzahl verteilt und somit zu viele Stunden mit geringen Niederschlägen produziert. Entsprechend gegenläufig verhalten sich die Vergleiche der Frequenzen von Ereignissen mit grösseren Intensitäten. Ab dem Niveau von 1 mm/h verschwindet der Jahresgang fast vollständig, im Bereich grösser 5 mm/h dagegen wird die Überschätzung durch CH02H im Winter maximal, im Sommer minimal und vereinzelt sogar zu einer Unterschätzung, während Frühling und Herbst irgendwo dazwischen liegen.

Abschliessend kann man sagen, dass die Gebirgsregionen vorwiegend unter ausgedehnten Abschattungserscheinungen in tieferen Lagen leiden, während umgekehrt auf der Alpennordseite und im Tessin relativ zum effektiv gefallenen Niederschlag zu viele Radarechos empfangen werden. Die Folgen sind zu hohe Nie-

erschlagsintensitäten in den Alpen, vor allem im Wallis und in Graubünden, und zu tiefe im Jura, im Mittelland und auf der Alpensüdseite.

Die ganzjährig vermeintlich grösste Zuverlässigkeit von CH02H hinsichtlich der Häufigkeit bestimmter Niederschlagsraten für das Südtessin, erweist sich beim saisonalen Vergleich als Kompensation gegenläufiger Effekte vorab der Winter- und Sommermonate. Die beste Leistung erbringt der neue Datensatz diesbezüglich also wiederum im Mittelland und im Jura, gefolgt vom Südtessin, am schlechtesten schneidet er erneut im Wallis, über den Alpen und vor allem in Graubünden ab.

Die Verwendung mehrstündiger Mittelwerte für die Gegenüberstellung von ANETZ und CH02H bewirkt im Bereich geringer Niederschlagsraten unabhängig von der Jahreszeit und von der betrachteten Region eine deutliche Verbesserung gegenüber den Stundenwerten. Dies ist nicht weiter verwunderlich in Anbetracht dessen, dass die Disaggregation schweizweit die Tendenz hat, die gemessenen Niederschlagsmengen auf zu viele Stunden zu verteilen.

Dagegen bringt die Mittelwertbildung zum Vergleich der Häufigkeit grösserer Niederschlagsereignisse überhaupt nichts, denn selbst im Sommer regnet es nur in den seltensten Fällen in drei oder sogar sechs aufeinander folgenden Stunden mit einer Intensität von über 5 mm/h oder mehr. Folglich reduziert sich die Zahl der Vergleichsmöglichkeiten drastisch, so dass man mehr oder weniger willkürliche Quotienten erhält, die jeglicher soliden statistischen Grundlage entbehren.

4.2.3.3 RMS und AMD

RMS erweist sich für die Gegenüberstellung der Zeitreihen von ANETZ-Messungen und einzelnen Gitterpunkten von CH02H bald einmal als zu empfindliches Instrument (Abb. 4-21). So sind kaum Unterschiede zwischen den einzelnen Jahreszeiten auszumachen, und selbst die Verwendung von 3- oder 6-stündigen Mittelwerten übt in den meisten Fällen nur einen sehr begrenzten korrigierenden Einfluss aus. Angestrebt wäre ein RMS-Wert möglichst nahe bei 0, die Ergebnisse der meisten Standorte erreichen aber höchstens den Bereich zwischen 0.25 und 0.5. Überhaupt vermag erst eine Mittelung über 6 Stunden einige wenige Werte in den Bereich zwischen 0.1 und 0.25 zu bewegen, während die Schranke von 0.1 gar nie unterschritten wird. Erstaunlicherweise sind überdies keine eindeutigen räumlichen Muster wie bei den normierten Intensitäten oder den Frequenz zu erkennen.

Betrachtet man die auf einzelne grosse Ausreisser weniger sensibel reagierende AMD zwischen den ANETZ-Zeitserien und denjenigen der entsprechenden Gitterpunkte von CH02H, bietet sich ein erfreuliches Bild (Abb. 4-22): mit Ausnahme des Standorts PSI Würenlingen bleiben sämtliche AMD-Werte sowohl beim ganzjährigen, als auch bei den saisonalen Vergleichen unterhalb von 0.25, einige sogar bereits für die Stundenwerte unterhalb von 0.1. Ein wenig sonderbar erscheint allerdings die Tatsache, dass AMD auf der Alpensüdseite und sogar im Wallis und in Graubünden eher kleiner ausfällt als im Mittelland und im Jura. Die Zeitserien der ANETZ-Stationen und von CH02H müssten einander in diesen Regionen also ähnlicher sein als auf der Alpennordseite, obschon die Verhältnisse der normierten Intensitäten und der Frequenzen bestimmter Niederschlagsintensitäten das Gegenteil besagen.

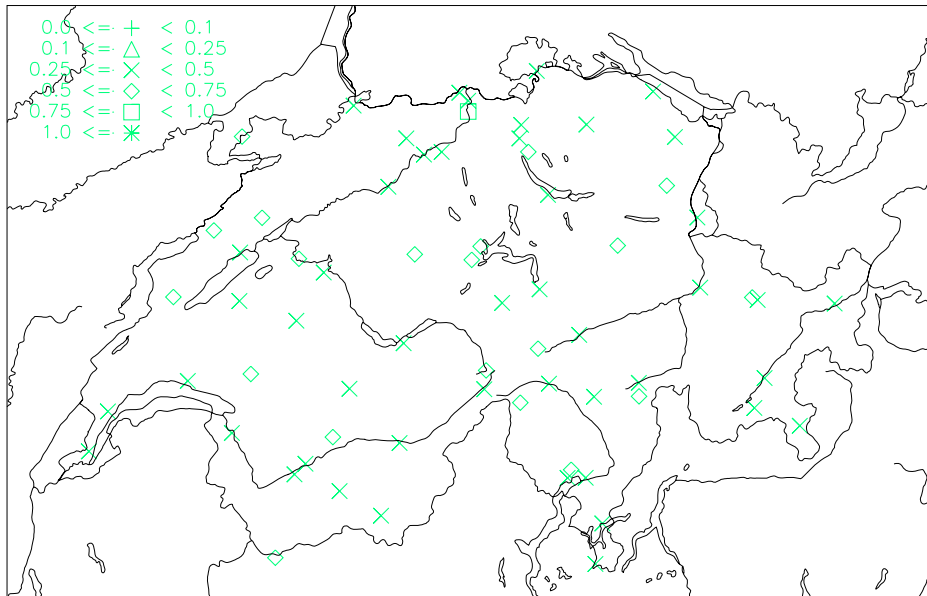


Abb. 4-21: In dieser Karte ist RMS zwischen den Zeitreihen der 68 ANETZ-Standorte (A) und den passenden Gitterelementen von CH02H (D) vom 1. Januar 1992 bis am 31. Dezember 2003 (Ausnahme: PSI Würenlingen erst ab dem 1. April 1992) eingezeichnet. Die Symbole bezeichnen folgende Beträge von $RMS = \sqrt{\left(\frac{d_i}{I_D} - \frac{a_i}{I_A}\right)^2}$: + unterhalb von 0.1, Δ zwischen 0.1 und 0.25, X von 0.25 bis 0.5, ◇ zwischen 0.5 und 0.75, □ von 0.75 bis 1.0 und * ab 1.0 und darüber.

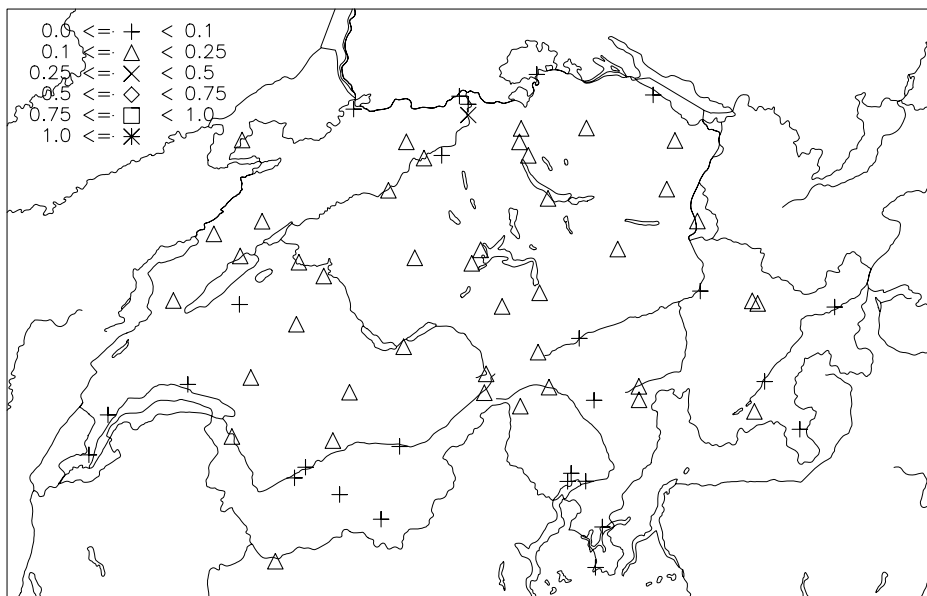


Abb. 4-22: Die Graphik zeigt die AMD zwischen den Zeitreihen der 68 ANETZ-Stationen den betreffenden Gitterflächen von CH02H vom 1. Januar 1992 bis am 31. Dezember 2003 (Ausnahme: PSI Würenlingen erst ab dem 1. April 1992). Die verwendeten Symbole dienen als Mass für $AMD = \left| \frac{d_i}{I_D} - \frac{a_i}{I_A} \right|$: + unterhalb von 0.1, Δ zwischen 0.1 und 0.25, X von 0.25 bis 0.5, ◇ zwischen 0.5 und 0.75, □ von 0.75 bis 1.0 und * ab 1.0 und darüber.

Dafür verantwortlich dürfte einmal mehr die unterschiedliche Wirkung der Disaggregation im Flachland und in den Bergregionen sein. Zur Berechnung der AMD wird zunächst jeder Stundenwert durch die mittlere Niederschlagsintensität dividiert. Letztere ist im Zuge der Disaggregation in Gebieten mit grosser Ab-

schattung aber erfahrungsgemäss viel höher als in der Realität, im Mittelland dagegen meist deutlich tiefer. In den abgeschatteten Gegenden bleibt der Quotient demnach im Allgemeinen relativ klein, während er auf der Alpennordseite unter Umständen ziemlich grosse Werte annehmen kann. Die Folge sind tendenziell kleine Differenzen zwischen den ANETZ-Messungen und CH02H in Regionen mit spärlichen Radardaten sowie grosse Unterschiede in Gebieten mit guter Radarabdeckung. Für die AMD werden die Absolutwerte dieser Differenzen schliesslich noch gemittelt. Trotzdem ist eine Zweiteilung der Schweiz mit dem gleichen Ausmass wie bei den Intensitäten oder den Frequenzen weder bei RMS noch bei AMD zu beobachten. Mehr noch als RMS erweist sich AMD als extrem invariant: saisonale Unterschiede sind praktische inexistent und Veränderungen durch die Verwendung von Mittelwerten anstelle von Stundenwerten eher die Ausnahme. Erst die direkte Gegenüberstellung von Berechnungen die einerseits auf der Grundlage von Stundenwerten und andererseits anhand 6-stündiger Mittelwerte ausgeführt wurden, offenbart einige wenige, kleine Differenzen.

4.2.4 MITTLERE NIEDERSCHLAGSFELDER

Die graphische Darstellung mittlerer, ganzjähriger oder saisonaler Niederschlagsfelder dient in erster Linie zur Abschätzung der Plausibilität von CH02H: insgesamt lassen sich gegenüber einem Datensatz mit Tageswerten kaum neue Informationen gewinnen, dagegen kann man überprüfen, inwiefern die jahreszeitlichen Niederschlagskarten den klimatologischen Erwartungen entsprechen. Obschon CH02H die täglichen Niederschlagssummen aus CH02D bezieht, können Unterschiede auftreten, weil bei der Disaggregation Tage mit fehlenden Radardaten vollständig und ersatzlos gelöscht werden.

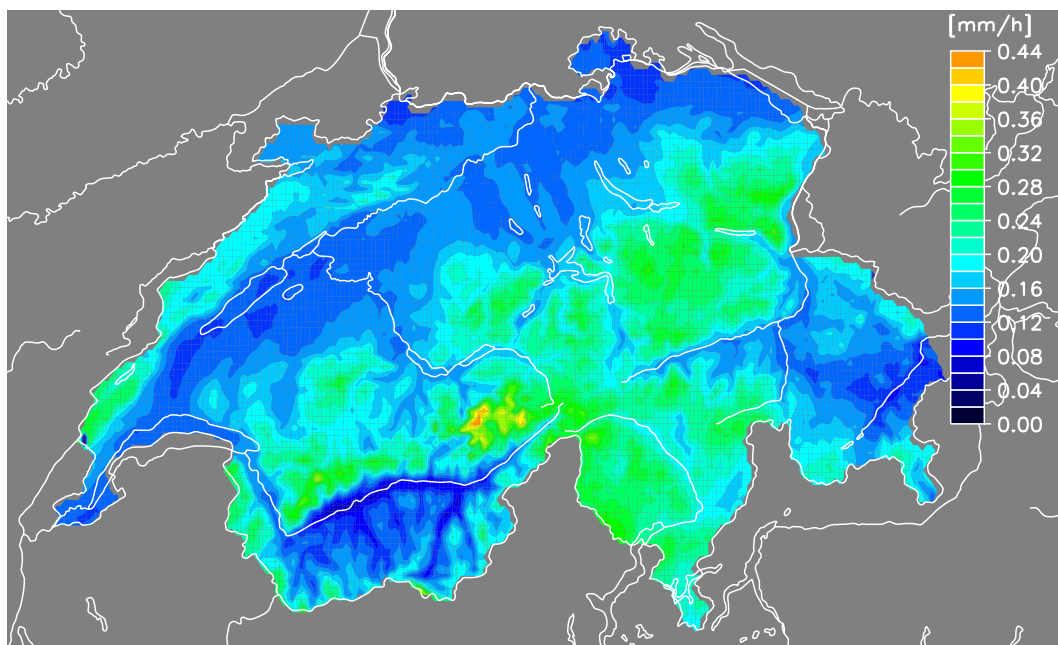


Abb. 4-23: Die Karte stellt, vom Unterengadin und vom Münstertal abgesehen, flächendeckend für die ganze Schweiz den vom 1. Januar 1992 bis am 31. Dezember 2003 über sämtliche Stunden mit vorhandenen Daten gemittelten Niederschlag (in mm/h) dar.

Abbildung 4-23 zeigt den ganzjährigen, mittleren Niederschlag der Jahre 1992 bis 2003 in der Schweiz. Besonders klar zum Vorschein kommen die Niederschlagsabschattung des Rhonetals durch die beidseitig ho-

hen Gebirgszüge der Alpen sowie auf der Alpennordseite die Zunahme des mittleren Niederschlags mit der Höhe. Die Regen- und Schneemengen steigen vom Minimum im Mittelland sowohl zu den Alpen, als auch zum Jura hin kontinuierlich an und erreichen das Maximum in den Viertausendern der Jungfrauregion. Im Winter (Abb. 4-24, oben links) geht der durchschnittliche Niederschlag in weiten Teilen der Schweiz – im Mittelland, im Tessin, in Graubünden und in grossen Teilen des Wallis – auf sehr geringe Werte von meist weniger als 0.1 mm/h zurück. Nur gerade entlang den Voralpen und Alpen sowie im Jura fallen nennenswerte Niederschlagsmengen von 0.2 mm/h oder mehr. Für den südwestlichen Teil des Schweizer Juras jedoch fällt ein wenig unerwartet sogar das Niederschlagsmaximum in diese Jahreszeit. Die hohen Werte der Jungfrauregion mögen auf den ersten Blick ein wenig befremdlich anmuten; ein Vergleich mit der jährlichen Niederschlagsklimatologie von Schwarb et. al (Abb. 2-2) bestätigt jedoch deren Richtigkeit – offensichtlich handelt es sich hierbei tatsächlich um die niederschlagsreichste Landesgegend.

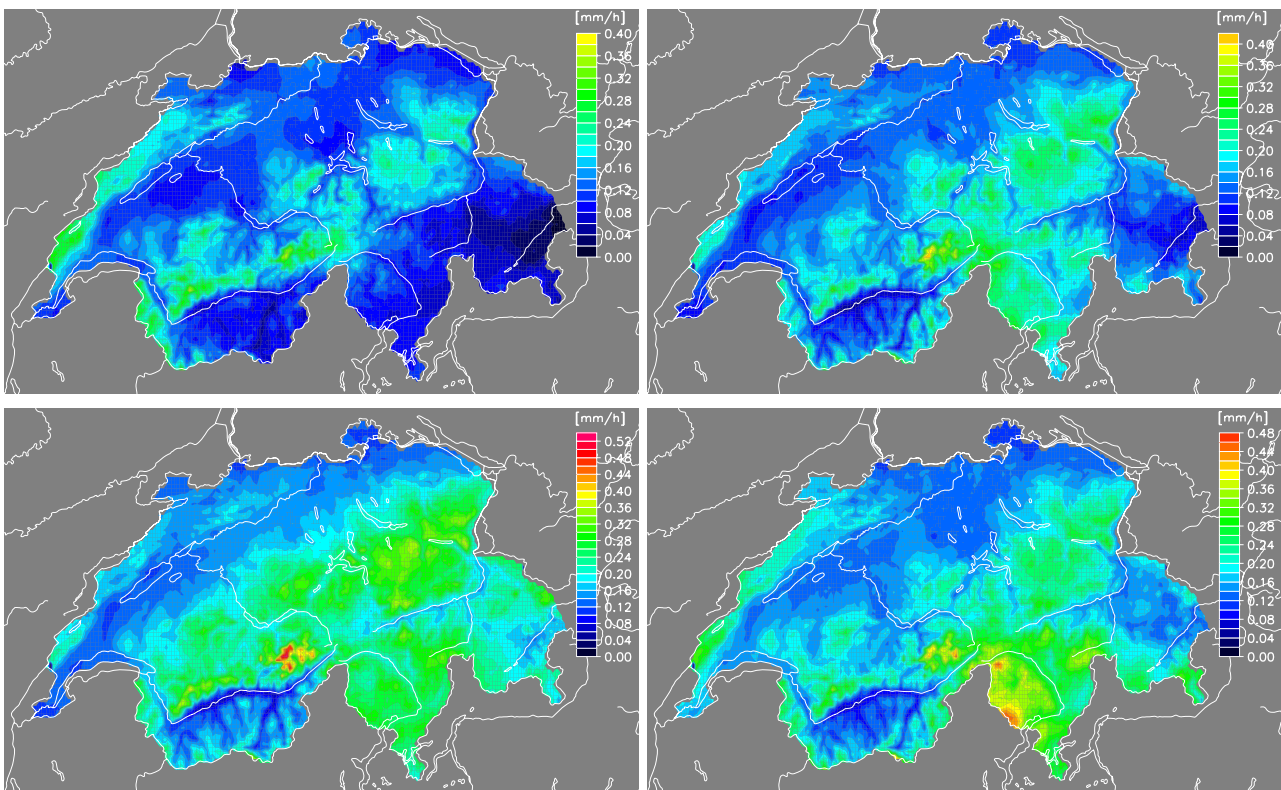


Abb. 4-24: Wie Abb. 4-23 (mit identischer Farbskala), aber getrennt für die Monate Dezember, Januar und Februar 1992/93 bis 2002/03 (oben links), März, April und Mai 1992 bis 2003 (oben rechts), Juni, Juli und August 1992 bis 2003 (unten links) und September, Oktober und November 1992 bis 2003 (unten rechts).

Während der mittlere Niederschlag im Frühling besonders im Tessin, aber auch in Graubünden und im östlichen Mittelland zunimmt, geht er vor allem im Jura und in den Waadtländer Alpen – überhaupt in der gesamten Westschweiz – erstaunlicherweise zurück (Abb. 4-24, oben rechts).

Im Sommer bleibt die Lage im Jura, im Mittelland und im Wallis gegenüber den Frühlingsmonaten im Wesentlichen unverändert, dagegen verzeichnen der gesamte Alpennordhang, Graubünden und vor allem die Jungfrauregion einen teilweise deutlichen Anstieg des mittleren Niederschlags (Abb. 4-24, unten links).

Anders verhält es sich in den Monaten September bis Oktober (Abb. 4-24, unten rechts): während sie dem Mittelland, dem Wallis, Graubünden und grossen Teilen der Alpen eher weniger Niederschlag bringen als die Sommermonate, nehmen die Niederschlagsmengen entlang dem Jura wieder zu, und die Region Genf erhält in dieser Saison sogar das Niederschlagsmaximum. Die grössten Veränderungen zeigt indes die Süd-

schweiz: vor allem nördlich des Lago Maggiore fallen im Herbst erheblich grössere, mittlere Regenmengen als in jeder anderen Jahreszeit.

Ein Vergleich mit CH02D offenbart, dass die Disaggregation insgesamt keine gravierende Beeinträchtigung der Klimatologie zur Folge hat.

4.3 MASKIERUNG

Im Laufe der Validierung wuchs die Zahl der Argumente, welche dafür sprachen, dass eine Maske, die mit Ausnahme des Unterengadins und des Münstertals die ganze Schweiz beibehält (Abb. 4-27, linke Seite), zu wenig restriktiv und eine weitere Einschränkung daher unabdingbar ist, denn Radarabschattungseffekte lassen die Disaggregation in einigen Landesgegenden schlichtweg zu lückenhaft werden. Als Grundlage für die erweiterte Maskierung dient die in Kapitel 4.1.4 besprochene Karte zur Abschätzung der abgeschatteten Regionen (siehe Abb. 4-6). Aus ihr geht eindeutig hervor, dass CH02H auf dem gesamten Kantonsgebiet von Graubünden und in weiten Teilen des Wallis unter den unvollständigen Radardaten leidet und somit viele Ungenauigkeiten beinhaltet, was die klimatologischen Analysen verzerrt. Für die kommenden Kapitel wird deshalb eine um diese Bereiche ergänzte Maske verwendet, der unausweichlich grosse Ausschnitte der Alpen zum Opfer fallen (Abb. 4-25, rechte Seite).



Abb. 4-25: Auf der linken Seite ist die ursprüngliche Maske dargestellt, welche sämtliche Gebiete ausserhalb der Schweizergrenzen und zusätzlich das Unterengadin und das Münstertal abdeckt. Die rechte Seite zeigt die mit Hilfe der Erkenntnisse bei der Validierung erweiterte Maske: praktisch ganz Graubünden und fast das gesamte Wallis, sowie grössere Teile des Tessins werden jetzt ebenfalls entfernt – übrig bleiben 7687 der anfänglich 24823 Gitterelemente von CH02H.

4.4 BEISPIEL: STÜNDLICHE NIEDERSCHLAGSFELDER

Dank der grösseren zeitlichen Auflösung von CH02H lässt sich anhand stündlicher Niederschlagsfelder die Niederschlagsentwicklung in der Schweiz bereits ziemlich gut mitverfolgen. Dies illustrieren stellvertretend die Abbildungen 4-26 eines Gewittersturms, der am 31. August 2002 zwischen 15.⁴⁰ und 23.⁴⁰ UTC über die Schweiz fegte.

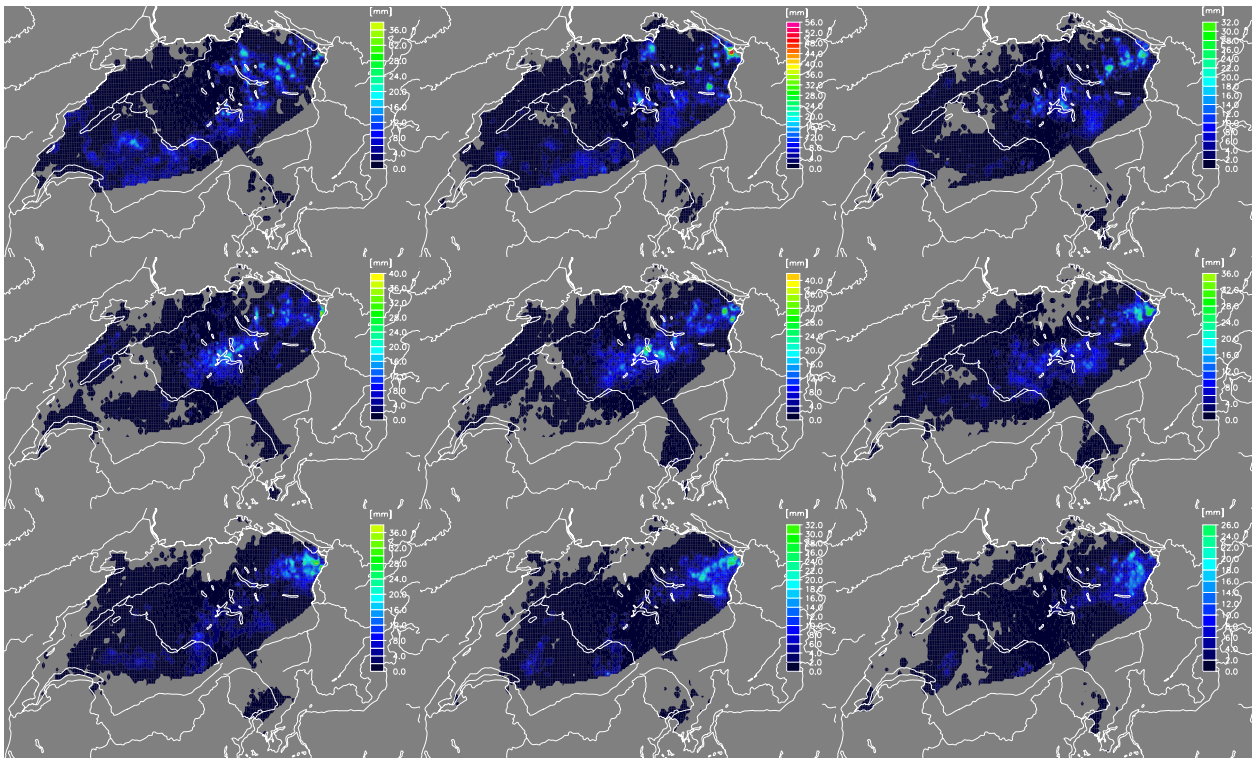


Abb. 4-26: Die neun Bilder zeigen stündliche Karten der Niederschlagsmengen eines Gewittersturms (in mm), der am 31. August 2002 zwischen 15:⁴⁰ UTC und 23:⁴⁰ UTC die Schweiz überquerte und im Raum Appenzell schwere Schäden verursacht hat.

Wie aus Tagesauflösungen lassen sich natürlich auch mit CH02H Summenfelder über längere Zeiträume berechnen, beispielsweise über die gesamten 12 Jahre (Abb. 4-27 und 4-28). Hier zeigen sich dann allerdings bald einmal die Grenzen der Disaggregation, zumindest derjenigen Variante, welche an Tagen, an denen ein Radar ausser Betrieb war, dessen Einflussbereich vollständig löscht. In Abbildung 4-27, die auf eine frühere Version von CH02H zurückgeht, lässt sich in der Westschweiz eine relativ deutlich sichtbare Kreisstruktur mit Mittelpunkt La Dôle erkennen. Diese ist das Resultat fehlender Radarmessungen von La Dôle, wodurch der neue Datensatz, über die gesamten 12 Jahre gesehen, offenbar eine beträchtliche Niederschlagsmenge nicht erfasst. Wie bereits in Kapitel 4.1.1 erwähnt, handelt es sich bei La Dôle um dasjenige Wetterradar der MeteoSchweiz, welches zwischen 1992 und 2003 während Niederschlagsereignissen am häufigsten ausgeschaltet war.

Die neueste Version von CH02H versucht diese Fehler bestmöglich zu korrigieren, indem bei einem Radar-ausfall nicht mehr die gesamten Daten im Einflussbereich des betreffenden Radars gelöscht werden, sondern nur noch diejenigen, welche nicht im Abdeckungsbereich eines anderen Radars liegen. Dennoch sind auf Abbildung 4-28 bei genauerer Betrachtung, etwa im Gebiet um den Neuenburgersee, immer noch kreisförmige „Diskontinuitäten“ auszumachen – jetzt allerdings mit Zentrum Albis, weil dieses Radar fehlende Informationen von La Dôle teilweise kompensiert hat. Dieser Umstand sollte bei der Arbeit mit CH02H stets beachtet werden.

Als Konsequenz dieser Beobachtung berechnen ausserdem die meisten Validierungsprogramme, sofern dies nicht bereits durch deren Aufgabenstellung gegeben ist, entsprechend normierte Grössen, womit solche auf Radarausfällen basierenden Merkmale eliminiert werden.

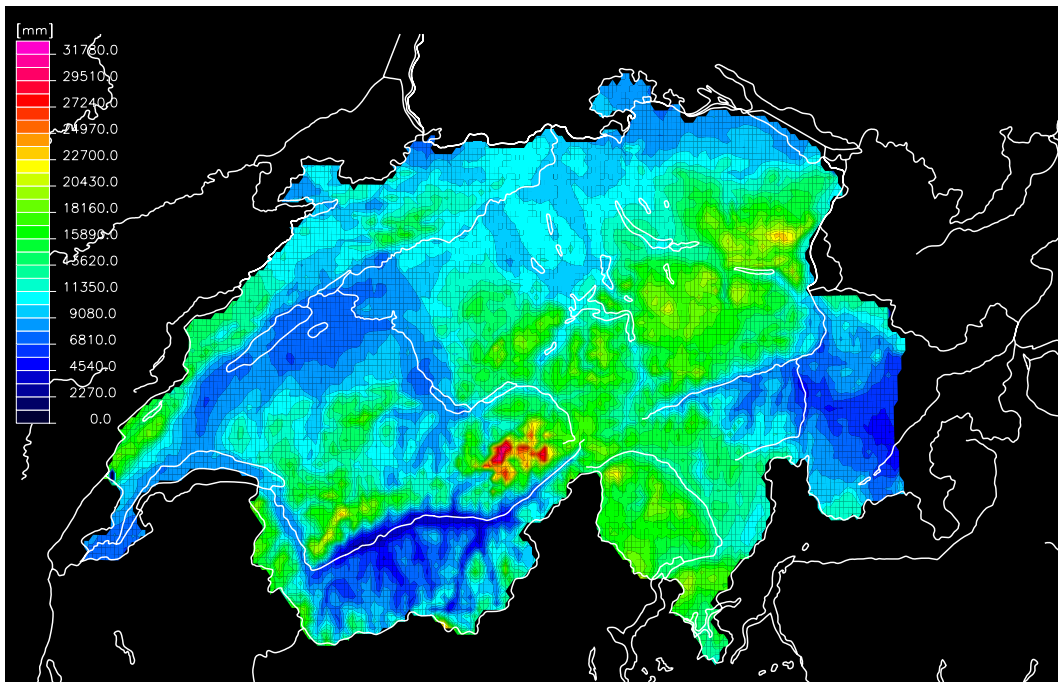


Abb. 4-27: Dieses Summenfeld der vom 1. Januar 1992 bis am 31. Dezember 2003 in der Schweiz gemäss CH02H gesamthaft gefallenen Niederschlagsmengen (in mm) entstammt einer früheren Programmversion, welche die Radarausfälle noch anders behandelt und eine weniger restriktive Maske verwendet hat als die nachfolgenden.

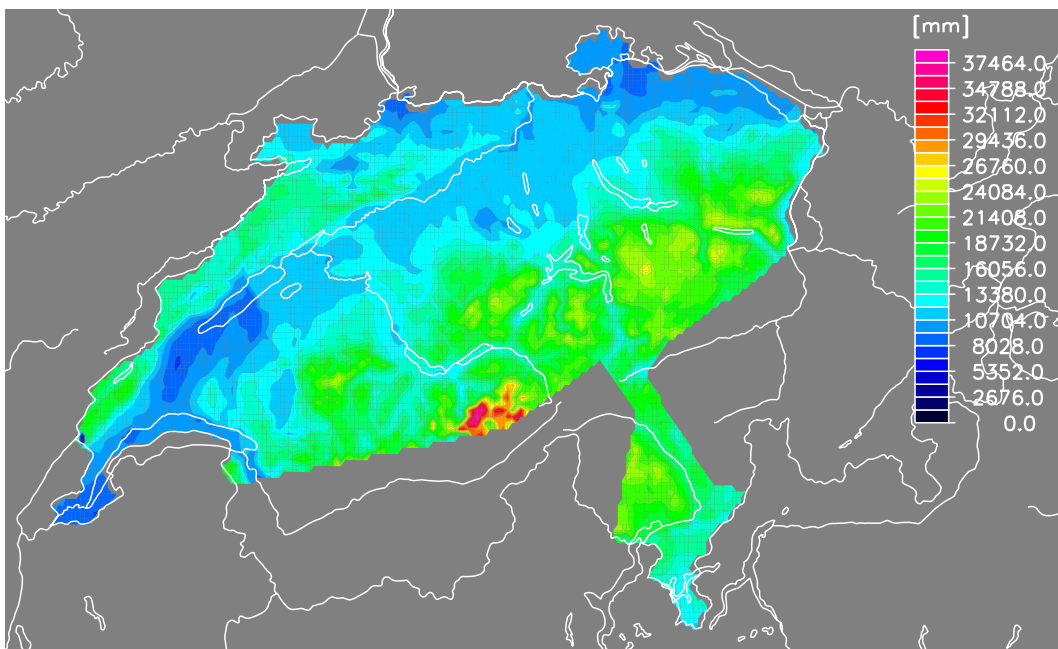


Abb. 4-28: Die neueste Version einer Karte mit der Summe sämtlicher Niederschläge vom 1. Januar 1992 bis am 31. Dezember 2003 (in mm), welche CH02H erfasst.

4.5 KLIMATOLOGISCHE ANALYSEN

4.5.1 NIEDERSCHLAGSINTENSITÄT UND -HÄUFIGKEIT

Aus klimatologischer Sicht interessanter als die im Rahmen der Validierung (Kapitel 4.2.4) untersuchten mittleren Niederschlagsfelder sind im Zusammenhang mit CH02H die saisonalen Intensitäten, d.h. die durchschnittlichen Regen- oder Schneemengen pro Niederschlagsstunde. Diesbezüglich bestätigt CH02H die Er-

wartungen: die tiefsten Niederschlagsintensitäten findet man ganzjährig im Mittelland, mittlere, o-
rographisch bedingte Werte im Jura und in den Voralpen, die Maxima im Tessin und in der Jungfrauregion
(Abb. 4-29).

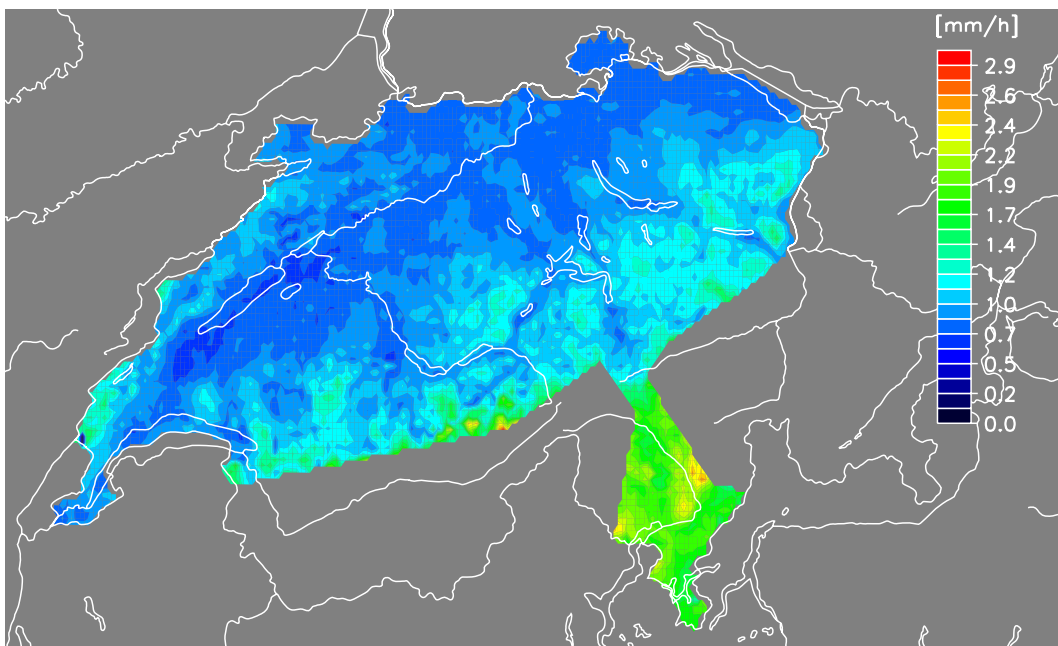


Abb. 4-29: Diese Karte zeigt die Niederschlagsintensität zwischen dem 1. Januar 1992 und dem 31. Dezember 2003 in den nicht maskierten Regionen der Schweiz.

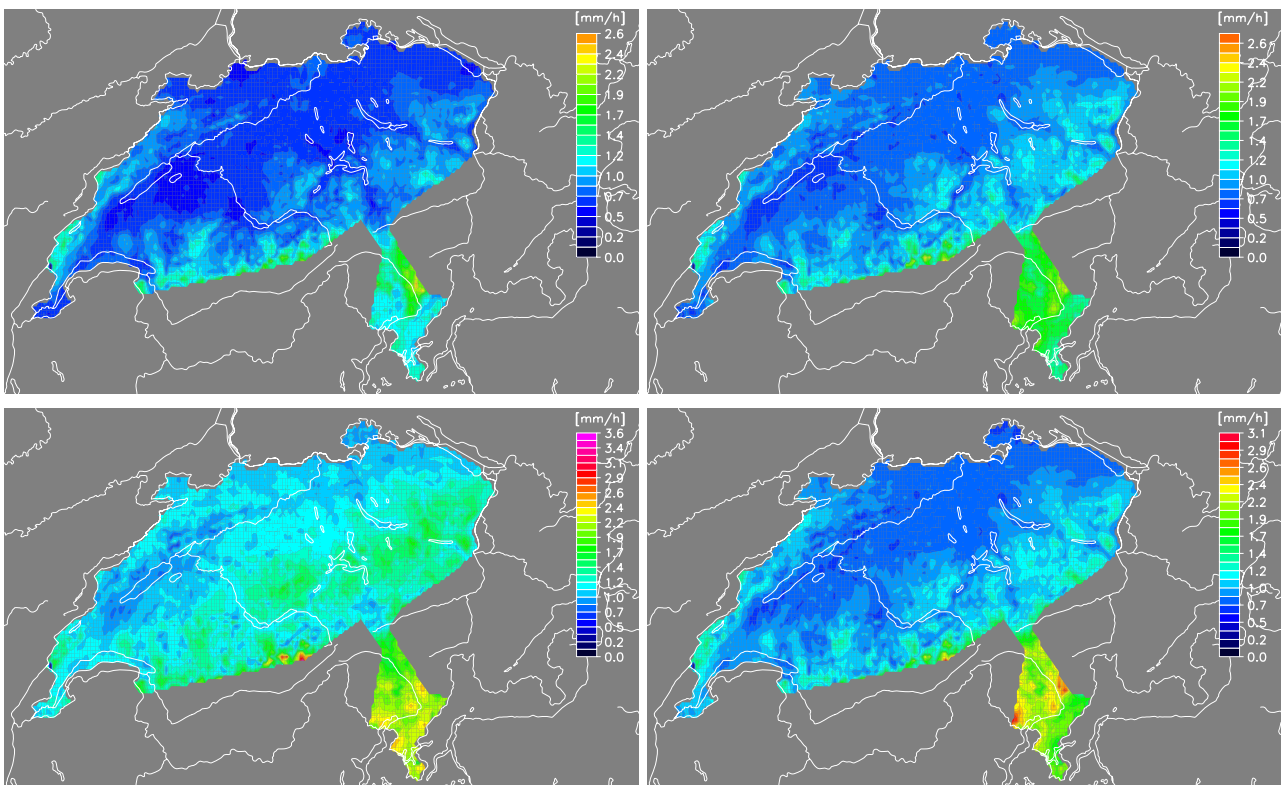


Abb. 4-30: Wie Abb. 4-29 (mit gleicher Farbskala), aber für jede Jahreszeit separat: Winter 1992/93 bis 2002/03 (oben links), Frühling 1992 bis 2003 (oben rechts), Sommer 1992 bis 2003 (unten links) und Herbst 1992 bis 2003 (unten rechts).

Im Winter (Abb. 4-30, oben links) erreicht die Niederschlagsintensität landesweit ein Minimum. Im Frühling nimmt sie hauptsächlich am Alpensüdhang, in geringerer Masse aber auch in der übrigen Schweiz langsam zu (Abb. 4-30, oben rechts). Die grössten Niederschlagsintensitäten treten erwartungsgemäss im Sommer

auf, wobei die Differenz zum Frühling im Mittelland und im Jura grösser ausfällt als entlang den Alpen und auf der Alpensüdseite (Abb. 4-30, unten links). Allerdings werden die Intensitäten der Südschweiz auf der Alpennordseite auch jetzt nicht annähernd erreicht. Während die Niederschlagsraten im Herbst in den Alpen und auf der Alpennordseite bereits wieder zurückgehen, bleiben sie im Tessin gegenüber dem Sommer praktisch unverändert – nördlich des Lago Maggiore erreichen sie sogar erst jetzt ihr Maximum (Abb. 4-30, unten rechts).

Ein wenig zu erstaunen vermag die Tatsache, dass der orographische Effekt auf den Intensitätskarten nur relativ schwach zutage tritt. Andererseits bewirkt er hauptsächlich eine Zunahme der Niederschlagsmenge und nicht unbedingt der Niederschlagsrate.

Die Verteilung der Niederschlagshäufigkeit, sozusagen das Gegenstück zu den Intensitätskarten, bietet ein ziemlich eindrückliches Bild. Auf den ersten Blick zeigt sich eine Art Zweiteilung der Schweiz (Abb. 4-31, 4-32): auf der Alpennordseite ist die Anzahl der Niederschlagsstunden in den meisten Monaten deutlich höher als im Tessin. Bei näherer Betrachtung fällt zudem auf, dass die Niederschlagshäufigkeit im Mittelland und entlang den Voralpen über das Jahr gesehen ziemlich konstant bei rund 15 bzw. durchschnittlich 20 Prozent liegt. Ein wenig stärker ausgeprägt sind die saisonalen Unterschiede im Jura. Die grössten Schwankungen und einen bereits subtropisch beeinflussten Jahresgang lässt das Tessin erkennen: auf ein Hauptminimum im Winter folgt im Frühling ein sekundäres Maximum; im Sommer geht die Anzahl der Niederschlagsstunden wegen des Einflusses des Subtropenhochs auf ein sekundäres Minimum zurück, bevor sie im Herbst wieder zum Hauptmaximum ansteigt (Abb. 4-32).

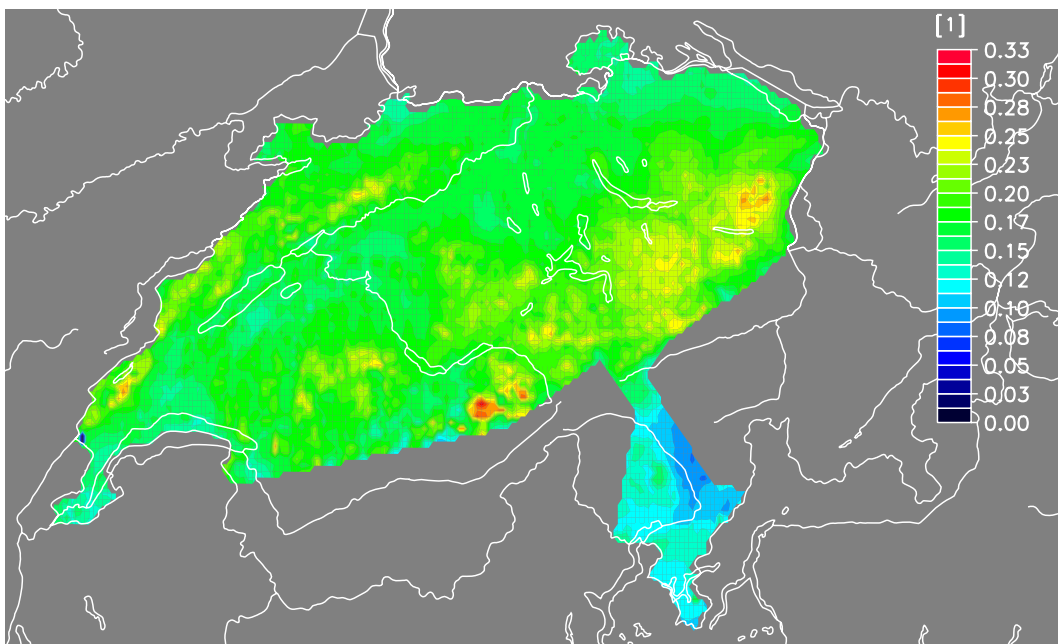


Abb. 4-31: Auf der Karte dargestellt ist die ganzjährige Niederschlagshäufigkeit vom 1. Januar 1992 bis zum 31. Dezember 2003 als Anteil aller Stunden mit mindestens 0.1 mm Niederschlag an den Stunden sämtlicher Tage, die nicht infolge fehlender Radardaten bei der Disaggregation gelöscht wurden. 0.0 bedeutet, dass es in den Wintermonaten am betreffenden Gitterpunkt nie geregnet oder geschneit hat, 1.0 hingegen, dass es in jeder Wintersaison ausschliesslich Niederschlagsstunden gegeben hat.

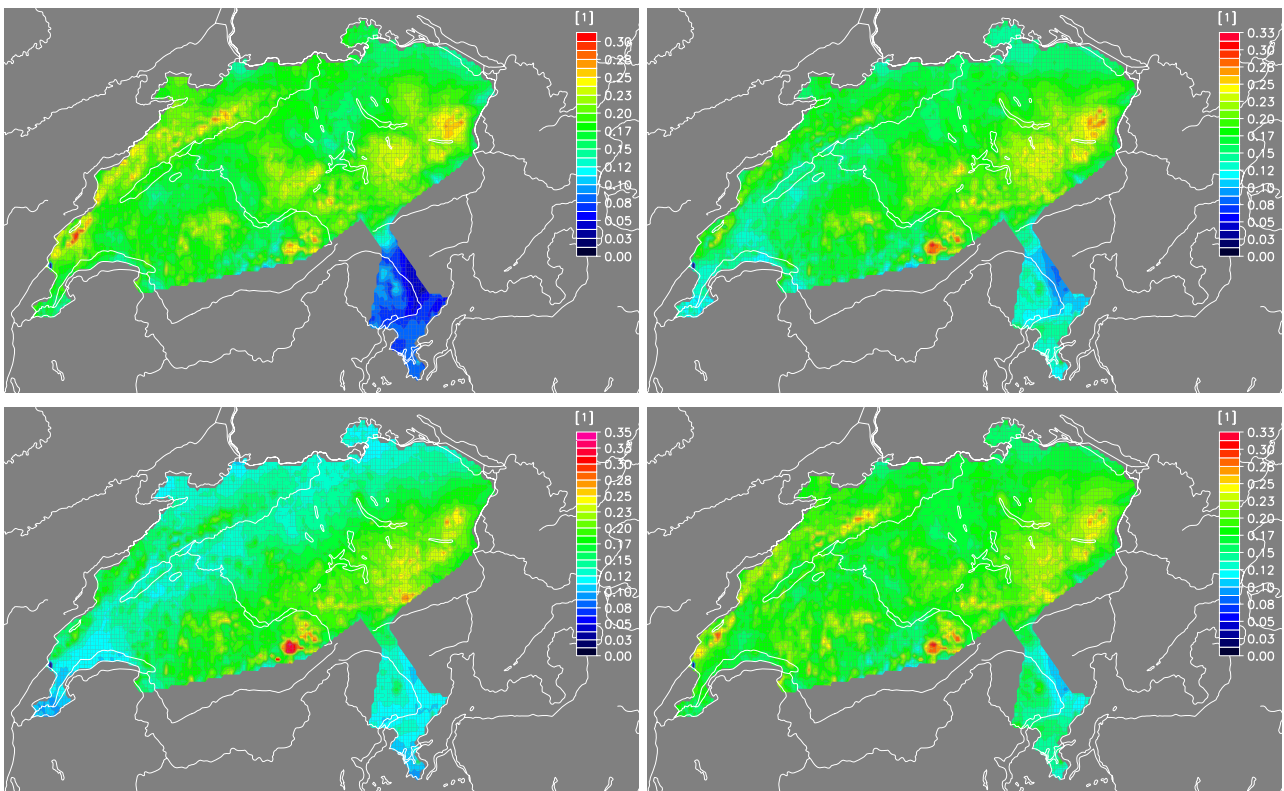


Abb. 4-32: Wie Abb. 4-31 (einschliesslich identischer Farbskala), aber saisonal: Dezember bis Februar 1992/93 bis 2002/03 (oben links), März bis Mai 1992 bis 2003 (oben rechts), Juni bis August 1992 bis 2003 (unten links) und September bis November 1992 bis 2003 (unten rechts).

4.5.2 STARKNIEDERSCHLÄGE

4.5.2.1 Ganzjährige Verteilung von Starkniederschlägen

In der gesamten Zeitspanne von 1992 bis 2003 treten gemäss CH02H Stunden mit mindestens 10 mm Niederschlag am häufigsten im Tessin und in der Jungfrauregion auf (Abb. 4-33). Bereits erheblich geringer ist deren Anzahl entlang den Voralpen und im Jura, während solche Ereignisse in vielen Gegenden des Mittellands nur äusserst selten zu beobachten sind. Zumindest auf der Alpennordseite bewirkt der Einfluss der Orographie also offensichtlich eine Zunahme der Häufigkeit von Starkniederschlägen gegenüber dem Flachland.

CH02H zeigt aber auch, dass der Anteil von Stunden mit mindestens 10 mm Niederschlag selbst in den niederschlagsintensivsten Landesgegenden nicht annähernd 1 Prozent ausmacht. In weiten Teilen der Alpennordseite, inklusive Jura und Voralpen, liegt er sogar wesentlich unter 0.1 Prozent, und im Gebiet zwischen Genfer- und Neuenburgersee sowie entlang dem Rhein zwischen Bodensee und Basel werden solche Niederschlagsintensitäten kaum je erreicht.

Einwenig anders präsentiert sich die Lage beim Anteil der Tage mit einer Niederschlagsmenge von mindestens 10 mm (Abb. 4-34). Hier stechen vor allem die Berner Alpen mit der Jungfrauregion und die Voralpen, insbesondere das Säntisgebiet, hervor, wo dieser Schwellenwert gemäss CH02H an gegen 30 Prozent aller Tage überschritten wird. Es folgen der Jura mit durchschnittlich 15 Prozent, die Südschweiz mit ungefähr 12 Prozent und am Ende das Mittelland mit grösstenteils weniger als 10 Prozent.

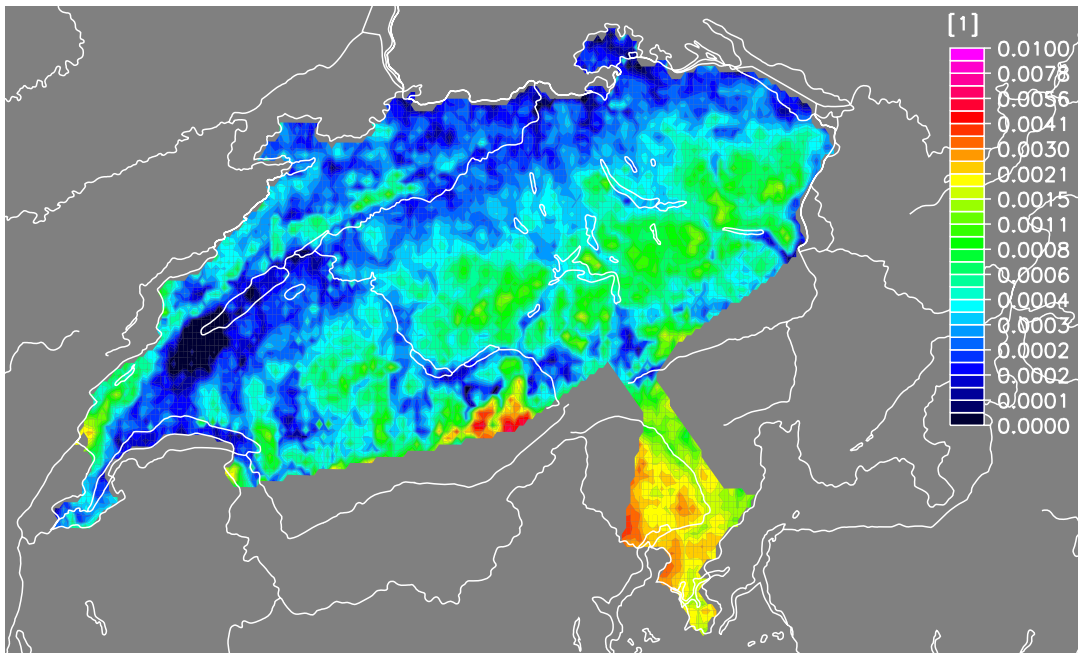


Abb. 4-33: Diese Graphik zeigt für sämtliche nicht maskierten Regionen der Schweiz, welchen Anteil die Stunden mit mindestens 10 mm Niederschlag zwischen dem 1. Januar 1992 und dem 31. Dezember 2003 an den Stunden aller Tage ausmachen, die nicht aufgrund lückenhafter Radardaten während der Disaggregation ganz entfernt wurden. 0.0 heisst in diesem Zusammenhang, dass solche Ereignisse während den ganzen 12 Jahren nie aufgetreten sind, 1.0, dass es ohne Unterbruch mit mindestens dieser Rate geregnet oder geschneit hat.

Insgesamt bietet sich ein sehr plausibles Bild, wie man es auch infolge der Höhenabhängigkeit der Niederschläge erwarten würde: die mässige Anzahl Tage mit grösseren Niederschlagsmengen im Jura nimmt zum Mittelland hin deutlich ab, bevor sie in den Voralpen wieder ansteigt und gegen die Alpen ihr Maximum erreicht; im Tessin bleibt sie allerdings höher als im Mittelland.

Eindrücklich bestätigt wird dieser Befund durch einen Vergleich mit der fast identischen Karte, welche auf der Grundlage der CH02D-Daten erstellt wurde (Abb. 4-35). Allfällige geringfügige Abweichungen sind auf die bei der Disaggregation gelöschten Daten zurückzuführen.

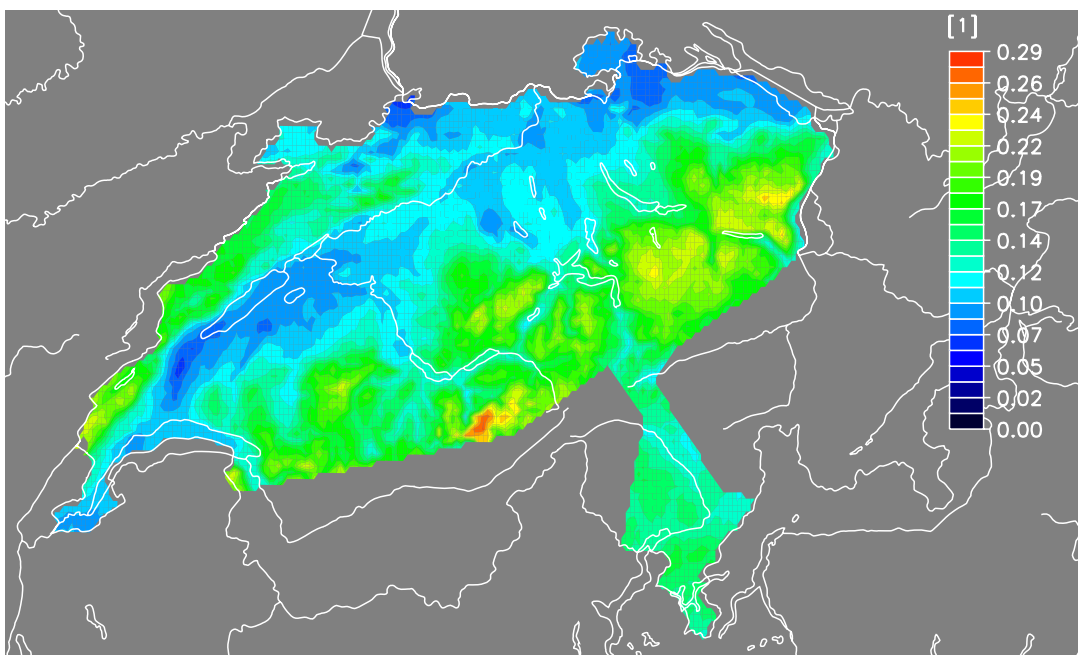


Abb. 4-34: Auf der Karte ist der ganzjährige Anteil aller Tage mit mindestens 10 mm Niederschlag an sämtlichen Tagen mit vollständigen Radardaten vom 1. Januar 1992 bis zum 31. Dezember 2003 abgebildet. Beträgt dieser Anteil 0.0, ist am betreffenden Gitterpunkt an keinem Tag so viel Niederschlag gefallen, beläuft er sich dagegen auf 1.0, hat es an jedem Tag wenigstens 10 mm Niederschlag gegeben.

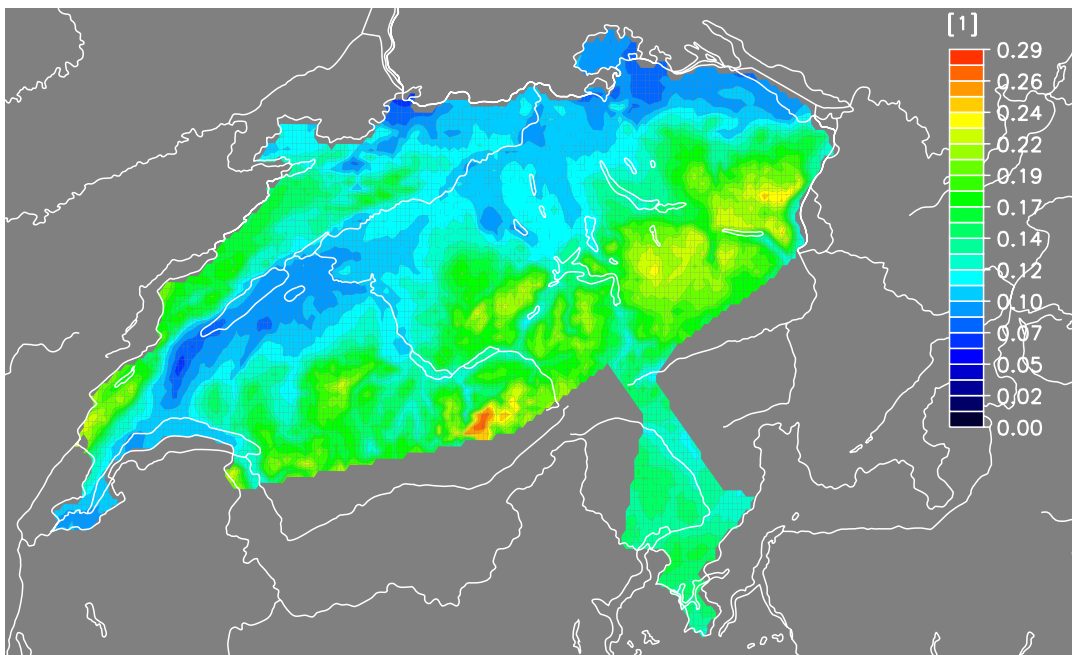


Abb. 4-35: Wie Abb. 4-34, mit der Ausnahme, dass hier nicht die Stundenwerte von CH02H, sondern die Tagessummen von CH02D zugrunde liegt.

4.5.2.2 Saisonale Vergleiche

In den Wintermonaten sind Stunden mit mindestens 10 mm Niederschlag merklich seltener (Abb. 4-36, oben links). Im Mittelland sind solche Ereignisse in den ganzen 12 Jahren von 1992 bis 2003 allenfalls in erhöhten Lagen zu beobachten, im Jura und entlang den Voralpen liegt ihr Anteil höchstens im Bereich von Zehntel Promillen, aber auch in den Kernregionen, allen voran im Tessin, geht ihre Zahl deutlich zurück.

Die Verteilung der Starkniederschläge im Frühling entspricht ziemlich gut dem ganzjährigen Mittel, wenn auch mit kleineren Werten (Abb. 4-36, oben rechts).

Die im Sommer in der Schweiz häufigen, konvektiven Wetterlagen widerspiegeln sich hingegen eindeutig in Abbildung 4-36 (unten links): in der ganzen Schweiz, vor allem aber im südlichen Tessin, in der Jungfrauregion und entlang den Voralpen, steigt die Zahl der Stunden mit schauerartigen Niederschlägen sprunghaft an, sodass ihr Anteil fast gesamtschweizerisch die Schwelle von 0.5 Promille erreicht und vielerorts sogar überschreitet. Dennoch liegen die Werte auf der Alpennordseite (0.2 bis 2‰) merklich tiefer als im Süden (1 bis 5‰).

Die Situation im Herbst präsentiert sich wieder ähnlich wie im Frühling und im ganzjährigen Mittel, allerdings mit einer nicht unbedeutenden Ausnahme: im Tessin bleibt die Zahl der Stunden mit starken Regenfällen im Herbst ähnlich hoch wie im Sommer bzw. nimmt sogar zu. In diesem Punkt stimmt CH02H mit der Beobachtung ziemlich gut überein, denn konvektive Niederschläge sind im Herbst auf der Alpensüdseite durchaus keine seltene Erscheinung und deutlich häufiger als etwa im Frühling (Abb. 4-36, unten rechts).

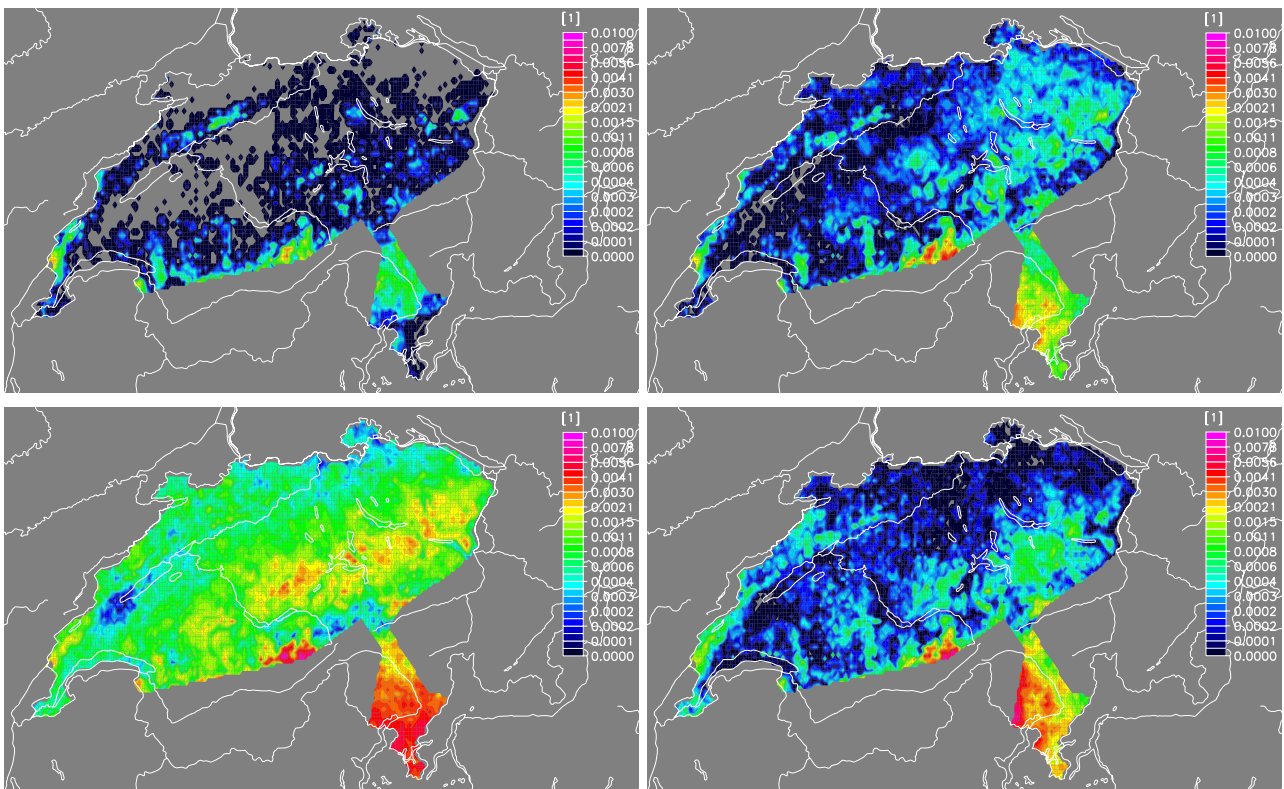


Abb. 4-36: Wie Abb. 4-33 (inklusive identischer Farbskala), aber für jede Jahreszeit einzeln: Winter 1992/93 bis 2002/03 (oben links), Frühling 1992 bis 2003 (oben rechts), Sommer 1992 bis 2003 (unten links) und Herbst 1992 bis 2003 (unten rechts).

Der Anteil der Niederschlagstage mit mindestens 10 mm Regen oder Schnee geht im Winter vor allem im Mittelland und auf der Alpensüdseite deutlich zurück, während die Schwankung über den Voralpen und Alpen geringer ausfällt (Abb. 4-37, oben links). Ein interessantes Phänomen zeichnet sich im Jura ab: die Anzahl Tage mit grösseren Niederschlagsmengen ist dort im Winter maximal.

Das ganze Jahr über, vornehmlich aber im Frühling (Abb. 4-37, oben rechts) widerspiegelt sich zumindest auf der Alpennordseite die Zunahme des mittleren Niederschlags mit der Höhe anschaulich in einem Anstieg der Anzahl Tage mit mehr als 10 mm Niederschlag vom Mittelland in den Jura und die Voralpen hinein.

Im Sommer (Abb. 4-37, unten links) erreicht der Anteil niederschlagsreicher Tage in weiten Teilen des Mittellands und des Tessins, vor allem aber in den Voralpen erwartungsgemäss das Maximum, im Jura hingegen verbreitet das Minimum.

Der Herbst präsentiert ein relativ ausgeglichenes Bild (Abb. 4-37, unten rechts): obgleich weiterhin deutliche Differenzen zwischen den Regionen Jura, Mittelland, Voralpen/Alpen und Alpensüdseite bestehen, sind sie in den Monaten September bis November anscheinend am kleinsten.

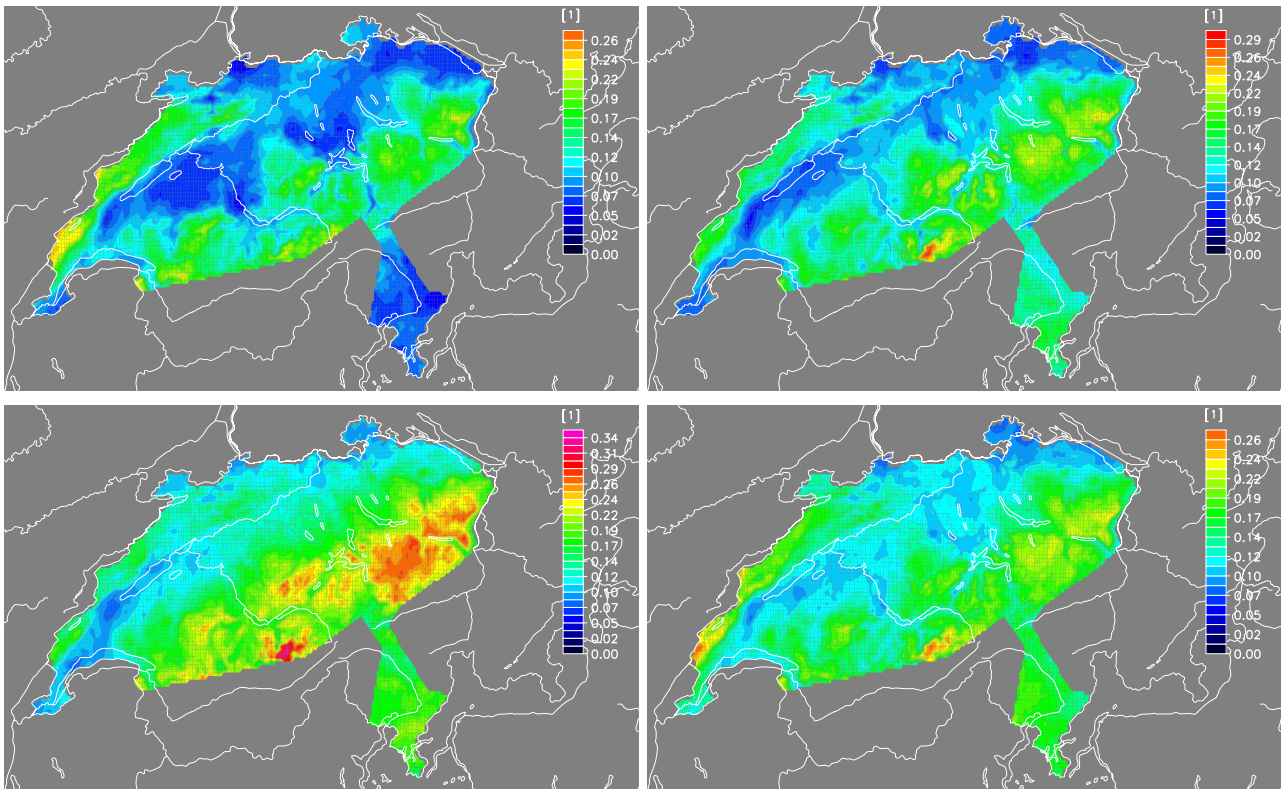


Abb. 4-37: Wie Abb. 4-34 (inklusive identische Farbskala), allerdings nach Jahreszeiten getrennt: Dezember bis Februar 1992/93 bis 2002/03 (oben links), März bis Mai 1992 bis 2003 (oben rechts), Juni bis August 1992 bis 2003 (unten links) und September bis November 1992 bis 2003 (unten rechts).

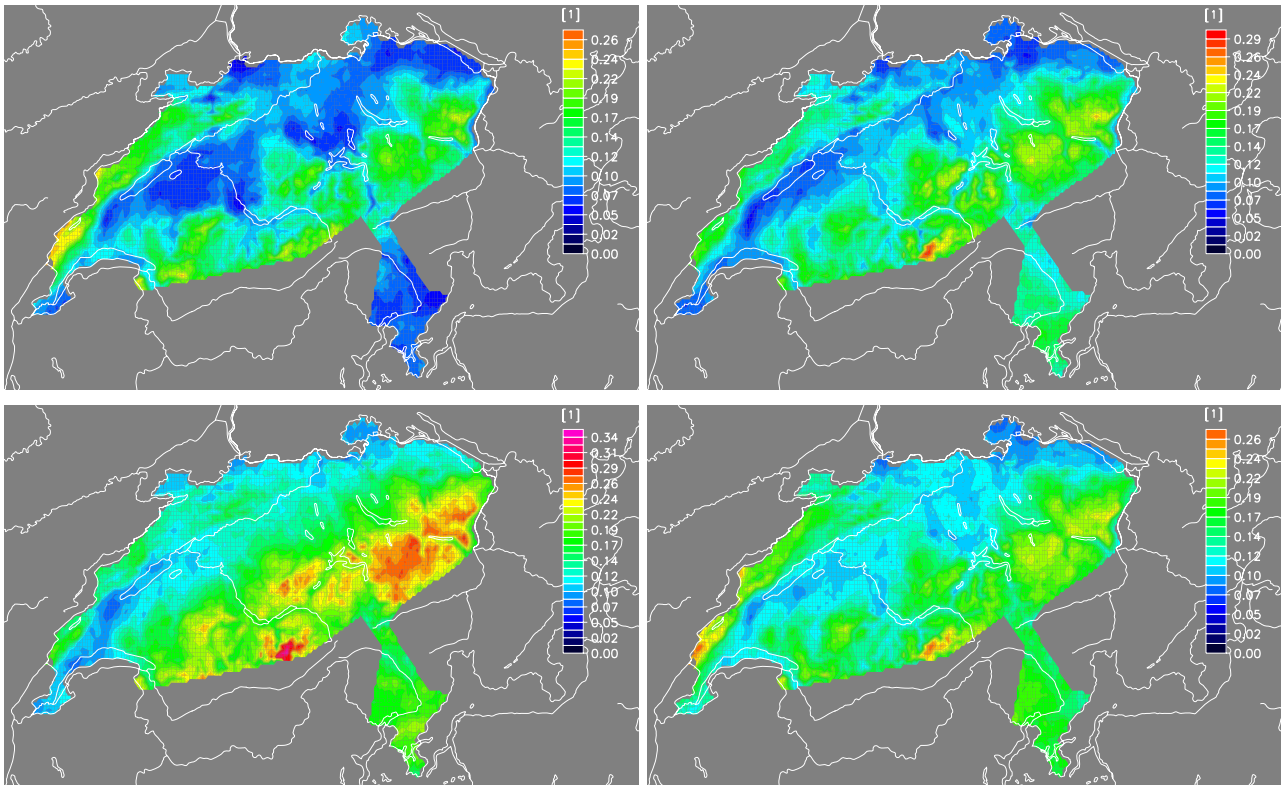


Abb. 4-38: Wie Abb. 4-34 (einschliesslich identische Farbskala), allerdings saisonal und auf der Grundlage der Tagessummen von CH02D.

Erfreulich ist die Tatsache, dass die mit CH02H erstellten Karten beim saisonalen Vergleich wiederum annähernd identisch mit denjenigen der CH02D-Daten sind (Abb. 4-38).

Einerseits ist also der Anteil der Stunden mit mindestens 10 mm Niederschlag im Tessin deutlich höher als auf der Alpennordseite, andererseits die Zahl der Tage mit Niederschlagsmengen von mehr als 10 mm kaum grösser – im Vergleich zu den Voralpen in aller Regel sogar kleiner. Dies lässt, unter Einbezug der in Kapitel 4.5.1 gemachten Beobachtungen zu den Niederschlagshäufigkeiten, vermuten, dass ein Grossteil der gesamthaft registrierten Niederschlagsmenge im Norden offenbar mit geringerer Intensität und auf mehr Stunden verteilt fällt als in der Südschweiz, wo eher kürzere, dafür heftigere Niederschlagsphasen auftreten. Dieser Sachverhalt lässt sich unabhängig davon feststellen, ob man ganzjährige oder saisonale Karten betrachtet, denn, wengleich der Anteil kurzer Starkniederschläge sich im Sommer nördlich der Alpen ebenfalls signifikant erhöht, erreicht er nie das Ausmass wie auf der Alpensüdseite im Sommer oder im Herbst.

4.5.3 QUANTILE

Das empirische α -Quantil teilt eine Menge von beobachteten, aufsteigend geordneten Werten im Verhältnis $\alpha : (1-\alpha)$. Approximativ sind $\alpha \cdot 100\%$ aller Daten kleiner als oder gleich dem empirischen α -Quantil, $(\alpha-1) \cdot 100\%$ dagegen grösser. Das heisst beispielsweise, dass ungefähr 10% der Werte in einer Menge kleiner sind als deren 10%-Quantil, die restlichen mindestens 90% dagegen grösser. Weil sie von besonderer Bedeutung sind, bezeichnet man das 50%-Quantil als *Median*, das 25%-Quantil als *unteres* und das 75%-Quantil als *oberes Quartil*.

Das Zeitintervall vom 1. Januar 1992, 6:⁰⁰ UTC bis am 1. Januar 2004, 5:⁰⁰ UTC umfasst 105'192 Stunden. Gemäss den in Kapitel 4.5.1 abgebildeten Karten der Niederschlagshäufigkeiten fällt in weiten Teilen der Alpennordseite an rund 20% aller Tage im Jahr Niederschlag – im Jura beträgt dieser Anteil ungefähr 20%, im Mittelland etwa 15%, in den Alpen circa 25%. Nicht so ganz so hoch ist die Niederschlagswahrscheinlichkeit auf der Alpensüdseite, wo über das Jahr gemittelt nur gut 10% Niederschlagstage auftreten. Im gesamten Zeitraum entspricht dies somit etwa 20'000 bzw. 10'000 Niederschlagsstunden in den betreffenden Regionen. Für die Karte mit den 99%-Quantilen folgt daraus, dass grössere Niederschlagsmengen nur noch während ungefähr 200 bzw. 100 weiteren Stunden gefallen sind – in 12 Jahren.

4.5.3.1 Median

Der Median kann als Mass für die an einem Ort pro Niederschlagsstunde zu erwartende Niederschlagsmenge verstanden werden. Auf der Alpennordseite übersteigt er bei ganzjähriger Betrachtung nur entlang den Voralpen und im Jura die Marke von circa 0.5 mm/h (Abb. 4-39). Das heisst, je nach Region fällt gemäss CH02H während mindestens der Hälfte der rund 15'000 bis 20'000 insgesamt beobachteten Niederschlagsstunden eine geringere Regen- oder Schneemenge als 0.5 mm. Die Grenze von 1 mm/h wird im Jura und im Mittelland im Allgemeinen von höchstens etwa 30% der Niederschlagsstunden erreicht (70%-Quantil). Wesentlich höher liegt der Median in weiten Teilen des Tessins, sowie in den Berner Alpen, wo er teilweise Werte von 1.0 mm/h oder mehr annimmt. Insgesamt ergibt sich aber ein sehr ausgeglichenes Bild mit relativ geringen Variationen.

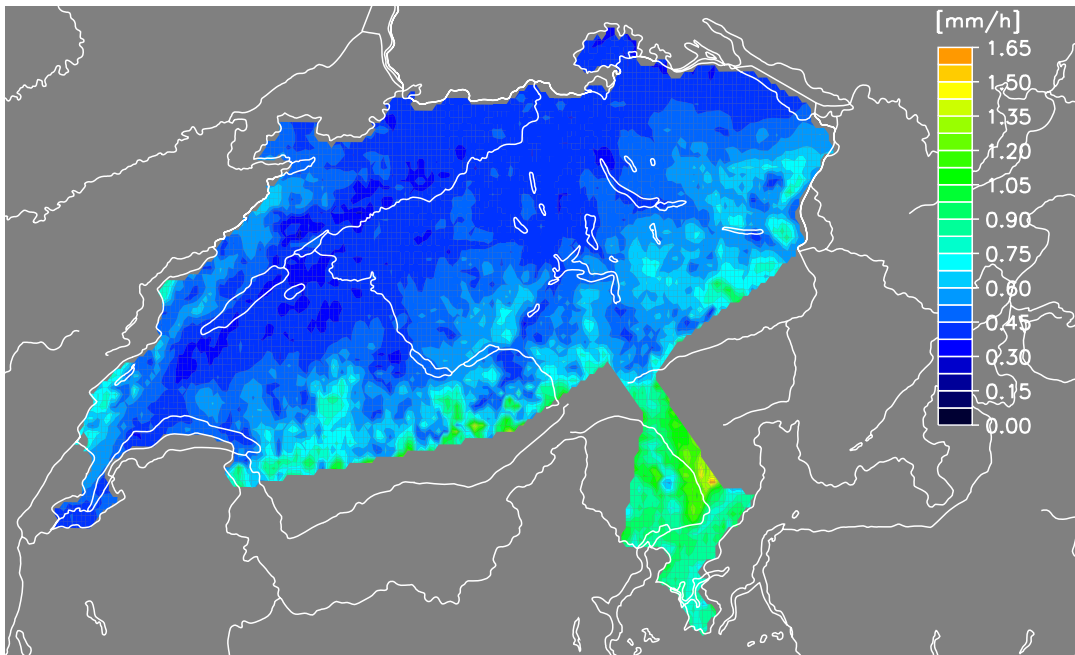


Abb. 4-39: Für jede nicht maskierte Gitterfläche ist auf dieser Karte der Median (das 50%-Quantil) der Niederschlagsraten (in mm/h) all jener Stunden zwischen dem 1. Januar 1992 und dem 31. Dezember 2003 eingezeichnet, an denen gemäss CH02H mindestens 0.1 mm Niederschlag erreicht wurden.

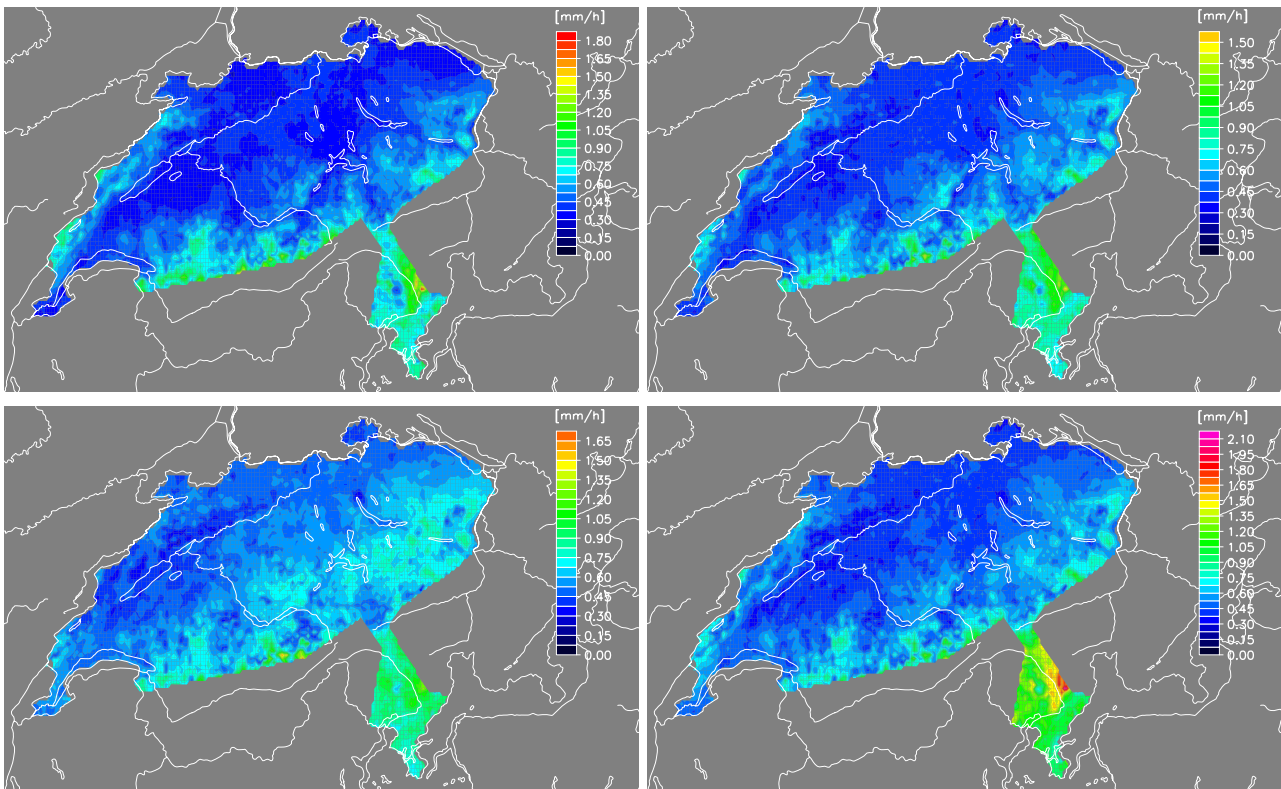


Abb. 4-40: Wie Abb. 4-39 (mit gleicher Farbskala), aber für jede Jahreszeit separat: Winter 1992/93 bis 2002/03 (oben links), Frühling 1992 bis 2003 (oben rechts), Sommer 1992 bis 2003 (unten links) und Herbst 1992 bis 2003 (unten rechts).

Beschränkt man sich für die Berechnung der Quantile auf die Wintermonate Dezember bis Februar, bewegt sich der Median entgegen den Erwartungen fast in der ganzen Schweiz in einem nur leicht tieferen Bereich als während dem ganzen Jahr (Abb. 4-40, oben links). Im Jura, im Mittelland und in den Voralpen pendeln die Werte zwischen 0.3 und 0.5 mm/h, ebenso sind sie für das Tessin mit durchschnittlich 0.8 mm/h nur unwesentlich kleiner. Auch Frühling und Herbst präsentieren ein weitgehend ähnliches Bild wie die Jahreswerte (Abb. 4-40, oben bzw. unten rechts); einzige Ausnahme ist die Alpensüdseite, wo der herbstliche Median

mit ungefähr 1.2 mm/h einwenig über dem ganzjährigen liegt. Selbst der Sommer wartet kaum mit Veränderungen auf – nur gerade in der südlichen Hälfte des Mittellands und in den Voralpen steigen die Werte geringfügig auf bis zu 0.75 mm/h an (Abb. 4-40, unten links). Gemäss CH02H regnet es folglich in den Monaten Juni bis August trotz der Gewitterhäufigkeit nur selten mit grösserer Intensität als von September bis Mai – heftige Gewitterniederschläge dürften somit sogar im Sommer eher die Ausnahme als die Regel darstellen. Von dieser Tendenz weicht nicht einmal das Tessin ab, obwohl die Alpensüdseite für ihre starken sommerlichen und herbstlichen Regenfälle bekannt ist.

4.5.3.2 99%-Quantile

Im Unterschied zum Median handelt es sich beim 99%-Quantil vorrangig um einen Massstab für Extremereignisse. Wie eingangs bereits erwähnt, registriert CH02H je nach Landesgegend im Verlauf von 12 Jahren nur noch während 100 bis 200 Stunden Regen- oder Schneefälle mit vergleichbaren oder höheren Intensitäten.

Qualitativ ähnelt die Karte der 99%-Quantile zumindest über das ganze Jahr gesehen derjenigen der Mediane (Abb. 4-41): weiterhin weist die Alpennordseite mit 4 bis 5 mm/h im Mittelland und 5 bis 8 mm/h entlang den Voralpen eindeutig tiefere Niederschlagsraten auf als die hohen Berner Alpengipfel und das Tessin mit je rund 10 bis 18 mm/h. Allerdings offenbart der saisonale Vergleich ganz im Gegensatz zum Median schweizweit einen ziemlich ausgeprägten Jahresgang der 99%-Quantile.

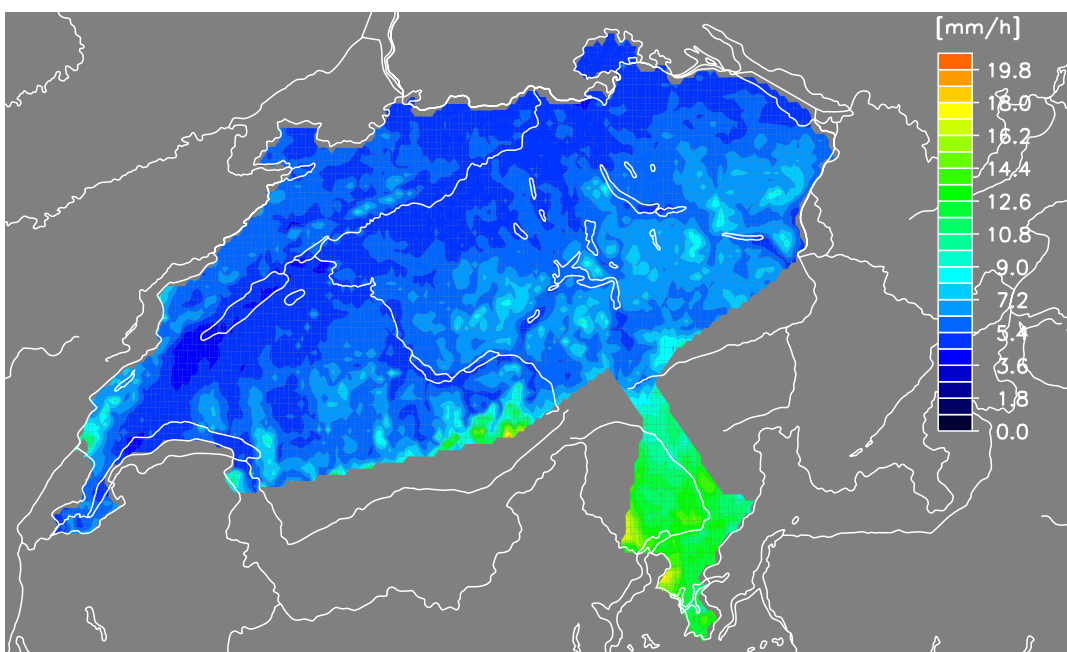


Abb. 4-41: Diese Karte präsentiert für die nicht maskierten Gebiete der Schweiz die ganzjährigen 99%-Quantile der Niederschlagsraten (in mm/h) sämtlicher Stunden vom 1. Januar 1992 bis zum 31. Dezember 2003, an welchen gemäss CH02H 0.1 mm oder mehr Niederschlag gefallen ist. Diese Grenze wird nur während 1% aller Niederschlagsstunden überschritten.

Im Mittelland liegen im Winter (Abb. 4-42, oben links) selbst die 99%-Quantile kaum über 4 mm/h, im Jura und zu den Alpen hin nehmen sie stellenweise immerhin bis auf etwa 6 mm/h zu. Vergleichbare Werte werden auch im Südtessin erreicht, nicht aber im Nordtessin, wo die 99%-Quantile sogar im Winter bis auf 15 mm/h ansteigen.

Der Frühling zeichnet sich durch eine Zunahme der 99%-Quantile auf der Alpennordseite und im Südtesin sowie einen Rückgang im Nordtesin aus (Abb. 4-42, oben rechts): im Jura und im Mittelland reichen die Werte jetzt grösstenteils von ungefähr 3.5 bis 6 mm/h, im Tessin bereits verbreitet von rund 8 bis 12 mm/h. War dies beim Median noch nicht der Fall, ist jetzt im Sommer der Einfluss der Gewitteraktivität gut spürbar. In weiten Teilen des Mittellandes erreichen die 99%-Quantile Werte zwischen etwa 5 und 9 mm/h, entlang den Voralpen (Napf, Pilatus) sogar bis 12 mm/h (Abb. 4-42, unten links). Noch grösser fällt der Zuwachs im Tessin aus, wo von Juni bis August fast flächendeckend während 1% der Niederschlagsereignisse Intensitäten zwischen 12 und 25 mm/h auftreten. Maximale 99%-Quantile werden im Sommer aber auch in der Jungfrauregion registriert (bis 25 mm/h).

Der Herbst zeigt sich weitgehend gleichwertig zum Frühling (Abb. 4-42, unten rechts), wenngleich mit tendenziell etwas tieferen 99%-Quantilen. Von diesem Trend ausgenommen ist das Tessin, vorab die Gegend unmittelbar nördlich des Lago Maggiore, wo die Werte in dieser Jahreszeit auf einem sommerlich hohen Niveau bleiben oder dieses zum Teil sogar überschreiten.

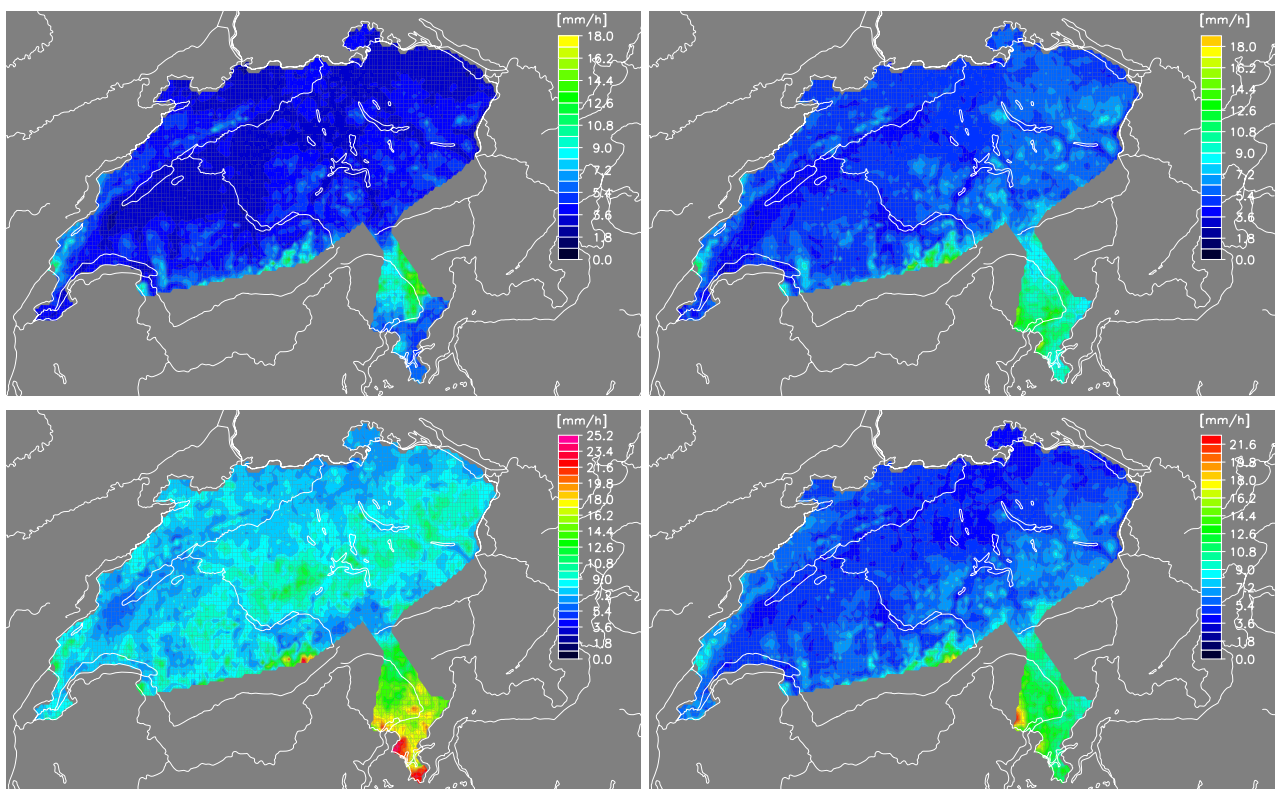


Abb. 4-42: Wie Abb. 4-41 (gleiche Farbskala inbegriffen), aber saisonal gegliedert: Dezember, Januar und Februar 1992/93 bis 2002/03 (oben links), März, April und Mai 1992 bis 2003 (oben rechts), Juni, Juli und August 1992 bis 2003 (unten links) und September, Oktober und November (unten rechts).

4.5.3.3 Quartilsdifferenz

Die Differenz zwischen dem 75%- und dem 25%-Quantil gibt einen Hinweis auf den Streubereich der Niederschlagsraten – je grösser sie wird, umso unterschiedlichere stündliche Regen- oder Schneemengen sind im betroffenen Gebiet zu erwarten.

Ganzjährig präsentiert sich das bereits bekannte Bild (Abb. 4-43): im Norden findet man im Allgemeinen eine relative geringe Streuung von meist weniger als 0.8 sicher aber weniger als 1.2 mm/h. Konkret bedeutet dies in Anbetracht des Medians, dass 50% aller Niederschläge auf der Alpennordseite inklusive Alpennordhang

Intensitäten innerhalb eines Bereichs von ungefähr 0.2 bis 1 mm/h aufweisen. Erheblich breiter gestreut sind die Niederschlagsraten im Tessin und in den Alpen mit Quartilsdifferenzen von durchschnittlich 1.5 bis 2.4 mm/h. Folglich bestimmen nicht nur höhere, sondern auch nachweislich variabelere Intensitäten das Niederschlagsgeschehen in den Bergen und auf der Alpensüdseite.

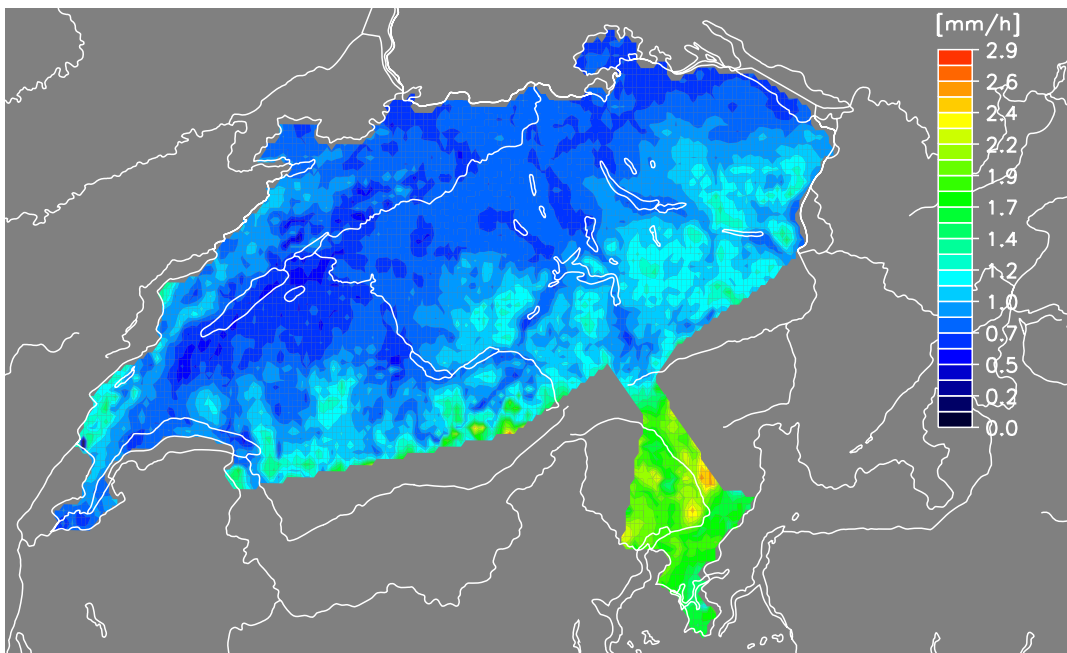


Abb. 4-43: Hierbei handelt es sich um eine graphische Darstellung der Quartilsdifferenzen, d.h. der Differenzen zwischen dem 75%- und dem 25%-Quantil, sämtlicher Niederschlagsraten von 0.1 mm/h oder höher an allen Gitterpunkten von CH02H vom 1. Januar 1992 bis zum 31. Dezember 2003.

Auf der Alpennordseite lässt sich lediglich ein mässiger Jahresgang mit einem schwachen Winterminimum und einem ebenso bescheidenen Sommermaximum erkennen (Abb. 4-44). Je nach betrachteter Region beträgt die Quartilsdifferenz von Dezember bis Februar rund 0.3 bis 1.0 mm/h, für Juni, Juli und August dagegen 0.5 bis 1.5 mm/h. Frühling und Herbst befinden sich irgendwo dazwischen, wobei die Lage im Frühling eher den winterlichen Verhältnissen nahe kommt, im Herbst dagegen den sommerlichen. Angesichts der Beobachtungen beim Median, wo sich die sommerliche Konvektion so gut wie überhaupt nicht abzeichnet, erscheint dies nicht weiter verwunderlich.

Im Unterschied dazu manifestiert sich im Tessin ein ausgeprägter Jahresgang mit minimaler Schwankungsbreite im Winter (1.0 bis 1.5 mm/h), mittleren Werten im Frühling (1.2 bis 2.0 mm/h), einer fortgesetzten Steigerung im Sommer (ziemlich homogen zwischen 1.8 und 2.5 mm/h) und den Maxima mehrheitlich im Herbst (von 1.8 mm/h im Süden bis 3.5 mm/h nördlich des Lago Maggiore).

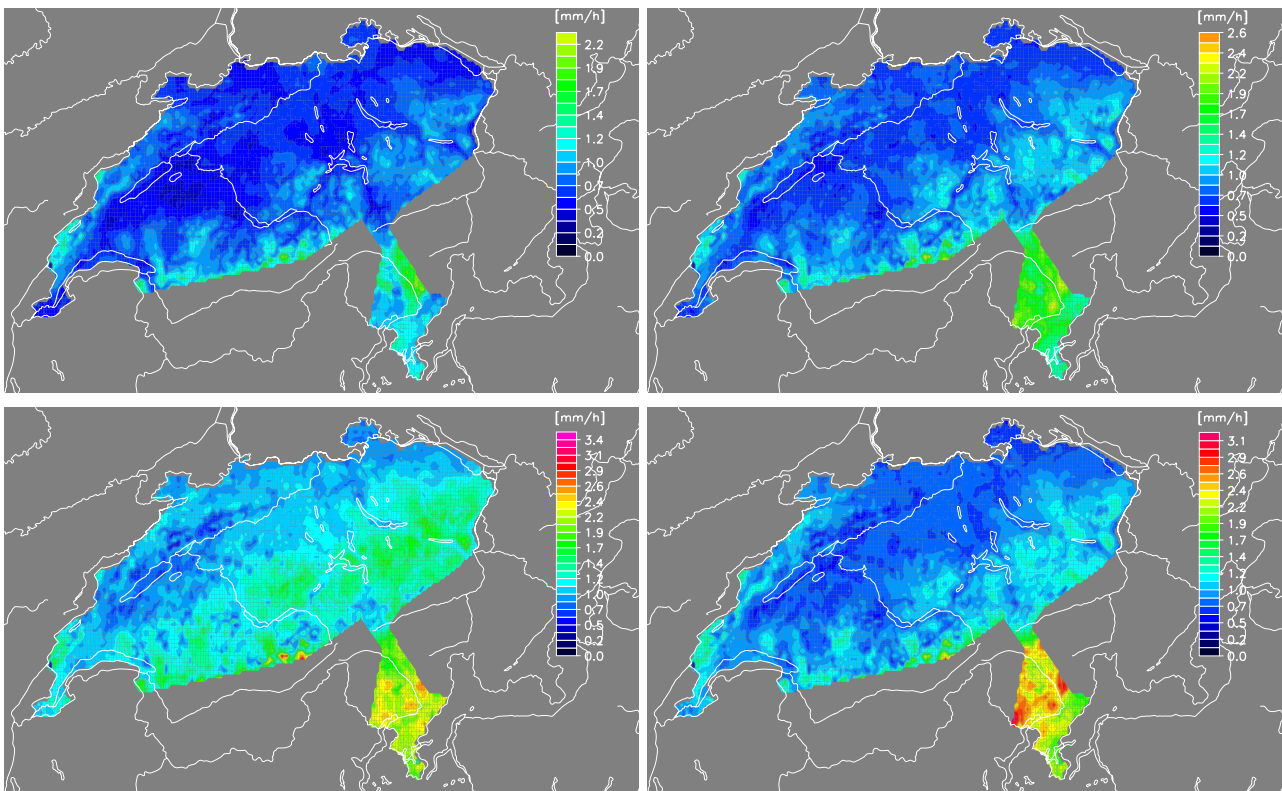


Abb. 4-44: Wie Abb. 4-43 (mit derselben Farbskala), aber jeweils nur für eine Jahreszeit: Winter 1992/93 bis 2002/03 (oben links), Frühling 1992 bis 2003 (oben rechts), Sommer 1992 bis 2003 (unten links) und Herbst 1992 bis 2003 (unten rechts).

4.5.4 TAGESGÄNGE

4.5.4.1 Vergleich mit sämtlichen ANETZ-Stationen

Der mittlere Tagesgang von CH02H an sämtlichen Niederschlagstagen der Jahre 1992 bis 2003 sowie allen 47 Gitterflächen, welche den von der Maske nicht ausgeschlossenen ANETZ-Standorten entsprechenden, erweist sich als geglättete Kurve mit einem primären Maximum am späten Nachmittag (16 bis 18 UTC) und einem sekundären in den Morgenstunden (6 bis 7 UTC) (Abb. 4-45). Dies erfüllt die Erwartungen, wie sie aufgrund der tageszeitlichen Verteilung von Nahblitzen bestehen, ziemlich gut (vgl. Huntrieser, 1995).

Der Vergleich mit den tatsächlich gemessenen Niederschlagsmengen ergibt eine akzeptable Übereinstimmung, wenn man von zwei Abweichungen absieht: erstens zeigen die ANETZ-Stationen kein sekundäres, morgendliches Maximum, und zweitens ist das primäre Maximum um etwa zwei Stunden auf 18 bis 19 UTC verschoben.

Der gleichermassen für die Wintermonate berechnete durchschnittliche, tägliche Niederschlagsverlauf präsentiert sich weitaus unregelmässiger mit diversen, über den ganzen Tag verteilten Auf- und Abwärtsbewegungen (Abb. 4-46, oben links). Vereinfacht ausgedrückt existiert im Winter gemäss CH02H kaum ein wirklicher Tagesgang der Niederschlagsintensitäten; allenfalls zeichnen sich am Morgen (7 bis 8 UTC) und am Nachmittag (13 bis 15 UTC) so etwas wie zwei Maxima ab, welche von einem Minimum am Mittag unterbrochen werden. Infolgedessen stimmt die winterliche Kurve von CH02H zumindest qualitativ schlechter mit den ANETZ-Messungen überein als die Jahreskurve, denn letztere zeigen ein Hauptmaximum in der zweiten Nachthälfte (2 bis 5 UTC), eine kleinere Spitze am Abend (19 UTC) und ein eindeutiges Minimum um die Mittagszeit (10 bis 12 UTC).

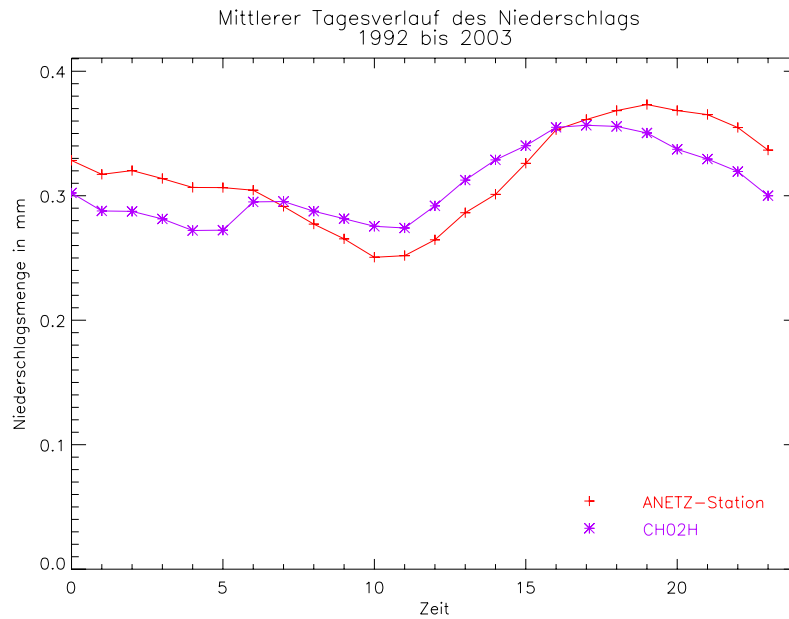


Abb. 4-45: Diese Graphik zeigt den ganzjährigen, mittleren Tagesverlauf des Niederschlags an den 47 ANETZ-Stationen (+, rot), welche nicht maskiert werden, und an den entsprechenden Gitterflächen von CH02H (*, violett) zwischen dem 1. Januar 1992 und dem 31. Dezember 2003. Auf der Abszisse ist die Uhrzeit (0 bis 23 UTC) abgetragen, auf der Ordinate die über sämtliche vorhandenen Niederschlagsstunden, d.h. Stunden mit mindestens 0.1 mm Niederschlag, zur jeweiligen Tageszeit gemittelte Niederschlagsmenge in mm.

Im Frühling lässt CH02H einen ähnlichen Tagesgang wie das ganze Jahr über erkennen, allerdings weniger geglättet (Abb. 4-46, oben rechts): minimale Niederschlagsraten in der Nacht (2 bis 5 UTC) und am Mittag, welche durch einen geringfügigen Anstieg am Morgen (6 UTC) voneinander getrennt sind, sowie maximale am späteren Nachmittag (16 bis 18 UTC). In qualitativer Hinsicht verhält sich der mittlere Tagesgang aller ANETZ-Stationen fast identisch, obgleich dessen Maximum einmal mehr um rund eine Stunde später eintritt als dasjenige von CH02H. In Bezug auf die Niederschlagsmengen resultieren daraus jedoch ansehnliche Differenzen, die nur morgens zwischen 6 und 8 UTC und abends von 17 bis 18 UTC annähernd verschwinden. Für die Sommermonate offenbart CH02H den erwarteten täglichen Verlauf der konvektiven Niederschlagsaktivität mit primärem Maximum am frühen Abend (18 UTC) und sekundärem in den Morgenstunden (6 bis 7 UTC). In dieser Jahreszeit erreicht sie auch zweifelsohne die beste Übereinstimmung mit den ANETZ-Messungen (Abb. 4-46, unten links). Beide Kurven verlaufen jetzt mehr oder weniger parallel zueinander; die teilweise vorhandene Verschiebung um eine Stunde dürfte zumindest partiell auf die um 20 Minuten gegeneinander verrückten Zeitreihen (siehe Kapitel 3.3.2) zurückzuführen sein.

Im Gegensatz zu den anderen Jahreszeiten präsentiert sich der durchschnittliche, tägliche Niederschlagsverlauf im Herbst sehr eintönig (Abb. 4-46, unten rechts). Weder bei der Kurve von CH02H, noch bei derjenigen der ANETZ-Stationen sind grössere Schwankungen auszumachen; folglich halten sich auch von September bis November die qualitativen Unterschiede zwischen ANETZ und CH02H in Grenzen. Quantitativ dagegen sind die Differenzen eher wieder grösser als im Sommer, vergleichbar mit den Frühlings- oder Winterwerten.

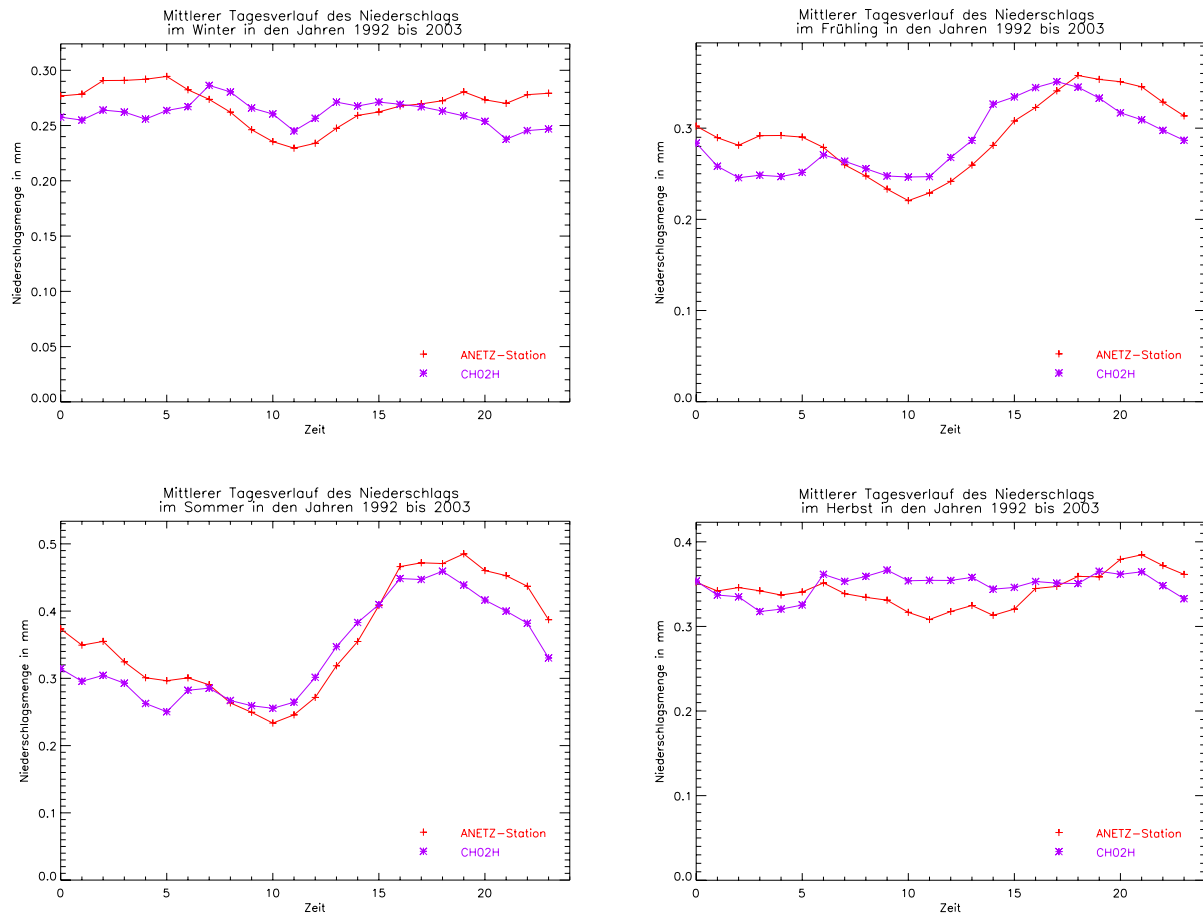


Abb. 4-46: Wie Abb. 4-45, aber saisonal unterteilt: Dezember bis Februar 1992/93 bis 2002/03 (oben links), März bis Mai 1992 bis 2003 (oben rechts), Juni bis August 1992 bis 2003 (unten links) und September bis November 1992 bis 2003 (unten rechts).

Bei der Betrachtung der mittleren Tagesgänge fällt auf, dass CH02H sowohl ganzjährig, als auch saisonal die Niederschlagsmengen am Tag über-, in der Nacht dagegen unterschätzt. Eine offenkundige Begründung für dieses Verhalten scheint es nicht zu geben.

4.5.4.2 Mittlerer Tagesgang in der Schweiz gemäss CH02H

Für die Kurven auf den Abbildungen 4-47 und 4-48 werden zunächst die Tagesgänge sämtlicher 7687 Gitterzellen von CH02H, welche innerhalb der Schweizergrenzen liegen und von der Maske nicht ausgeschlossen werden, bestimmt und nachfolgend gemittelt. Wie den Graphiken zu entnehmen ist, unterscheiden sie sich allerdings nur noch unwesentlich von den Ergebnissen in Kapitel 4.5.4.1, wo der Durchschnitt von lediglich 47 Gitterelementen berechnet wurde. Folglich stimmt also auch das gesamtschweizerische Mittel im Allgemeinen ziemlich gut mit dem Durchschnitt der punktuellen Messungen an den ANETZ-Stationen überein. Weil die Kurven noch geglätteter ausfallen, dürften sie aber sogar besser mit den ANETZ-Daten im Einklang stehen.

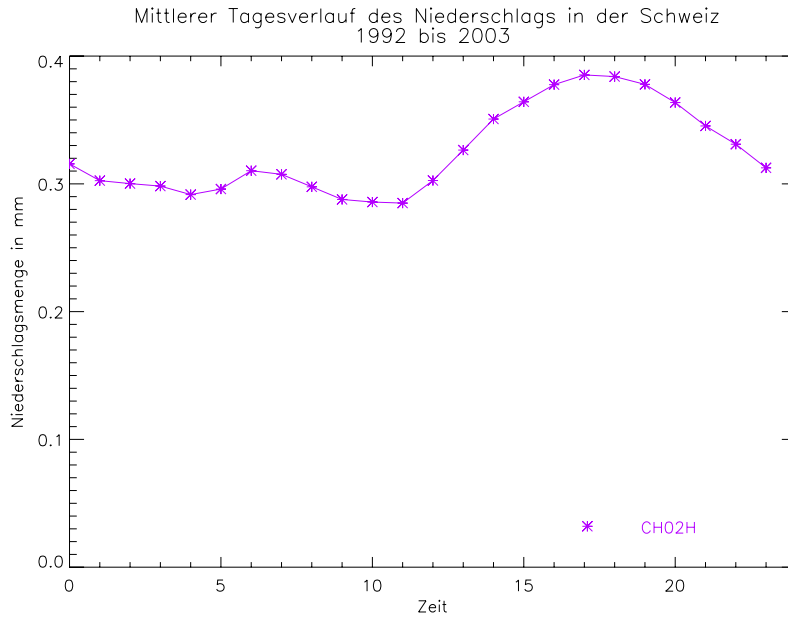


Abb. 4-47: In diesem Diagramm ist der ganzjährige, mittlere Tagesgang des Niederschlags sämtlicher nicht maskierter Gitterelemente von CH02H in der Schweiz in der Zeit vom 1. Januar 1992 bis am 31. Dezember 2003 aufgezeichnet. Auf der Abszisse erscheint die Tageszeit (0 bis 23 UTC), auf der Ordinate der Mittelwert (in mm) sämtlicher Stunden mit Niederschlagsmengen ab 0.1 mm.

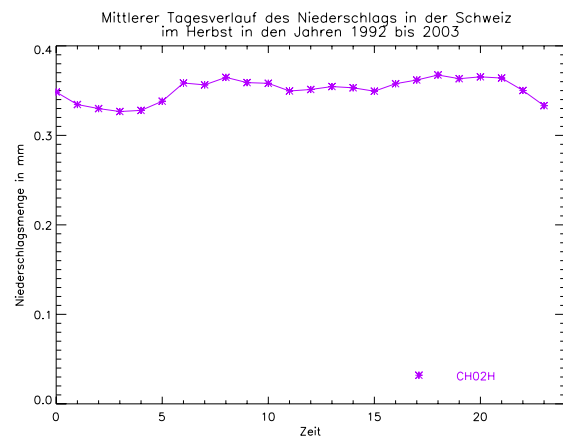
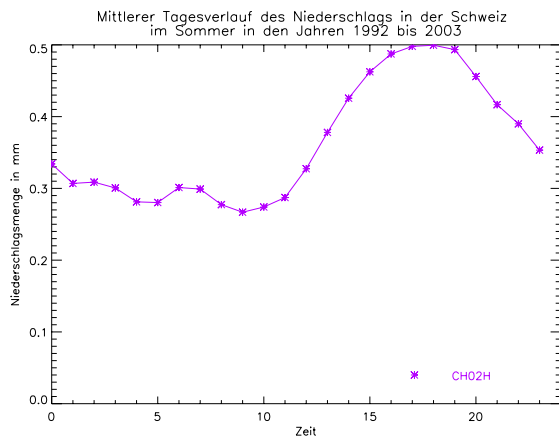
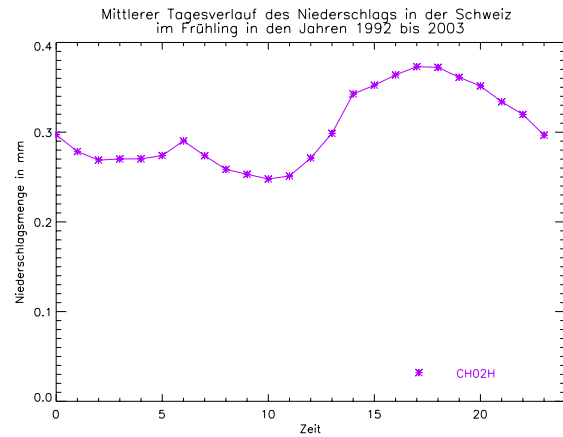
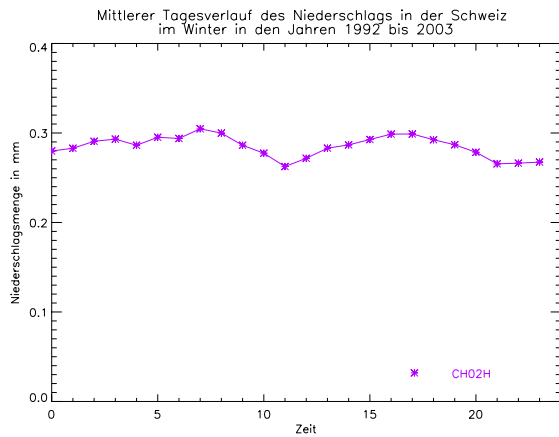


Abb. 4-48: Wie Abb. 4-47, allerdings nur für die Wintermonate Dezember, Januar und Februar 1992/93 bis 2002/03 (oben links), die Frühlingsmonate März, April und Mai 1992 bis 2003 (oben rechts), die Sommermonate Juni, Juli und August 1992 bis 2003 (unten links) und die Herbstmonate September, Oktober und November 1992 bis 2003 (unten rechts) getrennt.

4.5.4.3 Vergleiche mit einzelnen ANETZ-Stationen

Ganz anders verhält sich die Situation beim Vergleichen einzelner ANETZ-Stationen mit den entsprechenden Gitterflächen von CH02H. Im Flachland stimmen Messung und Disaggregation, wie das Beispiel Bern-Liebefeld zeigt, zwar oft relativ gut miteinander überein (Abb. 4-49 und 4-50), von einem charakteristischen Tagesgang ist aufgrund der zahlreichen Auf- und Abwärtsbewegungen beider Kurven aber nicht mehr viel zu sehen. Auf den meisten Graphiken sind immerhin ein Niederschlagsminimum am Mittag und ein spätnachmittägliches Maximum zu erkennen. Diese Tatsache spricht indes für die Qualität des neuen Datensatzes, da er nicht einfach die erwarteten Kurven zeichnet, sondern die ANETZ-Daten grösstenteils sehr gut widerspiegelt.

In den Bergen ist allerdings selbst in den nicht maskierten Regionen vielfach nicht einmal mehr eine qualitative Ähnlichkeit der beiden Datensätze vorhanden. Wie man dem Beispiel Säntis entnehmen kann (Abb. 4-51 und 4-52), zeigen ANETZ-Messung und CH02H teilweise einander diametral entgegenlaufende mittlere, tägliche Niederschlagsverläufe. Die Brauchbarkeit von CH02H für den Tagesgang muss in diesen Gebieten also ernsthaft in Frage gestellt werden.

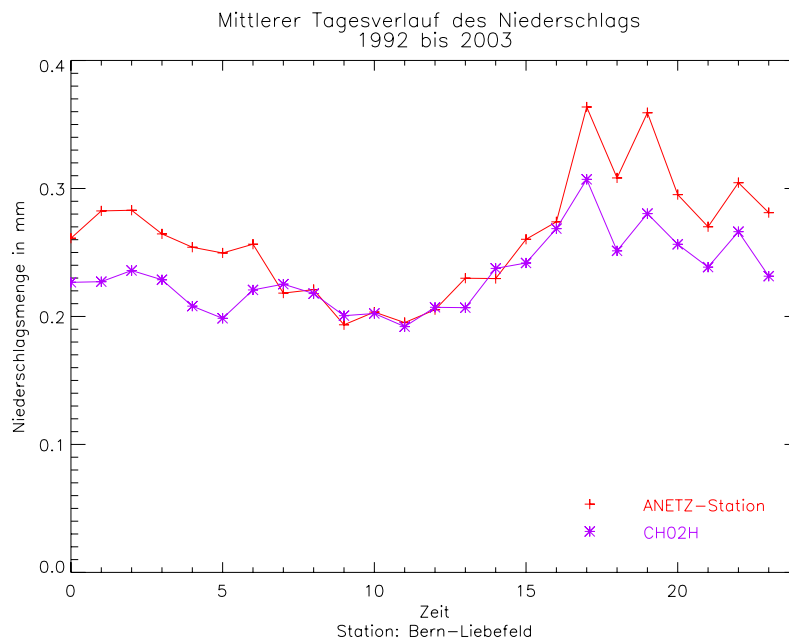


Abb. 4-49: Die beiden Kurven widerspiegeln den ganzjährigen, mittleren Tagesgang an der ANETZ-Station Bern-Liebefeld (+, rot) und der entsprechenden Gitterfläche von CH02H (*, violett) vom 1. Januar 1992 bis am 31. Dezember 2003. Auf der Abszisse ist die Uhrzeit (0 bis 23 UTC) abgetragen, auf der Ordinate das Mittel aller Stunden mit mindestens 0.1 mm Niederschlag zur jeweiligen Tageszeit (in mm).

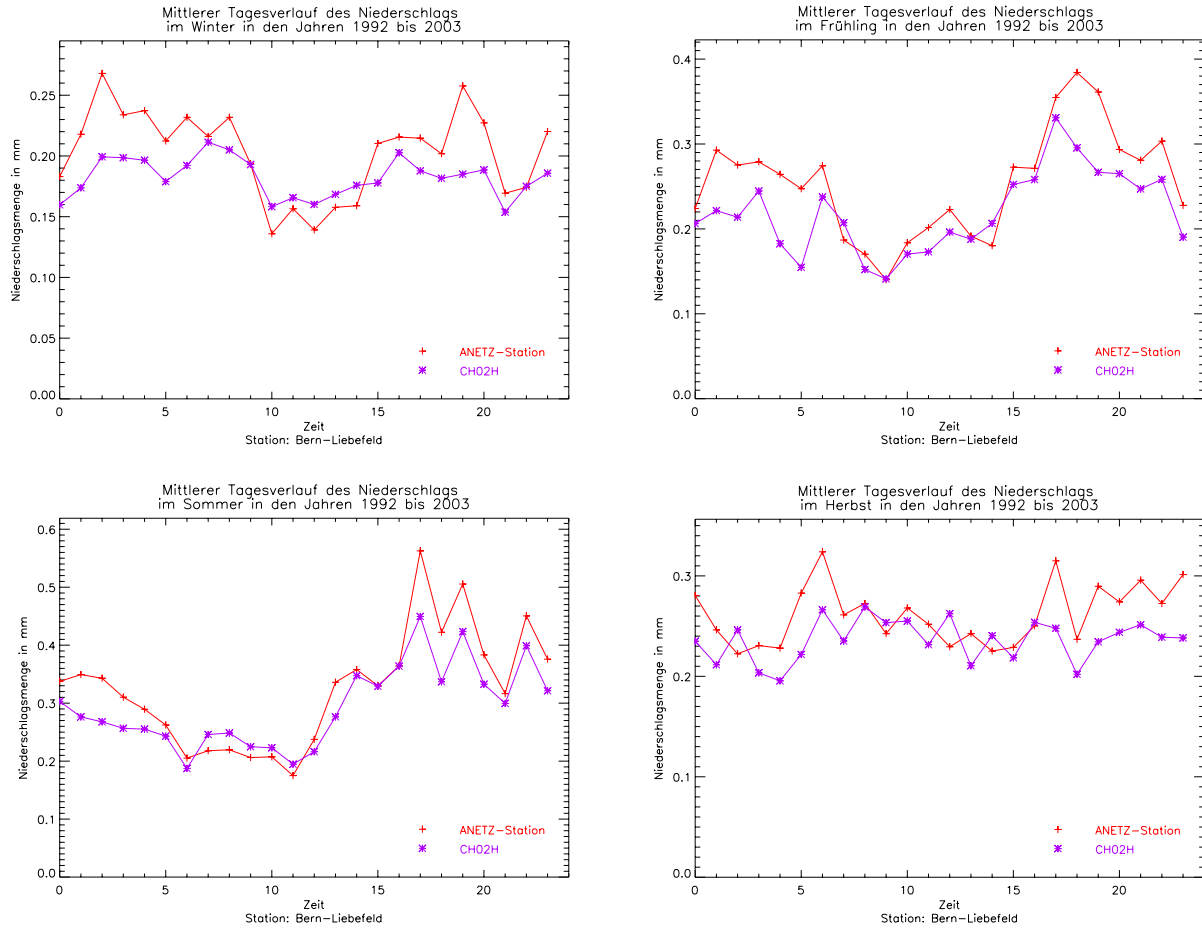


Abb. 4-50: Wie Abb. 4-49, aber nach Jahreszeiten getrennt: Winter 1992/93 bis 2002/03 (oben links), Frühling 1992 bis 2003 (oben rechts), Sommer 1992 bis 2003 (unten links) und Herbst 1992 bis 2003 (unten rechts).

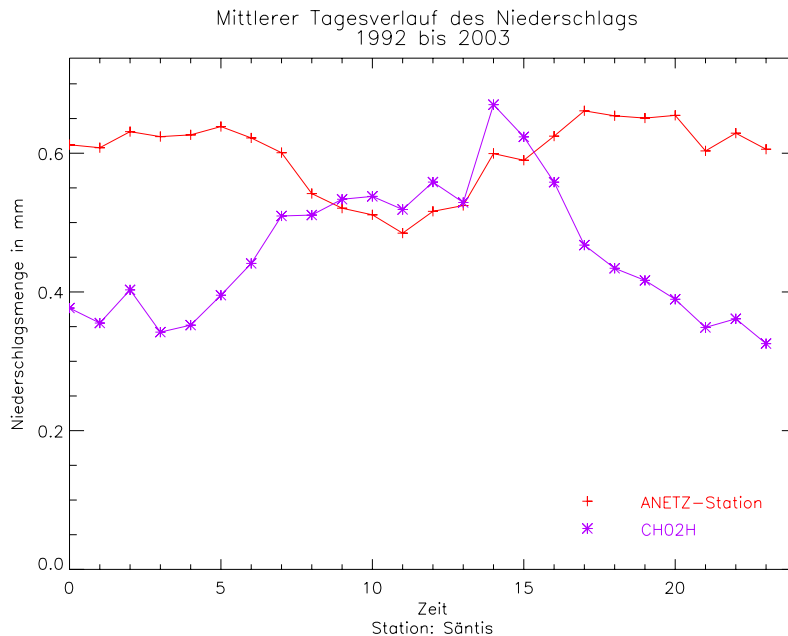


Abb. 4-51: Diese Graphik illustriert den ganzjährigen, mittleren, täglichen Niederschlagsverlauf am ANETZ-Standort Säntis (+, rot) und an der entsprechenden Gitterfläche von CH02H (*, violett) zwischen dem 1. Januar 1992 und dem 31. Dezember 2003. Die Abszisse dient als Achse für die Tageszeit (0 bis 23 UTC), die Ordinate als Achse für die zu jeder Stunde durchschnittliche Niederschlagsmenge (in mm) aller Ereignisse mit mindestens 0.1 mm/h.

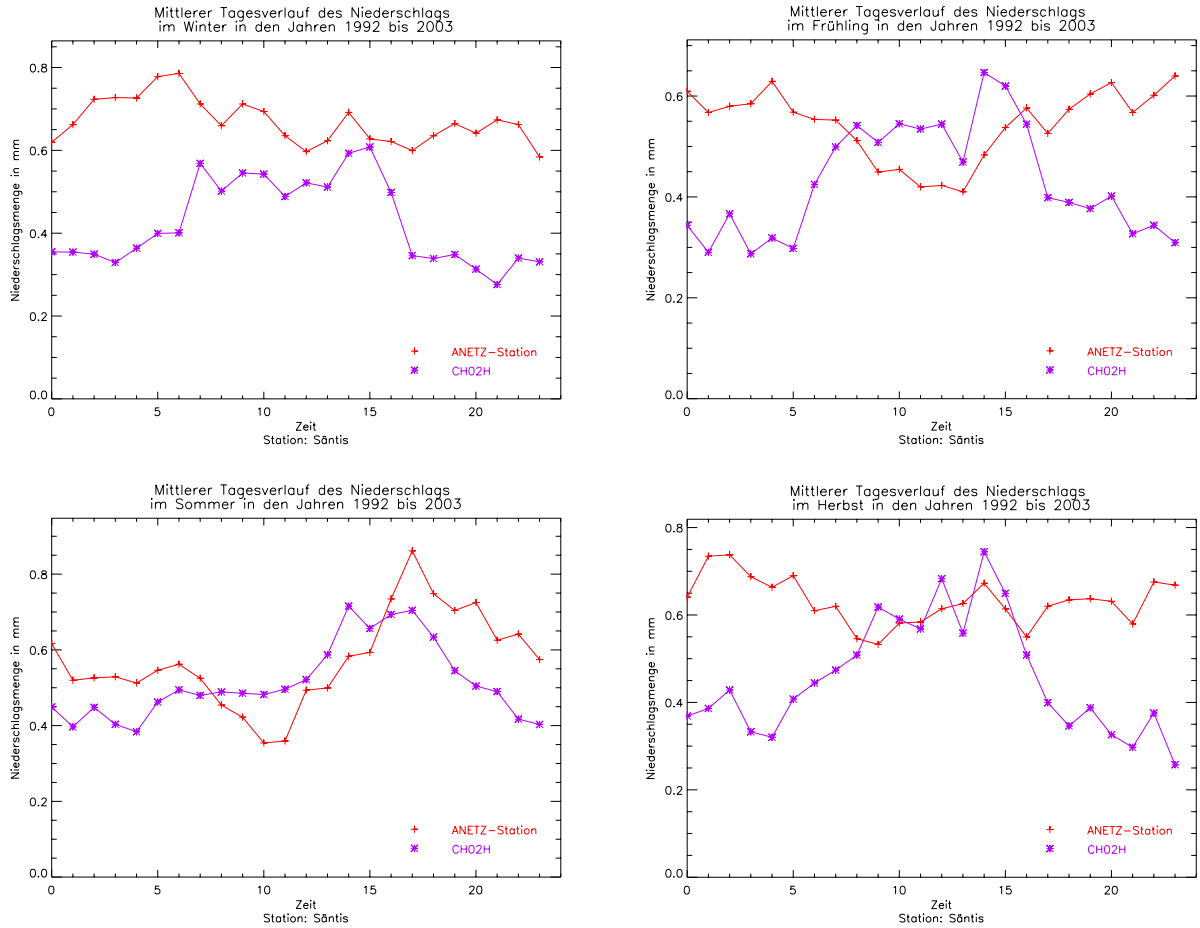


Abb. 4-52: Wie Abb. 4-51, aber saisonal: Dezember bis Februar 1992/93 bis 2002/03 (oben links), März bis Mai 1992 bis 2003 (oben rechts), Juni bis August 1992 bis 2003 (unten links) und September bis November 1992 bis 2003 (unten rechts).

5 SCHLUSSFOLGERUNGEN

Hydrologische Modelle benötigen Niederschlagsdaten mit laufend besserer räumlicher und zeitlicher Auflösung als wichtige Eingangsgrösse, Wettervorhersagemodelle sind zur Validierung darauf angewiesen. Niederschlagsmessungen am Boden erzielen trotz Messfehlern von einigen Prozenten zwar eine hohe Genauigkeit, erlauben allerdings nur eine geringe räumliche und zeitliche Auflösung: die meisten Niederschlagsmesser werden nur ein- bis zweimal täglich abgelesen, und die durchschnittliche Distanz zwischen zwei Messstandorten beträgt immerhin 10 bis 15 km, wenngleich das Messnetz der MeteoSchweiz damit eines der dichtesten weltweit ist. Andererseits betreibt die MeteoSchweiz Wetterradare, die alle 5 Minuten ein Bild der in der Atmosphäre vorhandenen Niederschlagspartikel mit einer Auflösung von typischerweise 2 x 2 km liefern. Die Radarmessungen decken die Fläche der Schweiz gut ab, leiden aber unter zahlreichen Schwierigkeiten, so dass die mit ihrer Hilfe ermittelten Niederschlagsraten einen hohen Unsicherheitsgrad aufweisen können. Zu den bedeutendsten Problemen gehören die Abschattung von Radarstrahlen infolge der Geometrie und der Einfluss des hellen Bandes in der Schmelzzone, welches oftmals die maximale Radarreflektivität bestimmt.

Der in dieser Arbeit weiterentwickelte, validierte und klimatologisch ausgewertete Datensatz, CH02H, trägt diesem Umstand mit stündlichen Niederschlagsfeldern auf einem geographischen Gitter mit einer Maschenweite von nur $0.021 \times 0.021^\circ$ Rechnung. CH02H beruht auf CH02D, einem analogen Datengitter in täglicher Auflösung. Dieses wird generiert, indem die Abweichungen der punktuellen Niederschlagsmessungen der MeteoSchweiz vom jeweiligen monatlichen Mittel mit Hilfe des SYMAP-Algorithmus auf einem geographischen Gitter interpoliert werden. Anschliessend wird die Anomalie an jedem Gitterpunkt mit der hoch aufgelösten monatlichen Niederschlagsklimatologie von Schwarb et al. (2001) multipliziert. CH02D umfasst in der Folge tägliche Niederschlagsfelder der Jahre 1992 bis 2003 auf einem Gitter, dessen Auflösung von ungefähr 1.55×2.31 km derjenigen der Radarbilder der MeteoSchweiz von 2×2 km ziemlich nahe kommt.

Ausgehend von den Tagesniederschlagsfeldern von CH02D und den Radarbildern der MeteoSchweiz wird in der vorliegenden Diplomarbeit, aufbauend auf der Arbeit von Adrian Altenhoff, mit CH02H ein Datensatz mit hoher zeitlicher und räumlicher Auflösung mittels Disaggregation erzeugt und validiert. Im Anschluss daran werden erste klimatologische Analysen realisiert.

Nach einer Bereinigung und Filterung der Radarbilder werden die vom Radar alle zehn Minuten gemessenen Niederschlagsintensitäten zu Stunden- und Tageswerten aufsummiert. Auf dieser Grundlage erfolgt zuletzt die Disaggregation der beobachteten Tagesniederschläge zu Stundenwerten, indem die täglichen Niederschlagsmengen auf 24 Stunden verteilt und mit der jeweils über eine Stunde aufsummierten Intensität der Radarechos gewichtet werden.

Die Validierung verläuft in drei Schritten. Am Anfang steht eine visuelle Überprüfung der Qualität von CH02H, indem die Zeitreihen von Niederschlagsmessungen an ANETZ-Stationen (insgesamt 72 automatische Klimastationen der MeteoSchweiz, wovon 69 unter anderem alle 10 Minuten die gefallenen Nieder-

schlagsmengen registrieren) mit denjenigen der entsprechenden Gitterpunkte des neuen Datensatzes verglichen und die zeitlichen Differenzen zwischen diesen beiden Datensätzen aufgezeigt werden. Daraufhin wird die kumulative, normierte und bezüglich der Mittelwertsdifferenzen korrigierte Niederschlagshäufigkeitsverteilung saisonal getrennt für jeweils eine ANETZ-Station und das betreffende Gitterelement in CH02H untersucht. Um die Vielzahl der visuellen Eindrücke der kumulativen Niederschlagshäufigkeitsverteilungen zu vereinen, erfolgt abschliessend ein Vergleich von CH02H mit den ANETZ-Messungen für zusammenfassende statistische Grössen – das eigentliche Kernstück der Validierung.

Wie gut CH02H die Niederschlagsintensitäten der ANETZ-Daten abdeckt, lässt sich den normierten Intensitätsverhältnissen entnehmen. Sie verlassen auf der Alpennordseite und im Südtessin nur in Einzelfällen den unmittelbar an 1.0 – vollständige Übereinstimmung – angrenzenden Bereich zwischen 0.75 und 1.5; im Wallis und in Graubünden dagegen sind Werte von 2.0 oder mehr üblich. Folglich erfasst CH02H die Niederschlagsintensitäten im Flachland, einschliesslich Voralpen und Jura, zufrieden stellend, in den Gebirgsregionen dagegen werden die Niederschlagsintensitäten generell überschätzt. Hierfür ist hauptsächlich die Radarabschattung verantwortlich, welche dafür sorgt, dass die Tagesniederschlagsmengen von CH02D auf zu wenige Stunden verteilt werden und deshalb zu grosse Intensitäten erreichen. Die Verhältnisse der Niederschlagshäufigkeiten für bestimmte stündliche Regen- bzw. Schneemengen geben an, welche Niederschlagsraten in CH02H infolge der Disaggregation unter- oder übervertreten sind. Das Flachland wird in der Regel von einem Übermass an kleinen Niederschlagsraten dominiert, wohingegen die grossen eher zu selten auftreten, im Gebirge verhält es sich meist gerade umgekehrt. Dieses Verhalten ist in erster Linie auf die Unterschiede zwischen den Punktmessungen des ANETZ und den Gitterflächendaten von CH02H zurückzuführen, daneben spielt wiederum die Radarabschattung eine Rolle.

RMS misst den Grad der zeitlichen Übereinstimmung der disaggregierten Niederschlagsmengen mit den ANETZ-Messungen. Die relativen Abweichungen nehmen entgegen den Erwartungen gesamtschweizerisch ungefähr den gleichen Betrag zwischen 25% und 50% an, was auf eine ziemlich grosse Ähnlichkeit der Zeitreihen von CH02H und ANETZ schliessen lässt. AMD macht eine ähnliche Aussage, ist jedoch weniger anfällig gegenüber zeitlichen Verschiebungen, weil vereinzelte, grosse Differenzen gegenüber zahlreichen kleineren weniger stark ins Gewicht fallen. Hier bewegen sich die relativen Abweichungen sogar ausnahmslos unterhalb von 25%, sind in Anbetracht der möglichen Unterschiede von Niederschlagsraten also gering.

Die saisonale Abhängigkeit der Qualität von CH02H hält sich auf der Alpennordseite und im Südtessin in Grenzen und ist in den Alpen hauptsächlich auf die Intensitäten und die Niederschlagshäufigkeitsverteilungen beschränkt. Dieser Sachverhalt lässt sich im Wesentlichen mit der abgeschwächten Wirkung der Radarabschattung bei sommerlichen, konvektiven Wetterlagen sowie den im Winter vorherrschenden und für das Radar schlecht sichtbaren Schneeniederschlägen in den Bergen begründen.

Als Konsequenz der Validierung erweist sich die Verwendung einer Maske für die klimatologischen Analysen als unabwendbar, da Radarabschattungseffekte die Disaggregation in einigen Landesgegenden zu stark beeinträchtigen. Basierend auf der Karte zur Abschätzung der abgeschatteten Regionen wurde daher eine Maske erstellt, welche das benachbarte Ausland, die Kantone Graubünden und Wallis sowie grosse Teile des Nordtessins von weiteren Berechnungen ausschliesst.

Die klimatologischen Analysen setzen sich aus einer Untersuchung der räumlichen Verteilung von Starkniederschlägen und wichtiger Quantile (Median, 99%-Quantil und Quartilsdifferenz) auf der Basis von Stundenwerten in den nicht maskierten Regionen der Schweiz zusammen. Ausserdem wurde der saisonale bzw. ganzjährige, mittlere Tagesgang von CH02H ermittelt. Mit einem primären Maximum am späten Nachmittag und einem sekundären in den Morgenstunden entspricht er zwar den Erwartungen, der Vergleich mit den tatsächlich gemessenen Niederschlagsmengen offenbart allerdings eine eingeschränkte Übereinstimmung, denn letztere weisen kein morgendliches Maximum auf und das abendliche etwa zwei Stunden später. Im Gegensatz zu zahlreichen anderen überprüften Grössen folgt die Qualität des durchschnittlichen täglichen Niederschlagsverlaufs von CH02H im Vergleich mit den ANETZ-Stationen einem Jahresgang mit minimalen Differenzen im Sommer und maximalen im Winter. Unabhängig von der Jahreszeit zeigen die ANETZ-Daten ein eindeutiges Minimum über die Mittagszeit, das von CH02H nicht oder nur ungenügend wiedergegeben wird, weshalb sich die bisher unbeantwortete Frage stellt, ob auch die Radarmessungen einem Tagesgang unterliegen.

Aufgrund der gewonnenen Erkenntnisse kann man zusammenfassend festhalten, dass CH02H für weite Teile der Alpennordseite bis hin zum Alpennordrand einen positiven Eindruck hinterlässt. Wenngleich der Datensatz von einer vollkommen fehlerfreien Wiedergabe der tatsächlich gemessenen Niederschlagsverläufe entfernt ist, halten sich die als Folge der Stationsinterpolation auf Gitterflächen erwartete Unterschätzung der Spitzenniederschläge bzw. die Überschätzung der Niederschlagshäufigkeit doch in Grenzen, die qualitative Übereinstimmung mit den Messreihen ist im Allgemeinen gut gewährleistet. Ähnlich lautet das Fazit auch für die südliche Hälfte des Tessins, wo der alpine Einfluss auf die Radarmessungen nur ein geringes Ausmass annimmt. Demgegenüber ist im Umgang mit CH02H in den Alpen Vorsicht geboten, denn infolge der in diesen Regionen häufig beobachteten Radarabschattung durch hohe Berge kommt es nicht selten zu erheblichen zeitlichen oder mengenmässigen Differenzen gegenüber den Messungen der ANETZ-Stationen, welche allerdings teilweise beträchtlichen, räumlichen Schwankungen unterliegen. Am wenigsten vertrauenswürdig präsentiert sich CH02H in den Kantonen Graubünden und Wallis: die Abschattungseffekte und damit die Unterschiede zu den Niederschlagsmessungen werden hier maximal, willkürliche Niederschlagsverteilungen dürften vielerorts eher die Regel als die Ausnahme darstellen. Besonders eindrücklich demonstrieren dies die statistischen Untersuchungen, wo die grössten Abweichungen vom Sollwert beinahe ausnahmslos in diesen Regionen auftreten.

Von einer Verwendung von CH02H als Eingangsgrösse in hydrologische Modelle oder für Modellvalidierungen aller Art ist angesichts dieser Tatsache in Graubünden und im Wallis entschieden abzuraten; auch im restlichen zentralen Alpenraum scheint sie kaum empfehlenswert. Dagegen dürfte der neue Datensatz auf der Alpennordseite, einschliesslich Jura und Voralpengürtel, sowie im Südtessin wertvolle Dienste bei Modellierungen und Modellvalidierung leisten. Dies nicht zuletzt, weil keine Alternativen mit vergleichbarer räumlicher und zeitlicher Auflösung existieren. Die Fehleranalysen dieser Arbeit sollten jedoch bei der Anwendung von CH02H berücksichtigt werden.

Im Hinblick auf klimatologische Auswertungen wäre eine Erweiterung von CH02H auf die 1980er Jahre wünschenswert und möglich, allerdings sind die Radardaten bis 1991 nicht in digitaler Form vorhanden und

müssten zuerst noch aufbereitet werden. Nichtsdestoweniger steht mit CH02H ein Datensatz mit stündlichen Niederschlagsfeldern, die sich über 12 Jahre erstrecken, für den Einsatz in hydrologischen Studien und Abflussklimatologien, zur Validierung quantitativer Niederschlagsprognosen sowie für Radarstudien zur Verfügung.

6 REFERENZEN

- [1] **Altenhoff, A. (2004)**: Stündliche Niederschlagsanalyse für die Schweiz – Disaggregation von Tagesniederschlagsfeldern mittels Niederschlagsradarbildern; Semesterarbeit an der ETH Zürich im Sommersemester 2004.
- [2] **Daly, C., Neilson, R. P. and Philipps, D. L. (1994)**: A statistical-topographic model for mapping climatological precipitation over mountainous terrain; *Journal of Applied Meteorology*, **33**, 140-158.
- [3] **Daly, C., Gibson, W. P., Taylor, G. H., Johnson, G. L., Pasteris, P. (2002)**: A knowledge-based approach to the statistical mapping of climate; *Climate Research (Clim Res)*, **22**, 99-113.
- [4] **Frei, C. and Schär, C. (1998)**: A precipitation climatology of the Alps from high-resolution rain-gauge observations; *International Journal of Climatology*, **18**, 873-900.
- [5] **Gurtz, J. (2002)**: Hydrologische Prozesse und Modelle; Skript zur gleichnamigen Vorlesung an der ETH Zürich im Wintersemester 2002/03.
- [6] **Hagen, M. (1999)**: The Alpine Radar Composite; *MAP-Newsletter*, **11**, 20-21.
- [7] **Hunrieser, H. C. (1995)**: Zur Bildung, Verteilung und Vorhersage von Gewittern in der Schweiz; Dissertation Nr. 11020, ETH Zürich.
- [8] **Joss, J., Schädler, B., Galli, G. et al. (1998)**: Operational Use of Radar for Precipitation Measurements in Switzerland; Nationales Forschungsprogramm "Klimaänderungen und Naturkatastrophen" (NFP 31), Schlussbericht; vdf Hochschulverlag AG.
- [9] **Sevruk, B. (1985)**: Correction of precipitation measurements, summary report; in *Proceedings of the ETH/IAHS/WMO Workshop on the Correction of Precipitation Data*, pp. 13–23.
- [10] **Sevruk, B. (1985)**: Systematischer Niederschlagsmessfehler in der Schweiz; in Sevruk, B. (ed.), *Der Niederschlag in der Schweiz, Beiträge Geol. Schweiz – Hydrologie*, **31**, 65–75.
- [11] **Wüest, M. (2003)**: Atmosphärenphysik III: Radarmeteorologie – Mesometeorologie; Skript zur gleichnamigen Vorlesung an der ETH Zürich im Wintersemester 2003/04.
- [12] **Wüest, M., Altenhoff, A., Frei, C., Hagen, M., Litschi, M. and Schär, C. (2005)**: A novel quantitative precipitation estimation dataset for Switzerland from combine weather radar and ground observations; submitted to *International Journal of Climatology*.

ANHANG

West-Ost-Koordinate	Süd-Nord-Koordinate	Position im Array	Bezeichnung in Abb. 3-6	West-Ost-Koordinate	Süd-Nord-Koordinate	Position im Array	Bezeichnung in Abb. 3-6
11	21	5072	GE 1	19	38	9177	VD
17	24	5801	GE 2	87	51	12378	BE 2
17	25	6042	GE 2	88	51	12379	BE 2
18	25	6043	GE 2	155	55	13410	GL
17	26	6283	GE 2	156	55	13411	GL
18	26	6284	GE 2	136	57	13873	UR
73	31	7544	BE 1	137	57	13874	UR
74	31	7545	BE 1	198	59	14417	GR 3
179	31	7650	GR 1	134	81	19655	ZH
17	32	7729	La Dôle	135	81	19656	ZH
73	32	7785	BE 1	60	82	19822	JU
74	32	7786	BE 1	134	82	19896	ZH
178	32	7890	GR 1	135	82	19897	ZH
179	32	7891	GR 1	185	82	19947	SG
16	33	7969	La Dôle	60	83	20063	JU
17	33	7970	La Dôle	134	83	20137	ZH
18	33	7971	La Dôle	135	83	20138	ZH
73	33	8026	BE 1	119	87	21086	AG
74	33	8027	BE 1	120	87	21087	AG
17	34	8211	La Dôle	119	88	21327	AG
73	34	8267	BE 1	120	88	21328	AG
74	34	8268	BE 1	119	89	21568	AG
168	34	8362	GR 2				

Tabelle A-1: Die vom Five-Neighbour-Filter ausgeklammerten Punkte auf dem CH02D-Gitter, wodurch die Entstehung von Bereichen ohne Daten verhindert werden sollte. Die rot geschriebenen Punkte bleiben aber auch nach dieser Massnahme noch als Löcher auf der Karte zurück.