



Bundesministerium
für Umwelt, Naturschutz
und Reaktorsicherheit

SCHRIFTENREIHE

REAKTORSICHERHEIT UND STRAHLENSCHUTZ

BMU - 2008 - 713

Untersuchungen der orografischen Besonderheiten der Probenahmestellen Schauinsland und Freiburg und deren Auswirkungen auf die Genauigkeit von adjungierten atmosphärischen Ausbreitungsrechnungen

Universität Bodenkultur Wien

IMPRESSUM

Dieser Band enthält einen Abschlussbericht über ein vom Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU) gefördertes Vorhaben. Verantwortlich für den Inhalt sind allein die Autoren. Das BMU übernimmt keine Gewähr für die Richtigkeit, die Genauigkeit und Vollständigkeit der Angaben sowie die Beachtung privater Rechte Dritter. Der Eigentümer behält sich alle Rechte an der weiteren Nutzung oder Vervielfältigung des Berichts vor.

Der Bericht gibt die Auffassung und Meinung des Auftragnehmers wieder und muss nicht mit der des BMU übereinstimmen.

Herausgeber:

Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit

Referat RS I 2

Postfach 12 06 29

53048 Bonn

ISSN 1612-6386

Erscheinungsjahr: 2008

**Untersuchung der orographischen Besonderheiten der
Probennahmestellen Schauinsland und Freiburg und
deren Auswirkungen auf die Genauigkeit von
adjungierten atmosphärischen
Ausbreitungsrechnungen („Einzugsgebiete“)**

Endbericht zum Forschungsvorhaben StSch 4478
des Bundesamts für Strahlenschutz, Salzgitter (Deutschland)

Petra Seibert
Paul Skomorowski

Wien, Mai 2007

Institut für Meteorologie
Department Wasser – Atmosphäre – Umwelt
Universität für Bodenkultur Wien
Peter-Jordan-Str. 82, A-1190 Wien, Österreich
<http://www.boku.ac.at/met.html>

Inhaltsverzeichnis

Verzeichnis der Tabellen	6
Verzeichnis der Abbildungen	10
Executive Summary	11
1 Einleitung	15
1.1 Aufgabenstellung	15
1.2 Planung und Ablauf	15
1.3 Zusammenarbeit mit anderen Stellen	17
2 Stand der Wissenschaft	18
2.1 Meteorologische Modelle	18
2.2 Ausbreitungsmodelle	21
2.3 Inputdaten für Rand- und Anfangswerte	27
2.4 Modellauswahl	27
2.5 Literaturrecherche zu bisherigen Untersuchungen im Raum Oberrhein- graben–Südschwarzwald	30
3 Stationsbesichtigung	37
3.1 LfU-Messstelle Freiburg-Mitte	38
3.2 Wetterstation Freiburg des DWD	38
3.3 LfU-Messstelle Freiburg-Straße	39
3.4 Observatorium Schauinsland des UBA	40
3.5 Observatorium Schauinsland des BfS	42
4 Beobachtungsdaten	43
4.1 LfU-Daten	44
4.2 UBA-Daten	44
4.3 Xenon-133 Daten	45
4.4 Radon-Daten	45
4.5 Meteorologische Daten der DWD-SYNOP-Stationen	45
5 Auswahl und Charakterisierung der Episoden	47
5.1 Auswahl der Episoden	47
5.2 Beschreibung der Episoden	50
6 Beschaffung von Modelldaten	81
6.1 Meteorologische Felder vom ECMWF	81
6.2 Geländehöhen- und Landnutzungsdaten	81
6.3 Quell-Rezeptor-Matrizen vom IDC/CTBTO	83
6.4 HYSPLIT-Trajektorien- und Konzentrationsdaten	84
6.5 Emissionsdaten von CO und NO _x	84

7	Modell-Setup und Ressourcenabschätzung	87
7.1	Modellgebiet mit Nestern	87
7.2	Modelloptionen	90
7.3	Rechenzeitbedarf	91
7.4	Schlussfolgerung	92
7.5	Beispiel für eine MM5-Simulation	92
7.6	Veränderungen des Setups der MM5-Läufe	93
8	Durchgeführte Rechnungen	101
8.1	MM5-Rechnungen	101
8.2	FLEXPART-ECMWF-Rechnungen	101
8.3	FLEXPART-MM5-Rechnungen	102
8.4	HYSPLIT-Rechnungen	103
9	Berechnungsergebnisse und Auswertung: Meteorologie	104
9.1	Methodik	104
9.2	Ergebnisse	107
9.3	Schlussfolgerungen	112
10	Berechnungsergebnisse und Auswertung: Transportmodellierung	133
10.1	Methodik	133
10.2	FLEXPART-Ergebnisse an ausgewählten Tagen jeder Episode	134
10.3	HYSPLIT	138
10.4	Auswertung für Fleurus	153
10.5	Schlussfolgerungen	164
11	Simulation von Spurenstoff-Konzentrationen	165
11.1	Prinzip	165
11.2	Betrachtete Spurenstoffe	167
11.3	Probleme und Limitationen	168
11.4	Ergebnisse	169
11.5	Schlussfolgerungen	172
12	Ausblick	190
	Literatur	192

Tabellenverzeichnis

2.1	Zum Betrieb des MM5-Modells notwendige Inputdaten	26
4.1	Übersicht der Daten der LfU-Station Freiburg-Mitte	46
4.2	Übersicht der UBA-Schauinslanddaten	46
4.3	Übersicht der Daten von Radionuklidkonzentrationen	46
4.4	Übersicht der meteorologischen Parameter der DWD-Stationen Freiburg und Feldberg	46
5.1	Vom Auftraggeber übermittelte Liste von aus radiologischer Sicht interessanten Episoden.	47
5.2	Ausgewählte Episoden.	49
6.1	ECMWF-Eingangsfelder	86
7.1	Übersicht zum Modell-Setup	87
7.2	Ressourcenbedarf von MM5 bei verschiedener Nestungsstufenzahl	91
7.3	Ressourcenbedarf der MM5-Version von FLEXPART	91
8.1	Überblick über die FLEXPART-Rechnungen mit ECMWF-Eingabefeldern.	102
8.2	Überblick über die FLEXPART-Rechnungen mit MM5-Eingabefeldern.	103
9.1	Liste der Metriken und ihre Definition sowie der Abkürzungen meteorologischer Parameter	106
9.2	Metriken für die Simulationsgüte meteorologischer Parameter in Freiburg und am Schauinsland, Episode 1.	129
9.3	Metriken für die Simulationsgüte meteorologischer Parameter in Freiburg und am Schauinsland, Episode 2.	129
9.4	Metriken für die Simulationsgüte meteorologischer Parameter in Freiburg und am Schauinsland, Episode 3.	129
9.5	Metriken für die Simulationsgüte meteorologischer Parameter in Freiburg und am Schauinsland, Episode 4.	130
9.6	Metriken für die Simulationsgüte meteorologischer Parameter in Freiburg und am Schauinsland, Episode 5.	130
9.7	Metriken für die Simulationsgüte meteorologischer Parameter in Freiburg und am Schauinsland, Episode 6.	130
9.8	Metriken für die Simulationsgüte meteorologischer Parameter in Freiburg und am Schauinsland, Episode 7.	131
9.9	Metriken für die Simulationsgüte meteorologischer Parameter in Freiburg und am Schauinsland, Episode 8.	131
9.10	Metriken für die Simulationsgüte meteorologischer Parameter in Freiburg und am Schauinsland, Episode 9.	131
9.11	Metriken für die Simulationsgüte meteorologischer Parameter in Freiburg und am Schauinsland, Episode 11.	132
10.1	Gütezahlen für die Ähnlichkeit der Quell-Rezeptor-Beziehungen Schauinsland (Freiburg) – Fleurus zwischen den verschiedenen Modellen.	155

10.2 Gütezahlen für die Ähnlichkeit der Quell-Rezeptor-Beziehungen Schauinsland (Freiburg) – Fleurus zwischen den verschiedenen Modellen, logarithmiert.	156
11.1 Metriken für die Übereinstimmung von modellierten und beobachteten Konzentrationen am Schauinsland, Episode 1.	184
11.2 Metriken für die Übereinstimmung von modellierten und beobachteten Konzentrationen am Schauinsland, Episode 2.	184
11.3 Metriken für die Übereinstimmung von modellierten und beobachteten Konzentrationen am Schauinsland, Episode 3.	185
11.4 Metriken für die Übereinstimmung von modellierten und beobachteten Konzentrationen am Schauinsland, Episode 4.	185
11.5 Metriken für die Übereinstimmung von modellierten und beobachteten Konzentrationen am Schauinsland, Episode 5.	186
11.6 Metriken für die Übereinstimmung von modellierten und beobachteten Konzentrationen am Schauinsland, Episode 6.	186
11.7 Metriken für die Übereinstimmung von modellierten und beobachteten Konzentrationen am Schauinsland, Episode 7.	187
11.8 Metriken für die Übereinstimmung von modellierten und beobachteten Konzentrationen am Schauinsland, Episode 8.	187
11.9 Metriken für die Übereinstimmung von modellierten und beobachteten Konzentrationen am Schauinsland, Episode 9.	188
11.10 Metriken für die Übereinstimmung von modellierten und beobachteten Konzentrationen am Schauinsland, Episode 11.	188
11.11 Überblick der wichtigsten Metriken für die Übereinstimmung von modellierten und beobachteten Konzentrationen am Schauinsland, alle Episoden.	189

Abbildungsverzeichnis

2.1	Windrose der LfU-Station Freiburg-Mitte.	31
2.2	Häufigkeit der in Freiburg (DWD-Station) beobachteten Windrichtungen in Abhängigkeit von Richtung und Betrag des geostrophischen Winds.	32
2.3	Windrosen am Schauinsland und Feldberg im Sommer.	33
2.4	Mittlerer Tagesgang von O ₃ , NO _y und CO im Sommer für die beiden Hauptwindsektoren am Schauinsland.	34
2.5	Windbeobachtungen in Ebnet, am Schauinsland und am Rappeneck am 5. Juni 1996	35
2.6	Mit KAMM modellierte Windverteilung am Boden um 10 MEZ und 13 MEZ im Bereich Freiburg – Zartener Becken – Schauinsland.	36
3.1	Topographie der Region Freiburg–Feldberg.	37
3.2	Landkarte von Freiburg mit den relevanten Stationen.	38
3.3	Die Station Freiburg-Mitte des LfU.	39
3.4	Die Station Freiburg des DWD.	39
3.5	Landkarte des Schauinsland mit der Station des Umweltbundesamts (UBA) und des BfS.	40
3.6	Die Station Schauinsland des Umweltbundesamts.	41
3.7	Blick vom Schauinsland ins Kappeler Tal und zum Feldberg.	41
3.8	Die Station Schauinsland des Bundesamts für Strahlenschutz.	42
5.1	Häufigkeiten der Windrichtung während der Episode 1.	50
5.2	Wetterkarten für die Episode 1	51
5.3	Zeitreihen der meteorologischen Parameter und Spurenstoffe, Episode 1.	52
5.4	Häufigkeiten der Windrichtung während der Episode 2.	53
5.5	Wetterkarten für die Episode 2.	54
5.6	Zeitreihen der meteorologischen Parameter und Spurenstoffe, Episode 2.	55
5.7	Häufigkeiten der Windrichtung während der Episode 3.	56
5.8	Wetterkarten für die Episode 3.	57
5.9	Wetterkarten für die Episode 3 (Forts.)	58
5.10	Zeitreihen der meteorologischen Parameter und Spurenstoffe, Episode 3.	58
5.11	Häufigkeiten der Windrichtung während der Episode 4.	59
5.12	Wetterkarten für die Episode 4.	60
5.13	Zeitreihen der meteorologischen Parameter und Spurenstoffe, Episode 4.	61
5.14	Häufigkeiten der Windrichtung während der Episode 5.	62
5.15	Wetterkarten für die Episode 5.	63
5.16	Wetterkarten für die Episode 5 (Forts.).	64
5.17	Zeitreihen der meteorologischen Parameter und Spurenstoffe, Episode 5.	64
5.18	Häufigkeiten der Windrichtung während der Episode 6.	65
5.19	Wetterkarten für die Episode 6.	66
5.20	Zeitreihen der meteorologischen Parameter und Spurenstoffe, Episode 6.	67
5.21	Häufigkeiten der Windrichtung während der Episode 7.	68
5.22	Wetterkarten für die Episode 7.	69
5.23	Zeitreihen der meteorologischen Parameter und Spurenstoffe, Episode 7.	70
5.24	Häufigkeiten der Windrichtung während der Episode 8 und 10.	71

5.25 Wetterkarten für die Episode 8 und 10.	72
5.26 Wetterkarten für die Episode 8 und 10 (Forts.)	73
5.27 Zeitreihen der meteorologischen Parameter und Spurenstoffe, Episode 8 und 10.	73
5.28 Wetterkarten für die Episode 9.	75
5.29 Wetterkarten für die Episode 9 (Forts.)	76
5.30 Häufigkeiten der Windrichtung während der Episode 9.	77
5.31 Zeitreihen der meteorologischen Parameter und Spurenstoffe, Episode 9.	77
5.32 Wetterkarten für die Episode 11.	79
5.33 Häufigkeiten der Windrichtung während der Episode 11.	80
5.34 Zeitreihen der meteorologischen Parameter und Spurenstoffe, Episode 11.	80
6.1 Geopotential der Topographie (Beispiel für ECMWF-Inputdaten)	82
6.2 Landnutzungskategorien (USGS-Datensatz)	83
6.3 LCE 2.5 Landnutzungsdaten	84
6.4 CO und NOx Emissionsdaten	85
7.1 Modellgebiet D1 mit vier eingebetteten Nestern D2 – D5.	88
7.2 Modellgebiet D1	88
7.3 Modellgebiet D2	89
7.4 Modellgebiet D3	89
7.5 Modellgebiet D4	89
7.6 Modellgebiet D5	90
7.7 Windvektoren und Topographie im Gebiet 5 für den 5.11.2004 16 und 20 Uhr UTC.	94
7.8 Windvektoren und Topographie im Gebiet 3 für den 5.11.2004, 16 und 20 Uhr UTC.	95
7.9 Partikelpositionen 6 h und 12 h vor dem Ende des Laufs.	96
7.10 Partikelpositionen 18 h und 24 h vor dem Ende des Laufs.	97
7.11 Partikelpositionen 36 h und 48 h vor dem Ende des Laufs.	98
9.1 Modelltopographie im innersten Rechengebiet, Lage der Beobachtungssta- tionen (schwarz) und gewählte Referenzgitterpunkte (rot).	105
9.2 Vergleich von Beobachtungen, ECMWF-Analysen und MM5-Simulationen für Temperatur und Wind in Freiburg und am Schauinsland, Episode 1.	114
9.3 Vergleich von Beobachtungen, ECMWF-Analysen und MM5-Simulationen für Temperatur und Wind in Freiburg und am Schauinsland, Episode 2.	115
9.4 Vergleich von Beobachtungen, ECMWF-Analysen und MM5-Simulationen für Temperatur und Wind in Freiburg und am Schauinsland, Episode 3.	116
9.5 Vergleich von Beobachtungen, ECMWF-Analysen und MM5-Simulationen für Temperatur und Wind in Freiburg und am Schauinsland, Episode 4.	117
9.6 Vergleich von Beobachtungen, ECMWF-Analysen und MM5-Simulationen für Temperatur und Wind in Freiburg und am Schauinsland, Episode 5.	118
9.7 Vergleich von Beobachtungen, ECMWF-Analysen und MM5-Simulationen für Temperatur und Wind in Freiburg und am Schauinsland, Episode 6.	119
9.8 Vergleich von Beobachtungen, ECMWF-Analysen und MM5-Simulationen für Temperatur und Wind in Freiburg und am Schauinsland, Episode 7.	120
9.9 Vergleich von Beobachtungen, ECMWF-Analysen und MM5-Simulationen für Temperatur und Wind in Freiburg und am Schauinsland, Episode 8.	121
9.10 Vergleich von Beobachtungen, ECMWF-Analysen und MM5-Simulationen für Temperatur und Wind in Freiburg und am Schauinsland, Episode 9.	122

9.11 Vergleich von Beobachtungen, ECMWF-Analysen und MM5-Simulationen für Temperatur und Wind in Freiburg und am Schauinsland, Episode 11.	123
9.12 Vergleich von Beobachtungen, ECMWF-Analysen und MM5-Simulationen für Temperatur und Wind am Feldberg, Episoden 1 und 2.	124
9.13 Vergleich von Beobachtungen, ECMWF-Analysen und MM5-Simulationen für Temperatur und Wind am Feldberg, Episoden 3 und 4.	125
9.14 Vergleich von Beobachtungen, ECMWF-Analysen und MM5-Simulationen für Temperatur und Wind am Feldberg, Episoden 5 und 6.	126
9.15 Vergleich von Beobachtungen, ECMWF-Analysen und MM5-Simulationen für Temperatur und Wind am Feldberg, Episoden 7 und 8.	127
9.16 Vergleich von Beobachtungen, ECMWF-Analysen und MM5-Simulationen für Temperatur und Wind am Feldberg, Episoden 9 und 11.	128
10.1 Integrierte Quell-Rezeptor-Felder, 24 h Messperiode endend am 20040702 06 (Episode 1).	140
10.2 Integrierte Quell-Rezeptor-Felder, 24 h Messperiode endend am 20041225 06 (Episode 2).	141
10.3 Integrierte Quell-Rezeptor-Felder, 24 h Messperiode endend am 20041106 06 (Episode 3, 1. Tag).	142
10.4 Integrierte Quell-Rezeptor-Felder, 24 h Messperiode endend am 20041111 06 (Episode 3, 2. Tag).	143
10.5 Integrierte Quell-Rezeptor-Felder, 24 h Messperiode endend am 20050203 06 (Episode 4).	144
10.6 Integrierte Quell-Rezeptor-Felder, 24 h Messperiode endend am 20050623 06 (Episode 5).	145
10.7 Integrierte Quell-Rezeptor-Felder, 24 h Messperiode endend am 20050811 06 (Episode 6).	146
10.8 Integrierte Quell-Rezeptor-Felder, 24 h Messperiode endend am 20040917 06 (Episode 7).	147
10.9 Integrierte Quell-Rezeptor-Felder, 24 h Messperiode endend am 20040203 06 (Episode 8).	148
10.10 Integrierte Quell-Rezeptor-Felder, 24 h Messperiode endend am 20041214 06 (Episode 9).	149
10.11 Integrierte Quell-Rezeptor-Felder, 24 h Messperiode endend am 20040207 06 (Episode 10).	150
10.12 Integrierte Quell-Rezeptor-Felder, 24 h Messperiode endend am 20051003 06 (Episode 11).	151
10.13 Integrierte Quell-Rezeptor-Felder und Trajektorien – HYSPLIT.	152
10.14 Vergleich von Quell-Rezeptor-Beziehungen zwischen Fleurus und dem Schauinsland bzw. Freiburg, Episode 1.	157
10.15 Vergleich von Quell-Rezeptor-Beziehungen zwischen Fleurus und dem Schauinsland bzw. Freiburg, Episode 2.	157
10.16 Vergleich von Quell-Rezeptor-Beziehungen zwischen Fleurus und dem Schauinsland bzw. Freiburg, Episode 3.	158
10.17 Vergleich von Quell-Rezeptor-Beziehungen zwischen Fleurus und dem Schauinsland bzw. Freiburg, Episode 4.	159
10.18 Vergleich von Quell-Rezeptor-Beziehungen zwischen Fleurus und dem Schauinsland bzw. Freiburg, Episode 5.	159
10.19 Vergleich von Quell-Rezeptor-Beziehungen zwischen Fleurus und dem Schauinsland bzw. Freiburg, Episode 6.	160

10.20	Vergleich von Quell-Rezeptor-Beziehungen zwischen Fleurus und dem Schauinsland bzw. Freiburg, Episode 7.	160
10.21	Vergleich von Quell-Rezeptor-Beziehungen zwischen Fleurus und dem Schauinsland bzw. Freiburg, Episode 8.	161
10.22	Vergleich von Quell-Rezeptor-Beziehungen zwischen Fleurus und dem Schauinsland bzw. Freiburg, Episode 9.	162
10.23	Vergleich von Quell-Rezeptor-Beziehungen zwischen Fleurus und dem Schauinsland bzw. Freiburg, Episode 10.	163
10.24	Vergleich von Quell-Rezeptor-Beziehungen zwischen Fleurus und dem Schauinsland bzw. Freiburg, Episode 11.	163
11.1	Vergleich von modellierten und beobachteten Konzentrationen am Schauinsland, Episode 1.	173
11.2	Vergleich von modellierten und beobachteten Konzentrationen am Schauinsland, Episode 2.	174
11.3	Vergleich von modellierten und beobachteten Konzentrationen am Schauinsland, Episode 3.	175
11.4	Vergleich von modellierten und beobachteten Konzentrationen am Schauinsland, Episode 4.	176
11.5	Vergleich von modellierten und beobachteten Konzentrationen am Schauinsland, Episode 5.	177
11.6	Vergleich von modellierten und beobachteten Konzentrationen am Schauinsland, Episode 6.	178
11.7	Vergleich von modellierten und beobachteten Konzentrationen am Schauinsland, Episode 7.	179
11.8	Vergleich von modellierten und beobachteten Konzentrationen am Schauinsland, Episode 8.	180
11.9	Vergleich von modellierten und beobachteten Konzentrationen am Schauinsland, Episode 9.	181
11.10	Vergleich von modellierten und beobachteten Konzentrationen am Schauinsland, Episode 10.	182
11.11	Vergleich von modellierten und beobachteten Konzentrationen am Schauinsland, Episode 11.	183

Executive Summary

Schauinsland is a mountain in the Southern Black Forest (Germany) where radiation monitoring stations are operated by the German Federal Radiation Protection Agency (BfS) and the Provisional Technical Secretariate of the Comprehensive Nuclear-Test-Ban Treaty Organisation (CTBTO/PTS). The Federal Environmental Agency (UBA) operates a regional Global Atmospheric Watch station nearby carrying out air pollution monitoring. The stations are located at 1200 m asl, about 250 m lower than the highest peak of the Black Forest and 1000 m above the city of Freiburg in the Rhine Valley, where a further radiation monitoring station is operated at the local BfS office.

Existing monitoring results show that both sites can have different concentrations of radionuclides and thus be influenced by different air masses. Receptor-oriented atmospheric transport models (from simple trajectories to full transport and diffusion models) are being used to assess the origin of air masses sampled at the stations. Normally, these models are driven by fields of wind, temperature, etc. from global meteorological models such as ECMWF (European Centre for Medium-Range Weather Forecasting) or NCEP/NOAA (National Center for Environmental Prediction of the North American Atmospheric and Oceanic Administration), typically at a resolution of 1° (approx. 100 km). It is obvious that differences between the two sites can probably not be assessed well on such a basis.

Thus, the guiding questions for this research project were:

1. Can the origin of air masses at the two stations be simulated better based on a high-resolution, nested meteorological model than based on a global model?
2. For which weather patterns are differences significant? Could such patterns be diagnosed from available data?
3. Is it possible to obtain an improved consideration of orographic effects with simplified methods such as using an elevated receptor position for the mountain station?

These questions have been answered by simulating several episodes with the Lagrangian particle dispersion model FLEXPART, based on ECMWF fields on one hand and calculations with the nonhydrostatic community model MM5 on the other hand. In the MM5 simulations, five nested domains were used. The region Freiburg–Schauinsland was resolved in the innermost nest with a grid distance of 0.67 km, while the whole of the Black Forest and its surroundings was in domain 4 with 2 km resolution.

The ten selected episodes (an eleventh episode, sometimes referred to in the report, can be defined as a part of another one) each have a duration of five to ten days. They were selected to cover certain radiological events and in addition to include the various types of relevant meteorological situations. These include situations with pronounced flows from Southwest, Northwest and Northeast as well as anticyclonic situations with

little air movement in summer (unstable vertical stratification) and winter (strongly stable stratification).

Several comparisons have been carried out:

- Temperature, wind speed and direction at the stations Freiburg, Schauinsland and Feldberg: comparison of observed hourly values with ECMWF fields (1°), MM5 domain 1 fields (54 km) and MM5 domain 5 fields (0.67 km).
- Source-receptor (s-r) relationships between Schauinsland (Freiburg) and Fleurus, the site of the Belgian isotope factory: comparison of 24-hour s-r relationships (corresponding to the xenon measurement intervals) as calculated by FLEXPART with MM5 fields (using all the domains) or ECMWF fields (with different receptor heights to be able to answer question 3), FLEXPART calculations by the CTBTO/PTS, and a residence time evaluation of HYSPLIT trajectories.
- Influence functions (quantitative fields-of-regard in CTBTO notation) for Schauinsland (Freiburg): maps have been produced for usually one interesting day of each episode showing the areas which would influence 24 hour observations at the monitoring station and how strong the influence is in each grid point, as calculated by FLEXPART with MM5 fields (using all the domains) or ECMWF fields (again with different receptor heights), and a residence time evaluation of HYSPLIT trajectories.
- Concentrations of atmospheric trace substances (carbon monoxide, nitrous oxides, radon): 3-hour simulated concentrations have been calculated by multiplying the s-r fields with emission inventories of the respective trace substances (50 km resolution for CO and NO_x, land-sea mask with constant land emissions for radon) for MM5-based and ECMWF-based FLEXPART calculations and compared with respective observations.

The main findings can be summarised as follows:

1. The MM5 model does produce many small- and regional-scale features such as the channelled flow in the Rhine Valley, realistic orographic thermal circulations, and inversions under anticyclonic conditions in the cold season which can be relevant for transport and dispersion. Despite a cold bias for fair-weather daytime temperatures (whose reason could not be clarified) it creates mesoscale wind fields and vertical stability patterns which are clearly better than ECMWF analyses.
2. The MM5 model showed that in southwesterly flow conditions a low-level jet with high wind velocities passing through the gap between the Jura and Vosges mountains and impinging on the mountains of the southern Black Forest is being produced. Observations at Feldberg and Schauinsland confirm this model result, while the feature is missing from ECMWF fields. This was unexpected and, to our knowledge, not yet described in the literature.
3. On a scale of several hundreds of kilometres, the rough shape of the influence areas (fields-of-regard in CTBTO terminology) produced on ECMWF and MM5

base is relatively similar, though there may be significant differences due to orography in detail, which can be important or not, depending on the circumstances.

4. Dependence of the deviation on the weather situation:

- The least differences are found in fast northwesterly flows.
- Due to the mentioned jet, the source-receptor sensitivity for Schauinsland is strongly overestimated with ECMWF-based simulations of southwesterly flows.
- Under strong inversion conditions, ECMWF-based simulations deviate strongly from MM5-based simulations and can not be considered realistic.
- Variation of the receptor height only marginally improves ECMWF-based simulations. A receptor height between the true height above sea level of the station and the model topography performs best.
- There exists a transport pattern from Italy or the Balkans through the Rhone Valley which is often not clear enough in the large-scale-model based simulations.
- Weather situations that are likely to be not well represented by the large-scale model can be diagnosed from the wind at the mountain tops and/or trajectories, plus information on the vertical temperature gradient:
 - northwesterly flows are unproblematic,
 - southwesterly flows with moderate or strong observed winds may be associated with roughly the right influence region but too strong intensity, and
 - persistent strong vertical stability (temperature at the mountains similar to or warmer than in the valley) renders the large-scale model simulations unreliable.
 - In other situations, the deviations are moderate.

5. HYSPLIT trajectories can serve as a reasonable approximation in many cases, especially if the flow pattern is not too complicated and there is no inversion. However, they can only serve as a kind of first guess and should not be considered as highly reliable.

6. The comparison of modelled and observed trace gas concentrations was not as conclusive as expected. A more comprehensive methodology (fine-scale emission inventory, longer back calculations, etc.) may be necessary. The limited findings available corroborate the result that FLEXPART simulations based on MM5-fields do capture local- and regional-scale meteorological features that are relevant for the trace gas concentrations, such as the diurnal wind systems in the Black Forest and the role of inversions.

7. While the hardware requirements for a set-up as used in this study could be implemented easily and would allow at least the simulation of certain interesting days, the necessary expert knowledge for troubleshooting (MM5 is not easy to handle) and interpretation of the results probably exceeds the capabilities of agencies without specialised meteorological staff.

There are a number of possibilities for deepening and continuing this work, e.g.:

- Study reasons for cold bias in MM5 simulations and other deficiencies and try to improve them.
- Run FLEXPART-MM5 with a very high-resolution output grid (order of 1 km) to show impact of local circulations more clearly.
- Full quantitative comparison of source-receptor fields from the different simulations as a function of transport distance etc.
- Investigation of the meteorological features related to orography as resolved in the new 0.2°-resolution fields now available at ECMWF (compared to 0.5° or 1° data normally used).
- Application of the toolbox created to other mountain observatories, especially those in high mountains (the next level of difficulty). Mountains are often preferred sites for background atmospheric monitoring, but from the point of view of the modeller these are less-than-ideal sites!
- With respect to the CTBTO radioactivity monitoring network, more systematic evaluations of the representativity of global-scale meteorological fields for the local conditions of each stations could be made, and this issue could receive more attention in the siting of the stations not yet determined.

1 Einleitung

1.1 Aufgabenstellung

Das Bundesamt für Strahlenschutz betreibt Messstellen für Radioaktivität in der Luft auf dem Schauinsland im Schwarzwald, einer gipfelnahen Lage in 1200 m Seehöhe, und im nahe gelegenen Freiburg, an der Einmündung des Zartener Beckens in den Rheingraben auf 270 m. Der Schauinsland ist darüber hinaus eine wichtige Hintergrund-Messstelle des deutschen Umweltbundesamts. Bisherige Messergebnisse haben gezeigt, dass die beiden Stationen unterschiedliche Luftmassen beproben und daher auch deutlich unterschiedliche Konzentrationswerte aufweisen können, obwohl bei der Radioaktivität, anders als bei den üblichen Luftschadstoffen, Ferntransporte oder zumindest regionale Transporte für Episoden verantwortlich sind und lokale Quellen daher an beiden Standorten nicht relevant sind.

Für die Untersuchung der Herkunft der Luftbeimengungen werden rezeptororientierte Ausbreitungsmodelle auf der Basis von globalen meteorologischen Datensätzen wie jenen des NCEP oder des ECMWF verwendet. Es liegt auf der Hand, dass damit die unterschiedliche Herkunft der Luft an den beiden Messstellen nicht ohne weiteres erfasst werden kann. Daraus ergeben sich die wesentlichen Fragestellungen des gegenständlichen Forschungsprojekts:

- Kann mit einem hochaufgelösten meteorologischen Ausschnittsmodell die Herkunft der Luft an den beiden Stationen in einem topographisch stark gegliederten Gelände besser simuliert werden als mit dem globalen Modell?
- Bei welchen Wetterlagen sind die Unterschiede signifikant, bei welchen nicht? Können diese Lagen aus den vorhandenen Daten diagnostiziert werden?
- Kann durch vereinfachte Ansätze wie unterschiedliche Annahme der Höhe über Grund auch mit dem globalen Datensatz eine Verbesserung der Darstellung der Orographie-Effekte erreicht werden?

Die Antworten auf diese Fragen werden in zusammenfassender Form im Executive Summary gegeben.

1.2 Planung und Ablauf

Das Projekt wurde in fünf Arbeitspakete gegliedert, die nachfolgend beschrieben sind. Für den Ablauf wurde der untenstehende Zeitplan vorgesehen.

Nr.	Arbeitspaket	Zeitraum
1	Modellübersicht	Juli – Sept. 2005
2	Vorbereitung der Modellrechnungen	Sept. 2005 – Jänner 2006
3	Durchführung+Auswertung Modellrechnungen	Jänner – Mai 2006
4	Auswertung mit Messdaten	Mai – Juli 2006
5	Abschluss	August – Dezember 2006

AP 1: Modellübersicht

1. Kontakt mit Auftraggeber zur besseren gegenseitigen Abstimmung
2. Literaturrecherche (einschl. Recherche im WWW) zu mesoskaligen meteorologischen Modellen, geeigneten Inputdaten zu für rezeptororientierte Anwendung geeigneten Ausbreitungsmodellen und Zugänglichkeit derselben
3. Testrechnungen mit MM5/FLEXPART zur genaueren Festlegung der erforderlichen Ressourcen, einschließlich vorläufiges Setup
4. Zusammenfassung der Ergebnisse in Zwischenbericht, unter Berücksichtigung der von BOKU-Met bei anderen Anwendungen gewonnen Erfahrungen

AP 2: Vorbereitung der Modellrechnungen

1. Stationsbesuch zur Erkundung der lokalen Verhältnisse, Besprechung der verfügbaren lokalen Daten, Festlegung der aus radiologischer Sicht relevanten Episoden
2. Literaturrecherche zur regionalen Klimatologie des Oberrheingrabens und Südschwarzwaldes und ihrer Modellierung
3. Besorgen und grobe Auswertung der verfügbaren lokalen Daten (Meteorologie und Spurenstoffe)
4. Auswahl der aus meteorologischer Sicht zu untersuchenden Episoden
5. Besorgen von Inputdaten vom ECMWF, evt. auch von NCEP
6. Besorgen von Ergebnissen des IDC im Provisorischen Technischen Sekretariat der CTBTO-PrepCom.

AP 3: Durchführung und Auswertung der Modellrechnungen

1. Evt. Anpassung des ursprünglichen Setups
2. MM5 Rechnungen
3. Rechnungen mit FLEXPART auf MM5-Basis
4. Rechnungen mit FLEXPART auf ECMWF-Basis

5. Auswertung der Differenzen verschiedener Rechnungen

AP 4: Auswertung der Modellrechnungen in Verbindung mit Radionuklid- und Spurenstoffdaten

1. Untersuchung der Berechnungsgüte und der Unterschiede mithilfe von Spurenstoffmessungen wie im Einführungsabschnitt dargelegt
2. Besprechung der erzielten Ergebnisse mit Auftraggeber, Identifikation noch offener Fragen

AP 5: Abschlussarbeiten

1. Letzte Untersuchungen in bezug auf allfällig noch offene Fragen
2. Erstellung des Endberichts
3. Erstellung einer wissenschaftlichen Publikation
4. Vorstellung des Endberichts beim Auftraggeber

1.3 Zusammenarbeit mit anderen Stellen

1.3.1 CTBTO

Das Internationale Datenzentrum (IDC) der Vorbereitungskommission für die Comprehensive Nuclear Test-Ban Treaty Organisation (CTBTO/PrepCom) in Wien betreibt ein weltweites Messnetz für Radioaktivität in der Luft zur Überwachung des Umfassenden Teststopp-Vertrages. Auch am Schauinsland befindet sich eine dieser Stationen. Weiters wird dort laufend das Einzugsgebiet dieser Stationen mit FLEXPART und ECMWF-Daten berechnet. Aus diesem Grund wurden wiederholt Gespräche zum Informationsaustausch mit den Meteorologen dieser Einrichtung geführt. Durch die Einbindung von Auftraggeber und -nehmer in die jeweiligen nationalen CTBT-Strukturen war es auch möglich, die Ergebnisse dieser Ausbreitungsrechnungen für Vergleichszwecke im gegenständlichen Projekt zu verwenden, und das am IDC entwickelte Web-GRAPE Visualisierungstool zu verwenden.

1.3.2 Umweltbundesamt

Das Umweltbundesamt (Berlin) betreibt auf dem Schauinsland eine nahe der BfS-Messstelle gelegene Hintergrund-Messstation für Luftbeimengungen. Anlässlich des Stationsbesuchs wurde die UBA-Station besucht ein Gespräch mit dem Leiter geführt, der Hinweise auf dort laufende Arbeiten gab und auch an den Ergebnissen des gegenständlichen Projekts sehr interessiert war. Weiters wurden auch Daten der UBA-Station verwendet.

2 Stand der Wissenschaft

2.1 Meteorologische Modelle

2.1.1 Grundlagen

Zahlreiche Institutionen und Gruppen weltweit haben verschiedene numerische Wettervorhersagemodelle entwickelt. Solche Modelle integrieren einen Satz von nichtlinearen partiellen Differentialgleichungen der Fluidodynamik, welche primär die Bilanzgleichungen von Impuls und Wärme sowie die Kontinuitätsgleichung sind. Dazu treten weitere Gleichungen, die im meteorologischen Fachjargon so genannte „physikalische“ Prozesse (im Unterschied zur reinen Dynamik) beschreiben: Wasserdampf, Wolken, Niederschlag, solare und terrestrische Strahlung, Turbulenz, und die Wechselwirkung mit der Unterlage. Diese Gleichungen werden auf einem festen Gitter numerisch gelöst, z. T. werden auch zweidimensional-spektrale numerische Darstellungen verwendet. Bei einer globalen Integration und unter Einschluss von Gleichungen für die Oberflächenprozesse sind keine Randwerte erforderlich (wohl aber bei Integration auf Ausschnitten). Anfangswerte sind hingegen immer erforderlich, sie werden aus Beobachtungsdaten gewonnen, wobei diese Analyseverfahren im Lauf der Zeit immer mehr verfeinert wurden. Der heutige Standard, zuerst am Europäischen Zentrum für mittelfristige Wettervorhersagen ECMWF¹ entwickelt und implementiert, ist die sogenannte vierdimensionale Variationsanalyse (4DVAR), die bereits aufwändiger als die eigentlich Vorhersage ist, da sie iterativ eine Kostenfunktion minimiert, wobei sämtliche Modellvariablen an allen Gitterpunkten die zu adjustierenden Kontrollvariablen darstellen.

Im Folgenden werden einige so genannte “Limited Area Modelle” (LAM) vorgestellt, die in der “Research Community” weit verbreitet sind. Im Unterschied zu den großräumigen Wettervorhersagemodellen, die Strömungen auf dem gesamten Globus simulieren, dienen diese Modelle dazu, in einem geografischen Ausschnitt eine verfeinerte Berechnung zu ermöglichen. Für die Simulation realistischer Fälle benötigen sie dazu Randwerte, die normalerweise aus den Daten eines solchen globalen operativen Modells genommen werden. Diese Modelle können grundsätzlich in zwei Modi betrieben werden: erstens als echtes Wettervorhersagemodell, wenn sie mit vorhergesagten Randwerten betrieben werden (Beispiele dazu finden sich unter <http://www.westwind.ch/>, Forecast Models 0-48 h bzw. 0-72 h) und zweites zur Simulation vergangener Episoden, wobei hierzu zweckmäßigerweise die Randwerte aus den so genannten Analysen der globalen Modelle verwendet werden. Diese Analysen sind dreidimensionale Felder von Temperatur, Wind usw., die aus den weltweiten Beobachtungen (Radiosonden, Satellitendaten, Flugzeugdaten, Oberflächendaten) abgeleitet wurden und dabei gleichzeitig auch den physikalischen Konsistenzbedingungen genügen, die das Vorhersagemodell vorgibt. Bei einem größeren Modellgebiet kann das

¹Das ECMWF (deutsch auch EZMW abgekürzt) ist eine internationale Organisation, gegründet von einer Gruppe europäischer Staaten. Mehr Information unter <http://www.ecmwf.int/>.

Innere des Modells aber auch in diesem Fall noch von der realen Wetterentwicklung abweichende Strömungen simulieren, da ja kein Modell perfekt ist. Um eine möglichst gute Annäherung an die Analyse – unsere beste Abschätzung für die Realität auf der Skala des Globalmodells – zu erzielen, wurde die Technik des sogenannten “grid nudging” eingeführt. Dabei werden die Modellvariablen auch im Inneren des Gebiets durch einen (nicht physikalischen) Term immer in Richtung auf die vom Globalmodell vorgegebenen Werte hin gezogen. Die Erfahrung zeigt die Sinnhaftigkeit der Technik.

Bei den LAMs handelt es sich oft um so genannte nicht-hydrostatische Modelle. In großräumigen Modellen wird die zeitliche Änderung des Vertikalwindes nicht direkt berechnet, vielmehr wird die dritte Bewegungsgleichung durch die Berechnung des Luftdrucks als hydrostatischer Druck ersetzt. Diese Approximation ist nicht zulässig, wenn atmosphärische Phänomene in räumlichen Skalen von wenigen Kilometern und darunter untersucht und aufgelöst werden sollen, insbesondere wenn die Topographie verstärkte Vertikalbewegungen induziert.

Alle hier dargestellten Modelle nutzen geländefolgende σ -Koordinaten als Vertikalkoordinate. Auch unterstützen die hier vorgestellten Modelle die Möglichkeit des Nestens. Dies bedeutet, dass die Auflösung auf Teilgebieten (Nest) erhöht wird, wobei die Ergebnisse des gröber aufgelösten Gebiets als Randwerte für die Nests benutzt werden. Beim Zwei-Wege-Nesting geben die Nester entsprechend der gröberen Auflösung gefilterte Information an die gröbere Stufe zurück. Durch mehrfaches Nesten können Auflösungen im km-Bereich erreicht werden, auch wenn bei den Eingangsdaten nur eine solche von 100 km zur Verfügung steht.

2.1.2 PSU/NCAR MM5

Ein sehr weit verbreitetes mesoskaliges Meteorologie-Vorhersagemodell ist das MM5 (Grell et al., 1994). Dieses Modell wurde an der Pennsylvania State University (PSU) und dem US-amerikanischen National Center for Atmospheric Research (NCAR) entwickelt und steht dem interessierten Wissenschaftler als sogenannte Open-Source Version zur Verfügung. Unter der Internetadresse <http://www.mmm.ucar.edu/mm5/mm5-home.html> kann das gesamte Vorhersagesystem samt Quellcode bezogen werden. Das Modell ist gut portierbar und läuft auf sämtlichen Unix-Plattformen, einschließlich Linux. Das Modell ist im wesentlichen in Fortran 90 codiert und benötigt einen Fortran 90 Compiler, z. B. der Firmen Portland Group oder Intel, und kann auch im Parallelbetrieb genutzt werden.²

Das MM5 Modell unterstützt Zwei-Wege Nesting. Ein wichtige Randbedingung besteht darin, dass beim Nesten der Faktor 3 bezüglich des Auflösungsgewinnes der einzelnen Nest-Level nicht überschritten werden darf. Auch existiert die Möglichkeit eines bewegten Zwei-Wege-Nestings (moving nests) für das innerste Gebiet, mit dem z.B. Hurricanes verfolgt werden können. Es können eine Vielzahl an Parametrisierungsschemata für Bodenfeuchte, Cumulus-Parametrisierung, etc. gewählt werden.

Zusätzlich sind auf der MM5-Internetseite Erweiterungen vorhanden, die in der aktuellen Version noch nicht eingebunden sind. Eine solche Erweiterung ist z.B. die Verbes-

²Die Version 6 des Portland Compilers eignet sich nicht für den Parallelbetrieb!

serung der Simulation in komplexer Opographie mit hoher Auflösung, die von Zängl (2002, 2003) entwickelt wurde. Mit Freigabe der Version 3.7 im Dezember 2004 wurde die Hauptentwicklung von MM5 eingestellt und auf das WRF Modell umgestellt (siehe Abschnitt 2.1.6).

2.1.3 Méso-NH

Ein weiteres in der „Research Community“ verwendetes Modell ist Méso-NH. Dieses Modell wurde vom Centre National de Recherches Météorologiques (eine Abteilung von Météo-France, dem französischen Wetterdienst) und dem Laboratoire d'Aérodynamique (CNRS) entwickelt. Der Quellcode und die Verwendung von Méso-NH ist für nicht-kommerzielle Zwecke kostenfrei, aber vor Benützung muß eine Lizenzvereinbarung unterzeichnet werden. Auch Méso-NH unterstützt Zwei-Wege-Nesting. Zusätzlich ist ein On-line Chemiemodul an das System gekoppelt.

2.1.4 ARPS

Das Advanced Regional Prediction System (ARPS) wurde an der Universität Oklahoma Anfang der 1990er Jahre entwickelt. Das ARPS Modell unterscheidet sich von den beiden vorhergehenden Modellen insofern, dass die eigentliche Anwendung in erster Linie für idealisierte Studien, wie z. B. die Simulation und Darstellung von konvektiven Ereignissen (Gewitter etc.) Verwendung findet.

Das ARPS Modell kann unter der Webadresse <http://www.caps.ou.edu/ARPS/> nach einer Registrierung kostenfrei bezogen werden und unterliegt keiner Einschränkung in dessen Benutzung. Auch das ARPS unterstützt die Möglichkeit des Zwei-Wege Nestens.

2.1.5 RAMS

Das Regional Atmospheric Modeling System (RAMS) entstand 1986 aus der Zusammenlegung zweier Modelle, einem Wolkenmodell (Cotton) und einem mesoskaligen Modell (Pielke) und wird an der Colorado State University weiterentwickelt. Das RAMS Modell war ursprünglich nur kommerziell erhältlich, inzwischen wird es unter der GNU Copyleft (GNU/GPL) Lizenz vertrieben. Von der Internetseite <http://bridge.atmet.org/users/software.php> kann nach erfolgter Registrierung das Modell geladen werden. Das Modell kann sowohl im hydrostatischen als auch im nichthydrostatischen Modus betrieben werden, und bietet auch die Möglichkeit eines Zwei-Wege-Nestings.

Das RAMS Modell besitzt keine Einschränkungen in der Definition der Maschenweite und der Domaingröße und wird auch für Studien mikroskaliger Phänomenen, wie Simulationen von Gebäudeüberströmungen, Tornados und Grenzschichtturbulenzen, verwendet.

Das Modell ist hauptsächlich in Fortran geschrieben, mit einigen Ausnahmen (Datenaustausch), die in C implementiert sind.

2.1.6 WRF

Das Weather Research and Forecast (WRF) Modell versteht sich im weitesten als Nachfolgeentwicklung von MM5, welches mit der Version 3.7 (Dezember 2004) eingestellt wurde. Sämtliche Erkenntnisse aus dem MM5 Model sind ins WRF Model übergegangen. Der Zweck, dieses Modell ins Leben zu rufen, war der Wunsch, das Know-how von Forschungseinrichtungen und operationellen Diensten zu verbinden. Entwickelt wird das Modell von operationellen nordamerikanischen Diensten wie NCEP (Vorhersagezentrum des US-amerikanischen Wetterdienstes NOAA), AFWA und Forschungseinrichtungen wie NCAR, FSL und diversen Universitäten. Das Model ist unter der Internetadresse <http://www.wrf-model.org/> für die Allgemeinheit frei verfügbar. Das WRF Modell unterstützt multiples Zwei-Wege-Nesting und zwei-Wege bewegtes Nesting. Anwendungen findet das WRF im operationellen und im Forschungsbetrieb. Die Entwicklung ist derzeit noch nicht abgeschlossen.

2.1.7 FITNAH

Das numerisches Modell FITNAH (Flow over Irregular Terrain with Natural and Anthropogenic Heat Sources) wurde ursprünglich am meteorologischen Institut der Universität Darmstadt entwickelt und gehört zu den ersten nichthydrostatischen Modellen aus Deutschland. Dieses Modell wird in erster Linie dafür verwendet, Veränderungen klimatischer Verhältnisse, welche z.B durch Bebauung entstehen können, zu prognostizieren, sowie als meteorologische Treibermodell für Ausbreitungsrechnungen in der lokalen Skala (Anlagen-Genehmigungsverfahren). Mit diesem Modell ist die Möglichkeit des Nestings nicht gegeben.

2.1.8 LM

Das Lokal-Modell LM (Doms und Schättler, 1999) ist Teil des numerischen Wettervorhersagesystems des Deutschen Wetterdienstes (DWD). Das LM wird im operationellen Dienst betrieben und überdeckt dabei ganz Mitteleuropa mit einer horizontalen Auflösung von 7 km mit 35 vertikalen Schichten und wird derzeit für Vorhersagen bis 48 h eingesetzt. Im "Consortium for Small-Scale Modelling" (COSMO, <http://www.cosmo-model.org/>), an dem die Wetterdienste aus Deutschland, Schweiz, Italien, Griechenland und Polen beteiligt sind, wird an der Weiterentwicklung des LM gearbeitet.

2.2 Ausbreitungsmodelle

2.2.1 Grundlagen

Ausbreitungsmodelle lösen im wesentlichen eine einzige partielle Differentialgleichung, nämlich die Bilanzgleichung für eine Luftbeimengung. Diese ist im Unterschied zu den Bewegungsgleichungen (Navier-Stokes Gleichungen) aber linear, deshalb ist die Lösung wesentlich weniger aufwändig. Eine Erweiterung stellen so genannte Chemie-

Transport-Modelle (CTMs) dar, welche nicht nur eine Luftbeimengung, sondern viele verschieden chemische Spezies einschließlich ihrer Wechselwirkung durch chemische Reaktionen simulieren. Da diese Reaktionen nichtlinear sind, ist diese Modellklasse wieder wesentlich komplexer. Sie wird jedoch hier nicht näher betrachtet, da sie für die gegebene Fragestellung nicht relevant ist.

Der Ausbreitungsvorgang von Luftbeimengungen hat im wesentlichen zwei Komponenten: den Transport mit der mittleren Strömung und die turbulente Diffusion. Je nach Substanz können noch trockene Deposition auf den Boden, Auswaschung durch Niederschläge (in-cloud und below-cloud scavenging), und radioaktive Umwandlung dazu kommen.

Diese Modelle benötigen Anfangsbedingung (kann auch trivial sein: keine Substanz in der Atmosphäre) und Angaben über allfällige Quellen. Zusätzlich brauchen sie meteorologische Felder (vor allem Windfelder, zumeist aber auch Temperatur und Feuchte um die Turbulenz zu berechnen), die üblicherweise aus dem Output von meteorologischen Modellen genommen werden (prognostisch, Analysen, oder diagnostische [genudgte] Simulationen). Man spricht hier von off-line Modellen. Einige meteorologische Modelle simulieren auch gleich den Transport von Tracern oder anderen Beimengungen mit, das wird dann on-line Modell genannt. Diese haben den Vorteil, dass keine oder weniger Interpolationen mit den damit verbundenen Fehlern nötig sind.

Folgende Modellklassen sind zu berücksichtigen:

- **Trajektorienmodelle:** Diese berechnen nur den Transport mit der mittleren Strömung für hypothetische, infinitesimal kleine Luftpakete. Sie liefern keine Konzentrationen. Trajektorienmodelle leisten im Verhältnis wenig, sind aber sehr schnell und produzieren überschaubaren Output.
- **Trajektorien-Puff-Modelle:** Bei diesen Modellen wird der Trajektorie eine analytisch gegebene Diffusion überlagert, Konzentrationen werden durch Aufsummieren der Puff-Beiträge berechnet. Das Modell ist wegen der analytischen Approximation der Diffusion und der mangelnden Berücksichtigung der Windscherung ab einer gewissen Puff-Größe zunehmend ungenau.
- **Lagrange'sche Partikel-Diffusions-Modelle (LPDM):** Hier werden Rechenpartikel, welche Luftpakete oder Beimengungsquantitäten darstellen, mit dem mittleren Wind und zusätzlich einer stochastischen Windkomponente zur Simulation der Turbulenz verlagert. Die Konzentration auf einem Gitter wird durch Summierung der Masse, mit welcher die Rechenpartikel behaftet sind, gebildet. Diese Modellklasse liefert im Prinzip die realitätsnächste Simulation, verbraucht jedoch auch die meisten Rechner-Ressourcen. Bei sehr hohen Verdünnungsfaktoren werden extrem hohe Partikelzahlen benötigt, bzw. es kommt zu statistischen Schwankungen in den berechneten Konzentrationen, die Ausdruck der mangelnden numerischen Auflösung sind. Fehler treten auch auf Grund der Interpolation des Windes auf die Partikelposition auf.
- **Euler-Modelle:** In Euler-Modellen wird die Bilanzgleichung wie in einem Wettervorhersagemodell durch Diskretisierung auf einem festen Gitter gelöst. Die Problematik dieser Modelle liegt darin, dass sie Strukturen, die kleiner als das

Gitter sind, nicht auflösen können und daher künstlich auf mindestens ein Gitterelement diffundieren. Auch sind alle Eulerschen Advektionsschemata mit zum Teil nicht geringen Diskretisierungsfehlern behaftet. Für Situationen, in denen nur ein kleiner Teil des Rechengitters relevante Konzentrationen enthält, sind Euler-Modelle wenig rechenökonomisch, da die Rechnungen stets für das ganze Gitter erfolgen.

- **Misch-Modelle:** Aufgrund der oben genannten Eigenschaften findet man häufiger den Ansatz, dass Beimengungen in der Nähe ihrer Quellen zunächst mit einem LPDM oder Puffmodell verfolgt, und später, wenn sie vom Gitter aufgelöst werden können, in das Euler-Modell überführt werden. Dies ist ein Kompromiss, der versucht Genauigkeit und mässige Rechenanforderungen zu vereinbaren.

Traditionell wurden diese Modelle immer nur vorwärts betrieben, ausgenommen die Trajektorienmodelle; Rückwärtstrajektorien sind unmittelbar anschaulich und jahrezehntelang in Verwendung.

Im Zuge von Optimierungsproblemen wurde die Theorie von adjungierten Modellen entwickelt und auch auf atmosphärische Transportmodelle, und zwar auf Euler-Modelle, angewendet. Dabei wird die Sensitivität einer Zielfunktion (Zielvariable, häufig in Form einer Kostenfunktion, die dann minimiert werden soll) in Abhängigkeit von Kontrollvariablen berechnet. Dazu wird der zugrunde liegende Algorithmus nach der Kontrollvariable differenziert und dann wie das Vorwärtsmodell diskretisiert. Man kann auch gleich den Code numerisch differenzieren. Für die linearen Ausbreitungsmodelle ist die Aufstellung des adjungierten Modells besonders einfach.

Lagrange'sche Partikel-Ausbreitungsmodelle können ebenfalls zur Berechnung solcher Sensitivitäten benutzt werden. Die erste Theorie dazu stammt von Flesch und Wilson (1995), eine auf die gegenständliche Fragestellung passende Darstellung, die auch Verlustprozesse mit einbezieht, findet sich bei Seibert und Frank (2004) und Stohl et al. (2005).

2.2.2 HYSPLIT

HYSPLIT (HYbrid Single-Particle Lagrangian Integrated Trajectory) ist ein Lagrange'sches Partikel-Ausbreitungs- und Trajektorienmodell, das in Zusammenarbeit zwischen der NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration) und dem Australischen Bureau of Meteorology, also dem US-amerikanischen und dem australischen Wetterdienst, entwickelt wurde. Mit HYSPLIT können einfache Trajektorien, aber auch echte Ausbreitungsrechnungen, gerechnet werden. Bei den Ausbreitungsrechnungen gibt es die Wahl zwischen Puff-Trajektorien-Modus, Partikelmodus, und hybridem Modus. Es kann auch Deposition berechnen, und ist im Vorwärts- oder Rückwärtsmodus verwendbar. Dieses Modell ist nur für meteorologische Input-Daten auf Druckflächen ausgelegt (Draxler und Hess, 1997).

Der "Research Community" stehen dabei zwei Möglichkeiten der Nutzung dieses Modells zur Verfügung. Das Modell kann einerseits interaktiv über eine Webmaske im Internet bedient werden, andererseits kann eine limitierte Version auf einen Windows PC

geladen werden (Off-line). Eine Unix-Version kann nur über persönliche Anfrage bezogen werden. Die interaktive Version von HYSPLIT ist unter der Adresse <http://www.arl.noaa.gov/ready/open/hysplit4.html> abrufbar. Dabei kann zwischen dem Trajektorien- und dem Dispersionsmodell, mit dem Konzentrationen gerechnet werden können, gewählt werden. Als meteorologische Inputfelder stehen folgende Datensätze zur Verfügung:

- Final Run (FNL) Archiv des NCEP Global Data Assimilation System (GDAS) Outputs mit $1^\circ \times 1^\circ$ Auflösung und 14 Druckniveaus. Die zeitliche Auflösung beträgt 6 h und die Daten sind für den Zeitraum 1. Dezember 1997 – aktuell verfügbar.
- Eta Data Assimilation System mit 185×129 Gitterpunkten, einer horizontalen Auflösung von 40 km (EDAS40) und 26 Druckflächen, die das Gebiet Nordamerikas bedecken. Diese Daten stammen vom so genannten ETA-Modell, ein operationelles LAM der NOAA. Die zeitliche Auflösung beträgt 3 h und die Daten sind für den Zeitraum 1. Jänner 2004 – aktuell verfügbar.

Zusätzlich können für länger zurückliegende Perioden noch folgende Datensätze benutzt werden:

- Eta Data Assimilation System mit 79×55 Gitterpunkten, einer horizontalen Auflösung von 80 km (EDAS80) und 22 Druckflächen, die das Gebiet Nordamerikas bedecken. Die zeitliche Auflösung beträgt 3 h und die Daten sind für den Zeitraum 1. Jänner 1997 – 30. April 2004 verfügbar.
- Nested Grid Models (NGM) mit 33×28 Gitterpunkten, einer horizontalen Auflösung von 180 km und 10 σ -Niveaus,³ die das Gebiet Nordamerikas bedecken. Die zeitliche Auflösung beträgt 2 h und die Daten sind für den Zeitraum Jänner 1991 bis April 1997 verfügbar.
- Die Felder der globalen NCAR/NCEP Reanalyse mit 144×73 Gitterpunkten, einer Auflösung von 2.5° und 17 Druckflächen. Die zeitliche Auflösung beträgt 6 h, die Daten sind für den gesamten Globus im Zeitraum Jänner 1948 – Dezember 2004 verfügbar.

2.2.3 FLEXPART

FLEXPART ist ein Langrange'sches Partikel-Ausbreitungsmodell, welches am Institut für Meteorologie der Universität für Bodenkultur (BOKU-Met) entwickelt wurde (Stohl et al., 1998). FLEXPART ist frei über das Internet verfügbar und wird von der Arbeitsgruppe Stohl (derzeit am NILU Oslo) und BOKU-Met weiter gewartet und entwickelt (Stohl et al., 2005, <http://zardoz.nilu.no/~andreas/flextra+flexpart.html>). Es wird derzeit von 26 Gruppen weltweit verwendet. Mit diesem Modell können Simulationen für weiträumige Transporte, Diffusion, feuchte und trockene Depositionen und der Zerfall von Luftverunreinigung bei Punkt-, Linien- oder Volumenquellen berechnet werden.

³Mit σ wird die Vertikalkoordinate in den meistverbreiteten terrainfolgenden Koordinatensystemen bezeichnet. Bei diesen folgt die unterste Koordinatenfläche dem Untergrund, die oberste ist eine Fläche konstanten Drucks, dazwischen erfolgt eine Anpassung. σ -Niveaus sind also Modellflächen.

Dabei werden Partikel von einer Quelle emittiert und deren Trajektorien unter Berücksichtigung des mittleren dreidimensionalen Windes und der turbulenten Fluktuationen berechnet. FLEXPART zeichnet sich besonders durch seine hoch optimierten numerischen Algorithmen (günstige Rechenzeit) sowie ein auf Minimierung des Massenspeicherbedarfs optimiertes Outputverfahren aus.

Seit einigen Jahren wurde auch die Möglichkeit der Rückwärtsrechnung für die Bestimmung von Quell-Rezeptor Beziehungen (weitere Verwendung zur inversen Modellierung) theoretisch fundiert und im Modell implementiert (Seibert und Frank, 2004; Stohl et al., 2005).

FLEXPART verwendet intern ein terrainfolgendes z-System.⁴ Das Modell existiert in mehreren Versionen, die sich durch die verwendbaren Input-Datenformate unterscheiden.

1. Die Standardversion verwendet Analysen und/oder Vorhersagen des ECMWF auf η -Flächen⁵. Dadurch kann es die volle vertikale Auflösung des meteorologischen Modells verwenden. Typischerweise werden derzeit Daten mit einer horizontalen Auflösung von $0.5^\circ \times 0.5^\circ$ und ca. 37 Modellflächen (unter Weglassung jener in der oberen Stratosphäre, die für troposphärische Fragestellungen nicht benötigt werden) verwendet. Durch die Verwendung von 3-stündigen Vorhersagen kann die zeitliche Auflösung von den üblichen 6 h auf 3 h gesteigert werden.
2. Eine zweite Version verwendet NCEP-Daten auf Druckniveaus als Input. Diese Version wird jeweils relativ rasch von A. Stohl aktualisiert.
3. Die dritte Version verwendet MM5 Output als Inputfelder, wobei diese noch mit einem Konvertierprogramm behandelt werden müssen um für FLEXPART bereit zu sein. Diese Version wurde ursprünglich von G. Wotawa (ehemals BOKU-Met, nunmehr CTBT/PTS/IDC) erstellt und basiert auf FLEXPART Version 3. Ein Update dieser Version auf die aktuelle FLEXPART Version 6.2 wurde im Rahmen des gegenständlichen Projekts durchgeführt. Die im Kapitel Ressourcenabschätzung und Set-up gezeigten Beispiele entstammen aber noch der Originalversion.

2.2.4 FLEXTRA

FLEXTRA ist ein an der Universität Wien von A. Stohl, G. Wotawa und P. Seibert entwickeltes Trajektorienmodell (Stohl et al., 1995) und es stellte den Ausgangspunkt für die Entwicklung von FLEXPART dar. Es ist ebenso wie dieses frei verfügbar und weit verbreitet. Es eignet sich vor allem dafür, sich einen raschen Überblick über Transportvorgänge zu verschaffen, insbesondere in Ergänzung zu FLEXPART.

⁴z-System ist ein Koordinatensystem, das die geometrische Höhe (in Metern) als Vertikalkoordinate verwendet. FLEXPART rechnet also einfach in Höhe über Grund.

⁵Das η -Koordinatensystem des ECMWF-Vorhersagemodells ist eine modifizierte Version des σ -Systems.

2.2.5 HYPACT

Das Hybrid Particle And Concentration Transport Model (HYPACT) ist ein Mischmodell, das direkt an das meteorologische Modell RAMS (s. Abschnitt 2.1.5) gekoppelt werden kann. Anfangs werden Partikel mit dem Lagrange'schen Modell von HYPACT verlagert und sobald diese von Gitter aufgelöst werden können, werden die Partikel zu Euler-Konzentrationen konvertiert und im Euler-Modell weiterverarbeitet. Das Modell kann von der Internetseite <http://bridge.atmet.org/users/software.php> nach erfolgreicher Registrierung kostenlos bezogen werden.

2.2.6 LPDM des DWD

Der Deutsche Wetterdienst hat – ursprünglich primär für die Anwendung im Kontext von Nuklearunfällen – ein LPDM geschaffen, das für die Zusammenarbeit mit den operationellen meteorologischen Modellen des DWD eingerichtet ist. Unseres Wissens existiert nur eine allgemein zugängliche, umfassende Publikation aus dem Jahr 1998 dazu (Glaab et al., 1998). Das Modell ist nicht allgemein verfügbar. Nach mündlichen Informationen eines Nutzers stellt es relativ hohe Anforderungen in Bezug auf die Rechenzeit und produziert umfangreichen Output.

Tabelle 2.1: Zum Betrieb des MM5-Modells notwendige Inputdaten. Dargestellt sind die meteorologische Größe, die vorhandene Anzahl vertikaler Schichten und die zugehörige EZMW GRIB-Codenummer.

Meteorologische Größe	Vertikale Schichten (Drucklevel)	GRIB Parameter (Table 2 v.128)
Temperature	31	130
U velocity	31	131
V velocity	31	132
Relative humidity	31	157
Sea-ice cover	1	31
Sea surface temperature	1	34
Volumetric Soil Water Layer 1	1	39
Volumetric Soil Water Layer 2	1	40
Volumetric Soil Water Layer 3	1	41
Volumetric Soil Water Layer 4	1	42
Geopotential	1	129
Soil Temperature level 1	1	139
Snowdepth	1	141
Mean-sea level pressure	1	151
10m U wind component	1	165
10m V wind component	1	166
2m temperature	1	167
2m dewpoint temperature	1	168
Soil Temperature level 2	1	170
Soil Temperature level 3	1	183
Skin temperature	1	235
Soil Temperature level 4	1	236

2.3 Inputdaten für Rand- und Anfangswerte

Um ein numerisches meteorologisches Modell betreiben zu können, werden zu Beginn der Integration der Bewegungsgleichungen Rand- und Anfangswerte benötigt. Die Anfangswerte bzw. Analysen beinhalten eine vollständige Beschreibung der prognostischen Variablen (z.B. Temperatur, dreidimensionaler Wind, Druck, diverse Bodenvariablen, usw.) zum Beginn der Vorhersage (Simulation) auf dem Modellgitter (siehe auch Abschnitt 2.1.1).

Als Rand- und Anfangswerte eignen sich z.B. Analysen des operationellen Vorhersagemodells des Europäischen Zentrums für mittelfristige Wettervorhersage ECMWF. Für das Modell-Setup und die Ressourcenabschätzung wurden Daten aus dem MARS-Archiv des ECMWF, zu dem BOKU-Met vollen Zugriff hat, extrahiert. Der Bereich der Daten, welche extrahiert wurden, erstreckt sich über ganz Europa und dessen Umgebung ($50.5^{\circ}\text{W} - 50.5^{\circ}\text{E}$ und von $25^{\circ}\text{N} - 80^{\circ}\text{N}$). In Tabelle 2.1 sind die extrahierten meteorologischen Größen, die für den Betrieb des MM5-Modells notwendig sind, aufgelistet. Die ECMWF-Daten können sowohl auf Druckflächen als auch auf Modellflächen (η -FLächen) für das MM5 nutzbar gemacht werden, wobei die Version mit den Modellflächen wegen der damit verbundenen besseren Vertikalauflösung vorzuziehen ist.

Ein weiterer Datensatz, der für die Anfangs- und Randwerte in Frage kommen könnte, sind die Felder, die am National Center for Environmental Prediction (NCEP) des US-amerikanischen Wetterdienstes (NOAA) erzeugt werden. Auf dem Server des NOAA Operational Model Archive Distribution System (NOMADS, http://nomad3.ncep.noaa.gov/ncep_data/) stehen die Felder des operationellen globalen Modelllaufs am NCEP, dem sogenannten Final Run (FNL) vom Global Data Assimilation System (GDAS), zum Download bereit.

Die Analysen werden vier Mal am Tag, für 00, 06, 12 und 18 UTC, gerechnet und abgespeichert. Die Daten sind global auf einem $1^{\circ} \times 1^{\circ}$ Gitter verfügbar, aber mit einer vertikalen Auflösung von nur 17 Druckflächen, also relativ grob. σ -Koordinaten stehen nicht zur Verfügung. Die Daten sind on-line jeweils für das laufende und das vorangegangene Jahr (d.h. momentan 1. Dezember 2004 – heute) als GRIB-Datei⁶ verfügbar.

2.4 Modellauswahl

Das gegenständliche Projekt wurde mit der Modellkombination **MM5 – FLEXPART** unter Verwendung von **ECMWF-Inputdaten** durchzuführen, und diese Wahl wird im Folgenden erläutert.

⁶Gridded Binary (GRIB) Format ist eine von der WMO eingeführter Standard, um gitterbezogene meteorologische Daten auszutauschen. Die relative komplexe Software zum Entpacken solcher Dateien (grib-decoder), ist z.B. vom ECMWF als source code (<http://www.ecmwf.int/products/data/software/download/gribex.html>) oder von NCEP als ausführbares Programm (<http://www.cpc.ncep.noaa.gov/products/wesley/wgrib.html>) erhältlich.

2.4.1 Meteorologisches Ausschnittsmodell

Die meisten der hier vorgestellten nichthydrostatischen Limited-Area-Modelle für die Berechnung dreidimensionaler meteorologischer Felder sind vom wissenschaftlichen Standpunkt her für die gestellte Aufgabe grundsätzlich geeignet. Für die Auswahl sind daher letztlich praktische Gesichtspunkte entscheidend. Für die getroffene Wahl von MM5 spricht:

- BOKU-Met hat bereits Erfahrung mit diesem Modell, die für die Aufbereitung des Inputs und die grafische Darstellung des Outputs nötige Software ist im Wesentlichen vorhanden.
- Das von uns bevorzugte Ausbreitungsmodell FLEXPART (siehe dazu unten) existiert bereits in einer MM5-kompatiblen Version.
- MM5 hat eine sehr große Nutzergemeinde, optimierte Make-Files stehen für viele Rechnerplattformen zur Verfügung.
- MM5 ist ein „Community model“, es gibt keine Nutzungseinschränkungen wie unter Umständen bei Wetterdienst-Modellen.
- MM5 wurde kürzlich speziell für hochaufgelöste Simulationen in gebirgigem Terrain modifiziert. Dies stellt einen wissenschaftlichen Vorteil gegenüber anderen Modellen dar.

Als relevanter Nachteil kann die Tatsache angeführt werden, dass die Entwicklung von MM5 nun am Ende angekommen ist und es in Zukunft von WRF abgelöst wird. Da jedoch die Entwicklung von WRF auf MM5 aufbaut, und sicherlich viele MM5-Nutzer in den kommenden Jahren auf WRF umsteigen werden, rechnen wir damit dass dies auch für die gegenständliche Anwendung ohne allzu großen Aufwand möglich ist, wenn in Zukunft das Bedürfnis dafür entstehen sollte.

2.4.2 Ausbreitungsmodell

Betreffend das Ausbreitungsmodell ist festzuhalten, dass sich in letzter Zeit Lagrange'sche Partikelmodelle gegenüber den Eulermodellen für die Berechnung von Quell-Rezeptor-Beziehungen für Punktmessungen durchgesetzt haben (vergleiche dazu auch das CTBTO-WMO-Experiment for Source Location). Dies ist verständlich, da diese nicht das Problem der Gitterauflösung in der Umgebung der Messstation haben.

Von den frei verfügbaren derartigen Modellen verdienen vor allem FLEXPART und HYSPLIT nähere Berücksichtigung. Als Mitentwickler von FLEXPART liegt uns dieses Modell natürlich besonders nahe.

HYSPLIT ist vor allem populär, weil es über ein Web-Interface auch ohne besondere Vorkenntnisse und sehr bequem betrieben werden kann. Die PC-Downloadversion erweitert den Nutzungsbereich und behält weitgehend diese Vorteile. Die nötigen Inputdaten werden von NOAA ebenfalls frei zur Verfügung gestellt. Für eine vertiefte

wissenschaftliche Bearbeitung wäre jedoch die Beschaffung des UNIX-Quellcodes erforderlich. Als ein deutlicher Nachteil erscheint die Beschränkung von HYSPLIT auf Input auf Druckflächen, insbesondere in Kombination mit der Tatsache, dass die NCEP-Daten nur mit einer vergleichsweise groben vertikalen Auflösung öffentlich verfügbar sind. Dies ist für die Zwischenschaltung von MM5 vielleicht weniger relevant, falls jedoch das Ausbreitungsmodell direkt mit den operationellen meteorologischen Daten betrieben werden soll, ist dies ein für die Genauigkeit relevanter Faktor. Ähnlich zu bewerten ist die Tatsache, dass die NCEP-Daten nur mit 6-stündiger statt 3-stündiger Auflösung vorliegen.

FLEXPART ist schnell, produziert sehr kompakten Output, und vor allem kennen wir es sehr gut. Dies ist vor allem auch für den rezeptororientierten (Rückwärts-)Modus relevant, der an unserem Institut entwickelt wurde lange bevor er in HYSPLIT angeboten wurde. FLEXPART gehörte zu den besten Modellen beim Test an den ETEX-1 Daten und hat ebenfalls eine umfangreiche internationale Nutzergemeinde. Im Unterschied zu HYSPLIT ist es auch vollkommen frei verfügbar. Es kann direkt mit ECWMF-Daten unter Verwendung der vollen vertikalen Modellauflösung betrieben werden.

2.4.3 Operationelle meteorologische Eingangsdaten

Schließlich bleibt noch die Frage nach den meteorologischen Inputdaten, einerseits für die Anfangs- und Randwerte sowie das Nudging im MM5, andererseits für direkte Simulationen mit FLEXPART. Letztere Option ist auch insofern interessant, als die operationelle Auflösung im ECMWF-Modell seit 1.2.2006 auf 25 km (spektral: T799) verbessert wurde. Das ECMWF gilt als weltweit führend was die Qualität der Datenassimilation anbelangt, es war das erste meteorologische Zentrum mit operationeller 4DVAR-Analyse.

Die Frage welche operationellen meteorologischen Daten genutzt werden sollen ist nicht zuletzt eine des Zugangs.

Wissenschaftliche Einrichtungen in den ECMWF-Mitgliedsländern können mit Unterstützung des jeweiligen nationalen Wetterdienstes einen direkten Zugang zum Datenarchiv (MARS) des ECMWF erhalten, allerdings in der Regel ohne die aktuellen Vorhersagedaten (die Analysen sind einen Tag nach ihrer Gültigkeit verfügbar). Mit einem solchen Zugang kann die volle horizontale, vertikale und zeitliche Modellauflösung genutzt und alle abgespeicherten Felder verwendet werden.

Hingegen sind die oben genannten NCEP-Daten derzeit frei über das Internet zugänglich. Für Nutzer, die nur gelegentlich Daten benötigen oder keine Möglichkeit zu einem MARS-Zugang haben, stellen daher diese Daten die übliche Quelle dar. Jedoch ist die Qualität dieser öffentlich angebotenen Daten deutlich niedriger als jene der ECMWF-MARS-Daten. Es wäre auch vorstellbar, dass im Kontext der internationalen Sicherheitslage der öffentliche Zugang zu diesen Daten Einschränkungen erfährt.

Auch die Wetterdienste Frankreichs, Großbritanniens und Deutschlands (sowie weiterer Staaten in verschiedenen Weltteilen) betreiben globale Wettervorhersagemodelle, und auch Ausschnittsmodelle mit derzeit ca. 10 km Auflösung. Allerdings sind die Ergebnissfelder dieser Modelle nicht leicht zugänglich. In der Regel wird hierzu eine spe-

zielle Vereinbarung mit dem Wetterdienst abzuschließen sein. Der Vorteil davon liegt offensichtlich in der operationellen Verfügbarkeit.

Ausschnittsmodelle werden auch von den Wetterdiensten kleinerer Staaten (z.B. Österreich mit dem hydrostatischen Modell ALADIN, die Schweiz mit dem sog. HRM-Modell im Rahmen von COSMO/LM), regionalen Wetterdiensten (etwa in Italien) und einigen wissenschaftlichen Instituten operationell oder quasi-operationell betrieben. Hier erscheint eine Initiative des neu formierten Instituts für Meteorologie, Klimatologie und Remote Sensing der Universität Basel besonders interessant. Dort wird das NMM (Nonhydrostatic Mesoscale Model) des NCEP, welches in Kürze das ETA-Modell ersetzen soll, in Zusammenarbeit mit NCEP mit einer Auflösung bis herunter zu 2 km operationell betrieben. Das Modellgebiet dieses Ausschnitts umfasst die Schweiz und Umgebung, und reicht im Norden bis etwa Stuttgart, im Westen bis jenseits der Rhône (siehe <http://www.meteoblue.ch/>).

2.5 Literaturrecherche zu bisherigen Untersuchungen im Raum Oberrheingraben–Südschwarzwald

2.5.1 Übersicht

Südwestdeutschland, der Oberrheingraben und der Schwarzwald sowie der Raum Freiburg–Schauinsland sind seit vielen Jahren Zielgebiet meteorologischer Forschungsprogramme. Die meisten dieser Programme wurden vom Institut für Meteorologie der Universität Karlsruhe (<http://www.imk.uni-karlsruhe.de/>) initiiert, koordiniert oder zumindest wesentlich mit durchgeführt.

Im Jahr 1979 wurde unter dem Titel *MESOKLIP* die erste derartige Studie durchgeführt. Eine in diesem Rahmen entstandene Arbeit über die Strömungsverhältnisse in Freiburg und am Feldberg (Malberg und Bökens, 1984) ist für das gegenständliche Projekt besonders interessant und wird weiter unten genauer besprochen. *TULLA* (Transport und Umwandlung von Luftschadstoffen im Lande Baden-Württemberg und aus Anrainerstaaten) folgte im Jahr 1985.

Das regionale Klimaforschungsprogramm *REKLIP* bezog die angrenzenden Regionen Frankreichs und der Schweiz geografisch mit ein, zahlreiche Institute waren daran beteiligt (siehe <http://imkhp7.physik.uni-karlsruhe.de/ZUDIS/DOCS/122-01.html>). Es erstreckte sich über den größten Teil der 1990er Jahre. Eines der Ergebnisse ist der „Klimaatlas Oberrhein Mitte-Süd“ (Fiedler, 1995). Von einem gewissen Interesse für das gegenständliche Projekt könnte auch die Dissertation von Tamm (2000) sein.

Von 1988 bis 1995 wurde als ein Subprojekt von Eurotrac *TRACT* (Transport of Air Pollutants over Complex Terrain) durchgeführt, ein internationales Projekt, das ebenfalls einen seiner Untersuchungsschwerpunkte im südwestdeutschen Raum hatte (Larsen et al., 2000; Anonymous, 1998).

Im Jahr 1996 fand die Feldmesskampagne *SLOPE96* statt (Volz-Thomas et al., 2000), welche die Untersuchung des Transports von Luftschadstoffen und ihre chemischen Umwandlungen zwischen Freiburg und dem Schauinsland zum Ziel hatte und daher besonders relevant für das gegenständliche Projekt ist. Sie wird ebenfalls unten detaillierter referiert.

Die Station Schauinsland war auch eine von zahlreichen, europaweit verteilten Beobachtungsstationen zur Untersuchung des troposphärischen Ozons im Eurotrac-Subprojekt *TOR* bzw. dem Fortsetzungsprojekt *TOR-2* unter Eurotrac-2. Stohl und James (2003) haben mit FLEXTRA für alle diese Stationen dreidimensionale Rückwärtstrajektorien berechnet, und zwar mit den ERA-15 Reanalysedaten für die ERA-15-Periode 1979-1993, sowie für den Zeitraum 1.1.1996–30.4.2001. Die räumliche Auflösung der zugrunde liegenden Windfelder ist stets $1^\circ \times 1^\circ$, die vertikale und zeitliche Auflösung sind in ERA-15 bis Ende 1997 31 Niveaus bzw. 6 h, später erhöht sich die vertikale Auflösung und es wurden 3-stündliche Daten verwendet. Vermutlich sind diese Daten noch verfügbar und könnten bei Bedarf für eine klimatologische Charakterisierung der großräumigen Transporte oder die Interpretation von Episoden aus diesen Zeiträumen herangezogen werden.

Eine gewisse Fortsetzung haben diese Aktivitäten in *VERTIKATOR* gefunden, einem Unterprogramm des deutschen AFO2000 Atmosphärenforschungsprogramms (siehe <http://www.vertikator-af02000.de/>).

Auch in *CarboEurope*, einem so genannten Cluster innerhalb des 6. EU-Rahmenprogramms ist die Station Schauinsland eingebunden (Schmidt et al., 2003).

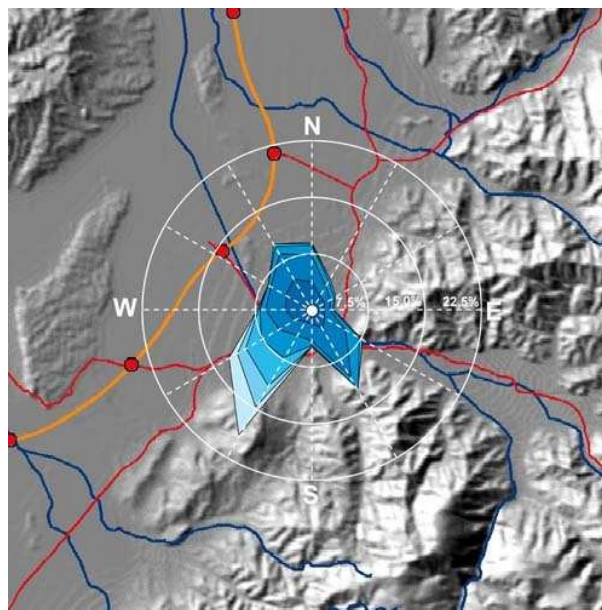


Abbildung 2.1: Windrose der LfU-Station Freiburg-Mitte, 1992-1998. Die Farbabstufungen geben die Windgeschwindigkeitsklassen an (von außen nach innen): >5 m/s, 4 m/s, 3 m/s, 2 m/s, 1 m/s. Quelle: http://www2.lfu.baden-wuerttemberg.de/lfu/abt3/windstatistik/stationen_html/4462.htm

2.5.2 Auswahl bisheriger Ergebnisse

Die Windverteilung an der LfU-Station in Freiburg-Mitte ist in Abb. 2.1 dargestellt. Drei Hauptwindrichtungen treten auf: Nordnordwest, Südwest und Südost. Dabei sind hohe Windgeschwindigkeiten ausschließlich im Südwestsektor zu finden. Bei diesen Winden dürfte es sich um großräumig angetriebene Strömungen handeln, während der

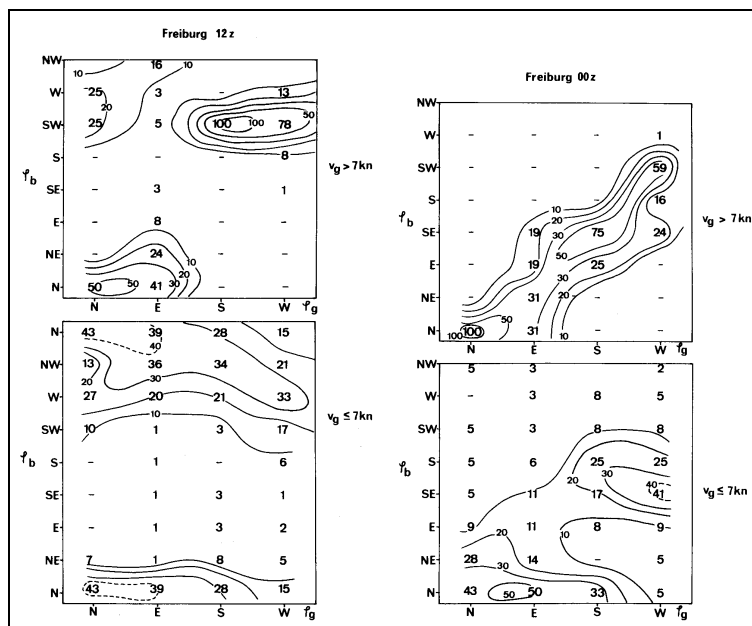


Abbildung 2.2: Häufigkeit in % der in Freiburg (DWD-Station) beobachteten Windrichtungen (y-Achse) in Abhängigkeit von Richtung und Betrag des geostrophischen Winds (x-Achse); unten: schwacher geostrophischer Wind, oben: mäßiger oder starker geostrophischer Wind. Links ist die Situation zu Mittag (13 Uhr MEZ) dargestellt, rechts in der Nacht (01 Uhr MEZ). Quelle: Malberg und Bökens (1984).

Südostwind vornehmlich dem Kaltluft-Abfluss aus dem Zartener Becken zuzuordnen ist. Dieser Wind wird auch als „Höll[en]täler“ bezeichnet, wobei Gross (1989) darauf hinweist, dass nach seinen Simulationsergebnissen diese Luft überwiegend aus dem (östlich des Schauinsland befindlichen) Bruggatal und nicht aus dem engen Höllental stammt. Die nördlichen und nordwestlichen Winde dürften teils die Taleinwinde des thermischen Windsystems, teils großräumiger Wind sein. Dazu sollte man bedenken, dass vor allem bei stabiler Atmosphäre der Wind im Oberrheingraben kanalisiert ist, wobei großräumige Westwinde zu Südwind, großräumige Ostwinde zu Nordwind im Rheingraben führen (Malberg und Bökens, 1984).

Die erwähnte Simulation von Gross (1989) wurde mit dem nichthydrostatischen Modell FITNAH mit einer horizontalen Gitterweite von 500 m und 28 vertikalen Schichten (extrem hohe Auflösung von 5 m in Bodennähe bis auf 30 m, Modell-Obergrenze bei 7000 m) durchgeführt. Das Modellgebiet war ca. 25 km groß und es wurden idealisierte Rand- und Anfangsbedingungen verwendet. Weiters wurde ein städtischer Zusatzwärmestrom von 50 Wm^{-2} angesetzt. Die Ergebnisse wurden nicht direkt mit Beobachtungen verglichen, erscheinen jedoch sehr plausibel.

Die beschriebenen Phänomene, welche die Windverteilung in Freiburg charakterisieren, lassen sich auch aus Abb. 2.2 ablesen. Wenn wir zunächst die Lagen mit schwachem großräumigem Wind betrachten, so ist die Windrichtung in Freiburg tagsüber nur wenig von jener des großräumigen Windes abhängig, und kommt zumeist aus Nord bis Nordwest, nur bei Westwind oben ist auch unten häufig reiner West- oder gar Südwestwind zu finden. Nachts finden wir entweder Winde aus Südost bis Süd (dies entspricht Kaltluftabfluss) oder – bevorzugt bei Nord- und Ostlagen – Wind von Nord bis Nordost,

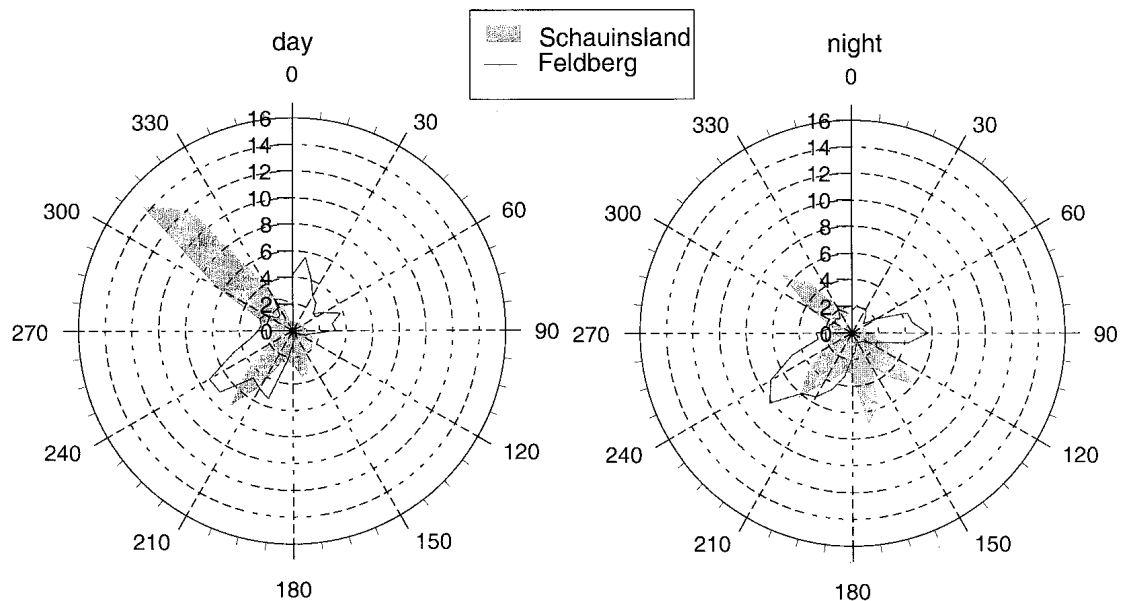


Abbildung 2.3: Windrosen am Schauinsland und Feldberg im Sommer: tags (links) und nachts (rechts). Aus Volz-Thomas et al. (2000). Vermutlich bedeutet tags und nachts hier nicht den ganzen Tag und die ganze Nacht sondern nur kurze Intervalle oder Einzeltermine. [Anm. d. Verf.]

der eher der regionalen kanalisierten Strömung des Rheingrabens entspricht. Bei stärkerem geostrophischen Wind ist bei Nordlagen auch in Freiburg Nordwind zu finden, bei Ostlagen verteilt sich der Wind auf Nord bis zu Südost. Bei Südlagen finden wir interessanterweise Winde aus Südost bis Ost, die vermutlich als Kaltluftabfluss interpretiert werden können. Bei Westlagen schließlich tritt der charakteristische, auch in Freiburg stärkere Südwestwind (siehe auch Abb. 2.1) auf. Tagsüber ist praktisch kein Südostwind zu finden, was die Interpretation des nächtlichen Südostwindes als Kaltluftabfluss auch für Lagen mit stärkerem großräumigen Wind stützt. Vielmehr überwiegt bei Süd- und Westwind in der Höhe in Freiburg der Südwestwind, bei Nord- und Ostwind findet sich unten meist Nordwind.

Deutlich anders sind die Verhältnisse auf den Bergen. Abbildung 2.3 vergleicht Windrosen am Schauinsland und am Feldberg tagsüber und nachts. Am Feldberg, wo der Windmast auf einem freien Gipfel steht, ist unabhängig von der Tageszeit Südwest die Hauptwindrichtung. Als zweite häufige Windrichtung finden wir tags Nordnordost, nachts aber Ost. Im Gegensatz dazu ist am Schauinsland tags Südwest wesentlich seltener als Nordwest, eine Richtung, die am Feldberg nur wenig auftritt. Dieser Nordwestwind ist auch nachts zu finden, aber mit wesentlich geringerer Häufigkeit. Südwestwind ist am Schauinsland die zweithäufigste Windrichtung und tags wie nachts etwa gleich häufig. Winde aus dem Südostsektor treten vornehmlich nachts auf, während Winde aus dem Nord- und Ostsektor in dieser Auswertung nicht auftreten. Volz-Thomas et al. (2000) identifizieren den Nordwestwind am Schauinsland als den Taleinwind aus dem Großen Tal und stellen auch fest, dass dieser im Winter wesentlich seltener auftritt und dann ohne Bevorzugung einer Tageszeit. Das heißt, der Nordwestwind kann einerseits die Folge der Kanalisierung des großräumigen Windes in der Sattellage der Station

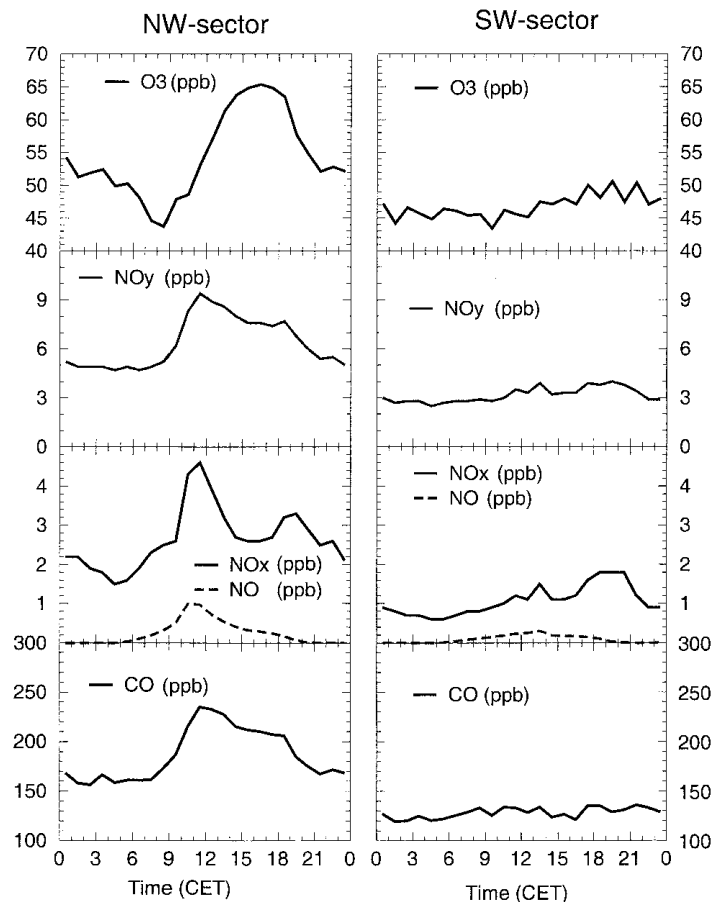


Abbildung 2.4: Mittlerer Tagesgang von O_3 , NO_y und CO im Sommer für die beiden Hauptwindsektoren am Schauinsland. Aus Volz-Thomas et al. (2000).

sein, andererseits der charakteristische Wind für die Taleinwindphase (zumindest ihren zweiten Teil, siehe unten).

Volz-Thomas et al. (2000) zeigen auch den mittleren Tagesgang verschiedener chemischer Komponenten in Abhängigkeit von der Windrichtung am Schauinsland (Abb. 2.4). Bei Südwestwind sind alle Tagesgänge sehr schwach ausgeprägt, bei NO_x ist noch am ehesten ein richtiges Maximum zu finden, und zwar am Abend. Anders bei Nordwestwind: abgesehen vom Ozon, bei dem auch lokale Produktion wichtig ist, weisen hier die Tagesgänge einen plötzlichen Anstieg ab etwa 9 Uhr auf, und erreichen zu Mittag ihr Maximum, nach dem die Konzentrationen bei NO_x rasch, bei den langlebigen Komponenten CO und NO_y aber zunächst nur langsam abfallen. Am Abend, in Verbindung mit der Umkehr des tagesperiodischen, thermisch getriebenen Windsystems fallen die Konzentrationen deutlich ab.

Aus diesem Grund wurde im Rahmen der CO_2 -Untersuchungen, die auf großräumige Repräsentanz ausgerichtet sind, eine strikte Filterfunktion verwendet, welche Messwerte tagsüber ausschließt (siehe Abschnitt 2.4 bzw. Schmidt et al. (2003)). Für die Messungen von Radioxenon und radioaktivem Aerosol des BfS ist jedoch nur eine 24-stündige Auflösung gegeben. Daher besteht ein großes Interesse, die Herkunft der Luftmassen auch unter den Bedingungen des thermischen Taleinwindes modellmäßig beschreiben zu können, und auch, oder zumindest wenigstens, angeben zu können,

wann ein großräumiges Modell akzeptable Daten über die Luftmassenherkunft liefern kann und wann nicht.

Im Rahmen von SLOPE96 fanden zwei äußerst intensiv mit Messungen begleitete Kampagnen statt (vom 4.–6. Juni und am 27. Juni 1996, die berichteten Ergebnisse beziehen sich auf den 5. Juni), wobei am Vormittag im Bereich der Engstelle zwischen Freiburg und Zartener Becken ein künstlicher Tracer freigelassen wurde (Kalthoff et al., 2000). Das Verhalten dieses Tracers wurde dann mit dem KAMM-DRAIS Modellsystem erfolgreich simuliert (Fiedler et al., 2000). Wie Kalthoff et al. (2000) an Hand von Beobachtungen zeigen, etablierte sich an diesem sommerlichen Schönwettertag das Taleinwindregime zwischen 5 und 9 Uhr MEZ (zu letzterem Zeitpunkt war es voll ausgeprägt) und es endete zwischen 19 und 20 Uhr zugunsten des Nachtregimes. Während die Talstationen wie Kappel und Ebnet im wesentlichen nur diese beiden Phasen zeigen, ist am Schauinsland sowie an der weiter unten am Nordostkamm des Schauinsland eingerichteten Messstelle Rappeneck ein komplexerer Tagesverlauf zu beobachten. Um 9 Uhr dreht der Wind am Schauinsland von Ost auf Nordost, am Rappeneck bleibt der Ostwind, nimmt aber um 9 Uhr deutlich an Geschwindigkeit ab. Erst zwischen 11.30 und 13.00 dreht der Wind an diesen beiden Stationen auf Nordwest (Abb. 2.5). Von Kalthoff et al. (2000) und Fiedler et al. (2000) wird dies so interpretiert, dass sich der Hangauf-/Taleinwind zwischen Rheingraben und Schwarzwald im Laufe des Tages nach Osten vorschiebt.

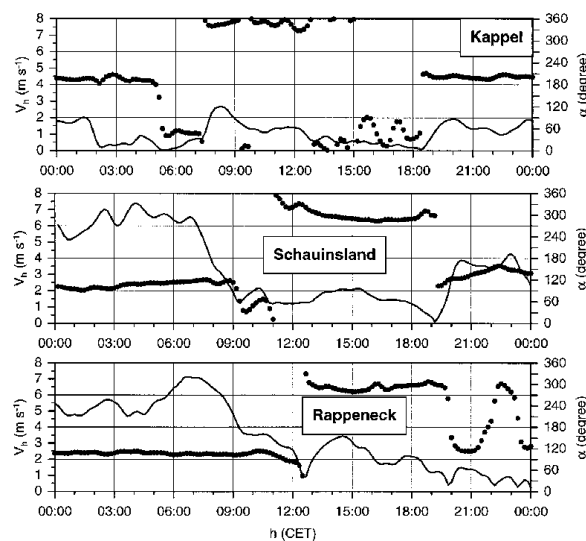


Abbildung 2.5: Windbeobachtungen in Ebnet (Zartener Becken), am Schauinsland und am Rappeneck (Nordostkamm des Schauinsland) am 5. Juni 1996. Die Punkte zeigen die Windrichtung, die Linien die Windgeschwindigkeit an. Aus Kalthoff et al. (2000).

Wir halten eine andere Interpretation für naheliegender: Am Vormittag werden die Osthänge des Schauinsland Richtung Bruggatal am stärksten von der Sonne beschienen, während der Hang vom Schauinsland und auch vom Rappeneck ins Große Tal (Kappeler Tal) nordwest-orientiert ist und daher wenig Strahlungsenergie erhält. Deshalb ist am Vormittag der Hangwind am Osthang stärker entwickelt und dominiert an den Kammstationen. Ab Mittag erhalten die steilen Hänge des eng eingeschnittenen, in Nord-Süd-Richtung verlaufenden Großen Tals mehr Energie und nun dominiert am Kamm des Schauinsland das Windsystem dieses Tals. Auch die Simulationen von

Fiedler et al. (2000) (Abb. 2.6) passen zu dieser Interpretation. Ein gewisser Widerspruch ist zwischen den Abbildungen 2.3 und 2.5 festzustellen. Der Nordostwind, welcher nach Abb. 2.5 während des Vormittags am Schauinsland gefunden wurde, ist eine Richtung, die in Abb. 2.3 gar nicht vorkommt. Deshalb vermuten wir, dass die Windrose von Volz-Thomas et al. (2000) nicht den gesamten Zeitraum tagsüber wiedergibt, sondern vielleicht 12-15 Uhr, oder einen bestimmten Tag-Termin.

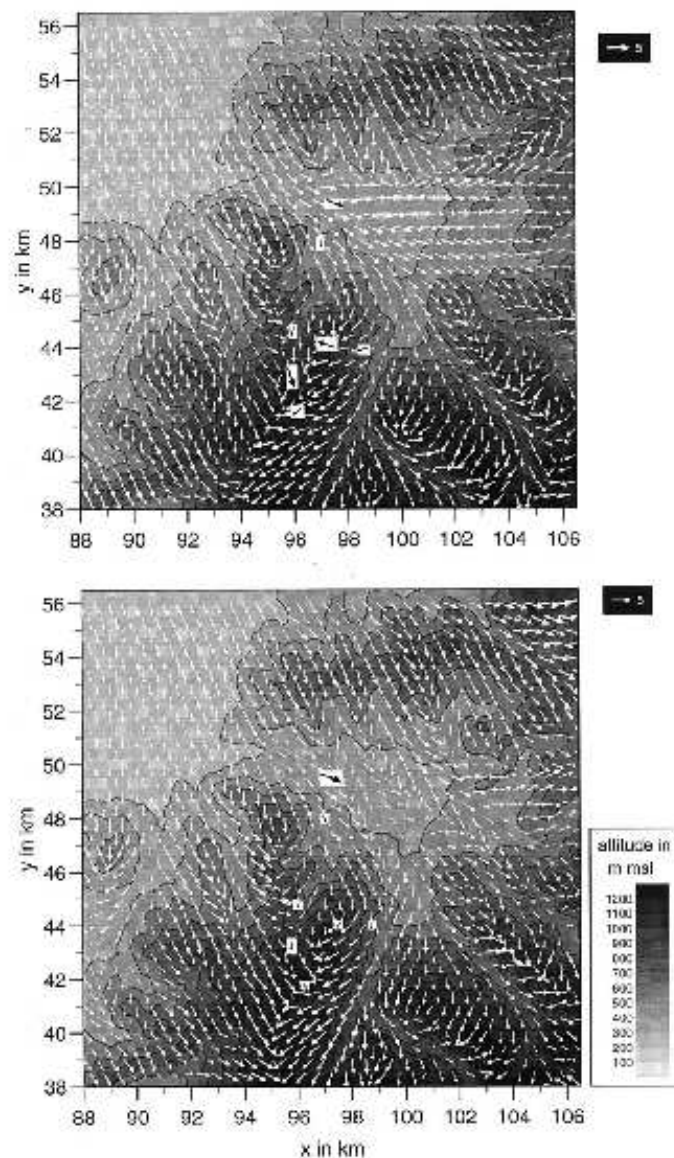


Abbildung 2.6: Mit KAMM modellierte Windverteilung am Boden um 10 MEZ (oben) und 13 MEZ (unten) im Bereich Freiburg – Zartener Becken – Schauinsland am 5. Juni 1996. Die Pfeile in den weissen Kästchen geben die Windbeobachtungen wieder. Aus Fiedler et al. (2000).

3 Stationsbesichtigung

Die im Arbeitsprogramm vorgesehene Stationsbesichtigung fand am 28.10.2005 statt. Bereits am Vormittag konnten die Vertreter des Auftragnehmers anlässlich der Projektbesprechung am BfS Freiburg diesen Standort sehen, an dem Messungen von Radon-222 durchgeführt werden. Weiters wurden folgende Beobachtungsstationen besucht:

1. Messstelle Freiburg-Mitte des Landesamts für Umweltschutz (LfU)
2. Wetterstation Freiburg des Deutschen Wetterdienstes (DWD)
3. Observatorium Schauinsland des Umweltbundesamtes (UBA)
4. Messstelle Schauinsland des BfS bzw. der CTBTO
5. Messstelle Freiburg-Straße des LfU

Der Besuch diente vor allem dazu, die Repräsentativität und die möglichen Einflüsse durch die Umgebung, sei es im Hinblick auf die Meteorologie oder auf Quellen von Spurenstoffen, einschätzen zu können. Daneben bot er die Möglichkeit, das Untersuchungsgebiet persönlich kennenzulernen, was für die Arbeit mit von den lokalen topographischen und anderen Verhältnissen beeinflussten Phänomene stets von großem Nutzen ist. Die Lage der besuchten Stationen ist aus den Abbildungen 3.1 (Überblick), 3.2 (Freiburg) und 3.5 (Schauinsland) ersichtlich.

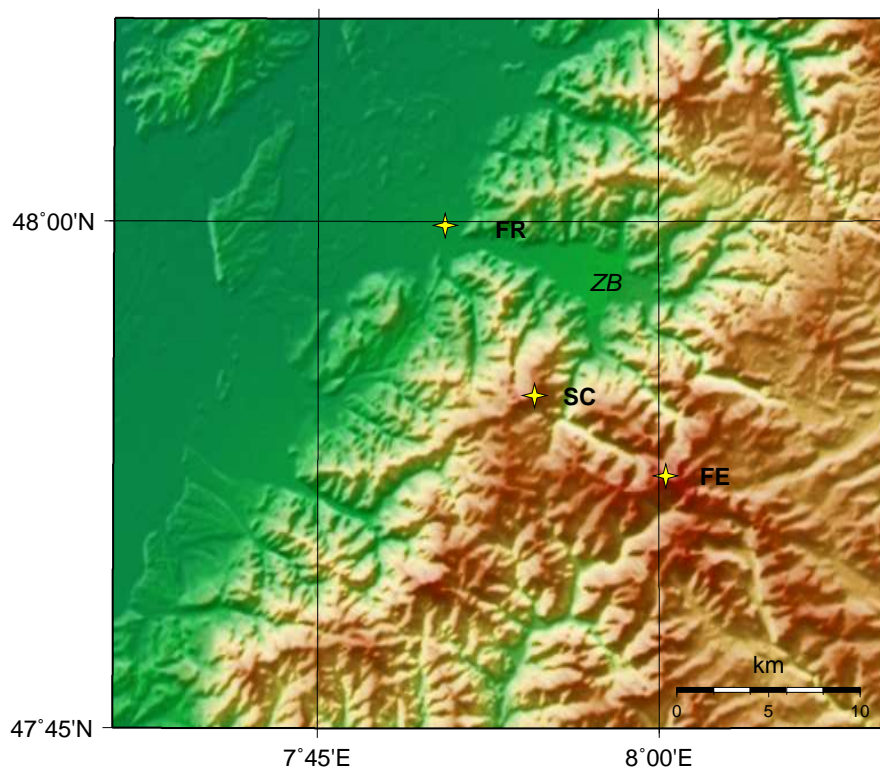


Abbildung 3.1: Topographie der Region Freiburg–Feldberg. Legende: FR = Freiburg (Wetterstation DWD), SC = Schauinsland (UBA-Station), FB = Feldberg (Wetterstation DWD), ZB = Zartener Becken. Datenbasis: 3" SRTM Geländehöhenmodell.

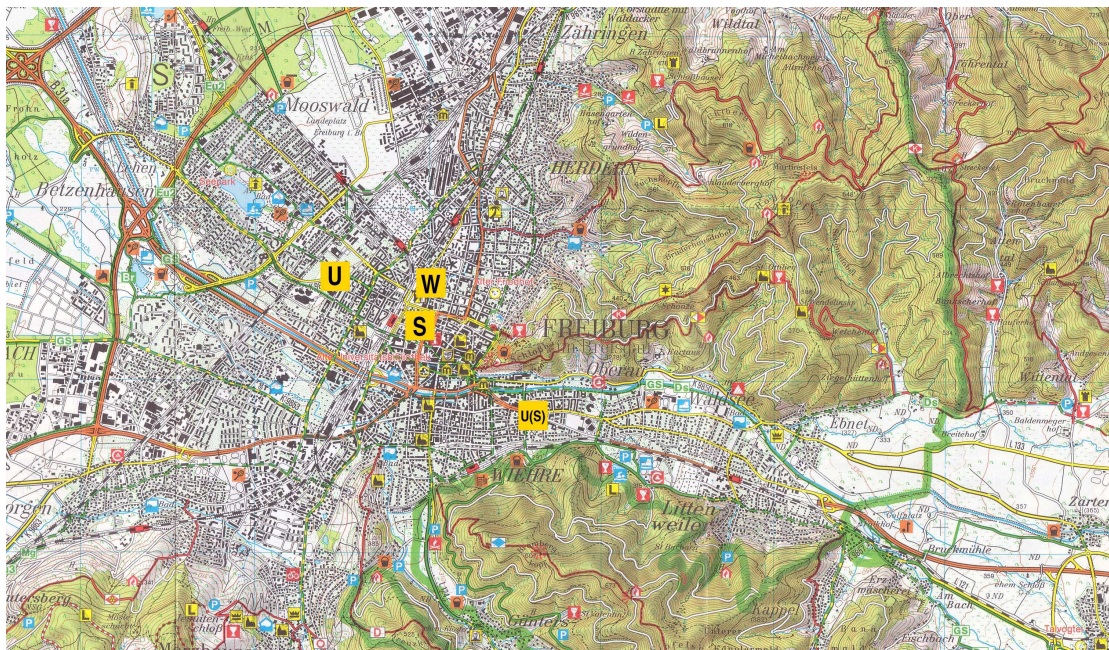


Abbildung 3.2: Landkarte von Freiburg mit den relevanten Stationen (U = LfU Luftgütestation Freiburg-Mitte, W = DWD-Wetterstation Freiburg, S = BfS-Station Freiburg, U(S) = LfU Luftgütestation Freiburg-Straße). **Grundlage: Freizeitkarte 505 (Topographische Karte 1:50.000, hier verkleinert auf ca. 1:160 000) © Landesvermessungsamt Baden-Württemberg (www.lv-bw.de), Az.: 2851.2-D/5762.**

Auch konnte bei dieser Gelegenheit ein Gespräch mit dem Leiter des UBA-Observatoriums am Schauinsland zur gegenseitigen Information geführt werden.

3.1 LfU-Messstelle Freiburg-Mitte

Die Luftgüte-Messstelle (Abb. 3.3) liegt zwischen dem teilweise begrünten Besucher-/Mitarbeiter-Parkplatz des sogenannten Technischen Rathauses der Stadt Freiburg (ein Flachbau) und einer Kleingartenanlage im Westen der Stadt, bereits etwas außerhalb des Zentrums. Eine größere Straße führt in ca. 100 m Abstand vorbei. Insgesamt erscheint die Lage der Station günstig im Hinblick auf Schadstoffmessungen sowie Temperatur- und Feuchtemessungen. Die Windmessungen könnten durch Bäume mit etwa derselben Höhe wie der Windmast sowie durch das etwas höhere Rathausgebäude beeinflusst sein. Die Windmessung sollte daher eher von der DWD-Station genommen werden. Die Seehöhe der Station beträgt 260 m.

3.2 Wetterstation Freiburg des DWD

Die Station (Abb. 3.4) liegt nicht weit vom Bahnhof im Bereich des Stadtzentrums. Der Messgarten befindet sich zwischen verschiedenen großen Gebäuden und in unmittelbarer Straßennähe. Die LfU-Station kommt einer meteorologischen Standardaufstellung näher. Die Windmessung wird auf dem Dach des 10-stöckigen Amtsgebäu-



Abbildung 3.3: Die Station Freiburg-Mitte des LfU.



Abbildung 3.4: Die Station Freiburg des DWD. Der Windmast befindet sich auf dem Dach des hohen Gebäudes, der Messgarten im Vordergrund ist in der rechten Abbildung im Detail zu sehen.

des durchgeführt, welches das höchste Gebäude in unmittelbarer Nähe sein dürfte. Dadurch ist eine verhältnismäßig ungestörte Anströmung gegeben, allerdings ist die Messhöhe mit ca. 30 m deutlich über dem normalen Standard von 10 m, was bei der Interpretation und Vergleich mit Modellrechnungen zu berücksichtigen sein wird. Die Seehöhe der Station beträgt 300 m (einschließlich Gebäudehöhe).

3.3 LfU-Messstelle Freiburg-Straße

Die Station liegt in der Engstelle des Höllentales zwischen dem Zartener Becken im Osten und der Ausmündung ins Rheintal in Freiburg (Abb. 3.2). Sie wäre daher sehr geeignet, die nächtlichen Kaltluftabflüsse durch dieses Tal zu beobachten. Leider sind von dieser Station keine Winddaten verfügbar. Die Station steht direkt bei einer mehrspurigen Einfallstraße, die luftchemischen Messungen sind daher im wesentlichen von den Straßenemissionen beeinflusst. Daher ist es nicht sinnvoll, sie in diesem Projekt zu nützen.

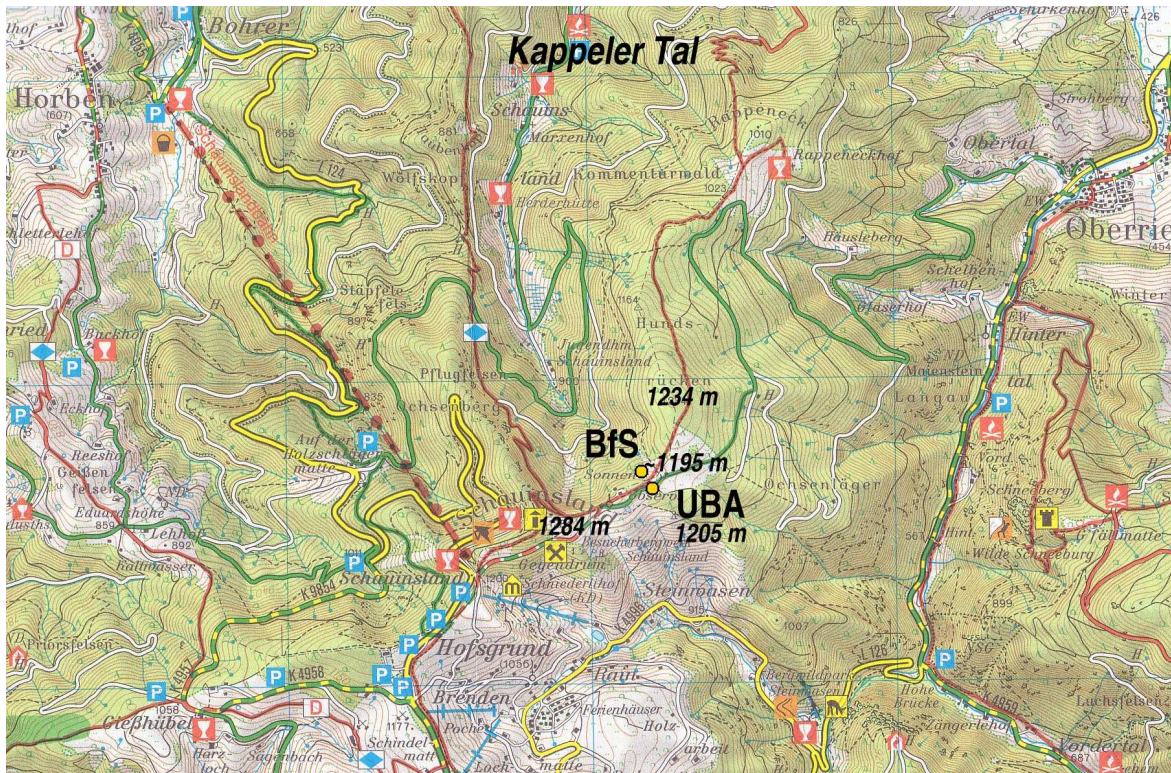


Abbildung 3.5: Landkarte des Schauinsland mit der Station des Umweltbundesamts (UBA) und des BfS. Zur Orientierung sind noch einige Höhenkoten hervorgehoben. Östlich der Station ist ein Teil des Brugggatales zu sehen. **Grundlage: Freizeitkarte 505 (Topographische Karte 1:50.000) © Landesvermessungsamt Baden-Württemberg (www.lv-bw.de), Az.: 2851.2-D/5762.**

3.4 Observatorium Schauinsland des UBA

Das Observatorium (Abb. 3.5 und 3.6) liegt in 1205 m Seehöhe etwas unterhalb des Gipfels des Schauinsland (750 m nordöstlich, 80 m tiefer) auf einer abfallenden, von Wald umgebenen Wiese. Zusätzlich zu dem standardmäßigem 10-m-Windmast wird seit ca. einem Jahr auch eine Windmessung auf einem 20 m hohen Mast betrieben. Nach Aussage des Stationsleiters, Herrn Meinhardt, liegen dort die Windgeschwindigkeiten in etwa 30% höher. Die Richtungsverteilung soll ähnlich sein. Kurz nach dem Observatorium bildet der Nordostkamm des Schauinsland einen flachen Sattel, nach dem er nochmals ca. 40 m ansteigt. In diesem Sattel mündet von Norden her ein etwa 7 km langes Seitental des Höllentals mit 1-2 km Breite, Großes Tal oder Kappeler Tal genannt (Abb. 3.7, links). Diese Sattellage bewirkt eine gewisse Kanalisierung des Windes an der Station Schauinsland. Aus diesem Grund wird im gegenständlichen Projekt für die Charakterisierung der großräumigen Strömung vorzugsweise die Windmessung der DWD-Wetterstation am Feldberg verwendet. Diese Station liegt in 8.5 km Luftlinie Entfernung nordöstlich des Schauinsland-Observatoriums, unmittelbar



Abbildung 3.6: Die Station Schauinsland des Umweltbundesamts. Links ist der Messgarten zu sehen, rechts aus etwas größerer Entfernung der 10-m-Windmast im Vordergrund und der 20-m-Mast im Hintergrund, und am Bildrand das Stationsgebäude. Blick nach Südosten.



Abbildung 3.7: Diese beiden Bilder sind etwas oberhalb des UBA-Observatoriums Schauinsland aufgenommen, wo die Zufahrtsstraße direkt an den Kamm heranführt. Im linken Bild ist das Kappeler Tal (Großes Tal) mit Blick nach Norden zu sehen, im rechten schaut man in Richtung Südosten zum Feldberg mit seinem Gipfelobservatorium des DWD hinüber.

am Gipfel der höchsten Erhebung des Schwarzwaldes, in 1486 m Seehöhe (Abb. 3.1 und 3.7, rechts).

Nach den Aussagen der lokalen Wissenschaftler ist ein mittägliches Maximum von NO_x charakteristisch, das durch den Herantransport von Luft aus dem Raum Freiburg bzw. dem Rheintal durch die Hangaufwinde verursacht wird. Damit geht eine charakteristische Winddrehung auf Nordwest einher, welche anzeigt, dass diese Winde vornehmlich durch das Kappeler Tal die Station erreichen (siehe auch Kalthoff et al., 2000; Fiedler et al., 2000).

Die Station ist eine Regionalstation des GAW-Messnetzes und Bestandteil des Messnetzes von CarboEurope (Ansprechpartnerin: Ingeborg Levin, Institut für Umweltp Physik der Universität Heidelberg). Für diesen Verwendungszweck werden die Daten gefiltert: nur Nacht-Daten (22-06 Uhr MEZ) bei mindestens 2.5 ms^{-1} Wind im Sommer und mindestens 3.5 ms^{-1} im Winter werden verwendet. Darüber hinaus müs-

sen in einer solchen Nacht mindestens acht Halbstunden gefunden werden, welche diese Bedingung erfüllen, und darüber hinaus darf die Standardabweichung des CO₂-Mischungsverhältnisses während dieser Zeitintervalle nicht mehr als 1.5 ppm betragen (Schmidt et al., 2003). So soll erreicht werden, dass der Einfluss von Quellen in der näheren Umgebung minimiert wird. Involviert in die Auswertung der Daten sind weiters M. Jordan vom Max-Planck-Institut für Biogeosphärenchemie in Jena, das LSCE in Frankreich, und Alex Vermeulen (Petten / NL) mit Trajektorienberechnungen.

Die Station war auch im Tropospheric Ozone Research Projekt (TOR) im Rahmen von EUROTRAC beteiligt. Die SLOPE-Kampagne (siehe Kapitel Literaturstudien) fand im Rahmen von TOR statt. Aus Sicht der Stationsbetreiber wäre eine Einteilung nach für den Spurenstoff-Transport relevanten Wetterlagen interessant; Ideen wären zum Beispiel Clusterung von FORs, die vom IDC der CTBTO/PTS berechnet werden, oder der TOR-Trajektorien).

Zur Meteorologie des Schauinsland sind weitere Informationen im folgenden Kapitel über die Ergebnisse der Literaturrecherche enthalten.

3.5 Observatorium Schauinsland des BfS

Das radiologische Observatorium des BfS (Abb. 3.5 und 3.8) befindet sich ca. 150 m nordwestlich des UBA-Observatoriums in unmittelbarer Nähe des Waldrandes und der Kante des nordwest-exponierten steilen, waldbestandenen Hanges, welcher ins Kappeler Tal hinunterführt. Der Einfluss des Hangauf- bzw. Taleinwindes aus dem Kappeler Tal dürfte hier also noch etwas stärker ausgeprägt sein als an der UBA-Station.



Abbildung 3.8: Die Station Schauinsland des Bundesamts für Strahlenschutz. Rechts ist der Messcontainer für die CTBTO-Messungen zu sehen, links das Stationsgebäude. Im rechten Bild (Nahaufnahme des Containers) erkennt man den Luftansaugstutzen in der Mitte und links davon ein Ultraschallanemometer. Der Blick ist in etwa nach Norden gerichtet.

4 Beobachtungsdaten

Für die Auswahl der radiologisch bzw. meteorologisch interessanten Episoden bedarf es einer Anzahl an Eingangsdaten. Für das gegenständliche Projekt wurden dabei Daten von verschiedenen Stellen erhalten und aufbereitet. Im wesentlichen mussten die Messgrößen, die teilweise als Exceldateien übermittelt wurden, so bearbeitet werden, dass sie mit Unix/Linux Tools (z. B. awk, sed) und Fortran Programmen weiter verarbeitet werden können. Sodann wurden die somit in reinem ASCII vorliegenden Dateien in ein einheitliches Datenformat umgewandelt, das bei BOKU-Met schon für verschiedene andere Projekte eingesetzt wurde. Dabei wurde für jede Station eine Datei erstellt, in der alle verfügbaren Parameter spaltenweise abgelegt wurden und mit Kopf, der die Parameter, die Einheiten und einen optionalen Kommentar enthält, zusammengeführt. Da in einigen Datenbeständen die einen oder anderen Parameter fehlten, bzw. nicht gemessen wurden (z. B. relative Feuchte oder Taupunkttemperatur), mussten diese zusätzlich berechnet werden.

Für die Klassifikation der Wetterlagen waren noch zwei Parameter von Interesse, mit denen die atmosphärische Stabilität beschrieben werden kann, nämlich die potentielle Temperatur (θ) und die äquivalentpotentielle Temperatur (θ_e). Diese beiden Größen werden wie folgt berechnet:

$$\theta = T \cdot (1000 \text{ hPa} / p)^{0.286}$$

$$\theta_e = \theta \cdot e^{(2490 \cdot r / T)}$$

wobei das Mischungsverhältnis r mit

$$r = 0.622 \cdot [e / (p - e)]$$

und der Dampfdruck über Wasser e mit

$$e(t_d) = 6.11 \text{ hPa} \cdot 10^{[7.5t_d / (237.3 + t_d)]}$$

berechnet wird; dabei ist T die absolute Temperatur (in K) und t_d die Taupunkttemperatur in °C, p ist der Luftdruck in hPa.

Die potentielle Temperatur ist jene Temperatur, die ein Luftpaket annimmt, wenn es adiabatisch auf einen Druck von 1000 hPa gebracht wird. (Angenähert kann sie auch als ein Zuschlag von 1° pro 100 Höhenmeter über NN berechnet werden.) In einer adiabatisch durchmischten Luftschicht ist daher die potentielle Temperatur mit der Höhe konstant. In einer stabilen Schichtung nimmt sie mit der Höhe zu, und zwar umso mehr, je stabiler die Schichtung ist. Auch eine Schichtung, in der die Temperatur z. B. um 0.5 K pro 100 m abnimmt ist bereits eine stabile Schichtung, da dann θ um 0.5 K pro 100 m zunimmt. Die äquivalent-potentielle Temperatur ist dann vertikal konstant, wenn die Luft unter Sättigungsbedingungen durchmischt wird.

Im nächsten Arbeitsschritt wurden mit Hilfe des Open-Source Programmes Generic Mapping Tools (GMT, <http://gmt.soest.hawaii.edu/>), Zeitreihen, Windrosen und die in Abbildung 3.1 dargestellte Landkarte produziert. Dieses Tool ist eine Programmsammlung von ca. 50 verschiedenen Befehlen, mit denen Zeitreihen, topographische, bzw. geologische Karten direkt aus der Unix-Shell oder in Scripts verarbeitet werden können. Somit wurde für jeden darzustellenden Parameter ein Script geschrieben, das im sogenannten Batch-Modus die diversen Grafiken produziert, ohne dass eine Nachbearbeitung notwendig wird.

Da für einzelne Messstationen Daten aus verschiedenen Datensätzen verfügbar sind (z. B. Freiburg), wurde aufgrund der Stationsbesichtigung (siehe Abschnitt 3.1) entschieden, dass für Freiburg alle Parameter aus dem LfU-Datensatz Freiburg-Mitte verwendet werden, die Windrichtung und Windgeschwindigkeit aber durch die DWD-Station Freiburg ersetzt werden.

4.1 LfU-Daten

Im Oktober 2005 wurde versucht, von der Internetseite der LfU Baden-Württemberg http://www2.lfu.baden-wuerttemberg.de/brs-web/home.cweb?FILTER_VIEW=none&AUTO_ANONYMOUS_LOGIN halbstündliche Luftmessdaten der Station Freiburg-Mitte zu erhalten. Da zu diesem Zeitpunkt die Abfrage über die Internetseite nicht funktionierte, wurden die Daten, die in Tabelle 4.1 ersichtlich sind, dankenswerter Weise vom Auftraggeber (Herr Zähringer) durch eine direkte Anfrage an das LfU besorgt.

Mit Ausnahme der PM₁₀-Daten, die als 24-stündige Mittelwerte vorliegen, haben die restlichen Parameter eine halbstündige Auflösung und wurden für den Zeitraum 1. Jänner 2004 bis 28. November 2005 gesammelt.

Für die in diesem Bericht enthaltenen Zeitreihendarstellungen von CO wurde die Konzentration mit der Formel

$$\text{CO [ppbv]} = \frac{28.01 \cdot 10^3}{28.96 \cdot 1.2} \text{CO [mg m}^{-3}\text{]}$$

in Volumsmischungsverhältnis umgewandelt, unter der Annahme dass sich die Konzentration auf Standardbedingungen von 1013,25 hPa und 20°C bezieht.

4.2 UBA-Daten

Die Daten der UBA-Messstelle am Schauinsland (47° 54' 51" N, 07° 54' 32" E, 1205 m NN) wurden am 28. Dezember 2005 per E-mail als Exceldatei vom UBA erhalten. Die erhaltenen Daten erstrecken sich dabei über den Zeitraum 1. Jänner 2000 bis 30. November 2005. Die zeitliche Auflösung der Daten beträgt 30 Minuten. Tabelle 4.2 zeigt eine Übersicht der einzelnen übermittelten Parameter und deren Einheiten.

4.3 Xenon-133 Daten

Die Radioxenon-Daten für die Stationen Schauinsland wurden am 11. November 2005 dem Auftragnehmer als Exceldatei vom Auftraggeber (Herr Zähringer) übermittelt. In der Exceltabelle sind 24-stündige ^{133}Xe -Daten, in der Einheit Bq m^{-3} , beginnend am 20. Februar 2004 bis einschließlich 24. Oktober 2005 enthalten (siehe Tab. 4.3).

4.4 Radon-Daten

Die Radon-Daten (siehe Tab. 4.3) wurden vom Auftraggeber (Herr Sartorius) als reine ASCII-Dateien aufbereitet und von Herrn Zähringer per E-Mail am 21. November 2005 übergeben. In den übermittelten Dateien, die monatlich organisiert sind, finden sich Werte für $^{222}\text{Radon}$ und $^{212}\text{Polonium}$, in der Einheit Bq m^{-3} , für die Probennahmestellen Freiburg ($47^\circ 59' 56'' \text{ N}$, $7^\circ 50' 52'' \text{ E}$, 276 m NN) und Schauinsland ($47^\circ 54' 57'' \text{ N}$, $7^\circ 54' 29'' \text{ E}$, 1205 m NN) [Anm. d. Auftragnehmers: dies ist dieselbe Höhe wie jene der UBA-Station. Vermutlich liegt die BfS-Station ca. 10 m tiefer]. $^{212}\text{Polonium}$ ist ein kurzlebige Zerfallsprodukt von $^{220}\text{Radium}$ (auch Thoron genannt, da es durch den Zerfall von Thorium analog zu Radon aus Radium entsteht). Das Zwischenprodukt mit der längsten Halbwertszeit nach dem Thoron ist ^{212}Pb , welches somit für die Lebensdauer in der Atmosphäre maßgeblich ist. Die Daten liegen stündlich für den Zeitraum 1. Jänner 2004 bis 31. Oktober 2005 vor.

4.5 Meteorologische Daten der DWD-SYNOP-Stationen

Zusätzlich zu den bereits beschriebenen Daten wurden stündliche meteorologische Messwerte der beiden SYNOP-Stationen Freiburg und Feldberg, welche vom Deutschen Wetterdienst betrieben werden und in die Datenbank der Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik Wien (ZAMG) eingespielt werden, zu der BOKU-Met einen Vollzugriff hat, abgefragt. Im Unterschied zum Monitoringbetrieb bei Luftgütemessstationen werden im SYNOP keine Stundenmittelwerte, sondern Mittel von 10 min für Wind und 2 min für Temperatur kurz vor der vollen Stunden genommen. Die Daten wurden aus der ZAMG SYNOP-Datenbank für den gesamten Zeitraum 2000 bis 2005 für die meteorologischen Parameter, wie sie in Tabelle 4.4 ersichtlich sind, extrahiert.

Tabelle 4.1: Übersicht der Daten der LfU-Station Freiburg-Mitte. Zeitraum der Verfügbarkeit: 1.1.2004–28.11.2005. Zeitliche Auflösung: 30 min, bei PM10 24 h.

CO	mg m ⁻³	O ₃	g m ⁻³
NO	g m ⁻³	NO ₂	g m ⁻³
SO ₂	g m ⁻³	PM10	μg m ⁻³
Temperatur	° C	Taupunktstemperatur	° C
Windrichtung	°	Windgeschwindigkeit	m s ⁻¹
Niederschlag	mm	Globalstrahlung	W m ⁻²

Tabelle 4.2: Übersicht der erhaltenen Daten der UBA-Station Schauinsland. Zeitraum: 1.1.2000–30.11.2005, zeitliche Auflösung 30 min.

NO	μg m ⁻³	TSP	μg m ⁻³
NO ₂	μg m ⁻³	PM10	μg m ⁻³
NO _x	μg m ⁻³	SF ₆	ppt
O ₃	μg m ⁻³	Temperatur	° C
SO ₂	μg m ⁻³	Windgeschwindigkeit	m s ⁻¹
CO ₂ IR	ppm	Windrichtung	°
CO ₂ GC	ppm	rel. Luftfeuchte	%
CH ₄	ppb	Niederschlag	mm
CO	ppb	Globalstrahlung	W m ⁻²
N ₂ O	ppb	Luftdruck	hPa
PAN	ppt		

Tabelle 4.3: Übersicht der Daten von Radionuklidkonzentrationen

Parameter	Einheit	HWZ	zeitliche Auflösung	Zeitraum
Freiburg BfS				
²²² Rn	Bq m ⁻³	3.825 d	1 h	01.01.2004-31.10.2005
Schauinsland BfS				
²²² Rn	Bq m ⁻³	3.825 d	1 h	01.01.2004-31.10.2005
²¹² Po	Bq m ⁻³	[10.6 h]	1 h	01.01.2004-31.10.2005
¹³³ Xe	Bq m ⁻³	5.25 d	24 h (06-06 UTC)	20.02.2004-24.10.2005

Tabelle 4.4: Übersicht der meteorologischen Parameter der DWD-Stationen 10803 Freiburg (48° 00' N, 7° 51' E, 300 m) und 10908 Feldberg (47° 53' N, 08° 00' E, 1486 m)

Windrichtung	°
Windgeschwindigkeit	1/10 m s ⁻¹
Temperatur	1/10 °C
Taupunktstemperatur	1/10 °C
Stationsluftdruck	hPa
auf Meeresniveau reduzierter Luftdruck	hPa

5 Auswahl und Charakterisierung der Episoden

5.1 Auswahl der Episoden

Gemäß dem Projektplan wurde eine Anzahl von Episoden ausgewählt, die die interessierenden Wetterlagen möglichst gut abdecken sollten und zugleich von ihrem Umfang her im Rahmen der gegebenen Ressourcen bewältigbar sein mussten. Dabei hat der Auftraggeber eine Vorauswahl von Episoden getroffen, die aus radiologischer Sicht besonders interessant sind. Da das Xenon-Monitoring am Schauinsland seit Februar 2004 läuft, war der Zeitraum von diesem Datum bis etwa zur Übermittlung der Episodenliste im Herbst 2005 besonders zu berücksichtigen. Diese Episoden sind in Tab. 5.1 zusammen gestellt; zumeist handelt es sich dabei um Ereignisse, die durch erhöhte Radioxenon-Konzentrationen gekennzeichnet sind.

Tabelle 5.1: Vom Auftraggeber übermittelte Liste von aus radiologischer Sicht interessanten Episoden. Die eingerahmten Episodennummern bezeichnen jene, die für die Endauswahl berücksichtigt werden konnten.

Episode	Zeitraum	Begründung	Bemerkung	Priorität
1	1. Juli 2004	Lanthan-140 gemessen	Herkunftsgebiet Mittelfrankreich?	2
2	16. Sept. 2004	Hoher Wert gemessen		3
3	6. – 11. Nov. 2004	180 mBq Xe-133 gemessen	Zwei Maxima – Zuordnung zum gleichen Emittenten möglich?	1
4	3. Feb. 2005	170 mBq Xe-133	Quelle KKP	1
5	17. – 26. Juni 2005	Mehrere Maxima	Stärkste Evidenz für einheitliche Quelle	1
6	9. – 11. Aug. 2005	Extremes Verhältnis Xe135/Xe133	Fleurus	1
7	22. – 23. Aug. 2005	Höchster Wert		2
8	1. – 17. Okt. 2005	Lang anhaltende Episode, Xe-131m und Xe-133m gemessen		1

Daneben sollte sicher gestellt werden, dass die aus meteorologischer Sicht relevanten Wetterlagen abgedeckt werden. Daher wurden zunächst die radiologisch interessanten Episoden daraufhin betrachtet, ob sie meteorologisch interessante Wetterlagen enthalten.

Als meteorologisch interessante Lagen werden

- winterliche und sommerliche Hochdrucklagen (mit Inversion bzw. hochreichender konvektiver Grenzschicht) und
- Strömungslagen (Nordwest bis Nord mit Kaltluftadvektion, West, Südwest mit föhniger Tendenz)

betrachtet. Von jeder der meteorologisch interessanten Lagen wurden zwei Episoden gesucht. Dazu wurden die Stationsdaten aus meteorologischer Sicht durchsucht. Die Wetterlagen wurden auch anhand der im Archiv der Wetterzentrale (<http://www.wetterzentrale.de/>) vorhandenen Wetterkarten beurteilt. So wurden die mit den aus radiologischer Sicht interessanten Episoden noch nicht abgedeckten Wetterlagen ergänzt.

Bei der Dauer der Episoden ist zwischen der zu simulierenden Zeitspanne einerseits und den „Rezeptortagen“ andererseits zu unterscheiden. Unter Rezeptortagen sind jene Tage zu verstehen, für die dann Rückwärtsrechnungen mit FLEXPART durchgeführt werden. Da diese zumindest drei Tage zurück reichen sollten, um sinnvolle Ergebnisse zu erhalten, muss die zu simulierende Episode entsprechend länger gewählt werden. Angenommen, der 10.1. sei der erste (oder einzige) Rezeptortag einer Episode. Dann bedeutet das im Sinne der Tabelle 5.2, dass der Sammelzeitraum für die Radionuklidkonzentration in diesem Fall vom 10.1. 06 UTC bis 11.1. 06 UTC reicht, und die FLEXPART-Rechnung von 8.1. 06 UTC bis 11.1. 06 UTC durchgeführt wird. Die MM5-Rechnung ist dann für den Zeitraum 8.1. 00 UTC bis 11.1. 06 UTC zu machen, wobei die ersten 6 h als Spin-up Zeit dienen. Selbstverständlich werden bei längeren Episoden die Herkunftsgebiete für jene Tage, wo dies möglich ist, länger als drei Tage zurück gerechnet.

Die ausgewählten Episoden stehen in Tabelle 5.2. Es fällt auf, dass winterliche Hochdrucklagen offenbar keine radiologisch besonders interessanten Ereignisse liefern. Das ist insofern leicht zu verstehen, als bei diesen Lagen in weiten Teilen Mitteleuropas eine sehr stabile Schichtung mit bodennaher Kaltluft vorherrscht, und die Station Schauinsland daher gar nicht oder nur in geringem Maß von Grenzschichtluft beeinflusst ist. Da die Quellen von radioaktiven Stoffen aber in der Regel in Bodennähe sind, können ihre Emissionen dann nicht zum Schauinsland gelangen.

Tabelle 5.2: Ausgewählte Episoden. Die Wetterlagen sind mit der vorherrschenden Richtung der großräumigen Strömung bezeichnet, H steht für Hochdrucklage. Bei der Dauer ist zuerst die Dauer in MM5-Tagen, dann in Rezeptortagen angegeben.

a) nach Wetterlagen geordnet

Episode	Wetterlage	Datum	Eintrag BfS Tabelle	Dauer [d]
1	W	26.06.–01.07.2004	① 1.7.2004 Lanthan-140 gemessen (Mittelfrankreich?)	6 / 4
2	W	21.12.–24.12.2004	—	4 / 2
3	NW-NE	03.11.–11.11.2004	③ 6.–11.11.2004 180 mBq Xe-133 gemessen, zwei Maxima – Zuordnung zum gleichen Emittenten möglich?	9 / 7
4	NW-NE	31.01.–03.02.2005	④ 3.2.2005 170 mBq Xe-133 Quelle KKP	4 / 2
5	Sommer-H	19.06.–24.06.2005	⑤ 17.–26.6.2005 Mehrere Maxima, stärkste Evidenz für einheitliche Quelle	6 / 4
6	Sommer-H	08.08.–11.8.2005	⑥ 9.–11.8.2005 Extremes Verhältnis $^{135}\text{Xe} / ^{133}\text{Xe}$ – Fleurus	4 / 2
7	SW	12.09.–16.09.2004	② 16.9.2004 Hoher Wert	5 / 3
8	SW	31.01.–08.02.2004	— (Anm.: 3 Rezeptortage unter Episode 10 gezählt)	9 / 4
9	Winter-H	08.12.–17.12.2004	—	10 / 8
10	Winter-H	04.02.–06.02.2004	— (Anm.: Intermezzo der Episode 8)	0 / 3
11	Nordostlage	29.09.–04.10.2005	$^{131\text{m}}\text{Xe}$ und $^{133\text{m}}\text{Xe}$ gemessen	5 / 3
Summe Tage				62 / 42

b) nach Datum geordnet

Episode	Wetterlage	Datum	Eintrag BfS Tabelle	Dauer [d]
8	SW	31.01.–08.02.2004	— (Anm.: 3 Rezeptortage unter Episode 10 gezählt)	9 / 4
10	Winter-H	04.02.–06.02.2004	— (Anm.: Intermezzo der Episode 8)	0 / 3
1	W	26.06.–01.07.2004	① 1.7.2004 Lanthan-140 gemessen (Mittelfrankreich?)	6 / 4
7	SW	12.09.–16.09.2004	② 16.9.2004 Hoher Wert	5 / 3
3	NW-NE	03.11.–11.11.2004	③ 6.–11.11.2004 180 mBq Xe-133 gemessen, zwei Maxima – Zuordnung zum gleichen Emittenten möglich?	9 / 7
9	Winter-H	08.12.–17.12.2004	—	10 / 8
2	W	21.12.–24.12.2004	—	4 / 2
4	NW-NE	31.01.–03.02.2005	④ 3.2.2005 170 mBq Xe-133 Quelle KKP	4 / 2
5	Sommer-H	19.06.–24.06.2005	⑤ 17.–26.6.2005 Mehrere Maxima, stärkste Evidenz für einheitliche Quelle	6 / 4
6	Sommer-H	08.08.–11.8.2005	⑥ 9.–11.8.2005 Extremes Verhältnis $^{135}\text{Xe} / ^{133}\text{Xe}$ – Fleurus	4 / 2
11	Nordostlage	29.09.–04.10.2005	$^{131\text{m}}\text{Xe}$ und $^{133\text{m}}\text{Xe}$ gemessen	5 / 3

5.2 Beschreibung der Episoden

5.2.1 Westlage Juni 2004

26.06.–01.07.2004 | 1.7. Lanthan-140 gemessen | 6 / 4 Tage

Wetterkarten siehe Abb. 5.2, beobachtete Zeitreihen siehe Abb. 5.3 und Windrosen Abb. 5.1.

Der 1.7., Ende der Episode und der Tag an dem das radiologische Ereignis stattfand, ist durch eine Kaltfrontdurchgang gekennzeichnet. In den vorangehenden Tagen wechselten sich jeweils Zwischenhocheinfluss und Frontdurchgänge ab. Dabei lagerte ein mächtiges Tief über dem nördlichen Atlantik, während in der Höhe (500 hPa) eine Westströmung mit Wellen geringer bis mäßiger Amplitude vorherrschte.

Der Wind am Feldberg wechselt zwischen SW und NNW, am Schauinsland treten Winde aus NW und SW auf, und in Freiburg sind alle drei Hauptwindrichtungen vertreten, wobei NNW und ESE relativ viel vorkommen. Die Zeitreihe zeigt an den meisten Tagen ein thermisches Windsystem in Freiburg an. Die Mehrzahl der Tage ist auch mit Schönwetter verbunden, und meist ist es nachts stabil und tagsüber adiabatisch zwischen Freiburg und den Bergstationen.

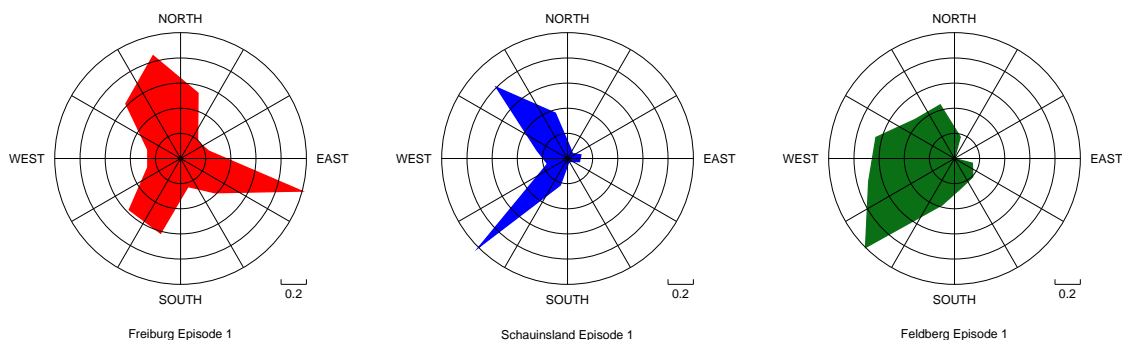
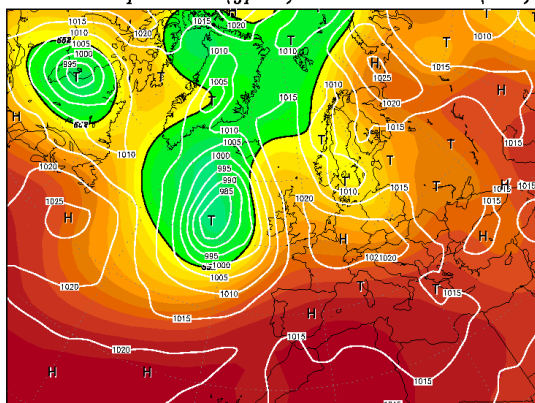


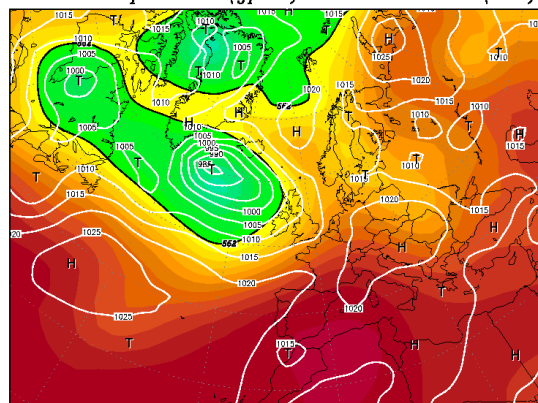
Abbildung 5.1: Häufigkeiten der Windrichtung während der Episode 1. Die Abbildungen sind so skaliert, dass die häufigste Richtung jeweils bis zum äußersten Radius reicht.

26JUN2004 00Z
500 hPa Geopotential (gpm) und Bodendruck (hPa)



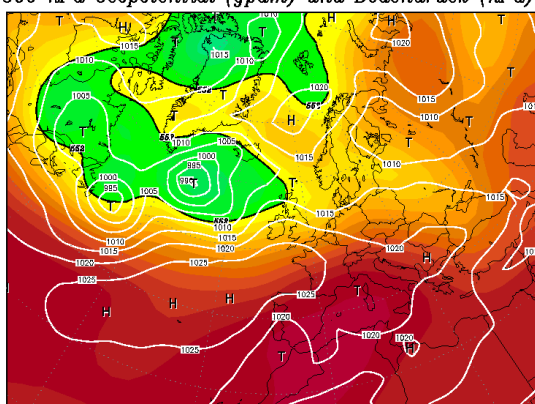
Daten: Reanalysis des NCEP
(C) Wetterzentrale
www.wetterzentrale.de

27JUN2004 00Z
500 hPa Geopotential (gpm) und Bodendruck (hPa)



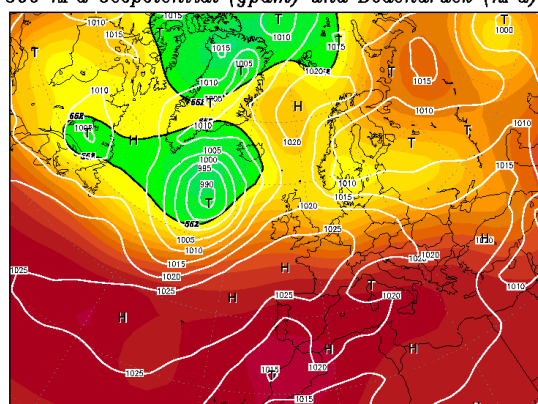
Daten: Reanalysis des NCEP
(C) Wetterzentrale
www.wetterzentrale.de

28JUN2004 00Z
500 hPa Geopotential (gpm) und Bodendruck (hPa)



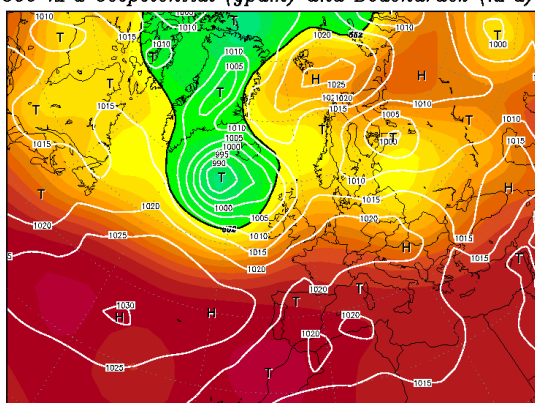
Daten: Reanalysis des NCEP
(C) Wetterzentrale
www.wetterzentrale.de

29JUN2004 00Z
500 hPa Geopotential (gpm) und Bodendruck (hPa)



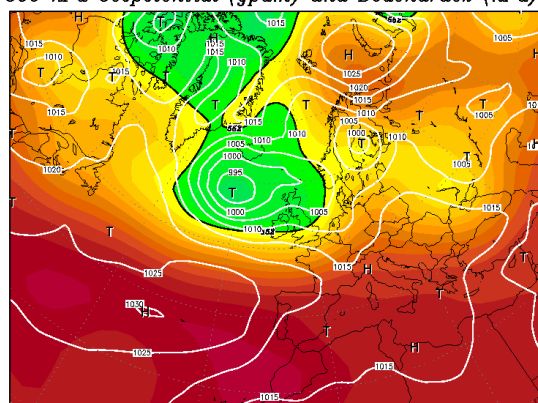
Daten: Reanalysis des NCEP
(C) Wetterzentrale
www.wetterzentrale.de

30JUN2004 00Z
500 hPa Geopotential (gpm) und Bodendruck (hPa)



Daten: Reanalysis des NCEP
(C) Wetterzentrale
www.wetterzentrale.de

01JUL2004 00Z
500 hPa Geopotential (gpm) und Bodendruck (hPa)



Daten: Reanalysis des NCEP
(C) Wetterzentrale
www.wetterzentrale.de

Abbildung 5.2: Wetterkarten für die Episode 1. Auf den Karten ist jeweils die Bodendruckverteilung (weisse Linien) und die Höhe der 500 hPa-Fläche (Farbe) dargestellt, und zwar zum 00 UTC-Termin. Die Karten basieren auf den NCEP-Analysen, die kartenmäßige Darstellung erfolgte durch <http://www.wetterzentrale.de>, von wo sie auch heruntergeladen wurden. Dort sind auch Darstellungen der Temperaturverteilung in 850 hPa verfügbar, die wir aus Platzgründen hier nicht aufgenommen haben.

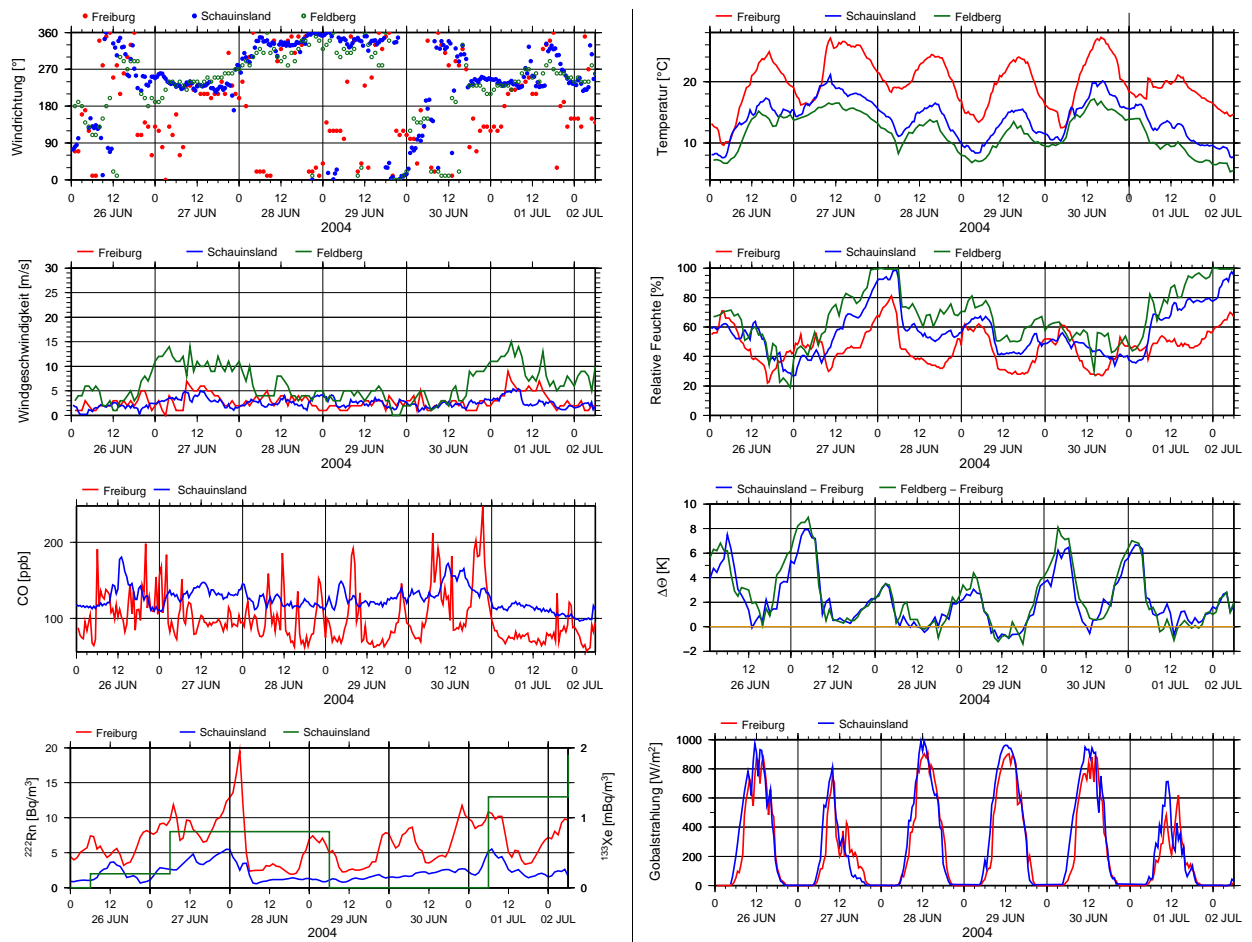


Abbildung 5.3: Zeitreihen von Wind, CO-Mischungsverhältnis, Radionuklid-Konzentrationen (grün ist Xenon, sonst Radon), der relativen Feuchte, der Differenz der potentiellen Temperatur von den Bergstationen nach Freiburg, und der Globalstrahlung für Episode 1.

5.2.2 Westlage Dezember 2004

21.12.–24.12.2004 | keine radiologische Besonderheit | 4 / 2 Tage

Wetterkarten siehe Abb. 5.5, beobachtete Zeitreihen siehe Abb. 5.6 und Windrosen Abb. 5.4.

Diese Wetterlage ist durch ein mächtiges Zentraltief westlich von Skandinavien gekennzeichnet, das am 23.12. einen Kerndruck von unter 950 hPa erreichte. Anfangs herrscht Hochdruckeinfluss über Mitteleuropa. Am 22.12. entwickelte sich über Neufundland ein sogenannter Schnellläufer, der 24 h später bereits die schottische Nordküste erreicht hatte. Im Laufe des 23. überquerte sein Frontensystem Mitteleuropa.

Im Unterschied zur vorhergehenden, sommerlichen Westlage ist diese typisch für die Winterzeit: geringe Einstrahlung und hohe Windgeschwindigkeiten, auf dem Feldberg 20 ms^{-1} , in Freiburg auch bis zu 10 ms^{-1} . An den ersten beiden Tagen ist es am Vormittag jeweils noch recht stabil, entsprechend akkumulieren sich CO und Rn in Freiburg. Mit dem vollen Einsetzen der kräftigen Westströmung verringert sich die Stabilität am 22. auf 2 bis 4 K. Ohne Tagesgang werden die Konzentrationen von CO und Rn sehr niedrig, Xe nimmt hingegen zu. Der Wind ist an allen Stationen scharf auf die SSW-Richtung konzentriert.

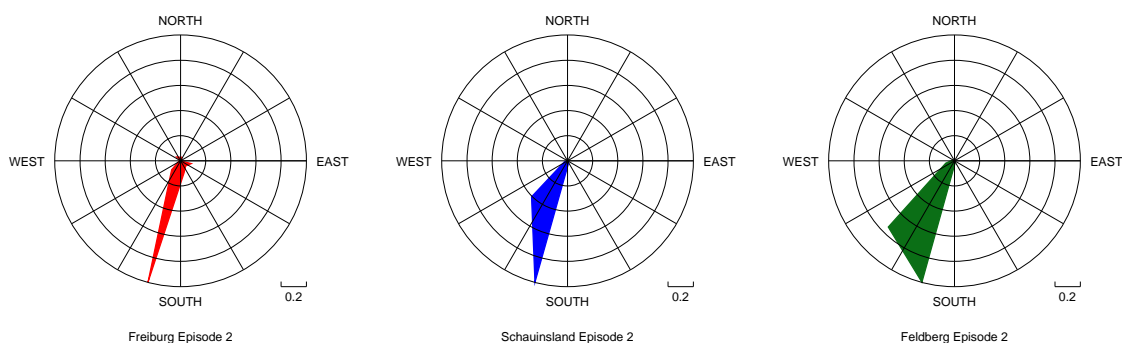
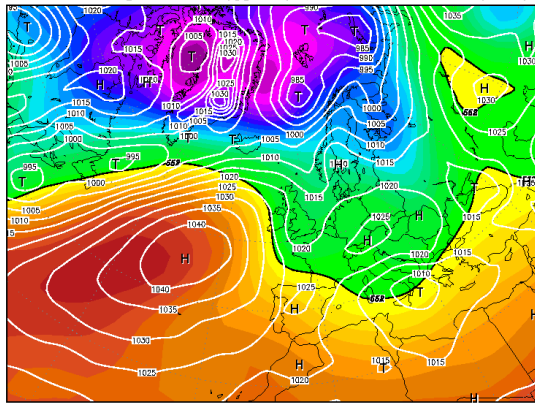


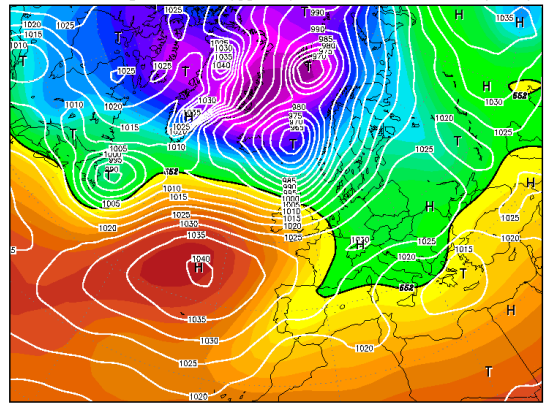
Abbildung 5.4: Häufigkeiten der Windrichtung während der Episode 2.

21DEC2004 00Z
500 hPa Geopotential (gpm) und Bodendruck (hPa)



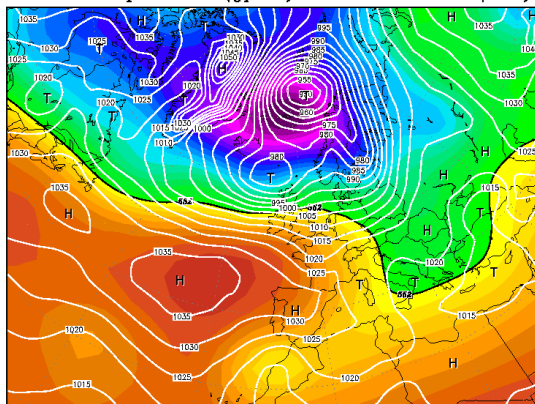
Daten: Reanalysis des NCEP
(C) Wetterzentrale
www.wetterzentrale.de

22DEC2004 00Z
500 hPa Geopotential (gpm) und Bodendruck (hPa)



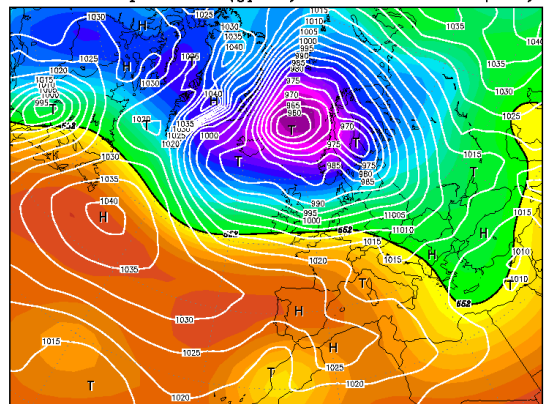
Daten: Reanalysis des NCEP
(C) Wetterzentrale
www.wetterzentrale.de

23DEC2004 00Z
500 hPa Geopotential (gpm) und Bodendruck (hPa)



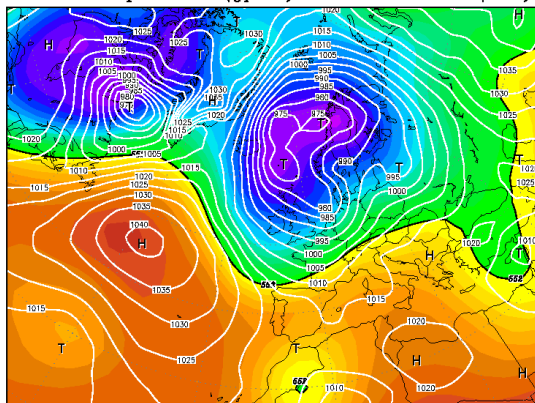
Daten: Reanalysis des NCEP
(C) Wetterzentrale
www.wetterzentrale.de

24DEC2004 00Z
500 hPa Geopotential (gpm) und Bodendruck (hPa)



Daten: Reanalysis des NCEP
(C) Wetterzentrale
www.wetterzentrale.de

25DEC2004 00Z
500 hPa Geopotential (gpm) und Bodendruck (hPa)



Daten: Reanalysis des NCEP
(C) Wetterzentrale
www.wetterzentrale.de

Abbildung 5.5: Wetterkarten für die Episode 2.

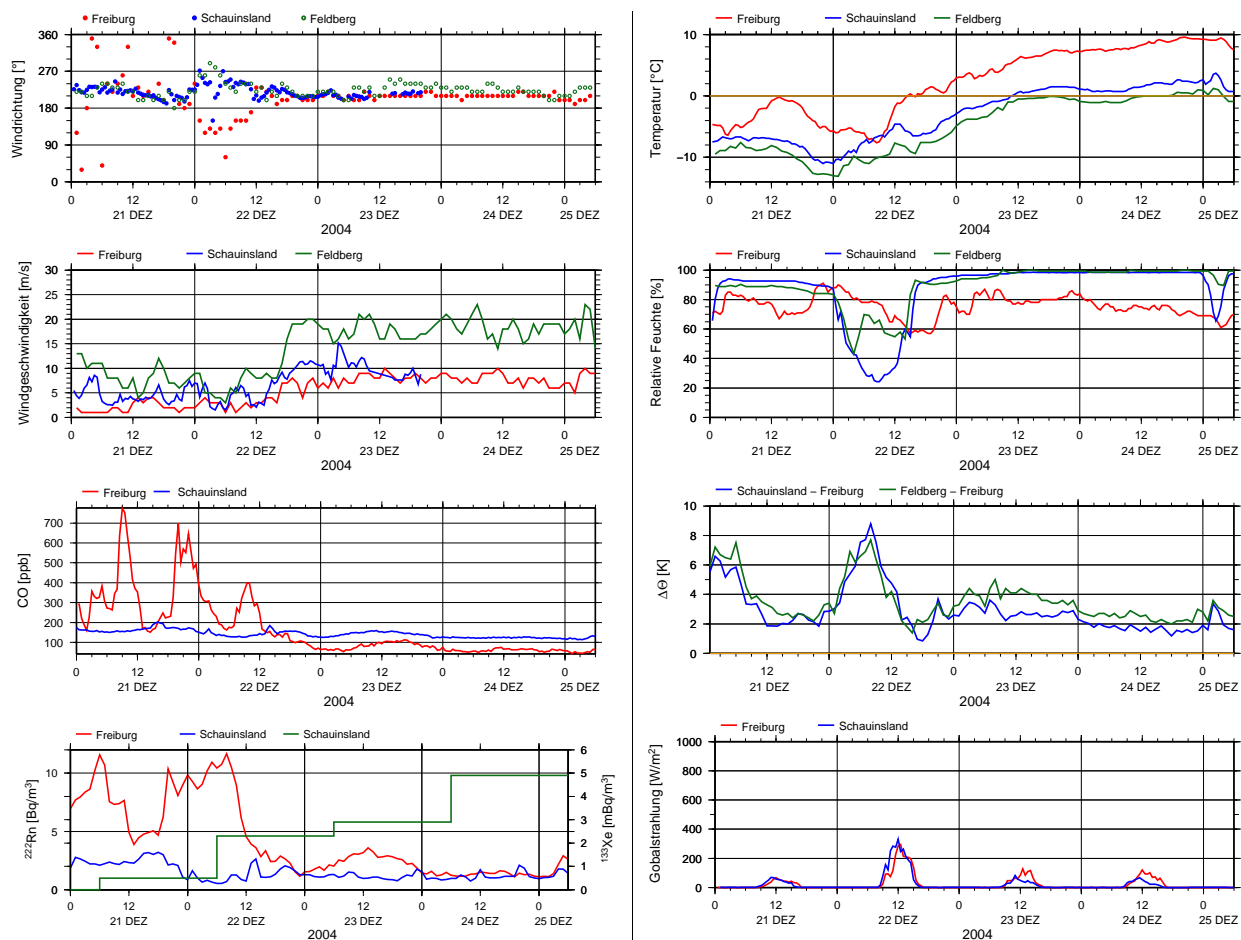


Abbildung 5.6: Zeitreihen der meteorologischen Parameter, von CO und der Radionuklide (grün Xenon-133, sonst Radon-222) für Episode 2.

5.2.3 Nordwest- bis Nordostlage November 2004

06.11–11.11.2004 | 6.-11.11. 180 mBq Xe-133 gemessen, zwei Maxima – gleiche Emittenten? | 9 / 7 Tage

Wetterkarten siehe Abb. 5.8, beobachtete Zeitreihen siehe Abb. 5.10 und Windrosen Abb. 5.7.

Es handelt sich um eine so genannte Ω -Lage, bei der ein starkes, stationäres Hochdruckgebiet südwestlich der Britischen Inseln zu finden ist, ein zweites, in diesem Fall schwächeres über Osteuropa. Auf der Ostseite des atlantischen Hochs stößt im Verlauf der Episode Kaltluft in den Mittelmeerraum vor und es bildet sich dort ein kräftiger Kaltlufttropfen, der sich zunehmend abschnürt. Zu Ende der Episode liegt der Kaltlufttropfen über dem westlichen Mittelmeer, und Süddeutschland ist von einer Ostströmung beeinflusst, während über Norddeutschland eine Hochdruckbrücke reicht. Zu Beginn der Episode ist jedoch eine eher westliche Strömung im Untersuchungsraum zu verzeichnen.

Der Feldberg verzeichnet ein breites Spektrum von Windrichtungen zwischen WNW und ENE. Am Schauinsland dominiert der NW-Wind, ENE kommt ebenfalls häufig vor. In Freiburg treten alle Hauptrichtungen auf, der NNW-Wind dominiert aber, passend zum Nord- bis Ostlagencharakter der Episode, obgleich sich teilweise auch das Talwindssystem bemerkbar macht. Die Windgeschwindigkeiten sind allgemein gering. Die Einstrahlung ist am 3., 4., und 8. für die Jahreszeit kräftig, sonst eher niedrig. Mit Ausnahme des 3. und 4. scheinen die Gipfel häufig in Wolken zu stecken. Bemerkenswert ist die Entwicklung der Stabilität: zu Anfang, bei noch antizyklonalen Bedingungen, ist diese sehr hoch, mit der Kaltluftadvektion verringert sie sich aber dramatisch, und steigt erst in der letzten Nacht wieder an. Die CO- und vor allem die Radon-Konzentration in Freiburg spiegelt dies deutlich wieder.

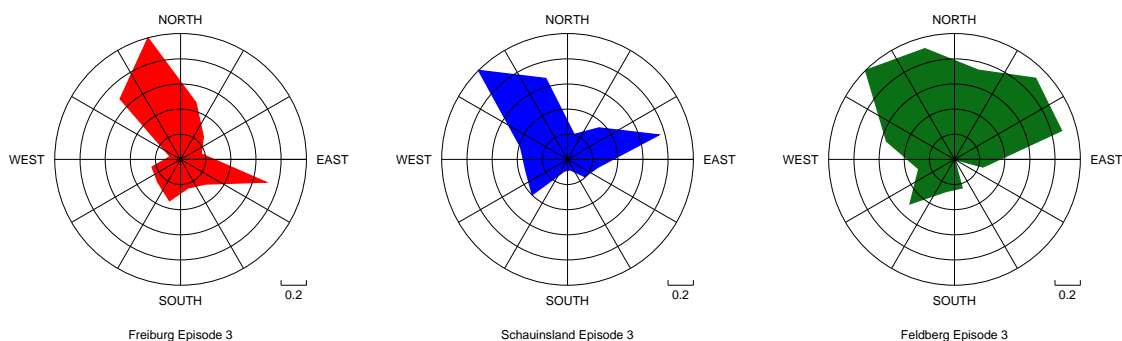
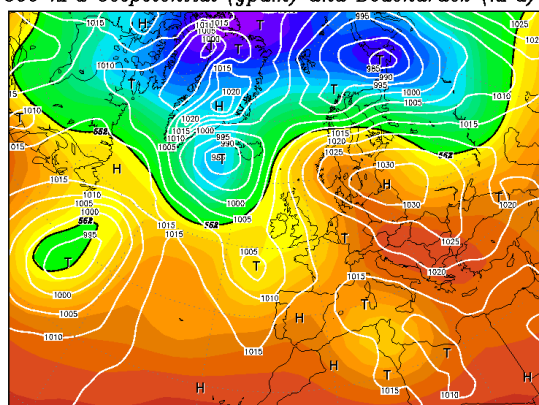


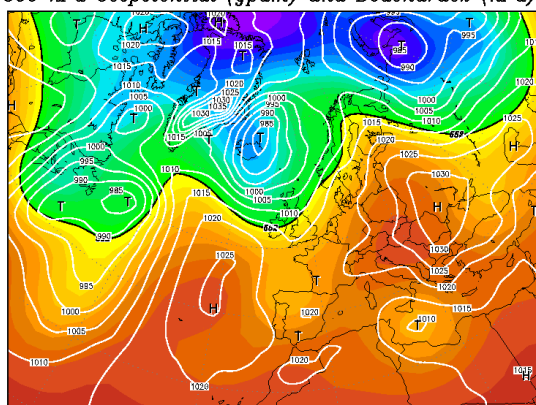
Abbildung 5.7: Häufigkeiten der Windrichtung während der Episode 3.

03NOV2004 00Z
500 hPa Geopotential (gpm) und Bodendruck (hPa)



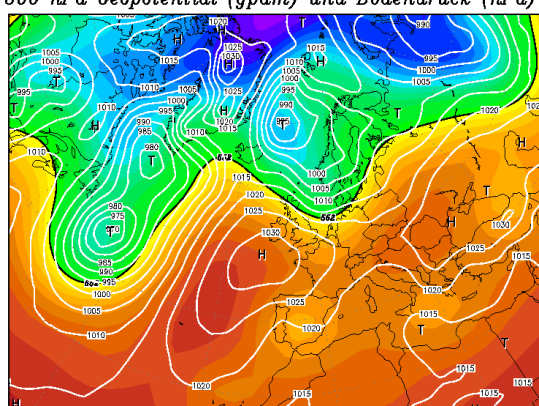
Daten: Reanalysis des NCEP
(C) Wetterzentrale
www.wetterzentrale.de

04NOV2004 00Z
500 hPa Geopotential (gpm) und Bodendruck (hPa)



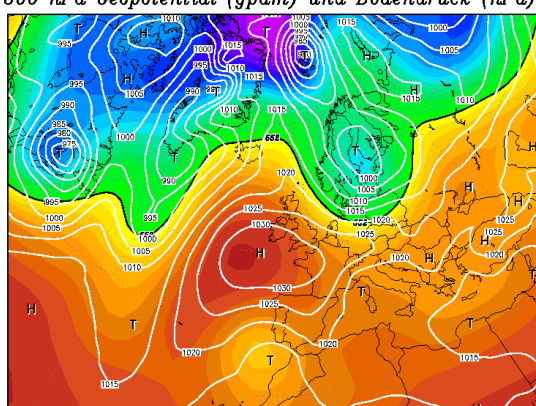
Daten: Reanalysis des NCEP
(C) Wetterzentrale
www.wetterzentrale.de

05NOV2004 00Z
500 hPa Geopotential (gpm) und Bodendruck (hPa)



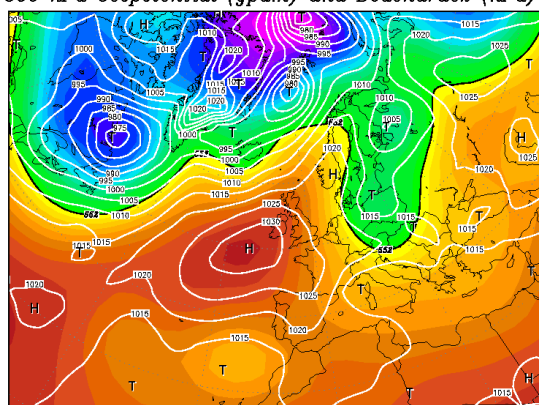
Daten: Reanalysis des NCEP
(C) Wetterzentrale
www.wetterzentrale.de

08NOV2004 00Z
500 hPa Geopotential (gpm) und Bodendruck (hPa)



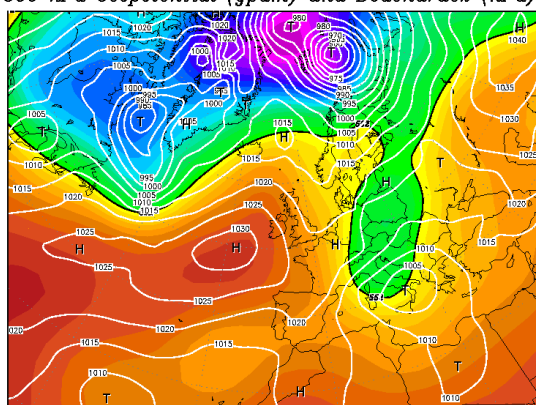
Daten: Reanalysis des NCEP
(C) Wetterzentrale
www.wetterzentrale.de

07NOV2004 00Z
500 hPa Geopotential (gpm) und Bodendruck (hPa)



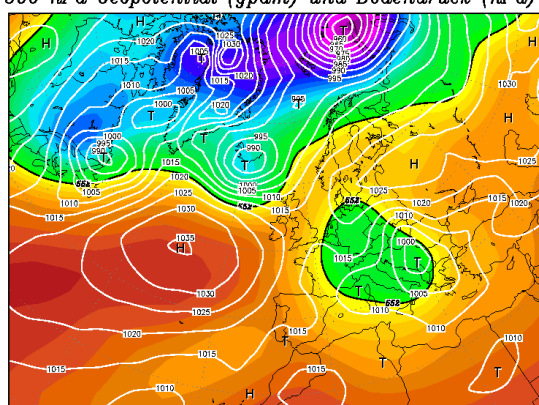
Daten: Reanalysis des NCEP
(C) Wetterzentrale
www.wetterzentrale.de

08NOV2004 00Z
500 hPa Geopotential (gpm) und Bodendruck (hPa)



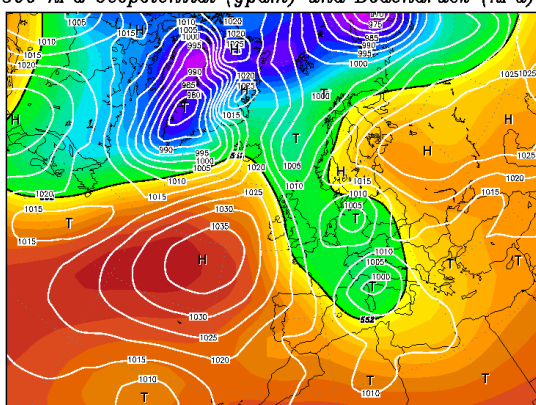
Daten: Reanalysis des NCEP
(C) Wetterzentrale
www.wetterzentrale.de

09NOV2004 00Z
500 hPa Geopotential (gpm) und Bodendruck (hPa)



Daten: Reanalysis des NCEP
(C) Wetterzentrale
www.wetterzentrale.de

10NOV2004 00Z
500 hPa Geopotential (gpm) und Bodendruck (hPa)



Daten: Reanalysis des NCEP
(C) Wetterzentrale
www.wetterzentrale.de

Abbildung 5.8: Wetterkarten für die Episode 3.

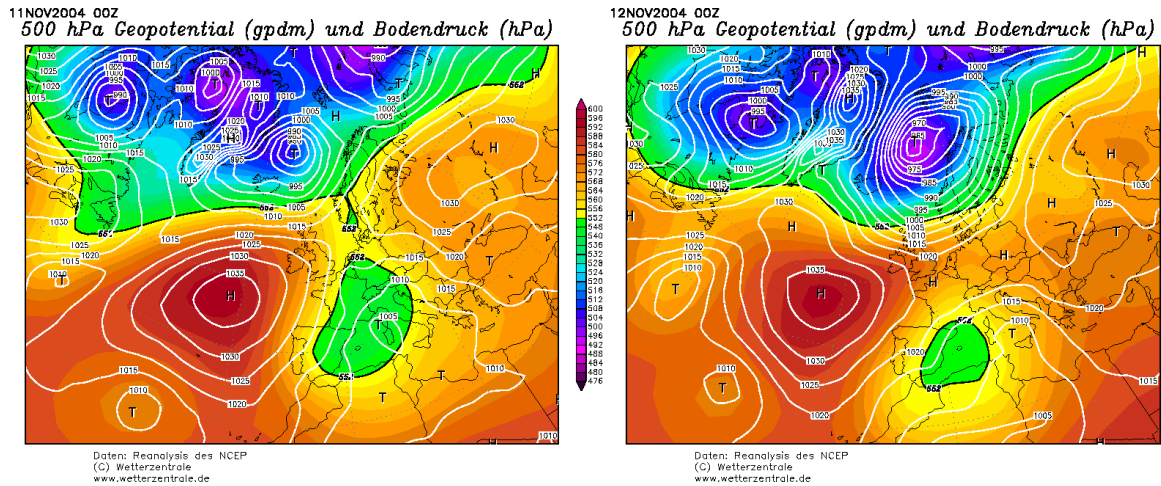


Abbildung 5.9: Wetterkarten für die Episode 3 (Forts.)

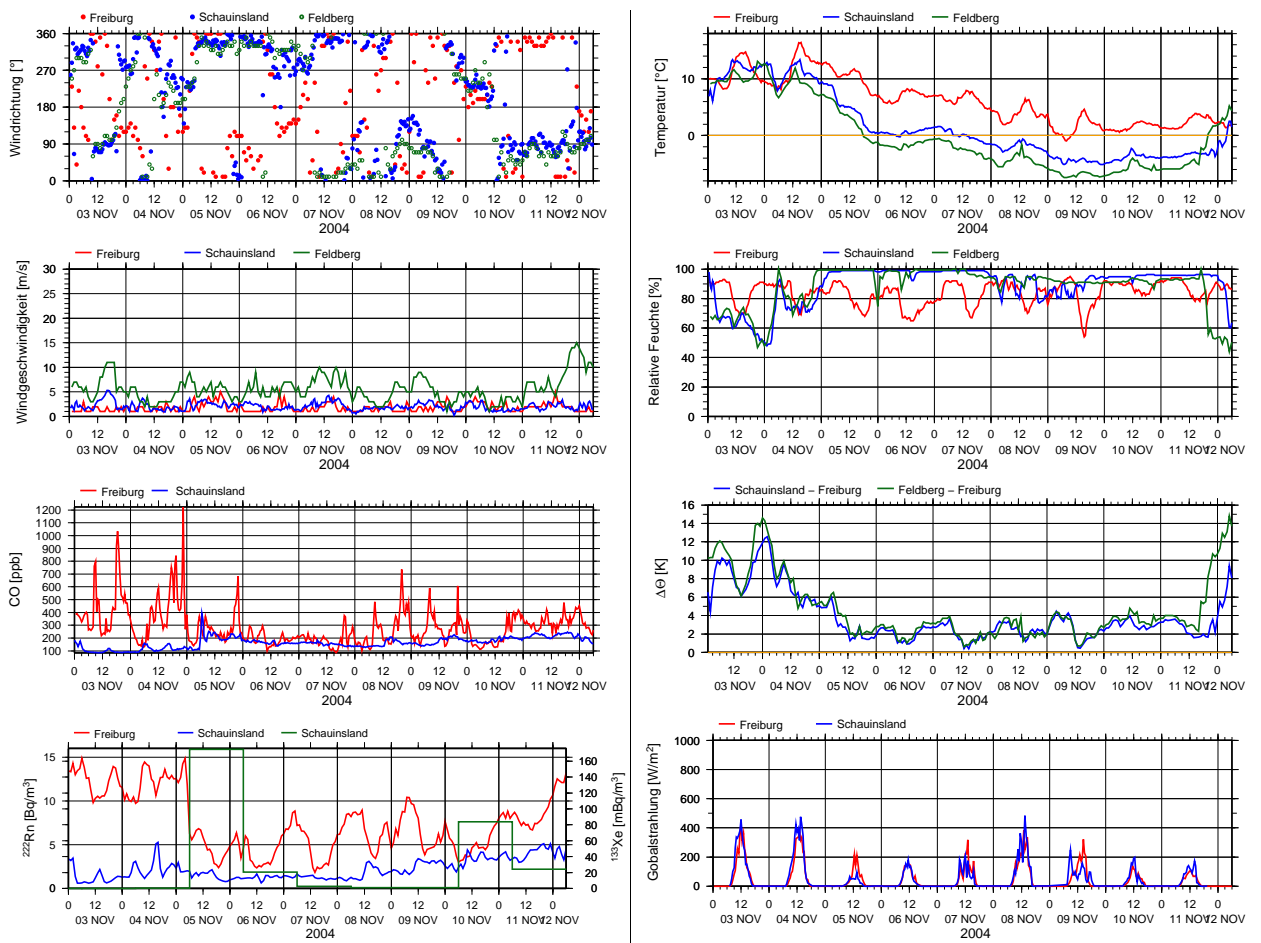


Abbildung 5.10: Zeitreihen der meteorologischen Parameter, von CO und der Radionuklide (grün Xenon-133, sonst Radon-222) für Episode 3.

5.2.4 Nordwest- bis Nordostlage Februar 2005

01.01.–03.02.2005 | 3.2. 170mBq Xe-133 Quelle KKP | 4 / 2 Tage

Wetterkarten siehe Abb. 5.12, beobachtete Zeitreihen siehe Abb. 5.13 und Windrosen Abb. 5.11.

Auch diese Episode ist durch ein blockierendes Hoch südwestlich der Britischen Inseln charakterisiert. Auf der Rückseite eines zu Beginn über Skandinavien liegenden, sehr kräftigen Tiefs wird Kaltluft nach Mitteleuropa und weiter in den östlichen Mittelmeerraum geführt. In der Höhe ist ein ausgedehnter Trog über Mittel- und Osteuropa zu finden, der sich weiter durch das Mittelmeer bis nach Marokko erstreckt. Am 3. kommt es zu einer heftigen Zyklonogenese über Griechenland, auch über Polen bildet sich ein kleines Tief. Der Raum nördlich der Alpen ist ab dem 1. von kräftiger Nordströmung beeinflusst, die sich erst zum 4. hin auflöst.

Der Wind auf dem Feldberg kommt zunächst aus W bis N und dreht am 3. über N auf E. Die Gipfel sind ständig in Wolken eingehüllt, auch in Freiburg ist es ausser am ersten Tag sehr feucht. Die Windgeschwindigkeiten sind mäßig. Am Schauinsland tritt fast nur Wind auf dem NW-Sektor auf, erst am 4. dreht auch dort der Wind auf Ost. In Freiburg überwiegt Südwind, passend zu einer westlichen Höhenströmung.

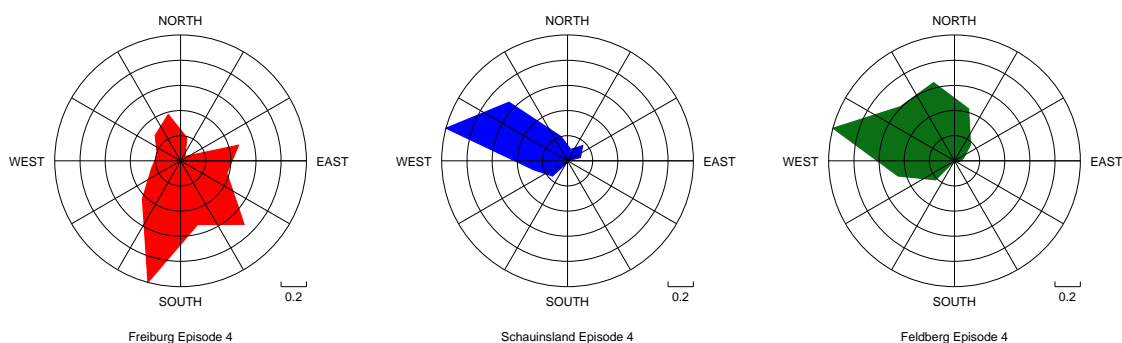
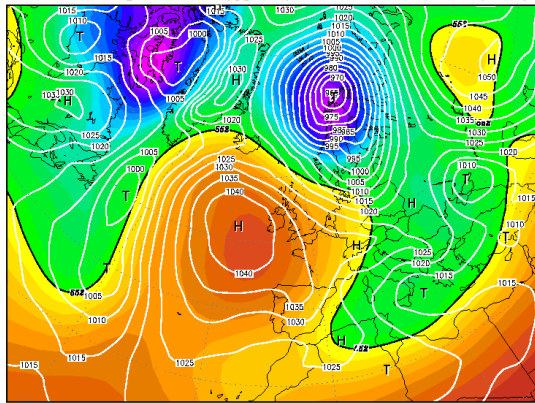


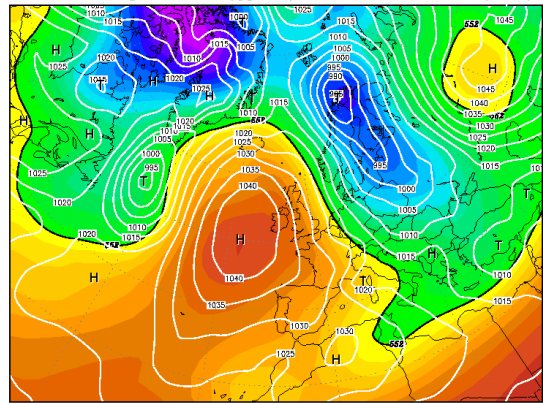
Abbildung 5.11: Häufigkeiten der Windrichtung während der Episode 4.

31JAN2005 00Z
500 hPa Geopotential (gpm) und Bodendruck (hPa)



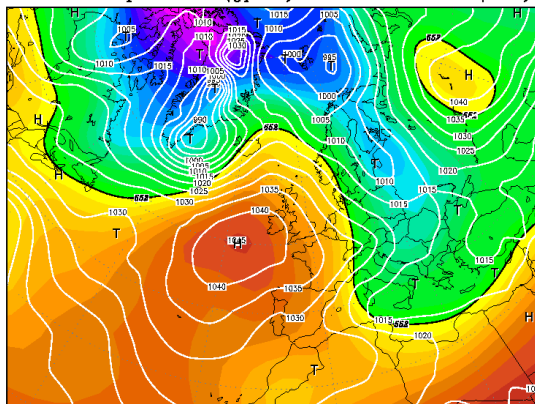
Daten: Reanalysis des NCEP
(C) Wetterzentrale
www.wetterzentrale.de

01FEB2005 00Z
500 hPa Geopotential (gpm) und Bodendruck (hPa)



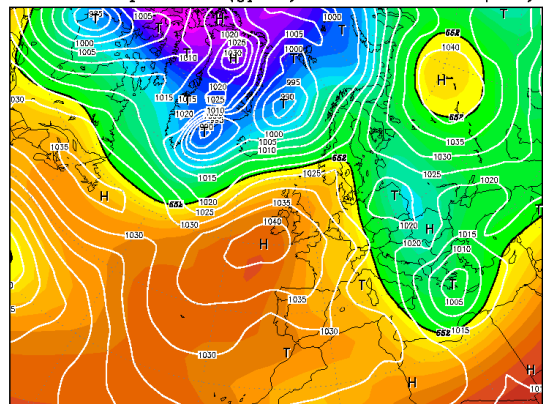
Daten: Reanalysis des NCEP
(C) Wetterzentrale
www.wetterzentrale.de

02FEB2005 00Z
500 hPa Geopotential (gpm) und Bodendruck (hPa)



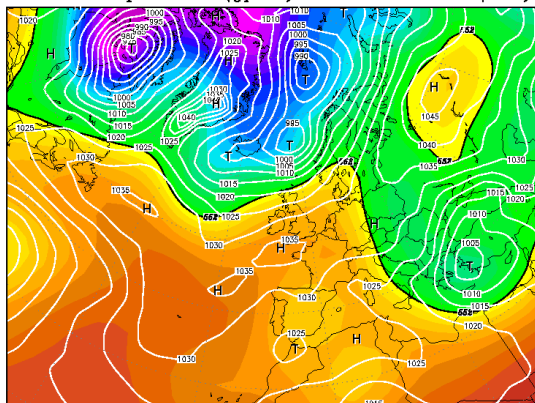
Daten: Reanalysis des NCEP
(C) Wetterzentrale
www.wetterzentrale.de

03FEB2005 00Z
500 hPa Geopotential (gpm) und Bodendruck (hPa)



Daten: Reanalysis des NCEP
(C) Wetterzentrale
www.wetterzentrale.de

04FEB2005 00Z
500 hPa Geopotential (gpm) und Bodendruck (hPa)



Daten: Reanalysis des NCEP
(C) Wetterzentrale
www.wetterzentrale.de

Abbildung 5.12: Wetterkarten für die Episode 4.

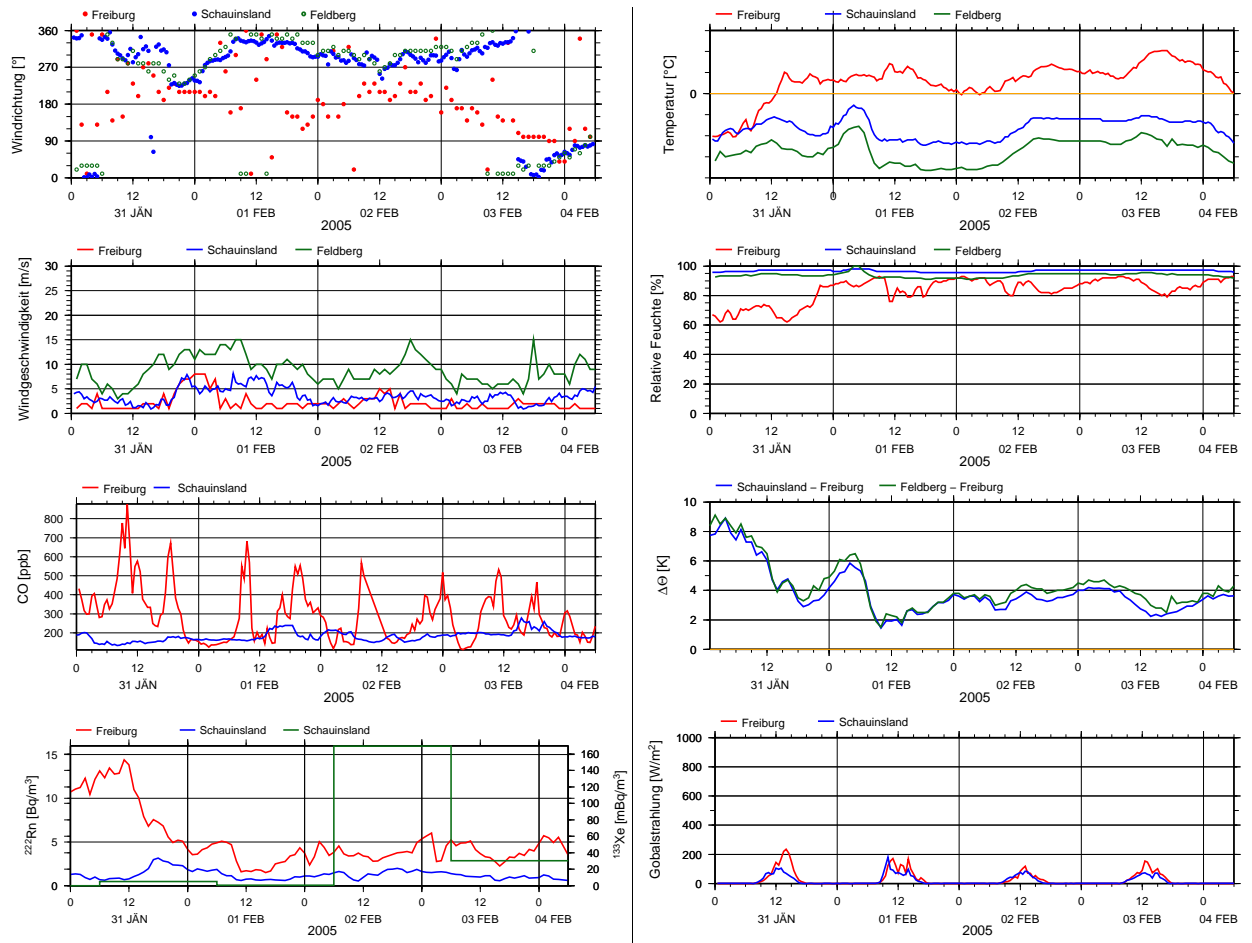


Abbildung 5.13: Zeitreihen der meteorologischen Parameter, von CO und der Radionuklide (grün Xenon-133, sonst Radon-222) für Episode 4.

5.2.5 Sommerliche Hochdrucklage Juni 2005

19.06.–24.06.2005 | 17.–26.6. Mehrere Maxima, stärkste Evidenz für einheitliche Quelle | 6 / 4 Tage

Wetterkarten siehe Abb. 5.15, beobachtete Zeitreihen siehe Abb. 5.17 und Windrosen Abb. 5.14.

Eine klassische sommerliche Hochdrucklage, bei der sich das Azorenhoch bis nach Mitteleuropa vorschiebt. Der Luftdruck liegt meist um 1020 hPa. Am 24. erreicht eine Gewitterfront Frankreich und überquert am 25. Deutschland.

Der antizyklonale Charakter der Lage zeigt sich sehr schön auch in allen lokalen Parametern: fast jeden Tag weitgehend ungestörte Einstrahlung mit Werten von nahezu 1000 Wm^{-2} , ein Tagesgang der Stabilität mit sehr stabiler Schichtung nachts (6-8 K in $\Delta\Theta$, isotherm in T) und neutraler Schichtung tagsüber. Das langsame Ansteigen der relativen Feuchte mit zunehmender Alterung des Hochs ist ebenfalls typisch. Bemerkenswert scheinen zwei Spitzen des CO in Freiburg in der Nacht vom 22. zum 23. Die Windverteilungen zeigen primär die typischen tagesperiodischen Schwankungen: in Freiburg ist nachts ESE-Wind zu finden, tagsüber NNW. Leider ist am Schauinsland während eines Teils der Episode Datenausfall zu verzeichnen, dadurch ist der nachmittägliche NW-Wind in der Windrose unterrepräsentiert. Am 24. hat der Wind in der Höhe auf W gedreht und an Geschwindigkeit zugelegt, er setzt sich bei neutraler Schichtung auch in Freiburg durch.

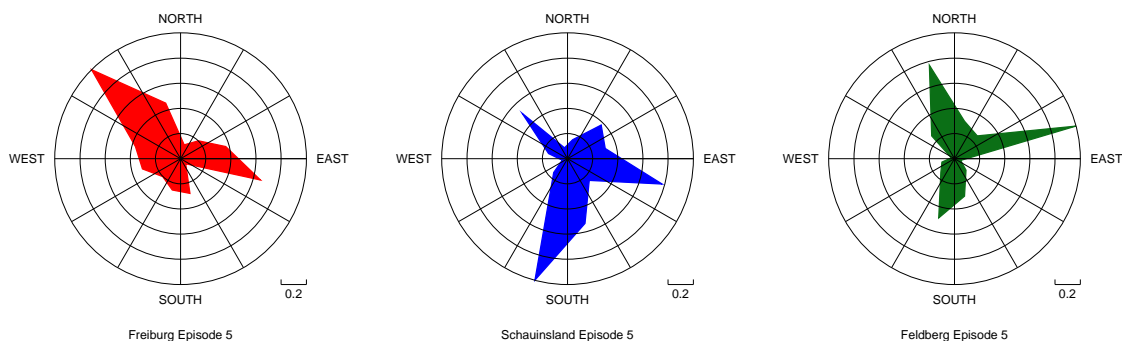
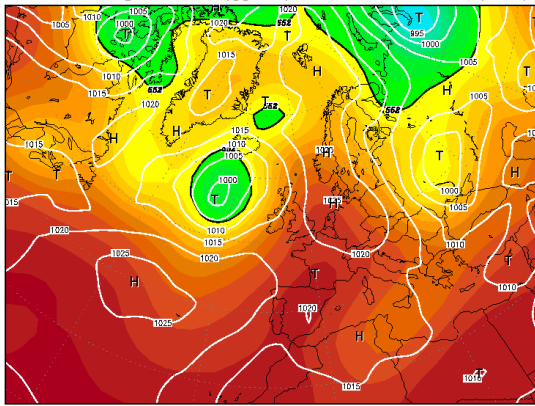


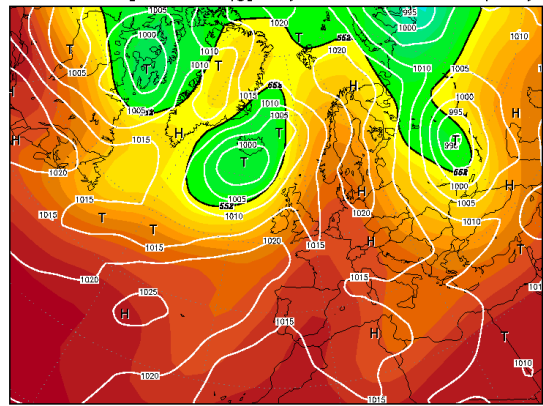
Abbildung 5.14: Häufigkeiten der Windrichtung während der Episode 5.

19JUN2005 00Z
500 hPa Geopotential (gpm) und Bodendruck (hPa)



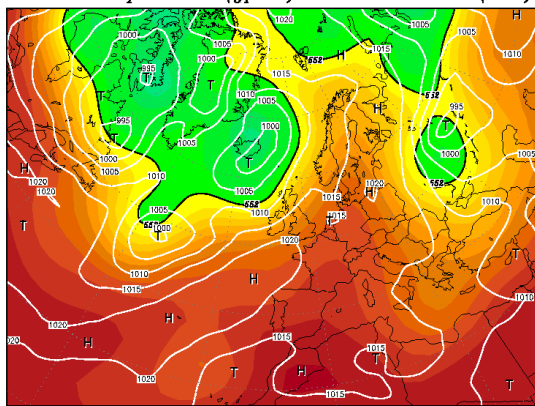
Daten: Reanalysis des NCEP
(C) Wetterzentrale
www.wetterzentrale.de

20JUN2005 00Z
500 hPa Geopotential (gpm) und Bodendruck (hPa)



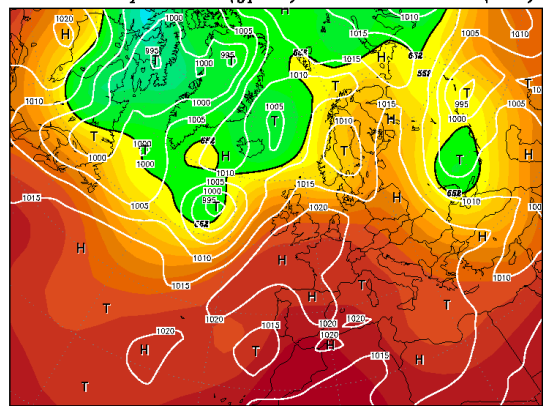
Daten: Reanalysis des NCEP
(C) Wetterzentrale
www.wetterzentrale.de

21JUN2005 00Z
500 hPa Geopotential (gpm) und Bodendruck (hPa)



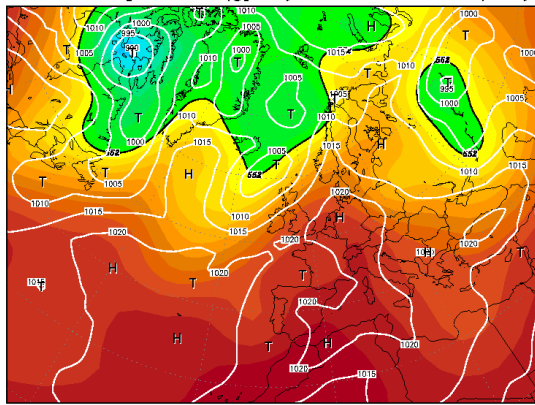
Daten: Reanalysis des NCEP
(C) Wetterzentrale
www.wetterzentrale.de

22JUN2005 00Z
500 hPa Geopotential (gpm) und Bodendruck (hPa)



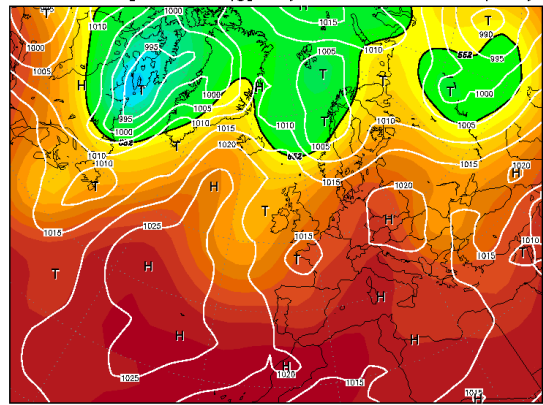
Daten: Reanalysis des NCEP
(C) Wetterzentrale
www.wetterzentrale.de

23JUN2005 00Z
500 hPa Geopotential (gpm) und Bodendruck (hPa)



Daten: Reanalysis des NCEP
(C) Wetterzentrale
www.wetterzentrale.de

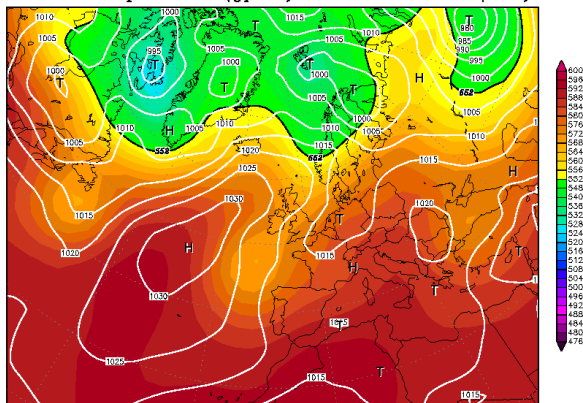
24JUN2005 00Z
500 hPa Geopotential (gpm) und Bodendruck (hPa)



Daten: Reanalysis des NCEP
(C) Wetterzentrale
www.wetterzentrale.de

Abbildung 5.15: Wetterkarten für die Episode 5.

25JUN2005 00Z
500 hPa Geopotential (gpm) und Bodendruck (hPa)



Daten: Reanalysis des NCEP
(C) Wetterzentrale
www.wetterzentrale.de

Abbildung 5.16: Wetterkarten für die Episode 5 (Forts.).

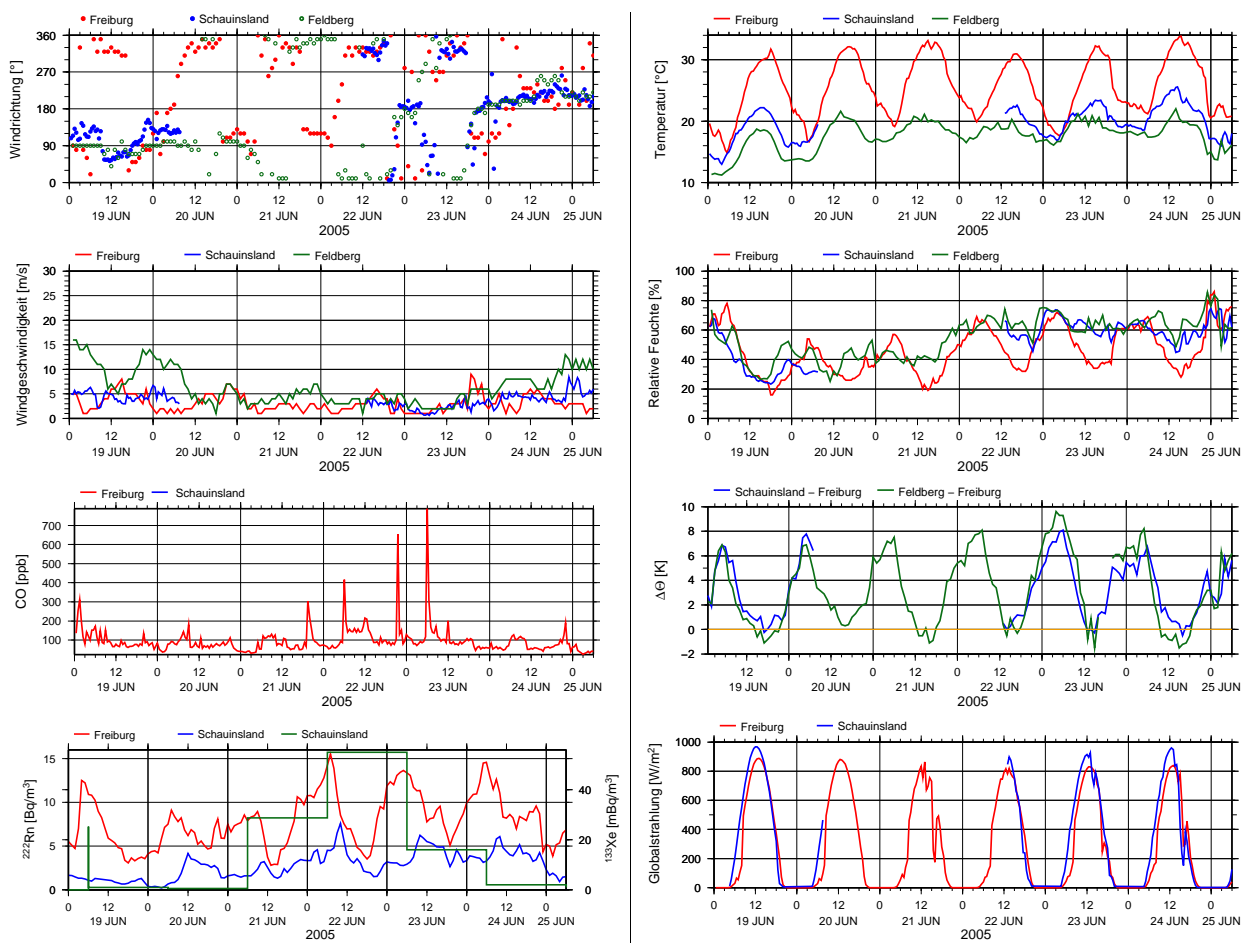


Abbildung 5.17: Zeitreihen der meteorologischen Parameter, von CO und der Radionuklide (grün Xenon-133, sonst Radon-222) für Episode 5.

5.2.6 Sommerliche Hochdrucklage August 2005

08.08.–11.8.2005 | 9.–11.8. Extremes Verhältnis $^{135}\text{Xe} / ^{133}\text{Xe}$ – Fleurus | 4 / 2 Tage

Wetterkarten siehe Abb. 5.19, beobachtete Zeitreihen siehe Abb. 5.20 und Windrosen Abb. 5.18.

Diese Lage kann nur grenzwertig unter der Bezeichnung „Hochdrucklage“ gefasst werden. Am 6. bestimmt ein Kaltlufttropfen über Südkandinavien und Mitteleuropa das Wettergeschehen. Dieser rückt langsam nach Nordosten ab, während gleichzeitig am Boden eine kräftige Tiefdruckentwicklung über der Ostsee Kaltluft auf ihrer Rückseite nach Süden führt. So gelangt Mitteleuropa unter eine schwache Hochdruckbrücke, wobei westliche bis nordwestliche Strömung vorherrscht.

Während Freiburg durchaus die für die thermische Talwindzirkulation charakteristische Windverteilung aufweist, weht am Schauinsland und Feldberg fast durchgehend Nordwestwind, wenn auch mit sehr geringen Geschwindigkeiten. Die Strahlung am Schauinsland ist am 8. von Wolken stärker reduziert, in Freiburg zumindest am 12. (Datenausfälle). Die Stabilität zeigt den Schönwetter-Tagesgang, und rechtfertigt zumindest aus dieser Sicht die Einordnung als Hochdrucklage. Das CO in Freiburg weist einen Tagesgang mit morgendlichen und abendlichen Spitzen auf, was auf einen lokalen Verkehrseinfluss hindeutet. Dieser wiederum lässt es als fraglich erscheinen, ob es mit den zur Verfügung stehenden Daten und Modellen richtig simuliert werden kann (räumliche und zeitliche Disaggregation der Quellen ist neben der Modellauflösung entscheidend).

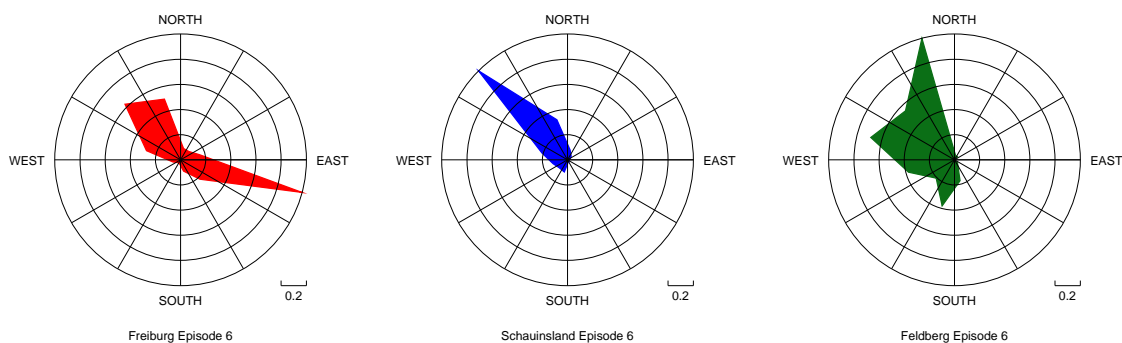
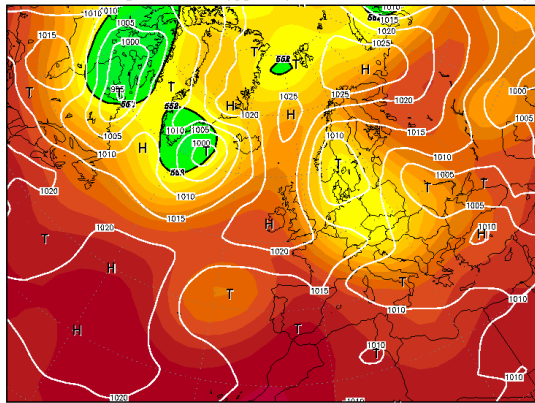


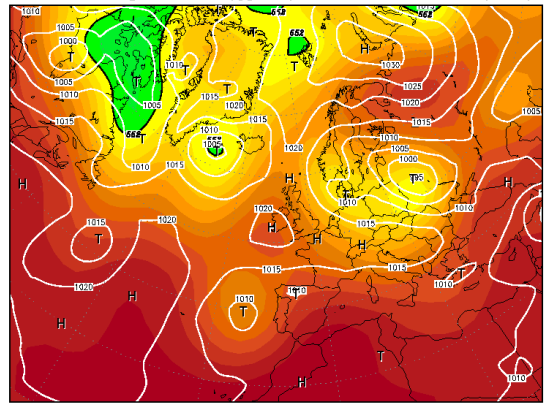
Abbildung 5.18: Häufigkeiten der Windrichtung während der Episode 6.

08AUG2005 00Z
500 hPa Geopotential (gpm) und Bodendruck (hPa)



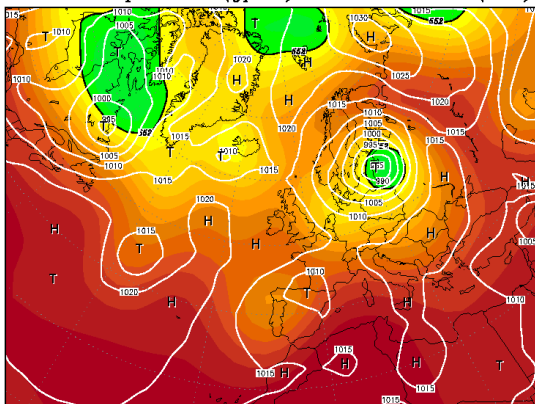
Daten: Reanalysis des NCEP
(C) Wetterzentrale
www.wetterzentrale.de

09AUG2005 00Z
500 hPa Geopotential (gpm) und Bodendruck (hPa)



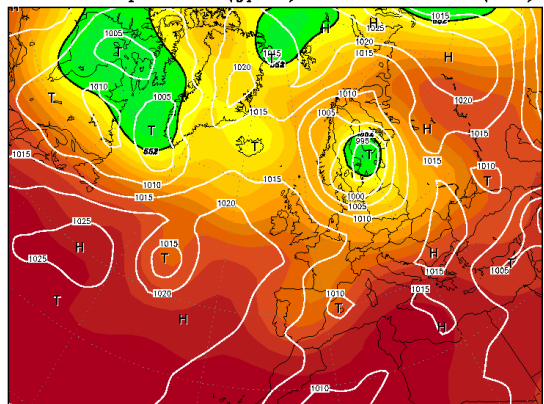
Daten: Reanalysis des NCEP
(C) Wetterzentrale
www.wetterzentrale.de

10AUG2005 00Z
500 hPa Geopotential (gpm) und Bodendruck (hPa)



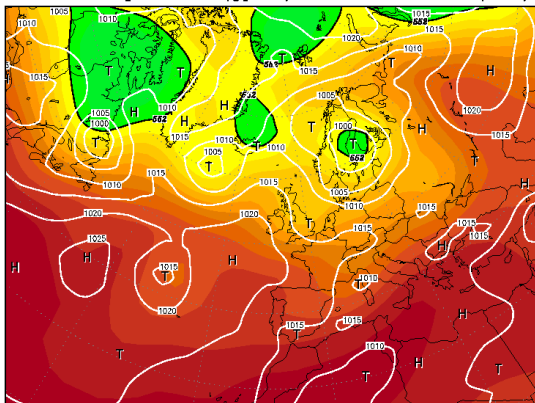
Daten: Reanalysis des NCEP
(C) Wetterzentrale
www.wetterzentrale.de

11AUG2005 00Z
500 hPa Geopotential (gpm) und Bodendruck (hPa)



Daten: Reanalysis des NCEP
(C) Wetterzentrale
www.wetterzentrale.de

12AUG2005 00Z
500 hPa Geopotential (gpm) und Bodendruck (hPa)



Daten: Reanalysis des NCEP
(C) Wetterzentrale
www.wetterzentrale.de

Abbildung 5.19: Wetterkarten für die Episode 6.

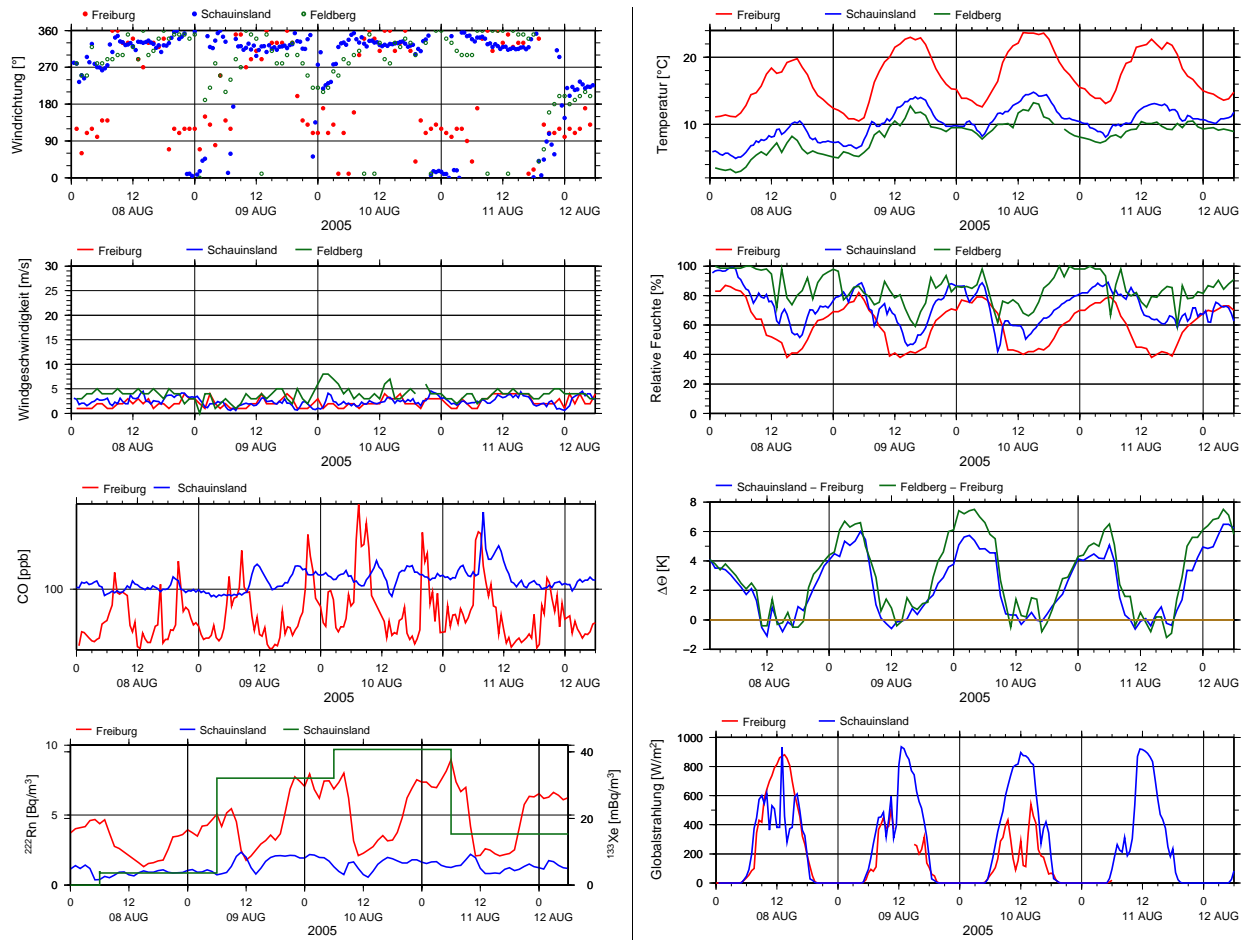


Abbildung 5.20: Zeitreihen der meteorologischen Parameter, von CO und der Radionuklide (grün Xenon-133, sonst Radon-222) für Episode 6.

5.2.7 Südwestlage September 2004

12.09.–16.09.2004 | 16.9.2004 Hoher Wert | 5 / 3 Tage

Wetterkarten siehe Abb. 5.22, beobachtete Zeitreihen siehe Abb. 5.23 und Windrosen Abb. 5.21.

Während dieser Episode wandert ein Tief vom Nordatlantik über die Britischen Inseln nach Skandinavien. Ein zweites Tief folgt nach, welches sich sehr stark entwickelt und gegen Ende der Episode mit einem Kerndruck von unter 965 hPa bei Island liegt. Im Lauf des 14. überquert die Kaltfront des ersten Tiefs Deutschland, zuvor tritt eine schöne Vorderseite mit Südwestströmung auf. Am 16. ist am Boden Zwischenhocheinfluss zu verzeichnen, während in der Höhe die Trogachse durchgeht. Am 17. tropft ein Teil des Trogens in ein schwaches Höhentief über dem Golf von Genua ab.

Erwartungsgemäß verzeichnen die Bergstationen durchgehend Südwestwind, bis die Strömung am Nachmittag des 15. auf NE dreht. Die Windgeschwindigkeit am Feldberg liegt um die 10 ms^{-1} . Der SW-Wind setzt sich auch in Freiburg durch, das nur in der Nacht vom 12. zum 13. und vom 15. zum 16. (nach Umstellung des Wetters) nächtlichen Talauswind registriert. Von etwa 13. mittags bis 15. kurz nach Mitternacht bleibt die relative Feuchte in Freiburg unter 60%, die Temperatur sinkt auch nachts nicht wesentlich ab und pendelt um 20° , während die Stabilität – von einer kurzen Unterbrechung abgesehen – mit maximal 2 K recht gering ist. Damit lässt sich diese Episode durchaus als föhnähnlich ansprechen. Der letzte Tag, an dem die Strömung auf NE gedreht hat, fällt nicht nur durch den hohen Xe-Wert auf, sondern auch durch eine mittägliche CO-Spitze am Schauinsland.

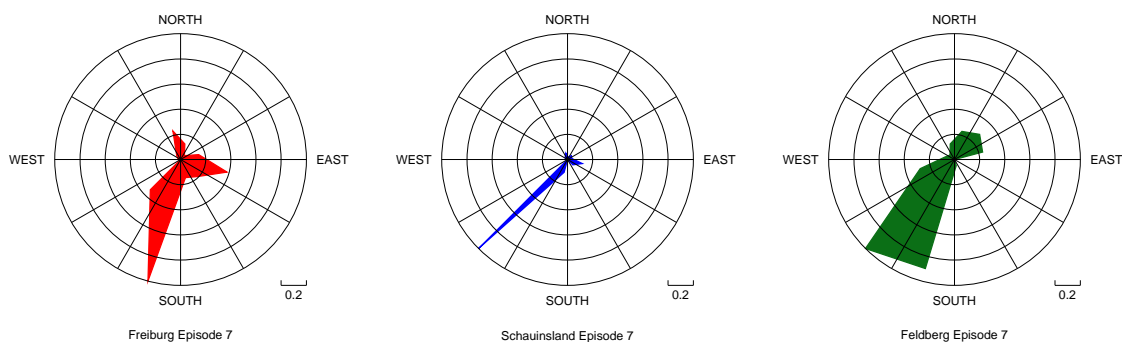
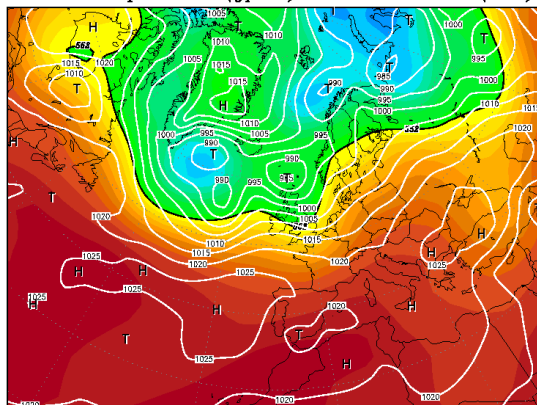


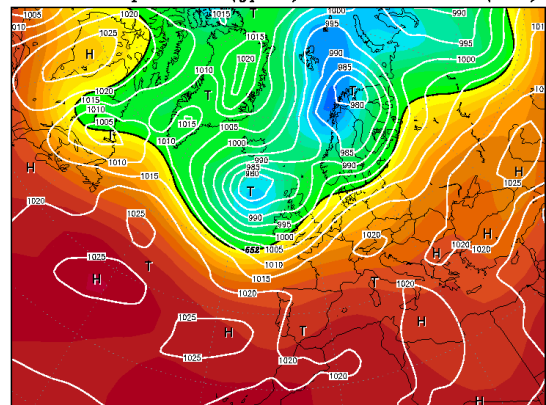
Abbildung 5.21: Häufigkeiten der Windrichtung während der Episode 7.

12SEP2004 00Z
500 hPa Geopotential (gpm) und Bodendruck (hPa)



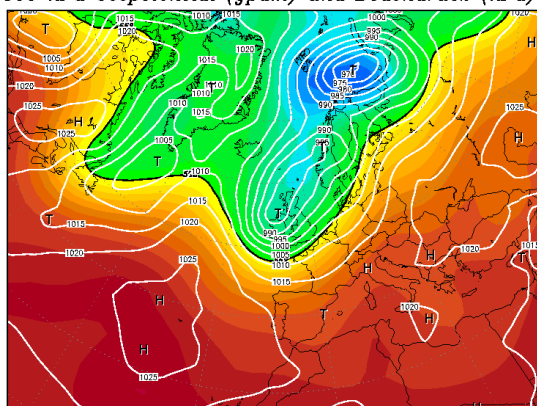
Daten: Reanalyse des NCEP
(C) Wetterzentrale
www.wetterzentrale.de

13SEP2004 00Z
500 hPa Geopotential (gpm) und Bodendruck (hPa)



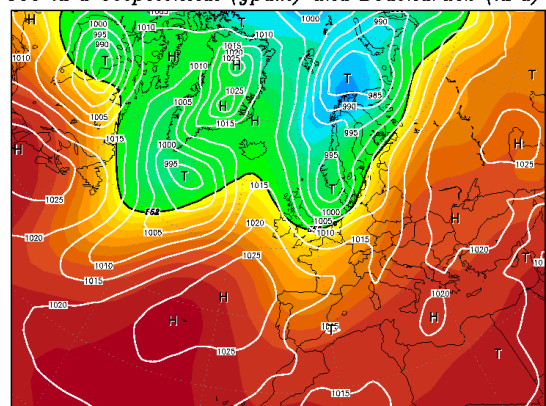
Daten: Reanalyse des NCEP
(C) Wetterzentrale
www.wetterzentrale.de

14SEP2004 00Z
500 hPa Geopotential (gpm) und Bodendruck (hPa)



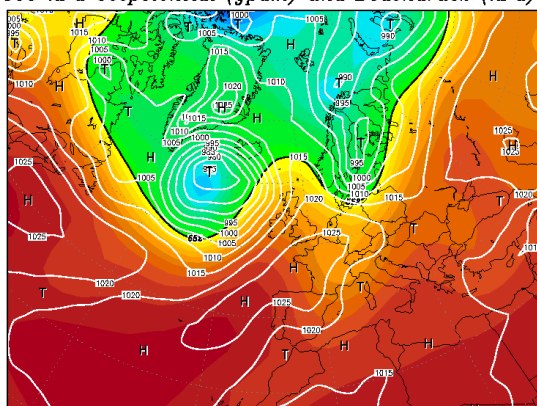
Daten: Reanalyse des NCEP
(C) Wetterzentrale
www.wetterzentrale.de

15SEP2004 00Z
500 hPa Geopotential (gpm) und Bodendruck (hPa)



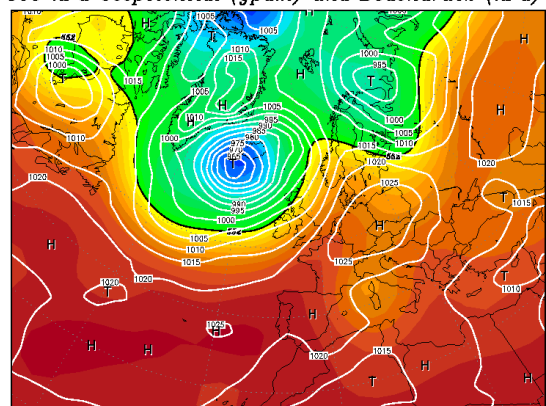
Daten: Reanalyse des NCEP
(C) Wetterzentrale
www.wetterzentrale.de

16SEP2004 00Z
500 hPa Geopotential (gpm) und Bodendruck (hPa)



Daten: Reanalyse des NCEP
(C) Wetterzentrale
www.wetterzentrale.de

17SEP2004 00Z
500 hPa Geopotential (gpm) und Bodendruck (hPa)



Daten: Reanalyse des NCEP
(C) Wetterzentrale
www.wetterzentrale.de

Abbildung 5.22: Wetterkarten für die Episode 7.

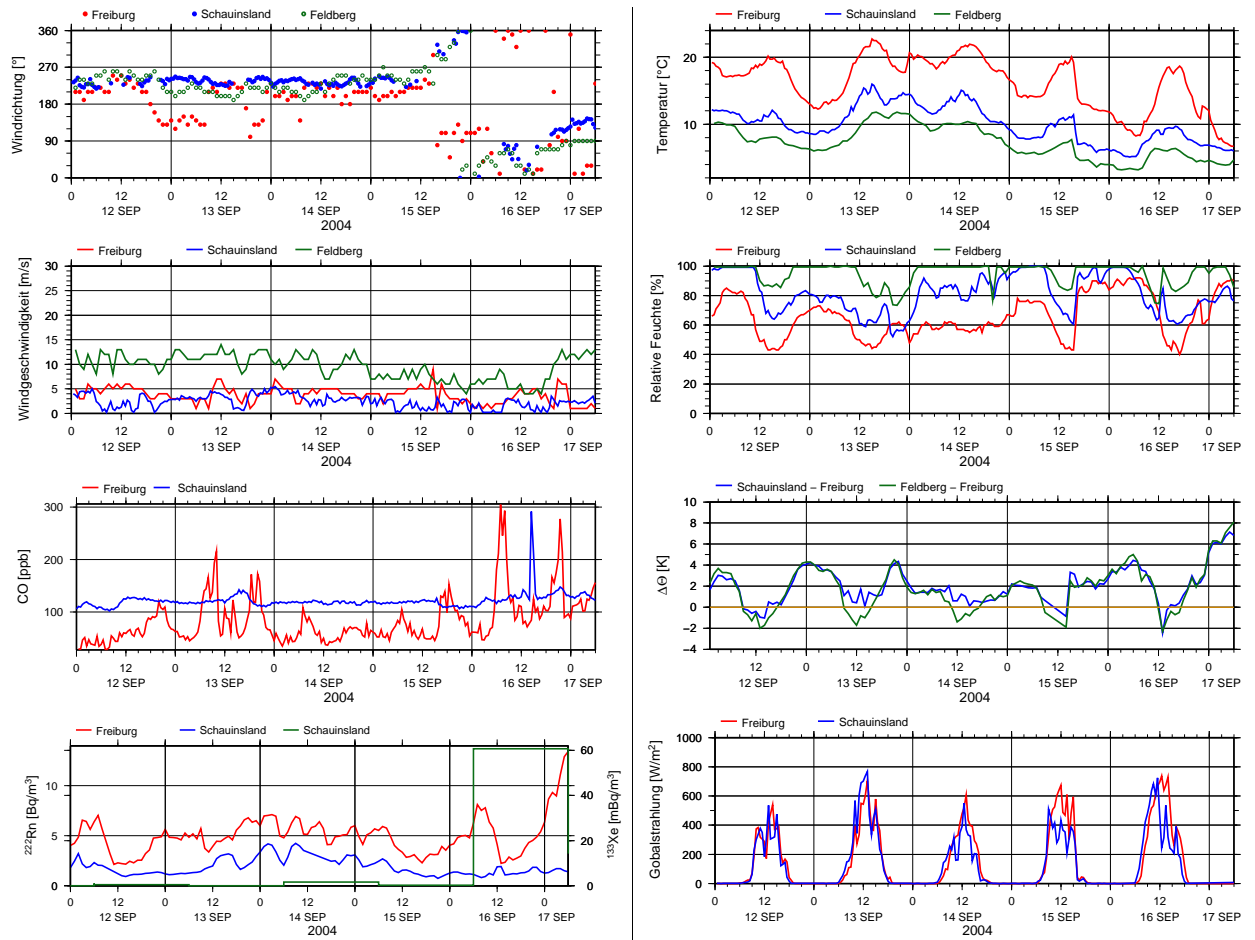


Abbildung 5.23: Zeitreihen der meteorologischen Parameter, von CO und der Radionuklide (grün Xenon-133, sonst Radon-222) für Episode 7.

5.2.8 Südwestlage Februar 2004

31.01.–08.02.2004 | keine radiologische Besonderheit, enthält Episode 10 | 9 / 4 Tage
Wetterkarten siehe Abb. 5.25, beobachtete Zeitreihen siehe Abb. 5.27 und Windrosen Abb. 5.24.

Tiefdrucktätigkeit über dem Atlantik in Verbindung mit einem stabilen Hoch im Mittelmeerraum bewirkt eine Tendenz zur Trogvorderseite über West- und Mitteleuropa. An den ersten Tagen Vorderseite, dann geht am 2.2. eine Kaltfront durch. Auf ihrer Rückseite dreht – wegen erneuter Tiefdruckentwicklung über dem Atlantik – der Wind zunächst wieder auf Südwest, bis sich dann vom 4. bis 6. Hochdruckeinfluss durchsetzt, weshalb diese beiden Tage der Kategorie „winterliche Hochdrucklage“ zugezählt und als Episode 10 geführt werden. Am 5. streift eine durch die nachfolgende Tiefdruckentwicklung abgeschwächte Front, vom 6. auf den 7. stellt sich wieder eine Vorderseite ein. Die Episode wird schließlich von einem heftigen Kaltlufteinbruch aus Nordwesten am 8.2. beendet.

Südwestwind dominiert diese Episode an allen Stationen, mit über 25 ms^{-1} am Feldberg. Es fällt auf, dass während der antizyklonalen Unterbrechung in der Mitte der Episode sich in Freiburg der Südostwind, mit einer Unterbrechung zu Mittag, einstellt, welcher Kaltluftabfluss aus dem Schwarzwald anzeigt. Auch die anderen Parameter reagierten auf diese Unterbrechung: auf den Bergstationen sinkt am 3. zu Mittag die relative Feuchte auf extrem geringe Werte (unter 10%), in Freiburg setzte ein Tagesgang der Temperatur ein, die Stabilität nimmt rapide zu, Radon und Kohlenmonoxid akkumulieren sich stark. Während der starken Südwestströmung in der Höhe bleibt auch in dieser Episode die Temperatur in Freiburg nachts auf derselben Höhe wie tags (kaum unter 10° , und das im Februar!), die Feuchte bleibt ebenfalls auch nachts um die 50%, und der Wind erreicht in Freiburg genauso wie am Schauinsland um die 10 ms^{-1} . Als Besonderheit ist noch zu erwähnen, dass während des Höhepunkts der föhnigen Lage auf dem Schauinsland mehr Rn-222 (und auch CO) als in Freiburg zu finden ist.

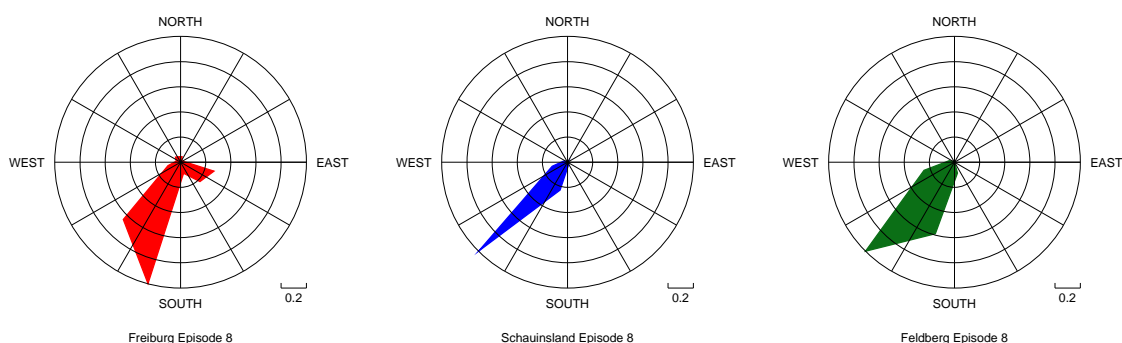
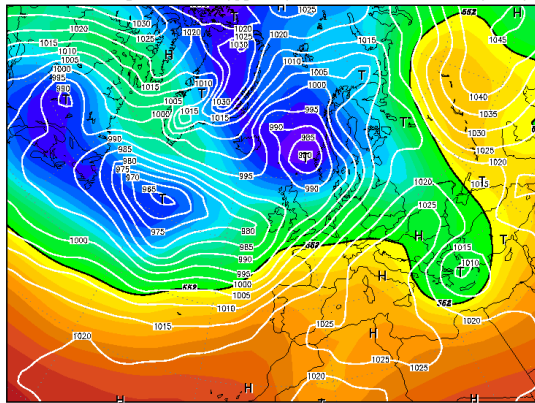


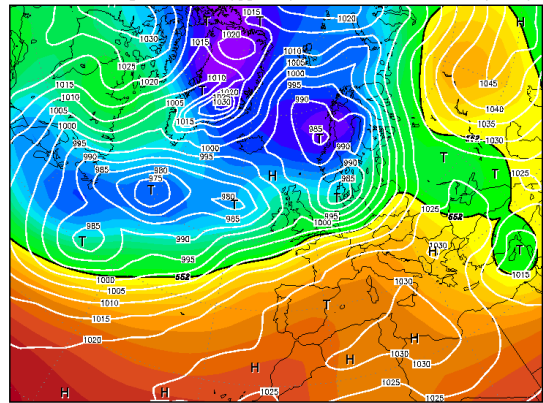
Abbildung 5.24: Häufigkeiten der Windrichtung während der Episode 8 und 10.

31JAN2004 00Z
500 hPa Geopotential (gpm) und Bodendruck (hPa)



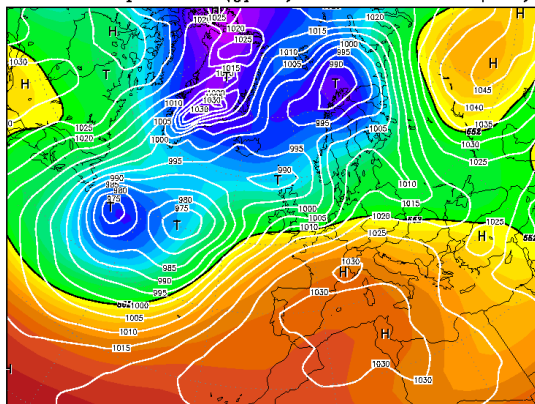
Daten: Reanalysis des NCEP
(C) Wetterzentrale
www.wetterzentrale.de

01FEB2004 00Z
500 hPa Geopotential (gpm) und Bodendruck (hPa)



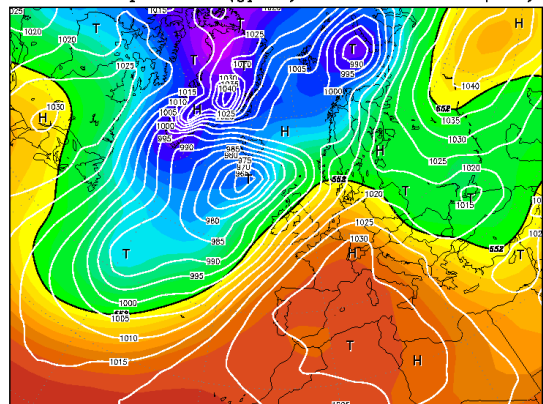
Daten: Reanalysis des NCEP
(C) Wetterzentrale
www.wetterzentrale.de

02FEB2004 00Z
500 hPa Geopotential (gpm) und Bodendruck (hPa)



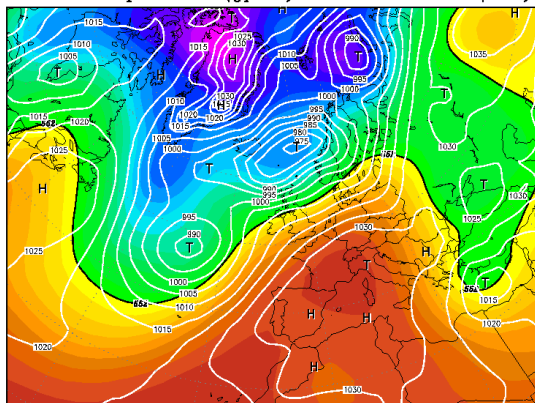
Daten: Reanalysis des NCEP
(C) Wetterzentrale
www.wetterzentrale.de

03FEB2004 00Z
500 hPa Geopotential (gpm) und Bodendruck (hPa)



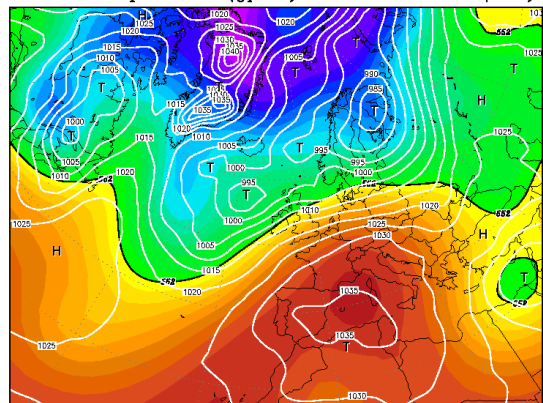
Daten: Reanalysis des NCEP
(C) Wetterzentrale
www.wetterzentrale.de

04FEB2004 00Z
500 hPa Geopotential (gpm) und Bodendruck (hPa)



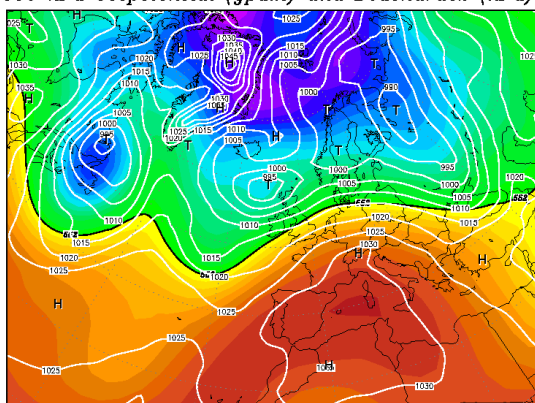
Daten: Reanalysis des NCEP
(C) Wetterzentrale
www.wetterzentrale.de

05FEB2004 00Z
500 hPa Geopotential (gpm) und Bodendruck (hPa)



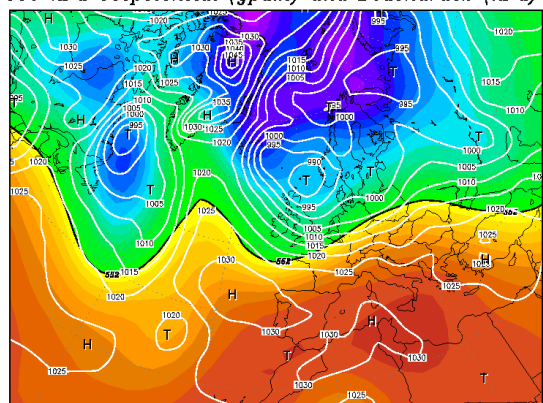
Daten: Reanalysis des NCEP
(C) Wetterzentrale
www.wetterzentrale.de

06FEB2004 00Z
500 hPa Geopotential (gpm) und Bodendruck (hPa)



Daten: Reanalysis des NCEP
(C) Wetterzentrale
www.wetterzentrale.de

07FEB2004 00Z
500 hPa Geopotential (gpm) und Bodendruck (hPa)



Daten: Reanalysis des NCEP
(C) Wetterzentrale
www.wetterzentrale.de

Abbildung 5.25: Wetterkarten für die Episode 7 und 10.

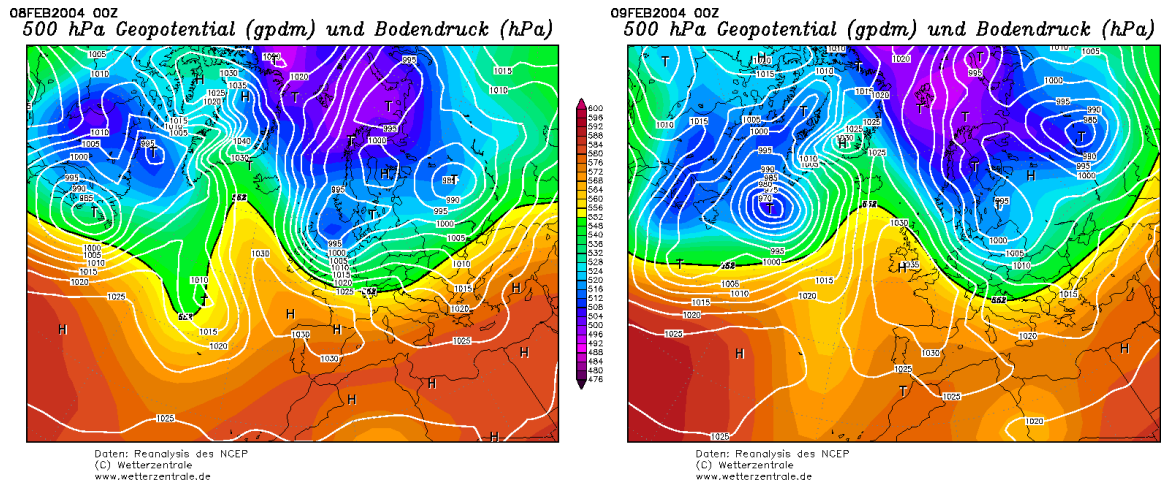


Abbildung 5.26: Wetterkarten für die Episode 8 und 10 (Forts.) .

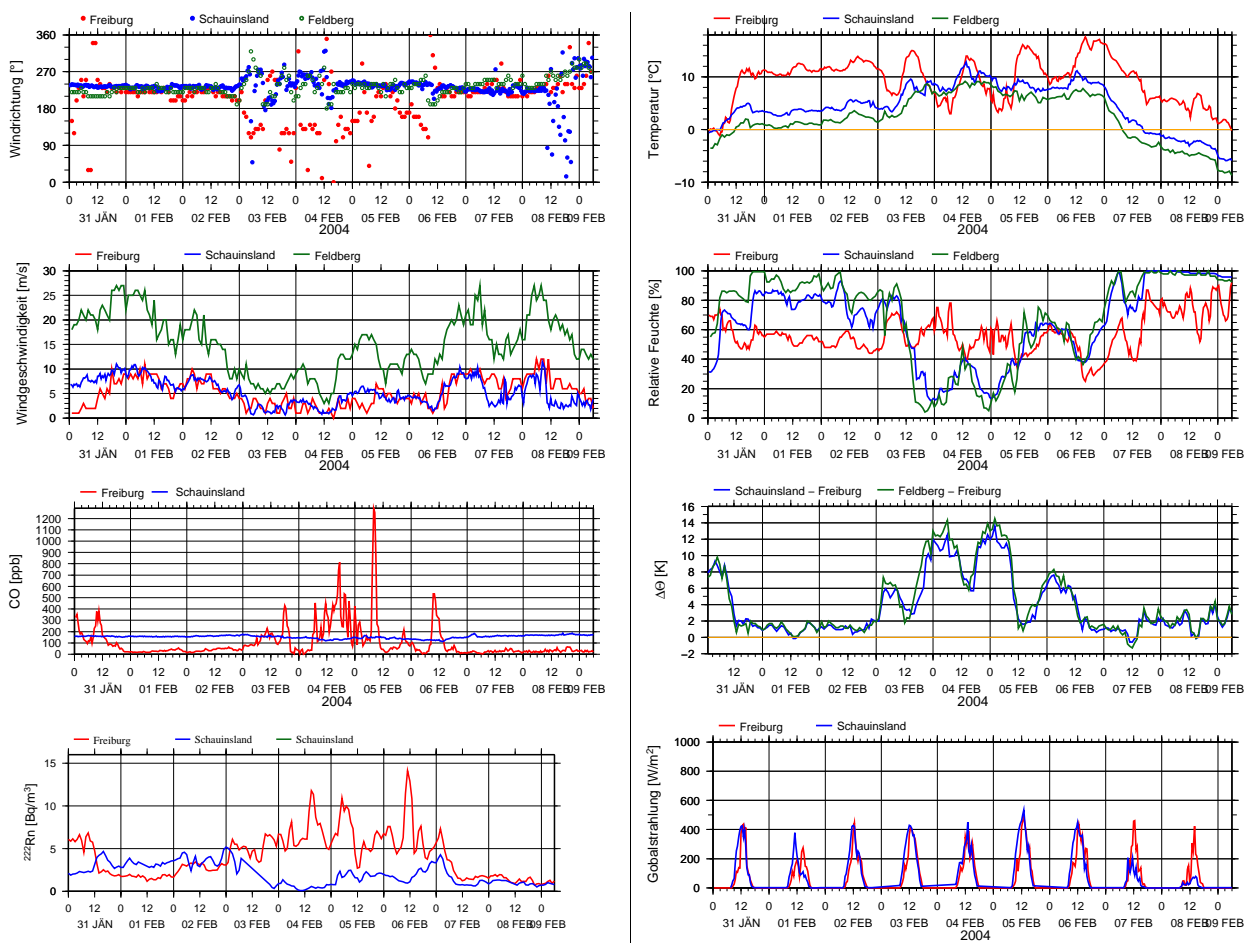


Abbildung 5.27: Zeitreihen der meteorologischen Parameter, von CO und der Radionuklide (grün Xenon-133, sonst Radon-222) für Episode 8 und 10.

5.2.9 Winterliche Hochdrucklage Dezember 2004

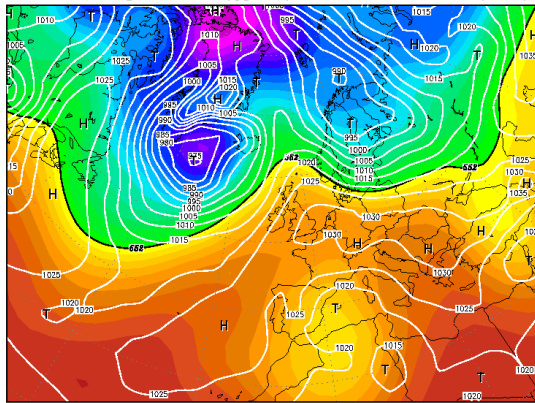
08.12.–17.12.2004 | keine radiologische Besonderheit | 10 / 8 Tage

Wetterkarten siehe Abb. 5.28, beobachtete Zeitreihen siehe Abb. 5.31 und Windrosen Abb. 5.30.

Eine klassische, lang anhaltende winterliche Hochdrucklage mit blockierendem Hoch (Kerndruck über 1030 hPa) über Mitteleuropa. Diese Hochdrucklage beginnt schon früher, wir wollen aber den letzten Teil betrachten, da so auch noch der spektakuläre Kaltfrontdurchgang in der Nacht vom 16. auf den 17. mitgenommen werden kann. In der ersten Hälfte der Lage können wir ein sogenanntes Blocking beobachten, mit einem Kaltlufttropfen im südlichen Mittelmeer, welcher gemeinsam mit dem Hoch über Mitteleuropa die Konfiguration bildet, welche die westliche Frontalzone blockiert. Dadurch ist im Untersuchungsraum eine leichte Ost- bis Südostkomponente der Strömung zu verzeichnen. Durch einen heftigen, bis zu den Kanarischen Inseln reichenden Kaltluftvorstoß auf dem Atlantik bildet sich am 13. ein neuer Kaltlufttropfen südwestlich von Spanien, während sich der alte Kaltlufttropfen weitgehend aufgefüllt hat. Dieser Kaltlufttropfen wandert dann weiter nach Süden ab, das blockierende Hoch wandert nach Osten, wodurch die Blocking-Lage aufgelöst wird und sich eine schwache Vorderseite über Mitteleuropa einstellt. Am 16. entwickelt sich im Seeraum zwischen Island und Schottland ein starkes Tiefdruckgebiet (Kerndruck unter 965 hPa) dessen Kaltfront am 16. Mitteleuropa erreicht. Auf ihrer Rückseite wird Deutschland dann am 17. von polarer Kaltluft überflutet.

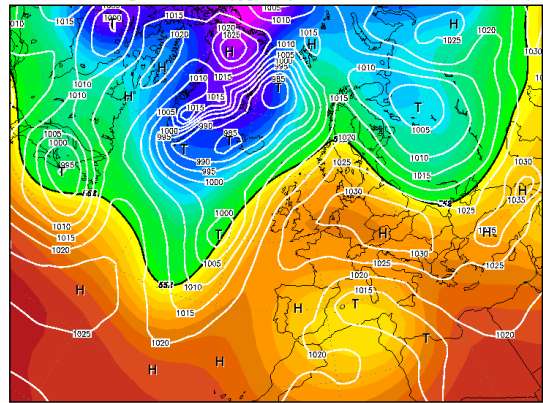
An den beiden Bergstationen beobachten wir einheitlich ein Drehen des Windes von anfangs Nord über Ost (mit fast 20 ms^{-1} am Feldberg) nach Süd (bei starker Windabschwächung), dann am 10. ein Rückdrehen auf Nord und am 12. das Eintreffen der Vorderseite mit SW-Wind. Am 14. stellt sich wieder N-Wind ein, dieser dreht über Ost auf SW, ganz zum Schluss kommt dann mit der Kaltfront wieder Westwind. In den Windrosen dominieren am Feldberg NE und SW, in Freiburg ist nahezu Calme. Freiburg liegt unter einer massiven Inversion (12-22 K !, $+10^\circ$ auf den Bergen und unter 0° in Freiburg), die Luftfeuchte ist meist nahe der Sättigung, die Strahlung minimal. Dementsprechend akkumulieren sich CO und Radon in Freiburg zu extremen Konzentrationen, wobei interessanterweise das CO erst ab dem 13. stark zunimmt. Auf dem Schauinsland hingegen sind die Konzentrationen gering. Die Kaltfront, welche die Episode am 16. beendet, ist eine klassische „maskierte“ Kaltfront: im Tal sinkt die Temperatur nicht, sondern steigt von -5° auf $+8^\circ$ an. Auf den Bergen, oberhalb der Inversion, welche beim Frontdurchgang ausgeräumt wird, sinkt sie natürlich sehr wohl.

08DEC2004 00Z
500 hPa Geopotential (gpm) und Bodendruck (hPa)



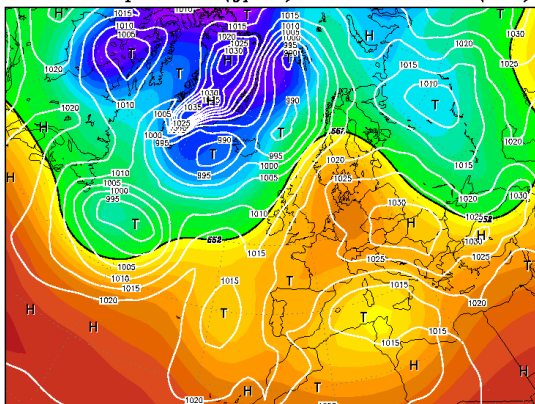
Daten: Reanalysis des NCEP
(C) Wetterzentrale
www.wetterzentrale.de

09DEC2004 00Z
500 hPa Geopotential (gpm) und Bodendruck (hPa)



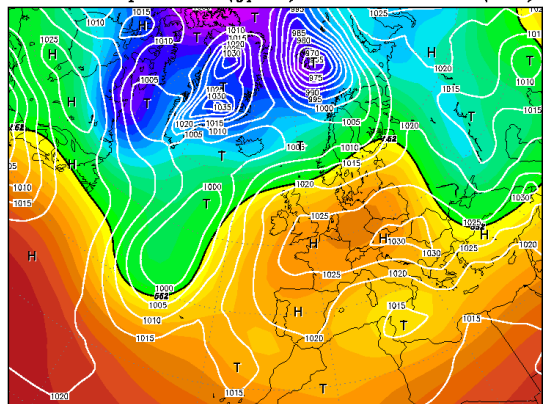
Daten: Reanalysis des NCEP
(C) Wetterzentrale
www.wetterzentrale.de

10DEC2004 00Z
500 hPa Geopotential (gpm) und Bodendruck (hPa)



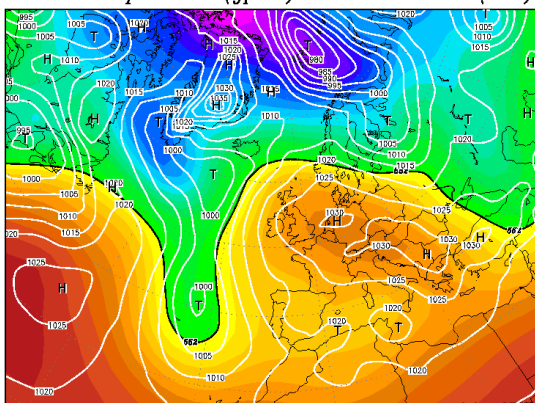
Daten: Reanalysis des NCEP
(C) Wetterzentrale
www.wetterzentrale.de

11DEC2004 00Z
500 hPa Geopotential (gpm) und Bodendruck (hPa)



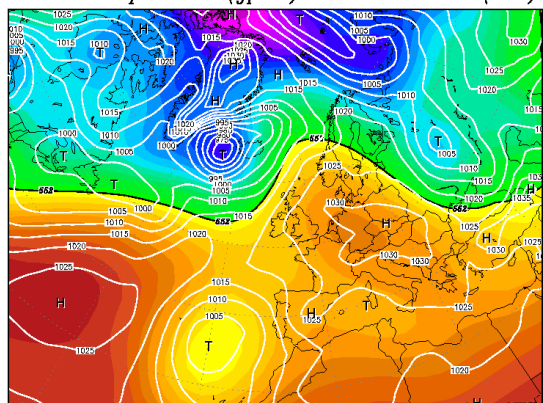
Daten: Reanalysis des NCEP
(C) Wetterzentrale
www.wetterzentrale.de

12DEC2004 00Z
500 hPa Geopotential (gpm) und Bodendruck (hPa)



Daten: Reanalysis des NCEP
(C) Wetterzentrale
www.wetterzentrale.de

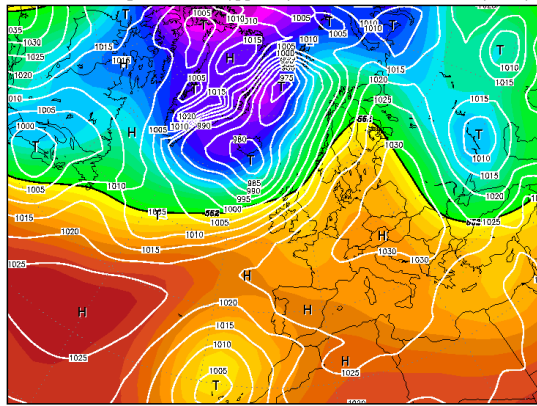
13DEC2004 00Z
500 hPa Geopotential (gpm) und Bodendruck (hPa)



Daten: Reanalysis des NCEP
(C) Wetterzentrale
www.wetterzentrale.de

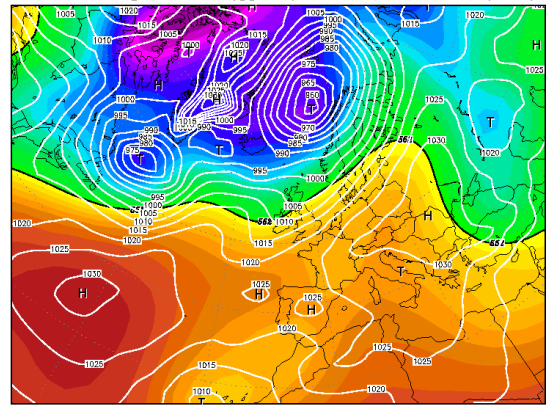
Abbildung 5.28: Wetterkarten für die Episode 9.

14DEC2004 00Z
500 hPa Geopotential (gpm) und Bodendruck (hPa)



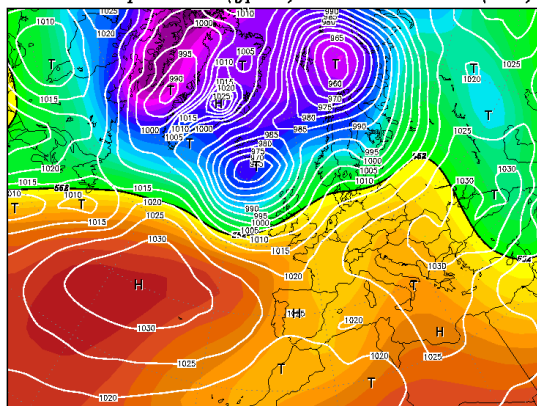
Daten: Reanalysis des NCEP
(C) Wetterzentrale
www.wetterzentrale.de

15DEC2004 00Z
500 hPa Geopotential (gpm) und Bodendruck (hPa)



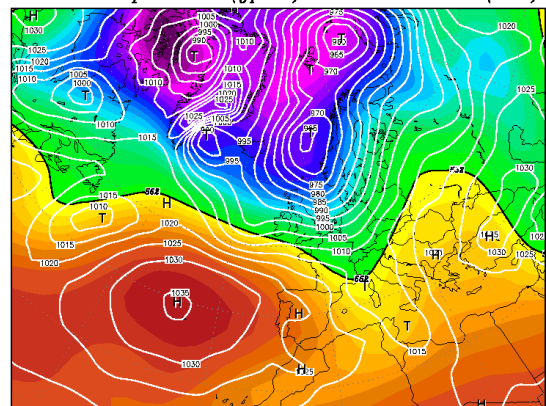
Daten: Reanalysis des NCEP
(C) Wetterzentrale
www.wetterzentrale.de

16DEC2004 00Z
500 hPa Geopotential (gpm) und Bodendruck (hPa)



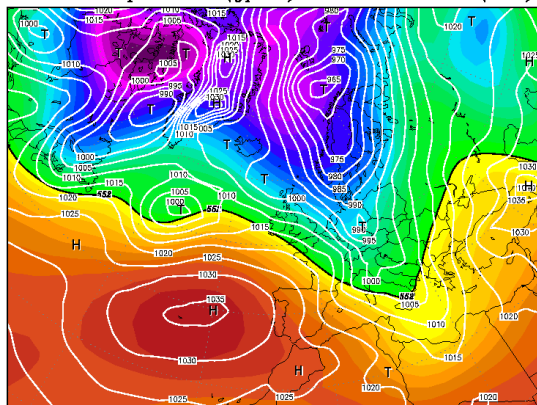
Daten: Reanalysis des NCEP
(C) Wetterzentrale
www.wetterzentrale.de

17DEC2004 00Z
500 hPa Geopotential (gpm) und Bodendruck (hPa)



Daten: Reanalysis des NCEP
(C) Wetterzentrale
www.wetterzentrale.de

18DEC2004 00Z
500 hPa Geopotential (gpm) und Bodendruck (hPa)



Daten: Reanalysis des NCEP
(C) Wetterzentrale
www.wetterzentrale.de

Abbildung 5.29: Wetterkarten für die Episode 9 (Forts.)

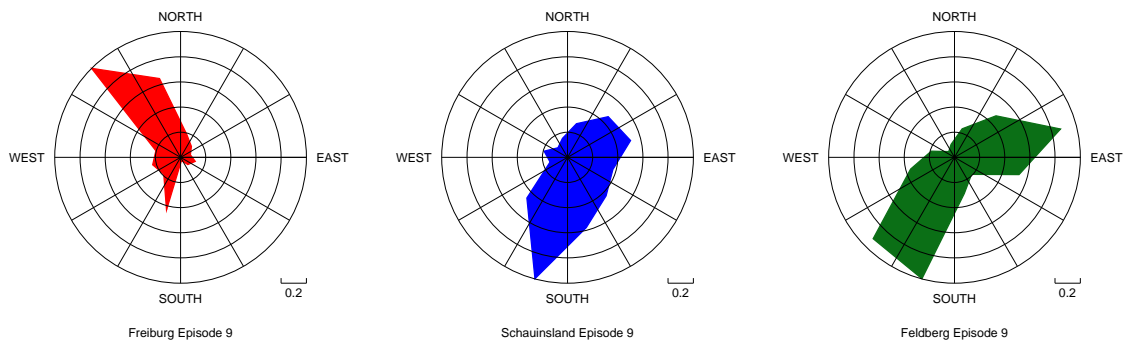


Abbildung 5.30: Häufigkeiten der Windrichtung während der Episode 9.

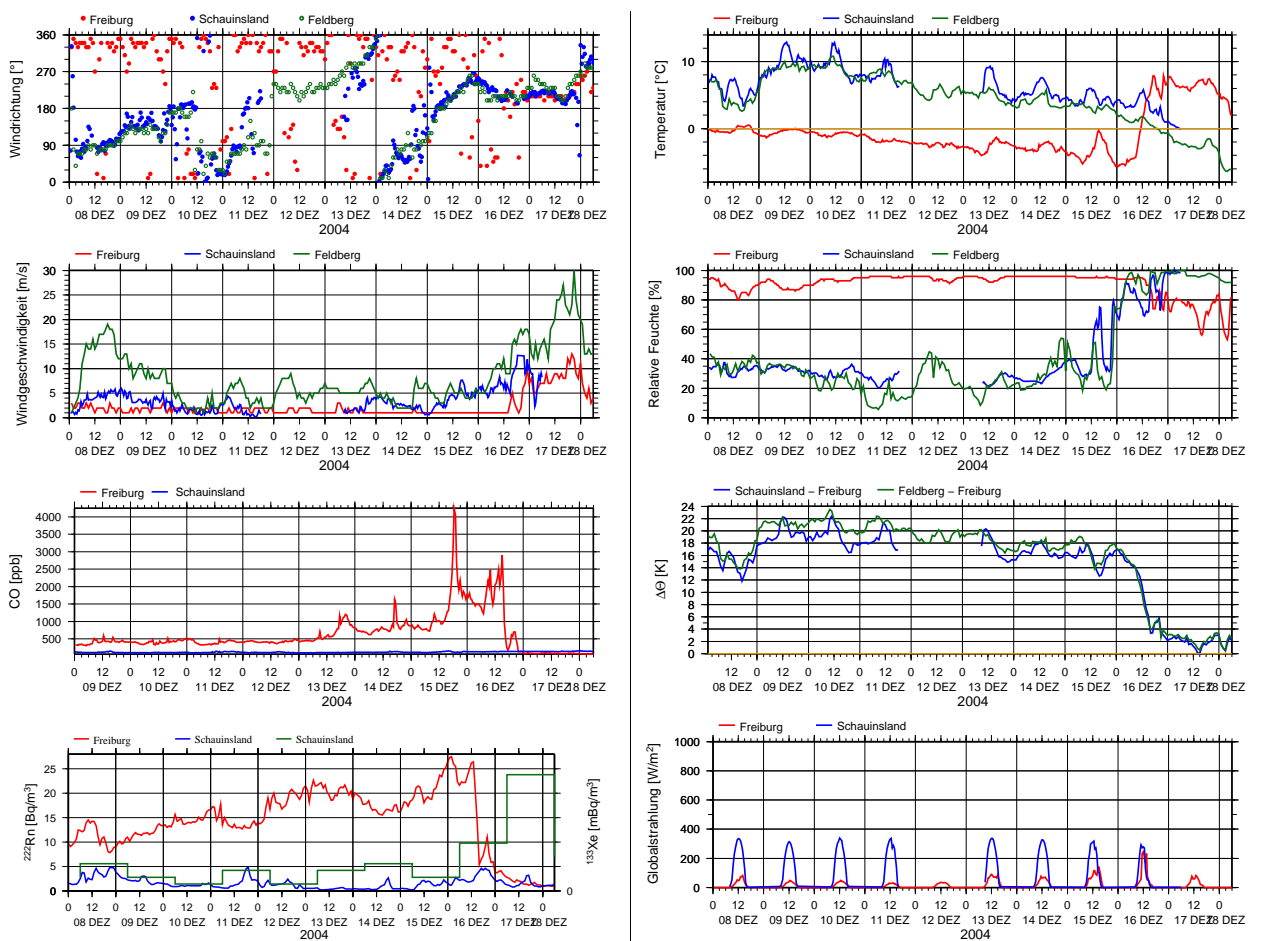


Abbildung 5.31: Zeitreihen der meteorologischen Parameter, von CO und der Radionuklide (grün Xenon-133, sonst Radon-222) für Episode 9.

5.2.10 Winterliche Hochdrucklage Februar 2004

04.02.–06.02.2004 | keine radiologische Besonderheit, Intermezzo der Südwestlage
Episode 8 | 0 / 3 Tage

Diese Episode ist ein Zwischenhoch im Rahmen der Episode 8, Südwestlage, und dort beschrieben.

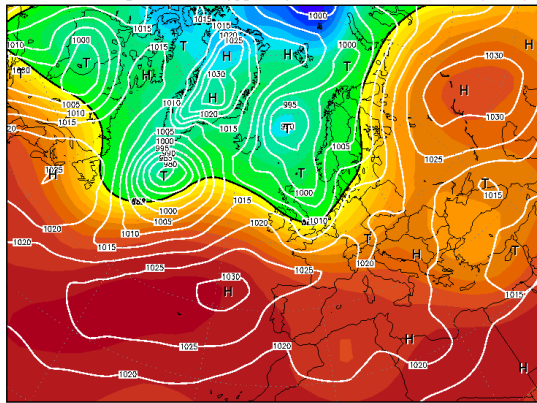
5.2.11 Nordostlage Oktober 2005

29.9.–04.10.2005 | Beginn einer längeren Episode, in der Xe-131 und Xe-133m gemessen wurden | Episode 11 | 5 / 3 Tage

Wetterkarten siehe Abb. 5.32, beobachtete Zeitreihen siehe Abb. 5.34 und Windrosen Abb. 5.33.

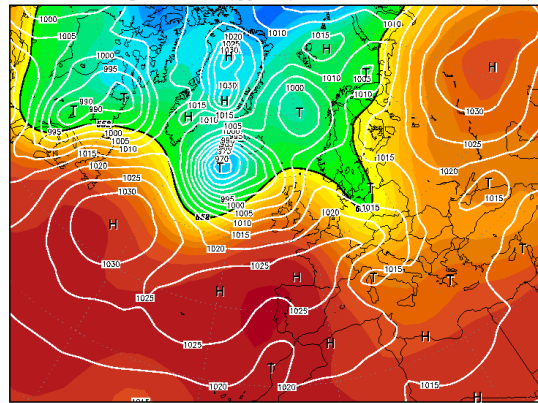
Diese Episode wurde primär aus radiologischer Sicht ausgewählt. Am 2. und 3. Oktober wurden erhöhte Werte von Xe-133 beobachtet. Aus meteorologischer Sicht kam es am 29.9. zu einem Kaltfront-Durchgang mit Winddrehung auf den Bergstationen von SW auf NW. Der 30. ist von Zwischenhocheinfluss geprägt, wir finden das thermische Windsystem in Freiburg und den üblichen Tagesgang beim Radon und CO. Am 1.10. stellt sich eine Trogvorderseite ein, und in der Nacht auf den 2. erfolgt ein markanter Kaltfrontdurchgang. Dieser führt in der Folge zur Bildung eines Genua-Tiefs und zum Abtropfen des Troges über dem westlichen Mittelmeer, wodurch sich über Süddeutschland eine nördliche bis nordöstliche Strömung einstellt, verbunden mit Schlechtwetter und feuchtadiabatischen vertikalen Temperaturgradienten.

29SEP2005 00Z
500 hPa Geopotential (gpm) und Bodendruck (hPa)



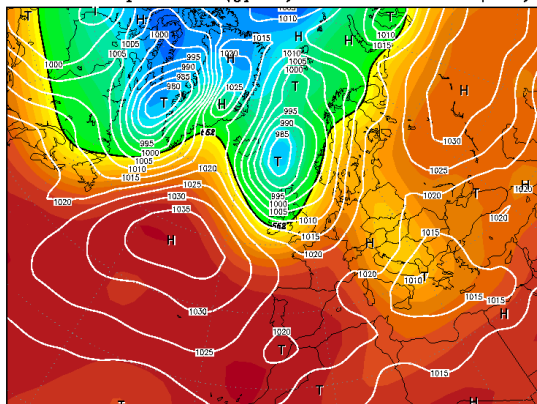
Daten: Reanalysis des NCEP
(C) Wetterzentrale
www.wetterzentrale.de

30SEP2005 00Z
500 hPa Geopotential (gpm) und Bodendruck (hPa)



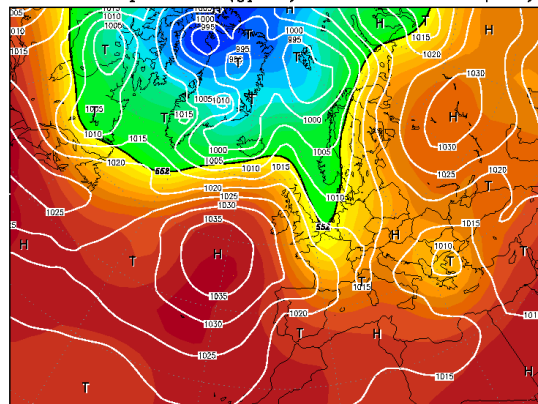
Daten: Reanalysis des NCEP
(C) Wetterzentrale
www.wetterzentrale.de

01OCT2005 00Z
500 hPa Geopotential (gpm) und Bodendruck (hPa)



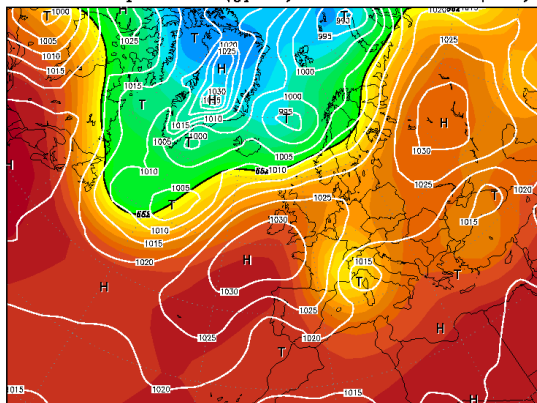
Daten: Reanalysis des NCEP
(C) Wetterzentrale
www.wetterzentrale.de

02OCT2005 00Z
500 hPa Geopotential (gpm) und Bodendruck (hPa)



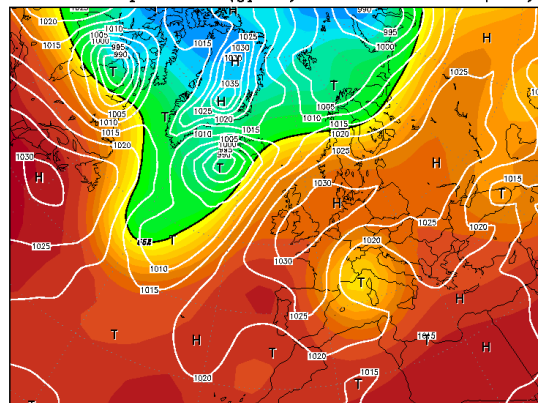
Daten: Reanalysis des NCEP
(C) Wetterzentrale
www.wetterzentrale.de

03OCT2005 00Z
500 hPa Geopotential (gpm) und Bodendruck (hPa)



Daten: Reanalysis des NCEP
(C) Wetterzentrale
www.wetterzentrale.de

04OCT2005 00Z
500 hPa Geopotential (gpm) und Bodendruck (hPa)



Daten: Reanalysis des NCEP
(C) Wetterzentrale
www.wetterzentrale.de

Abbildung 5.32: Wetterkarten für die Episode 11.

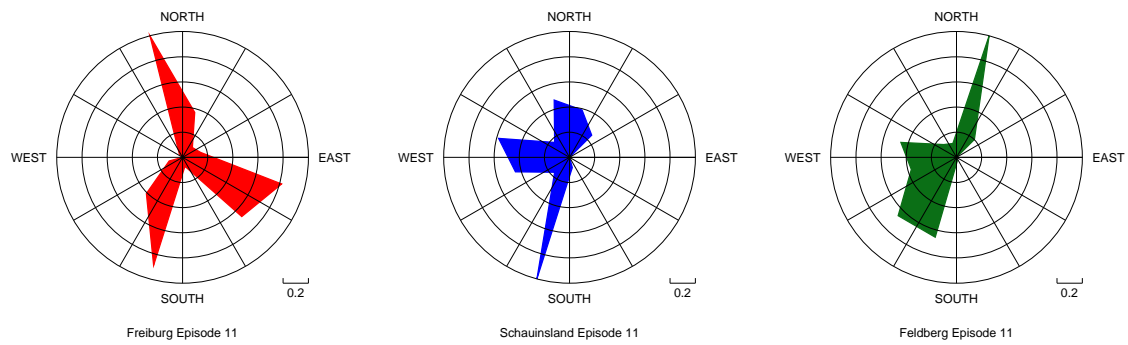


Abbildung 5.33: Häufigkeiten der Windrichtung während der Episode 11.

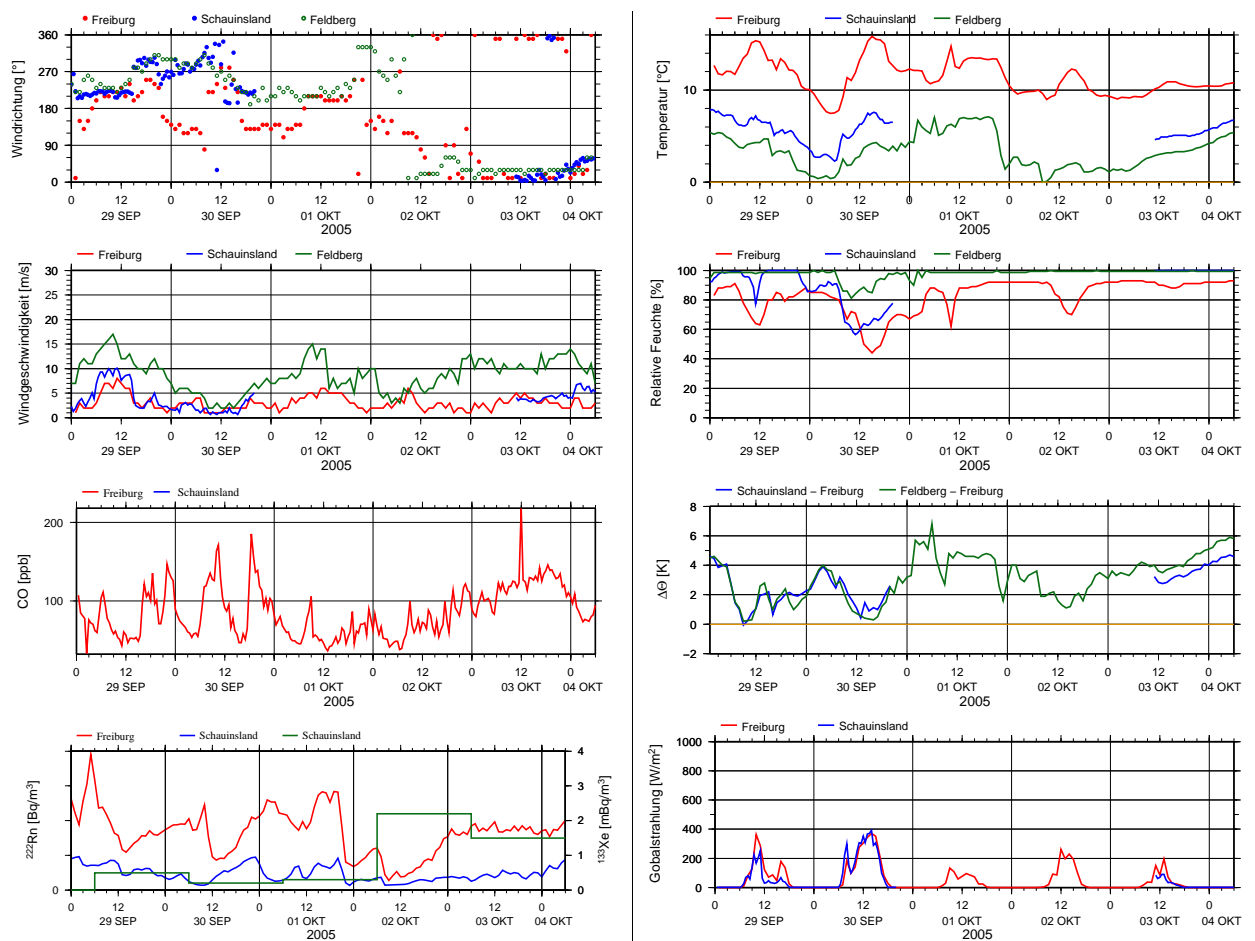


Abbildung 5.34: Zeitreihen der meteorologischen Parameter, von CO und der Radionuklide (grün Xenon-133, sonst Radon-222) für Episode 11.

6 Beschaffung von Modelldaten

6.1 Meteorologische Felder vom ECMWF

Zum Betrieb des meteorologischen Modells MM5 werden zu Beginn der Integration Anfangswerte und dann weiter Randwerte benötigt. Zusätzlich ist beabsichtigt, mittels "grid nudging" die MM5-Simulation in der Nähe der ECMWF-Analysen zu halten, da ansonsten der Vorhersagefehler zu groß werden könnte. Die dafür verwendeten Analysen beinhalten eine vollständige Beschreibung der prognostischen Variablen (z. B. Druck, dreidimensionaler Wind, Temperatur usw.) auf dem Modellgitter.

Für das gegenständliche Projekt wurden für die ausgewählten Episoden (siehe Tabelle 5.2) die benötigten Eingangsfelder vom Europäischen Zentrum für mittelfristige Wettervorhersage (ECMWF) aus dem MARS-Archiv extrahiert und nach Wien transferiert. Diese Daten beinhalten Felder der Windgeschwindigkeit, sowie anderer meteorologischer Parameter wie zum Beispiel der Temperatur oder der Feuchte auf 37 Modellflächen (Tabelle 6.1). Als Beispiel für die extrahierten Daten ist die vom ECMWF verwendete Topographie in Form des Geopotentials in Abbildung 6.1 dargestellt. Die räumliche Auflösung der Felder beträgt 1° (entspricht ca. 56 km in N-S Richtung und ca. 35 km in E-W Richtung), die zeitliche Auflösung 3 Stunden, und die Felder wurden für das Gebiet von 50° W – 50.5° E und 25° N – 80.5° N für die Jahre 2004 – 2005 extrahiert.

6.2 Geländehöhen- und Landnutzungsdaten

6.2.1 SRTM Geländehöhendaten

Im PSU/NCAR MM5 Modell wird als Basis für die Topographie der sogenannte GTOPO30-Datensatz (<http://edc.usgs.gov/products/elevation/gtopo30/gtopo30.html>) verwendet, dessen räumliche Auflösung mit $30''$ (ca. 1 km) doch ziemlich grob ist, vor allem wenn man bedenkt, dass für die geplante Simulation in der kleinsten Nestungsstufe die räumliche Maschenweite 0,67 km beträgt.

Daher wurden auch die frei verfügbaren hochaufgelösten Shuttle-Radar-Daten (SRTM, NASA Shuttle Radar Topographic Mission (<http://srtm.usgs.gov/>), bzw. die „Fehler“-korrigierte Version (<http://srtm.csi.cgiar.org/>)) mit einer horizontalen Auflösung von $3''$ (ca. 100 m) besorgt. Der Datensatz deckt den Bereich Mitteleuropas ab. Abbildung 3.1 wurde bereits mit diesem Datensatz produziert und zeigt den doch hohen Detaillierungsgrad an. Leider erwies sich der Einbau dieser Daten in das MM5 als unerwartet schwierig und wurde daher zurückgestellt. Der Einfluss auf die Ergebnisse sollte nicht allzu groß sein.

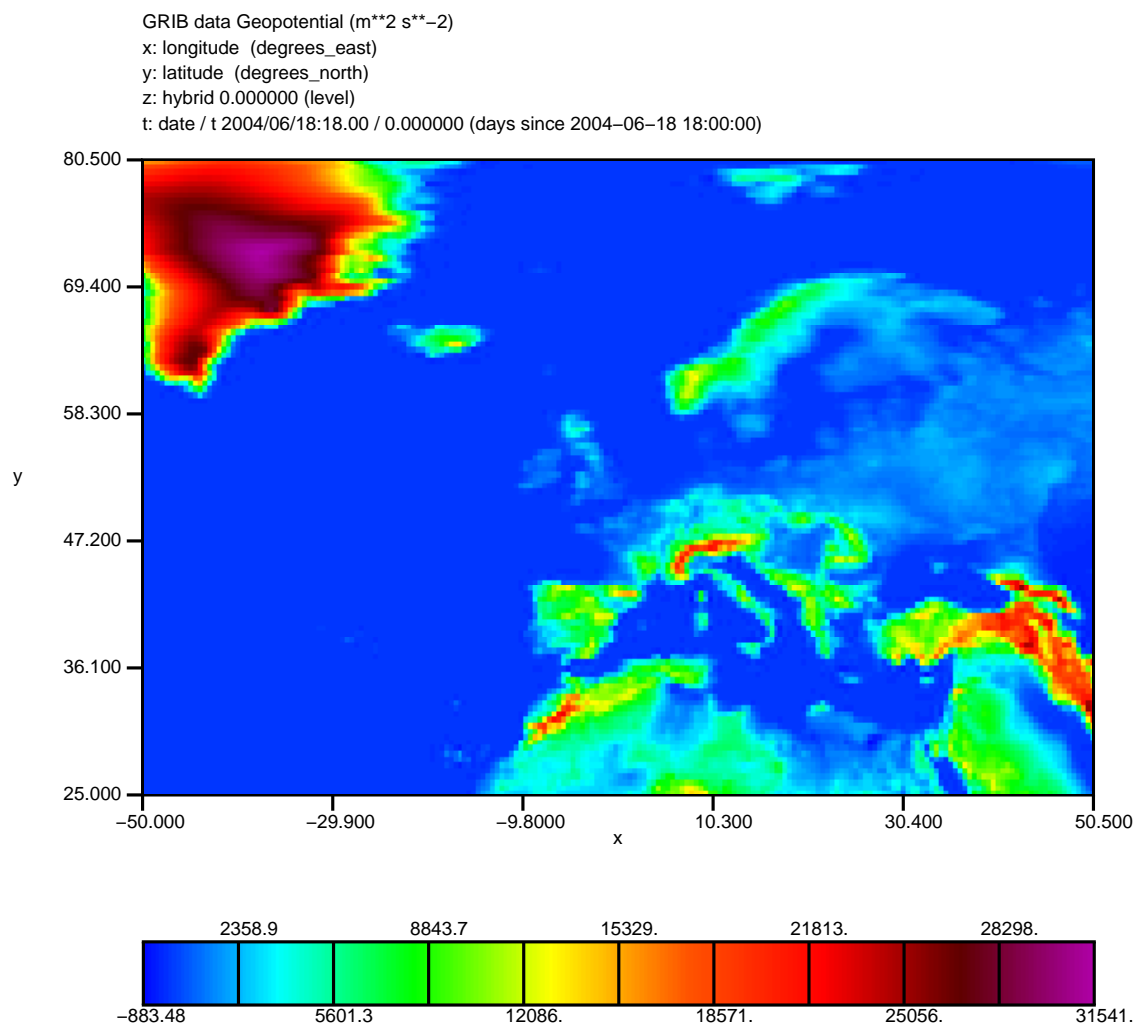


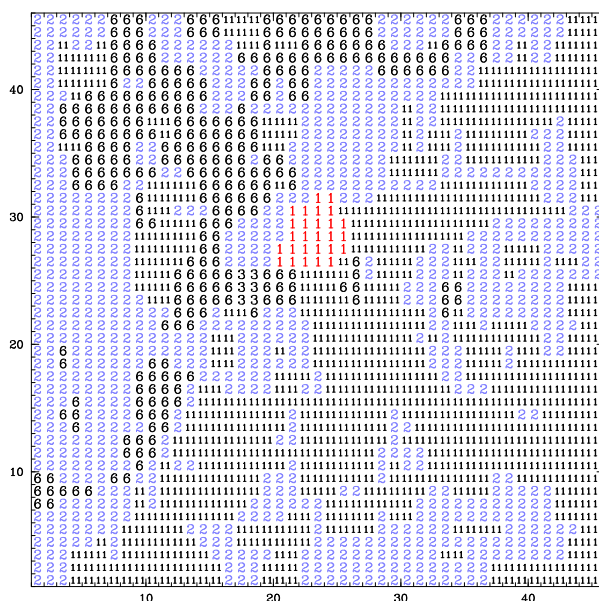
Abbildung 6.1: Geopotential der Topographie [m^2s^{-2}] für den 18. Juni 2004 18:00 UTC als Beispiel für die vom ECMWF extrahierten Größen (hier in 0.5° Auflösung).

6.2.2 Landnutzungsdaten

Das PSU/NCAR MM5 Modell benötigt Landnutzungsdaten für die Initialisierung diverser Bodenparameter und die Festlegung von Parametern wie z. B. die Albedo, die Bodenrauigkeit usw. Standardmäßig verwendet MM5 den sog. USGS-Landnutzungsdatensatz, der auf einem 1-km-Gitter und mit 24 Landoberflächen-Kategorien vorliegt. Die Landnutzung im innersten Rechengebiet (Nest 5) ist in Abb. 6.2 dargestellt. Das Stadtgebiet von Freiburg wird im wesentlichen korrekt erfasst (evt. könnte es etwas grösser sein), die Umgebung besteht aus landwirtschaftlichen Nutzflächen und Laubwald. Man könnte evt. Misch- oder Nadelwald statt Laubwald für eine bessere Angabe in den Höhenlagen halten, allerdings sind die Unterschiede in den relevanten Parametern (Albedo etc.) gering.

Im Rahmen des Eurotrac-2 Projektes wurde am Institut für Meteorologie und Klimaforschung – Atmosphärische Umweltforschung (IMK-IFU) in Garmisch-Partenkirchen in der Arbeitsgruppe von Herrn Smiatek ein europäischer Landnutzungsdatensatz (LCE

Dataset: data RIP: BfS Init: 0000 UTC Mon 31 Jan 05
 Fcst: 0.00 h Valid: 0000 UTC Mon 31 Jan 05 (0200 LST Mon 31 Jan 05)
 Land use category



Model info: V3.7.0 No Cumulus Eta PBL Reisner 1 1 km, 35 levels, 2 sec

Abbildung 6.2: In den Berechnungen verwendete Landnutzungskategorien (USGS-Datensatz) im innersten Rechengebiet. Es gilt folgender Schlüssel: 1 = bebautes Stadtgebiet, 2 = unbewässertes Acker- und Weideland, 6 = Ackerland-Wald-Mosaik, 11 = Laubwald.

2.5) erstellt (Smiatek, 2004). Dieser Datensatz liegt mit einer horizontalen Auflösung von 1 km und 24 verschiedenen Landnutzungstypen, die in den gleichen Kategorien wie im MM5 aufgeteilt sind, auf. Der geografische Bereich erstreckt sich dabei von 36°W – 56°E und 29°N – 75°N. Abbildung 6.3 zeigt die Landnutzungstypen im engeren Untersuchungsgebiet. Diese Daten könnten alternativ zum Standard-Datensatz verwendet werden und sollten an sich eine bessere Qualität aufweisen. Jedoch war auch hier der Aufwand im Verhältnis zur verfügbaren Zeit zu groß, um die Daten nutzen zu können.

6.3 Quell-Rezeptor-Matrizen vom IDC/CTBTO

Die Quell-Rezeptor-Daten wurden für die vorgesehenen Rezeptortage der Station DEP33 (Schauinsland) vom IDC zur BOKU-Met transferiert. Sie wurden mit dem dortigen operationellen Setup von FLEXPART/ECMWF erstellt und reichen jeweils sechs Tage zurück. Die Auflösung beträgt räumlich 1° und zeitlich (für die potentiellen Quellen) 3 h.

Es wurde auch in Aussicht gestellt, mit dem dort eingerichteten, aber aus Mangel an Rechenkapazität nicht operationellen Setup HYSPLIT/NCEP dieselben Quell-Rezeptor-Daten zu berechnen. Aus internen Gründen des IDC kam es jedoch nicht dazu, so dass diese Daten nicht Teil der Auswertungen sind.

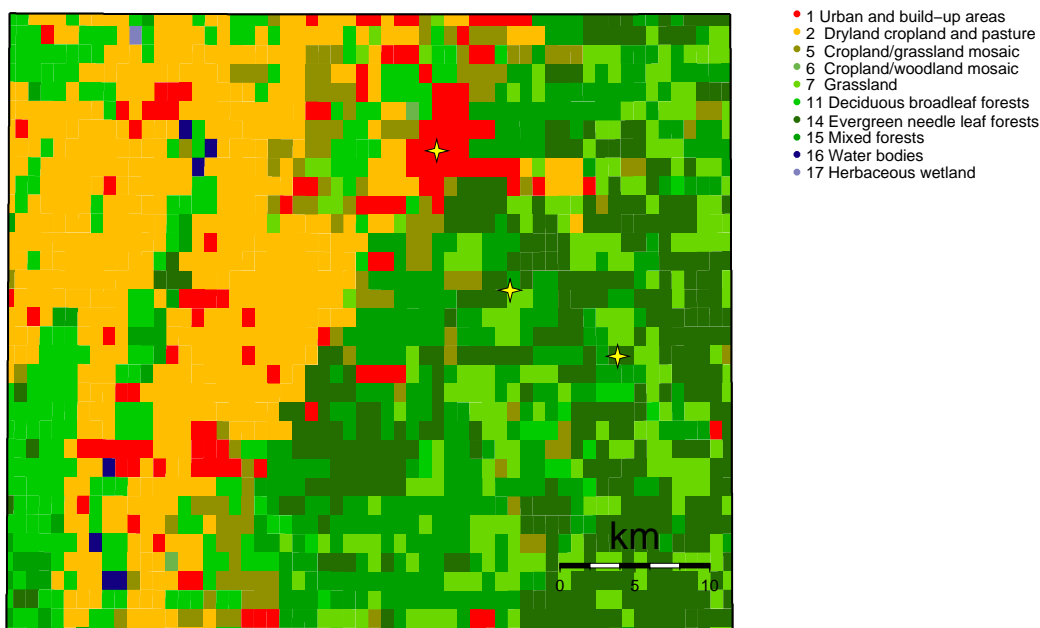


Abbildung 6.3: Landnutzungsdaten im Untersuchungsgebiet, wie sie im Landnutzungsdatensatz LCE-2.5 gesehen werden. Die Symbole kennzeichnen die Stationen Freiburg, Schauinsland und Feldberg.

6.4 HYSPLIT-Trajektorien

Vom Auftraggeber wurden die HYSPLIT-Trajektorien der Episoden übermittelt, um diese mit den FLEXPART-Rechnungen vergleichen zu können.

6.5 Emissionsdaten von CO und NO_x

Von der EMEP-Website <http://webdab.emep.int/> wurden für den gesamten europäischen Raum Emissionsdaten von CO und NO_x im ASCII-Format bezogen. Die Emissionsdaten aus dem Jahr 2003 haben eine horizontale Auflösung von 0,5° und erstrecken sich von 30° W – 60° E und 30° N – 75° N. Abbildung 6.4 stellt diese Daten für CO und NO_x grafisch dar.

Diese Daten sollen dazu dienen, die Qualität von Herkunftsberechnungen zu überprüfen, in dem die berechneten Quell-Rezeptor-Beziehungen mit den Emissionsdaten verknüpft werden und so eine modellierte Zeitreihe der Spurenstoff-Konzentrationen gewonnen und mit den Beobachtungen verglichen werden kann. Dazu sollten die EMEP-Daten noch räumlich und zeitlich (Tages- und Jahresgang) möglichst gut disaggregiert

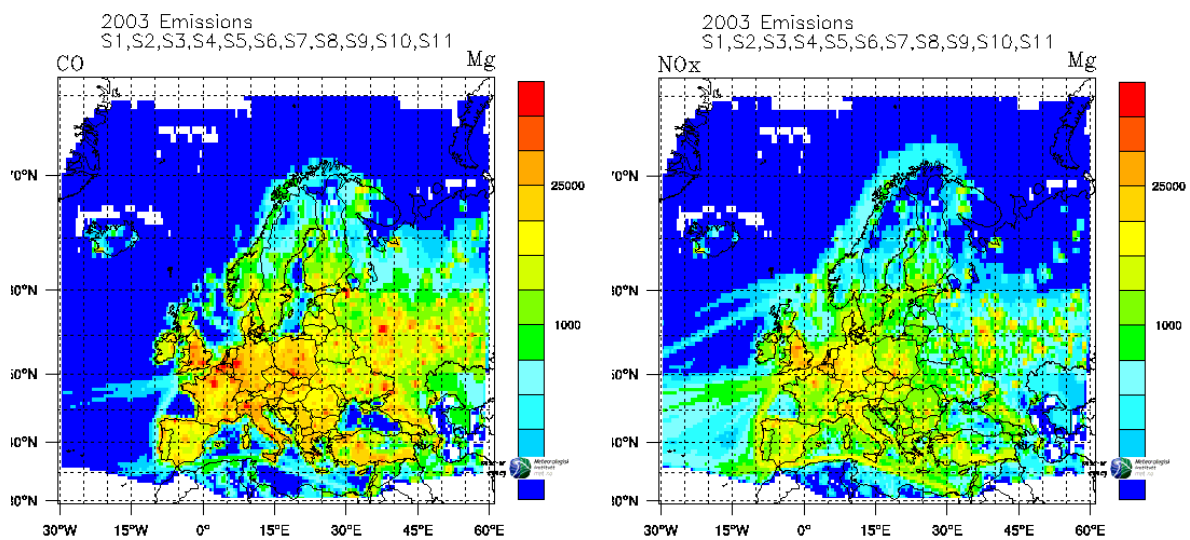


Abbildung 6.4: Emissionsdaten für CO (links) und NO_x (rechts) in Mg pro Gitterzelle für das Jahr 2003, wie sie auf <http://webdab.emep.int/> erhältlich sind.

werden, wobei sich jedoch aus Zeitgründen die räumliche Disaggregation als nicht mehr machbar herausstellte.

Tabelle 6.1: Aus dem ECMWF Archiv extrahierte Eingangsfelder. Dargestellt sind die meteorologische Größe, die vorhandene Anzahl vertikaler Schichten und die dazugehörige ECMWF Grib-Codenummer.

Anz. Sch.	Grib-Code	Parameter	Einheit
37	131	U-velocity	$m s^{-1}$
37	132	V-velocity	$m s^{-1}$
37	135	Vertical velocity	$Pa s^{-1}$
37	130	Temperature	K
1	134	Surface pressure	Pa
37	133	Specific humidity	$kg kg^{-1}$
0	141	Snow depth	m of water
0	151	Mean sea level pressure	Pa
0	164	Total cloud cover	(0 - 1)
0	165	10 metre u wind component	$m s^{-1}$
0	166	10 metre v wind component	$m s^{-1}$
0	167	2 metre temperature	K
0	168	2 metre dewpoint temperature	K
0	142	Large scale precipitation	m
0	143	Convective precipitation	m
0	146	Surface sensible heat flux	$W m^{-2} s$
0	176	Surface solar radiation	$W m^{-2} s$
0	180	East/West surface stress	$N m^{-2} s$
0	181	North/South surface stress	$N m^{-2} s$
0	129	Geopotential	$m^2 s^{-2}$
0	172	Land/sea mask	(0, 1)
0	160	Standard deviation of orografy	-
0	173	Surface roughness	m
0	186	Low cloud cover	(0 - 1)
0	187	Medium cloud cover	(0 - 1)
0	188	High cloud cover	(0 - 1)
0	235	Skin Temperature	K
0	139	Surf.temp/soil temp level 1	K
0	170	Deep soil tmp/soil temp level 2	K
0	183	Clim deep soil tmp/soil tmp level	K
0	236	Soil temperature level 4	K
0	39	Volumetric soil water layer 1	$m^3 m^{-3}$
0	40	Volumetric soil water layer 2	$m^3 m^{-3}$
0	41	Volumetric soil water layer 3	$m^3 m^{-3}$
0	42	Volumetric soil water layer 4	$m^3 m^{-3}$
0	31	Sea ice cover	(0-1)
0	32	Snow albedo	(0-1)
0	33	Snow density	kg^{-3}
0	34	Sea surface temperature	K
0	136	Total column water	$kg m^{-2}$
0	137	Precipitable water content	$kg m^{-2}$
0	174	Albedo	-

7 Modell-Setup und Ressourcenabschätzung

7.1 Modellgebiet mit Nestern

Als erster Schritt für die Modellrechnungen wurde das Modellgebiet definiert. Um die hohe räumliche Auflösung, die die Durchführung dieses Projektes verlangt, zu erreichen, wurde dem äußeren Gebiet D1 vier Nestungsstufen, D2 – D5, eingebettet (Abb. 7.1). Dabei wurde die Randbedingung des MM5-Modells, dass beim Nesten der Faktor 3 bezüglich des Auflösungsgewinnes der horizontalen Gitterlänge pro Nestlevel nicht überschritten werden darf, Rechnung getragen. In Tabelle 7.1 sind die Gitterpunktdimensionen mit den dazugehörigen horizontalen Auflösungen pro Nest eingetragen.

Die Abbildungen 7.3 – 7.6 zeigen die einzelnen Nester und die entsprechende Topographie. Dabei ist deutlich erkennbar, wie die Auflösung der Topographie von Neststufe zu Neststufe zunimmt. Als Basis für die Topographie wurde hier der so genannten GTOPO30-Datensatz verwendet, da dessen Verwendung bereits in MM5 integriert ist. Für N5 (0.67 km Gitterweite) stößt man damit jedoch an die untere Grenze der Verwendbarkeit, da die GTOPO30-Daten (Global Topography 30") mit ca. 1 km Auflösung eigentlich zu grob dafür sind. Deshalb ist auch der Gewinn an Detaillierungsgrad, der in den Abbildungen von N4 zu N5 sichtbar ist, gering.

Da das eigentliche Simulationssystem aus einer Anzahl an Prä- und Postprozessor-Programmen besteht, müssen einige Vorkehrungen getroffen werden. Das erste Modul dieser Prozessorkette legt das Modellgebiet fest und bereitet die geographischen und orographischen Daten sowie Vegetationstypus und Bodentypus in der jeweiligen Domain vor. Dieser Vorgang ist nachdem das Modellgebiet festgelegt wurde nur ein-

Tabelle 7.1: Übersicht zum Modell-Setup: Neststufen, Gitterpunkte, horizontale Gitterdistanz, und Größe der damit verbundenen Inputdatenfiles. Die Filegröße bezieht sich auf einen Simulationstag (ausgenommen Terrain-Files).

Domain	Gitterpunkte	Auflösung [km]	Seitenlänge [km]	Terrain-files	Input p-Flächen	Input σ -Flächen
D1	78×78	54.00	4212	690 kB	36 MB	59 MB
D2	91×91	18.00	1638	896 kB	48 MB	77 MB
D3	100×100	6.00	600	1100 kB	58 MB	91 MB
D4	79×79	2.00	158	705 kB	37 MB	60 MB
D5	46×46	0.67	31	318 kB	12 MB	25 MB
Summe				2.65 MB	191 MB	312 MB
ECMWF-Basisdaten					40 MB	



Abbildung 7.1: Modellgebiet D1 mit vier eingebetteten Nestern D2 – D5.

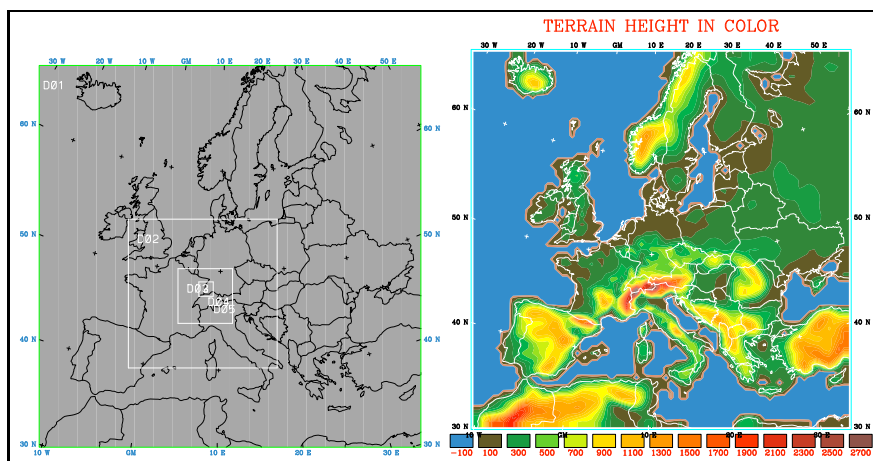


Abbildung 7.2: Modellgebiet D1 mit eingebettetem Nest D2 (links), rechts die Topographie dieses Gebiets.

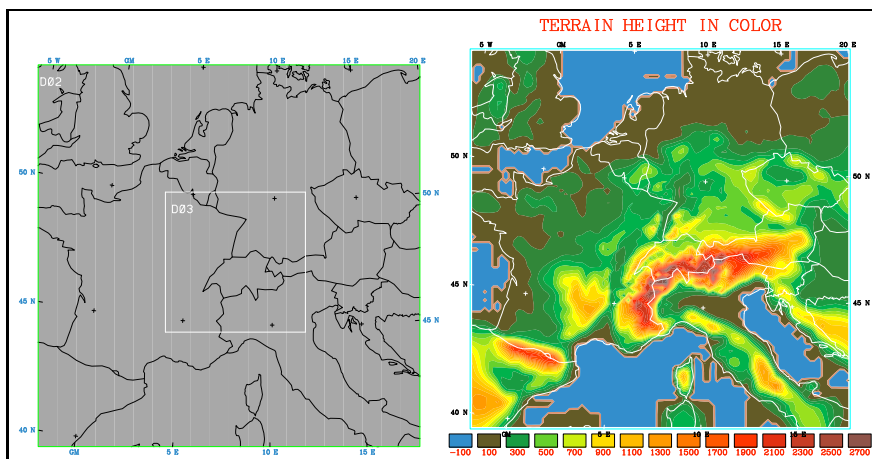


Abbildung 7.3: Modellgebiet D2 mit eingebettetem Nest D3 (links), rechts die Topographie dieses Gebiets.

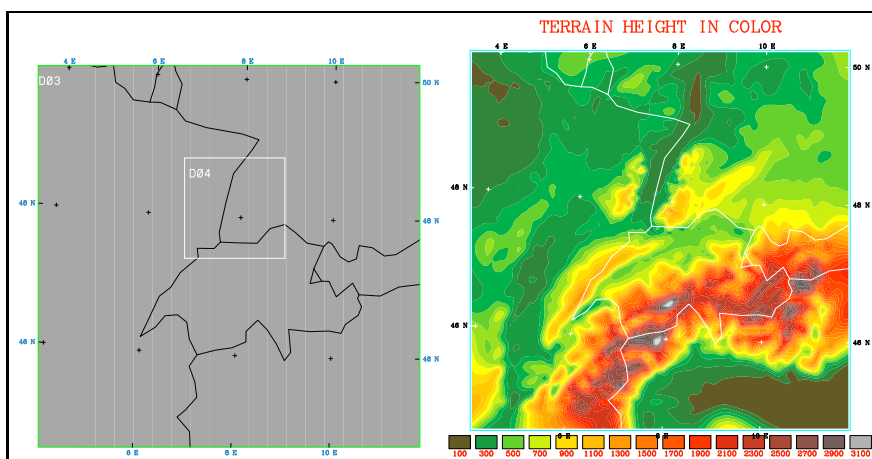


Abbildung 7.4: Modellgebiet D3 mit eingebettetem Nest D4 (links), rechts die Topographie dieses Gebiets.

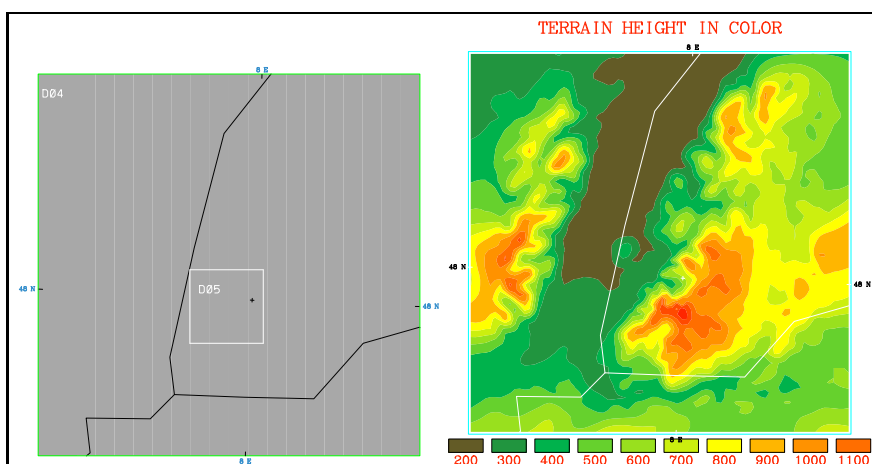


Abbildung 7.5: Modellgebiet D4 mit eingebettetem Nest D5 (links), rechts die Topographie dieses Gebiets.

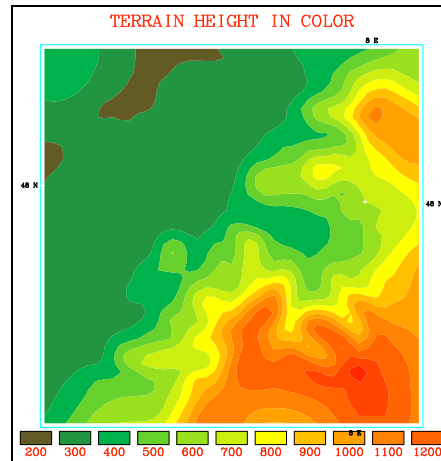


Abbildung 7.6: Topographie im Nest D5.

mal auszuführen und nimmt kaum Zeit in Anspruch. Bei dem vorgeschlagenen Set-up werden ca. 2,65 MByte Speicherplatz produziert (Tabelle 7.1).

Als Anfangs- und Randwerte wurden für die Testperiode 1. November 2004 bis 8. November 2004 meteorologische Größen aus dem Archiv des EZMW extrahiert (s.a. Tab. 2.1) mit einer zeitlichen Auflösung von 3 h und einer räumlichen Auflösung von 0.5° extrahiert. Der Platzbedarf beträgt dabei ca. 5 MByte pro Termin (40 MByte / Tag). Diese meteorologischen Eingangsdaten müssen dann durch das nächste Präprozessor-Programm REGRID aufbereitet werden. Im Wesentlichen werden die Eingangsdaten in das MM5-Format umgewandelt, wobei ab diesem Zeitpunkt der Starttermin für die Simulation bekannt sein muss. Die umgewandelten Daten nehmen etwa 190 MByte pro Tag in Anspruch (Tabelle 7.1).

Als vorletzter Schritt müssen die auf Druckkoordinaten vorliegenden Felder auf terrainfolgende σ -Koordinaten interpoliert werden. In unserem Setup wurden dabei 30 σ -Level gewählt, um eine ausreichende vertikale Genauigkeit zu gewährleisten. Dies geschieht mit dem Präprozessor-Programm INTERPF. Auch werden in diesem Modul die für den gesamten Lauf notwendigen Randbedingungen sichergestellt. Dabei fällt ein Festplattenspeicherbedarf von ca. 312 Mbyte pro Tag an (Tabelle 7.1).

7.2 Modelloptionen

Als letzter Schritt müssen die Parameter für die diversen Parametrisierungen eingestellt werden. Für das Test-Setup wurden dabei folgende Einstellungen vorgenommen:

- **Cumulus-Parametrisierung:** Kain-Fritsch in der 1. und 2. Neststufe, für 6 km und kleiner wurde die Parametrisierung als unnötig betrachtet, da die Konvektion dann schon aufgelöst werden kann.
- **Grenzschichtschema:** MRF. Ein rechenmässig effizientes Schema, das für Simulationen mit hoher Auflösung in der Grenzschicht geeignet ist. Die Verwendung eines Schemas mit TKE-Budget muss noch geprüft werden.

Tabelle 7.2: Ressourcenbedarf von MM5 bei verschiedener Nestungsstufenzahl pro simuliertem Tag. Rechnung auf Intel Pentium 3.0 GHz mit Intel-Compiler.

Nest	CPU-Zeit	Arbeits- speicher	Festplattenspeicher		
			Input	Output	Gesamt
MM5-N3	172 min (2 h 52 min)	280 MB	.38 GB	0.8 GB	1.2 GB
MM5-N4	407 min (6 h 47 min)	330 MB	0.48 GB	1.05 GB	1.4 GB
MM5-N5	739 min (12 h 19 min)	550 MB	0.53 GB	1.08 GB	1.6 GB

- **Landoberflächenschema:** Noah Land-Surface-Model. Ein aufwändiges Schema, welches Bodenfeuchte und Bodentemperatur in vier verschiedenen Tiefen (7, 28, 100 und 255 cm) rechnet, die Vegetationsschicht zumindest auf einfache Art berücksichtigt und eine Schneedecke simulieren kann.
- **Niederschlagsschema:** Reisner 1. Ein mittleres Schema mit akzeptabler Rechenzeit, das allerdings konvektive Niederschläge weniger gut simuliert.
- **Strahlungsschema:** Cloud-radiation-scheme, ein Schema das die Auswirkungen von Wolken auf die Strahlung berücksichtigt und auch die Möglichkeit bietet, die unterschiedliche Besonnung im Gebirge zu berücksichtigen.

Um Abweichungen der simulierten Felder im Innerern des Modellgebiets von der vorgegebenen Analyse zu minimieren, wurde das „Grid-Nudging“ aktiviert. Dabei werden die Modellvariablen auf dem äußersten Gitter, welches in seiner Auflösung der ECMWF-Analyse vergleichbar ist zu den vorgegebenen Analysewerten hin korrigiert.

7.3 Rechenzeitbedarf

Für eine Testperiode (1. November 2004 – 8. November 2004) wurde eine Simulation, mit Initialisierung um 12 UTC, gestartet, bei der zur jeder vollen Stunde die Modellvariablen abgespeichert wurden. Tabelle 7.2 zeigt die für verschiedene Läufe mit drei, vier oder fünf Nestungsstufen benötigten Ressourcen an.

Für das Vorhaben sollen jeweils für fünf Wetterlagen jeweils zwei Fälle untersucht werden, wobei pro Fall eine Periode von 3-5 Tagen simuliert werden soll. Eine Gesamt-Simulationsdauer von 50 Tagen würde mit fünf Nestebenen ca. 26 Tage Rechenzeit und (einschließlich der GRIB-Version für den FLEXPART-Input) ca. 150 GB an Fest-

Tabelle 7.3: Grobe Richtwerte für den Ressourcenbedarf von FLEXPART-MM5 pro Messwert für den das Herkunftsgebiet bestimmt wird. Rechnung auf Opteron 2.4 GHz mit PG-Compiler.

Nest	CPU-Zeit	Arbeits- speicher	Festplattenspeicher		
			Input	Output	Gesamt
FLEXPART	≈10 min	≈500 MB	≈1.0 GB	1 MB	≈1 GB

plattenplatz beanspruchen, mit vier Nestebenen etwa die halbe Rechenzeit, während der Festplattenbedarf nur wenig verringert würde.

Gerechnet wurde dabei mit der MM5 Version 3.7 (Dezember 2004) auf einem handelsüblichen SUSE-Linux-System (Desktop) mit einem Pentium 4 Prozessor (3.0 GHz, 1 GB RAM) und dem Intel Fortran 90 Compiler V9.0. Auf einem alternativ bei uns verwendbaren AMD-Opteron System (2.4 GHz), ebenfalls unter SUSE-Linux, jedoch mit dem Portland Group Compiler, werden ähnliche Rechenzeiten erreicht.

Die Ressourcenabschätzung für FLEXPART-Läufe ist deutlich komplexer, weil es so viele mögliche Optionen für die Berechnungen gibt. So skaliert der Output mit der Ausgabefrequenz, die Rechenzeit mit der Partikelanzahl, der zeitlichen Auflösung für die zugrundeliegenden Stationsdaten, und der Anzahl Rezeptorpunkte die zum Beispiel für Tests verwendet werden sollen, bei denen unterschiedliche Höhen über Grund als Approximationsmethode untersucht werden sollen. Outputmenge und Rechenzeit skaliert mit der Länge der Zeit, die die Luftmassen zurückverfolgt werden sollen (obige Angaben sind für 5 Tage). Nicht alle Beziehungen sind linear. Zum Beispiel beinhaltet die Rechenzeit einen Sockel, der durch das Einlesen und Verarbeiten der Meteorologie-Daten entseht. Die Angaben in Tabelle 7.3 können daher nur als ungefähre Anhaltspunkte dienen. Wenn wir annehmen, dass pro Episode vier Beobachtungstage mit jeweils 3 h Auflösung an zwei Stationen mit FLEXPART untersucht werden sollen, ergäbe das bei 10 Episoden 240 Rechnungen, die bei den Zahlen der Tabelle 7.3 sowohl bezüglich der Rechenzeit (ca. 2 Tage) als auch der Datenmengen (ca. 500 MB) unproblematisch wären.

7.4 Schlussfolgerung

Die Simulation von ca. 50 Tagen ist bei den gegebenen Ressourcen mit dem vorgeschlagenen Set-up und fünf Nestebenen bis hinunter auf 0,67 km möglich. Für allfällige zukünftige Rechnungen über wesentlich längere Perioden könnte untersucht werden, wie wichtig die letzte Neststufe tatsächlich ist, da diese überproportional viel Rechenzeit verbraucht.

Weiters zeigt die Ressourcenabschätzung, dass mit einem handelsüblichen Rechner der Preisklasse von 1000 Euro (zu der allerdings noch die nicht geringen Kosten für den Compiler gerechnet werden müssen) die *a posteriori* Untersuchung einzelner Episoden gut möglich ist. Der kritische Faktor für Implementierungen ausserhalb einer meteorologischen Einrichtung ist wohl eher im erforderlichen Know-how in Bezug auf Meteorologie und EDV (Linux, Fortran,...) zu sehen.

7.5 Beispiel für eine MM5-Simulation

Im folgenden werden Ergebnisse des MM5-Testlaufs als Beispiel dargestellt. Wie besprochen, wurde der Zeitraum 1.–8.11.2005 simuliert. Hier werden die Windfelder im Bereich des Zielgebietes in Neststufe 5 und Neststufe 3 vorgestellt. Abbildung 7.7 zeigt die Domain 5 mit einer horizontalen Auflösung von 0,67 km. Dargestellt sind die Wind-

vektoren für den 5. November um 16 und 20 Uhr UTC und die Topographie. Es herrscht eine kräftige Nordströmung, und am späten Nachmittag wird die Topographie weitgehend überströmt. Mit der Stabilisierung am Abend kommt es dann zu einer Trennung in zwei Strömungsregime: Auf den Bergen weht weiter der nördliche Wind. Im Tal wird der Wind von der Topographie beeinflusst: Kanalisierung auf Nordwest im Rheingraben, ein komplexes Strömungsmuster im Zartener Becken, das sich vermutlich aus Kaltluftabflüssen in Wechselwirkung mit der großräumigen Strömung ergibt.

In Neststufe 3 (Abbildung 7.7) mit 6 km Gitterweite erkennen wir nur mehr die Beeinflussung der Strömung durch ganze Gebirgsmassive wie Schwarzwald, Vogesen, Jura. In den Alpen wirken nur grosse Strukturen wie die größten Täler und die Gotthard-Senke, durch die Nordföhn im Tessin bewirkt wird.

Für dieses Beispiel wurden auch Simulationen mit FLEXPART durchgeführt. Dabei wurden Partikel zwischen 5.11.2004/06 UTC und 6.11.2004/06 UTC in 50 m über der Modelltopographie am Schauinsland freigesetzt und maximal 72 h, bis 3.11.2004/06 UTC, zurückverfolgt. Dies wurde einmal mit den Windfeldern aller fünf Neststufen gerechnet, und dann nur mit dem äußersten Gebiet (54 km Gitterweite). Die Ergebnisse sind hier als die Positionen aller Partikel, die sich in den untersten 150 m über Grund befinden, dargestellt (Abb. 7.9–7.11). Auch auf dem Schauinsland, der als Bergstation ja weniger von der grossräumigen Strömung abweichende Windverhältnisse haben sollte, erkennen wir einen deutlichen Einfluss der kleinräumigen Strömung, vielleicht als Folge der Umströmung des Feldbergs (Abb. 7.9). Mit zunehmender Entfernung wird die Auswirkung der kleinräumigen Strömungsmodifikation allerdings geringer (Abb. 7.10, 7.11).

7.6 Veränderungen des Setups der MM5-Läufe

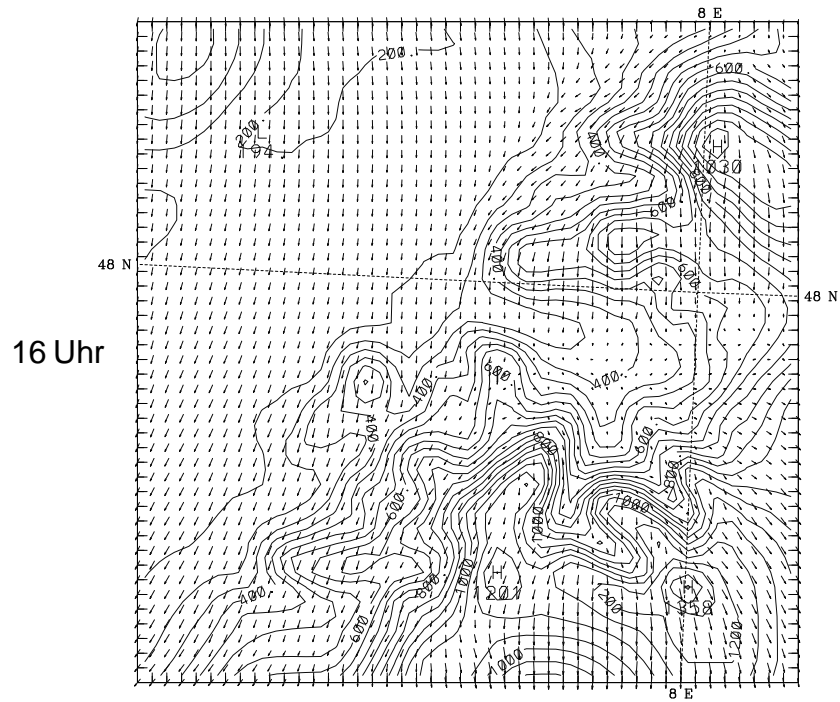
Es zeigte sich nach den Produktionsläufen, dass vor allem die Maximumtemperaturen im Sommer im Modell zu kalt sind. Daher wurden noch verschiedene Varianten des Setups getestet, um hier zu besseren Ergebnissen zu gelangen. Es konnten zwar Verbesserungen erzielt werden, allerdings waren auch diese nicht wirklich befriedigend (Näheres siehe unter Modellergebnisse, Kapitel 9). Als positiv erwiesen sich folgende Veränderungen:

- Vorverlegung des Simulationsbeginns von 00 UTC auf 18 UTC.
- Verwendung des “Cloud Radiation Scheme” an Stelle des “Rapid Radiative Transfer Model” (an sich eine einfachere Parametrisierung, scheint aber für unsere Verhältnisse besser zu funktionieren).
- Verringerung der so genannten “moisture availability” (Bodenfeuchte) um 30%.

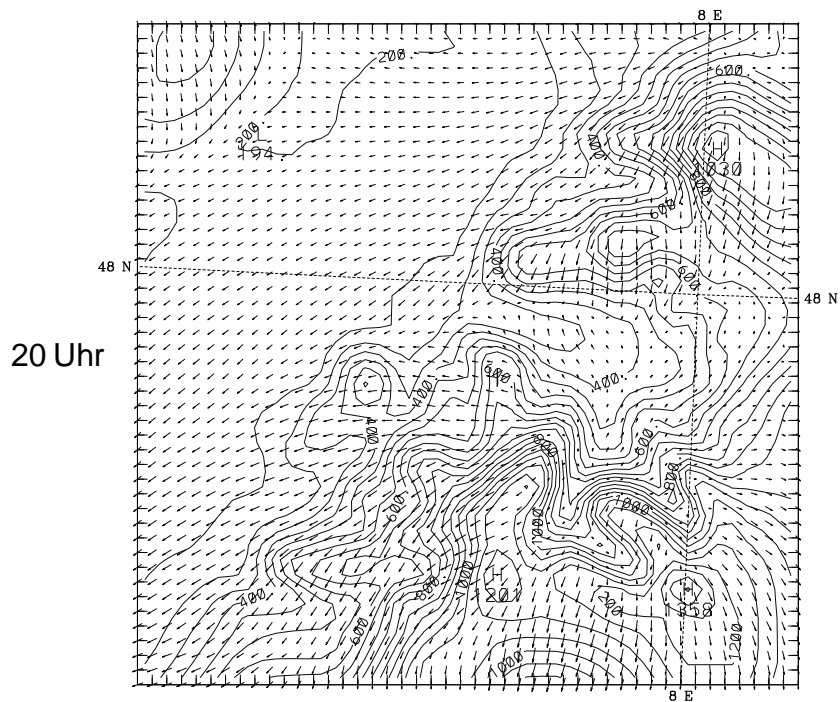
Alle Sommerfälle (Episoden 1, 5 und 6) wurden mit diesen geänderten Parametern nochmals berechnet.

Die Verwendung eines einfacheren Landoberflächenschemas (“five-layer soil model” anstelle von “Noah land surface model”) erbrachte keine Vorteile.

SIGMA =1.000 TERRAIN (m) 2004-11-05_16.00.00 = 2004-11-01_12 +100.00H SMOOTH= 0
 SIGMA =0.995 BARB UV (m/s) 2004-11-05_16.00.00 = 2004-11-01_12 +100.00H SMOOTH= 0



SETUP 1
 CONTOUR FROM 150.00 TO 1350.0 CONTOUR INTERVAL OF 50.000 PT(3,3)= 333.14^{9.5} MAXIMUM VECTOR
 SIGMA =1.000 TERRAIN (m) 2004-11-05_20.00.00 = 2004-11-01_12 +104.00H SMOOTH= 0
 SIGMA =0.995 BARB UV (m/s) 2004-11-05_20.00.00 = 2004-11-01_12 +104.00H SMOOTH= 0



SETUP 1
 CONTOUR FROM 150.00 TO 1350.0 CONTOUR INTERVAL OF 50.000 PT(3,3)= 333.14^{7.9} MAXIMUM VECTOR

Abbildung 7.7: Windvektoren und Topographie im Gebiet 5 für den 5.11.2004 16 und 20 Uhr UTC.

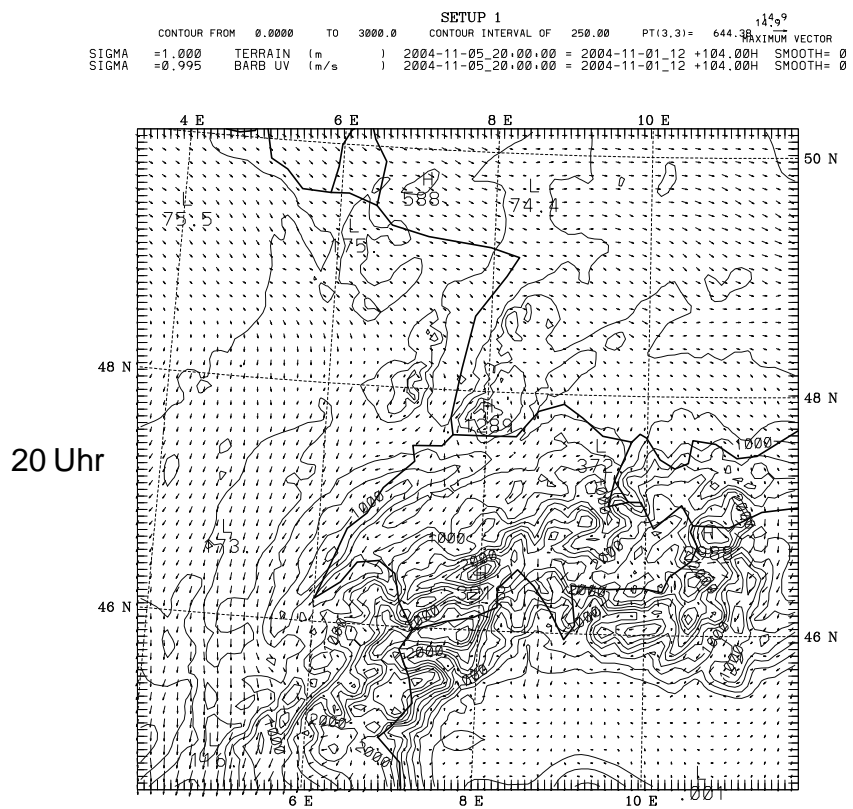
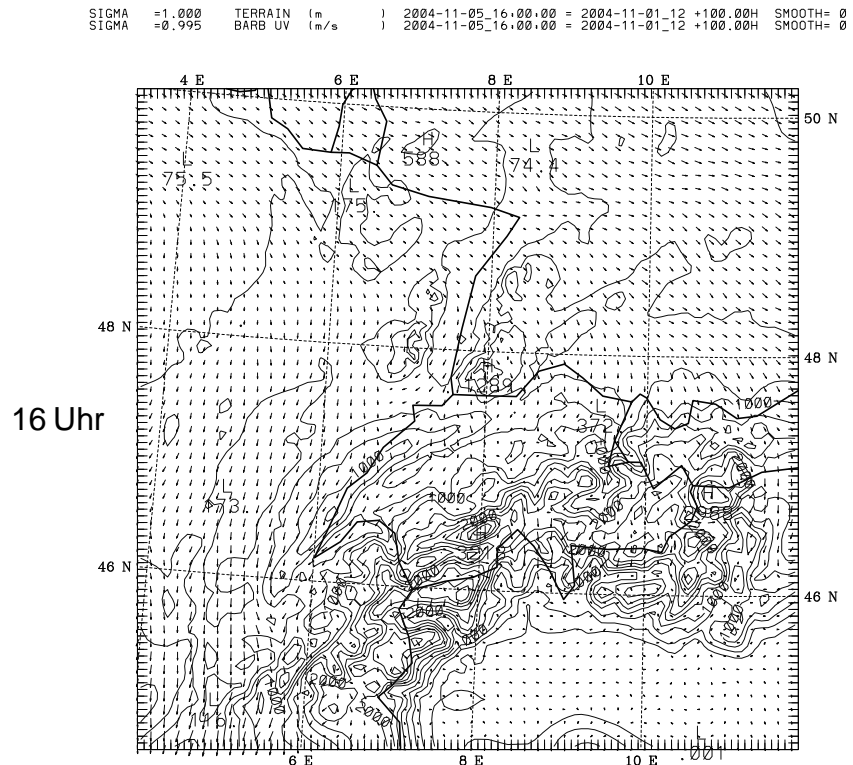


Abbildung 7.8: Windvektoren und Topographie im Gebiet 3 für den 5.11.2004, 16 und 20 Uhr UTC. Die Windpfeile sind nur an jedem zweiten Gitterpunkt dargestellt.

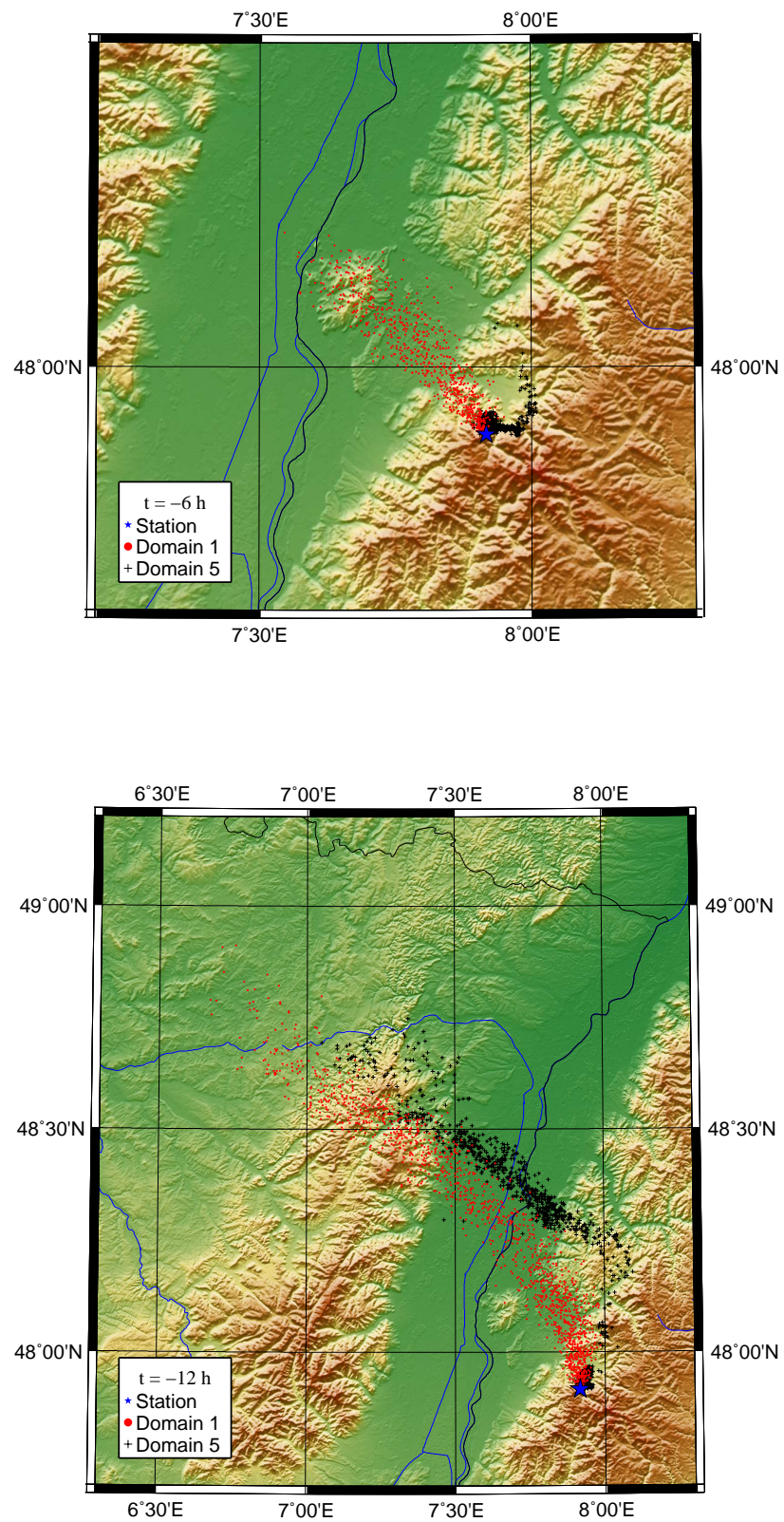


Abbildung 7.9: Partikelpositionen 6 h (oben) und 12 h (unten) vor dem Ende des Laufs, d. h. am 6.11.2004/00 UTC und 5.11.2004/18 UTC.

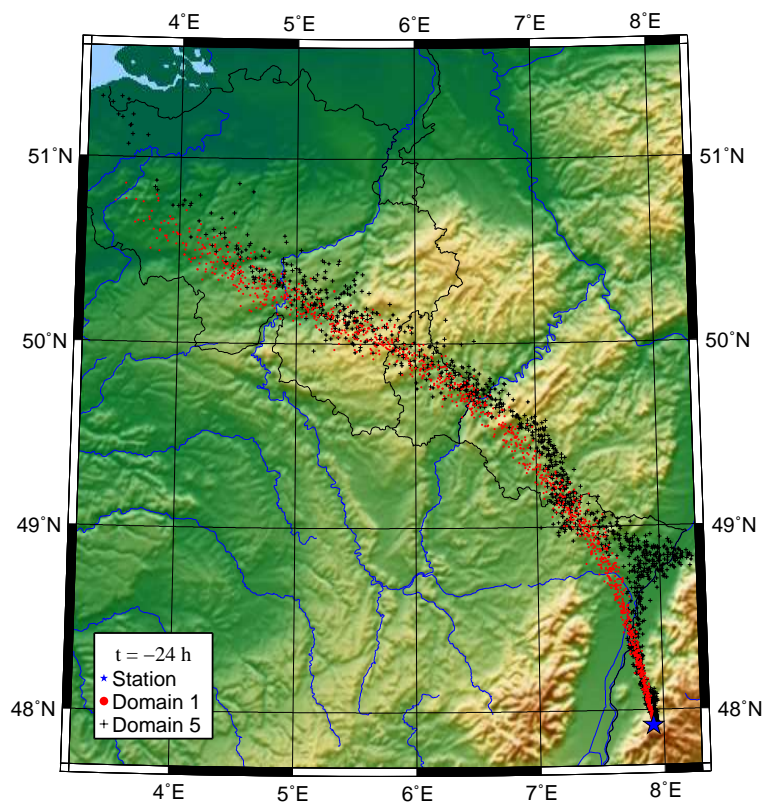
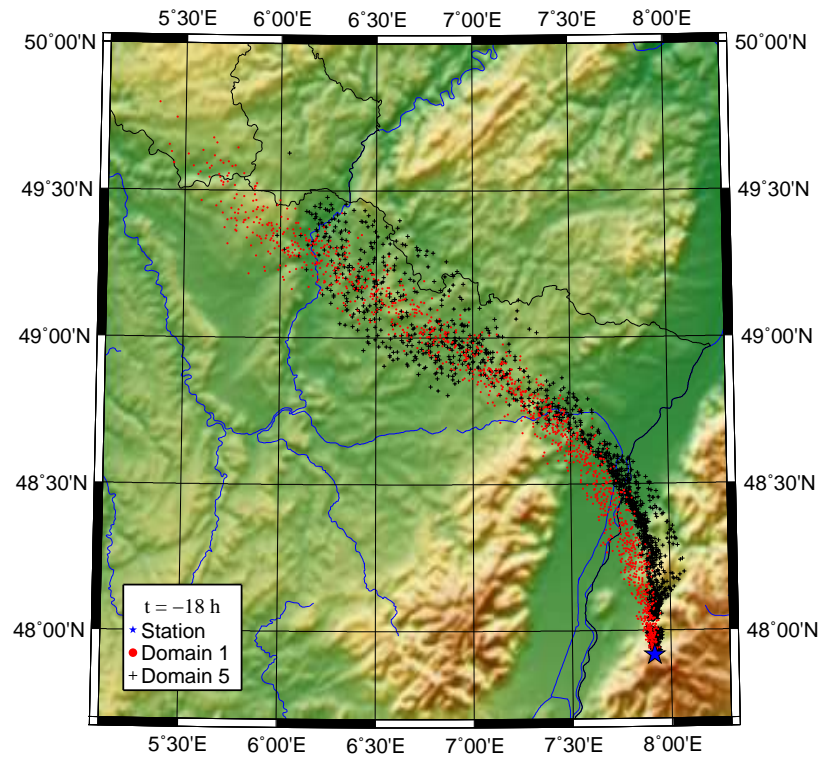


Abbildung 7.10: Partikelpositionen 18 h (oben) und 24 h (unten) vor dem Ende des Laufs, d. h. am 5.11.2004/12 UTC und 5.11.2004/06 UTC.

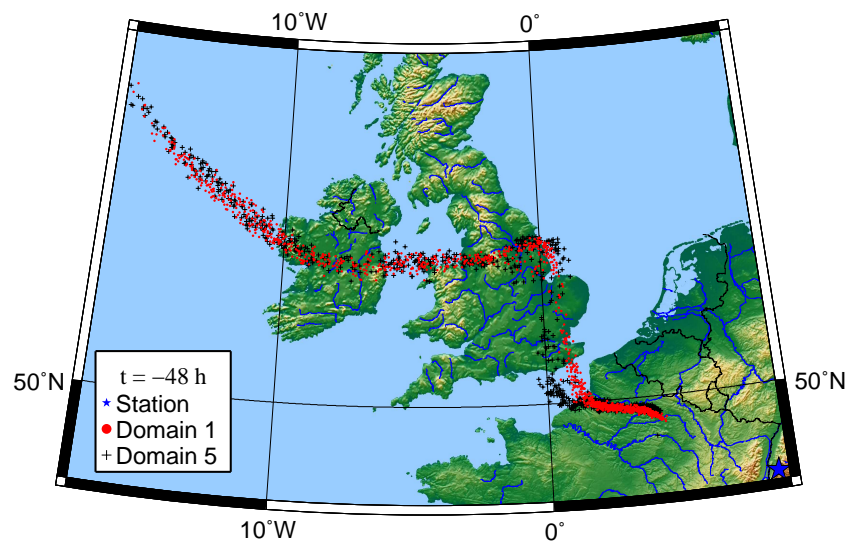
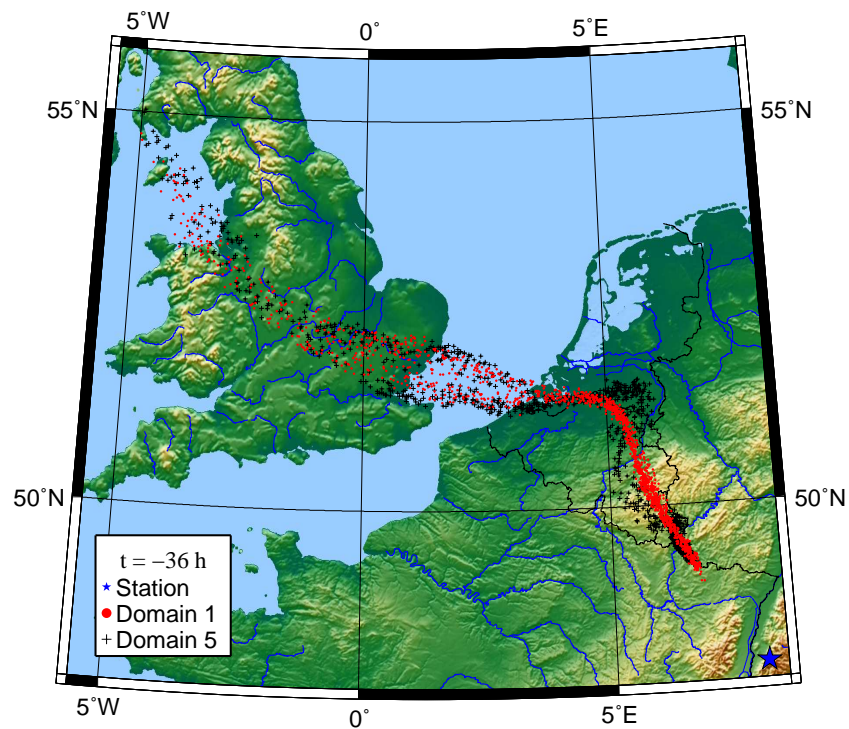


Abbildung 7.11: Partikelpositionen 36 h (oben) und 48 h (unten) vor dem Ende des Laufs, d. h. am 4.11.2004/18 UTC und 4.11.2004/06 UTC.

Für die Episode 9 (winterliche Hochnebel-Lage), wo im Modell der Hochnebel zu früh aufreißt, wurde das Niederschlagsschema Reisner-1 durch das aufwändigere Reisner-2 Schema ersetzt, was jedoch nur geringere Verbesserungen brachte. Die präsentierten Ergebnisse dieser Episode basieren auf dem Reisner-2 Lauf.

Gegen Ende der Projektlaufzeit wurde dann festgestellt, dass irrtümlich ein Schalter im Konfigurationsfile auf einen unerwünschten Wert eingestellt war. Dadurch wurde ein wichtiger Teil der Verbesserungen des MM5 für steile Topographie durch G. Zängl, nämlich die Diffusion der Temperatur auf horizontalen z-Flächen anstatt auf terrainfolgenden σ -Flächen, nicht aktiviert. Dies wird sich besonders bei stabiler Schichtung bemerkbar machen.

7.6.1 Vorbereitung MM5-Output für FLEXPART

MM5 legt seine Ergebnisse in einem internen Format ab. Zur Verwendung in FLEXPART müssen die benötigten Felder in das so genannte GRIB-Format (ein Standard für numerische Produkte auf einem Gitter in der Meteorologie) transferiert werden, mit einem File pro Termin und Nest. Dazu wurden vorhandene Programme entsprechend adaptiert. Der Gesamtbedarf an Festplattenkapazität für alle Episoden beträgt 23 GB.

7.6.2 Anpassungen von FLEXPART-MM5

Zu Projektbeginn lag nur eine FLEXPART-MM5 Version vor, die auf FLEXPART Version 3 basiert. Der aktuelle Stand von FLEXPART ist Version 6.2. Aufgrund des großen Versionsunterschiedes, dem auch erhebliche inhaltliche Verbesserungen und Veränderungen der Ein- und Ausgabedarstellung entsprechen, sollte wenn irgend möglich eine aktuelle Version von FLEXPART-MM5 erstellt werden.

Dies ist auf der Basis des aktuellen FLEXPART Version 6.2 erfolgt, wobei die alte FLEXPART-MM5 Version als Hintergrundinformation bzw. zum Übernehmen von Code-teilen noch mitverwendet wurde. Im Zuge dieser Arbeiten hat sich herausgestellt, dass in der alten FLEXPART-MM5 Version in vereinfachender Weise angenommen worden war, dass das kartesische Gitter von MM5 (Lambert'sche Kegelprojektion) verzerrungsfrei sei. Tatsächlich jedoch muss ein Maßstabsfaktor berücksichtigt werden, der einige Prozent ausmachen kann. Die Einarbeitung dieses Maßstabsfaktors war relativ komplex, da er ortsabhängig ist.

Im Laufe der Arbeiten zeigte sich auch noch, dass eine inhaltliche Erweiterung des FLEXPART-MM5 sinnvoll ist. Wie in jedem numerischen Modell, gibt es auch im FLEXPART vertikale und horizontale Diffusion, wobei die horizontale Diffusion als parallel zu den Koordinatenflächen implementiert ist, welche in FLEXPART terrainfolgende z-Koordinaten sind. In den inneren Nestern mit hoch aufgelöster Orographie kann dies jedoch ähnlich wie im MM5 selbst zu unerwünschten vertikalen Transporten führen. Deshalb wurde auch hier eine Diffusion auf z-Flächen implementiert. Diese vergrößert den Rechenzeitbedarf ca. um einen Faktor 2, da bei jedem Diffusionsvorgang die alte und neue Höhe der Topographie unter dem Partikel bestimmt wird. Hier gibt es sicher noch Optimierungsmöglichkeiten.

Ausserdem wurden aufgrund der Erfahrungen im ersten Rechendurchgang einige der Standardwerte in FLEXPART angepasst. So wurde die minimale Mischungshöhe von 100 m auf 10 m herabgesetzt, und die Dicke der Schicht, in der die Partikel ausgewertet werden (d. h., die potentielle Quellschicht) von 150 m auf 20 m. Beides dient dazu, die Verhältnisse unter sehr stabiler Schichtung besser zu erfassen. Allerdings führt die Verringerung der Schichtdicke zu einer schlechteren Zählstatistik, das heißt, in den Ergebnissen sind in Randbereichen stärkere statistische Fluktuationen der Partikelkonzentration (Quell-Rezeptor-Beziehungsstärke) zu finden.

8 Durchgeführte Rechnungen

8.1 MM5-Rechnungen

Es wurden die vereinbarten Episoden mit einer Gesamtanzahl von 57 Tagen und 5 Neststufen (feinste Auflösung 0,67 km) simuliert. Die erforderliche Rechenzeit auf dem dafür eingesetzten Intel Pentium-4 Rechner mit 3 MHz CPU (hyperthreading) betrug 43 Tage, wobei nebenher auch noch interaktive Nutzung durch einen User gegeben war.

Der Umfang der Ergebnisfiles beträgt ca. 100 Gigabyte (ohne verschiedene Varianten).

8.2 FLEXPART-ECMWF-Rechnungen

Es lagen einerseits Quell-Rezeptor-Matrizen (SRM-Felder) vom IDC der CTBTO vor, die mit dem dort operationellen Setting erzeugt wurden. Andererseits wurden vom Auftragnehmer ebenfalls FLEXPART-Rechnungen mit ECMWF-Feldern als meteorologischem Input durchgeführt. Diese haben eine bessere Auflösung, können aber für Vergleichszwecke auf dieselbe Auflösung wie CTBTO-Felder zusammengefasst werden. Die eigenen Rechnungen dienen auch der vorgesehenen Untersuchung, wie sich Variationen des Rezeptorpunktes auswirken. Deshalb wurden diese mit dem Rezeptorpunkt Schauinsland für verschiedene Höhen zur Freisetzung der Partikel durchgeführt. Tabelle 8.1 gibt einen Überblick über diese Rechnungen. SIL-0 lässt die Partikel in der Höhe über Grund des Ansaugstutzens frei, die bei den gegebenen ECMWF-Daten in 625 m NN liegt. Alternativ wird in SIL-2 die Freisetzung in der richtigen Höhe über dem Meer vorgenommen, wobei diese dann aber rund 600 m über Grund liegt. Als Kompromissvariante wurde SIL-1 mit einer Freisetzung in der Mitte gerechnet (ca. 300 m über Modellgrund). Bei den Freisetzungen in der Höhe wurden die Partikel auf eine Schicht von 10 m aufgeteilt, um die in dieser Höhe u. U. geringere Turbulenz auszugleichen (man könnte auch eine noch stärkere Verteilung erwägen). Die Freisetzung über eine Schicht von 150 m wie bei der CTBTO erscheint uns weniger realitätsnah.

Die FLEXPART-Outputfiles nehmen pro Lauf ca. 100 MB in Anspruch, derzeit damit 300 Megabyte. Sie wurden in SRM-Felder entsprechend den Konventionen des CTBT/IDC konvertiert und können damit auch im WEBGRAPE-Visualisierungstool interaktiv untersucht werden. Allerdings kann dieses Tool nur ein File pro Rezeptortag verarbeiten. Für diesen Zweck musste daher die rezeptorseitige Auflösung von 3 h auf 1 d (jeweils 06-06) vergrößert werden.

Tabelle 8.1: Überblick über die FLEXPART-Rechnungen mit ECMWF-Eingabefeldern. SIL steht für SchauInsLand und bezeichnet Rechnungen, die vom Auftragnehmer selbst durchgeführt wurden.

Run-Name	CTBTO	SIL-0	SIL-1	SIL2
Input hor. Auflösung	1°	1°	1°	1°
Input zeitl. Auflösung	3 h	3 h	3 h	3 h
Rezeptor zeitl. Auflösung	1 d	3 h	3 h	3 h
Rezeptor Höhe	0-150 m ü.G.	5 m ü.G.	910-920 m NN	1200-1210 m NN
Partikel / Rezeptortag	240 000	160 000	160 000	
Ausgabegebiet	global	Europa	Europa	Europa
Ausgabe zeitl. Auflösung	3 h	3 h	3 h	3 h
Ausgabe räuml. Auflösung	1°	0.5°	0.5°	0.5°
Ausgabe Schichtdicke	150 m	150 m	150 m	150 m
Ausgabegebiet Nest	—	Mitteleuropa	Mitteleuropa	Mitteleuropa
Ausgabe Nest räuml. Aufl.	—	ca. 8 km	ca. 8 km	ca. 8 km
Minimale Mischungshöhe	?	150 m	150 m	150 m
FLEXPART Version	5	6.2	6.2	6.2

Rezeptorpunkt: Schauinsland

8.3 FLEXPART-MM5-Rechnungen

Die Tabelle 8.2 zeigt den Überblick zu den FLEXPART-Rechnungen, die mit MM5-Eingabefeldern durchgeführt wurden. Sie wurden möglichst ähnlich wie die auf ECMWF-Feldern basierenden Rechnungen angelegt, ausgenommen die Schichtdicke für die potentiellen Quellen (siehe 7.6.2). Allerdings entfallen Sensitivitätsrechnungen mit unterschiedlicher Rezeptorhöhe, da im innersten Nest die Geländehöhe selbst am Schauinsland nur ca. 100 m abweicht. Dafür wird der Rezeptorpunkt Freiburg extra berechnet – bei den ECMWF-basierten Läufen würde man hier nur einen geringen Effekt erwarten, da die horizontale Distanz der beiden Stationen weit unter der Gittergröße von 111 km x 75 km liegt.

Die Rechendauer des FLEXPART-MM5 für alle Episoden (sog. langsamer und genauer Modus im FLEXPART) auf einem Rechner mit Opteron 2.4 MHz Prozessor beträgt insgesamt ca. 12 Stunden pro Rezeptorpunkt, wenn die z-Diffusion nicht eingeschaltet ist. Mit z-Diffusion verdoppelt sich die Rechenzeit in etwa.

Die FLEXPART-MM5 Outputfiles nehmen eine Gesamtkapazität von ca. 340 MB in Anspruch.

Auch die Ergebnisse von FLEXPART-MM5-Rechnungen wurden ins SRM-Format konvertiert.

Tabelle 8.2: Überblick über die FLEXPART-Rechnungen mit MM5-Eingabefeldern.

Run-Name	MM
Input hor. Auflösung	0.67 km – 54 km
Input zeitl. Auflösung	1 h
Rezeptor zeitl. Auflösung	3 h
Rezeptor Höhe	5 m ü.G.
Partikel / Rezeptortag	180 000
Ausgabegebiet	Europa
Ausgabe zeitl. Auflösung	3 h
Ausgabe räuml. Auflösung	0.5°
Ausgabe Schichtdicke	25 m
Ausgabegebiet Nest	Mitteleuropa
Ausgabe Nest räuml. Aufl.	ca. 8 km
Minimale Mischungshöhe	10 m
FLEXPART Version	6.2-MM5_3.7.0

Rezeptorpunkte: Schauinsland, Freiburg BfS

8.4 HYSPLIT-Rechnungen

Vom Auftraggeber wurden HYSPLIT-Trajektorienendpunkte übermittelt (Startintervalle 3 h, Startpunkt 500 m über Grund). Diese überdecken aber nur jene Perioden, zu denen radiologisch interessante Ereignisse beobachtet wurden. Daher wurden vom Auftragnehmer nochmals für alle Episodentage Rechnungen mit dem Webinterface von READY (<http://www.arl.noaa.gov/ready/open/hysplit4.html>) durchgeführt. Dabei stellte sich heraus, dass bei Sammelberechnungen maximal 48 Stunden rückwärts gerechnet werden können. Für die näher gelegenen Regionen dürfte das ausreichen. Die folgenden Ergebnisse beruhen auf den 48-Stunden-Daten.

Die Trajektorien wurden mit einer Aufenthaltsdauer-Analyse auf einem Gitter (sowohl 1° als auch 0,5° vorhanden) ausgewertet und in Quell-Rezeptor-Felder umgewandelt, wie sie auch aus dem FLEXPART-Output erzeugt wurden (CTBTO-IDC SRM-Format). Es wurden alle Trajektorienpunkte berücksichtigt, die sich unterhalb von 1000 m über Grund befanden. Ein entlang der Trajektorie laufender Gauß'scher Ausbreitungsprozess (laufende Vergrößerung des Einflussgebiets) wurde aus Zeitgründen nicht berücksichtigt, sondern jeder Trajektorienpunkt wurde einfach zu 100% in der Zelle des Auswertegitterpunkts gezählt, in der er sich befindet.

9 Berechnungsergebnisse und Auswertung: Meteorologie

9.1 Methodik

Zur Beurteilung der Modellergebnisse werden einerseits beobachtete und modellierte Zeitreihen der wichtigsten Parameter einander graphisch gegenüber gestellt, und andererseits Metriken für diese Datensätze berechnet. Folgende Parameter wurden berücksichtigt:

- Temperatur in 2 m über Grund für Freiburg, Schauinsland und Feldberg
- Stabilität der Talatmosphäre, gemessen als Differenz der potentiellen Temperatur $\Delta\Theta$ Schauinsland – Freiburg (null wäre neutrale Schichtung, je größer, umso stabiler – ab 9,5 K Inversion)
- Windrichtung und -geschwindigkeit, 10 m über Grund am Schauinsland, unterste Modellfläche [ca. 30 m] in Freiburg [wegen Messung am Dach] und Feldberg [wegen schlechter Repräsentation der Gipfelage im Modell]

Die Beobachtungen wurden mit Gitterpunktwerten der ECMWF-Daten (in 1° Auflösung) und der MM5-Simulation, und zwar einerseits im äußersten Rechengebiet (54 km Gitterweite) und andererseits im innersten Rechengebiet (0,67 km Gitterweite). Bei den beiden groben Datensätzen fallen alle drei Stationen in die selbe Gitterzelle. Daher sind für diese die entsprechenden Modellwerte auch gleich. Lediglich bei der Temperatur wurde für alle Modellwerte eine Korrektur zum Ausgleich des Unterschiedes Modelltopographie – wahre Stationshöhe angebracht, wobei eine Reduktion mit dem klimatologischen Temperaturgradienten von 0,6 K auf 100 m verwendet wurde.

Bei den Beobachtungen in Freiburg wird für die Temperatur die LfU-Station und für den Wind die DWD-Station herangezogen. Der verwendete MM5-Gitterpunkt ist ein Kompromiss zwischen beiden. Abbildung 9.1 zeigt die Lage der für den Vergleich gewählten Modellgitterpunkte im innersten Rechengebiet und die Modelltopographie. Da die Modelltopographie die wahre Topographie nur annähernd wiedergeben kann, wurde am Schauinsland ein Vergleichsgitterpunkt gewählt, der auf dem Bergrücken liegt, anstatt am Nordosthang.

Modell- und Beobachtungsdaten liegen mit Ausnahme des ECMWF (nur dreistündlich) alle stündlich vor.

Neben den graphischen Vergleichen wurden Metriken berechnet. Die darin enthaltenen Parameter sind in Tabelle 9.1 aufgelistet und definiert. Im Rahmen diverser Modellvergleiche im Kontext von großräumigen Ausbreitungsmodell-Vergleichen haben sich

Dataset: data RIP: BFS Init: 0000 UTC Mon 31 Jan 05
 Fcst: 0.00 h Valid: 0000 UTC Mon 31 Jan 05 (0200 LST Mon 31 Jan 05)
 Terrain height: AMSL
 Terrain height: AMSL

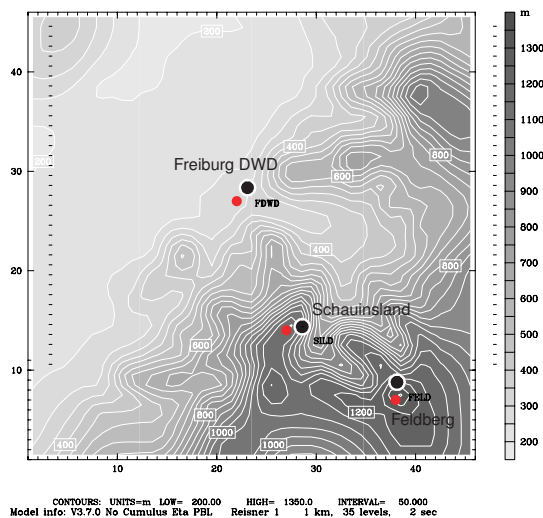


Abbildung 9.1: Modelltopographie im innersten Rechengebiet, Lage der Beobachtungsstationen (schwarz) und gewählte Referenzgitterpunkte (rot).

gewisse Parameter etabliert (Klug et al., 1992; Mosca et al., 1998a,b; Hanna und Paine, 1989), auf die wir teilweise zurück greifen. Der Parameter RBIAS ist abweichend zur gängigen Praxis nur mit der Standardabweichung der Beobachtungen normiert, ohne Berücksichtigung der Streuung des Modells, um nicht Modellrechnungen mit hoher Streuung zu begünstigen. Für viele Größen offensichtlich wenig geeignet wäre eine Normierung mit dem Mittelwert, obgleich man auch diese bei manchen Parametern öfters findet. Taylors Gütezahl (Taylor, 2001) ist dadurch gekennzeichnet, dass sie bei Werten nahe 1 mit gegen Null gehenden Werten des BCRMSE und gegen 1 gehendem Korrelationskoeffizienten verbunden ist. Bei schlechtem Zusammenhang jedoch können Korrelation und BCRMSE sehr unterschiedliche Güte aufweisen. Hier erlaubt die Gütezahl nach Taylor eine einheitliche Beurteilung.

Die Stabilität kann im Grunde nur für die fein aufgelösten MM5-Rechnungen aus dem Modell angegeben werden, da wie gesagt in den anderen Simulationen die Stationen in dieselbe Gitterzelle fallen. Hier wurde als Referenz für die Berechnung der Gütezahlen die sich aus dem genannten klimatologischen Temperaturgradienten ergebende Θ -Differenz von 3,80 K als konstant gültig betrachtet (in den Tabellen als „Grob“ bezeichnet).

Bei der Windrichtung als Vektorgröße können die Standardstatistiken nicht angewendet werden. Hier wurde nur der mittlere quadratische Fehler (unter Berücksichtigung der Differenz auch über Nord, wenn nötig) berechnet, sowie ein daraus mit einer „vernünftigen“ Funktion abgeleiteter RMSE-Score SDD.

Die Metriken werden für jede Episode und jeden Parameter berechnet. Darüber hinaus werden die Gütezahlen gemittelt über alle Parameter pro Episode, gemittelt über alle Episoden pro Parameter, und im Gesamtmittel berechnet.

Tabelle 9.1: Liste der Metriken und ihre Definition sowie der Abkürzungen meteorologischer Parameter

Abkürzung	Parameter	Definition
XMEAN	arithmetisches Mittel Modell	$\bar{x}^m = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i^m$
YMEAN	arithmetisches Mittel Beobachtung	$\bar{x}^o = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i^o$
RMSE	mittlerer quadratischer Fehler	$\sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_i^m - x_i^o)^2}$
BIAS	systematischer Fehler	$B = \bar{x}^m - \bar{x}^o$
RBIAS	relativer systematischer Fehler	$RB = \frac{B}{\sigma_o}$
XVAR	Varianz Modell	$\sigma_m^2 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_i^m - \bar{x}^m)^2$
YVAR	Varianz Beobachtung	$\sigma_o^2 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_i^o - \bar{x}^o)^2$
XSTD, YSTD	Standardabweichungen	$\sigma_m = \sqrt{\sigma_m^2}, \quad \sigma_o = \sqrt{\sigma_o^2}$
R	Korrelationskoeffizient (gewöhnlicher)	$r = \frac{\text{cov}(x^o, x^m)}{\sqrt{\sigma_x^o \sigma_x^m}}$
BCRMSE	RMSE, um Effekt des syst. Fehlers korrigiert	$\sqrt{\sigma^{o2} + \sigma^{m2} - 2\sigma^o \sigma^m r}$
SB	Gütezahl für system. Fehler	$S_b = \frac{1}{1 + a RB^2}$
SR	Taylor's Gütezahl	$S_r = 2(1 + r) \left(\frac{\sigma^m}{\sigma^o} + \frac{\sigma^o}{\sigma^m} \right)^{-2}$
S	Gesamt-Gütezahl	$S = 0.5 S_r + 0.5 S_b$
Abkürzung	Parameter	
T	Temperatur (Grad C)	
FF	Windgeschwindigkeit (m/s)	
$\Delta\Theta$	Differenz der potentiellen Temperatur Schauinsland – Freiburg (K)	
DD	Windrichtung (Grad)	
SDD	Streuung der Windrichtung (Grad)	

9.2 Ergebnisse

Episode 1, Westlage Juni 2004:

Abb. 9.2 und 9.12, Tab. 9.2. Sommerepisode mit Kaltfrontpassagen und Zwischenhochs. Maxima in Freiburg um 25°.

MM5-D5 unterschätzt die Tagestemperaturen konsistent um bis zu 5 K, die Minima sind korrekt. Klare Verbesserung von D1 auf D5. ECMWF recht gut. Schauinsland: Ähnlich Freiburg, aber ECMWF hat ebenfalls Fehler bis +/- 5 K. Die Amplitude der ECMWF-Fehler ist größer als jene der MM5-Fehler. Am Feldberg sind MM5-D1 und D5 einige Grade zu kalt, ECMWF zeigt einen zu starken Tagesgang und mittags zu warme Temperaturen.

Die Windgeschwindigkeiten in Freiburg werden vom MM5 in beiden Rechengebieten gut erfasst, ECMWF unterschätzt die Windgeschwindigkeit eher, vor allem in Perioden mit stärkerem Wind. Am Schauinsland passt MM5-D1 gut, das feine D5 zeigt zeitweise zu hohe Geschwindigkeiten. Die Windrichtung wird im wesentlichen gut von den Modellen erfasst, MM5-D5 zeigt die beste und ECMWF die schlechteste Übereinstimmung. Der Nordwind am Mittag des 26.6. wird nur von MM5-D5 reproduziert. Am Feldberg unterschätzen alle Modelle während der Starkwindphasen die Windgeschwindigkeit, am wenigsten MM5-D5.

MM5-D5 zeigt im Prinzip die geringe Stabilität, insbesondere die adiabatische Durchmischung tagsüber. Jedoch wird an einigen Tagen die nächtliche Stabilisierung unterschätzt, so dass der Korrelationskoeffizient nur 0,64 beträgt. Insgesamt zeigen die Metriken MM5 eindeutig vor ECMWF.

Episode 2, Westlage Dezember 2004:

Abb. 9.3 und 9.12, Tab. 9.3. Winterepisode, geringer Tagesgang der Temperatur und hohe Windgeschwindigkeiten. Temperatur steigt von -5° auf fast +10° in Freiburg, und -10° auf +3° am Schauinsland.

Alle Modelle erfassen die Temperaturentwicklung gut. Für einige Teile der Episode ist das MM5-D5 Ergebnis bemerkenswert gut und deutlich besser als die großskaligen Modelle. Nur MM5-D5 erfasst am Schauinsland die geringe Absenkung der Temperatur in der Nacht vom 21. auf den 22.12. und das Tagesmaximum am 22. richtig.

Die hohen Windgeschwindigkeiten werden nur von MM5 erfasst, wobei am Schauinsland nur das D5-Nest ausreichend hohe Geschwindigkeiten liefert. Während der stürmischen Zeit ist die Richtung fast konstant aus Südwest und in allen Modellen gut erfasst. Am Anfang der Episode sind die Abweichungen größer, am Schauinsland ist nur MM5-D5 gut. Am Feldberg unterschätzen die Modelle ähnlich wie in Episode 1 die Geschwindigkeit, während die Richtung allgemein gut erfasst wird.

Wegen der hohen Windgeschwindigkeiten ist die Stabilität relativ gering, was vom MM5-D5 sehr gut erfasst wird. Lediglich die starke Stabilisierung am Morgen des 22.12. wird unterschätzt.

Die Metriken zeigen einen großen Vorsprung für MM5-D5. Die Stabilität wird von MM5 insgesamt brauchbar erfasst.

Episode 3, Nordwest- bis Nordostlage, November 2004:

Abb. 9.4 und 9.13, Tab. 9.4. Herbstepisode mit wechselnden Winden, nur zu Beginn sonnig, Temperatur sinkt von 15° in Freiburg und fast gleich warm am Schauinsland (d. h. sehr stabile Schichtung) auf knapp über 0° in Freiburg und -6° am Schauinsland.

In Freiburg ist MM5-D5 etwas schlechter als ECMWF, und hat vor allem am 3.11. Probleme, die Tageserwärmung zu simulieren. Am Schauinsland und Feldberg ist während des anfänglichen Hochdruckwetters mit stabiler Schichtung nur MM5-D5 in der Lage die Temperaturen korrekt wiederzugeben, die großräumigen Modell sind z.T. mehr als 5 K zu kalt. Im weiteren Verlauf ist MM5 am Schauinsland ca. 2 K zu kalt, ECMWF ca. 1 K zu warm. Die mittlere Stabilität stimmt in diesem Fall sehr gut mit dem klimatologischen Wert überein, was auch von MM5 simuliert wird. Die Korrelation ist mit 0,9 auch hoch, so dass ein sehr guter Gesamtwert für die Stabilität erreicht wird, und damit der klimatologische Wert, der hier mit 0,5 verhältnismäßig gut liegt, noch immer klar übertroffen wird.

Die Windgeschwindigkeit wird vom MM5 in Freiburg im wesentlichen richtig simuliert, am Schauinsland gibt es mehr Abweichungen. Die Richtung der meist schwachen Winde in Freiburg ist sehr variabel, und wird von den Modellen nur bei den Phasen mit deutlichem Südwestwind wiedergegeben. Am Schauinsland ist die Übereinstimmung besser, aber auch hier kommen Phasen mit größeren Abweichungen vor. Am Feldberg ist die Übereinstimmung Beobachtung – MM5-D5 deutlich besser. Diese synoptisch recht komplexe Lage wird von den Modellen offenbar weniger gut simuliert, vor allem dort wo auch noch Orographieeinfluss dazu kommt.

Die sehr hohe Stabilität in der Hochdruck-Phase am Anfang und die folgende gute Durchmischung werden vom MM5-D5 korrekt wiedergegeben.

Episode 4, Nordwest- bis Nordostlage, Februar 2005

Abb. 9.5 und 9.13, Tab. 9.5. Winterepisode ohne Tagesgang, advektiv geprägt.

MM5 ist wieder zu kalt, vor allem am Schauinsland und Feldberg (2 bis 3 K). Allerdings wird der relative Verlauf, vor allem am 31.1., von MM5-D5 deutlich besser simuliert als von den anderen Modellen, und am Feldberg ist auch das ECMWF meist zu kalt.

In Freiburg sind zwei Phasen mit kräftigem SSW-Wind zu beobachten, die von MM5-D5 exzellent wiedergegeben werden. Am Schauinsland werden die Windschwankungen zwischen Südwest und Nord vom MM5-D5 ebenfalls sehr gut reproduziert, bei der Geschwindigkeit sind einige Abweichungen vorhanden. Die großräumigen Modelle und vor allem ECMWF unterschätzen die Windstärke am Schauinsland und Feldberg. MM5-D5 kann die Windrichtung am Feldberg sehr gut simulieren. Dieser Fall zeigt die für den Oberrheingraben so charakteristische Kanalisierung: bei Nordwestwind in der Höhe ist im Tal südlicher Wind zu beobachten. Nur MM5-D5 kann diese Situation an-

gemessen wiedergeben (inwieweit die zwischen D1 und D5 liegenden Neststufen das können, wurde hier nicht untersucht).

In den Metriken ist das MM5-D5 am Schauinsland klar überlegen, in Freiburg zumindest bei der Windgeschwindigkeit (die anderen Parameter haben nur geringe Unterschiede). Die mittlere Stabilität stimmt in diesem Fall sehr gut mit dem klimatologischen Wert überein, MM5 gibt eine etwas weniger stabilere Situation, hat jedoch guten Taylor-Score (Korrelation 0,8). Im Gesamt-Score ist der Vorsprung auf die Klimatologie der Stabilität aber gering.

Episode 5, Sommerliche Hochdrucklage Juni 2005:

Abb. 9.6 und 9.14, Tab. 9.6. Frühsommerliche Hitzeperiode mit starkem Tagesgang und Temperatur bis 34° in Freiburg.

Alle Modelle unterschätzen die Tagesmaxima in Freiburg, MM5 deutlich mehr (ca. 5 K) als ECMWF (2 bis 3 K). Am Schauinsland teilweiser Datenausfall. Am ersten Tag ist die Nachttemperatur von MM5-D5 sehr gut, an den letzten Tagen ist diese in allen Modellen zu kalt. Maxima von ECMWF gut, von MM5 erheblich zu kalt. Der relativ geringe Tagesgang am Feldberg wird vom MM5 richtig erfasst, allerdings bei einem um 4 bis 5 K zu niedrigem Niveau.

An den ersten Tagen ist in Freiburg ein typischer tagesperiodischer Wind zu beobachten, am 24.6. stellt sich dann Südwestwind im Tal und in der Höhe ein. Letzterer wird von allen Modellen adäquat erfasst, wobei aber der auffrischende Wind am Abend des 23. (konvektive Zelle?) in den Modellen nicht vorhanden ist. Die Talein- und die Tal-auswindphase in Freiburg simuliert das MM5 in D5 sehr gut, in den Übergangsphasen treten naturgemäß größere Abweichungen auf. Am Feldberg wird die Windgeschwindigkeit unterschätzt, am wenigsten von MM5-D5. Die Windrichtung am Feldberg wird vor allem vom MM5-D5 recht gut erfasst.

Trotz der schlechten Wiedergabe der Temperatur im MM5 wird die adiabatische Durchmischung in den Tagesstunden vom MM5 richtig erfasst (soweit aufgrund der Datenausfälle am Schauinsland beurteilbar). Allerdings ist nächtliche Stabilisierung wiederum unterschätzt.

Bei den Metriken ist MM5 etwas besser als ECMWF, obwohl der Taylor-Score wegen der schlechten Wiedergabe der Tagesgänge im MM5 bei diesem Modell deutlich niedriger ist. Dies wird durch den besseren Bias aber überkompensiert (jedenfalls so wie die Gütezahlen definiert wurden). Beim Wind ist MM5 und vor allem das Nest D5 viel besser als ECMWF. MM5-D5 überschätzt die Labilität dieser Lage und hat auch nur eine mäßige Korrelation in der Stabilität.

Episode 6, sommerliche Hochdrucklage, August 2005:

Abb. 9.7 und 9.14, Tab. 9.7. Sommerepisode mit Temperaturen um 20° in Freiburg und bis 15° am Schauinsland.

Auch hier unterschätzen alle Modelle die Tagesmaxima in Freiburg, in ähnlicher Größenordnung wie an den anderen schönen Sommertagen. Am Schauinsland und Feldberg ist ECMWF besser, MM5 ebenfalls wieder zu kalt. Der Tagesgang der Stabilität wird vom MM5-D5 in etwa richtig wiedergegeben, allerdings ist wieder an manchen Tagen die nächtliche Stabilisierung unterschätzt.

Die eher schwachen Winde werden vor allem vom MM5-D5 gut beschrieben.

Hier führt die schlechte Wiedergabe der Höchsttemperaturen im MM5 in Freiburg zu einer schlechteren Gütezahl als für das ECMWF, allerdings ist am Schauinsland und beim Wind dennoch MM5-D5 genauer. Die Lage ist im Mittel etwas labiler als Episode 5 und die Stabilität wird vom MM5 besser beschrieben.

Episode 7, Südwestlage, September 2004:

Herbstepisode, Abb. 9.8 und 9.15, Tab. 9.8. föhnig.

Von ECMWF recht gut simuliert, MM5 erfasst zwar den groben Verlauf, ist aber zu kalt und hat Probleme die Tageserwärmung wiederzugeben. Die geringe nächtliche Abkühlung vom 13. auf den 14.9. wird von den Modellen wiedergegeben.

Die kräftigen Winde in Freiburg werden vom MM5, aber nicht vom ECMWF simuliert. Am Schauinsland ist die Geschwindigkeit des Südwestwinds von MM5-D5 deutlich überschätzt, am Feldberg hingegen von allen Modellen unterschätzt, am wenigsten von MM5-D5. Die Windrichtung wird allgemein gut getroffen, MM5-D5 ist dabei am besten. Die Überschätzung der Windstärke am Schauinsland durch das MM5-D5 dürfte mit der Richtung aus Südwest zusammen hängen, bei der sich die Beobachtungsstation im Windschatten des Schauinsland-Gipfels befindet. Im Modell ist dieser Gipfel deutlich abgeflacht. Zudem ist die Station auch durch den umgebenden Wald beeinflusst, weshalb kürzlich ein höherer (20 m) Windmast errichtet wurde, an dem auch höhere Windgeschwindigkeiten gemessen werden (siehe Seite 40).

Die Metriken spiegeln dies wieder: bei der Temperatur sind keine großen Unterschiede zwischen ECMWF und MM5-D5 zu verzeichnen, in Freiburg ist MM5-D5 beim Wind besser, am Schauinsland wegen der massiven Überschätzung der Windgeschwindigkeit schlechter. Die Windrichtung wird wie bei den anderen Südwestlagen am Schauinsland gut von allen Modellen erfasst. Die für die Jahreszeit geringe Stabilität wird vom MM5 sehr gut erfasst, einschließlich der Stabilisierung gegen Ende der Episode.

Episode 8, Südwestlage, Februar 2004:

Abb. 9.9 und 9.15, Tab. 9.9. Winterliche Südwestlage, sehr mild (bis 12° am Schauinsland), in welcher die Episode 10 (winterliche Hochdrucklage, 4.–5.2.) enthalten ist.

Keines der Modelle arbeitet wirklich gut. In Freiburg trifft MM5-D5 den föhnigen ersten Teil noch am besten, ist aber so wie die anderen zu kalt. In der zweiten Episodenhälfte mit ausgeprägten Tagesgängen erfasst ECMWF zwar die Minima halbwegs, die Maxima sind aber zu kalt. MM5-D5 ist hier bis zu 5 K zu warm, was auch dazu führt, dass trotz zu geringer Tageserwärmung die Maxima hier besser passen als in den anderen

Modellen. Da MM5-D5 die mittlere Temperatur sehr gut trifft, schneidet trotz schlechter Korrelation und niedrigem Taylor-Score dieses Modell im Gesamtscore besser ab als ECMWF. Am Schauinsland und Feldberg ist MM5-D5 den anderen Modellen deutlich überlegen, vor allem was die Erwärmung ab dem 3.2. betrifft – die anderen Modelle geben hier eine Abkühlung statt Erwärmung.

Auch in dieser SW-Episode simuliert MM5 den Wind sehr gut, wobei er am Schauinsland von MM5-D5 so wie bei den anderen SW-Lagen überschätzt wird, wobei dies vermutlich auf die Stationsumgebung zurückzuführen ist (siehe Diskussion der Episode 7). Am Feldberg finden wir die bei SW-Wind typische Unterschätzung der Windstärke (wobei auch diesmal MM5-D5 bei weitem besser ist als die anderen Modelle). Solange ausreichend starker Wind weht, simulieren die Modelle, vor allem MM5-D5, auch die Richtung sehr gut.

Die geringe Stabilität (vom 31.1. mittags bis 2.2. abends nahezu durchmischt) wird vom MM5-D5 sehr gut wiedergegeben. Allerdings wird in der zweiten Episodenhälfte die nächtliche Abkühlung viel zu schwach simuliert (siehe schlechte Temperatursimulation), deshalb ist dann auch die Stabilität nicht mehr gut, so dass hier einmal der Gesamt-Score der MM5-D5-Stabilität etwas schlechter ist als jener der Klimatologie.

Episode 9, winterliche Hochdrucklage, Dezember 2004:

Abb. 9.10 und 9.16, Tab. 9.10. Winterliche Hochdrucklage mit Hochnebel, gegen Ende kommt eine maskierte Kaltfront herein (Erwärmung im Tal, Abkühlung auf den Bergen).

In dieser Episode ist das MM5-D5 weit überlegen, da die großräumigen Modelle die Lage der Bergstation über der Inversion nicht wiedergeben, aber auch die Stärke der Inversion unterschätzen, keinen Hochnebel beinhalten und demzufolge einen unrealistischen Tagesgang der Temperatur produzieren. Daher ist es in diesen Modellen im Tal vor allem mittags um 5 bis 10 K zu warm und am Schauinsland um bis zu 15 K (!) zu kalt. Im großen und ganzen simuliert MM5-D5 diese Episode exzellent, mit einem (Schönheits-)Fehler: Der Hochnebel geht dort schon zwei Tage vor der Kaltfront auf, dementsprechend sind ab dem 14.12. mittags die Temperaturen in Freiburg auch im MM5-D5 zu hoch. Am Feldberg tendiert MM5 zeitweise zu Unterschätzung der Temperaturen.

Sowohl die geringen Windgeschwindigkeiten im Tal während der Inversionslage als auch der starke Wind mit Frontdurchgang wird von MM5 gut erfasst, vom ECMWF wird letzterer aber stark unterschätzt. Der Verlauf der Windstärke am Schauinsland wird vom MM5, vor allem in D5, exzellent simuliert. In Freiburg wird die Tatsache, dass der Wind während der Inversionslage hauptsächlich aus Nordwest kommt, nur von MM5-D5 korrekt wiedergegeben, die großräumigen Modelle geben statt dessen den östlichen bis südlichen Wind, der oberhalb der Inversion vorherrscht. Am Schauinsland wird die Windrichtung generell besser simuliert, wobei auch hier MM5-D5 am nächsten zu den Beobachtungen liegt. Auffällig ist die Winddrehung auf Nordost am Schauinsland am 14.12., die in MM5-D5 nicht und in MM5-D1 nur ansatzweise zu finden ist. Am Feldberg tendiert MM5-D5 zumindest von West gegen Nord. Außerdem ist am Feldberg bei eher schwachem Wind am 12.12. eine auffällige Drehung auf Südwest zu beobachten, die in den Modellen nicht vorkommt.

Dieser Fall zeigt die Begrenzung der Nützlichkeit von Gütezahlen auf, die eine ganze Episode mit unterschiedlichen Charakteristika in eine Zahl zusammenfassen. Die Temperatur im MM5-D5 wäre nämlich in Freiburg nach dem Taylor-Score und auch dem Gesamtscore schlechter zu bewerten wie im ECMWF. Das liegt daran, dass an den beiden Tagen, an denen das MM5-D5 den Hochnebel verfrüht aufreißen lässt, die Abweichungen extrem groß werden und damit die sehr gute Simulation der restlichen Zeit für den Korrelationskoeffizienten nahezu irrelevant wird. Nur der geringe systematische Fehler „rettet“ die MM5-Simulation halbwegs. Beim Wind liegt MM5 aber auch in den Metriken deutlich besser als ECMWF. Die außerordentlich hohe Stabilität wird vom MM5 auch quantitativ bemerkenswert gut simuliert, und hier ist die Gütezahl auch viel besser als bei der Temperatur für sich allein, obwohl auch hier die zwei Tage ohne Hochnebel viel verschlechtern. Das MM5-D5 kann die hohe Stabilität im Mittel zwar simulieren, hat aber wegen der zwei schlecht simulierten Tage doch einen deutlichen mittleren Fehler und die Korrelation ist zwar gut, aber nicht so gut wie sie sein könnte. Daher wird auch bei der Stabilität nur ein mittlerer Gesamt-Score erreicht, wobei allerdings die Klimatologie fast auf 0 fällt.

Episode 11, Nordostlage, Oktober 2005:

Abb. 9.11 und 9.16, Tab. 9.11. Herbstepisode mit Kaltluftadvektion. Datenausfälle.

Alle Modelle liegen eher zu kalt, MM5 hat ein Problem, die Tageserwärmung am 30.9., nach dem Kaltfrontdurchgang, zu erfassen. Insgesamt wird der Temperaturverlauf in allen Modellen befriedigend erfasst. Am Feldberg liegt MM5-D5 recht gut.

Der Verlauf der Windgeschwindigkeit wird von MM5-D5 sehr gut wiedergegeben, ECMWF zeigt erheblich zu schwachen Wind. Der stark variable Verlauf der Windrichtung wird von den Modellen, vor allem MM5-D5, gut erfasst. Am Feldberg wird wie üblich die Windstärke unterschätzt, die Richtung sehr gut erfasst.

Die Metriken zeigen die gute Erfassung der Windgeschwindigkeit im MM5-D5, bei der Richtung erhält ECMWF einen besseren RMSE. Die Temperatur ist im MM5-D5 etwas besser getroffen als in den anderen Modellen. Die Stabilität der Kaltluft ist gering, was vom MM5 richtig simuliert wird. Im Mittel über die Episode ist der Score der Stabilität jedoch nur mittelmäßig.

9.3 Schlussfolgerungen

Bei den Temperaturen ist das MM5 systematisch um einige Grade zu kalt, vor allem bei Schönwetter tagsüber. Verschiedene Modifikationen im Setup haben das ursprünglich noch schlechtere Verhalten des Modells gebessert, aber nicht in ausreichendem Maß. Die Tatsache, dass der Fehler bei stark advektiven Lagen gering und bei Schönwetter mittags am stärksten ist, zeigt, dass die Ursache wohl vor allem in der Bodenwärmebilanz zu suchen ist. Als Hauptfaktoren kommen die einfallende kurzweilige Strahlung und die Aufteilung der verfügbaren Energie auf fühlbaren Wärmestrom, latenten Wärmestrom und Bodenwärmestrom in Frage. Durch die Änderung des Parameters für die Feuchteverfügbarkeit im Boden wurde bereits eine gewisse Verschiebung von Verdun-

stung zu fühlbarer Wärme bewirkt. Eine detailliertere Analyse dieses "cold bias" war ihm Rahmen des Projektes nicht möglich. Herbstliche und winterliche Inversionslagen wurden von MM5 sehr gut modelliert. Zum Teil ist auch die nächtliche Abkühlung im MM5 zu klein. Hier könnte auch die fehlende z-Diffusion eine Rolle spielen, welche eine vertikale Durchmischung durch numerische Effekte unterbindet.

Bei Windgeschwindigkeit und -richtung ist das hochaufgelöste MM5 deutlich besser als ECMWF. So wird sowohl die thermische Zirkulation in Freiburg bei Schönwetterlagen („Höllentäler“) als auch die Kanalisierung der großräumigen Strömung im Oberrheingraben nur vom MM5-D5 richtig wiedergegeben. Am Schauinsland ist bei Südwestwind der beobachtete Wind deutlich schwächer als der modellierte, während am Feldberg umgekehrt der beobachtete Wind stärker als der modellierte ist. Beides dürfte darauf zurückzuführen sein, dass auch im Nest 5 die Topographie noch immer bedeutend glatter ist als in Realität. Dies heißt aber weiter, dass die Abweichung Modell–Beobachtung lokal stark begrenzt sein dürfte, und daher wenig Einfluss auf die Ausbreitungsrechnungen haben sollte. Wichtig ist, dass die Erhöhung der Windgeschwindigkeiten bei Südwestlagen durch die Düsenwirkung der Burgundischen Pforte nur vom MM5 erfasst wird.

In den Metriken findet sich zumeist die Überlegenheit des MM5-D5 wieder, vor allem bei der Windgeschwindigkeit. Bei den Südwestlagen am Schauinsland sind zwar die Metriken nicht so gut, aber wie oben erklärt, ist die MM5-Simulation dennoch als weit besser einzustufen. Die einzige Ausnahme ist die Temperatur bei Schönwetter in Freiburg. Allerdings ist der Absolutbetrag der Temperatur für die Ausbreitungsmodellierung nicht so wesentlich. Jedoch könnte man erwarten, dass bei einer genauen Temperatursimulation auch die Qualität der Windsimulation noch zunehmen würde. Die Simulation der vertikalen Temperaturschichtung (Stabilität) durch das MM5-D5 ist in den meisten Fällen gut oder sehr gut, und in der winterlichen Inversionslage besonders relevant. Der Klimatologie ist sie weit überlegen.

Die Windrichtungen erweisen sich generell als schwer simulierbar. Dies ist eine meteorologische Erfahrungstatsache, die stark mit der kleinräumigen Beeinflussung des Windes durch Topographie und manchmal auch Wald oder Gebäude zu tun hat, die in Modellen dieser Art nicht erfasst werden kann. Andererseits sollte man davon ausgehen können, dass diese Abweichungen für die großräumige Ausbreitung nicht so bedeutsam sind. Es wäre interessant zu sehen, ob ein Einbau der 3" Topographie in MM5-D5 noch eine Verbesserung erbrächte, etwa im Bereich der Strömung um die Berggipfel.

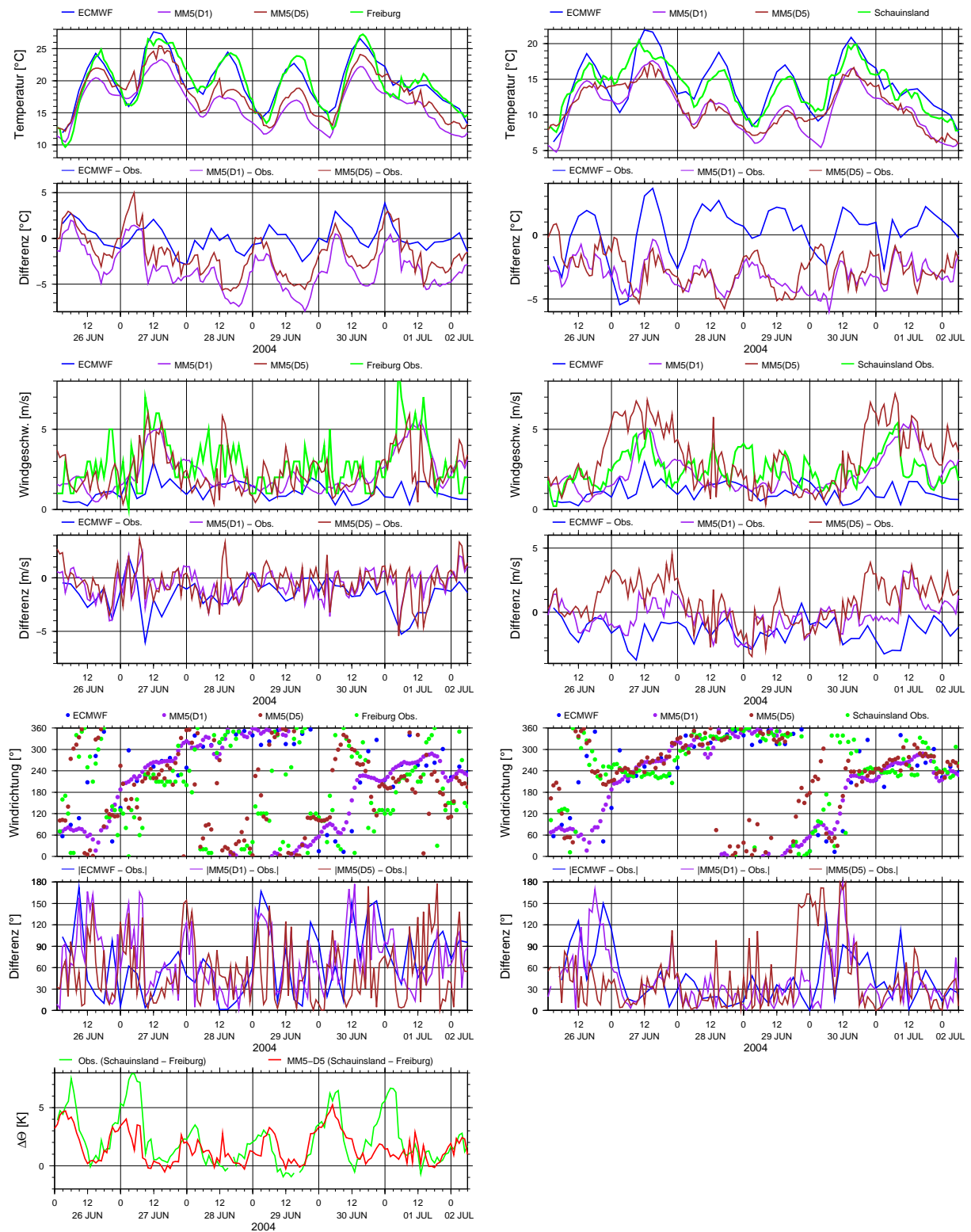


Abbildung 9.2: Vergleich von Beobachtungen, ECMWF-Analysen, MM5-Motherdomain (54 km) und MM5-Nest 5 (0,67 km) für Temperatur und Wind in Freiburg (links) und am Schauinsland (rechts), Episode 1.

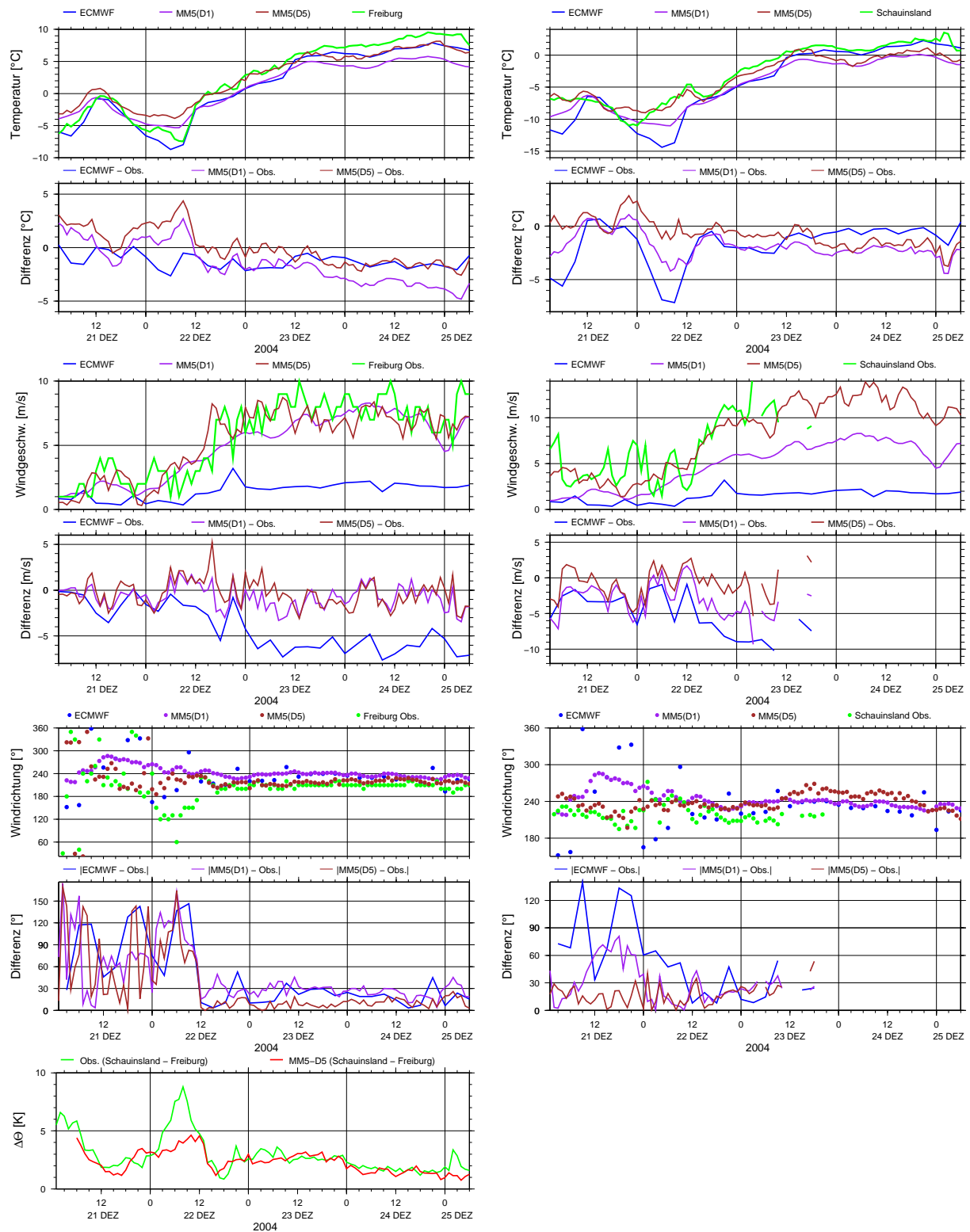


Abbildung 9.3: Vergleich von Beobachtungen, ECMWF-Analysen, MM5-Motherdomain (54 km) und MM5-Nest 5 (0,67 km) für Temperatur und Wind in Freiburg (links) und am Schauinsland (rechts), Episode 2.

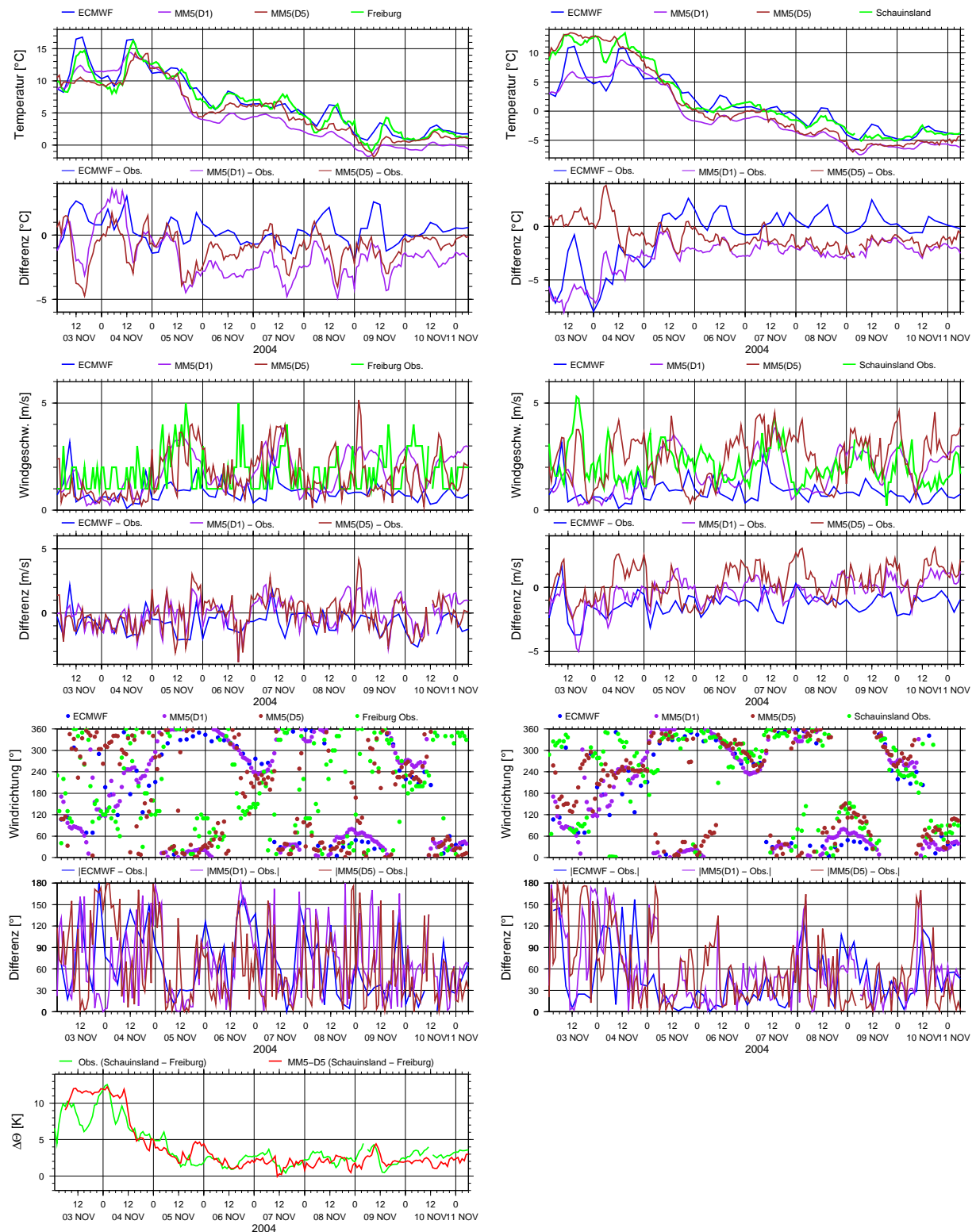


Abbildung 9.4: Vergleich von Beobachtungen, ECMWF-Analysen, MM5-Motherdomain (54 km) und MM5-Nest 5 (0,67 km) für Temperatur und Wind in Freiburg (links) und am Schauinsland (rechts), Episode 3.

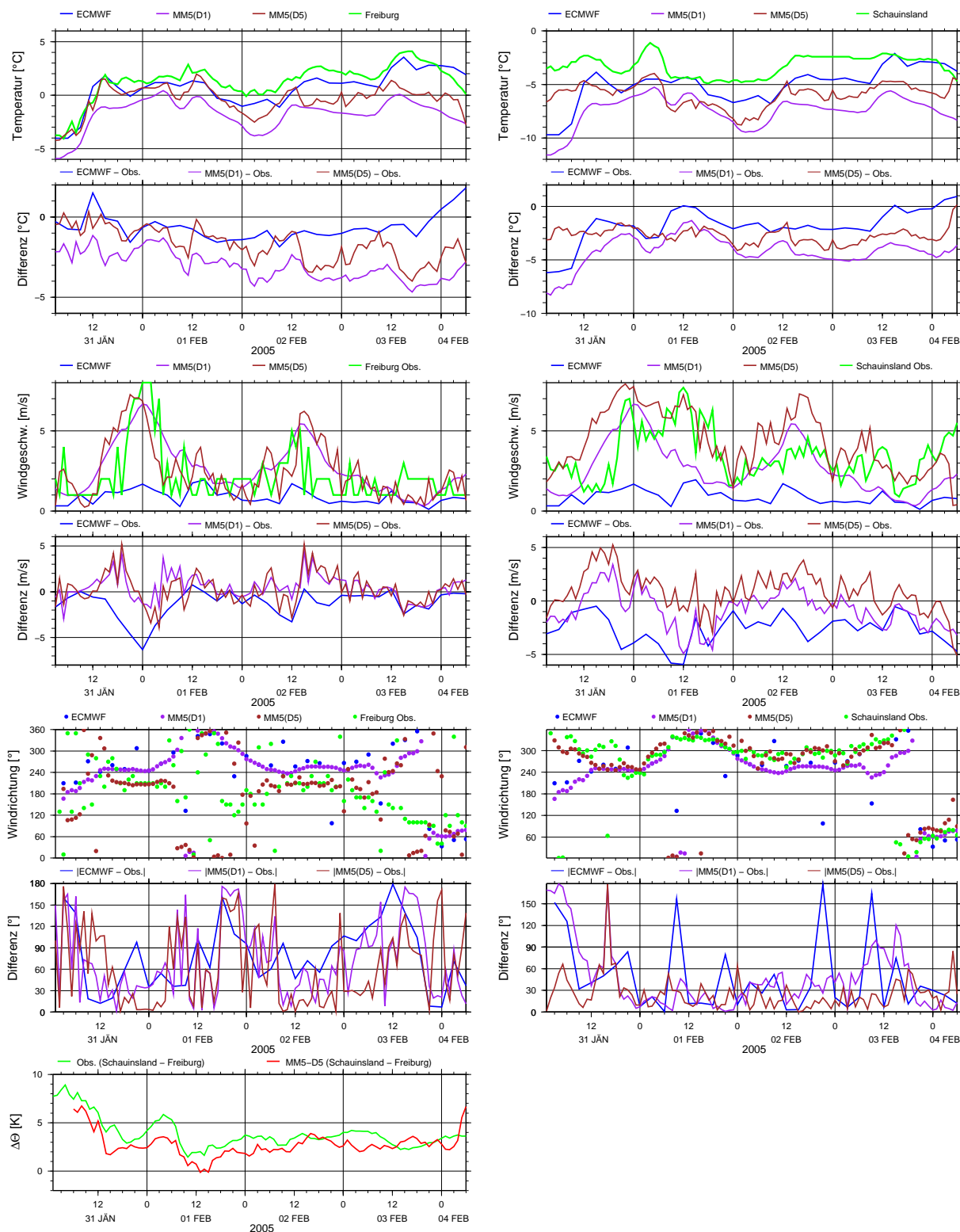


Abbildung 9.5: Vergleich von Beobachtungen, ECMWF-Analysen, MM5-Motherdomain (54 km) und MM5-Nest 5 (0,67 km) für Temperatur und Wind in Freiburg (links) und am Schauinsland (rechts), Episode 4.

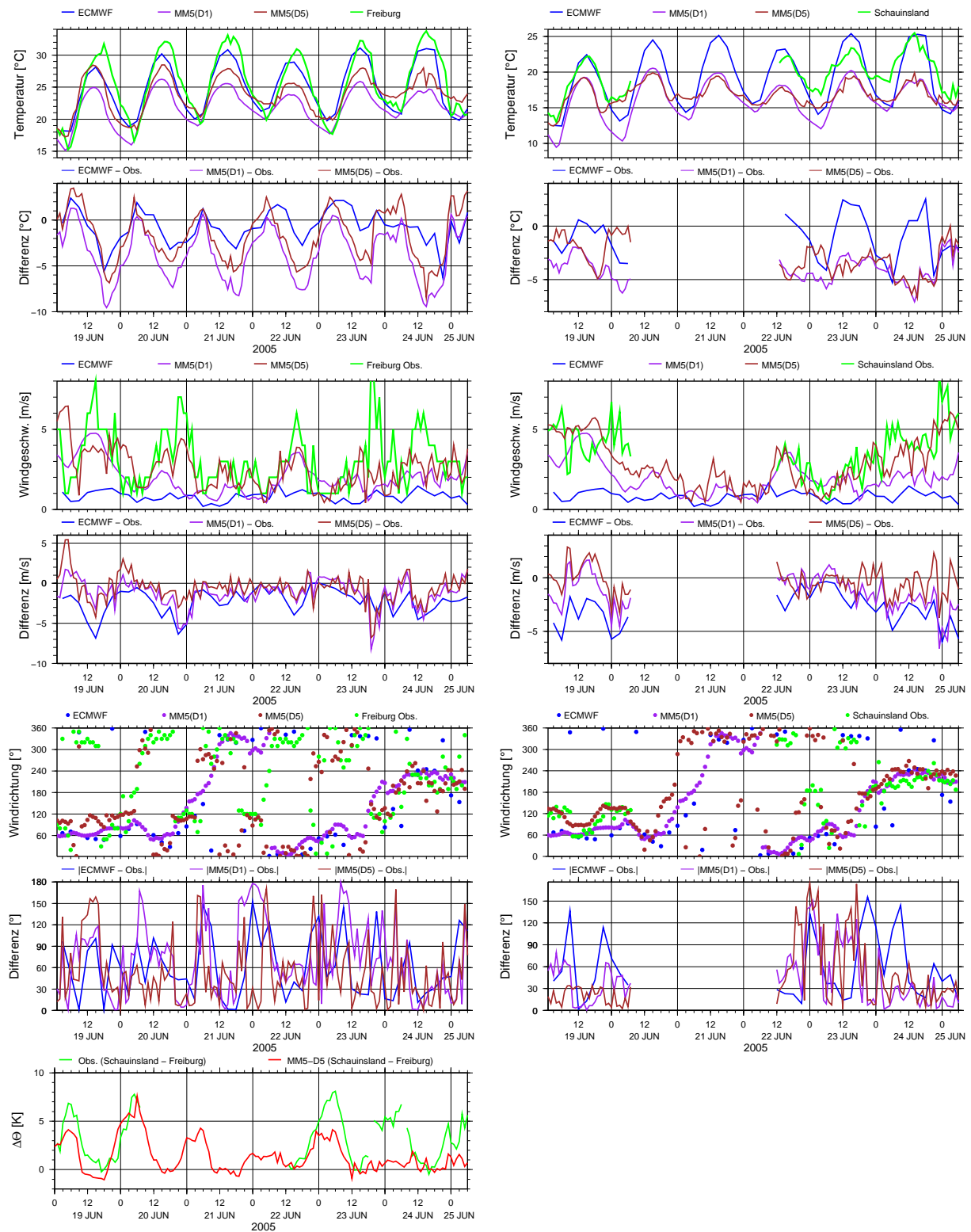


Abbildung 9.6: Vergleich von Beobachtungen, ECMWF-Analysen, MM5-Motherdomain (54 km) und MM5-Nest 5 (0,67 km) für Temperatur und Wind in Freiburg (links) und am Schauinsland (rechts), Episode 5.

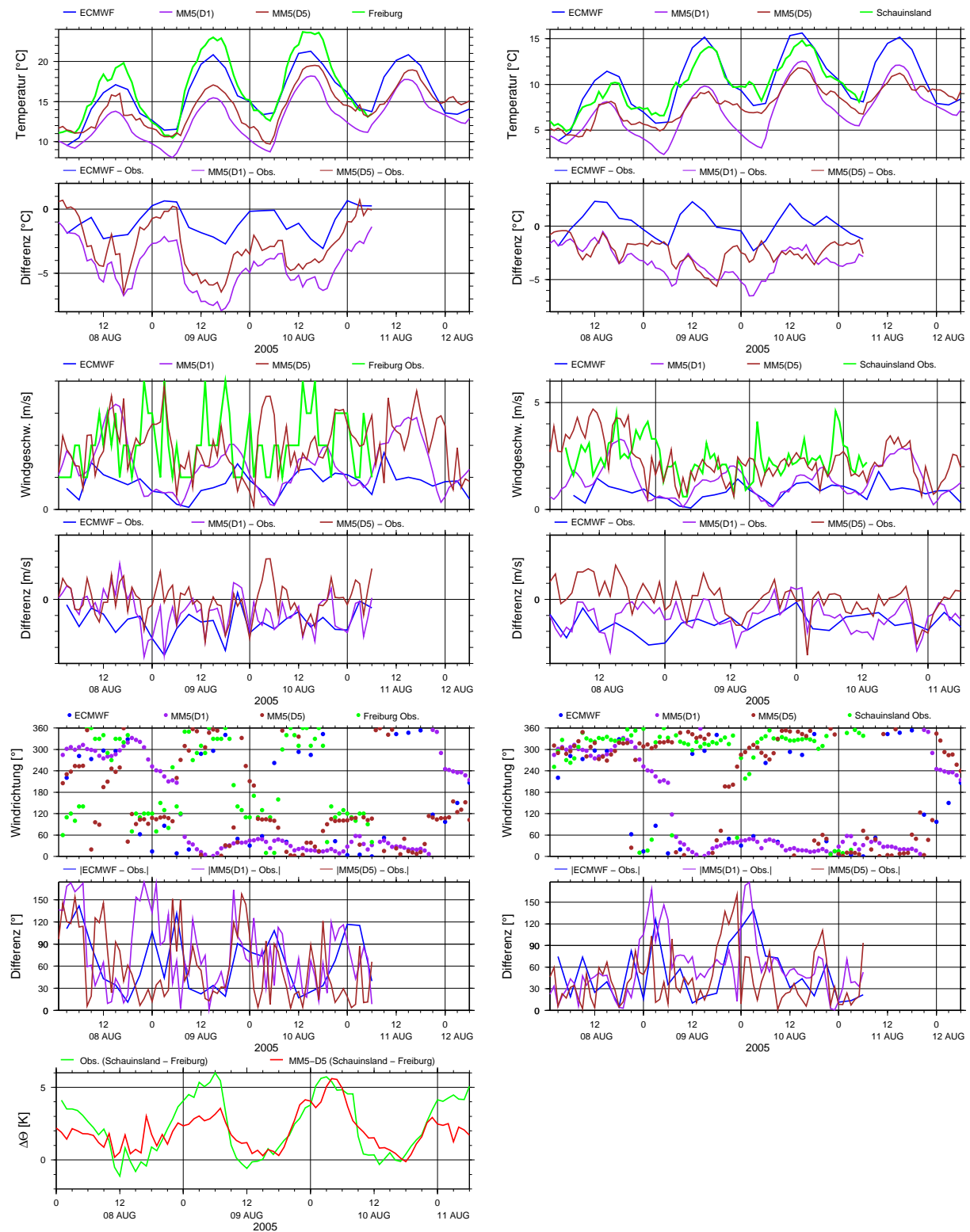


Abbildung 9.7: Vergleich von Beobachtungen, ECMWF-Analysen, MM5-Motherdomain (54 km) und MM5-Nest 5 (0,67 km) für Temperatur und Wind in Freiburg (links) und am Schauinsland (rechts), Episode 6.

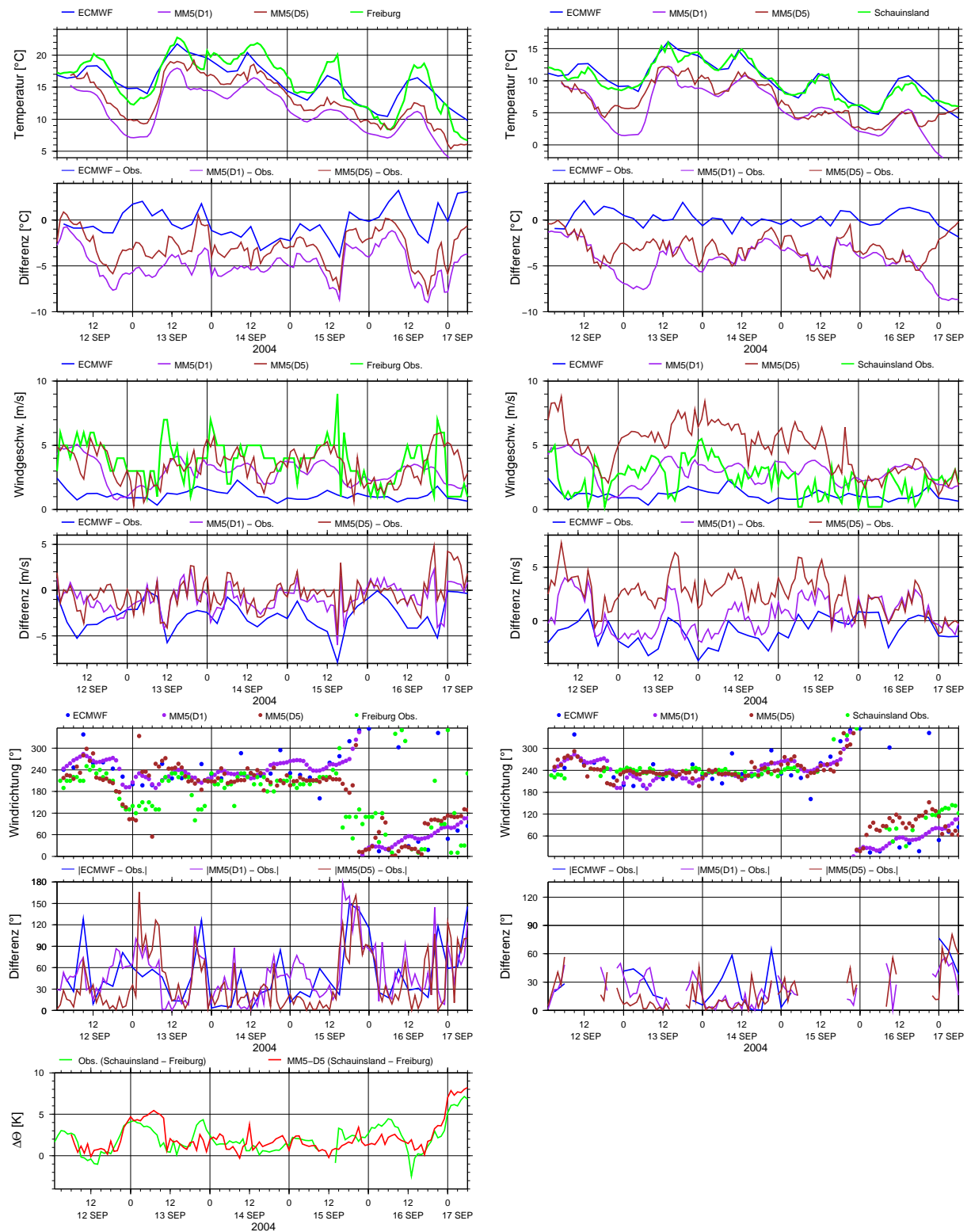


Abbildung 9.8: Vergleich von Beobachtungen, ECMWF-Analysen, MM5-Motherdomain (54 km) und MM5-Nest 5 (0,67 km) für Temperatur und Wind in Freiburg (links) und am Schauinsland (rechts), Episode 7.

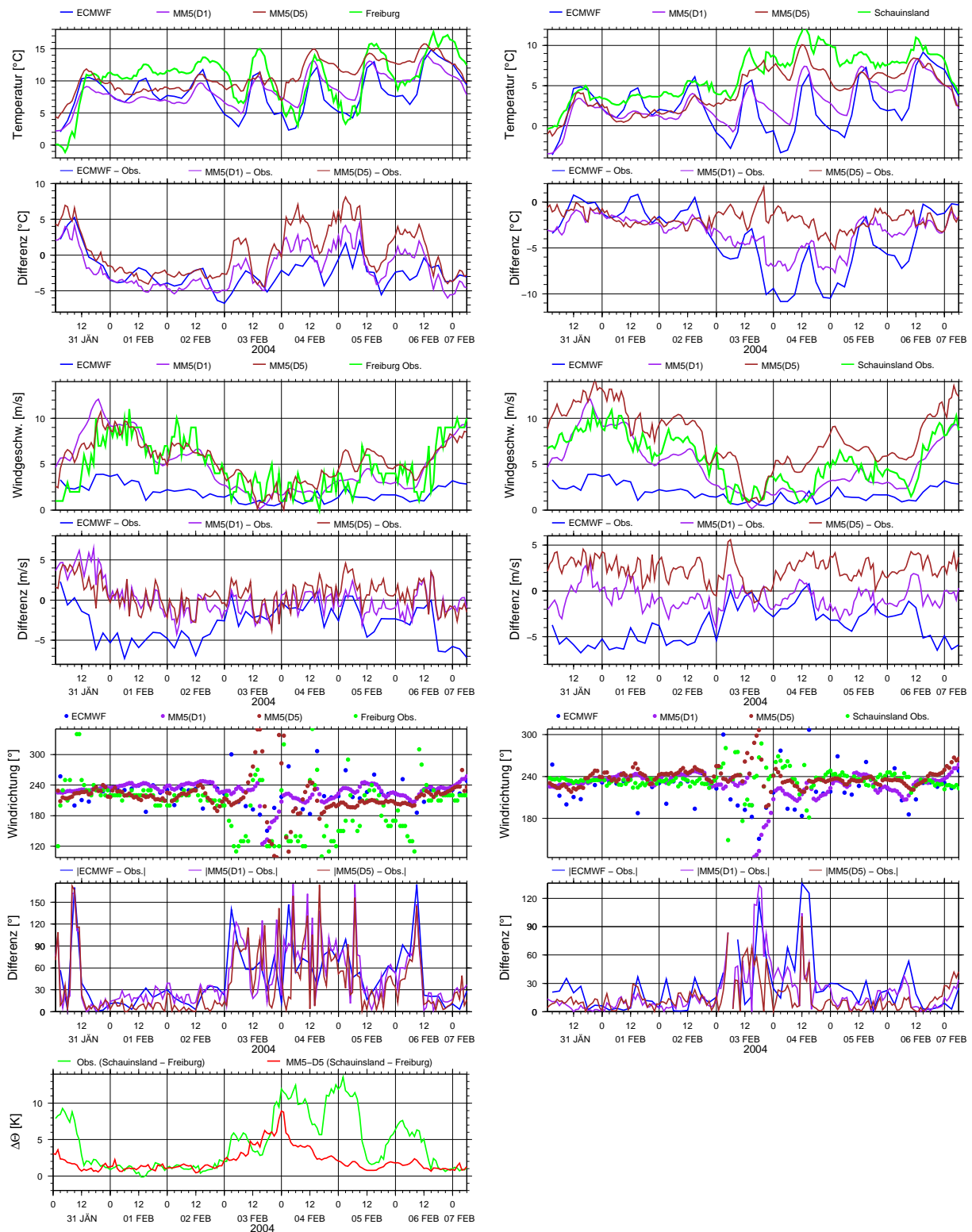


Abbildung 9.9: Vergleich von Beobachtungen, ECMWF-Analysen, MM5-Motherdomain (54 km) und MM5-Nest 5 (0,67 km) für Temperatur und Wind in Freiburg (links) und am Schauinsland (rechts), Episode 8.

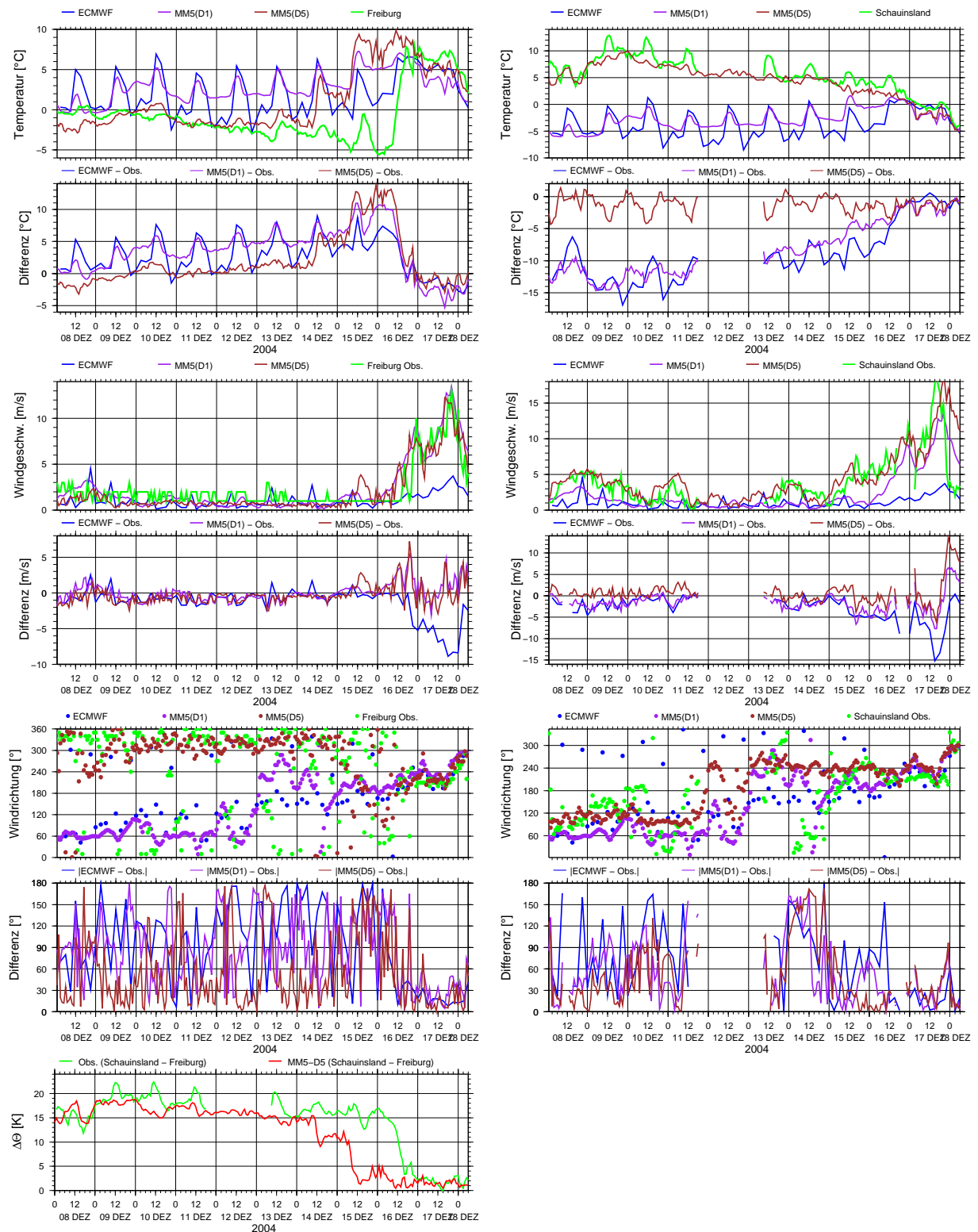


Abbildung 9.10: Vergleich von Beobachtungen, ECMWF-Analysen, MM5-Motherdomain (54 km) und MM5-Nest 5 (0,67 km) für Temperatur und Wind in Freiburg (links) und am Schauinsland (rechts), Episode 9.

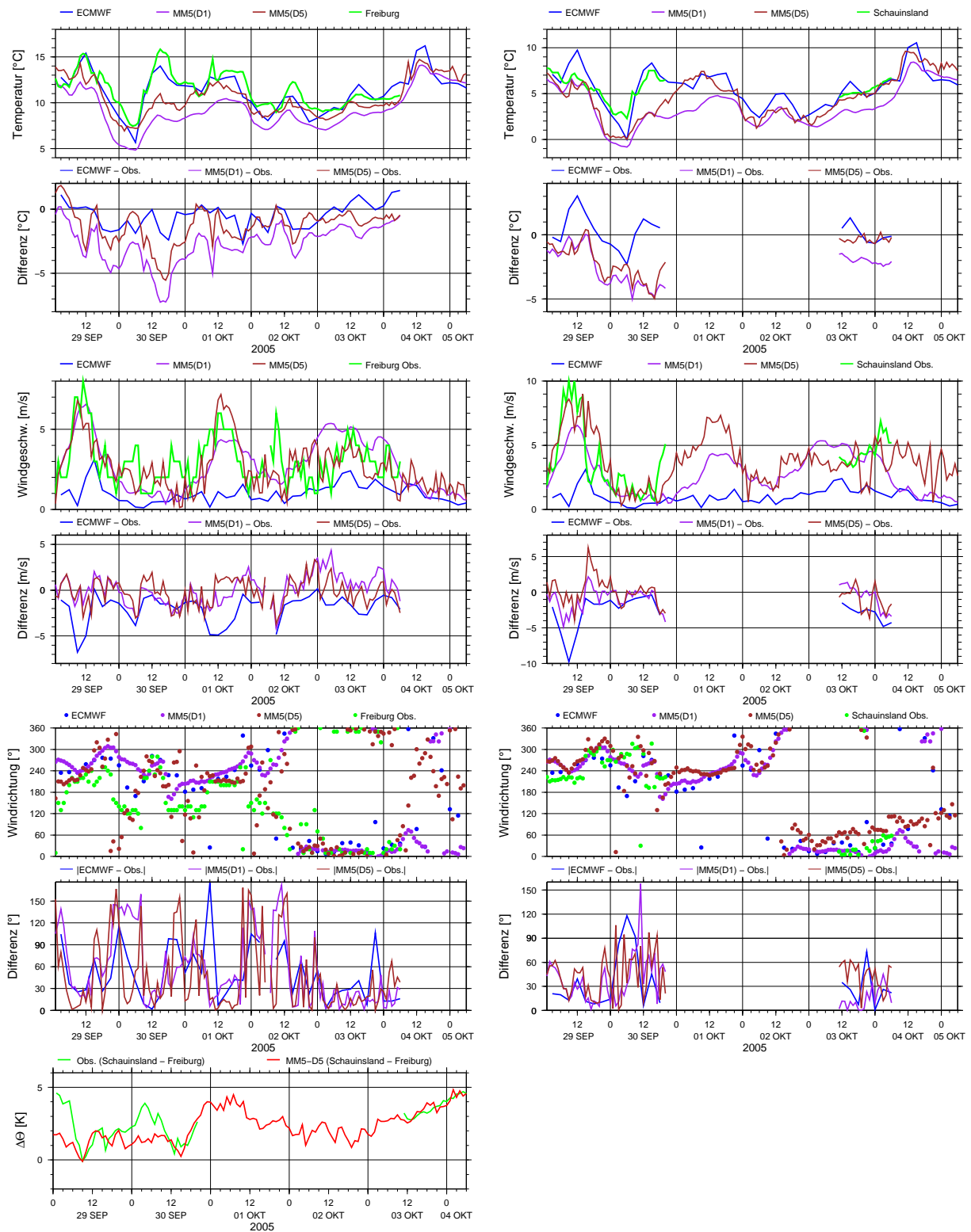


Abbildung 9.11: Vergleich von Beobachtungen, ECMWF-Analysen, MM5-Motherdomain (54 km) und MM5-Nest 5 (0,67 km) für Temperatur und Wind in Freiburg (links) und am Schauinsland (rechts), Episode 11.

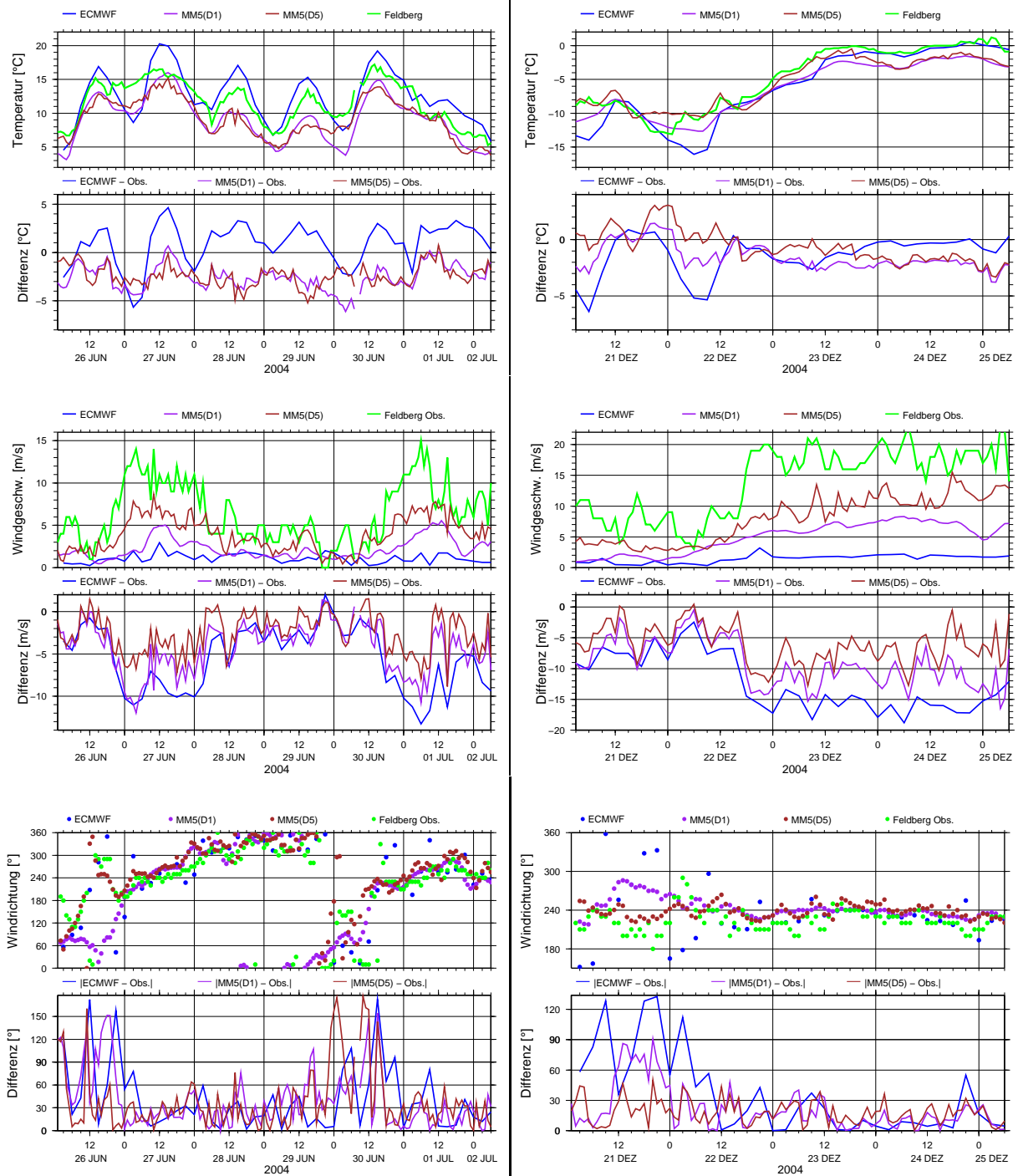


Abbildung 9.12: Vergleich von Beobachtungen, ECMWF-Analysen, MM5-Motherdomain (54 km) und MM5-Nest 5 (0,67 km) für Temperatur am Feldberg Episode 1 (links) und Episode 2 (rechts).

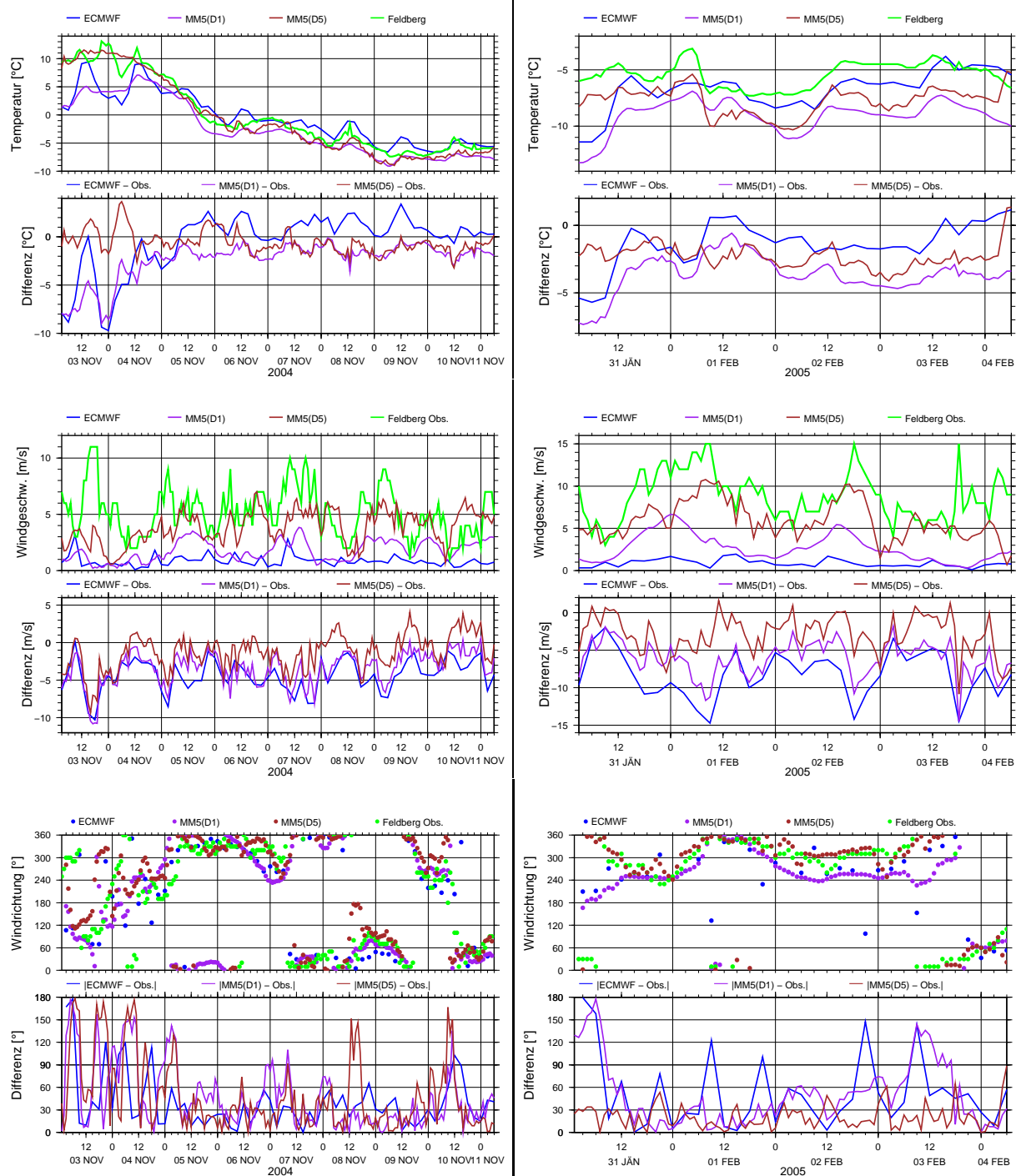


Abbildung 9.13: Vergleich von Beobachtungen, ECMWF-Analysen, MM5-Motherdomain (54 km) und MM5-Nest 5 (0,67 km) für Temperatur am Feldberg Episode 3 (links) und Episode 4 (rechts).

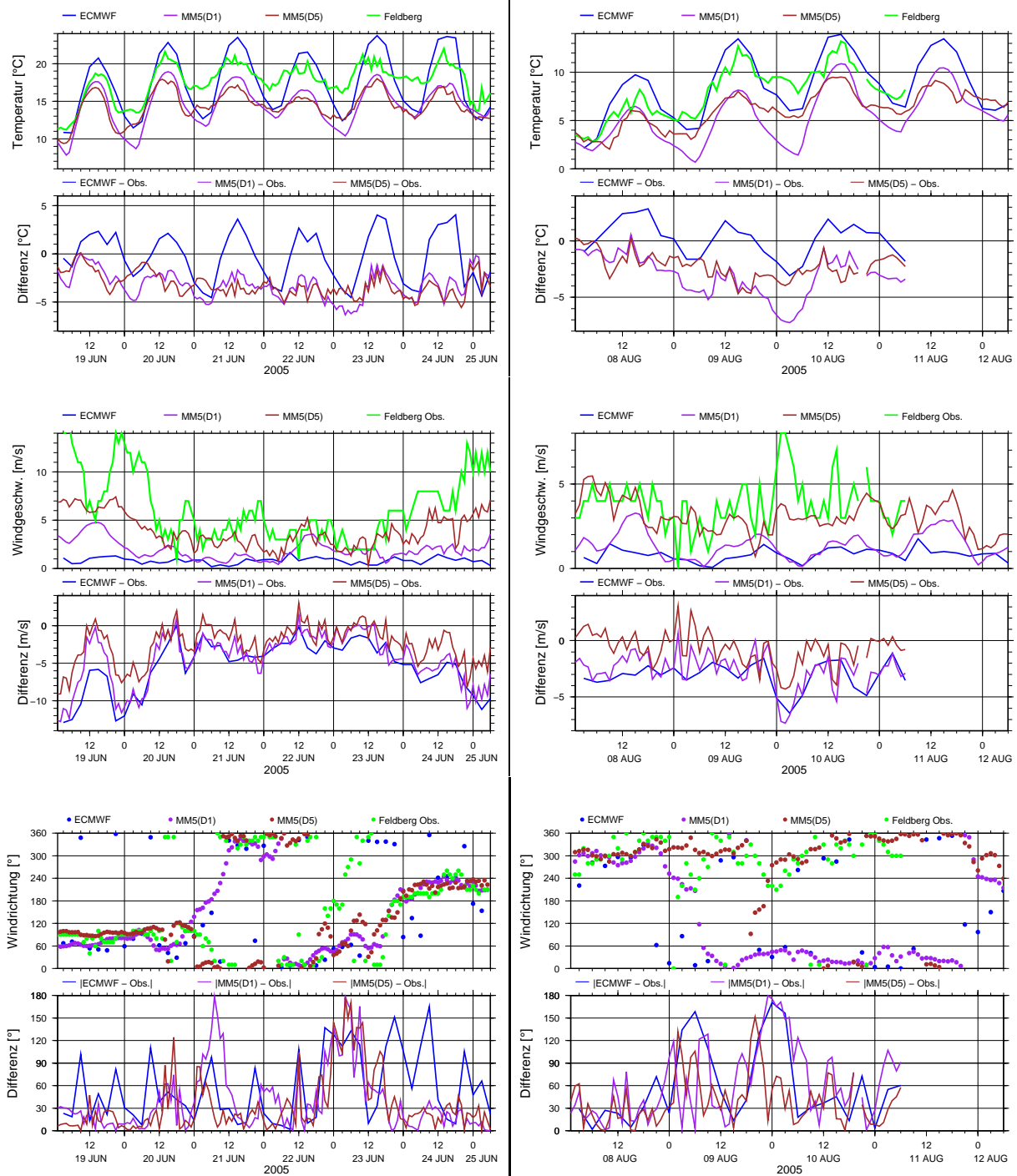


Abbildung 9.14: Vergleich von Beobachtungen, ECMWF-Analysen, MM5-Motherdomain (54 km) und MM5-Nest 5 (0,67 km) für Temperatur am Feldberg Episode 5 (links) und Episode 6 (rechts).

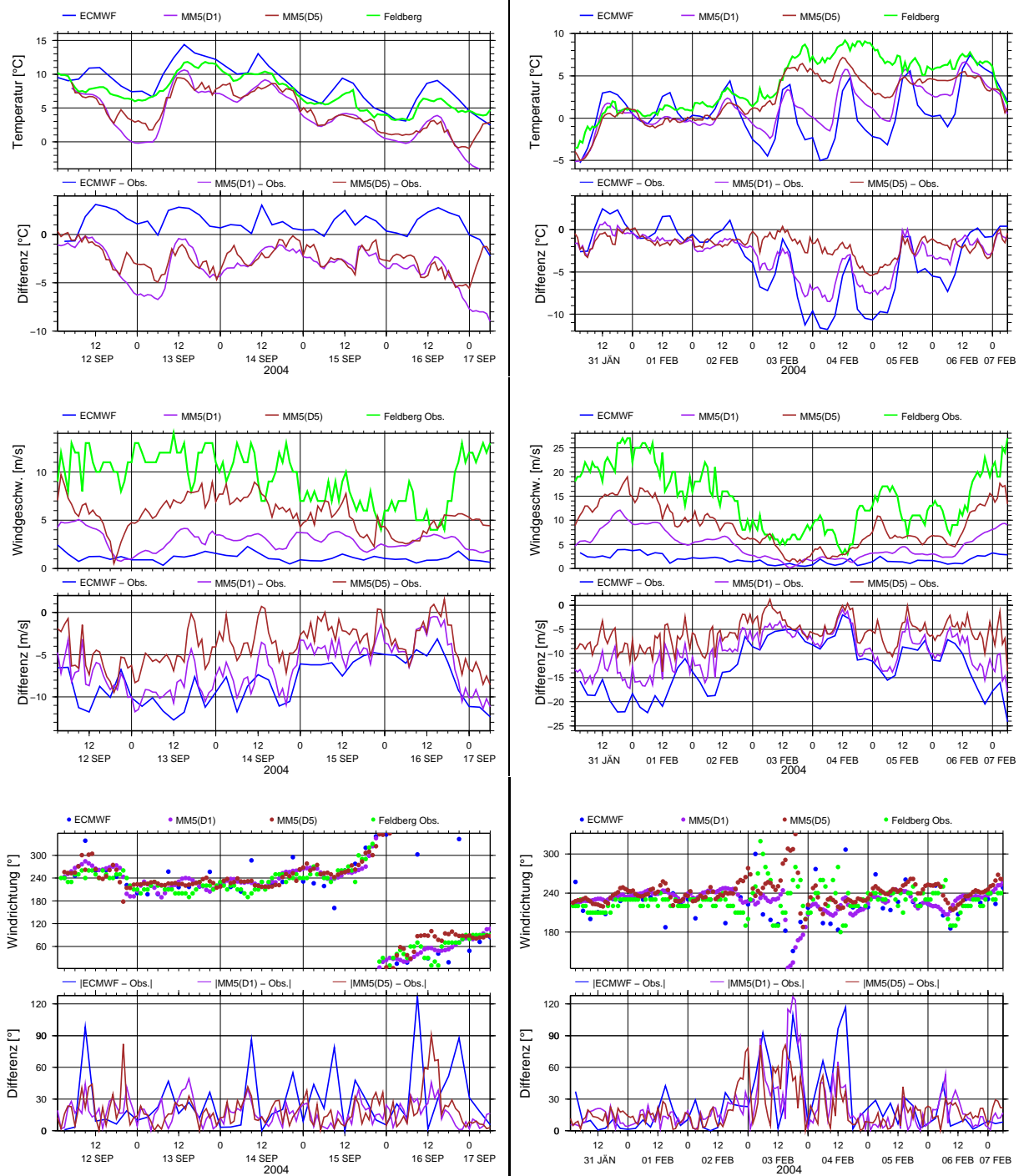


Abbildung 9.15: Vergleich von Beobachtungen, ECMWF-Analysen, MM5-Motherdomain (54 km) und MM5-Nest 5 (0,67 km) für Temperatur am Feldberg Episode 7 (links) und Episode 8 (rechts).

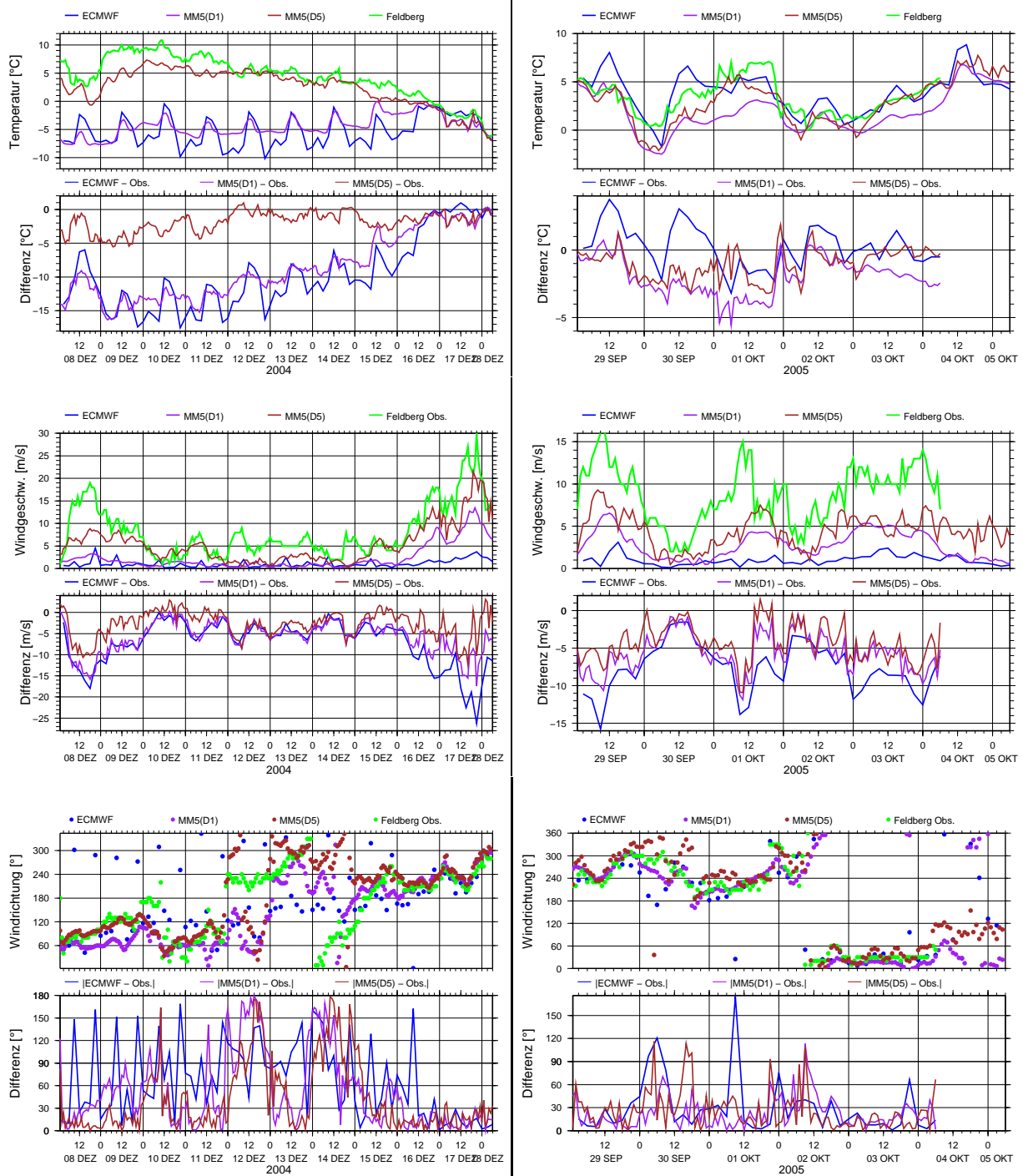


Abbildung 9.16: Vergleich von Beobachtungen, ECMWF-Analysen, MM5-Motherdomain (54 km) und MM5-Nest 5 (0,67 km) für Temperatur am Feldberg Episode 9 (links) und Episode 11 (rechts).

Tabelle 9.2: Metriken für die Simulationsgüte meteorologischer Parameter in Freiburg (links) und am Schauinsland (rechts), Episode 1.

	T			FF			$\Delta\Theta$		T			FF		
	ECMWF	MM5-D1	MM5-D5	ECMWF	MM5-D1	MM5-D5	Grob	Fein	ECMWF	MM5-D1	MM5-D5	ECMWF	MM5-D1	MM5-D5
XMEAN	18.09	16.29	18.56	1.97	2.02	2.23	3.80	1.56	18.09	16.29	11.92	1.97	2.02	2.92
YMEAN	19.75	19.75	19.75	2.66	2.67	2.66	2.23	2.23	13.90	13.90	13.90	2.56	2.56	2.56
BIAS	-1.67	-3.47	-1.20	-0.69	-0.65	-0.43	1.57	-0.67	4.19	2.39	-1.98	-0.59	-0.54	0.36
RB	-0.42	-0.87	-0.30	-0.44	-0.41	-0.28	0.72	-0.31	1.35	0.77	-0.64	-0.62	-0.56	0.37
XVAR	14.58	11.36	12.74	0.65	1.20	1.41	0.00	1.83	14.58	11.36	9.83	0.65	1.20	2.84
YVAR	15.99	15.99	15.99	2.42	2.46	2.42	4.74	4.74	9.60	9.60	9.60	0.90	0.92	0.90
XSTD	3.82	3.37	3.57	0.81	1.10	1.19	0.00	1.35	3.82	3.37	3.13	0.81	1.10	1.68
YSTD	4.00	4.00	4.00	1.56	1.57	1.56	2.18	2.18	3.10	3.10	3.10	0.95	0.96	0.95
R	0.93	0.84	0.86	0.52	0.60	0.41	0.00	0.64	0.86	0.93	0.92	0.35	0.46	0.42
RMSE	2.23	4.10	2.34	1.50	1.42	1.58	2.69	1.81	4.62	2.70	2.32	1.17	1.20	1.59
BCRMSE	1.48	2.20	2.01	1.33	1.26	1.52	2.18	1.68	1.96	1.25	1.21	1.01	1.08	1.55
SB	0.37	0.12	0.53	0.34	0.37	0.56	0.16	0.51	0.05	0.14	0.20	0.21	0.24	0.42
SR	0.96	0.89	0.92	0.51	0.71	0.66	0.00	0.66	0.89	0.96	0.96	0.66	0.72	0.52
STOT	0.66	0.50	0.72	0.42	0.54	0.61	0.08	0.59	0.47	0.55	0.58	0.43	0.48	0.47
RMSE (DD)				73.05	78.98	75.64						47.10	49.52	46.62
SDD				0.34	0.29	0.32						0.66	0.62	0.66

Tabelle 9.3: Metriken für die Simulationsgüte meteorologischer Parameter in Freiburg (links) und am Schauinsland (rechts), Episode 2.

	T			FF			$\Delta\Theta$		T			FF		
	ECMWF	MM5-D1	MM5-D5	ECMWF	MM5-D1	MM5-D5	Grob	Fein	ECMWF	MM5-D1	MM5-D5	ECMWF	MM5-D1	MM5-D5
XMEAN	-0.54	0.92	2.49	3.03	4.77	4.89	3.80	2.45	-0.54	0.92	-3.10	2.30	3.48	5.76
YMEAN	2.53	2.53	2.53	5.59	5.59	5.59	2.94	2.94	-2.74	-2.74	-2.74	6.39	6.39	6.39
BIAS	-3.07	-1.61	-0.04	-2.56	-0.82	-0.70	0.86	-0.49	2.20	3.65	-0.36	-4.09	-2.91	-0.63
RB	-0.55	-0.29	-0.01	-0.88	-0.28	-0.24	0.54	-0.30	0.51	0.85	-0.08	-1.24	-0.89	-0.19
XVAR	29.80	13.55	15.61	2.06	5.82	5.79	0.00	1.22	29.80	13.55	12.30	1.85	4.61	10.88
YVAR	30.79	30.79	30.79	8.36	8.36	8.36	2.58	2.58	18.58	18.58	18.58	10.81	10.81	10.81
XSTD	5.46	3.68	3.95	1.43	2.41	2.41	0.00	1.10	5.46	3.68	3.51	1.36	2.15	3.30
YSTD	5.55	5.55	5.55	2.89	2.89	2.89	1.61	1.61	4.31	4.31	4.31	3.29	3.29	3.29
R	0.99	0.98	0.99	0.86	0.91	0.88	0.00	0.78	0.94	0.96	0.98	0.73	0.79	0.81
RMSE	3.20	2.59	1.78	3.14	1.46	1.57	1.82	1.12	3.03	3.87	1.19	4.78	3.58	2.15
BCRMSE	0.92	2.03	1.78	1.82	1.22	1.40	1.61	1.01	2.08	1.26	1.14	2.48	2.08	2.05
SB	0.25	0.54	1.00	0.11	0.56	0.63	0.26	0.52	0.28	0.12	0.93	0.06	0.11	0.73
SR	0.99	0.84	0.89	0.59	0.92	0.91	0.00	0.78	0.92	0.96	0.95	0.43	0.75	0.90
STOT	0.62	0.69	0.94	0.35	0.74	0.77	0.13	0.65	0.60	0.54	0.94	0.25	0.43	0.82
RMSE (DD)				43.22	57.70	37.58						59.51	37.47	22.88
SDD				0.71	0.51	0.79						0.49	0.79	0.94

Tabelle 9.4: Metriken für die Simulationsgüte meteorologischer Parameter in Freiburg (links) und am Schauinsland (rechts), Episode 3.

	T			FF			$\Delta\Theta$		T			FF		
	ECMWF	MM5-D1	MM5-D5	ECMWF	MM5-D1	MM5-D5	Grob	Fein	ECMWF	MM5-D1	MM5-D5	ECMWF	MM5-D1	MM5-D5
XMEAN	5.18	4.84	5.76	1.49	1.64	1.55	3.80	3.93	5.18	4.84	1.31	1.48	1.62	2.31
YMEAN	6.43	6.43	6.43	1.65	1.65	1.65	3.85	3.85	1.90	1.90	1.90	2.20	2.20	2.20
BIAS	-1.26	-1.59	-0.67	-0.16	-0.01	-0.10	-0.05	0.08	3.27	2.94	-0.59	-0.72	-0.57	0.11
RB	-0.30	-0.38	-0.16	-0.22	-0.02	-0.13	-0.02	0.03	0.55	0.49	-0.10	-0.92	-0.73	0.15
XVAR	19.14	23.95	16.78	0.28	0.76	1.02	0.00	12.02	19.14	23.95	41.17	0.28	0.76	0.98
YVAR	17.97	17.97	17.97	0.51	0.51	0.51	7.61	7.61	35.43	35.43	35.43	0.61	0.61	0.61
XSTD	4.37	4.89	4.10	0.53	0.87	1.01	0.00	3.47	4.37	4.89	6.42	0.53	0.87	0.99
YSTD	4.24	4.24	4.24	0.71	0.71	0.71	2.76	2.76	5.95	5.95	5.95	0.78	0.78	0.78
R	0.97	0.94	0.96	0.06	0.31	0.19	0.00	0.90	0.94	0.98	0.99	0.21	0.11	-0.01
RMSE	1.68	2.32	1.38	0.87	0.94	1.12	2.76	1.54	4.03	3.33	1.12	1.11	1.25	1.27
BCRMSE	1.12	1.68	1.20	0.86	0.94	1.12	2.76	1.54	2.36	1.58	0.95	0.85	1.11	1.27
SB	0.53	0.41	0.80	0.67	1.00	0.85	1.00	0.99	0.25	0.29	0.91	0.11	0.16	0.83
SR	0.98	0.95	0.98	0.48	0.63	0.53	0.00	0.90	0.88	0.95	0.99	0.52	0.55	0.47
STOT	0.76	0.68	0.89	0.58	0.81	0.69	0.50	0.95	0.57	0.62	0.95	0.31	0.35	0.65
RMSE (DD)				73.21	82.50	71.86						48.02	48.43	69.67
SDD				0.34	0.26	0.35						0.64	0.64	0.37

Tabelle 9.5: Metriken für die Simulationsgüte meteorologischer Parameter in Freiburg (links) und am Schauinsland (rechts), Episode 4.

	T			FF			$\Delta\Theta$		T			FF		
	ECMWF	MM5-D1	MM5-D5	ECMWF	MM5-D1	MM5-D5	Grob	Fein	ECMWF	MM5-D1	MM5-D5	ECMWF	MM5-D1	MM5-D5
XMEAN	-0.79	-1.83	-0.49	1.81	2.73	2.19	3.80	2.91	-0.79	-1.83	-5.66	1.81	2.73	4.11
YMEAN	1.25	1.25	1.25	2.15	2.15	2.15	3.89	3.89	-3.26	-3.26	-3.26	3.51	3.51	3.51
BIAS	-2.04	-3.08	-1.75	-0.34	0.58	0.04	-0.09	-0.97	2.47	1.43	-2.41	-1.71	-0.78	0.59
RB	-1.23	-1.85	-1.05	-0.21	0.35	0.02	-0.05	-0.62	2.48	1.43	-2.41	-1.13	-0.52	0.39
XVAR	3.27	2.29	2.52	0.56	1.95	2.87	0.00	2.12	3.27	2.29	1.21	0.56	1.95	3.96
YVAR	2.78	2.78	2.78	2.71	2.71	2.71	2.46	2.46	1.00	1.00	1.00	2.29	2.29	2.29
XSTD	1.81	1.51	1.59	0.75	1.40	1.69	0.00	1.45	1.81	1.51	1.10	0.75	1.40	1.99
YSTD	1.67	1.67	1.67	1.65	1.65	1.65	1.57	1.57	1.00	1.00	1.00	1.51	1.51	1.51
R	0.90	0.84	0.79	0.56	0.68	0.55	0.00	0.79	0.38	0.37	0.74	0.60	0.34	0.45
RMSE	2.19	3.21	2.05	1.41	1.37	1.59	1.57	1.39	3.00	2.05	2.52	2.10	1.84	1.98
BCRMSE	0.80	0.90	1.07	1.37	1.24	1.59	1.57	0.99	1.70	1.47	0.76	1.22	1.67	1.89
SB	0.06	0.03	0.08	0.70	0.44	0.99	0.97	0.21	0.02	0.05	0.02	0.07	0.27	0.39
SR	0.94	0.91	0.89	0.44	0.82	0.77	0.00	0.89	0.50	0.58	0.86	0.51	0.67	0.67
STOT	0.50	0.47	0.49	0.57	0.63	0.88	0.49	0.55	0.26	0.31	0.44	0.29	0.47	0.53
RMSE (DD)				83.53	88.41	86.57						42.61	50.07	30.54
SDD				0.26	0.22	0.24						0.72	0.61	0.88

Tabelle 9.6: Metriken für die Simulationsgüte meteorologischer Parameter in Freiburg (links) und am Schauinsland (rechts), Episode 5.

	T			FF			$\Delta\Theta$		T			FF		
	ECMWF	MM5-D1	MM5-D5	ECMWF	MM5-D1	MM5-D5	Grob	Fein	ECMWF	MM5-D1	MM5-D5	ECMWF	MM5-D1	MM5-D5
XMEAN	23.13	21.68	24.47	1.68	1.91	2.41	3.80	1.49	22.49	21.14	17.17	1.78	2.27	3.29
YMEAN	25.51	25.51	25.51	3.06	3.06	3.06	3.21	3.21	19.69	19.69	19.69	3.77	3.77	3.77
BIAS	-2.38	-3.82	-1.04	-1.38	-1.15	-0.65	0.59	-1.71	2.80	1.45	-2.53	-1.99	-1.50	-0.48
RB	-0.50	-0.80	-0.22	-0.83	-0.69	-0.39	0.25	-0.71	1.04	0.54	-0.94	-1.25	-0.94	-0.30
XVAR	17.99	7.58	9.77	0.42	0.98	1.30	0.00	3.58	18.22	8.31	3.51	0.46	0.93	2.06
YVAR	22.63	22.63	22.63	2.78	2.78	2.78	5.83	5.83	7.20	7.20	7.20	2.52	2.52	2.52
XSTD	4.24	2.75	3.13	0.65	0.99	1.14	0.00	1.89	4.27	2.88	1.87	0.68	0.96	1.43
YSTD	4.76	4.76	4.76	1.67	1.67	1.67	2.41	2.41	2.68	2.68	2.68	1.59	1.59	1.59
R	0.90	0.81	0.84	0.31	0.46	0.43	0.00	0.65	0.92	0.88	0.81	0.11	0.15	0.51
RMSE	3.18	4.86	2.91	2.11	1.88	1.69	2.48	2.53	3.49	2.00	2.98	2.59	2.29	1.58
BCRMSE	2.11	3.00	2.72	1.59	1.49	1.56	2.41	1.86	2.09	1.38	1.59	1.66	1.73	1.51
SB	0.29	0.13	0.68	0.13	0.17	0.40	0.62	0.17	0.08	0.25	0.10	0.06	0.10	0.52
SR	0.94	0.68	0.78	0.30	0.56	0.62	0.00	0.78	0.78	0.93	0.80	0.29	0.45	0.75
STOT	0.61	0.41	0.73	0.21	0.37	0.51	0.31	0.47	0.43	0.59	0.45	0.17	0.28	0.63
RMSE (DD)				76.84	78.25	66.84						73.82	51.24	56.76
SDD				0.31	0.29	0.40						0.33	0.60	0.52

Tabelle 9.7: Metriken für die Simulationsgüte meteorologischer Parameter in Freiburg (links) und am Schauinsland (rechts), Episode 6.

	T			FF			$\Delta\Theta$		T			FF		
	ECMWF	MM5-D1	MM5-D5	ECMWF	MM5-D1	MM5-D5	Grob	Fein	ECMWF	MM5-D1	MM5-D5	ECMWF	MM5-D1	MM5-D5
XMEAN	13.85	12.27	14.39	1.59	1.15	1.96	3.80	1.97	13.85	12.27	7.80	1.59	1.15	1.92
YMEAN	16.72	16.72	16.72	2.19	2.19	2.19	2.34	2.34	9.85	9.85	9.85	2.28	2.28	2.28
BIAS	-2.88	-4.45	-2.33	-0.61	-1.04	-0.23	1.46	-0.37	3.99	2.42	-2.05	-0.70	-1.13	-0.36
RB	-0.72	-1.11	-0.58	-0.73	-1.25	-0.28	0.72	-0.18	1.58	0.96	-0.81	-1.16	-1.88	-0.60
XVAR	13.98	6.86	7.48	0.42	0.49	0.65	0.00	1.66	13.98	6.86	4.75	0.42	0.49	0.76
YVAR	15.95	15.95	15.95	0.69	0.69	0.69	4.10	4.10	6.37	6.37	6.37	0.36	0.36	0.36
XSTD	3.74	2.62	2.74	0.65	0.70	0.80	0.00	1.29	3.74	2.62	2.18	0.65	0.70	0.87
YSTD	3.99	3.99	3.99	0.83	0.83	0.83	2.03	2.03	2.52	2.52	2.52	0.60	0.60	0.60
R	0.98	0.94	0.92	0.13	0.00	0.31	0.00	0.77	0.90	0.86	0.87	0.23	0.25	-0.01
RMSE	2.97	4.80	2.96	1.16	1.50	0.99	2.50	1.37	4.39	2.77	2.41	1.04	1.38	1.12
BCRMSE	0.72	1.80	1.82	0.99	1.09	0.96	2.03	1.32	1.83	1.34	1.26	0.78	0.80	1.06
SB	0.16	0.07	0.23	0.16	0.06	0.56	0.16	0.75	0.04	0.10	0.13	0.07	0.03	0.22
SR	0.99	0.81	0.83	0.53	0.49	0.66	0.00	0.73	0.82	0.93	0.91	0.61	0.61	0.43
STOT	0.57	0.44	0.53	0.34	0.27	0.61	0.08	0.74	0.43	0.51	0.52	0.34	0.32	0.33
RMSE (DD)				72.45	82.62	70.60						56.26	59.74	45.03
SDD				0.34	0.26	0.36						0.53	0.48	0.69

Tabelle 9.8: Metriken für die Simulationsgüte meteorologischer Parameter in Freiburg (links) und am Schauinsland (rechts), Episode 7.

	T			FF			$\Delta\theta$		T			FF		
	ECMWF	MM5-D1	MM5-D5	ECMWF	MM5-D1	MM5-D5	Grob	Fein	ECMWF	MM5-D1	MM5-D5	ECMWF	MM5-D1	MM5-D5
XMEAN	13.84	11.16	13.31	2.31	2.74	3.21	3.80	2.25	13.84	11.16	7.44	2.31	2.74	4.42
YMEAN	16.10	16.10	16.10	3.83	3.83	3.83	2.07	2.07	9.97	9.97	9.97	2.11	2.11	2.11
BIAS	-2.26	-4.94	-2.79	-1.53	-1.09	-0.62	1.73	0.18	3.87	1.19	-2.53	0.20	0.63	2.31
RB	-0.56	-1.23	-0.70	-0.85	-0.61	-0.34	1.02	0.11	1.40	0.43	-0.92	0.15	0.49	1.79
XVAR	9.01	13.10	13.93	0.35	0.90	1.27	0.00	3.33	9.01	13.10	10.04	0.35	0.90	2.94
YVAR	16.04	16.04	16.04	3.23	3.23	3.23	2.90	2.90	7.62	7.62	7.62	1.66	1.66	1.66
XSTD	3.00	3.62	3.73	0.59	0.95	1.13	0.00	1.82	3.00	3.62	3.17	0.59	0.95	1.71
YSTD	4.00	4.00	4.00	1.80	1.80	1.80	1.70	1.70	2.76	2.76	2.76	1.29	1.29	1.29
R	0.92	0.89	0.88	0.40	0.56	0.32	0.00	0.70	0.93	0.89	0.88	0.30	0.02	0.43
RMSE	2.84	5.26	3.38	2.25	1.85	1.89	2.43	1.37	4.02	2.10	2.95	1.26	1.70	2.84
BCRMSE	1.71	1.81	1.91	1.65	1.49	1.79	1.70	1.36	1.08	1.73	1.51	1.24	1.58	1.65
SB	0.24	0.06	0.17	0.12	0.21	0.46	0.09	0.90	0.05	0.35	0.11	0.81	0.29	0.03
SR	0.88	0.94	0.94	0.24	0.53	0.53	0.00	0.85	0.96	0.88	0.92	0.37	0.46	0.66
STOT	0.56	0.50	0.55	0.18	0.37	0.50	0.04	0.87	0.50	0.61	0.51	0.59	0.38	0.34
RMSE (DD)				61.55	60.77	52.26						24.48	27.33	28.44
SDD				0.46	0.47	0.58						0.93	0.91	0.90

Tabelle 9.9: Metriken für die Simulationsgüte meteorologischer Parameter in Freiburg (links) und am Schauinsland (rechts), Episode 8.

	T			FF			$\Delta\theta$		T			FF		
	ECMWF	MM5-D1	MM5-D5	ECMWF	MM5-D1	MM5-D5	Grob	Fein	ECMWF	MM5-D1	MM5-D5	ECMWF	MM5-D1	MM5-D5
XMEAN	6.63	8.26	10.54	3.24	4.98	5.02	3.80	2.06	6.63	8.26	4.68	3.24	4.98	7.77
YMEAN	10.35	10.35	10.35	4.79	4.86	4.79	4.47	4.47	6.28	6.28	6.28	5.60	5.68	5.60
BIAS	-3.73	-2.09	0.18	-1.55	0.12	0.22	-0.67	-2.40	0.34	1.98	-1.60	-2.36	-0.70	2.17
RB	-0.96	-0.54	0.05	-0.55	0.04	0.08	-0.18	-0.63	0.12	0.70	-0.57	-0.88	-0.26	0.81
XVAR	8.27	6.08	6.02	2.04	6.44	4.15	0.00	2.48	8.27	6.08	6.41	2.04	6.44	8.84
YVAR	15.09	15.09	15.09	7.89	7.77	7.89	14.36	14.36	8.00	8.00	8.00	7.27	7.02	7.27
XSTD	2.87	2.47	2.45	1.43	2.54	2.04	0.00	1.58	2.87	2.47	2.53	1.43	2.54	2.97
YSTD	3.88	3.88	3.88	2.81	2.79	2.81	3.79	3.79	2.83	2.83	2.83	2.70	2.65	2.70
R	0.83	0.71	0.56	0.74	0.79	0.81	0.00	0.56	0.38	0.72	0.95	0.89	0.92	0.91
RMSE	4.32	3.45	3.23	2.54	1.74	1.69	3.85	3.99	3.20	2.81	1.85	2.83	1.27	2.50
BCRMSE	2.19	2.74	3.23	2.01	1.74	1.68	3.79	3.18	3.18	2.00	0.94	1.56	1.06	1.24
SB	0.10	0.26	0.98	0.25	0.98	0.94	0.76	0.20	0.87	0.17	0.24	0.12	0.59	0.13
SR	0.84	0.70	0.64	0.57	0.89	0.82	0.00	0.39	0.69	0.84	0.96	0.65	0.96	0.95
STOT	0.47	0.48	0.81	0.41	0.93	0.88	0.38	0.30	0.78	0.51	0.60	0.38	0.77	0.54
RMSE (DD)				59.61	54.44	45.02						35.01	27.08	25.43
SDD				0.49	0.55	0.69						0.82	0.91	0.92

Tabelle 9.10: Metriken für die Simulationsgüte meteorologischer Parameter in Freiburg (links) und am Schauinsland (rechts), Episode 9.

	T			FF			$\Delta\theta$		T			FF		
	ECMWF	MM5-D1	MM5-D5	ECMWF	MM5-D1	MM5-D5	Grob	Fein	ECMWF	MM5-D1	MM5-D5	ECMWF	MM5-D1	MM5-D5
XMEAN	0.09	2.77	1.42	1.80	2.21	1.98	3.80	10.92	0.37	2.87	3.72	1.96	2.47	4.50
YMEAN	-0.64	-0.64	-0.64	2.35	2.35	2.35	14.22	14.22	5.41	5.41	5.41	4.07	4.07	4.07
BIAS	0.73	3.41	2.06	-0.55	-0.14	-0.37	-10.42	-3.30	-5.04	-2.54	-1.69	-2.11	-1.60	0.43
RB	0.22	1.04	0.63	-0.22	-0.06	-0.15	-1.68	-0.53	-1.41	-0.71	-0.47	-0.61	-0.47	0.13
XVAR	4.35	3.04	12.73	2.09	7.85	5.88	0.00	45.17	4.04	3.40	9.13	2.27	8.62	11.63
YVAR	10.71	10.71	10.71	6.35	6.35	6.35	38.35	38.35	12.76	12.76	12.76	11.80	11.80	11.80
XSTD	2.09	1.74	3.57	1.44	2.80	2.42	0.00	6.72	2.01	1.84	3.02	1.51	2.94	3.41
YSTD	3.27	3.27	3.27	2.52	2.52	2.52	6.19	6.19	3.57	3.57	3.57	3.43	3.43	3.43
R	0.69	0.18	0.40	0.87	0.90	0.89	0.00	0.79	-0.33	-0.13	0.95	0.75	0.75	0.75
RMSE	2.48	4.83	4.27	1.56	1.23	1.20	12.12	5.36	6.85	4.93	2.06	3.28	2.81	2.48
BCRMSE	2.38	3.42	3.75	1.46	1.22	1.14	6.19	4.22	4.64	4.23	1.18	2.52	2.32	2.44
SB	0.67	0.08	0.20	0.68	0.97	0.82	0.03	0.26	0.05	0.17	0.31	0.21	0.32	0.86
SR	0.69	0.41	0.70	0.69	0.94	0.95	0.00	0.89	0.24	0.29	0.95	0.47	0.85	0.87
STOT	0.68	0.24	0.45	0.69	0.95	0.88	0.02	0.57	0.15	0.23	0.63	0.34	0.58	0.87
RMSE (DD)				58.06	91.86	73.99						88.53	52.16	67.33
SDD				0.51	0.21	0.33						0.22	0.58	0.40

Tabelle 9.11: Metriken für die Simulationsgüte meteorologischer Parameter in Freiburg (links) und am Schauinsland (rechts), Episode 11.

	T			FF			$\Delta\theta$			T			FF		
	ECMWF	MM5-D1	MM5-D5	ECMWF	MM5-D1	MM5-D5	Grob	Fein		ECMWF	MM5-D1	MM5-D5	ECMWF	MM5-D1	MM5-D5
XMEAN	9.41	8.53	10.30	2.15	2.98	2.88	3.80	2.08		9.87	8.67	4.50	2.21	3.05	3.46
YMEAN	11.39	11.39	11.39	3.02	3.02	3.02	2.62	2.62		5.49	5.49	5.49	3.87	3.87	3.87
BIAS	-1.98	-2.86	-1.09	-0.88	-0.05	-0.14	1.18	-0.55		4.39	3.19	-0.99	-1.66	-0.81	-0.41
RB	-1.05	-1.52	-0.58	-0.59	-0.03	-0.10	0.95	-0.44		3.27	2.38	-0.74	-0.74	-0.36	-0.18
XVAR	3.14	2.55	2.40	1.03	1.96	1.96	0.00	1.57		3.66	3.99	3.90	1.41	2.37	4.15
YVAR	3.53	3.53	3.53	2.22	2.22	2.22	1.54	1.54		1.80	1.80	1.80	5.09	5.09	5.09
XSTD	1.77	1.60	1.55	1.01	1.40	1.40	0.00	1.25		1.91	2.00	1.98	1.19	1.54	2.04
YSTD	1.88	1.88	1.88	1.49	1.49	1.49	1.24	1.24		1.34	1.34	1.34	2.26	2.26	2.26
R	0.84	0.63	0.71	0.40	0.47	0.58	0.00	0.68		0.90	0.80	0.76	0.62	0.77	0.78
RMSE	2.23	3.24	1.73	1.68	1.49	1.34	1.71	1.14		4.48	3.41	1.63	2.43	1.66	1.50
BCRMSE	1.03	1.52	1.35	1.43	1.49	1.33	1.24	1.00		0.92	1.22	1.30	1.78	1.45	1.44
SB	0.08	0.04	0.23	0.22	0.99	0.91	0.10	0.34		0.01	0.02	0.16	0.16	0.43	0.75
SR	0.92	0.79	0.82	0.60	0.73	0.79	0.00	0.84		0.84	0.77	0.76	0.55	0.77	0.88
STOT	0.50	0.42	0.53	0.41	0.86	0.85	0.05	0.59		0.42	0.39	0.46	0.35	0.60	0.82
RMSE (DD)				43.60	72.93	67.38							31.80	31.89	42.74
SDD				0.71	0.34	0.40							0.86	0.86	0.72

10 Berechnungsergebnisse und Auswertung: Transportmodellierung

10.1 Methodik

10.1.1 Umwandlung ins SRM-Format

Zunächst wurden die Ausgabedateien von FLEXPART in das SRM-Format (Quell-Rezeptor-Beziehungen) der CTBTO konvertiert. Dies dient einerseits dazu, diese mit denselben Programmen weiter verarbeiten zu können (insbesondere mit WEBGRAPE¹), andererseits ist diese Format auch für die Verknüpfung mit Emissionsdaten zwecks Erzeugung einer modellierten Konzentrationszeitreihe (siehe Kapitel 11) vorteilhaft. FLEXPART schreibt nämlich die Daten entsprechend dem Rechengang laufend heraus. Es wird dabei für jeden „Quell-Tag“ (d.h. Tag auf die potentiellen Quellen bezogen) ein File angelegt. Die verschiedenen Rezeptortermine sind darin als verschiedene Pseudospezies enthalten. In der Praxis ist man aber mehr daran interessiert, wo die Luft hergekommen ist, die zu einem bestimmten Rezeptor-Zeitintervall beobachtet wurde. Die SRM-Dateien sind daher jeweils auf ein solches Rezeptor-Zeitintervall bezogen.

Das Konvertierprogramm FLEXPART_to_SRM des IDC wurde umgeschrieben, so dass nicht nur ganztägige, sondern auch kürzere Rezeptorintervalle bearbeitet werden können, und dass bei FLEXPART-Rechnungen mit höherer Auflösung auch SRM-Files mit den (gröberen) IDC-Spezifikationen (1°, 06-06 UTC Rezeptorzeit) erzeugt werden können. Außerdem wurde das Programm so modifiziert, dass der Verbrauch an Memory für die Auswertung längerer Episoden mit größeren Gittern nicht zu sehr ansteigt.

Diese Daten wurden an den Auftraggeber übergeben und sind auf Anfrage bei den Autoren erhältlich.

10.1.2 Auswertung in Bezug auf einzelne potentielle Quellen

Es wurde ein Programm erstellt, mit dem Zeitreihen (bezogen auf das Rezeptordatum) der Quell-Rezeptor-Beziehungen zwischen dem Schauinsland und allen europäischen Kernkraftwerks- bzw. WAA-Standorten sowie der Isotopenfabrik in Fleurus (Belgien) aus den SRM-Feldern berechnet werden können. Die Ergebnisse der Anwendung auf Fleurus finden sich in Abschnitt 10.4.

¹WEBGRAPE ist eine Visualisierungssoftware des CTBTO/IDC, welche für die Nationale Datenzentren der CTBTO frei erhältlich ist.

10.2 FLEXPART-Ergebnisse an ausgewählten Tagen jeder Episode

Zur grafischen Veranschaulichung wurde in jeder Episode ein Rezeptortag ausgewählt, für den die Quell-Rezeptor-Felder, berechnet mit den verschiedenen Modellen, bildlich gezeigt werden. Dabei wurde soweit vorhanden der Tag mit dem radiologischen Ereignis, bzw. dem Ereignis mit der höchsten Konzentration, gewählt. Bei Episode 3, mit zwei Ereignissen, bezüglich derer die Frage gestellt war, ob diese dieselbe Quelle haben, wurden zwei Tage dargestellt. Es wird jeweils über ein Rezeptorzeitintervall von 24 h integriert, mit "collection stop" um 06 UTC, entsprechend dem Xenon-Messprogramm am Schauinsland. Auf der Quellseite wurde bis zum Start der Rechnungen der jeweiligen Episode zurück integriert. Daher kann diese Integrationszeit je nach Länge der Episode und Lage des Tages in derselben unterschiedlich sein.

Für jeden Tag wird das grobe und das feine Auswertegitter von FLEXPART gezeigt (Abb. 10.1–10.12, linke und mittlere Spalte), wobei die rechte Spalte noch eine Ausschnittsvergrößerung des feinen Auswertegitters für den Bereich Schwarzwald–Belgien enthält, damit die Unterschiede in der näheren Umgebung besser ablesbar werden. In den Zeilen werden alle unserer fünf FLEXPART-Läufe gezeigt: auf der Basis der MM5-Rechnung unter Verwendung aller MM5-Neststufen für Freiburg (FRB-0) und für Schauinsland (SIM-0), auf der Basis von ECMWF-Daten zunächst mit bodennahe Freisetzung der Rechenpartikel (SIL-0), dann mit der Freisetzung in mittlerer Höhe (SIL-1) und schließlich mit Freisetzung in der wahren Höhe über NN (SIL-2). Bei Basis ECMWF-Daten würden sich Rechnungen für Freiburg nur ganz minimal von jenen für den Schauinsland unterscheiden, daher wurden nur Schauinsland-Rechnungen gemacht. Der Standort Fleurus ist besonders hervorgehoben. Da die FLEXPART-MM5-Läufe mit einer geringeren vertikalen Schichtdicke für die Partikelanzählung erfolgten (um Stabilitätseinflüsse vor allem im Nahbereich besser zu erfassen), sind hier statistische Fluktuationen der Konzentration stärker.

Eine vollständige Darstellung aller Simulationsergebnisse auf Papier übersteigt den sinnvollen Rahmen eines Berichts, vor allem wenn neben integralen auch differentielle Quell-Rezeptor-Beziehungen betrachtet werden sollen. Bei Interesse sollten die numerischen Felder mit einer geeigneten Software wie zum Beispiel WEBGRAPE betrachtet werden.

Die aus den HYSPLIT-Trajektorien abgeleiteten Quell-Rezeptor-Felder sind separat in Abb. 10.13 dargestellt.

Es sei darauf hingewiesen, dass die spezifischen Ergebnisse für Fleurus auf einer SRM-Auflösung von 1° beruhen, um die Vergleichbarkeit mit den CTBTO-Ergebnissen sicherzustellen, jedoch die im folgenden diskutierten SRM-Plots auf der vollen Auflösung ($0,5^\circ$ bzw. 8 km) beruhen. Da die Gradienten in den SRM-Feldern oft hoch sind (schmale Streifen als Einzugsgebiete), können die Beträge des SRM-Feldes an einem Punkt wie Fleurus von der Auflösung deutlich beeinflusst werden. Daher kann es auch zu scheinbaren Widersprüchen zwischen den Fleurus-Ergebnissen (siehe Abschnitt 10.4) und den hier folgenden Ergebnissen kommen, wobei offenbar

die HYSPLIT-Trajektorienauswertungen weniger empfindlich gegenüber der Auflösung sind als die FLEXPART-Ergebnisse.

Episode 1, Westlage Juni 2004:

Abb. 10.1. Das Einzugsgebiet der Luftmassen verläuft in allen Simulationen quer durch Frankreich, mit einer bei ECMWF relativ schmalen Spur. Daher kann man davon ausgehen, dass dort auch das radiologische Ereignis stattgefunden hat (zumindest wenn es nicht aus der näheren Umgebung stammt). Die MM5-Rechnungen schließen das ECMWF-Einzugsgebiet ein, jedoch ist ihr Kern etwas stärker aufgeweitet und weist dafür geringere Intensität auf. Diese Rechnungen zeigen auch einen sehr schwachen Einfluss aus Oberitalien. Die Unterschiede Freiburg – Schauenland sind minimal.

Episode 2, Westlage Dezember 2004:

Abb. 10.2. In diesem Fall kommt die Spur zunächst aus Südwest und biegt dann auf West um. Das feine Ausgabegitter zeigt ein sekundäres Maximum in der Gegend nahe Lyon, und auch leichte Unterschiede zwischen den Freisetzungshöhen der Rechenpartikel. ECMWF- und MM5-basierte Rechnungen haben recht ähnliche Umrisse. Dramatisch ist aber der Unterschied zwischen der MM5-Rechnung für Schauenland und allen anderen Rechnungen: erstere zeigt einen um vieles schwächeren Einfluss. Dies ist auf die hohe Windgeschwindigkeit am Schauenland zurückzuführen, die in Freiburg nicht auftritt und auch in den ECMWF-Daten nicht vorhanden ist.

Episode 3, Nordwest- bis Nordostlage, November 2004:

Abb. 10.3. Der erste ausgewählte Tag hat eine sehr prononcierte Spur, welche über Cattenom und Fleurus führt, aber auch andere Regionen Ostfrankreichs, Belgiens und Großbritanniens als mögliche Quellregion erscheinen lässt. An diesem Tag sind sich die verschiedenen Simulationsergebnisse alle sehr ähnlich, was auf die zügige Nordwestströmung mit wenig Variation und hohen Windgeschwindigkeiten sowie guter vertikaler Durchmischung zurückzuführen ist. Fleurus liegt bei allen Rechnungen im Bereich des stärksten Einflusses, obwohl diese Spur sehr schmal ist. Die MM5-basierte Rechnung gibt ein komplexer strukturiertes Einflussgebiet, das aber ebenfalls Fleurus und Cattenom enthält. Auffällig ist, dass die ECMWF-basierten Simulationen ein zweites Maximum südlich der Hauptspur in Frankreich zeigen, das in den MM5-basierten Rechnungen nicht vorhanden ist. Diese zeigen eine gewisse Kanalisierung im Rheingraben.

Der zweite ausgewählte Tag (Abb. 10.4) dieser längeren Episode mit nördlicher Anströmung zeigt ein großes Gebiet als mögliche Quelle. Neben dem größten Teil Deutschlands und Teilen Polens gehören Teile des Benelux und Ostfrankreich dazu, mit geringerer Einflusstärke auch Südschweden. Hier zeigt die MM5-basierte Rechnung ein grob mit der ECMWF-basierten Rechnung übereinstimmendes Gebiet, im Detail und vor allem für den Bereich mit den stärksten Einflüssen jedoch erhebliche Unterschiede. Der Einfluss von Fleurus erscheint hier als wesentlich stärker. Während nach

der ECMWF-basierten Rechnung Fleurus als Quelle mehr oder weniger ausscheidet, wäre nach der MM5-Rechnung die dortige Isotopenfabrik auch für das zweite Xenon-Maximum eine mögliche Quelle, mit ähnlicher Einflusstärke wie im ersten Maximum. Außerdem lassen die MM5-basierten Rechnungen einen schwachen Einfluss aus dem Rhonetal, Italien und dem Balkan zu, den es nach ECMWF nur bei der Rechnung SIL-2 und dann in kleinerem Ausmaß gibt.

Episode 4, Nordwest- bis Nordostlage, Februar 2005

Abb. 10.5. Der gewählte Tag zeigt eine relativ klare Nordwestlage, bei der KKW's in den Niederlanden und Belgien sowie Fessenheim und eventuell weitere französische Standorte und die Isotopenfabrik Fleurus (Belgien) als Verursacher in Frage kommen. Fessenheim hat deutlich den stärksten potentiellen Einfluss, und zwar in allen Modellvarianten. Die grobe Richtung stimmt zwischen ECMWF- und MM5-basierten Rechnungen überein, aber letztere hat eine deutliche Ausbuchtung des Einzugsgebietes nach Südwesten und mehr Detailstrukturen. In den MM5-basierten Rechnungen zeigen sich sehr interessante orographische Phänomene: Für Freiburg ist eine deutliche Kanalisierung im Rheingraben vorhanden, wobei der Hauptstrom der Luft offenbar via Basel und durch die Burgundische Pforte zwischen Jura und Vogesen aus Frankreich gekommen ist. Das Einflussgebiet des Schauinsland hat einerseits auch diese Bahn, andererseits überquert es von Nordwesten her Vogesen und Rheingraben. Wie bei vielen anderen Nordwestlagen ist ein deutlicher Höhengradient mit der Rezeptorhöhe festzustellen: schwächster Einfluss bei SIL-2, stärkster bei SIL-0. Dies liegt nicht nur an der notwendigen Durchmischung, sondern eher an der mit der Höhe zunehmenden Windgeschwindigkeit.

Episode 5, Sommerliche Hochdrucklage Juni 2005

Abb. 10.6. Dem Charakter einer Hochdrucklage entsprechend ist das Einflussgebiet eher großflächig, wobei die höchsten Werte aber auf die nähere Umgebung konzentriert sind. Die MM5-Rechnung zeigt den Einfluss des Rheingraben bei Freiburg, der aber auch am Schauinsland noch sichtbar ist, da vermutlich die in Freiburg ankommende Luft durch die Talwinde und die Labilität auch auf den Schauinsland gelangen. In den ECMWF-basierten Rechnungen fehlt im oberen Rezeptorniveau der Nordost-Ast. Neben deutschen KKW's kommen auch Anlagen in anderen Ländern, vor allem Belgien und Frankreich, als Verursacher des radiologischen Ereignisses in Frage.

Episode 6, sommerliche Hochdrucklage, August 2005:

Abb. 10.7. Dieses Ereignis hat ein scharf abgegrenztes Einzugsgebiet im Nordwesten, wobei neben dem nahe gelegenen Fessenheim insbesondere Fleurus und Cattenom als mögliche Quellen in Frage kommen. Der potentielle Einfluss von Fleurus ist nach den ECMWF-basierten Simulationen stärker als in den MM5-basierten.

Episode 7, Südwestlage, September 2004:

Abb. 10.8. Diese Episode als Ganzes wurde zwar als Südwestlage eingestuft, jedoch fällt der letzte und radiologisch interessante Tag bereits kurz nach einen Frontdurchgang und war durch nordöstliche Winde gekennzeichnet. Dementsprechend dominiert Süddeutschland einschließlich Bayern als mögliches Herkunftsgebiet, Belgien (Fleurus) ist aber auch noch enthalten. Interessanterweise ist der Einfluss von Bayern bei größerer Freisetzungshöhe stärker, nicht jedoch der von entfernteren Regionen wie Belgien. Bei stärkerer Strukturierung sind die MM5-Rechnungen sehr ähnlich wie die mit ECMWF-Daten, mit dem möglicherweise bedeutsamen Unterschied, dass nach MM5-FLEXPART auch Fessenheim als Quelle in Frage kommt.

Episode 8, Südwestlage, Februar 2004:

Abb. 10.9. Diese Wetterlage war rein aus meteorologischen Gründen ausgewählt worden. Die Spur der Luftmassen führt relativ eng gebündelt über Frankreich, lediglich schwache Einflusszonen überdecken einen breiteren Kegel. Bei grösserer Freisetzungshöhen nimmt der Einfluss deutlich ab, das Gebiet ändert sich wenig. Sehr bemerkenswert ist der Unterschied zwischen Freiburg und Schauinsland in der MM5-basierten Rechnung. Aufgrund der hohen Windgeschwindigkeiten ist die Intensität für Schauinsland generell geringer und der Nahbereich trägt praktisch nichts bei, ganz im Unterschied zu Freiburg. Ähnlich den anderen Südwestlagen (siehe etwa Episode 4) kommt die Luft wieder durch die Burgundische Pforte bei Basel nach Freiburg. Obgleich SIL-2 einen gegenüber SIL-0 und SIL-1 deutlich abgeschwächten Einfluss zeigt, ist dieser noch immer deutlich höher als nach der MM5-basierten Rechnung.

Episode 9, winterliche Hochdrucklage, Dezember 2004:

Abb. 10.10. Diese aus meteorologischer Sicht besonders interessante Inversionslage zeigt in der ECMWF-basierten Modellierung ein kleines und sehr intensives Einflussgebiet vor allem südlich des Schauinsland. Der stabilen Luftschichtung entsprechend, schwächt sich der Einfluss für die höhere Freisetzungshöhe um mehr als eine Größenordnung ab.

Während nach der ECMWF-basierten Modellierung die Luft unrealistischer Weise direkt von Süden über die Alpen herangeführt wird, zeigt die MM5-Modellierung, dass für Freiburg das primäre Einzugsgebiet auf die tief liegenden Regionen nördlich der Alpen, insbesondere Rheingraben und Bodenseeraum, daneben das Schweizer Mittelland und Südostfrankreich, konzentriert ist. Bei genauerer Betrachtung des Nest-Outputs kann man erkennen, dass für Freiburg der Einfluss des Rheingrabens wesentlich stärker ist als für den Schauinsland. Am Schauinsland erstreckt sich das Maximum des Einzugsgebiets direkt nach Süden über die Hochlagen des Schwarzwalds. All dies sind klare Effekte der Inversionslage. Eine gewisse Unschärfe im Detail ergibt sich aus der Auflösung von 8 km selbst des feinen Ausgabegitters – für die genaue Untersuchung des Nahbereichs, die im Anlassfall einer radiologischen Auffälligkeit interessant wäre, sollte bei einer derartigen Situation eine noch bessere Auflösung, entsprechend

etwa den 2 km in Domain 4 des MM5, gewählt werden. Die MM5-basierten Rechnungen zeigen zusätzlich noch ein Luftmassenherkunftsgebiet entlang der Donau bis nach Österreich hinein (naturgemäß stärker für die unterhalb der Inversion gelegene Station Freiburg), das in den ECMWF-basierten Rechnungen nicht existiert. Sowohl ECMWF- als auch MM5-basierte Rechnungen ergeben auch noch einen schwachen Einfluss aus Norditalien und dem Balkan, allerdings mit dem Unterschied, dass nach dem MM5 die Luft durch das Rhonetal herangeführt wird, anstatt wenig realistisch direkt über die Alpen. Bei den ECMWF-basierten Rechnungen mit höher liegenden Rezeptor (SIL-1 und SIL-2) wird offenbar der Boden durch die Inversionslage effektiv abgeschirmt, hier sind außer auf den höchsten Regionen der Alpen nur minimale Einflussstärken gegeben.

Episode 10, Winterliches Zwischenhoch, Februar 2004:

Abb. 10.11. Das Herkunftsgebiet liegt im Südwesten, der Einfluss nimmt mit der Entfernung rasch ab und ist auch vor allem in der Nähe deutlich höhenabhängig (stärkere Einflüsse bei bodennaher Freisetzung). In der MM5-basierten Simulation erkennen wir einen Einfluss der Alpen und des Jura, welche von der Luft umströmt werden. Wie bei anderen Südwestlagen ist ein massiver Unterschied der Intensität Freiburg – Schauinsland zu beobachten, zurückzuführen auf die orographisch stark erhöhten Windgeschwindigkeiten im Bereich der Höhenlagen des Südschwarzwalds, und auch hier gleicht SIL-2 diesen Effekt bei weitem nicht aus.

Episode 11, Nordostlage, Oktober 2005:

Abb. 10.12. Dieser Tag hat zufolge von Winddrehung ein weit gespanntes Einzugsgebiet von Deutschland bis Nordfrankreich. Es zeigen sich mäßige Unterschiede je nach Freisetzungshöhe. Das MM5-basierte Bild ist komplexer und im Detail deutlich vom ECMWF-basierten verschieden, auch wenn sich die Umriss der Einzugsgebiete im Norden recht gut decken. Im Süden zeigt wieder MM5 einen schwachen Transport rund um die Alpen und durch das Rhonetal. Der Westast ist schwächer ausgeprägt. Man kann auch einen etwas stärkeren Einfluss des Rheingrabens für Freiburg gegenüber Schauinsland ausmachen. Der Einfluss der Burgundischen Pforte bei Basel ist in den MM5-basierten Simulationen gut auszumachen und ähnlich für Freiburg und Schauinsland, von den sonst oft zu findenden großen Unterschieden bei Südwestwind ist in diesem Fall nichts zu bemerken. Dies liegt daran, dass am Vormittag des 2.10., vor dem Frontdurchgang, die Windstärke auch auf den Bergen schwach waren und die Schichtung in etwa adiabatisch, so dass die Luft auch leicht vom Rheingraben auf die Höhe des Schauinsland gehoben werden konnte.

10.3 HYSPLIT

Beim Betrachten der SRM-Felder, die aus den HSYPLIT-Trajektorien abgeleitet wurden (Abb. 10.13) sehen wir zum einen den Effekt der auf 48 Stunden begrenzten Tra-

jektoriendauer. Zum anderen ist erkennbar, dass die Trajektorien meist relativ gut mit dem Kern des SRM-Feldes der FLEXPART-Rechnungen zusammen passen, weshalb bei wenig variabler Strömung insgesamt eine bemerkenswerte Übereinstimmung der Hauptmerkmale zu finden ist. Allerdings bei komplizierten Lagen, wie etwa der Inversionslage in Episode 9 oder dem zweiten Tag der Episode 3, sind die Unterschiede dann doch erheblich. Ausserdem bringt die Art der Berechnung mit sich, dass die Felder generell glatter sind als die von FLEXPART erzeugten.

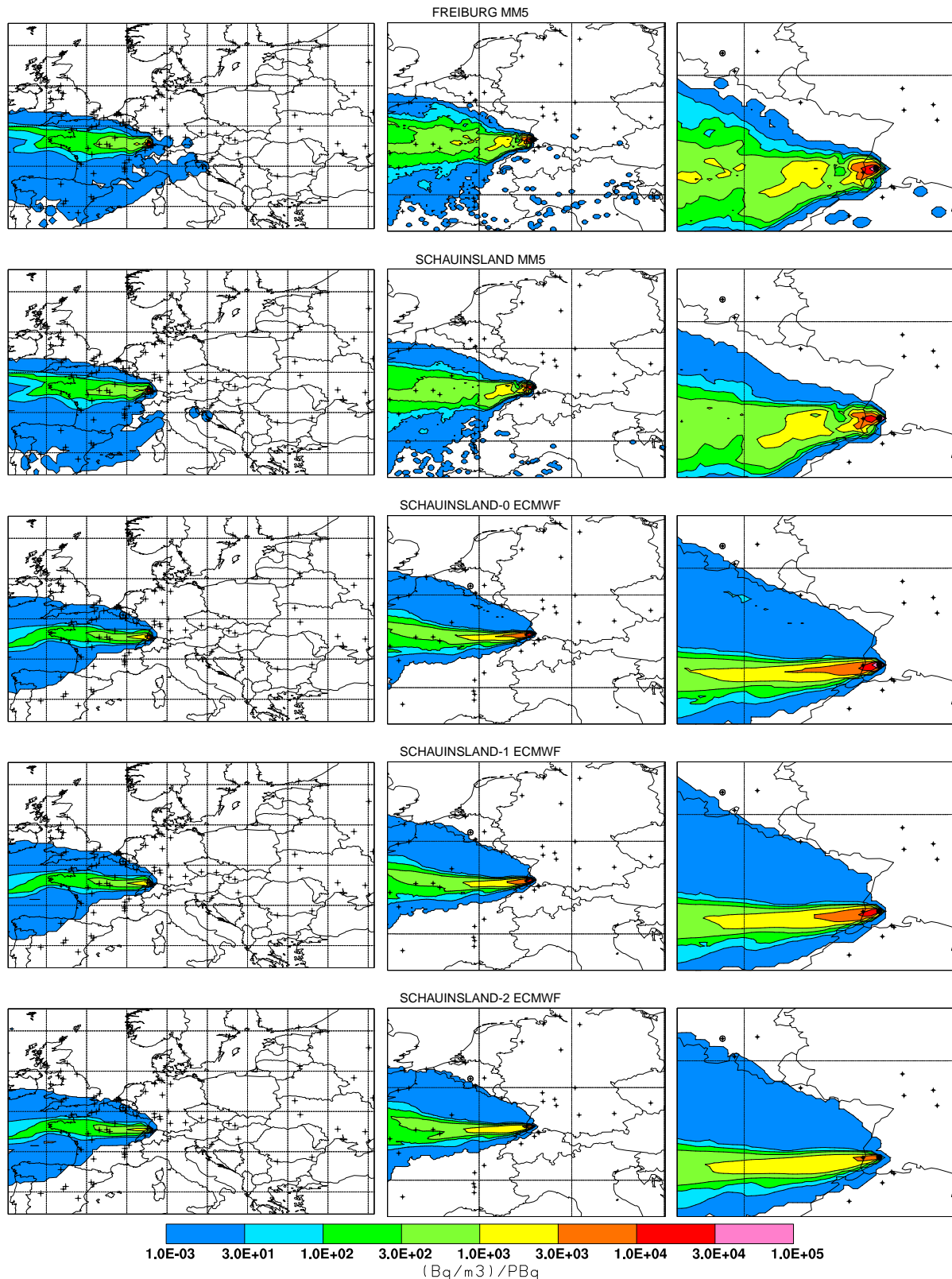


Abbildung 10.1: Integrierte Quell-Rezeptor-Felder, 24 h Messperiode endend am 20040702 06 (Episode 1). Kreuze bezeichnen Nuklearstandorte. Links 0.5° Auflösung, Mitte und rechts 7.5 km. Von oben nach unten: Freiburg, MM5; Schauinsland, MM5; Schauinsland, ECMWF, bodennah; Schauinsland, ECMWF, 915 m NN; Schauinsland, ECMWF, 1205 m NN.

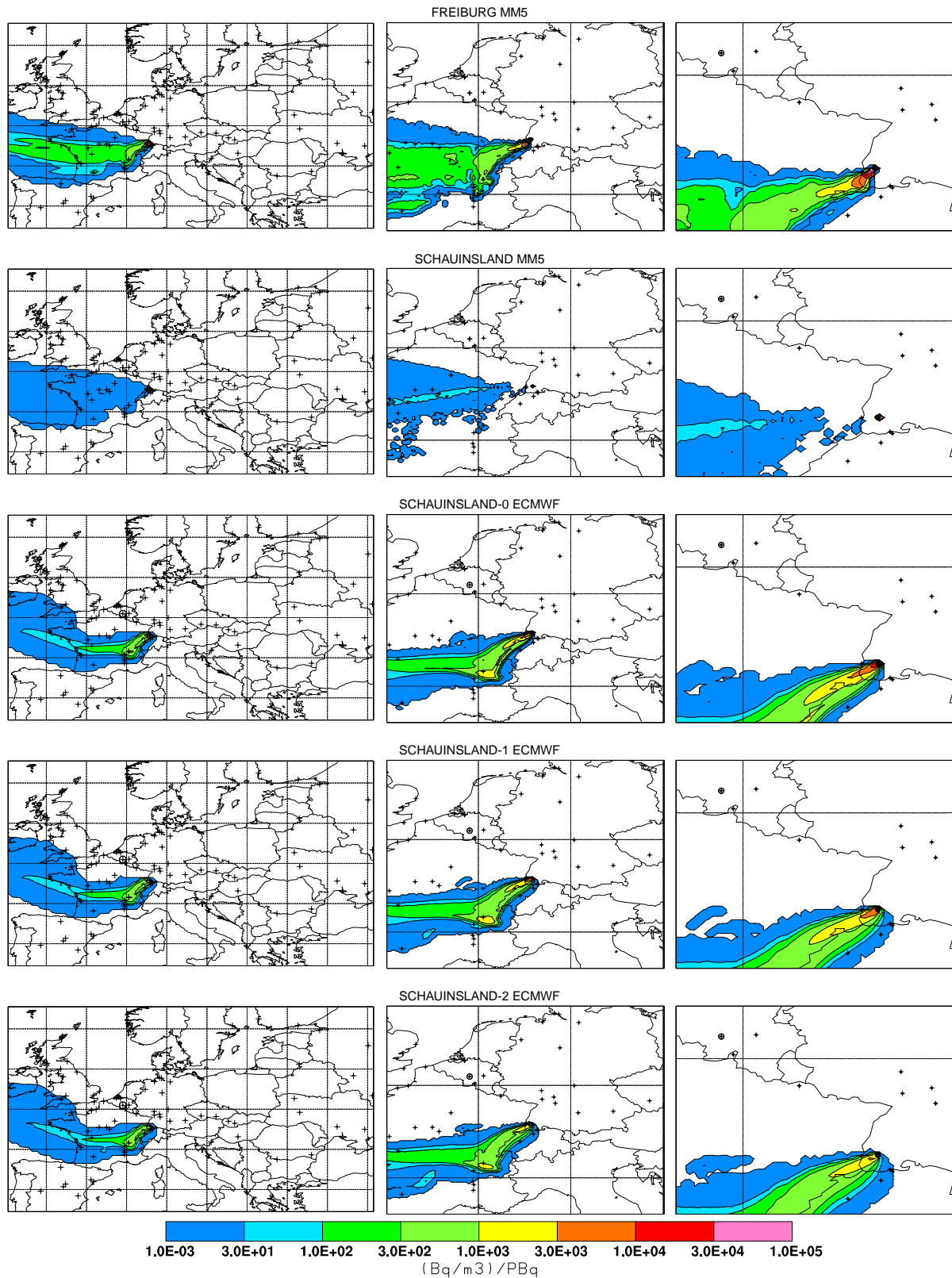


Abbildung 10.2: Integrierte Quell-Rezeptor-Felder, 24 h Messperiode endend am 20041225 06 (Episode 2). Kreuze bezeichnen Nuklearstandorte. Links 0.5° Auflösung, Mitte und rechts 7.5 km. Von oben nach unten: Freiburg, MM5; Schauinsland, MM5; Schauinsland, ECMWF, bodennah; Schauinsland, ECMWF, 915 m NN; Schauinsland, ECMWF, 1205 m NN.

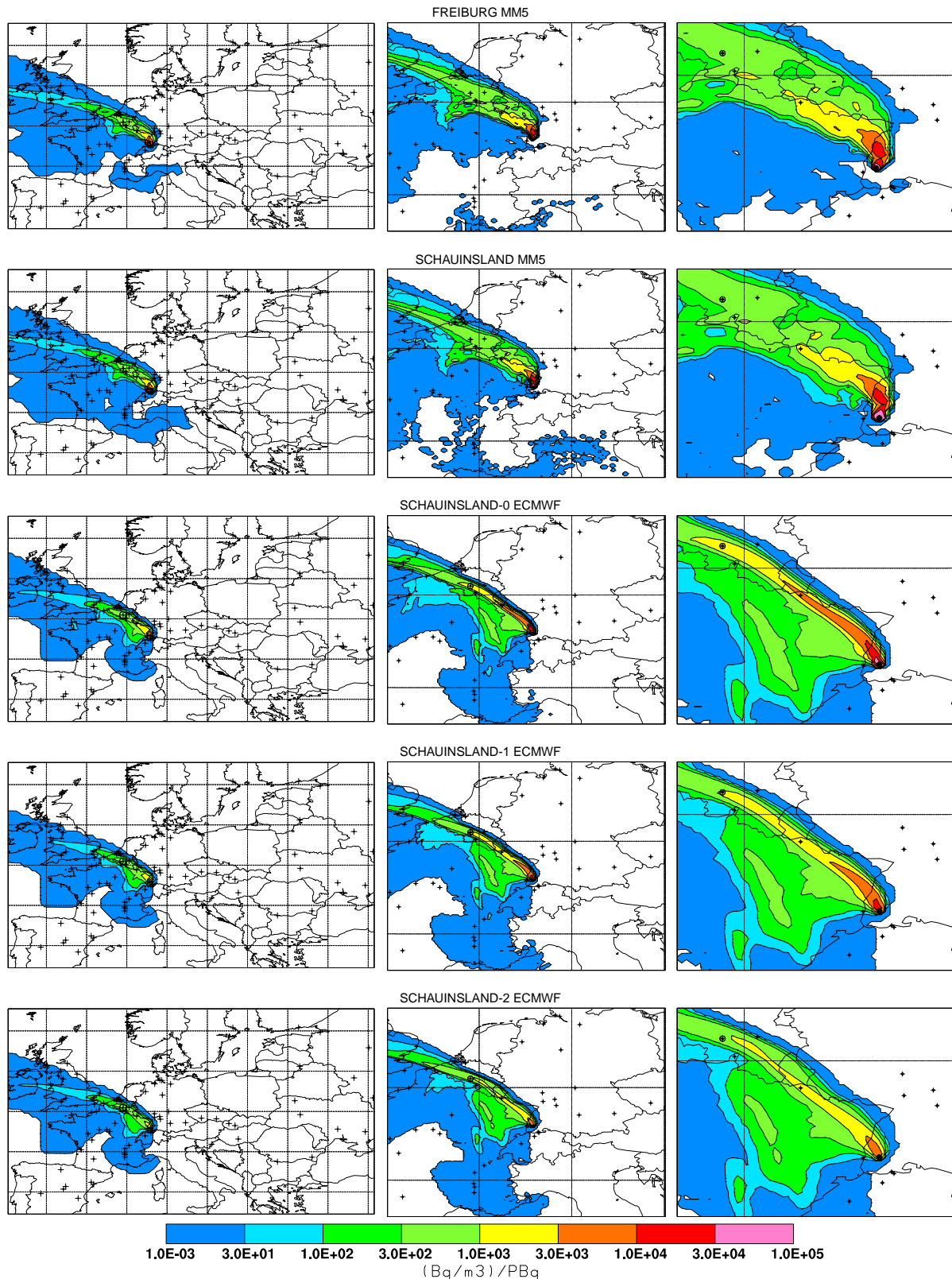


Abbildung 10.3: Integrierte Quell-Rezeptor-Felder, 24 h Messperiode endend am 20041106 06 (Episode 3, 1. Tag). Kreuze bezeichnen Nuklearstandorte. Links 0.5° Auflösung, Mitte und rechts 7.5 km . Von oben nach unten: Freiburg, MM5; Schauinsland, MM5; Schauinsland, ECMWF, bodennah; Schauinsland, ECMWF, 915 m NN ; Schauinsland, ECMWF, 1205 m NN .

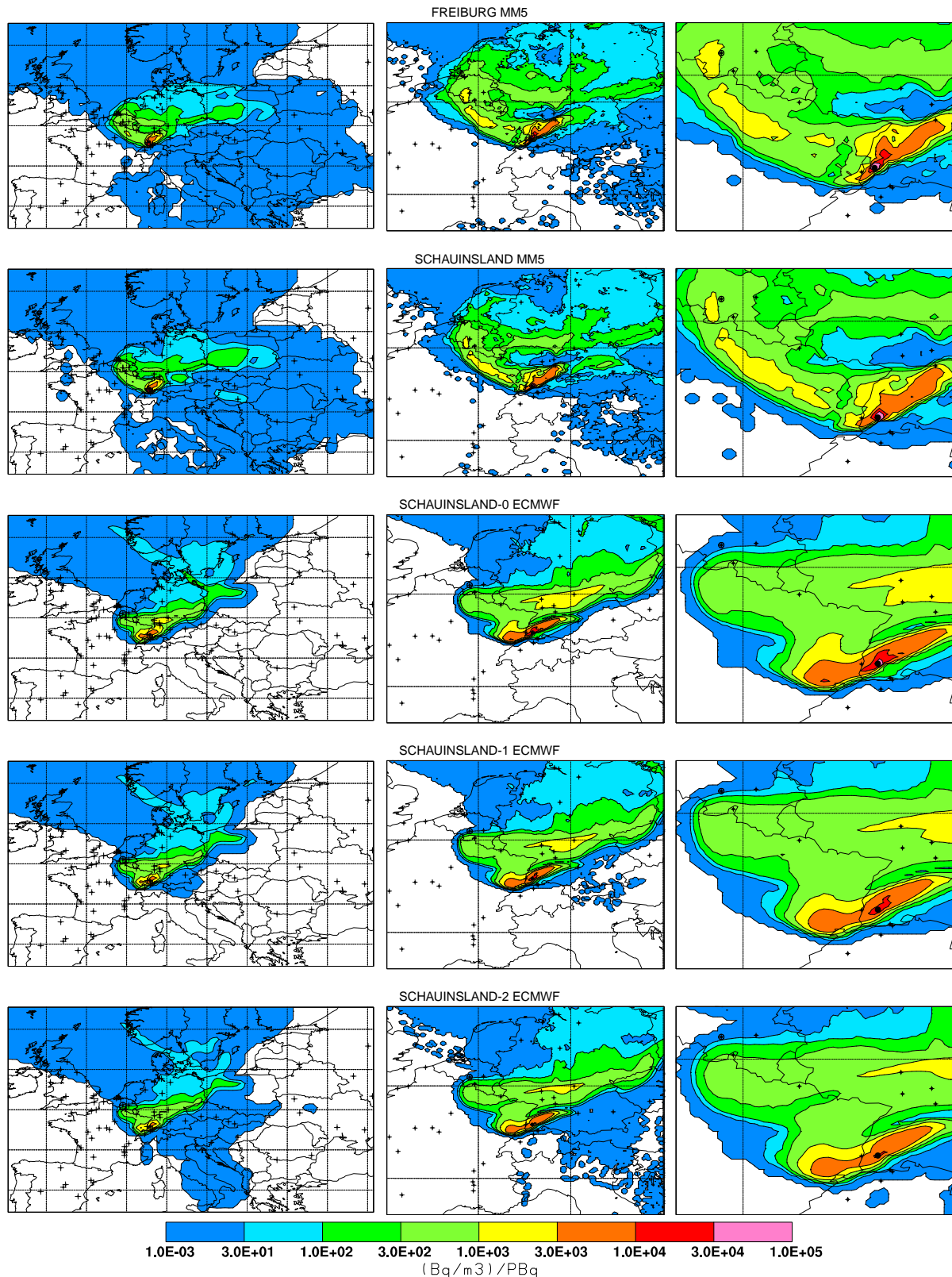


Abbildung 10.4: Integrierte Quell-Rezeptor-Felder, 24 h Messperiode endend am 20041111 06 (Episode 3, 2. Tag). Kreuze bezeichnen Nuklearstandorte. Links 0.5° Auflösung, Mitte und rechts 7.5 km. Von oben nach unten: Freiburg, MM5; Schauinsland, MM5; Schauinsland, ECMWF, bodennah; Schauinsland, ECMWF, 915 m NN; Schauinsland, ECMWF, 1205 m NN.

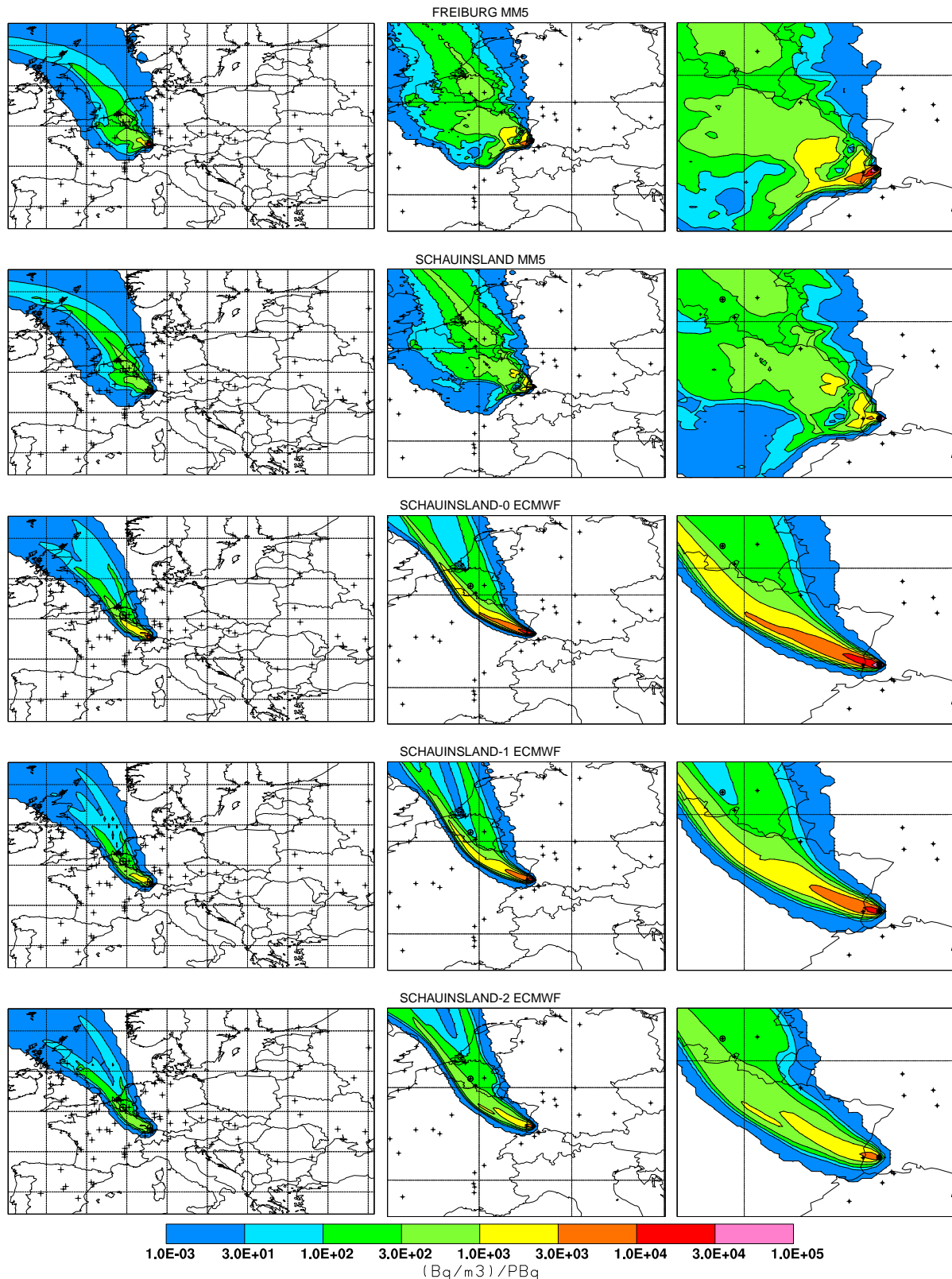


Abbildung 10.5: Integrierte Quell-Rezeptor-Felder, 24 h Messperiode endend am 20050203 06 (Episode 4). Kreuze bezeichnen Nuklearstandorte. Links 0.5° Auflösung, Mitte und rechts 7.5 km. Von oben nach unten: Freiburg, MM5; Schauinsland, MM5; Schauinsland, ECMWF, bodennah; Schauinsland, ECMWF, 915 m NN; Schauinsland, ECMWF, 1205 m NN.

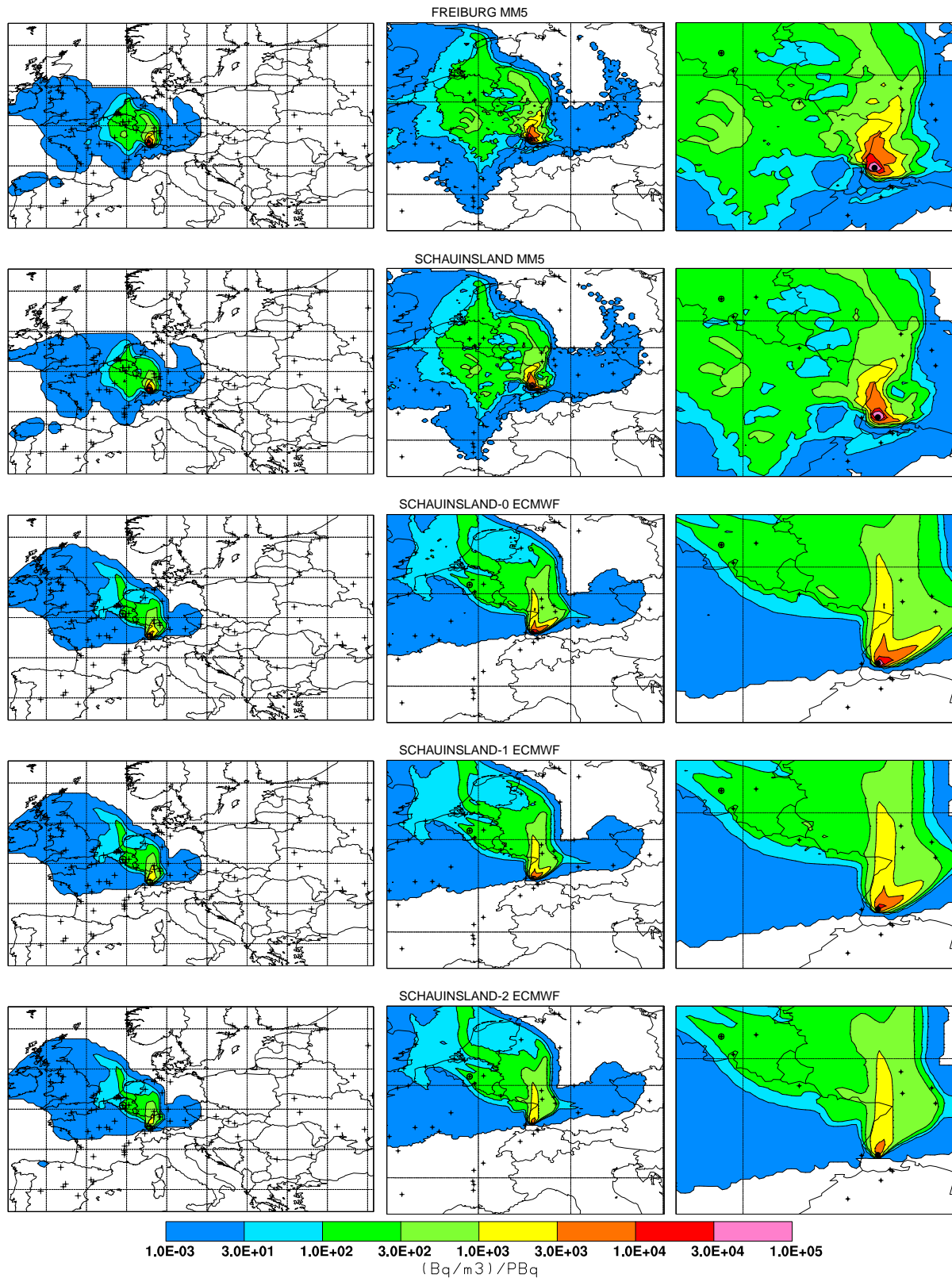


Abbildung 10.6: Integrierte Quell-Rezeptor-Felder, 24 h Messperiode endend am 20050623 06 (Episode 5). Kreuze bezeichnen Nuklearstandorte. Links 0.5° Auflösung, Mitte und rechts 7.5 km. Von oben nach unten: Freiburg, MM5; Schauinsland, MM5; Schauinsland, ECMWF, bodennah; Schauinsland, ECMWF, 915 m NN; Schauinsland, ECMWF, 1205 m NN.

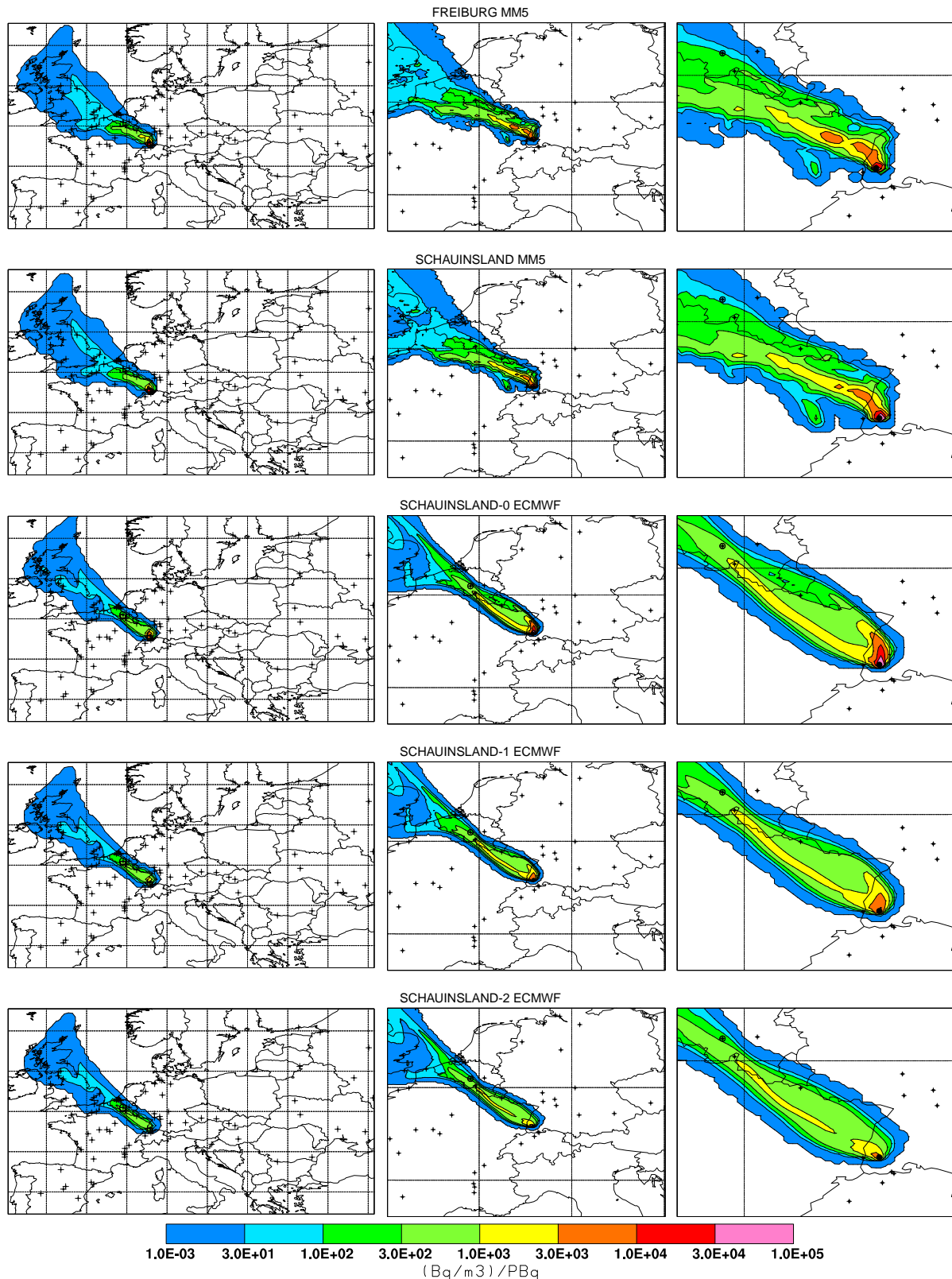


Abbildung 10.7: Integrierte Quell-Rezeptor-Felder, 24 h Messperiode endend am 20050811 06 (Episode 6). Kreuze bezeichnen Nuklearstandorte. Links 0.5° Auflösung, Mitte und rechts 7.5 km . Von oben nach unten: Freiburg, MM5; Schauinsland, MM5; Schauinsland, ECMWF, bodennah; Schauinsland, ECMWF, 915 m NN; Schauinsland, ECMWF, 1205 m NN.

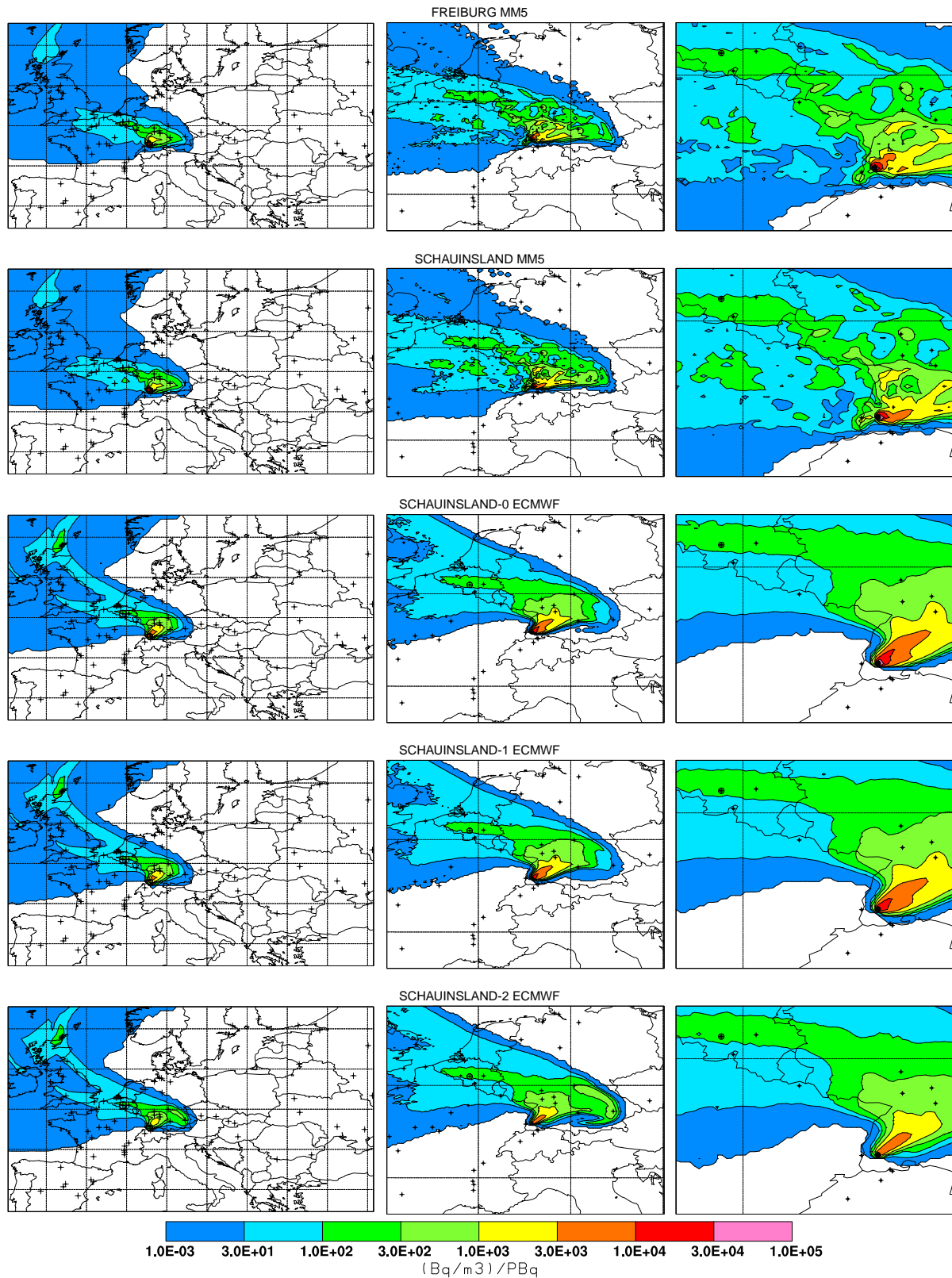


Abbildung 10.8: Integrierte Quell-Rezeptor-Felder, 24 h Messperiode endend am 20040917 06 (Episode 7). Kreuze bezeichnen Nuklearstandorte. Links 0.5° Auflösung, Mitte und rechts 7.5 km. Von oben nach unten: Freiburg, MM5; Schauinsland, MM5; Schauinsland, ECMWF, bodennah; Schauinsland, ECMWF, 915 m NN; Schauinsland, ECMWF, 1205 m NN.

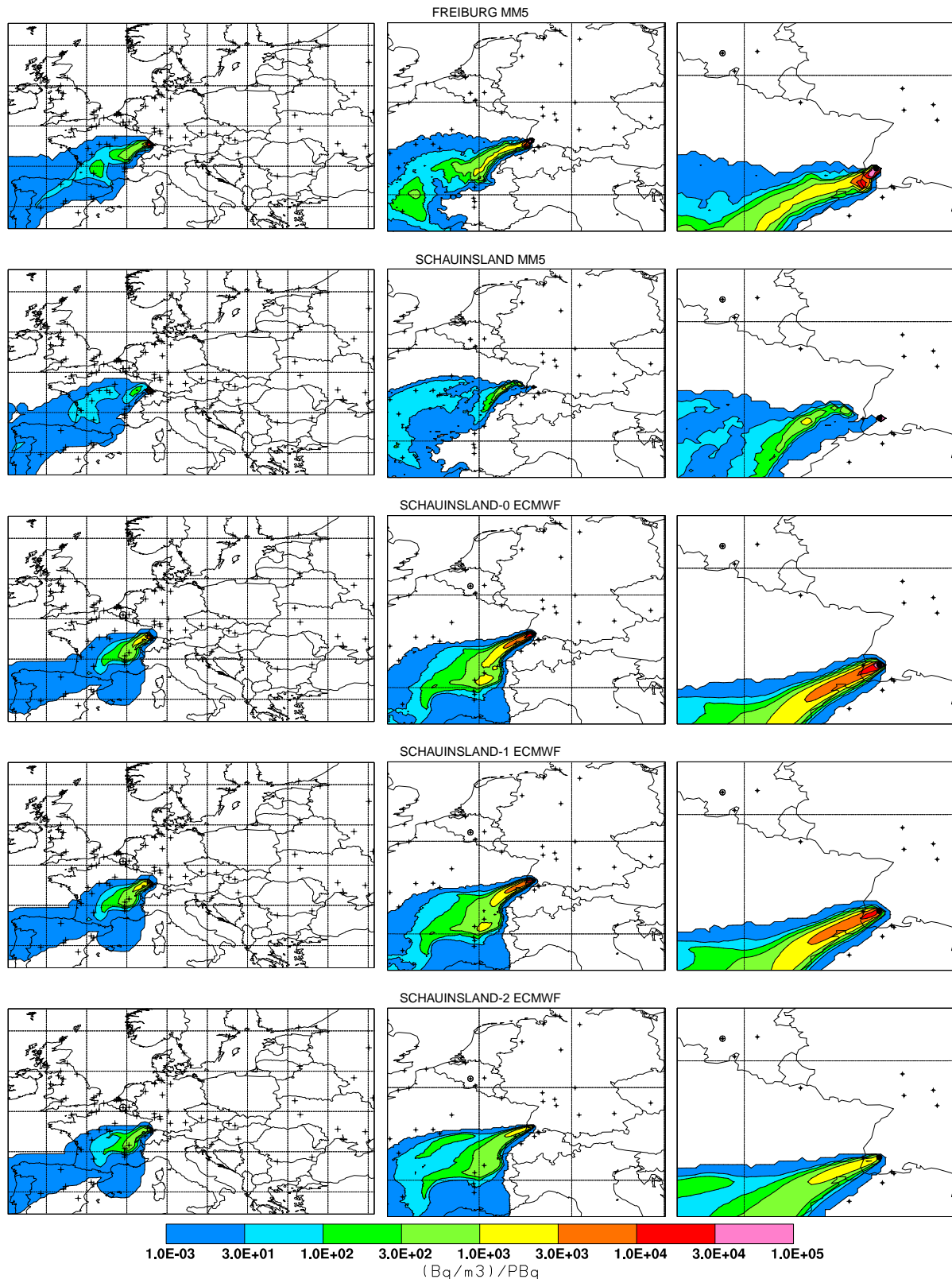


Abbildung 10.9: Integrierte Quell-Rezeptor-Felder, 24 h Messperiode endend am 20040203 06 (Episode 8). Kreuze bezeichnen Nuklearstandorte. Links 0.5° Auflösung, Mitte und rechts 7.5 km. Von oben nach unten: Freiburg, MM5; Schauinsland, MM5; Schauinsland, ECMWF, bodennah; Schauinsland, ECMWF, 915 m NN; Schauinsland, ECMWF, 1205 m NN.

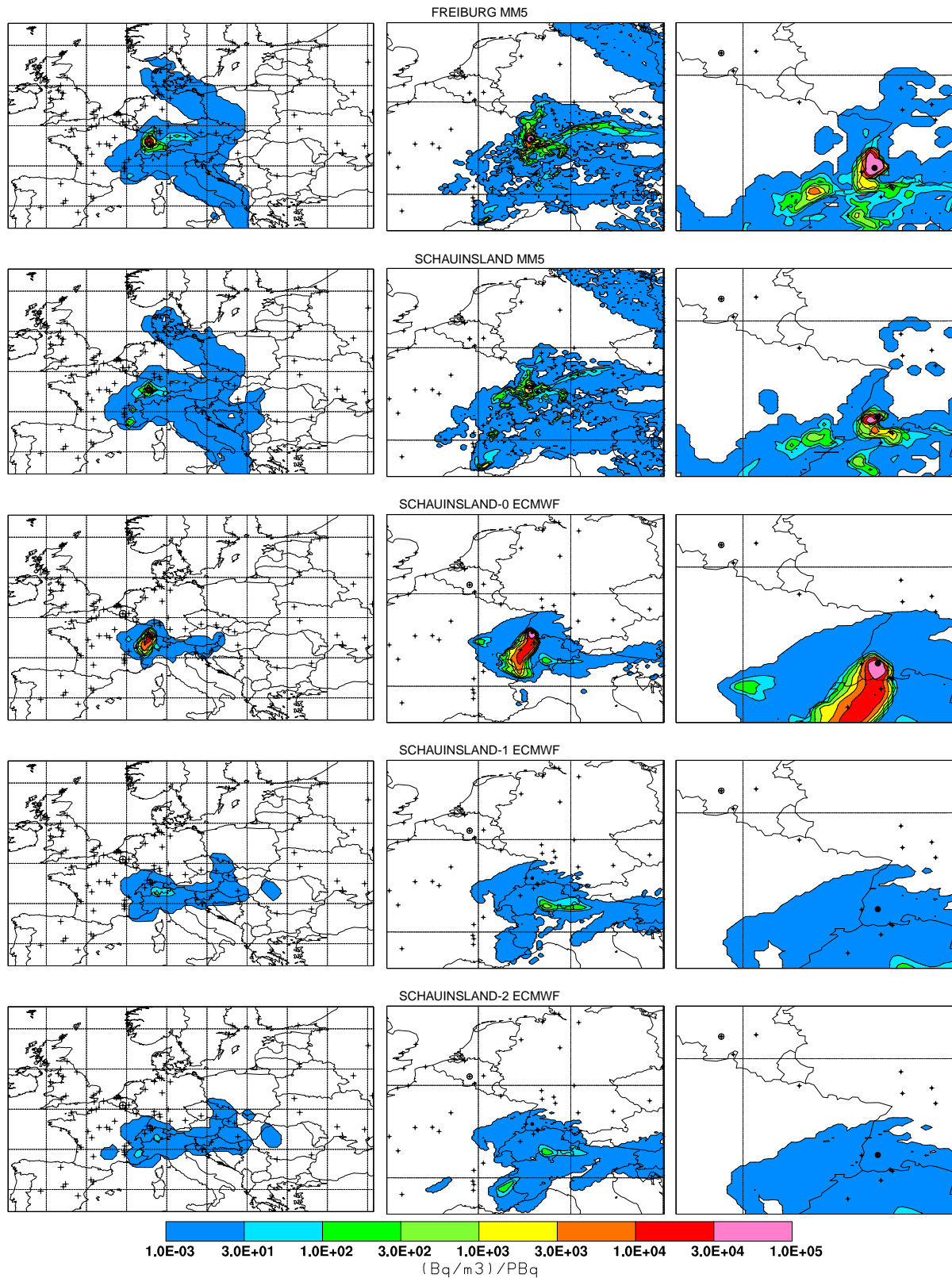


Abbildung 10.10: Integrierte Quell-Rezeptor-Felder, 24 h Messperiode endend am 20041214 06 (Episode 9). Kreuze bezeichnen Nuklearstandorte. Links 0.5° Auflösung, Mitte und rechts 7.5 km. Von oben nach unten: Freiburg, MM5; Schauinsland, MM5; Schauinsland, ECMWF, bodennah; Schauinsland, ECMWF, 915 m NN; Schauinsland, ECMWF, 1205 m NN.

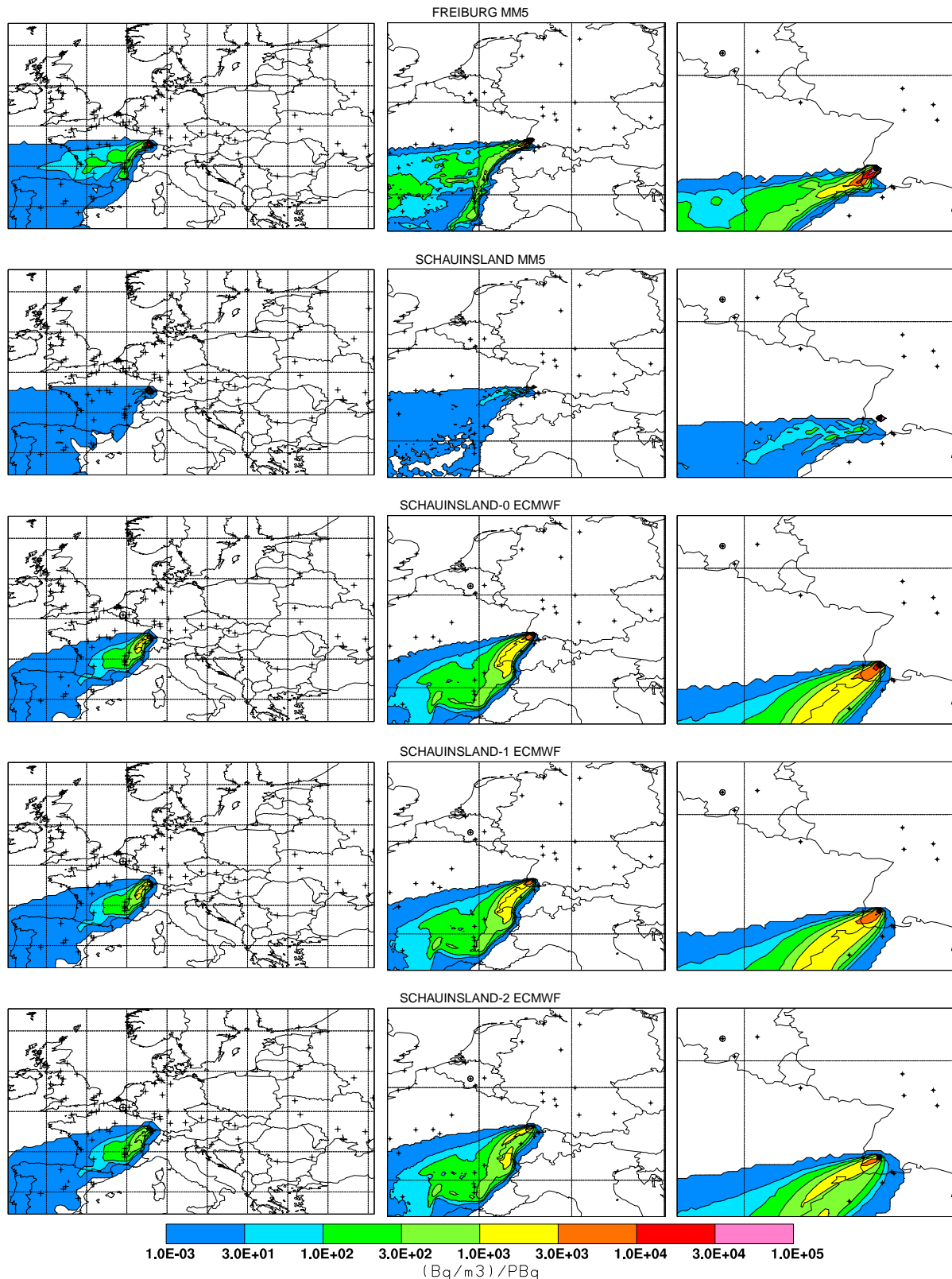


Abbildung 10.11: Integrierte Quell-Rezeptor-Felder, 24 h Messperiode endend am 20040207 06 (Episode 10). Kreuze bezeichnen Nuklearstandorte. Links 0.5° Auflösung, Mitte und rechts 7.5 km. Von oben nach unten: Freiburg, MM5; Schauinsland, MM5; Schauinsland, ECMWF, bodennah; Schauinsland, ECMWF, 915 m NN; Schauinsland, ECMWF, 1205 m NN.

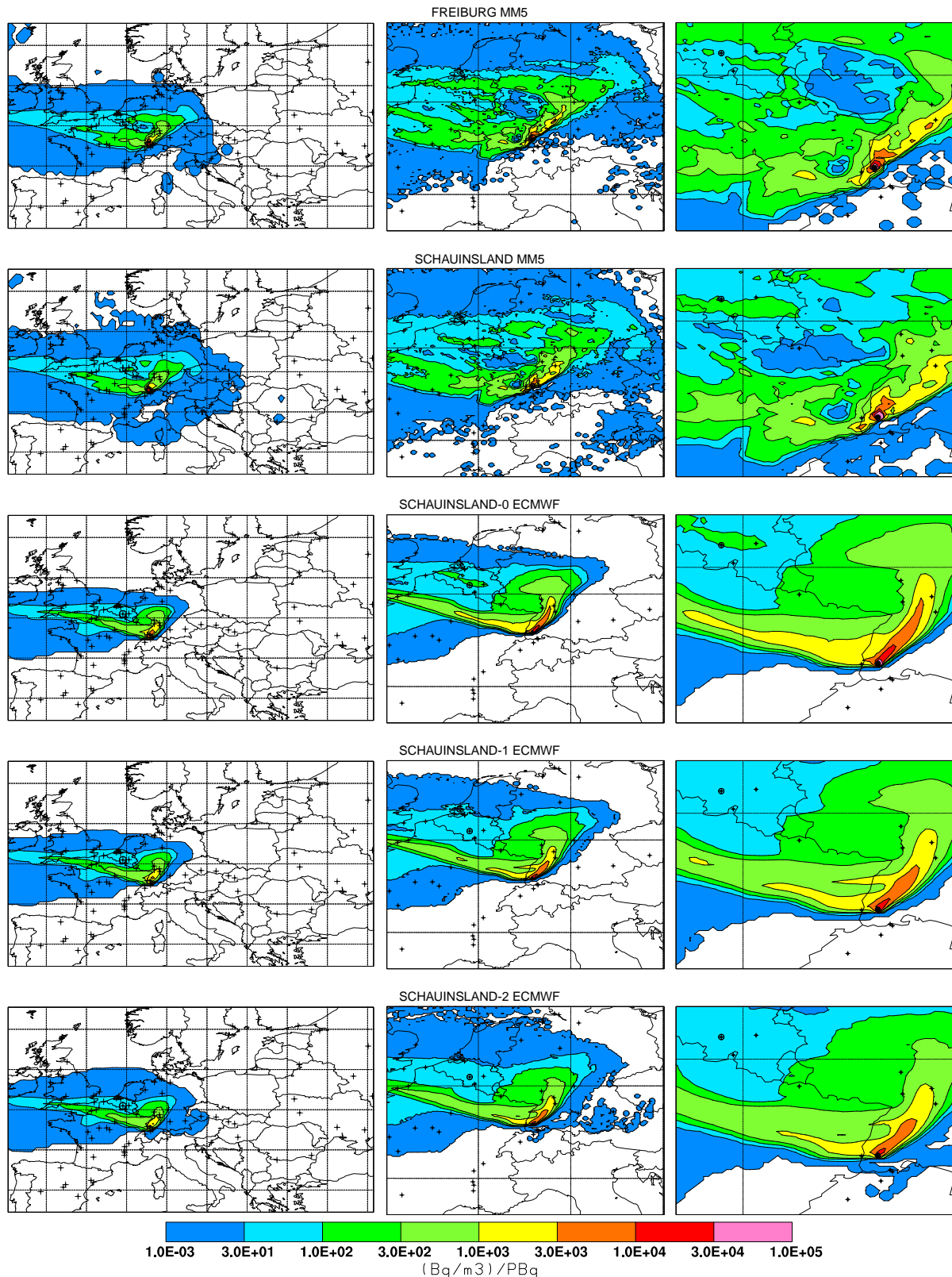


Abbildung 10.12: Integrierte Quell-Rezeptor-Felder, 24 h Messperiode endend am 20051003 06 (Episode 11). Kreuze bezeichnen Nuklearstandorte. Links 0.5° Auflösung, Mitte und rechts 7.5 km. Von oben nach unten: Freiburg, MM5; Schauinsland, MM5; Schauinsland, ECMWF, bodennah; Schauinsland, ECMWF, 915 m NN; Schauinsland, ECMWF, 1205 m NN.

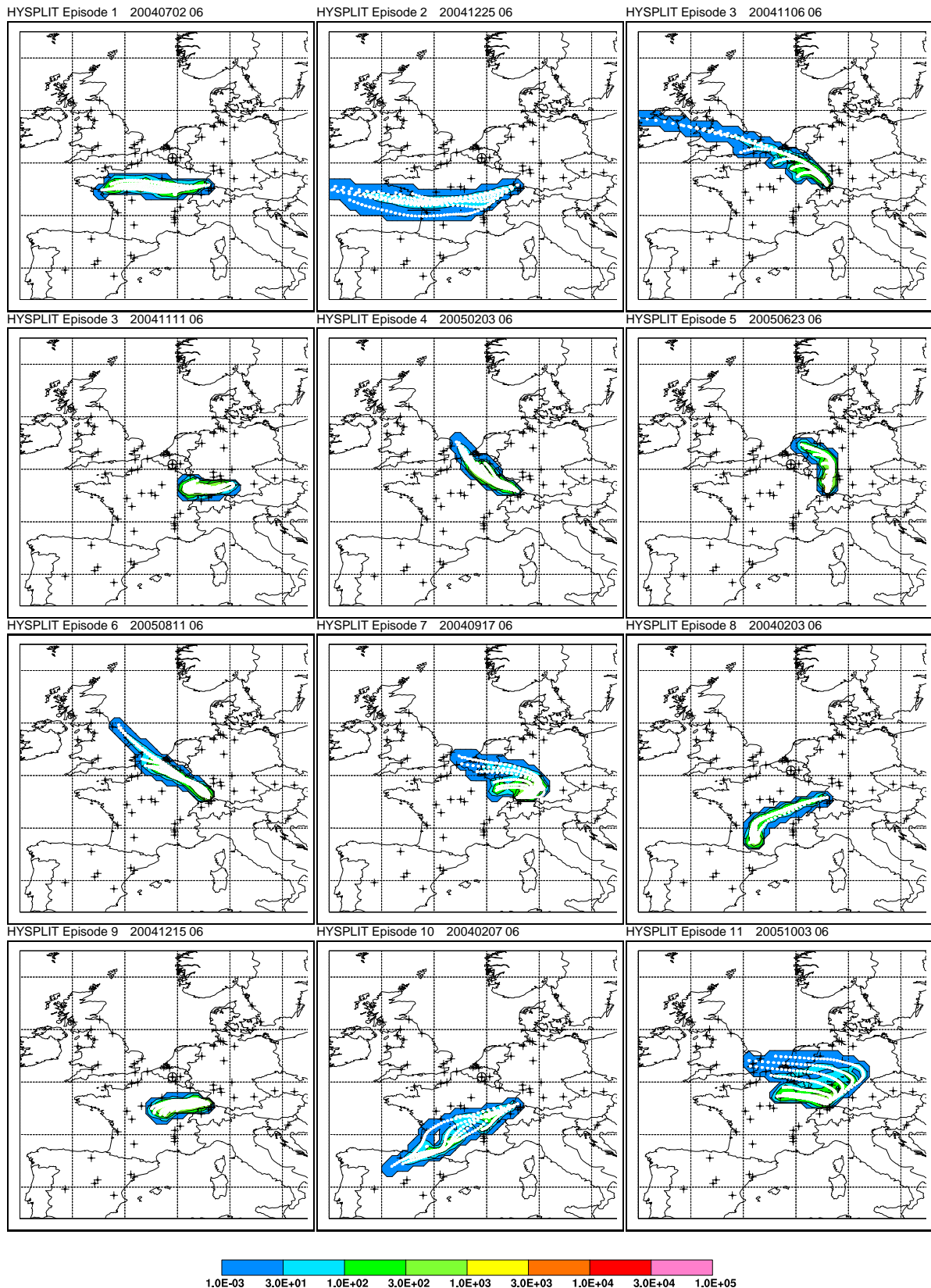


Abbildung 10.13: Integrierte Quell-Rezeptor-Felder aus 48-h HYSPLIT-Trajektorien berechnet, 24 h Messperiode endend am angegebenen Tag, 0.5° Auflösung. Kreuze bezeichnen Nuklearstandorte. Die Trajektorienstützstellen (stündlich) sind durch \circ gekennzeichnet.

10.4 Auswertung für Fleurus

Die Quell-Rezeptor-Beziehungen zwischen dem Schauinsland (bzw. Freiburg) und Fleurus sind für die verschiedenen Ausbreitungsrechnungen in den Abb. 10.14–10.24 dargestellt, und in Tab. 10.1–10.2 mit Hilfe von Gütezahlen zusammengefasst. Zwecks besserer Vergleichbarkeit wurden alle FLEXPART-Simulationen auf dem 1°-Gitter der CTBTO-Daten ausgewertet. Bei der Berechnung der Gütezahlen und der systematischen Abweichung wurde neben der normalen Berechnung auch noch eine mit den logarithmierten Werten durchgeführt, was angesichts der um Größenordnungen schwankenden Intensität der Quell-Rezeptor-Beziehung nahe liegt. Allerdings mußten dabei Nullwerte durch einen kleinen von Null verschiedenen Wert ersetzt werden, wobei in der Wahl dieses Werts eine gewisse Willkür liegt. Hervorgehoben sei auch, dass die folgenden Erkenntnisse für einen Transport Fleurus–Schauinsland gelten, also bei einer nordwestlichen Strömung, und nicht auf andere meteorologische Situationen übertragen werden sollten.

Wie aus Tab. 10.1 klar hervorgeht, sind sich die MM5-basierten Simulationen für Freiburg und Schauinsland sehr ähnlich.

Während die relative systematische Abweichung zwischen den verschiedenen von uns durchgeführten Rechnungen 20% nicht übersteigt, sind die Werte aus den CTBTO-Rechnungen durchweg rund einen Faktor 2 niedriger. Auch fällt auf, dass diese verhältnismässig gut mit allen anderen Rechnungen korreliert sind ($R = 0,6–0,8$). Beides kann möglicherweise durch die Freisetzung der Partikel in eine Schicht von 150 m Dicke erklärt werden. Diese initiale Verdünnung bewirkt vermutlich einerseits eine stärkere horizontale Auffächerung und dadurch ein Mindestmaß an Korrelation mit den anderen, schmalen Einzugsgebieten. Andererseits heisst das auch, dass die Einzelwerte an einem Quellpunkt niedriger sein müssen.

Wenn wir SIM-0, also die MM5-basierte Rechnung für Schauinsland, als Referenz heranziehen, und den Korrelationskoeffizienten betrachten, so ist jene mit der Freisetzung in mittlerer Höhe (SIL-1) besser damit korreliert als die Rechnungen mit Rezeptor 5 m über Modellboden (SIL-0) oder in wahrer Höhe (SIL-1).

Die aus den HYSPLIT-Trajektorien abgeleiteten Werte weichen in allen Maßzahlen relativ stark von den anderen Rechnungen ab, was aufgrund des deutlich anderen, vereinfachten Algorithmus nicht überrascht. Die systematische Überschätzung ließe sich leicht durch eine größere Mischungshöhe (derzeit 1000 m) korrigieren, denn die HYSPLIT-Trajektorien überschreiten interessanterweise diese Höhe fast nie. Realistischer wäre aber wohl eine Korrektur durch mehr seitliche Ausbreitung und Verdünnung – derzeit wird ja die ganze Aufenthaltsdauer einer einzigen Gitterzelle zugeschrieben.

Bei Betrachtung der Korrelationskoeffizienten der logarithmierten Werte (Tab. 10.2) ergibt sich ein recht ähnliches Bild. Auch hier ist SIL-1 besser als SIL-0 und SIL-2 mit SIM-0 korreliert. Dies scheint ein robustes Ergebnis zu sein. Allerdings wird die Korrelation bei weitem nicht so eng, dass man von einer Ersetzbarkeit der MM5-basierten Rechnung durch die variierte Rezeptorhöhe sprechen könnte. Die Korrelationen zwischen MM5-basierter Rechnung und CTBTO verschlechtern sich und liegen nun unter

jenen der SIL-0/1/2-Rechnungen. Die HYSPLIT-Korrelationen tendieren zur Vereinheitlichung bei mittleren Werten (0,4–0,6).

Da der Wahl des kleinen Wertes, mit dem die Nullwerte bei der Logarithmierung ersetzt werden müssen, eine gewisse Willkür anhaftet, werden in Tab. 10.2 b) die Mittelwerte für verschiedene Annahmen gezeigt. Man erkennt einen sehr hohen Einfluss dieses Werts, vor allem bei HYSPLIT, welches linear den höchsten Wert hat, jedoch im logarithmischen Fall den kleinsten. Dies liegt an der unterschiedlichen Werteverteilung, die bei HYSPLIT z.B. durch viele Null-Werte, aber große Beträge der Nicht-Null-Werte gekennzeichnet ist. Solche Ergebnisse machen auch deutlich, dass es sehr schwierig ist, wirklich verlässliche Metriken für derartige Ergebnisse von Ausbreitungsrechnungen zu finden, die einerseits in etwa log-normal verteilt sind, andererseits aber auch Nullwerte enthalten. Bei einer nicht logarithmierten Auswertung wird das Ergebnis weitgehend von den wenigen hohen Werten bestimmt, bei einer Logarithmierung gewinnen die Nullwerte erheblichen Einfluss, und es gibt kein a-priori Kriterium dafür, wie hoch man diesen ansetzen sollte.

Bei Betrachtung konkreter Werte an einzelnen Tagen (Abb. 10.14–10.24 findet man solche mit sehr guter Übereinstimmung (wie der 11.4.2004 in Episode 3, Abb. 10.16), aber auch große Unterschiede. Die Reihung SIL-0 – SIL-1 – SIL-2 kann die maximalen Werte unten zeigen (Episoden 3 und 4, tageweise auch in Episode 6 und 11), oder aber oben (einzelne Tage der Episoden 1, 5, 8, 9 und 11). Bei den Fällen mit guter allgemeiner Übereinstimmung liegt auch HYSPLIT meist im Rahmen, vermutlich weil es sich um Termine mit gebündelter Strömung handelt, wo auch die echten Ausbreitungsmodelle ein schmales Einzugsgebiet zeigen und daher ein einfaches Trajektorienmodell keinen allzu großen Fehler macht (zumindest einzelne Tage in den Episoden 1, 3, 4, 6, 7, 11). Allerdings ist anzumerken, dass zu rund einem Viertel der Tage HYSPLIT keinen Fleurus-Einfluss zeigt, obwohl alle anderen Modelle dies tun. Weiters gibt es in Episode 9 einen Tag, an dem nur HYSPLIT einen solchen zeigt.

Tabelle 10.2: Gütezahlen nach Tab. 9.1 für die Quell-Rezeptor-Beziehung Schauinsland (Freiburg) – Fleurus wie in Tab. 10.1. Es wurden die dekadischen Logarithmen der SRM-Werte verwendet, Null-Werte davor durch 10^{-4} ersetzt.

a) Korrelationskoeffizient (R)

	FRB-0	SIM-0	SIL-0	SIL-1	SIL-2	HYSPLIT	CTBTO
FRB-0	1.000	0.959	0.822	0.848	0.691	0.457	0.788
SIM-0	—	1.000	0.747	0.764	0.601	0.447	0.743
SIL-0	—	—	1.000	0.989	0.814	0.559	0.887
SIL-1	—	—	—	1.000	0.823	0.552	0.873
SIL-2	—	—	—	—	1.000	0.424	0.742
HYSPL	—	—	—	—	—	1.000	0.424
CTBTO	—	—	—	—	—	—	1.000

b) Mittelwerte der logarithmierten Quell-Rezeptor-Beziehungen für die verschiedenen Simulationen in Abhängigkeit von dem Wert, der für Null-Werte eingesetzt wurde (z.B. heisst -5 , dass 10^{-5} statt 0 verwendet wurde). Die erste Zeile (REGULAR) enthält die Mittel der nicht logarithmierten Werte.

Exponent	FRB-0	SIM-0	SIL-0	SIL-1	SIL-2	HYSPLIT	CTBTO
REGULAR	18.4	20.7	19.9	18.0	16.1	58.0	9.1
-5	0.234	0.280	0.114	0.105	0.440	0.004	0.349
-4	0.386	0.462	0.189	0.192	0.594	0.018	0.472
-3	0.636	0.762	0.311	0.350	0.802	0.072	0.637

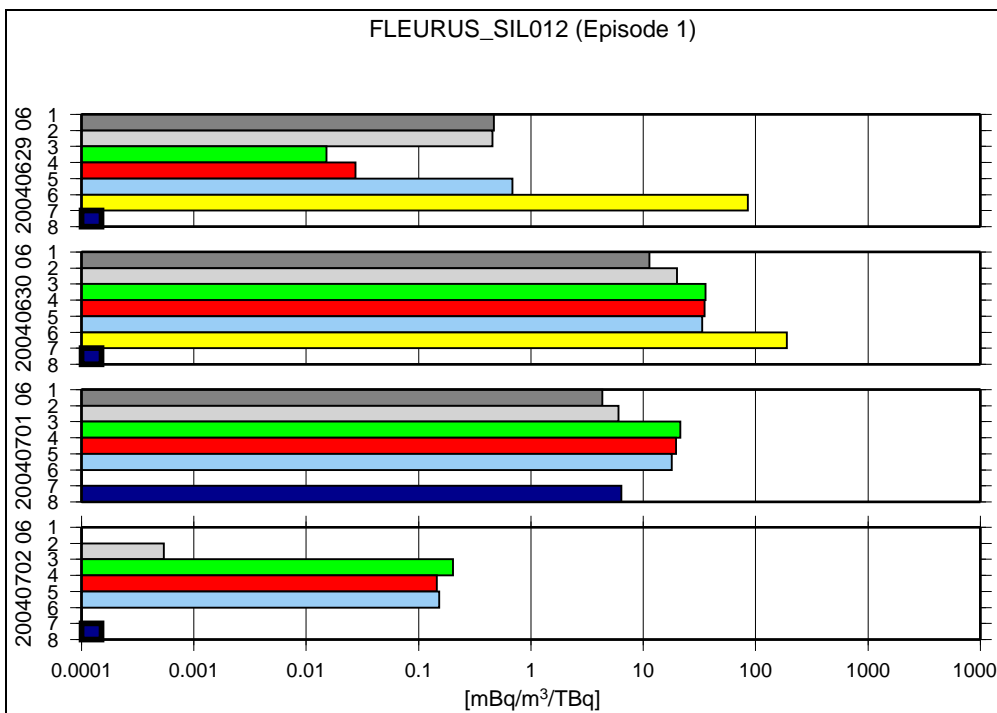


Abbildung 10.14: Vergleich von Quell-Rezeptor-Beziehungen zwischen Fleurus und dem Schauinsland bzw. Freiburg, Episode 1.

Legende (von oben nach unten): MM5-FLEXPART für Schauinsland (dunkelgrau), MM5-FLEXPART für Freiburg (hellgrau), ECMWF-FLEXPART Lauf SIL-0, SIL-1, SIL-2 (verschiedene Rezeptorhöhen, unten grün, Mitte rot, oben hellblau), HYSPLIT-Trajektorien (gelb), und CTBTO-IDC FLEXPART (dunkelblau). Eine schwarz eingerahmte Box am Anfang einer Zeile bezeichnet fehlende Daten für dieses Modell am entsprechenden Tag.

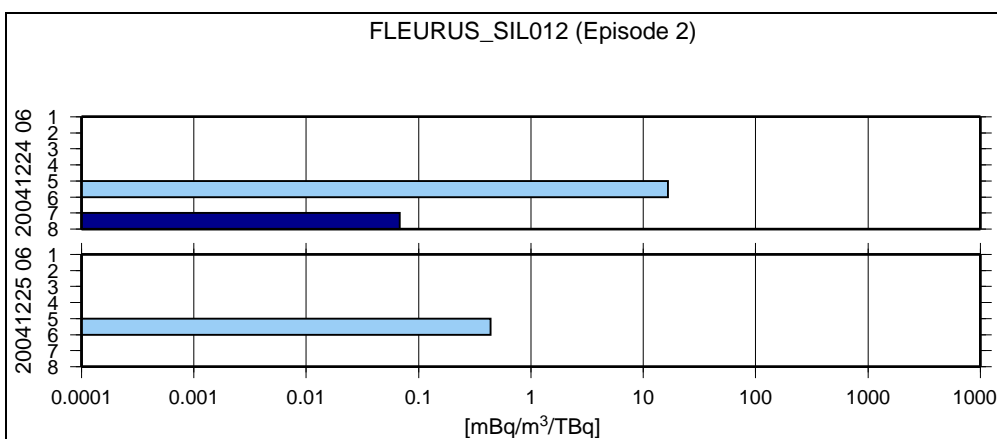


Abbildung 10.15: Vergleich von Quell-Rezeptor-Beziehungen zwischen Fleurus und dem Schauinsland bzw. Freiburg, Episode 2. Legende siehe Abb. 10.14

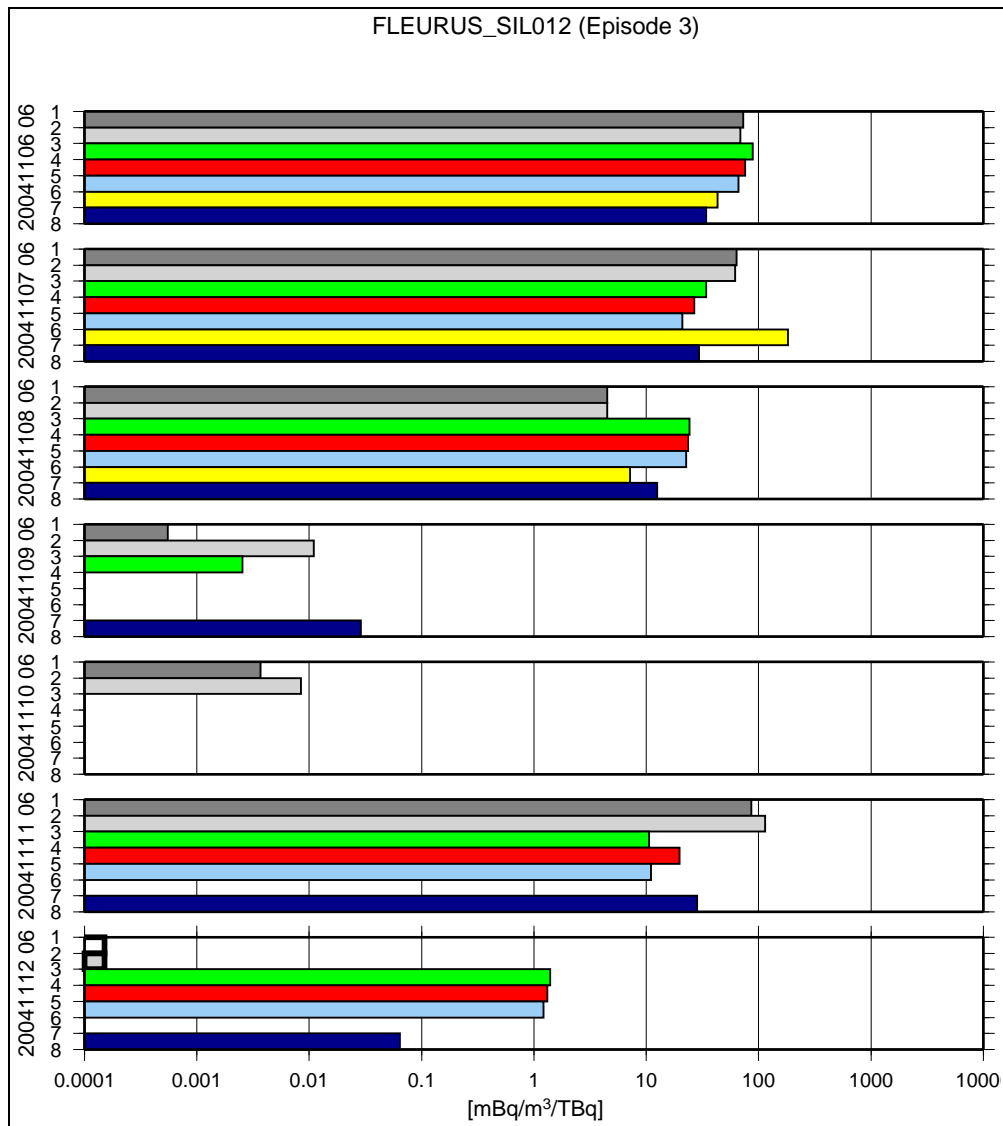


Abbildung 10.16: Vergleich von Quell-Rezeptor-Beziehungen zwischen Fleurus und dem Schauinsland bzw. Freiburg, Episode 3. Legende siehe Abb. 10.14

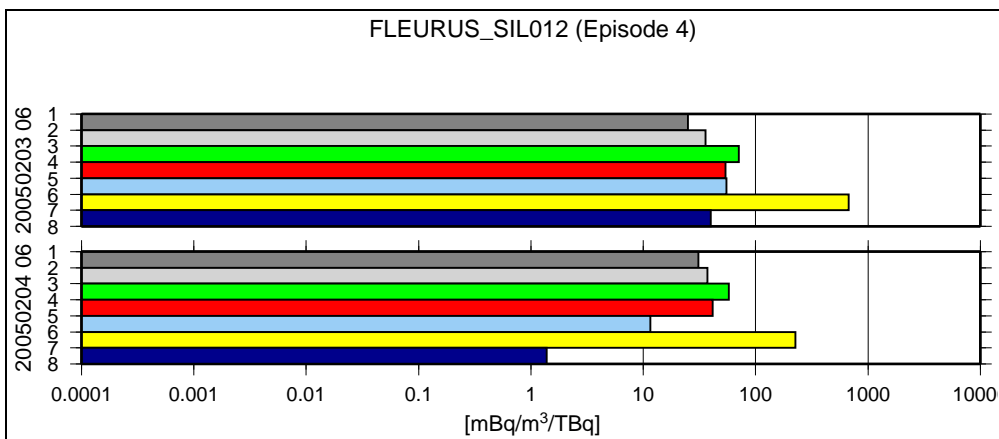


Abbildung 10.17: Vergleich von Quell-Rezeptor-Beziehungen zwischen Fleurus und dem Schauinsland bzw. Freiburg, Episode 4. Legende siehe Abb. 10.14

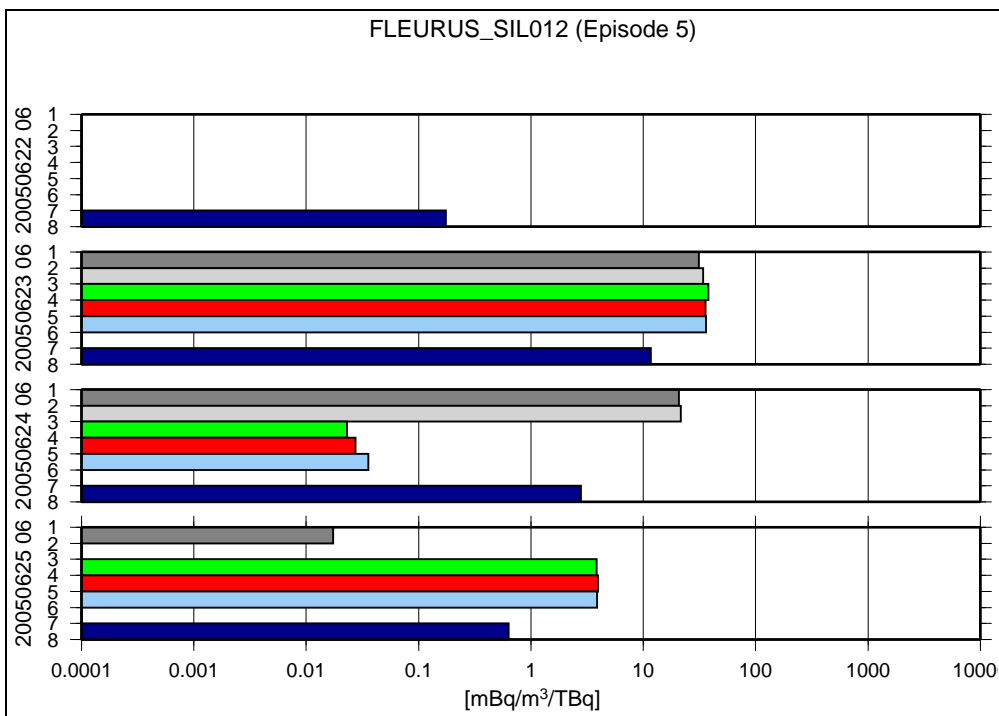


Abbildung 10.18: Vergleich von Quell-Rezeptor-Beziehungen zwischen Fleurus und dem Schauinsland bzw. Freiburg, Episode 5. Legende siehe Abb. 10.14

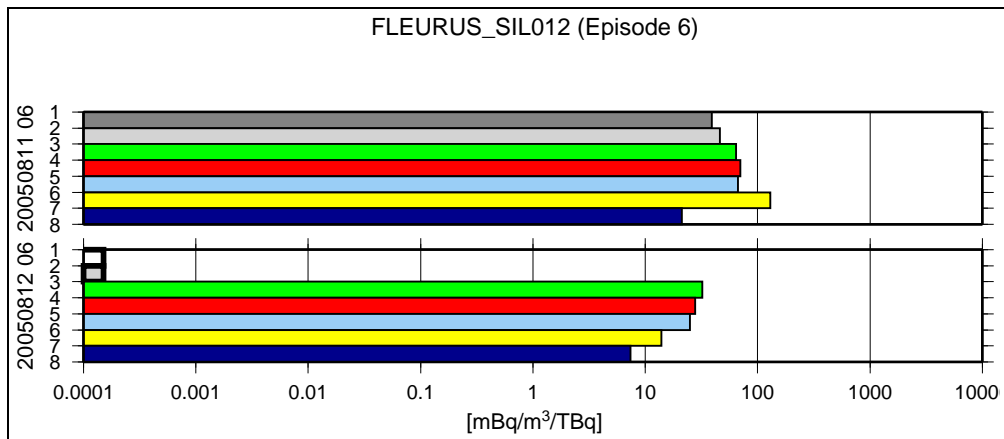


Abbildung 10.19: Vergleich von Quell-Rezeptor-Beziehungen zwischen Fleurus und dem Schauinsland bzw. Freiburg, Episode 6. Legende siehe Abb. 10.14

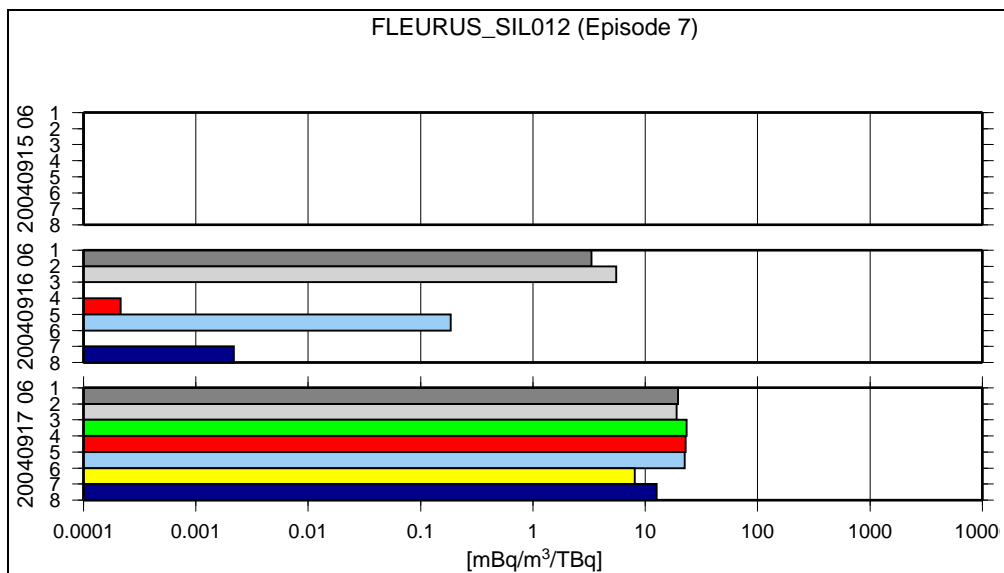


Abbildung 10.20: Vergleich von Quell-Rezeptor-Beziehungen zwischen Fleurus und dem Schauinsland bzw. Freiburg, Episode 7. Legende siehe Abb. 10.14

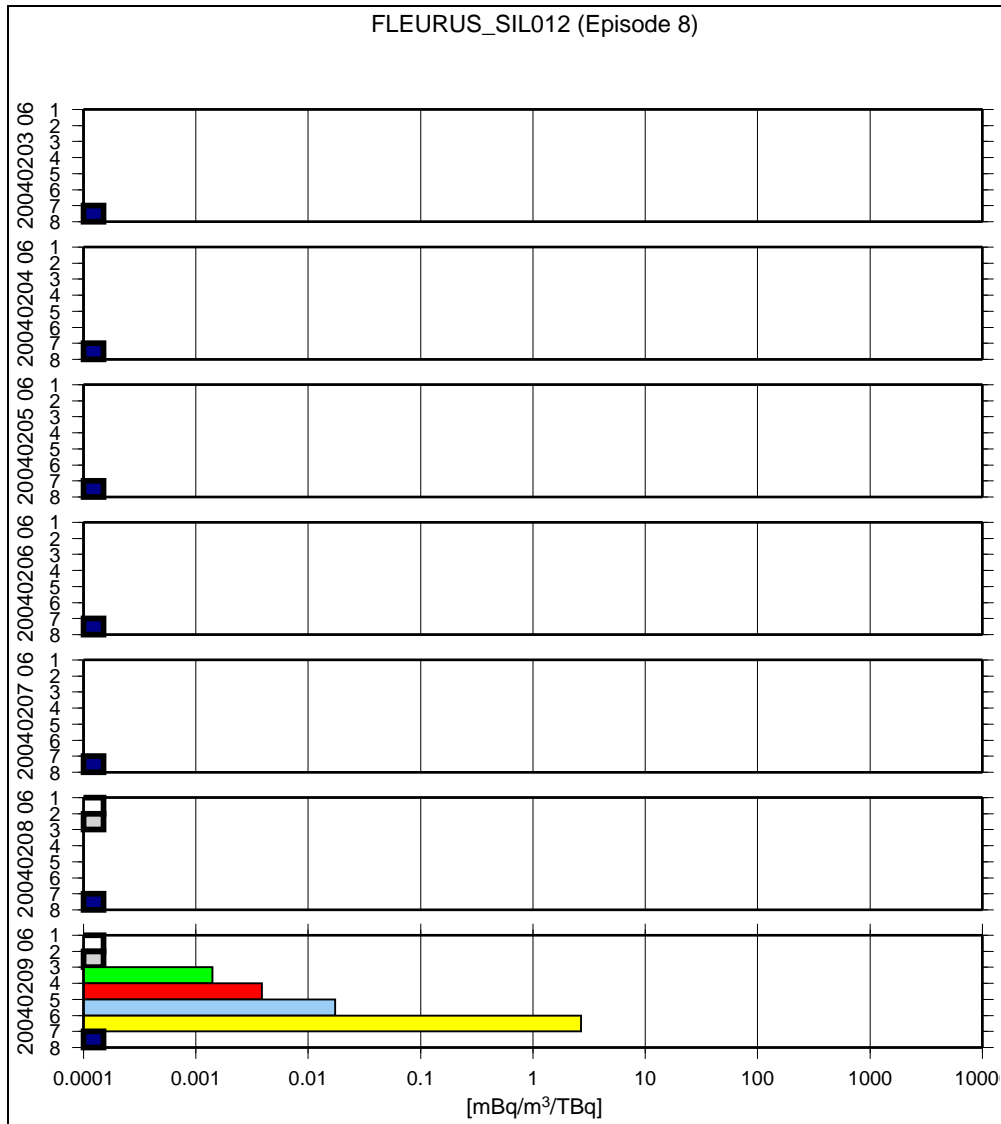


Abbildung 10.21: Vergleich von Quell-Rezeptor-Beziehungen zwischen Fleurus und dem Schauinsland bzw. Freiburg, Episode 8. Legende siehe Abb. 10.14

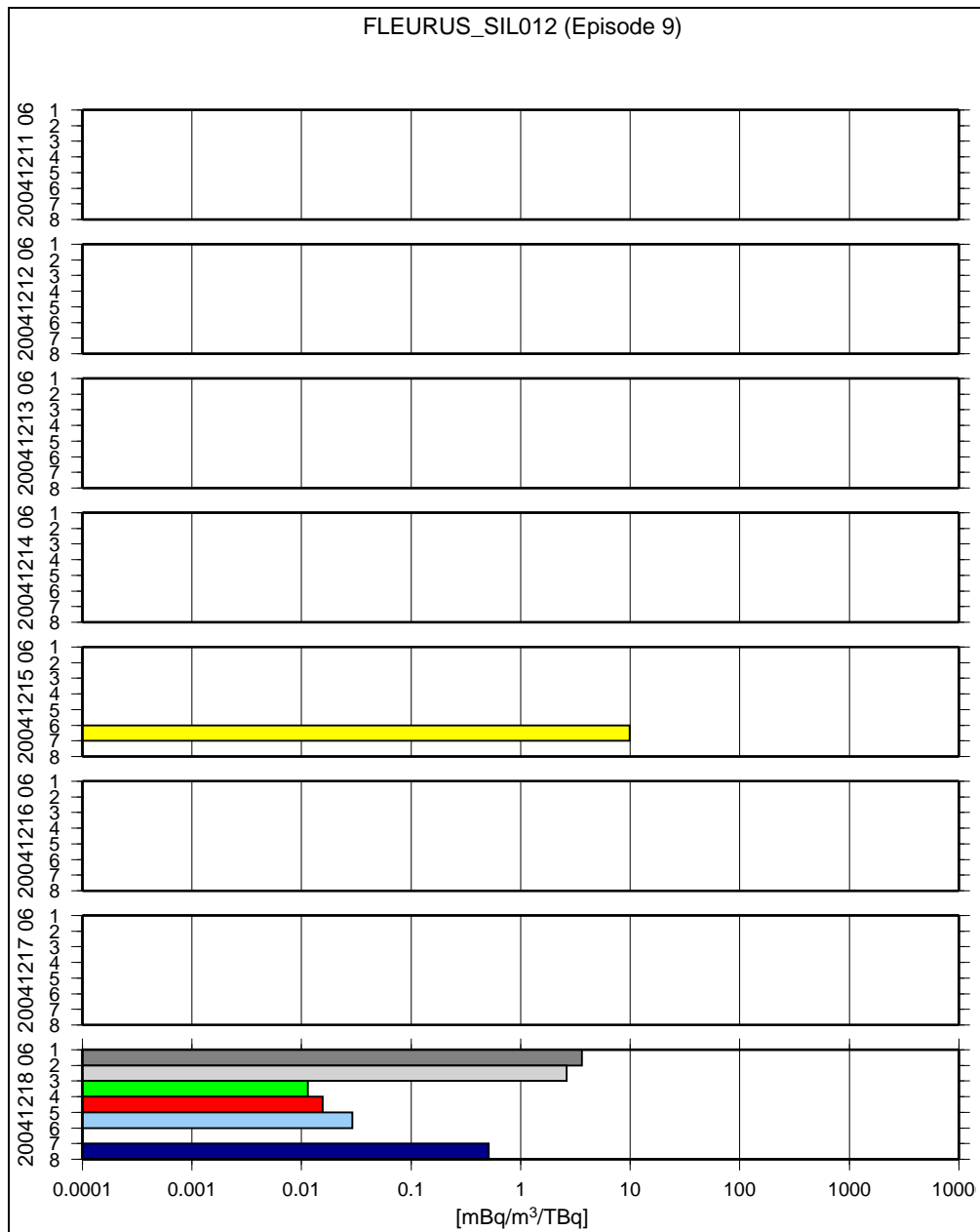


Abbildung 10.22: Vergleich von Quell-Rezeptor-Beziehungen zwischen Fleurus und dem Schauinsland bzw. Freiburg, Episode 9. Legende siehe Abb. 10.14

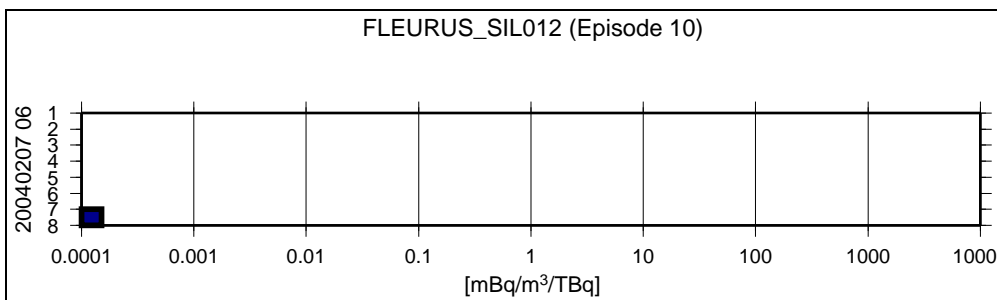


Abbildung 10.23: Vergleich von Quell-Rezeptor-Beziehungen zwischen Fleurus und dem Schauinsland bzw. Freiburg, Episode 10. Legende siehe Abb. 10.14

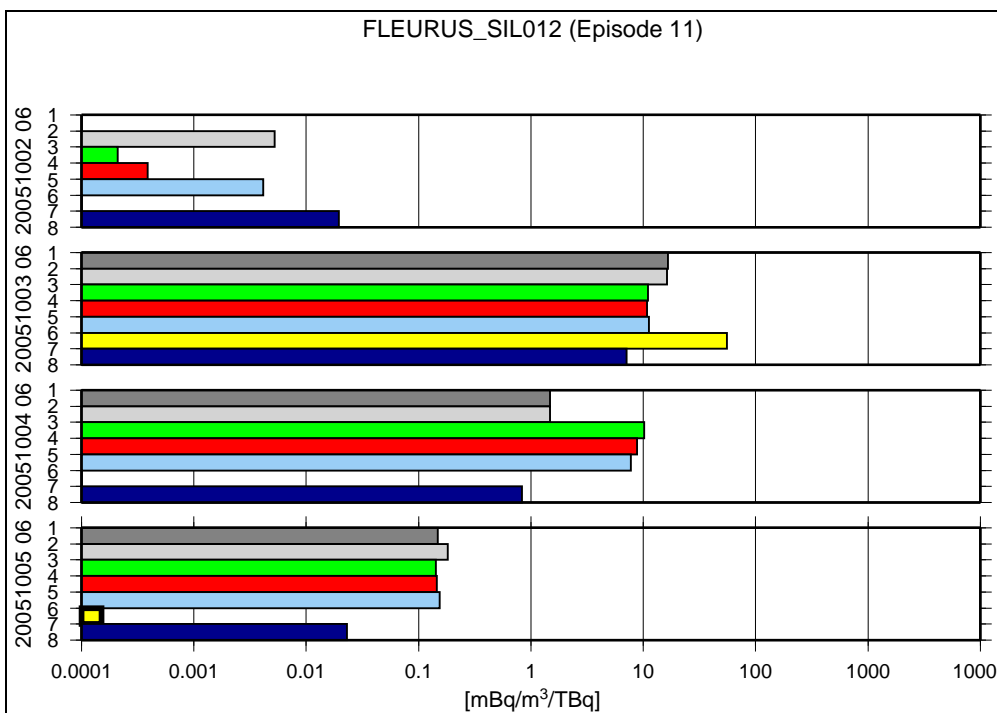


Abbildung 10.24: Vergleich von Quell-Rezeptor-Beziehungen zwischen Fleurus und dem Schauinsland bzw. Freiburg, Episode 11. Legende siehe Abb. 10.14

10.5 Schlussfolgerungen

Die Unterschiede zwischen den verschiedenen Rezeptorhöhen bei den ECMWF-basierten Rechnungen einerseits und zwischen Freiburg und Schauinsland bei den MM5-basierten Rechnungen andererseits sind bei den meisten Fällen gering. Jedoch sind zwischen ECMWF- und MM5-basierter Simulation in vielen Situationen deutliche oder sogar erhebliche Unterschiede zu finden.

Lediglich in Wetterlagen mit einer kräftigen, wenig variablen Anströmung vor allem aus Nordwest sind sich die verschiedenen FLEXPART-Simulationen sehr ähnlich. Unter den ECMWF-basierten Simulationen sind jene mit einer Rezeptorhöhe in der Mitte zwischen dem Modellboden und der wahren Höhe über NN den MM5-basierten Simulationen am nächsten.

Die MM5-basierten Rechnungen zeigen erwartungsgemäß eine stärkere Strukturierung der Quell-Rezeptor-Beziehungen und realistischere Umströmung der Alpen, des Jura und der Vogesen und nur sie erlauben eine realitätsnahe Simulation im Falle einer herbstlichen (oder winterlichen) Hochdrucklage mit Inversionsbildung zwischen Freiburg und Schauinsland.

Die vielleicht größte Überraschung war, wie gering die Unterschiede Freiburg – Schauinsland für die meisten Situationen sind. Andererseits, und das ist eine echte Neuigkeit, kommt es bei der Anströmung aus Südwest im Bereich des Hochschwarzwaldes zu sehr hohen Windgeschwindigkeiten, die vom MM5 wiedergegeben werden, aber in der ECMWF-Analyse fehlen – nicht nur in Bodennähe, sondern auch in einigen hundert Meter über Grund. Dieser vertikale Gradient der Windgeschwindigkeit führt zu beträchtlichen Intensitätsunterschieden zwischen den beiden Rezeptorpunkten sowie dazu, dass die ECMWF-basierte Rechnung der MM5-basierten für Freiburg ähnelt, während sie für den Schauinsland nicht gut passt.

In etlichen der Wetterlagen, besonders der Inversionslage Episode 9, manifestiert sich der Einfluss der lokalen Topographie (z. B. Rheingraben) bei den Simulationen von Freiburg im Vergleich zu Schauinsland auf MM5-Basis. Allerdings wird dies meist nur in den Nest-Outputs klar sichtbar. Es wäre auch vorstellbar, von der 8 km - Auflösung im Nest auf eine noch höhere, zum Beispiel 1 bis 2 km, in einem kleineren Gebiet herunter zu gehen. Man kann erwarten, dass die Unterschiede dann noch klarer sichtbar werden, und der potentielle Einfluss von umliegenden KKW's besser erkennbar wird.

11 Simulation von Spurenstoff-Konzentrationen

11.1 Prinzip

Dieser Abschnitt verfolgt die Absicht, die Qualität der verschiedenen Verfahren zur Berechnung der Quell-Rezeptor-Beziehungen vergleichend zu untersuchen, in dem man Spurenstoff-Messungen mit Werten vergleicht, die auf der Basis der verschiedenen Varianten der rezeptororientierten Ausbreitungsmodellierung berechnet wurden. Neben kontinuierlichen Messungen braucht man dazu einen europaweiten Emissionsdatensatz.

Die Spurenstoffe, die wir dafür heranziehen, sind CO, NO_x und Radon-222; die Berechnungen wurden für den Schauinsland durchgeführt.

In allen Fällen sind neben den Fehlern bei der Berechnung der Quell-Rezeptor-Beziehung auch andere Fehler im Spiel, die weiter unten näher erläutert werden. Daher könnten wir selbst für perfekte Ausbreitungsrechnungen keine perfekten simulierten Konzentrationszeitreihen erwarten. Dem Ansatz lag die Erwartung zu Grunde, dass die Größenordnung der anderen Fehler jene der Ausbreitungsrechnung wenigstens nicht übersteigt, so dass sinnvoll interpretierbare Unterschiede der verschiedenen Berechnungsmodi gefunden werden können, und so eine Bewertung der Unterschiede zwischen den ECMWF-basierten und MM5-basierten Rechnungen möglich ist.

Wir haben die Quell-Rezeptor-Beziehungen für jedes Rezeptorintervall l als ein SRM-File vorliegen. Darin stehen für jede Gitterzelle (i, j) und jede Transportdauer n Werte m_{ijn} . Zur Klarstellung können wir daher auch m_{ijn}^l schreiben.

Außerdem haben wir die Emissionsdaten, auf demselben Gitter, q_{ij} , zunächst als Jahresmittelwerte, und daher ohne Zeitindex. Kartendarstellungen der CO- und NO_x-Emissionsdaten finden sich auf Seite 85.

Der modellierte Konzentrationswert am Rezeptor c_l^{mod} ist dann

$$c_l^{mod} = f \sum_{ijn} m_{ijn}^l q_{ij}$$

Die Reihe der c_l^{mod} kann dann mit den Beobachtungswerten c_l^{obs} verglichen werden. f ist ein Skalierungsfaktor, der auf die Einheiten und den Raumbezug der SRM-Daten einerseits und der Emissionsdaten andererseits Rücksicht nimmt.

Ausgehend von diesem Grundprinzip können wir die im Folgenden beschriebenen Verbesserungen einführen.

11.1.1 Zeitabhängigkeit der Emissionsdaten

Emissionen wie jene von CO und NO_x haben einen Jahresgang, einen Wochengang und einen Tagesgang. Aus Arbeiten mit Chemie-Transport-Modellen liegt uns ein Programm vor, welches für jede Jahresstunde einen Skalierungsfaktor g der Emission liefert. Die Zeitabhängigkeit wird dabei für jeden Aktivitätssektor (Kraftwerke, Industrie, Hausbrand, PKW-Verkehr, etc.) in Abhängigkeit von Jahreszeit, Wochentag und Tageszeit vorgegeben. Die Daten dazu stammen aus einem früheren Projekt zur Ozon-simulation in Ostösterreich (POP).

Die Zeit für die Quelle ergibt sich aus der Rezeptorzeit minus der Transportzeit:

$$t_q = t_l - \Delta t_n$$

Die Transportzeit ist in unseren FLEXPART-Simulationen durch die 3-stündige Auflösung der Quellen in der Quell-Rezeptor-Matrix in Intervallen von $\Delta t = 3$ h gegeben. Damit kann die mittlere Transportzeit im n -ten Intervall als

$$\Delta t_n = (n - 0.5)\Delta t$$

berechnet werden.

Für die modellierte Konzentration ergibt sich somit

$$c_l^{mod} = f \sum_{ijn} g(t_q) m_{ijn}^l q_{ij} = f \sum_{ijn} g[t_l - (n - 0.5)\Delta t] m_{ijn}^l q_{ij}.$$

11.1.2 Umwandlung während des Transports

Im Falle von Radon ist offensichtlich, dass die Halbwertszeit von 3,824 d berücksichtigt werden sollte. Auch NO_x wird durch Prozesse, die wir in der FLEXPART-Simulation nicht berücksichtigt haben, während des Transports vermindert, vor allem trockene Deposition und weitere chemische Umwandlung. Hier kann auch eine mittlere Halbwertszeit eingesetzt werden, es wurden für die folgenden Auswertungen 3 d angesetzt.

Wenn man vereinfacht die Transportzeit als jeweils einen Zeitpunkt betrachtet (tatsächlich ist die Transportzeit in unserer FLEXPART-Simulation ein Intervall von 3 h), so ergibt sich

$$c_l^{mod} = f \sum_{ijn} e^{-at_n} m_{ijn}^l q_{ij},$$

wobei a die Zerfallskonstante ist, welche über $a = \frac{\ln 2}{T_{1/2}}$ mit der Halbwertszeit $T_{1/2}$ zusammenhängt.

11.2 Betrachtete Spurenstoffe

11.2.1 Kohlenmonoxid

Kohlenmonoxid, CO, ist ein Produkt unvollständiger Verbrennung und hat daher zahlreiche anthropogene Quellen. Als natürliche Quellen sind vor allem große Waldbrände zu nennen, die aber in Europa selten sind. CO entsteht auch durch Oxidation von Kohlenwasserstoffen. Die wichtigste Senke von CO in der Atmosphäre ist die Reaktion mit OH, wobei die durchschnittliche Lebensdauer des troposphärischen CO mit 30 bis 90 Tagen angegeben wird (Seinfeld und Pandis, 1998). Deshalb hat CO eine relevante großräumige Hintergrundkonzentration, die auf der Nordhemisphäre etwa 120 ppb (mit saisonaler Schwankung) beträgt (Seinfeld und Pandis, 1998). In der unmittelbaren Nähe von starken Verkehrsemissionen kann die CO-Konzentration recht hoch sein, allerdings ist dieses Phänomen durch technische Verbesserungen heutzutage weit weniger prominent als früher.

11.2.2 Stickoxide

Die wichtigsten Stickoxide in der Atmosphäre sind Stickstoffmonoxid, NO, und Stickstoffdioxid, NO₂. Beide gelangen durch Oxidation des Luftstickstoffs und, je nach Brennstoff, von im Brennstoff enthaltenem N bei Verbrennungsprozessen in die Atmosphäre, wobei NO Ausdruck einer unvollständigen Verbrennung ist. In der Atmosphäre wird NO relativ rasch durch Ozon zu NO₂ oxidiert, weshalb die Betrachtung der Summe von beiden, als NO_x bezeichnet, für viele Zwecke gängig ist. Der EMEP-Emissionskataster gibt die Stickoxid-Emission auch als NO_x an, wobei hier das Gewicht so berechnet wird als seien alle NO-Moleküle bereits zu NO₂ oxidiert. Zum Vergleich mit den Messdaten müssen diese also gleich behandelt werden, womit die Massenkonzentration von NO_x folgendermaßen berechnet wird:

$$c_{NO_x} = c_{NO_2} + \frac{M_{NO_2}}{M_{NO}} c_{NO}$$

Das Molekulargewicht von NO₂, M_{NO_2} , beträgt 46, jenes von NO, M_{NO} , 30. Somit hat der Faktor in obiger Gleichung den Zahlenwert 1,533.

Der Verkehr ist die wichtigste Quelle von NO_x. NO₂ hat in der Troposphäre eine chemische Lebensdauer von etwa ein bis vier Tagen; es wird zu Substanzen wie NO₃⁻, PAN und HNO₃ oxidiert (Seinfeld und Pandis, 1998). Deshalb hat es auch keine relevante globale Hintergrundkonzentration. Eine mittlere Lebensdauer (Halbwertszeit) von 3 Tagen wurde angenommen.

11.2.3 Radon

Radon ist ein natürliches radioaktives Edelgas. Wir betrachten das Isotop ²²²Rn, das durch Exhalation aus Uran-Anteilen im Boden in die Atmosphäre gelangt, und eine

Halbwertszeit von 3,284 Tagen hat. Als Edelgas deponiert es nicht und hat keine chemischen Quellen und Senken. Es wird daher gerne zur Verifikation atmosphärischer Transportmodelle in der globalen Skala eingesetzt.

Die Exhalation ist vom Urangehalt des Bodens, der Bodentextur, der Bodenfeuchtigkeit, dem Vorhandensein einer Schneedecke und anderen Faktoren abhängig, und daher einer beträchtlichen Variabilität unterworfen. Derzeit sind mit den Emissionskatastern von anthropogenen Spurenstoffen vergleichbare Radonflussdaten nicht verfügbar. Für die Verifikation von Ausbreitungsmodellen werden daher in der Regel konstante oder nur sehr großräumig und einfach variierende Flussraten angenommen, wobei als Standardwert lange 1 Atom pro Quadratmeter und Sekunde (entspricht $76 \text{ Bq m}^{-2}\text{h}^{-1}$) galt. Wie Conen und Robertson (2002) in ihrem Überblicksartikel aufzeigen, nimmt die mittlere Exhalationsrate in mittleren und hohen nördlichen Breiten ab; für $40^\circ\text{--}50^\circ\text{N}$ werden Werte von 0.5 bis $0.8 \text{ Atome cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ angegeben. Levin et al. (2002) geben Durchschnittswerte von ca. $50\text{--}60 \text{ m}^{-2}\text{h}^{-1}$ für Heidelberg und allgemein Westeuropa an. Wir rechnen deshalb mit einer Quellstärke von $50 \text{ Bq m}^{-2}\text{h}^{-1}$ ($13.9 \text{ mBq m}^{-2}\text{s}^{-1}$).

Die Quellstärke über dem Ozean ist etwa einen Faktor 100 niedriger als über Land und kann daher in unserer Anwendung vernachlässigt werden.

11.3 Probleme und Limitationen

Für jeden der betrachteten Spurenstoffe gibt es Limitationen in unserem Modellansatz, welche die Belastbarkeit der erhaltenen Ergebnisse limitieren.

Bei CO und NO_x , die vor allem anthropogene Quellen haben, ist die wichtigste Einschränkung die räumliche Auflösung der Emissionsdaten von 0.5° im EMEP-Emissionskataster. Während das für eine Auswertung mit FLEXPART-Ergebnissen auf einem 0.5° oder 1° Gitter gut ist, so heißt das doch, dass die Zusatzinformation, die im Nest-Output mit 8 km Auflösung zur Verfügung steht, nicht wirklich genutzt werden kann. Da in unmittelbarer Nähe der Messstellen liegende Quellen einen um bis zu einer Größenordnung verschiedenen Einfluss haben können, je nachdem ob sie 5 km oder 50 km entfernt sind, muss man mit sehr großen Fehlern bei den Wetterlagen, welche Transporte aus der Umgebung beinhalten können, rechnen. Dies bewahrheitete sich bei den Auswertungen. Die Ergebnisse speziell von NO_x waren zunächst sehr unbefriedigend. Da über dem Schwarzwald selbst, aber auch den Vogesen, nur sehr geringe Emissionen anzutreffen sind, durch das 0.5° -Gitter diese aber aus den Ballungsräumen dort hin verwischt werden, resultieren für die Station Schauinsland in der Regel deutlich zu hohe Konzentrationen, deren Verlauf überdies oft nicht mit den Beobachtungen korreliert. Eine simple Gegenmaßnahme, nämlich die Emissionen in einem gewissen Umkreis (hier als 80 km gewählt) einfach auf Null zu setzen, brachte eine deutliche Verbesserung. Dies zeigt an, dass ohne einen räumlich detaillierten Emissionskataster der Wert der Methode sehr begrenzt ist.

Spezifisch für CO ist das Problem, dass die Rückverfolgungszeit in unseren Simulationen von 3 bis 5 Tagen kurz im Vergleich zur Lebensdauer von mehr als einem Monat ist. Daher sollten die simulierten CO -Konzentrationen in der Regel deutlich unter den

beobachteten liegen, und auch nur einen Teil von deren Varianz erklären können (vor allem sollte der hochfrequente Anteil erklärt werden). Es bietet sich daher an, bei der Auswertung primär die Korrelation zu betrachten.

Umgekehrt ist für NO_x die Schwierigkeit gegeben, dass dieses einer raschen chemischen Umwandlung unterliegt, die ein Lagrange'sches Partikelmodell mangels Chemiemodul gar nicht simulieren kann. Andererseits sollte hier der Hintergrund kein großes Problem sein. Wegen der Variabilität der NO_2 -Senke dürfen an die Ergebnisse keine zu hohen Erwartungen gerichtet werden, obwohl eine mittlere Konversionsrate berücksichtigt wurde.

Beim Radon gibt es keine Probleme mit Senken, und die Quellen sind vergleichsweise homogener. Dennoch muss man damit rechnen, dass sowohl räumliche wie zeitliche Variationen der Quellfunktion, die in unseren Ansatz nicht eingehen, das Ergebnis verschlechtern. Dies gilt wohl besonders im Bereich des Schwarzwalds, der im Vergleich zu Schotterebenen und Kalkregionen in der Umgebung eine relativ hohe Radon-Exhalation aufweisen dürfte. Außerdem ist die Halbwertszeit so beschaffen, dass bei der gegebenen Rückverfolgungszeit mit einem Konzentrationsanteil von etwa 30–50% gerechnet werden muss, der für unsere Simulation als nicht erfasster Hintergrund zu gelten hat. Außerdem sind die Winter-Ergebnisse mit Vorsicht zu sehen, da hier Schneedeckeneinfluß zusätzliche Differenzen bringen kann.

11.4 Ergebnisse

Derzeit werden nur Ergebnisse für Schauinsland gezeigt, da in Freiburg (außer evt. bei Radon) ohne höher aufgelösten Emissionskataster keine nützlichen Ergebnisse erwartet werden. Am Schauinsland werden wegen der vielen Einschränkungen nur zwei Modellvarianten betrachtet, die ECMWF-basierte Simulation mit Partikelfreisetzung in Bodennähe und die MM5-basierte Simulation.

Es werden einerseits Zeitreihen-Grafiken der Konzentrationen (Abb. 11.1–11.11) und andererseits diesbezügliche Metriken (Tab. 11.1–11.10) präsentiert. Die Metriken sind dieselben, die in Kapitel 9 (Tabelle 9.1) für die meteorologischen Größen eingeführt wurden.

Episode 1, Westlage Juni 2004:

Die beobachtete CO-Konzentration weist wenig Variation auf, wobei am 29. früh und am 30. tagsüber Maxima beobachtet werden. ECMWF-FLEXPART erzeugt jeden Morgen ein Maximum, auch bei NO_x und Radon, ein Phänomen, das an vielen Tagen auftritt. Es wird durch den Tagesgang der Stabilität verursacht – allerdings ist dieses morgendliche Maximum zum Zeitpunkt der maximalen Stabilität nur für eine Tal- oder Flachlandstation tatsächlich charakteristisch. An einer Bergstation ist der Tagesgang typischerweise umgekehrt, hier werden maximale Konzentrationen von am Boden emittierten Spurenstoffen am Mittag oder Nachmittag mit zunehmender Durchmischung bzw. Advektion durch Tal- und Hangwinde erreicht. Daher ist die ungefähre Übereinstimmung des Maximums am 29. früh mehr ein Zufallstreffer. Beide Modelle

zeigen den Abfall vom 30.6. auf den 1.7. und erreichen eine Korrelation von knapp unter 0,5 (MM5 etwas besser).

Beim NO_x sind die Ergebnisse generell nicht gut, lediglich die mittlere Konzentration wird halbwegs getroffen.

Der beobachtete Radon-Peak am 1.7. zu Mittag wird von den Modellen nicht simuliert, in der MM5-basierten Simulation ist er zumindest andeutungsweise vorhanden.

Episode 2, Westlage Dezember 2004:

Hier liegen nur zwei simulierte Tage vor, die wenig Rückschlüsse erlauben, obgleich beim NO_x gute Korrelationskoeffizienten (0,8 bzw. 0,9) erreicht werden.

Episode 3, Northwest- bis Nordostlage, November 2004:

Der allgemeine Trend im CO und im NO_x wird von der MM5-basierten Simulation wiedergegeben. Diese zeigt auch, wenngleich über kürzere Intervalle als beobachtet, die mittäglichen Maxima in den drei Komponenten am 8. und 9.11., an Stelle derer die ECMWF-basierte Simulation Minima aufweist (siehe Diskussion unter Episode 1). Generell liegen die Simulierten NO_x -Werte und auch das Radon (hier aber nur bis zur Mitte der Episode) erheblich zu hoch.

Episode 4, Northwest- bis Nordostlage, Februar 2005

Dies ist eine sehr kurze Episode. Beim CO wird der steigende Trend von den Modellen grob wiedergegeben, es fehlt aber der Abfall gegen Ende. Beim NO_x und Radon sind beide Modelle eher schlecht.

Episode 5, Sommerliche Hochdrucklage Juni 2005:

Leider ist hier die CO-Messung am Schauinsland komplett ausgefallen, jene des NO_x bis Mittag des 22. Juni. Die ECMWF-basierte Rechnung zeigt jeweils Maxima aller Komponenten in der zweiten Nachthälfte vom 21. auf den 22.6., sowie jeweils kurz nach Mitternacht am 23.6. und am 24.6, die nicht den Beobachtungen entsprechen, und zu negativer Korrelation führen. Das MM5 gibt den allgemeinen Trend des NO_x besser wieder (Korrelationskoeffizient von 0,7), und ist auch für das Radon etwas besser. Vermutlich hätte bei dieser windschwachen Lage eine gute Darstellung der regionalen Emissionsverteilung für die MM5-basierte Simulation eine deutliche Verbesserung gebracht.

Episode 6, sommerliche Hochdrucklage, August 2005:

Diese kurze Episode zeigt ein Maximum in den Beobachtungen, bei CO und Radon am Vormittag des 11.8., bei NO_x etwas breiter über den Tag verteilt. Die ECMWF-basierte Rechnung hat aber das Maximum so wie bei der anderen Hochdrucklage in der zweiten

Nachthälfte. Der MM5-basierten Rechnung fehlt ein Tag (es gab hier Probleme mit dem MM5).

Episode 7, Südwestlage, September 2004:

Diese Episode ist durch einen Anstieg des beobachteten CO und NO_x bei gleichzeitigen Rückgang der Radon-Konzentration gekennzeichnet. Ersteres wird von den Modellen in etwas wiedergegeben, letzteres aber nicht. Die MM5-basierte Rechnung zeigt im Unterschied zur ECMWF-Rechnung das nachmittägliche CO-Maximum am 16., auch beim Radon ist der Verlauf am 16. relativ gut.

Episode 8, Südwestlage, Februar 2004:

Sehr charakteristisch ist wieder der entgegengesetzte Tagesgang in der MM5- und der ECWMF-basierten Simulation, wobei für das NO_x die MM5-basierte Simulation nicht nur vom Verlauf, sondern auch in Bezug auf die Absolutwerte wesentlich besser ist (nicht beim CO). Die Radonwerte werden generell nicht gut simuliert.

Episode 9, winterliche Hochdrucklage, Dezember 2004:

Die CO-Beobachtungen zeigen einen relativ glatten Verlauf, der im Wesentlichen die Hintergrundkonzentrationen oberhalb der Inversion wiedergibt. Darauf sind an manchen Tagen kleine Maxima am Nachmittag aufgesetzt, offenbar dringen geringe Mengen Grenzschichtluft gelegentlich auch durch. Demzufolge müssten die Simulationen niedrige, wenig variable Ergebnisse liefern. Die ECWMF-basierte Simulation tut das gar nicht, da hier der Schauinsland nicht oberhalb der Inversion liegt. In der MM5-basierten Simulation sind die Werte anfangs ähnlich hoch, gehen dann aber ab dem 13. auf realistisch niedrige Werte zurück. Die nachmittäglichen Maxima sind vorhanden, wenngleich eher zu ausgeprägt.

Beim NO_x sind die beobachteten Werte wegen der Inversion sehr niedrig, nur am 11., dem 15. und 16. kommt es tagsüber zu Anstiegen. Während die MM5-basierte Rechnung das im Großen und Ganzen gut wiedergibt (die Unterschätzung am Anfang ist eine Folge der simplifizierten Nullsetzung der Emissionen im Nahbereich), liegt die ECMWF-basierte Rechnung viel zu hoch und weist überdies eine zu große und unpassende Variabilität auf. Der (auf den Drei-Stunden-Mitteln basierende) NO_x-Korrelationskoeffizient ist für die MM5-Rechnung etwa Null, für die ECMWF-Rechnung gar deutlich negativ. Auch die beobachtete Radon-Konzentration ist sehr niedrig, mit Ausnahme des 11. und 16. auch ziemlich konstant. Gemessen an den anderen Tagen ist die ECMWF-basierte Simulation recht hoch. Ansonsten zeigt sich ein ganz ähnliches Bild wie beim NO_x, mit Hilfe des MM5 kann zumindest das niedrige Niveau in der Mitte der Episode und ein Teil der Variabilität richtig wiedergegeben werden.

Episode 10, Winterliches Zwischenhoch, Februar 2004:

Dieses Intermezzo aus Episode 8 wird wegen seiner Kürze nicht eigens interpretiert und es gibt dafür auch keine eigenen Metriken.

Episode 11, Nordostlage, Oktober 2005:

Leider hat auch diese Episode Ausfälle von Beobachtungsdaten. Beim NO_x simulieren beide Modelle wesentlich zu hohe Werte, die Korrelationen sind eher mäßig, vor allem beim MM5. Im Radon sehen wir ein Maximum am 1.10, das die Modelle nicht wiedergeben, und einen Anstieg ab dem 2.10. mittags, der von den Modellen auch gezeigt wird.

11.5 Schlussfolgerungen

Trotz einiger simulierter Phänomene sind die Ergebnisse insgesamt wenig befriedigend (siehe auch Überblickstabelle 11.11), was darauf hinweist, dass die Methodik noch nicht ausreichend entwickelt ist. Eine bessere Quantifizierung des von der Reichweite der Simulationen nicht erfassten Hintergrunds wäre für CO und wahrscheinlich auch Radon sehr vorteilhaft. Ausserdem wären räumlich gut aufgelöste Emissionsdaten wichtig.

Wegen des nicht ausreichend erfassten Hintergrunds für Radon und CO sind die Korrelationskoeffizienten vermutlich als die robustesten Parameter anzusprechen. Diese zeigen – abgesehen von der Episode 3 und bei Radon auch der Episode 6 – nur für NO_x häufig deutlich positive Werte (siehe Tab. 11.11). Daher ist zumindest im Hinblick auf die Gütezahlen in erster Linie diese Substanz zu betrachten. Bei allen Scores liegt hier die MM5-basierte Simulation sowohl im Mittel als auch bei der Anzahl der Episoden, in denen diese besser abschneidet, klar vorne. Beim CO ergibt sich in etwa Gleichstand (vermutlich auch durch den relativ größeren Einfluss entfernter Quellen begründet), beim Radon wäre die ECMWF-basierte Simulation etwas besser, obgleich hier beide Modelle schlechte Korrelationen aufweisen.

Der typische Spurenstoff-Tagesgang an einer Bergstation (Minimum nachts, Maximum tagsüber), welcher umgekehrt ist wie an einer Flachlandstation, wird nur von der MM5-basierten Simulation grundsätzlich wiedergegeben. Auch bei Inversionslagen spiegelt sich die Problematik, dass im großräumigen Modell die Topographie zu glatt ist und daher auch die „Gipfel“ unter der Inversion bleiben, in den zu hohen Konzentrationswerten wieder, während die MM5-Simulation zumindest an der Mehrzahl der Tage passende Werte liefert.

Trotz der erheblichen Einschränkungen zeigt sich also insgesamt ein deutlicher Vorteil für die hochaufgelöste Simulation.

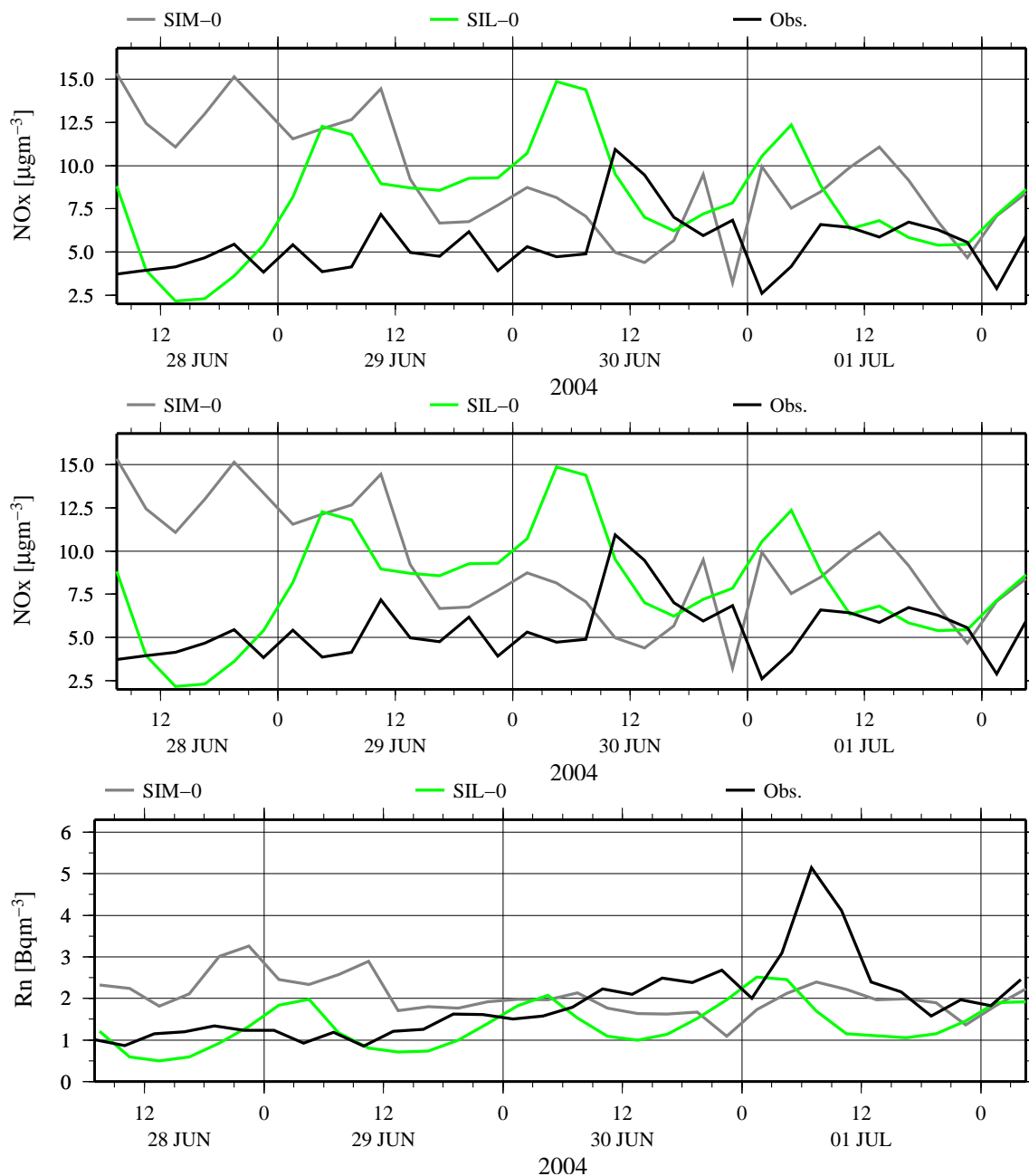


Abbildung 11.1: Vergleich von modellierten und beobachteten Konzentrationen am Schauinsland, Episode 1. Von oben nach unten: CO, NO_x, Radon. Die Beobachtung ist in schwarz, die MM5-basierte Simulation in grau und die ECMWF-basierte Simulation in grün dargestellt.

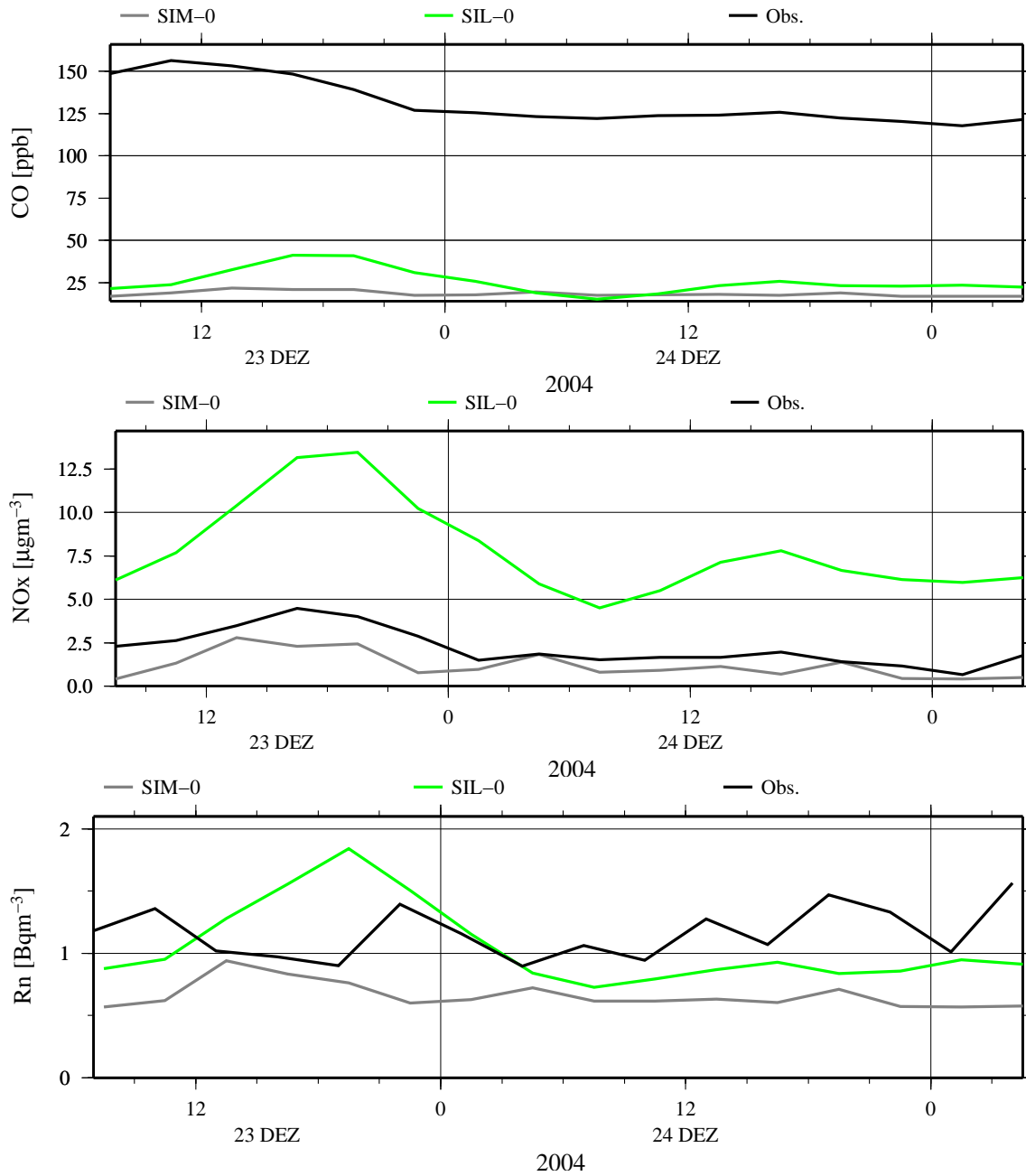


Abbildung 11.2: Vergleich von modellierten und beobachteten Konzentrationen am Schauinsland, Episode 2. Von oben nach unten: CO, NOx, Radon. Die Beobachtung ist in schwarz, die MM5-basierte Simulation in grau und die ECMWF-basierte Simulation in grün dargestellt.

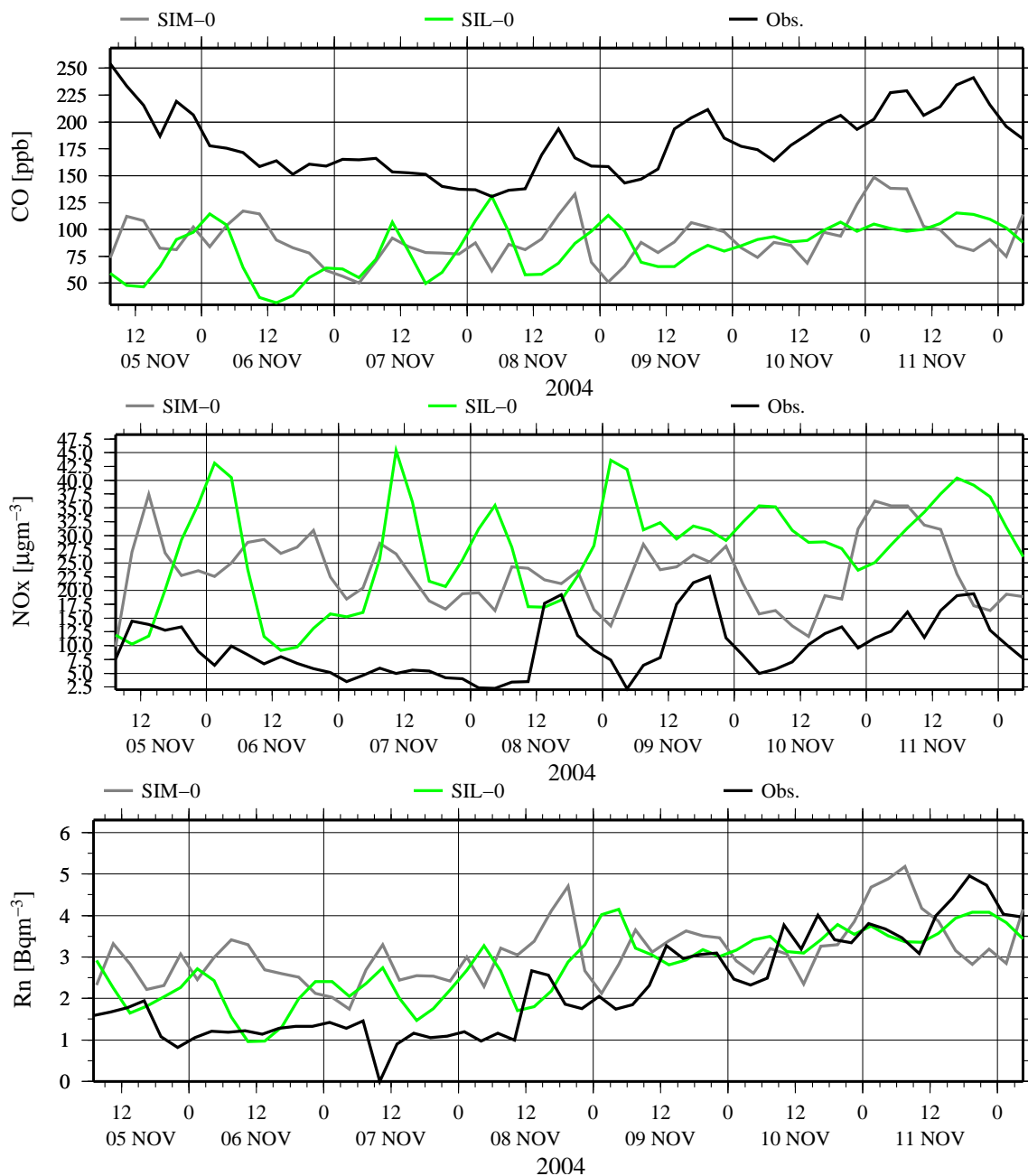


Abbildung 11.3: Vergleich von modellierten und beobachteten Konzentrationen am Schauinsland, Episode 3. Von oben nach unten: CO, NOx, Radon. Die Beobachtung ist in schwarz, die MM5-basierte Simulation in grau und die ECMWF-basierte Simulation in grün dargestellt.

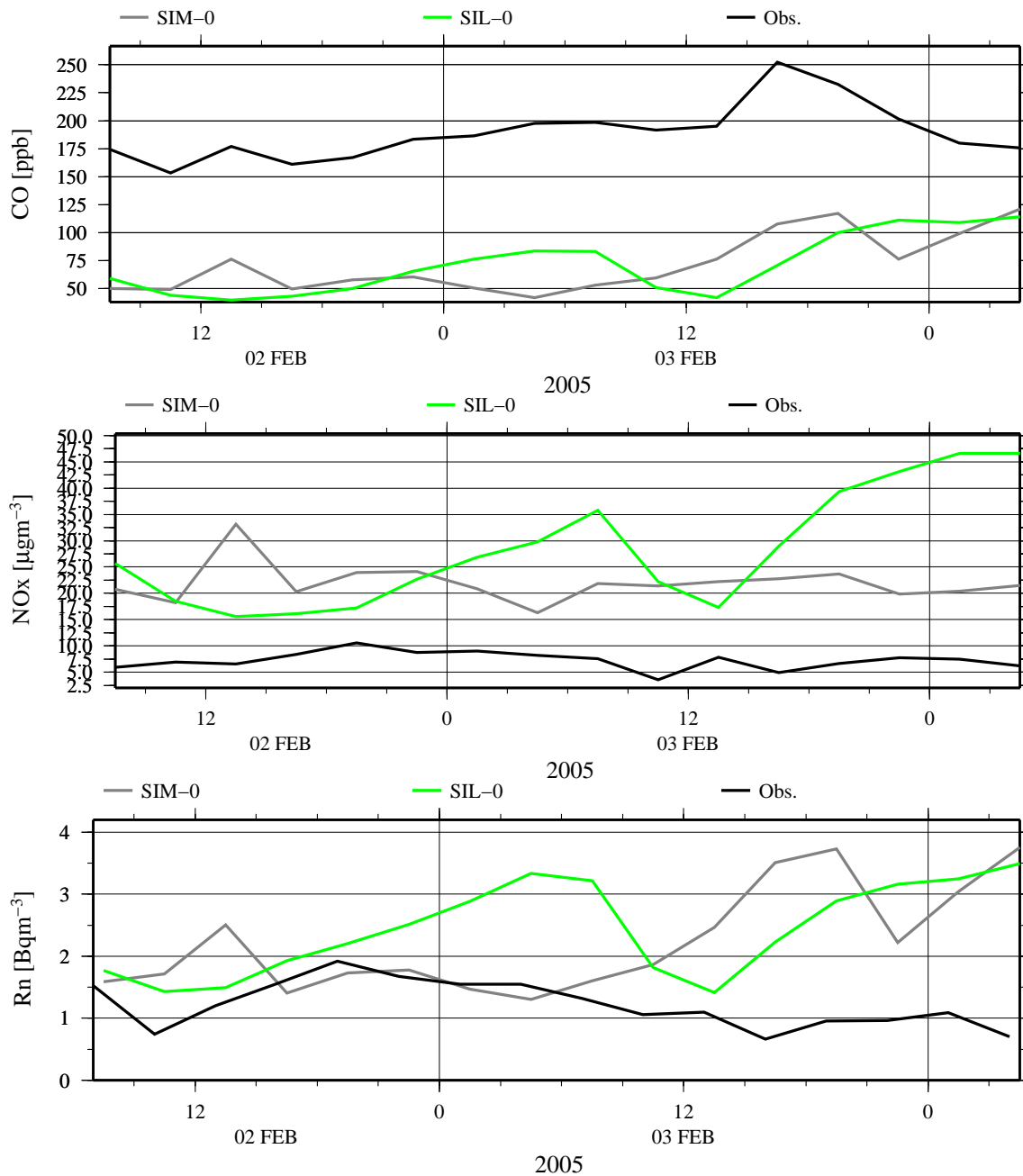


Abbildung 11.4: Vergleich von modellierten und beobachteten Konzentrationen am Schauinsland, Episode 4. Von oben nach unten: CO, NO_x, Radon. Die Beobachtung ist in schwarz, die MM5-basierte Simulation in grau und die ECMWF-basierte Simulation in grün dargestellt.

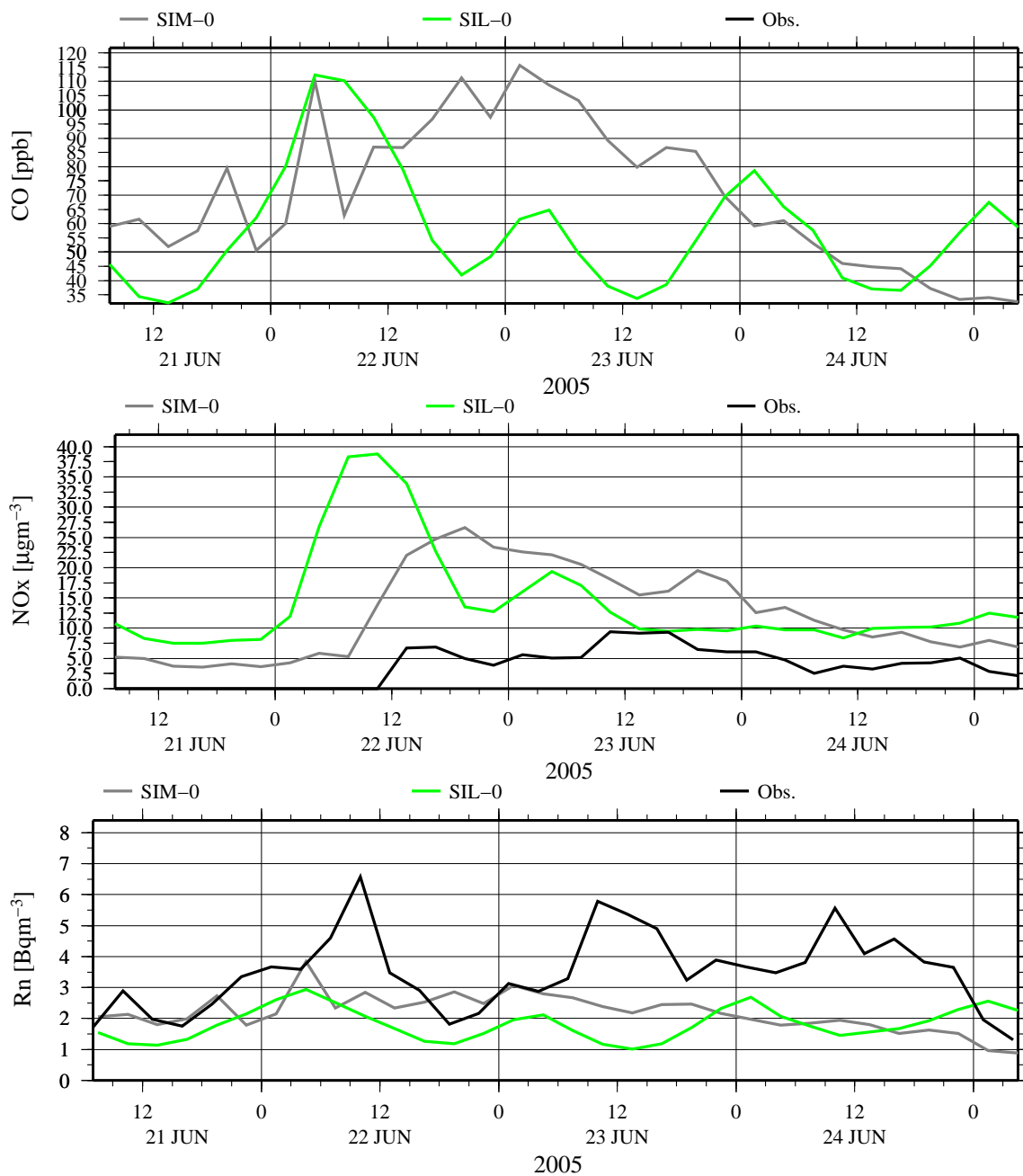


Abbildung 11.5: Vergleich von modellierten und beobachteten Konzentrationen am Schauinsland, Episode 5. Von oben nach unten: CO, NOx, Radon. Die Beobachtung ist in schwarz, die MM5-basierte Simulation in grau und die ECMWF-basierte Simulation in grün dargestellt.

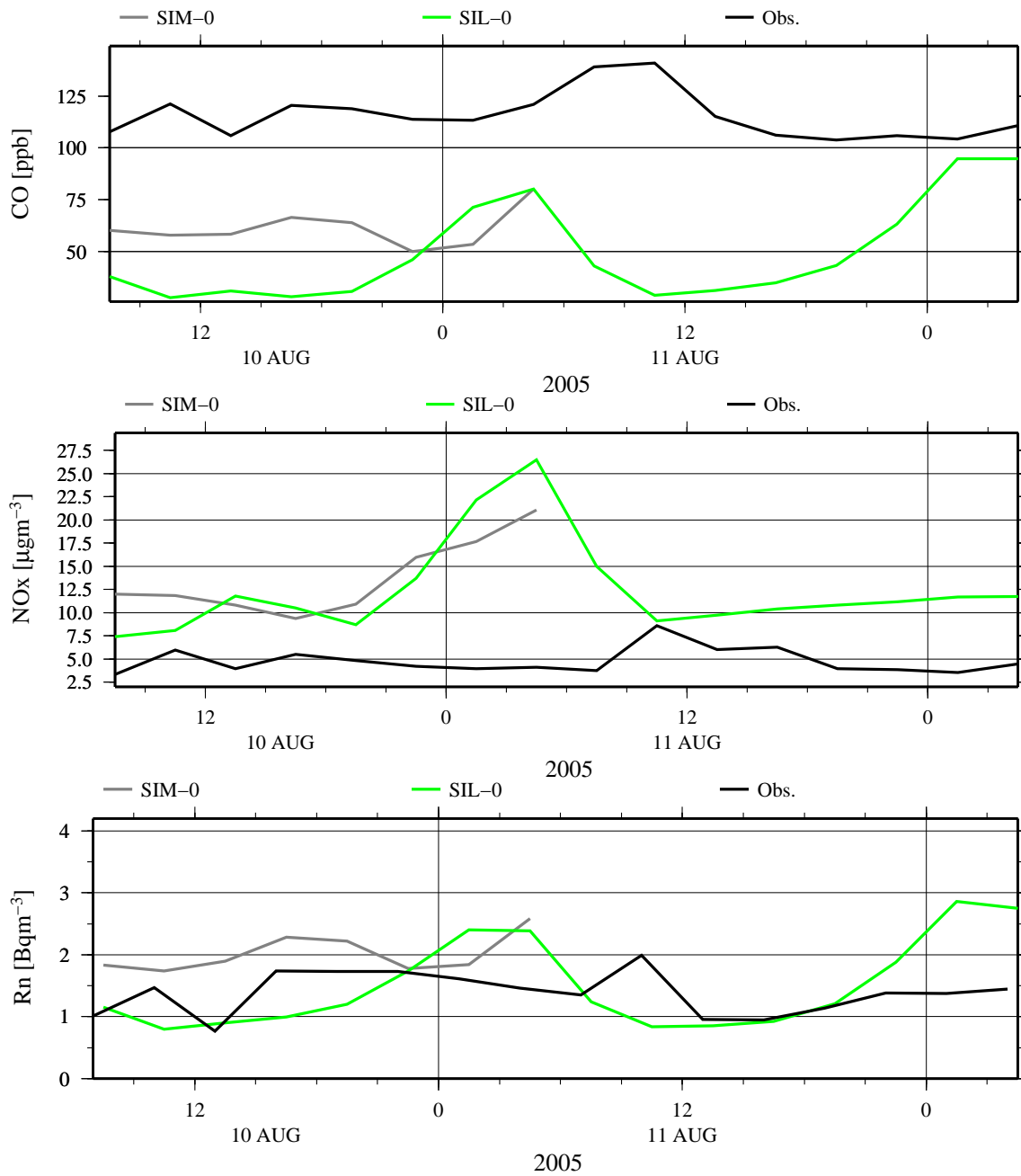


Abbildung 11.6: Vergleich von modellierten und beobachteten Konzentrationen am Schauinsland, Episode 6. Von oben nach unten: CO, NOx, Radon. Die Beobachtung ist in schwarz, die MM5-basierte Simulation in grau und die ECMWF-basierte Simulation in grün dargestellt.

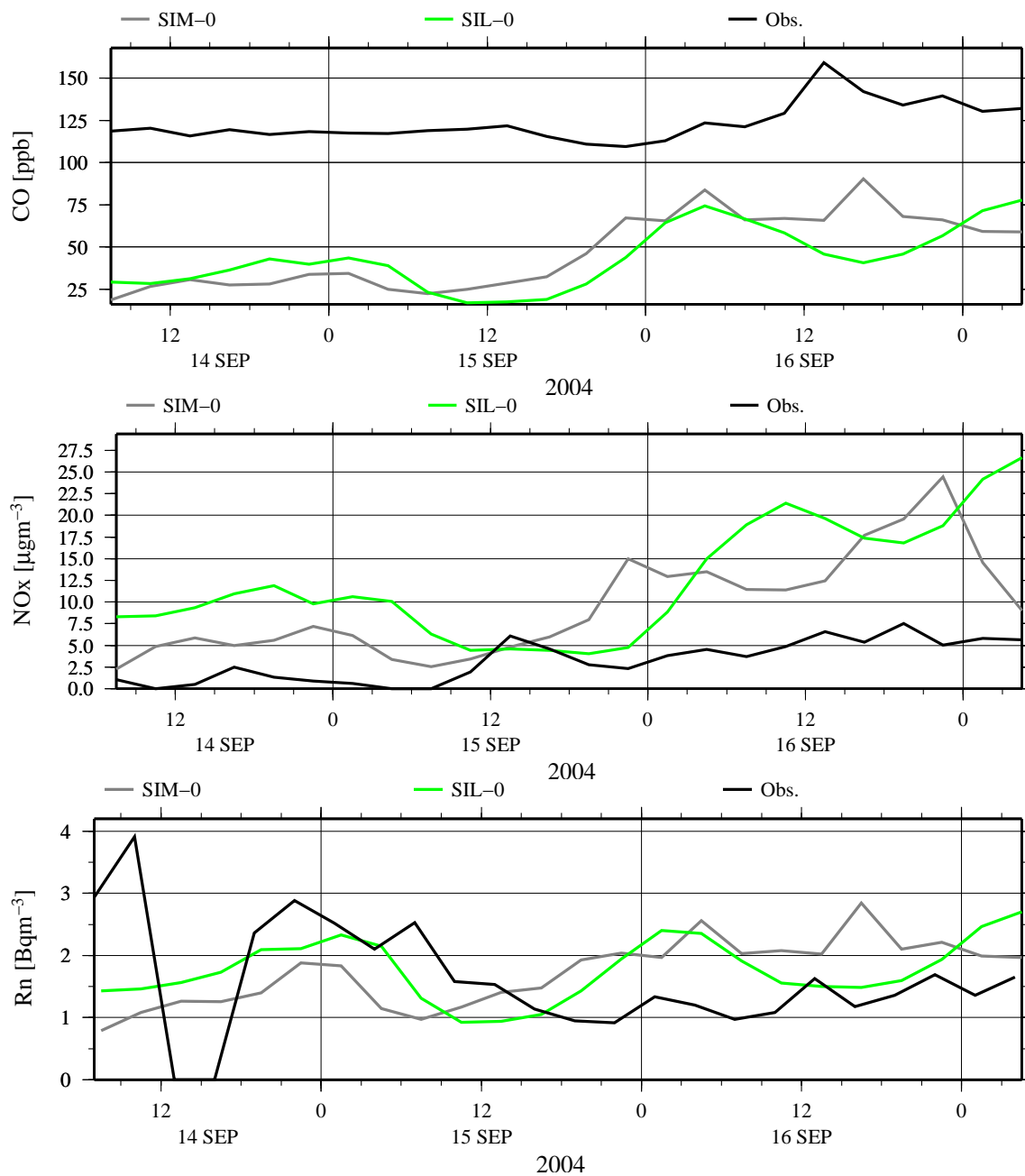


Abbildung 11.7: Vergleich von modellierten und beobachteten Konzentrationen am Schauinsland, Episode 7. Von oben nach unten: CO, NO_x, Radon. Die Beobachtung ist in schwarz, die MM5-basierte Simulation in grau und die ECMWF-basierte Simulation in grün dargestellt.

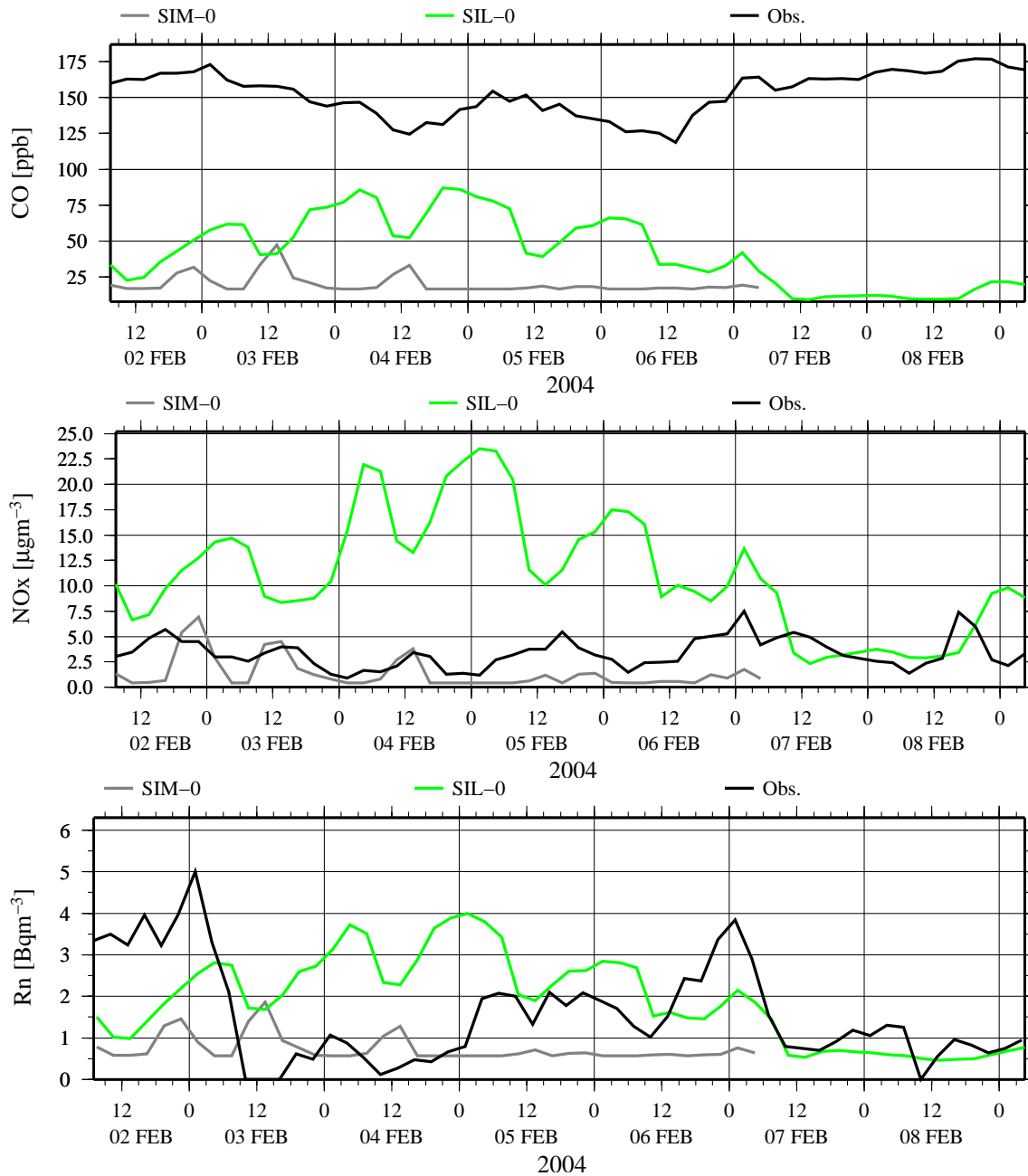


Abbildung 11.8: Vergleich von modellierten und beobachteten Konzentrationen am Schauinsland, Episode 8. Von oben nach unten: CO, NO_x, Radon. Die Beobachtung ist in schwarz, die MM5-basierte Simulation in grau und die ECMWF-basierte Simulation in grün dargestellt.

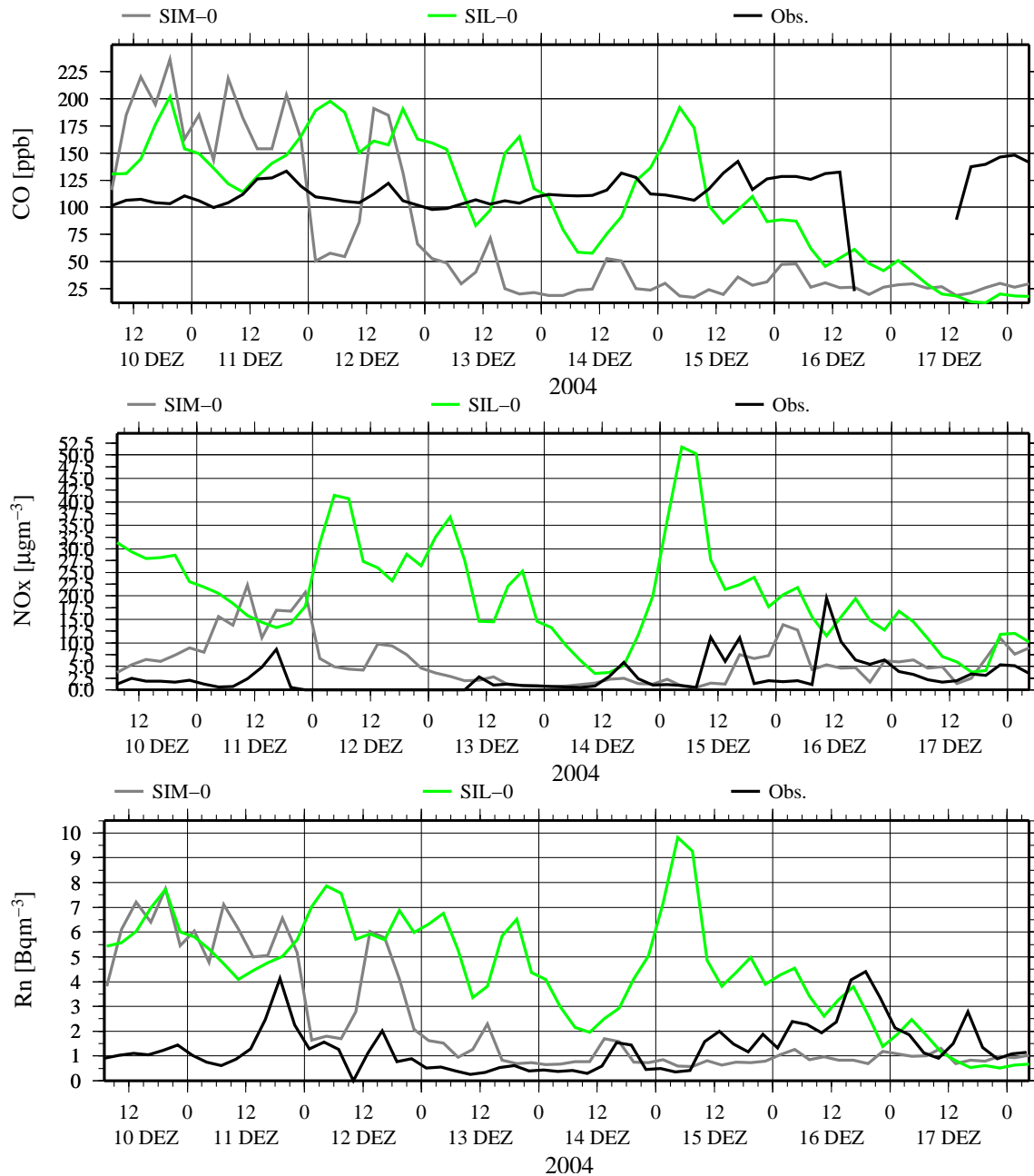


Abbildung 11.9: Vergleich von modellierten und beobachteten Konzentrationen am Schauinsland, Episode 9. Von oben nach unten: CO, NOx, Radon. Die Beobachtung ist in schwarz, die MM5-basierte Simulation in grau und die ECMWF-basierte Simulation in grün dargestellt.

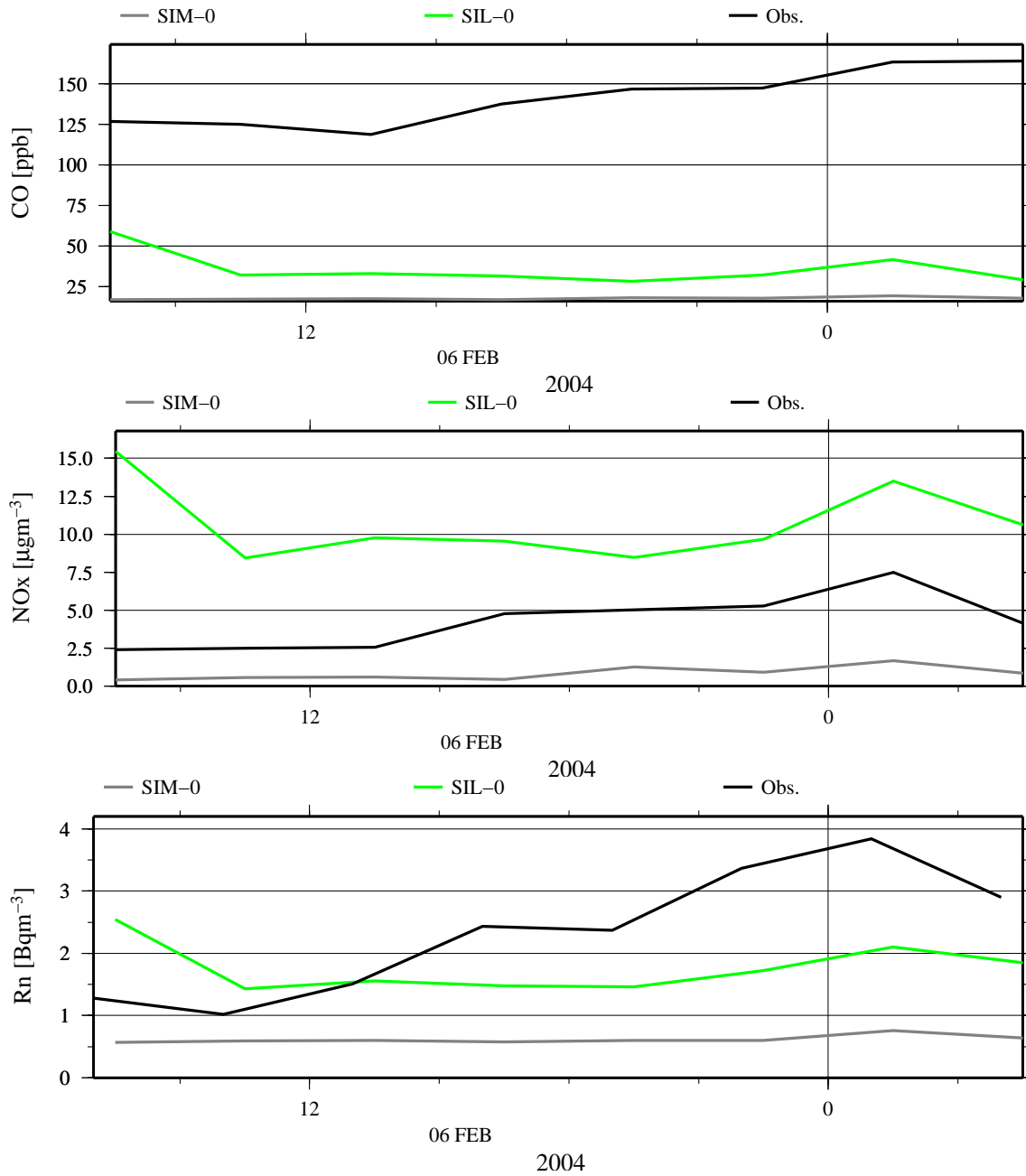


Abbildung 11.10: Vergleich von modellierten und beobachteten Konzentrationen am Schauinsland, Episode 10. Von oben nach unten: CO, NOx, Radon. Die Beobachtung ist in schwarz, die MM5-basierte Simulation in grau und die ECMWF-basierte Simulation in grün dargestellt.

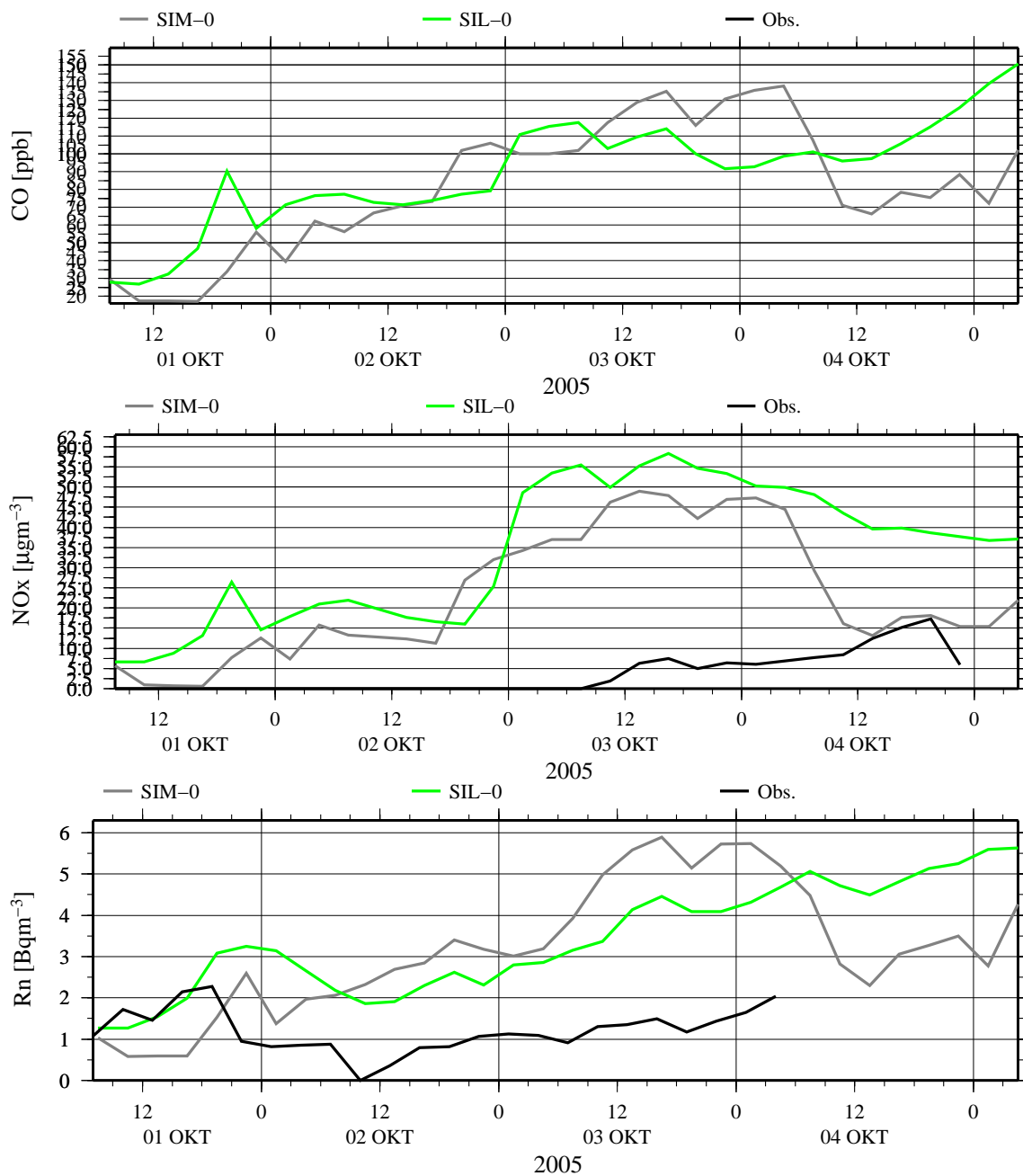


Abbildung 11.11: Vergleich von modellierten und beobachteten Konzentrationen am Schauinsland, Episode 11. Von oben nach unten: CO, NOx, Radon. Die Beobachtung ist in schwarz, die MM5-basierte Simulation in grau und die ECMWF-basierte Simulation in grün dargestellt.

Tabelle 11.1: Metriken für die Übereinstimmung von modellierten und beobachteten Konzentrationen am Schauinsland, Episode 1. Bei den CO-Daten wurden die Modellsimulationen mit dem systematischen Fehler korrigiert, um den fehlenden Hintergrund angenähert zu berücksichtigen.

	CO [ppb]		NOx [$\mu\text{g}\text{m}^{-3}$]		Rn [Bqm^{-3}]	
	FP-MM5	FP-EC	FP-MM5	FP-EC	FP-MM5	FP-EC
XMEAN	56.83	37.37	8.98	7.83	1.99	1.31
YMEAN	56.83	37.37	6.87	6.87	1.82	1.82
BIAS	0.00	0.00	2.11	0.96	0.17	-0.51
RB	0.00	0.00	0.86	0.39	0.18	-0.53
XVAR	413.75	302.08	12.25	10.98	0.32	0.32
YVAR	640.04	640.04	6.04	6.04	0.92	0.92
XSTD	20.34	17.38	3.50	3.31	0.56	0.57
YSTD	25.30	25.30	2.46	2.46	0.96	0.96
R	0.49	0.45	-0.14	0.14	0.06	0.42
RMSE	23.55	23.30	5.02	3.96	1.10	1.02
BCRMSE	23.55	23.30	4.55	3.84	1.08	0.89
SB	1.00	1.00	0.12	0.39	0.76	0.26
SR	0.71	0.63	0.38	0.52	0.41	0.55
STOT	0.85	0.82	0.25	0.46	0.58	0.40

Tabelle 11.2: Metriken für die Übereinstimmung von modellierten und beobachteten Konzentrationen am Schauinsland, Episode 2. Bei den CO-Daten wurden die Modellsimulationen mit dem systematischen Fehler korrigiert, um den fehlenden Hintergrund angenähert zu berücksichtigen.

	CO [ppb]		NOx [$\mu\text{g}\text{m}^{-3}$]		Rn [Bqm^{-3}]	
	FP-MM5	FP-EC	FP-MM5	FP-EC	FP-MM5	FP-EC
XMEAN	21.42	27.55	1.54	8.22	0.75	1.08
YMEAN	21.42	27.55	3.00	3.00	1.20	1.20
BIAS	0.00	0.00	-1.46	5.22	-0.45	-0.12
RB	0.00	0.00	-0.94	3.36	-1.82	-0.47
XVAR	153.20	110.63	2.43	8.66	0.13	0.10
YVAR	535.84	535.84	2.41	2.41	0.06	0.06
XSTD	12.38	10.52	1.56	2.94	0.36	0.32
YSTD	23.15	23.15	1.55	1.55	0.25	0.25
R	-0.80	-0.46	0.78	0.92	0.48	0.02
RMSE	33.90	29.51	1.79	5.46	0.56	0.42
BCRMSE	33.90	29.51	1.04	1.62	0.32	0.40
SB	1.00	1.00	0.10	0.01	0.03	0.31
SR	0.07	0.15	0.89	0.65	0.65	0.47
STOT	0.53	0.58	0.49	0.33	0.34	0.39

Tabelle 11.3: Metriken für die Übereinstimmung von modellierten und beobachteten Konzentrationen am Schauinsland, Episode 3. Bei den CO-Daten wurden die Modellsimulationen mit dem systematischen Fehler korrigiert, um den fehlenden Hintergrund angenähert zu berücksichtigen.

	CO [ppb]		NOx [$\mu\text{g m}^{-3}$]		Rn [Bq m^{-3}]	
	FP-MM5	FP-EC	FP-MM5	FP-EC	FP-MM5	FP-EC
XMEAN	88.87	81.37	22.85	26.90	3.04	2.72
YMEAN	88.87	81.37	12.27	12.27	2.20	2.20
BIAS	0.00	0.00	10.58	14.63	0.84	0.52
RB	0.00	0.00	1.56	2.16	0.69	0.43
XVAR	581.31	641.90	47.13	101.31	0.69	0.80
YVAR	3160.21	3160.21	46.07	46.07	1.47	1.47
XSTD	24.11	25.34	6.87	10.07	0.83	0.90
YSTD	56.22	56.22	6.79	6.79	1.21	1.21
R	0.61	0.45	0.33	0.16	0.52	0.71
RMSE	45.72	50.23	13.20	18.44	1.35	1.00
BCRMSE	45.72	50.23	7.90	11.23	1.05	0.85
SB	1.00	1.00	0.04	0.02	0.17	0.36
SR	0.42	0.41	0.67	0.50	0.66	0.78
STOT	0.71	0.70	0.35	0.26	0.42	0.57

Tabelle 11.4: Metriken für die Übereinstimmung von modellierten und beobachteten Konzentrationen am Schauinsland, Episode 4. Bei den CO-Daten wurden die Modellsimulationen mit dem systematischen Fehler korrigiert, um den fehlenden Hintergrund angenähert zu berücksichtigen.

	CO [ppb]		NOx [$\mu\text{g m}^{-3}$]		Rn [Bq m^{-3}]	
	FP-MM5	FP-EC	FP-MM5	FP-EC	FP-MM5	FP-EC
XMEAN	71.56	71.41	22.34	28.14	2.26	2.44
YMEAN	71.56	71.41	9.44	9.44	1.24	1.24
BIAS	0.00	0.00	12.91	18.70	1.02	1.20
RB	0.00	0.00	5.85	8.48	2.85	3.35
XVAR	602.40	616.32	14.00	105.91	0.65	0.49
YVAR	1300.91	1300.91	4.86	4.86	0.13	0.13
XSTD	24.54	24.83	3.74	10.29	0.80	0.70
YSTD	36.07	36.07	2.20	2.20	0.36	0.36
R	0.35	0.23	-0.17	-0.09	-0.67	-0.03
RMSE	35.94	38.83	13.72	21.55	1.48	1.44
BCRMSE	35.94	38.83	4.66	10.71	1.08	0.79
SB	1.00	1.00	0.00	0.00	0.01	0.01
SR	0.58	0.54	0.32	0.08	0.09	0.32
STOT	0.79	0.77	0.16	0.04	0.05	0.17

Tabelle 11.5: Metriken für die Übereinstimmung von modellierten und beobachteten Konzentrationen am Schauinsland, Episode 5. Bei den CO-Daten wurden die Modellsimulationen mit dem systematischen Fehler korrigiert, um den fehlenden Hintergrund angenähert zu berücksichtigen.

	CO [ppb]		NOx [$\mu\text{g}\text{m}^{-3}$]		Rn [Bqm^{-3}]	
	FP-MM5	FP-EC	FP-MM5	FP-EC	FP-MM5	FP-EC
XMEAN	71.41	71.41	12.92	14.76	2.23	1.86
YMEAN	---	---	5.01	5.01	3.43	3.43
BIAS	---	---	7.91	9.75	-1.20	-1.57
RB	---	---	2.00	2.47	-0.95	-1.24
XVAR	616.32	616.32	58.13	78.09	0.40	0.31
YVAR	---	---	15.60	15.60	1.60	1.60
XSTD	24.83	24.83	7.62	8.84	0.63	0.56
YSTD	---	---	3.95	3.95	1.27	1.27
R	---	---	0.72	-0.05	0.07	-0.11
RMSE	---	---	9.64	13.86	1.83	2.13
BCRMSE	---	---	5.51	9.85	1.38	1.44
SB	---	---	0.02	0.02	0.10	0.06
SR	---	---	0.57	0.26	0.34	0.24
STOT	---	---	0.30	0.14	0.22	0.15

Tabelle 11.6: Metriken für die Übereinstimmung von modellierten und beobachteten Konzentrationen am Schauinsland, Episode 6. Bei den CO-Daten wurden die Modellsimulationen mit dem systematischen Fehler korrigiert, um den fehlenden Hintergrund angenähert zu berücksichtigen.

	CO [ppb]		NOx [$\mu\text{g}\text{m}^{-3}$]		Rn [Bqm^{-3}]	
	FP-MM5	FP-EC	FP-MM5	FP-EC	FP-MM5	FP-EC
XMEAN	61.54	51.59	12.78	16.34	2.06	1.56
YMEAN	61.54	51.59	5.24	5.24	1.79	1.79
BIAS	0.00	0.00	7.54	11.10	0.26	-0.23
RB	0.00	0.00	3.62	5.32	0.25	-0.22
XVAR	66.57	757.31	19.93	98.68	0.08	0.44
YVAR	1340.66	1340.66	4.35	4.35	1.09	1.09
XSTD	8.16	27.52	4.46	9.93	0.29	0.66
YSTD	36.62	36.62	2.09	2.09	1.04	1.04
R	0.01	-0.74	0.42	-0.76	0.41	0.57
RMSE	37.40	59.84	8.57	16.06	1.00	0.89
BCRMSE	37.40	59.84	4.07	11.60	0.96	0.86
SB	1.00	1.00	0.01	0.00	0.61	0.68
SR	0.09	0.12	0.42	0.02	0.19	0.64
STOT	0.55	0.56	0.21	0.01	0.40	0.66

Tabelle 11.7: Metriken für die Übereinstimmung von modellierten und beobachteten Konzentrationen am Schauinsland, Episode 7. Bei den CO-Daten wurden die Modellsimulationen mit dem systematischen Fehler korrigiert, um den fehlenden Hintergrund angenähert zu berücksichtigen.

	CO [ppb]		NOx [$\mu\text{g}\text{m}^{-3}$]		Rn [Bqm^{-3}]	
	FP-MM5	FP-EC	FP-MM5	FP-EC	FP-MM5	FP-EC
XMEAN	47.55	43.89	9.53	12.21	1.73	1.77
YMEAN	47.55	43.89	4.08	4.08	1.71	1.71
BIAS	0.00	0.00	5.46	8.13	0.03	0.06
RB	0.00	0.00	1.91	2.85	0.03	0.06
XVAR	437.04	312.58	31.75	41.80	0.25	0.22
YVAR	1286.79	1286.79	8.15	8.15	0.93	0.93
XSTD	20.91	17.68	5.64	6.47	0.50	0.47
YSTD	35.87	35.87	2.85	2.85	0.97	0.97
R	0.11	-0.06	0.69	0.59	-0.29	0.03
RMSE	39.58	40.92	6.90	9.71	1.21	1.07
BCRMSE	39.58	40.92	4.22	5.31	1.21	1.06
SB	1.00	1.00	0.03	0.01	0.99	0.96
SR	0.42	0.30	0.55	0.43	0.24	0.32
STOT	0.71	0.65	0.29	0.22	0.61	0.64

Tabelle 11.8: Metriken für die Übereinstimmung für die Ausgabe gesampelt werden, ist mit 150 m für solche Fragestellungen vermutlich zu hoch. von modellierten und beobachteten Konzentrationen am Schauinsland, Episode 8. Bei den CO-Daten wurden die Modellsimulationen mit dem systematischen Fehler korrigiert, um den fehlenden Hintergrund angenähert zu berücksichtigen.

	CO [ppb]		NOx [$\mu\text{g}\text{m}^{-3}$]		Rn [Bqm^{-3}]	
	FP-MM5	FP-EC	FP-MM5	FP-EC	FP-MM5	FP-EC
XMEAN	21.83	55.21	1.73	14.12	0.80	2.43
YMEAN	21.83	55.21	4.41	4.41	1.85	1.85
BIAS	0.00	0.00	-2.68	9.71	-1.05	0.57
RB	0.00	0.00	-1.40	5.06	-0.81	0.44
XVAR	148.94	381.48	7.68	32.93	0.23	0.65
YVAR	2487.94	2487.94	3.68	3.68	1.68	1.68
XSTD	12.20	19.53	2.77	5.74	0.48	0.81
YSTD	49.88	49.88	1.92	1.92	1.29	1.29
R	-0.79	-0.37	0.36	-0.26	-0.02	-0.35
RMSE	60.01	59.96	3.83	11.69	1.74	1.84
BCRMSE	60.01	59.96	2.74	6.51	1.39	1.75
SB	1.00	1.00	0.05	0.00	0.13	0.34
SR	0.02	0.14	0.60	0.13	0.21	0.26
STOT	0.51	0.57	0.32	0.07	0.17	0.30

Tabelle 11.9: Metriken für die Übereinstimmung von modellierten und beobachteten Konzentrationen am Schauinsland, Episode 9. Bei den CO-Daten wurden die Modellsimulationen mit dem systematischen Fehler korrigiert, um den fehlenden Hintergrund angenähert zu berücksichtigen.

	CO [ppb]		NOx [$\mu\text{g}\text{m}^{-3}$]		Rn [Bqm^{-3}]	
	FP-MM5	FP-EC	FP-MM5	FP-EC	FP-MM5	FP-EC
XMEAN	70.82	106.91	5.90	19.85	2.29	4.36
YMEAN	70.82	106.91	3.18	3.18	1.30	1.30
BIAS	0.00	0.00	2.72	16.67	0.99	3.06
RB	0.00	0.00	0.71	4.38	1.04	3.22
XVAR	4525.83	3116.62	24.91	118.19	4.80	4.97
YVAR	8721.71	8721.71	14.50	14.50	0.91	0.91
XSTD	67.27	55.83	4.99	10.87	2.19	2.23
YSTD	93.39	93.39	3.81	3.81	0.95	0.95
R	0.18	0.31	0.04	-0.29	0.05	-0.20
RMSE	104.79	92.92	6.73	20.84	2.55	4.01
BCRMSE	104.79	92.92	6.16	12.51	2.34	2.60
SB	1.00	1.00	0.16	0.01	0.08	0.01
SR	0.53	0.51	0.48	0.14	0.28	0.21
STOT	0.77	0.75	0.32	0.07	0.18	0.11

Tabelle 11.10: Metriken für die Übereinstimmung von modellierten und beobachteten Konzentrationen am Schauinsland, Episode 11. Bei den CO-Daten wurden die Modellsimulationen mit dem systematischen Fehler korrigiert, um den fehlenden Hintergrund angenähert zu berücksichtigen.

	CO [ppb]		NOx [$\mu\text{g}\text{m}^{-3}$]		Rn [Bqm^{-3}]	
	FP-MM5	FP-EC	FP-MM5	FP-EC	FP-MM5	FP-EC
XMEAN	45.33	45.33	22.66	32.97	3.04	2.98
YMEAN	---	---	4.50	4.50	1.17	1.17
BIAS	---	---	18.16	28.47	1.88	1.82
RB	---	---	2.91	4.56	3.52	3.41
XVAR	808.06	808.06	261.24	296.73	3.09	1.18
YVAR	---	---	39.07	39.07	0.28	0.28
XSTD	28.43	28.43	16.16	17.23	1.76	1.08
YSTD	---	---	6.25	6.25	0.53	0.53
R	---	---	0.27	0.52	0.14	0.15
RMSE	---	---	24.00	32.17	2.58	2.14
BCRMSE	---	---	15.69	14.98	1.76	1.13
SB	---	---	0.01	0.00	0.01	0.01
SR	---	---	0.29	0.31	0.18	0.36
STOT	---	---	0.15	0.16	0.09	0.18

Tabelle 11.11: Überblick der wichtigsten Metriken für die Übereinstimmung von modellierten und beobachteten Konzentrationen am Schauinsland. Bei den CO-Daten wurden die Modellsimulationen mit dem systematischen Fehler korrigiert, um den fehlenden Hintergrund angenähert zu berücksichtigen.

CO

Episode	STOT		SB		SR		R	
	FP-MM5	FP-EC	FP-MM5	FP-EC	FP-MM5	FP-EC	FP-MM5	FP-EC
1	0.85	0.82	1.00	1.00	0.71	0.63	0.49	0.45
2	0.53	0.58	1.00	1.00	0.07	0.15	-0.80	-0.46
3	0.71	0.70	1.00	1.00	0.42	0.41	0.61	0.45
4	0.79	0.77	1.00	1.00	0.58	0.54	0.35	0.23
5	---	---	---	---	---	---	---	---
6	0.55	0.56	1.00	1.00	0.09	0.12	0.01	-0.74
7	0.71	0.65	1.00	1.00	0.42	0.30	0.11	-0.06
8	0.51	0.57	1.00	1.00	0.02	0.14	-0.79	-0.37
9	0.77	0.75	1.00	1.00	0.53	0.51	0.18	0.31
10	0.54	0.60	1.00	1.00	0.07	0.20	-0.42	-0.47
11	---	---	---	---	---	---	---	---
Mittel	0.66	0.67	1.00	1.00	0.32	0.33	-0.03	-0.07

NO_x

Episode	STOT		SB		SR		R	
	FP-MM5	FP-EC	FP-MM5	FP-EC	FP-MM5	FP-EC	FP-MM5	FP-EC
1	0.25	0.46	0.12	0.39	0.38	0.52	-0.14	0.14
2	0.49	0.33	0.10	0.01	0.89	0.65	0.78	0.92
3	0.35	0.26	0.04	0.02	0.67	0.50	0.33	0.16
4	0.16	0.04	0.00	0.00	0.32	0.08	-0.17	-0.09
5	0.30	0.14	0.02	0.02	0.57	0.26	0.72	-0.05
6	0.21	0.01	0.01	0.00	0.42	0.02	0.42	-0.76
7	0.29	0.22	0.03	0.01	0.55	0.43	0.69	0.59
8	0.32	0.07	0.05	0.00	0.60	0.13	0.36	-0.26
9	0.32	0.07	0.16	0.01	0.48	0.14	0.04	-0.29
10	0.14	0.16	0.07	0.02	0.20	0.30	-0.51	-0.37
11	0.15	0.16	0.01	0.00	0.29	0.31	0.27	0.52
Mittel	0.27	0.17	0.06	0.04	0.49	0.30	0.25	0.05

Radon

Episode	STOT		SB		SR		R	
	FP-MM5	FP-EC	FP-MM5	FP-EC	FP-MM5	FP-EC	FP-MM5	FP-EC
1	0.58	0.40	0.76	0.26	0.41	0.55	0.06	0.42
2	0.34	0.39	0.03	0.31	0.65	0.47	0.48	0.02
3	0.42	0.57	0.17	0.36	0.66	0.78	0.52	0.71
4	0.05	0.17	0.01	0.01	0.09	0.32	-0.67	-0.03
5	0.22	0.15	0.10	0.06	0.34	0.24	0.07	-0.11
6	0.40	0.66	0.61	0.68	0.19	0.64	0.41	0.57
7	0.61	0.64	0.99	0.96	0.24	0.32	-0.29	0.03
8	0.17	0.30	0.13	0.34	0.21	0.26	-0.02	-0.35
9	0.18	0.11	0.08	0.01	0.28	0.21	0.05	-0.20
10	0.15	0.62	0.14	0.98	0.16	0.27	-0.51	-0.46
11	0.09	0.18	0.01	0.01	0.18	0.36	0.14	0.15
Mittel	0.29	0.38	0.28	0.36	0.31	0.40	0.02	0.07

12 Ausblick

In einer Reihe von Aspekten kann das Thema der Untersuchung noch vertieft werden. Dazu gehören insbesondere die folgenden Punkte:

- Untersuchung der Frage, warum das MM5 an Schönwettertagen zu kalte Temperaturen liefert, und Einführung entsprechender Verbesserungen.
- FLEXPART-MM5 mit einem noch höher aufgelösten Ausgabegitter (etwa 1 bis 2 km Gitterweite) betreiben, um die Unterschiede in der unmittelbaren Umgebung zwischen Schauinsland und Freiburg noch klarer herauszuarbeiten.
- Voll quantitativer Vergleich sämtlicher Quell-Rezeptor-Felder der verschiedenen Modellansätze, in Abhängigkeit von Transportzeit, meteorologischen Größen, usw.
- Seit 2006 wurde das operationelle Datenassimilations- und Vorhersagesystem des ECMWF auf eine Auflösung von ca. $0,2^\circ$ verbessert. Es könnte studiert werden, welche orographisch beeinflussten Phänomene im Bereich Schauinsland damit erfasst werden. Allerdings ist anzumerken, dass der Datenextraktionsaufwand für die FLEXPART-Inputdaten in dieser Auflösung extrem hoch ist.
- Wiederholung der Vergleiche beobachteter und simulierter NO_x -Konzentrationen unter Verwendung eines hochaufgelösten Emissionskatasters (sofern es gelingt, diesen zu beschaffen). Wenn zusätzlich realistische Randbedingungen für CO gefunden werden, könnte diese Aufgabe auch für CO wiederholt werden.

Nachdem gezeigt werden konnte, dass zumindest bei bestimmten Wetterlagen die 1° -ECMWF-Felder für den Schauinsland nicht sehr repräsentativ sind, wäre für das Beobachtungsnetz der CTBTO eine systematischere Untersuchung der Repräsentativität dieser Daten für alle Stationen naheliegend. Dieser Aspekt könnte auch im Hinblick auf die Standortwahl der (wenigen) noch nicht im Detail festgelegten Stationen mehr berücksichtigt werden.

Bergstationen werden häufig als Standorte für Monitoringaktivitäten in Bezug auf Luftbeimengungen ausgewählt, da sie als Hintergrundstationen betrachtet werden, die weniger von lokalen Quellen beeinflusst sind. Beispiele dafür aus dem Alpenraum sind Jungfraujoch (Schweiz), Zugspitze und Hohenpeissenberg (Deutschland) und Sonnblick (Österreich). Allerdings sind solche Standorte aus Modellsicht weniger ideal. Die vorliegenden Ergebnisse sollten daher auch für das GAW-Programm der WMO (Global Atmospheric Watch der Weltorganisation für Meteorologie) von Interesse sein. Es bietet sich an, den hier entwickelten Satz von Werkzeugen auch auf Hochgebirgsstationen anzuwenden, die nächste Komplexitätsstufe im Vergleich zum Mittelgebirge des Schwarzwalds.

Veröffentlichungen

Berichte über das Forschungsvorhaben sind in Form von Postern and der European Geosciences Union (EGU) General Assembly 2006 und 2007 an die Fachöffentlichkeit gebracht worden:

Skomorowski, P.; Seibert, P. (2006): Orographic influence in measurements and nested simulations of CO and radionuclides in the BlackForest. European Geosciences Union General Assembly, 02–07 April 2006, Wien; Geophysical Research Abstracts, 8, 06151. Kurzabstract on-line unter <http://www.cosis.net/abstracts/EGU06/06151/EGU06-J-06151.pdf>.

Seibert, P.; Skomorowski, P. (2007): Comparison of receptor-oriented dispersion calculations based on ECMWF data and nested MM5 simulations for the Schauinsland monitoring station. European Geosciences Union General Assembly, 16–20 April 2007, Wien; Geophysical Research Abstracts, 9, 05421. Kurzabstract on-line unter <http://www.cosis.net/abstracts/EGU2007/05421/EGU2007-J-05421.pdf>.

Ausserdem wurde ein Vortrag bei der Veranstaltung „120 Jahre Sonnblick-Observatorium“ des Sonnblick-Vereins und der Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik gehalten: Petra Seibert und Paul Skomorowski (2006): Ausbreitungsrechnungen mit FLEXPART und MM5 an Bergstationen. 120 Jahre Sonnblick-Observatorium, 18.-19.11.2006, Salzburg.

Geplant ist die Veröffentlichung der wesentlichen Aspekte in einer wissenschaftlichen Zeitschrift in englischer Sprache.

Nicht zuletzt dient auch dieser Abschlussbericht und seine geplante Bereitstellung im WorldWideWeb der Verbreitung der Ergebnisse.

Literaturverzeichnis

- Anonymous (1998), The Transport of Air Pollutants over Complex Terrain (TRACT), September, 1992. *Atmospheric Environment*, **32** (7), Special Issue.
- Conen, F. und L. B. Robertson (2002), Latitudinal distribution of radon-222 flux from continents. *Tellus* **54B**, 127–133.
- Doms, G. und U. Schättler (1999), The non-hydrostatic limited-area model LM (Lokal-Modell) of DWD. Part I: Scientific documentation. Deutscher Wetterdienst, Geschäftsbereich Forschung und Entwicklung, Postfach 100465, 63004 Offenbach.
- Draxler, R. R. und G. D. Hess (1997), Description of the Hysplit_4 modeling system. NOAA, Tech Memo ERL ARL-224.
- Fiedler, F. (ed.) (1995), *Klimaatlas Oberrhein Mitte-Süd. Trinationale Arbeitsgemeinschaft Regio-Klima-Projekt REKLIP*. Vdf Hochschulverlag, Zürich.
- Fiedler, F., I. Bischoff-Gauß, N. Kalthoff, und G. Adrian (2000), Modeling of the transport and diffusion of a tracer in the Freiburg-Schauinsland area. *J. Geophys. Res.* **105**(D1), 1599–1610.
- Flesch, T. K. und J. D. Wilson (1995), Backward-time Lagrangian stochastic dispersion models and their application to estimate gaseous emissions. *J. Appl. Meteorol.* **34**, 1320–1333.
- Glaab, H., B. Fay, und I. Jacobsen (1998), Evaluation of the emergency dispersion model at the Deutscher Wetterdienst using ETEX data. *Atmos. Environ.* **32**(24), 4359–4366.
- Grell, G., J. Dudhia, und D. Stauffer (1994), A Description of the Fifth Generation Penn State/NCAR Mesoscale Model (MM5). NCAR, TN-398+STR.
- Gross, G. (1989), Numerical simulation of the nocturnal flow systems in the Freiburg area for different topographies. *Beitr. Phys. Atmosph.* **62**(1), 57–72.
- Hanna, S. R. und R. J. Paine (1989), Hybrid Plume Dispersion Model (HPDM) development and evaluation. *J. Appl. Meteorol.* **28**(2), 206–224.
- Kalthoff, N., V. Horlacher, U. Corsmeier, A. Volz-Thomas, B. Kolahgar, H. Geiß, M. Möllmann-Coers, und A. Knaps (2000), Influence of valley winds on transport and dispersion of airborne pollutants in the Freiburg-Schauinsland area. *J. Geophys. Res.* **105**(D1), 1585–1597.
- Klug, W., G. Graziani, G. Grippa, D. Pierce, und C. Tassone (1992), *Evaluation of Long Range Atmospheric Transport Models Using Environmental Radioactivity Data from the Chernobyl Accident: The ATMES Report*. Elsevier Applied Science, London, 366 pp.

- Larsen, S., F. Fiedler, und P. Borrell (eds.) (2000), *Exchange and Transport of Air Pollutants over Complex Terrain and the Sea*, vol. 9 of *Transport and Chemical Transformation of Pollutants in the Troposphere*. Springer, Berlin, 357 pp.
- Levin, I., M. Born, M. Cuntz, U. Langendörfer, S. Mantsch, T. Naegler, M. Schmidt, A. Varlagin, S. Verclas, und D. Wagenbach (2002), Observations of atmospheric variability and soil exhalation rate of radon-222 at a Russian forest site: Technical approach and deployment for boundary layer studies. *Tellus* **54B**, 462–475.
- Malberg, H. und G. Bökens (1984), Orographische Einflüsse auf die Strömungsverhältnisse im südlichen Oberrheingraben. *Meteorologische Rundschau* **37**(1), 11–15.
- Mosca, S., R. Bianconi, R. Bellasio, G. Graziani, und W. Klug (1998a), *ATMES II – Evaluation of long-range dispersion models using data of the 1st ETEX release*. EUR 17756 EN, Office for Official Publications of the European Communities, L-2985 Luxembourg, 459 pp. + app.
- Mosca, S., G. Graziani, W. Klug, R. Bellasio, und R. Bianconi (1998b), A statistical methodology for the evaluation of long-range atmospheric dispersion models: an application to the ETEX exercise. *Atmos. Environ.* **32**(24), 4307–4327.
- Schmidt, M., R. Graul, H. Sartorius, und I. Levin (2003), The Schauinsland CO₂ record: 30 years of continental observations and their implications for the variability of the European CO₂ budget. *J. Geophys. Res.* **108**(D19), 4619; doi:10.129/2002JD003085.
- Seibert, P. und A. Frank (2004), Source-receptor matrix calculation with a Lagrangian particle dispersion model in backward mode. *Atmos. Chem. Phys.* **4**, 51–63.
- Seinfeld, J. H. und S. N. Pandis (1998), *Atmospheric Chemistry and Physics*. Wiley, New York, 1326 pp.
- Smiatek, G. (2004), 4.2 Land cover and topography mapping. In: R. Friedrich und S. Reis (eds.), *Emissions of air pollutants – Measurements, calculations and Uncertainties. GENEMIS. EUROTRAC-2 Subproject Final Report*, pp. 282–291, Springer, Berlin–Heidelberg.
- Stohl, A., C. Forster, A. Frank, P. Seibert, und G. Wotawa (2005), Technical note: The Lagrangian particle dispersion model FLEXPART version 6.2. *Atmos. Chem. Phys.* **5**, 2461–2474.
- Stohl, A., M. Hittenberger, und G. Wotawa (1998), Validation of the Lagrangian particle dispersion model Flexpart against large-scale tracer experiment data. *Atmos. Environ.* **32**(24), 4245–4264.
- Stohl, A. und P. James (2003), A 3-d backward trajectory database for the TOR-2 project provided by the Lagrangian trajectory model FLEXTRA. In: A. Lindskoog (ed.), *TOR-2. Tropospheric Ozone Research. Final Report*, pp. 144–145, Eurotrac-2 International Scientific Secretariate, GSF, Munich.
- Stohl, A., G. Wotawa, P. Seibert, und H. Kromp-Kolb (1995), Interpolation errors in wind fields as a function of spatial and temporal resolution and their impact on different types of kinematic trajectories. *J. Appl. Meteorol.* **34**, 2149–2165.

- Tamm, H.-P. (2000), Modellierung von Flächendatensätzen der Oberflächentemperatur, Strahlungsbilanz und Kaltluftproduktion in Strahlungsnächten. Dissertation an der Geowissenschaftlichen Fakultät, Freiburg i. Br., http://www.freidok.uni-freiburg.de/volltexte/26/pdf/26_1.pdf, 153 pp.
- Taylor, K. E. (2001), Summarizing multiple aspects of model performance in a single diagram. *J. Geophys. Res.* **106**(D7), 7183–7192.
- Volz-Thomas, A., H. Geiß, und N. Kalthoff (2000), Schauinsland Ozone Precursor Experiment (SLOPE96): scientific background and main results. *J. Geophys. Res.* **105**(D1), 1553–1561.
- Zängl, G. (2002), An improved method for computing horizontal diffusion in a sigma-coordinate model and its application to simulations over mountainous topography. *Mon. Wea. Rev.* **130**, 1423–1432.
- Zängl, G. (2003), A generalized sigma coordinate system for the MM5. *Mon. Wea. Rev.* **131**, 2875–2884.