Leitfaden zur Intepretation der CHM15k Ceilometerplots

Version 1.0

November 2011

Bearbeiter: Harald Flentje

Aerosol-Profilmessungen mit den CHM15k-Ceilometern des DWD

Der Deutsche Wetterdienst betreibt ein Messnetz von JENOPTIK CHM15k Ceilometern (s. Abb. 1). Ceilometer sind Wolkenhöhenmessgeräte, deren neueste Generation sich durch den Einsatz eines gepulsten Festkörperlasers (Nd:YAG, 1064 nm) auch zum qualitativen Nachweis von Partikeln in der Luft (Aerosol) eignet. Es ist im Prinzip ein leistungsschwaches aber kostengünstiges elastisches Rückstreu-Lidar (ähnlich einem Radar, aber mit Licht betrieben). Lidar-Systeme werden seit vielen Jahren zur Messung atmosphärischer Partikeln verwendet. Die Eignung von Ceilometern für Partikelmessungen wird an den Observatorien Hohenpeissenberg und Lindenberg untersucht.

Die Ceilometer liefern zwei unabhängige Datensätze: (1) das operationelle Datentelegramm für Wolkenbasishöhen und Strahl-Eindringtiefen über die AMDA, das seit längerem für die Wettervorhersage verwendet wird. (2) den diesem zugrundeliegenden umfassenderen Rohdatensatz der Rückstreuintensität. Beide Datensätze werden mit 15 s Zeitauflösung gemessen und via DSL/ISDN zur Verfügung gestellt. Letzterer über eine Ethernet-Schnittstelle, gepackt in über 30 min akkumulierten Paketen, während der Übertragungspausen der AMDA.

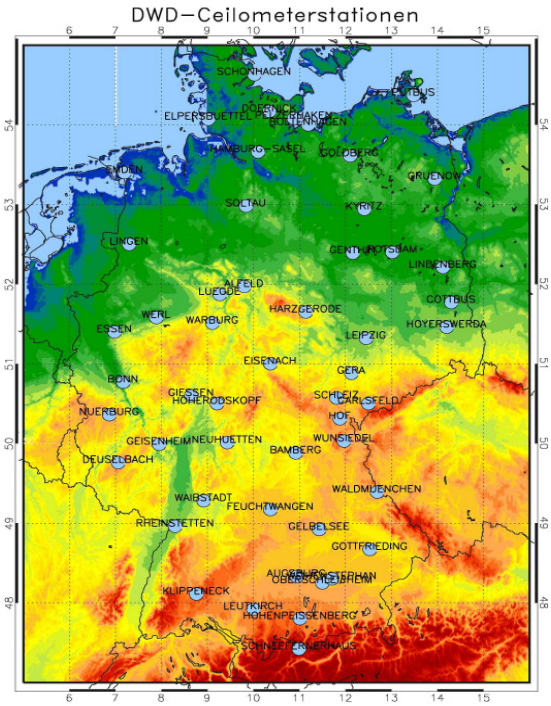

Abb. 1: Ceilometer-Standorte im meteorologischen Messnetz des DWD

Messprinzip

Lidar ist ein aktives Fernerkundungsverfahren (Light Detection and Ranging = Lichterkennung und Höhenzuordnung), bei dem gepulste Laserstrahlen in die Atmosphäre ausgesandt, an Luftmolekülen bzw. atmosphärischen Partikeln gestreut ('reflektiert'), von einem Teleskop aufgefangen und anschließend elektronisch analysiert werden. Das zurückkommende Licht wird Photonenweise gezählt (photo counting). Ihre Zählrate ist ein Maß für die Partikelkonzentration. Die Position (Höhe über Grund = Entfernung vom Gerät) der Partikel wird über die Laufzeit des Lichts ermittelt (Abb. 2).

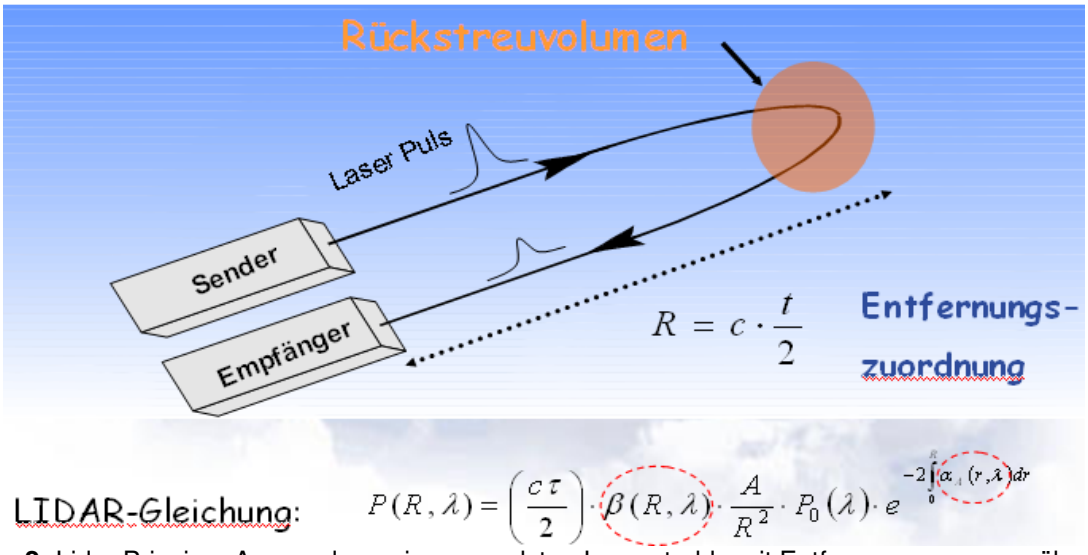

Abb. 2: Lidar Prinzip – Aussendung eines gepulsten Laserstrahls mit Entfernungsmessung über Lichtlaufzeit und atmosphärischer Kalibrierung mittels Referenzwert (Lidar-Inversion).

Zur quantitativen Auswertung des Rückstreusignals, muss die elastische-Rückstreu-Lidar-Gleichung (s.o.) gelöst werden, die zwei Unbekannte, den Rückstreu- (β) und den Extinktionskoeffizienten (α) enthält. Deren Beziehung, das sog. Lidar-Verhältnis LR=β/α, ist meist unbekannt und muss aus Literaturwerten abgeschätzt oder evtl. vorhandenen Messungen anderer Meßsysteme entnommen werden. Die vielfältigen dazu verwendeten Methoden werden in der umfangreichen Lidar-Literatur beschrieben.

Informationsgehalt

Eine Einschätzung der Signifikanz des Messsignals liefert das sog. Signal/Rausch-Verhältnis (SNR). Das Rauschen setzt sich bei diesen Geräten aus elektronischem Rauschen und Himmelsstreulicht zusammen. Ein SNR>1 bedeutet, dass das Messsignal größer ist als das Hintergrundsignal, also noch echte Aerosolinformation vorliegt. Wo das SNR<1, ist kein auswertbares Messsignal mehr vorhanden. Das SNR nimmt etwa exponentiell mit der Höhe ab, daher ist die Empfindlichkeit für hochgelegene dünne Aerosolschichten, im Vergleich zu den wesentlich leistungsstärkeren Lidar-Systemen, sehr eingeschränkt (s. Kap ??? + ???). In die Tagesgrafiken sind jeweils drei über ca. 20 min gemittelte SNR-Profile eingefügt – sie gelten für die Periode nach dem jeweiligen Koordinatenursprung.

Die im DWD eingesetzten CHM15k Ceilometer können prinzipiell Aerosol- und Wolkenpartikel von wenigen 100 m über Grund (ü.G.) bis in ca. 15 km Höhe messen. Die Sensitivität nimmt für Partikel mit Größen unterhalb von etwa 0.4 µm stark ab (~r^{-6}), d.h. es 'sieht' eher die größeren Partikel. Der volle Höhenbereich wird nur bei wolkenfreiem Wetter abgedeckt. In Wolken mit optischen Dicken >~3 (Schätzung) wird der Laserstrahl so stark zerstreut, dass von größeren höhen kein Rückstreusignal mehr empfangen werden kann und nur die Wolkenuntergrenze detektiert wird. In diesem Fall erhält man keine Informationen über eventuell vorhandene Wolken oder Staubschichten oberhalb der blockierenden Wolkenschicht. In den Grafiken sind diese Bereiche, die kein signifikantes Signal also keine Information enthalten, auf Basis des SNR ausgeblendet.

Aus den Messdaten (ncdf Format, s. Anhang) werden Zeit-Höhenschnitte der entfernungskorrigierten (r^2-Abfall) Rückstreuprofile erzeugt (Lev 1). Im Allgemeinen sieht man in diesen Bildern bis in 1-2 km Höhe die bodennahe atmosphärische Grenzschicht, die mehr Partikel enthält und sich farblich vom darüber liegenden Bereich deutlich unterscheidet (zu wärmeren Farben/höheren Rückstreuintensitäten hin). An ihrer Obergrenze treten z.T. Wolken auf, die in den Bildern schwarz erscheinen. *Aerosol- und Wolkenpartikel erzeugen gleichartige Rückstreusignale und können in den CHM15k (Lev 1) Grafiken i.M. nur durch deren Intensität, also die Farbe, unterschieden werden, die für Aerosole eher im mittleren und unteren Bereich unserer logarithmischen Farbskala liegt. Die Farbskala gibt nur eine qualitative Intensitätsinformation. Einen allgemein gültigen Schwellwert, der eine dünne Wolke von einem dichten Aerosol trennt, gibt es nicht - dichter Rauch kann z.B. optisch dichter sein als eine dünne Wasser- oder Eiswolke.* ***Die Ceilometerdaten an sich enthalten keine quantitative Information über die Größe, die Art und Zusammensetzung, die Herkunft und den Mischungszustand atmosphärischer Partikel.*** Oft treten auch Aerosolschichten unterschiedlicher Herkunft in der freien Troposphäre oberhalb der Grenzschicht auf, z.B. (Sahara-) Staub, Feuerrauch, Pollen oder Vulkanasche. Deren Interpretation erfordert i.A. Trajektorien, weitere Messungen und Beobachtungen, Vergleiche mit anderen Stationen und Erfahrung, die hier im Ansatz vermittelt werden soll. Die Einzelheiten der Aufbereitung des Rohsignals zu beschreiben, würde den Rahmen dieser Erläuterung sprengen. Es werden verschiedene Normierungen, Filter und Mittelungen und Komprimierungen angewandt, die dem Informationsgehalt der Daten angepasst sind. Die Grafiken zeigen den zeitlichen Verlauf der entfernungskorrigierten vertikalen Intensitätsprofile (Intensität P) in ***relativen*** Einheiten von $P \cdot r^2$. Um schwache Aerosolstrukturen hervorzuheben wird Pr^2 auf einer dekadisch logarithmischen Farbskala dargestellt. Da die Profile nicht bzgl. der Extinktion korrigiert sind, erscheinen alle Strukturen um so stärker gedämpft, je höher sie liegen, weil der Laserpuls auf dem Hin- und Rückweg durch die dazwischen liegenden Streu/Absorptionsprozesse abgeschwächt wurde.

Wegen des großen Informationsgewinns ist die Erweiterung eines Teils der Ceilometer mit einem Modul zur Messung des Depolarisationsverhältnisses (DepolV - δ) geplant. Das DepolV δ gibt den Intensitätsanteil depolarisiert zurückgestreuten Lichts $I_\perp$ relativ zur Intensität des ausgesandten linear polarisierten Laserlichts $I_{||}$ an:

$$\delta_{aerosol} = \frac{I_\perp}{I_{||}} \ ,$$

mit dessen Hilfe sphärische von nicht-sphärischen (irregulären) Partikeln unterschieden werden können. Vulkanasche, (Sahara)Staub, Waldbrandpartikel depolarisieren das Laserlicht, und zwar unterschiedlich stark, und können daher untereinander und von wässrigen/hygroskopischen (runden) Partikeln (Wolkentröpchen, Sulfate,…) unterschieden werden.

Einschränkungen

Die (***nicht immer mögliche!***) näherungsweise Berechnung eines Profils des Rückstreu- oder Extinktionskoeffizienten ist nur mit Zusatzinformationen, z.B. der optischen Dicke und in-situ Partikeleigenschaften, möglich (Kap. ???). Zur (***mit noch größerem Vorbehalt versehenen!***) Abschätzung der Massenkonzentration werden zusätzliche starke, nicht ohne weiteres verfügbare, Informationen oder Annahmen über die Partikel benötigt (Kap. ???). Die beiden letzteren Schritte sind mit dem DWD Ceilometernetz allein in der gegenwärtigen Form trotz der verfügbaren Hilfsmessungen i.A. nicht möglich. Dieser Umstand soll durch die Anbindung an 'Anker'stationen mit Lidars und die Einbindung in ein Deutsches (bzw. internationales) Aerosolmessnetz (2011 in Vorbereitung) verbessert werden (s. Kap. ???).

Datenprodukte

Die aktuellen CHM15k Daten aller Ceilometer Stationen werden über geräte-interne Netzwerkschnittstellen alle 15 min an den AFDZ nach Offenbach übertragen und dort als Tagesdateien im netcdf-Format gespeichert. Einzelheiten dazu finden sich im Bericht zum DWD Projekt 'Ceilometermessungen (Rückstreuprofile) des Jenoptik CHM15k im DWD operationell erschließen'.

Die Aufbereitung der Daten erfolgt in mehreren Schritten zu Level 0, 1, 2,… Produkten (vom Rohsignal bis zur Abschätzung von Aerosolparametern), deren Informationsgehalt - aber auch deren Unsicherheit – entsprechend zunimmt. Der naheliegendste abgeleitete Datensatz (Lev 1) ist das entfernungskorrigierte relative Rückstreuprofil Pr^2, das als Zeit-Höhenschnitt im Netz verfügbar ist (Abb. 3). Als nächstes folgen der Rückstreu-(Extinktions)koeffizient (Lev 2) und schließlich daraus abgeleitete Größen wie die Partikel-Massenkonzentration, die Grenzschichthöhe, Schrägsichtweite usw. (Lev 3).

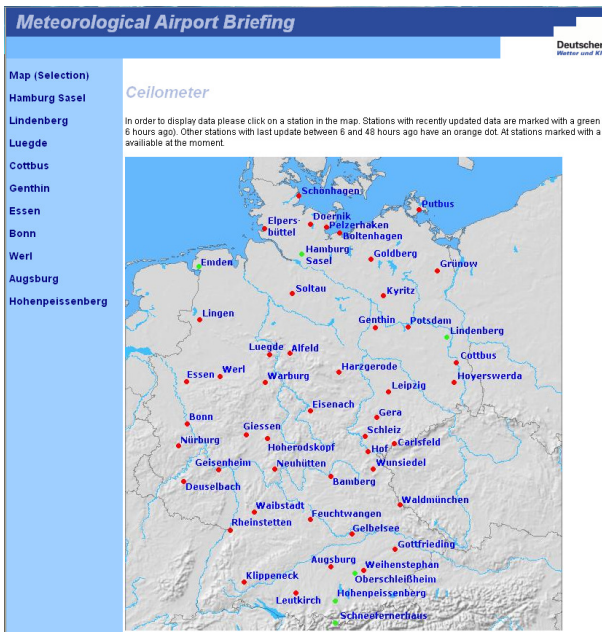

Abb. 3: Internetlink zu Quicklooks der entfernungskorrigierten Ceilometerdaten (Pr^2)
http://www.deutscher-wetterdienst.de/gsb/ceilometer/

Außer im web sind die Lev 1 Grafiken auch als Webcamlayer/Ceilometer in NinJo vorhanden:

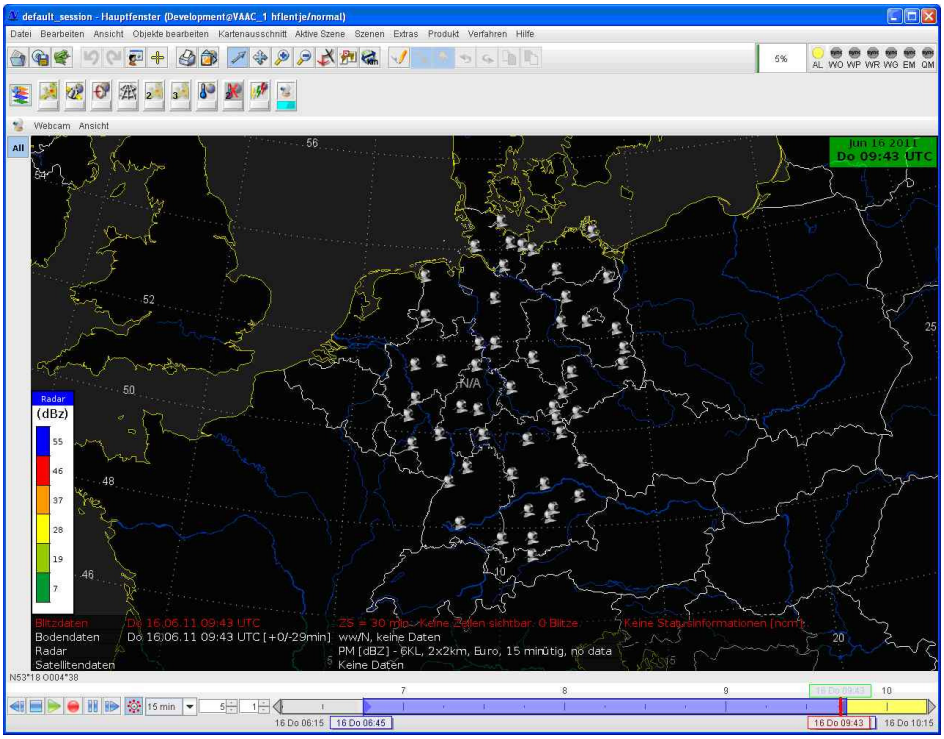

Abb. 4: Darstellung der CHM15k Ceilometerstationen im NinJo Webcamlayer.

Beispiele von CHM15k Ceilometermessungen:

Sommertag mit ungestörter Grenzschicht-Entwicklung

Unterhalb von ca. 2 km liegt anfangs die stabile nächtliche Grenzschicht mit höheren Rückstreu-Intensitäten, (gelbgrün) darüber die intern geschichtete Residualschicht des letzten Tages (dunkelblau-grün). Um 01:00 wird täglich eine Geräte-interne Kalibration durchgeführt und verursacht eine kurze Signalschwankung. Ab etwa 10:00 setzt Konvektion ein, die Grenzschichthöhe steigt auf ca. 3 km an. Kurz nach Mittag bilden sich an der Grenzschicht-Obergrenze (schwarz)flache Cumuli, die sich um ca. 15:00 wieder auflösen. Im Intensitätsschatten der Wolken sieht man Streifen erhöhten Signalrauschens. Nach Sonnenuntergang sinkt die Grenzschicht wieder zusammen. Um ca. 18:00 tritt in 10 km vorübergehend ein Zirrus auf. Der Intensitätsanstieg vom Boden (ca. 1000 m ü.G.) bis in 1.4 km ist ein Überlapp-Artefakt des optischen Systems und wird in den Grafiken ausgeblendet (s.u.).

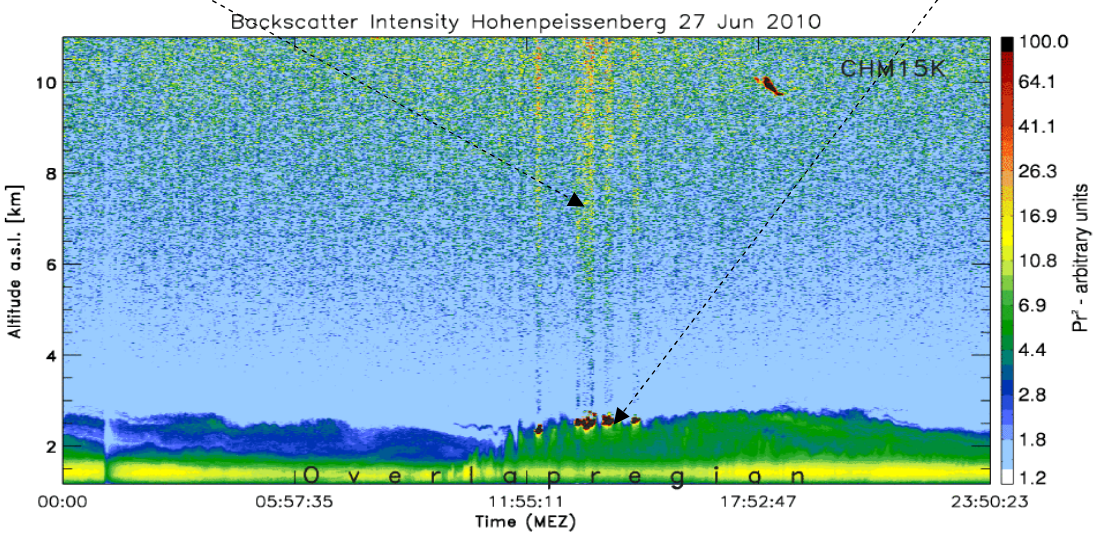

Abb. 5: CHM15k Rückstreuprofile im Tagesverlauf am Beispiel einer ungestörten Grenzschichtentwicklung (ohne SNR Maske).

Wintertag mit Zwischenhoch-Einfluss und nachmittags Wetterfront

Am Vormittag erkennt man tiefe Wolken, die nicht durchdrungen werden (den Strahl blockieren). Vormittags klart der Himmel vorübergehend auf. Ab ca. 13:00 ziehen Zirren auf, deren Untergrenze (!) von ca. 8 km Höhe beginnend absinkt und in tiefe Wolken übergeht, die um ca. 20:00 z.T. bis zum Boden reichen. Wie hoch die Wolken reichen, kann nur anfangs erkannt werden, nach 18:00 wird der

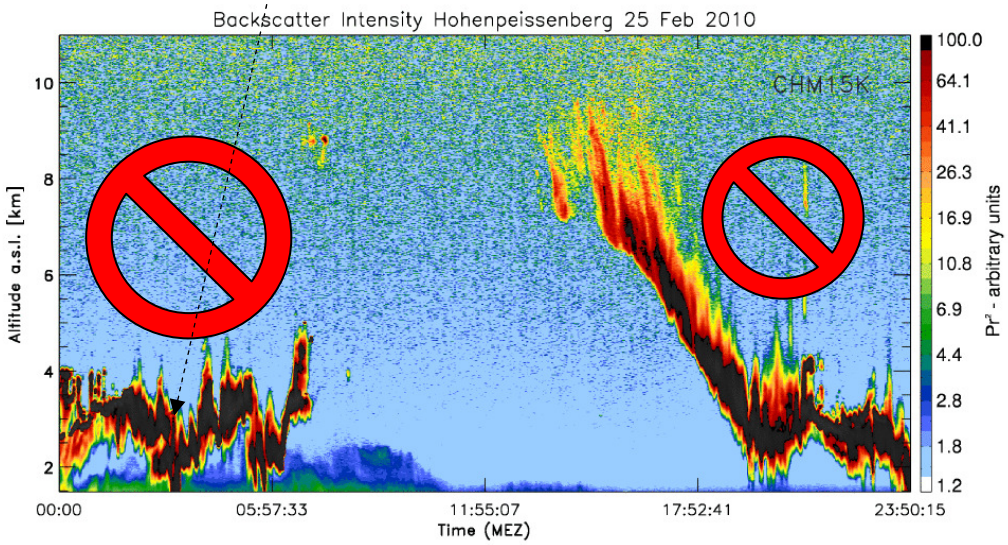

Abb. 6: CHM15k Rückstreuprofile im Tagesverlauf mit Wolken, ohne SNR-Maske.

Laserstrahl, bis auf weniger Ausnahmen, im unteren Bereich der Wolken vollständig zerstreut. Um oberhalb der Wolken keine partikelfreie Atmosphäre zu suggerieren, werden solche Bereiche wie in Abb. 7 nachträglich mit Hilfe des Signal/Rausch Verhältnisses SNR ausgeblendet. Dabei wird hier ein Schwellwert SNR>1 verwendet, da in Bereichen mit SNR<1 keine signifikante Streuinformation vorliegt.

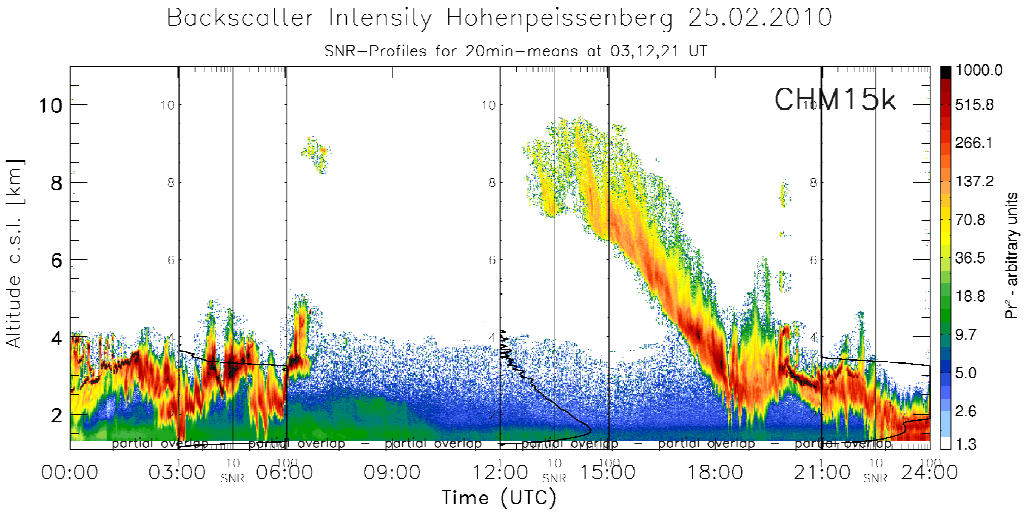

Abb. 7: Wie 3a, aber mit SNR-Profilen und SNR-Maske (Bereiche mit SNR<1 sind ausgeblendet), SNR-Profile sind über 20 min gemittelt.

Im Tagesverlauf aufziehende Zirren

Zirren sind höher und optisch dünner als Wasserwolken und erzeugen daher geringere Rückstreusignale. Typischerweise nimmt ihre Höhe beim Aufzug einer Warmfront ab, daher findet man schräge (am Messort scheinbar absinkende) Strukturen.

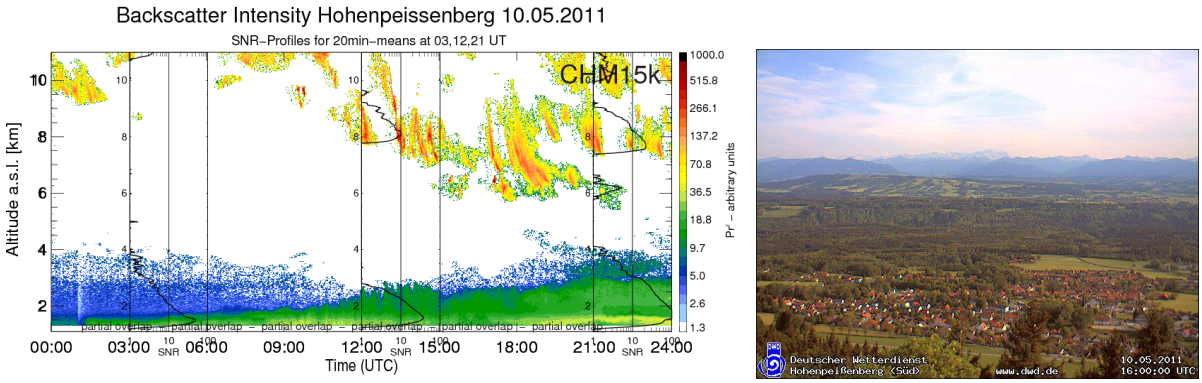

Abb. 8: Beispielsmessung 'Aufziehende Zirren'

Hochnebel und Stratusbewölkung

In diesem Beispiel einer winterlichen Inversionslage lag der Hohenpeißenberg anfangs am Oberrand, dann innerhalb und später unterhalb einer Hochnebeldecke. Anfangs dringt der Laserstrahl noch bis in die sauberere freie Troposphäre durch, während unten im Hochnebel hohe Rückstreuintensitäten auftreten. Um Mittag steigt der Nebel auf Gipfelniveau (keine Sicht, kein Signal), nachmittags ab 12:00 steigt der Hochnebel weiter an und blockiert als dünne Stratusdecke den Laserstrahl. Unterhalb befindet sich eine recht verschmutzte Luftmasse, darüber sinkt das Signal schnell ab. Direkt oberhalb des Stratus tritt eine durch Sättigungseffekte des Empfängers verursachte signalfreie Zone auf (Artefakt).

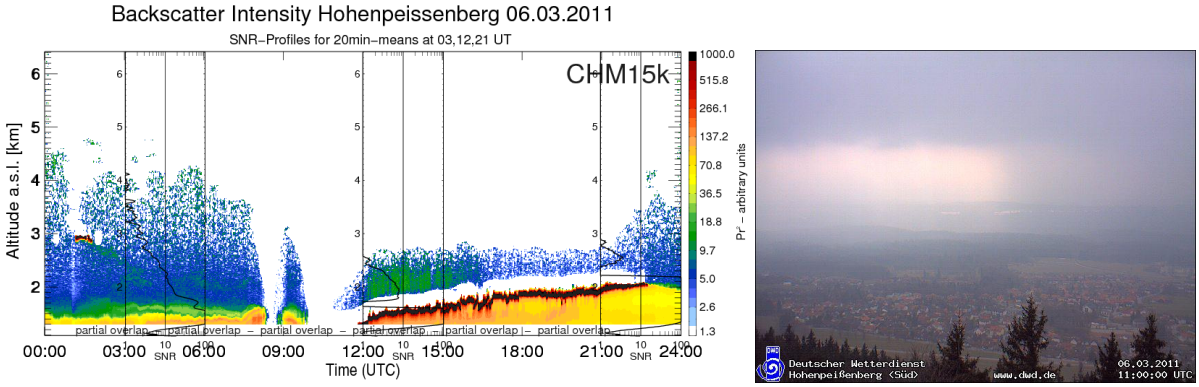

Abb. 9: Beispielsmessung 'Hochnebel und Stratusbewölkung'

Niederschlag

Regentropfen, Schnee oder Graupel streuen stark und erzeugen ein großes Rückstreusignal. Die dazu gehörenden Wolken sind i.A. optisch so dicht, dass sie den Laserstrahl blockieren. Daher erscheint als typisches Bild eine scheinbar flache (schwarze) Wolkenschicht mit roten Fallstreifen des daraus fallenden Niederschlags (z.B. bis 6:00, um 10:30 und um 16:00 am 14.06.in Abb. 10).

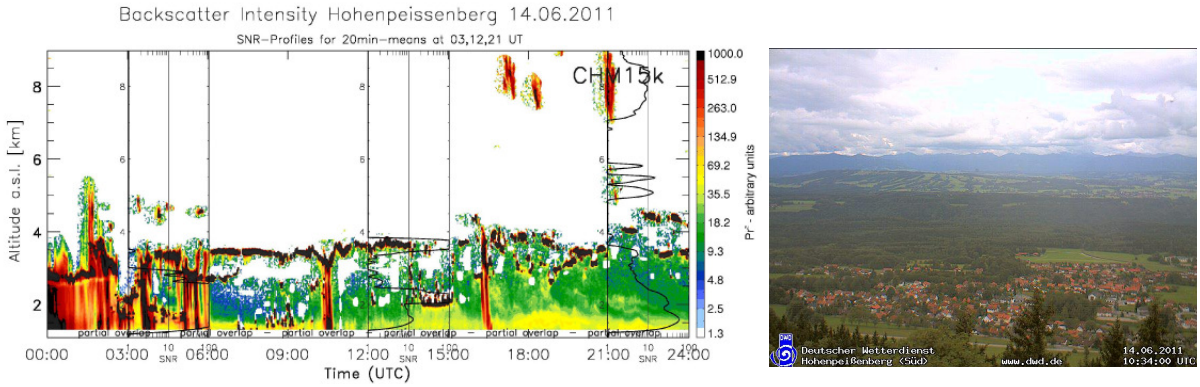

Abb. 10: Beispielsmessung mit Regen und lokalen Schauern, erkennbar als rote Fallstreifen, darüber (schwarz) die zugehörigen Wolken, von denen nur die Basis gesehen wird. Das Webcambild zeigt den Regenschauer um 10:34 UTC.

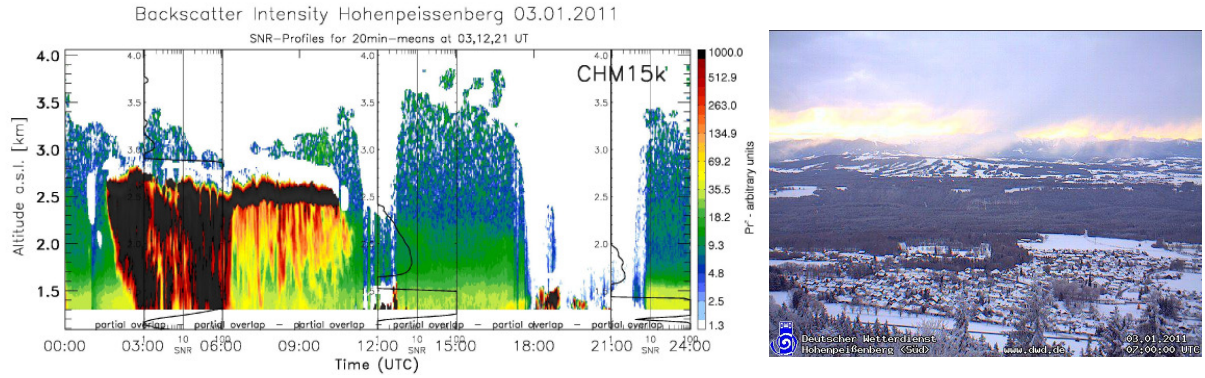

Abb. 11: Beispielsmessung mit Schneefall (02:00 – 06:00) und Schneeschauern (06:00-11:00), die nicht bis zum Boden hinab reichen. Das Webcambild ist vom Vormittag.

Saharastaub

Saharastaub tritt in Mitteleuropa 5-15 mal pro Jahr während ausgeprägter Süd(west)lagen auf und bleibt typischerweise über mehrere Tage das dominierende Aerosol. Oft reicht er von der Grenzschicht bis in 3-6 km Höhe und ist optisch z.T. sogar dichter als die Grenzschicht. Intern zeigt er oft eine laminare (wellenförmig verlaufende) Schichtung, besonders deutlich unten am 30./31. Mai 2008. Da die Partikel nicht sphärisch sind, würden sie ein deutlich depolarisiertes Signal erzeugen, das mit evtl. zukünftig dafür aufgerüsteten Geräten nachweisbar wäre.

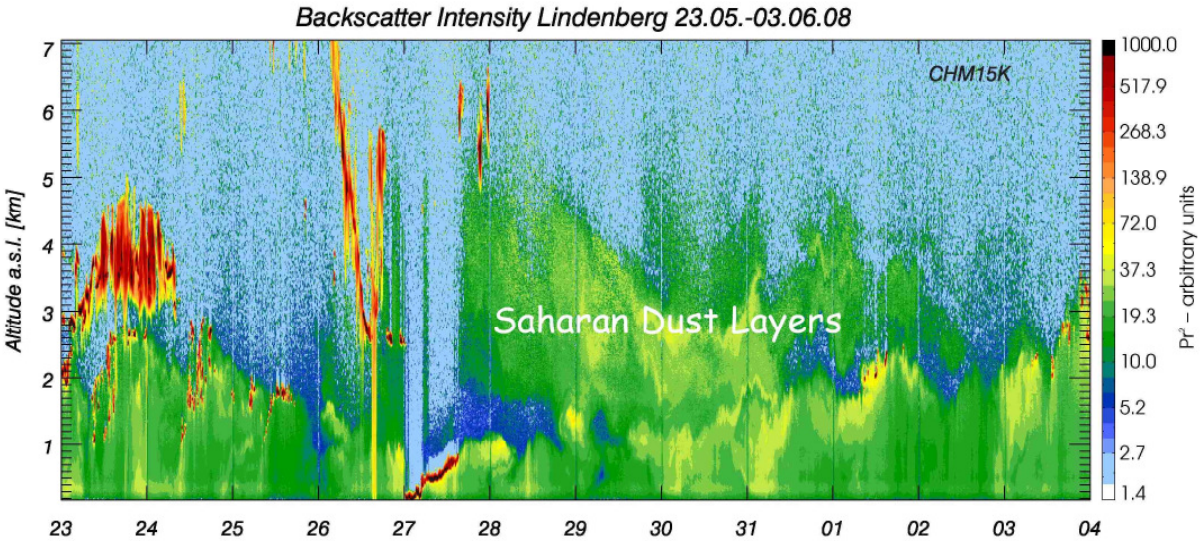

Abb. 12: Beispielsmessung 'Sharastaub Mai 2008 über Lindenberg'

In Abb. 13 sind Tagesmessungen des CHX15k (Nahfeld) auf dem Schneefernerhaus (SFH, 2635 m ü.G.) und des Messnetzgeräts CHM15k am Hohenpeißenberg (HPB, 988 m ü.G.) verglichen.

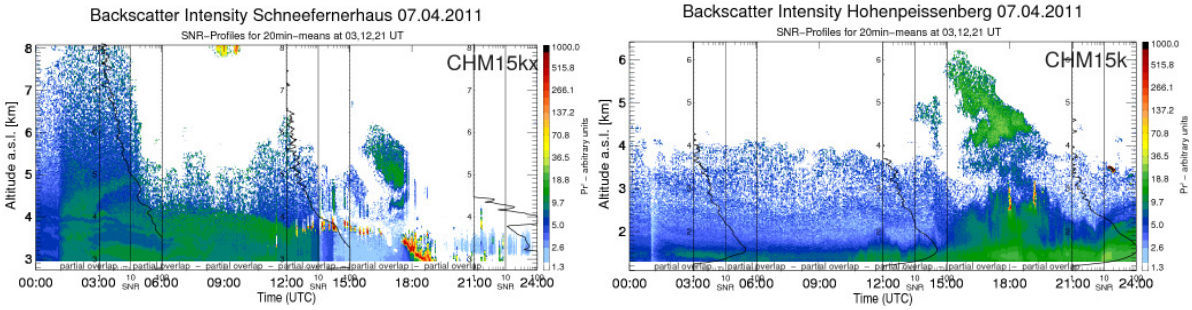

Abb. 13: Beispielsmessung 'Sharastaub April 2011 über Schneefernerhaus und Hohenpeißenberg'

Rauchschichten aus entfernten Waldbränden

Waldbrandaerosol aus entfernten, oft mediterranen Waldbrandgebieten, treten z.T. im Sommer in flachen, optisch recht dünnen Schichten auf. Sie werden meist in größerer Höhe transportiert und gelangen nicht bis zum Boden. Sie sind mäßig depolarisierend, was jedoch erst mit der vorgesehen Depolarisationsmessung zur Identifikation verwendet werden kann. Zur Identifizierung der Quellregion reichen oft Rückwärts-Trajektorien kombiniert mit Satellitenbildern (z.B. MODIS). Bei 3:00, 12:00 und 21:00 sind Einzelprofile des über 20 min gemittelten Signal/Rausch-Verhältnisses (SNR) eingefügt. SNR>1 bedeutet, dass das Messsignal größer ist als das elektronische Rauschen, also noch echte Aerosolinformation vorliegt. Wo das SNR<1, ist kein auswertbares Meßsignal mehr vorhanden.

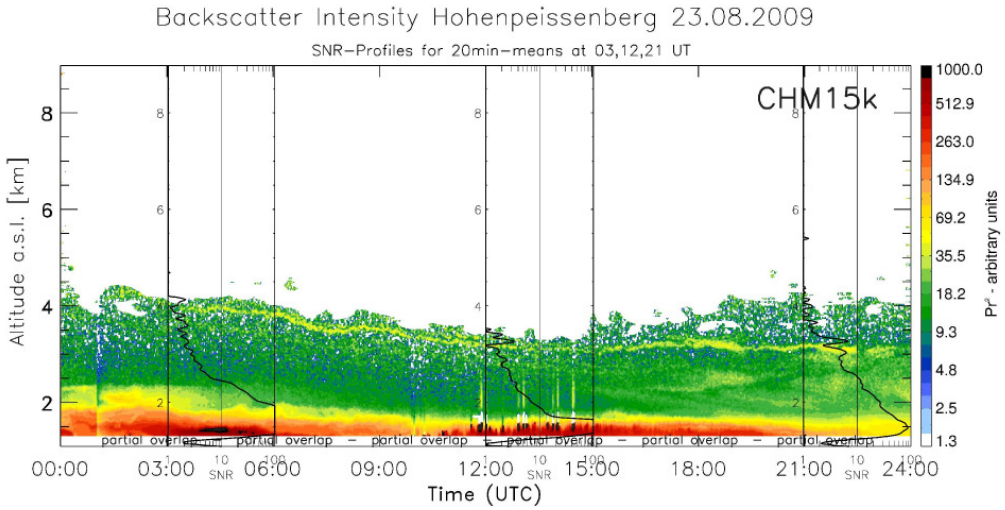

Abb. 14: CHM15k Tagesprofil flacher Rauchpartikelschichten vom 23. August 2009 mit Signal/Rauschverhältnis-Profilen.

Flache, klar abgegrenzte Aerosolschich-ten sind zwar typisch, aber nicht eindeutig für Brandaerosole. Eine Synopsis benachbarter Ceilometermessungen (Abb. 15) zeigt sowohl die großflächige Ausdehnung als auch stabile (nicht-turbulente) Strömungsverhältnisse und erleichtert mit Hilfe von Trajektorien die Quellzuordnung und Identifikation der Partikel.

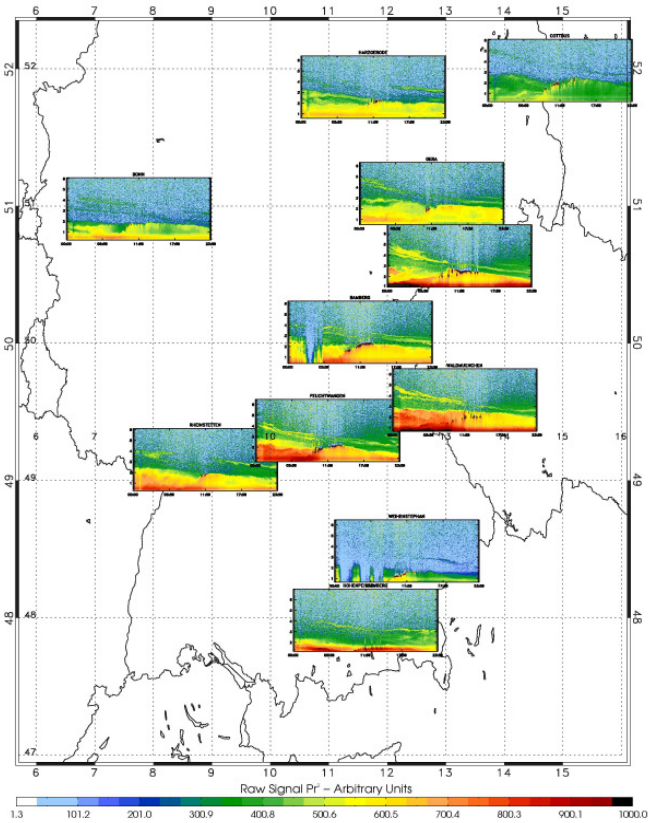

Abb. 15: Composit der Rauch-Aerosolschichten vom 23.09.2009 über den süddeutschen Ceilometerstationen.

Vulkanasche

Troposphärische Vulkanasche wurde mit den CHM15k bisher im April/Mai 2010 (Eyjafjallajökull) und im Mai 2011 (Grimsvötn) direkt beobachtet. Ihre Dichte, Kohärenz, Schichtung usw. hängen von der speziellen Eruptionscharakteristik und dem Transport ab. Die Asche der ersten Ausbruchphase des Eyjafjallajökull wurde am 16./17. April 2010 als kompakte, ca. 1 km dicke Schicht (rot) von Nordwest nach Südost über Deutschland transportiert (Abb. 16) und sank dabei im Tagesverlauf um mehrere km ab. Rheinstetten überquerte sie z.B. vom 16.04. nachts (3.5 km Höhe) bis ca. 17.04. 13:30 (1.5 km Höhe) und zog dann weiter nach Süden. Der scharf begrenzte Rand zeigt, dass bis dato kaum Vermischung mit der Umgebungsluft stattgefunden hatte. Interne Wellenstrukturen deuten stabile Schichtung an. Ab Mittag ist bereits eine nachfolgende, dünnere/diffusere Ascheschicht erkennbar. *Anhand der Ceilometermessung einer Station allein lässt sich diese Partikelschicht nicht sicher als Vulkanasche identifizieren. Dazu werden externe Informationen, wie etwa Rückwärtstrajektorien, die Zusammenschau mehrerer Ceilometer und in-situ oder Depolarisations-Lidar Messungen benötigt. Die Partikelart und -herkunft kann so durch verschiedene 'weichere' und/oder 'härtere' Indizien eingegrenzt werden. Im Fall des Eyjafjallajökull konnte die Asche z.B. durch Messungen der SO_2-Konzentration und der Partikelgrößenverteilung am Schneefernerhaus, das sich vorübergehend innerhalb der absinkenden Ascheschicht befand, identifiziert werden.*

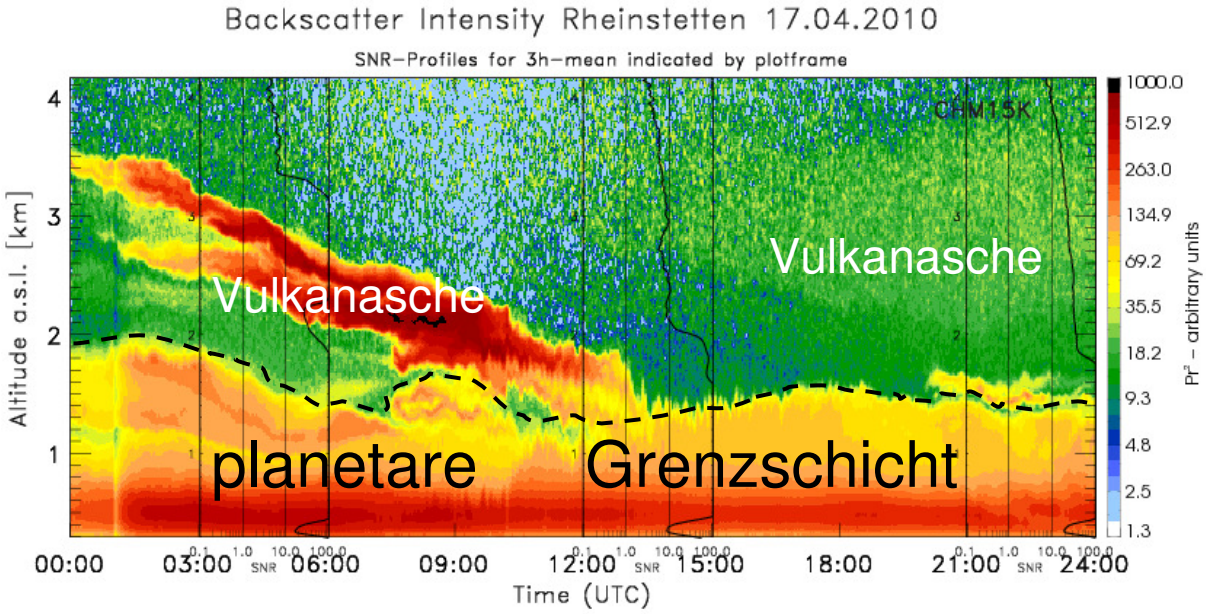

Abb. 16: CHM15k Tagsprofile vom 15.04.2010 mit Vulkanascheschichten und SNR-Profilen.

Die Zeit-Höhenschnitte an den Stationen vermitteln den Eindruck, dass die Schicht stark absinkt. Ein scheinbares Absinken resultiert jedoch auch aus Advektion und Neigung der Schicht. Darin unterscheiden sich die Grafiken von den 'quasi-Momentaufnahmen' des CALIOP Lidars auf dem CALIPSO Satelliten (Abb. 17). Erst mit simultanen Messungen mehrerer Ceilometer lässt sich etwas über die Neigung von Aerosolschichten aussagen.

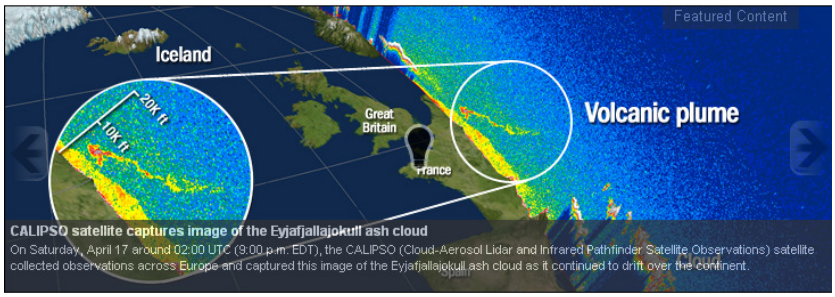

Abb. 17: CALIOP/CALIPSO Profile der Eyjafjalla Vulkanasche entlang des Satellitenüberflugs über Belgien am 17. April 2010 (http://www-calipso.larc.nasa.gov/products/lidar/browse_images/show_calendar.php).

Durch die Synopsis benachbarter Ceilometermessungen kann die Ausbreitung kohärenter Aerosolschichten verfolgt, ihre regionale Ausprägung interpoliert und die Art/Herkunft der Partikel unter Zuhilfenahme von Zusatzinformationen mit wesentlich größerer Sicherheit identifiziert werden. Abb. 18 zeigt die Situation vom 17. April 2010 retrospektiv. Daraus lassen sich die Homogenität und das Mischungsverhalten abschätzen und mit Hilfe von Lidar-Ankerstationen, Flugzeugmessungen u.a. letztlich im Prinzip eine 4-D Aerosolverteilung über Deutschland assimilieren. Insbesondere an den südlichsten Stationen Hohenpeißenberg und Leutkirch wurde die Ascheschicht z.T. durch tiefe Wolken verdeckt. Die maximale Partikel-Massenkonzentration lag in dieser Schicht bei etwa 1 mg/m³.

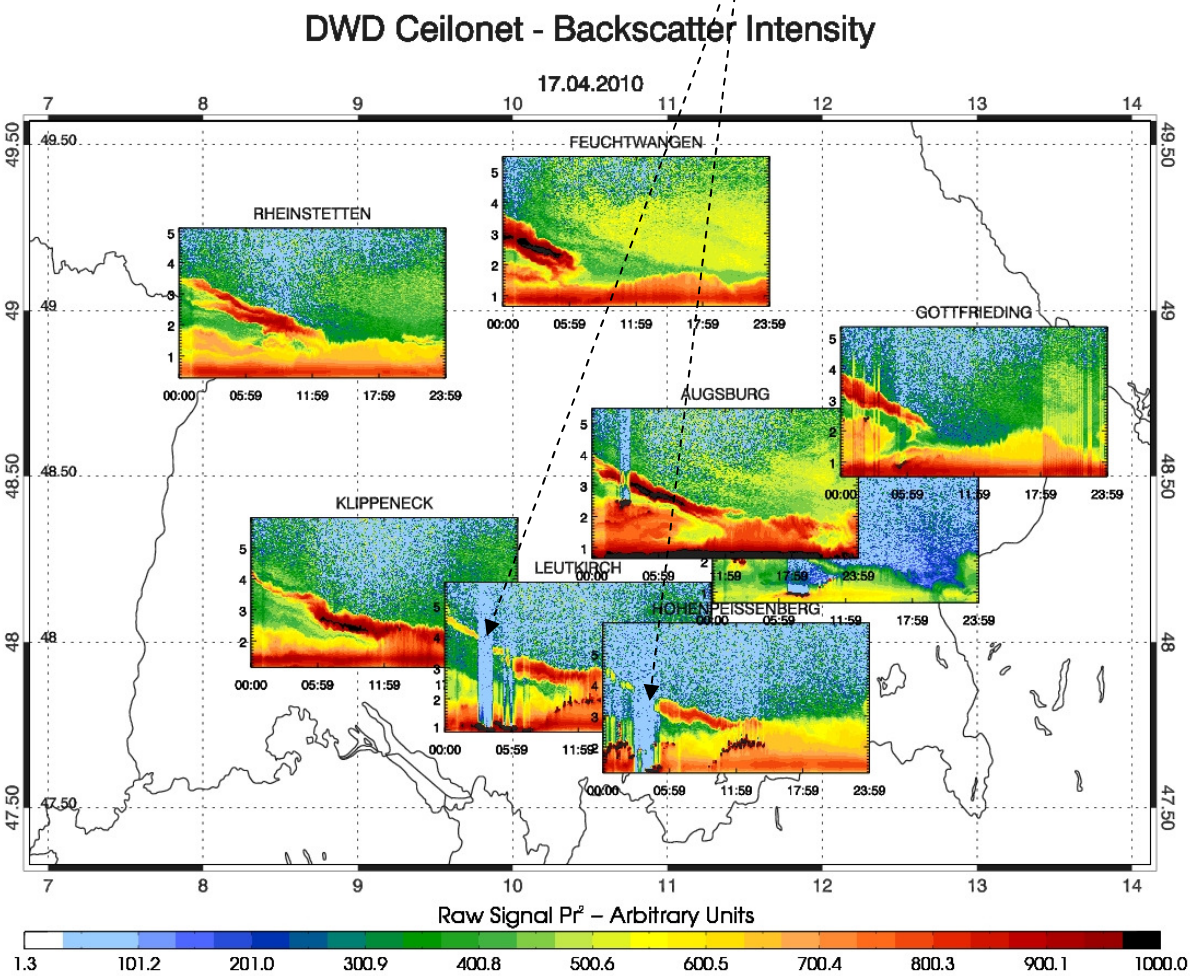

Abb. 18: Composit der Eyjafjalla-Asche Messungen vom 17.04.2010 über den süddeutschen Ceilometerstationen.

Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden. zeigt den komplexen Verlauf des Rückstreusignals am Hohenpeißenberg vom 15.04. – 21.04.2010. Zwischen den sehr stark rückstreuenden Wolken, ist die Vulkanasche relativ unauffällig. Da unterhalb von 4 km Höhe fast ausschließlich Flüssigwasserwolken auftreten, hätte die Asche aufgrund ihrer Depolarisation des Laserstrahls klar identifiziert werden können. Diese Möglichkeit besteht aber erst nach Integration des vom Hersteller für 2012 angekündigten Moduls zur Messung des Depolarisationsverhältnisses in die Ceilometer.