

Untersuchung der Reflektivität Z und der differentiellen Reflektivität ZDR eines mit Silberjodid geimpften Hagelgewitters.

Dr. Hermann Gysi, Radar-Info Karlsruhe

Hagelgewitter vom 6. Juni 2015 im Bereich Calw, Weil der Stadt, Aidlingen und Sindelfingen. Geimpft mit 3 Flugzeugen.

1. Einleitung
2. Messmethode und verwendete Daten
3. Verlauf des Hagelgewitters
4. Zusammenfassung
5. Literatur

1. Einleitung

Am 6. 6. 2015 strömte an der Vorderseite einer sich aus Nordwesten nähernden Kaltfront sehr warme und feuchte Luft nach Südwestdeutschland. Aus diesem Grund wurde am Vormittag für alle Hagelabwehr Schutzgebiete Bereitschaft für den Tag angeordnet. Um 11:15 Uhr UTC (13:15 Uhr MESZ) kam es im Bereich Calw / Weil der Stadt zur Bildung eines ersten Hagelgewitters im Nordschwarzwald das, angetrieben durch eine westliche Strömung in mittlerer Höhe, langsam nach Osten in Richtung Schutzgebiet Stuttgart / Rems-Murr-Kreis (in der Folge Schutzgebiet genannt) zog. Die herannahende Kaltfront sorgte dabei für zusätzliche Labilisierung, so dass eine kräftige Entwicklung mit Hagelpotenzial und Unwettergefahr zu erwarten war.

Der Impfbeginn erfolgte um 12:00 Uhr UTC durch das Flugzeug der Württembergischen Gebäudeversicherung (WGV). Die beiden Flugzeuge des Schutzgebiets kamen 8 Minuten später, um 12:08 UTC dazu, als klar war, dass die Hagelzelle ihr zu betreuendes Schutzgebiet betreffen würde. Das Einsatzende dieser beiden Flugzeuge war um 13:37 bzw. um 13:44 UTC mit der Landung am Stuttgarter Flughafen. Der WGV-Flieger flog nach dem Einsatzende an diesem Hagelgewitter weiter zur Schwäbischen Alb, wo sich inzwischen ebenfalls starke Hagelgewitter entwickelt hatten.

2. Messmethode und verwendete Daten

Zur Auswertung der Entwicklung des Hagelgewitters stehen alle 5 Minuten Volumenscans des ca. 50 km entfernten Dualpol Doppler Radars des Instituts für Meteorologie und Klimaforschung (IMK) des KIT (Karlsruher Institut für Technologie) zur Verfügung.

Das Radar des IMK misst verschiedene Eigenschaften der Hydrometeore (Tropfen, Graupel, Schnee, Hagel, usw.). Einerseits wird die Reflektivität Z in der horizontalen

Messebene bestimmt und ausgewertet. Sie ist abhängig von der Anzahl der gemessenen Teilchen und deren Durchmesser d (genau genommen von d^6). Zusätzlich wird das Verhältnis der Reflektivität der horizontalen und der vertikalen Messebene, die Differentielle Reflektivität ZDR, berechnet und ausgewertet. Für kugelförmige Streuteilchen beträgt die differentielle Reflektivität 0 dB, für oblate Spherioide (horizontal ovale Streuteilchen) nimmt sie positive Werte an und für prolata Spherioide (vertikal ovale Streuteilchen) negative Werte. Zur Interpretation der Werte siehe Abb. 1.

In der hier vorliegenden Auswertung werden anhand von Reflektivität und Differentieller Reflektivität Bereiche identifiziert, in denen das Auftreten von Hagel ausgeschlossen bzw. als sehr wahrscheinlich angenommen werden kann. Außerdem wird versucht, die Größe der Hagelkörner aus den Daten abzuschätzen. Dazu wird der zeitliche Verlauf der Reflektivität Z sowie der differentiellen Reflektivität ZDR ausgewertet. Zudem stehen horizontale Schnitte (CAPPI) von Z und ZDR in den Höhen 1500 und 3500 m über Grund (agl) zur Verfügung. Für die wissenschaftliche Untersuchung wird eine Klassifikation der Hydrometeore angenommen, die wie folgt aussieht (Höllner, 1995):

- Hohe Werte der Reflektivität ($Z > 55$ dBZ) und gleichzeitig sehr kleine Werte der Differentiellen Reflektivität (-0.5 dB $< ZDR < 0.5$ dB) deuten auf große, runde Hagelkörner hin.
- Kleine Werte der Reflektivität ($Z < 50$ dBZ) und gleichzeitig sehr kleine Werte der Differentiellen Reflektivität (-0.5 dB $< ZDR < 0.5$ dB) deuten auf kleine Hagelkörner oder Graupel, oder unterhalb der Schmelzzone auf kleine Wassertropfen hin.
- Hohe Werte der Reflektivität ($Z > 55$ dBZ) und gleichzeitig hohe Werte der Differentiellen Reflektivität ($ZDR > 4$ dB) lassen sich hauptsächlich durch große Tropfen erklären.

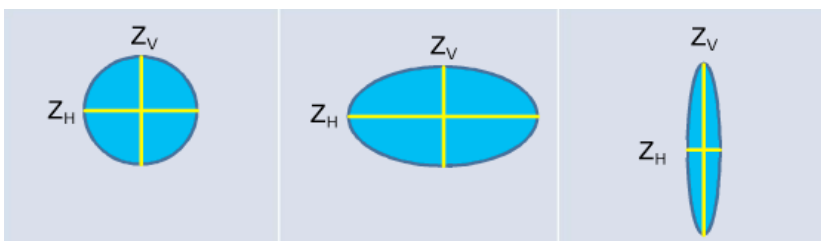


Abb. 1: Differentielle Reflektivität ZDR.
 $ZDR = 10 \cdot \log(Z_H / Z_V)$ in dB

ZDR = 0 für runde Teilchen wie Hagel, Graupel, kleine Tropfen (links)
 ZDR > 0 für oblate Spherioide wie große Wassertropfen (mitte)
 ZDR < 0 für prolata Spherioide wie Schneekristalle (rechts)

Grafik: www.wdtb.noaa.gov

3. Verlauf des Hagelgewitters

Um 11:45 UTC erreichte das Hagelgewitter erstmals den Frühwarnbereich, der virtuell um das Schutzgebiet gelegt wurde. Hagelgewitter werden dann erfasst, wenn

sie bei der jeweils vorherrschenden Windrichtung und -geschwindigkeit noch eine Stunde brauchen, um den Rand des Schutzgebiets zu erreichen. Das Gewitter hatte zu diesem Zeitpunkt in 1500 m über Grund eine Reflektivität von 60 dBZ, was einer Regenintensität von über 200 mm/h entspricht. In der Folge schwächte es sich wieder etwas ab, bevor es dann um 12:00 UTC seine maximale Reflektivität von 63 dBZ erreichte. Das ist genau der Zeitpunkt, an dem das erste Flugzeug (WGV-Flugzeug) mit der Impfung begann. Kurz danach, um 12:08 UTC begannen auch die beiden Flugzeuge des Schutzgebiets Stuttgart / Rems-Murr-Kreis mit der Impfung.

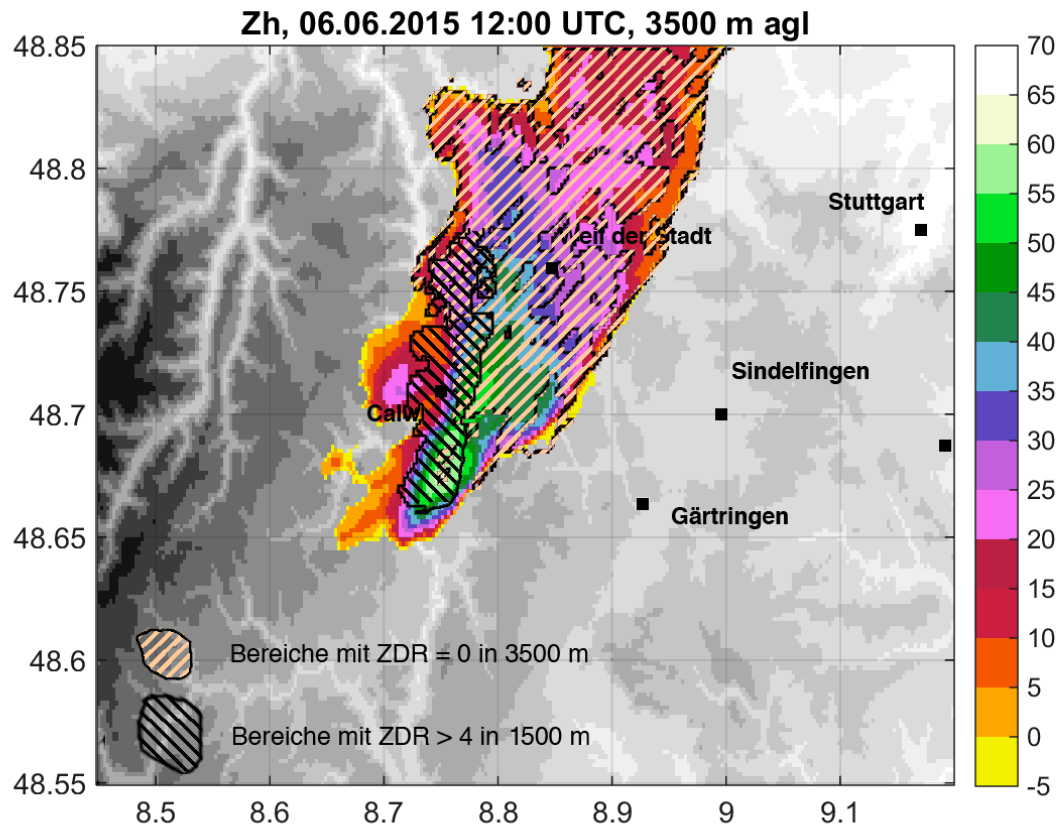


Abb. 2: Horizontaler Schnitt der Reflektivität durch das Gewitter in 3500 m über Grund (agl.) zu Beginn der Impfung um 12:00 UTC (14.00 Uhr Lokalzeit). Schraffiert eingezeichnet ist der Bereich mit differentieller Reflektivität (ZDR) um 0 dB in 3500 m über Grund und mit ZDR > 4 dB in 1500 m über Grund. Die Skala rechts ist in dBZ.

Zu Beginn der Impfung um 12:00 UTC misst man mit dem Radar im Bereich der höchsten Reflektivität in 3500 m über Grund Streuteilchen mit einer differentiellen Reflektivität zwischen 0 und 0.5 dB (Abb. 2). Diese Kombination von hoher Reflektivität und differentieller Reflektivität nahe 0 dB lässt auf große Hagelkörner schließen. In der darunter liegenden Schicht in 1500 m über Grund werden bei ähnlich hoher Reflektivität Streuteilchen mit einer differentiellen Reflektivität gemessen, die größer als 4 dB ist (Abb. 3). In dieser Schicht hat man es zu diesem Zeitpunkt demnach mit großen Wassertropfen zu tun.

Zehn Minuten nach Beginn des intensiven Inputs von Silberjodid-Kristallisationskernen in das Gewitter mit drei Flugzeugen beginnt sich die Gewitterzelle abzuschwächen. Zuerst ist die Abnahme der Reflektivität Z in 3500 m über Grund zu sehen, 10 Minuten später dann auch in 1500 m, wo um 12:20 UTC ein temporäres Minimum der Reflektivität von 55 dBZ (100 mm/h) erreicht wurde (Abb. 3).

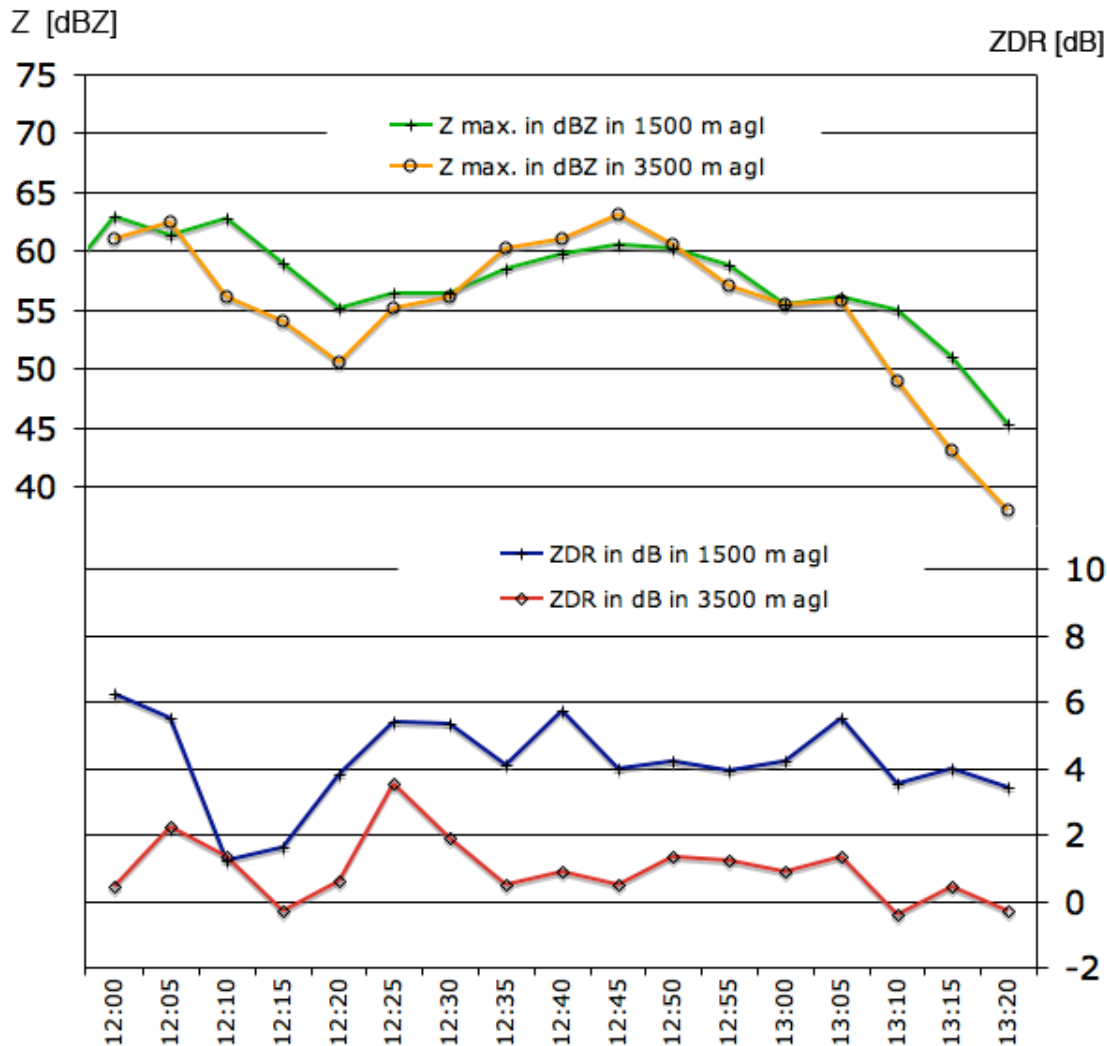


Abb. 3: Verlauf der maximalen Reflektivität Z [dBZ] in 1500 m über Grund (grün) und 3500 (gelb) m über Grund und der differentiellen Reflektivität ZDR [dB] in 1500 m über Grund (blau) und 3500 m über Grund (rot).

Um 12:10 UTC ist die Reflektivität in 3500 m (braun) deutlich gesunken, während in 1500 m nach wie vor eine Reflektivität von 63 dBZ gemessen wurde (grün). Die differentielle Reflektivität ZDR (blau) hat in 1500 m über Grund ein Minimum von 1.2 dB. Die Kombination von hoher Reflektivität und differentieller Reflektivität um 0 dB lässt hier auf Hagelkörner schließen. Die großen Hagelkörner waren also dabei, aus dem Gewitter auszufallen (Abb. 4). Dies wurde auch durch Hagelmeldungen am Boden bestätigt. In 3500 m über Grund war die differentielle Reflektivität weiterhin bei Werten um 0 dB. Man konnte also weiterhin runde Teilchen (Hagelkörner oder Graupel) messen, aber die geringere Reflektivität deutet auf insgesamt sehr viel

kleinere Teilchen hin. Das kann als Erfolg der Hagelabwehr interpretiert werden, zumindest erwartet man als Folge des eingebrachten Silberjodids deutlich kleinere Streuteilchen.

Wieso um 12:25 UTC die differentielle Reflektivität vorübergehend auf einen Wert über 3 ansteigt (Abb. 3), ist unklar. Eventuell misst man dort unterkühlte Wassertropfen oder oblate Eisteilchen.

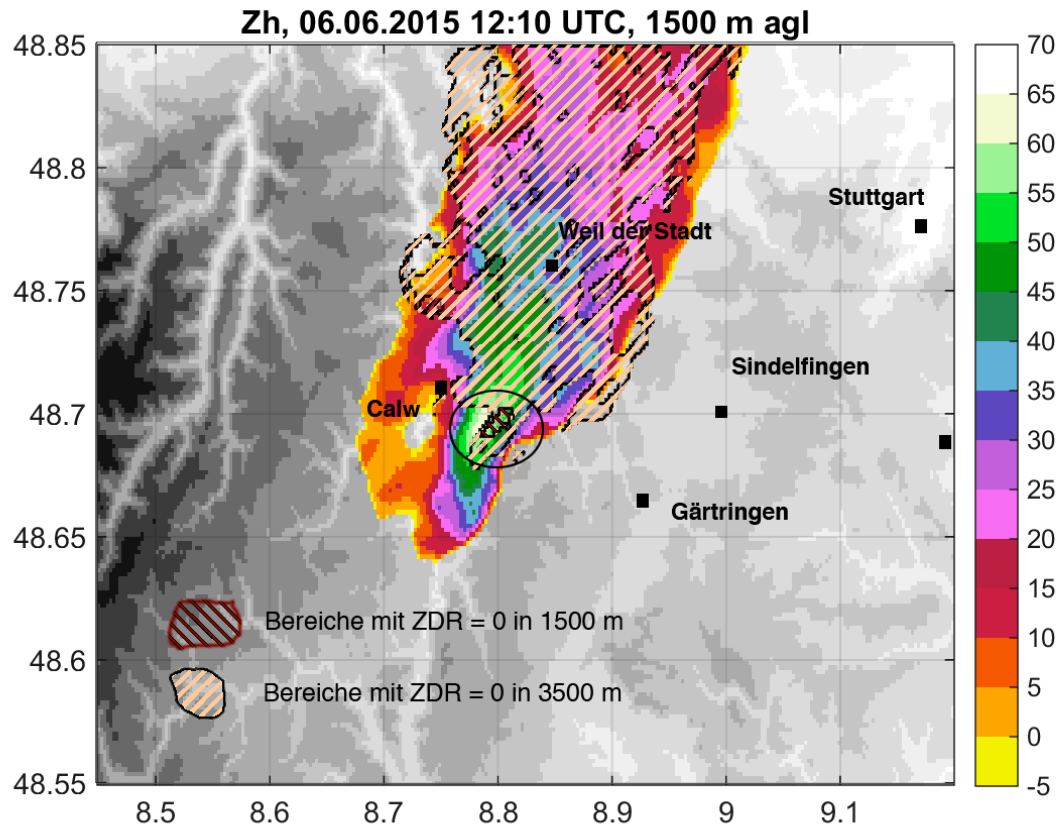


Abb. 4: Wie Abb. 2 aber in 1500 m über Grund und um 12:10 UTC (14:10 Uhr Lokalzeit). Zusätzlich ist der Bereich mit differentieller Reflektivität (ZDR) von 0 dB in 1500 m (eingekreist) eingezeichnet.

Die drei Hagelflugzeuge hatten die ganze Zeit über unterhalb der Gewitterzelle nahe an der Wolkenbasis mit jeweils 2 Brennern Silberjodid Partikel freigesetzt. Um sich nicht gegenseitig zu behindern, wurden unterschiedliche Bereiche des Aufwinds geimpft.

Im weiteren Verlauf der Impfung verstärkt sich die Reflektivität Z wieder auf über 60 dBZ in 1500 m und auf 63 dBZ in 3500 m über Grund. Die differentielle Reflektivität liegt dabei in 1500 m die ganze Zeit bei Werten um 4 dB oder darüber, was auf große Wassertropfen hindeutet. In 3500 m über Grund ist die differentielle Reflektivität klein und liegt meist zwischen 0 und 1.5 dB. Dies kann man exemplarisch im horizontalen Schnitt der Reflektivität durch das Gewitter in 3500 m über Grund um 12:40 Uhr UTC sehen (Abb. 5). Zu diesem Zeitpunkt wurde das Gewitter bereits 40 Minuten lang geimpft. Die Reflektivität in 3500 m über Grund liegt

wieder bei ähnlich hohen Werten wie zu Beginn der Impfung. Sieht man sich die differentielle Reflektivität ZDR in 3500 m über Grund an, dann findet man mehrheitlich runde Streuteilchen mit differentieller Reflektivität um 0 dB. Man hat also wieder die gleiche Kombination von hoher Reflektivität und differentieller Reflektivität um 0 dB wie am Anfang.

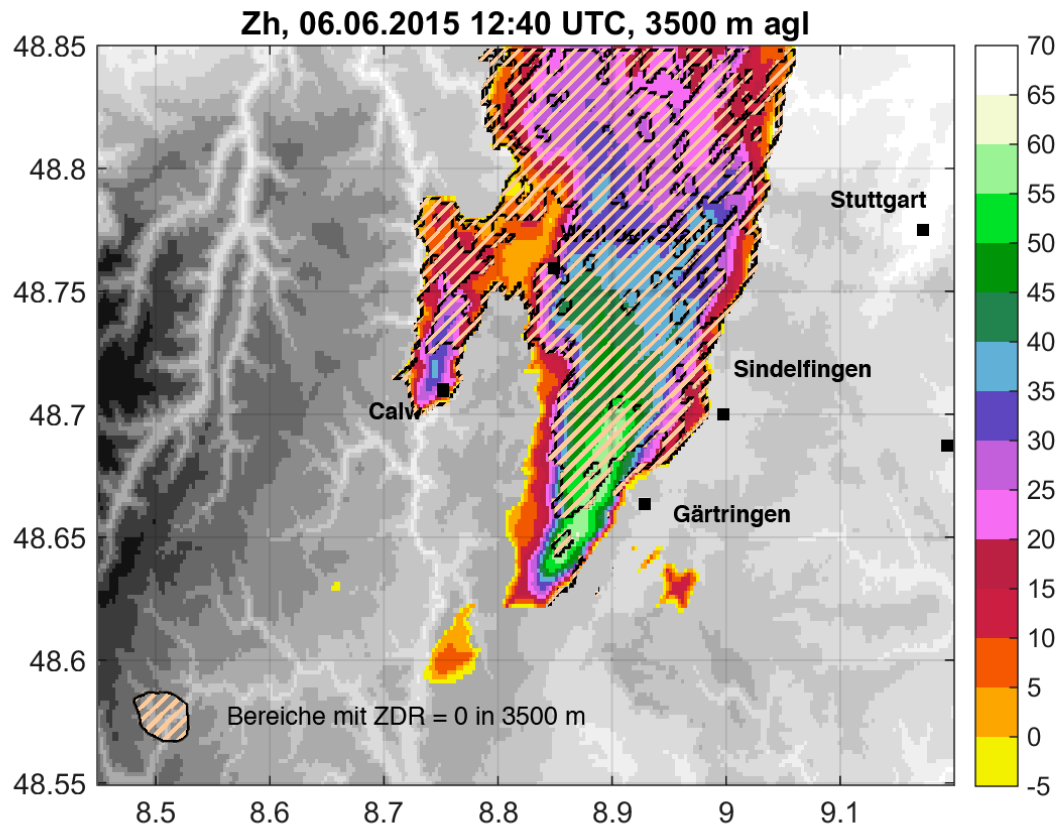


Abb. 5: Wie Abb. 2, aber um 12:40 UTC (14.40 Uhr Lokalzeit), 40 Minuten nach Beginn der Impfung.

Näher am Boden - in der Schicht 1500 m über Grund – gibt es jetzt aber, anders als um 12:10 und 12:15 UTC, nur Streuteilchen mit sehr großer differentieller Reflektivität, also große Wassertropfen. Die Hagelkörner sind demnach auf ihrem Weg zum Boden hin komplett geschmolzen und das legt die Vermutung nahe, dass die hohe Reflektivität in 3500 m jetzt nicht mehr von wenigen großen, sondern von vielen kleinen Hagelkörnern verursacht wurde. Ob das eine Auswirkung des eingebrachten Silberjodids ist, kann man natürlich nicht mit Sicherheit sagen, aber es ist genau das, was man bei geimpften Gewittern erwartet. Keine großen, sondern viele kleine Hagelkörner. So klein, dass sie schmelzen bevor sie den Boden erreichen und in diesem Fall gleichzeitig so viele, dass sie eine ähnlich hohe Reflektivität erzeugen wie große Hagelkörner.

Auch um 12:50 UTC und noch später gab es in 1500 m keinerlei Hagel mehr, sondern nur noch Wassertropfen. Ab 13:10 UTC begann sich das Gewitter dann allmählich aufzulösen.

4. Zusammenfassung

Das Hagelgewitter, das am frühen Nachmittag des 6. Juni 2015 über den nordöstlichen Ausläufern des Schwarzwalds entstand, wurde erfolgreich von drei Hagelflugzeugen geimpft. Nur kurz nach Beginn der Impfung gab es bodennah einige Hagelsignale in den Radardaten, die auch durch Beobachtungen am Boden bestätigt wurden. Danach hatte sich das Maximum der Reflektivität im Gewitter vorübergehend abgeschwächt, um sich dann im weiteren Verlauf der Impfung erneut zu verstärken. Trotz der Zunahme der Reflektivität wurde in den Radarbildern aber in der Ebene 1500 m über Grund kein Hagel mehr gemessen.

Die hier vorgelegte Auswertung der Reflektivität und der differentiellen Reflektivität legt den Schluss nahe, dass die Zunahme der Reflektivität während des Impfens nicht durch große Hagelkörner, sondern durch viele kleine Hagel- oder Graupelkörner verursacht wurde. Die Messungen bestätigen hier also die grundlegende Hypothese der Hagelabwehr, dass durch die vielen, zusätzlich ins Gewitter eingebrachten Kristallisationskerne die Bildung großer Hagelkörner verhindert wird, weil sich das im Gewitter verfügbare Wasser durch die zusätzlichen Kristallisationskerne auf viele kleine, anstatt auf wenige große Hagelkörner verteilt.

5. Literatur

Höller H. (1995): Hochreichende Konvektion. Annalen der Meteorologie 32, Selbstverlag des Deutschen Wetterdienstes, Offenbach am Main 1995, S. 158-165.

Schoor G.: Radar & Application Course. www.wdtb.noaa.gov/courses/rac/outline.php