pro*met*, Heft 107, 79-90, DOI: 10.5676/DWD_pub/promet_107_07
© Deutscher Wetterdienst 2024

U. GERMANN, M. SARTORI, A. HERING, M. BOSCACCI, L. CLEMENTI, B. CALPINI

7 Radarmeteorologie – Herausforderungen im Gebirge

Radar Meteorology – Challenges in a Mountainous Region

Zusammenfassung
Wegen der steilen Hänge, der starken orografischen Niederschläge und der hohen Häufigkeit von Sturzfluten, Hangrutschungen und Murgängen ist in den Alpen die Nachfrage nach hochaufgelösten Wetterradarmessungen von Regen, Schnee, Hagel- und Gewitterzellen besonders hoch. Aber der Bau und Betrieb von Radaren und die Auswertung der Daten sind in den Bergen mit großen Herausforderungen verbunden. Dieser Artikel liefert eine Einführung in die Thematik mit Fokus auf die Schweizer Alpen.

Summary
Due to the steep slopes, heavy orographic precipitation and the high frequency of flash floods, landslides and debris flows, the demand for high-resolution weather radar measurements of rain, snow, hail and thunderstorm cells is particularly high in the Alps. However, the construction and operation of radars and the analysis of the data are associated with major challenges in the mountains. This article provides an introduction to the topic, focussing on the Swiss Alps.

1 Einleitung

Viele Herausforderungen der Radarmeteorologie gelten in einer Bergregion gleich wie im Flachland. Einige hingegen betreffen besonders stark oder ausschließlich die Radaranwendung im Gebirge. Die Wetterphänomene, die es zu beobachten, und die Naturgefahren, vor denen es zu warnen gilt, werden stark von der Orografie beeinflusst. Die Häufigkeit und die Intensität von Murgängen und Sturzfluten beispielsweise hängen direkt von der Hangneigung ab, weshalb diese gravitativen Naturgefahren geradezu typisch sind für die steilen Hänge einer Bergregion. Die Landnutzung der Menschen und die daraus abgeleiteten Bedürfnisse und die Anforderungen an die Radardaten sind in den Bergen ebenfalls anders als im Flachland.

Bei der Wahl des Standortes für den Bau eines Wetterradars spielt die Abschattung des Radarstrahles durch die Berge eine zentrale Rolle. Auch der Zugang, die Stromversorgung, die Datenübermittlung und die Baubedingungen vor Ort können die Wahl des Standortes stark einschränken, insbesondere bei Standorten über 2000 Metern über Meer (Abbildung 7-1). Bei der Datenprozessierung gibt es in einer Bergregion weitere große Herausforderungen. Das wohl prominenteste Beispiel ist die Unterdrückung einer außerordentlich hohen Anzahl starker Bodenechos. Unter Bodenechos versteht man die aus der Rückstreuung des Radarstrahles an der Erdoberfläche resultierenden Störsignale im Radarbild. Eine weitere große Herausforderung steckt in der Interpretation der Radarmessungen in den entlegenen Tälern, wo die unteren Schichten der Atmosphäre infolge der Abschattung verborgen bleiben. Die Niederschlagsbestimmung ist besonders stark betroffen, da in abgeschatteten Regionen nur Radarechos aus der Höhe vorliegen, welche nur beschränkt korrelieren mit dem Niederschlag am Boden.

Die meisten Länder fokussieren beim Design der Wetterradare, bei deren Konfiguration und bei der Entwicklung der Algorithmen auf die Anwendungen im Flachland. Nur wenige befassen sich mit den spezifischen Herausforderungen der Radaranwendung im Gebirge. Die Schweiz ist geprägt von Hügeln und Bergen in allen Regionen, hat

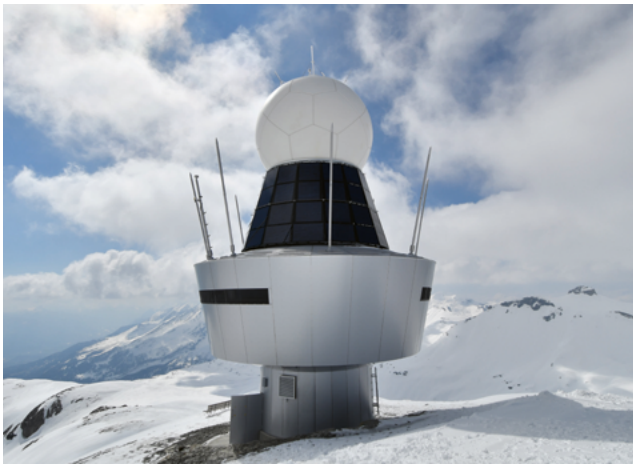

Abbildung 7-1: Wetterradar in der Südwestschweiz auf der Pointe de la Plaine Morte auf 2937 Metern über Meer.

selbst in den Alpen eine relativ dichte Besiedlung und starke Landnutzung und muss sich seit der ersten Radarinstallation Ende der 50er Jahre den besonderen Herausforderungen in einer Bergregion stellen und Lösungen für die Probleme suchen. Dieser Artikel orientiert sich an den in der Schweiz in sechs Jahrzehnten der operationellen Radaranwendung gemachten Erfahrungen und erlaubt einen Einstieg in die Thematik. Für eine detaillierte wissenschaftliche Besprechung wird auf den Review-Artikel GERMANN et al. (2022) und die dort zitierte Literatur verwiesen.

2 Zweck der Radarmessung im Gebirge

Der Zweck der Radarmessung hängt stark von den für eine Region typischen Wetterphänomenen sowie der Bedürfnisse der Anwender ab. Die Alpen können auf der windzugewandten Seite intensive und langanhaltende Stauniederschläge verursachen. Die Grenze zwischen einem Gebirge und einer sich im Sommerhalbjahr stark aufheizenden Ebene ist ein bevorzugter Ort für die Entstehung von Gewittern, Mesozyklonen, Starkniederschlags- und Hagelzellen. Das wird beobachtet an der Südflanke der Alpen am Rande der Poebene, auf der Nordseite zwischen den Voralpen und dem Schweizer Mittelland und auf beiden Seiten des Juras. Auch die Lebensdauer, Verlagerungsgeschwindigkeit und Zuglinie dieser konvektiven Systeme werden entscheidend von der Orografie beeinflusst. Je stärker der Niederschlag und je langsamer die Verlagerung, desto größer sind die am Boden auftreffenden Wassermengen und das Risiko für Sturzfluten und Hangrutschungen. Trifft der starke Niederschlag einen steilen Hang mit losem Gesteinsmaterial oder gar schmelzendem Permafrost, muss mit Murgängen und Bergstürzen gerechnet werden. In der Schweiz werden Radarmessungen seit zwei Jahrzehnten für Warnungen eingesetzt (HERING et al. 2004; MOSER 2023). Der Zusammenhang zwischen der Orografie und Gewittern, Hagel, Mesozyklonen und Starkniederschlägen kommt bei klimatologischen Studien in den Alpen klar zum Vorschein (PANZIERA und GERMANN 2010; PANZIERA et al. 2015, 2018; NISI et al. 2016, 2018; FELDMANN et al. 2021, 2023).

Besonders kritisch und interessant für die Radaranwendung sind konvektive Systeme, also Gewitter und die damit verbundenen Phänomene Hagel, Starkniederschlag, Blitze, Sturzfluten und Murgänge. Gewitter sind räumlich beschränkt und zeichnen sich durch starke räumliche Gradienten und eine schnelle zeitliche Veränderung aus. Derzeitige operationelle numerische Wettervorhersagemodelle erlauben einen oder mehrere Tage im Voraus Aussagen, ob in einer bestimmten Region an einem Tag mit starken Gewittern zu rechnen ist oder nicht. Solche Aussagen zur Wahrscheinlichkeit basieren auf der gleichzeitigen Berechnung von mehreren Läufen des Vorhersagemodells, sogenannten Ensembles. Das ist eine wertvolle Information, um sich frühzeitig auf mögliche Unwetter vorzubereiten. Dank der Assimilation der Radardaten (ROSSA et al. 2010) liefern hochaufgelöste Vorhersagemodelle auch auf der Skala bis zu einigen Stunden wichtige Informationen über das Auftreten von Gewittern. Aber die präzise Vorhersage von Ort und Zeit eines Gewitters ist wegen der schnellen Entwicklung und der nicht-linearen Prozesse, Stichwort deterministisches Chaos, nicht oder nur sehr schwer möglich (NERINI 2019). Zuverlässige Warnungen für einen exakten Ort können derzeit nur sehr kurz vor dem Ereignis ausgelöst werden, wenn das Gewitter bereits vom Radar erfasst wurde und dessen Intensität, Entwicklung und Verlagerung aus den Messungen und Modellen abgeschätzt werden kann. Für beispielsweise die Sperrung einer Straße ist es entscheidend, ob das Gewitter das steile Gerinne mit losem Gesteinsmaterial oberhalb der Straße trifft, oder sich nur wenige Kilometer entfernt auf der anderen Seite des Bergkammes entlädt. Daher ist im Gebirge die möglichst exakte Lokalisierung von großer Bedeutung. Je nach Anforderung werden bei solchen Anwendungen die Echtzeit-Wetterradarwarnungen durch lokale Überwachungssysteme ergänzt, beispielsweise Pegelmessungen mit Mikrowellen oder Reißleinen. Das Wetterradar kann Gewitter flächendeckend und in Echtzeit zuverlässig bis auf Distanzen von 150 Kilometern erfassen und bildet, kombiniert mit Modellen, das primäre System für die landesweite Überwachung und Warnung vor Naturgefahren, welche aus Gewittern, Hagel- und Starkniederschlagszellen resultieren. Laut Auskunft der Fachleute für Naturgefahren in den Bergkantonen Graubünden und Wallis scheint bei der Auslösung von Murgängen durch Gewitter auch der Hagel eine Rolle zu spielen (M. Keiser und J.-Y. Délèze, persönliche Mitteilung), eine Beobachtung, die noch weiter analysiert werden muss. Die nächste Generation von hochaufgelösten Vorhersagesystemen wie SINFONY (siehe Beitrag 1 in diesem Heft) wird einen großen Fortschritt bringen, aber die Aussagen werden immer mit einer Angabe der Unsicherheit verbunden sein.

3 Abschattung und Standortwahl

Das Radarsignal ist eine elektromagnetische Welle. Für die Erfassung von Niederschlägen eignen sich Wellenlängen zwischen 3 und 10 Zentimetern, siehe auch Beitrag 2 in diesem Heft. Bei diesen Wellenlängen ist die Atmosphäre transparent. Auch die Niederschlagswolken sind beinahe transparent, wäre da nicht der kleine Teil der Energie des Radarstrahles, welcher vom Niederschlag Richtung Radar zurückgestreut, von der Antenne empfangen, und im Empfänger in ein digitales Signal umgewandelt wird, welches die Basis für die Radarmessung bildet. Genau genommen sind es die kleinen, mittleren und großen Regentropfen, die Schneeflocken, Graupel, Eiskristalle und Hagelkörner, welche das Radarsignal zurückstreuen; wir nennen diese zusammenfassend Hydrometeore. Der große Rest der Energie des Radarstrahles propagiert weiter. Das Radar kann also im Gegensatz zum menschlichen Auge durch alle Arten von Wolken hindurchsehen und erstellt gewissermaßen eine dreidimensionale Radiographie der Niederschlagswolken.

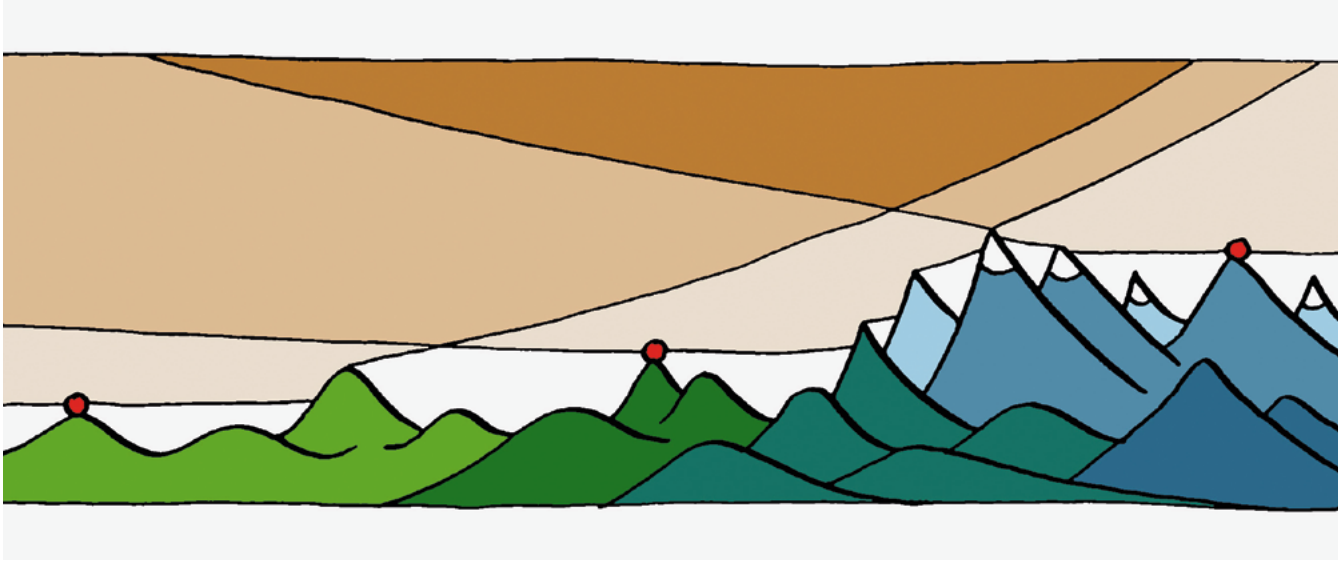

Abbildung 7-2: Die Standorte für Wetterradare zur Abdeckung einer Bergregion können vereinfacht in drei Gruppen unterteilt werden: Ein Hügel (roter Punkt links) für die Abdeckung im Vorland des Gebirges; ein Berg auf mittlerer Höhe (roter Punkt in der Mitte), möglichst etwas entfernt vom Hauptkamm des Gebirges; und ein Berg im Zentrum des Gebirges (roter Punkt rechts). Die Brauntöne unterteilen die Atmosphäre in Regionen, die von einem, zwei, bzw. allen drei Radaren abgetastet werden. Die Radarstrahlen sind in dieser Darstellung wegen der Erdkrümmung und der Refraktion leicht nach oben gekrümmt.

Das Radar kann aber nicht durch Berge hindurchschauen. Es wird durch die Berge gestoppt, ein Teil der auftreffenden Energie wird absorbiert und in Wärme umgewandelt, der Rest wird zurückgestreut. Das von den Bergen zum Radar zurückgestreute Signal verursacht starke Echos im Radarbild, sogenannte Bodenechos *(ground clutter)*. Die Hydrometeore in der Atmosphäre hinter dem Berg bleiben dem Radar verborgen. Wir sprechen von Abschattung.

Die Abschattung ist eine der größten Herausforderungen im Gebirge und hängt stark vom Standort des Wetterradars ab. Die Wahl des Standortes eines neuen Radars entscheidet also maßgebend über die Qualität der Daten und die Region, welche mit dem Radar abgedeckt werden kann. Bergketten, die tiefer liegen als das Radar sind kein Problem, da aus noch zu besprechenden Gründen die Antenne kaum negative Elevationswinkel abtastet. Kritisch sind höhere Berge in der nahen Umgebung des Radars, da diese den Radarstrahl abschatten und die Hydrometeore dahinter verborgen bleiben.

Für die Bestimmung der am Boden auftreffenden Niederschlagsmenge und -art ist es wichtig, mit dem Radar die Hydrometeore so nah am Boden wie möglich zu erfassen. Aus dieser Betrachtung müsste man das Radar auf dem Talboden installieren, was aber dazu führen würde, dass das Radar wegen der Abschattung eine nur sehr kleine Region abdecken könnte. Den maximalen Umkreis erreicht man, wenn das Radar auf dem höchsten Punkt eines Gebirges installiert wird. Das wäre in den Alpen wegen Gletscher, Permafrost und hohen Kosten für Bau, Zugang und Stromversorgung keine realistische Option. Zudem ist es nicht von Vorteil, wenn das Radar zu hoch liegt, weil dann kaum mehr Messungen in der flüssigen Phase des Niederschlags unterhalb der Nullgradgrenze möglich sind. Die Standortwahl ist eine Optimierung vieler Parameter. Das Radar soll möglichst frei von nahen Hindernissen sein, um eine große Region abdecken zu können. Daher kommen nur Standorte auf Hügelzügen oder Bergen in Frage. Gleichzeitig soll es möglichst tief liegen, um die bodennahen Schichten erfassen zu können. Es kommen weitere Faktoren wie Bau, Naturschutz, Zugang, Stromversorgung, Datenanbindung und elektromagnetische Verträglichkeit mit anderen Systemen in Sichtverbindung dazu.

Etwas vereinfacht gesagt können die Radarstandorte in einer Bergregion wie beispielsweise der Schweiz in drei Gruppen unterteilt werden (Abbildung 7-2). Für die Abdeckung der Ebenen im Vorland der Alpen eignen sich Hügelzuge wie der Albis bei Zürich auf 900 Metern oder Bric della Croce bei Torino (Italien) auf 700 Metern über Meer. In den Voralpen eignet sich ein Berg auf mittlerer Höhe, welcher den Alpen vorgelagert und möglichst weit entfernt von den höheren Bergketten liegt. Je tiefer der Standort liegt, desto größer ist die Anzahl Messungen unterhalb der Nullgradgrenze, ein entscheidender Faktor, da gerade die Voralpen geprägt sind von starken Stauniederschlägen und Gewittern. Zu dieser zweiten Gruppe gehören die Schweizer Radare auf Monte Lema (1625 m) und La Dôle (1675 m). In den inneren Regionen der Alpen kommen wegen der Abschattung durch die vielen Drei- und Viertausender nur noch Standorte über 2800 Metern über Meer wie der Weissfluhgipfel (2840 m), die Pointe de la Plaine Morte (2937 m) oder die Valluga (2811 m, Österreich) in Frage.

Diese Betrachtung gilt für volumenabtastende Radare mit großen Reichweiten über 200 Kilometern, also mit Wellenlängen von 5 oder 10 Zentimetern. Bei Radaren mit 3 Zen-

timeter Wellenlänge und Reichweiten von etwa 40 Kilometern dürfen die Distanzen zu den nächsten Hindernissen entsprechend kürzer sein.

Natürlich hängt die Standortwahl auch von der Anwendung ab. Muss mit einem Radar nur gerade eine Stadt, ein Talabschnitt oder das Gebiet eines Sportanlasses überwacht werden, fällt die Wahl möglicherweise auf einen tiefergelegenen Standort mit weniger Reichweite, dafür aber besseren Messungen für die spezifische Region.

4 Abtastung der Atmosphäre

Die Antenne bündelt beim Aussenden die Energie des Radarsignales in einer Keule, der sogenannten Hauptkeule (Abbildung 7-3). Dieselbe Bündelung erfolgt sowohl beim Senden wie auch beim Empfangen, wenn die Antenne die zurückgestreuten Signale auffängt. Die Breite der Hauptkeule bestimmt die räumliche Auflösung der Radarmessung und soll daher möglichst eng sein. Ein übliches Maß für die Breite ist die sogenannte 3-Dezibel (dB)-Strahlbreite. Diese beträgt bei vielen Radaren etwa 1 Grad (°). Nebst der Hauptkeule hat jede Antenne auch Seitenkeulen. Ein kleiner Teil der Energie wird also nicht in der Hauptkeule, sondern entlang der Seitenkeulen in allen möglichen Richtungen ausgesendet. Die Darstellung der Haupt- und Seitenkeulen wird Antennendiagramm genannt (Abbildung 7-3). Die Güte des Antennendiagrammes hängt von der Geometrie

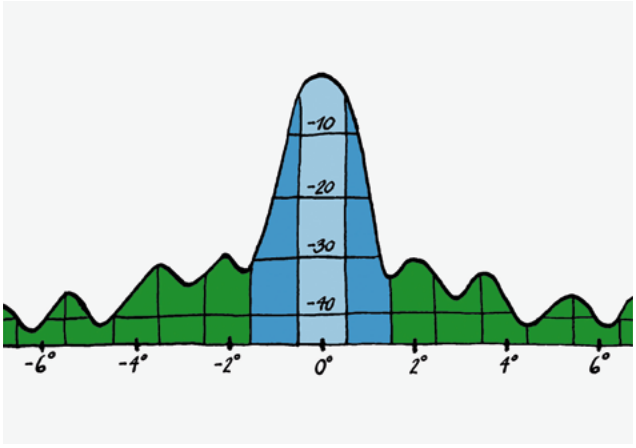

Abbildung 7-3: Beispiel eines Antennendiagramms eines operationellen Wetterradars. Auf der x-Achse ist die Abweichung vom Zentrum des Radarstrahles in Grad (°) aufgetragen; auf der y-Achse die Leistung in Bezug auf die Spitze im Zentrum des Strahles in Dezibel (dB). Die hell- und dunkelblauen Bereiche bilden zusammen die Hauptkeule, in hellblau ist die 3-dB-Strahlbreite gezeigt (hier 1°). Die Seitenkeulen sind in grün dargestellt. Die erste Seitenkeule liegt bei etwa −30 dB, hat also eine Intensität, die 1000-mal kleiner ist als die Spitze im Strahlzentrum. Da dieselbe Charakteristik auch beim Empfang gilt, werden die Echos in der Spitze der ersten Seitenkeule gegenüber der Hauptkeule um 60 dB unterdrückt (ein Faktor von 1 Million). Der grüne Bereich zieht sich über den hier dargestelleten Bereich weiter bis ± 180°, aber die Werte fallen nach 6° schnell ab und pendeln zwischen –50 und –60 dB.

und Präzision der Antenne und von der Form, wie das Horn am Ende des Wellenleiters die Leistung der Radarwelle auf der Antenne verteilt, ab. Bei geeigneter Geometrie der Antenne und des Hornes sind die Seitenkeulen im Vergleich zur Hauptkeule sehr klein.

Mittels der Bewegung der Antenne in Azimut und Elevation kann die Atmosphäre schrittweise gemäß einem konfigurierbaren Programm abgetastet werden. In der Regel macht die Antenne volle 360°-Umdrehungen bei konstanten Elevationswinkeln. Die Wahl der Elevationswinkel, deren Anzahl und Reihenfolge, die Drehgeschwindigkeit der Antenne sowie eine Reihe weiterer Parameter bilden zusammen das sogenannte Abtast-Programm (Abbildung 7-4). Im Gebirge spielt die Wahl des Abtast-Programms wegen der vielen Bergketten, der starken Abschattung und der Bodenechos eine besonders zentrale Rolle. Je mehr Elevationswinkel abgetastet werden, desto höher ist die vertikale Auflösung der Radarinformation, aber desto länger dauert es auch, bis die Antenne das gesamte Abtast-Programm einmal durchlaufen hat. Die Dauer, welche für einen Durchlauf benötigt wird, bestimmt die Wiederholrate der Abtastung und damit die zeitliche Auflösung der Radarprodukte. Die Wahl der Abtastung ist also im Wesentlichen ein Kompromiss zwischen räumlicher und zeitlicher Auflösung.

Bei Bergstandorten stellt sich die Frage, ob die Antenne auch negative Elevationswinkel fahren sollte. Es gibt verschiedene Gründe, weshalb das nur beschränkt Sinn macht. Die tiefste Elevation des Schweizer Abtast-Programms liegt aktuell bei –0,2°, also zwei Zehntelgrad unter einer horizontalen Ausrichtung. Die Antennenmechanik würde Winkel bis –2° zulassen, aber der Informationsgewinn einer Umdrehung bei –2° wäre wegen der Abschattung durch nahe Hindernisse, der beschränkten Reichweite bis zur gegenüberliegenden Talseite und der vielen Bodenechos gering und stünde in keinem guten Verhältnis zum Zeitverlust.

Die Abtastung hängt nicht nur von den technischen Möglichkeiten und der Orografie, sondern entscheidend auch von der Anwendung und der Art des Niederschlags ab, der beobachtet werden soll. In der Entstehungsphase sind Gewitter von geringer Mächtigkeit, aber sie erreichen schnell eine große vertikale Ausdehnung. Für die Beobachtung von Gewittern sind Radarmessungen aus allen Schichten der Troposphäre wertvoll. Der Informationsgehalt der Radarmessung ist bis in die mittlere Troposphäre beinahe konstant (Kurve 1 in Abbildung 7-5). Gerade für die Charakterisierung von Gewittern, die Einschätzung der Gefahren *(severity ranking)* und das Erzeugen von Gewitterwarnungen sind Messungen aus den mittleren und oberen Troposhpärenschichten entscheidend. Dasselbe gilt für die Identifikation von Hagelzellen und die Abschätzung der Hagelkorngrößen in Gewitterwolken. Das bedeutet, dass mit dem Radar Gewitter und Hagel auch dort zuverlässig erfasst werden können, wo die untersten ein oder zwei Kilometer der Atmosphäre abgeschattet sind. Gewitter- und Hagelzellen verändern sich im Bereich von Minuten.

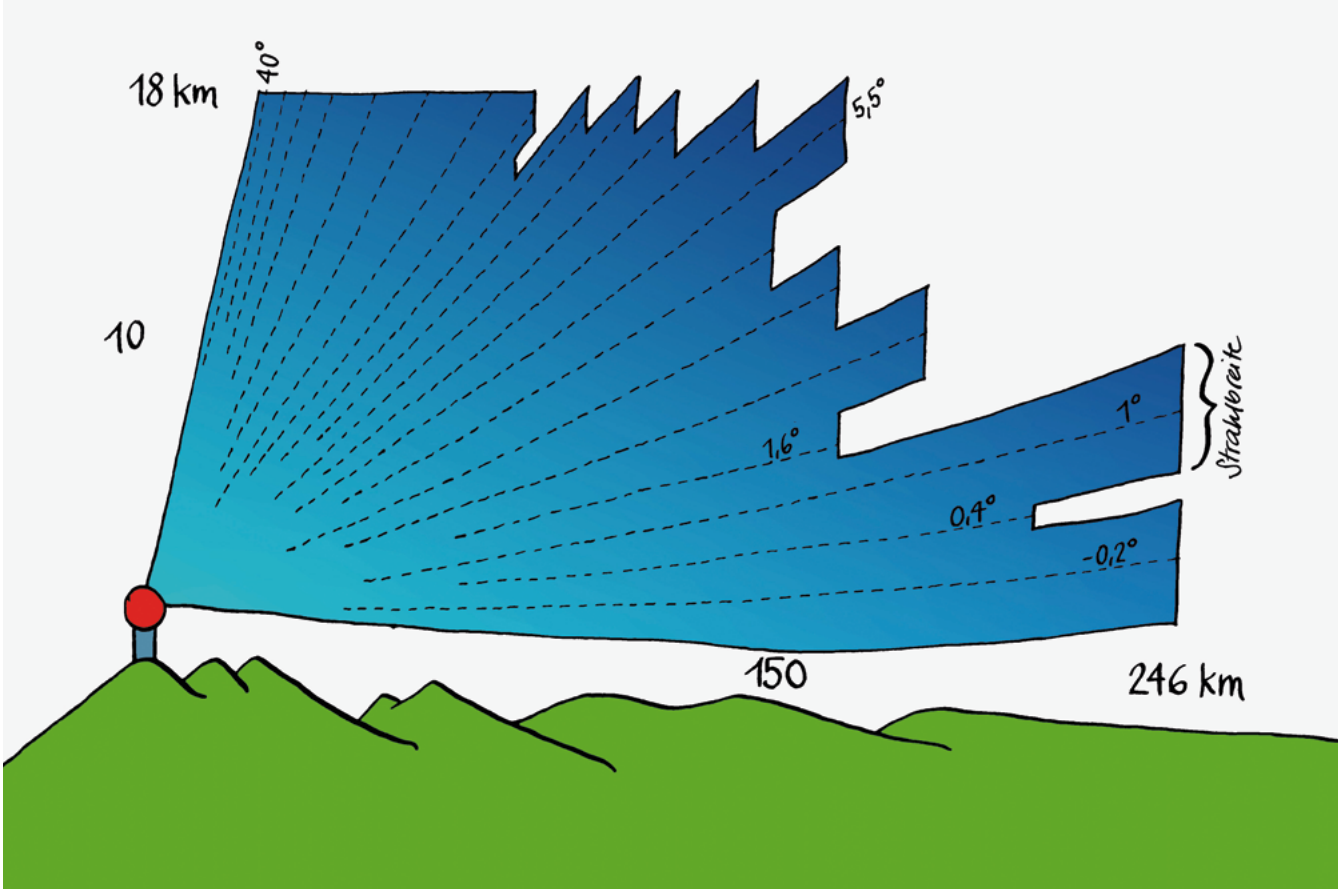

Abbildung 7-4: Abtast-Programm der Schweizer Wetterradare. Die Antenne hat eine 3-dB-Strahlbreite von 1° und macht volle 360°-Umdrehungen bei 20 verschiedenen Elevationswinkeln zwischen −0,2° und 40°. Der ganze Durchlauf dauert 5 Minuten. Die maximale Distanz hängt von der Zeit zwischen zwei aufeinanderfolgenden Pulsen ab. Bei tiefen Elevationen wird etwas länger gewartet, um bis 246 Kilometer Distanz messen zu können. Bei den höheren Elevationen wird bis etwa 150 Kilometer Distanz respektive 18 Kilometer Höhe gemessen, die Pulsrepetitionsfrequenz ist entsprechend höher als bei den tiefen Elevationen. Die Wahl des Abtast-Programms im Gebirge ist ein Kompromiss vieler Aspekte, siehe GERMANN et al. (2022).

Für deren Überwachung ist also nicht nur eine hohe horizontale und vertikale, sondern auch eine hohe zeitliche Auflösung ausschlaggebend (Abbildung 7-6). Dank einer verzahnten Reihenfolge der 20 Elevationen mit zwei Halbvolumen von je 10 Elevationen *(interleaved scan)* werden in der Schweiz die Radarprodukte mit einer zeitlichen Auflösung von 2,5 Minuten erzeugt.

Etwas anders verhält es sich mit der Bestimmung von Niederschlagsraten und -mengen am Boden. In diesem Kontext sind vor allem bodennahe Messungen von Nutzen. Der Informationsgehalt der Radarmessung für die Niederschlagsbestimmung nimmt rasch mit der Höhe ab. Dabei kann man unterscheiden zwischen konvektiven und stratiformen Niederschlägen. Bei stratiformen Niederschlägen gibt es einen abrupten Abfall des Informationsgehalts im Bereich der Nullgradgrenze (Kurve 3 in Abbildung 7-5). Bei konvektiven Niederschlägen (Gewittern) ist dieser Abfall präsent aber weniger abrupt (Kurve 2 in Abbildung 7-5). Die Wichtigkeit, den Niederschlag möglichst nah am Boden zu messen, wird zusätzlich verstärkt durch orografische Prozesse, also das orografisch bedingte Wachstum von Hydrometeoren in den unteren Schichten der Troposphäre. Kann der Niederschlag mit dem Radar wegen der Abschattung nur oberhalb von 4 oder 5 Kilometern Höhe über Meer beobachtet werden, dann wird die daraus abgeleitete Schätzung der Niederschlagsmengen am Boden mit großen Unsicherheiten behaftet sein. Solche Unsicherheiten können gut im Bereich eines Faktors 2 oder höher liegen (GERMANN et al. 2006). Um die Atmosphäre trotz Abschattung möglichst knapp über der Orografie abtasten zu können, wurde in der Schweiz bei den untersten Elevationswinkeln ein kleiner Abstand von nur 0,6° gewählt, also −0,2, 0,4, 1,0 und 1,6° (Abbildungen 7-4 und 7-7). Benachbarte Elevationen überlappen sich also, sind aber wegen der verzahnten Abtastung zeitlich um 2,5 Minuten versetzt.

Nehmen wir an, die Abbildung 7-2 repräsentiere die Situation in einem Land und die drei Radare befänden sich auf 900, 1600 und 2800 Metern über Meer. Der Vertikalschnitt geht also von 0 bis 4300 Meter über Meer. Nehmen wir weiter an, dass die tiefste Elevation leicht negativ ist wie in Abbildung 7-4. Jetzt kann berechnet werden, welcher prozentuale Teil des Landes unterhalb der Erdoberfläche liegt (Relief), welcher Teil der Atmosphäre wegen der Abschattung den Radaren verborgen bleibt, und welcher Teil der

Abbildung 7-5: Informationsgehalt verschiedener Radarmessungen in Abhängigkeit von der Höhe. Für die Identifikation, die Charakterisierung und das Nowcasting von Gewittern und Hagel (Kurve 1) ist der Informationsgehalt der Radarmessung bis in mittlere Höhen der Troposphäre beinahe konstant und nimmt erst in der oberen Troposphäre ab. Für diese Anwendungen empfiehlt es sich daher, mit einer guten vertikalen Auflösung abzutasten. Hingegen sind für die Bestimmung des Niederschlags am Boden die Hydrometeore mit dem Radar möglichst nahe an der Erdoberfläche zu erfassen, dabei nimmt der Informationsgehalt rasch mit der Höhe ab. Das ist sehr ausgeprägt bei stratiformen Niederschlägen (Kurve 3), etwas weniger bei konvektiven (Kurve 2). Die Messungen aus dem Schmelzbereich stratiformer Niederschläge müssen besonders betrachtet werden und sind deshalb gestrichelt markiert (siehe Diskussion des *brightbands* in Abschnitt 8).

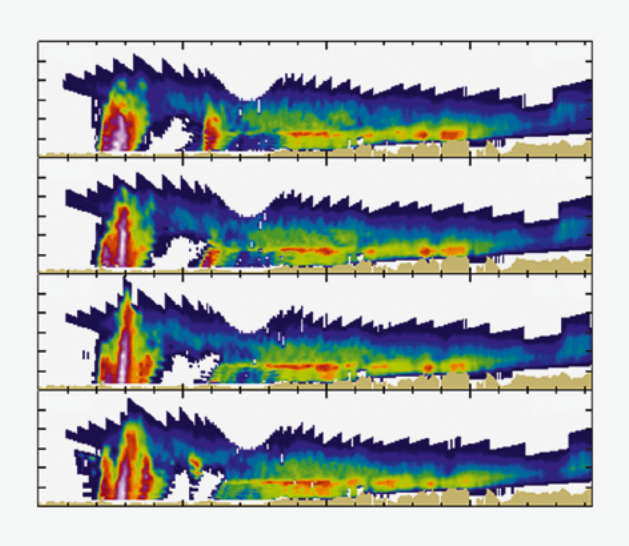

Abbildung 7-6: Vertikalschnitt der Reflektivität des Albis-Radars bei Zürich am 12. Juni 2014 um 19:20 UTC, 19:25 UTC, 19:30 UTC, 19:35 UTC (von oben nach unten). Der Schnitt hat eine vertikale Ausdehnung von 15 Kilometern, ist 192 Kilometer lang und zieht von der Nordwestschweiz (links) bis in die Südostschweiz (rechts). Die mächtigen, sich schnell verändernden Gewitterzellen am Jura-Südfuß (links) verdeutlichen den Wert der hohen zeitlichen und vertikalen Auflösung (aus GERMANN et al. 2016).

Atmosphäre von einem, zwei oder allen drei Radaren sichtbar ist. Ein mögliches Resultat ist in Abbildung 7-8 dargestellt. Wenn wir beispielsweise einen horizontalen Schnitt auf 1800 Meter legen, erhalten wir approximativ folgende Werte: 40 % der Fläche werden von zwei Radaren abgetastet, 20 % von einem Radar (hellbraun), 4 % von keinem Radar (weiß) und die verbleibenden 36 % der Fläche liegen unter dem Relief (blau).

5 Bodenechos

Das Radarsignal wird nicht nur von den Hydrometeoren zurückgestreut, sondern auch von Insekten, Vögeln, Flugzeugen, Häusern, Hügeln und Bergen und anderen möglichen Objekten. Die Rückstreuung am Boden ist im Gebirge besonders kritisch, da die Bodenechos erstens sehr stark sind, zweitens kontinuierlich auftreten, und drittens eine große Fläche betreffen. Dabei ist es nicht nur die Hauptkeule, die Bodenechos verursacht, sondern auch die Seitenkeulen. Da letztere in verschiedene Richtungen schauen, können sie auch dann zu Bodenechos führen, wenn die Hauptkeule auf einer Elevation mehrere Grad über dem Horizont abtastet. Ein Radar wird so gewählt und konfiguriert, dass Bodenechos so weit wie möglich vermieden werden. Dabei helfen eine kleine Strahlbreite, schwache Seitenkeulen und eine kurze Pulslänge. In der Schweiz wurde aus diesem Grunde eine besonders kurze Pulslänge von 0,5 Mikrosekunden gewählt, was einer radialen Auflösung von 75 Metern entspricht. Damit beschränkt sich das Bodenecho radial auf einen sehr kurzen Abschnitt. Bei einer Pulslänge von 2 Mikrosekunden wäre die von der Rückstreuung eines Berges in der Radarkeule gestörte Fläche viermal größer. Die Wellenlänge spielt für die Bodenechos auch eine Rolle, worauf wir später noch zu sprechen kommen.

Trotz geeigneter Antenne, Pulslänge und Wellenlänge wird in einer Bergregion wegen der Positionierung der Radare auf Bergen ein beachtlicher Teil des gesamten Messvolumens von Bodenechos gestört (Abbildung 7-9). Diese Störechos können durch raffinierte Datenprozessierung eliminiert werden (JOSS und LEE 1995). Die Unterdrückungsrate muss beinahe perfekt sein, da selbst eine kleine Anzahl von Falschechos, welche nicht unterdrückt würden, in den Anwendungen wie der automatischen Gewitterwarnung verheerende Folgen hätte. Bei der Unterdrückung der Bodenechos in den Schweizer Alpen hat sich die Einführung der doppelten Polarisation ab 2011 als besonders wertvoll erwiesen (GERMANN et al. 2022).

6 Wahl der Wellenlänge

Für die Beobachtung von Niederschlag und Gewittern kommen Wellenlängen von 3, 5 und 10 Zentimetern zum Einsatz. Die 3-Zentimeter-Wellen (X-Band, 10 GHz) werden von großen Tropfen, schmelzendem Schnee und Hagel stark abgeschwächt und eignen sich daher nur für kurze

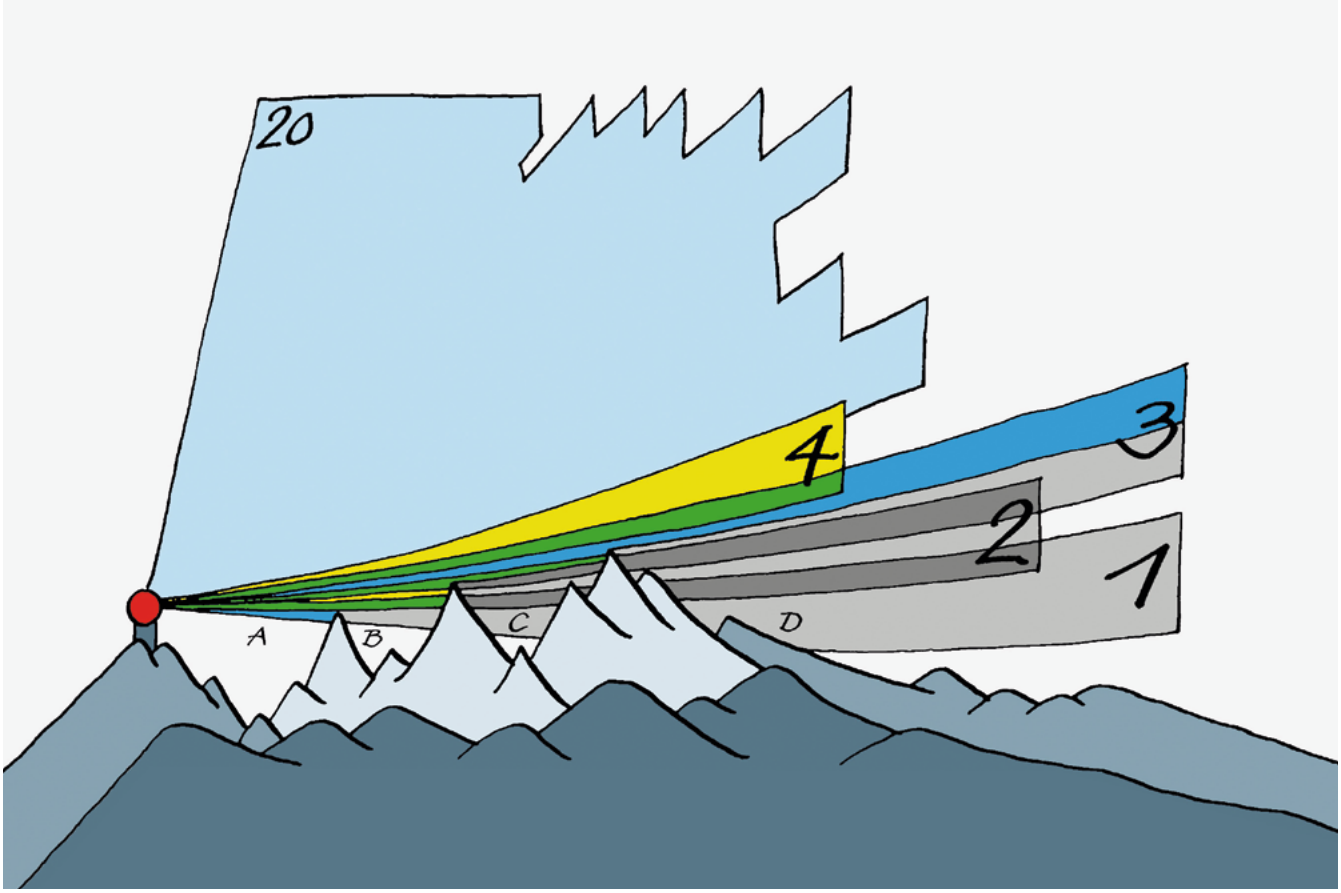

Abbildung 7-7: Für die Niederschlagsbestimmung sind die untersten Elevationen besonders wichtig. In blau dargestellt ist die 1-Grad-Strahlbreite der tiefsten und dritttiefsten, in gelb der zweit- und vierttiefsten Elevation des Schweizer Abtast-Programms (siehe auch Abbildung 7-4). In grün markiert sind die überlappenden Bereiche und in grau der von den Bergen abgeschattete Teil. In der Region „C" beispielsweise ist die tiefste Elevation ganz, die zweittiefste stark, die dritttiefste schwach und die vierttiefste nicht abgeschattet. Die verbleibenden 16 Elevationen sind hellblau eingefärbt. Die beste Schätzung des Niederschlags am Boden erhält man durch eine Korrektur der Teilabschattung, des vertikalen Profils und einer gewichteten Kombination der Messungen auf allen Elevationen (GERMANN et al. 2006).

Reichweiten. Bei Wellenlängen von 10 Zentimetern (S-Band, 3 GHz) kann die Abschwächung mit Ausnahme von Hagel vernachlässigt werden, was der primäre Vorteil dieser Wellenlänge ist. Ein weiterer Vorteil von großen Wellenlängen ist das große Nyquist-Intervall für die Dopplermessungen der Windgeschwindigkeit.

Bei gleicher Strahlbreite nimmt der Durchmesser der Antenne linear mit der Wellenlänge zu. Die Fläche der Antenne ist bei einer Wellenlänge von 10 Zentimetern demnach viermal größer als bei 5 Zentimetern. Für den Einsatz in einer Bergregion hat sich die Schweiz aus mehreren Gründen für 5,5 Zentimeter entschieden (C-Band, 5 GHz). Bei einem 10-Zentimeter-Radar würde eine Antenne mit einem Durchmesser von 9 Metern und entsprechend ein Radom von 12 Metern benötigt, eine Dimension, welche für Bergstandorte aus baulichen und finanziellen Gründen kaum eine Option ist. Bei gegebener Antennengröße hat ein 5-Zentimeter-Radar gegenüber einem 10-Zentimeter-Radar eine zweifach bessere Strahlbreite und tiefere Seitenkeulen. Auch das Verhältnis der Intensität der Wettersignale gegenüber Bodenechos ist bei 3 und 5 Zentimeter besser als bei 10 Zentimetern. Kleine Strahlbreite, schwache Seitenkeulen und gutes Verhältnis zwischen Wetterechos gegenüber Bodenechos sind drei wichtige Faktoren, um den Einfluss von Bodenechos in den Bergen zu minimieren.

7 Kalibrierung, Überwachung und Wartung

Kontinuierliche Kalibrierung und Überwachung der Radar-Hardware sind unabdingbar für alle Radarnetze, deren Daten für kritische Anwendungen wie die Aviatik, Starkniederschlags- und Gewitterwarnungen verwendet werden. Das gilt im Gebirge gleich wie im Flachland. Die Schwierigkeit im Gebirge liegt darin, dass die Anreise zum Radarstandort lang, der Zugang je nach Witterung nicht immer gewährleistet, die Arbeit auf über 2800 Metern über Meer umständlich und die effektive Arbeitszeit am Radar kurz ist. Die Kalibrierung und Überwachung müssen automatisch erfolgen und aus der Ferne bedient werden können. Wartungseinsätze am Radarstandort müssen sorgfältig geplant werden, um sicherzustellen, dass alle notwendigen Ersatzteile, Werkzeuge und Messinstrumente zur Hand sind. Das bedingt, dass die Überwachung viel Information über den Zustand der Hardware liefern muss, um aus der

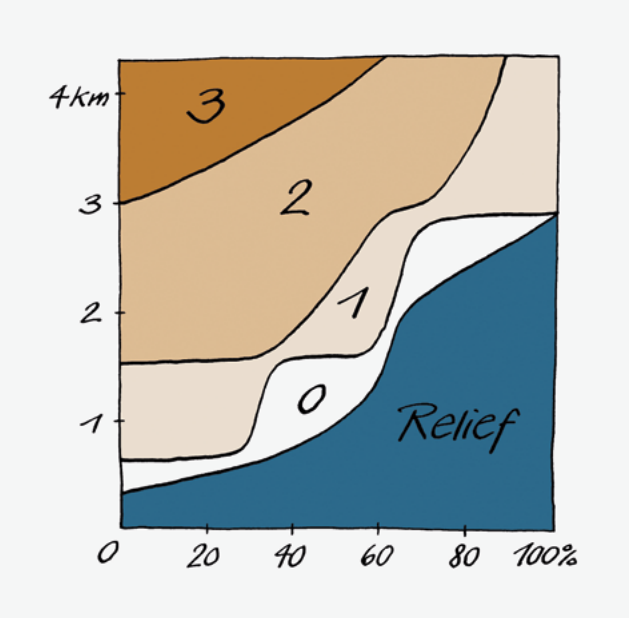

Abbildung 7-8: Radarsichtbarkeit in einer Bergregion in Prozent der gesamten Fläche (x-Achse) und in Funktion von der Höhe über Meer (y-Achse). Die hier dargestellte Radarsichtbarkeit entspricht in etwa der Region aus Abbildung 7-2. Für die drei Radarstandorte in Abbildung 7-2 wird eine Höhe von 900, 1600 und 2800 Meter über Meer angenommen. Die blaue Fläche entspricht dem Relief. Weiß eingezeichnet ist der Teil der Atmosphäre, der von keinem der drei Radare sichtbar ist. Der hellbraune Teil der Atmosphäre wird genau von einem Radar abgetastet. Die anderen beiden Brauntöne zeigen den prozentualen Teil, der von zwei respektive drei Radaren sichtbar ist. Im Idealfall würde der weiße Teil verschwinden.

Ferne gute Diagnosen erstellen zu können. Ebenso soll das Altern von Komponenten mit geeigneten Parametern möglichst frühzeitig erkannt werden. Bei der Kalibrierung empfiehlt es sich, nicht nur system-interne Verfahren wie das Einspeisen einer Rauschquelle zu benutzen, sondern auch externe unabhängige Quellen. Eine besonders interessante Lösung für die Überwachung der Antennenposition und die absolute Kalibrierung der Reflektivität in der horizontalen und vertikalen Polarisation ist die Sonnenstrahlung, deren Maximum zwar im sichtbaren Spektralbereich bei einer Wellenlänge von 0,5 Mikrometern liegt, die aber auch im Mikrowellenbereich der Radarwellenlängen genügend Leistung hat. Die Sonnenstrahlung ist nicht polarisiert und eignet sich somit auch für die Kalibrierung der differentiellen Reflektivität.

8 Meteorologische Algorithmen

Viele in der Radarmeteorologie diskutierte Themen und Lösungsansätze gelten unabhängig vom Standort des Radars. Die Problematik der Ableitung der Regenrate aus der Reflektivität unter Annahmen über die Größenverteilung der Regentropfen, die Abschwächung des Radarsignals im starken Regen, die Berechnung der Dopplergeschwindigkeit mittels *pulse-pair*-Algorithmus oder die Bestimmung der Art der Hydrometeore aus den polarimetrischen Messungen gelten im Gebirge ebenso wie in einer flachen Region. Aber es gibt zwei wichtige Aspekte, welche die Radardaten in einer Bergregion massiv beeinträchtigen und bei der Erzeugung aller Produkte berücksichtigt werden müssen: Bodenechos und Abschattung, die zu einer komplexen vierdimensionalen Struktur der Messunsicherheiten führen.

Selbst bei einer nahezu perfekten Unterdrückung der Bodenechos wird es vereinzelte Falschsignale geben, die nicht unterdrückt werden. Da diese hohe Reflektivitätswerte haben können, muss mit zusätzlichen Qualitätskontrollen in den nachgelagerten Algorithmen sichergestellt werden, dass sie beispielsweise nicht fälschlicherweise als Hagel klassifiziert werden. Unter gewissen Umständen kann das Bodenecho subtrahiert werden ohne das Wetterecho im selben Pixel zu verlieren. In einer Bergregion, wo Bodenechos stark sind und große Flächen betreffen, hilft das nur beschränkt. In vielen Fällen hinterlässt das Bodenecho nach dessen Unterdrückung ein Pixel ohne Information *(missing value)*, was bei allen nachfolgenden Schritten in der Datenprozessierung zwingend beachtet werden muss. Auch die Anwendungen polarimetrischer Messungen *(dual-polarisation)* werden beachtlich gestört durch Bodenechos (FRIEDRICH et al. 2009).

Das andere Problemkind der Radaranwendung im Gebirge ist die Abschattung des Radarstrahls durch Hügel und Berge. Genau genommen gibt es auch die Teilabschattung, das heißt, dass der untere Teil des Strahles durch eine Bergkette abgeschattet wird, während der Rest der elektromagnetischen Welle hinter dem Kamm weiterzieht. In teilabgeschatteten Regionen unterschätzt das Radar den wahren Wert der Reflektivität. Mit einem hochaufgelösten Geländemodell und unter Berücksichtigung des Antennendiagramms, des Abtast-Programms und der Propagation der Welle in der Atmosphäre kann die Abschattung und Teilabschattung mathematisch simuliert werden. Hindernisse in nächster Nähe wie Gebäude, Bäume oder Felsen, die im Geländemodell nicht abgebildet sind, müssen separat eingerechnet werden. Diese theoretischen Simulationen haben ein wesentliches Problem – die Refraktion, also die Beugung des Radarstrahls infolge von Dichtegradienten in der Atmosphäre. Diese Dichtegradienten variieren in der Zeit, insbesondere bei Inversionslagen, und können in einer Bergregion räumlich stark variieren. Da die Dichtegradienten und deren zeitliche und räumliche Variation nicht ausreichend bekannt sind, sind die Simulationen der Abschattung mit signifikanten Unsicherheiten behaftet. Oft werden die theoretisch simulierten Abschattungskarten, auch Sichtbarkeitskarten gennant, mit empirischen Verfahren ergänzt. Dazu werden Wetterechos über lange Zeitperioden akkumuliert. Liegt eine ausreichend genaue Karte der Teilabschattung vor, dann können die Reflektivitätswerte entsprechend korrigiert werden.

Auf jeden Fall muss die drei- (oder vier-)dimensionale Karte der Abschattung und Teilabschattung bei allen nachfolgenden Schritten in der Datenprozessierung beachtet

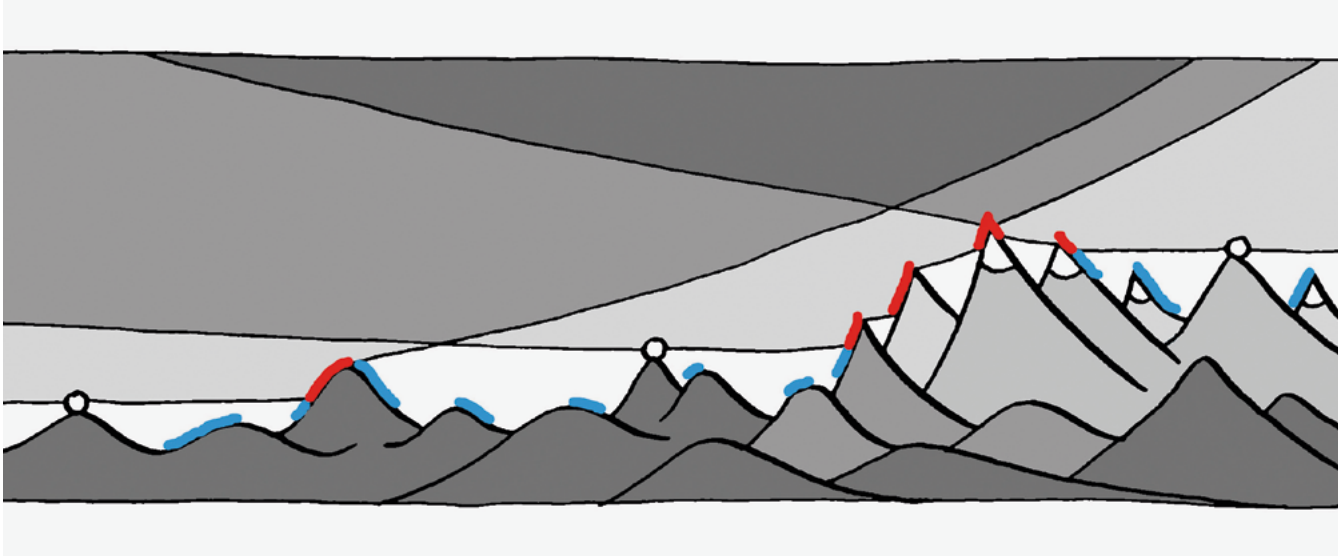

Abbildung 7-9: Entstehung von Störechos bei Radarmessungen im Gebirge. In den roten Zonen trifft die Hauptkeule direkt auf das Gelände, was mit Bestimmtheit starke, beinahe konstante Bodenechos erzeugt. In den blau markierten Zonen können Seitenkeulen auf den Boden treffen und, wenn die Rückstreuung genügend stark ist, ebenfalls zu Bodenechos führen. In den Radardaten werden diese Seitenkeulen-Bodenechos der Höhe der Hauptkeule zugeordnet. Dargestellt ist der gleiche Vertikalschnitt wie in Abbildung 7-2.

werden. Dasselbe gilt für die Karte der Bodenechounterdrückung. Das betrifft die Bestimmung der Niederschlagsraten und -mengen am Boden, die Abschätzung der Wahrscheinlichkeit und Korngröße von Hagel am Boden, die Berechnung des vertikalen Windprofils am Radarstandort, das Verfolgen und die Charakterisierung von Gewittern, die Identifikation von Mesozyklonen, die Erzeugung von Gewitter-, Hagel- und Starkniederschlags-Warnungen und beinahe alle anderen Produkte.

Die Bestimmung des Niederschlags am Boden wird zusätzlich erschwert durch die Tatsache, dass in den Bergen der unterste Teil der Troposphäre dem Radar verborgen bleibt und der Niederschlag aus den Messungen aus der Höhe abgeleitet werden muss. Dazu werden die Messungen aus der Höhe gewissermaßen auf den Boden extrapoliert, man spricht von der Korrektur des vertikalen Reflektivitätsprofiles. Die Reflektivität nimmt in stratiformen Niederschlägen oberhalb der Nullgradgrenze rasch ab. Auf der Höhe, wo Schnee und Eis schmilzt, also knapp unter der Nullgradgrenze, zeigt das Reflektivitätsprofil eine Anomalie, das sogenannte helle Band *(brightband)*. Die schmelzenden Schneeflocken haben beim Fallen für eine kurze Zeit noch den großen Durchmesser und die langsame Fallbewegung der Flocken, aber bereits die hohe Dielektrizität des Flüssigwassers. Aus dieser Kombination resultiert eine um mehrere Dezibel höhere Reflektivität, welche im Vertikalschnitt die Form eines horizontalen Bandes annimmt (siehe auch Abbildung 7-6), daher der Begriff *brightband*. Da das vertikale Reflektivitätsprofil nicht exakt bekannt ist, führt dessen Korrektur unweigerlich zu Unsicherheiten in der Bestimmung des Niederschlags am Boden. In der Schweiz wird die Teilabschattung und das Reflektivitätsprofil seit den Neunzigerjahren operationell korrigiert (JOSS und LEE 1995). In 2001 wurden die Algorithmen nochmals verbessert (GERMANN et al. 2006). Im Jahr 2009 wurde ein Algorithmus entwickelt für die Berechnung der Unsicherheiten der Radarniederschlagsraten in den Bergen mittels eines Ensemble-Ansatzes und der Verwendung einer Fehlerkovarianzmatrix und stochastischen Methoden (GERMANN et al. 2009; MANDAPAKA und GERMANN 2010). Das Ensemble wurde über viele Jahre in Echtzeit in ein hydrologisches Abflussmodell eingespeist, um die Propagation der Unsicherheiten in einem hydro-meteorologischen Vorhersagesystem zu untersuchen (LIECHTI et al. 2013). Die Problematik der Abschattung konnte mit dem Bau von zwei zusätzlichen Radaren im Zentrum der Alpen im Projekt *Rad4Alp* markant verringert werden (GERMANN et al. 2022).

9 Aktuelle Forschungsfragen

Die Weiterentwicklung der Algorithmen entlang der gesamten Linie von der Hardware-Kalibrierung und der Signalprozessierung über die meteorologische Interpretation zur automatischen Starkniederschlags- und Gewitterwarnung und den nachgelagerten Anwendungen in der numerischen Wettervorhersage, der Hydrologie, der Aviatik und den anderen Sektoren wird die Forschenden an den Universitäten und den Wetterdiensten noch eine Weile beschäftigen, auch in Bezug auf die besonderen Herausforderungen im Gebirge. Es gibt aber einige Forschungsschwerpunkte, die an Bedeutung gewonnen und großes Potenzial haben:

- Lange war die Beobachtung von Hagel nur mit dem aufwändigen Einsatz von *Hailpads* möglich. Seit 2015 werden in der Schweiz neue Methoden eingesetzt: Hagelmeldungen aus der Bevölkerung über die App (*crowd-sourcing*; BARRAS et al. 2019), ein Netz von

automatischen Hagelsensoren (KOPP et al. 2023) und eine mit einer hochauflösenden Kamera ausgerüstete Drohne. Die daraus gewonnenen Hageldaten bieten neue Möglichkeiten für die Verifikation, Eichung und Weiterentwicklung der Radar-Algorithmen für die Hagelbestimmung im Alpenraum.

- Dank der markanten Verbesserung der Qualität der Radardaten um die Jahrtausendwende und der seither stetigen Zunahme der Zeitreihen kommen Radardaten in den Schweizer Alpen vermehrt auch für klimatologische Studien zum Einsatz (FELDMANN et al. 2021, 2023; NISI et al. 2016, 2018; PANZIERA und GERMANN 2010; PANZIERA et al. 2015, 2018).

- Großes Potenzial hat auch der Einsatz von künstlicher Intelligenz. Auch in diesem Kontext sind die Datenqualität und die langen Zeitreihen ausschlaggebend. Dieser Ansatz hat bereits vielversprechende Resultate hervorgebracht. Der von WOLFENSBERGER et al. (2021) entwickelte Algorithmus für die Niederschlagsbestimmung im Alpenraum verzichtet auf physikalische Verfahren wie die Korrektur des vertikalen Reflektivitätsprofils und basiert anstelle dessen auf künstlicher Intelligenz. Im Nowcasting kann maschinelles Lernen eingesetzt werden, um spezifische Zielgrößen wie die Wahrscheinlichkeit von Blitz, Starkregen und Hagel über der Topografie (LEINONEN et al. 2022, 2023) oder die orografische Verstärkung des Niederschlags (FORESTI et al. 2019) direkt aus einem Satz von Eingangsvariablen abzuleiten. Wenn bei den Eingangsvariablen gleichzeitig Messungen und Modellvorhersagen zum Einsatz kommen, wird der durch maschinelles Lernen trainierte Algorithmus implizit eine nahtlose Verschmelzung *(seamless blending)* von Messungen, deren Extrapolation und Modellvorhersagen liefern. Bisher wurde die Verschmelzung explizit mit statistischen Methoden erzielt (SIDERIS et al. 2020).

- Anwendungen werden zunehmend voll automatisiert. Warnungen vor starken Gewittern werden vollautomatisch erzeugt und an die Behörden und die Bevölkerung übermittelt, Warnungen vor Starkniederschlag lösen die automatische Sperrung einer Straße aus und die Flughäfen werden mit automatisch erzeugten METAR-Meldungen beliefert. Diese Art von Anwendung bedingt, dass im Hintergrund die Stabilität und Kalibrierung der Radartechnik nochmals markant verbessert werden muss.

- Fortschritte finden auch im Bereich der Radartechnik statt. Es laufen Anstrengungen, phasengesteuerte Gruppenantennen *(phased-array antenna)* für Wetterradare einzusetzen. Durch die Steuerung der Phasen der einzelnen Antennenelemente kann die Richtung und Form des Radarstrahls verändert werden, ohne die Antenne mechanisch zu bewegen. Das öffnet neue Möglichkeiten für eine dynmische Abtastung der Atmosphäre und allgemein höhere Abtastraten. Bevor die Technik für Wetterradare in einer Bergregion operationell zum Einsatz kommt, müssen noch verschiedene Hürden überwunden werden, auch betreffend Kosten und Datenqualität. Bedeutend näher an der operationellen Anwendung ist die Entwicklung von Radarsendern mit Halbleitertechnologie *(solid-state transmitter)* als Ersatz der Magnetron-Vakuumröhren. Diese Technologie wird schon operationell eingesetzt, aber ob sie sich langfristig bewährt gegenüber den erprobten Magnetron-Systemen mit hohen Reichweiten und kurzen Pulsen, muss sich erst noch erweisen.

Literatur

BARRAS, H., HERING, A., MARTYNOV, A., NOTI, P.-A., GERMANN, U., MARTIUS, O., 2019: Experiences with >50'000 Crowdsourced Hail Reports in Switzerland. *Bulletin of the American Meteorological Society* **100,** 1429–1440, https://doi.org/10.1175/BAMS-D-18-0090.1.

FELDMANN, M., GERMANN, U., GABELLA, M., BERNE, A., 2021: A characterisation of Alpine mesocyclone occurrence. *Weather and Climate Dynamics* **2,** 1225–1244, https://doi.org/10.5194/wcd-2-1225-2021.

FELDMANN, M., HERING, A., GABELLA, M., BERNE, A., 2023: Hailstorms and rainstorms versus supercells – a regional analysis of convective storm types in the Alpine region. *npj Climate and Atmospheric Science* **6,** https://doi.org/10.1038/s41612-023-00352-z.

FORESTI, L., SIDERIS, I.V., NERINI, D., BEUSCH, L.E.A., GERMANN, U.R.S., 2019: Using a 10-year radar archive for nowcasting precipitation growth and decay: A probabilistic machine learning approach. *Weather and Forecasting* **34,** 1547–1569, https://doi.org/10.1175/WAF-D-18-0206.1.

FRIEDRICH, K., GERMANN, U., TABARY, P., 2009: Influence of ground clutter contamination on polarimetric radar parameters. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology* **26,** 251–269, https://doi.org/10.1175/2008JTECHA1092.1.

GERMANN, U., BERENGUER, M., SEMPERE-TORRES, D., ZAPPA, M., 2009: REAL – Ensemble radar precipitation estimation for hydrology in a mountainous region. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society* **135,** 445–456, https://doi.org/10.1002/qj.375.

GERMANN, U., BOSCACCI, M., CLEMENTI, L., GABELLA, M., HERING, A., SARTORI, M., SIDERIS, I.V., CALPINI, B., 2022: Weather Radar in Complex Orography. *Remote Sensing* **14,** https://doi.org/10.3390/rs14030503.

GERMANN, U., BOSCACCI, M., GABELLA, M., SCHNEEBELI, M., 2016: Weather radar in Switzerland. In: From weather observations to atmospheric and climate sciences in Switzerland, WILLEMSE, S., FURGER, M. (Hrsg.), *vdf*, Zurich, Switzerland, ISBN: 978-3-7281-3745-6, 165–188

GERMANN, U., GALLI, G., BOSCACCI, M., BOLLIGER, M., 2006: Radar precipitation measurement in a mountainous region. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society* **132,** 1669–1692, https://doi.org/10.1256/qj.05.190.

HERING, A., MOREL, C., GALLI, G., SENESI, S., AMBROSETTI, P., BOSCACCI, M., 2004: Nowcasting thunderstorms in the Alpine region using a radar based adaptive thresholding scheme. *Proceedings of the 3th European Conference on Radar in Meteorology and Hydrology*, 206–211.

JOSS, J., LEE, R., 1995: The application of radar-gauge comparisons to operational precipitation profile corrections. *Journal of Applied Meteorology* **34,** 2612–2630, https://doi.org/10.1175/1520-0450(1995)034<2612:TAORCT>2.0.CO;2.

KOPP, J., SCHRÖER, K., SCHWIERZ, C., HERING, A., GERMANN, U., MARTIUS, O., 2023: The summer 2021 Switzerland hailstorms: weather situation, major impacts and unique observational data. *Weather* **78,** 184–191, https://doi.org/10.1002/wea.4306.

LEINONEN, J., HAMANN, U., GERMANN, U., 2022: Seamless Lightning Nowcasting with Recurrent-Convolutional Deep Learning. *Artif. Intell. Earth Syst.* **1,** e220043, https://doi.org/10.1175/AIES-D-22-0043.1.

LEINONEN, J., HAMANN, U., SIDERIS, I.V., GERMANN, U., 2023: Thunderstorm Nowcasting With Deep Learning: A Multi-Hazard Data Fusion Model. *Geophysical Research Letters* **50,** https://doi.org/10.1029/2022GL101626.

LIECHTI, K., ZAPPA, M., FUNDEL, F., GERMANN, U., 2013: Probabilistic evaluation of ensemble discharge nowcasts in two nested Alpine basins prone to flash floods. *Hydrological Processes* **27,** 5–17, https://doi.org/10.1002/hyp.9458.

MANDAPAKA, P.V., GERMANN, U., 2010: Radar-Rainfall Error Models and Ensemble Generators. In: Rainfall: state of the science, TESTIK, F., GEBREMICHAEL, M. (Hrsg.), ISBN: 978-0-875-90481-8, 247-264.

MOSER, L.N.R., 2023: Radar-based warnings of heavy rainfall, flash floods and debris flows in small alpine and urban catchments. *M.Sc. thesis*, ETH, 96p.

NERINI, D., 2019: Ensemble precipitation nowcasting: limits to prediction, localization and seamless blending. *Ph.D. thesis*, ETH.

NISI, L., HERING, A., GERMANN, U., MARTIUS, O., 2018: A 15-year hail streak climatology for the Alpine region. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society* **144,** 1429–1449, https://doi.org/10.1002/qj.3286.

NISI, L., MARTIUS, O., HERING, A., KUNZ, M., GERMANN, U., 2016: Spatial and temporal distribution of hailstorms in the Alpine region: A long-term, high resolution, radar-based analysis. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society* **142,** 1590–1604, https://doi.org/10.1002/qj.2771

PANZIERA, L., GABELLA, M., GERMANN, U., MARTIUS, O., 2018: A 12-year radar-based climatology of daily and sub-daily extreme precipitation over the Swiss Alps. *International Journal of Climatology* **38,** 3749–3769, https://doi.org/10.1002/joc.5528.

PANZIERA, L., GERMANN, U., 2010: The relation between airflow and Orographic precipitation on the southern side of the Alps as revealed by weather radar. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society* **136,** 222–238, https://doi.org/10.1002/qj.544.

PANZIERA, L., JAMES, C.N., GERMANN, U., 2015: Mesoscale organization and structure of orographic precipitation producing flash floods in the lago maggiore region. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society* **141,** 224–248, https://doi.org/10.1002/qj.2351.

ROSSA, A., HAASE, G., KEIL, C., ALBERONI, P., BALLARD, S., BECH, J., GERMANN, U., PFEIFER, M., SALONEN, K., 2010: Propagation of uncertainty from observing systems into NWP: COST-731 Working Group I. *Atmospheric Science Letters* **11,** 145–152, https://doi.org/10.1002/asl.274.

SIDERIS, I.V., FORESTI, L., NERINI, D., GERMANN, U., 2020: NowPrecip: localized precipitation nowcasting in the complex terrain of Switzerland. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society* **146,** 1768–1800, https://doi.org/10.1002/qj.3766.

WOLFENSBERGER, D., GABELLA, M., BOSCACCI, M., GERMANN, U., BERNE, A., 2021: RainForest: a random forest algorithm for quantitative precipitation estimation over Switzerland. *Atmospheric Measurement Techniques* **14,** 3169–3193, https://doi.org/10.5194/amt-14-3169-2021.

Kontakt

DR. URS GERMANN
Ufficio federale di meteorologia e climatologia
MeteoSvizzera
Via ai Monti 146
6655 Locarno-Monti
Schweiz
urs.germann@meteoswiss.ch

DR. MAURIZIO SARTORI
Ufficio federale di meteorologia e climatologia
MeteoSvizzera
Via ai Monti 146
6655 Locarno-Monti
Schweiz
maurizio.sartori@meteoswiss.ch

DR. ALESSANDRO HERING
Ufficio federale di meteorologia e climatologia
MeteoSvizzera
Via ai Monti 146
6655 Locarno-Monti
Schweiz
alessandro.hering@meteoswiss.ch

MARCO BOSCACCI
Ufficio federale di meteorologia e climatologia
MeteoSvizzera
Via ai Monti 146
6655 Locarno-Monti
Schweiz
marco.boscacci@meteoswiss.ch

LORENZO CLEMENTI
Ufficio federale di meteorologia e climatologia
MeteoSvizzera
Via ai Monti 146
6655 Locarno-Monti
Schweiz
lorenzo.clementi@meteoswiss.ch

PROF. DR. BERTRAND CALPINI
Ufficio federale di meteorologia e climatologia
MeteoSvizzera
Via ai Monti 146
6655 Locarno-Monti
Schweiz