



Leibniz-Institut für
Troposphärenforschung

Kurzbericht

Modellierung von Luftströmung im Erzgebirge während ausgewählter Zeiträume

Im Auftrag des Sächsischen Landesamtes für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie
(LfULG)

Roland Schrödner, Ralf Wolke

24.01.2019

Inhaltsverzeichnis

1. EINLEITUNG, MOTIVATION	4
2. MODELLBESCHREIBUNG UND SETUP	5
DAS CHEMIE-TRANSPORT-MODELL COSMO-MUSCAT	5
DAS LAGRANGE'ISCHE PARTIKELMODELL LAPASi	7
RÜCKWÄRTSTRAJEKTORIEN MIT LAGRANTO	8
3. ERGEBNISSE DER DREI AUSGEWÄHLTEN ZEITRÄUME	9
19. & 21. JANUAR 2017	9
METEOROLOGISCHE CHARAKTERISIERUNG	9
ERGEBNISSE SCHADSTOFFAUSBREITUNGSRECHNUNG	9
25.-26. JANUAR 2018	12
METEOROLOGISCHE CHARAKTERISIERUNG	12
ERGEBNISSE SCHADSTOFFAUSBREITUNGSRECHNUNG	12
14.-15. FEBRUAR 2018	18
METEOROLOGISCHE CHARAKTERISIERUNG	18
ERGEBNISSE SCHADSTOFFAUSBREITUNGSRECHNUNG	18
4. FAZIT	22
REFERENZEN	24
ANHANG	26

1. Einleitung, Motivation

Mit Hilfe von zeitlich und räumlich hochaufgelösten Modellrechnungen (mit horizontalen Gitterweiten bis zu 200 m) wurden die Luftströmungen im Erzgebirge für drei ausgewählte Perioden analysiert und veranschaulicht. Ziel der Untersuchungen war es, mögliche Verursacher für die aufgetretenen Geruchsereignisse einzugrenzen bzw. Industrieanlagen und –gebiete als Verursacher auszuschließen. Dabei wurden Strömungsmuster und vertikale Austauschprozesse untersucht, die zur Akkumulation von Schadstoffen im Böhmisches Becken und/oder Transport der Luftmassen über den Erzgebirgskamm führen. Durch die hohe räumliche Auflösung soll die Auswirkung der komplexen Orographie auf bodennahe Luftströmung möglichst realistisch abgebildet werden.

Für die Untersuchungen wurden drei unterschiedliche Arten von Modellen eingesetzt:

1. Offline-Berechnung von Rückwärtstrajektorien mit dem Modell LAGRANTO
2. Ableitung von "Source-Receptor" -Beziehungen und Veranschaulichung von Strömungsmustern mit Hilfe von COSMO-MUSCAT-Simulationen für passive Tracer aus fiktiven Punktquellen in unterschiedlicher Höhe über Grund.
3. Ausbreitungsrechnungen mit dem online an COSMO gekoppelten Lagrange 'schen Partikelmodell LaPaSi.

Für die Untersuchungen wurden gemeinsam mit dem Auftraggeber drei Geruchsepisoden ausgewählt, die zu gehäuften Beschwerden von Bürgern aus dem Erzgebirge geführt haben. Neben den Bürgermeldungen wurden diese Episoden auch im Rahmen des EU-Projektes OdCom durch ausgebildete Probanden registriert. Deshalb kann hier von genaueren und gesicherteren Angaben ausgegangen werden. Es wurden die folgenden drei Episoden modelliert und analysiert: (1) 19./21.01.2017, (2) 25./26.01.2018, (3) 14./15.02.2018.

2. Modellbeschreibung und Setup

Das Chemie-Transport-Modell COSMO-MUSCAT

Das am Leibniz-Institut für Troposphärenforschung Leipzig (TROPOS) entwickelte Modellsystem COSMO-MUSCAT dient zur regionalen prognostischen Beschreibung (Simulation) der meteorologischen und luftchemischen Eigenschaften der Atmosphäre. Anwendung findet es für zurückliegende Zeiträume (Hindcast), insbesondere für lufthygienische Untersuchungen aller Art, für die Analyse der Schadstoffbelastung in der Luft und auf dem Boden, für detaillierte Sensitivitäts- und Prozessstudien, zur Erforschung der Wechselwirkung bzw. Rückkopplung zwischen natürlichen meteorologischen Bedingungen und anthropogenen, umweltbelastenden Einflüssen sowie für die Untersuchung des Zusammenhanges zwischen den verschiedenen räumlichen Skalen (Wolke et al. 2004; Heinold et al. 2007, 2012; Stern et al. 2008; Hinneburg et al. 2009; Renner und Wolke, 2010; Wolke et al. 2012). Zur Bereitstellung geeigneter Randwerte für die detaillierten Modellläufe wird zumeist eine hierarchische Gitterstruktur verwendet, bei der von der europäischen bis zur urbanen Skala genestet wird (vgl. z. B. Abbildung 1). Das Modellsystem besteht aus dem online gekoppelten Wettervorhersagemodell COSMO des Deutschen Wetterdienstes (Schättler et al. 2009; Baldauf et al. 2011) und dem Chemie-Transport-Modell MUSCAT (MUlti-Scale Chemistry Aerosol Transport). Dabei kommt ein Kopplungsschema zur Anwendung, das die von MUSCAT benötigten meteorologischen Felder aus dem simultan mitlaufenden meteorologischen Modell in Zeit und Raum approximiert, wobei die Massenerhaltung gewährleistet wird. COSMO-MUSCAT beschreibt den Transport und die chemischen und mikrophysikalischen Umwandlungsprozesse von Spurengasen und Partikelpopulationen. Die Transportprozesse umfassen Advektion, Diffusion, Sedimentation der Partikel sowie trockene und nasse Deposition.

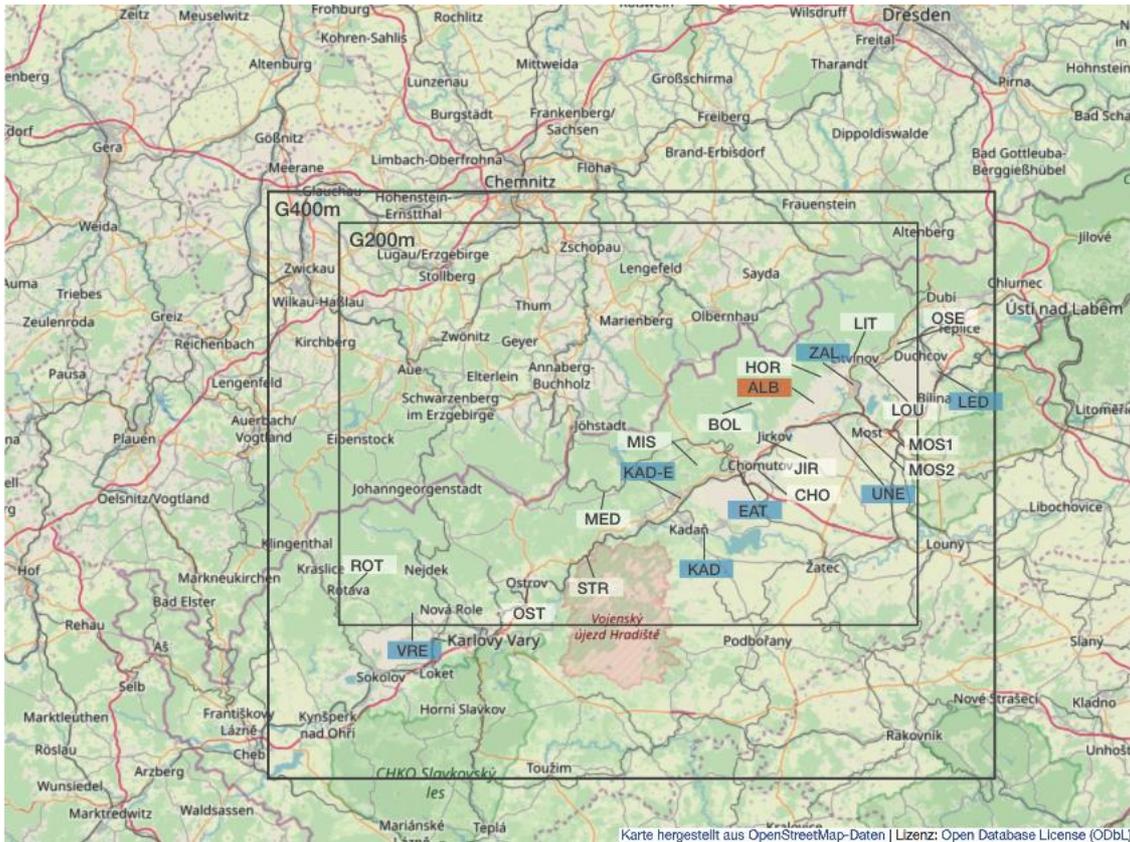


Abbildung 1: Übersicht über die Modellgebiete und Tracerquellen. Blau hinterlegte Quellen sind Industriestandorte oder Kraftwerke. Braun hinterlegt ist der Braunkohletagebau Albrechtice (um die Großflächigkeit abzubilden bestehend aus 6 einzelnen Quellen). Weiß hinterlegt sind zusätzliche hypothetische Quellen für eine bessere Differenzierung möglicher Quellregionen. Bildquelle der Karte: OpenStreetMap.

COSMO-MUSCAT wurde im Rahmen dieser Arbeit angewendet um Quellregionen für die drei Untersuchungszeiträume einzugrenzen bzw. auszuschließen. Zu diesem Zweck wurde mit dem Modell die Ausbreitung von Tracern sowohl aus potentiellen Punktquellen von Industrieanlagen und Kraftwerken als auch aus rein hypothetischen Quellen (zur Charakterisierung einer Quellregion) simuliert. Die Simulationen wurden angetrieben durch Reanalysedaten für COSMO mit 2,7 km Auflösung. Da für die Lokalisierung der Schadstoffquellen eine möglichst hohe zeitliche und räumliche Genauigkeit angestrebt wird und das betrachtete Gebiet durch eine ausgeprägte Orographie charakterisiert ist, wurden die Simulationen mit einer horizontalen Gitterauflösung von ca. 200 x 200 m² und 50 vertikalen Schichten durchgeführt. Dabei werden die meteorologischen Felder immer weiter verfeinert, indem eine Simulation auf einem feineren Gitter mit den Daten einer auf einem gröberen Gitter durchgeführten Modellrechnung angetrieben wird. Für die Analyse wurden die Ergebnisse der Simulationen mit 400 und 200 m horizontaler Auflösung verwendet. Abbildung 1 zeigt die räumliche Abdeckung der beiden Gitter sowie die Standorte der untersuchten Quellen. Die genauen Standorte und Bezeichnungen der Quellen

sind in Tabelle 4 im Anhang zusammengefasst. Für die meisten Quellen wurde die Emission in Bodennähe (ca. 10 m über Grund) und in ca. 100 m über Grund betrachtet. Für die Standorte ZAL, KAD-E und UNE wurden auch Tracer in 200 m über Grund und für UNE in 300 m über Grund emittiert. Die Quelle ALB repräsentiert einen Braunkohletagebau. Zur Abdeckung dieser großflächigen Quelle wurden insgesamt 6 Quellen über die Fläche des Tagebaus verteilt und für die Analyse zusammengefasst, wobei nur bodennah emittiert wurde.

Außerdem wurde untersucht, ob die Geruchsereignisse durch die nahe bei Olbernhau verlaufende Pipeline verursacht worden sind. Hierzu sind entlang des Verlaufs der Pipeline von Jirkov über Hora Svaté Kateřiny und Brandov nach Olbernhau die Tracer-Ausbreitung aus 15 hypothetische Quellen modelliert worden. Für die Quellen in der Nähe von Jirkov und Bolebor zeigte sich dabei ein ähnliches Bild wie für JIR und BOL. Bei den anderen Quellen entlang des Pipelineverlaufs ergab sich, dass diese zu nah an den Probandenstandorten liegen und sich die Tracer nur in einem eng begrenzten Gebiet ausbreiteten. Damit können diese Quellen nicht die breite räumliche Verteilung der Geruchsmeldungen über mehrere Täler und Orte sowie die teilweise langen Zeiträume der Meldungen (bei wechselnder Anströmung) erklären. Aus diesen Gründen werden die Quellstandorte entlang der Pipeline-Trasse im Folgenden nicht weiter berücksichtigt.

Das Lagrange' sche Partikelmodell LaPaSi

Im Unterschied zum "klassischen" Trajektorien-Modell werden beim Lagrange 'schen Partikelmodell die Flugbahnen für "sehr viele emittierte Partikel " berechnet. Um dabei die Turbulenz der Atmosphäre zu berücksichtigen, werden die einzelnen Flugbahnen stochastisch gestört. Dies führt zu einer Schar von Trajektorien, die im Mittel der Bewegungsrichtung des Windfeldes entspricht. Die Streuung der Trajektorien repräsentiert die Turbulenz und veranschaulicht die Unsicherheiten der berechneten Flugbahnen.

Das Lagrang' sche Partikelmodell LaPaSi (Lagrangian Particle Simulation, Faust 2017) wurde als Modul innerhalb des Wettervorhersagemodells COSMO am TROPOS entwickelt und ist damit online an COSMO gekoppelt. Das bedeutet, dass LaPaSi mit jedem Zeitschritt (üblicherweise in der Größenordnung von einigen 10 Sekunden) mit neuen meteorologischen Feldern versorgt wird. Damit kann der Partikeltransport realistischer abgebildet werden als mit offline angetriebenen Partikelmodellen (Zeitauflösung des Antriebs ~0,5 – 1 h).

Auf Grund des hohen Rechenaufwandes bei diesen Simulationen konnten im Vgl. zu MUSCAT nur wenige ausgewählte Quellen betrachtet werden. Die Tracer wurden hierfür in 50 m über Grund emittiert.

Rückwärtstrajektorien mit LAGRANTO

Mit Rückwärtstrajektorien kann nachverfolgt werden, welchen Weg die Luftpakete, die an einem bestimmten Zielort in einer bestimmten Höhe eintreffen, genommen haben. Dafür werden die Ausgabedaten eines meteorologischen Modells verwendet (üblicherweise in stündlicher Auflösung), aus denen der Weg rekonstruiert wird. Innerhalb des Projektes wurde hierfür das Trajektorienmodell LAGRANTO (Miltenberg et al., 2013) verwendet. Dabei wurden Rückwärtstrajektorien für alle Probandenmeldungen erstellt, wobei Trajektorien im Umkreis von 500 m bis 1 km und bis 150 m über Grund am Probandenstandort betrachtet wurden. Für die Analyse sind die Trajektorien bis zu 6 Stunden zurückverfolgt worden.

3. Ergebnisse der drei ausgewählten Zeiträume

19. & 21. Januar 2017

Meteorologische Charakterisierung

Am 19.01.2017 herrschte im Untersuchungsgebiet strenger Frost bei Schneehöhen von teilweise über 50 cm auf deutscher Seite des Erzgebirges und 15-20 cm auf tschechischer Seite. Ab 20.01.2017 setzte Tauwetter ein. Der Zeitraum 19. — 21.01. war geprägt durch eine sehr stabile Schichtung der bodennahen Atmosphärenschichten. Die Höhe der Hauptinversion lag bei ca. 1000 m am 19.01. und ca. 1400 m am 21.01. Die vertikale Durchmischung war mit max. 300 m am 19.01. und verbreitet weniger als 100 m am 21.01. sehr gering. In der Nacht vom 20. auf den 21.01. wurde im Nordböhmischen Becken und in den Höhenlagen des Erzgebirges Nebel gemeldet. Die beiden untersuchten Tage zeichnen sich durch geringe Windgeschwindigkeiten sowohl im Böhmisches Becken (0 — 8 km/h) als auch auf umliegenden Bergstationen aus (Milesovka und Zinnwald, 10 — 15 km/h). Durch die niedrigen Windgeschwindigkeiten in den Tallagen auf tschechischer Seite des Erzgebirges sind beide Tage häufig durch umlaufenden Wind gekennzeichnet. Am östlichen Rand des Untersuchungsgebietes gab es im Tal parallel zum Erzgebirge Nordostwind. In der Höhe, und damit auch in den Höhenlagen des Erzgebirges, kam der Wind aus Südost bis Ost.

Ergebnisse Schadstoffausbreitungsrechnung

Tabelle 1: Kurzüberblick Probandenmeldungen 19. & 21.01.2017.

Datum und Uhrzeit	Ort
19.01.2017 08 - 08:30 Uhr	Nová Ves v Horách
19.01.2017 13 - 20 Uhr	Litvínov
19.01.2017 15 - 18 Uhr	Olbernhau
19.01.2017 17 - 18 Uhr	bei Deutscheinsiedel
21.01.2017 08 - 20 Uhr	Litvínov
21.01.2017 09:45 - 10 Uhr	Dlouhá Louka
21.01.2017 13 - 13:30 Uhr & 16:20 - 18 Uhr	Olbernhau
21.01.2017 23:15 - NA	Seiffen / Steinhübel
21.01.2017 12 - 23:30 Uhr	Seiffen / Mannsche

Die Analyse der Rückwärtstrajektorien hat ergeben, dass Trajektorien, die am Zielort (Probandenstandort) niedrig sind (bis 30 m über Grund, blau in Abbildung 2), zumeist aus der Gegend östl. von Litvínov stammen (siehe Abbildung 2). Allerdings sind sie in dieser Gegend ca. 400 — 900 m über Grund. Trajektorien, die in 30 – 100 m über Grund (grün in Abbildung 2) ankommen, reichen zurück über die Gegend zwischen Bolebor, Jirkov, Most und Litvínov Richtung Südosten. In Abbildung 2 kann man sehr gut die Komplexität der Orographie erkennen. Luftpakete aus einem großen Einzugsgebiet und verschiedenen Luftschichten können über die verschiedenen Täler zum selben Zielgebiet gelangen.

Am 21.01. zeigen die niedrigen Rückwärtstrajektorien wieder in das Gebiet zwischen Litvínov, Most und Jirkov. Erst ab dem Nachmittag gibt es wieder zunehmend Trajektorien aus Gegenden östl. von Litvínov.

Insbesondere gibt es an beiden Tagen keine Trajektorien aus Gebieten südwestlich von Most und westlich von Jirkov.

Die beste Übereinstimmung von Zeitserien am Probandenstandort mit den Probandenmeldungen zeigen am 19.01. die Quellen LIT, OSE und LED (siehe Tabelle 1). Die Quellen HOR, LOU zeigen Übereinstimmung mit den Meldungen in Litvínov und Olbernhau und LED. Die Quellen MOS1, MOS2 und CHO könnten nur die Meldungen in Nová Ves v Horách erklären. Die Quelle ZAL könnte nur die Meldung in Litvínov teilweise erklären.

Am 21.01. stimmen die Quellen LIT, HOR LOU, OSE und LED am besten mit den Probandenmeldungen überein. Die Quelle ZAL zeigt nur für einen Teil der Meldungen Übereinstimmung.

Die Ergebnisse der Untersuchungen sind in Abbildung 3 zusammengefasst. Insgesamt kann man alle Quellen westlich und südlich von Chomutov als Verursacher der Gerüche ausschließen.

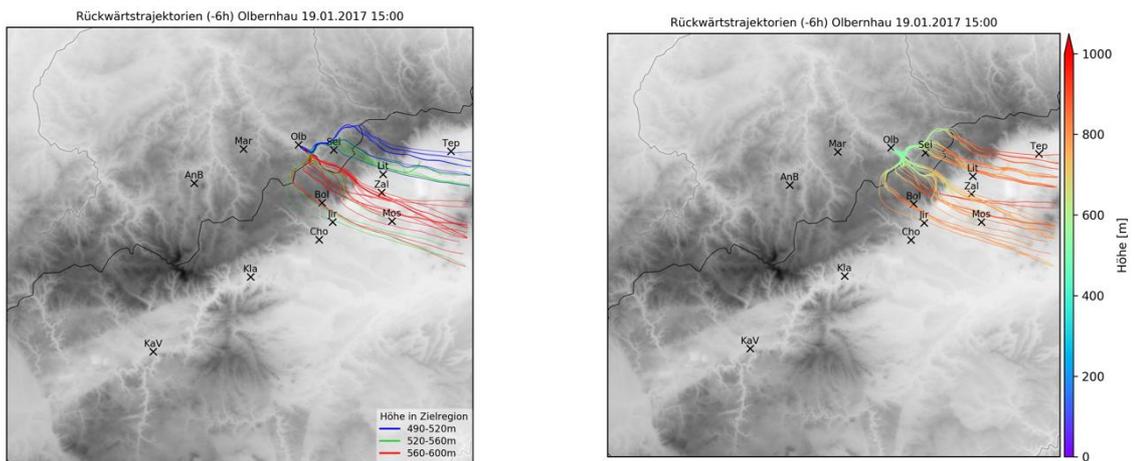


Abbildung 2: Rückwärtstrajektorien (6 Stunden zurück) für Olbernhau am 19.01.2017 15:00 Uhr. Links: Nach Höhe am Zielgebiet eingefärbt (blau: niedrig, grün: mittelhoch, rot: hoch). Rechts: Nach absoluter Höhe eingefärbt. Datengrundlage der Orographie: NASA SRTM v4.1.

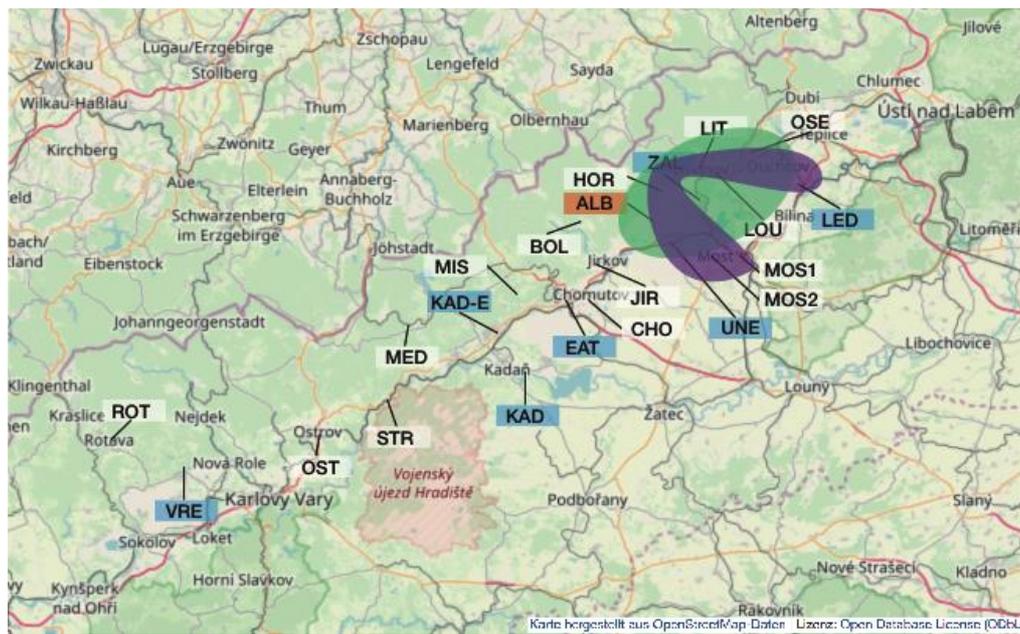


Abbildung 3: Am besten mit den Probandenmeldungen übereinstimmende Quellregionen für den 19.01 (lila) und den 21.01.2017 (grün). Bildquelle der Karte: OpenStreetMap.

25.-26. Januar 2018

Meteorologische Charakterisierung

An beiden Tagen lagen die Temperaturen tagsüber leicht über, nachts leicht unter null. Die Schichtung in den unteren Schichten der Atmosphäre war stabil. Die Höhe der Temperaturinversion lag an beiden Tagen bei ca. 1200 m. Am 25.01. war die vertikale Durchmischung stark eingeschränkt mit bodennahen Mischungsschichthöhen teilweise unter 100 m im Nordböhmischen Becken. Am 26.01. war die vertikale Durchmischung mit Mischungsschichthöhen über 300 m deutlich stärker. An beiden Tagen war es im Nordböhmischen Becken und den Höhenlagen des Erzgebirgskamms häufig neblig. Vereinzelt wurde Sprühregen im Böhmischen Becken gemeldet. Beide Tage sind wieder durch geringe Windgeschwindigkeiten in den Tallagen auf tschechischer Seite des Erzgebirges gekennzeichnet (max. 10 km/h). In den Höhenlagen wehte besonders 26.01. starker Wind (> 40 km/h). Im Nordböhmischen Becken wehte der Wind am 25.01. zunächst aus südwestlichen Richtungen. Ab ca. 18:00 Uhr drehte der Wind auf Südost und im weiteren Verlauf des 26.01. auf Nord (ab ca. 14:00 Uhr).

Ergebnisse Schadstoffausbreitungsrechnung

Tabelle 2: Kurzüberblick Probandenmeldungen 25. & 26.01.2018.

Datum und Uhrzeit	Ort
25.01.2018 06 – 24 Uhr	Seiffen
25.01.2018 07:40 – 10 Uhr	Steinhübel
25.01.2018 09-21 Uhr	Litvínov
25.01.2018 17-22 Uhr	Olbernhau
25.01.2018 18:15 – 23 Uhr	Sayda
26.01.2018 00 - 10 Uhr & 17 - 24 Uhr	Olbernhau
26.01.2018 05 – 15 Uhr	Seiffen
26.01.2018 06 – 10 Uhr	Sayda
26.01.2018 07 – 08 Uhr	Steinhübel

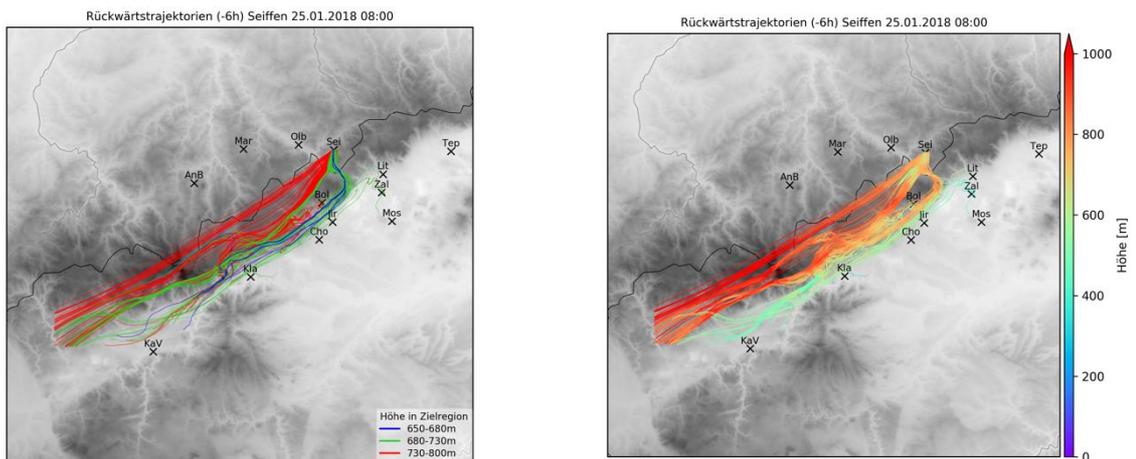


Abbildung 4: Rückwärtstrajektorien (6 Stunden zurück) für Seiffen am 25.01.2018 08:00 Uhr. Links: Nach Höhe am Zielgebiet eingefärbt (blau: niedrig, grün: mittelhoch, rot: hoch). Rechts: Nach absoluter Höhe eingefärbt. Datengrundlage der Orographie: NASA SRTM v4.1.

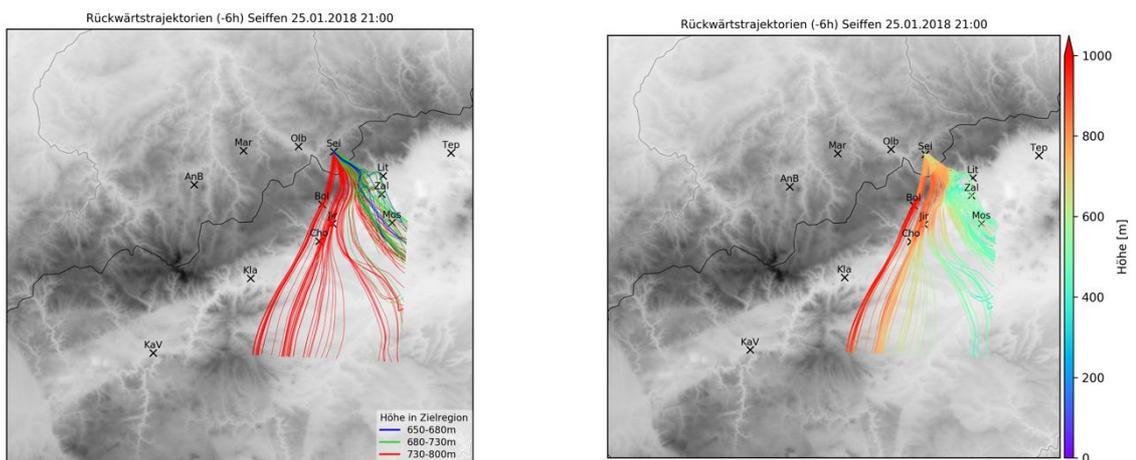


Abbildung 5: Rückwärtstrajektorien (6 Stunden zurück) für Seiffen am 25.01.2018 21:00 Uhr. Links: Nach Höhe am Zielgebiet eingefärbt (blau: niedrig, grün: mittelhoch, rot: hoch). Rechts: Nach absoluter Höhe eingefärbt. Datengrundlage der Orographie: NASA SRTM v4.1.

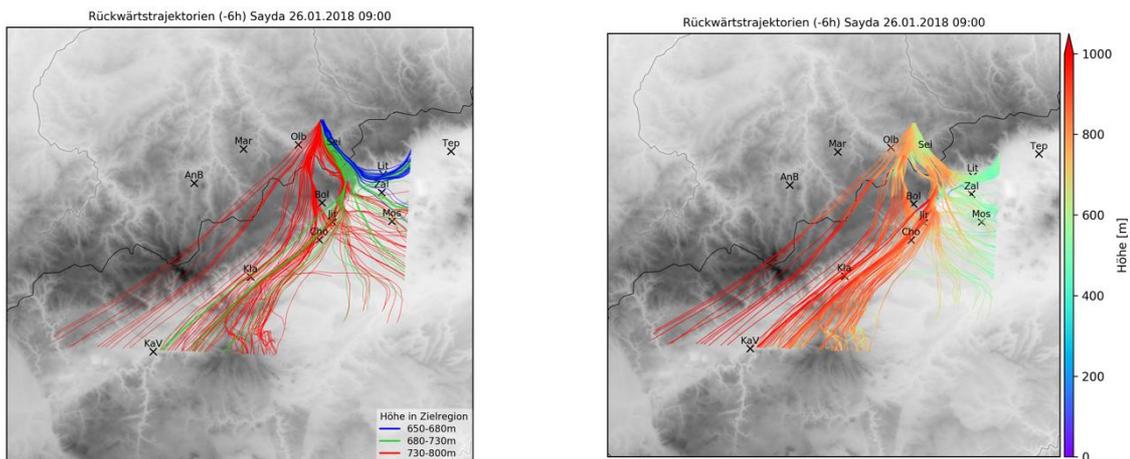


Abbildung 6: Rückwärtstrajektorien (6 Stunden zurück) für Sayda am 26.01.2018 09:00 Uhr. Links: Nach Höhe am Zielgebiet eingefärbt (blau: niedrig, grün: mittelhoch, rot: hoch). Rechts: Nach absoluter Höhe eingefärbt. Datengrundlage der Orographie: NASA SRTM v4.1.

Zusätzlich zu den in Tabelle 2 genannten Meldungen gab es am 25.01. Beschwerden in Dittersbach, Neuhausen, Heidelberg, Olbernhau und Seiffen sowie am 26.01. in Olbernhau, Seiffen, Heidersdorf, Deutscheinsiedel, Deutschneudorf, Neuernsdorf und Dittersbach.

Die Trajektorienanalysen zeigen, dass bis ca. 18:00 Uhr am 25.01. kein Transport aus Osten und Südosten zu den Probandenstandorten erfolgte (siehe Abbildung 4). Niedrige Trajektorien weisen in diesem Zeitraum entlang des Nordrands des Nordböhmisches Beckens nach Westen über Jirkov, Chomutov, Kadan bis nach Karlsbad und verlaufen dort auch bodennah (innerhalb der untersten 100 m über Grund). Luftpakete in höheren Schichten am Zielort (50 bis 150 m) wurden entlang des Erzgebirgshauptkamms in höheren Schichten bei hohen Windgeschwindigkeiten transportiert. Niedrigere Rückwärtstrajektorien in Litvínov zeigen in die Gegend um Zaluži und Most und etwas westlich davon.

Nach 18:00 Uhr weisen niedrige Trajektorien an allen Probandenstandorten in die Gegend zwischen Litvínov, Most und südlich davon (siehe Abbildung 5). Am Probandenstandort Litvínov kommen ab 21:00 Uhr alle Luftpakete aus Osten.

Am 26.01. fächern die Trajektorien für die untersuchten Standorte stark auf und deuten auf ein Einzugsgebiet hin, das sich von Jirkov über Most und Litvínov bis nach Teplice erstreckt. Niedrige Trajektorien zeigen dabei mehr nach Osten (blau), während mittelhohe Trajektorien in die Gegend um Litvínov und Most verweisen (grün, siehe Abbildung 6). Luftpakete entlang beider Trajektorienkategorien überziehen das

Gebiet bodennah. Am Nachmittag dreht der Wind auf nördliche Richtungen, wodurch dann kaum noch Rückwärtstrajektorien nach Süden zeigen.

Die Meldungen in Litvínov, Olbernhau und Sayda können nur von den Quellen ZAL und ALB im gesamten gemeldeten Zeitraum erklärt werden (siehe Tabelle 5). Teilweise Übereinstimmungen an den drei Standorten wurde mit resultierenden Tracerkonzentrationen der Quellen MOS2, BOL, LIT, HOR, LOU, OSE, JIR und UNE gefunden. Die Meldungen in Steinhübel stimmen nur mit Konzentrationsverläufen der Quellen BOL, MED und MIS vollständig überein.

Keine der untersuchten Quellen kann den gesamten gemeldeten Zeitraum am Probandenstandort Seiffen erklären. Alle Quellen westlich von HOR erreichen ab ca. 18:00 Uhr (Zeitpunkt der Winddrehung) nicht mehr den Probandenstandort. Luftpakete von Standorten östlich von HOR sowie HOR selbst werden erst ab diesem Zeitpunkt zum Probandenstandort transportiert. Die Quellen ALB und UNE zeigen den längsten Zeitraum mit Übereinstimmung.

Am 26.01. können die meisten Meldezeiträume durch die Quellen OSE, ZAL, ALB, UNE und BOL erklärt werden. Keine Übereinstimmung mit einer der untersuchten Quellen findet sich für die Meldung in Olbernhau am Nachmittag (17:00 bis 24:00 Uhr). Da der Wind zu der Zeit aus nördlichen Richtungen wehte kommen die betrachteten Quellen nicht in Frage. Ebenso zeigen die Rückwärtstrajektorien ab 19:00 in Richtung Nordosten. Zwischen 17:00 und 19:00 Uhr deuten die Rückwärtstrajektorien auf Transport innerhalb des Tals und der Nachbartäler aus Richtung Seiffen und Sayda.

Zusammenfassend (siehe Abbildung 7) können alle Quellen südwestlich von Chomutov ausgeschlossen werden. Ebenso kommen am 25.01. vor 18:00 Uhr keine Quellen östlich und nordöstlich von Most in Frage. Für den Abend des 25.01. kann man südwestlich von Most ausschließen. Am 26.01. können nur Quellen innerhalb eines großen Gebietes, das sich von Jirkov bis nach Osek erstreckt, beitragen. Eine mögliche Quellregion für die Meldungen in Olbernhau am Abend lässt sich nicht ermitteln.



Abbildung 7: Am besten mit den Probandenmeldungen übereinstimmende Quellregionen für den 25.01. (grün: bis 18:00 Uhr, lila: ab 18:00 Uhr, links) und den 26.01.2018 (lila, rechts). Bildquelle der Karte: OpenStreetMap.

Neben der Analyse der Luftströmung und der "Source-Receptor"-Beziehung wurde auch untersucht, wie sich die emittierten Tracer vertikal verteilen. In Abbildung 8 zeigt die Konzentration der Tracer (Summe der Quellen CHO, BOL, ZAL) entlang einer Linie Marienberg-Olbernhau-Seiffen (siehe Linie in Abbildung 9). Der Tracertransport erfolgte zu dem Zeitpunkt senkrecht zur Darstellungsebene entlang der Täler (d.h. in das Diagramm hinein). Man sieht, dass sich die im Böhmisches Becken in die Atmosphäre emittierten Tracer weiterhin in den untersten Atmosphärenschichten konzentrieren (unterste ca. 100-200 m). Dieser Sachverhalt wurde bei allen Episoden beobachtet. Darüber hinaus kann man sehen, dass sich die verschiedenen Tracer, bedingt durch die komplexe Orographie der gebirgigen Landschaft, von ihrer Quelle auf verschiedenen Wegen ausbreiten können (vgl. Abbildung 9). Im Tal von Olbernhau (siehe Ausschnitt rechts in Abbildung 8), ist zu erkennen, dass für den konkreten Zeitpunkt und die dargestellten Tracer auf der westlichen Talseite die höchsten Konzentrationen direkt am Boden und auf der östlichen Talseite in ca. 50-100 m über Grund auftreten. Allerdings wurden für andere Fälle unterschiedliche Konzentrationsverteilungen im Talquerschnitt festgestellt, sodass sich diesbezüglich keine allgemeingültigen Schlussfolgerungen aus diesen Betrachtungen ableiten lassen. Es zeigt vielmehr die häufig beobachtete hohe kleinräumige Variabilität der Tracerkonzentrationen.

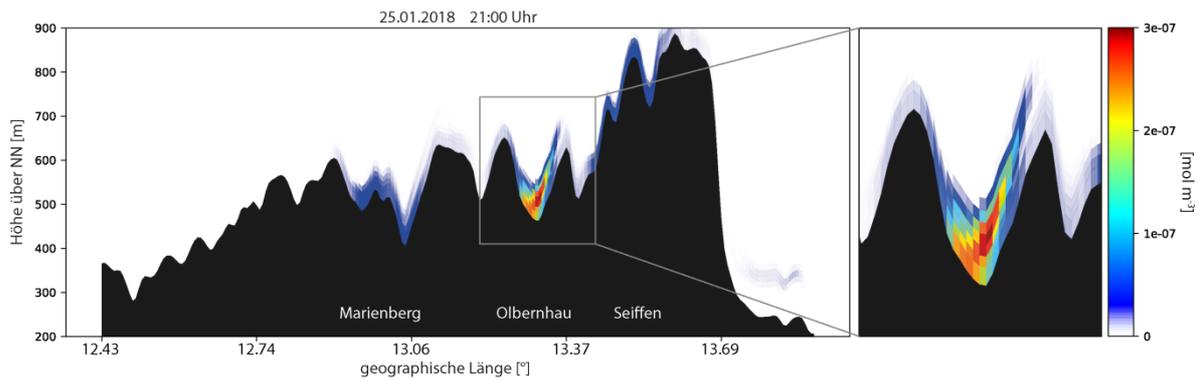


Abbildung 8: Vertikalschnitte durch das Modellgebiet auf einer Linie von Marienberg über Olbernhau nach Seiffen am 25.01.2018 21:00 Uhr (links, vgl. Abbildung 9) sowie der Ausschnitt um Olbernhau vergrößert (rechts). Die Höhe der Konzentration bezieht sich auf eine angenommene konstante Quellstärke der Punktquellen von 1mol/s.

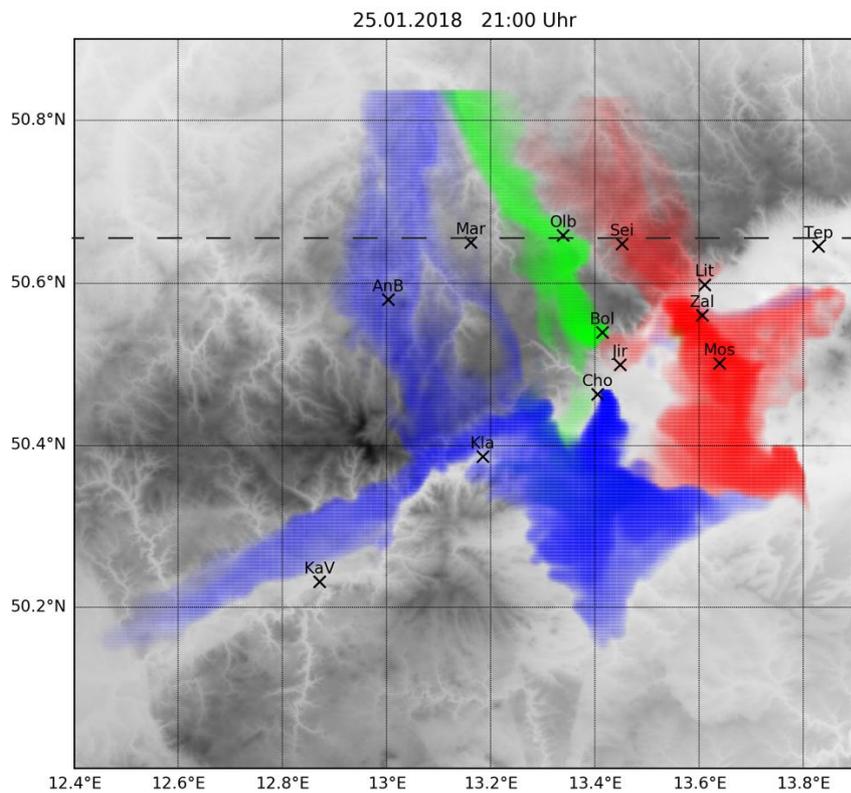


Abbildung 9: Konzentration der Tracer aus den Quellen CHO (blau), BOL (grün) und ZAL (rot) am 25.01.2018 21:00 Uhr. Niedrige Konzentrationen sind transparent dargestellt, hohe Konzentrationen deckend. Die gestrichelte Linie markiert die Position des Vertikalprofils in Abbildung 8.

14.-15. Februar 2018

Meteorologische Charakterisierung

An beiden Tagen lagen die Temperaturen im Untersuchungsgebiet zumeist unter dem Gefrierpunkt. Erst am Abend des 15.02. setzt Tauwetter ein. Auf tschechischer Seite und in den Kammlagen des Erzgebirges lagen ca.10 cm Schnee. Am Morgen des 14.02. ist die atmosphärische Schichtung stabil. Tagsüber wird sie zunehmend labiler und die Mischungsschicht erreicht eine Höhe von ca. 1000 m im Nordböhmischen Becken. Am darauffolgenden Tag erreicht liegt die Mischungsschichthöhe bei max. 400 m. Ab der Nacht zum 15.02. wird vielerorts Nebel und feuchter Dunst im Böhmischem Becken gemeldet. Ab ca. 20:00 Uhr am 15.02. setzt Schneefall ein. Leichter bis mäßiger Wind weht in den Niederungen meist aus östlichen Richtungen, in den Höhenlagen mäßig bis frisch aus Südwest. Im Laufe des 15.02. dreht der Wind über Süd nach Südwest.

Ergebnisse Schadstoffausbreitungsrechnung

Tabelle 3: Kurzüberblick Probandenmeldungen 14. & 15.02.2018.

Datum und Uhrzeit	Ort
14.02.2018 06:30 – 17 Uhr	Rübenau
14.02.2018 09:30 – 10:45 Uhr	Sayda
14.02.2018 15 – 17 Uhr	Marienberg
14.02.2018 keine Angabe der Uhrzeit	Litvínov
15.02.2018 05 – 24 Uhr	Seiffen
15.02.2018 06:30 – 07 Uhr	Rübenau
15.02.2018 07:30 – 08:30 & 17:45 – 19 Uhr	Olbernhau

Zusätzlich zu diesen Meldungen gab es am 14.02. Beschwerden in Seiffen, Deutschneudorf, Marienberg und Reitzenhain sowie am 15.02. in Seiffen, Marienberg, Reitzenhain, Klíny-Mnisek und Dittersbach.

Die Rückwärtstrajektorien am 14.02. weisen im Tal des Nordböhmischen Beckens alle in Richtung Osten entlang der Nordseite des Tals (siehe Abbildung 10). Der Transport über das Erzgebirge nach Marienberg findet über Klíny, über Deutschneudorf, Seiffen und Olbernhau, über Bolebor oder über Hora Svatého statt (siehe Abbildung 11),

wobei nur die westlichen Trajektorien auf tschechischer Seite in Bodennähe zu finden sind. Rübenau wird über Bolebor oder Hora Svatého angeströmt, Sayda über Klíny.

Am 15.02. zeigen die Rückwärtstrajektorien während der untersuchten Zeiträume am Vormittag Richtung Süden und Südosten über das Gebiet zwischen Litvínov, Most und Jirkov. Ab dem Nachmittag kommen Luftpakete häufiger aus Westen über Chomutov, Jirkov und Bolebor bzw. über Deutschneudorf nach Seiffen und Olbernhau (siehe Abbildung 12).

Übereinstimmung mit den Meldungen in Rübenau und Marienberg am 14.02. zeigen nur die Quellen BOL und HOR (siehe Tabelle 5). Teilweise Übereinstimmung findet sich für die Quellen ALB, LIT und UNE. Besonders zu bemerken ist, dass nur der Tracer, der in UNE in 300 m Höhe emittiert wurde, mit den Meldungen übereinstimmt. Die Tracer aus niedrigeren Höhen werden nicht zum richtigen Zeitpunkt über das Erzgebirge transportiert. Die Meldung in Sayda (9:30 — 10:45 Uhr) kann von keiner der untersuchten Quellen erklärt werden.

Am 15.02. zeigt nur die Quelle ALB vollständige Übereinstimmung mit den Meldungen. Größtenteils Übereinstimmung kann für die Quellen UNE, JIR, CHO und KAD festgestellt werden, von welchen lediglich in Seiffen am Nachmittag keine Tracer eintreffen, aber an den anderen Probandenstandorten Konzentrationsverläufe und Meldungen zusammenpassen.

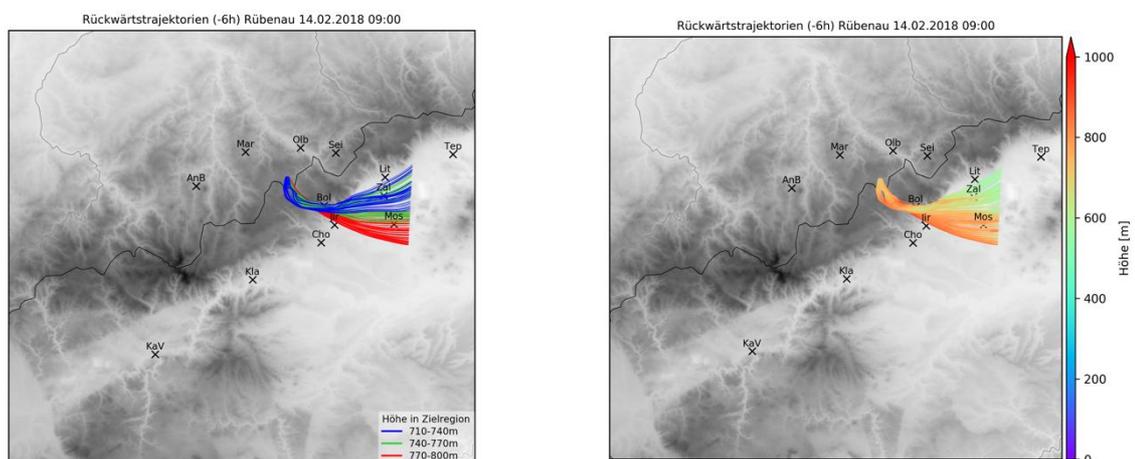


Abbildung 10: Rückwärtstrajektorien (6 Stunden zurück) für Rübenau am 14.02.2018 09:00 Uhr. Links: Nach Höhe am Zielgebiet eingefärbt (blau: niedrig, grün: mittelhoch, rot: hoch). Rechts: Nach absoluter Höhe eingefärbt. Datengrundlage der Orographie: NASA SRTM v4.1.

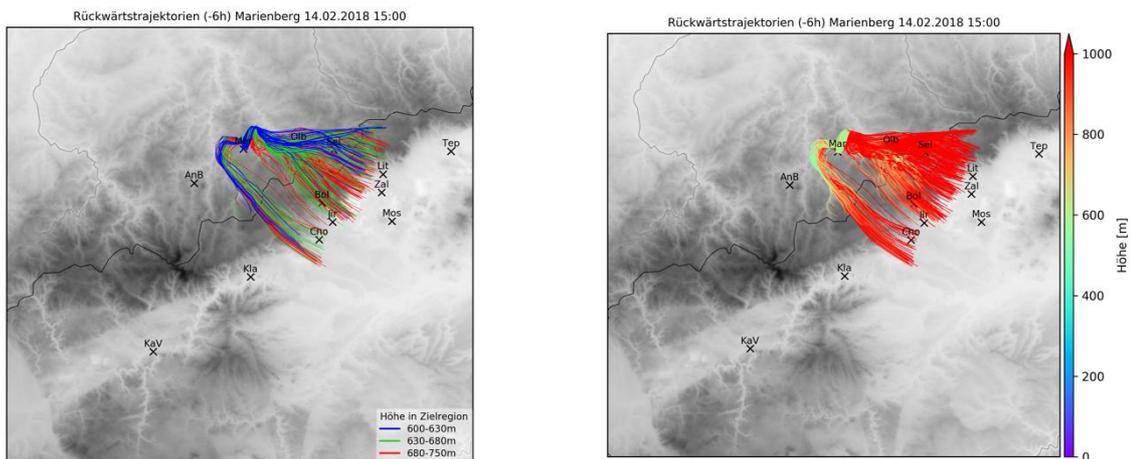


Abbildung 11: Rückwärtstrajektorien (6 Stunden zurück) für Marienberg am 14.02.2018 14:00 Uhr. Links: Nach Höhe am Zielgebiet eingefärbt (blau: niedrig, grün: mittelhoch, rot: hoch). Rechts: Nach absoluter Höhe eingefärbt. Datengrundlage der Orographie: NASA SRTM v4.1.

In der Zusammenfassung kommt am 14.02. ein Gebiet von Jirkov bis Litvínov als Quellregion in Frage (siehe Abbildung 13). An diesem Tag spielen Quellen südlich und westlich von Jirkov und südöstlich von Litvínov keine Rolle. Interessant ist die Differenzierung von Tracern, die in unterschiedlichen Höhen emittiert wurden (Beispiel UNE). Am 15.02. erstreckt sich das mögliche Quellgebiet bis nach Most und Litvínov.

An beiden Tagen findet sich die beste Übereinstimmung für Quellen im Überlappungsbereich der beiden Gebiete.

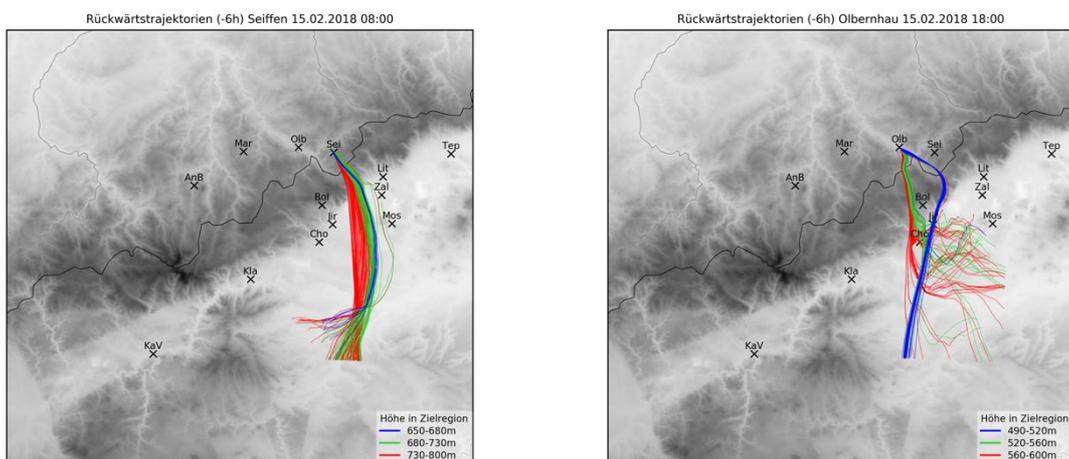


Abbildung 12: Rückwärtstrajektorien (6 Stunden zurück) für Seiffen (links) am 15.02.2018 08:00 Uhr und Olbernhau (rechts) am 15.02.2018 18:00 Uhr (nach Höhe am Zielgebiet eingefärbt (blau: niedrig, grün: mittelhoch, rot: hoch)). Datengrundlage der Orographie: NASA SRTM v4.1.



Abbildung 13: Am besten mit den Probandenmeldungen übereinstimmende Quellregionen für den 14.02. (grün) und den 15.02.2018 (lila). Bildquelle der Karte: OpenStreetMap.

4. Fazit

Aus früheren Studien ist bekannt, dass Geruchsereignisse vor allem Hochdruck- und Inversionswetterlagen, bei schwachem Wind, sowie einer Anströmung aus südlichen Richtungen auftreten (Jähn et al. 2012, 2013). Dabei stauen sich die Luftmassen vor dem Erzgebirge im Nordböhmischen Becken. Beim Aufbrechen der Inversion oder der Zunahme des Windes wird dann der Emissionsmix über den Kamm transportiert und führt zu erhöhten Geruchsbelastungen im Erzgebirgsraum. Dieser Wirkungsmechanismus wird auch durch die jetzige Studie für die ausgewählten Zeiträume bestätigt. Neben der typischen Wettersituation waren die drei analysierten Episoden teilweise durch Schnee am Boden und Nebel gekennzeichnet. Die beim Überströmen des Erzgebirgskamms auftretenden Strömungsmuster hängen sehr stark von der Feinstruktur der Orographie (z. B. Gebirgstäler, Einschnitte am Kamm) ab. Bei früheren Simulationen mit horizontalen Gitterauflösungen von mehr als 1 km konnten diese nur ungenau aufgelöst werden. Bei den jetzt durchgeführten hochaufgelösten Modellrechnungen (mit Gitterweiten bis zu 200 m) konnten auch feingliedrige Strömungsmuster veranschaulicht und analysiert werden. Dadurch war es möglich, einzelne Transportwege durch die Täler, Hangströmungen und Zirkulationen innerhalb der Täler detaillierter zu untersuchen und auch den Vertikaltransport besser abzubilden.

Nach Betrachtung der drei Zeiträume kann keine eindeutige Zuordnung zu einer Quelle oder Region gemacht werden, die alle betrachteten Geruchsmeldungen erklären könnte. Mit Sicherheit können lediglich die Quellen im Westen des Untersuchungsgebietes (westl. und südl. von Chomutov) als Verursacher für die Gerüche ausgeschlossen werden. Für jeden einzelnen der untersuchten Zeiträume können außerdem Quellregionen eingegrenzt werden und andere ausgeschlossen werden, die sich aber von denen an anderen Tagen unterscheiden. Insbesondere kann keine der untersuchten Quellen alle Probandenmeldungen erklären. Bei den Trajektorien- und Tracerausbreitungsanalysen ergibt sich als häufigste Quellregion das Gebiet rund um den Tagebau Albrechtice.

Da die Tracerkonzentrationen in zunehmender Entfernung von der Quelle schnell abnehmen, erscheint eine weit entfernte Quelle (z.B. außerhalb des Untersuchungsgebietes) unwahrscheinlich. Dann sollten in der Nähe dieser Quelle ebenfalls starke (bzw. stärkere) Gerüche festgestellt werden oder die Emissionen bereits oberhalb der Mischungsschicht eingetragen worden sein. Allerdings konnte der Eintrag und Transport in der Höhe mit anschließendem Absinken hinter dem

Erzgebirge nur in wenigen Fällen beobachtet werden und kann somit keine allgemeingültige Erklärung liefern. Für die untersuchten Zeiträume wurde bei Übereinstimmung mit Probandenmeldungen meist kein Unterschied zwischen bodennah und in der Höhe emittierten Tracern festgestellt (d.h. sowohl bodennah emittierte Tracer als auch solche, die direkt in höhere Luftschichten eingetragen wurden (z.B. einige 100 m über Grund), stimmen im selben Zeitraum mit den Probandenmeldungen überein). Eine Ausnahme ist der 14.02.2018, an dem nur die sehr hoch emittierten Tracer (z.B. Quellstandort UNE in 300 m über Grund) und höhergelegene Quellen am Erzgebirgskamm (z.B. BOL) eine Übereinstimmung mit den Probandenmeldungen zeigen. Deutliche Konzentrationsunterschiede zwischen Bodenschicht und darüberliegenden Schichten wurden zwar häufig gefunden. Allerdings sind dabei mal höhere Konzentrationen am Boden und mal in der Höhe festgestellt worden, woraus sich kein generelles Bild ergab.

Unter der Annahme, dass die verschiedenen Probanden den selben Geruch feststellen, wäre eine mögliche Erklärung für die von der Anströmung abhängigen unterschiedlichen Quellregionen, dass es sich bei den geruchsverursachenden Quellen um mehrere gleichartige (z.B. Braunkohlekraftwerke oder -tagebaue) oder großflächig verteilte kleine (z.B. Hausbrand) handelt. Eine andere Erklärung wäre, dass erst durch chemische Umwandlungen in der Atmosphäre die geruchsverursachenden Substanzen aus Vorläufergasen entstehen. Ohne genauere Kenntnis dieser Substanzen lässt sich darüber allerdings nur spekulieren.

Referenzen

- Baldauf, M., A. Seifert, J. Forstner, D. Majewski, M. Raschendorfer, and T. Reinhardt (2011): Operational Convective-Scale Numerical Weather Prediction with the COSMO Model: Description and Sensitivities, *Mon Weather Rev*, **139**(12), 3887-3905.
- Faust, M. (2017): Entwicklung eines Lagrangeschen Partikel Dispersions Modells zur Identifizierung von Geruchsquellen im Erzgebirge. Master Thesis, University of Leipzig, Germany 2017.
- Heinold, B., I. Tegen, R. Wolke, A. Ansmann, I. Mattis, A. Minikin, U. Schumann, B. Weinzierl (2012): Simulations of the 2010 Eyjafjallajökull volcanic ash dispersal over Europe using COSMO–MUSCAT, *Atmos. Environ.* **48**: 195-204.
- Heinold, B., J. Helmert, O. Hellmuth, R. Wolke, A. Ansmann, B. Marticorena, B. Laurent and I. Tegen (2007): "Regional modeling of Saharan dust events using LM-MUSCAT: Model description and case studies." *J. Geophys. Res. - Atmos.* **112**(D11): D11204.
- Hinneburg, D., E. Renner, R. Wolke (2009): "Formation of secondary inorganic aerosols by power plant emissions exhausted through cooling towers in Saxony." *Environ. Sci. Pollut. Res.* **16**(1): 25-35 (doi:10.1007/s11356-11008-10081-11355).
- Jähn, M, R. Wolke, B.Sändig, E. Renner (2012): "Ermittlung der Quellen von Gerüchen und hohen Schadstoffkonzentrationen im Erzgebirge über die Modellierung der Luftmassenbahnen " *Abschlussbericht*, <https://www.umwelt.sachsen.de/umwelt/download/Geuchbericht.pdf>.
- Jähn, M, R. Wolke, B.Sändig (2013): "Detection of odor sources and high concentrations of pollutants in the Ore Mountains by modeling of air mass paths." *Meteorologische Zeitschrift* **22**, No. 2, 213–220.
- Miltenberger, A.K., Pfahl S., and Wernli H. (2013): An online trajectory module (version 1.0) for the nonhydrostatic numerical weather prediction model COSMO, *Geosci. Model Dev.*, **6**, 1989–2004, doi:10.5194/gmd-6-1989-2013.
- Renner, E. and R. Wolke (2010): "Modelling the formation and atmospheric transport of secondary inorganic aerosols with special attention to regions with high ammonia emissions." *Atmos. Environ.* **44**(15): 1904-1912.
- Schättler, U., G. Doms, C. Schraff (2009): A description of the nonhydrostatic regional COSMO-Model. Part I: Users Guide. Deutscher Wetterdienst, Offenbach, 2009. [<http://www.cosmo-model.org>].
- Stern, R., P. Builtjes, M. Schaap, R. Timmermans, R. Vautard, A. Hodzic, M. Memmesheimer, H. Feldmann, E. Renner, R. Wolke and A. Kerschbaumer (2008): "A

model intercomparison study focussing on episodes with elevated PM10 concentrations." *Atmos. Environ.* **42**(19): 4567-4588.

Wolke, R., O. Knoth, O. Hellmuth, W. Schröder, E. Renner (2004): The parallel model system LM-MUSCAT for chemistry-transport simulations: Coupling scheme, parallelization and application, in: G.R. Joubert, W.E. Nagel, F.J. Peters, and W.V. Walter, Eds., *Parallel Computing: Software Technology, Algorithms, Architectures, and Applications*, Elsevier, Amsterdam, The Netherlands, 363-370.

Wolke, R., W. Schröder, R. Schrödner, E. Renner (2012): Influence of grid resolution and meteorological forcing on simulated European air quality: A sensitivity study with the modeling system COSMO–MUSCAT, *Atmos. Environ.* **53**: 110-130.

Anhang

Tabelle 4: Bezeichnung und Standorte der im Bericht verwendeten Tracerquellen.

Kurzbezeichnung	Name	geogr. Breite [°]	geogr. Länge [°]
<i>Industrie, Kraftwerke, Tagebau</i>			
LED	Kraftwerk Ledvice	50,575336	13,779531
ZAL	Industriekomplex Záluží	50,555908	13,6020209
UNE	United Energy, Inc.		
EAT	Eaton Industries Ltd.	50,454692	13,368092
KAD	Kadaň	50,374903	13,288429
KAD-E	Kraftwerk Kadaň	50,411759	13,252814
VRE	Kraftwerk Vřesová	50,257619	12,692799
ALB	Braunkohletagebau	50,557144	13,524828
	Albrechtice (6 Standorte)	50,540201	13,54516
		50,541984	13,521541
		50,538943	13,492398
		50,524967	13,501297
		50,549573	13,510633
<i>sonstige Standorte</i>			
OSE	Osek	50,622469	13,691467
LOU	Louka u Litvínova	50,596698	13,637808
LIT	Litvínov	50,60420291	13,6181158
HOR	Horní Jiřetín	50,575	13,5453
MOS1	Most (östl. Stadtrand)	50,499751	13,680376
MOS2	Most (Zentrum)	50,50300691	13,63617407
BOL	Boleboř	50,540232	13,412781
JIR	Jirkov	50,498945	13,425569
CHO	Chomutov	50,46047542	13,41778558
MIS	Místo	50,447427	13,269906
MED	Měděnec	50,421904	13,119305
STR	Stráž nad Ohří	50,339567	13,053485
OST	Ostrov	50,30592466	12,93906742
ROT	Rotava	50,29631111	12,57338055

Tabelle 5: Zusammenfassung der Ergebnisse der Tracersimulationen (gültig für unterste Schicht im Modell, d.h. die bodennächsten 20 m).

x: erhöhte Tracerkonzentration am Probandenstandort während des gesamten Meldezeitraumes (zusätzlich rot eingefärbt). **t:** teilweise. Tracerzeitserie weist Lücken, d.h. kein Tracer vor Ort, während des Meldezeitraumes auf. **g:** nur gelegentlich. Tracer wird nur gelegentlich zum Probandenstandort transportiert, ist aber den größten Teil des Meldezeitraumes dort vorzufinden. **-**: nicht untersucht. **"_0"**: Tracer wurde bodennah emittiert (unterste Modellschicht, entspricht ca. 10 m über Grund). **"_1"**: Tracer wurde in 100 m über Grund emittiert. **"_2"**: Tracer wurde in 200 m über Grund emittiert. **"_3"**: Tracer wurde in 300 m über Grund emittiert. **Ohne Eintragung:** Keine zeitliche Übereinstimmung von erhöhten Tracerkonzentrationen am Probandenstandort und Probandenmeldungen. Standorte der untersuchten Quellen siehe Abbildung 1.

Abkürzungen der Probandenstandorte: **Nov:** Nová Ves v Horách, **Lit:** Litvínov, **Olb:** Olbernhau, **Ein:** Deutscheinsiedel, **Dlo:** Dlouhá Louka, **Sei:** Seiffen / Steinhübel, **Sei2:** Seiffen / Mannsche, **Ste:** Steinhübel, **Say:** Sayda, **Rüb:** Rübenu, **Mar:** Marienberg.

Station	19.01.17				21.01.17					25.01.18				26.01.18				14.02.18			15.02.18							
	Nov 8- 8:30	Lit 13-20	Olb 15-18	Ein 17-18	Dlo Lit 8- 20	Olb 9:45- 10	Olb 13- 13:30	Sei2 16:20 -18	Sei 23:15 -NA	Sei 12-23	Ste Sei 6-24	Lit 9- 7:40- 10	Olb 12	Olb 17-22	Say 18:15 -23	Olb 0-10	Olb 17-24	Sei 5- 15	Say 6-10	Ste 7-8	Rüb 6:30- 17	Say 9:30- 10:45	Mar 15-17	Sei 5- 24	Rüb 6:30- 7	Olb 7:30- 8:30	Olb 17:45 -19	
	<i>Industrie, Kraftwerke, Tagebau</i>																											
LED_0			x	x	t			x	x	x	g																	
LED_1	x		x	x	t			x	x	x	g			t														
ZAL_0		t			x						t		x	x	x	x		t	x	x	g			t			x	
ZAL_1		t			x	x					t		x	x	x	x		t	x	x				t			x	
ZAL_2		t			x	x			x		g		x	x	x	x		t	t	x				t			x	
UNE_0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	t		x	t	x	x		g	g				t		x	x	x	
UNE_1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	t		x	t	x	x		t	x				t		x	x	x	
UNE_2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	t		x	t	x	x		t	x				t		x	x	x	
UNE_3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	t		t	t	x	x		g	x	x		t		x		x	x	
EAT_0														t				t								x	x	
EAT_1											g		t					t						g		x		
KAD_0														t				g	g					t		x	x	x
KAD_1											g							g	t							x	x	x
KAD-E_0	-	-	-	-							g	g	t					g	g	g				g		x	x	

KAD-E_1	-	-	-	-				g	g	t		g	g			g	x	x
KAD-E_2	-	-	-	-				g	g	t		g	g			g	x	
VRE_0																		
VRE_1																		
ALB	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	t	x	x	x	x	x	x	x
<i>sonstige Standorte</i>																		
OSE_0	x	x	x	x	x	x		x	x	x	t	t	g	t	t	t	x	x
OSE_1	x	x	x	x	x		t	x		x	x	x	x	t	t	t	x	x
LOU_0		x	x				t	x		x	x	t	t	t	x	t		t
LOU_1		x		t	x		x	x		X		t	t	t	t	x	t	t
LIT_0	x	x	x	x	x		x	x	x	x		t	t	x	t	x		t
LIT_1	x	x	x	x	x		x	x	x	x	x	x	t				x	t
HOR_0		t	x				x		x	x	t	t	x	x	x	g	t	t
HOR_1		t	x				x		x	x	t	t	x	x	x	g	t	t
MOS1_0	x						t											t
MOS1_1										g	t		g	t	g	t		t
MOS2_0	x						x				g	t	t	t	x		g	
MOS2_1	x						t				g	t	t	t	x	t	t	t
BOL_0									x			t	x	t	x	x	g	t
BOL_1											t	x	t	x	x	g	t	x
JIR_0	-	-	-	-							g		x	g	t	g	t	g
JIR_1	-	-	-	-							g		x	x	t	g	t	g
CHO_0	x								x			t					x	t
CHO_1	x								x		g	t	x					g
MIS_0											g	x	t		t	g		t
MIS_1											g	x	t		t	g		g
MED_0											t	x	t			g		
MED_1											g	x	t			g		

STR_0						
STR_1						
OST_0			g	x	t	
OST_1					g	
ROT_0						
ROT_1						