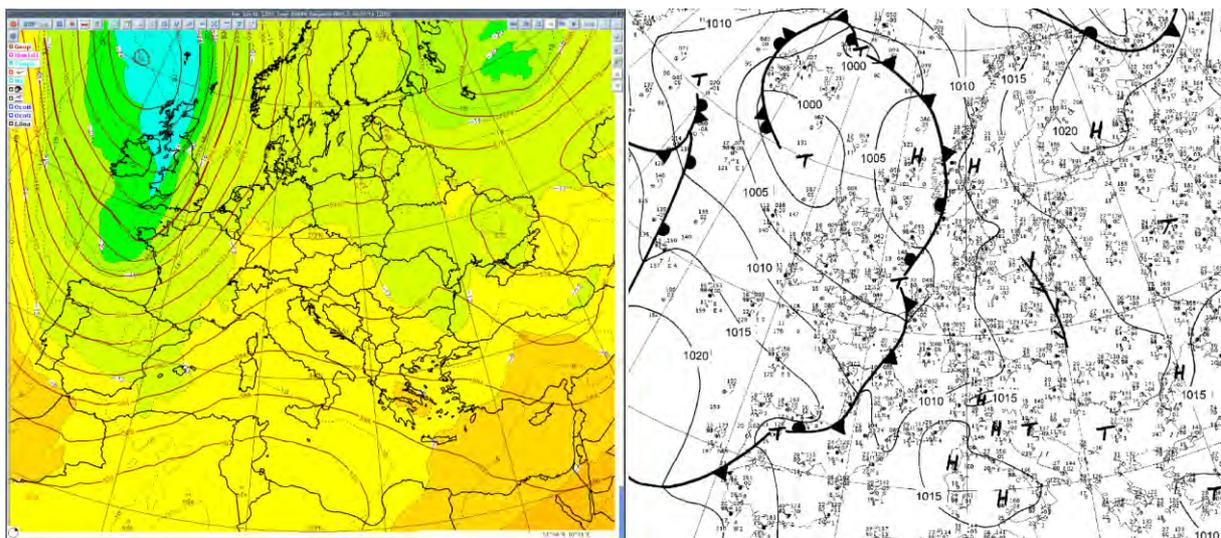


## Extremwetterereignis in Luxemburg am 06.07.2014

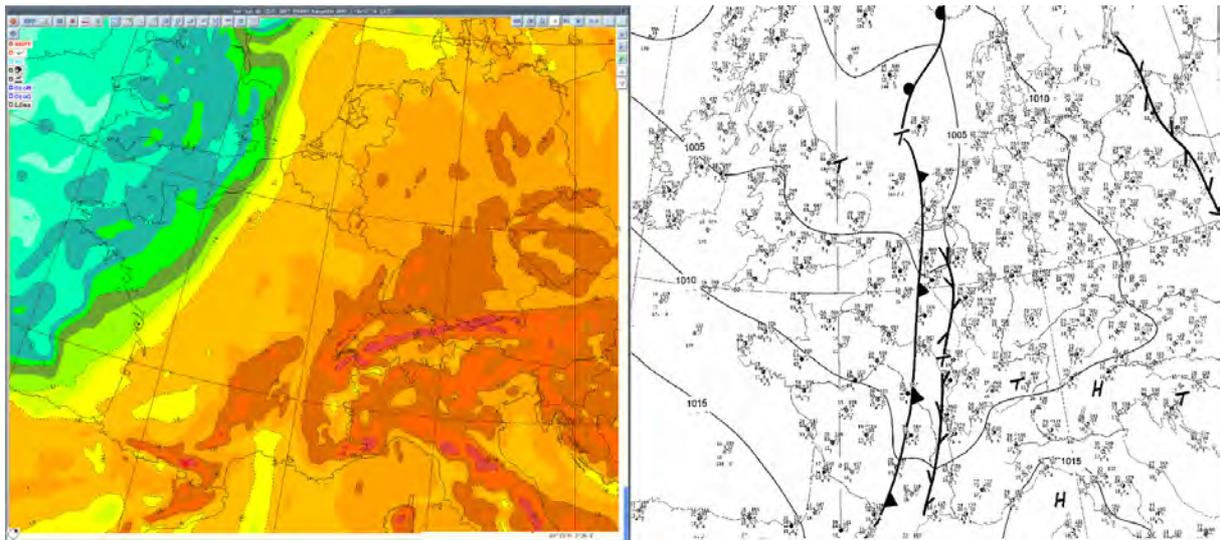
Am Sonntag, den 06. Juli 2014 vollzog sich ein heftiges Sommer-Unwetterereignis über weiten Teilen des Großherzogtums während den Abendstunden. In diesem Artikel soll die an diesem Tag vorherrschende Wetterlage erläutert und mithilfe von meteorologischen Karten und Grafiken gezeigt werden, was sich genau ereignete und wie es überhaupt dazu kommen konnte.

### Wie gestaltete sich die Großwetterlage?

Ein umfangreicher und weit nach Süden ausgreifender Höhentrog lag über Westeuropa und dessen Drehzentrum befand sich über dem Seegebiet zwischen Island und den Britischen Inseln (Abb. 1, links). An den beiden Flanken des Troges erstreckte sich der polare Jetstream, dessen rechter Eingangsbereich über Frankreich dynamische Hebungsantriebe lieferte. Im Bodendruckfeld manifestierte sich zunehmender Tiefdruckeinfluss. Ausgehend von einem Tiefdruckgebiet im Bereich von Island erstreckte sich ein Frontensystem vom Europäischen Nordmeer über die Nordsee und Frankreich bis zur Iberischen Halbinsel (Abb. 1, rechts). Da das Frontensystem annähernd parallel zur Höhenströmung lag, bildete sich jeweils eine Frontalwelle über der Nordsee und Nordspanien aus. Dabei griff eine langsam ostwärts ziehende Kaltfront auf das westliche Mitteleuropa über (Abb. 2, rechts). Im Vorfeld transportierte die südliche bis südwestliche Strömung in der unteren Troposphäre (Abb. 3) südeuropäische Subtropikluft in die Großregion, so dass die feuchtpotentielle Temperatur in 850 hPa (ca. 1500 m Höhe) bis auf Werte um 17°C stieg (Abb. 2, links).



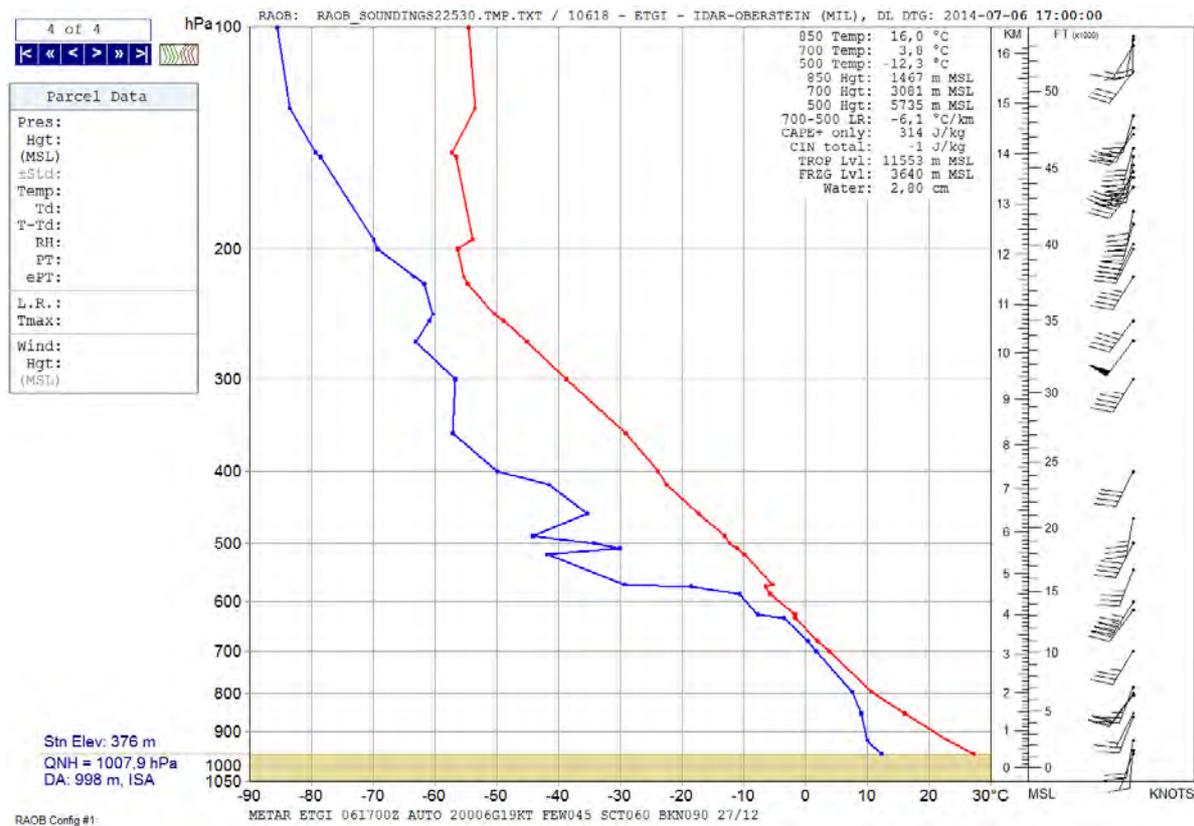
**Abb. 1:** 500 hPa-Höhenanalyse des französischen Wettermodells ARPEGE 0.5° (links) und Bodenanalyse des Deutschen Wetterdienstes (rechts) vom 06.07.14 um 12 UTC (14 Uhr MESZ). In der linken Abbildung stellen die braunen Linien das Geopotential (in gpdam) dar und die Farbflächen zeigen die Temperatur (in °C). In der rechten Abbildung sind die Linien gleichen Luftdrucks in schwarz dargestellt. Quellen: Météo-France, Deutscher Wetterdienst.



**Abb. 2:** Analyse der feuchtpotentiellen Temperatur in 850 hPa (in °C) des französischen Wettermodells ARPEGE 0.1° vom 06.07.14 um 12 UTC (links). Bodenanalyse des Deutschen Wetterdienstes vom 06.07.14 um 15 UTC (rechts). Quellen: Météo-France, Deutscher Wetterdienst.

### Wie sah das präfrontale Vertikalprofil der Atmosphäre aus?

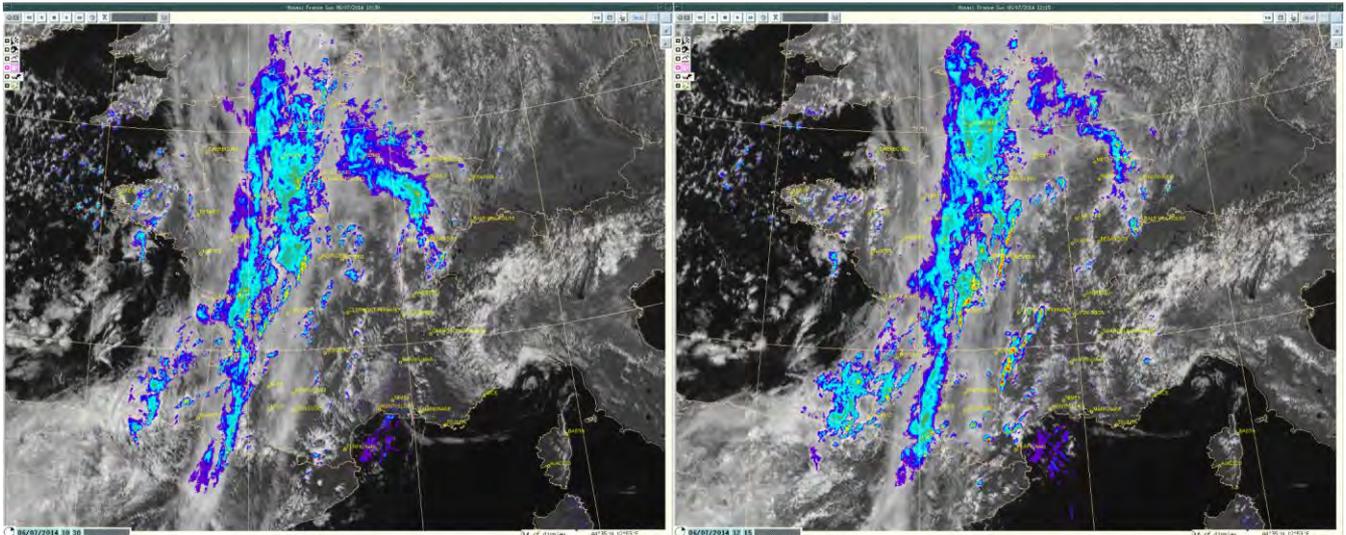
Die vertikale Verteilung der Feuchte und die thermische Vertikalstruktur sowie das vertikale Windprofil der Troposphäre im Bereich vor der Kaltfront werden näher untersucht. Dabei wird der 17 UTC (19 Uhr MESZ) Radiosondenaufstieg aus Idar-Oberstein (60 km östlich von Wasserbillig) herangezogen (Abb. 3). Dieser zeigte eine gut durchmischte Schicht zwischen dem Boden und 800 hPa (ca. 2000 m Höhe). Oberhalb davon befand sich eine etwa 2000 m dicke Schicht mit hoher Luftfeuchte (Differenz zwischen Taupunkt und Temperatur kleiner als 5°C). In der mittleren und oberen Troposphäre war hingegen ein massiver Feuchterückgang zu verzeichnen (Differenz zwischen Taupunkt und Temperatur größer als 15°C). Die Tropopause (Obergrenze der Troposphäre) lag in rund 11,6 km Höhe. Die relativ starke Temperaturabnahme in den unteren 4500 m und die nicht allzu trockene Grundschicht ließen eine moderate Labilität zu. Außerdem war die Änderung der Windgeschwindigkeit mit zunehmender Höhe stark ausgeprägt, so dass eine Scherung von etwa 39 kn (72 km/h bzw. 20 m/s) zwischen 0 und 4 km Höhe vorlag. Zusammenfassend kann somit schlussgefolgert werden, dass es zu einer Überlappung von mäßiger Labilität, starker Windscherung und signifikanten Hebungsimpulsen (siehe Großwetterlage: Kalt-front/Konvergenz, rechter Jet-Eingang) kam, wodurch ein erhöhtes Risiko für die Entwicklung von organisierter Konvektion gegeben war. Die Konstellation, mit der sehr trockenen Luftströmung, die sich über der sehr feuchten Luftschicht befand, und die zum Boden hin gut durchmischte Luft sorgte in Kombination mit den starken Winden in ca. 4000 m Höhe (bis zu 45 kn bzw. 85 km/h) für ein erhöhtes Potential für unwetterträchtige Gewitterfallböen. Die dieser Ansicht zugrunde gelegten thermodynamischen Prozesse werden im späteren Verlauf dieses Artikels genauer erläutert.



**Abb. 3:** Radiosondenaufstieg aus Idar-Oberstein vom 06.07.14 um 17 UTC (erstellt mit RAOB). Die rote Kurve stellt die Temperatur dar und die blaue Kurve den Taupunkt. Rechts neben dem Diagramm sind die Windpfeile für die entsprechenden Höhen angegeben.

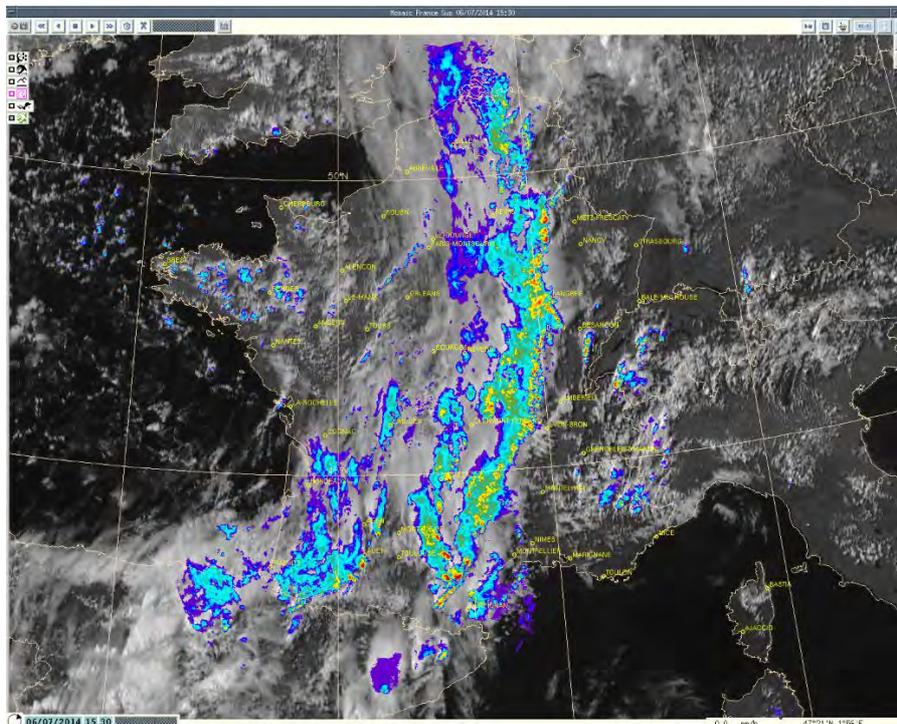
### Wie verlief die Wetterentwicklung bis zum Eintreffen des Unwetters?

Der Tag startete mit einem wolkigen bis stark bewölkten Himmel. Im Laufe des Vormittages klarte es stellenweise auf, so dass beispielsweise in der Südhälfte Luxemburgs 2 bis 4 Sonnenstunden registriert werden konnten. Jedoch näherte sich bereits aus Frankreich ein Wolkengebilde mit allmählich schwächer werdenden Niederschlägen (Abb. 4, links), das hauptsächlich aus aufgelösten nächtlichen Gewittern hervorging. Dementsprechend nahm die Bewölkung wieder rasch zu und der Himmel war um die Mittagszeit herum wieder nahezu komplett bedeckt. Gleichzeitig wurden vorderseitig der konvektiven Überreste einzelne kräftige Schauer über der Großregion ausgelöst, die aber nur vereinzelt einige Blitze produzierten und relativ schnell in den Westen von Deutschland weiterzogen. Von Süden her lockerte die Bewölkung im Laufe des Nachmittags wieder auf und folglich erhöhte sich die Einstrahlung, so dass die Temperaturen im Großherzogtum auf Werte zwischen 25°C und 29°C stiegen. Auch über der Osthälfte Frankreichs konnte ein Auflockern der Bewölkung beobachtet werden, was sich positiv auf die präfrontale Labilität auswirkte.



**Abb. 4:** Niederschlagsradar- und HRV-Satellitenbilder vom 06.07.14 um 10:30 UTC (links) und um 12:15 UTC (rechts). Quelle: Météo-France.

Entlang einer Konvergenz im Bereich des Zentralmassivs und entlang der Kaltfront über der Mitte Frankreichs kam es dann gegen 12 UTC (14 Uhr MESZ) zur Auslöse von hochreichender Feuchtekonvektion (Abb. 4, rechts). Diese beiden Gewitterschwerpunkte verbanden sich im weiteren Verlauf aufgrund des schnellen Vorankommens des nördlichen Teils der Kaltfront. Demzufolge entstand gegen 15 UTC (17 Uhr MESZ) eine teils unterbrochene Gewitterlinie (in Fachkreisen auch "broken-line squall line" genannt), die sich über nahezu die gesamte Länge Frankreichs erstreckte und eine nordöstliche Zugrichtung besaß (Abb. 5). Dabei befanden sich hauptsächlich im nördlichen Teil dieser Linie die kräftigsten Gewitterzellen.

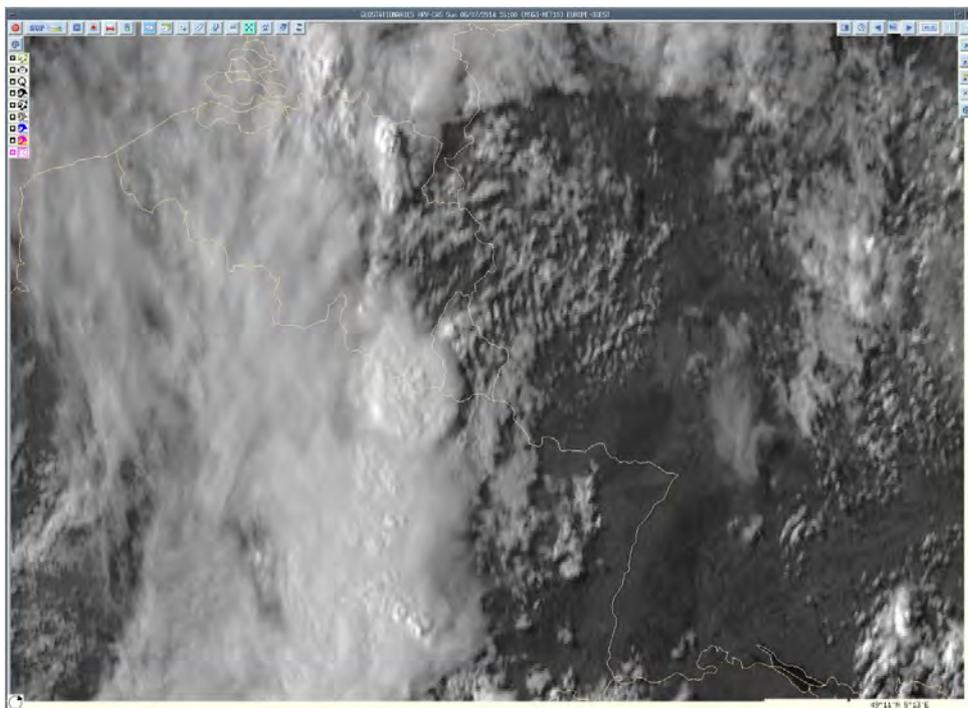


**Abb. 5:** Niederschlagsradar- und HRV-Satellitenbild vom 06.07.14 um 15:30 UTC. Quelle: Météo-France.

## Wie und mit welchen Eigenschaften erfolgte die Passage des konvektiven Unwetters?

Ein sehr intensives konvektives Segment der Gewitterlinie erfasste gegen 16 UTC (18 Uhr MESZ) zunächst das Dreiländereck und den äußersten Südwesten Luxemburgs (Abb. 7, links). Während der weiteren nordostwärtigen Verlagerung mit einer Geschwindigkeit von ca. 70 km/h zog dieser markante Gewitterherd über Steinfort und Bissen in Richtung Ettelbrück (Abb. 7, rechts) und verließ das Großherzogtum dann gegen 17 UTC (19 Uhr MESZ).

Bereits in Lothringen hatte diese kompakte Zelle für große Schäden und Verletzte gesorgt (z.B. in Longwy) und dessen extreme Intensität konnte zum Teil anhand der Niederschlagsradarbilder gedeutet werden. Zum einen zeigten die Bilder einen starken Gradienten der Niederschlagsintensitäten an der Vorgrenze des Gewitters, was in der Regel auf einen stark ausgeprägten Aufwindbereich hindeutet. Zum anderen erreichten die Niederschlagsintensitäten während des Durchgangs in Luxemburg Werte um 150 bis 200 mm/h, so dass ein deutliches Signal für Hagel und Starkregen vorlag. Einen weiteren Hinweis für einen sehr hohen Flüssigwassergehalt der Gewitterwolke und für schmelzenden Hagel innerhalb der Zelle lieferten die Radardaten des Deutschen Wetterdienstes, die Dämpfungseffekte in einem schmalen Streifen an der Rückseite dieses Gewitters zeigten. Des Weiteren ergab eine Satellitenbildanalyse, dass diese Gewitterzelle während ihrer hochaktiven Phase Wolkenoberflächentemperaturen von bis zu  $-58^{\circ}\text{C}$  besaß, so dass die Wolkenhöhe etwa 11 bis 12 km betrug.



**Abb. 6:** HRV-Satellitenbild vom 06.07.14 um 16 UTC. Die Gewitterwolke erreicht den Südwesten Luxemburgs. Quelle: Météo-France.

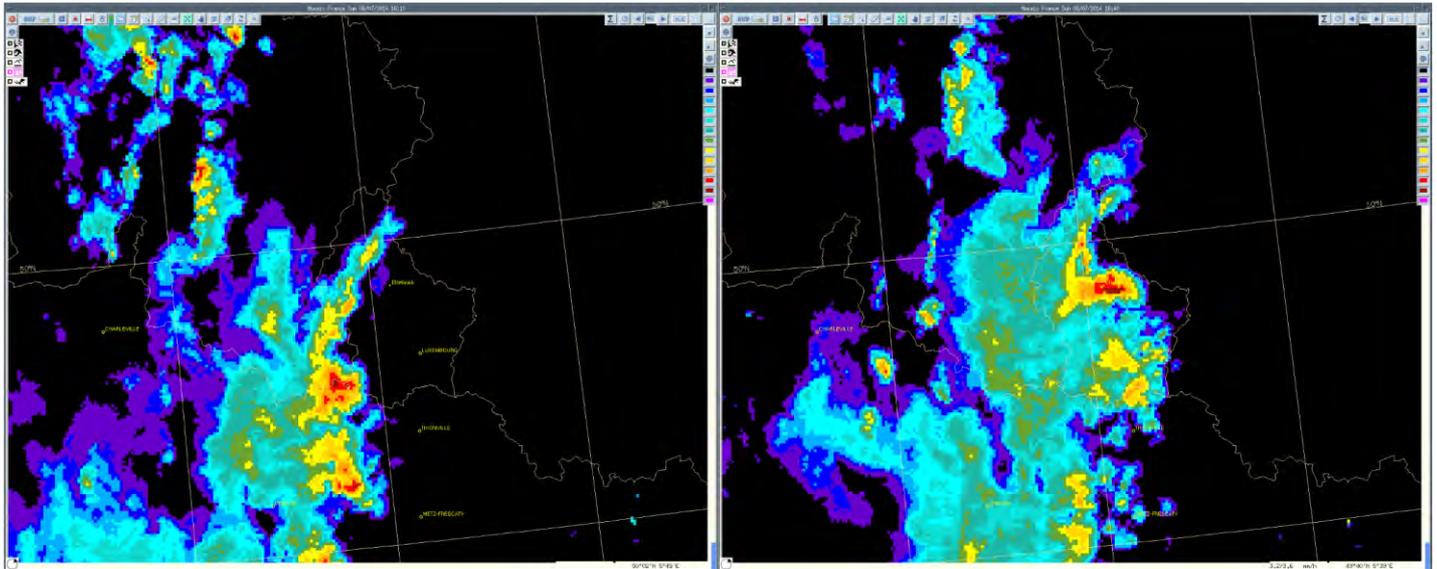


Abb. 7: Niederschlagsradarbilder vom 06.07.14 um 16:10 UTC (links) und um 16:40 UTC (rechts). Quelle: Météo-France.

### Welche Ursache lag den extremen Windböen zugrunde?

Die heftigste Begleiterscheinung der im vorigen Abschnitt beschriebenen Gewitterzelle war ohne jeden Zweifel der Wind. Sogenannte feuchte und intensive Gewitterfallböen (in Fachkreisen "wet downbursts" genannt) sorgten auf dem Pfad dieser Zelle verbreitet für massive Schäden an Vegetation und Infrastruktur. Ein feuchter Downburst basiert auf den Abwinden innerhalb einer Gewitterwolke und ist von erheblichen Niederschlägen begleitet. Durch mehrere Mechanismen thermodynamischen Ursprungs können diese Abwinde sehr stark beschleunigt werden, so dass sie mit voller Wucht auf den Boden aufprallen und horizontal ausfließen. Prinzipielle Voraussetzungen dieser Starkwindereignisse sind:

- Eine vom Boden ausgehend gut durchmischte Schicht unterhalb der Wolkenbasis mit einer vertikalen Temperaturabnahme von annähernd  $1^{\circ}\text{C}$  pro 100 m und eine innerhalb dieser durchmischten Schicht zum Boden hin abnehmende relative Feuchte.
- Ein Auslösefaktor für den konvektiven Abwind. Dieser kann durch eine sehr trockene Luftströmung im Bereich der mittleren Troposphäre gegeben sein, die in die Wolke "eindringt" (turbulente Durchmischung) und zu Verdunstung von Wolken-/ Regentropfen oder zu Sublimation von kleinem Hagel bzw. Graupel führt. Dies induziert eine rasche Abkühlung der Umgebungsluft, die somit schwerer wird und eine weitere Beschleunigung in Richtung Boden erfährt. Eine hohe Niederschlagslast oder das Schmelzen von feinkörnigem Hagel unterhalb der Nullgradgrenze können diesen Prozess zusätzlich verstärken.
- Ein Starkwindfeld in der unteren Hälfte der Troposphäre, das mithilfe des Abwindes bis in Bodennähe "durchgereicht" wird.

Basierend auf dem Radiosondenaufstieg aus Idar-Oberstein und den Niederschlagsradar-daten (siehe beide vorige Abschnitte) waren diese Voraussetzungen mehr oder weniger erfüllt. Private Beobachtungen belegten, dass die feuchten Downbursts von kleinen Hagelkörnern begleitet wurden, was lokal zu größeren Hagelakkumulationen führte.



**Abb. 8:** Durchgang des feuchten Downbursts in Bissen. Quelle: Vito Antonacci (via rtl.lu)

Während des Durchgangs der heftigen Gewitterzelle im äußersten Südwesten Luxemburgs wurde in Steinfort eine Orkanböe von 131 km/h und in Bartringen eine orkanartige Böe von 113 km/h gemessen (Quelle: MeteoGroup). Am Flughafen Findel sorgte der intensive Dichtefluss dieses Gewitters für eine Sturmböe von 79 km/h. Auch im Norden Luxemburgs war der zerstörerische Downburst weiterhin aktiv, mit einer schweren Sturmböe von 90 km/h in Diekirch (Quelle: meteoLCD).



**Abb. 9:** Massive Vegetationsschäden im Härebësch zwischen Koerich und Simmern, verursacht durch den Downburst. Quelle: Luxplan (Markus Quack).

## Wie viel Niederschlag produzierte das Unwetter?

Obwohl das konvektive Unwetter eine relativ hohe Verlagerungsgeschwindigkeit besaß, kam es stellenweise in kürzester Zeit zu markanten Niederschlagsmengen bzw. lokalen Überschwemmungen wegen teils sehr starker Regenfällen. Es folgt eine Auswahl der höchsten Niederschlagsmengen (ab 15 l/m<sup>2</sup>) zwischen 18 und 19 Uhr MESZ (Quelle: MeteoGroup, ASTA):

- 24 l/m<sup>2</sup> - Steinfort
- 20 l/m<sup>2</sup> - Petingen
- 17 l/m<sup>2</sup> - Ettelbrück
- 15 l/m<sup>2</sup> - Koerich

## Wie hoch war die Blitzaktivität dieser Gewitterzelle?

Die höchste Erdblitzdichte konnte in einem Streifen ausgehend von Longwy über Arlon und Useldingen bis nach Ettelbrück und Vianden beobachtet werden (Abb. 9). Im Allgemeinen kann die Blitzaktivität des Unwetters als moderat eingestuft werden, wobei punktuell relativ hohe Blitzdichten von bis zu einem Erdblitz pro km<sup>2</sup> erreicht wurden.

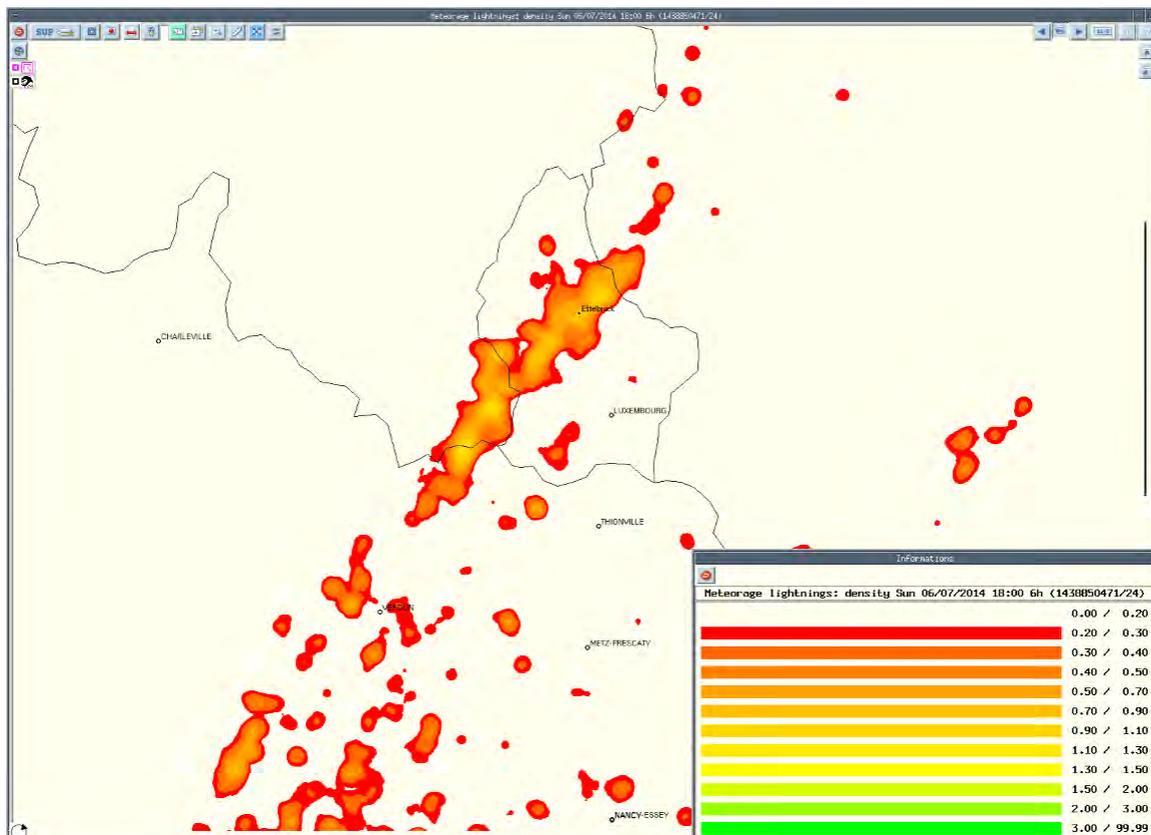


Abb. 10: Blitzdichte (Erdblitz pro km<sup>2</sup>) vom 06.07.14 zwischen 12 und 18 UTC . Quelle: Météo-France/Météorage.

## Was müsste noch untersucht werden?

Die wesentlichen Merkmale dieses konvektiven Extremereignisses konnten in diesem Artikel dargelegt werden. Nichtsdestotrotz könnte die Analyse dieses Sommer-Unwetters in einer ausführlicheren Art und Weise fortgesetzt werden. Kompliziert ist die Frage nach der Gewitterart (hybrides Gewitter?), da es sich in diesem Fall um kein Musterexemplar handelte, wie man es aus der Fachliteratur gewohnt ist. Diesbezüglich könnten noch weitere Radarmessungen (z.B. Radialwinde, Vertikalschnitte, ...) zur Analyse herangezogen werden, um diese Komplexität näher zu beleuchten. Mit diesen zusätzlichen Daten wäre auch eine genauere Betrachtung des Gewitterkerns möglich, so dass eine detailliertere Aussage über die dominanten Prozesse im Auslöseniveau des Downbursts getätigt werden könnte. Des Weiteren bestünde noch die Möglichkeit eine umfassende Schadensanalyse durchzuführen, um somit auf die verbreitet aufgetretenen Windspitzen schließen zu können.



**Abb. 11:** Blick auf die Vorderseite des konvektiven Unwetters vom Standort Schieren. Fotograf: Gilles Hemmerling. Quelle: Facebook.

## Glossar

**Feuchtpotentielle Temperatur** - Maß zur Bestimmung von Luftmassen, da invariant gegenüber Verdunstung bzw. Kondensation.

**Höhentrog** - Südwärts gerichteter Kaltluftausbruch in höheren Schichten der Troposphäre.

**Jetstream** - Ein äußerst intensiver, bandförmiger, nicht beständiger, von West nach Ost gerichteter Luftstrom mit sehr hohen Windgeschwindigkeiten, der in der oberen Troposphäre (9 bis 12 km Höhe) konzentriert ist und durch große horizontale Temperaturunterschiede verursacht wird.

**Konvergenz** - Luft strömt aus unterschiedlichen Richtungen zusammen, wodurch Hebungsimpulse erzeugt werden.

**Radiosondenaufstieg** - Die Vertikalstruktur der Atmosphäre wird standardmäßig mit Radiosonden erfasst. Dazu wird an einem Ballon ein Behälter mit Sensoren für die meteorologischen Größen (Druck, Temperatur und Feuchte) befestigt. Beim Aufstieg des Ballons durch die Atmosphäre werden in regelmäßigen Abständen die Messdaten per Funk zur Bodenstation übertragen. Die Position der Sonde wird heute meist mit GPS bestimmt. Aus der Positionsänderung werden Windstärke und Windrichtung für die jeweiligen Höhen berechnet. Eine Sondierung der Atmosphäre ermöglicht dem Meteorologen sich einen Überblick über den vertikalen Aufbau der Troposphäre zu verschaffen und somit beispielsweise Rückschlüsse auf die Höhe der Wolkenuntergrenze oder auf die Niederschlagsart (im Winter) zu ziehen. Radiosondenaufstiege spielen unter anderem in der Gewittervorhersage eine sehr wichtige Rolle, da sie Aufschluss darüber geben, ob die Troposphäre "bereit" ist Gewitter zu produzieren.

**Tropopause** - Obere Abgrenzung der Troposphäre und dessen Höhe variiert in den mittleren Breiten je nach Jahreszeit zwischen 9 und 13 km.

**Troposphäre** - Schicht der Erdatmosphäre, in der sich die Wetterprozesse abspielen.