

DROHNENMESSUNGEN IM UNTEREN URNER REUSSTAL



**Fazit über das zweitägige Pilotprojekt in Bezug auf
Messqualität und Relevanz für lufthygienische Fragestellungen**

Altdorf, 23.02.2015

IMPRESSUM

Auftraggeber:

Amt für Umweltschutz
Kanton Uri
Klausenstrasse 4
6460 Altdorf

Projektbearbeitung und Bericht:

Christian Ruckstuhl
inNET Monitoring AG
Dätwylerstrasse 15
6460 Altdorf

Projektbearbeitung und PowerPoint-Präsentation:

Martin J. Fengler
Meteomatics GmbH
Zürcherstrasse 204F
9014 St. Gallen

Raffael Känzig
Phoster GmbH

Projektleitung:

Niklas Joos
Leiter Abteilung Immissionsschutz
Amt für Umweltschutz

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung.....	- 3 -
2	Standorte	- 5 -
3	Meteorologische Bedingungen.....	- 6 -
4	Messgrösse: Lung Deposited Surface Area (LDSA)	- 8 -
4.1	Partector	- 9 -
4.2	Kurzzeitvergleich LDSA mit Feinstaub, Stickoxiden und Russ (Black Carbon).....	- 9 -
5	Resultate und Vergleiche.....	- 12 -
5.1	Vergleich Drohnenmessungen mit Temperaturprofil Erstfeld.....	- 12 -
5.2	Höhenabhängigkeit der Schadstoffbelastung	- 14 -
5.3	Querprofil der Schadstoffbelastung	- 16 -
5.4	Meteorologische Grössen im Tagesverlauf.....	- 18 -
5.5	Einfluss Verkehr auf LDSA	- 20 -
5.6	Drohnenmessungen versus Seilbahn oder Transektmessungen	- 21 -
6	Fazit	- 23 -
7	Anhang	- 24 -
7.1	Inversionswetterbericht von MeteoSchweiz für den 04.12.2014	- 24 -
7.2	Inversionswetterbericht von MeteoSchweiz für den 05.12.2014	- 26 -
7.3	PowerPoint-Präsentation von Meteomatics: Pilotstudie – Schadstoffmessungen.....	- 28 -

1 Einleitung

Das untere Urner Reusstal ist aufgrund der Gotthardtransitachse und seiner von Bergen umgebenen Lage erhöhten Luftschadstoffimmissionen ausgesetzt. Um die Immissionsbelastung und die meteorologischen Bedingungen zu erfassen und ein Wirkungsmonitoring von Massnahmen durchzuführen, wird seit Jahren an den beiden fest installierten Immissionsmessstandorten Altdorf Gartenmatt und A2 Uri (bei Erstfeld) die Luftbelastung erhoben. Westlich der Messstation A2 Uri befindet sich am Hang ein Temperaturprofil, mit welchem insbesondere Inversionslagen detektiert werden können. Die beiden fest installierten Standorte erlauben in erster Linie die langzeitlichen Veränderungen der Luftbelastung und Grenzwertüberschreitungen zu dokumentieren. Hingegen ist es nicht möglich die räumliche Schadstoffverteilung sowohl in der Vertikale als auch in der Horizontale zu bestimmen. Die Frage betreffend vertikaler Ausbreitung stellt sich insbesondere im Zusammenhang mit der höheren Sensitivität des Alpenraums in Bezug auf Schadstoffe im Vergleich zum Mittelland.

Um bessere Kenntnisse über die räumliche Schadstoffverteilung im unteren Urner Reusstal zu erlangen, wurden im Rahmen des LUBETRAX-Projektes Höhenprofilmessungen (Seilbahn Amsteg – Arni) und verschiedene Querprofilmessungen durchgeführt.¹ In einem MfM-U-Projekt wurden bei Erstfeld Transektmessungen quer zur A2 durchgeführt.² Eine weitere Möglichkeit, die räumliche Immissionsbelastung zu beurteilen, stellt das Flechtenmonitoring dar.³ Dabei wird aufgrund der Flechtensammensetzung und deren Auftretenshäufigkeit auf die allgemeine Luftqualität geschlossen.

Fortschritte in der Messtechnik und Aviatik erlauben es heutzutage, mittels Drohnen relativ einfach Meteo- und Luftschadstoffprofilmessungen durchzuführen. Um die Möglichkeiten dieser neuartigen Technologien zu evaluieren, hat das Amt für Umweltschutz (AfU) Uri von der Firma Meteomatics GmbH im Rahmen eines Pilotprojekts Profilmessungen durchführen lassen. Diese Messungen sind in der Form einer PowerPoint-Präsentation dokumentiert (Anhang 7.3).⁴

Um die Drohnenmessungen in den Gesamtrahmen der langjährigen Immissions- und Meteomessungen im unteren Urner Reusstal einzuordnen, beauftragte das AfU Uri die Firma inNET Monitoring AG die Messungen zu begleiten und folgende Punkte zu untersuchen:

- Vergleich des Drohnen temperatur- und -feuchteprofils mit dem fest installierten Temperaturprofil von Erstfeld
- Vergleich der Drohnenschadstoffmessungen mit den Seilbahnprofilmessungen des LUBETRAX-Projekts
- Vergleich der Drohnenschadstoff-Transektmessungen mit MfM-U-Transektmessungen
- Einfluss des Verkehrsaufkommens und der Verkehrszusammensetzung auf die Drohnenschadstoffmessungen

¹ Die räumliche Verteilung der Stickoxide und des Feinstaubes im Urner Reusstal während winterlicher Inversionslagen, LUBETRAX, ökoscience, Amt für Umweltschutz Uri, 1999

² Immissionsgradienten an der Autobahn A2 im Urner Reusstal bei Erstfeld, ökoscience, 2009

³ Luftqualitätsuntersuchungen mit Flechten im Kanton Uri. Unteres Urner Reusstal - Ersterhebung 2008, AGB Arbeitsgemeinschaft für Bioindikation, 2010

⁴ Pilotstudie – Schadstoffmessungen, Meteomatics GmbH, 18.12.2014

- Zusammenhang zwischen Schadstoffkonzentration und Inversionsstärke
- Gesamtrelevanz von Kurzzeit-Drohnenmessungen für lufthygienische Fragestellungen

Der vorliegende Bericht enthält im Fazit (Kapitel 6) auch eine Empfehlung, ob und in welcher Art weitere Drohnenmessungen helfen können, aktuelle lufthygienische Fragestellungen zu beantworten.

2 Standorte

Abbildung 1 zeigt die für das Pilotprojekt relevanten Messeinrichtungen: Die gelben Punkte stellen das Temperaturprofil, der blaue Punkt die MfM-U-Messstation A2 Uri, der rote Punkt den Standort der Drohnen-Vertikalflüge und der rote Strich die Drohnen-Horizontalflüge dar.

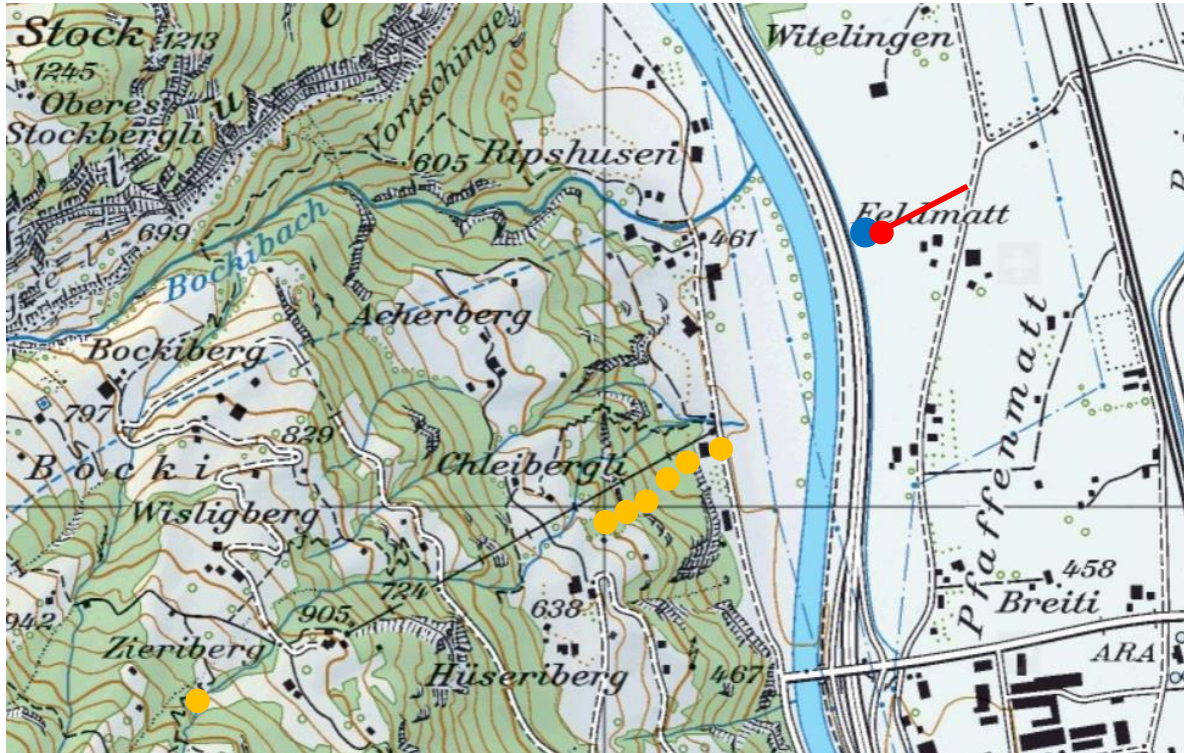


Abbildung 1: Standort MfM-U-Messcontainer A2 Uri (blauer Punkt), Temperaturprofil Erstfeld (gelbe Punkte), Drohnenvertikalprofil (roter Punkt) und Drohnenhorizontalprofil (rote Linie).

3 Meteorologische Bedingungen

Die Flüge wurden am 04./05.12.2014 jeweils zwischen 04:30 Uhr und 10:00 Uhr durchgeführt. Diese Zeitspanne deckt die stärkste frühmorgendliche Bodeninversion ab. An beiden Tagen bestimmten ein Tief im Mittelmeerraum und ein Hoch über Osteuropa das Wetter im Alpenraum. Eine bestehende Inversionslage über den Alpen ohne grossen Luftmassenwechsel blieb vorherrschend. Die Inversionsuntergrenze wurde für den 04.12.2014 auf 800 bis 1000 m ü. M. und für den 05.12.2014 auf 600 bis 900 m ü. M. prognostiziert (siehe auch Anhang 7.1 und Anhang 7.2).⁵ Für beide Tage wurde die Inversionsstärke auf mittelstark (Temperaturgradient 2 bis 3.9°C pro 200 m) prognostiziert und es wurde eine zeitweilige Bodeninversion vorhergesagt, welche teilweise auch schwach aufgetreten ist.

Die meteorologischen Bedingungen sind in Abbildung 2 und Abbildung 3 anhand von Webcam-Aufnahmen visualisiert.



Abbildung 2: Webcam-Aufnahme vom 04.12.2014 um 10:00 Uhr von Altdorf Richtung Attinghausen mit aktueller Feinstaubbelastung (links) und Temperaturprofil (rechts).⁶

⁵ Inversionsbericht für die Zentral- und Ostschweiz, MeteoSchweiz, 03.12.2014 und 04.12.2014

⁶ <http://inversion.innetag.ch/>

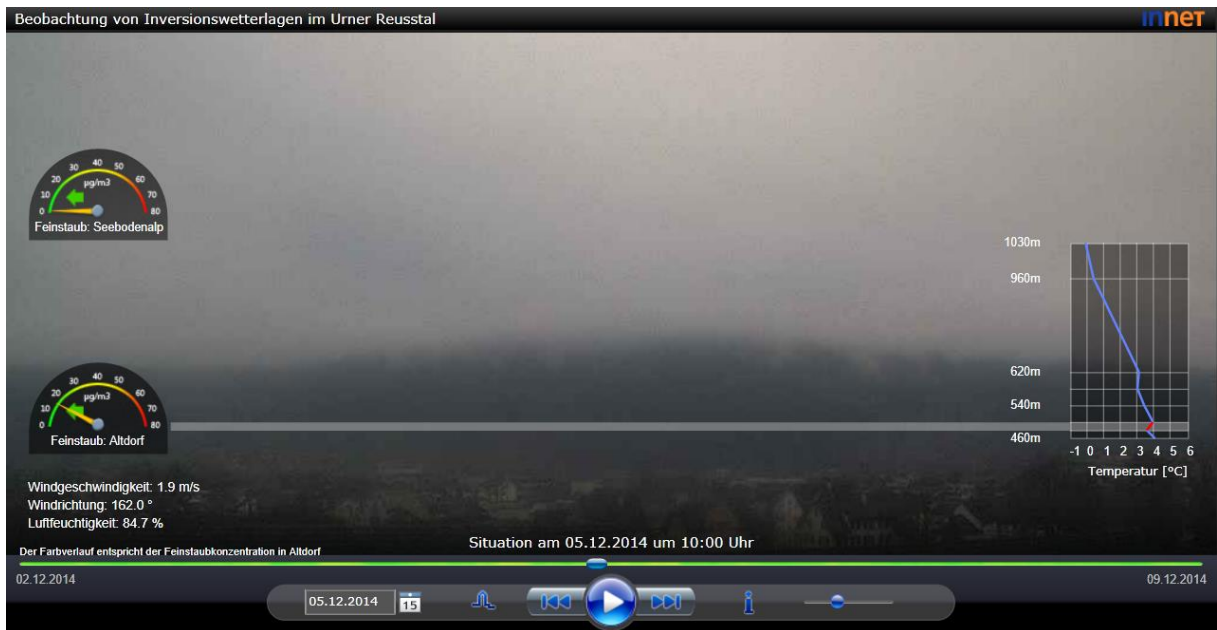


Abbildung 3: Webcam-Aufnahme vom 05.12.2014 um 10:00 Uhr von Altdorf Richtung Attinghausen mit aktueller Feinstaubbelastung (links) und Temperaturprofil (rechts).⁶

4 Messgrösse: Lung Deposited Surface Area (LDSA)

Als Schadstoffparameter wurde die Lung Deposited Surface Area (LDSA) erfasst. Die LDSA steht für die Summe der gesamten Partikeloberfläche pro Luftvolumen, meist erfasst in $\mu\text{m}^2 \text{cm}^{-3}$. Da die Partikeloberfläche relevant für gesundheitliche Auswirkungen auf den Körper ist, stellt sie (wenn auch in Studien relativ selten verwendet) ein wertvolles Mass für Gesundheitsstudien und Arbeitsplatzsicherheit dar.⁷

Im Bereich Immissionsschutz ist die LDSA eine wenig bekannte Grösse und es existieren auch keine Grenzwerte in der Luftreinhalteverordnung (LRV). Um sich trotzdem ein Bild von der LDSA machen zu können, ist in Abbildung 4 der relative Verlauf der Grössen Feinstaub PM10 und PM2.5, der Partikeloberfläche (surface area) und der Partikelanzahl (number) als Funktion der Distanz zur Autobahn dargestellt⁸. Die Partikelanzahl zeigt den stärksten Gradienten, die grösste Feinstaubfraktion PM10 den geringsten. Die Partikeloberfläche zeigt auch eine relativ starke Abklingfunktion, was damit zusammenhängt, dass kleine Partikel im Vergleich zu grossen eine grosse Oberfläche in Bezug zur Masse aufweisen.

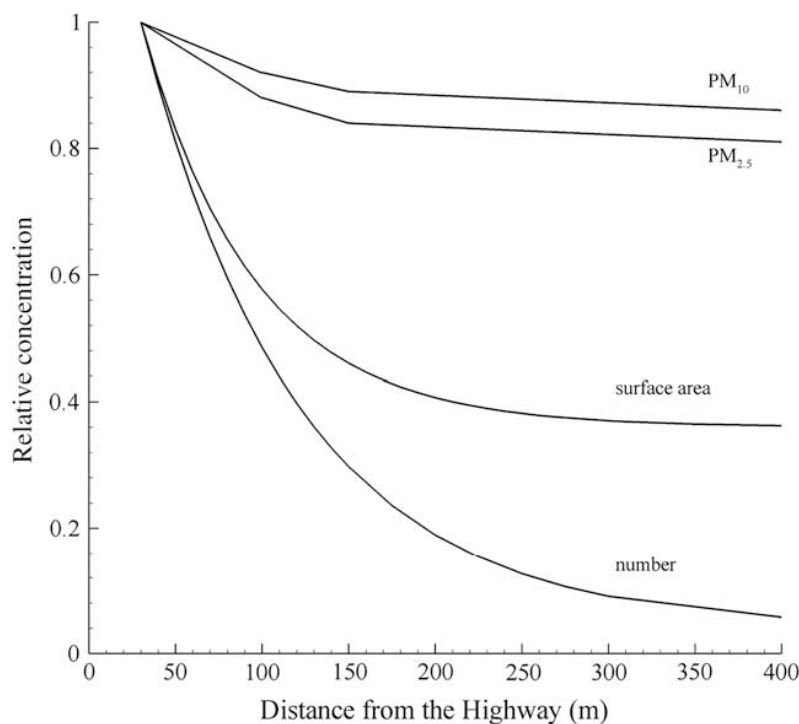


Abbildung 4: Relative Konzentration von PM10, PM2.5, Partikeloberfläche und Partikelanzahl in Abhängigkeit von der Distanz zu einer Autobahn.⁸

⁷ <http://www.naneos.ch/pdf/LDSA.pdf>

⁸ Temporal size distribution and concentration of particles near a major highway, Buonanno G. et al., Atmospheric Environment, 43, 1100–1105, 2009

4.1 Partector

Die LDSA-Messungen wurden mit dem Partector der Firma naneos particle solutions gmbh durchgeführt.⁹ Das Messprinzip beruht auf elektrischer Ladung der Partikel und anschliessender Messung des induzierten Stromes. Die wichtigsten Kenndaten des Partectors sind:

- Konzentrationsbereich: 1 bis 20'000 $\mu\text{m}^2 \text{cm}^{-3}$
- Partikelgrössenbereich: 10 nm bis 10 μm
- Zeitliche Auflösung: 1 s
- Gewicht: 440 g



Abbildung 5: Partector der Firma naneos

4.2 Kurzzeitvergleich LDSA mit Feinstaub, Stickoxiden und Russ (Black Carbon)

Wie schon in Abbildung 4 gezeigt, weisen die Partikeloberfläche und der Feinstaub recht unterschiedliche Abklingfunktionen auf. Um trotzdem die LDSA besser in Bezug zu den gängigen Immissionsgrößen setzen zu können, wurde während einer Woche an der MfM-U-Messtation A2 Uri der Partector betrieben. In Abbildung 6 bis Abbildung 8 sind jeweils der Verlauf (links) und die Korrelation (rechts) von LDSA und Feinstaub (PM10), LDSA und Stickoxiden (NO_x) sowie LDSA und Russ (Russ gemessen als Black Carbon [BC]) dargestellt. Die zeitliche Auflösung der dargestellten Messwerte beträgt 30 Minuten. Insbesondere weist die LDSA mit Russ eine sehr hohe Korrelation ($R^2 = 0.91$) auf. Dass Russ die höchste Korrelation mit der LDSA aufweist, ist insofern nicht überraschend, da Russpartikel in der Regel kleiner als 100 nm sind und bei der LDSA kleine Partikel überproportional stark gewichtet sind.

⁹ www.naneos.ch

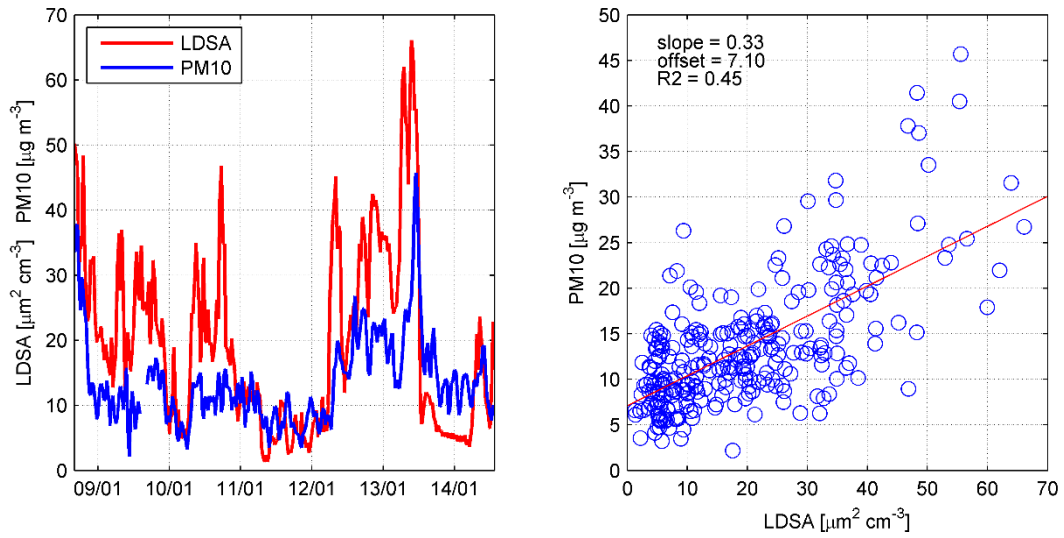


Abbildung 6: Verlauf (links) und Korrelation (rechts) von LDSA und PM10 vom 08.01.2015, 16:00 Uhr bis 14.01.2015, 13:00 Uhr an der Messstation A2 Uri.

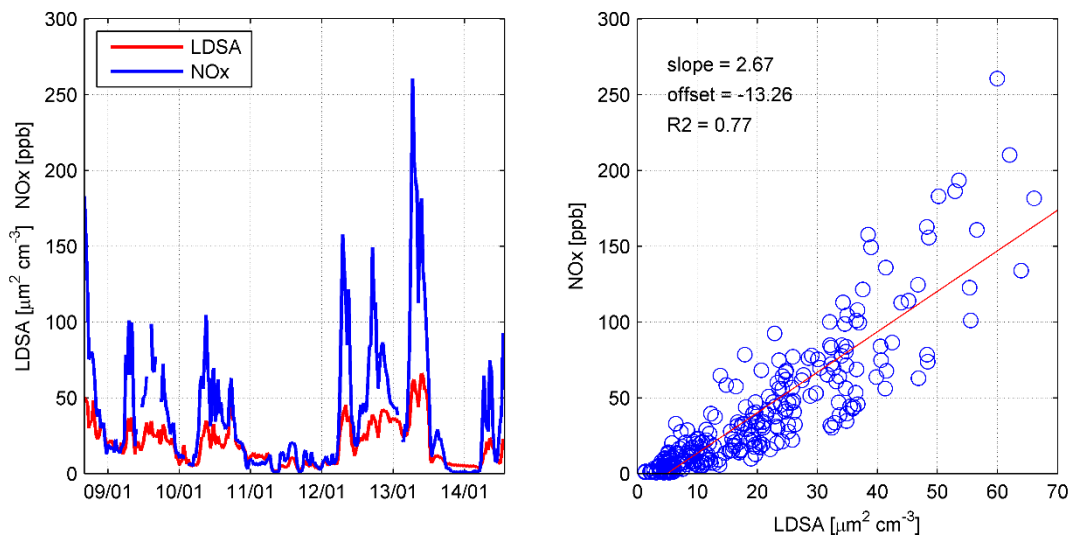


Abbildung 7: Verlauf (links) und Korrelation (rechts) von LDSA und NO_x vom 08.01.2015, 16:00 Uhr bis 14.01.2015, 13:00 Uhr an der Messstation A2 Uri.

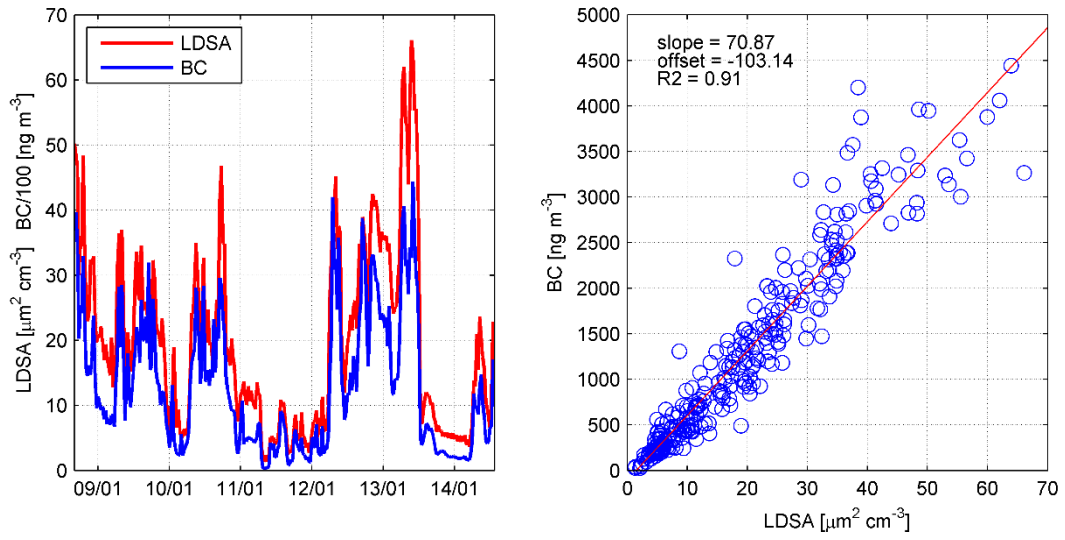


Abbildung 8: Verlauf (links) und Korrelation (rechts) von LDSA und Russ (gemessen als Black Carbon [BC]) vom 08.01.2015, 16:00 Uhr bis 14.01.2015, 13:00 Uhr an der Messtation A2 Uri.

5 Resultate und Vergleiche

5.1 Vergleich Drohnenmessungen mit Temperaturprofil Erstfeld

Die Temperaturprofile der Drohnen- und der Hangmessungen zeigen für sämtliche Zeitpunkte (hier nicht dargestellt) und folglich auch für das Tagesmittel sehr gut übereinstimmende Gradienten (Abbildung 9). Aufgrund der meteorologischen Bedingungen sind im Mittel innerhalb des gemessenen Höhenbereichs keine Inversionslagen feststellbar.

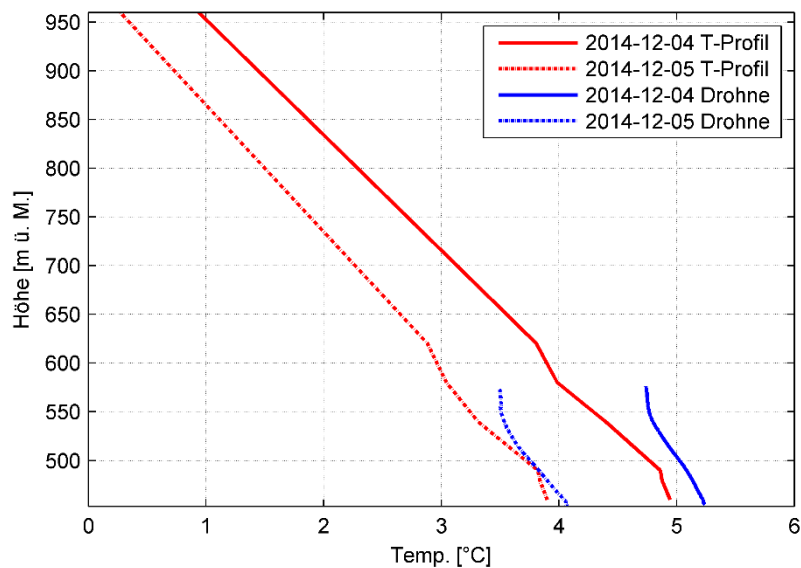


Abbildung 9: Gemittelte Temperaturgradienten des fest installierten Temperaturprofils (rote Kurven) und der Drohnenmessungen (blaue Kurven) vom 04. und 05.12.2014 jeweils zwischen 4 und 10 Uhr morgens.

An einzelnen Zeitpunkten sind hingegen schwache Bodeninversionen aufgetreten. Eine solche Bodeninversion ist exemplarisch für den 04.12.2014 um 7:00 Uhr in Abbildung 10 dargestellt. Sowohl die Drohnen- als auch die Temperaturprofilmessung zeigen diese Inversionsschicht.

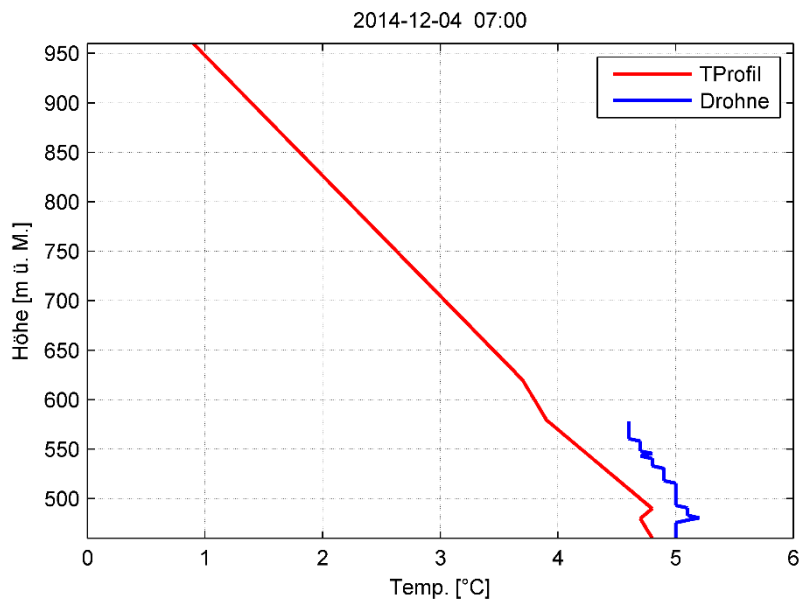


Abbildung 10: Temperaturgradienten des fest installierten Temperaturprofils (rote Kurve) und der Drohnenmessungen (blaue Kurve) am 04.12.2014 um 7:00 Uhr

Hingegen zeigen die Feuchtemessungen der beiden Systeme beachtliche Unterschiede (Abbildung 11). Die qualitätssichernden Parallelmessungen am Temperaturprofil Erstfeld, welche im Jahr 2013 von der inNET Monitoring AG durchgeführt wurden, zeigten, dass die absoluten und relativen Differenzen zwischen den ersten sechs Messpunkten und einem Referenzsensor immer weniger als ein Prozent betragen.¹⁰ Somit kann davon ausgegangen werden, dass zumindest der Gradient des Feuchteprofils von Erstfeld bis auf eine Höhe von 160 m über Grund sehr genau stimmt. Ob nun der Unterschied zwischen Drohnenmessungen und dem Feuchteprofil der fix installierten Sensoren messtechnisch bedingt ist (zum Beispiel Trägheit des Drohnensensors) oder durch lokale Unterschiede der tatsächlichen Feuchte (höhere Luftfeuchte im Wald), ist anhand der vorliegenden Daten nicht abschliessend beurteilbar.

¹⁰ Temperaturprofil Erstfeld – Qualitätssicherung. Bericht zu den Parallelmessungen mit HOBO-Sensoren an den 7 Messpunkten des Temperaturprofils. inNET Monitoring AG, Altdorf, 2015.

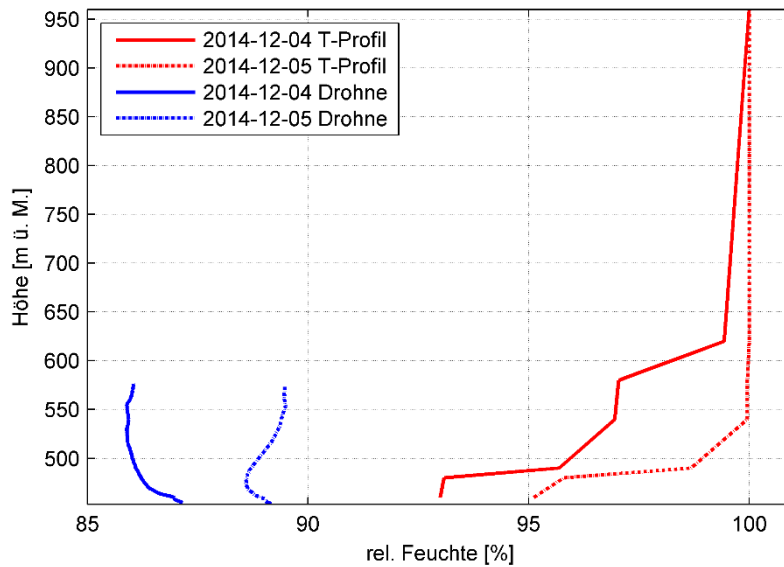


Abbildung 11: Gemittelte Feuchtegradienten des fest installierten Feuchteprofils (rote Kurven) und der Drohnenmessungen (blaue Kurven) vom 04. und 05.12.2014 jeweils zwischen 4 und 10 Uhr morgens.

Fazit

- Temperaturprofilmessungen mit Drohnen sind gut und genau durchführbar.
- Der Vorteil von Drohnenmessungen gegenüber Messungen am Hang ist, dass sie nicht von mikroskaligen Effekten beeinflusst werden.
- Hangprofile haben den Vorteil, dass sie kontinuierlich und online betrieben werden können.
- Feuchtemessungen mittels Drohnen müssten vor weiteren Einsätzen genauer evaluiert werden.

5.2 Höhenabhängigkeit der Schadstoffbelastung

In der LUBETRAX-Messkampagne wurde die Höhenabhängigkeit der Schadstoffbelastung mit Seilbahnmessungen an verschiedenen Tagen im Februar 1998 ermittelt.¹¹ Abbildung 12 zeigt das meteorologisch bedingte sehr unterschiedliche Ausbreitungsmuster der NO_2 -Konzentration während der LUBETRAX-Kampagne. Das Spektrum der Muster umfasst: vertikaler NO_2 -Gradient als Funktion der Tageszeit am 02.02.1998, starke Inversionslage mit Auflösung am frühen Nachmittag mit entsprechender NO_2 -Durchmischung am 03.02.1998, zunehmende Belastung im Tagesverlauf mit relativ

¹¹ Die räumliche Verteilung der Stickoxide und des Feinstaubes im Urner Reusstal während winterlicher Inversionslagen, LUBETRAX, ökoscience, Amt für Umweltschutz Uri, 1999

homogener vertikaler Durchmischung am 04.02.1998 und starke, über den ganzen betrachteten Zeitraum anhaltende Inversion mit schlechter Durchmischung am 05.02.1998. Die beiden Tage mit schlechter Durchmischung beziehungsweise starken Inversionslagen zeigen, dass zumindest an diesen Tagen die Inversionsgrenze auf einer Höhe zwischen knapp 800 und 900 m ü. M. lag.

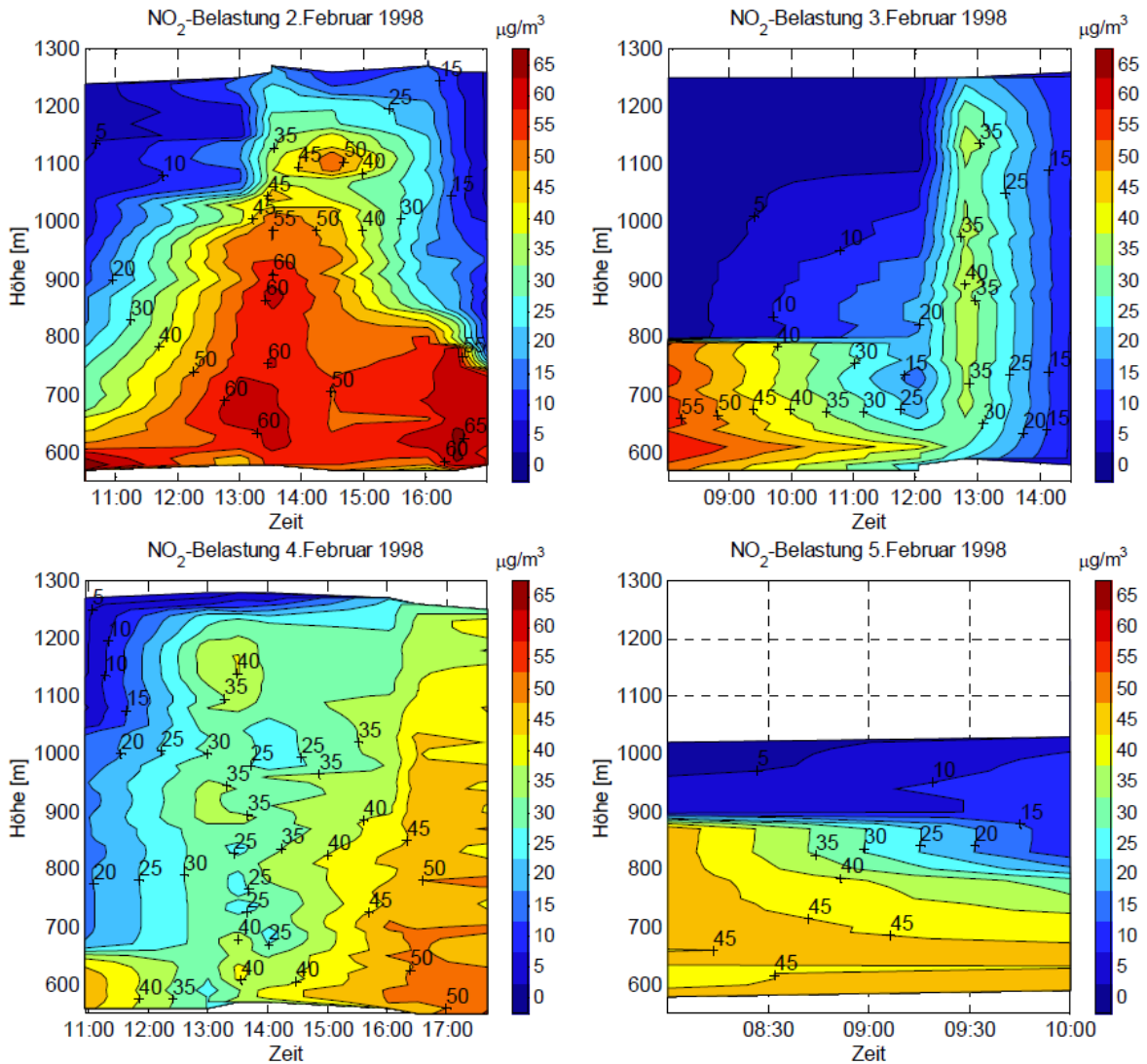


Abbildung 12: Höhenabhängigkeit der NO₂-Belastung zwischen Amsteg und Arnisee, 02.02.1998 bis 05.02.1998.¹¹

Die Drohnenflüge vom 04.12.2014 und 05.12.2014 konnten nur bis auf etwa 560 m ü. M. durchgeführt werden. Folglich wurden alle Messparameter unterhalb der Inversionsuntergrenze erfasst. An den beiden Tagen hat sich auch keine tiefliegende Bodeninversion ausgebildet. Die jeweils von zirka 4 bis 10 Uhr gemittelte höhenabhängige LDSA ist in Abbildung 13 dargestellt. Der relativ stark abnehmende Gradient der LDSA ist vorwiegend auf Verdünnungseffekte zurückzuführen.

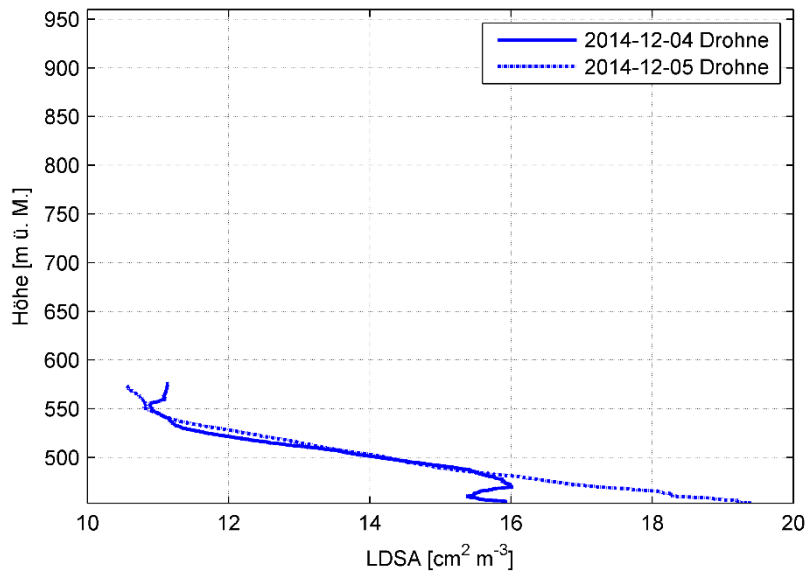


Abbildung 13: Mittlere Vertikalprofile der LDSA, ermittelt mittels Drohnenflügen am 04.12.2014 (ausgezogene Linie) und am 05.12.2014 (gestrichelte Linie) jeweils von 4 bis 10 Uhr morgens.

Fazit

- LDSA-Höhenprofilmessungen mit Drohnen liefern plausible Messdaten.
- Für weiterreichende Interpretationen sind zwingend Messflüge über die Inversionsgrenzen nötig.
- Der Zeitrahmen muss sowohl über den Tag als auch bezüglich Anzahl Tage ausgedehnt werden, um Aussagen über Belastung und Dynamik machen zu können.
- Weitere Messparameter wie NO₂, O₃, PM10 und BC wären für weitere Interpretationen hilfreich, aber nicht zwingend.
- Die Relevanz von Vertikalflügen für den Immissionsschutz-Vollzug ist beschränkt; solche Projekte sind eher für die angewandte Forschung von Bedeutung.

5.3 Querprofil der Schadstoffbelastung

Im Rahmen des MfM-U-Projekts wurden aufwändige Gradientmessungen bei der Messstation A2 Uri durchgeführt.¹² Im Abstand von 50 m, 100 m, 200 m und 415 m zur Autobahn wurden periodisch zeitlich hochaufgelöste Messungen vorgenommen. Entlang des praktisch identischen Profils (etwas gekürzt) haben nun auch die Drohnenmessungen stattgefunden. Abbildung 14 zeigt die normierten Abklingfunktionen von NO₂ und der Partikelkonzentration zu verschiedenen Tagesperioden während der Wintermonate 2008 und 2009. Bei beiden Stoffen ist die Abklingfunktion während des Tages bei

durchschnittlich besserer Durchmischung stärker ausgeprägt als während der Nacht. Im Weiteren zeigt die Partikelkonzentration einen stärkeren Gradienten als die NO₂-Konzentration.

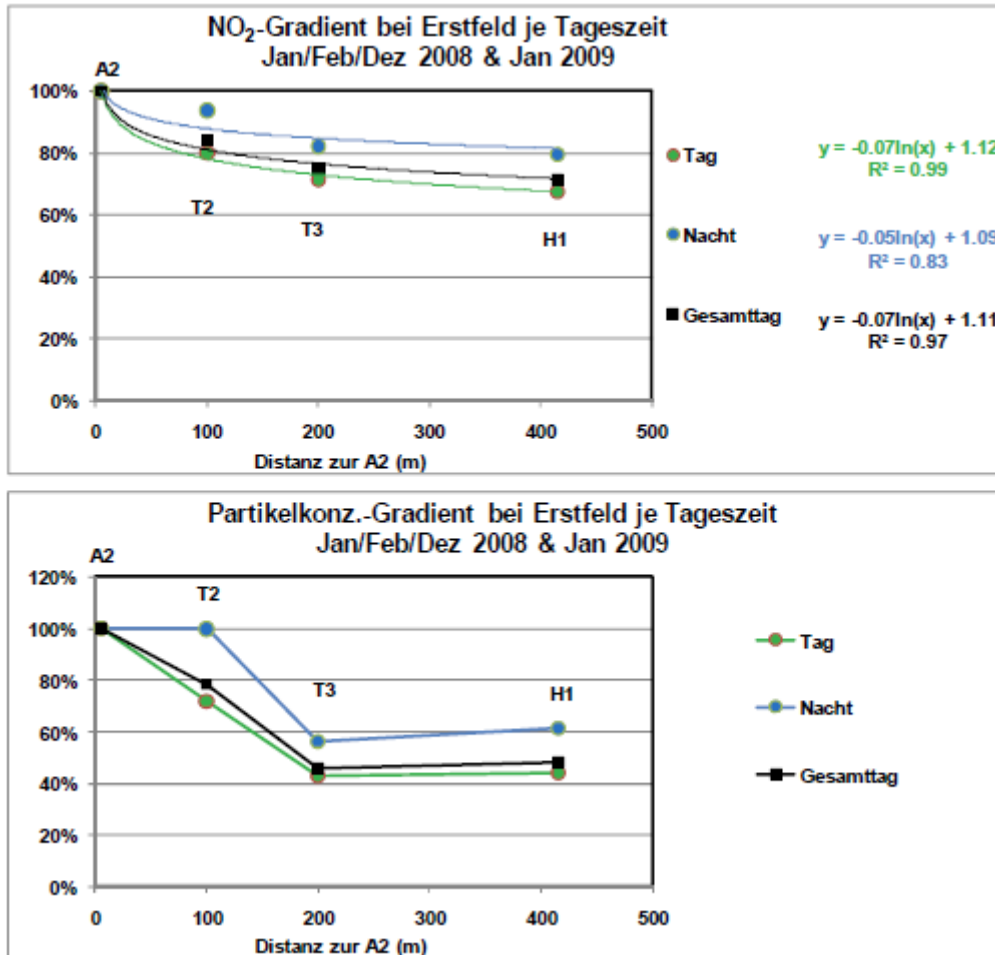


Abbildung 14: Gradienten von NO₂- und Partikelkonzentration, unterteilt nach Tag, Nacht und Gesamttag für die Monate Januar 2008, Februar 2008, Dezember 2008 und Januar 2009.¹²

Das LDSA-Querprofil ist in Abbildung 15 anhand gemittelter Absolutwerte für die beiden Messtage dargestellt. Aufgrund einer relativ geringen Anzahl Querflüge und infolge von LDSA-Datenausfällen ist das Querprofil vom 04.12.2014 mit Vorsicht zu betrachten. Aufgrund der nur wenige Stunden dauernden Messungen ist es nicht möglich, die hier ermittelten Abklingfunktionen mit den Gradienten aus der ökoscience-Studie zu vergleichen. Es scheint anhand dieser kurzen Messungen aber trotzdem, dass innerhalb der ersten 60 Meter die LDSA-Konzentration markant abnimmt (siehe auch Folie 26 in Anhang 7.3), was auch in Übereinstimmung mit der Abklingfunktion in der Abbildung 4 ist.

¹² Immissionsgradienten an der Autobahn A2 im Urner Reusstal bei Erstfeld, ökoscience, 2009

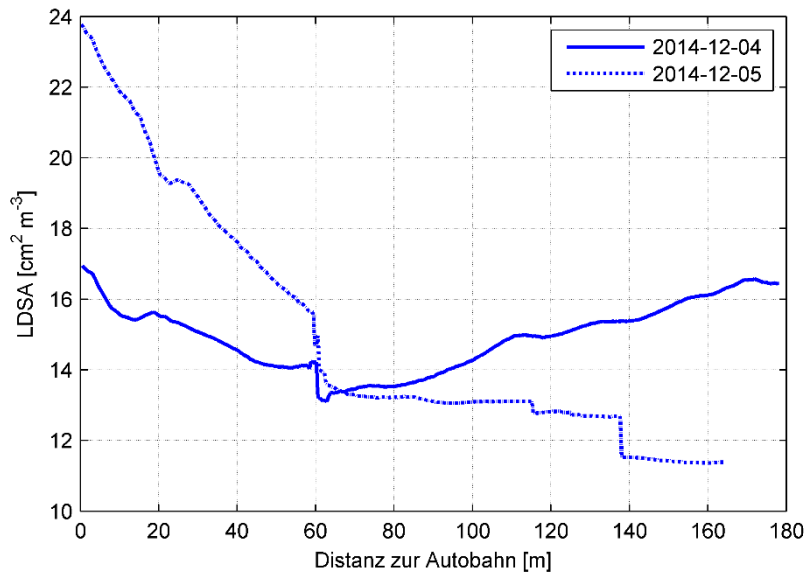


Abbildung 15: Abklingfunktion der LDSA am 04.12.2014 (ausgezogene Linie) und am 05.12.2014 (gestrichelte Linie), jeweils gemittelt von 4 bis 10 Uhr morgens als Funktion der Distanz zur Autobahn A2.

5.4 Meteorologische Grössen im Tagesverlauf

Der zeitliche Temperaturverlauf wenige Meter über Grund ist in Abbildung 16 dargestellt. Die Drohnemessungen zeigen eine gute Übereinstimmung mit dem fest installierten belüfteten Thygan-VTP6-Sensor¹³ an der Messstation A2 Uri. Der rasche Temperaturanstieg an beiden Morgen geht mit dem Anstieg der Globalstrahlung einher.

¹³ <http://www.meteolabor.ch/meteo-messgeraete/temperatur/>

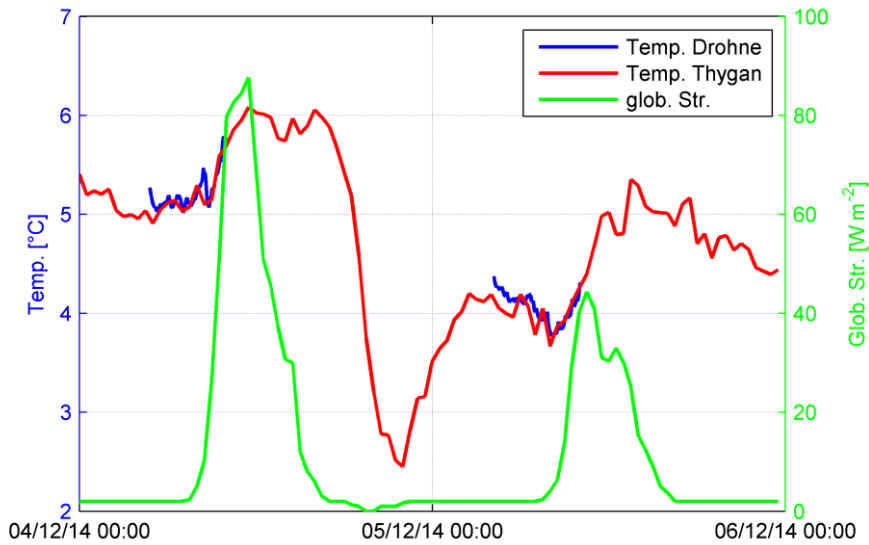


Abbildung 16: Zeitlicher Verlauf der Lufttemperatur der Drohnenmessungen, gemittelt von 3 bis 5 m über Grund (blaue Kurve), und des fix installierten Thygan-Sensors auf 3 m über Grund (rote Kurve), zusammen mit der Globalstrahlung (grüne Kurve).

In Abbildung 17 ist derselbe Verlauf wie in Abbildung 16, aber für die relative Feuchte dargestellt. An beiden Tagen scheint der Startwert der Drohnenmessung relativ tief im Vergleich zur sonst guten Übereinstimmung der beiden Messsysteme. Es ist unklar, inwieweit dieser negative Ausreisser mit der Interpolationsroutine für die Drohnenmessungen oder mit der Trägheit des Sensors zusammenhängt.

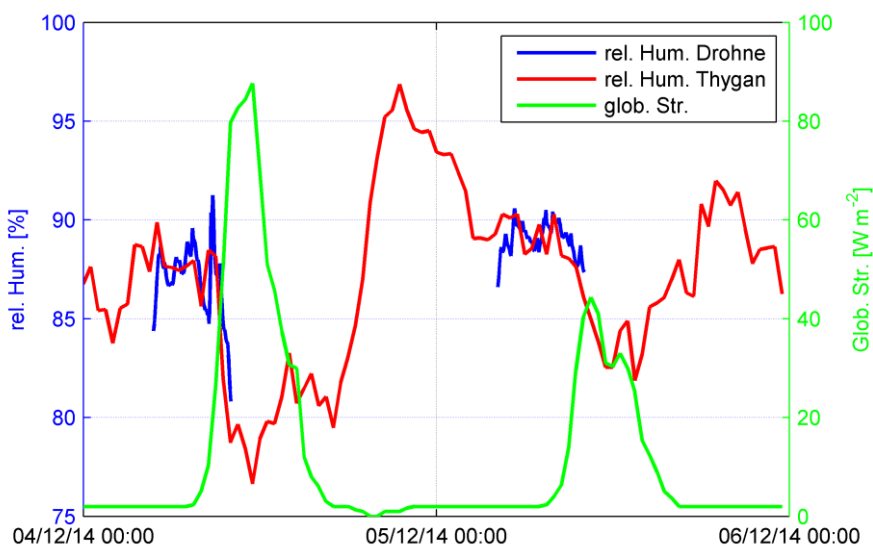


Abbildung 17: Zeitlicher Verlauf der relativen Feuchte der Drohnenmessungen, gemittelt von 3 bis 5 m über Grund (blaue Kurve), und des fix installierten Thygan-Sensors auf 3 m über Grund (rote Kurve), zusammen mit der Globalstrahlung (grüne Kurve).

Der Vergleich der Windgeschwindigkeit aus den Drohnenmessungen (zeitlich gleitend gemittelt von 7 bis 13 m über Grund) zeigt ebenfalls eine relativ gute Übereinstimmung mit dem auf der Messstation A2 Uri fest installierten WNZ-Sensor (Abbildung 18).

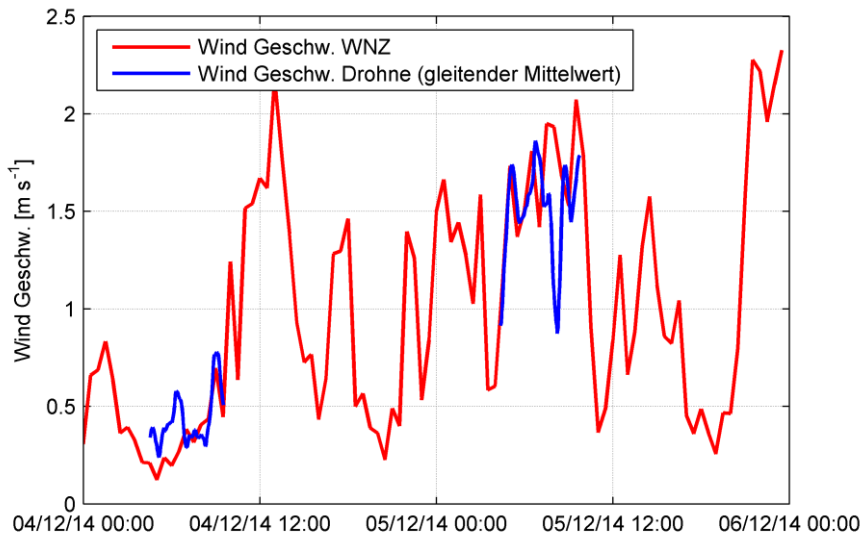


Abbildung 18: Zeitlicher Verlauf der Windgeschwindigkeit (gleitender Mittelwert) der Drohnenmessungen, gemittelt von 7 bis 13 m über Grund (blaue Kurve), und des fix installierten WNZ-Sensors auf 10 m über Grund (rote Kurve).

5.5 Einfluss Verkehr auf LDSA

Hier soll die Frage beantwortet werden, inwiefern die Drohnen- bzw. LDSA-Messungen in Bezug zum Verkehr gesetzt werden können. In Abbildung 19 ist der Verlauf des stündlichen Totalverkehrs (rote Kurve) und der schweren Nutzfahrzeuge SNF (blaue Kurve) als Zeitreihe über die zwei Tage im Dezember 2014 aufgetragen. Die grüne Kurve steht für die LDSA, welche aus dem Mittel über die jeweils ersten zehn Meter der Drohnenvertikalflüge berechnet wurde. Die zeitliche Auflösung der Verkehrsdaten beträgt eine Stunde. Aufgrund der nur sehr kurzen Messdauer mit der Drohne und der geringen zeitlichen Auflösung der Verkehrsdaten ist es schwierig die beiden Größen zueinander in Bezug zu setzen.

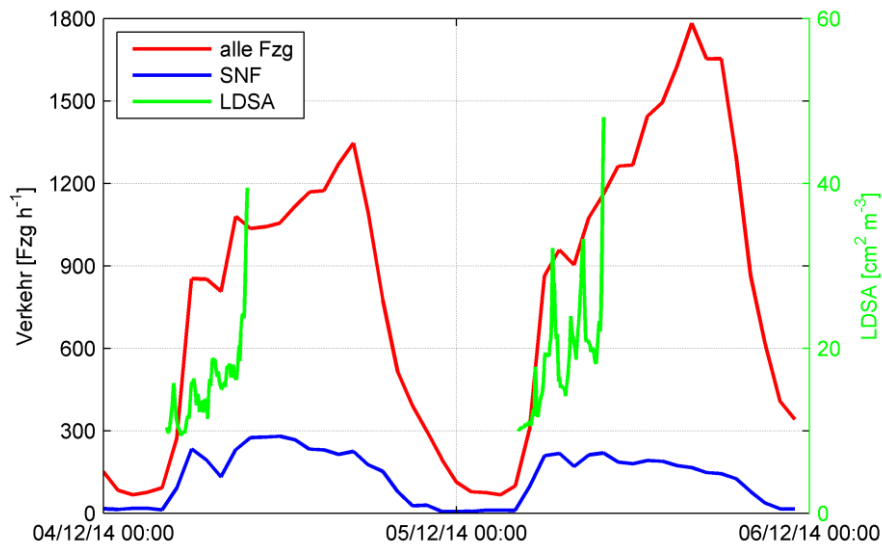


Abbildung 19: Verkehrsaufkommen am 04. und 05.12.2014 an der ASTRA-Zählstelle Erstfeld (251) als Summe beider Fahrrichtungen, zusammen mit der LDSA (Mittel über die ersten 10 Meter der Vertikalflüge).

5.6 Drohnenmessungen versus Seilbahn oder Transektmessungen

Wie erwähnt sind Drohnenmessungen eine von mehreren Möglichkeiten, die räumliche Ausbreitung der Luftschadstoffe und die Meteorologie sowohl in der Horizontale als auch in der Vertikale zu bestimmen. Es stellt sich nun die Frage, welches der Systeme für welche Fragestellung vorteilhaft ist. Vor- und Nachteile sind in Tabelle 1 zusammengestellt.

Tabelle 1: Vor- und Nachteile der verschiedenen Arten, die räumliche und zeitliche Schadstoffverteilung und die Meteorologie zu erfassen.

Messart	Vorteile	Nachteile
Drohne	<ul style="list-style-type: none"> - rasch verschiebbar (z. B. für Standortvergleiche) - Meteo-Messungen unbeeinflusst von kleinräumigen Effekten - zeitlich hoch aufgelöste Messungen möglich (annähernd zeitgleich) - räumlich hoch aufgelöste Messungen möglich - horizontale und vertikale Messungen möglich 	<ul style="list-style-type: none"> - beschränkte Möglichkeiten für Messgeräte aufgrund Gewichtseinschränkungen - Aufwendige Vorabklärungen bezüglich Flugsicherheit - beschränkte Messhöhe - aufwendig für längere Messkampagnen - keine Standardgeräte einsetzbar infolge Gewichtseinschränkungen

Hangprofil fix	<ul style="list-style-type: none"> - langfristiger Betrieb möglich - Daten online verfügbar - breites Messspektrum möglich - genügend hoch aufgelöste Daten 	<ul style="list-style-type: none"> - je nach Messgrösse kostenintensiv - wartungsaufwendig je nach Messgrösse - Beeinflussung durch kleinräumige Effekte möglich (z. B. Wald) - räumlich geringe Auflösung
Hangprofil mit Seilbahn	<ul style="list-style-type: none"> - breites Messspektrum möglich mit bereits vorhandenen Messinstrumenten 	<ul style="list-style-type: none"> - Einschränkungen bei Standortwahl
Transekt fix	<ul style="list-style-type: none"> - langfristige Messungen möglich - breites Messspektrum möglich - Datenerhebung online möglich - gleichzeitige Messungen - hohe Messgenauigkeit dank präzisen Messgeräten 	<ul style="list-style-type: none"> - je nach Ausstattung kostenintensiv - nur horizontale Ausbreitung - hohe Anforderungen an Infrastruktur (Strom und Platzbedarf) - räumliche Ausbreitung ist auf einzelne Messpunkte beschränkt (z. B. Abstand 100 m)
Transekt mit Fahrzeug	<ul style="list-style-type: none"> - breites Messspektrum mit vorhandenen Messinstrumenten möglich 	<ul style="list-style-type: none"> - nur horizontale Ausbreitung
Flechtenanalyse	<ul style="list-style-type: none"> - grosse räumliche Abdeckung möglich - kein Bezug zu LRV-Grenzwerten 	<ul style="list-style-type: none"> - kostenintensiv - beschränkte Auflösung bezüglich Belastung - zeitliche Entwicklung schwierig zu erfassen

6 Fazit

Das Pilotprojekt hat gezeigt, dass Schadstoff- und Meteoromessungen mit Drohnen möglich sind und zumindest für Temperatur und LDSA plausible Messdaten liefern. Um Abklingfunktionen und Höhenabhängigkeiten der Schadstoffbelastung zu quantifizieren, reichen die zwei Messtage à je 5 Stunden nicht aus. Des Weiteren müsste die Flughöhe auf mindestens 1000 m ü. M. oder zur Inversionsgrenze erhöht werden können. Es sei hier angemerkt, dass dieses Pilotprojekt auch nicht dafür ausgelegt war, wissenschaftlich fundierte Aussagen machen zu können. Das Hauptziel war eine Machbarkeits- und Potentialabschätzung von Drohnenflügen im Bereich des Immissionsschutzes.

Der Fokus des Pilotprojekts war innerhalb des Immissionsschutzes auf die Lufthygiene im Strassenverkehrsbereich ausgerichtet. Es gäbe aber weitere mögliche Einsatzgebiete von Drohnenschadstoff- und -Meteoromessungen, welche näher zu prüfen wären:

- *Quer- und Längsprofilmessungen von Luftschadstoffen und meteorologischen Bedingungen bei Grosseinstallationen wie zum Beispiel Holzfeuerungs- oder Industrieanlagen:* In Kombination mit Rückwärtstrajektorien-Modellrechnungen wäre es unter Umständen sogar möglich, die Emissionen von einzelnen Quellen zu quantifizieren. Um die Machbarkeit dieser Idee zu prüfen, müsste ein Pilotprojekt gestartet werden.
- *Staub-Immissionsmessungen im Gebiet von Steinbrüchen:* Immissionsmessungen in horizontaler und vertikaler Richtung können dazu beitragen, die räumliche Ausbreitung solcher Emissionen besser zu quantifizieren und eventuell sogar Abschätzungen bezüglich Emissionen machen zu können.
- *Emissionsmessungen über Kaminen:* Mit genau platzierten Drohnen über Kaminen könnten Emissionsmessungen einfach durchgeführt werden. Dies würde erlauben, unabhängig vom Betriebszustand der Anlage Stichprobenmessungen durchzuführen. Die Herausforderung bei dieser Anwendungsart bestünde darin, die nötige Messausrüstung auf der Drohne zu platzieren.
- *Querprofilmessungen zu Hauptverkehrsachsen zur Quantifizierung der Abklingfunktion:* Automatisierte Flüge auf zirka 2 Metern über Grund würden erlauben, die Abklingfunktion abhängig von der Meteorologie und folglich die Bevölkerungsexposition genauer abzuschätzen. Es bestünde die Möglichkeit, die Abklingfunktionen beispielsweise an den verschiedenen MfM-U-Standorten einander gegenüber zu stellen.
- *Validierung von Immissionsmodellen:* Die Validierung des in-LUFT- und anderer Immissionsmodelle beruht im Allgemeinen auf Punktmessungen. Mit Drohnenmessungen könnte man insbesondere spezielle Geländekammern wie das Muotathal oder Engelberg flächendeckend ausmessen und so die Modelle validieren und Grundlagen für Modellverbesserungen finden. Dazu müsste die Drohne mit PM10-, O₃- und/oder NO₂-Sensoren ausgerüstet werden.
- *Mobile Interventionsmessungen bei Grosseignissen:* Mit einer rasch einsetzbaren Drohne könnte bei einem Grosseignis wie z. B. einem Grossfeuer oder Chemieunfall die Gefährdung der Einsatzkräfte und der Bevölkerung ermittelt werden. Der Einsatz einer Drohne hätte nebst der räumlichen Auflösung zusätzlich den Vorteil, dass sich niemand in den kritischen Abluftbereich begeben müsste, um Messungen durchzuführen.

7 Anhang

7.1 Inversionswetterbericht von MeteoSchweiz für den 04.12.2014

3. Dezember 2014 21:48
MeteoSchweiz, Zürich



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Eidgenössisches Departement des Innern EDI
Bundesamt für Meteorologie und Klimatologie
MeteoSchweiz

Inversionswetterbericht für die Zentral- und Ostschweiz

Allgemeine Lage bis Dienstag, 09.12.2014:

Bis am Freitag bestimmt noch ein Tief über dem Mittelmeerraum das Wetter im Alpenraum. Damit bleibt die Inversionslage in mittleren Höhenlagen erhalten und es kommt zu keinem eigentlichen Luftmassenwechsel. Zeitweise können sich in den Nächten lokale Bodeninversionen bilden. Diese sollten aber meist nur schwach ausfallen und sind von kurzer Dauer. Im Laufe des Samstags bringt eine Kaltfront aus Norden Niederschläge, wobei die Schneefallgrenze gegen 700 Meter, lokal auch tiefer, sinken dürfte. Die Luftmasse wird dabei ausgetauscht, Inversionen sind kaum zu erwarten. Dahinter stellt sich ab Sonntag wahrscheinlich eine West- bis Nordwestlage ein. Damit wird zeitweise feuchte Meeresluft zu den Alpen gesteuert. Sind bringen einige Niederschläge. Dazwischen kommt es auch zu Aufhellungen, wobei sich vorübergehend lokale Bodeninversionen bilden können. Diese lösen aber jeweils wieder schnell auf.

Datum:	heute 04.12.2014	morgen 05.12.2014	Samstag 06.12.2014	Sonntag 07.12.2014	Montag 08.12.2014	Dienstag 09.12.2014
Inversionsuntergrenze	800-1000m	700-900m	--	--	--	--
Mischungsschichthöhe	sinkend	bleibend	--	--	--	
Inversionsstärke	mittel	mittel	keine	keine	keine	keine
Bodeninversionen	zeitweise	zeitweise	keine	zeitweise	zeitweise	zeitweise
Windstärke [m/s]	1-2	1-2	2-3	2-4	3-5	3-5
Windrichtung	NE (Bise)	NE (Bise)	NE (Bise)	W	W	W
Bodentemperatur Kloten	2 / 5	2 / 5	2 / 4	1 / 4	-1 / 4	0 / 5
Temperatur 850 hPa	0	0	0	-4	-7	-5
CAP - Klassen	1	1	1	1	1	2
Luftmassenwechsel	nein	nein	ja	nein	nein	ja

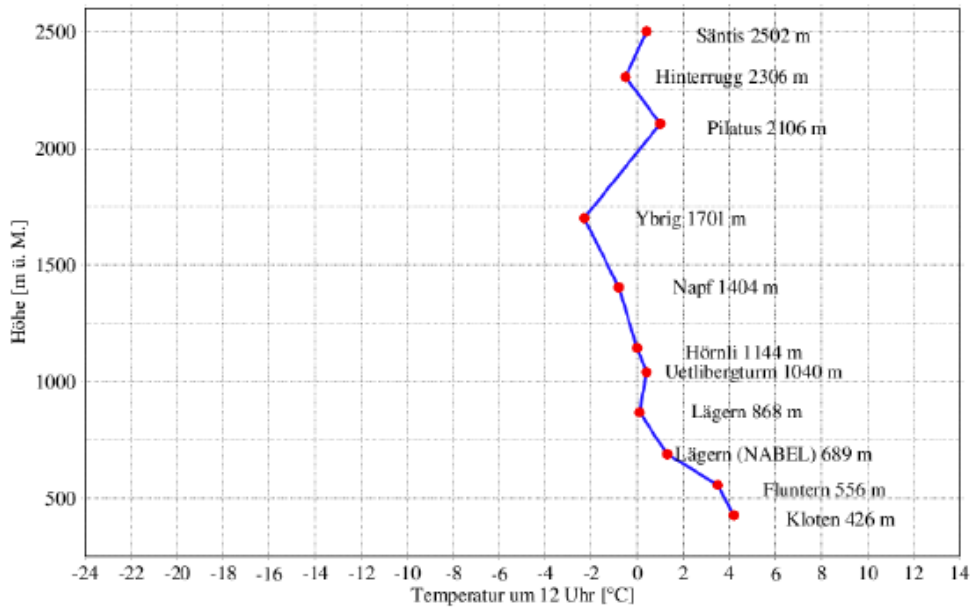
Inversionsstärke: **keine**; **schwach**: 0-1.9 C/200 m; **mässig**: 2-3.9 C/200 m; **stark**: >=4 C/200 m

CAP - Klassen :

1	Indifferente Nordostlage	4	Indifferente Ostlage	7	Zyklonale West-Südwestlage
2	Zyklonale West-Südwestlage, strömungsschwach	5	Hoch über den Alpen	8	Hoch über Mitteleuropa
3	Nördliche Westlage	6	Zyklonale Nordlage	9	Südliche Zyklonale Westlage

Temperaturprofil des Vortages mit Bergstationen

Mittwoch 03.12.2014



Radiosondendaten:

<http://www.meteoschweiz.ch/web/de/klima/messsysteme/atmosphaere/radiosondierungen.html>

Nächste Aktualisierung: Freitag, 05.12.2014, 8 Uhr
Telefonische Rückfragen: 0900 162 333 (24h täglich)

7.2 Inversionswetterbericht von MeteoSchweiz für den 05.12.2014

4. Dezember 2014 19:41
MeteoSchweiz, Zürich



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Eidgenössisches Departement des Innern EDI
Bundesamt für Meteorologie und Klimatologie
MeteoSchweiz

Inversionswetterbericht für die Zentral- und Ostschweiz

Allgemeine Lage bis Mittwoch, 10.12.2014:

Am Freitag dauert die Inversionslage der vergangenen Tag noch an. Im Laufe des Samstags bringt eine Kaltfront aus Norden Niederschläge und einen Luftmassenwechsel, Inversionen sind kaum zu erwarten. Dahinter stellt sich ab Sonntag eine wechselhafte West- bis Nordwestlage ein. Mit häufigeren Luftmassenwechseln dürften sich nur über Nacht zeitweise Bodeninversionen ausbilden.

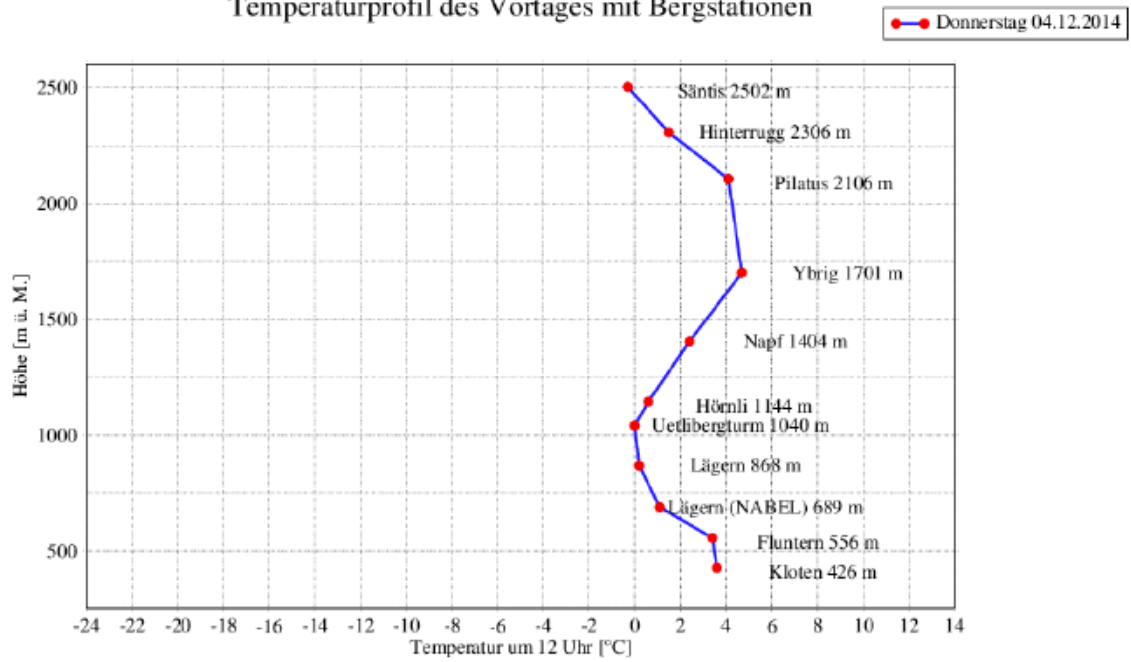
Datum:	heute 05.12.2014	morgen 06.12.2014	Sonntag 07.12.2014	Montag 08.12.2014	Dienstag 09.12.2014	Mittwoch 10.12.2014
Inversionsuntergrenze	600-900m	--	--	--	--	--
Mischungsschichthöhe	steigend	--	--	--	--	--
Inversionsstärke	mittel	keine	keine	keine	keine	keine
Bodeninversionen	zeitweise	keine	zeitweise	keine	keine	zeitweise
Windstärke [m/s]	2-3	2-3	1-2	3-4	3-4	3-4
Windrichtung	NE (Bise)	NE (Bise)	variabel	W	SW	SW
Bodentemperatur Kloten	2 / 5	1 / 4	1 / 3	0 / 3	-1 / 3	1 / 6
Temperatur 850 hPa	4	-3	-4	-4	-7	-1
CAP - Klassen	1	1	4	4	5	3
Luftmassenwechsel	nein	ja	nein	ja	ja	nein

Inversionsstärke: **keine**; **schwach**: 0-1.9 C/200 m; **mässig**: 2-3.9 C/200 m; **stark**: >=4 C/200 m

CAP - Klassen :

1	Indifferente Nordostlage	4	Indifferente Ostlage	7	Zyklonale West-Südwestlage
2	Zyklonale West-Südwestlage, strömungsschwach	5	Hoch über den Alpen	8	Hoch über Mitteleuropa
3	Nördliche Westlage	6	Zyklonale Nordlage	9	Südliche Zyklonale Westlage

Temperaturprofil des Vortages mit Bergstationen



Radiosondendaten:

<http://www.meteoschweiz.ch/web/de/klima/messsysteme/atmosphaere/radiosondierungen.html>

Nächste Aktualisierung:

Samstag, 06.12.2014, 8 Uhr

Telefonische Rückfragen:

0900 162 333 (24h täglich)

7.3 PowerPoint-Präsentation von Meteomatics: Pilotstudie – Schadstoffmessungen

Pilotstudie – Schadstoffmessung



Meteodrones to master the weather.

Meteomatics GmbH
Zürcherstrasse 204F
9014 St. Gallen



Projektleitung:
Dr. Martin J. Fengler, Meteomatics GmbH
Raffael Känzig, Phoster GmbH

Piloten und Engineering:
Christopher Hartmann, Daniel Schmitz

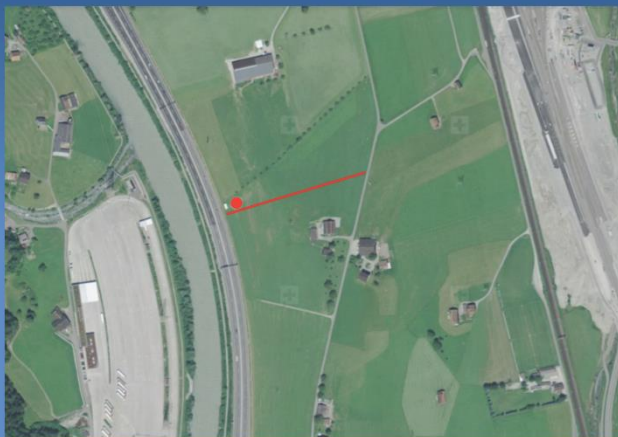
1

LDSA – Lung Deposited Surface Area

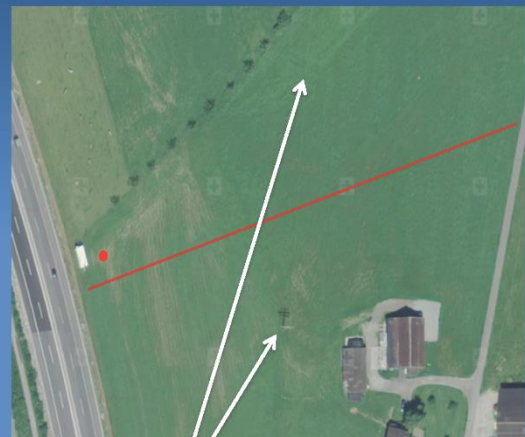
- Mass für gesundheitliche Belastung durch Nanopartikel in der Luft, die in die Lunge gelangen können
- Die Partikeloberfläche ist relevant für die Immunreaktion des Körpers
- LDSA hat die beste Korrelation mit beobachteten Gesundheitsauswirkungen
- Hintergrund: *“Toxic Potential of Materials at the Nanolevel”* von Andre Nel et al. Science 311, 622 (2006)

2

Umgebung



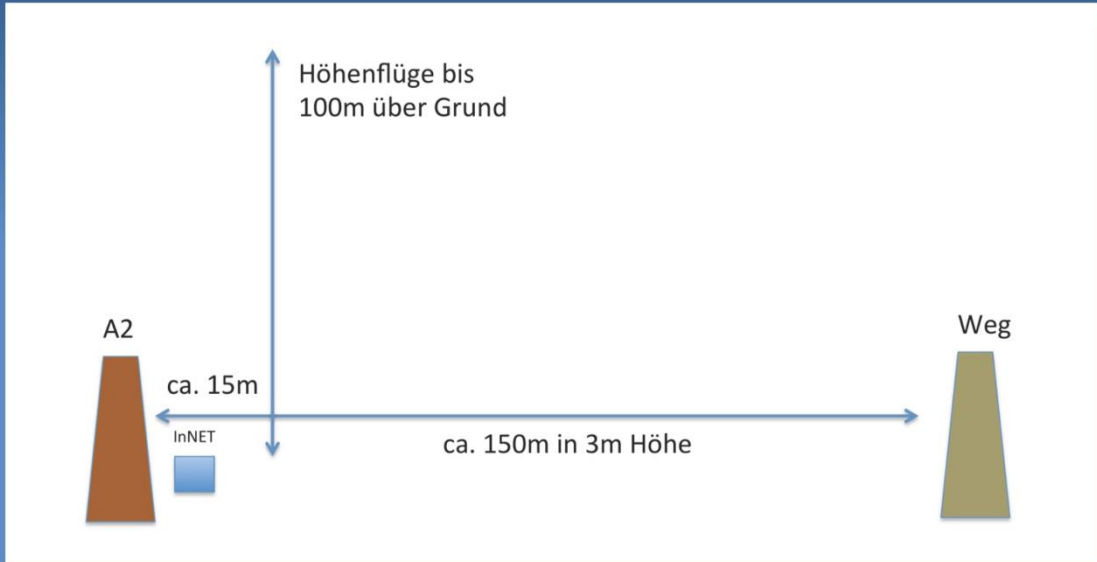
- Luft-Immissionsmessstation Erstfeld
- 750m nördlich von Heliport Erstfeld



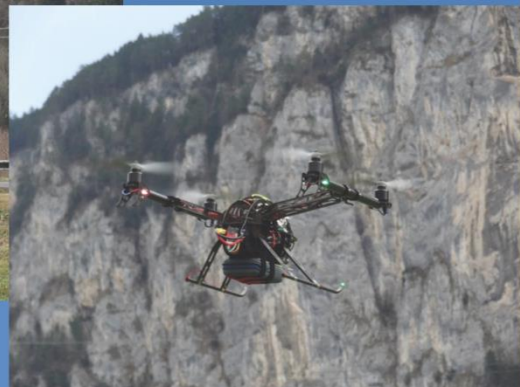
Stromleitung

3

Pilotstudie: geflogenes Setup



Eindrücke vom Fluggerät





Allgemeine Wetterlage

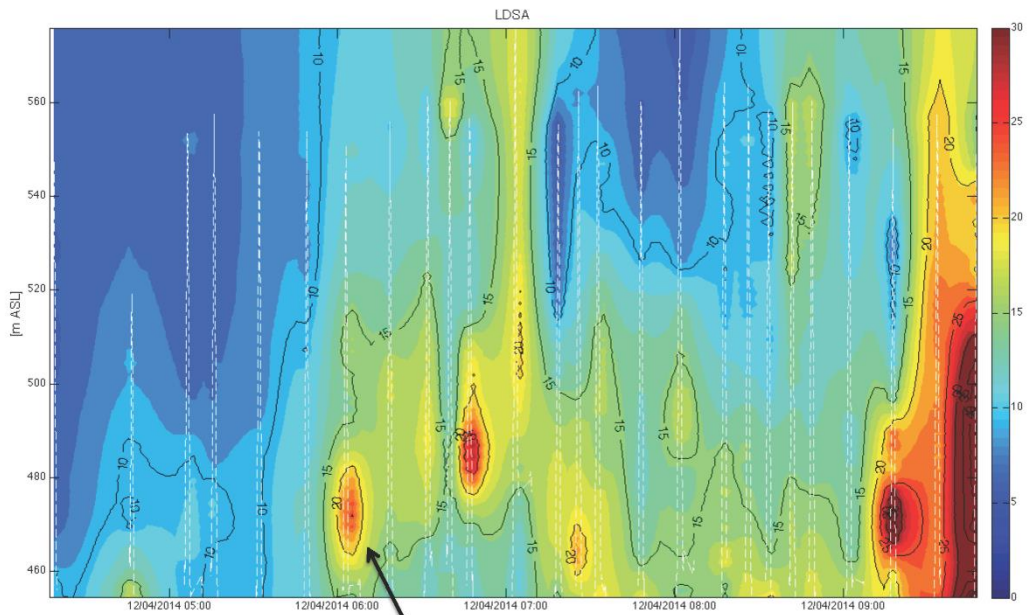
Zwischen einem mächtigen Hoch über Osteuropa und einem Mittelmeertief gelangt kühle Luft von Osten her auf die Alpennordseite, milde und feuchte Luft wird gleichzeitig an die Südseite herangeführt.

Wetterlage am Donnerstag

In der Nacht ist es unterhalb von rund 1000 bis 1300 Metern trüb durch Wolken und Nebel. Es ist weitgehend trocken. Darüber lockert es zunehmend auf, und stellenweise ist es dann während der Nacht nur mehr gering bewölkt bis sternenklar. Am Morgen dann teils sonnig.

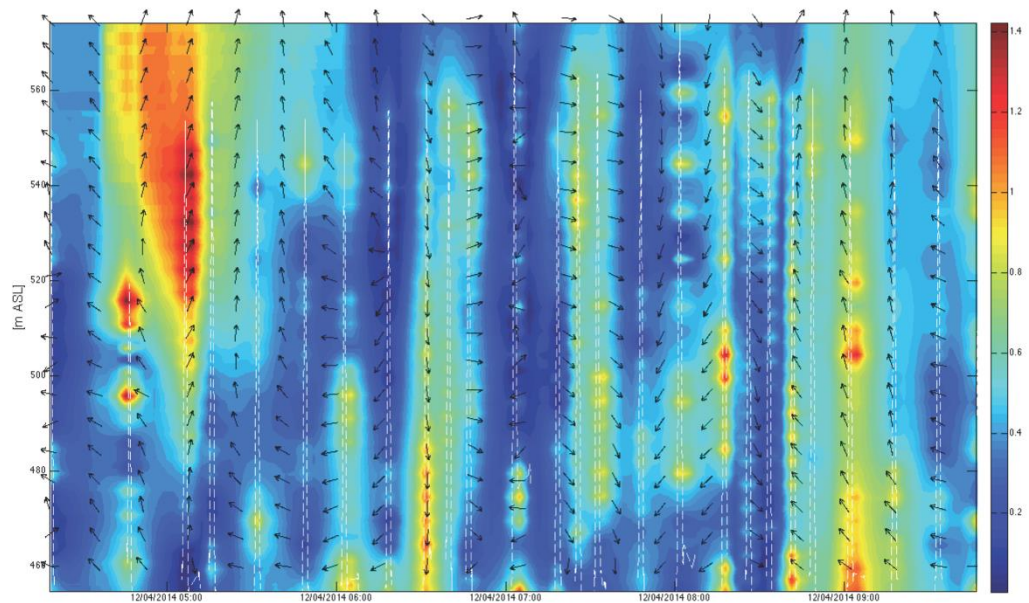
Über dem Mittelland ist es weiterhin trüb.

4.12.2014 – LDSA in [$\mu\text{m}^2/\text{cm}^3$]

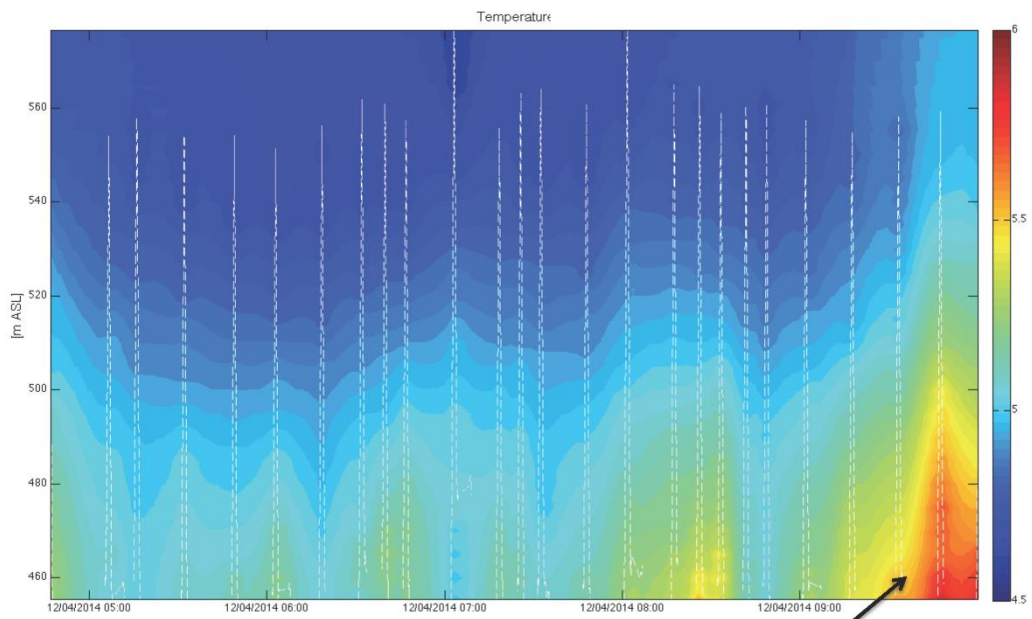


Verkehrszunahme ab 6h

4.12.2014 – Wind in [m/s]



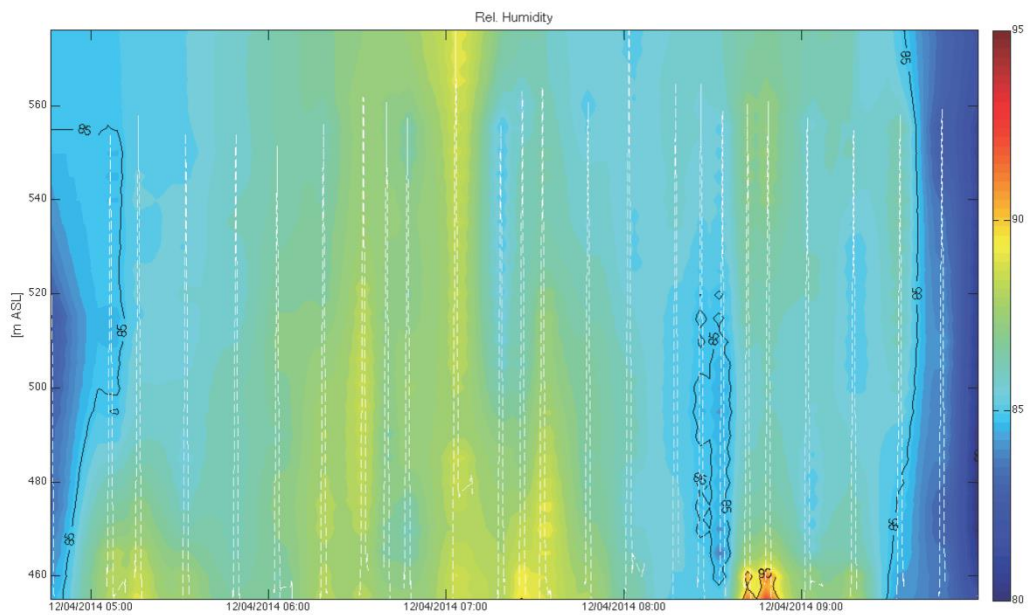
4.12.2014 – Temperatur in [°C]



Sonnenaufgang macht sich bemerkbar

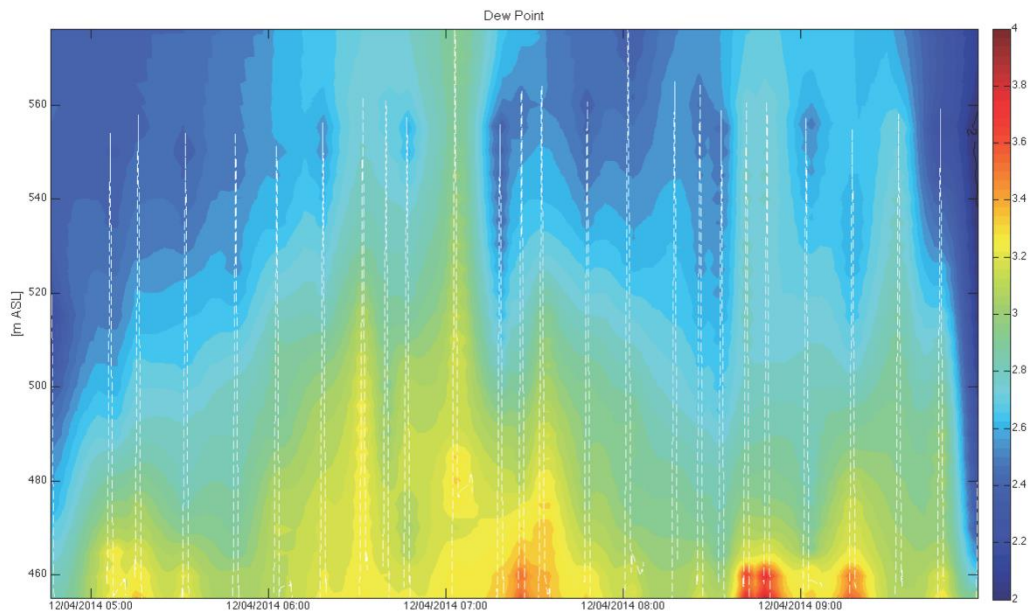
10

4.12.2014 – Relative Feuchte in [%]



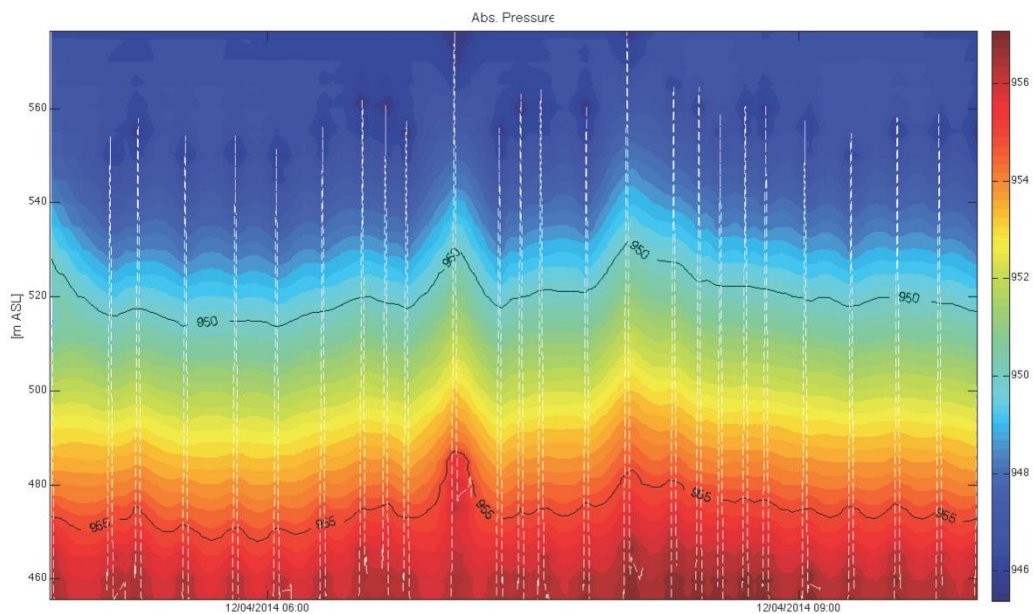
11

4.12.2014 – Taupunkt in [°C]



12

4.12.2014 – Absoluter Luftdruck in [hPa]



13

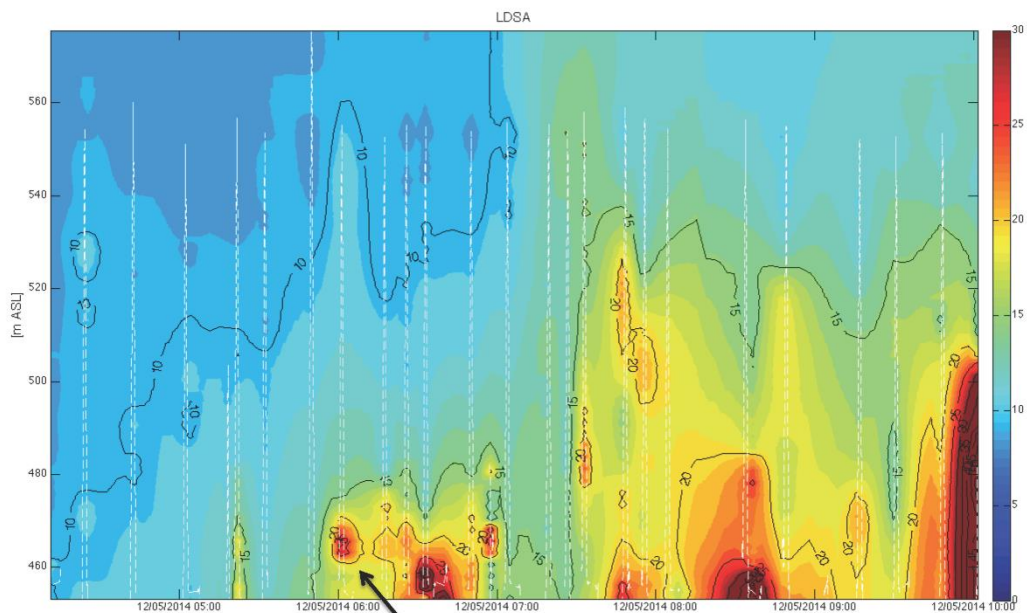
Wetterlage am Freitag

Am Freitag ist es weiterhin hochneblig trüb, abgesehen von örtlichem Nebelnässen aber überwiegend trocken. In den Alpen und oberhalb von 700 bis 1000 Metern scheint oft die Sonne.

Die Temperaturen liegen bei Nebel 2 bis 5 Grad.

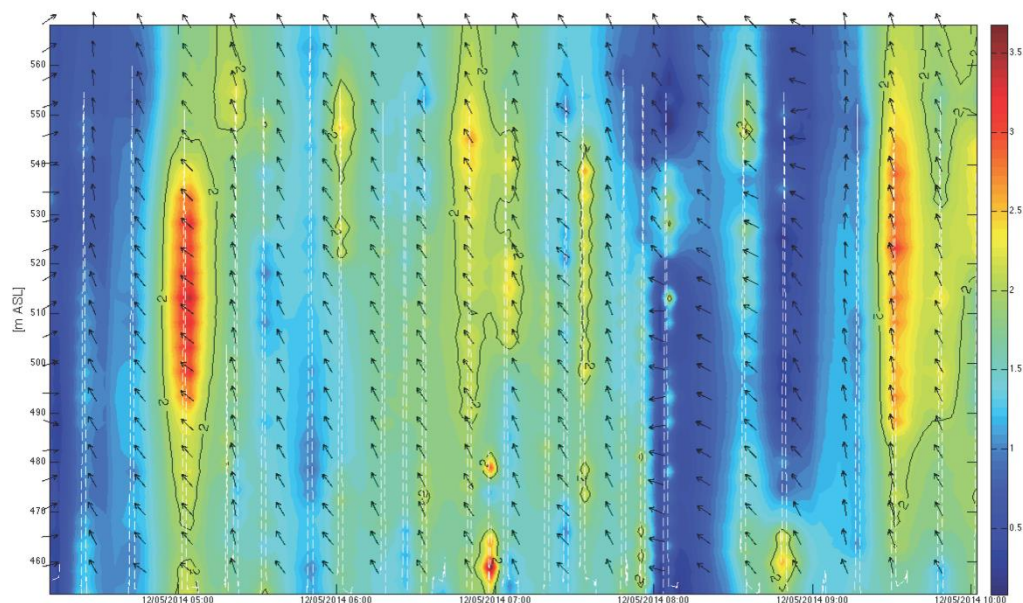
Bis zum Morgen sinkt die Schneefallgrenze auf 500 Meter. Über den Alpen ziehen dichte Wolken auf, es bleibt aber überwiegend trocken.

Im Tagesverlauf setzt sich überall zeitweise die Sonne durch. Dazu ist es kalt: oberhalb etwa 800 Meter Dauerfrost, auf 3000 Meter rund -14 Grad.



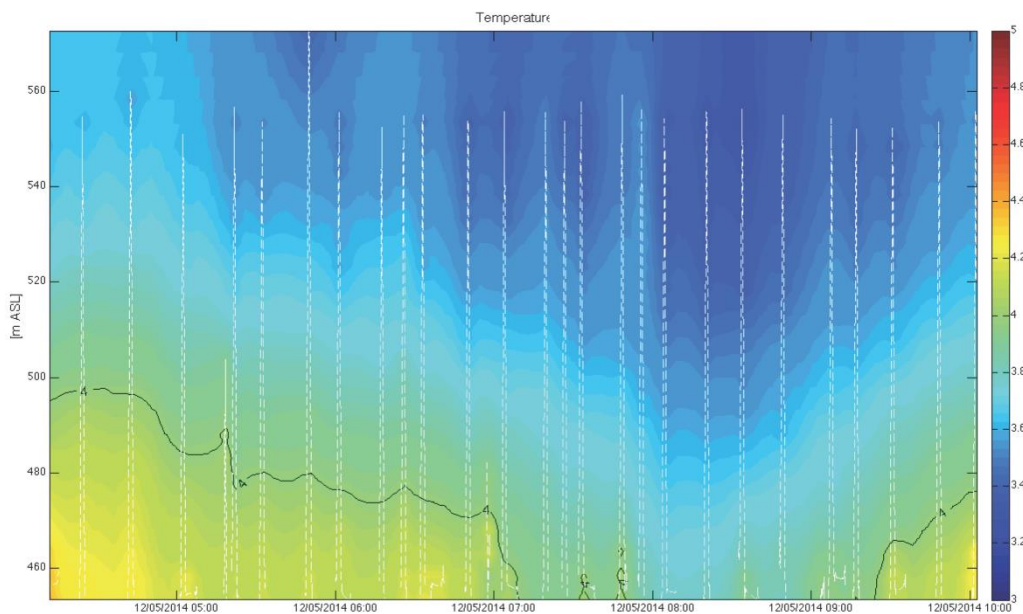
Verkehrszunahme ab 6h

5.12.2014 – Wind in [m/s]



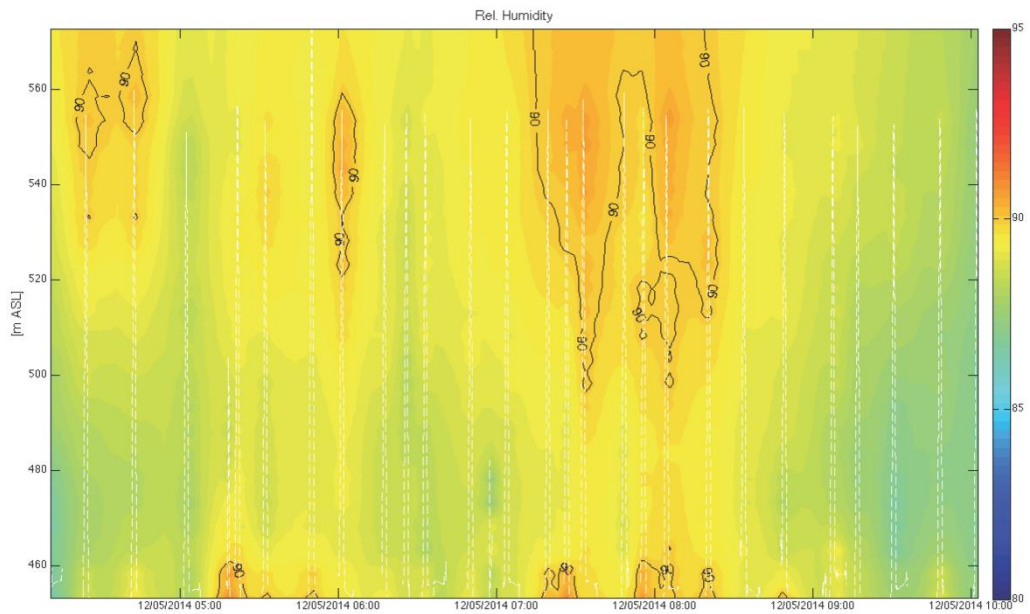
16

5.12.2014 – Temperatur in [°C]



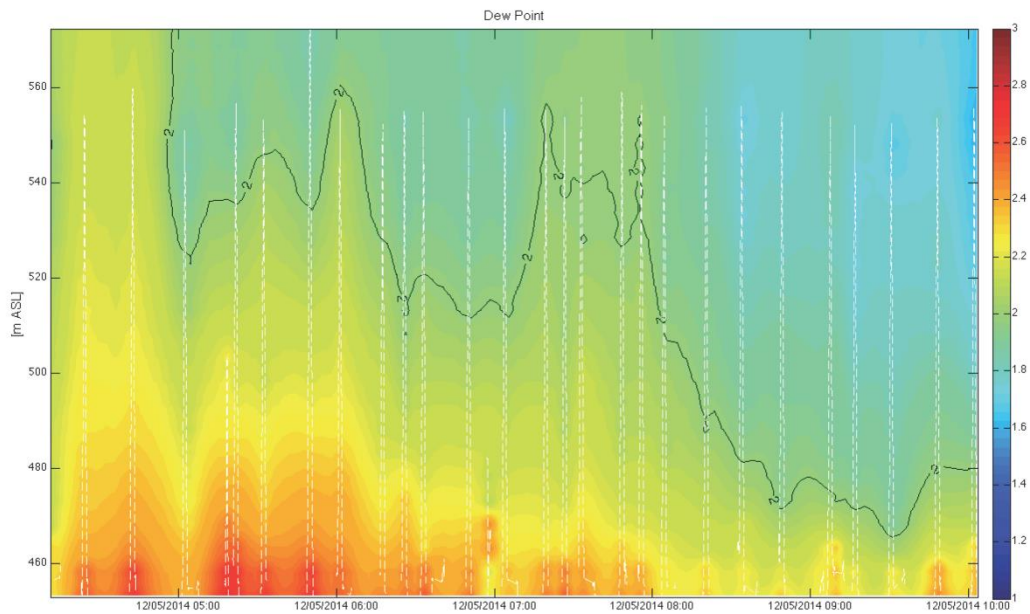
17

5.12.2014 – Relative Feuchte in [%]



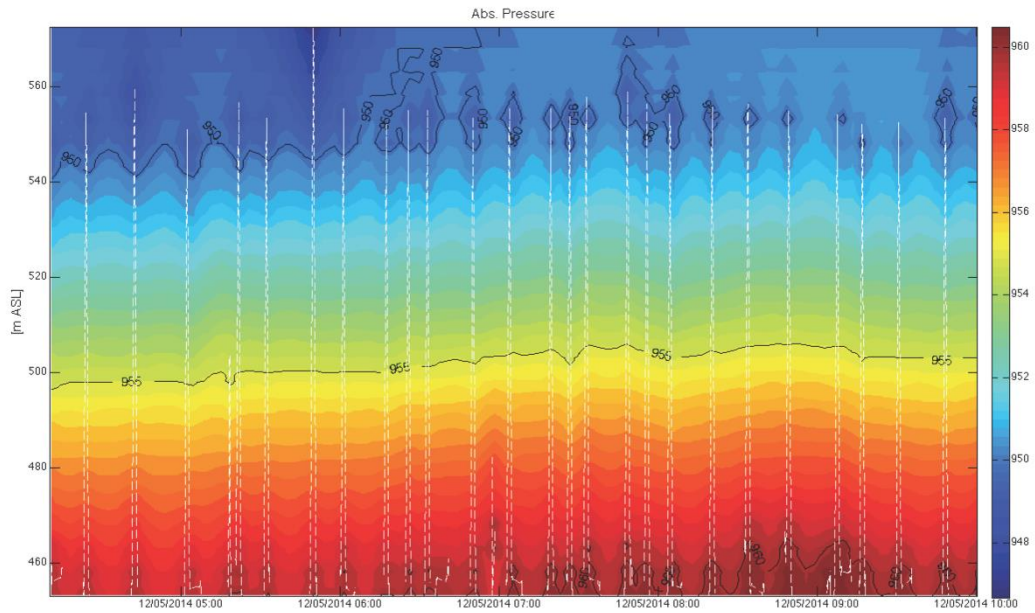
18

5.12.2014 – Taupunkt in [°C]

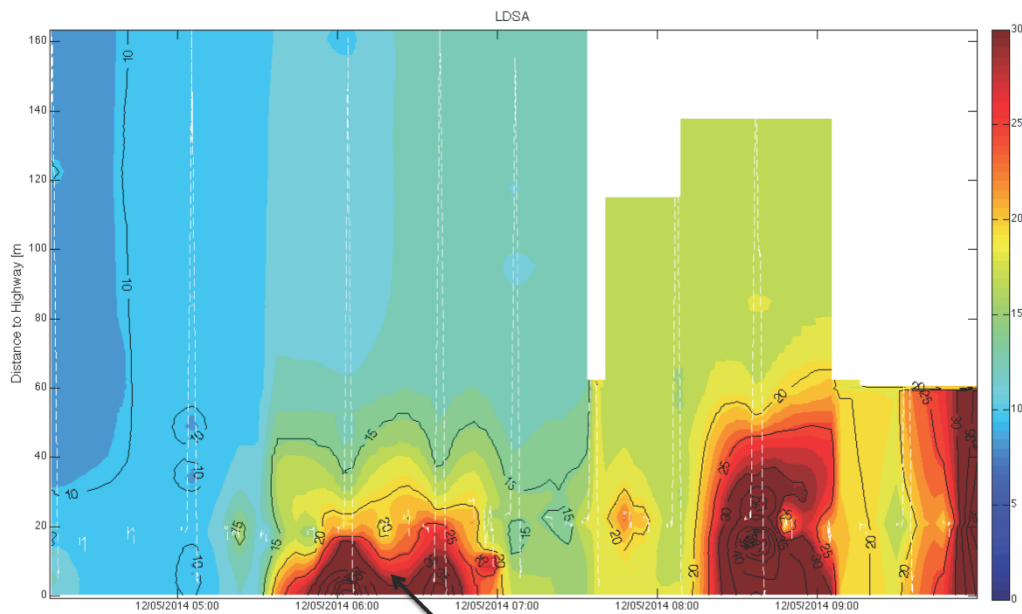


19

5.12.2014 – Absoluter Luftdruck in [hPa]

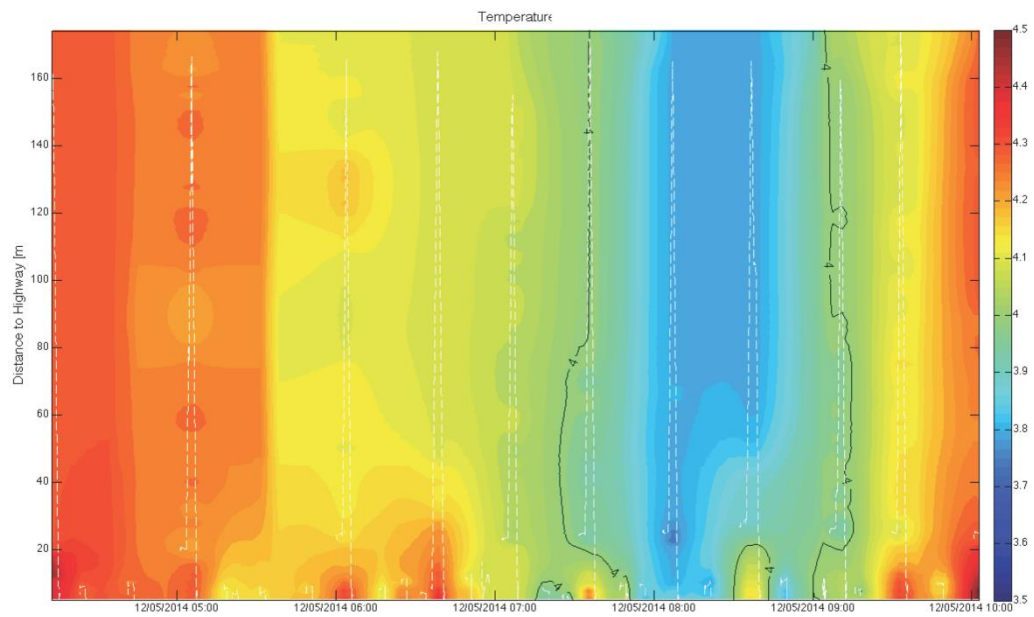


5.12.2014 – LDSA Querprofil in [$\mu\text{m}^2/\text{cm}^3$]



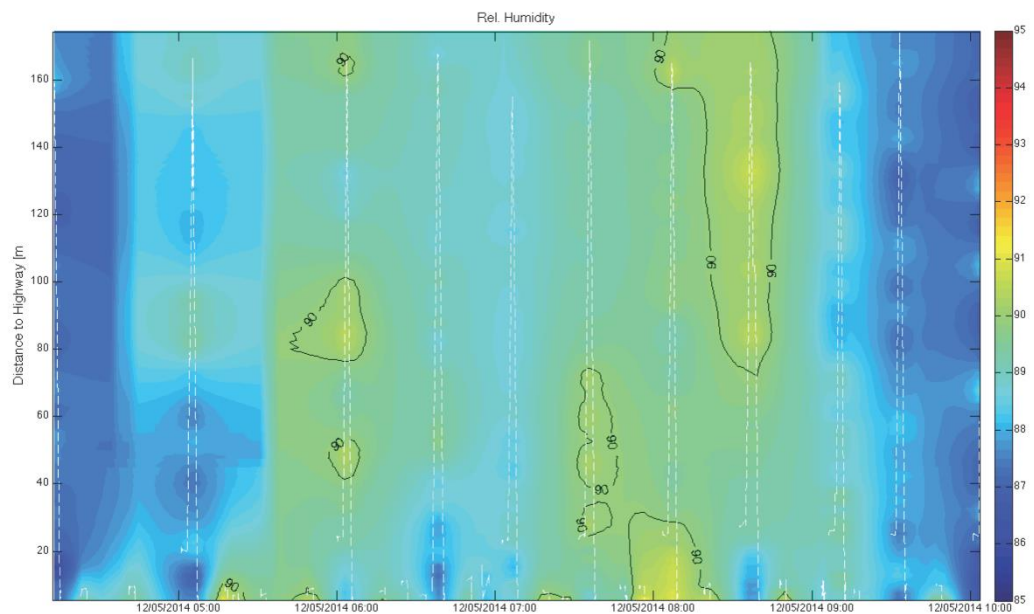
Verkehrszunahme ab 6h

5.12.2014 – Temperatur Querprofil in [°C]



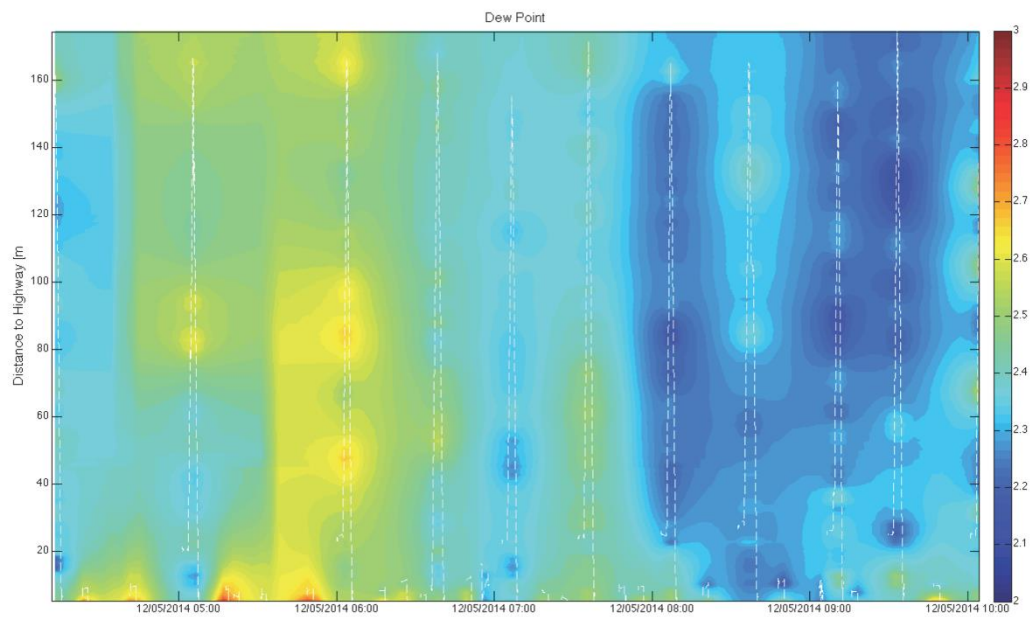
22

5.12.2014 – Relative Feuchte Querprofil



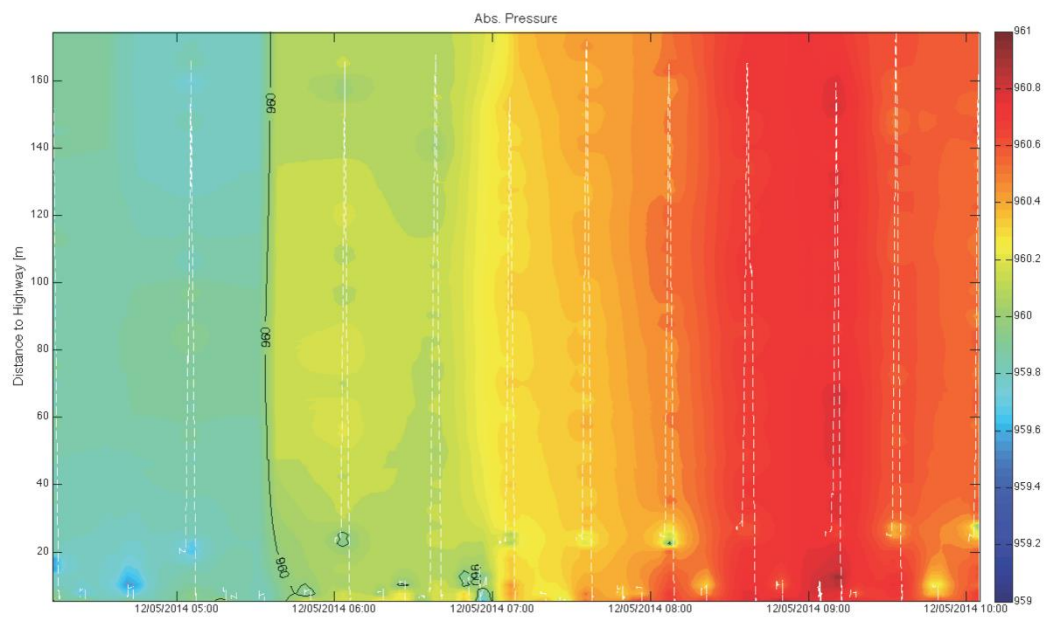
23

5.12.2014 – Taupunkt Querprofil in [°C]



24

5.12.2014 – Abs. Luftdruck Querprofil



25

Intepretation

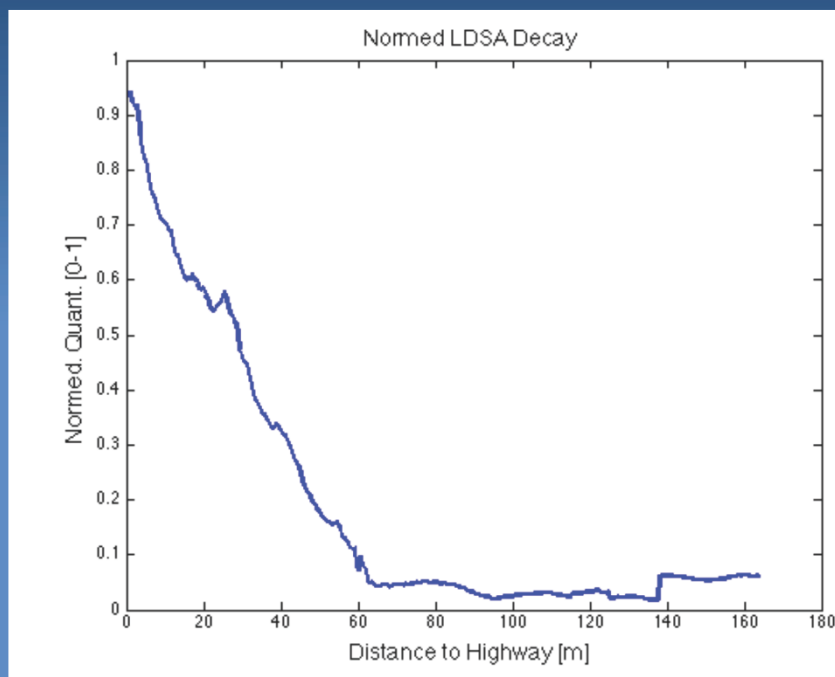
- Verkehrszunahme ab 6h führt unmittelbar zum Anstieg der LDSA-Werte
- Kleinräumiger Effekt (vertikal wie horizontal) direkt nachweisbar
- "Schadstoffwolken" in den Daten erkennbar
- Räumlicher Transportmechanismus der Partikel noch ungenügend untersucht.

Ausblick & Vorschlag:

- Vertiefte Untersuchung an einem Ort, der höhere Flüge und eine Automatisierung der Querprofile zulässt.

26

Abklingverhalten im Querprofil am 5.12.



27



Vielen Dank an den Support durch
BAZL, inNET, Rega und Heliport Erstfeld!