

Immissionsberechnung für den Flughafen Frankfurt/Main und das Jahr 1998

Dr. Lutz Janicke

September 1999

Inhaltsverzeichnis

1	Aufgabenstellung	1
2	Modellansatz	2
3	Ergebnisse	4
A	Modellierung der Emission	14
A.1	Messungen der HLFU	14
A.2	Modellierung eines Abgasstrahls mit PLURIS	19
A.3	Modellierung der Quelle in LASAT	21
A.4	Diagramme der Meßergebnisse	24
B	Einfluß der Emissionshöhe	28
C	Tabellarische Darstellung der Ergebnisse	31

	Ingenieurbüro Janicke	Tel.:	(04947) 9120 35
	Gesellschaft für Umweltphysik	Fax:	(04947) 9120 34
	D-26427 Dunum	Email:	info@janicke.de
	Alter Postweg 21	Internet:	www.janicke.de



1 Aufgabenstellung

Ziel dieses Vorhabens ist es, die Konzentrationsverteilung von Flugzeugabgasen in der näheren Umgebung des Flughafens Frankfurt/Main für das Jahr 1998 zu ermitteln. Einzelheiten hierzu wurden in Fachgesprächen am 01.06.1999 bei der FAG in Frankfurt, am 29.06.1999 bei der Mediationsgruppe und in separater Korrespondenz mit der FAG und der HLfU festgelegt. Dabei wurden folgende Rahmenbedingungen gesetzt:

- Es sollen nur die Emissionen der Flugzeuge berücksichtigt werden, also kein Hilfsverkehr und keine APU's.
- Es werden die Stoffe HC (Kohlenwasserstoffe), CO und NO_x (Stickoxide) betrachtet.
- Bei Stickoxiden ist davon auszugehen, daß 80 % in Form von NO₂ vorliegen.
- Das Rechengebiet umfaßt den Bereich (Gauß-Krüger-Koordinaten in km) von 3461 R bis 3477 R und 5539 H bis 5550 H mit einer horizontalen Auflösung von 200 m. Im Innern ist der Bereich 3465 R bis 3472 R und 5542 H bis 5547 H mit 100 m aufzulösen und der eigentliche Flughafenbereich mit 50 m.
- Gebäudeeinflüsse brauchen nicht berücksichtigt zu werden.
- Es ist das gesamte Jahr 1998 mit dem aktuellen Flugverkehr und dem aktuellen Wetter als Zeitreihe durchzurechnen. Die Verkehrsdaten aus dem Flugtagebuch werden von der FAG und der HLfU zur Verfügung gestellt, die Zeitreihe der Ausbreitungsklassen vom DWD.
- Emissionsdaten für jedes einzelne Flugzeug werden von der HLfU bereitgestellt.
- Als Ergebnis sind die Jahresmittelwerte und die 98-Perzentile in grafischer und tabellarischer Form auszuweisen.



2 Modellansatz

Die Ausbreitungsrechnungen werden mit dem Lagrange-Ausbreitungsmodell LASAT (Version 2.9) durchgeführt.^{1,2} LASAT ist ein Episodenmodell, das den zeitabhängigen Verlauf der Konzentration mehrerer Stoffe auf einem Satz geschachtelter Netze berechnet. Es ist gemäß VDI 3945 Blatt 3 (Entwurf) verifiziert.

Um bei den Koordinatenangaben mit handlicheren Zahlen arbeiten zu können, wird ein kartesisches Netz mit dem Ursprung bei dem Punkt 3460 R und 5540 H (Gauß-Krüger-Koordinaten in km) definiert. Die Rechnetze sind in diesem Koordinatensystem folgendermaßen gewählt (Angaben in Meter):

Netz	links	rechts	unten	oben	Auflösung
1	1 000	17 000	-1 000	10 000	200
2	4 000	13 000	1 000	8 000	100
3	5 600	11 200	2 800	6 800	50

Das vertikale Netz hat eine variable Maschenweite, die in Bodennähe 10 m beträgt und mit zunehmender Höhe bis auf 100 m anwächst. Emissionen werden nur berücksichtigt, wenn sie innerhalb des äußersten Netzes freigesetzt werden.

Das Gelände wird als eben und horizontal homogen angesehen. Rechnungen mit dem prognostischen Windfeldmodell FITNAH^{3,4} haben gezeigt, daß die Näherung der Homogenität nicht sonderlich gut erfüllt ist. Es ist aber zu vermuten, daß die Auswirkungen auf den Jahresmittelwert bei dem vorliegenden ausgedehnten Quellsystem nicht gravierend sind. Gebäudeeinflüsse werden nicht berücksichtigt.

Die Bodenrauigkeit wird einheitlich mit $z_0 = 0.03$ m angesetzt. Dieser geringe Wert entspricht ungefähr den Verhältnissen auf dem Rollfeld, außerhalb müßte aufgrund der Bebauung und der Bewaldung mit einem wesentlichen größeren Wert gerechnet werden, der zu einer höheren vertikalen Dispersion führen würde. Die in Bodennähe erzeugte Abgaswolke hat aber, wenn sie über die Flughafengrenze hinwegdriftet, schon eine vertikale Ausdehnung von fast 100 m und reagiert auf die Rauigkeitsänderung, die eine von unten fortschreitende Änderung in der Turbulenzstruktur der Atmosphäre bewirkt, nur langsam. Für Rechnungen im Nahbereich des Flughafens und im Sinne einer konservativen Näherung ist dieses Vorgehen angemessen.

Die zeitliche Diskretisierung ist variabel. Die Flugbahn bei *Approach*, *TakeOff* und *ClimbOut* wird im 10-Sekunden-Raster aufgelöst, bei Rollbewegungen kann die Auflösung gröber sein. Die Zeitpunkte ATA (*actual time of arrival*), ATD (*actual*

¹Referenzbuch zu LASAT 2.8, Ing.-Büro Janicke, Oktober 1998.

²Arbeitsbuch zu LASAT, Ing.-Büro Janicke, 1998.

³G. GROSS, 1988: A Numerical Estimation of the Deforestation Effects on Local Climate in the Area of the Frankfurt International Airport. *Beitr. Phys. Atmosph.* **61**, 219-231.

⁴Mitteilung Dr. Heimann, DLR



time of departure) und die Blockzeiten werden ebenfalls auf 10 Sekunden gerundet. Zunächst werden Halbstundenmittelwerte der Konzentration berechnet. Sie werden statistisch erfaßt zur späteren Berechnung der Perzentile und es werden 48 aufeinander folgende Konzentrationsfelder zu einem Tagesmittelwert zusammengefaßt. Die Tagesmittelwerte werden monatsweise berechnet, aufsummiert und dann wird aus den Monatsmittelwerten der Jahresmittelwert gebildet.

Die Flugzeuge werden als Linienquelle über die Strecke angesetzt, die sie innerhalb eines Zeitabschnitts (typischerweise 10 Sekunden) zurücklegen. Diese Linie bekommt eine vertikale und horizontale Ausdehnung und eine longitudinale und vertikale Versetzung aufgrund des Austrittsimpulses der Abgase und ihrer Wechselwirkung mit der Wirbelschlepe. Die Emissionsmodellierung ist detailliert in Anhang A beschrieben. Der Verlauf der Rollwege wird aus der Parkposition, der benutzten Start/Landebahn und dem Schema der allgemeinen Verkehrsführung auf dem Rollfeld geschätzt.

Die Rollwege werden mit konstanter Geschwindigkeit durchfahren, die sich aus der Länge des Rollwegs und der benötigten Zeit (Differenz zwischen Blockzeit und ATA bzw. ATD) ergibt. Der *TakeOff* erfolgt gleichmäßig beschleunigt und der *ClimbOut* geradlinig, da in den zur Verfügung gestellten Daten noch keine Information über die jeweils benutzte Flugroute enthalten ist. Da auch keine Information über die anzuwendenden Steigprofile vorhanden ist, wird folgendes Schema verwendet:

Flugzeugtyp	t_T (s)	L_T (m)	\bar{u}_T (m/s)	u_C (m/s)	w_C (m/s)
Propellerflugzeug	25.7	900	35	70	5.0
Leichtes Strahlflugzeug	47.5	1900	40	80	13.6
Schweres Strahlflugzeug	65.0	2600	40	100	10.2

Es bedeuten:

- t_T Zeitdauer des *TakeOff* (s)
- L_T Länge der Startstrecke (m)
- \bar{u}_T Mittlere Geschwindigkeit bei *TakeOff* (m/s)
- u_C Horizontale Geschwindigkeit bei *ClimbOut* (m/s)
- w_C Vertikale Geschwindigkeit bei *ClimbOut* (m/s)

Die Gruppe „Schweres Strahlflugzeug“ wird von den Flugzeugtypen B747 und A340 gebildet.

Die Emission der drei Stoffe CO, HC und NO_x ist für jede Phase des LTO-Zyklus vorgegeben. Die Quellstärke wird für jedes Bahnstück homogen im Innern des ausgefüllten Volumens und zeitlich konstant über den betreffenden Zeitabschnitt gewählt. Bahnstücke, die ganz außerhalb des Rechengebietes oder ganz oberhalb von 1500 ft (457 m) liegen, werden nicht berücksichtigt.



3 Ergebnisse

Im Jahr 1998 wurden 419 210 Flugbewegungen auf dem Flughafen Frankfurt/Main abgewickelt. Der von der HLFU bereitgestellte Datensatz enthält keine Militärflugzeuge und umfaßt 414 983 Einträge, von denen 410 738 mit Emissionsangaben versehen sind. 5 041 Datensätze sind für die Ausbreitungsrechnung nicht nutzbar, da sie keine Angabe zur verwendeten Start/Landebahn enthalten oder Positionsangaben, die nicht zugeordnet werden können. In der Ausbreitungsrechnung werden daher fast 97 % aller Flugbewegungen berücksichtigt.

Die vom DWD gelieferte Zeitreihe enthält stundenweise für den Flughafen Frankfurt/Main die Werte von Windrichtung (10-Grad-Sektoren), Windgeschwindigkeit (Knoten) und Stabilitätsklasse (Klug/Manier). Von 49 fehlenden Datensätzen konnten noch 25 nachträglich beschafft werden. Die übrigen 24 wurden durch interpolierte Werte ersetzt.

Die Ausbreitungsrechnung wurde monatsweise durchgeführt. Dadurch entstand eine geringfügige Ungenauigkeit, da die in den letzten Minuten eines Monats freigesetzten Abgase nicht in der Rechnung des Folgemonats berücksichtigt wurden. Insgesamt wurden etwa 100 Millionen Simulationsteilchen verwendet. Die Rechenzeit betrug ungefähr 400 Stunden auf einem modernen PC.

In den Bildern 1 bis 9 sind die Mittelwerte und die 98-Perzentile der Stoffe CO, HC und NO₂ auf den drei Rastern dargestellt. Die tabellarische Darstellung steht in Anhang C. Zur Information sind auf den Bildern die größeren Gebäude, die Start/Landebahnen und die Grenze des Flughafengeländes eingezeichnet.

Im Flughafensbereich treten die höchsten Konzentrationen von CO und HC längs der Rollwege auf. Für NO₂ ist dagegen der *TakeOff* maßgeblich. Durch den Austrittsimpuls bedingt treten dabei die höchsten Konzentrationen etwa 200 m vor dem Beginn der Startbahn auf. Die leichte Erhöhung in der Verlängerung der Start/Landebahn ist dagegen auf die Modellierung der Wirbelschleppes bei *Approach* zurückzuführen, bei der die Quelle um 100 m nach unten versetzt wird.

Außerhalb des Flughafengeländes ist die Konzentrationsverteilung durch das für Frankfurt typische Vorherrschen von Nord-Ost- und Süd-West-Winden geprägt. Da sehr stabile Schichtung, die bei niedrigen Quellen zu hohen bodennahen Konzentrationen führt, vorwiegend bei Nord-Ost-Wind auftritt, sind hohe Werte der 98-Perzentile deutlich nach Süd-Westen verschoben.

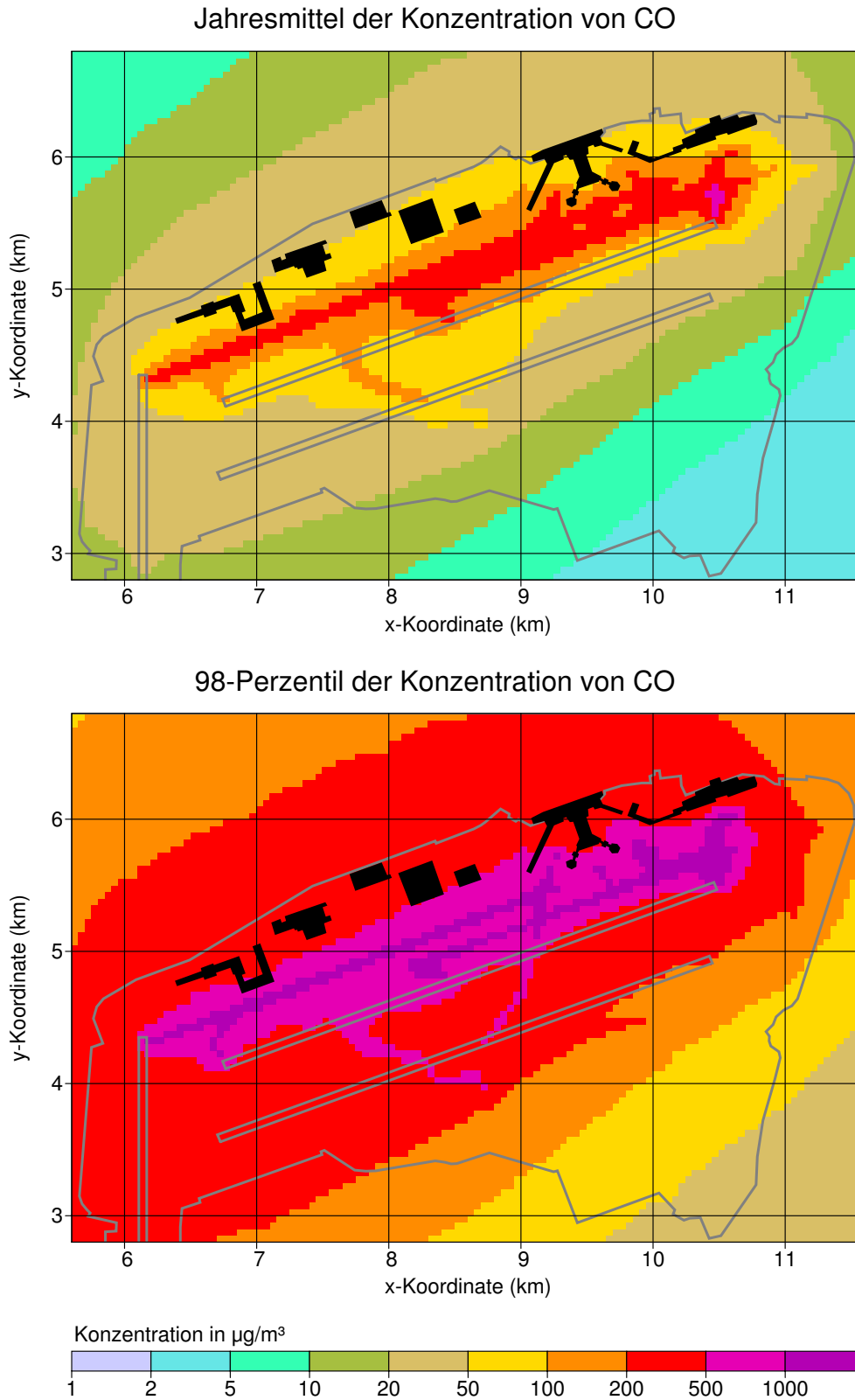


BILD 1: CO-Immission am Flughafen Frankfurt/Main im Jahre 1998 (LASAT-Rechnung auf Basis der Flugzeugemissionen, kleines Rechennetz).

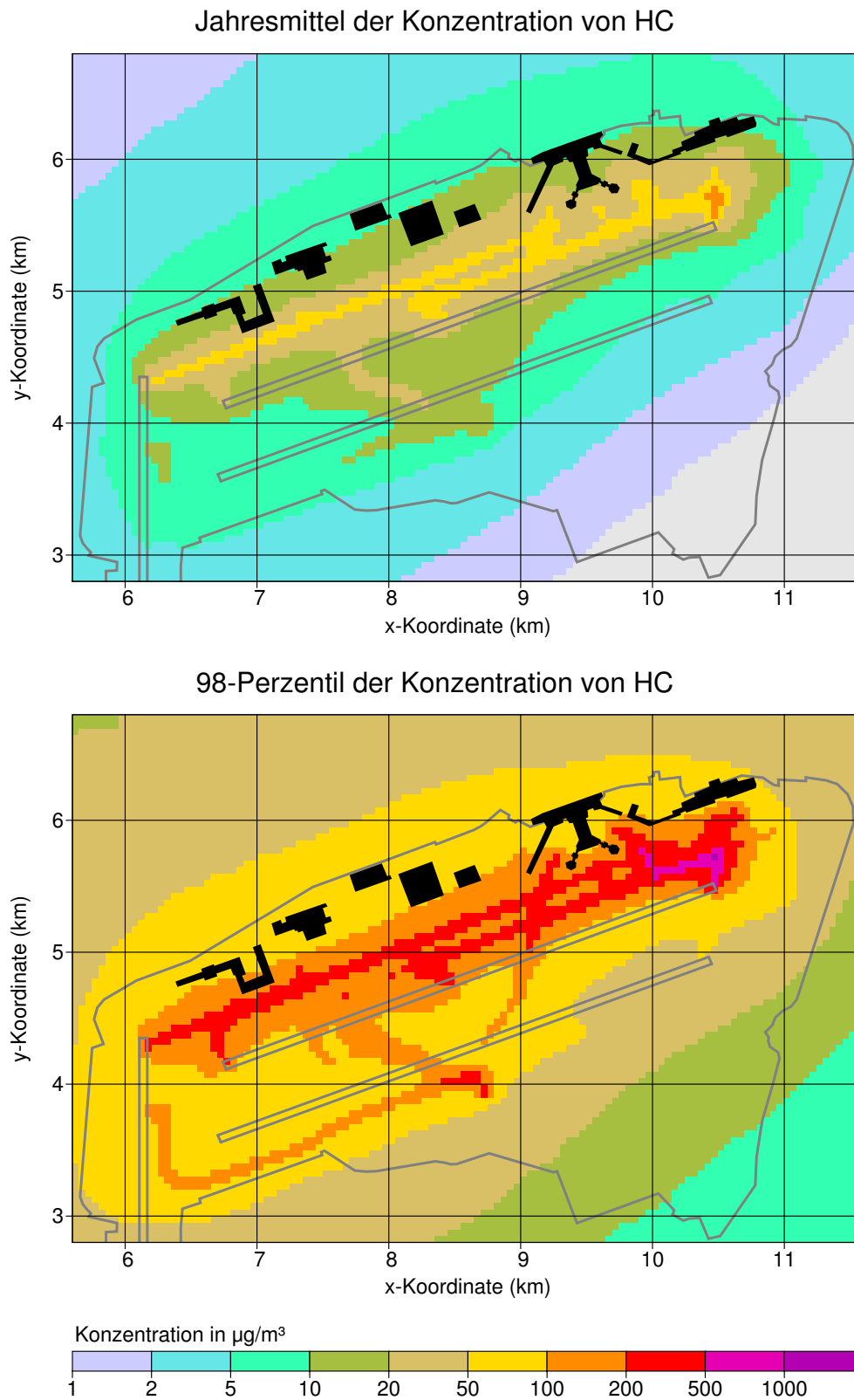


BILD 2: HC-Immission am Flughafen Frankfurt/Main im Jahre 1998 (LASAT-Rechnung auf Basis der Flugzeugemissionen, kleines Rechennetz).

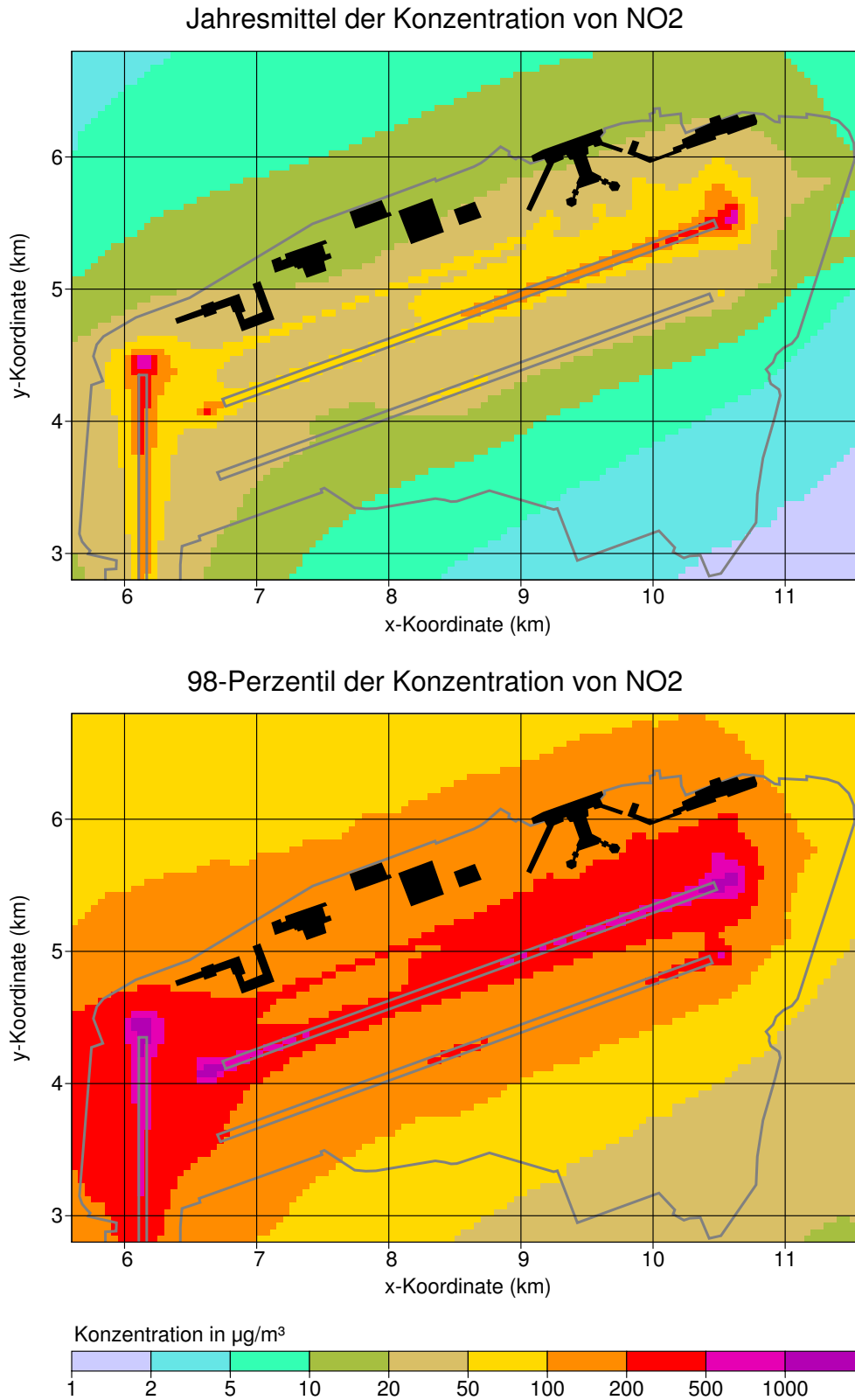


BILD 3: NO₂-Immission am Flughafen Frankfurt/Main im Jahre 1998 (LASAT-Rechnung auf Basis der Flugzeugemissionen, kleines Rechennetz).

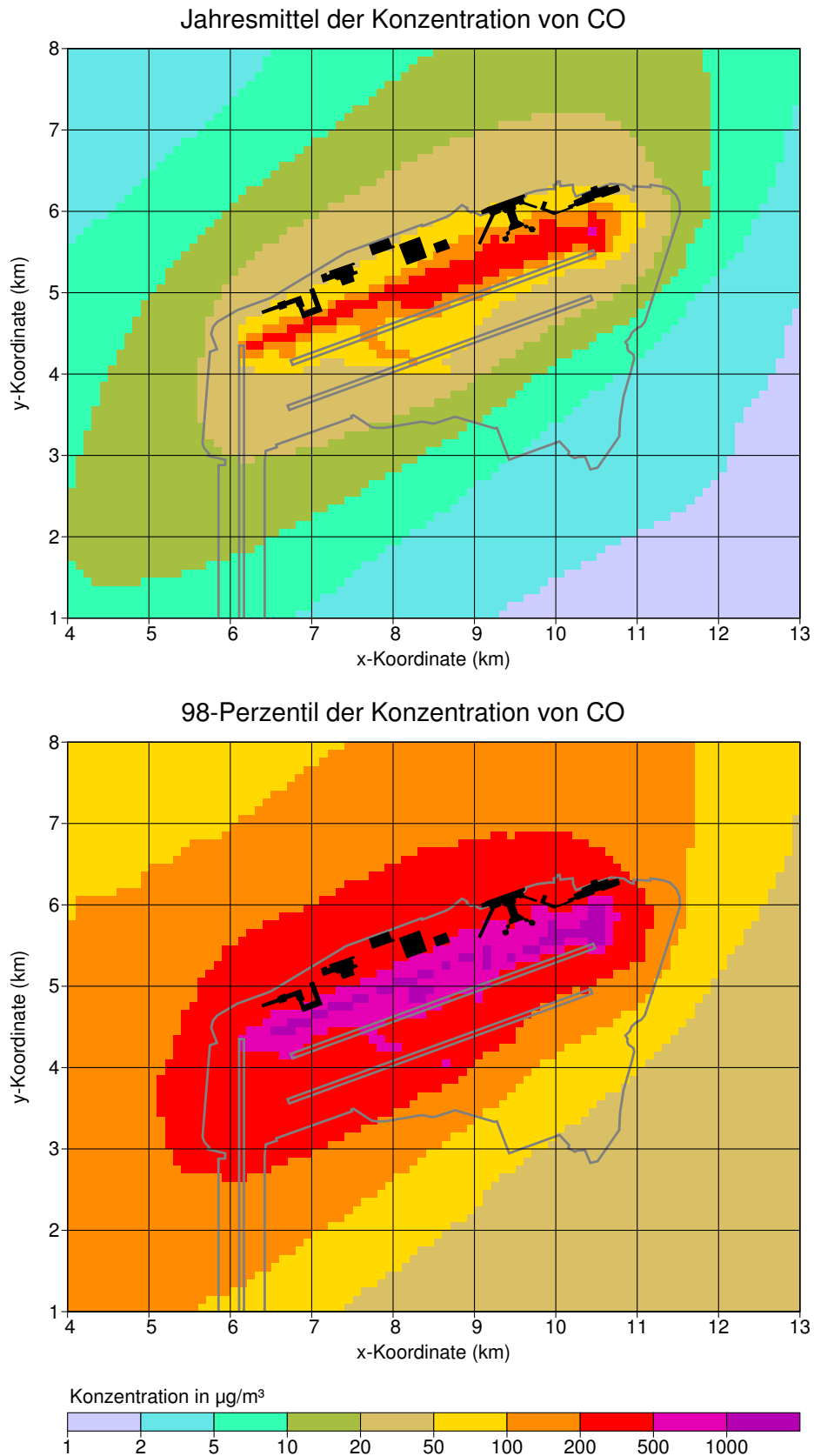


BILD 4: CO-Immission am Flughafen Frankfurt/Main im Jahre 1998 (LASAT-Rechnung auf Basis der Flugzeugemissionen, mittleres Rechennetz).

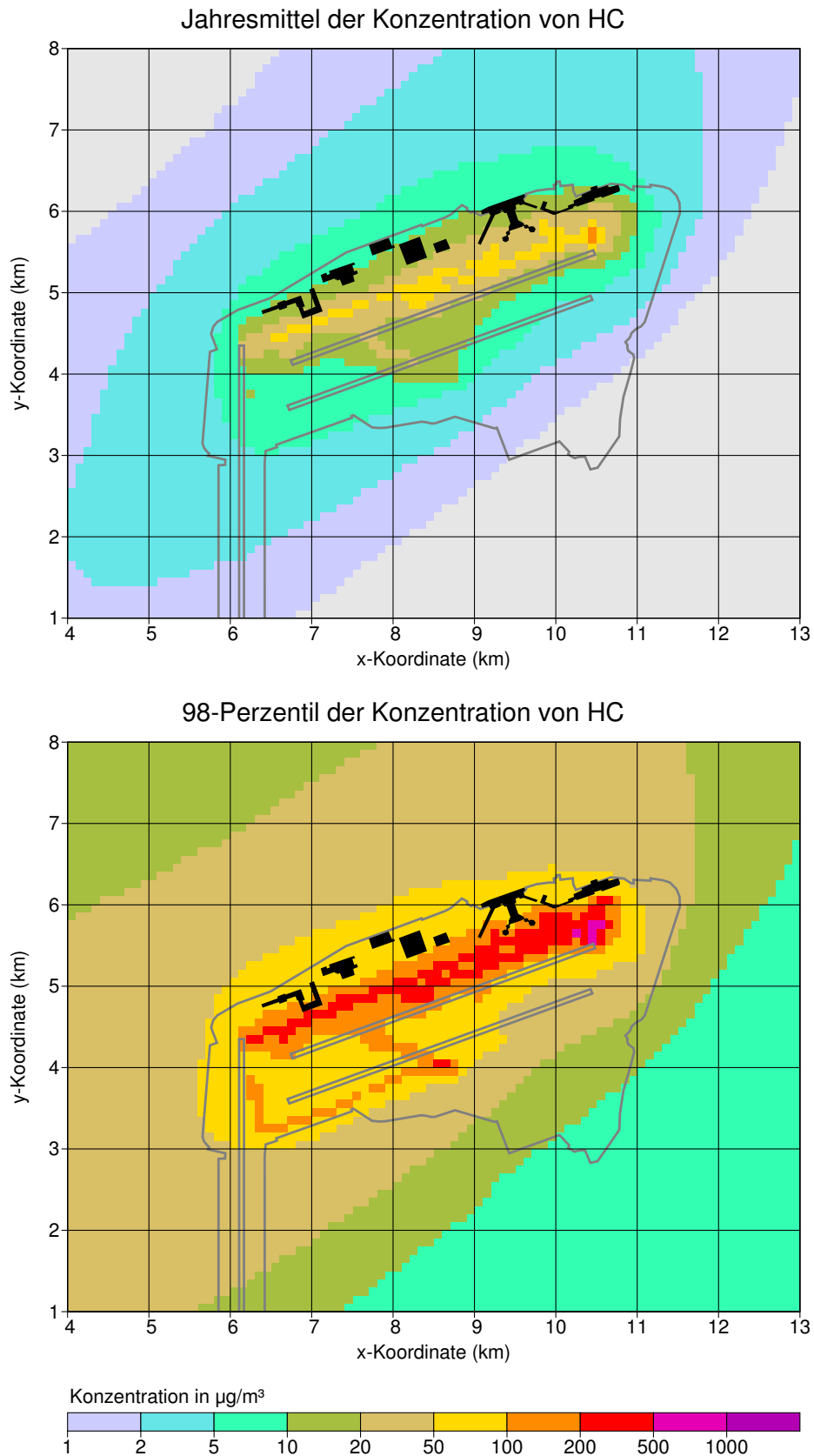


BILD 5: HC-Immission am Flughafen Frankfurt/Main im Jahre 1998 (LASAT-Rechnung auf Basis der Flugzeugemissionen, mittleres Rechennetz).

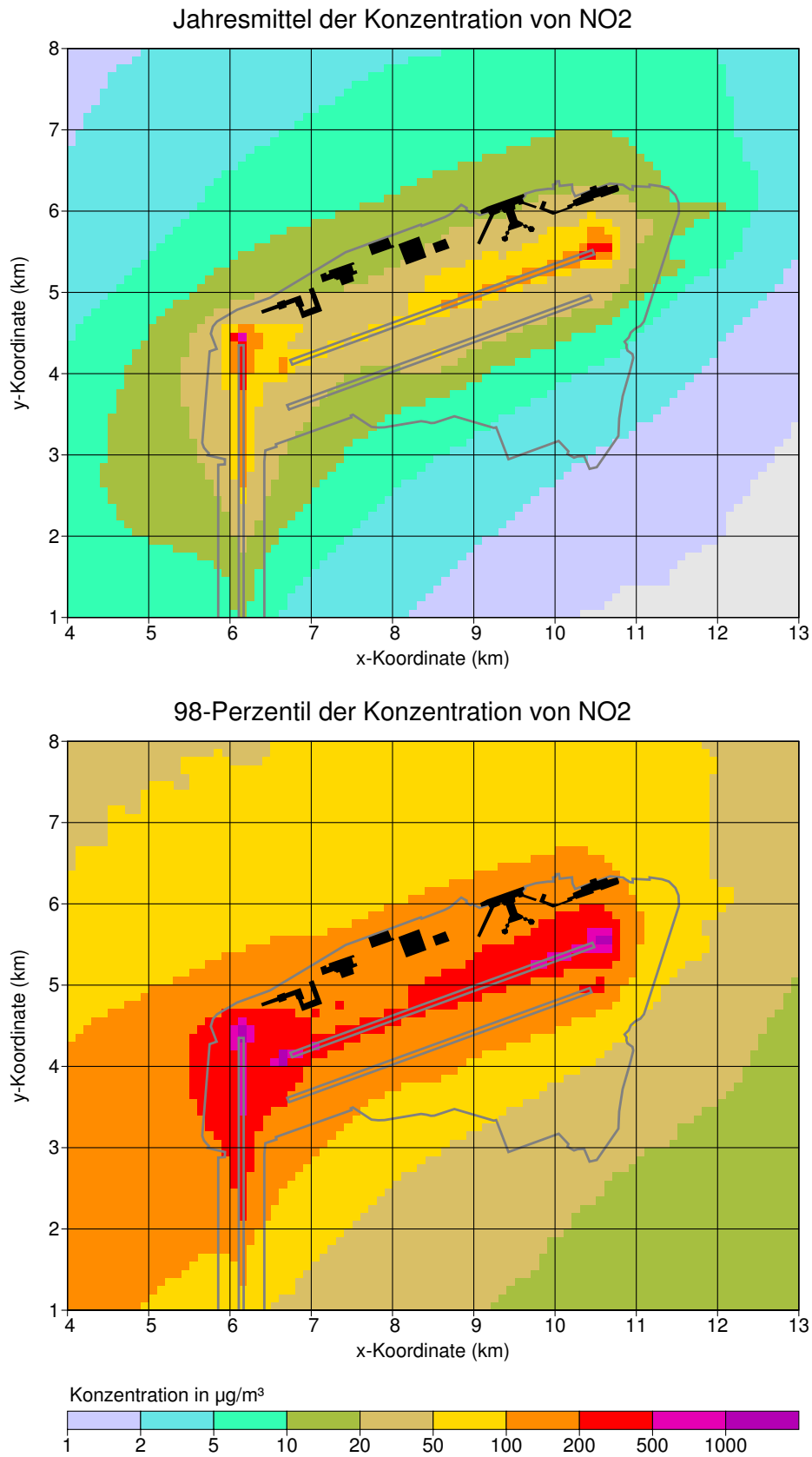


BILD 6: NO₂-Immission am Flughafen Frankfurt/Main im Jahre 1998 (LASAT-Rechnung auf Basis der Flugzeugemissionen, mittleres Rechennetz).

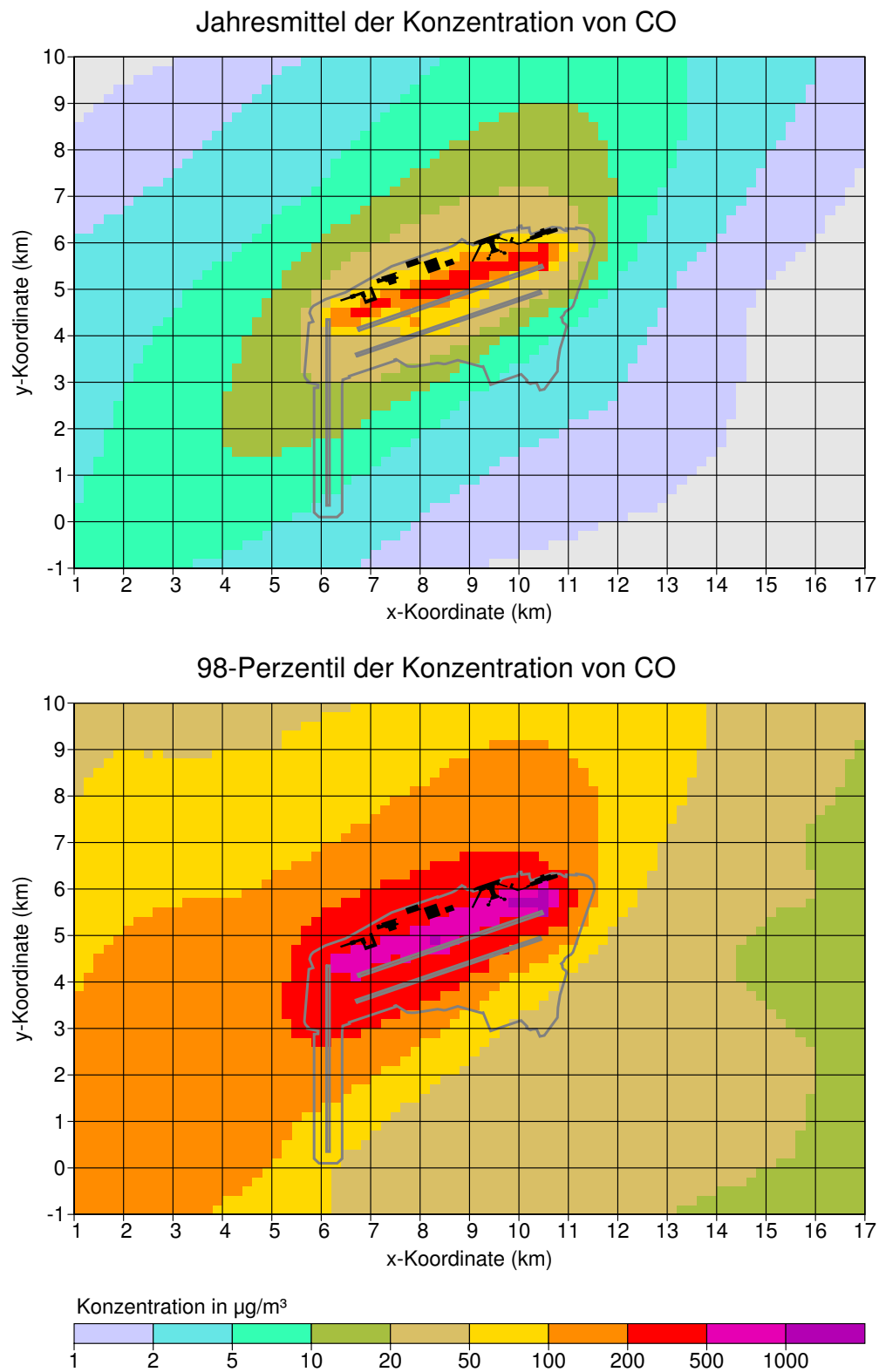


BILD 7: CO-Immission am Flughafen Frankfurt/Main im Jahre 1998 (LASAT-Rechnung auf Basis der Flugzeugemissionen, großes Rechennetz).

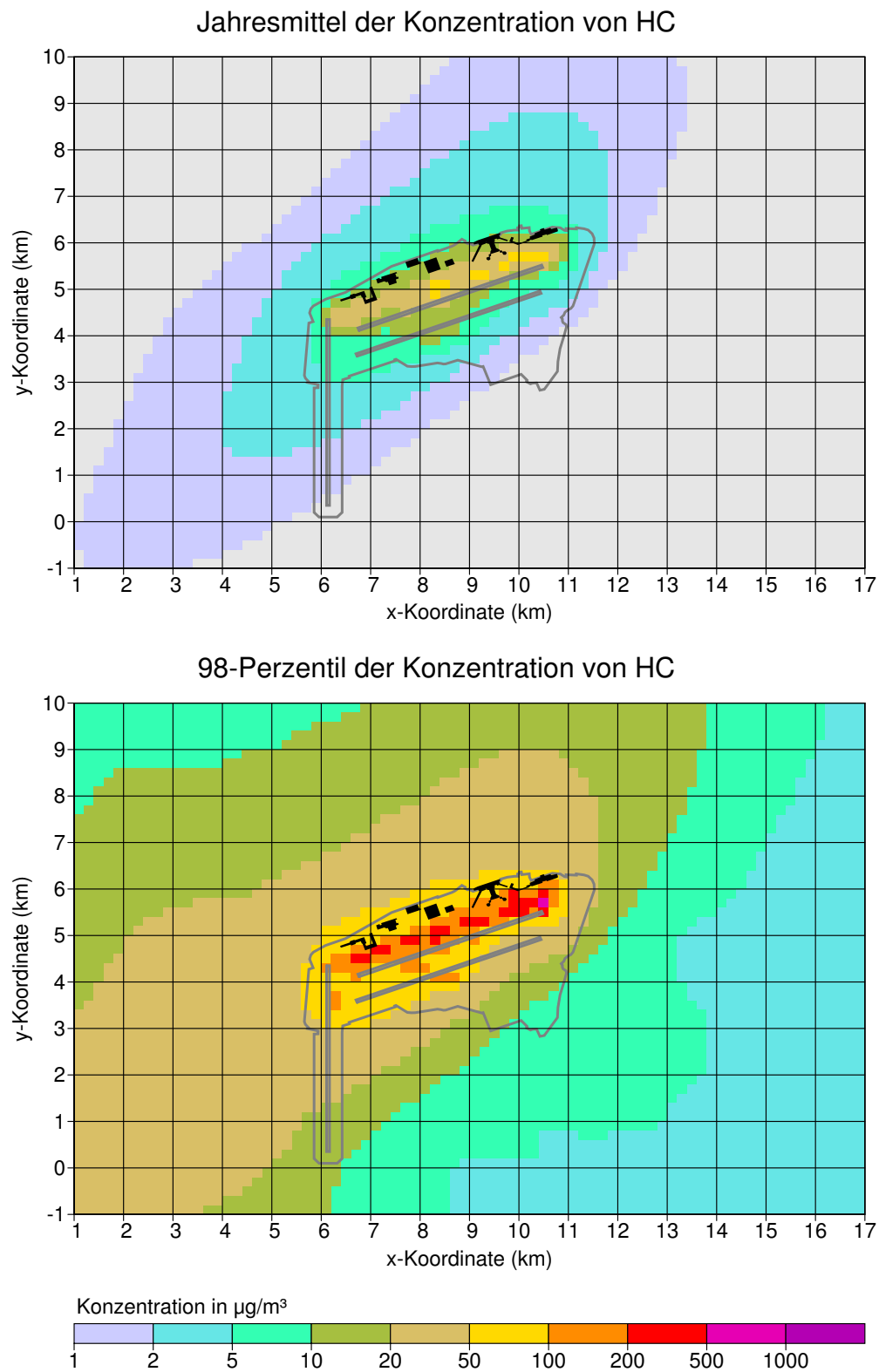


BILD 8: HC-Immission am Flughafen Frankfurt/Main im Jahre 1998 (LASAT-Rechnung auf Basis der Flugzeugemissionen, großes Rechennetz).

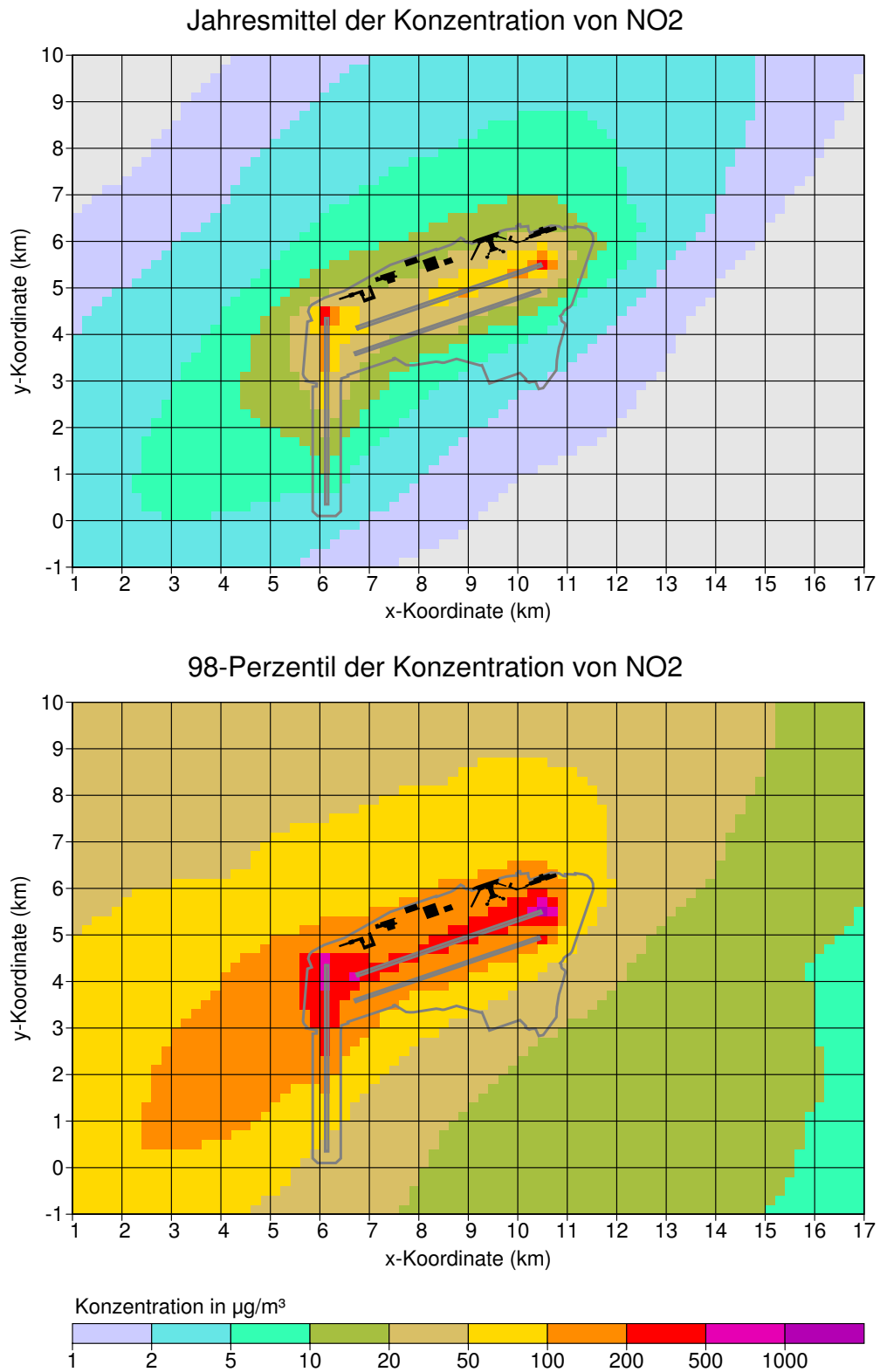


BILD 9: NO₂-Immission am Flughafen Frankfurt/Main im Jahre 1998 (LASAT-Rechnung auf Basis der Flugzeugemissionen, großes Rechennetz).

A Modellierung der Emission

Bei der Modellierung der Ausbreitung von Flugzeugabgasen in der Umgebung eines Flughafens sind nicht nur die Transporteigenschaften der Atmosphäre von Bedeutung sondern auch die Umstände der Abgasfreisetzung. Im Gegensatz zu typischen industriellen Quellen erfolgt die Freisetzung mit einem enormen, horizontal gerichteten Austrittsimpuls, instationär und zum größten Teil in Bodennähe. Diese Umstände müssen von einem Ausbreitungsmodell explizit berücksichtigt werden.

Für die Belastung der näheren Umgebung sind die Stickoxide am kritischsten. Von den vier im LTO-Zyklus auftretenden Flugphasen *Approach*, *Idle*, *TakeOff* und *ClimbOut* trägt die *TakeOff*-Phase am meisten zur Emission von Stickoxiden bei, denn bei den Triebwerken mit der höchsten NO_x-Emission ist die Quellstärke bei *TakeOff* um etwa einen Faktor 100 höher als im *Idle*-Zustand. Besondere Bedeutung kommt also der Emissions-Modellierung beim *TakeOff* zu.

Im folgenden werden zunächst die von der HLfU durchgeführten Immissionsmessungen mit hoher zeitlicher Auflösung diskutiert, sodann die Modellierung eines stationären Abgasstrahls mit dem Modell PLURIS und schließlich die im Modell LASAT verwendete Approximation der Emissionsbedingungen.

A.1 Messungen der HLfU

Von der HLfU wurden Ergebnisse aus einer Meßreihe zur Verfügung gestellt, bei der in der Woche vom 20.01.1998 bis zum 26.01.1998 neben der Startbahn West (18W) u.a. die Konzentration der Stoffe NO und NO₂ mit einer zeitlichen Auflösung von 5 Sekunden bestimmt wurden.⁵ Vielfach können darin einzelne Konzentrationsmaxima (Pulse) Startvorgängen auf 18W zugeordnet werden. Die startenden Flugzeuge passieren dabei die Meßstelle in einem Abstand von etwa 250 m. In einer ebenfalls zur Verfügung gestellten Excel-Tabelle sind 97 solcher Ereignisse mit Angabe von Startzeit, Flugzeugtyp, Quellstärke bzgl. NO_x und gemessenen Maximalwerten und Dosen (Zeitintegrale) von NO und NO₂ ausgewertet. Daneben sind Windrichtung, Windgeschwindigkeit und Bedeckungsgrad angegeben.

Bild 10 zeigt die Meßergebnisse für eine ausgewählte Stunde (weitere Diagramme sind in Abschnitt A.4 aufgeführt). Es ist deutlich zu erkennen, daß in den Meßwerten von NO lediglich die Starts auf 18W zu sehen sind (B757, B737, A321), nicht aber die auf 07L (A321, A321, A300, A310, A300, B737, A310, KH17, A321, A321, B737), obwohl bei der aktuellen Windrichtung von 40 Grad die Startschwelle von 07L genau im Luv der Meßstelle liegt.

Der gemessene NO-Puls ist das Abbild einer über die Meßstelle hinwegdriftenden

⁵Luftschadstoffbelastung auf dem Flughafen Frankfurt Main. Umweltplanung, Arbeits- und Umweltschutz, Heft Nr. 261, 1999. Schriftenreihe der Hessischen Landesanstalt für Umwelt.

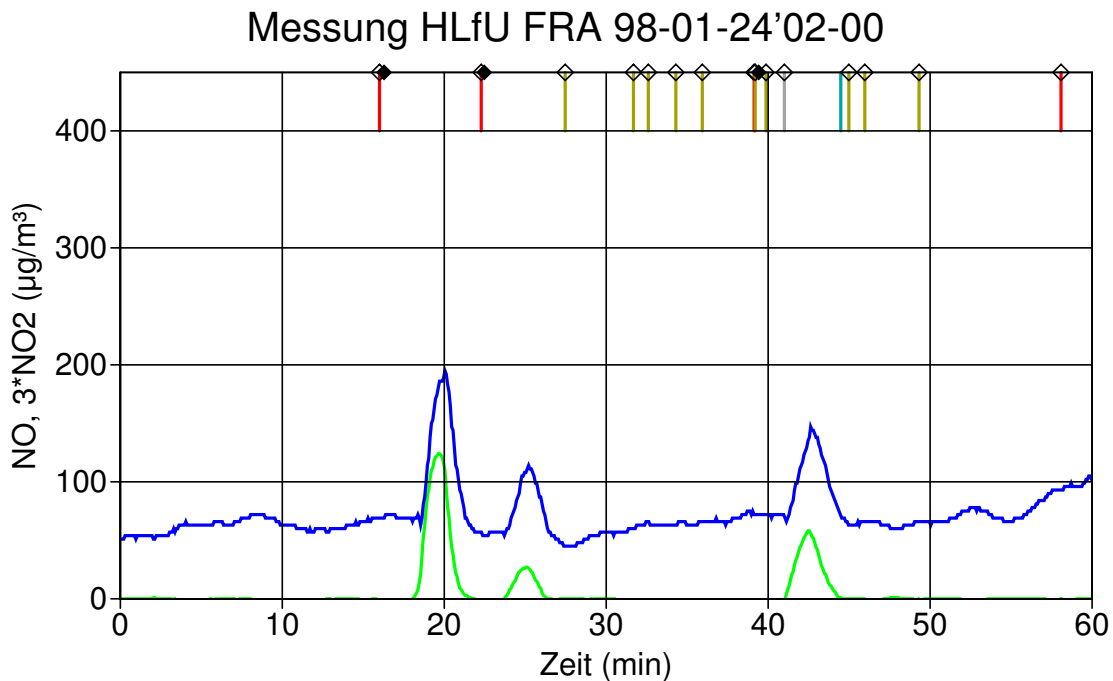


BILD 10: Am Meßpunkt 3 gemessene Konzentration von NO (grüne Kurve) und NO₂ (blaue Kurve) am 24.01.1999 zwischen 1 und 2 Uhr. Die NO₂-Werte sind zur besseren Darstellung mit dem Faktor 3 multipliziert. Am oberen Bildrand sind die dem Flugtagebuch entnommenen Flugbewegungen angegeben. Die Farben kennzeichnen die verwendete Start/Landebahn, es bedeuten: rot = 18W, ocker = 07L, türkis = 07R. Starts sind durch eine offene Raute gekennzeichnet. Eine ausgefüllte Raute bezeichnet Starts auf 18W, die in der Auswertetabelle der HLFU enthalten sind, wobei die Zeiten geringfügig differieren.

Wolke. Die Wolke hat die Form einer lang gestreckten Fahne, die während des knapp 50 Sekunden dauernden *TakeOff* emittiert wird. In dieser Zeit legt das Flugzeug etwa 2000 m zurück. Der Teil der Fahne, der über die Meßstelle hinwegdriftet, stammt aus der Mitte der *TakeOff*-Strecke, wo das Flugzeug eine Geschwindigkeit von etwa 60 m/s erreicht hat. Bei hoher Windgeschwindigkeit quer zur Startbahn wird die Fahne schneller versetzt. Außerdem hat sie weniger Zeit, sich aufgrund der inneren Turbulenz auszudehnen, bevor sie die Meßstelle erreicht. Daher ist anzunehmen, daß der gemessene Puls um so schmaler ist, je höher die Windgeschwindigkeit ist.

In Bild 11 ist aber keine derartige Tendenz zu erkennen. Hier ist für NO die Pulsbreite 2τ aufgetragen, die man aus der Dosis d und dem Maximalwert c_{\max} erhält, wenn man für die Pulsform eine Gaußglocke ansetzt:

$$c(t) = c_{\max} \exp\left(-\frac{t^2}{2\tau^2}\right) \quad (1)$$

$$d = \int c(t) dt = \frac{1}{\sqrt{2\pi\tau}} c_{\max} \quad (2)$$

Oberhalb einer Windgeschwindigkeit von 4 m/s gibt es für die Pulsbreite eine deutliche untere Grenze von etwa 70 Sekunden. Lediglich unterhalb von 4 m/s deuten die Meßpunkte auf eine Zunahme der Pulsbreite mit abnehmender Windgeschwindigkeit hin.

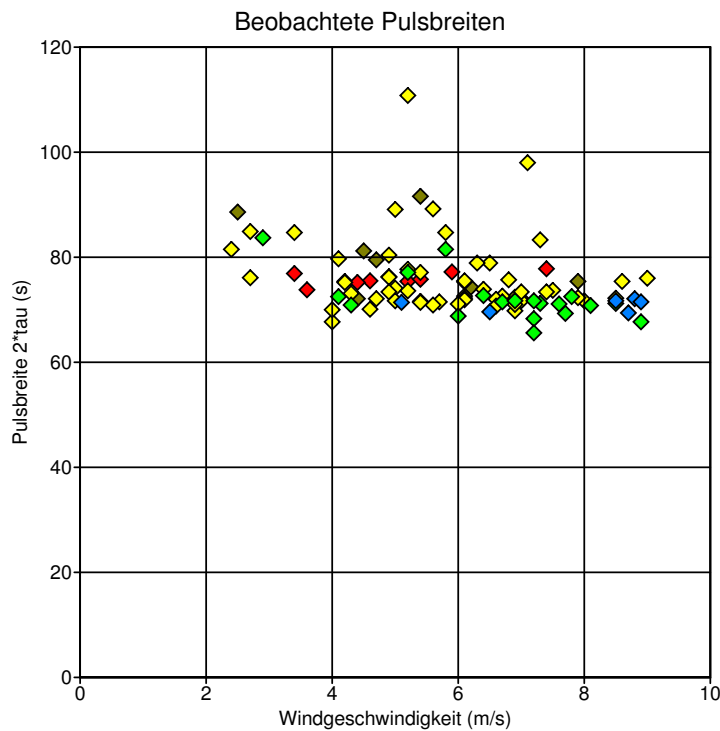


BILD 11: Beobachtete Pulsbreite (2σ einer approximierenden Gauß-Glocke) als Funktion der Windgeschwindigkeit. Die Windrichtung ist durch die Füllfarbe der Rauten gekennzeichnet: rot = 0 bis 14 Grad, oliv = 15 bis 29 Grad, gelb = 30 bis 44 Grad, grün = 45 bis 59 Grad, blau = 60 bis 75 Grad.

Hieraus kann man auf eine Zeitkonstante der Meßapparatur von gut einer Minute schließen.⁶ Da mit einer solchen Zeitkonstanten normalerweise auch eine Signalverzögerung einhergeht, ließe sich damit die Beobachtung erklären, daß die Konzentrationsfahne aus einem Gebiet zu stammen scheint, das deutlich hinter der Startbahn liegt (Bild 12).

Wenn auch auf diese Weise die Maximalwerte verschliffen sind, kann man doch von der Zuverlässigkeit der Dosiswerte ausgehen, denn die sollten gegenüber internen Zeitkonstanten relativ unempfindlich sein. Die Dosis ist die Größe, die man zur Berechnung der mittleren Konzentration benötigt. Hat man nämlich im Zeitraum $t_1 \leq t \leq t_2$ eine Überlagerung vieler Pulse $c_i(t)$, dann erhält man die mittlere Konzentration \bar{c} aus

$$\bar{c} = \frac{\int_{t_1}^{t_2} \sum_i c_i(t) dt}{t_2 - t_1} \quad (3)$$

$$= \frac{\sum_i d_i}{t_2 - t_1} \quad (4)$$

wobei über alle Pulse in dem betreffenden Zeitintervall zu summieren ist. Für eine Modellierung, die der Bestimmung von Mittelwerten über Zeiträume dient, die groß sind gegenüber der Pulsbreite, ist es also wichtig, die gemessenen Dosiswerte möglichst gut zu reproduzieren. Im folgenden wird immer die NO_x-Dosis betrachtet, die hier in Einheiten von NO₂ angegeben wird und sich entsprechend dem unter-

⁶Nach Mitteilung von Dr. Büchen (HLfU) liegt die Ansprechzeit der Apparatur, also die Zeit zwischen dem Anlegen einer Gasprobe und dem ersten Auftreten eines Meßsignals, bei 14 Sekunden.

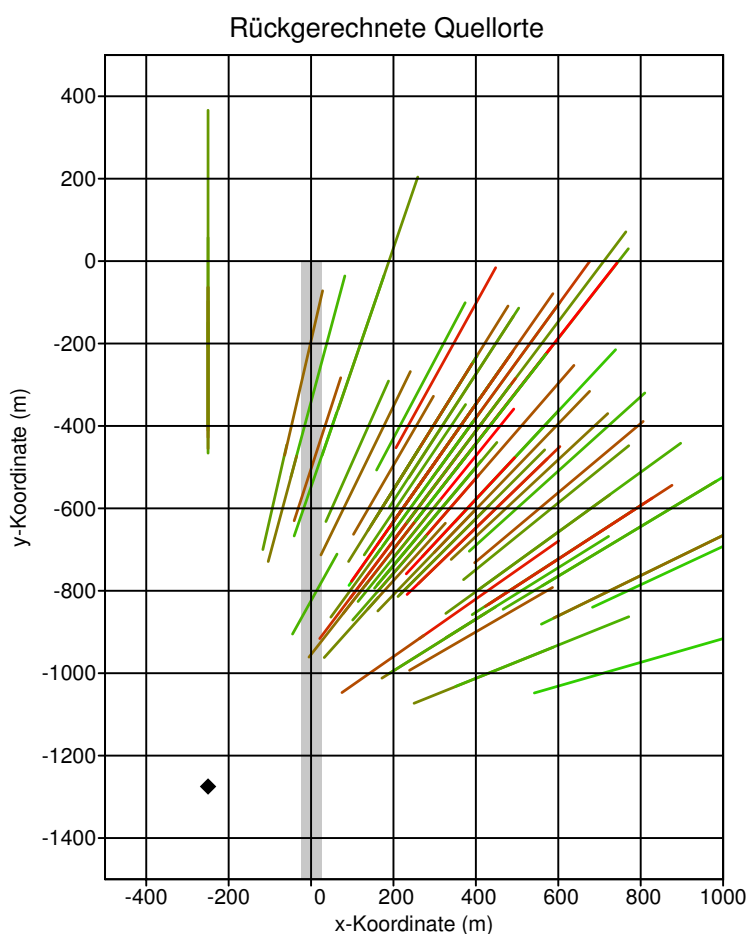


BILD 12: Auf Basis der Signalverzögerung, der Pulsbreite, der Windgeschwindigkeit und der Windrichtung zurückgerechnete Quellorte. Dabei ist angenommen, daß die in der Auswertetabelle von der HLFU angegebene Verzögerungszeit die Zeit zwischen Start und dem Zeitpunkt des Auftretens der Maximalkonzentration abzüglich 2τ ist. Die Raute bezeichnet die Meßstelle, die Startbahn ist grau schattiert. Es ist zu beachten, daß wegen der ganzzahligen Werte der Windrichtung häufig Linien übereinander liegen. Durch rote Farbe sind besonders starke Pulse hervorgehoben.

schiedlichen Molekulargewicht aus

$$d_{\text{NO}_x} = 1.53 d_{\text{NO}} + d_{\text{NO}_2} \quad (5)$$

ergibt. Daher sind die Ergebnisse nicht davon abhängig, welcher Wert für die Umsetzungsrate von NO nach NO₂ angesetzt wird. Vergleicht man die Summe über alle d_{NO_x} -Werte mit der Summe über alle d_{NO} -Werte, dann erhält man, daß hier bei den einzeln identifizierbaren Abgasfahnen am Meßort im Mittel 15 % des Stickoxids in Form von NO₂ vorliegt.

Sollen die gemessenen Dosiswerte zur Grundlage einer Modellkalibrierung gemacht werden, ist es zweckmäßig, noch weitere Einflußfaktoren zu isolieren. Der wichtigste ist zunächst die Quellstärke Q , die bei den hier diskutierten Ereignissen um einen Faktor 20 variiert, denn es ist zu erwarten, daß eine Veränderung der Quellstärke unter Beibehaltung aller anderen Parameter zu einer entsprechenden Veränderung der Dosis führt. Weiterhin wird die Windgeschwindigkeit u Einfluß haben. Denn wenn die Abgasfahne eine bestimmte, zeitlich unveränderliche und nur durch das betrachtete Flugzeug festgelegte Struktur hat, dann wird sie bei hoher Windgeschwindigkeit schneller über den Meßort hinwegbewegt als bei geringer Windgeschwindigkeit. Entsprechend ist bei hoher Windgeschwindigkeit ein geringer Wert der Dosis zu erwarten. Für die weiteren Betrachtungen wird daher die spezifische

Dosis D verwendet,

$$D = \frac{d_{\text{NO}_x} u}{Q} \quad (6)$$

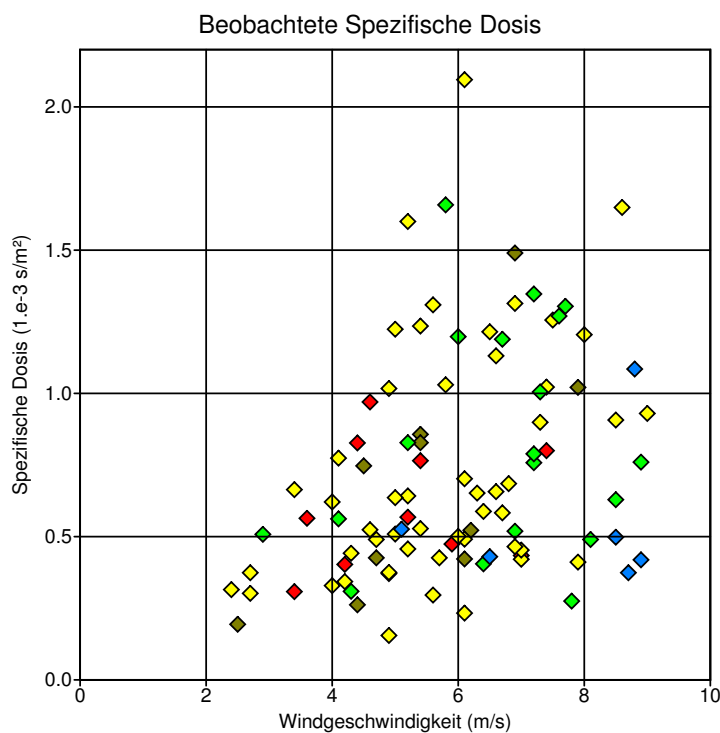


BILD 13: Beobachtete Spezifische Dosis D als Funktion der Windgeschwindigkeit u . Die Windrichtung ist durch die Füllfarbe der Rauten gekennzeichnet: rot = 0 bis 14 Grad, oliv = 15 bis 29 Grad, gelb = 30 bis 44 Grad, grün = 45 bis 59 Grad, blau = 60 bis 75 Grad.

In Bild 13 ist die spezifische Dosis als Funktion der Windgeschwindigkeit aufgetragen. Offensichtlich besteht doch eine Korrelation, denn hohe D -Werte treten nur bei hoher Windgeschwindigkeit auf. Eine mögliche Erklärung hierfür ist, daß die Abgasfahne während des Transportes zum Meßort nicht zeitlich konstant ist sondern sich ausdehnt. Dabei spielt nur die vertikale Ausdehnung eine Rolle, denn eine horizontale Ausdehnung verändert in erster Näherung nicht den Wert der Dosis. Diese vertikale Diffusion muß ihre Ursache in der internen, durch das Flugzeug erzeugten Turbulenz besitzen, denn die Aufweitung der Fahne durch atmosphärische Turbulenz geschieht so, daß die Abmessungen der Fahne unabhängig von der Windgeschwindigkeit sind. Der hier beobachtbare Zusammenhang zwischen D und u liefert also Hinweise auf die anfängliche Eigenturbulenz der Abgasfahne.

Weiterhin fällt auf, daß bei Windrichtungen nahezu parallel zur Startbahn (rote Rauten) keine signifikant anderen Meßwerte auftreten als bei mehr östlicher Windrichtung. In einer Reihe von Fällen ist sogar direkter Nordwind ausgewiesen. Wenn trotzdem Konzentrationspulse beobachtet werden, dann bedeutet dies, daß die Fahne sich beim Transport parallel zur Startbahn so stark aufweitet, daß ein erheblicher Teil schließlich doch den 250 m seitlich gelegenen Meßort überstreicht. Hieraus können Hinweise auf die horizontale Aufweitung der Fahne erhalten werden.

Wenn jedes startende Flugzeug eine Abgasfahne mit gleicher Struktur (Ausdehnung, Turbulenz) erzeugen würde, müßte die spezifische Dosis D unabhängig von der jewei-

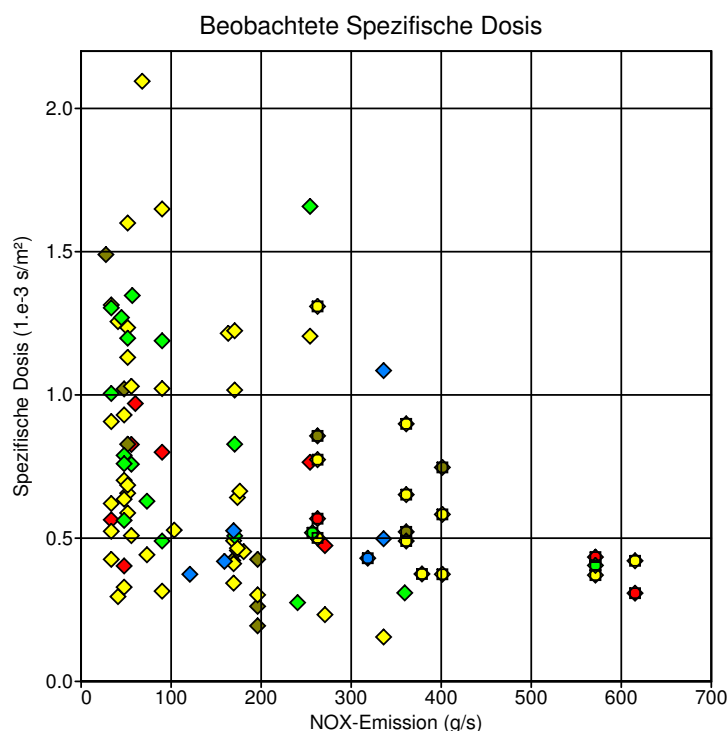


BILD 14: Beobachtete Spezifische Dosis D als Funktion der Quellstärke Q . Die Windrichtung ist durch die Füllfarbe gekennzeichnet: rot = 0 bis 14 Grad, oliv = 15 bis 29 Grad, gelb = 30 bis 44 Grad, grün = 45 bis 59 Grad, blau = 60 bis 75 Grad. Sterne bezeichnen Flugzeuge vom Typ B747.

ligen Quellstärke sein. Bild 14 zeigt aber, daß bei besonders starken Emittenten vorwiegend geringe D -Werte beobachtet werden. Bei der Gruppe der stärksten Emittenten mit durchwegs niedrigen D -Werten gehören alle Maschinen zum Flugzeugtyp B747, der in diesem Bild durch einen Stern statt durch eine Raute gekennzeichnet ist. Andererseits hat nicht jede B747 einen niedrigen D -Wert. Der besonders hohe Wert von $1.3 \cdot 10^{-3} \text{ s m}^{-2}$ hat aber möglicherweise eine besondere Ursache: er gehört zu einem Start am 24.01 um 22:23:35 und zu dieser Zeit sind offensichtlich auch Starts auf 07L vom Meßpunkt 3 erfaßt worden (siehe Abschnitt A.4), so daß dieser hohe Wert aus einer Überlagerung mehrerer Abgasfahnen stammen könnte.

Diese Darlegungen zeigen, daß für eine genaue Modellierung des Emissionsverhaltens der Flugzeuge anhand der von der HLFU durchgeführten Messungen die sorgfältige Analyse jedes Einzelpulses und der Einsatz spezifischer, von Flugzeug- und Triebwerkstyp abhängiger Parameter notwendig ist.

A.2 Modellierung eines Abgasstrahls mit PLURIS

Mit dem Modell PLURIS wurde untersucht, wie sich die Abgasstrahlen eines Flugzeuges beim *TakeOff* ausbreiten. PLURIS ist ein integrales Fahnenmodell zur Simulation von Freistrahlen. Es berücksichtigt Temperatur und Feuchtigkeit der Abgase. Es wurde anhand von Wassertank- und Windkanalexperimenten und Beobachtungen an Abgasfahnen aus Schornsteinen und an Kühlturmschwaden validiert. Für die Untersuchung der Abgasstrahlen von Flugzeugen wurde nur die im folgenden beschriebene Modifizierung durchgeführt.

Zum Vergleich mit der Rechnung dienten Meßdaten, die von Frau Klein (Flugha-



fen Düsseldorf) zur Verfügung gestellt wurden. Hierbei wurde für ein Flugzeug mit drei Triebwerken vom Typ CF6-80C2D1F die Abgasgeschwindigkeit in verschiedenen Abständen hinter dem Flugzeug bei *TakeOff*-Belastung gemessen. Aus den Diagrammen ist nicht zu entnehmen, in welcher Höhe die Messungen bei Abständen von mehr als 150 m erfolgten. Die angegebenen Werte wurden als Maximalwerte in der betreffenden Entfernung interpretiert.

Für die Turbine CF6-80C2D1F wurden die Daten übernommen, die für das ähnliche Triebwerk CF6-50E/C2 nach Durchmischung mit dem Mantelstrahl geschätzt wurden:

- Austrittstemperatur 94 Grad Celsius bei 20 Grad Celsius Umgebungstemperatur
- Volumenstrom 714 m³/s
- Durchmesser 2.5 m
- Mittlere Ausströmgeschwindigkeit 150 m/s

Da das Modell PLURIS nur einen einzelnen Freistrahler rechnen kann, das getestete Flugzeug aber drei Triebwerke besitzt, wurde folgende Näherung gemacht:

- In der Nähe des Flugzeugs (50 m hinter dem mittleren Triebwerk) wurden nur die Daten für ein einzelnes Triebwerk verwendet, da die anderen beiden etwa 8 m weiter außen sitzen und hier vermutlich nur einen geringen Einfluß haben.
- In größerer Entfernung wurden Daten aus einer Rechnung verwendet, bei der alle Triebwerke zu einem einzigen mit der dreifachen Querschnittsfläche (Durchmesser 4.3 m) zusammengefaßt sind. Seine Position ist der aus den drei Triebwerkspositionen berechnete Schwerpunkt.
- Die Modellvorstellung bei PLURIS geht von einem Freistrahler aus, die Abgasstrahlen des Flugzeugs, insbesondere der beiden seitlichen Triebwerke, verlaufen aber dicht am Erdboden. Es wurde daher angenommen, daß die Einmischung der Außenluft in den Strahl (Entrainment) hier nur halb so groß ist wie bei einem freien Strahl.

Das folgende Bild zeigt die gemessene und die berechnete maximale Geschwindigkeit hinter dem (stehenden) Flugzeug bei neutraler Schichtung und Windstille.

Die grüne Kurve für ein einzelnes Triebwerk trifft gut den Meßwert, der dem Flugzeug am nächsten liegt, während die blaue Kurve für die Zusammenfassung der drei Triebwerke die Messungen im Fernbereich trifft. Dieser eine Vergleich ist noch keine Validierung, man kann aber vermuten, daß PLURIS auch in diesem Anwendungsbereich realistische Ergebnisse liefert.

Auf ein Problem sei noch hingewiesen. PLURIS liefert in 500 m Entfernung für die Fahnenachse noch eine Temperaturerhöhung von etwa 6 Grad. Dies bewirkt einen thermischen Anstieg des Abgasstrahls, der in etwa 200 m Entfernung einsetzt (hier ist der Versatz der Strahlachse etwa 5 m) und in 500 m Entfernung etwa 75 m

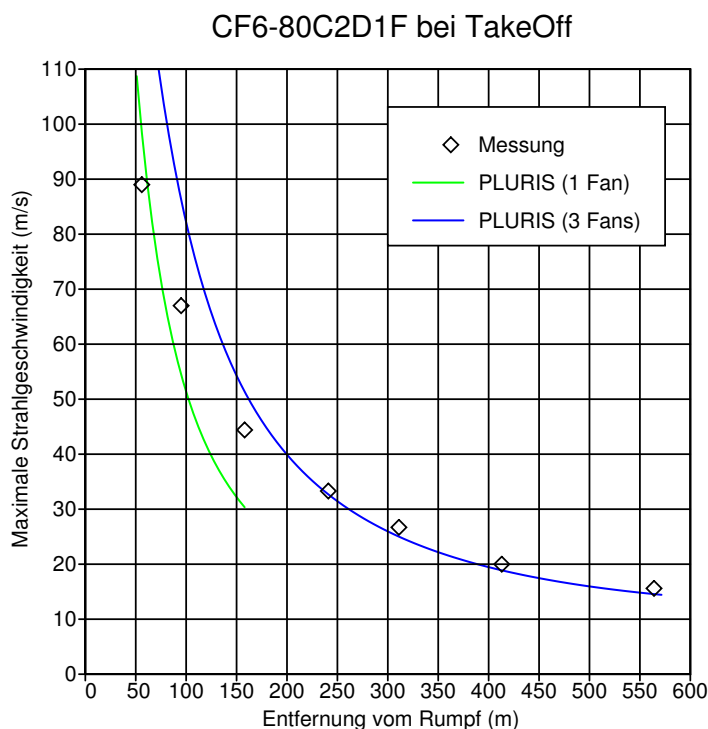


BILD 15 Maximale Strömungsgeschwindigkeit im Abluftstrahl hinter einem Flugzeug. Die Rauten bezeichnen Meßwerte hinter einem Flugzeug vom Typ MD11 mit 3 Triebwerken CF6-80C2D1F bei *TakeOff*-Last. Die grüne Kurve stellt das Ergebnis einer Modellrechnung mit PLURIS für ein Triebwerk dar, die blaue Kurve ist eine Modellrechnung für einen Verbund aus drei Triebwerken.

beträgt bei einem Durchmesser⁷ von ebenfalls 75 m. Der thermische Anstieg wird aber vermutlich durch die Nähe des Erdbodens weitgehend unterdrückt, denn sonst wären die Messungen kaum möglich gewesen.

A.3 Modellierung der Quelle in LASAT

Der Abschnitt A.2 hat gezeigt, daß es grundsätzlich möglich sein sollte, den Abgasstrahl eines Triebwerks mit PLURIS zu modellieren. Die ursprüngliche Absicht, PLURIS in LASAT einzubinden und mit dieser Kombination die Ausbreitungsrechnungen durchzuführen, wurde aber aus folgenden Gründen wieder aufgegeben:

1. Die Wirkung des Erdbodens auf die Entwicklung des Abgasstrahls läßt sich aus dem Modell heraus nicht hinreichend genau beschreiben.
2. Die Modellrechnung in PLURIS erfolgt für einen stationären Strahl. Gerade der für Immissionsbetrachtungen so wichtige *TakeOff* ist aber ein sehr instationärer Vorgang und im Rahmen des Modells nicht beschreibbar.

Die Modellierung der Quelle erfolgt daher empirisch auf der Basis der in Abschnitt A.1 dargestellten Meßergebnisse. Dabei ist es im Rahmen dieses Projektes nicht möglich und für den Zweck der Immissionsberechnung auch nicht erforderlich, jeden Flugzeugtyp mit jeder vorkommenden Triebwerkskombination separat zu betrachten. Statt dessen wird mit einem einheitlichen Modellansatz gerechnet, der sich vorwiegend an den modernen großen Flugzeugen mit hohem NO_x-Ausstoß orientiert. Dabei wird von folgenden Überlegungen ausgegangen:

⁷Als Radius wird für eine Verteilung in Form einer Gaußglocke der Abstand 2σ angesetzt.



1. Die Emission in Form eines Abgasstrahls bewirkt eine horizontale Versetzung der effektiven Quelle. Diese Versetzung ist wegen des instationären Charakters allerdings nicht so groß, wie sie sich aufgrund einer PLURIS-Rechnung darstellen würde.
2. Die anfängliche Aufweitung der Abgasfahne erfolgt aufgrund ihrer internen Turbulenz. Die horizontale Aufweitung ist zwar für den Vergleich mit den Messungen wichtig, aber nicht so sehr für die vorgesehenen Immissionsbetrachtungen. Hier geht vorwiegend die vertikale Diffusion ein.
3. Beobachtungen und Modellrechnungen⁸ zeigen, daß die Abgasstrahlen der Triebwerke in der Regel in der Wirbelschleppe des Flugzeuges eingefangen und damit gegenüber der Flughöhe um etwa 100 m nach unten versetzt sind.

Hieraus folgt folgender Ansatz für die Modellierung der Emission in LASAT:

- Bei *TakeOff*, *ClimbOut* und *Approach* wird die Flugbahn in Stücke von 10 Sekunden Dauer zerlegt. Die Emission erfolgt gleichmäßig in einem Volumen, das die Länge der in dieser Zeit zurückgelegten Strecke, die Breite b und die Höhe h besitzt. Die Unterkante des Volumens liegt auf Flughöhe ($=0$ am Erdboden). Beim Taxi-Verkehr können die Bahnstücke länger sein.
- Bei *TakeOff* und *ClimbOut* wird die effektive Quelle um die Strecke s in Strahlrichtung versetzt.
- Bei *ClimbOut* und *Approach* wird die effektive Quelle um maximal 100 m nach unten versetzt, soweit die Flughöhe dies zuläßt.
- Jedes Simulationsteilchen erhält bei der Freisetzung eine normalverteilte Zusatzgeschwindigkeit zur Simulation der internen Turbulenz der Abgasfahne. Die Streuungen der Geschwindigkeitskomponenten sind σ_L in Strahlrichtung, σ_H horizontal senkrecht zur Strahlrichtung und σ_V vertikal.
- Die Zusatzgeschwindigkeit wird exponentiell auf einer Zeitskala T_σ abgebaut, so daß sich asymptotisch in den drei Raumrichtungen eine Aufweitung von σT_σ ergibt.

Die Werte der eingeführten Parameter wurden durch Vergleichsrechnungen mit den in Abschnitt A.1 beschriebenen Messungen bestimmt. Das Ziel war es, im Mittel über alle Einzelereignisse eine Übereinstimmung von DQ und eine möglichst hohe Korrelation zwischen den gemessenen und den berechneten Werten von D zu erhalten. Diese Optimierung wurde wegen der langen Rechenzeiten nicht formal sondern durch stichprobenweises Probieren durchgeführt. Das Ergebnis sind folgende Werte:

⁸T. GERZ, T. EHRET: Wingtip Vortices and Exhaust Jets During the Jet Regime of Aircraft Wakes. *Aerospace Science and Technology*, **7**, 463-474, 1997.

T. GERZ, T. DÜRBECK, P. KONOPKA: Transport and effective diffusion of aircraft emissions. *J. Geophys. Res.*, **103**, 25905-25913, 1998.

Horizontale Ausdehnung	b	50	m
Vertikale Ausdehnung	h	5	m
Horizontale Versetzung	s	200	m
Longitudinale Streuung	σ_L	1.00	m/s
Horizontale Streuung	σ_H	2.40	m/s
Vertikale Streuung	σ_V	0.28	m/s
Zeitskala	T_σ	300	s

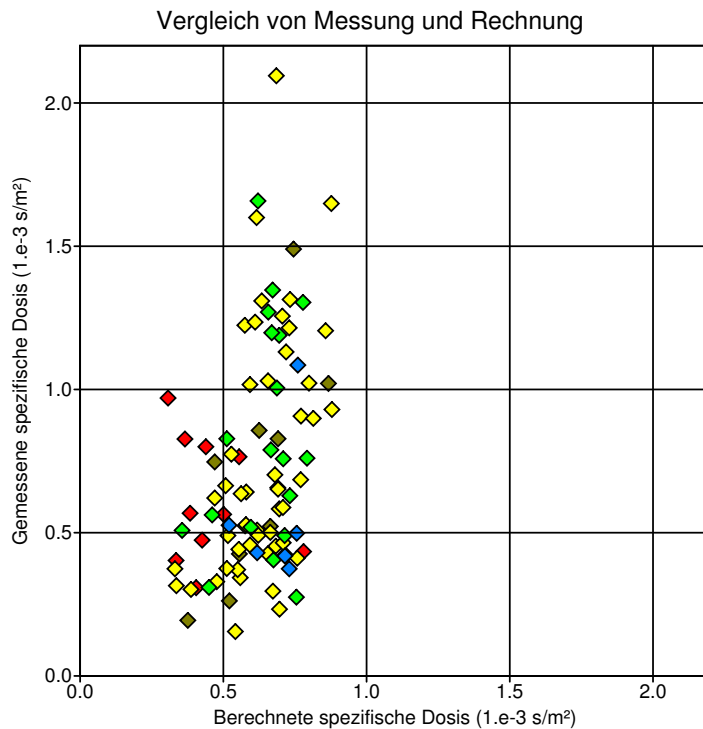


BILD 16: Vergleich zwischen gemessener und berechneter spezifischer Dosis D . Die Windrichtung ist durch die Füllfarbe gekennzeichnet: rot = 0 bis 14 Grad, oliv = 15 bis 29 Grad, gelb = 30 bis 44 Grad, grün = 45 bis 59 Grad, blau = 60 bis 75 Grad.

Der gemessene Mittelwert von DQ ist $\langle DQ \rangle_M = 0.108 \text{ g/m}^2$, der von LASAT berechnete ist $\langle DQ \rangle_R = 0.106 \text{ g/m}^2$. In Bild 16 sind berechnete und gemessene Werte von D miteinander verglichen. Das Bild zeigt klar, daß in dieser normierten Größe die Variabilität der Einzelmessungen nicht vom Modell wiedergegeben wird. Anders sieht es aus, wenn man die Dosis nicht auf die Quellstärke bezieht. Da die Variation der Quellstärke um einen Faktor 20 vom Modell korrekt wiedergegeben wird, erhält man für die skalierte Dosis $d_{\text{NO}_x u}$ eine wesentliche bessere Korrelation (Bild 17).

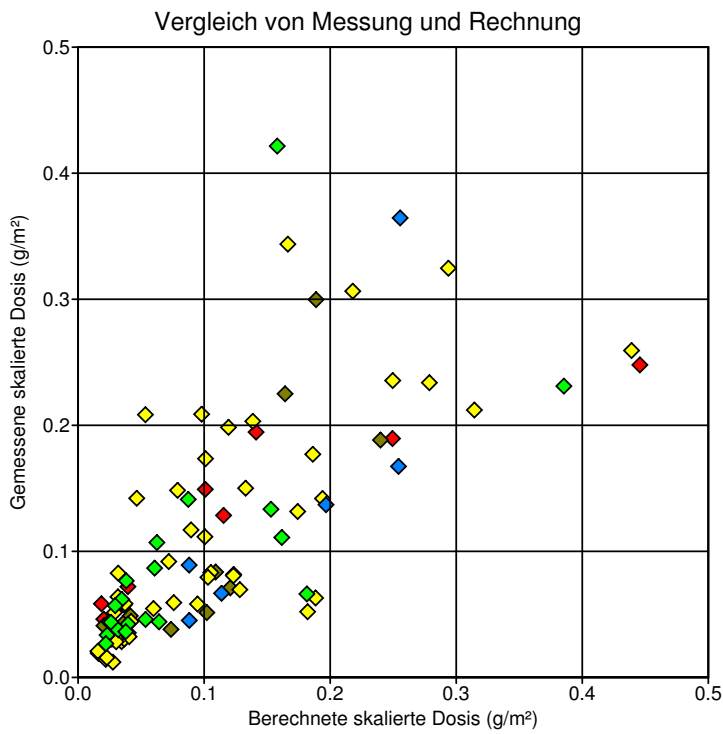
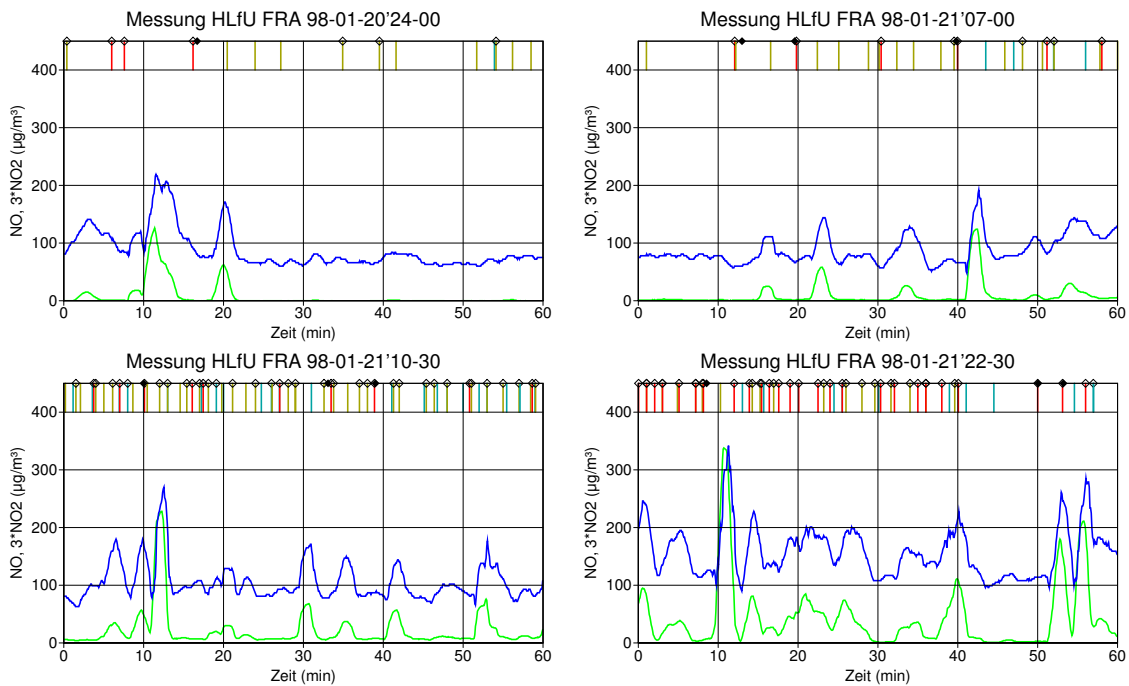
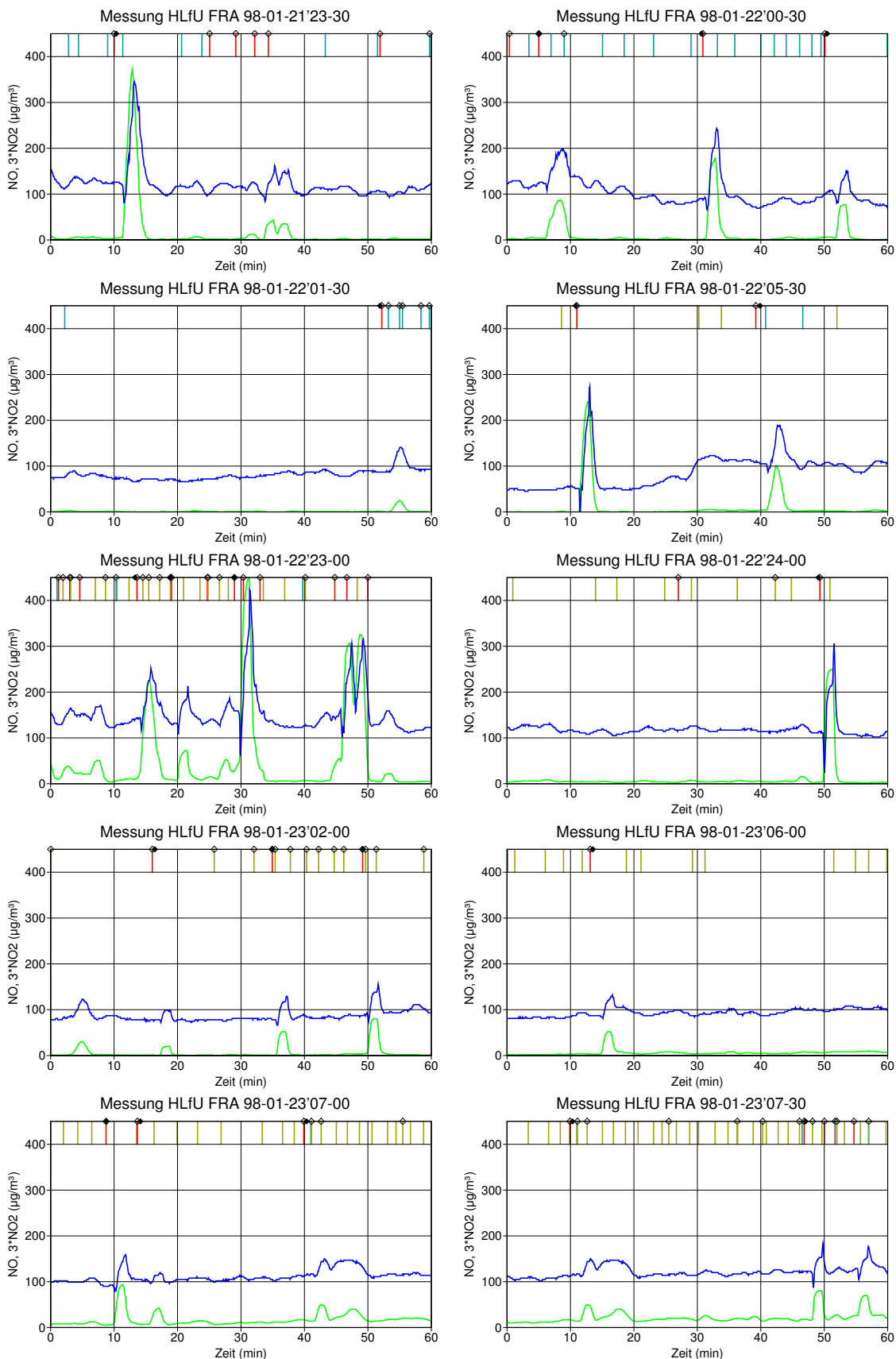
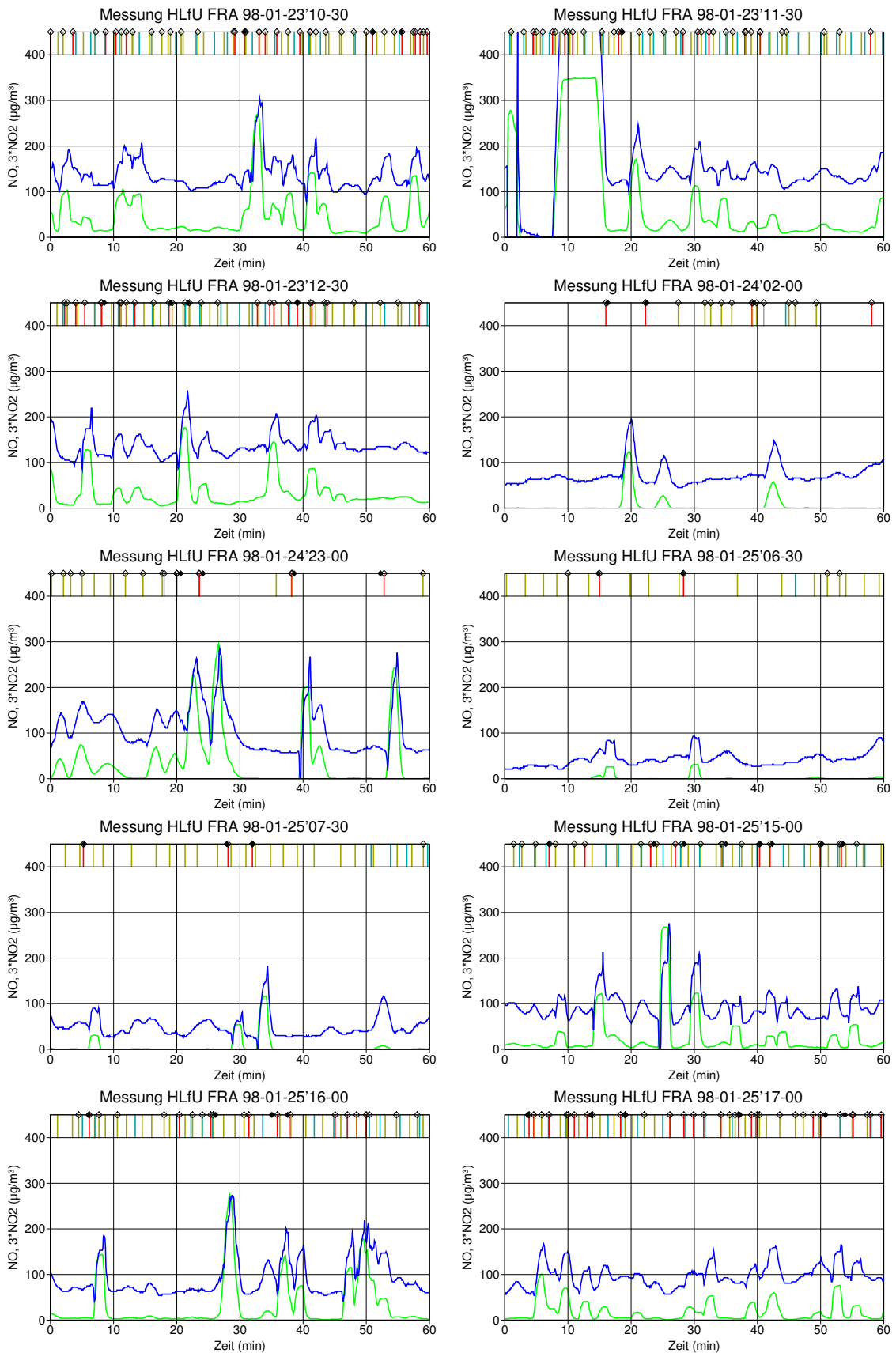


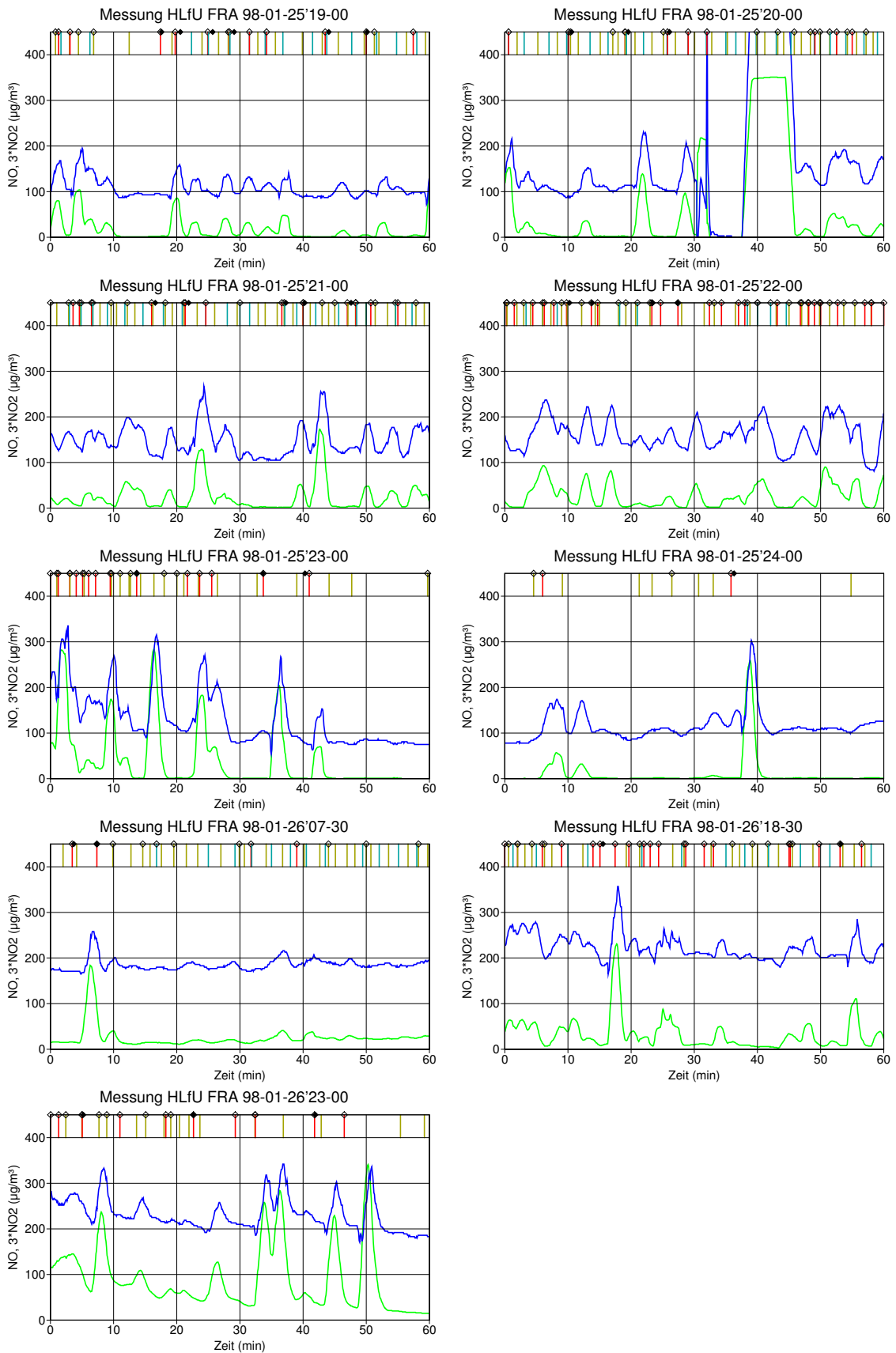
BILD 17: Vergleich zwischen gemessener und berechneter skaliertes Dosis $d_{NO_x u}$. Die Windrichtung ist durch die Füllfarbe gekennzeichnet: rot = 0 bis 14 Grad, oliv = 15 bis 29 Grad, gelb = 30 bis 44 Grad, grün = 45 bis 59 Grad, blau = 60 bis 75 Grad.

A.4 Diagramme der Meßergebnisse









B Einfluß der Emissionshöhe

Wenn es um die Immission im Nahbereich des Flughafens geht, braucht man die startenden und landenden Flugzeuge nicht bis zu beliebigen Flughöhen zu verfolgen, denn je größer die Emissionshöhe ist, desto geringer ist der Einfluß auf den Nahbereich des Flughafens. Es ist allerdings nicht ganz klar, wo man die Grenze hinlegen soll. Um diese Entscheidung zu erleichtern, wird im folgenden die NO_x-Ausbreitung beim Start eines Flugzeuges mittlerer Größe nachgerechnet und untersucht, welche Beiträge die in verschiedenen Höhen emittierten Abgase zur Immission an einer Reihe von Aufpunkten liefern.

Der Startpunkt des Flugzeuges bildet den Nullpunkt des Koordinatensystems. Es startet in Richtung Westen, beschleunigt dabei innerhalb von 48 Sekunden auf 90 m/s und hebt dann mit einer Steiggeschwindigkeit von 12.5 m/s ab. Die Emission beträgt beim *TakeOff* 80 g/s und beim *ClimbOut* 50 g/s. Der Wind weht mit 5 m/s in 10 m Höhe aus Westen, die atmosphärische Schichtung ist indifferent (III/1) und die Bodenrauigkeit beträgt $z_0 = 0.03$ m.

Die Flugbahn wird im 4-Sekunden-Takt modelliert, wobei die Freisetzung so erfolgt, wie in Abschnitt A beschrieben. Die Konzentration wird in Schritten von 10 Sekunden ermittelt (Mittelungszeit). Es liegen 9 Aufpunkte im Lee (Osten) des Startpunktes gestaffelt mit einem gegenseitigen Abstand von jeweils 1000 m. Diese Anordnung wurde gewählt, damit sich die Abgasfahnen aus den verschiedenen Flughöhen überlagern und ein direkter Vergleich ihrer Beiträge zur Gesamtimmission möglich ist.

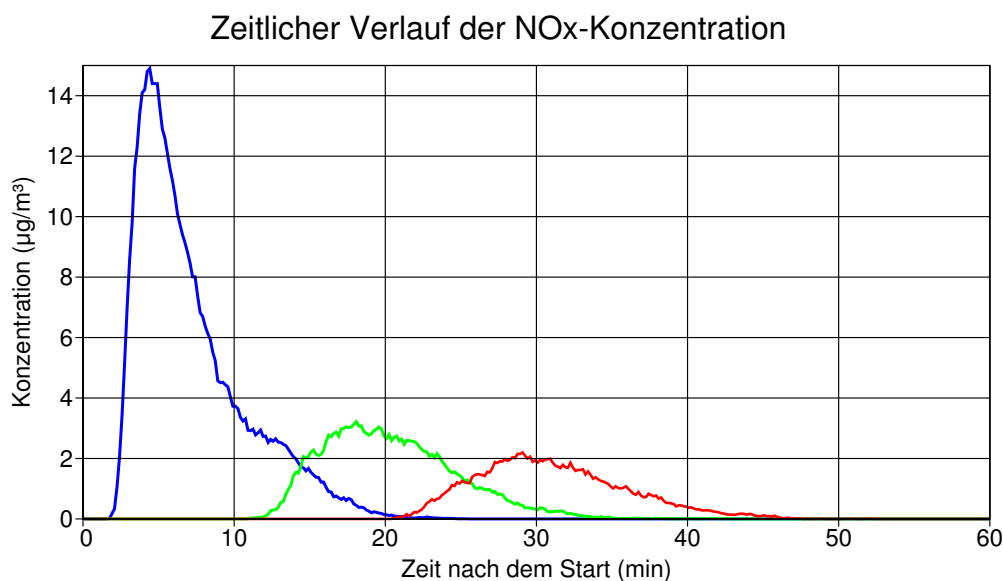


BILD 18: Konzentrationsverlauf an den Aufpunkten unterschiedlicher Entfernung vom Startpunkt: 1000 m (blau), 5000 m (grün) und 9000 m (rot).

Bild 18 zeigt, daß innerhalb einer Stunde alle Immissionsbeiträge erfaßt werden, auch an dem am weitesten entfernt liegenden Aufpunkt. Um die Beiträge aus unterschiedlichen Emissionshöhen zu analysieren, wird daher im folgenden der Stundenmittelwert der Konzentration betrachtet. Zunächst wird untersucht, welchen Beitrag der *TakeOff* und welchen der *ClimbOut* liefert, wobei das Flugzeug bis zu einer Flughöhe von 750 m (ca. 2500 ft) verfolgt wird.

Stundenmittel der Konzentration von NOx

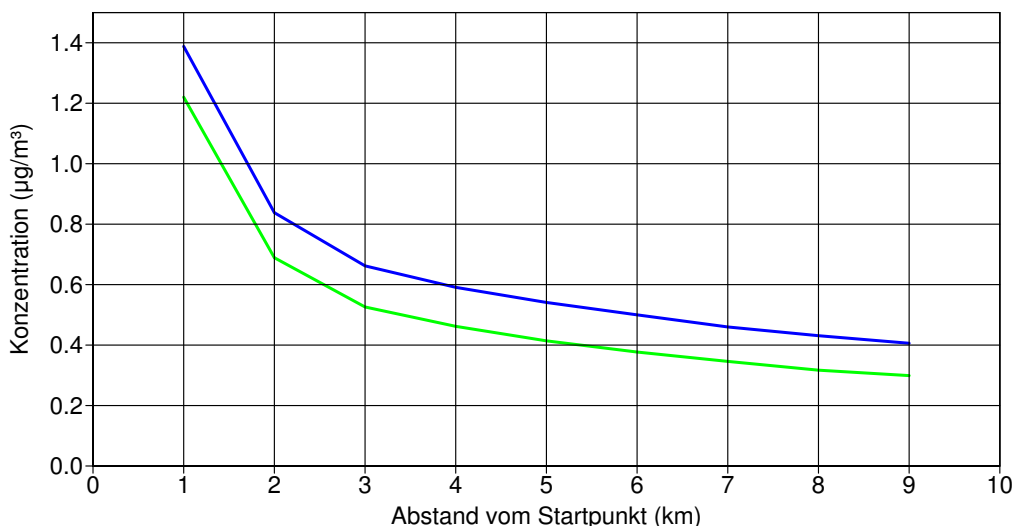


BILD 19: Gesamtmission (blau) an den 9 Aufpunkten und Anteil des *TakeOff* (grün).

Anteil an der NOx-Immission

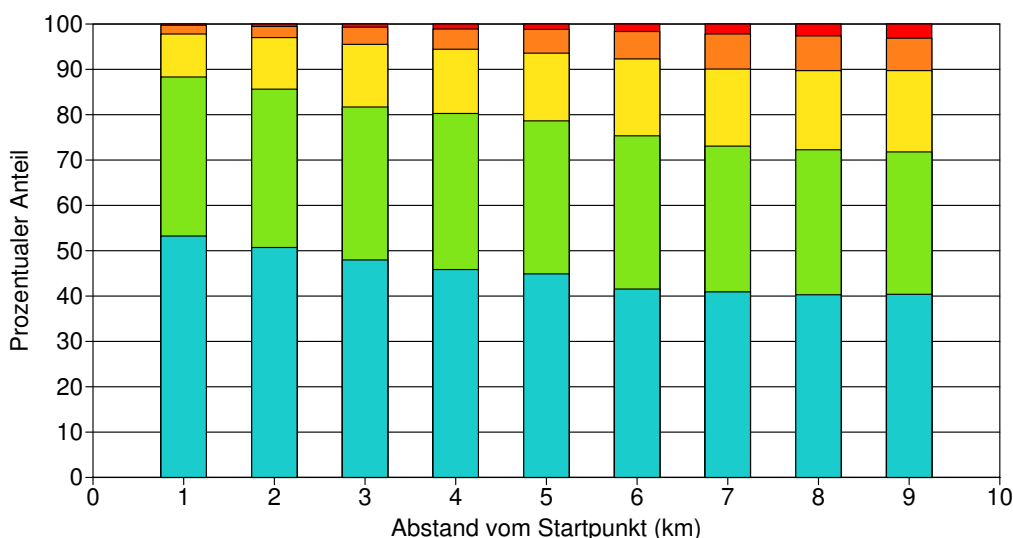


BILD 20: Prozentualer Anteil der in verschiedenen Höhen freigesetzten Emissionen am Gesamtbeitrag des *ClimbOut* zur Konzentration an den 9 Aufpunkten. Die Farben kennzeichnen die unterschiedlichen Emissionshöhen (blau: 0 bis 150 m, grün: 150 bis 300 m, gelb: 300 bis 450 m, orange: 450 bis 600 m, rot: 600 bis 750 m).

Bild 19 zeigt die Gesamtmission über die Kette der 9 Aufpunkte hinweg und den Anteil, der auf die Emission beim *TakeOff* zurückzuführen ist. Es ist zu erkennen,



daß der Einfluß der *ClimbOut*-Emission mit zunehmender Entfernung wächst, sein Anteil aber auch in 9 km Entfernung nur etwa 25 % beträgt.

In Bild 20 ist dargestellt, welchen Anteil die Emissionen in unterschiedlichen Höhen am Gesamtbeitrag des *ClimbOut* besitzen. Eine Extrapolation auf Flughöhen größer als 750 m läßt darauf schließen, daß auch von dort noch merkbare Beiträge kommen. Allerdings ist das Flugzeug dann schon mehr als 16 km vom östlichsten Aufpunkt entfernt und hat damit den Nahbereich des Flughafens verlassen. Es ist daher auch eine Sache der Konvention, welcher Raumbereich betrachtet wird. In diesem Sinne wurden hier nur Emissionen bis 750 m Höhe berücksichtigt.

Es ist anzunehmen, daß Emissionen oberhalb von 750 m Flughöhe an den betrachteten Aufpunkten nur noch einen zusätzlichen Beitrag von weniger als 2 % liefern. Je weiter der Aufpunkt vom Startpunkt entfernt liegt, desto größer ist der Einfluß der Emission in großer Höhe. Im ungünstigsten Fall (Aufpunkt 9) vernachlässigt man etwa 30 Prozent der Beiträge, wenn man den *ClimbOut* nur bis 1000 ft Höhe rechnet. Berücksichtigt man Emissionen bis 1500 ft Höhe, dann sinkt der Fehler auf etwa 12 %. Da der *ClimbOut* an der Gesamtmission nur einen Anteil von höchstens 25 % hat, betragen die absoluten Fehler etwa 8 % bei 1000 ft bzw. 3 % bei 1500 ft. Betrachtet man nicht eine einzelne, indifferente Wettersituation sondern eine Statistik über alle Ausbreitungsklassen, ergeben sich natürlich Verschiebungen aber vermutlich keine grundsätzlichen Änderungen.

Bei der Immissionsberechnung für das Jahr 1998 werden Emissionen bis maximal 1500 ft Höhe berücksichtigt, sofern sich das Flugzeug dabei innerhalb des Rechengebietes befindet.



C Tabellarische Darstellung der Ergebnisse

Die Tabellen mit den numerischen Werten der Jahresmittelwerte und der 98-Perzentile für jede Rechenzelle sind sehr umfangreich und daher in einer separaten Anlage zusammengefaßt.

Die Anordnung der Tabellen entspricht der Folge der Bilder in Abschnitt 3:

1. Zuerst kommen die Ergebnisse für das kleine Netz mit der Auflösung von 50 m dann das mittlere Netz mit 100 m Auflösung und schließlich das große Netz mit 200 m Auflösung.
2. Innerhalb eines Blockes für eine Auflösung kommen zuerst die Ergebnisse für CO, dann für HC und zum Schluß für NO₂.
3. Für jede Komponente ist zuerst der Jahresmittelwert und dann das 98-Perzentil aufgelistet.

Die Zahlenwerte sind Konzentrationen in $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Da eine Tabelle für ein Rechenetz nicht auf einer A4-Seite darstellbar ist, sind die Tabellen in Teilstücke zerlegt mit einer jeweils angepaßten Achsenbeschriftung.