

Ausbreitungsrechnungen für eine Masthähnchenanlage

Dr. Ulf Janicke

2014-08-27

Im Auftrag des
Bayerischen Landesamtes für Umwelt
Auftragsnummer 21-0270-8960/2014

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	2
2	Anlage und Vorgehen	2
2.1	Anlage	2
2.2	Emissions- und Immissionsmessungen mit zeitgleicher Spurengasmessung	4
2.3	Meteorologie	6
2.4	Ausbreitungsrechnungen	7
2.5	Impulsüberhöhung und Gebäudeeinfluß	8
3	Ergebnisse	10
3.1	Vergleich von gemessener und modellierter SF ₆ -Konzentration	10
3.2	Vergleich der gemessenen SF ₆ - und Bioaerosol-Konzentrationsverteilungen	14
3.3	Vergleich für weitere Zeitperioden zu verschiedenen Jahreszeiten	17
4	Diskussion	31

1 Einleitung

Für eine Masthähnchenanlage wurden zeitgleich Emissions- und Immissionsmessungen von Bioaerosolen (Parameter Gesamtbakterien und Staphylokokken in KBE) und Ausbreitungsexperimente mit dem Spurengas SF₆ durchgeführt. Die Bioaerosol-Messungen wurden vom Bayerischen Landesamt für Umwelt (LfU), die SF₆-Messungen vom Ing.-Büro Lohmeyer (IBL) unter Mitarbeit des Ing.-Büros Theurer vorgenommen. Zusätzlich wurden vom LfU meteorologische Kenngrößen gemessen.

Das inerte Spurengas SF₆ wurde aus einem der Anlagenkamine mit kontrollierter, bekannter Emissionsrate freigesetzt und parallel hierzu wurden die Abluftbedingungen dieses Kamins vermessen. SF₆ kommt in der Natur praktisch nicht vor und seine Konzentration kann mit hoher Genauigkeit bestimmt werden. Damit stellen die SF₆-Messungen eine zuverlässige Referenz dar, mit der sowohl die Bioaerosol-Messungen als auch Ausbreitungsrechnungen verglichen werden können.

Im Folgenden werden die SF₆-Messungen mit Ausbreitungsrechnungen verglichen, die mit dem Ausbreitungsmodell LASAT durchgeführt wurden. In einem zweiten Schritt wurden die SF₆-Messungen den Bioaerosol-Messungen gegenübergestellt, teilweise unterstützt durch Ausbreitungsrechnungen. In einem dritten Schritt wurden weitere Intervalle zu verschiedenen Jahreszeiten, für die jedoch keine SF₆-Referenzmessungen vorlagen, analysiert und nachgerechnet.

2 Anlage und Vorgehen

2.1 Anlage

Die Anlage besteht im wesentlichen aus einem einzelnen Stall in flachem, freiem Gelände mit zum Zeitpunkt der Messung (18. März 2014) praktisch kahlen Feldern, siehe Bilder 1 und 2.

Der Stall hat eine horizontale Ausdehnung von etwa 20 m mal 100 m, eine Traufhöhe von etwa 3.6 m und eine Firsthöhe von 8.0 m. Die 6 Abluftkamine befinden sich in Firstnähe am westlichen Ende des Daches. Die Abluftöffnung hat jeweils einen Durchmesser von 1.2 m und befindet sich rund 3 m über Firsthöhe, siehe Bild 2. Im folgenden werden die Kamine von 1 bis 6 durchnummeriert, beginnend mit dem vom Giebel entferntesten (am östlichsten gelegenen) Kamin.

Während der Spurengasmessungen waren nur die Kamine 1 bis 4 aktiv. Ihre Austrittsparameter (Temperatur und Geschwindigkeit) waren sehr ähnlich und über den Verlauf der Messungen näherungsweise konstant. Die Austrittstemperatur lag mit Werten zwischen 19 und 26 °C nur wenig über der Umgebungstemperatur (11 bis 19 °C).

Die gemessene Strömungsgeschwindigkeit im Abgaskanal vor dem aufgesetzten Diffusor

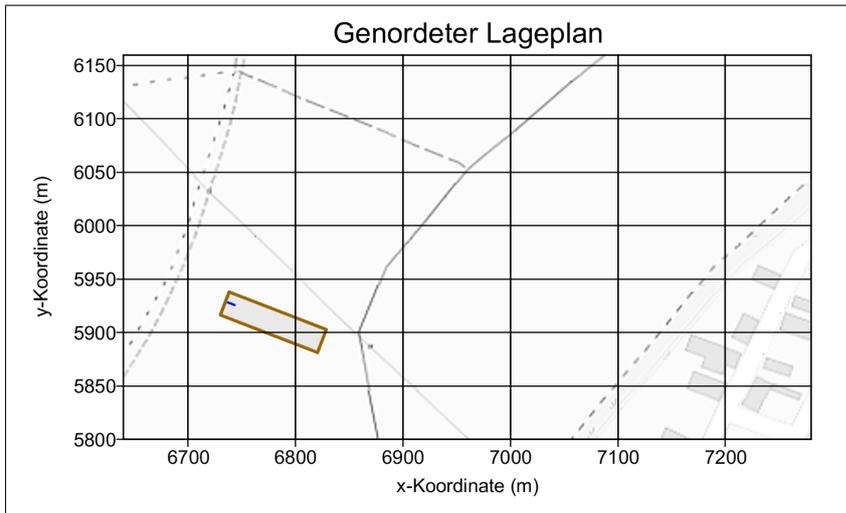


BILD 1: Lageplan mit dem Grundriß des Stallgebäudes (braunes Rechteck) und der Position der 6 Abluftkamine (sehr kleine blaue Punkte). Plan basierend auf *Open Street Map*.



BILD 2: Oben: Anlage von Osten aus gesehen.
Unten: Ansicht der 6 Abluftkamine (von links nach rechts: Kamin 1 bis Kamin 6). Im Vordergrund ist die Station I1/Im1 des Vormittags zu sehen (links der helle Kasten mit den Spülflaschen für die Bioaerosolmessung, rechts das Stativ mit dem SF₆-Einlaßschlauch).
Bilder UJ.

betrug etwa 10 m/s. Im Kanal von Kamin 1 mit variablem Betriebsmodus lag sie im Bereich 2.3 bis zu 9.8 m/s. Durch den Aufsatz des Diffusors wurde die mittlere Strömungsgeschwindigkeit am Diffusoraustritt auf geschätzte 60% verringert.¹ Die mittlere Austrittsgeschwindigkeit lag somit bei etwa 6 m/s bzw. für Kamin 1 zwischen 1 und 6 m/s.

2.2 Emissions- und Immissionsmessungen mit zeitgleicher Spurengasmessung

Die Emissions- und Immissionsmessungen wurden am 18. März 2014 in zwei Perioden von je 2.5 Stunden Dauer durchgeführt. Die Vormittagsmessung ging von 10:00 bis 12:30 (MEZ), die Nachmittagsmessung von 13:15 bis 15:45.

Die SF₆-Messungen wurden für halbstündige Intervalle durchgeführt (5 Halbstundenmittel für den Vormittag, 5 für den Nachmittag). Die Bioaerosolmessungen fanden von 10:00 bis 10:30, 11:00 bis 11:30, 12:00 bis 12:30, 13:15 bis 13:45 und 14:15 bis 14:45 statt (3 Halbstundenmittel für den Vormittag, 2 für den Nachmittag).

Während der Messungen kam der Wind beständig aus westsüdwestlicher Richtung. Die Konzentrationsmessungen fanden an einem Punkt in Luv der Anlage (Hintergrundmessung) und an 5 Punkten in Lee der Anlage in Entfernungen zwischen etwa 100 m und 500 m vom Stall statt. Für die Nachmittagsmessungen wurden einige der Lee-Stationen des Vormittags versetzt. Die Bioaerosol- und die SF₆-Messungen wurden jeweils an denselben Monitorpunkten in einer Höhe von etwa 1.5 m über Grund durchgeführt. Die Lage der Stationen ist in Bild 3 dargestellt, Tabelle 1 listet die Bezeichnungen und Koordinaten auf.

Die SF₆-Freisetzung erfolgte durch Injizierung innerhalb des Kamins 2 (Messkamin) etwa 2 m unterhalb der Austrittsöffnung. Der Emissionsmassenstrom wurde kontinuierlich kontrolliert. Er hatte einen zeitlich praktisch konstanten Wert von $3.28 \times 10^5 \mu\text{g/s}$.²

Zur Bestimmung der Bioaerosol-Freisetzung in den Kaminen 1 bis 4 wurden im Messkamin während jedes der 5 Intervalle mit Bioaerosolmessungen Emissionsmessungen gemäß Richtlinie VDI 4257 Blatt 1 durchgeführt. Später wurde mit einem kulturbasierten Nachweisverfahren die Konzentration der relevanten Parameter in KBE/m³ nach Richtlinie VDI 4256 Blatt 1 bestimmt. Durch Multiplikation mit den gemessenen Volumenströmen für Kamin 1 und 2 ergaben sich für jedes Intervall Emissionsmassenströme für die Parameter Gesamtbakterien und Staphylokokken in KBE/s.³ Typische Werte über die Summe der 4 Kamine lagen zwischen 2×10^8 und 7×10^8 KBE/s.

¹Die Annahme von gleichem Volumenstrom $(\pi/4)d^2v$ für den Abgaskanal ($d_1 = 0.92 \text{ m}$, v_1) und die Diffusoraustrittsfläche ($d_2 = 1.20 \text{ m}$, v_2) liefert $v_2 = (0.92/1.20)^2 v_1 = 0.6v_1$.

²Durchflußrate 191 l/h, Dichte des SF₆-Gases 6.18 kg/m³ bei 15 °C und 1 bar.

³Für die Kamine 3 und 4 konnte derselbe Volumenstrom wie für Kamin 1 bzw 2 angesetzt werden, da alle Kamine baugleich sind, dieselbe Leistung haben und auf Vollast laufen.

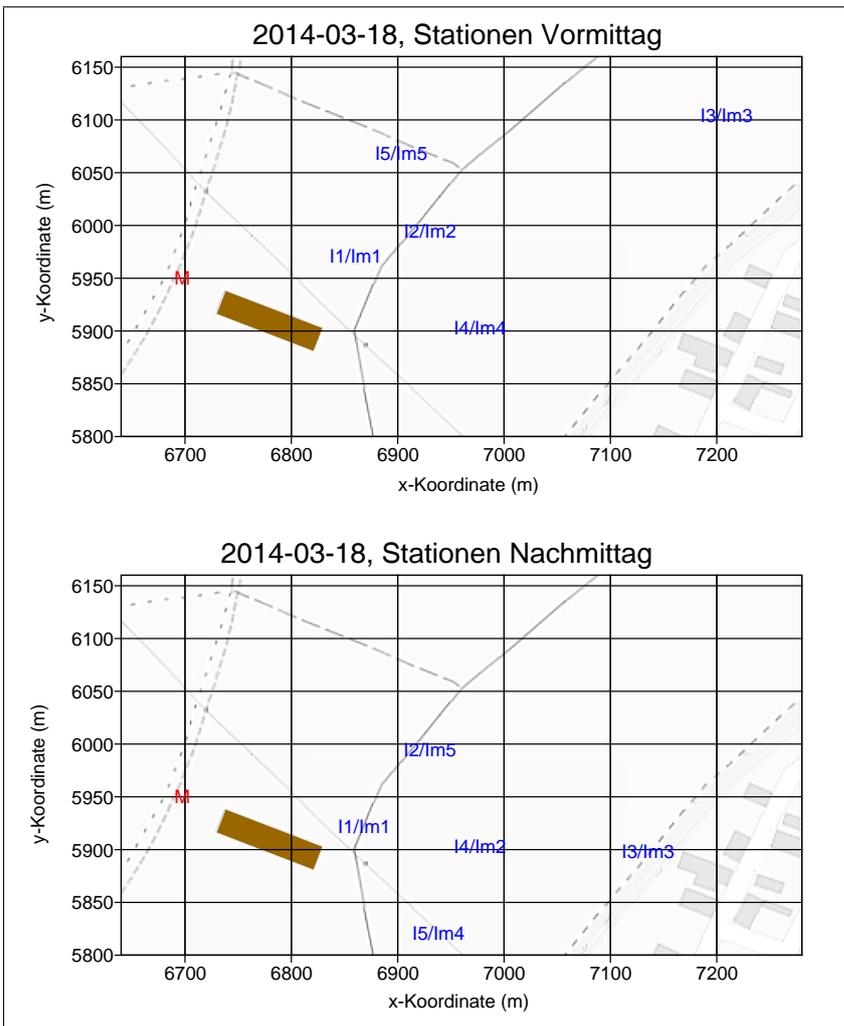


BILD 3: Lage der Stationen am Vormittag und am Nachmittag. Die erste Bezeichnung (z.B. I1) ist die Kennzeichnung für die SF₆-Messungen nach IBL, die zweite (z.B. Im1) die für die Bioaerosolmessungen nach LfU. Das ‚M‘ markiert den Ort des Anemometers.

Bezeichnung (IBL/LfU)	x-Koordinate (m)	y-Koordinate (m)	Entfernung (m)
Vormittag			
I1/Im1	6859	5971	125
I2/Im2	6930	5995	200
I3/Im3	7209	6105	500
I4/Im4	6977	5903	236
I5/Im5	6903	6069	215
Nachmittag			
I1/Im1	6867	5922	125
I2/Im5	6930	5995	200
I3/Im3	7135	5899	394
I4/Im2	6977	5903	236
I5/Im4	6938	5821	222

TABELLE 1: Koordinaten der Stationen und aus den Koordinaten berechnete Entfernung zum Messkamin (Kamin 2 bei 6742 m/5927 m). Die erste Bezeichnung (z.B. I1) ist die Kennzeichnung für die SF₆-Messungen nach IBL, die zweite (z.B. Im1) die für die Bioaerosolmessungen nach LfU.

2.3 Meteorologie

Etwa 40 m nordwestlich des Stalls (Koordinaten 6697 m/5950 m) und 10 m über Grund wurden parallel zu den Immissionsmessungen meteorologische Messungen mit einem dreidimensionalen Ultraschallanemometer durchgeführt. Hierbei wurden Windgeschwindigkeit, Windrichtung und Turbulenzparameter in Form von aufeinanderfolgenden 3-Minutenmitteln bestimmt. Aus den Originaldaten wurden Windgeschwindigkeit, Windrichtung sowie die horizontalen und vertikalen Geschwindigkeitsfluktuationen direkt als Zeitreihe für die Ausbreitungsrechnung übernommen. Die Monin-Obukhov-Länge wurde als gleitendes 15-Minuten-Mittel aufbereitet.

Bild 4 zeigt den Verlauf von Windgeschwindigkeit, Windrichtung, Temperatur und inverser Monin-Obukhov-Länge. In der ersten Periode (10:00 bis 12:30) lag die Windgeschwindigkeit im Mittel bei 4.6 m/s, die Windrichtung bei 265 (-95) Grad und die Schichtung war labil. In der zweiten Periode (13:15 bis 15:45) nahm die Windgeschwindigkeit zu auf im Mittel 7.3 m/s, die Windrichtung war relativ konstant mit im Mittel 258 (-102) Grad und die Schichtung ging vom labilen in den indifferenten Bereich über.

Aus den meteorologischen Daten konnte auch die Rauigkeitslänge abgeschätzt werden. Die Auswertung ergab einen Wert von rund 0.02 m.

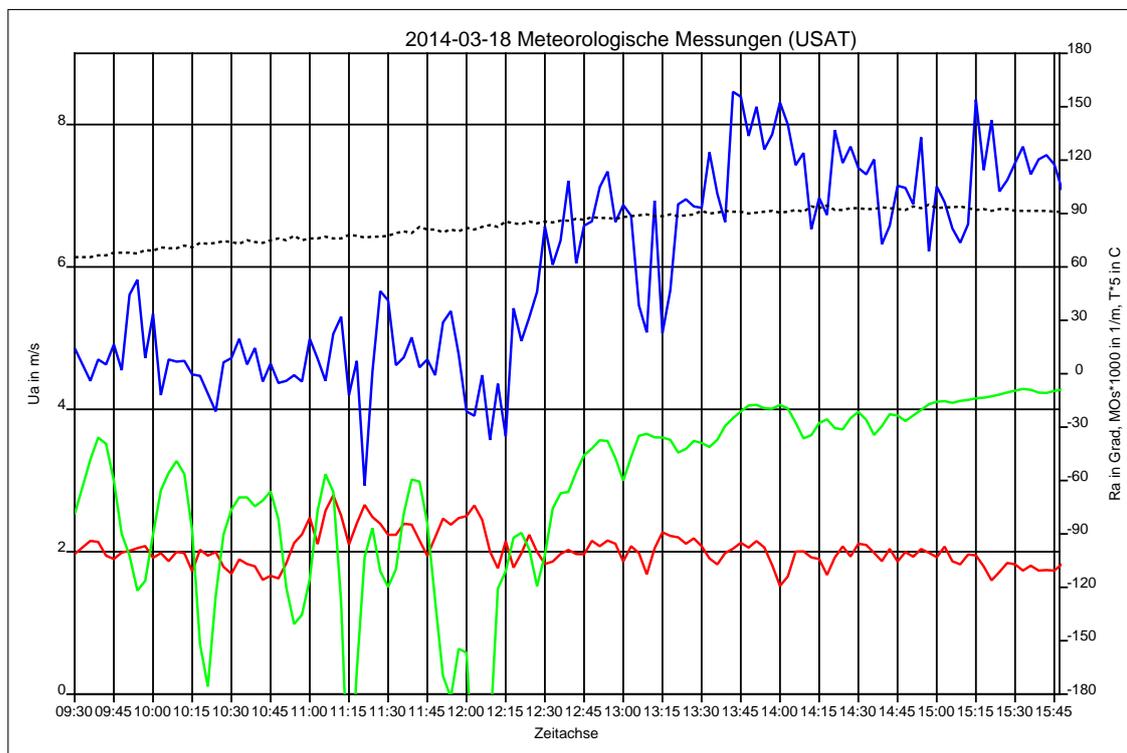


BILD 4: Zeitlicher Verlauf von Windgeschwindigkeit (blau), Windrichtung (rot) und Temperatur (schwarz gestrichelt) – aufgetragen jeweils für den Anfangszeitpunkt des 3-Minuten-Mittelungsintervalls – sowie inverser Monin-Obukhov-Länge (grün, gleitendes 15-Minuten-Mittel). Zeitangaben in MEZ.

2.4 Ausbreitungsrechnungen

Für die Ausbreitungsrechnungen wurde das Partikelmodell LASAT in der aktuellen Version 3.3.43 eingesetzt. LASAT ist konform mit der Richtlinie VDI 3945 Blatt 3 und das Muttermodell von AUSTAL2000. Gegenüber AUSTAL2000 bietet LASAT eine größere Flexibilität und insbesondere die Möglichkeit, zusätzliche meteorologische Daten und Substanzeigenschaften zu berücksichtigen.

SF₆ wurde als inertes Spurengas ohne Deposition modelliert, die Emissionsrate für den Meskamin wurde entsprechend den Messungen als konstanter Wert vorgegeben. Für die Emission der Parameter Gesamtbakterien und Staphylokokken aus den 4 Kaminen wurden die zeitabhängigen, aus den Messungen berechneten Emissionsraten in Form von Halbstundenmitteln verwendet.⁴

Für die Bioaerosole wurde ein aerodynamischer Durchmesser unter etwa 1 µm angenommen (vernachlässigbare Deposition) und es wurde eine Lebensdauer angenommen, die groß im Vergleich zu den hier betrachteten Transportzeiten von maximal einer Minute ist (vernachlässigbare Absterbeprozesse). Beide Annahmen werden später anhand der Ergebnisse noch diskutiert.

Die Kamine wurden als Punktquellen in der Höhe 11.3 m über Grund modelliert, der Stall wurde in der Windfeldberechnung explizit als Gebäude mit einer Höhe von 8 m aufgelöst. In den Testrechnungen, in denen eine Impulsüberhöhung berücksichtigt wurde (eine thermische Überhöhung war aufgrund der geringen Temperaturdifferenz zwischen Abluft und Außenluft vernachlässigbar), wurde der Öffnungsdurchmesser am Austritt des Diffusors mit 1.2 m und eine mittlere Austrittsgeschwindigkeit von 6 m/s vorgegeben.

Das Gelände wurde als eben mit einer Rauigkeitslänge von 0.02 m angenommen. Es wurden zwei geschachtelte Rechennetze mit den horizontalen Maschenweiten 2 m und 4 m verwendet. Das Vertikalraster hatte in Bodennähe eine Auflösung zwischen 0.5 m und 2 m.

Es wurde das LASAT-Grenzschichtmodell 2.1 verwendet, das es erlaubt, die gemessenen Geschwindigkeitsfluktuationen und die Mittelungszeit von 3 Minuten zu berücksichtigen und das nach den bisherigen Erfahrungen etwas realistischere horizontale Fahnenbreiten liefert als das Grenzschichtmodell von AUSTAL2000.

Die Meteorologie wurde als Zeitreihe von aufeinanderfolgenden 3-Minutenmitteln von Windgeschwindigkeit, Windrichtung, horizontalen und vertikalen Geschwindigkeitsfluktuationen in Anemometerhöhe (10 m über Grund) vorgegeben. Es wurden durch Anpassung des meteorologischen Grenzschichtprofils in LASAT direkt die mit dem Ultraschallanemometer gemessenen Werte übernommen. Die Schubspannungsgeschwindigkeit für die Turbulenzprofile wurde in diesem Fall intern aus den vertikalen Geschwindigkeitsfluktuationen anstatt aus

⁴Die Bioaerosolfreisetzung wurde als halbstündiger Summenparameter erfaßt, über Emissionsschwankungen innerhalb dieser Zeit lagen daher keine Informationen vor. Das schränkt die Aussagegenauigkeit der Modellergebnisse ein, falls es starke Schwankungen gäbe und diese zufällig mit einer stark schwankenden Windrichtung, die als Mittelwert über 3 Minuten vorgegeben wurde, korreliert wären.

dem Windprofil bestimmt. Die Monin-Obukhov-Länge wurde aus den Daten als gleitendes 15-Minutenmittel abgeleitet und ebenfalls als 3-Minutenmittel vorgegeben.

Die Konzentrationen wurden als Halbstundenmittel auf dem Netz mit der horizontalen Maschenweite 4 m und dem Vertikalintervall 1 m bis 2 m über Grund bestimmt. Die statistische Unsicherheit der Konzentrationwerte war an den Aufpunkten, die von der Fahne hinreichend beaufschlagt wurden, kleiner als 5%.

2.5 Impulsüberhöhung und Gebäudeeinfluß

Die Berücksichtigung einer Abgasfahnenüberhöhung nach dem Standardverfahren (Berechnung gemäß Richtlinie VDI 3783 Blatt 2) ist möglich, wenn eine freie Abströmung vorliegt. Richtlinie VDI 3783 Blatt 13 legt als Faustregel fest, daß das der Fall ist, wenn der Austritt mindestens 3 m über First und die Austrittsgeschwindigkeit mindestens 7 m/s beträgt.

Mit diesen Bedingungen soll sichergestellt werden, daß Störeffekte durch das Gebäude oder den Kamin als Baukörper selbst keinen wesentlichen Einfluß auf das Überhöhungsverhalten haben. Bei Austrittsgeschwindigkeiten kleiner als etwa dem 1.5-fachen der Anströmgeschwindigkeit kann der Unterdruckbereich in Lee des Kamins zu einer Unterdrückung der Überhöhung bis hin zu einer Herabsetzung der Fahnenachse führen (sogenannter *down wash*).⁵

Dem geforderten Mindestwert von 7 m/s entspricht bei einem Verhältnis von Ausström- zu Anströmgeschwindigkeit von mindestens 1.5 eine Anströmgeschwindigkeit von nicht mehr als 4 bis 5 m/s. Das ist im Jahresmittel ein für Deutschland plausibler Wert. Für die hier betrachteten Einzelfälle sieht die Situation anders aus: Am Vormittag liegt das Verhältnis von Austrittsgeschwindigkeit zu Anströmgeschwindigkeit bei etwa 1.3, am Nachmittag sogar nur bei 0.8. Angesichts dieser Werte und des ausgedehnten Baukörpers, den die 6 eng nebeneinander stehenden Kamine bilden, ist zu erwarten, daß eine Impulsüberhöhung am Vormittag nur wenig wirksam und am Nachmittag vollständig unterdrückt ist.

Die Rauchexperimente, die am Nachmittag vom Ing.-Büro Lohmeyer durchgeführt wurden, belegen dies und zeigen, daß die Fahne bereits nach wenigen Metern in den Leebereich von Kaminen und Gebäudedach heruntergezogen und entlang der Dachschräge und dem Stall transportiert wurde, siehe Bild 5. Entsprechend müßte in der Ausbreitungsrechnung ohne Überhöhung gerechnet werden. Selbst dann wird die Situation nicht vollständig erfaßt, denn der Transport entlang der Dachschräge nach unten kann in der Ausbreitungsrechnung, in der der Stall als Kasten mit flachem Dach eingeht, nicht explizit modelliert werden.

Für den Vormittag wurde daher für Vergleichszwecke eine Rechnung mit und eine Rechnung ohne Überhöhung durchgeführt. Für den Nachmittag wurde eine Rechnung ohne Überhöhung und eine Rechnung mit horizontal versetztem Emissionsort und ohne Überhöhung durchgeführt.

⁵Siehe z.B. BRIGGS, G.A. (1984): *Plume rise and buoyancy effects*. In: Atmospheric Science and Power Production (ed. D. Randerson) DOE/TIC-27601, US Dept. Energy, available from NTIS, Springfield, VA, USA.



BILD 5: Darstellung der Strömungsverhältnisse am Nachmittag mit Hilfe von Rauchversuchen (die Bilder wurden zu unterschiedlichen Zeitpunkten aufgenommen). Bild oben IBL, Bild unten UJ.

3 Ergebnisse

3.1 Vergleich von gemessener und modellierter SF₆-Konzentration

Bild 6 zeigt die modellierte SF₆-Konzentrationsverteilung für den Vormittag (mittlere Konzentration von 10:00 bis 12:30) für eine Ausbreitungsrechnung mit Abgasfahnenüberhöhung. Mit eingetragen in Form farbiger Kästchen sind die gemessenen Konzentrationswerte.

In dieser Periode schwankte die Windrichtung relativ stark (siehe Bild 4). Der Verlauf und die Ausdehnung der Fahne wird von der Modellrechnung recht gut wiedergegeben, allerdings ist die berechnete Konzentration in Quellnähe etwas zu niedrig und die Konzentration am entferntesten Punkt I3/Im3 zu hoch. Bild 7 zeigt das Ergebnis ohne Überhöhung, die gemessenen Werte in Quellnähe werden hiermit besser wiedergegeben.

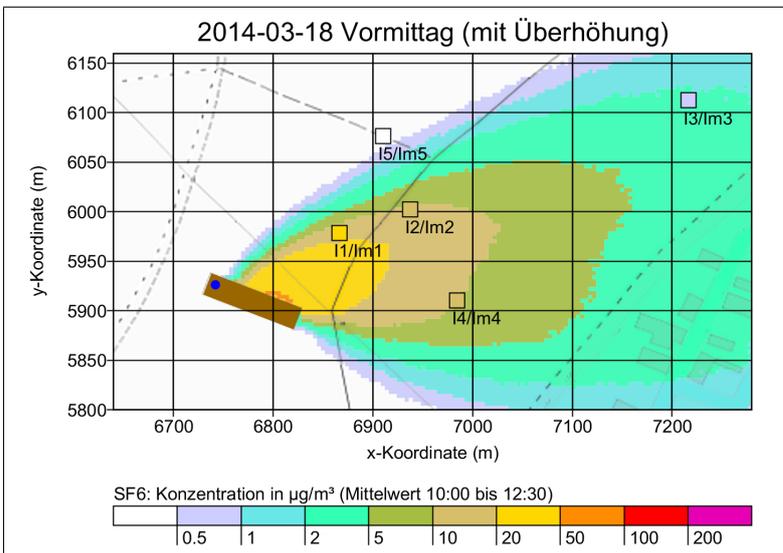


BILD 6: SF₆-Konzentrationsverteilung am Vormittag. Der Hintergrund zeigt das Ergebnis der Ausbreitungsrechnung mit Berücksichtigung einer Abgasfahnenüberhöhung, die Kästchen die Messungen an den Monitorpunkten (Mittelwerte über die Periode von 2.5 Stunden Dauer).

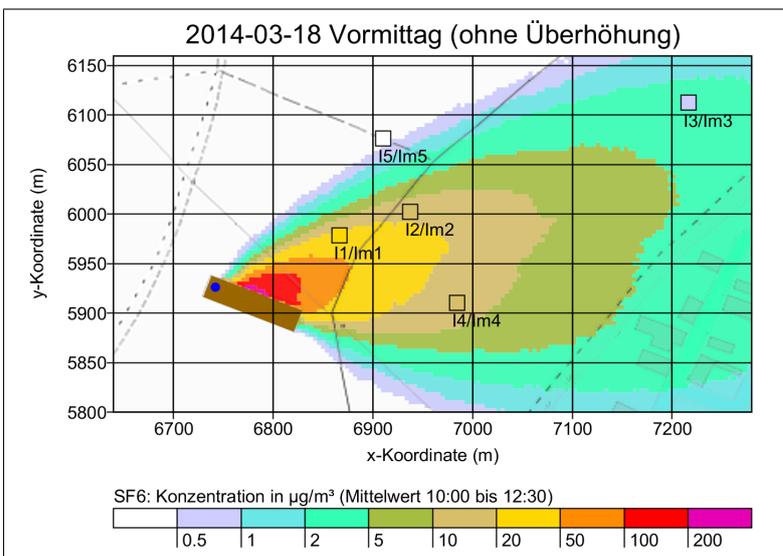


BILD 7: SF₆-Konzentrationsverteilung am Vormittag. Der Hintergrund zeigt das Ergebnis der Ausbreitungsrechnung ohne Berücksichtigung einer Abgasfahnenüberhöhung, die Kästchen die Messungen an den Monitorpunkten (Mittelwerte über die Periode von 2.5 Stunden Dauer).

Ein Vergleich von gemessenen und berechneten Halbstundenmitteln für den Vormittag und die Rechnung ohne Überhöhung ist in Bild 8 grafisch und in Tabelle 2 tabellarisch aufgeführt.

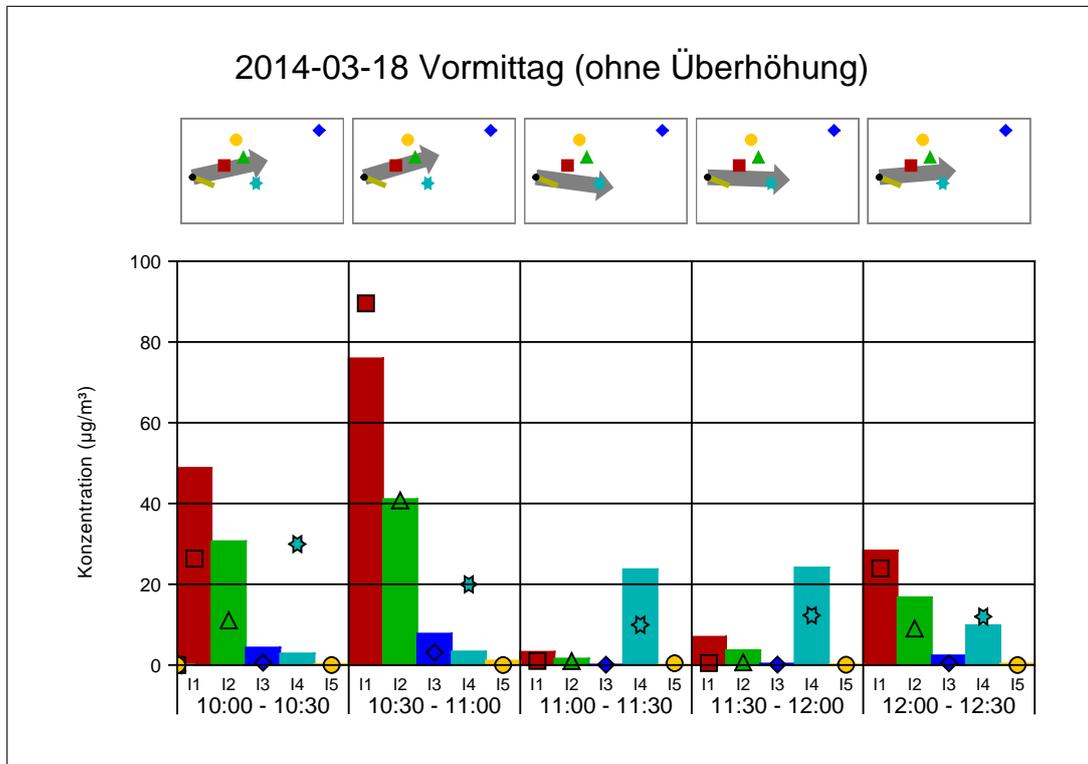


BILD 8: Vergleich der berechneten (Balken) und gemessenen (Symbole) Halbstundenmittel (Vormittag, ohne Überhöhung). Die kleinen Bilder oben deuten die Lage von Stall, Quelle und Stationen sowie die mittlere Windrichtung an.

TABELLE 2: Vormittag, Rechnung ohne Überhöhung. Vergleich von gemessenen (gem.) und berechneten (ber.) Halbstundenwerten der SF₆-Konzentration (in µg/m³) an den Monitorpunkten.

SF ₆ (µg/m ³) Intervall	I1/Im1		I2/Im2		I3/Im3		I4/Im4		I5/Im5	
	gem.	ber.	gem.	ber.	gem.	ber.	gem.	ber.	gem.	ber.
10:00 - 10:30	26.36	48.83	10.40	30.66	0.57	4.33	29.95	2.86	0.00	0.25
10:30 - 11:00	89.55	75.93	40.11	41.10	3.10	7.77	19.98	3.36	0.00	1.10
11:00 - 11:30	1.01	3.27	0.32	1.59	0.07	0.07	9.96	23.71	0.44	0.06
11:30 - 12:00	0.48	6.99	0.00	3.68	0.11	0.36	12.30	24.14	0.07	0.12
12:00 - 12:30	23.95	28.35	8.38	16.77	0.44	2.38	11.99	9.86	0.00	0.36
Mittelwert	28.27	32.68	11.84	18.76	0.86	2.98	16.84	12.79	0.10	0.38

Bei den Vergleichen ist zu beachten, daß ein großer relativer Unterschied zwischen berechnetem und gemessenem Wert, wie er zum Beispiel am Punkt I4 in den ersten beiden Halbstunden am Vormittag auftritt, nicht unbedingt signifikant ist: Wenn der betrachtete Aufpunkt am Rand der Fahne liegt, dann führen an dieser Stelle bereits kleine Unterschiede in der Lage oder Breite der Fahne auf große relative Abweichungen, obwohl die Fahnenform insgesamt gut getroffen wird. Daher ist immer auch eine Vergleich der gesamten Fahnenform (soweit Messungen hierzu vorliegen) hilfreich.

Bild 9 zeigt die berechnete und gemessene Konzentrationsverteilung für den Nachmittag (Rechnung ohne Überhöhung). Die berechnete Fahne ist im Vergleich zur gemessenen etwas nach Norden verschoben. Nach der Diskussion in Abschnitt 2.5 ist der Grund vermutlich der *down wash* hinter den Kaminen und der Transport entlang des schrägen Stalldaches, der in der Modellierung unzureichend berücksichtigt wird.

Zum Vergleich zeigt Bild 10 das Ergebnis einer Rechnung ohne Überhöhung, in der die Quelle auf dem Stalldach testweise im Rahmen einer möglichst einfachen Modifikation entlang der Dachachse versetzt wurde. Die Übereinstimmung mit den Messungen fällt besser aus.

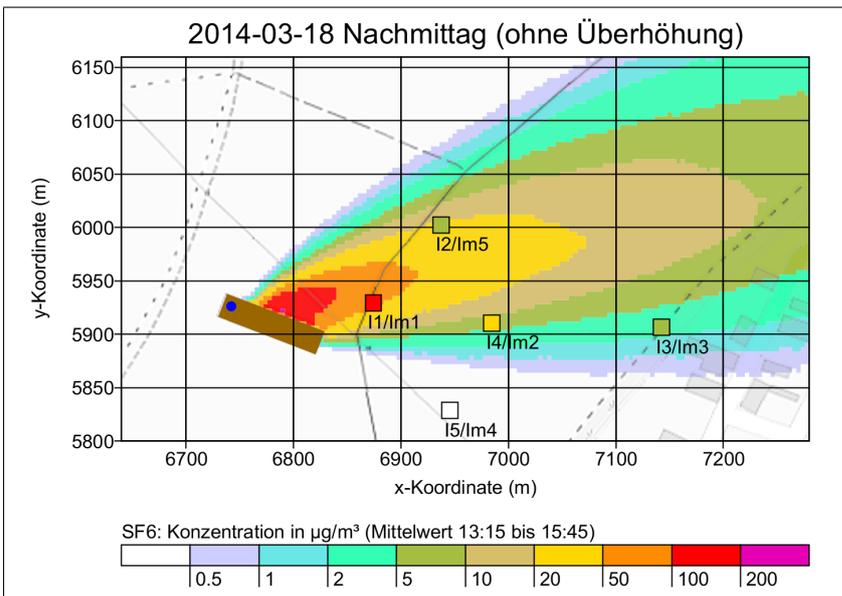


BILD 9: SF₆-Konzentrationsverteilung am Nachmittag. Der Hintergrund zeigt das Ergebnis der Ausbreitungsrechnung ohne Berücksichtigung einer Abgasfahnenüberhöhung, die Kästchen die Messungen an den Monitorpunkten (Mittelwerte über die Periode von 2,5 Stunden Dauer).

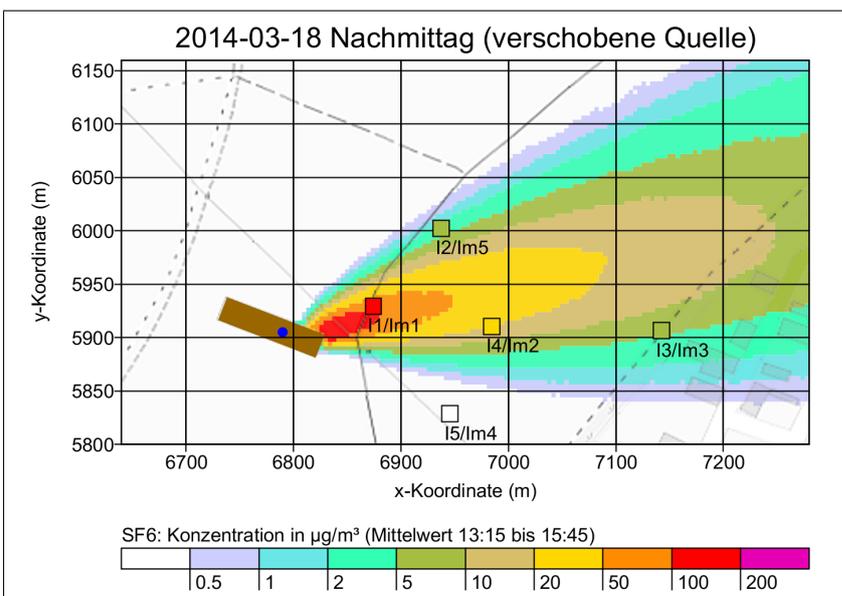


BILD 10: SF₆-Konzentrationsverteilung am Nachmittag. Der Hintergrund zeigt das Ergebnis der Ausbreitungsrechnung ohne Berücksichtigung einer Abgasfahnenüberhöhung und mit einem Versatz der Quelle, die Kästchen die Messungen an den Monitorpunkten (Mittelwerte über die Periode von 2,5 Stunden Dauer).

Ein Vergleich von gemessenen und berechneten Halbstundenmitteln für den Nachmittag ist in Bild 11 grafisch und in Tabelle 3 tabellarisch aufgeführt.

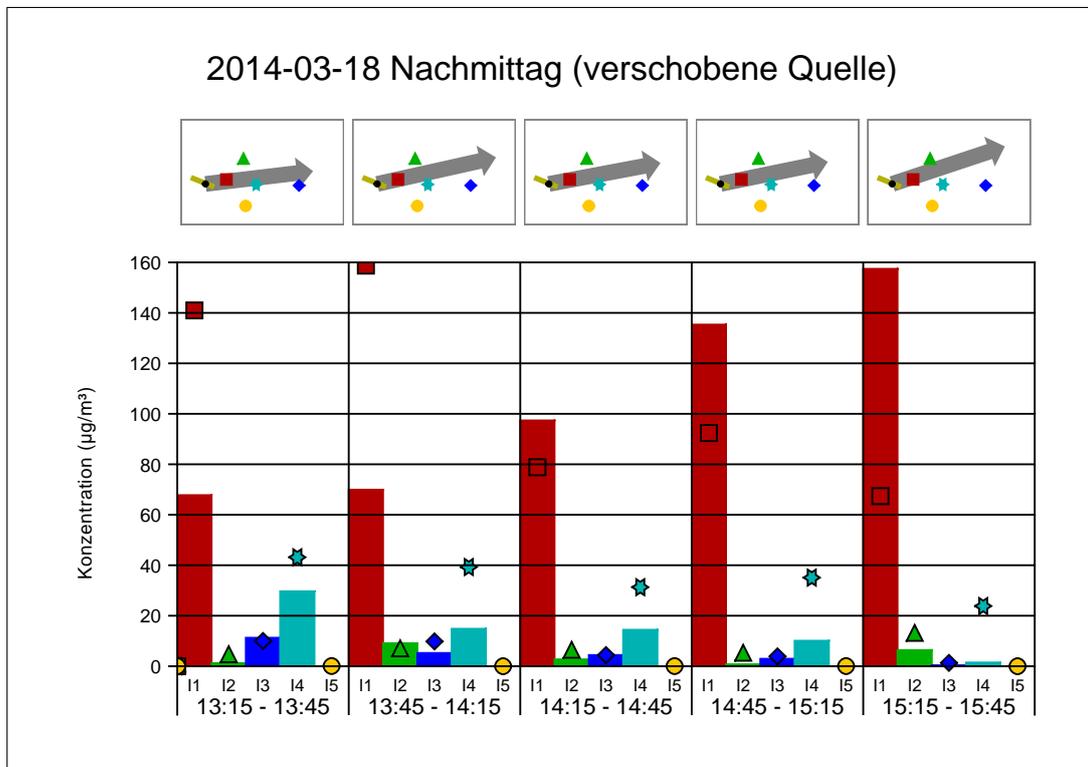


BILD 11: Vergleich der berechneten (Balken) und gemessenen (Symbole) Halbstundenmittel (Nachmittag, ohne Überhöhung, verschobene Quelle). Die kleinen Bilder oben deuten die Lage von Stall, Quelle und Stationen sowie die mittlere Windrichtung an.

TABELLE 3: Nachmittag, Rechnung ohne Überhöhung und mit verschobener Quelle. Vergleich von gemessenen (gem.) und berechneten (ber.) Halbstundenwerten der SF₆-Konzentration (in µg/m³) an den Monitorpunkten.

SF ₆ (µg/m ³) Intervall	I1/Im1		I2/Im5		I3/Im3		I4/Im2		I5/Im4	
	gem.	ber.	gem.	ber.	gem.	ber.	gem.	ber.	gem.	ber.
13:15 - 13:45	140.96	67.78	3.71	1.23	10.00	11.26	43.37	29.68	0.07	0.05
13:45 - 14:15	158.70	69.93	6.02	9.10	9.82	5.23	39.30	14.82	0.00	0.00
14:15 - 14:45	78.83	97.37	5.44	2.70	4.42	4.42	31.31	14.43	0.05	0.00
14:45 - 15:15	92.39	135.35	4.27	0.76	3.89	2.93	35.10	10.09	0.05	0.00
15:15 - 15:45	67.39	157.44	12.14	6.39	1.31	0.36	23.84	1.46	0.00	0.00
Mittelwert	107.66	105.57	6.32	4.04	5.89	4.84	34.58	14.10	0.03	0.01

3.2 Vergleich der gemessenen SF₆- und Bioaerosol-Konzentrationsverteilungen

Während der Zeitperiode, in der die Messungen durchgeführt wurden, waren die Freisetzungsbedingungen für das künstlich eingeführte SF₆ und für diejenigen Bioaerosole, die über die Kamine 1 bis 4 abgeleitet wurden, praktisch gleich. Testrechnungen haben gezeigt, daß die geringfügig unterschiedlichen Positionen der Kamine 1 bis 4 keine wesentliche Rolle spielen, ebenso wenig die geringere Abluftgeschwindigkeit des Kamins 1, da die Überhöhung ohnehin niedrig ausfiel oder gar nicht auftrat.

Der Unterschied in der Freisetzung liegt damit in erster Linie in der Emissionsrate. Da die Konzentration c proportional zur Emissionsrate q ist, könnte man erwarten, daß das Verhältnis c/q für SF₆ und die betrachteten Parameter Gesamtbakterien und Staphylokokken sehr ähnlich ist.⁶

Tabelle 4 listet die gemessenen Emissionsraten, die gemessenen Konzentrationen und die Verhältnisse c/q für den Vormittag auf, Tabelle 5 die für den Nachmittag.⁷ Werte unterhalb der Nachweisgrenze (NG) sind gekennzeichnet, ebenso Werte unterhalb der in den Datenblättern angegebenen Bestimmungsgrenze (BG).

Das Hauptaugenmerk der Bioaerosolmessungen lag auf dem Parameter Staphylokokken, der relativ eindeutig der Mastanlage zugeordnet werden kann. Die Messung der Gesamtbakterien diene in erster Linie Konsistenztests. Daher wird im folgenden nur auf die Ergebnisse für die Staphylokokken eingegangen.

Die maximal gemessenen Staphylokokken-Konzentrationen treten am Nachmittag auf. Sie sind mit ein paar 100 KBE/m³ immer noch sehr klein und quantitativ vermutlich nicht sehr belastbar.⁸

Hierfür spricht auch, daß entgegen aller Erwartung keine Entfernungsabhängigkeit zu erkennen ist: Die für die Station I1/Im1 ausgewiesenen Werte sind praktisch genauso groß wie Werte für die mehr als doppelt so weit entfernte Station I4/Im2.

Selbst wenn man an der Station I1/Im1 für den Nachmittag von einem groben Wert 1000 KBE/m³ ausgehen würde, wäre das immer noch um rund zwei Größenordnungen kleiner als das, was man aufgrund der SF₆-Messungen erwarten würde.

⁶Die gemessenen Hintergrundbelastungen der Bioaerosole fielen sehr niedrig aus und wurden hier nicht weiter berücksichtigt. Insbesondere Staphylokokken sind Leitparameter für Tierhaltungsanlagen und kommen im unbelasteten Hintergrund nicht vor.

⁷Die in diesem Bericht aufgeführten Gesamtraten der Emission wurden aus den gerundeten Werten für die Einzelkaminen bestimmt.

⁸Die Bestimmungsgrenze lag bei der angewandten Aufbereitungsmethode (Filtration) und der jeweiligen Probenahmedauer im Bereich von etwa 30 bis 80 KBE/m³. Nach Aussagen des LfU sind die Unsicherheiten um den Faktor 3 größer, d.h. sie liegen bei etwa 240 KBE/m³.

TABELLE 4: Vergleich von gemessenen Emissionen und Konzentrationen von SF₆ und Bioaerosolen für den Vormittag.

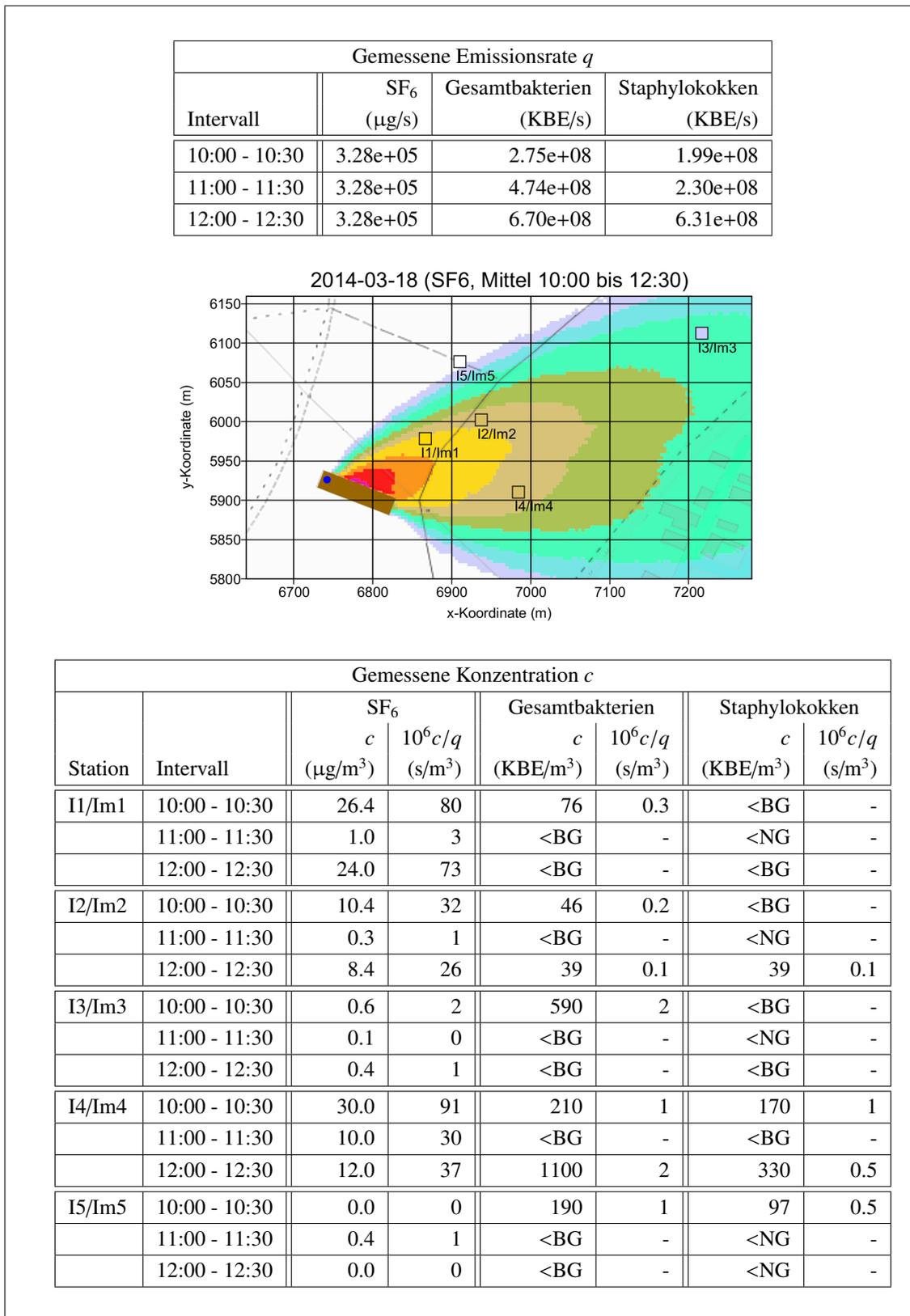
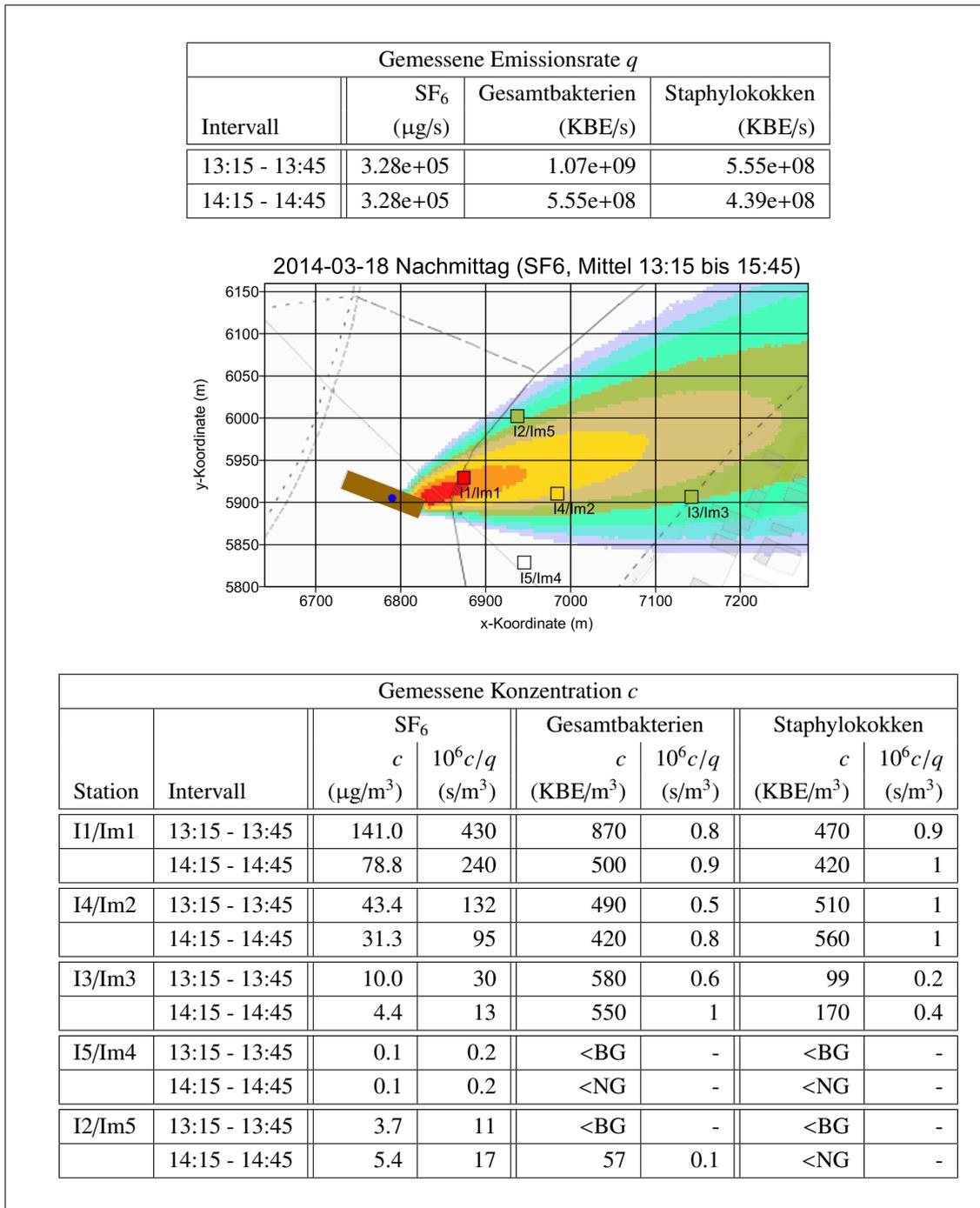


TABELLE 5: Vergleich von gemessenen Emissionen und Konzentrationen von SF₆ und Bioaerosolen für den Nachmittag (verschobene Quelle).



3.3 Vergleich für weitere Zeitperioden zu verschiedenen Jahreszeiten

Zu verschiedenen Jahreszeiten waren an 4 weiteren Tagen (2013-04-16, 2013-07-16, 2013-10-22, 2014-01-29) Bioaerosol-Messungen an der betrachteten Anlage durchgeführt worden. Wie für 2014-03-18 wurde die Emission von Gesamtbakterien und Staphylokokken bestimmt (neben den 6 Kaminen waren teilweise auch die Seitenlüfter am westlichen Giebel in Betrieb) und die Konzentration an 5 Stationen in Lee des Stalls als Halbstundenmittel ermittelt (zwei Halbstundenmittel pro Tag). Die Meteorologie wurde jeweils mit einem dreidimensionalen Ultraschallanemometer aufgenommen.

Analog zu den Rechnungen für 2014-03-18 wurden für diese Tage ebenfalls Ausbreitungsrechnungen durchgeführt. Die folgende Tabelle gibt eine Übersicht über die verschiedenen Situationen.^{9,10} Mit aufgelistet ist das Ergebnis der Messung und der Modellierung für jeweils eine Station inmitten der Fahne.

Die Detailergebnisse sind in den anschließenden Bildern und Tabellen aufgeführt.

⁹Die zweite Messung für 2013-07-16 ist nicht aufgeführt, da sich alle Stationen außerhalb des von der Fahne beaufschlagten Gebietes befanden.

¹⁰Die Volumenströme wurden nach Abschluss der hier aufgeführten Berechnungen vom LfU nochmals überprüft und geringfügig angepasst. Die hier aufgeführten Massenströme weichen daher geringfügig von denen im Endbericht des LfU ab. Wegen des linearen Zusammenhangs zwischen Emissionsmassenstrom und Immissionskonzentration ergeben sich auch in den Ergebnissen nur so geringfügige Änderungen, dass auf eine Neuberechnung verzichtet wurde.

TABELLE 6: Übersicht über die Intervalle und ausgewählte Eckdaten.

Jahr	2013	2013	2013	2013	2013	2013	2013	2013	2013	2013	2013	2014	2014	2014
Tag	04-16	04-16	04-16	07-16	10-22	10-22	10-22	10-22	10-22	10-22	10-22	01-29	03-18	03-18
Beginn (MEZ)	10:15	14:30	14:30	10:00	10:15	10:15	13:45	10:45	11:30	10:00	11:30	10:00	10:00	13:15
u_a USAT (m/s)	5.9	5.6	5.6	2.9	0.9	0.9	2.0	3.4	4.1	4.5	4.1	4.5	4.5	7.2
Windrichtung USAT (Grad)	242	217	217	58	131	131	116	102	75	255	75	255	255	260
z_0 (m)	0.02	0.02	0.02	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.02	0.2	0.02	0.02	0.02
Klug/Manier-Klasse	III/2,IV	IV	IV	IV,V	IV,V	IV,V	V,III/1	III/2	III/2	IV,V	III/2	IV,V	IV,V	III/2
Temperatur USAT (°C)	18	20	20	22	16	16	22	-4	-4	14	-4	14	14	18
Strahlung (W/m ²)	484	719	719	628	100	100	349	158	213	576	213	576	576	586
Ozon (µg/m ³)	99	111	111	101	4	4	30	52	52	83	52	83	83	98
Feuchte (%)	54	50	50	52	56	56	56	77	76	46	76	46	46	33
Feuchte im Stall (%)	59	61	61	52	77	77	67	76	76	62	76	62	62	53
Temperatur im Stall (°C)	24	25	25	24	24	24	25	21	21	23	21	23	23	26
u_{exit} (m/s)	2.7	3.7	3.7	5.6	5.2	5.2	4.9	5.1	5.2	6.1	5.2	6.1	6.1	6.2
u_{exit}/u_a	0.5	0.7	0.7	1.9	5.8	5.8	2.5	1.5	1.3	1.4	1.3	1.4	1.4	0.9
Rechnung mit Überhöhung	nein	nein	nein	ja	ja	ja	ja	nein						
Station in der Fahne	Im2	Im5	Im5	Im5	Im1	Im1	Im1	Im1	Im1	Im4	Im1	Im4	Im4	Im1
Quellentfernung (m)	250	340	340	210	110	110	110	110	110	230	110	230	230	120
Reisezeit ca. (s)	42	61	61	72	122	122	55	32	27	51	27	51	51	17
Staphylokokken														
q_{mess} (KBE/s)	3.6e+08	9.2e+08	9.2e+08	7.8e+08	4.6e+08	4.6e+08	1.4e+09	1.5e+09	5.5e+08	2.0e+08	5.5e+08	2.0e+08	2.0e+08	5.6e+08
c_{mess} (KBE/m ³)	1.7e+02	4.0e+03	4.0e+03	<BG	1.4e+04	1.4e+04	2.2e+03	1.1e+04	4.0e+04	1.7e+02	4.0e+04	1.7e+02	1.7e+02	4.7e+02
c_{mod} (KBE/m ³)	4.4e+04	4.4e+04	4.4e+04	4.2e+04	3.5e+04	3.5e+04	1.5e+05	2.0e+05	1.3e+05	1.9e+03	1.3e+05	1.9e+03	1.9e+03	1.2e+05

Intervall 2013-04-16, 10:15 - 10:45 MEZ

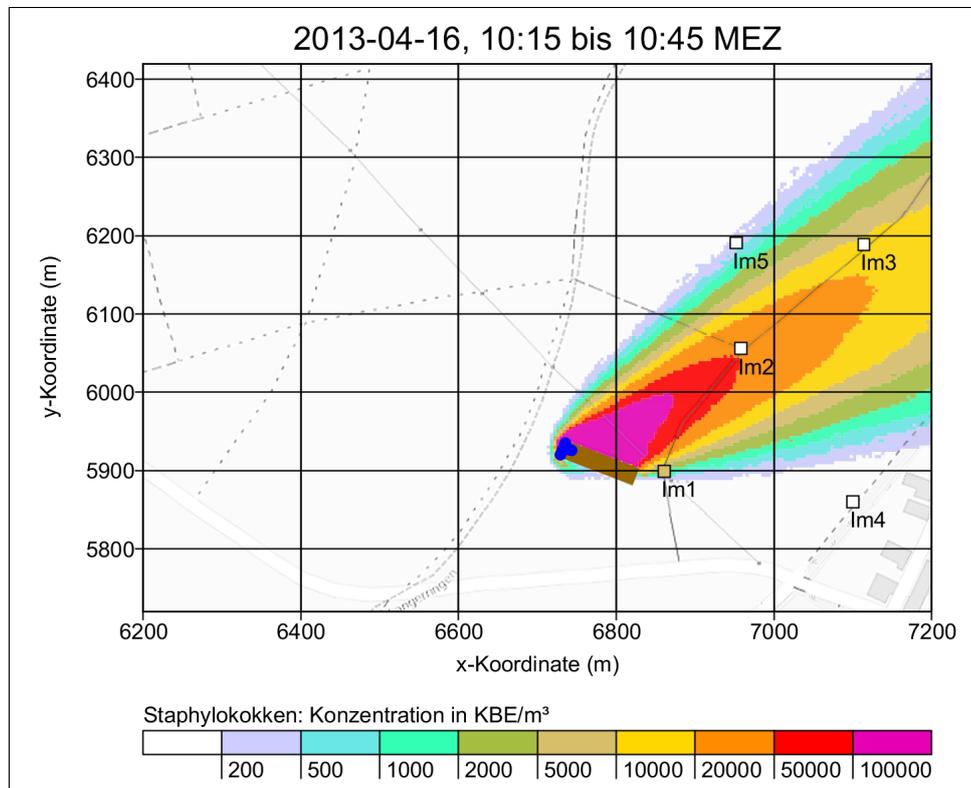


BIld 12: Konzentrationsverteilung für den Parameter Staphylokokken. Der Hintergrund zeigt das Ergebnis der Ausbreitungsrechnung, die Kästchen die aus Messungen abgeleiteten Werte an den Stationen. Die Lage der Emissionsquellen ist durch blaue Punkte gekennzeichnet.

TABELLE 7: Gemessene und berechnete Konzentrationen.

2013-04-16, 10:15 - 10:45 MEZ				
Station	Gesamtbakterien		Staphylokokken	
	Gemessen (KBE/m ³)	Berechnet (KBE/m ³)	Gemessen (KBE/m ³)	Berechnet (KBE/m ³)
Im1	9.1e+03	2.4e+03	5.7e+03	1.7e+03
Im2	3.4e+03	6.0e+04	1.7e+02	4.4e+04
Im3	8.3e+01	1.7e+04	<BG	1.3e+04
Im4	<BG	4.5e+01	<NG	3.2e+01
Im5	1.2e+02	3.9e+02	<BG	2.8e+02

Intervall 2013-04-16, 14:30 - 15:00 MEZ

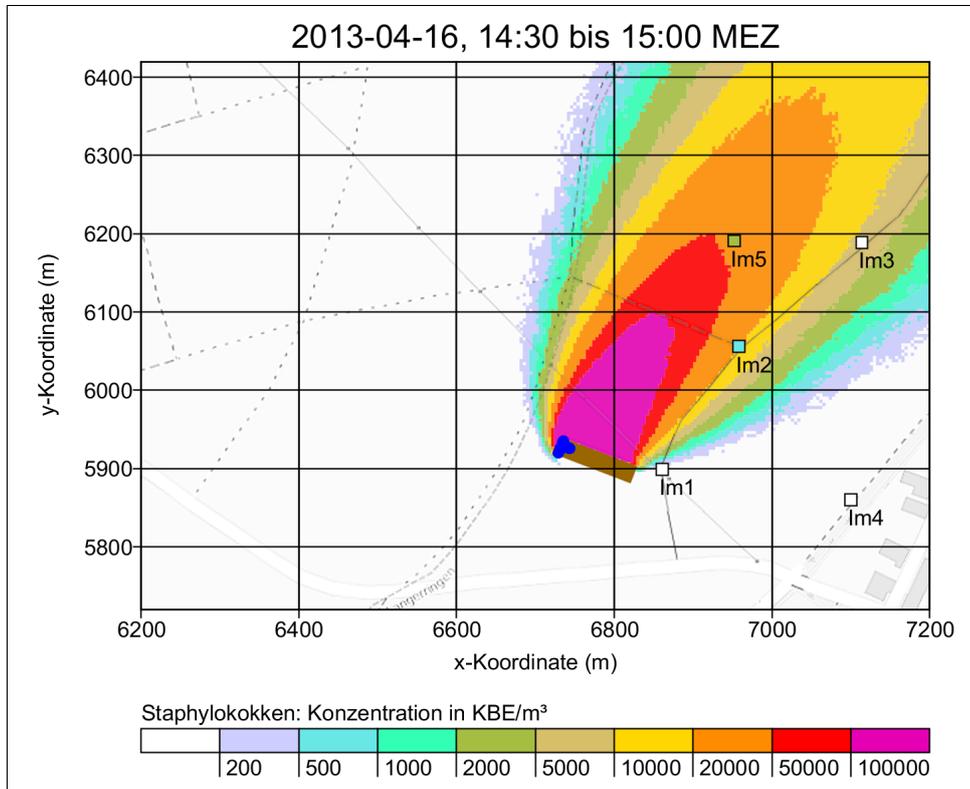


BILD 13: Konzentrationsverteilung für den Parameter Staphylokokken. Der Hintergrund zeigt das Ergebnis der Ausbreitungsrechnung, die Kästchen die aus Messungen abgeleiteten Werte an den Stationen. Die Lage der Emissionsquellen ist durch blaue Punkte gekennzeichnet.

TABELLE 8: Gemessene und berechnete Konzentrationen.

2013-04-16, 14:30 - 15:00 MEZ				
Station	Gesamtbakterien		Staphylokokken	
	Gemessen (KBE/m ³)	Berechnet (KBE/m ³)	Gemessen (KBE/m ³)	Berechnet (KBE/m ³)
Im1	6.8e+01	7.2e+01	<BG	4.8e+01
Im2	4.8e+02	3.2e+04	5.5e+02	2.1e+04
Im3	5.2e+02	1.2e+04	1.9e+02	7.9e+03
Im4	<BG	0.0e+00	<NG	0.0e+00
Im5	4.5e+03	6.6e+04	4.0e+03	4.4e+04

Intervall 2013-07-16, 10:00 - 10:30 MEZ

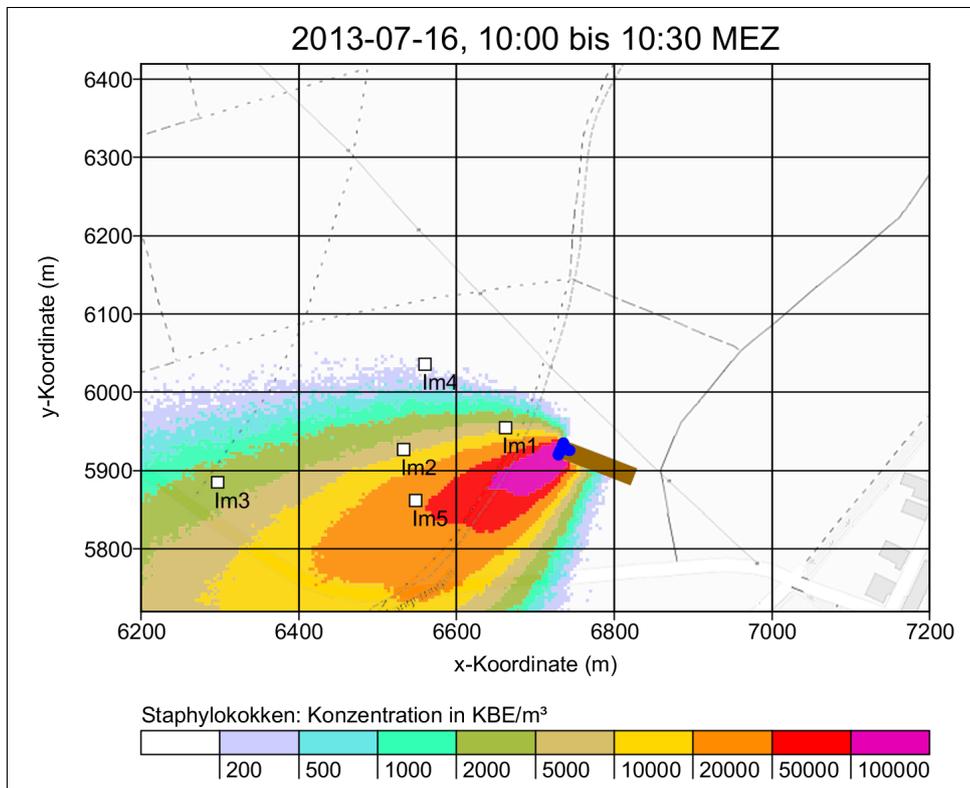


BILD 14: Konzentrationsverteilung für den Parameter Staphylokokken. Der Hintergrund zeigt das Ergebnis der Ausbreitungsrechnung, die Kästchen die aus Messungen abgeleiteten Werte an den Stationen. Die Lage der Emissionsquellen ist durch blaue Punkte gekennzeichnet.

TABELLE 9: Gemessene und berechnete Konzentrationen.

2013-07-16, 10:00 - 10:30 MEZ				
Station	Gesamtbakterien		Staphylokokken	
	Gemessen (KBE/m ³)	Berechnet (KBE/m ³)	Gemessen (KBE/m ³)	Berechnet (KBE/m ³)
Im1	1.6e+02	6.3e+03	<BG	8.2e+03
Im2	<BG	7.0e+03	<NG	8.2e+03
Im3	<BG	2.5e+03	<BG	2.9e+03
Im4	<BG	9.2e+01	<NG	1.2e+02
Im5	1.9e+02	3.6e+04	<BG	4.2e+04

Intervall 2013-07-16, 13:45 - 14:15 MEZ

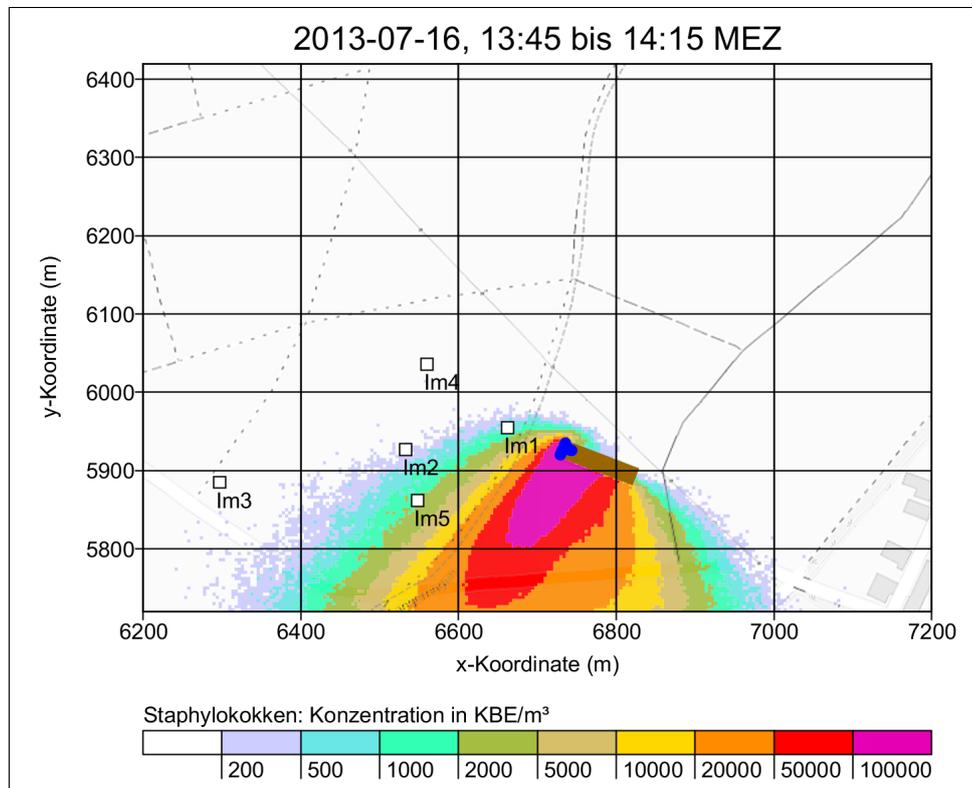


BILD 15: Konzentrationsverteilung für den Parameter Staphylokokken. Der Hintergrund zeigt das Ergebnis der Ausbreitungsrechnung, die Kästchen die aus Messungen abgeleiteten Werte an den Stationen. Die Lage der Emissionsquellen ist durch blaue Punkte gekennzeichnet.

TABELLE 10: Gemessene und berechnete Konzentrationen.

2013-07-16 13:45 - 14:15 MEZ				
Station	Gesamtbakterien		Staphylokokken	
	Gemessen (KBE/m ³)	Berechnet (KBE/m ³)	Gemessen (KBE/m ³)	Berechnet (KBE/m ³)
Im1	<BG	7.1e+02	<NG	6.6e+02
Im2	<BG	1.6e+02	<NG	2.0e+02
Im3	<BG	0.0e+00	<NG	0.0e+00
Im4	<NG	0.0e+00	<BG	0.0e+00
Im5	<BG	1.7e+03	<BG	2.1e+03

Intervall 2013-10-22, 10:15 - 10:45 MEZ

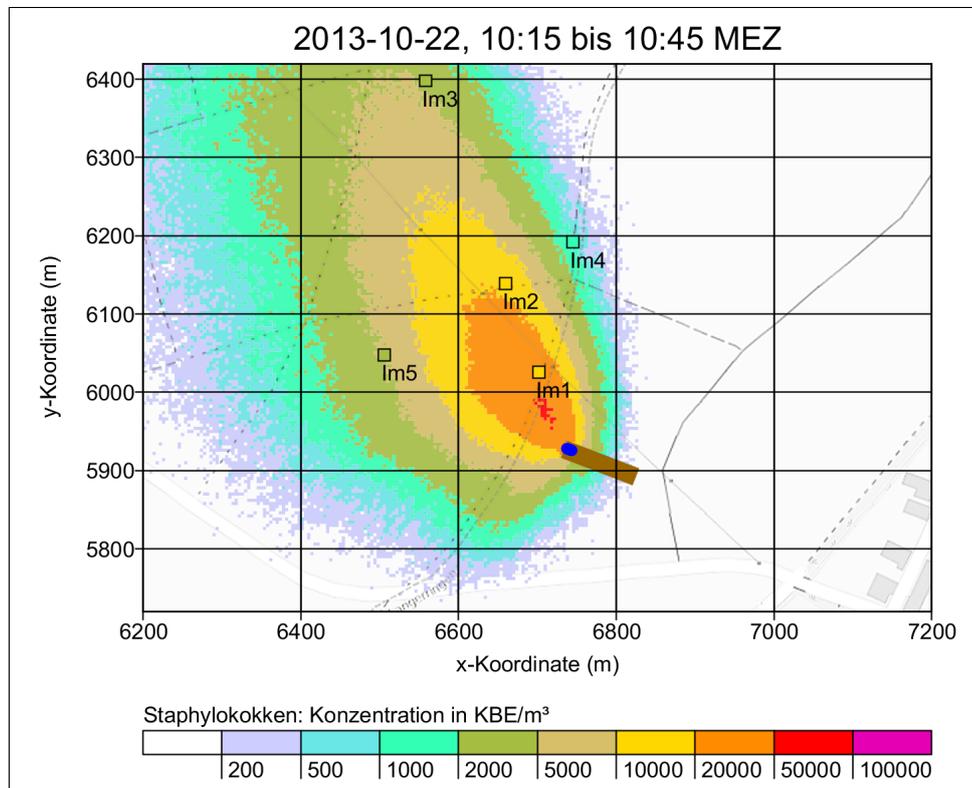


BILD 16: Konzentrationsverteilung für den Parameter Staphylokokken. Der Hintergrund zeigt das Ergebnis der Ausbreitungsrechnung, die Kästchen die aus Messungen abgeleiteten Werte an den Stationen. Die Lage der Emissionsquellen ist durch blaue Punkte gekennzeichnet.

TABELLE 11: Gemessene und berechnete Konzentrationen.

2013-10-22, 10:15 - 10:45 MEZ				
Station	Gesamtbakterien		Staphylokokken	
	Gemessen (KBE/m ³)	Berechnet (KBE/m ³)	Gemessen (KBE/m ³)	Berechnet (KBE/m ³)
Im1	2.7e+04	7.0e+04	1.4e+04	3.5e+04
Im2	1.4e+04	3.4e+04	1.4e+04	1.7e+04
Im3	8.8e+03	8.2e+03	3.9e+03	4.1e+03
Im4	1.9e+03	1.7e+03	1.2e+03	8.7e+02
Im5	4.2e+03	1.1e+04	3.6e+03	5.7e+03

Intervall 2013-10-22, 13:45 - 14:15 MEZ

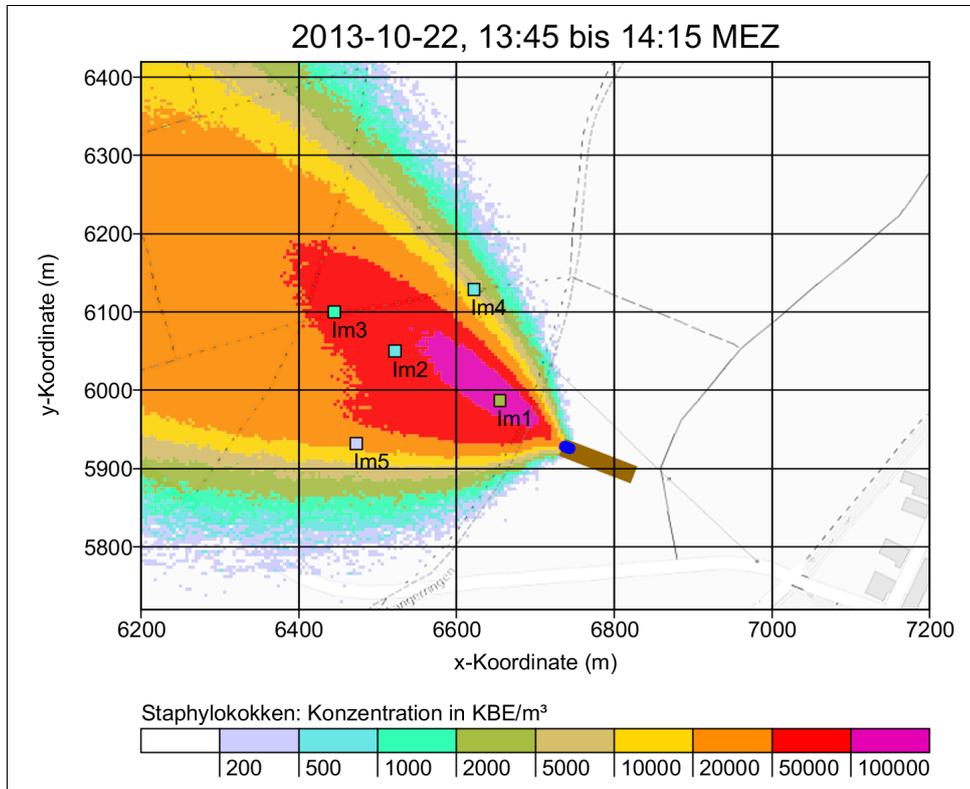


BILD 17: Konzentrationsverteilung für den Parameter Staphylokokken. Der Hintergrund zeigt das Ergebnis der Ausbreitungsrechnung, die Kästchen die aus Messungen abgeleiteten Werte an den Stationen. Die Lage der Emissionsquellen ist durch blaue Punkte gekennzeichnet.

TABELLE 12: Gemessene und berechnete Konzentrationen.

2013-10-22, 13:45 - 14:15 MEZ				
Station	Gesamtbakterien		Staphylokokken	
	Gemessen (KBE/m ³)	Berechnet (KBE/m ³)	Gemessen (KBE/m ³)	Berechnet (KBE/m ³)
Im1	3.7e+03	3.0e+05	2.2e+03	1.5e+05
Im2	1.1e+03	1.5e+05	5.6e+02	7.5e+04
Im3	2.1e+03	1.1e+05	1.8e+03	5.8e+04
Im4	1.4e+02	1.4e+04	8.0e+02	7.2e+03
Im5	3.5e+02	5.8e+04	3.2e+02	3.0e+04

Intervall 2014-01-29, 10:45 - 11:15 MEZ

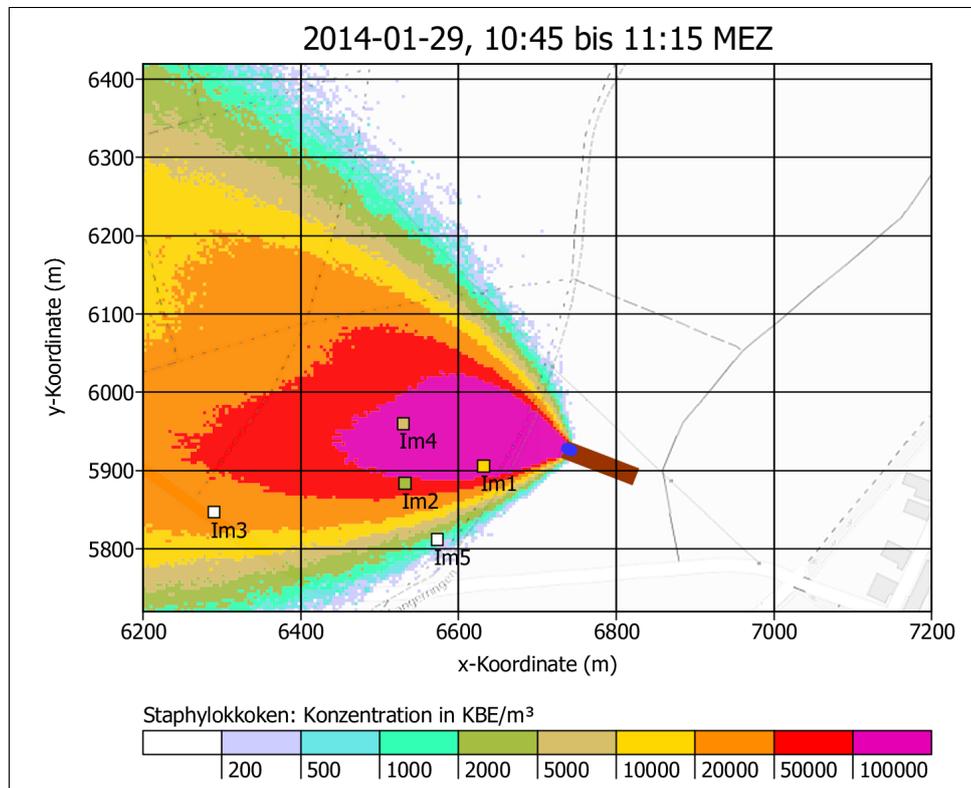


BILD 18: Konzentrationsverteilung für den Parameter Staphylokokken. Der Hintergrund zeigt das Ergebnis der Ausbreitungsrechnung, die Kästchen die aus Messungen abgeleiteten Werte an den Stationen. Die Lage der Emissionsquellen ist durch blaue Punkte gekennzeichnet.

TABELLE 13: Gemessene und berechnete Konzentrationen.

2014-01-29, 10:45 - 11:15 MEZ				
Station	Gesamtbakterien		Staphylokokken	
	Gemessen (KBE/m ³)	Berechnet (KBE/m ³)	Gemessen (KBE/m ³)	Berechnet (KBE/m ³)
Im1	6.4e+03	9.9e+04	1.1e+04	2.0e+05
Im2	3.1e+03	4.8e+04	3.2e+03	9.4e+04
Im3	1.9e+02	1.6e+04	1.2e+02	3.1e+04
Im4	1.1e+04	6.8e+04	7.8e+03	1.3e+05
Im5	<BG	9.9e+02	<NG	2.0e+03

Intervall 2014-01-29, 11:30 - 12:00 MEZ

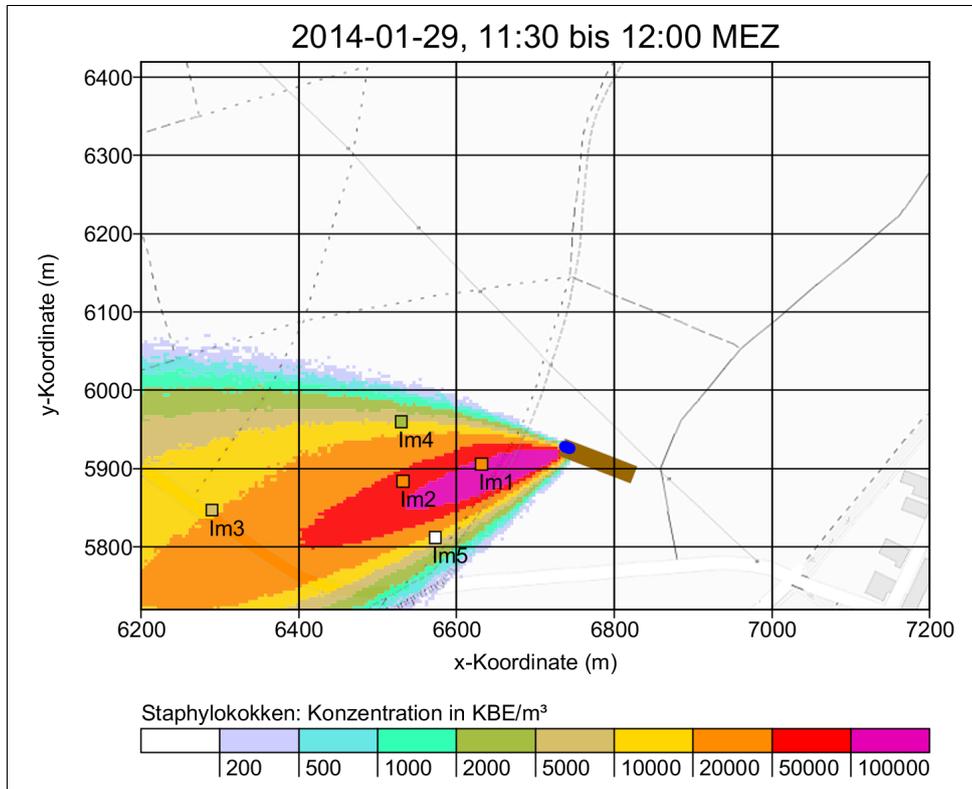


BIld 19: Konzentrationsverteilung für den Parameter Staphylokokken. Der Hintergrund zeigt das Ergebnis der Ausbreitungsrechnung, die Kästchen die aus Messungen abgeleiteten Werte an den Stationen. Die Lage der Emissionsquellen ist durch blaue Punkte gekennzeichnet.

TABELLE 14: Gemessene und berechnete Konzentrationen.

2014-01-29, 11:30 - 12:00 MEZ				
Station	Gesamtbakterien		Staphylokokken	
	Gemessen (KBE/m ³)	Berechnet (KBE/m ³)	Gemessen (KBE/m ³)	Berechnet (KBE/m ³)
Im1	5.6e+04	1.5e+05	4.0e+04	1.3e+05
Im2	2.9e+04	7.9e+04	2.0e+04	6.5e+04
Im3	7.4e+03	2.3e+04	6.0e+03	1.9e+04
Im4	3.5e+03	1.0e+04	3.2e+03	8.4e+03
Im5	1.3e+02	2.0e+04	7.0e+01	1.6e+04

Intervall 2014-03-18, 10:00 - 10:30 MEZ

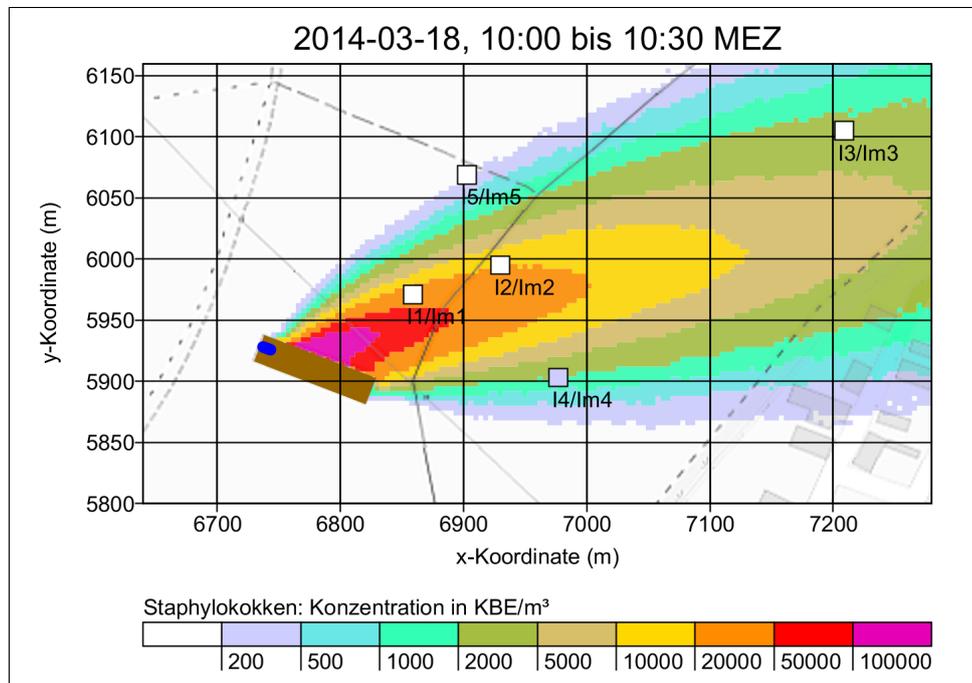


BILD 20: Konzentrationsverteilung für den Parameter Staphylokokken. Der Hintergrund zeigt das Ergebnis der Ausbreitungsrechnung, die Kästchen die aus Messungen abgeleiteten Werte an den Stationen. Die Lage der Emissionsquellen ist durch blaue Punkte gekennzeichnet.

TABELLE 15: Gemessene und berechnete Konzentrationen.

2014-03-18, 10:00 - 10:30 MEZ				
Station	Gesamtbakterien		Staphylokokken	
	Gemessen (KBE/m ³)	Berechnet (KBE/m ³)	Gemessen (KBE/m ³)	Berechnet (KBE/m ³)
I1/Im1	7.6e+01	4.2e+04	<BG	3.1e+04
I2/Im2	4.6e+01	2.6e+04	<BG	1.9e+04
I3/Im3	5.9e+02	3.7e+03	<BG	2.7e+03
I4/Im4	2.1e+02	2.5e+03	1.7e+02	1.9e+03
I5/Im5	1.9e+02	2.2e+02	9.7e+01	1.6e+02

Intervall 2014-03-18, 13:15 - 13:45 MEZ

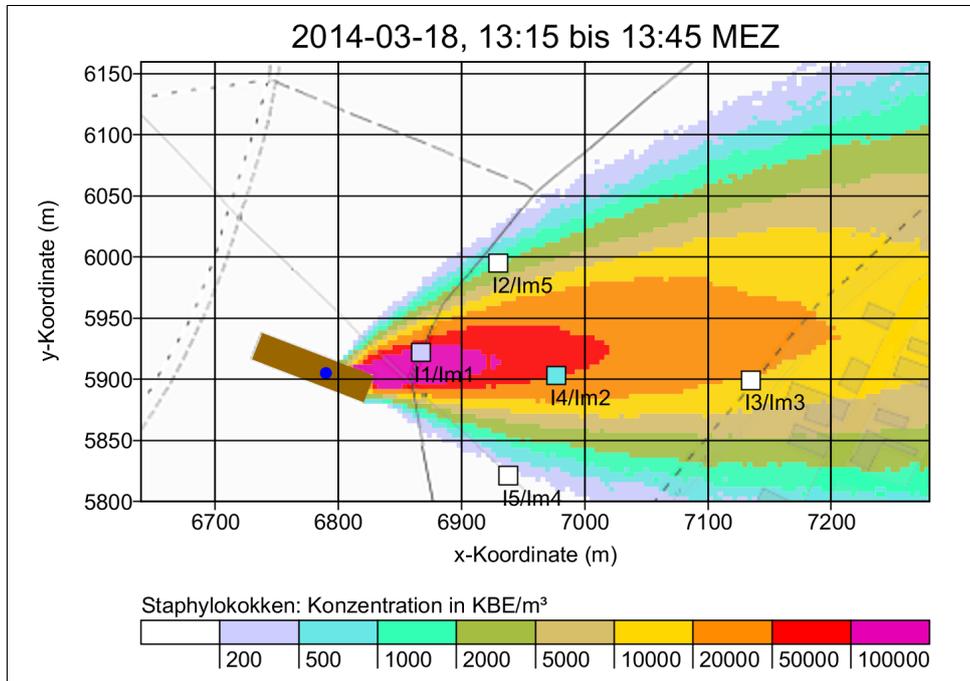


BILD 21: Konzentrationsverteilung für den Parameter Staphylokokken. Der Hintergrund zeigt das Ergebnis der Ausbreitungsrechnung, die Kästchen die aus Messungen abgeleiteten Werte an den Stationen. Die Lage der Emissionsquellen ist durch blaue Punkte gekennzeichnet.

TABELLE 16: Gemessene und berechnete Konzentrationen.

2014-03-18, 13:15 - 13:45 MEZ				
Station	Gesamtbakterien		Staphylokokken	
	Gemessen (KBE/m ³)	Berechnet (KBE/m ³)	Gemessen (KBE/m ³)	Berechnet (KBE/m ³)
I1/Im1	8.7e+02	2.2e+05	4.7e+02	1.2e+05
I2/Im5	<BG	4.0e+03	<BG	2.1e+03
I3/Im3	5.8e+02	3.5e+04	9.9e+01	1.8e+04
I4/Im2	4.9e+02	9.7e+04	5.1e+02	5.0e+04
I5/Im4	<BG	1.9e+02	<BG	9.8e+01

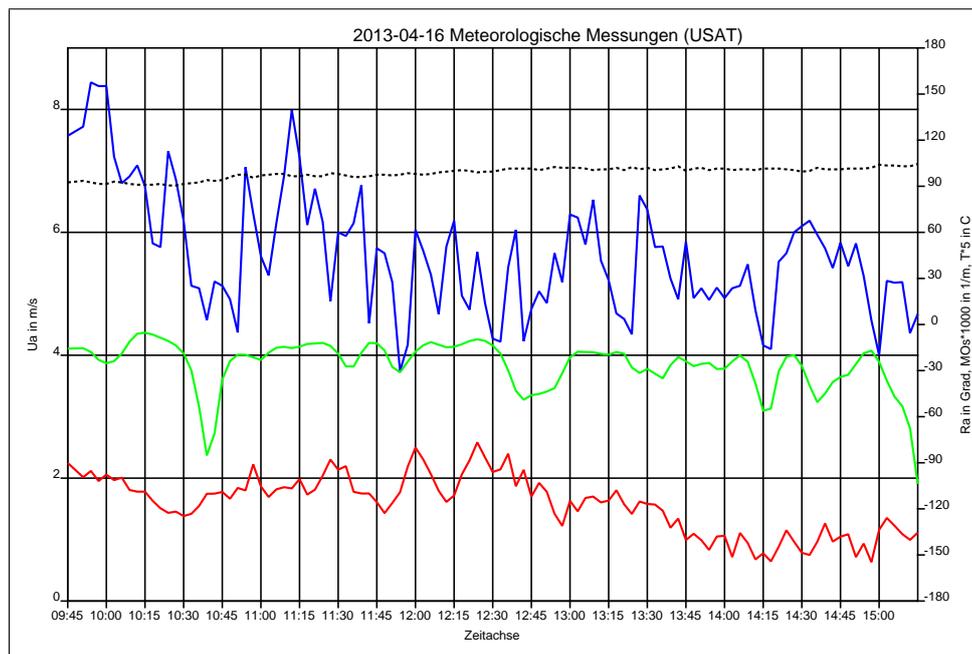


BILD 22: 2013-04-16: Zeitlicher Verlauf von Windgeschwindigkeit (blau), Windrichtung (rot) und Temperatur (schwarz gestrichelt) sowie inverser Monin-Obukhov-Länge (grün, gleitendes 15-Minuten-Mittel). Zeitangaben in MEZ.

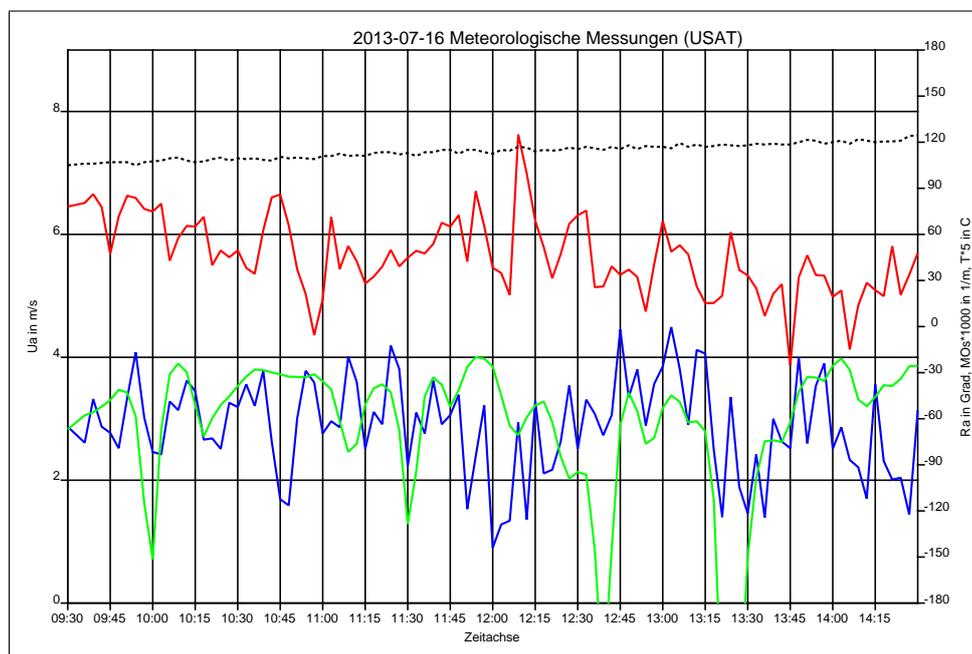


BILD 23: 2013-07-16: Zeitlicher Verlauf von Windgeschwindigkeit (blau), Windrichtung (rot) und Temperatur (schwarz gestrichelt) sowie inverser Monin-Obukhov-Länge (grün, gleitendes 15-Minuten-Mittel). Zeitangaben in MEZ.

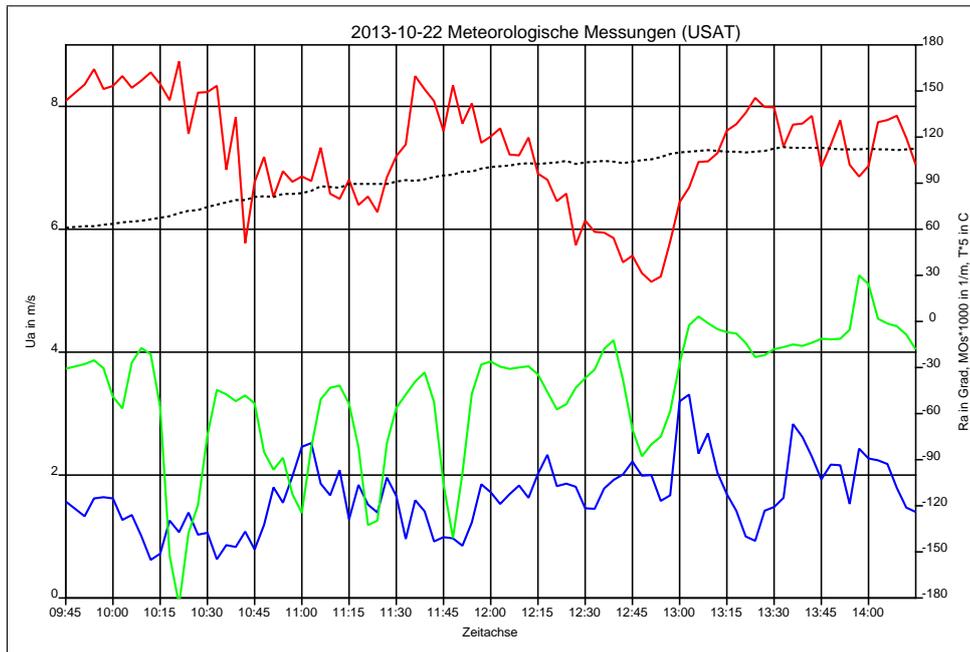


BILD 24: 2013-10-22: Zeitlicher Verlauf von Windgeschwindigkeit (blau), Windrichtung (rot) und Temperatur (schwarz gestrichelt) sowie inverser Monin-Obukhov-Länge (grün, gleitendes 15-Minuten-Mittel). Zeitangaben in MEZ.

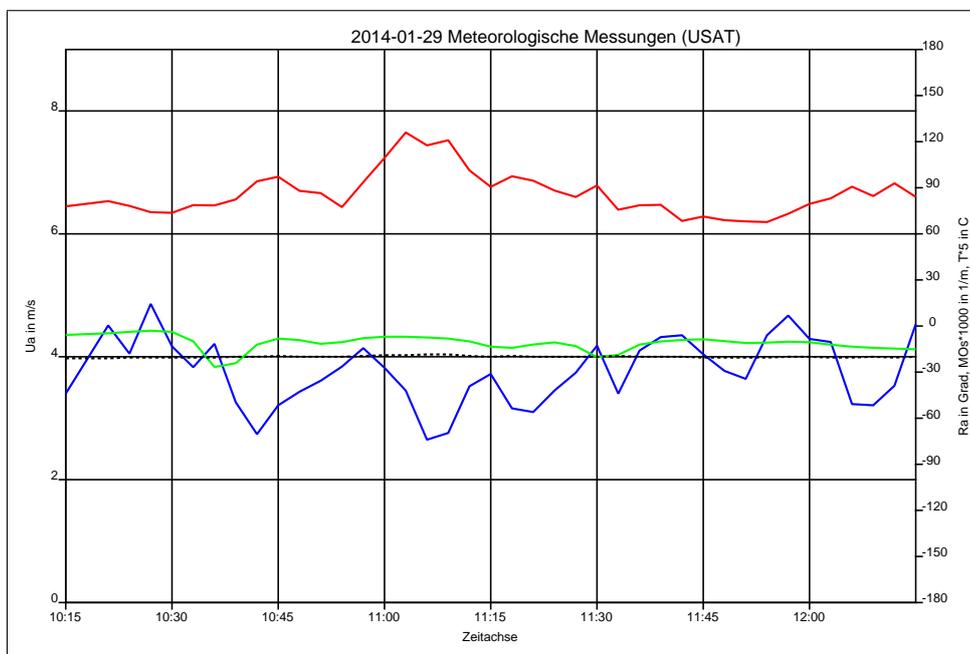


BILD 25: 2014-01-29: Zeitlicher Verlauf von Windgeschwindigkeit (blau), Windrichtung (rot) und Temperatur (schwarz gestrichelt) sowie inverser Monin-Obukhov-Länge (grün, gleitendes 15-Minuten-Mittel). Zeitangaben in MEZ.

4 Diskussion

Die Modellierung der genauen Strömungsverhältnisse um das Stallgebäude und der Abgasfahnenüberhöhung ist nur näherungsweise möglich. Das kann in manchen Situationen im unmittelbaren Nahbereich den prognostizierten Verlauf der Fahnenachse beeinflussen und insbesondere im Randbereich einzelner Halbstundenfahnen auf größere Abweichungen zu den Meßwerten führen, ist aber für die durchgeführten Vergleiche nicht von wesentlicher Bedeutung. Insbesondere sind hiervon nicht die beobachteten systematischen Unterschiede zwischen den gemessenen, mit der Quellstärke normierten Konzentrationen von SF₆ und denen der Bioaerosole betroffen.

Die Übereinstimmung von gemessener und modellierter SF₆-Konzentration ist grundsätzlich gut und belegt, daß die für die Ausbreitung eines inerten, nicht-deponierenden Spurenstoffes relevanten Vorgänge in der Ausbreitungsrechnung realitätsnah berücksichtigt wurden.

Der gut dokumentierte Einfluß der Kaminreihe und des Daches auf das Ausbreitungsverhalten der Abluffahne ist – gemessen an der üblichen Standardpraxis nach TA Luft – relativ groß. Dieser Sachverhalt sollte bei den anstehenden Überarbeitungen von Richtlinien und Vorschriften im Zusammenhang mit Abluftüberhöhung und Gebäudeeinflüssen Berücksichtigung finden und unter Umständen auch im Rahmen von Windkanalversuchen näher untersucht werden.

Es ist unklar, welche Streubreite die kulturbasierten Messungen besitzen. Während bei der Emissionsmessung durch Doppelbestimmungen relative Standardunsicherheiten von etwa 25% ermittelt wurden (siehe Richtlinie VDI 4255 Blatt 3 E), sind die Unsicherheiten auf der Immissionsseite nach Aussage des LfU noch nicht genau bekannt: Durch die Filtration können auf der Immissionsseite Bestimmungsgrenzen von 30 bis 80 KBE/m³ erreicht werden; die Unsicherheiten können jedoch um den Faktor 2 bis 3 höher liegen (d.h. etwa 240 KBE/m³). Für kleine Werte lassen sich daher die Konzentrationen kaum quantitativ interpretieren.

In drei Intervallen (2013-10-22 10:15 bis 10:45, 2014-01-29 11:30 bis 12:00, 2014-01-29 10:45 bis 11:15) wurden Staphylokokken-Konzentrationen von mehr als 10 000 KBE/m³ gemessen, in allen anderen Intervallen lagen die Werte bei wenigen 1000 KBE/m³ oder unter 1000 KBE/m³. Für die ersten zwei dieser drei Intervalle liefert die Ausbreitungsrechnung im Rahmen eines Faktors 2 bis 3 vergleichbare Werte. Diese Übereinstimmung kann als gut angesehen werden angesichts der Tatsache, daß ein einzelnes Halbstundenmittel betrachtet wird, und in Anbetracht der Unsicherheiten einer kulturbasierten Emissions- und Immissionsbestimmung. Für die anderen Intervalle liefert die Ausbreitungsrechnung Bioaerosol-Konzentrationen, die systematisch um ein bis zwei Größenordnungen höher als die gemessenen Werte sind.

Die gute Übereinstimmung für die zwei Intervalle zeigt, daß es grundsätzlich möglich ist, mit einer Ausbreitungsrechnung für einen inerten, nicht-deponierenden Spurenstoff die beobachtete Konzentration von Staphylokokken wiederzugeben. Warum in den anderen Intervallen systematisch deutlich niedrigere Konzentrationen gemessen als berechnet wurden, ist unklar.

Depositionsprozesse kommen nicht in Betracht, da sie in dem betrachteten Entfernungsbereich von ein paar hundert Metern kaum eine Konzentrationsreduktion um eine Größenordnung oder mehr bewirken können. Als Beispiel zeigt Bild 26 eine Ausbreitungsrechnung einmal unter Vernachlässigung der Deposition und einmal mit starker Deposition, wobei bei der Rechnung mit Deposition angenommen wurde, daß die Trägerpartikel der Staphylokokken einen aerodynamischen Durchmesser von 100 µm besitzen. Im Vergleich zur Rechnung ohne Deposition fällt die Konzentration im Entfernungsbereich bis etwa 300 m um einen Faktor 2 bis 3 kleiner aus, nicht aber um eine Größenordnung. Für Deposition als Erklärung müsste also ein aerodynamischer Durchmesser von deutlich über 100 µm angenommen werden, was nicht realistisch erscheint.

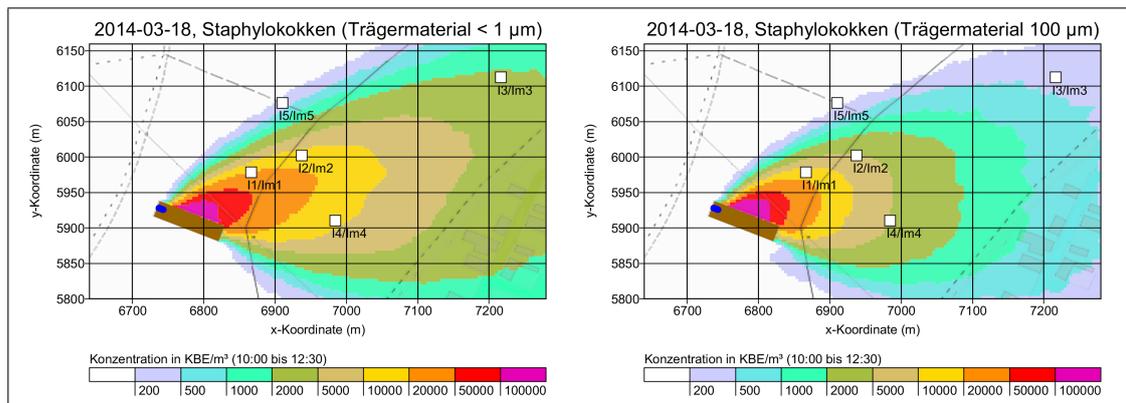


BILD 26: Testrechnung unter Vernachlässigung der Deposition (aerodynamischer Durchmesser der Trägerpartikel kleiner 1 µm, Sinkgeschwindigkeit kleiner 0.01 cm/s und Depositionsgeschwindigkeit kleiner 0.05 cm/s) und mit starker Deposition (aerodynamischer Durchmesser 100 µm, Sinkgeschwindigkeit 25 cm/s, Depositionsgeschwindigkeit zwischen 30 und 50 cm/s). Im Entfernungsbereich bis etwa 300 m führt die Deposition auf eine Reduktion der luftseitigen Konzentration um einen Faktor 2 bis 3. Die Kästchen kennzeichnen wie zuvor die gemessenen Werte; eine weiße Füllung bedeutet, daß die gemessene Staphylokokken-Konzentration im Mittel über den dargestellten Zeitraum unter 200 KBE/m³ lag.

Eine andere mögliche Erklärung wären systematische, prozeßbedingte Unterschiede zwischen der Emissions- und der Immissionsbestimmung. Das wiederum paßt nicht zu der guten Übereinstimmung für die zwei Intervalle.

Schließlich können Absterbeprozesse während des Transportes in Betracht gezogen werden. Sie müßten in den zwei Intervallen mit guter Übereinstimmung kaum, in den anderen Fällen dagegen stark wirksam gewesen sein. Um eine Reduktion um zwei Größenordnungen auf 100 Meter Transportweg durch einen Absterbeprozess zu erzielen, müßte die Lebensdauer unter 10 Sekunden liegen.¹¹ Allerdings ist nicht klar, ob dann die grundsätzliche Fahnenform übereinstimmen würde, denn ein solcher Absterbeprozess würde die Konzentration nicht insgesamt um zwei Größenordnungen reduzieren, sondern nach dem doppelten Transportweg bereits eine Reduktion um vier Größenordnungen bewirken.

Es kann also geprüft werden, ob für die beiden Intervalle besondere Bedingungen vorlagen,

¹¹Aus der Bedingung $\exp(-t/T) = 0.01$ folgt mit der Transportzeit $t = x/u$, der Entfernung $x = 100$ m und einer Transportgeschwindigkeit $u = 3$ m/s eine Lebensdauer von $T = 7$ s.

die sie gegenüber den anderen Intervallen auszeichnen und die eine besonders lange Lebensdauer der Keime nahelegen.¹² Die Übersichtstabelle 6 scheint hierauf jedoch keinen klaren Hinweis zu geben.

Solange nicht klar ist, unter welchen Bedingungen und in welcher Höhe eine Absterberate anzusetzen ist, kann es sinnvoll sein, für Prognosen im Rahmen des Immissionsschutzes ohne die Annahme von Absterbeprozessen zu rechnen, denn die hier aufgeführten Untersuchungen zeigen, daß die Ausbreitungsrechnung eine obere Grenze für die zu erwartende Keimkonzentration liefert, die in einigen Fällen, insbesondere beim Vorliegen hoher gemessener Konzentrationswerte, auch tatsächlich erreicht wird.

¹²Ein möglicher Einflußparameter, der noch nicht untersucht wurde, ist die UV-Strahlung.