



PAUL SCHERRER INSTITUT



PSI Bericht Nr. 02-17

Juli 2002

ISSN 1019-0643

PSI-02-17

Forschungsbereich Allgemeine Energie  
Labor für Atmosphärenchemie

---

Projekt «WINDBANK mittleres Aaretal»

Analyse, Diagnose und Prognose der Wind-  
verhältnisse um das Kernkraftwerk Gösgen

W.K. Graber und M. Tinguely

---

# INHALTSVERZEICHNIS

<b>Zusammenfassung</b>	<b>1</b>
<b>1. Einleitung</b>	<b>2</b>
<b>2. Analyse</b>	<b>3</b>
2.1 Messkampagne	3
2.2 Klassifizierungsverfahren	7
2.3 Dreidimensionale Windfelder und Veranschaulichung	24
2.4 Qualitätskriterien zur Unterscheidbarkeit der Klassen	50
<b>3. Diagnose</b>	<b>53</b>
3.1 Diagnose aktueller Windfelder aufgrund von Messwerten	53
3.2 Diagnose aufgrund von Messwerten und Modelldaten	54
<b>4. Charakterisierung der Windfeldklassen</b>	<b>55</b>
<b>5. Parametrisierung der Turbulenz</b>	<b>59</b>
<b>6. Prognose und on-line Betrieb</b>	<b>64</b>
<b>7. Ausblick</b>	<b>66</b>
<b>Verdankungen</b>	<b>67</b>
<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>67</b>

PLEASE BE AWARE THAT  
ALL OF THE MISSING PAGES IN THIS DOCUMENT  
WERE ORIGINALLY BLANK

## Zusammenfassung

Die vorliegende Studie stellt die Windverhältnisse im topographisch komplexen Gebiet im mittleren Aaretal rund um das Schweizerische Kernkraftwerk Gösgen dar und stellt aus dieser Kenntnis ein Instrument bereit, das im Falle eines Reaktorstörfalls der Notfallschutzplanung als Entscheidungshilfe dient.

Die Windverhältnisse wurden zunächst während einer begrenzten Zeitdauer von 4 Monaten mit temporär eingesetzten Windstationen und Messgeräten zur Bestimmung der vertikalen Windprofile erfasst. Die Daten dieser Feldmesskampagne wurden zusammen mit den Messungen permanenter Windmessgeräte und den Daten eines hochauflösenden Wetterprognose-Modells kombiniert und führten zu einer lückenlosen Windinformation an 71 Punkten in einem Gebiet mit etwa 50 km Durchmesser rund um Gösgen. Gestützt auf die Erfahrungen aus Vorläuferprojekten wurden diese Daten mit Hilfe einer Clusteranalyse in 12 Klassen eingeteilt. Diese Klassen repräsentieren die im Gebiet immer wieder auftretenden typischen Windverhältnisse. Zur Bestimmung der zur aktuellen Zeit herrschenden Windfeldklasse werden zwei unterschiedliche Diagnoseverfahren angewendet: Das erste Verfahren stützt sich einzig auf die aktuellen Messungen der permanenten meteorologischen Stationen, beim zweiten Verfahren werden zusätzlich zu diesen Messwerten noch die Daten des Wetterprognosemodells hinzugezogen. Bei diesem zweiten Verfahren werden die an den Orten der temporären Stationen herrschenden Winde mit Hilfe der multivariaten linearen Regression rekonstruiert. Dank einer on-line Akquisition der aktuellen Windwerte von den permanenten Stationen via Telefonleitung und der Daten des Wetterprognosemodells via Computer-Link stehen die Winddaten kurze Zeit nach ihrer Erfassung zur Rekonstruktion der fehlenden Messwerte bereit. Aus den nun wiederum an 71 Orten bekannten Windwerten lässt sich die aktuell herrschende Windklasse bestimmen. Die Studie zeigt, dass die mittels Rekonstruktion diagnostizierte Windfeldklasse mit einer Wahrscheinlichkeit von 95% die herrschende Windfeldklasse ergibt. In einem weiteren Schritt wird die Prognoseleistung des Wetterprognosemodells herangezogen, um durch Rekonstruktion sämtlicher Messwerte aus den Modelldaten die Windwerte der 71 Messpunkte zu generieren. Damit lässt sich eine über die kommenden 24 Stunden laufende Abfolge prognostizierter Windfeldklassen bestimmen. Die Untersuchung zeigt, dass die so prognostizierte Windfeldklasse mit 76% Wahrscheinlichkeit eintritt. Die aktuell errechneten Windfeldklassen werden schliesslich dazu benützt, um über den Zeitraum von 48 Stunden (24 Stunden vor und 24 Stunden nach der aktuellen Zeit) eine Ausbreitungsrechnung zur Illustration der Dispersion einer fiktiven Quelle am Ort des Kernkraftwerks Gösgen graphisch darzustellen. Die Ausbreitungsrechnung stützt sich dabei auf die den Windfeldklassen zugehörigen 3-dimensionalen Windfelder, die in einer Datenbank bereit sind. Dadurch wird die zeitaufwendige on-line-Berechnung von Windfeldern erspart, die fiktive Schadgaswolke kann also innerhalb weniger Minuten eingesehen werden. Da die Ausbreitungsrechnung stark von der aktuell herrschenden Turbulenzaktivität der Atmosphäre abhängt, werden entsprechende Turbulenzparameter aus den Messdaten der permanent zur Verfügung stehenden Stationen abgeleitet. Der Ansatz zur Turbulenzparametrisierung wird in dieser Studie detailliert dargestellt.

# 1 Einleitung

Im Rahmen des Projektes "Windbank mittleres Aaretal", einem Auftrag des Bundesamtes für Energiewirtschaft der Schweiz an das Paul Scherrer Institut, wurden im Gebiet um Gösgen im zweiten Halbjahr 1999 Windmessungen durchgeführt. Das Projekt "Windbank" hat zum Ziel, die regionale Windsituation über alle in diesem Zeitraum auftretenden Wetterlagen zu erfassen und diese nach meteorologischen Gesichtspunkten zu klassifizieren. Diese für die Gegend typischen Windklassen werden künftig dazu benutzt, die aktuelle Windsituation mit Hilfe eines on-line erfassten Datensatzes von Routinestationen zu diagnostizieren. Ferner wird die Windsituation durch Verknüpfung der Windklassen mit einem Wetterprognosemodell für die nächsten 24 Stunden prognostiziert. Die Windfeldklassen bilden dadurch eine wesentliche Grundlage für die Notfallschutzplanung bei radioaktiven Störfällen. In vorangehenden Projekten wurde dieses Verfahren mit Erfolg für die aktuelle Diagnose in den Gebieten um Basel (siehe Kaufmann und Weber, 1996), im unteren Aaretal (siehe Graber und Bürki, 1996) und um Mühleberg bei Bern (siehe Graber und Tinguely, 1999 und Graber and Gassmann, 2000) angewandt. Die Festlegung der Windsituation in wenigen für ein Gebiet typischen Klassen erwies sich in diesen Projekten als geeignetes Instrument für die Notfallschutzplanung.

Das erste Projekt dieser Art für die Umgebung von Basel wurde ausgelöst durch den Chemieunfall bei Schweizerhalle im November 1986: Im Projekt "MISTRAL" (Modell für Immissions-Schutz bei Transport und Ausbreitung von Luftfremdstoffen) im Rahmen von REKLIP (Regionales Klimaprojekt der Oberrheinischen Universitäten) wurde diese Art der Klassifikation von Windfeldern erstmals mit Erfolg realisiert. Später folgten Projekte in den Gebieten um die Kernkraftwerke Beznau, Leibstadt und Mühleberg.

Die lokalen Windverhältnisse in komplexer Topographie stellen für die Diagnose der Ausbreitung von Luftfremdstoffen ein wesentliches Problem dar, da die Ausbreitungsbedingungen von grosser Inhomogenität sind. Der lokale Wind kann nicht aus Wetterkarten oder aus den verfügbaren Routinemesstationen gelesen werden. Das vorliegende Verfahren stützt sich auf das Vorgehen der Projekte im Unteren und oberen Aaretal (siehe Graber und Bürki, 1996, und Graber und Tinguely, 1999). Darin wird die Windsituation in einer Gegend mit stark gegliederter Topographie in eine begrenzte Zahl typischer und immer wiederkehrender Windfelder klassiert. Diese Klassierung basiert auf der **Analyse** der oben angesprochenen Feldmesskampagne im Gebiet um Gösgen, dem Standort des Kernkraftwerks.

Aufgrund dieser Klassierung wird als Hilfe für die Notfallschutzplanung eine **Diagnose** der aktuellen Windsituation durch Verknüpfung der Windklassierung mit den on-line erfassten Messtationen der MeteoSchweiz durchgeführt. Durch laufende Aktualisierung der Klassenabfolge der vergangenen 24 Stunden wird eine Berechnung der Ausbreitung einer fiktiven Quelle am Ort des Kernkraftwerkes Gösgen durchgeführt und steht als Abfolge graphischer Darstellungen zur Illustration der Ausbreitungssituation zur Verfügung. Durch die weitere Verknüpfung der Windfeldklassierung mit dem räumlich hochaufgelösten Wetterprognosemodell „SM“ der MeteoSchweiz wird in diesem Projekt erstmals eine **Prognose** der Windklassenabfolge für die nächsten 24 Stunden realisiert.

Der vorliegende Bericht gliedert sich entsprechend der obigen Darstellung in eine Beschreibung der Analyse, der Diagnose und der Prognose der Windfeldklassen. In Anlehnung an den Bericht zum Projekt „Windbank oberes Aaretal“ (siehe Graber und Tinguely, 1999) wird im Analyse-Kapitel zunächst die Messkampagne, das Klassifikationsverfahren und die Windfeld- mit anschliessender Dispersionsrechnung dargestellt. Die Beschreibung des Diagnoseverfahrens umfasst die Darstellung der erzielten Genauigkeit und es wird die Separierungsqualität der Klassen aufgezeigt.

Es folgt eine Abschätzung der Turbulenzparameter und deren Einbindung in die Windfeld- und Ausbreitungsrechnung. Im Prognose-Kapitel wird das Vorgehen zur Identifikation von Windfeldklassen aus dem „SM“ und die Prognosequalität beleuchtet. Zudem wird ein testweise installierter On-line-Betrieb der Diagnose und Prognose beschrieben. In einem **Ausblick** werden schliesslich die für einen operationellen Betrieb notwendigen Schritte zusammengestellt.

## 2 Analyse

### 2.1. Messkampagne

Für die Messkampagne vom 1. Juli bis 31. Oktober 1999 wurden 22 temporäre meteorologische Messstationen im Gebiet um das Kernkraftwerk Gösgen aufgestellt. Die Standorte sind mit den zugehörigen Stationsnummern von 1 bis 22 in Figur 1 zusammen mit den permanenten Stationen über der Topographie eingezeichnet.

Im Folgenden werden die insgesamt 22 Standorte der temporären PSI-Stationen aufgeführt, die Nummern beziehen sich auf die geographische Karte in Figur 1. Ferner sind die Koordinaten im Schweizer Kilometernetz, die topographische Höhe in Metern über Meer und die Höhe der Messsensoren in Metern über Grund angegeben:

1	Kölliken	645.050, 243.400, 427, 10
2	Benkerjoch	644.900, 253.200, 670, 10
3	Erlinsbach	643.100, 251.200, 489, 10
4	Schafmatt	638.400, 252.200, 812, 10
5	Lostorf	639.500, 248.300, 460, 10
6	Hauenstein	631.800, 247.900, 718, 10
7	Ober Schloss	623.900, 242.500, 886, 10
8	Gunzgen	629.200, 241.000, 426, 10
9	Wangen b.Olten	633.600, 243.300, 418, 10
10	Rothrist	632.100, 239.200, 405, 10
11	Mumenthal	626.500, 231.600, 455, 10
12	St. Urban	630.600, 230.500, 490, 10
13	Oberer Sennhof	634.600, 233.700, 495, 10
14	Altachen	638.800, 235.800, 440, 10
15	Walterswil	638.900, 241.100, 427, 10
16	Bottenwil	643.400, 236.800, 574, 10
17	Attelwil	646.300, 234.300, 476, 10
18	Kirchrued	650.700, 237.800, 623, 10
19	Oberkulm	652.700, 238.200, 508, 10
20	Egliswil	655.900, 243.900, 442, 10
21	Dottikon	659.625, 248.825, 420, 10
22	Häggligen	662.500, 249.100, 539, 10

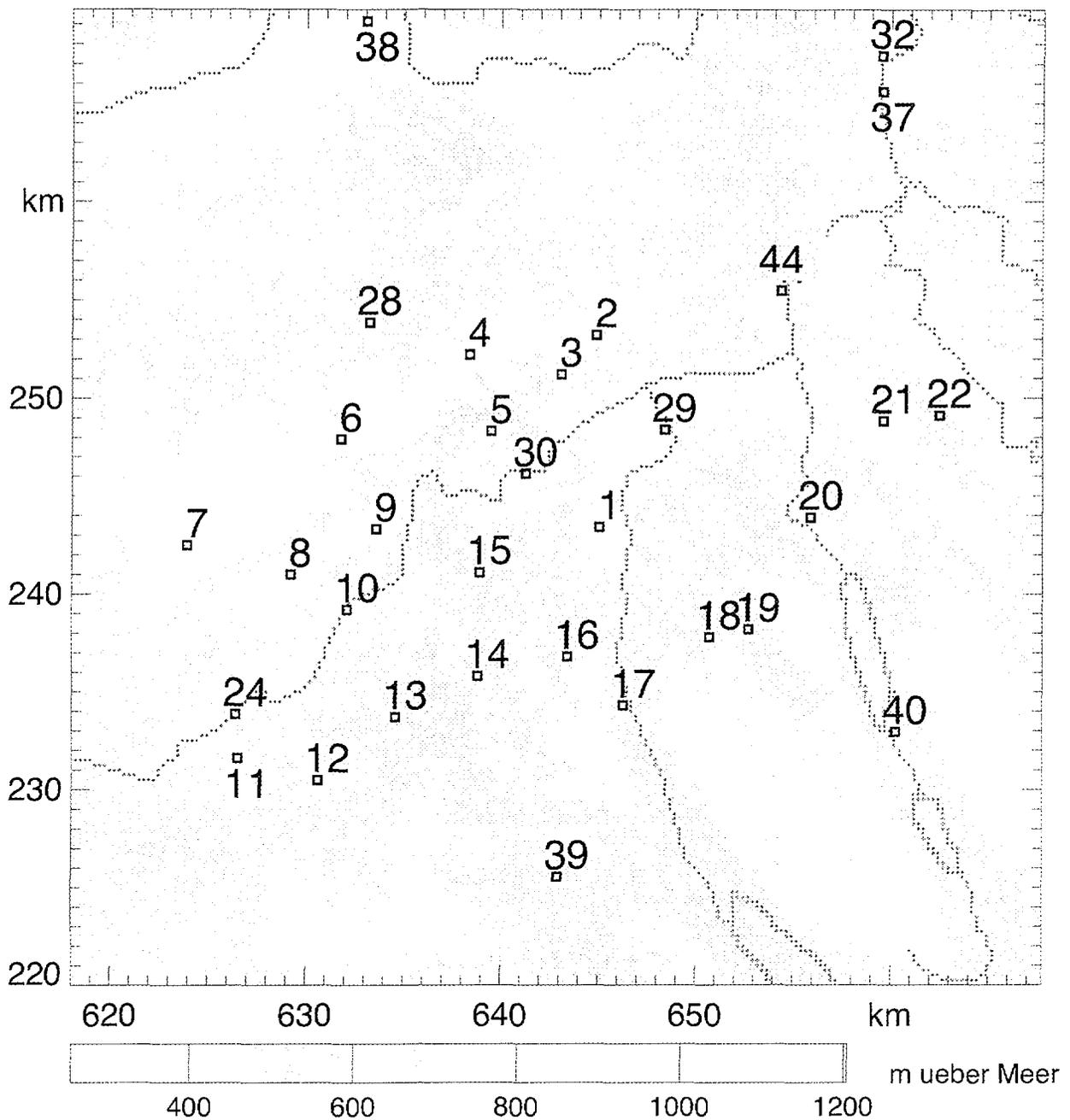
In Ergänzung zu diesen Messwerten der temporären Stationen standen die Daten von 21 permanenten Stationen der Routinenetze ANETZ und ENET der MeteoSchweiz zur Verfügung. Ihre Koordinaten sind in der folgenden Tabelle zusammengestellt, der Kürzel vor der Ortsbezeichnung weist auf die in den Figuren 4 und 5 verwendeten Abkürzungen hin:

23	Napf (Nap)	638.138, 206.075, 1406, 10
24	Wynau	626.400, 233.860, 422, 11.7
25	St. Chrischona (StC)	618.700, 269.020, 489, 253
26	Chasseral (Cha )	571.290, 220.320, 1599, 45
27	Grenchen (Gre)	598.000, 225.700, 430, 10
28	Rünenberg	633.250, 253.840, 610, 15
29	Buchs-Suhr	648.400, 248.380, 387, 13.5
30	Gösgen unten	641.260, 246.130, 380, 10
31	Gösgen oben	641.260, 246.130, 380, 110
32	Beznau unten (Bez)	659.500, 267.400, 327, 10
33	Beznau oben (Bez)	659.500, 267.400, 327, 70
34	Leibstadt unten (Lei)	656.350, 272.100, 341, 10
35	Leibstadt oben (Lei)	656.350, 272.100, 341, 110
36	Lägern (Lae)	672.252, 259.461, 842, 26.4
37	PSI	659.450, 265.650, 334, 70
38	Möhlin (Moe)	633.050, 269.150, 340, 10
39	Egolzwil	642.900, 225.550, 522, 10
40	Mosen	660.250, 232.950, 453, 18
41	Uetliberg (Uet)	679.450, 245.050, 854, 189
42	Bantiger (Ban)	606.850, 202.975, 942, 59
43	Cham (Chm)	677.825, 226.880, 440, 10

In Schinznach wurde ein SODAR platziert. SODAR steht für „SOund Detection And Ranging“, wobei mit Hilfe von vertikal ausgesandten Schallwellen und der Messung der Dopplerverschiebung der Rückstreuung die 3 Dimensionen des Windvektors in verschiedenen Höhen gemessen werden. Die mittels SODAR gewonnenen Windprofile sind in den Datensatz als temporäre Messungen so eingearbeitet, dass je die Mittelwerte über die Höhenschichten von 0 bis 100 m, von 100 bis 200 m und von 200 bis 300 m als getrennte „Stationen“ aufgeführt werden:

44	Sodar 1 Schinznach unten	654.375, 255.450, 347, 50
45	Sodar 1 Schinznach Mitte	654.375, 255.450, 347, 150
46	Sodar 1 Schinznach oben	654.375, 255.450, 347, 250

Um die mit den obigen Winddaten gewonnenen Informationen durch die weiträumigen meteorologischen Verhältnisse zu ergänzen, wurde der Datensatz des Schweizerischen Prognose-Modells „SM“ herangezogen. Diese Modelldaten charakterisieren die aktuelle Wetterlage und deren daraus rechnerisch ableitbare nahe Zukunft. Da die Messwerte aller meteorologischen Stationen in Europa darin verarbeitet und zu einem engmaschigen Gitter umgerechnet wurden, ist damit der atmosphärische Zustand in idealer Weise charakterisiert. Das SM ist ein nichthydrostatisches mesoskaliges dynamisches Wetterprognosemodell, das auf Daten des Europäischen Wettermodells des DWD (Deutscher Wetterdienst, beschrieben in Majewski, 1991) basiert. Das DWD-Modell berücksichtigt sämtliche aktuellen Wetterdaten der nördlichen Hemisphäre und besitzt eine Auflösung von 55 km Gitterweite. Das SM rechnet auf einem begrenzten Gebiet von 37 bis 55 Grad nördlicher Breite und von 5 Grad westlicher bis 20 Grad östlicher Länge; die Initialisierung aus dem Europäischen Modell ist in Schubiger und De Morsier (1992) beschrieben. Die in der vorliegenden Arbeit verwendeten Daten beschränken sich auf einen Ausschnitt in der Region um das Kernkraftwerk Gösgen. Die räumliche Auflösung beträgt 14.5 km Gitterweite, die Zeitauflösung eine Stunde. Die Rechnungen des SM laufen bei der MeteoSchweiz täglich zweimal routinemässig für eine Prognosezeit von 48 Stunden ab, beginnend um 00:00 und 12:00 UTC (universal time, läuft der Mitteleuropäischen Zeit (MEZ, Winterzeit) um eine Stunde nach).



**Figur 1:** Die Windstationen im Gebiet des Kernkraftwerkes Gösgen. Flüsse, Seen und die Höhenlinien ab 400 m in Stufen von 100 m sind eingetragen. Ordinate und Abszisse zeigen das Schweizerische Kilometernetz. Die Topographie ist zudem mit der angegebenen Höhenstufung eingefärbt. Die Zahlen entsprechen den in den obigen Tabellen gegebenen Stationsnummern.

Von den 48 gerechneten Stunden werden die ersten 6 Stunden als Einschwingphase des Modells nicht berücksichtigt, sodass sich 42 Stunden auswerten lassen. In der vorliegenden Studie wurden von jedem zweiten SM-run zwischen 1. Juli und 31. Oktober 1999 die Stunden 7 bis 30 verwendet (siehe Figur 11 und 12), sodass eine lückenlose Überdeckung der gesamten Messkampagnezeit von 2952 Stunden vorliegt. Da die SM-Daten die gesamten Messungen des Europäischen Kontinents verarbeiten, ergeben sie eine ideale Darstellung der grossräumigen Wettersituation, die zusammen mit der lokalen Topographie die Windverhältnisse im betrachteten Gebiet bestimmt. Die

SM-Daten wurden in den vergangenen Jahren mehrfach mit repräsentativen Bodenstations- und Radiosondierungsdaten verifiziert. Daraus geht hervor, dass die Prognosewerte die Realität gut wiedergeben, was sich aufgrund der kurzen Prognosezeit und der für Prognosemodelle guten räumlichen Auflösung leicht verstehen lässt. Für die vorliegende Studie wurden 25 Gitterpunkte aus dem gesamten Datensatz des SM extrahiert und in den Datensatz des Projektes einbezogen. Die folgende Tabelle gibt für jeden dieser Gitterpunkte die Koordinaten und die Höhe der darunterliegenden Topographie in m über Meer an:

47	1. Gitterpunkt	614.319, 272.008, 281
48	2. Gitterpunkt	627.854, 272.056, 382
49	3. Gitterpunkt	641.389, 272.136, 699
50	4. Gitterpunkt	654.913, 273.358, 323
51	5. Gitterpunkt	669.197, 273.509, 382
52	6. Gitterpunkt	614.354, 257.555, 545
53	7. Gitterpunkt	627.917, 258.716, 519
54	8. Gitterpunkt	642.236, 258.801, 523
55	9. Gitterpunkt	655.802, 258.913, 383
56	10. Gitterpunkt	669.354, 260.168, 627
57	11. Gitterpunkt	615.142, 244.217, 688
58	12. Gitterpunkt	628.741, 244.267, 855
59	13. Gitterpunkt	642.339, 244.349, 416
60	14. Gitterpunkt	655.928, 245.573, 505
61	15. Gitterpunkt	669.523, 245.717, 528
62	16. Gitterpunkt	615.179, 229.765, 444
63	17. Gitterpunkt	629.562, 230.931, 474
64	18. Gitterpunkt	643.192, 231.015, 608
65	19. Gitterpunkt	656.821, 231.130, 586
66	20. Gitterpunkt	670.437, 232.387, 481
67	21. Gitterpunkt	615.972, 216.428, 570
68	22. Gitterpunkt	629.635, 216.480, 657
69	23. Gitterpunkt	643.297, 216.564, 669
70	24. Gitterpunkt	656.949, 217.791, 558
71	25. Gitterpunkt	670.608, 217.937, 436

Die Gitterpunkte liegen im Mittel 225 m über Grund und repräsentieren somit eine Übergangsschicht zwischen dem stark von der Topographie beeinflussten bodennahen Windfeld (das durch die meist 10 m hohen Bodenmessstationen erfasst wird) und dem durch die Hoch- und Tiefdruckgebiete bestimmten geostrophischen Höhenwindfeld. Die SM-Daten ergänzen die 46 Stationswerte und führen somit zu einer stündlichen Windinformation an 71 Punkten des Untersuchungsgebietes.

Die Messungen der temporären und permanenten Stationen wurden zusammen mit den SM-Daten in eine Datenbank eingebunden. Als Mittelungsintervall wurde für alle Messungen eine Stunde gewählt. Die nur spärlich und kurzfristig aufgetretenen Ausfälle wurden unter Berücksichtigung ähnlicher Windsituationen aus den nächstliegenden Stationen interpoliert.

## 2.2. Klassifizierungsverfahren

Die Klassifikation stützt sich auf die durch Kaufmann und Weber (1996) erarbeiteten Grundlagen und folgt den Ausführungen im Bericht zur Windbank oberes Aaretal (siehe Graber und Tinguely, 1999). In dieser Publikation findet sich auch eine ausführliche Diskussion über die Wahl der Parameter beim Klassifizierungsverfahren, bei der 15 unterschiedliche Verfahren miteinander verglichen werden. Bei dieser Untersuchung zeigte sich eine Verbesserung der Separierungsqualität der Windklassen, indem zunächst alle Winddaten mit Windgeschwindigkeiten unter  $0.5 \text{ ms}^{-1}$  auf 0 gesetzt werden, da Winde unter  $0.5 \text{ ms}^{-1}$  nur ein Rauschen in den Datensatz hineinbringen, das der Schärfe der gebildeten Klassen abträglich ist. Diese rauschreduzierende Massnahme wurde auch auf den vorliegenden Datensatz angewandt. Anschliessend findet eine Normierung der einzelnen Stundenwerte statt, um die Wirkung von einzelnen Starkwindepisoden zu eliminieren, die zu isolierten Klassen führen würden. Natürlich muss später bei der Windfeldbestimmung in Echtzeit nach erfolgter Klassenidentifikation wiederum auf die herrschende Windgeschwindigkeit skaliert werden. Die Normierung erfolgt nach der in Graber und Tinguely (1999) gegebenen Definition des Normierungsfaktors  $s_t$  für die Stunde  $t$  gemäss:

$$s_t = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N (u_{ij}^2 + v_{ij}^2)^{1/2}$$

wobei  $u_{ij}$  und  $v_{ij}$  die West-, bzw. Südkomponente des Windes der Station  $j$  zur Zeit  $t$  bedeutet. Die Summierung erfolgt über die 71 "Stationen", die nebst den Messorten noch die SM-Gitterdaten einschliessen. Die Normierung ist dann gegeben durch:

$$u'_{ij} = \frac{u_{ij}}{s_t} \quad \text{und} \quad v'_{ij} = \frac{v_{ij}}{s_t}$$

wobei hier  $u'_{ij}$  und  $v'_{ij}$  die normierte West-, bzw. Südkomponente des Windes der Station  $j$  zur Zeit  $t$  bedeutet. Damit wird eine Normierung erreicht, die auf dem über alle Stationen gemittelten Wind einer Stunde basiert, daher hohe Windgeschwindigkeiten des gesamten Windfeldes dämpft, die Unterschiede von Station zu Station aber beibehält. Winddaten mit gleichem Strömungsmuster, aber unterschiedlichen Windgeschwindigkeiten werden dadurch derselben Klasse zugeordnet.

Im nächsten Schritt wird die Clusteranalyse analog zu Graber und Tinguely, 1999, nach dem "complete linkage Verfahren" durchgeführt. Die Einteilung nach Klassen erfolgt aufgrund einer Distanzfunktion, die ein Mass zur Unterscheidbarkeit der Windvektoren aller Stationen darstellt. Die Distanz der Windvektoren zur Stunde  $t$  gegenüber der Stunde  $\tau$  ist wie folgt definiert:

$$d_{t\tau} = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N \left[ (u'_{ij} - u'_{\tau j})^2 + (v'_{ij} - v'_{\tau j})^2 \right]^{1/2}$$

wobei der Stationenindex  $j$  wiederum über die verfügbaren Stationsdaten zur Zeit  $t$  läuft. Unterscheiden sich zwei Stundenwerte nur in der Windgeschwindigkeit, nicht aber in der

Windrichtung, so wird aufgrund der vorgängig geschilderten Normierung die Distanz Null. Dagegen weist ein Windfeld, bei dem alle Winde um 180 Grad gedreht sind, eine Distanz von 2 auf. Dies stellt die maximal erreichbare Distanz dar, wie aus der definierenden Gleichung hervorgeht. Aufgrund der Normierung ist die Distanz eine dimensionslose Grösse. Die Berechnung der Distanzen jeder Stunde gegenüber jeder anderen Stunde führt somit zu einer Distanzmatrix der Grösse 2952 x 2952 mit Diagonalsymmetrie.

Die Clusteranalyse nach dem complete linkage Verfahren wird mit Hilfe der entsprechenden IMSL-Routine (IMSL Fortran Subroutines for Mathematical Applications) in einem Fortran-Programm für eine Anzahl von 12 Klassen durchgeführt. Die Anzahl von 12 Klassen erwies sich bei der Studie zum Kernkraftwerk Mühleberg als beste Wahl, wie in Graber und Tinguely, 1999, dargestellt. Die Methode ergibt eine Klassenbildung mit einer ausgewogenen Anzahl von Vertretern in jeder Klasse und vermeidet die mit anderen Verfahren häufig erzielte Bildung sehr kleiner Klassen.

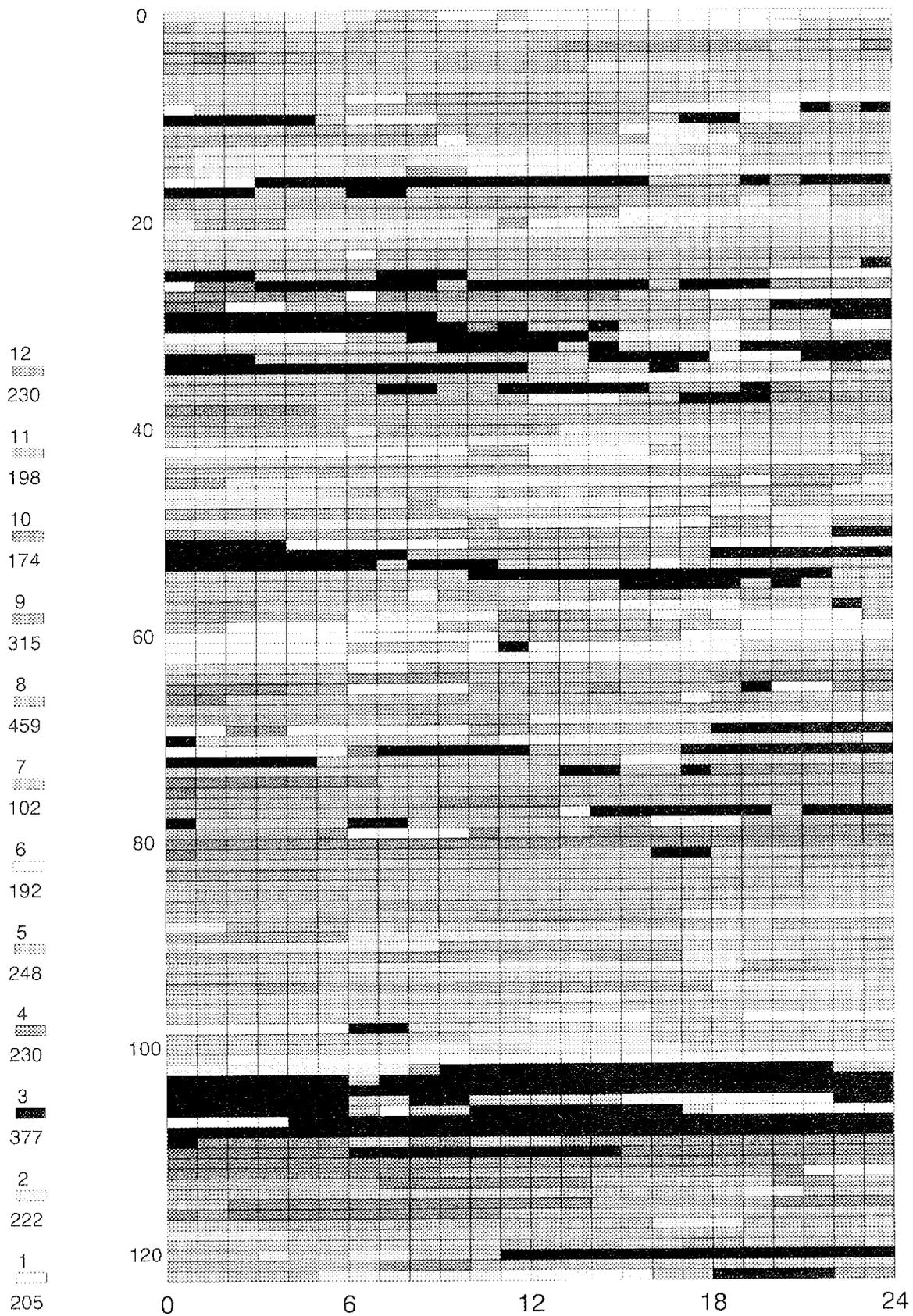
Zur Erhöhung der Klassenschärfe wird in Anlehnung an Kaufmann und Weber (1996) nach der Clusteranalyse eine Umverteilung der Stundenklassierung vorgenommen, indem die Distanz eines einzelnen Stundenwertes  $t$  zu allen 12 Klassen gemäss dem folgenden Distanzmass bestimmt wird:

$$d_{ic} = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N [(u'_{ij} - u'_{cj})^2 + (v'_{ij} - v'_{cj})^2]^{1/2}$$

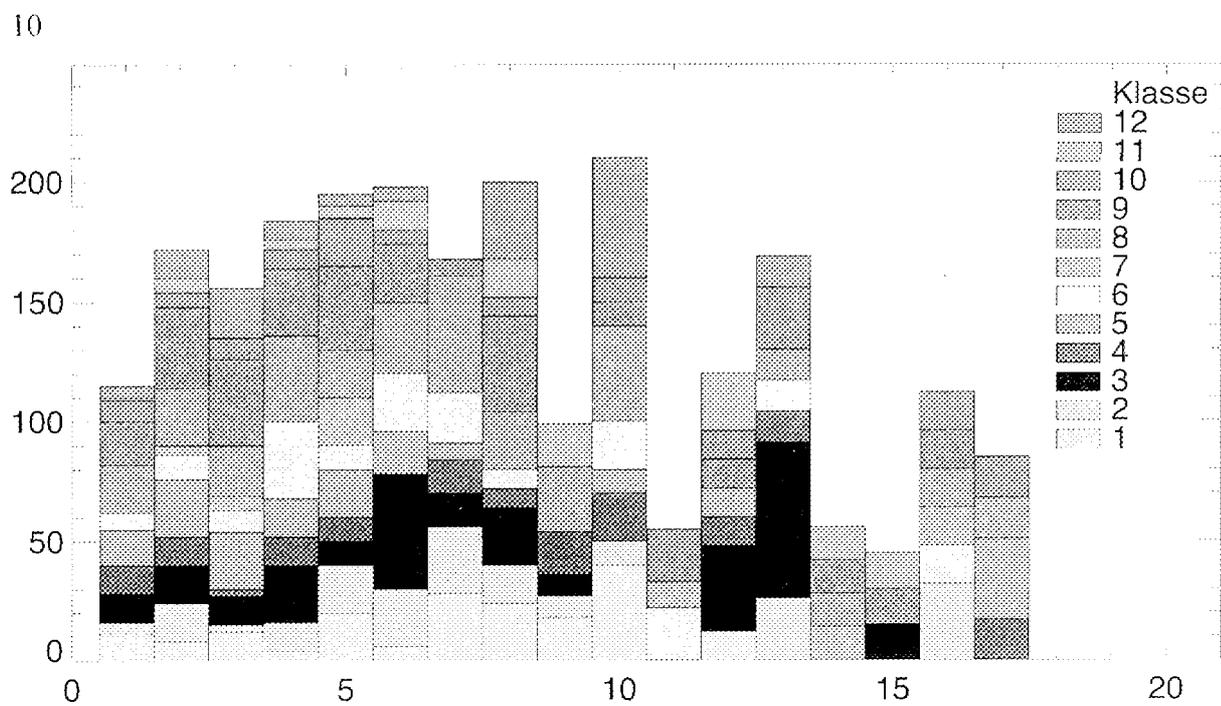
wobei  $u'_{cj}$  und  $v'_{cj}$  die Mittel der West- und Südwindkomponente über die Mitglieder der Klasse  $c$  bilden. Von den 12 auf diese Weise bestimmten Distanzen zu einer Zeit  $t$  wird die minimale Distanz gesucht und die betreffende Stunde dieser Klasse neu zugeordnet. Stimmt diese Zuordnung mit derjenigen der ursprünglichen Klasseneinteilung überein, so war die erste Zuordnung bereits "richtig", andernfalls wird die Stunde umverteilt. Ist diese Berechnung und Neuordnung für alle Stunden vollzogen, so liegt eine neue Clusterbildung nach der 1. Umverteilung vor, deren Mittelwerte wiederum berechnet werden können. Diese Umverteilung wird nun so oft wiederholt, bis in einem Durchgang durch alle Stunden keine Änderung der Klasseneinteilung mehr erfolgt. Die so bestimmte Klasseneinteilung ist also in diesem Sinne stabil.

In Figur 2 sind die 12 Klassen nach dieser Umverteilung in ihrer zeitlichen Abfolge über die 2952 Stunden der Messkampagne dargestellt. Die Darstellung spiegelt in horizontaler Richtung den Tagesverlauf und in vertikaler Richtung den saisonalen Verlauf der Tage vom 1. Juli (Ordinate Punkt 1) bis 31. Oktober 1999 (Ordinate Punkt 122) wieder. Zusätzlich zu der Klassennummer in der Legende auf der linken Seite ist jeweils die Anzahl der Stunden für das Auftreten dieser Klasse angegeben.

Wie Figur 2 zeigt, persistieren einige Klassen über längere Zeit. Zur statistischen Erfassung der Verteilung der Persistenzdauer ist diese in Figur 3 dargestellt: Am häufigsten tritt eine zehnstündige Persistenz auf, doch sind auch 13 oder 16 Stunden Persistenz durchaus bei vielen Klassen noch anzutreffen, insgesamt in 281 Stunden. Die Ordinate gibt die totale Stundenzahl an. So bestehen beispielsweise die 169 Stunden der 13-stündigen Persistenz aus 13 13-Stunden-Intervallen.



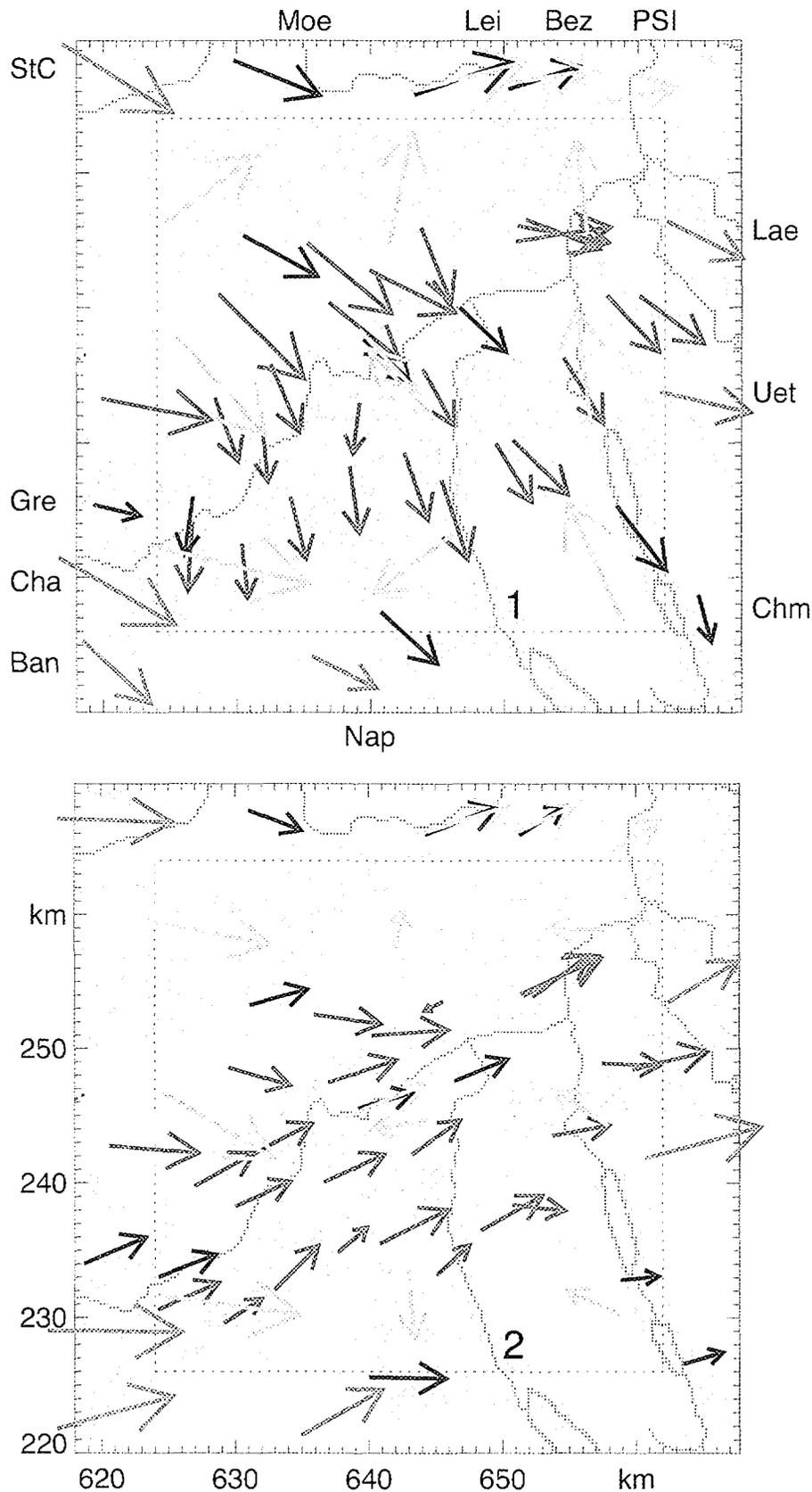
**Figur 2:** Darstellung der zeitlichen Abfolge der Klassen, entsprechend der Legende auf der linken Seite, die neben der Klassennummer noch die Anzahl der Stunden angibt, die der betreffenden Klasse zugehören. Die Ordinate gibt die Tage vom 1. Juli bis 31. Oktober 1999 wieder, die Abszisse bezeichnet die Tageszeit in Stunden.



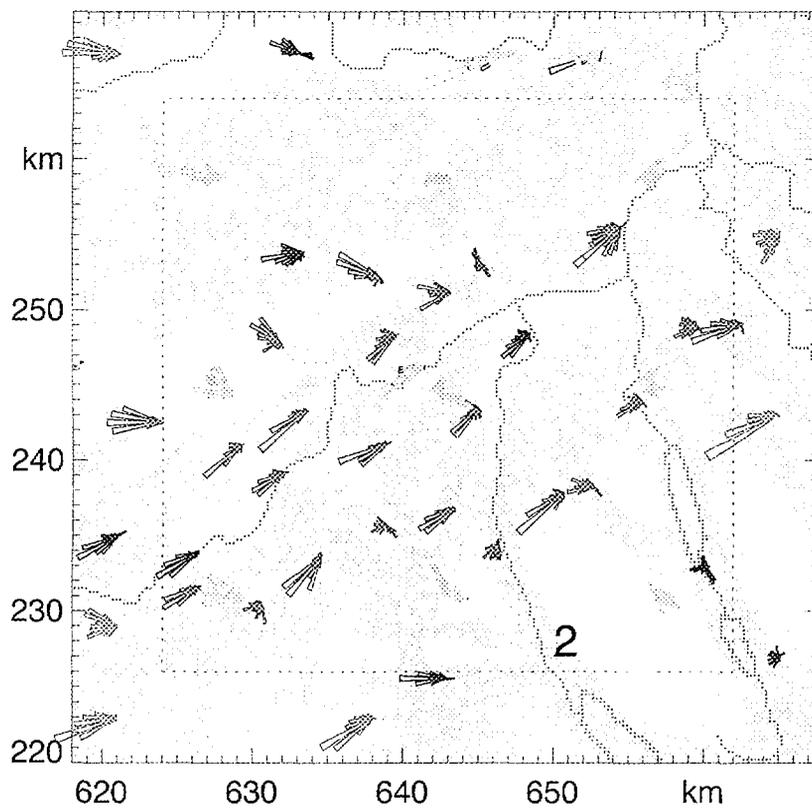
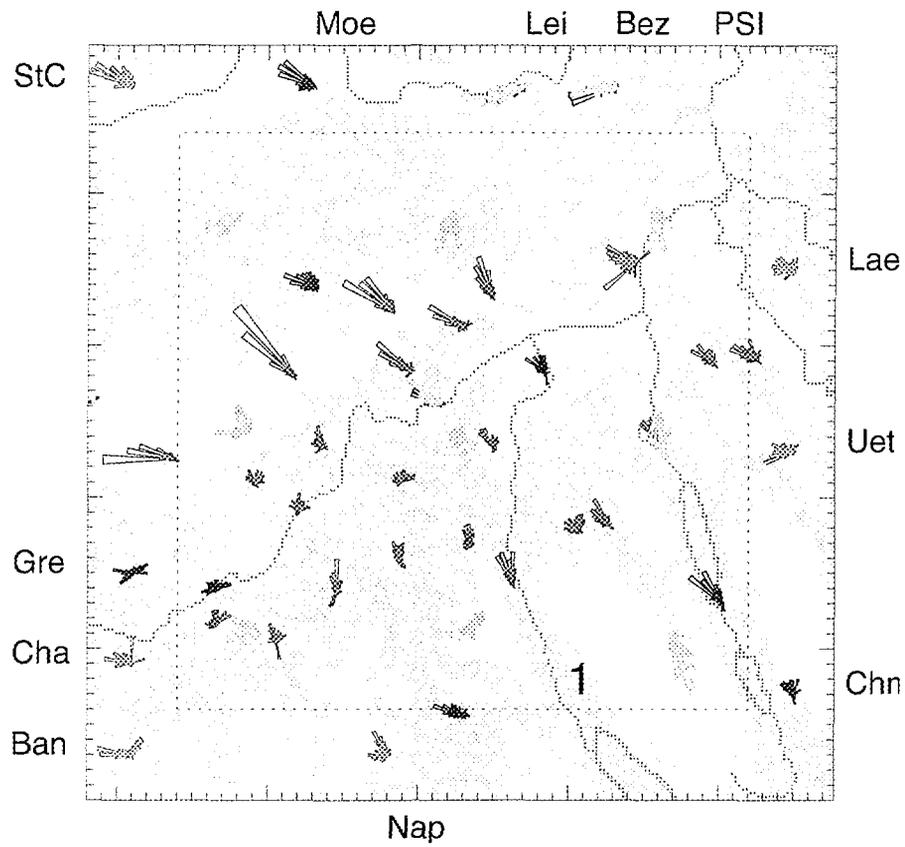
**Figur 3:** Verteilung der Persistenz der einzelnen Klassen. Die Ordinate zeigt die totale Stundenzahl der in der Abszisse angegebenen Persistenzdauer (in Stunden) der betreffenden Klasse. Die Klassenfarbe entspricht jener von Figur 2.

In den Figuren 4.1a bis 4.6a auf den nächsten Seiten sind die gemittelten Windwerte der 12 Klassen geographisch über dem Untersuchungsgebiet dargestellt. Die Winde der temporären Stationen sind als hellgrüne, diejenigen der permanenten Talstationen als dunkelgrüne, jene der permanenten Höhenstationen als dunkelblaue, die SODAR-Daten als rote und die SM-Winddaten als hellblaue Pfeile dargestellt. Die Werte der oberen Niveaus bei Turmmessungen sind mit gelben Pfeilen versehen. Unterlegt ist das Flusssystem, Ordinate und Abszisse geben das Schweizerische Kilometernetz wieder. Die am Rand mit Kürzel entsprechend den obigen Tabellen angegebenen Stationen liegen teilweise ausserhalb des dargestellten Kartenausschnittes. Um sie dennoch wiederzugeben, wurden sie horizontal bzw. vertikal in den gepunktet markierten Bildrand hinein verschoben.

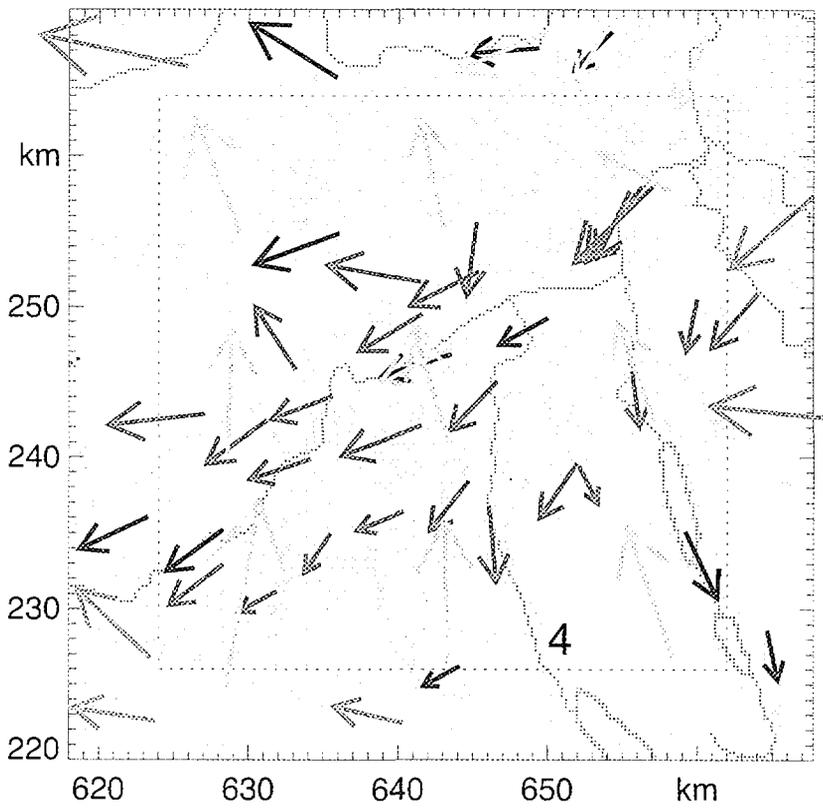
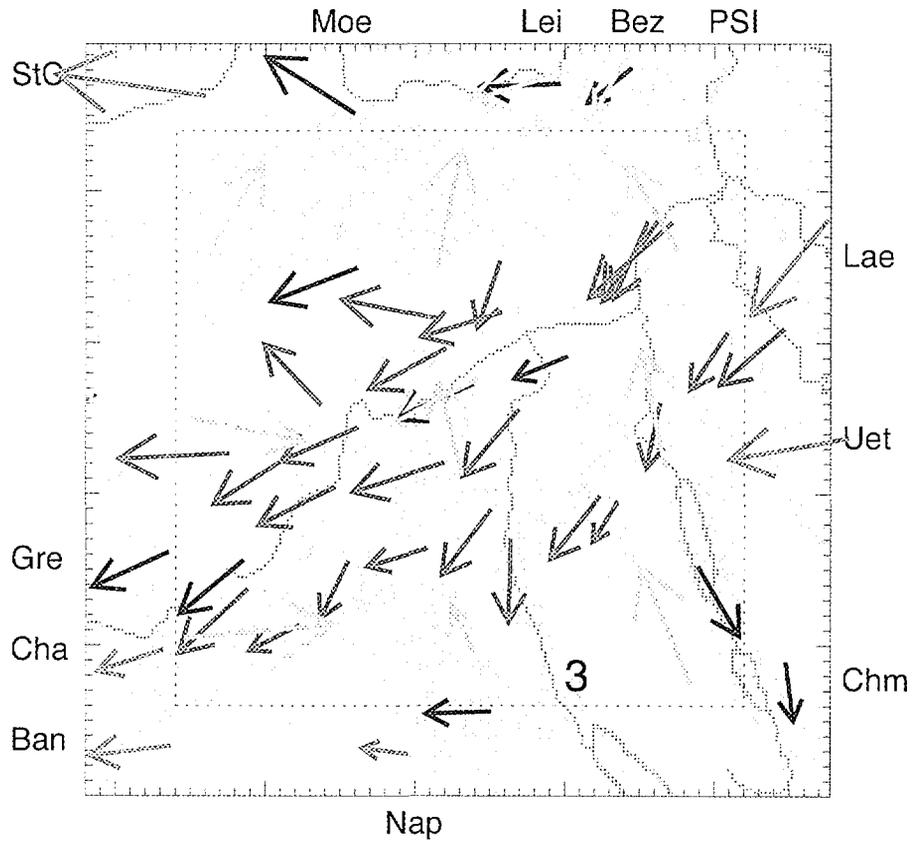
Die Figuren 4.1b bis 4.6b zeigen schliesslich die Häufigkeitsverteilungen der einzelnen Winddaten für die verschiedenen Klassen an ihren Standorten. Deutlich lassen sich grosse Unterschiede von Klasse zu Klasse bezüglich der Auffächerung der Windrosen feststellen, was sich zur Charakterisierung der Klassen gut eignet. Eine Charakterisierung der 12 Klassen wird im Kapitel 4 beschrieben.



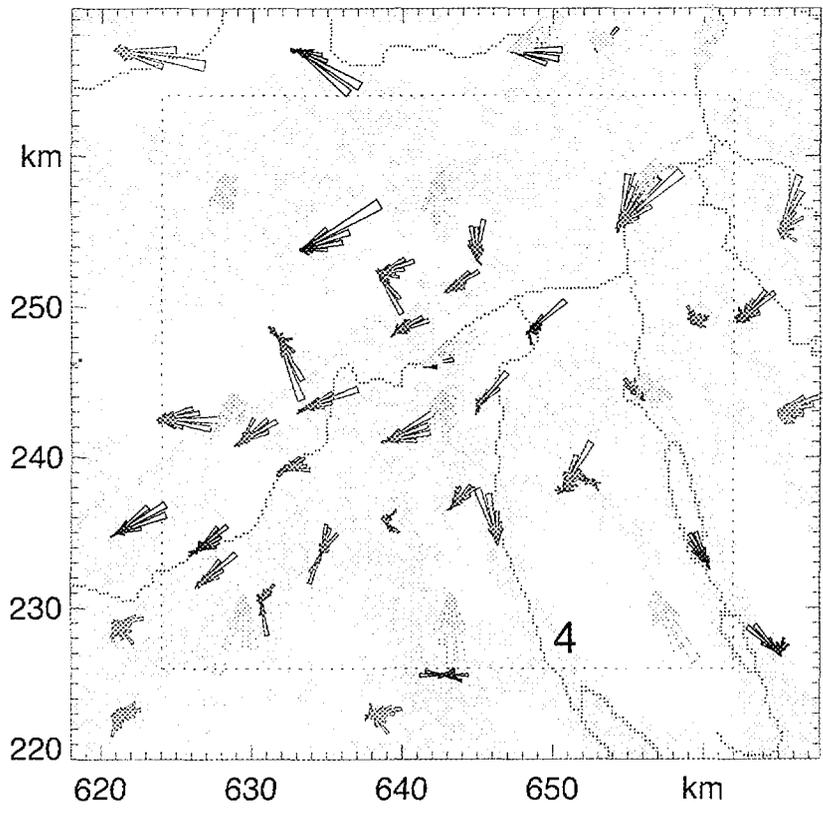
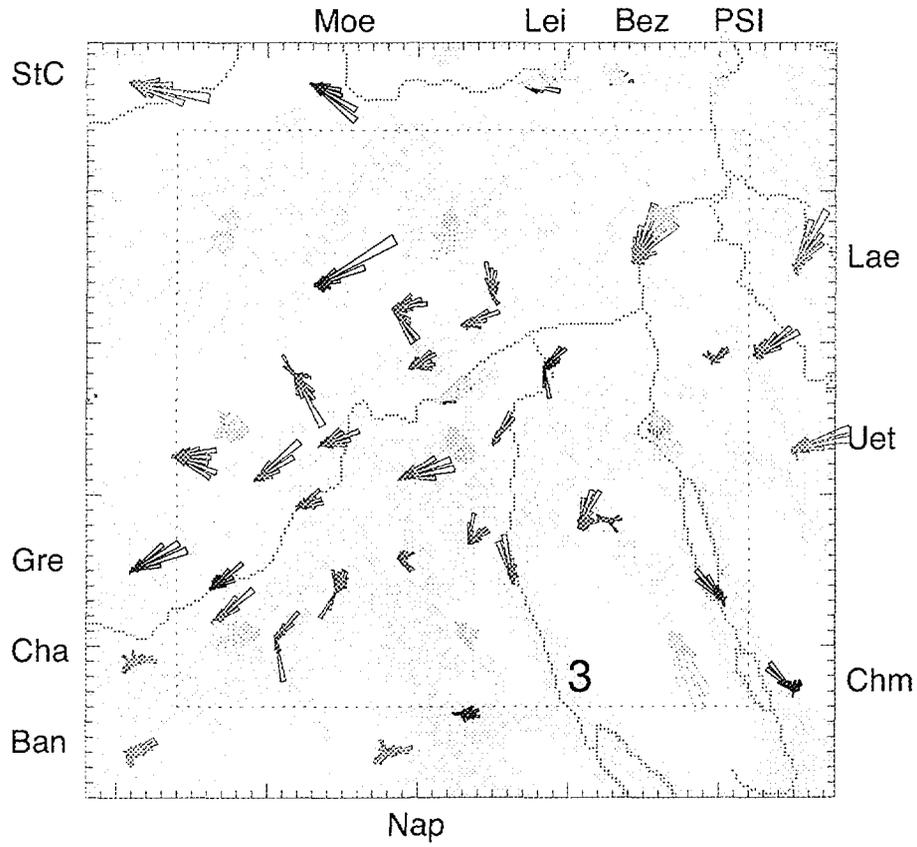
**Figur 4.1a:** Gemittelte Windvektoren über alle Stunden der Klasse 1 (oben) und 2 (unten) über der Topographie dargestellt (gleicher Ausschnitt wie Figur 1). Die am Rand mit Kürzel entsprechenden den obigen Tabellen angegebenen Stationen liegen teilweise ausserhalb des dargestellten Kartenausschnittes. Um sie dennoch wiederzugeben, wurden sie in den gepunktet markierten Bildrand hinein verschoben. Bedeutung der Farben: temporäre Stationen hellgrün, permanente Talstationen dunkelgrün, permanente Höhenstationen dunkelblau, SODAR-Daten rot, SM-Daten hellblau (SM = Swiss Model, im Mittel 225 m ü.G.), obere Niveaus der Messungen bei Kernanlagen gelb.



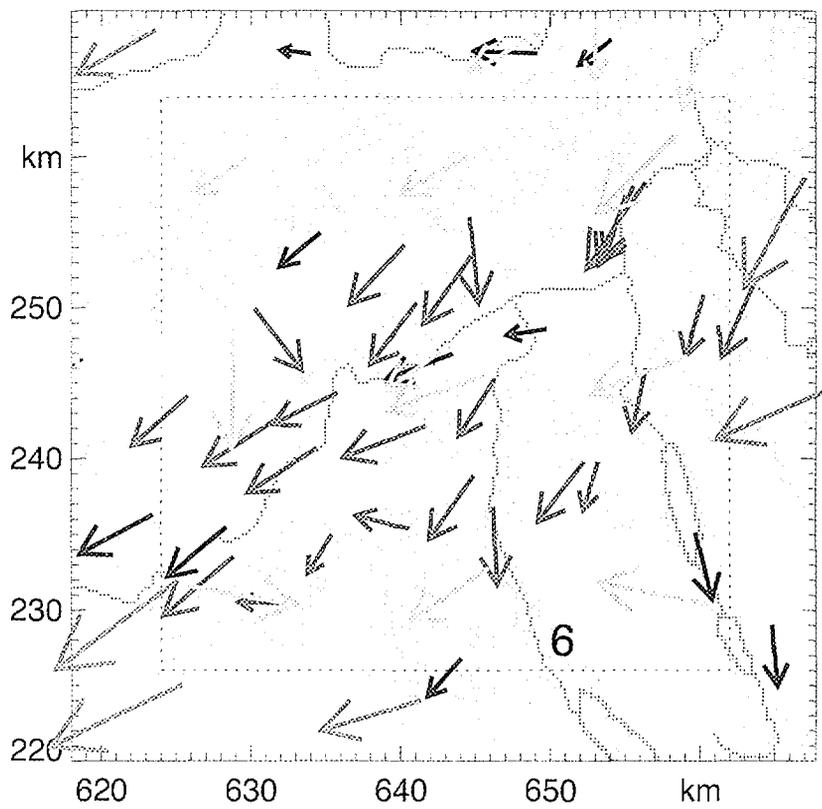
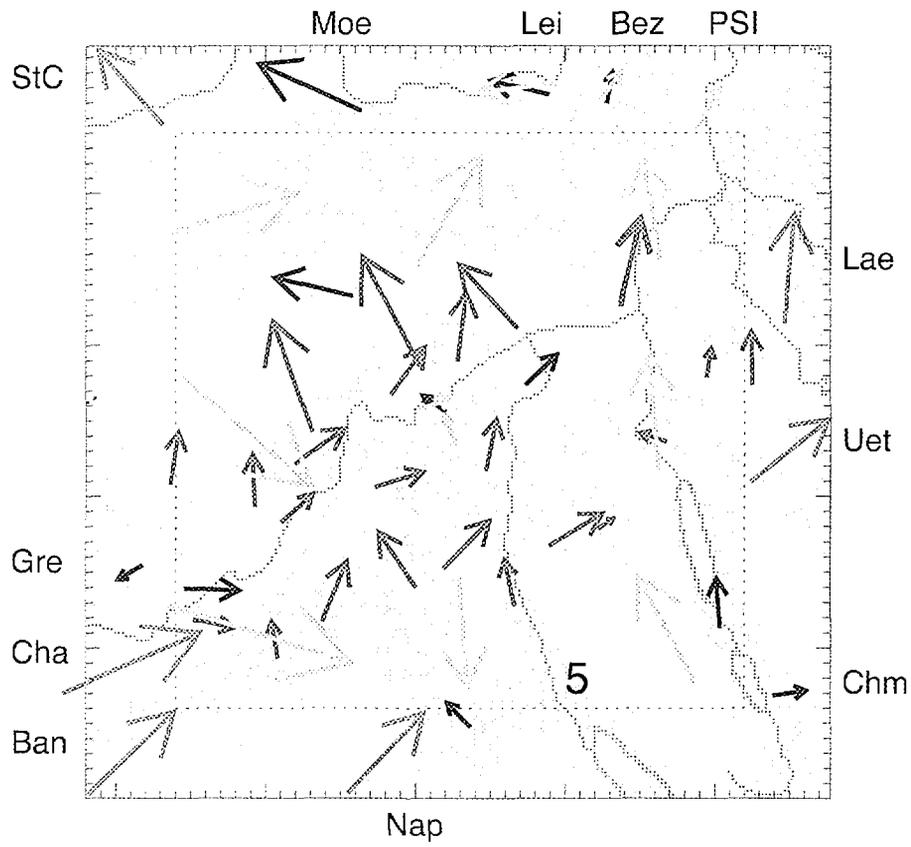
**Figur 4.1b:** Die Häufigkeitsverteilungen der Windrichtungen in 10 Grad Intervallen innerhalb der Klassen 1 (oben) und 2 (unten). Die Klassennummer ist eingeblendet. Die Farbgebung und die übrigen Angaben entsprechen jenen der Figur 4.1a.



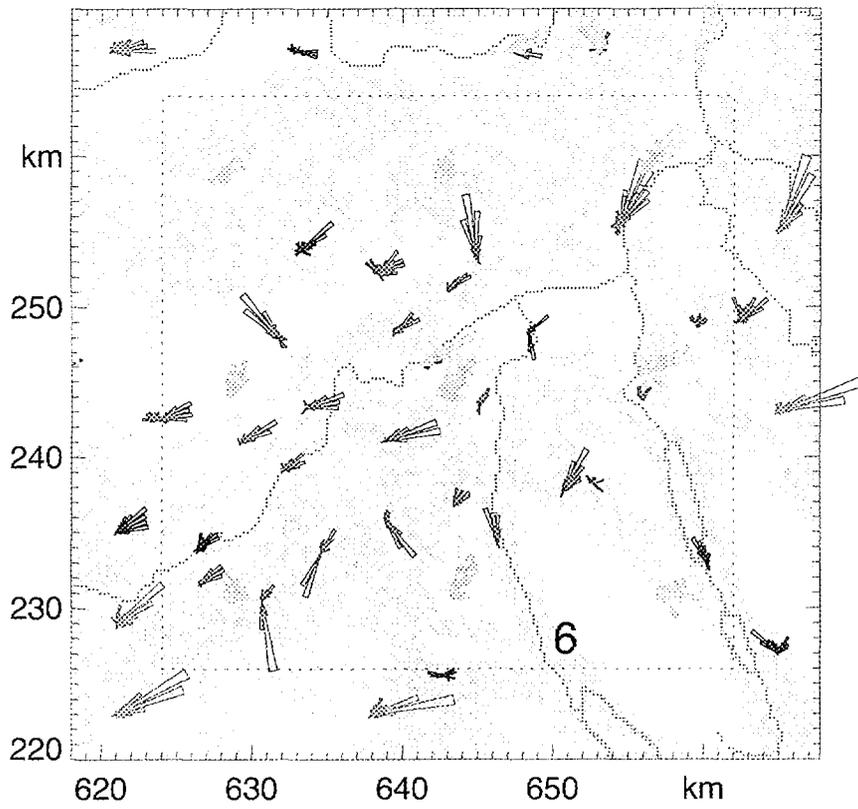
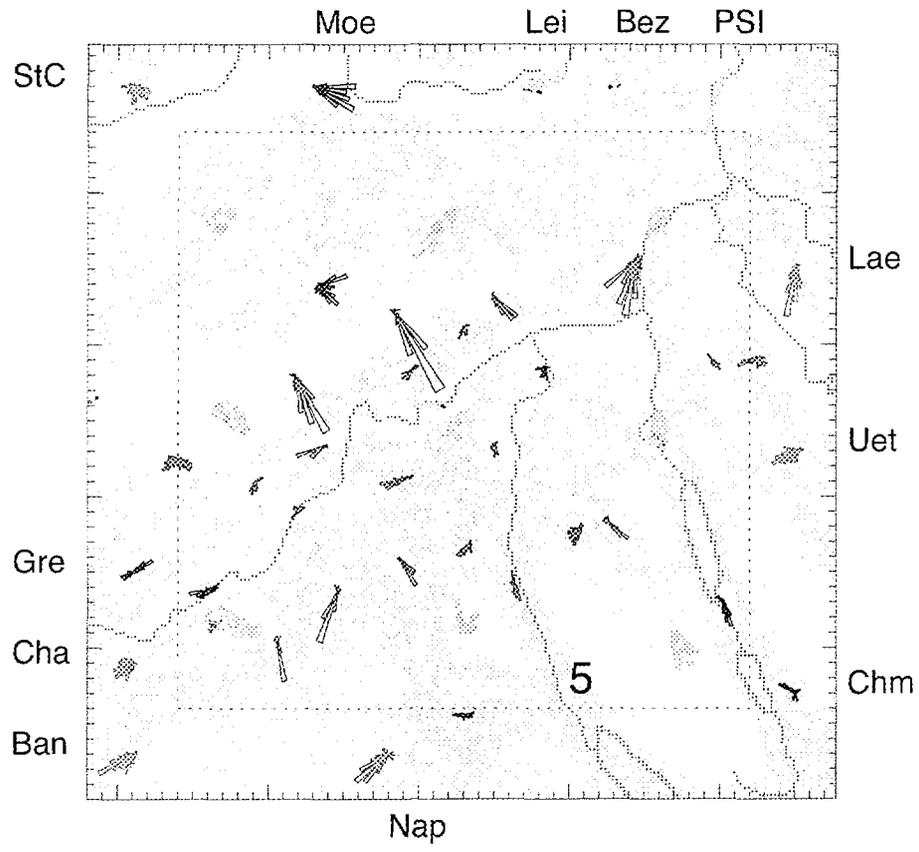
**Figur 4.2a:** Wie Figur 4.1a, jedoch für die Klassen 3 und 4.



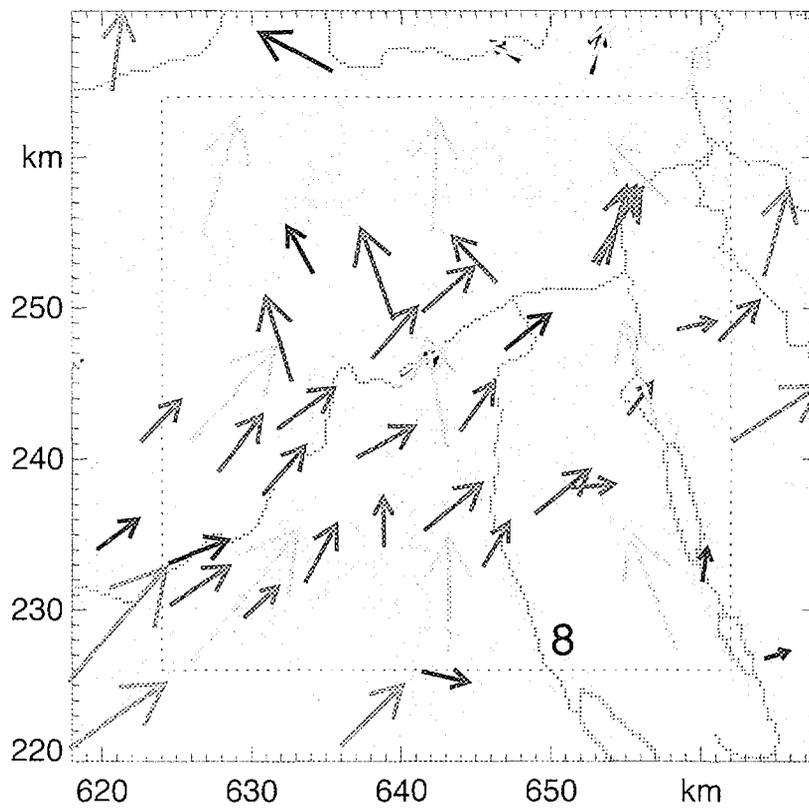
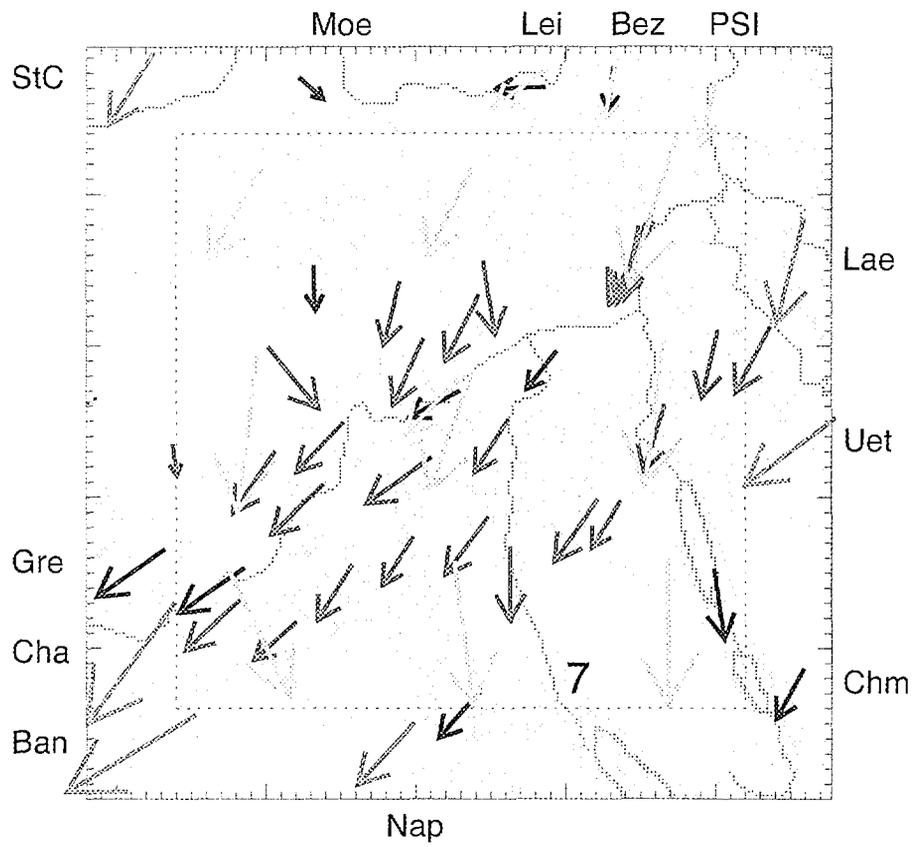
Figur 4.2b: Wie Figur 4.1b, jedoch für die Klassen 3 und 4.



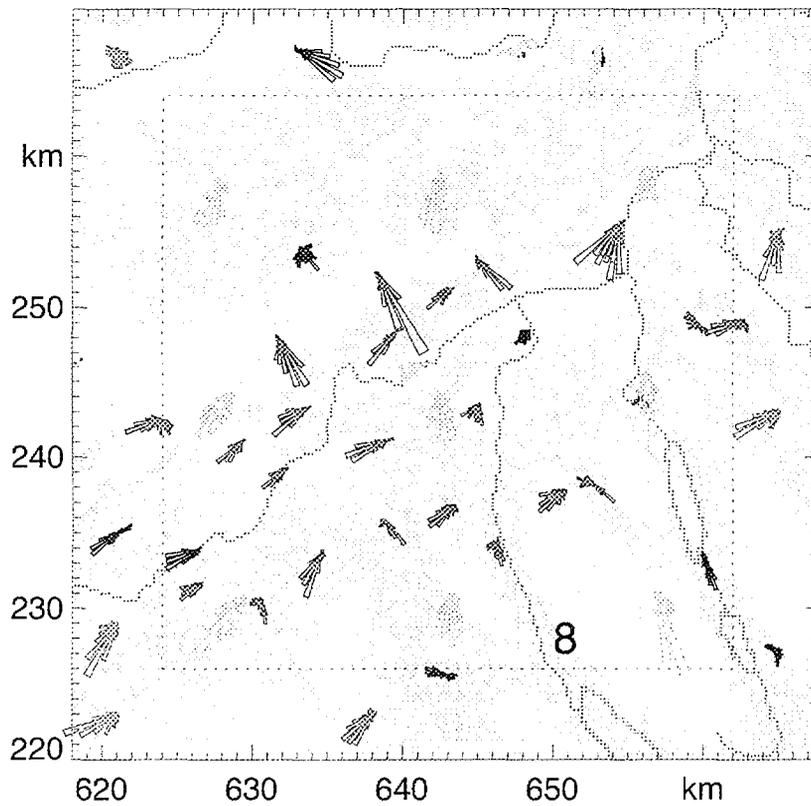
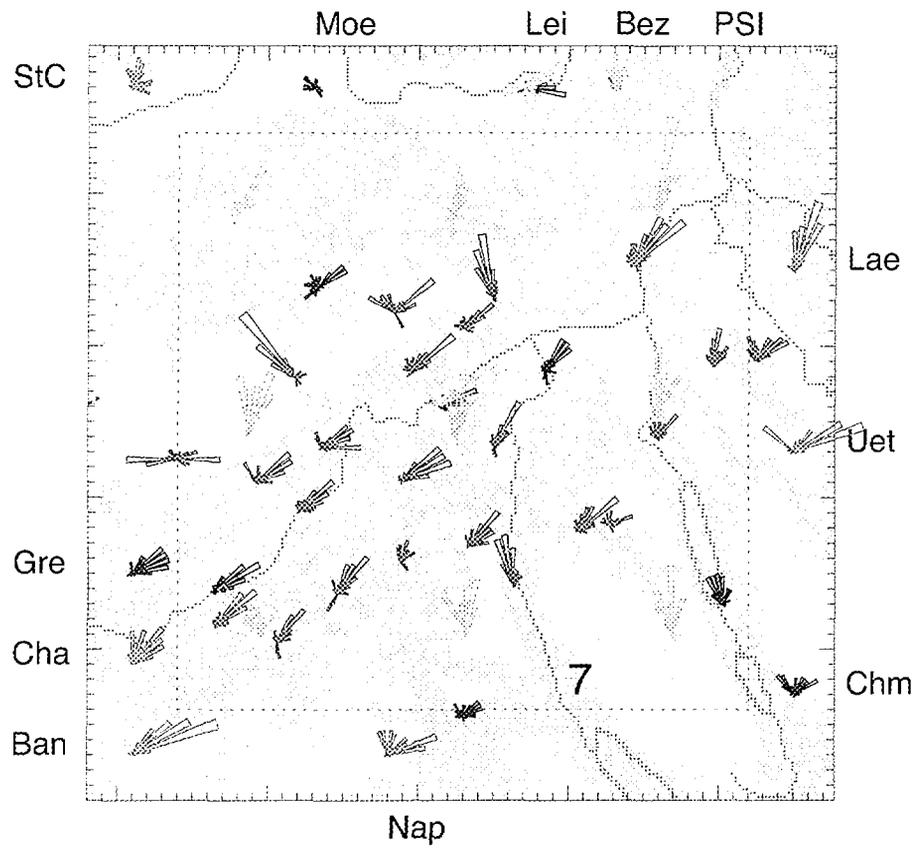
Figur 4.3a: Wie Figur 4.1a, jedoch für die Klassen 5 und 6.



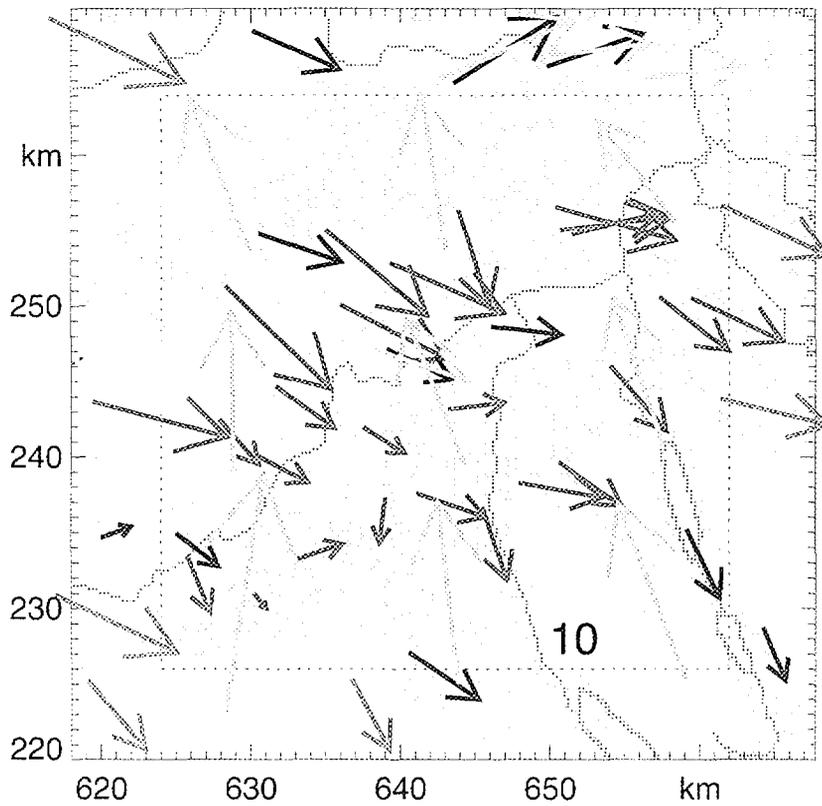
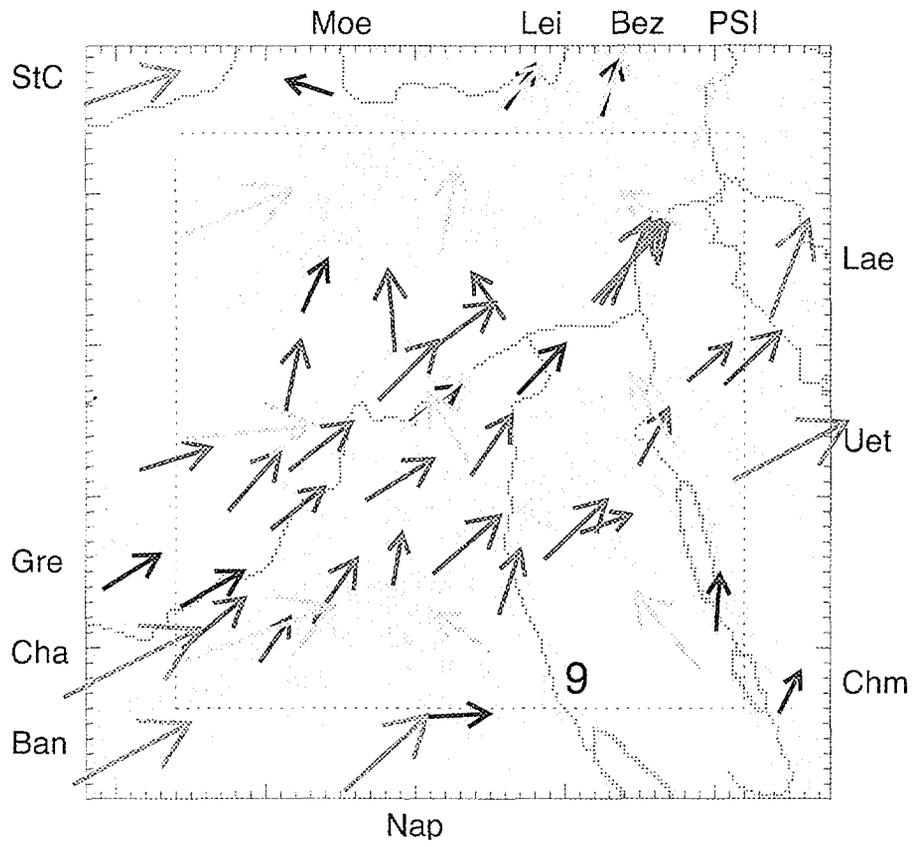
Figur 4.3b: Wie Figur 4.1b, jedoch für die Klassen 5 und 6.



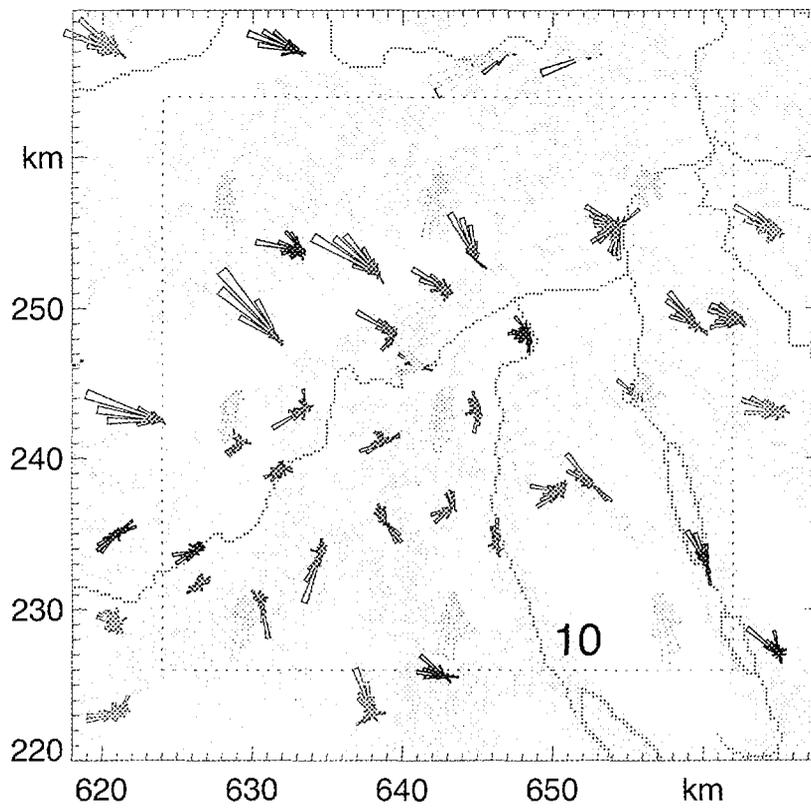
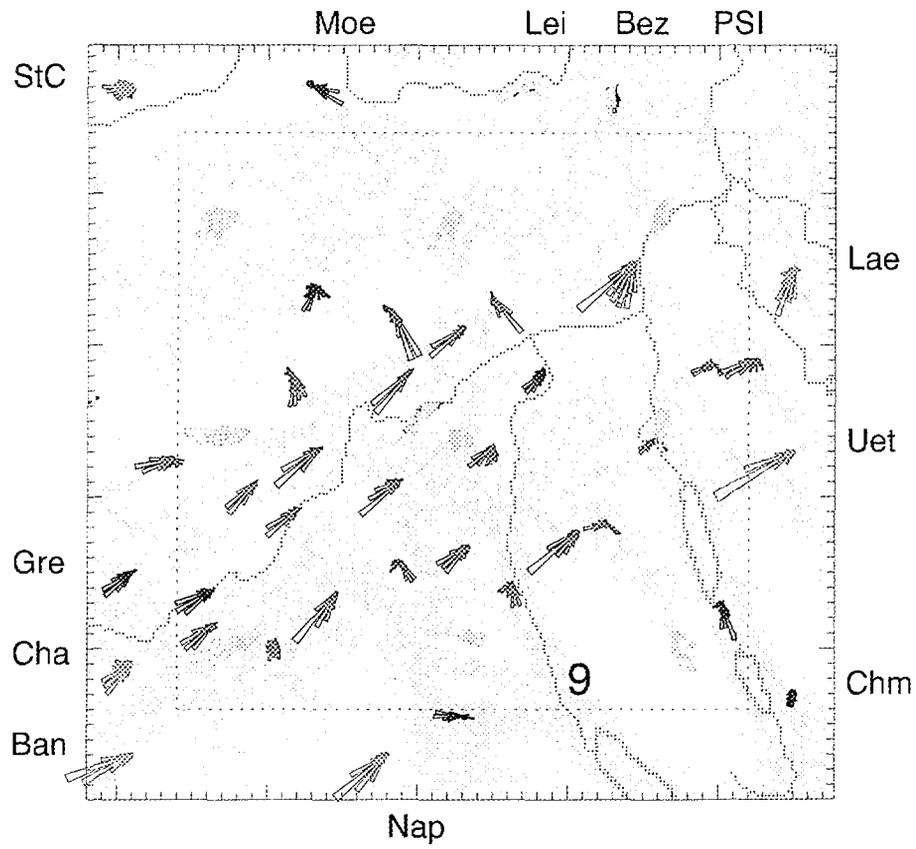
**Figur 4.4a:** Wie Figur 4.1a, jedoch für die Klassen 7 und 8.



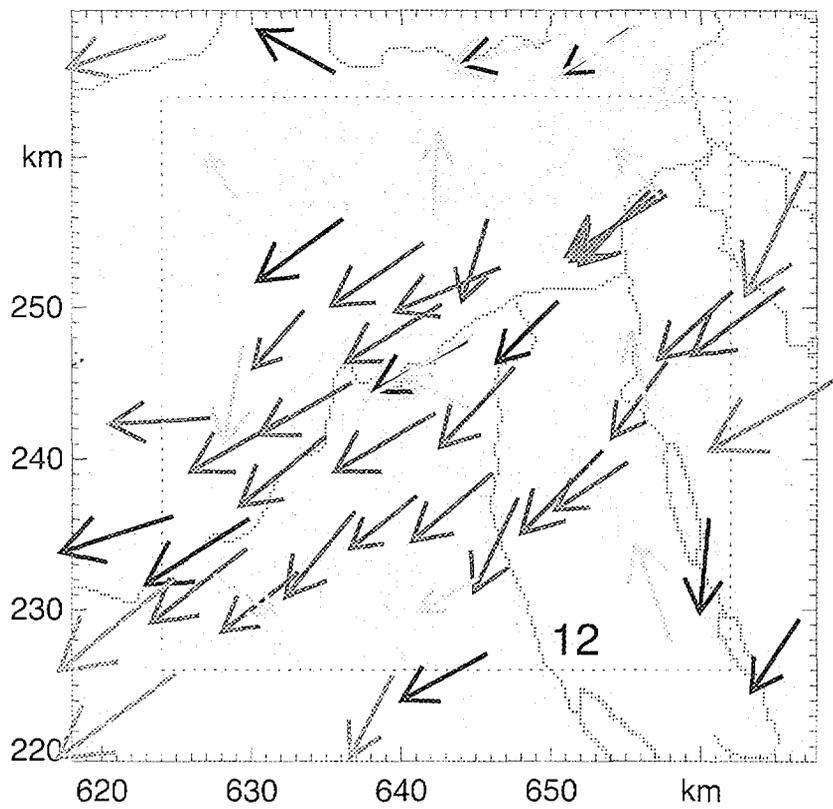
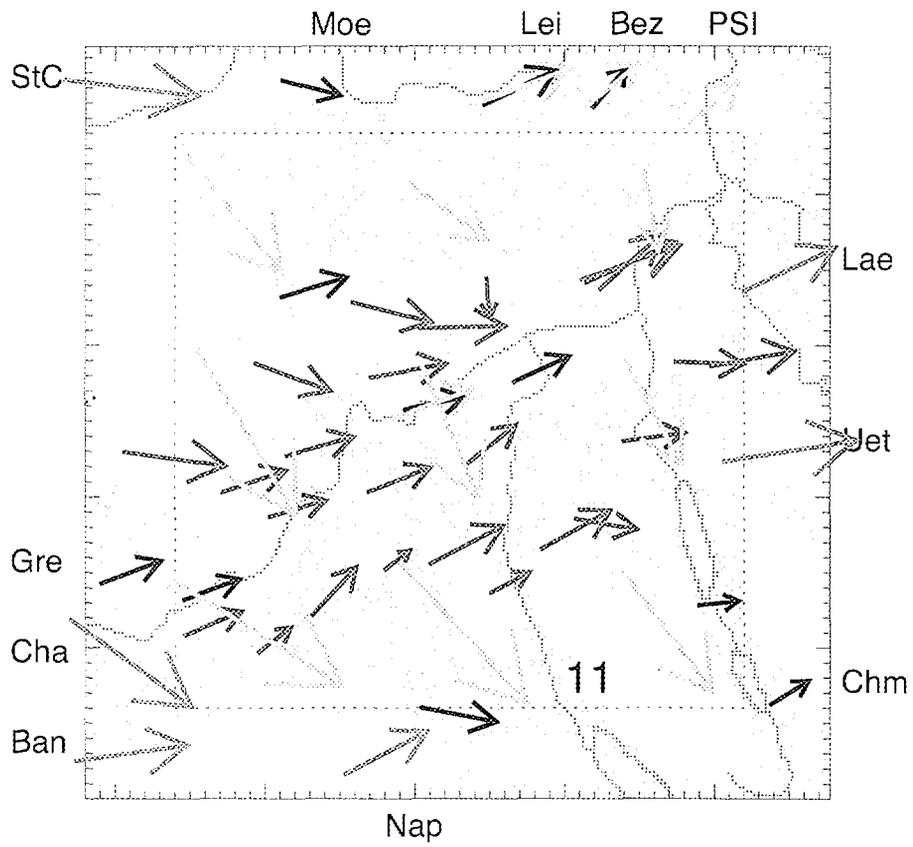
Figur 4.4b: Wie Figur 4.1b, jedoch für die Klassen 7 und 8.



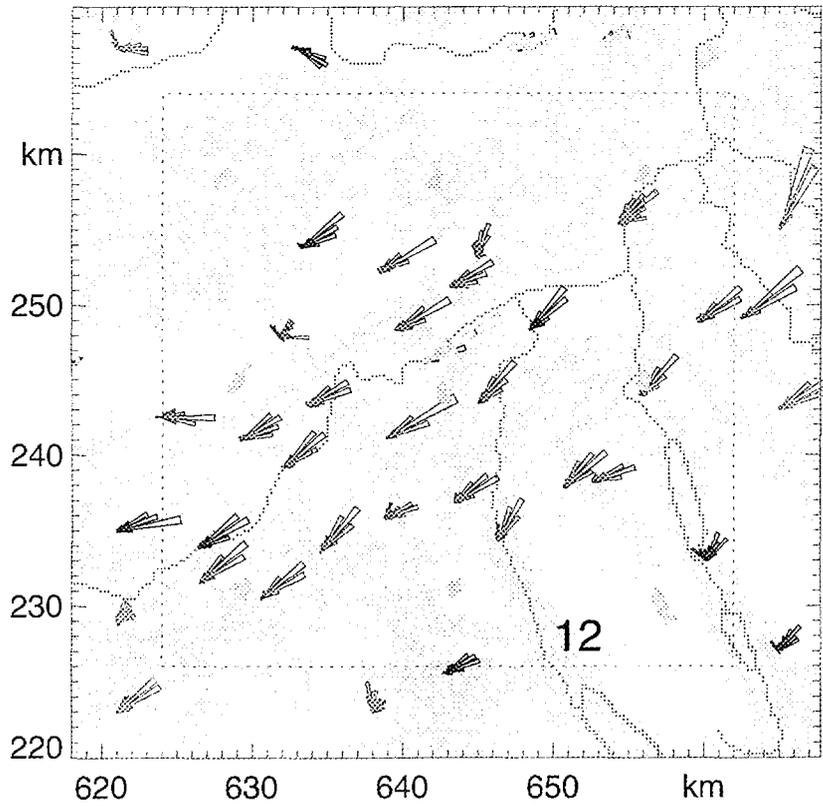
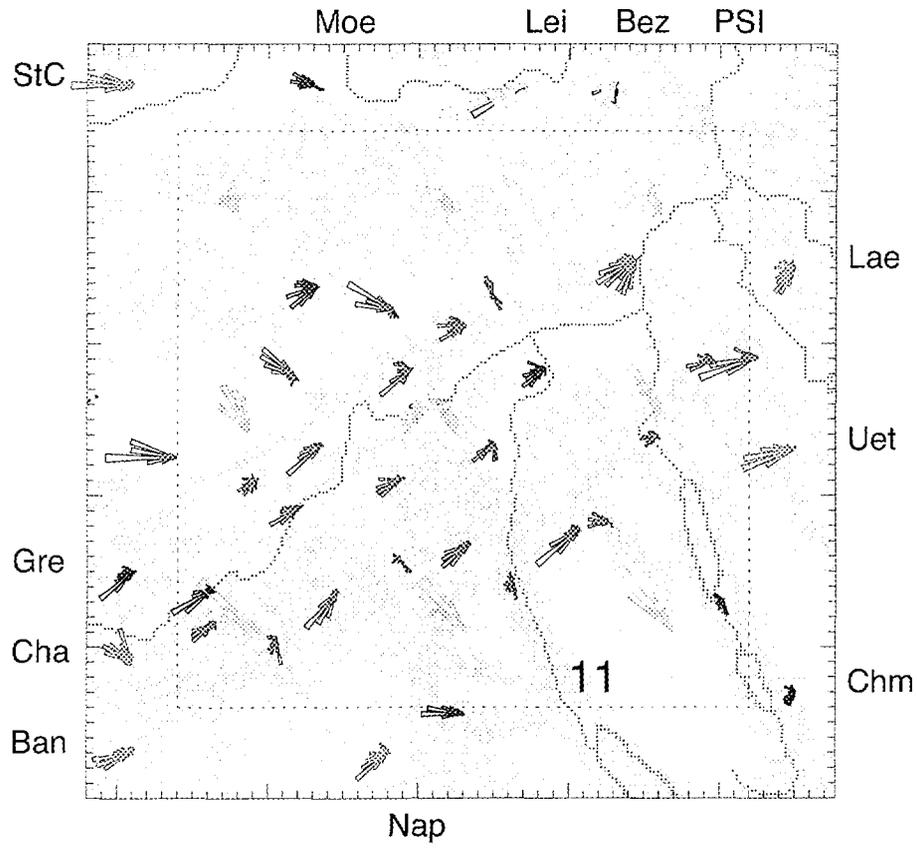
Figur 4.5a: Wie Figur 4.1a, jedoch für die Klassen 9 und 10.



**Figur 4.5b:** Wie Figur 4.1b, jedoch für die Klassen 9 und 10.



Figur 4.6a: Wie Figur 4.1a, jedoch für die Klassen 11 und 12.



Figur 4.6b: Wie Figur 4.1b, jedoch für die Klassen 11 und 12.

### **2.3. Dreidimensionale Windfelder und Veranschaulichung**

Die mittleren Windwerte der Stationen und SM-Gitterpunkte für jede Klasse werden im Folgenden auf ein regelmässiges Gitter interpoliert. Dazu dienen die Programme MEDIC und MATHEW der Lawrence Livermore National Laboratories, California, wie in Tayler et. al. (1994) beschrieben. Als Bodenwinde dienen alle Bodenstationswerte, als Höhenwinde werden die Bergstationen, die SM- und SODAR-Daten verwendet.

Das Programm MEDIC interpoliert diese Winddaten entsprechend ihrer Höhenlage auf ein regelmässiges Gitter mit horizontaler Auflösung von 500 m und vertikaler Auflösung von 50 m ab 200 m über Meer in 25 Höhenschichten auf euklidischen Ebenen. Das betrachtete Gebiet erstreckt sich von 618 bis 668 km Ost und von 220 bis 270 km Nord im Schweizer Kilometernetz.

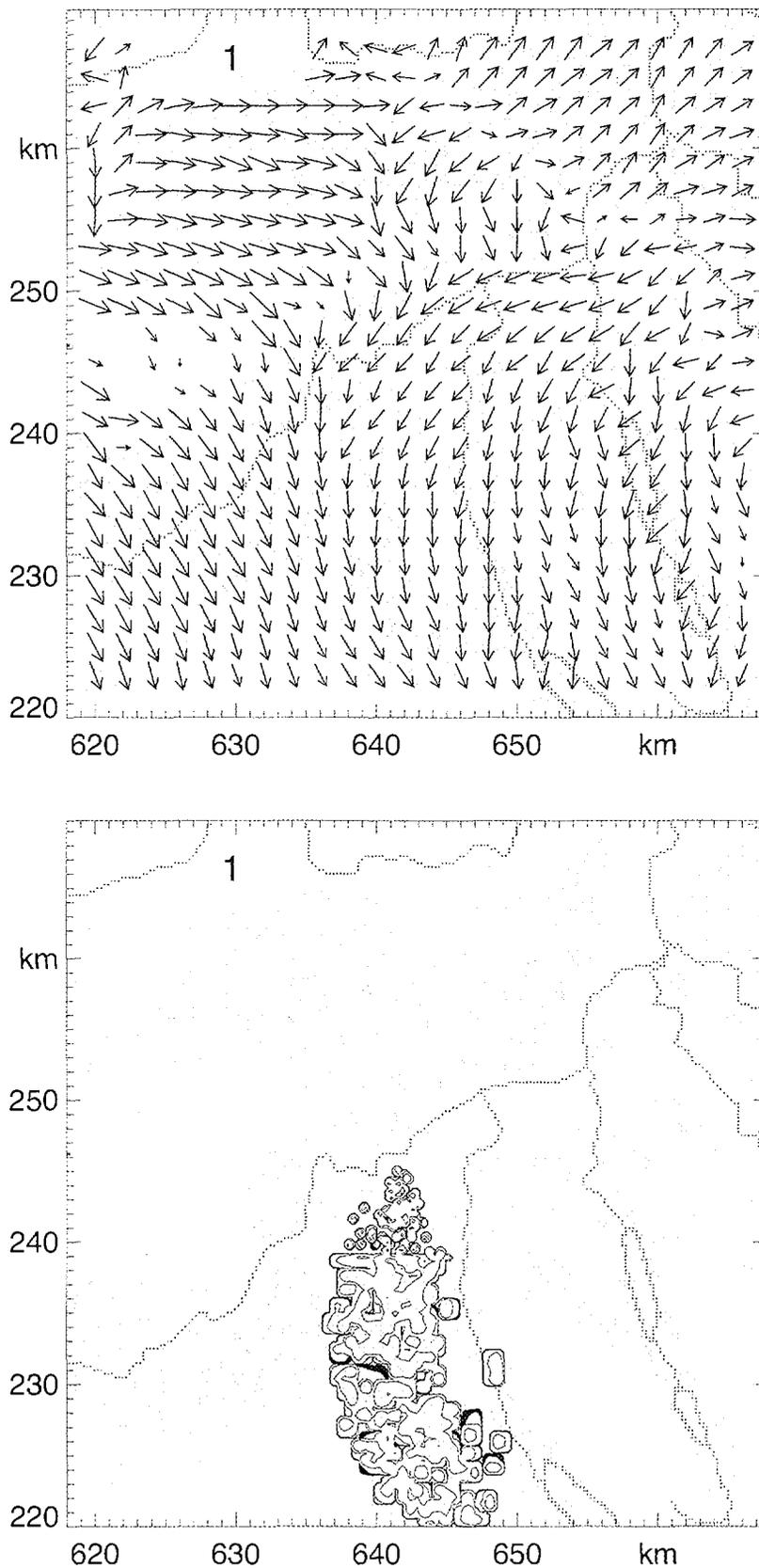
Anschliessend wird das interpolierte Windfeld mit dem Programm MATHEW so korrigiert, dass es divergenzfrei ist. Die Korrektur allfälliger Divergenzen des interpolierten Windfeldes wird zum Teil im horizontalen Feld, zum Teil durch Einführung einer vertikalen Geschwindigkeit erzielt. Die relativen Anteile der horizontalen und vertikalen Korrekturen sind durch die herrschende Stabilitätsschichtung der Atmosphäre gegeben, indem bei hoher Stabilität mehr horizontale (Umströmung von Hügeln), bei geringer Stabilität mehr vertikale Korrektur (Überströmung von Hügeln) eingeführt wird.

Für das Modell MATHEW sind also die Stabilitätsklassen für die Rechnungen der Windfelder in Pasquill-Gifford Stabilitätsklassen (Klasse 1 labile, 4 neutrale und 6 stabile Schichtung) einzugeben. Für die Berechnung der charakteristischen Windfelder der 12 Klassen wird generell mit einer neutralen Schichtung (Stabilitätsklasse 4) gerechnet. Da der Einfluss der Stabilität auf das Windfeld nicht bedeutend ist, wird bei der on-line-Bestimmung der Windfeldklasse ebenfalls stets die Stabilitätsklasse 4 angenommen.

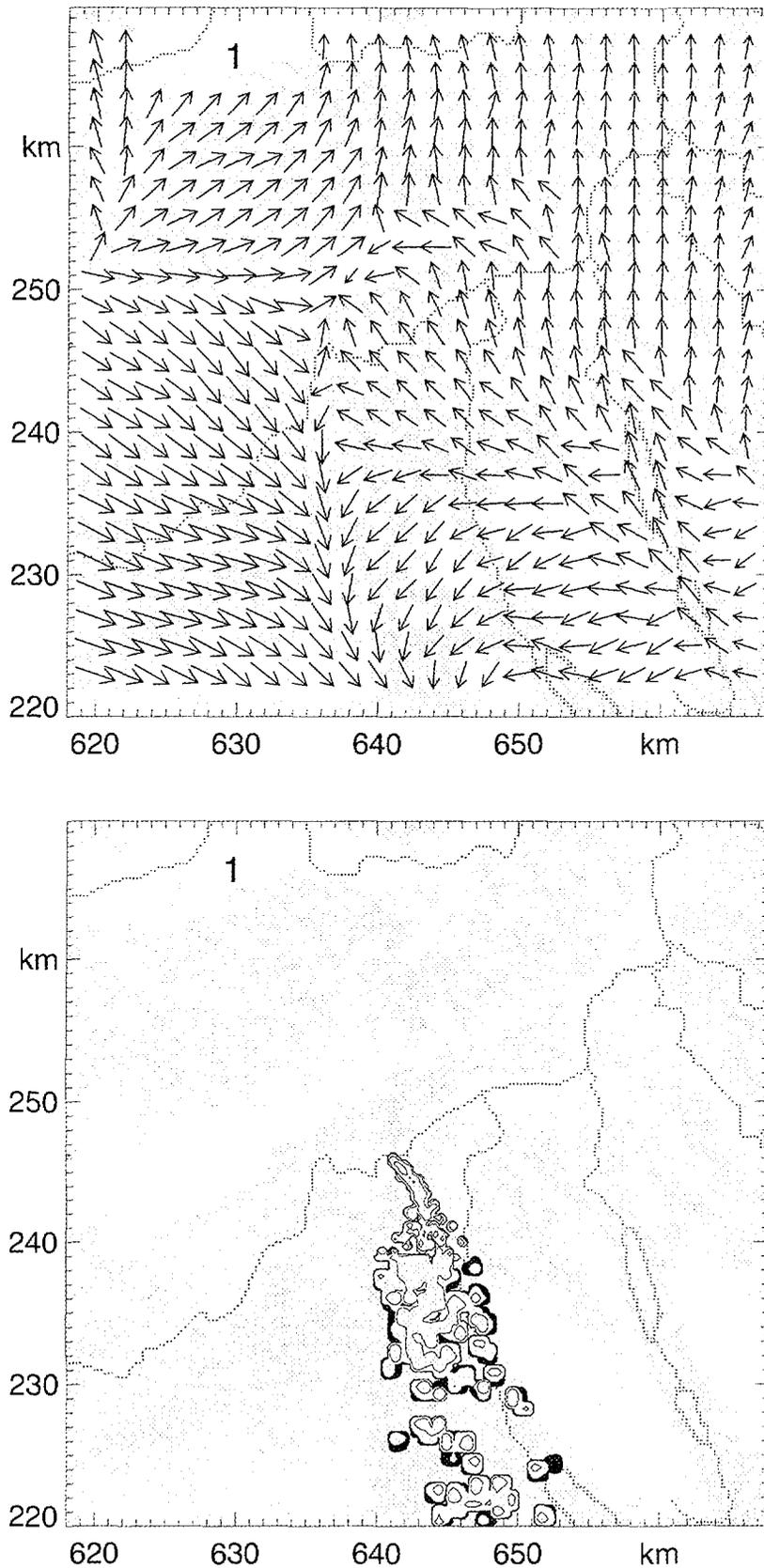
Ausgehend von den Windfeldrechnungen wird zur Veranschaulichung anschliessend eine Ausbreitungsrechnung mit dem Programm ADPIC durchgeführt. Dieses Programm rechnet die Windverfrachtung einer sehr grossen Anzahl von Partikeln. Die Dispersion wird dadurch berücksichtigt, dass jede Partikeltrajektorie in Abhängigkeit der Turbulenzaktivität der Atmosphäre horizontal und vertikal stochastisch abgelenkt wird. Damit ist die Ausbreitung wesentlich von der Stabilität der Atmosphäre abhängig. Wie beim Programm MATHEW wird auch hier eine Stabilitätsklasse nach Pasquill angenommen, die für die berechneten Standardfälle ebenfalls 4 ist. Die Auswirkung der Stabilität auf die Ausbreitung ist wesentlich grösser als auf das Windfeld, sodass etwa eine labiler angenommene Atmosphäre die Dispersion der Ausbreitungswolke wesentlich erhöht. Beim on-line-Verfahren wird hingegen die Stabilität bei der Ausbreitungsrechnung berücksichtigt.

Bei der Ausbreitungsrechnung von Standardfällen wurde als Beispiel eine fiktive Emissionsquelle in 70 m über Grund am Standort des Kernkraftwerks Gösgen angenommen. Die Quelle startet im Zeitraum von 24 Stunden 10'000 Partikel. Nach jeweils einer halben Stunde werden die emittierten Partikel in jeder Gitterzelle der Höhe 1.5 m, 20 m, 40 m, 80 m, 200 m und 300 m über Grund ausgezählt und der betreffenden Gitterzelle als Konzentration zur entsprechenden Zeit zugewiesen.

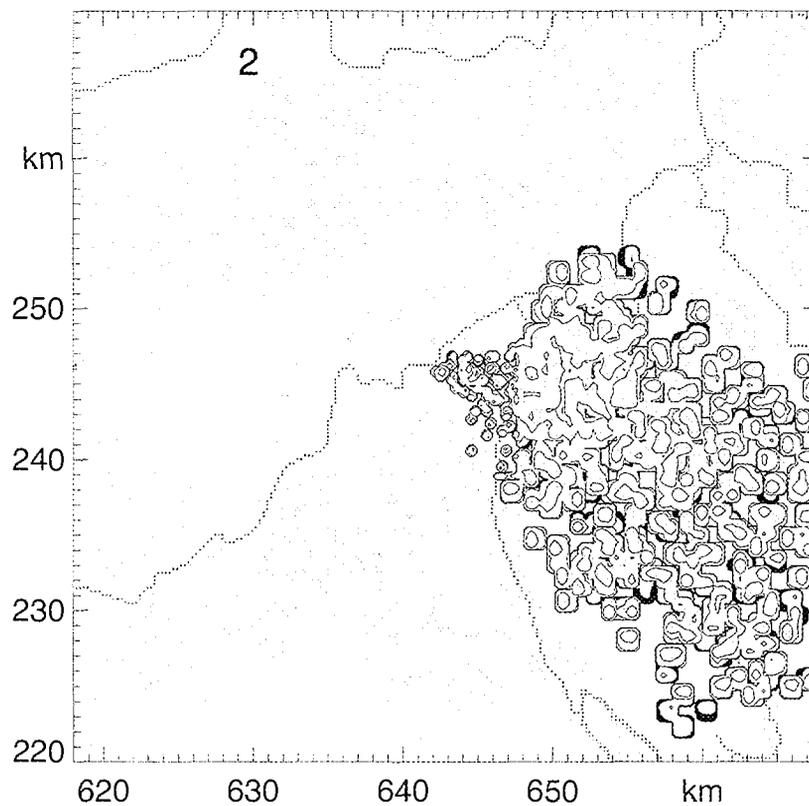
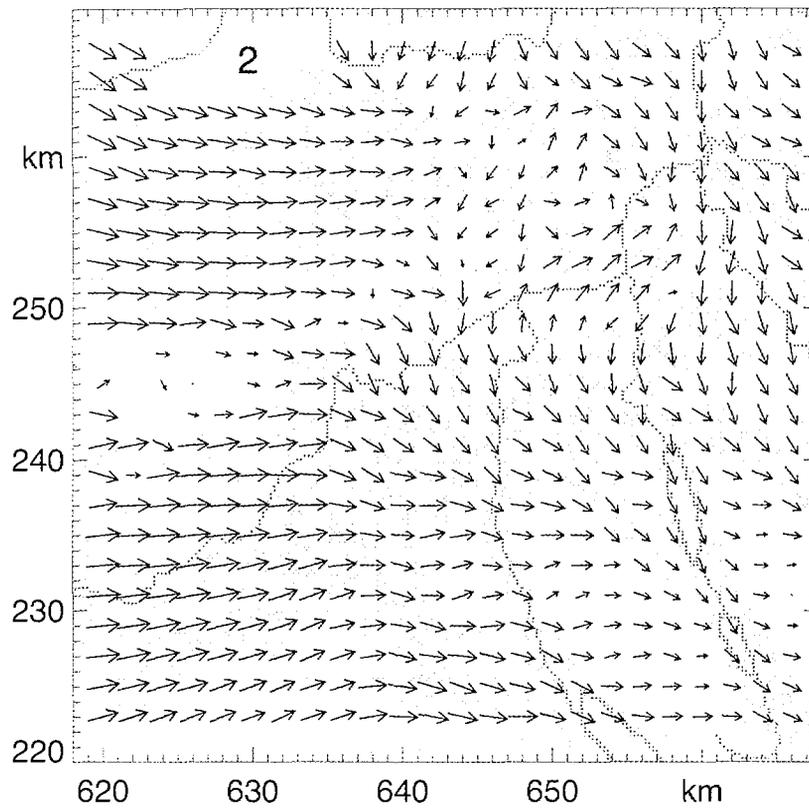
Die Windfeld- und Ausbreitungsrechnungen sind für alle 12 Klassen in den Figuren 5.1 bis 5.12 dargestellt. Diese Darstellungen sind zusammen mit den mittleren Stationswinden und den mittleren Windrosen der Figuren 4.1 bis 4.6 zur Charakterisierung der 12 Windfeldklassen herangezogen worden (vgl. Kapitel 4).



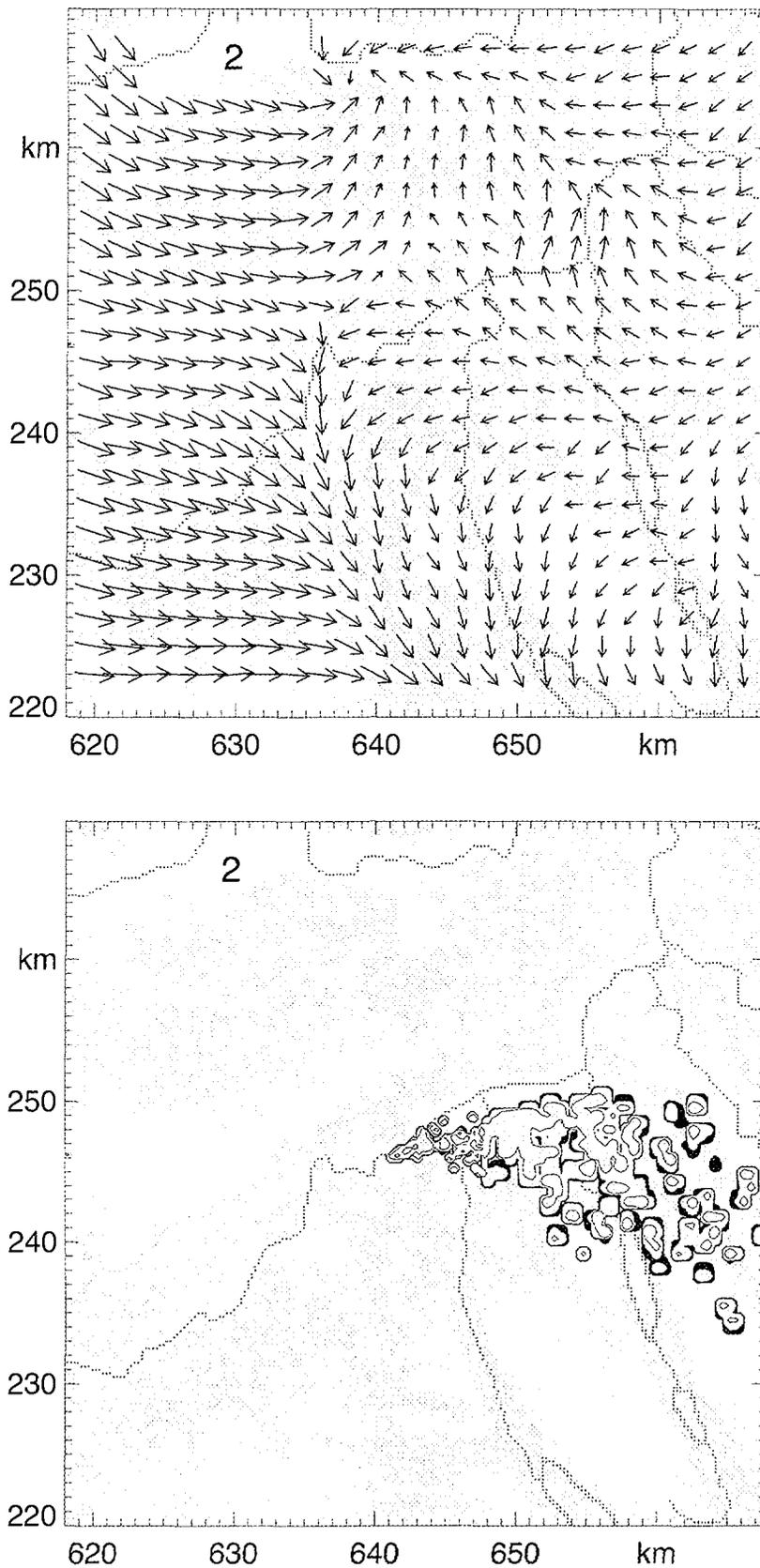
**Figur 5.1a:** Windfeld in 800 m über *Meer* (oben) und Konzentrationen (20 m über *Grund*) der Dispersion einer fiktiven Quelle 8 Stunden nach Start für Klasse 1. Der Ausschnitt entspricht jenem von Figur 1 mit unterlegter Topographie und Flüssen.



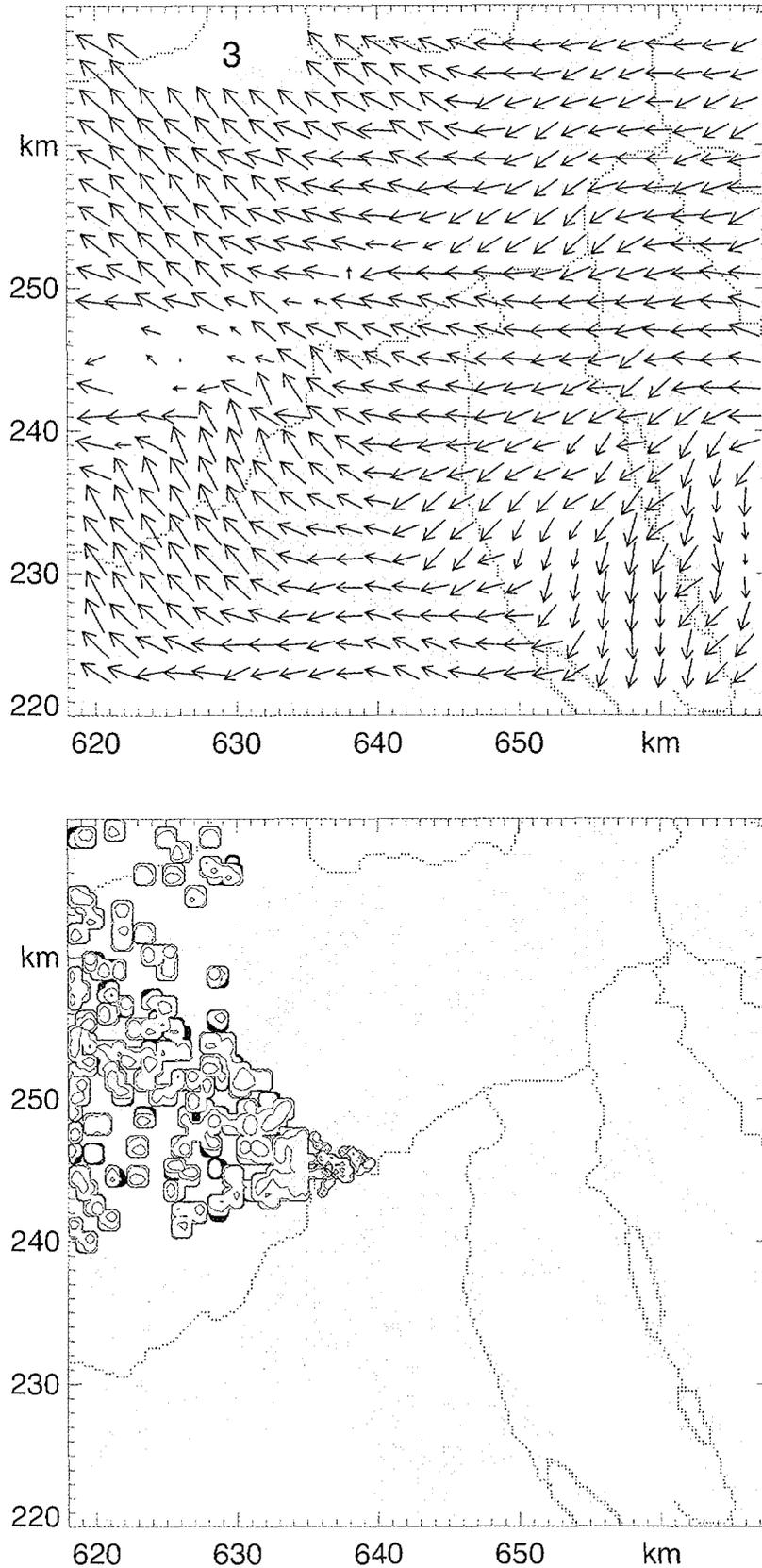
**Figur 5.1b:** Windfeld in 1200 m über *Meer* (oben) und Konzentrationen (300 m über *Grund*) der Dispersion einer fiktiven Quelle 8 Stunden nach Start für Klasse 1. Der Ausschnitt entspricht jenem von Figur 1 mit unterlegter Topographie und Flüssen.



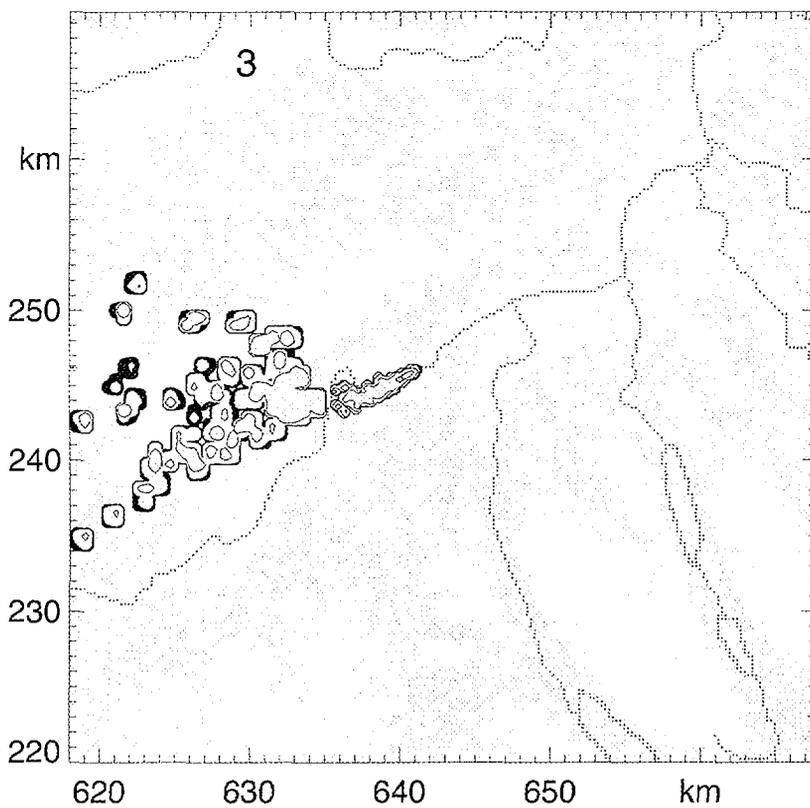
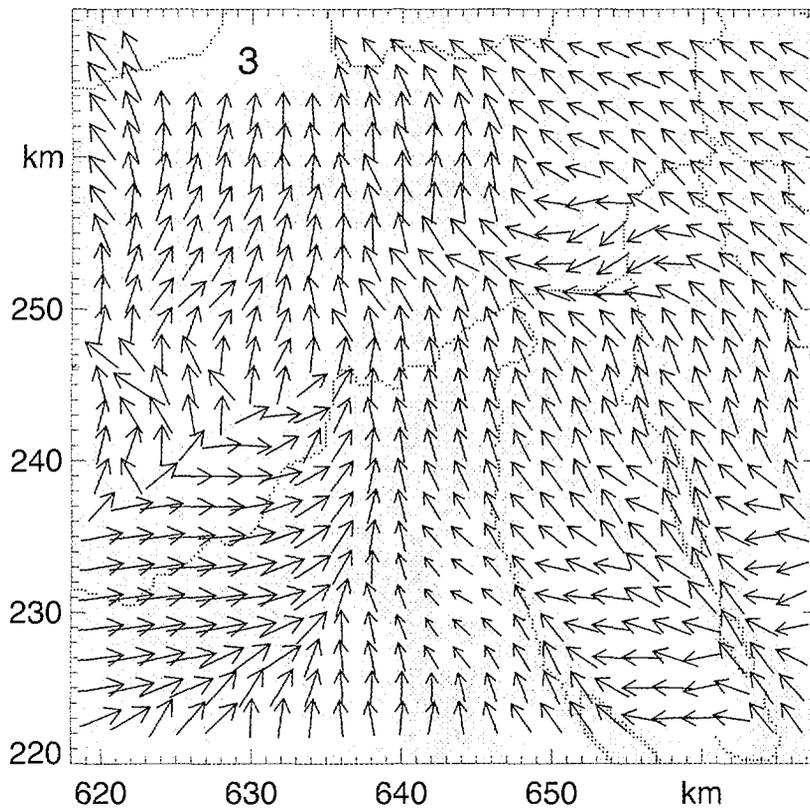
**Figur 5.2a:** Windfeld in 800 m über *Meer* (oben) und Konzentrationen (20 m über *Grund*) der Dispersion einer fiktiven Quelle 8 Stunden nach Start für Klasse 2. Der Ausschnitt entspricht jenem von Figur 1 mit unterlegter Topographie und Flüssen.



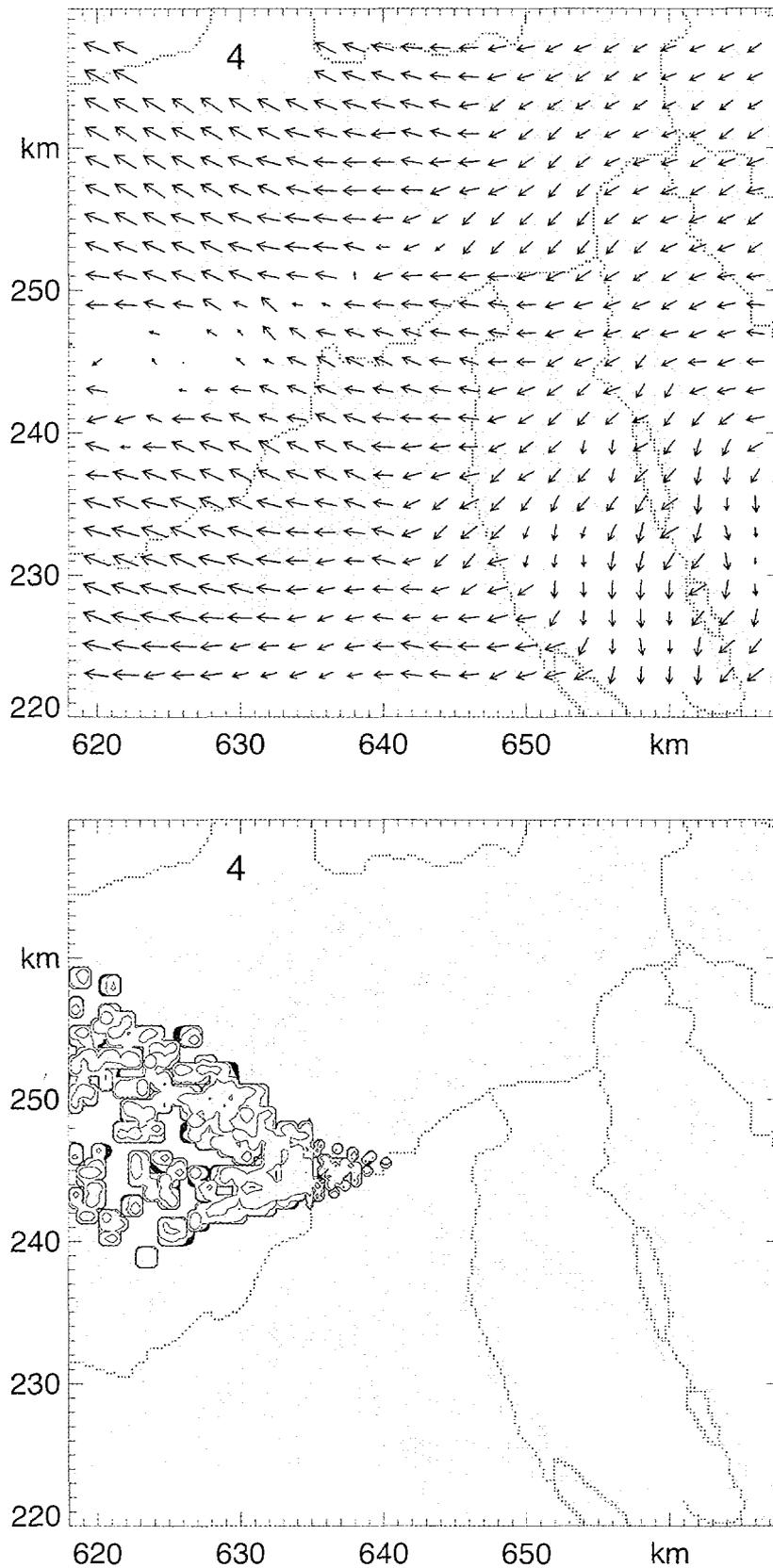
**Figur 5.2b:** Windfeld in 1200 m über *Meer* (oben) und Konzentrationen (300 m über *Grund*) der Dispersion einer fiktiven Quelle 8 Stunden nach Start für Klasse 2. Der Ausschnitt entspricht jenem von Figur 1 mit unterlegter Topographie und Flüssen.



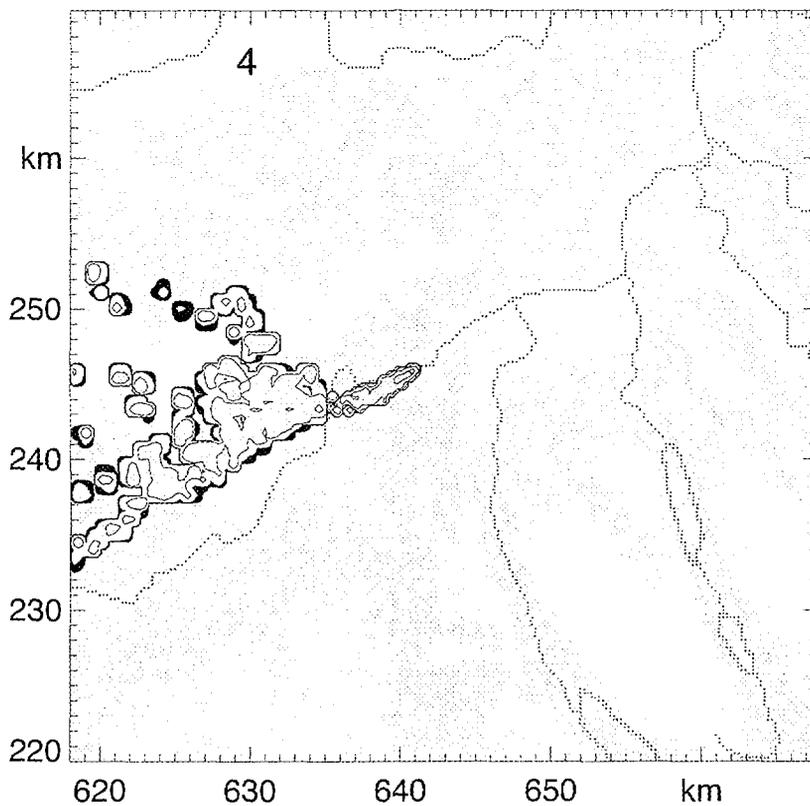
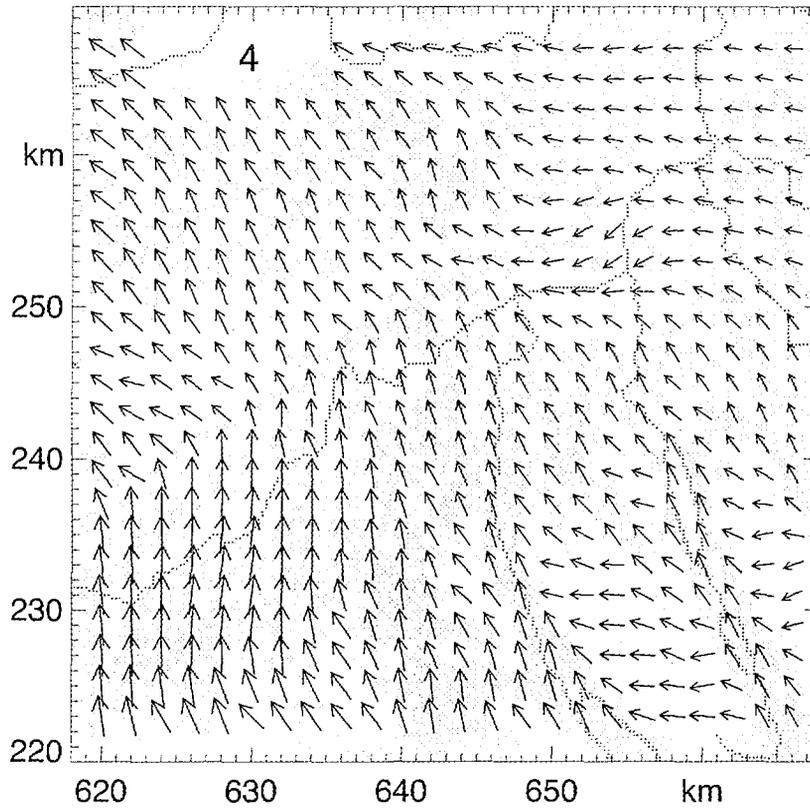
**Figur 5.3a:** Windfeld in 800 m über *Meer* (oben) und Konzentrationen (20 m über *Grund*) der Dispersion einer fiktiven Quelle 8 Stunden nach Start für Klasse 3. Der Ausschnitt entspricht jenem von Figur 1 mit unterlegter Topographie und Flüssen.



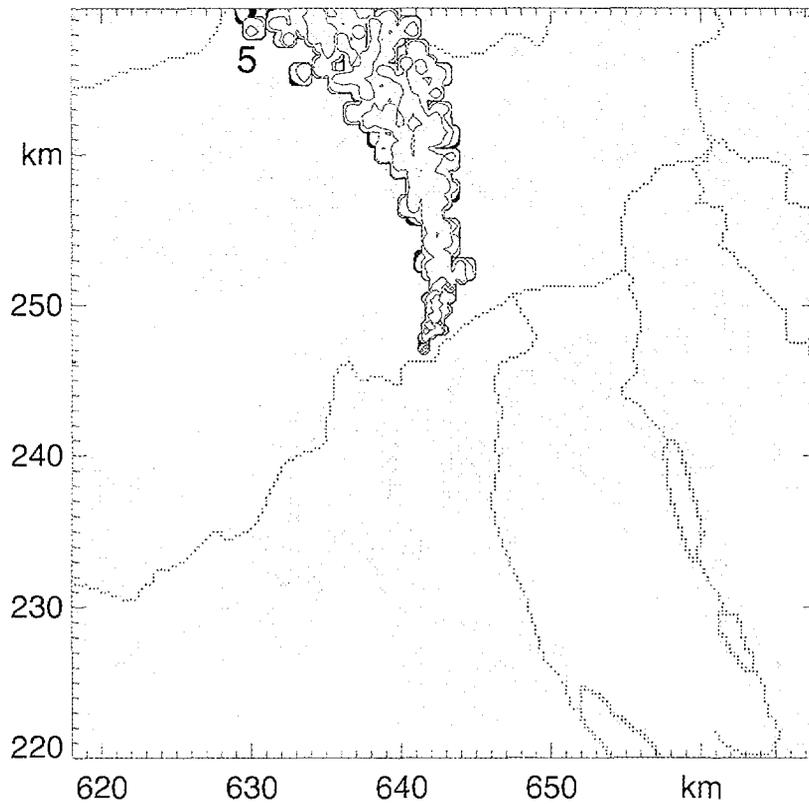
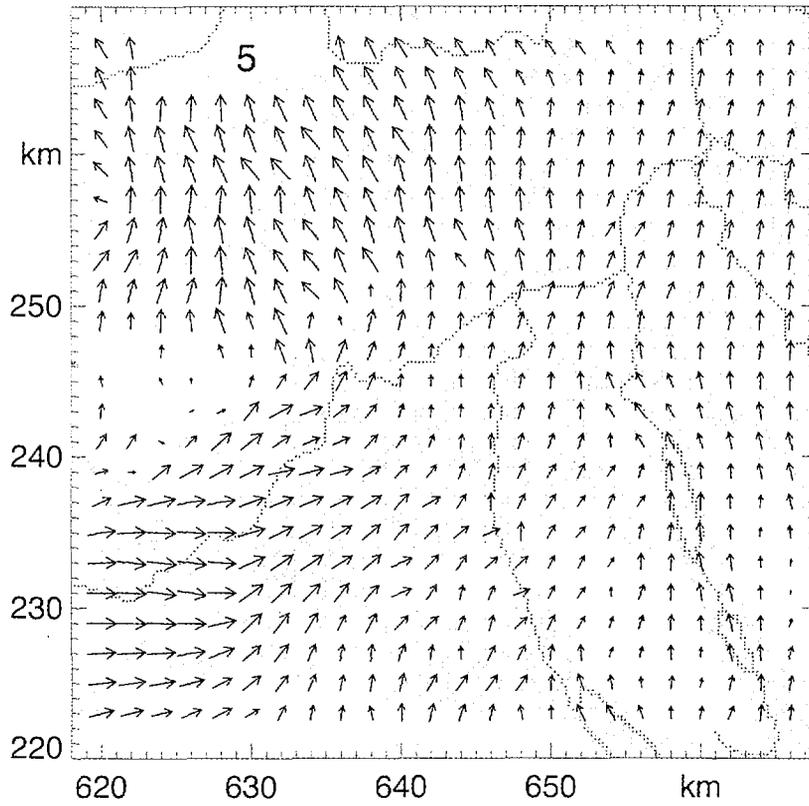
**Figur 5.3b:** Windfeld in 1200 m über *Meer* (oben) und Konzentrationen (300 m über *Grund*) der Dispersion einer fiktiven Quelle 8 Stunden nach Start für Klasse 3. Der Ausschnitt entspricht jenem von Figur 1 mit unterlegter Topographie und Flüssen.



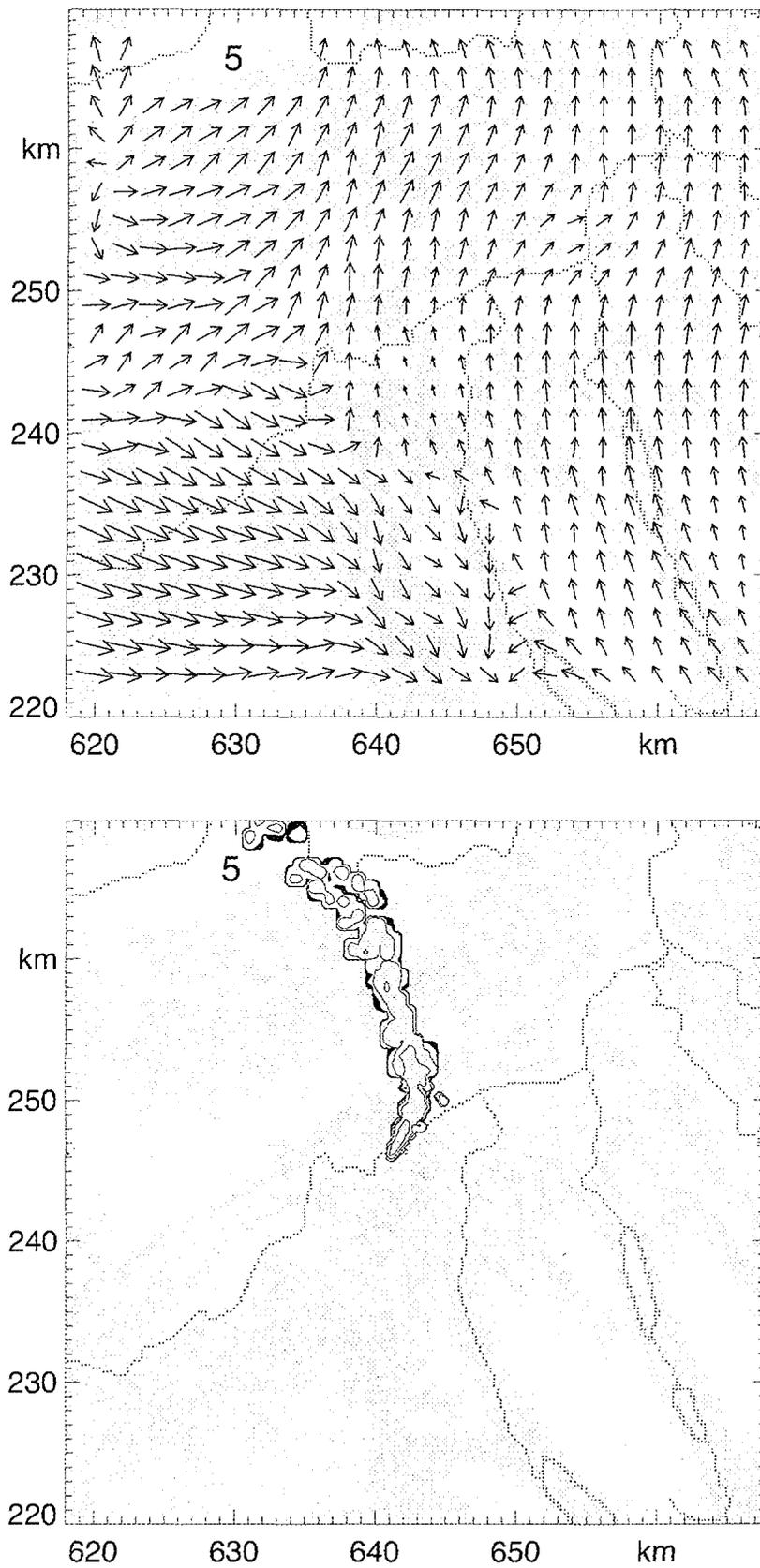
**Figur 5.4a:** Windfeld in 800 m über *Meer* (oben) und Konzentrationen (20 m über *Grund*) der Dispersion einer fiktiven Quelle 8 Stunden nach Start für Klasse 4. Der Ausschnitt entspricht jenem von Figur 1 mit unterlegter Topographie und Flüssen.



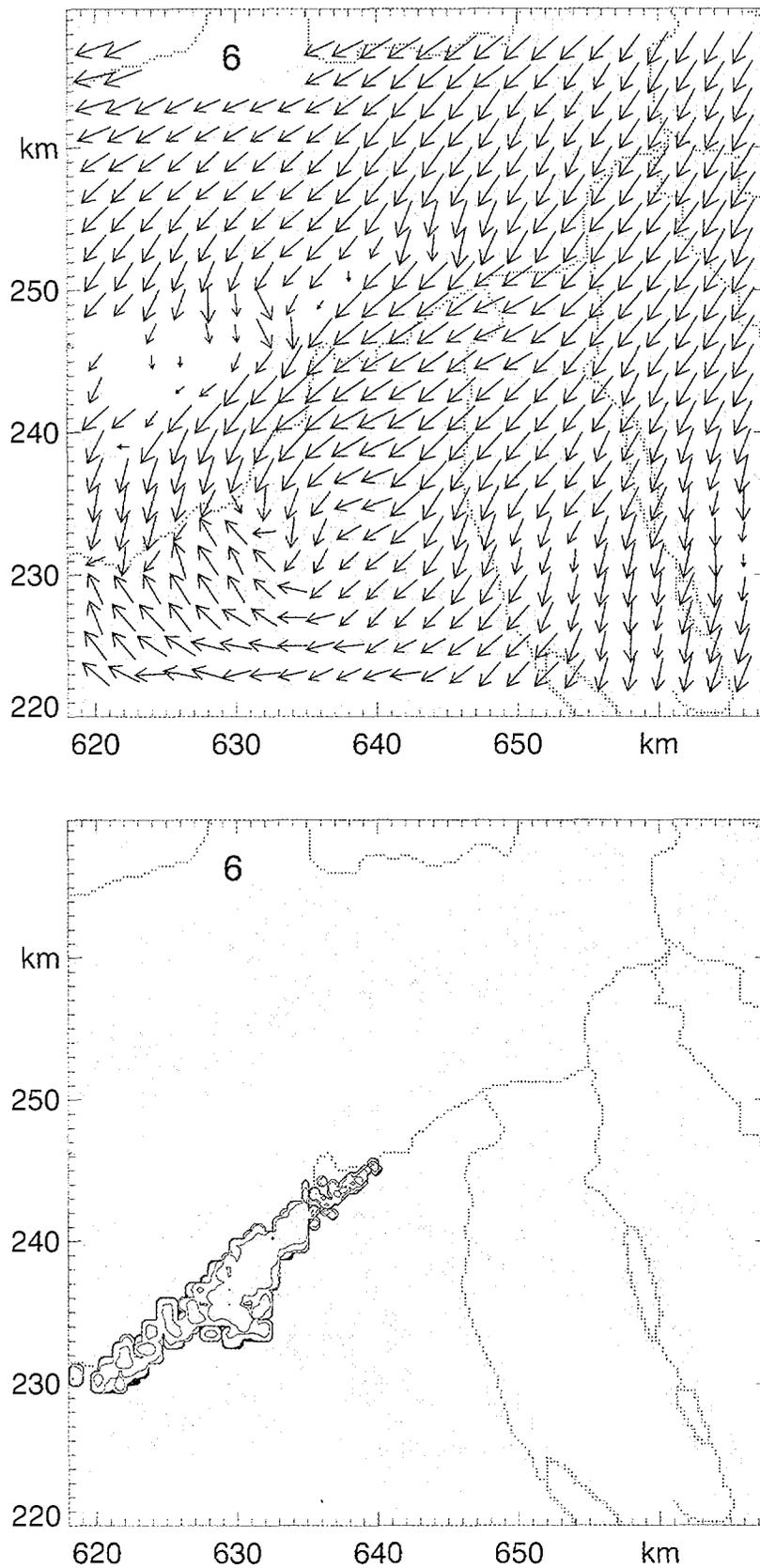
**Figur 5.4b:** Windfeld in 1200 m über *Meer* (oben) und Konzentrationen (300 m über *Grund*) der Dispersion einer fiktiven Quelle 8 Stunden nach Start für Klasse 4. Der Ausschnitt entspricht jenem von Figur 1 mit unterlegter Topographie und Flüssen.



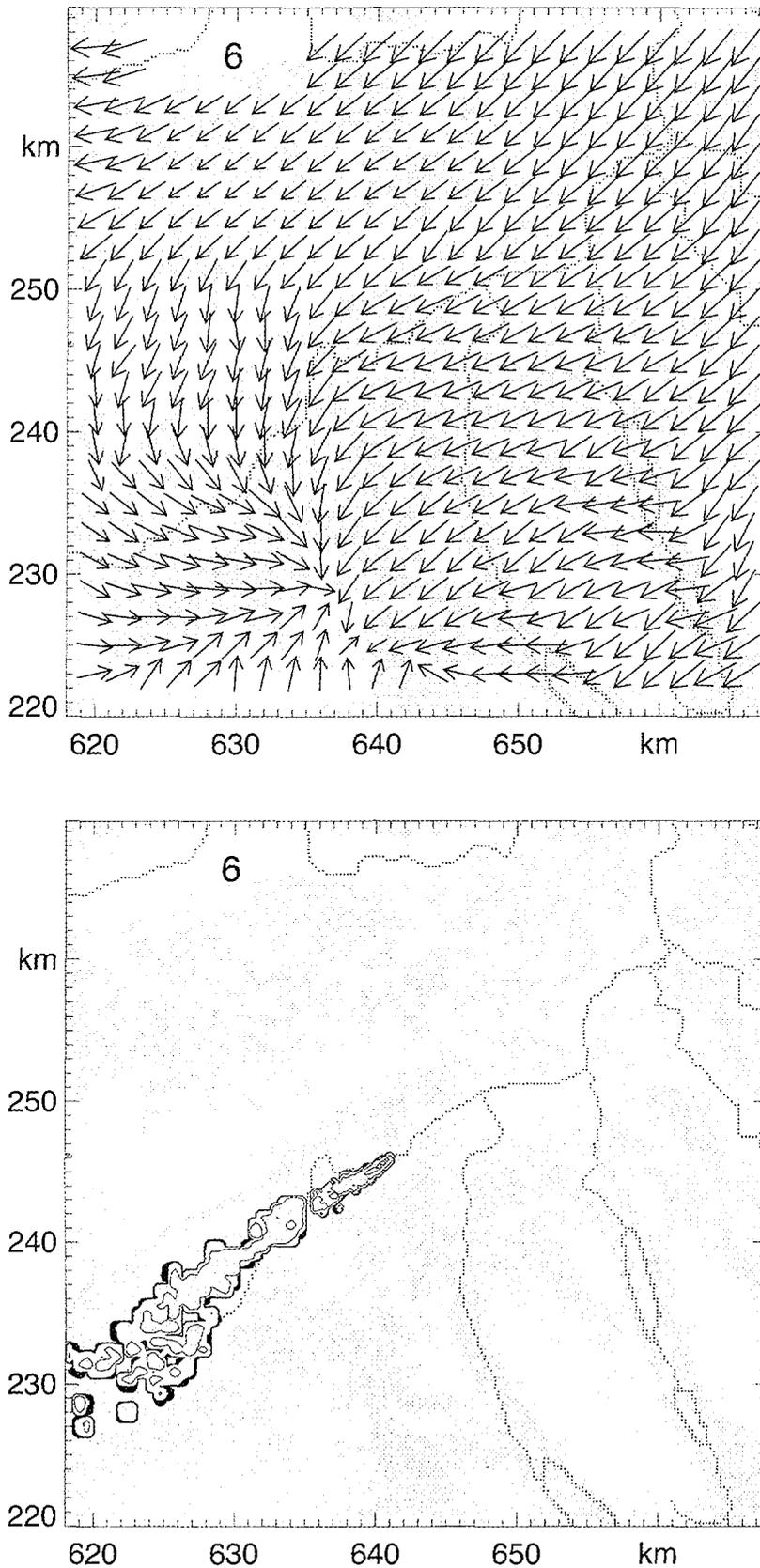
**Figur 5.5a:** Windfeld in 800 m über *Meer* (oben) und Konzentrationen (20 m über *Grund*) der Dispersion einer fiktiven Quelle 8 Stunden nach Start für Klasse 5. Der Ausschnitt entspricht jenem von Figur 1 mit unterlegter Topographie und Flüssen.



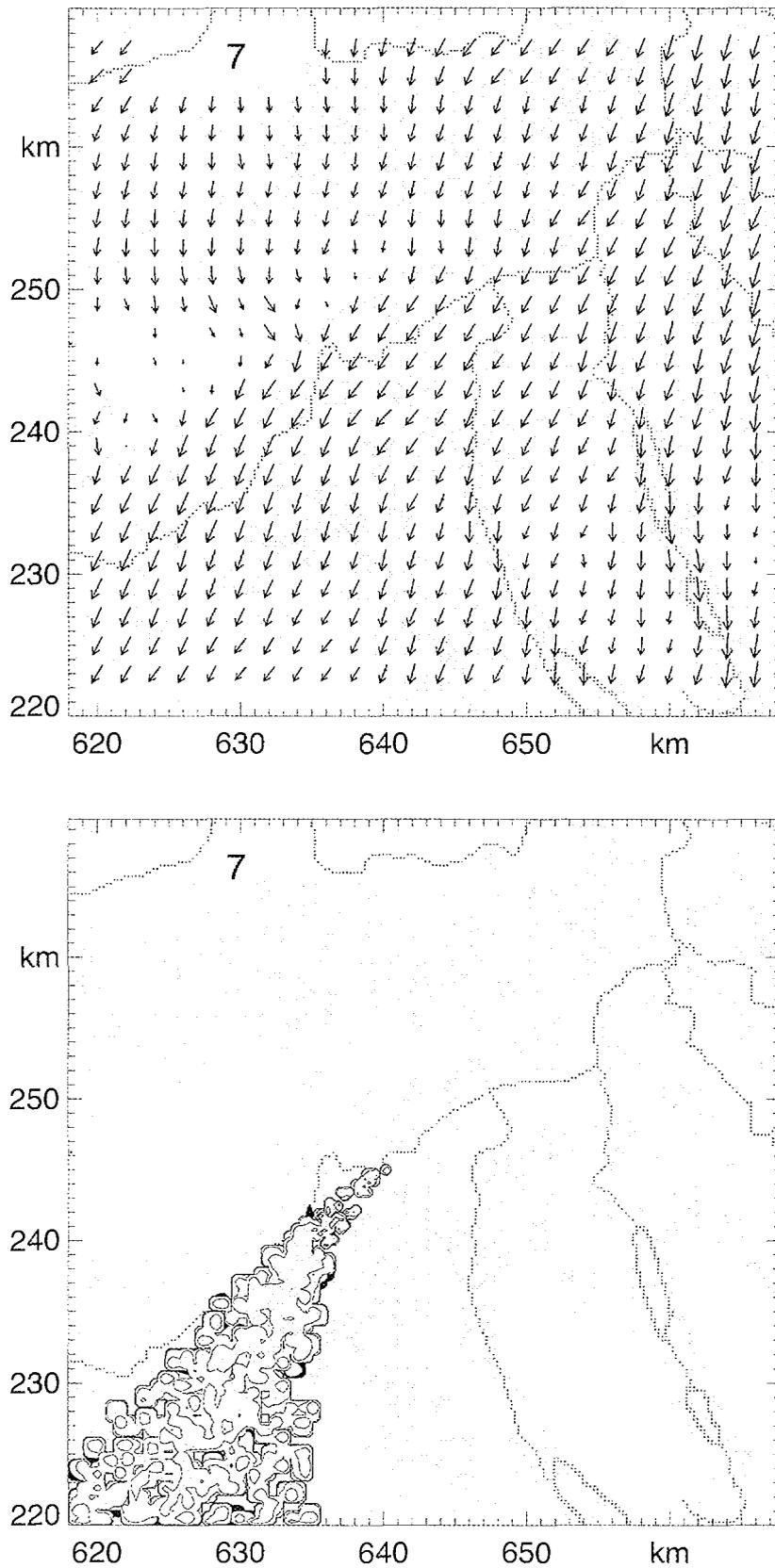
**Figur 5.5b:** Windfeld in 1200 m über *Meer* (oben) und Konzentrationen (300 m über *Grund*) der Dispersion einer fiktiven Quelle 8 Stunden nach Start für Klasse 5. Der Ausschnitt entspricht jenem von Figur 1 mit unterlegter Topographie und Flüssen.



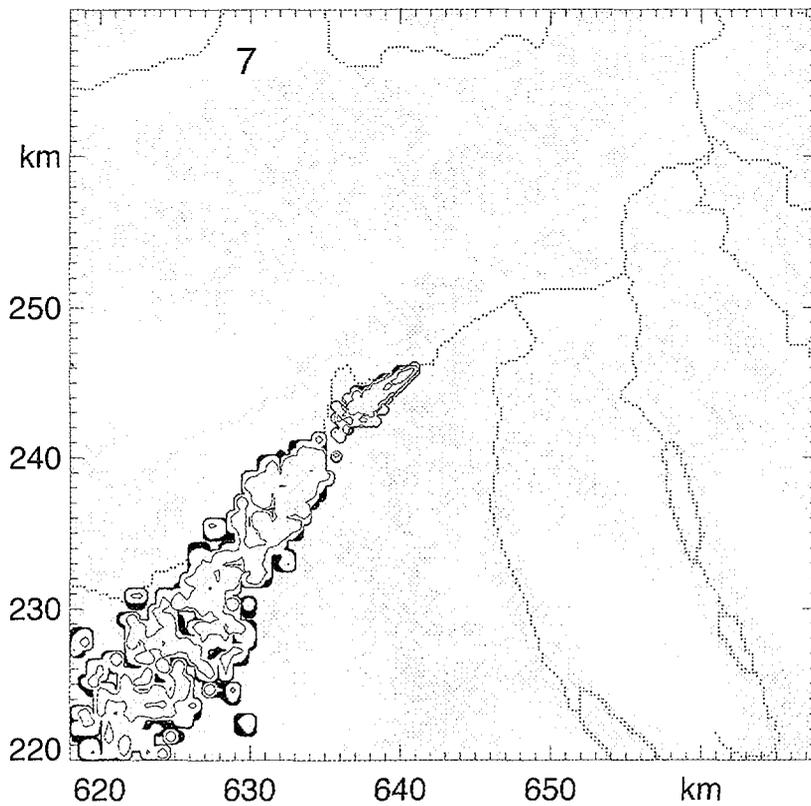
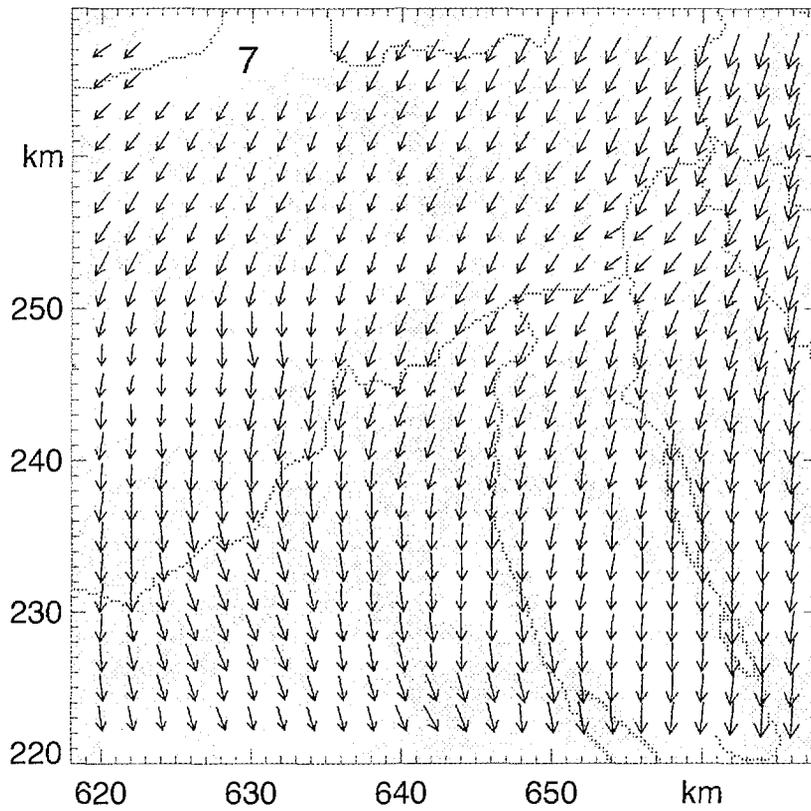
**Figur 5.6a:** Windfeld in 800 m über *Meer* (oben) und Konzentrationen (20 m über *Grund*) der Dispersion einer fiktiven Quelle 8 Stunden nach Start für Klasse 6. Der Ausschnitt entspricht jenem von Figur 1 mit unterlegter Topographie und Flüssen.



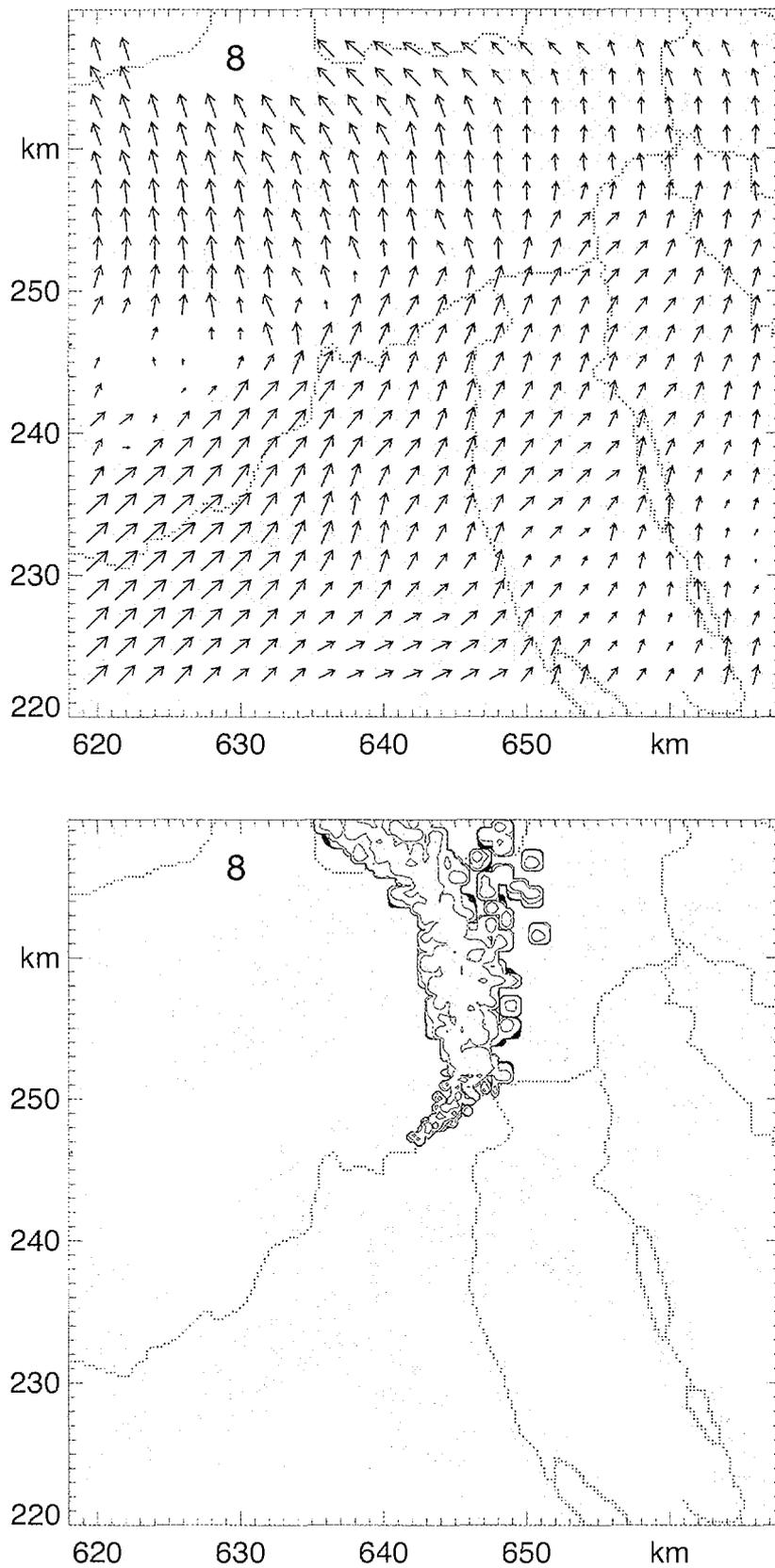
**Figur 5.6b:** Windfeld in 1200 m über *Meer* (oben) und Konzentrationen (300 m über *Grund*) der Dispersion einer fiktiven Quelle 8 Stunden nach Start für Klasse 6. Der Ausschnitt entspricht jenem von Figur 1 mit unterlegter Topographie und Flüssen.



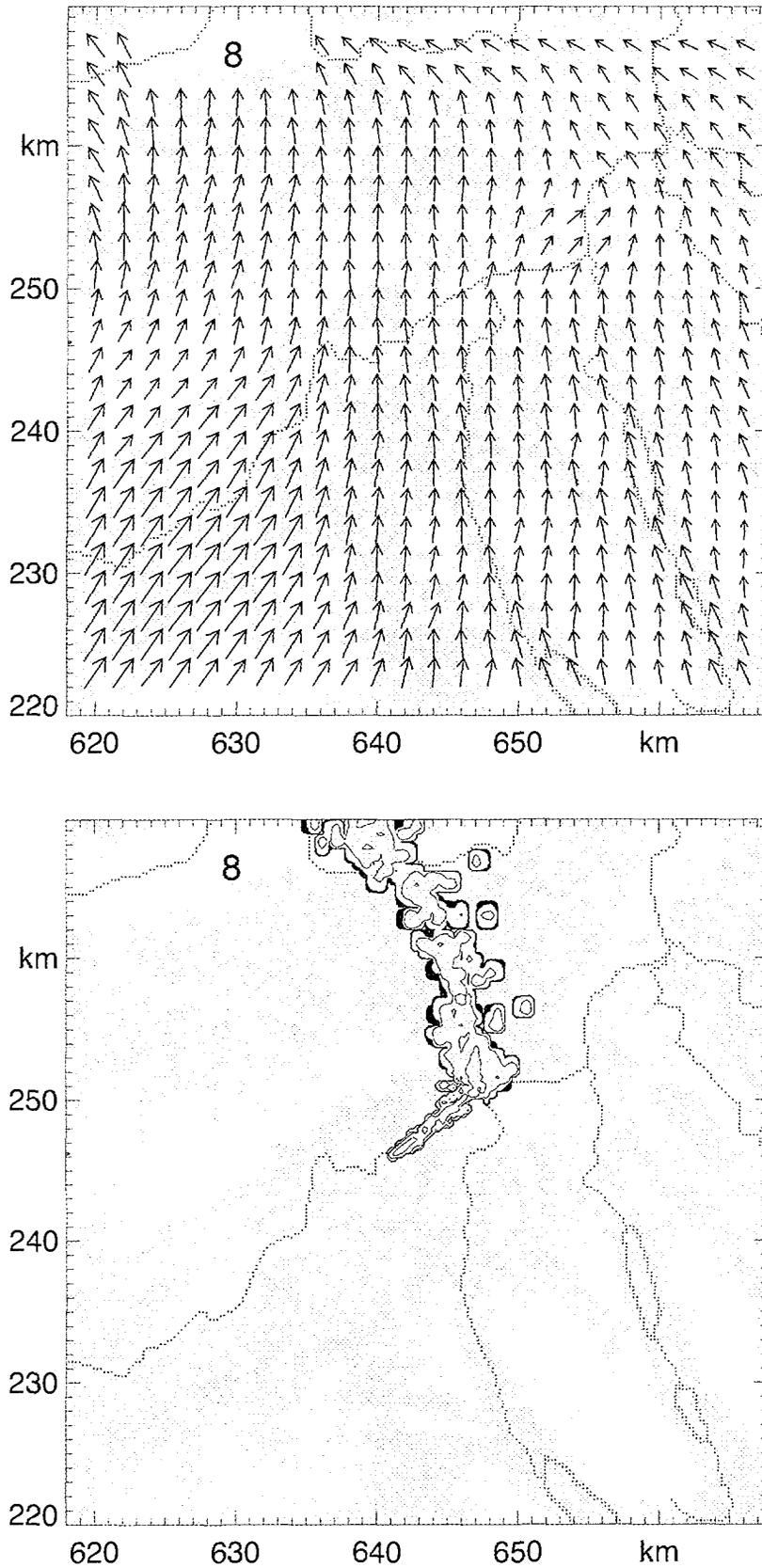
**Figur 5.7a:** Windfeld in 800 m über *Meer* (oben) und Konzentrationen (20 m über *Grund*) der Dispersion einer fiktiven Quelle 8 Stunden nach Start für Klasse 7. Der Ausschnitt entspricht jenem von Figur 1 mit unterlegter Topographie und Flüssen.



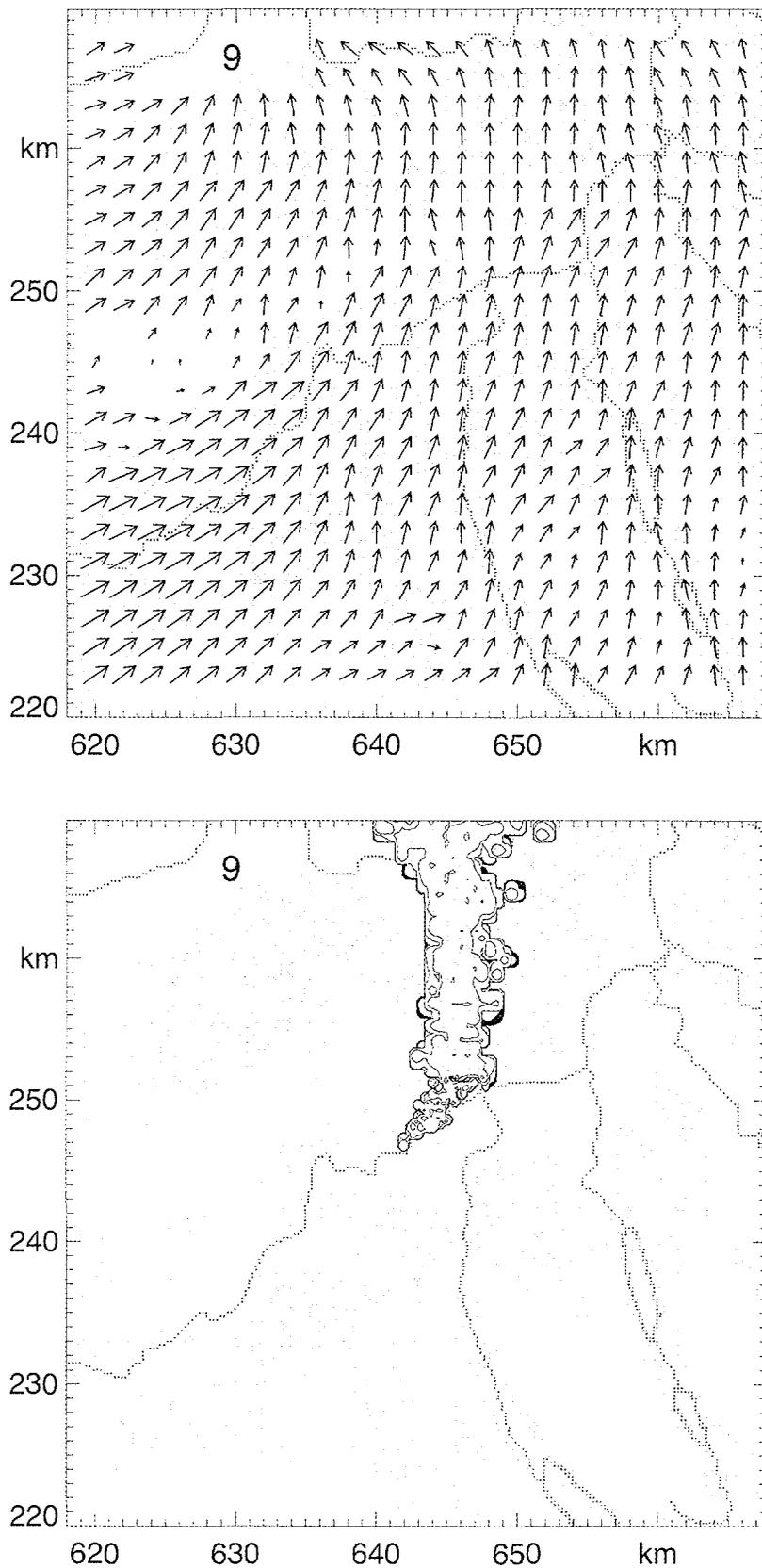
**Figur 5.7b:** Windfeld in 1200 m über *Meer* (oben) und Konzentrationen (300 m über *Grund*) der Dispersion einer fiktiven Quelle 8 Stunden nach Start für Klasse 7. Der Ausschnitt entspricht jenem von Figur 1 mit unterlegter Topographie und Flüssen.



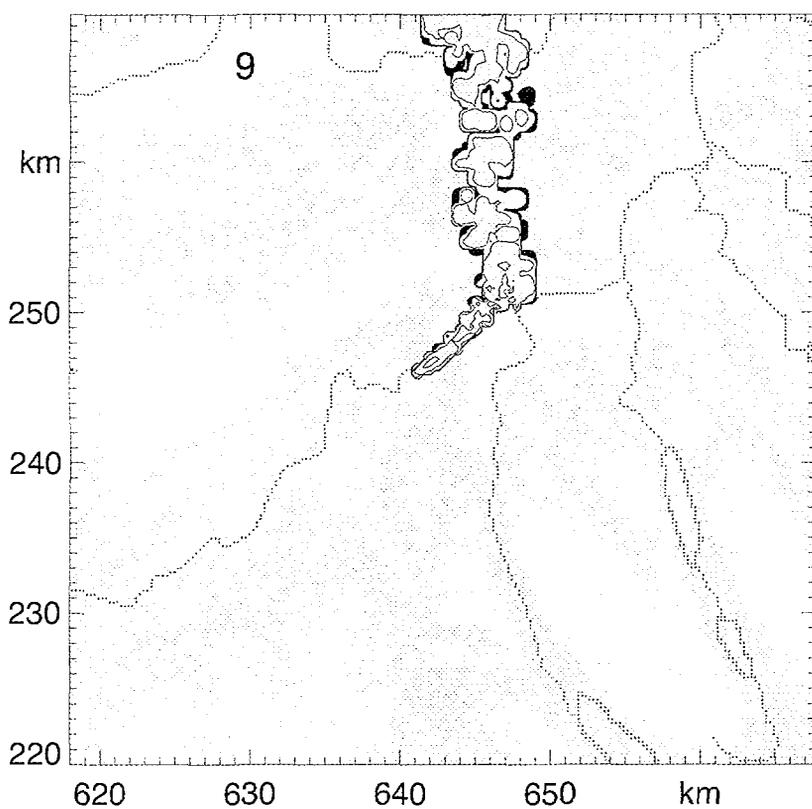
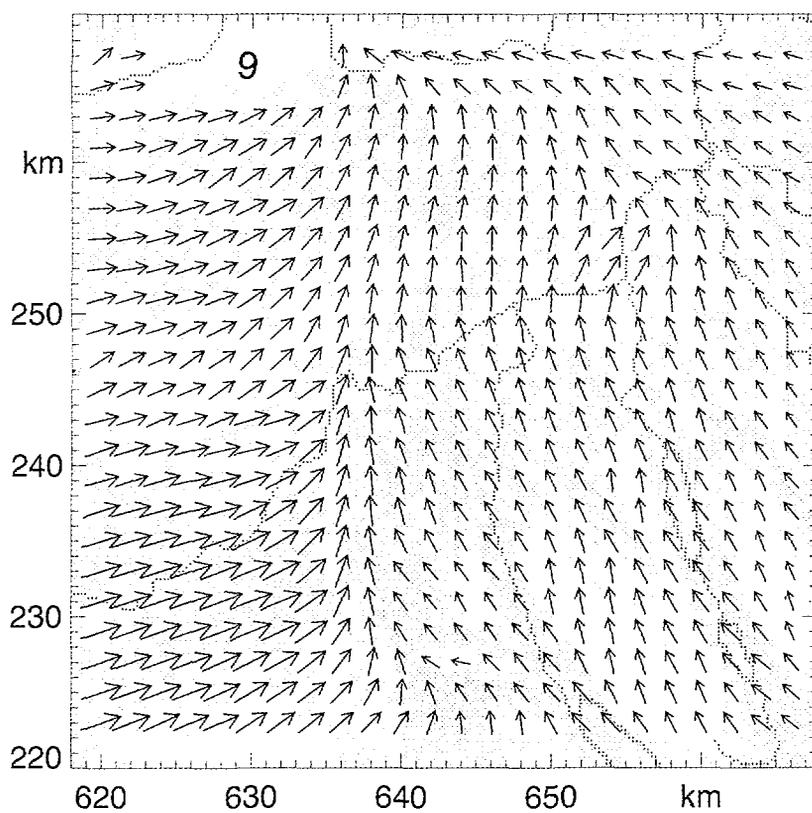
**Figur 5.8a:** Windfeld in 800 m über Meer (oben) und Konzentrationen (20 m über Grund) der Dispersion einer fiktiven Quelle 8 Stunden nach Start für Klasse 8. Der Ausschnitt entspricht jenem von Figur 1 mit unterlegter Topographie und Flüssen.



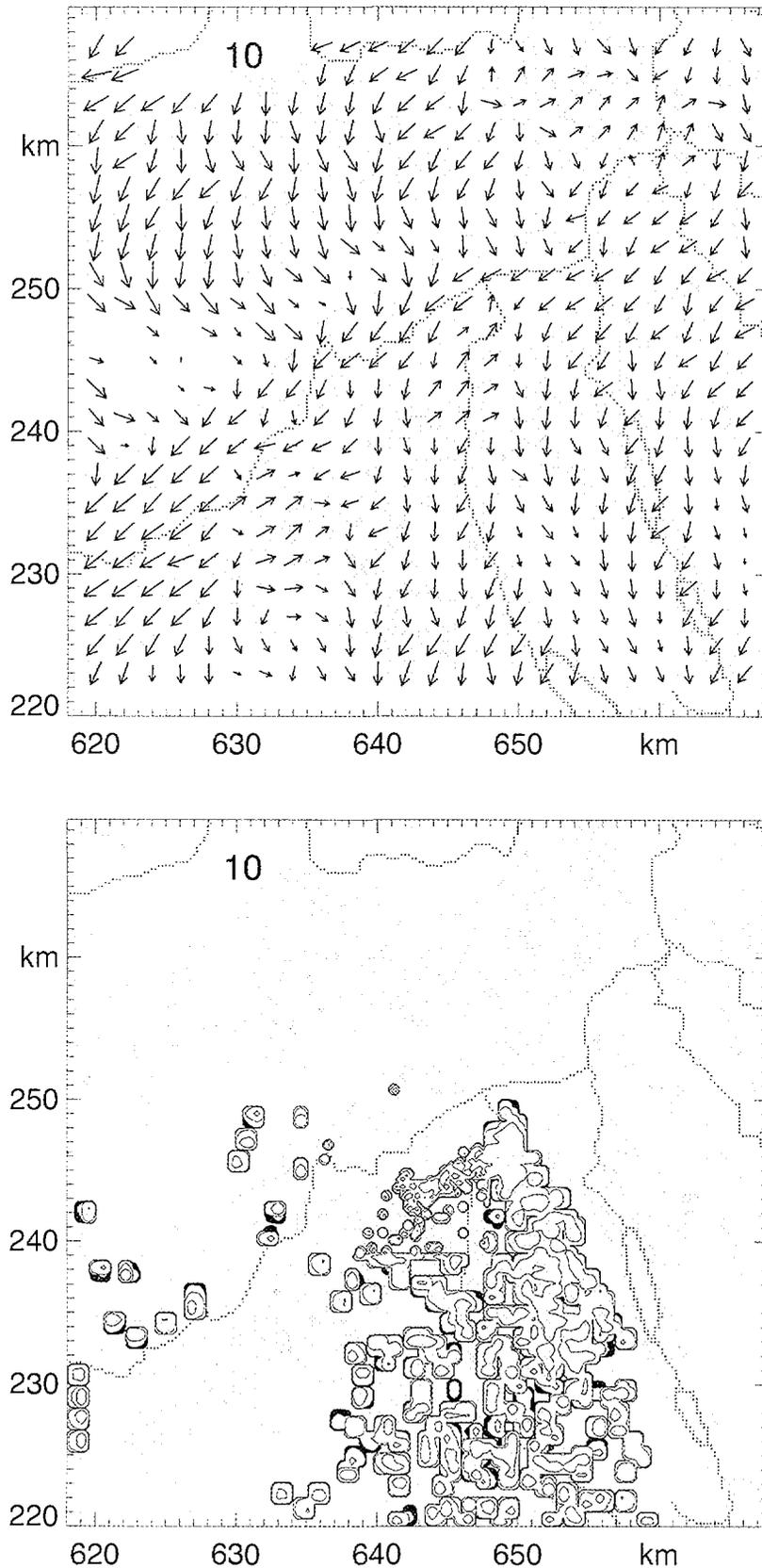
**Figur 5.8b:** Windfeld in 1200 m über *Meer* (oben) und Konzentrationen (300 m über *Grund*) der Dispersion einer fiktiven Quelle 8 Stunden nach Start für Klasse 8. Der Ausschnitt entspricht jenem von Figur 1 mit unterlegter Topographie und Flüssen.



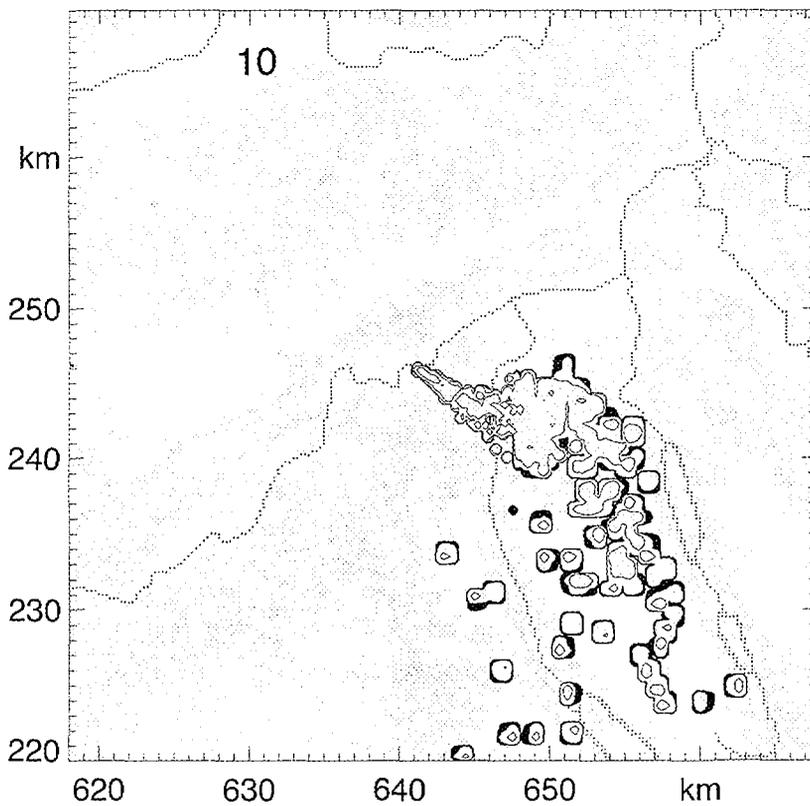
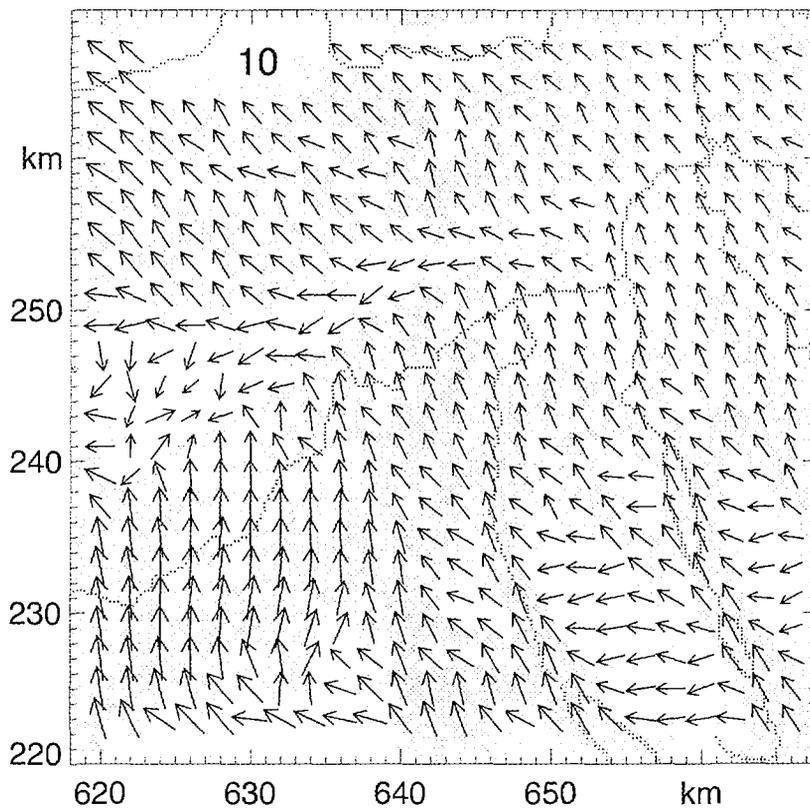
**Figur 5.9a:** Windfeld in 800 m über *Meer* (oben) und Konzentrationen (20 m über *Grund*) der Dispersion einer fiktiven Quelle 8 Stunden nach Start für Klasse 9. Der Ausschnitt entspricht jenem von Figur 1 mit unterlegter Topographie und Flüssen.



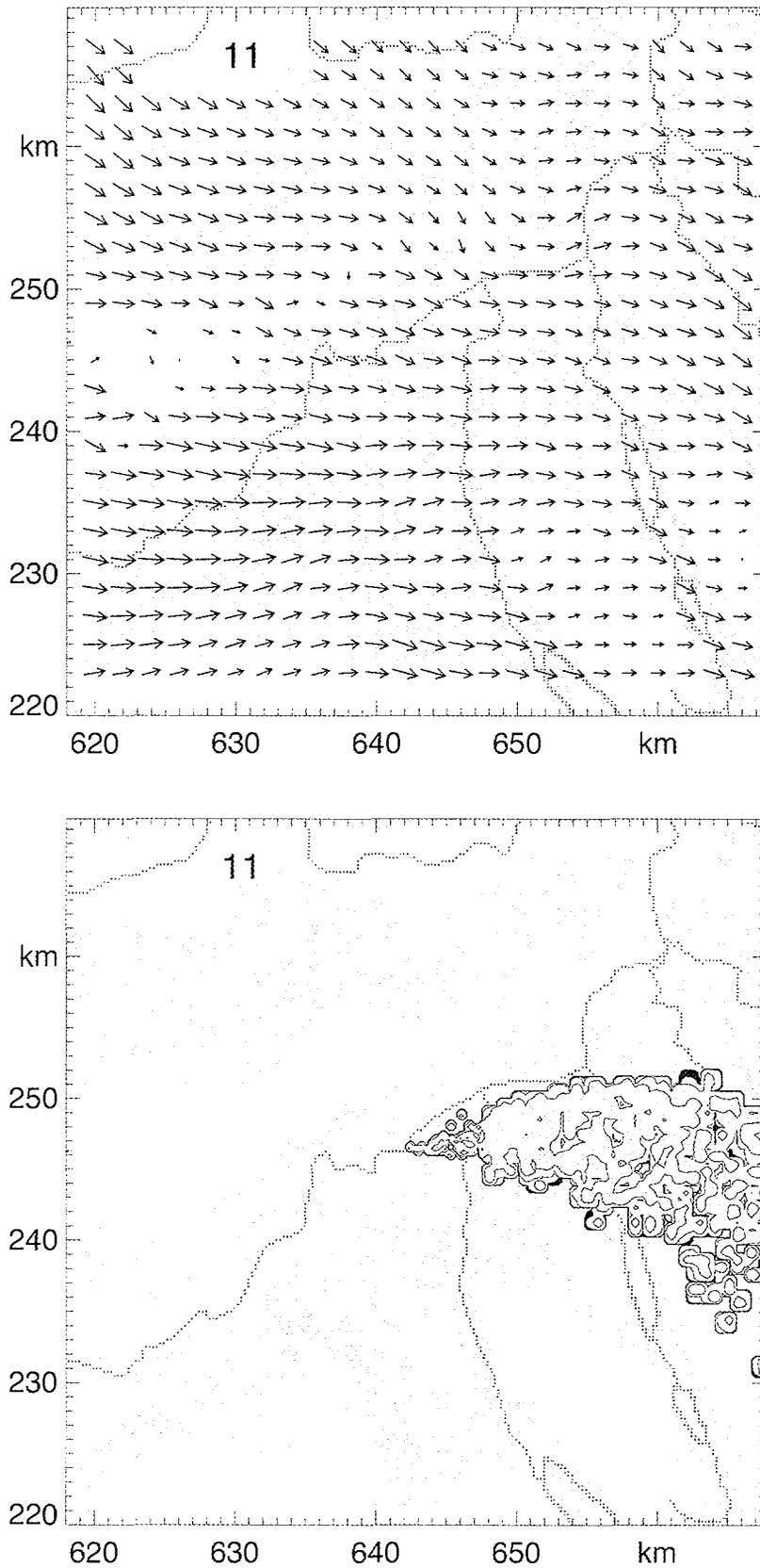
**Figur 5.9b:** Windfeld in 1200 m über Meer (oben) und Konzentrationen (300 m über Grund) der Dispersion einer fiktiven Quelle 8 Stunden nach Start für Klasse 9. Der Ausschnitt entspricht jenem von Figur 1 mit unterlegter Topographie und Flüssen.



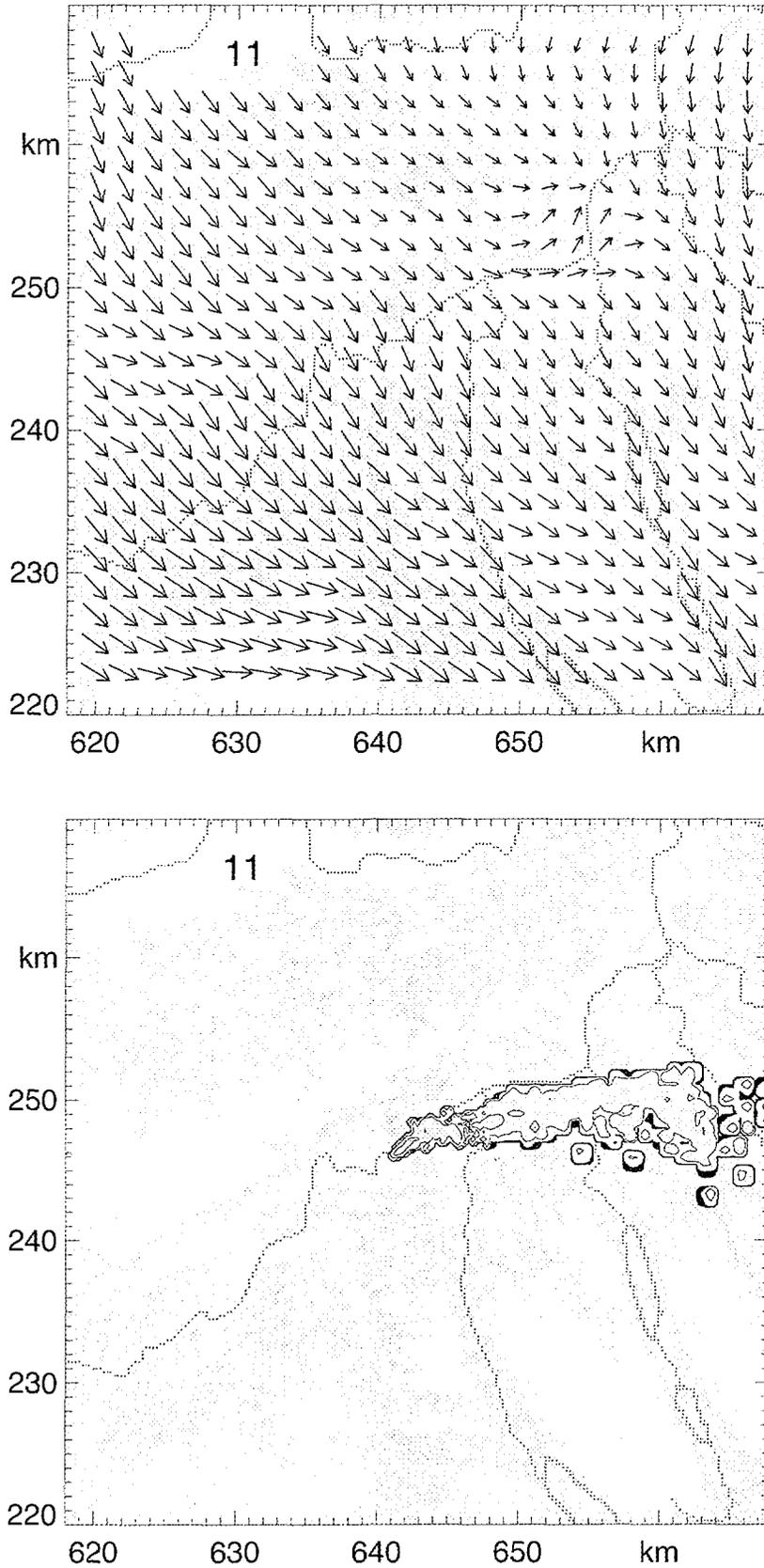
**Figur 5.10a:** Windfeld in 800 m über Meer (oben) und Konzentrationen (20 m über Grund) der Dispersion einer fiktiven Quelle 8 Stunden nach Start für Klasse 10. Der Ausschnitt entspricht jenem von Figur 1 mit unterlegter Topographie und Flüssen.



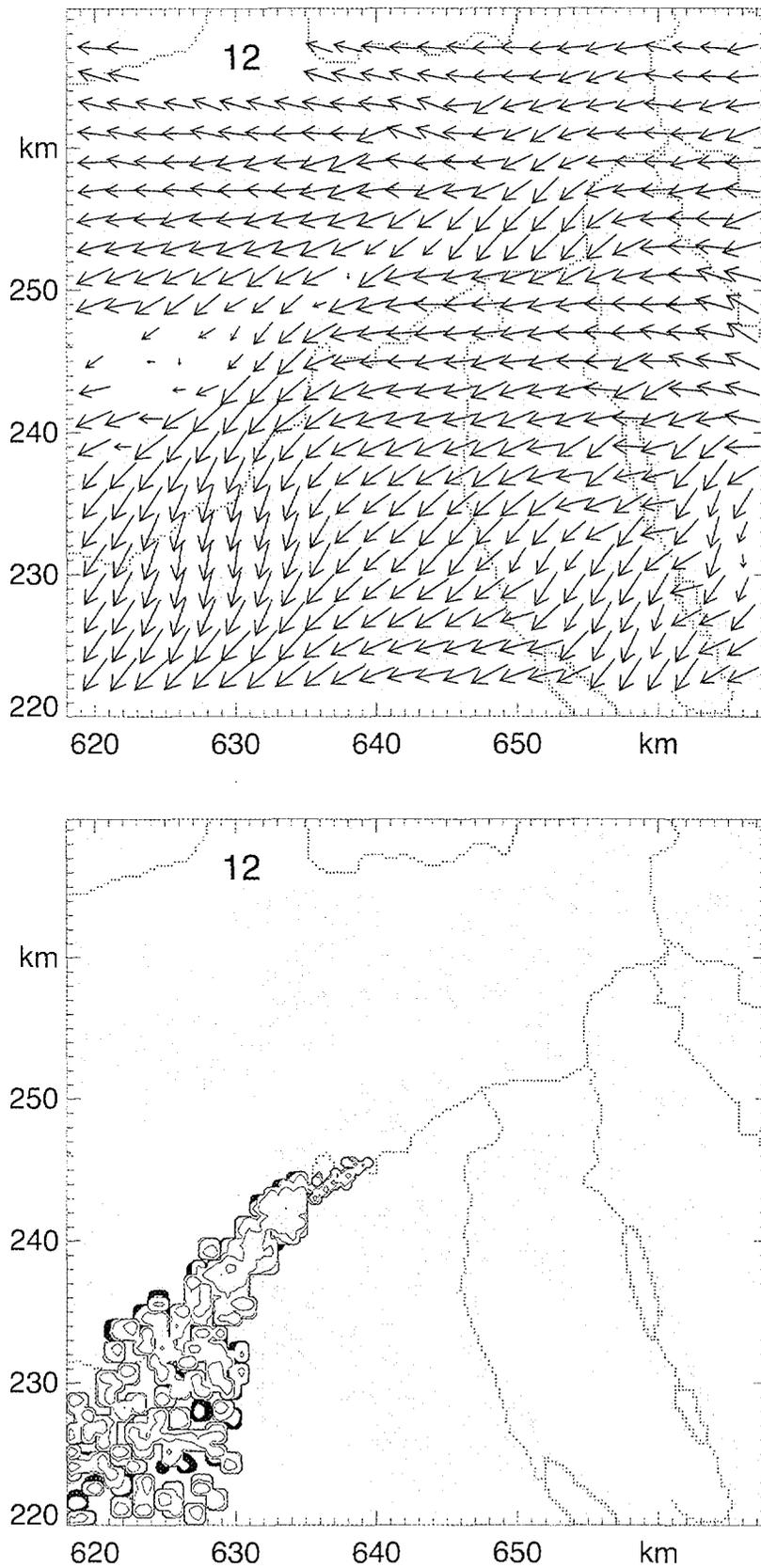
**Figur 5.10b:** Windfeld in 1200 m über *Meer* (oben) und Konzentrationen (300 m über *Grund*) der Dispersion einer fiktiven Quelle 8 Stunden nach Start für Klasse 10. Der Ausschnitt entspricht jenem von Figur 1 mit unterlegter Topographie und Flüssen.



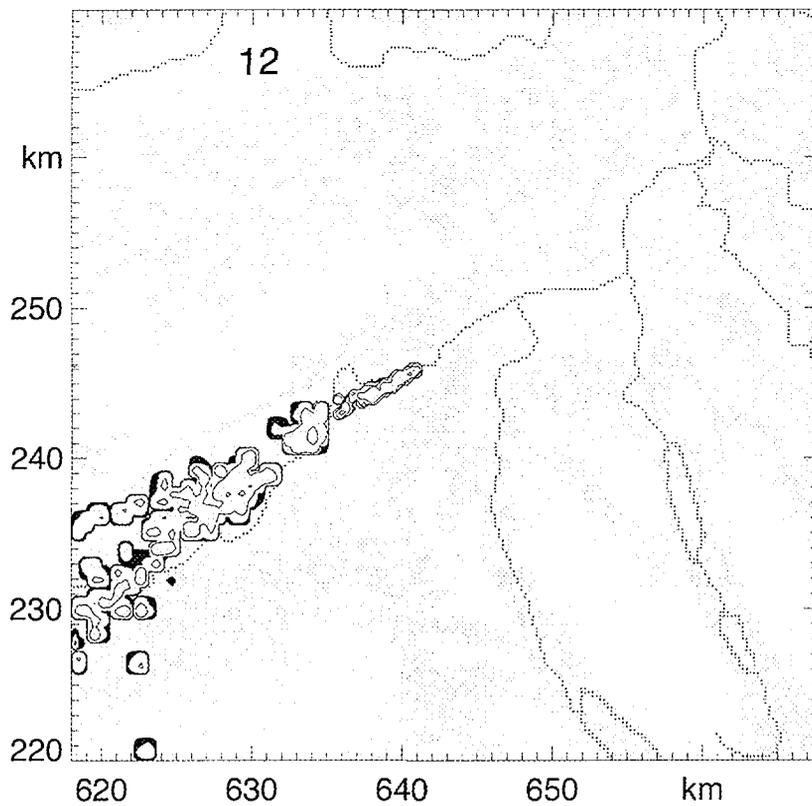
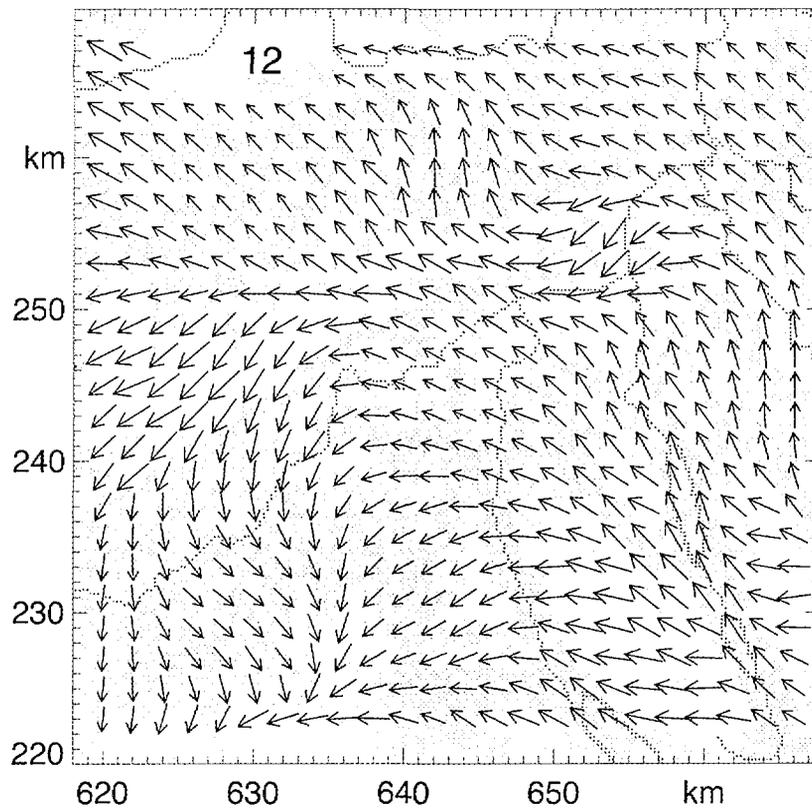
**Figur 5.11a:** Windfeld in 800 m über *Meer* (oben) und Konzentrationen (20 m über *Grund*) der Dispersion einer fiktiven Quelle 8 Stunden nach Start für Klasse 11. Der Ausschnitt entspricht jenem von Figur 1 mit unterlegter Topographie und Flüssen.



**Figur 5.11b:** Windfeld in 1200 m über *Meer* (oben) und Konzentrationen (300 m über *Grund*) der Dispersion einer fiktiven Quelle 8 Stunden nach Start für Klasse 11. Der Ausschnitt entspricht jenem von Figur 1 mit unterlegter Topographie und Flüssen.



**Figur 5.12a:** Windfeld in 800 m über *Meer* (oben) und Konzentrationen (20 m über *Grund*) der Dispersion einer fiktiven Quelle 8 Stunden nach Start für Klasse 12. Der Ausschnitt entspricht jenem von Figur 1 mit unterlegter Topographie und Flüssen.

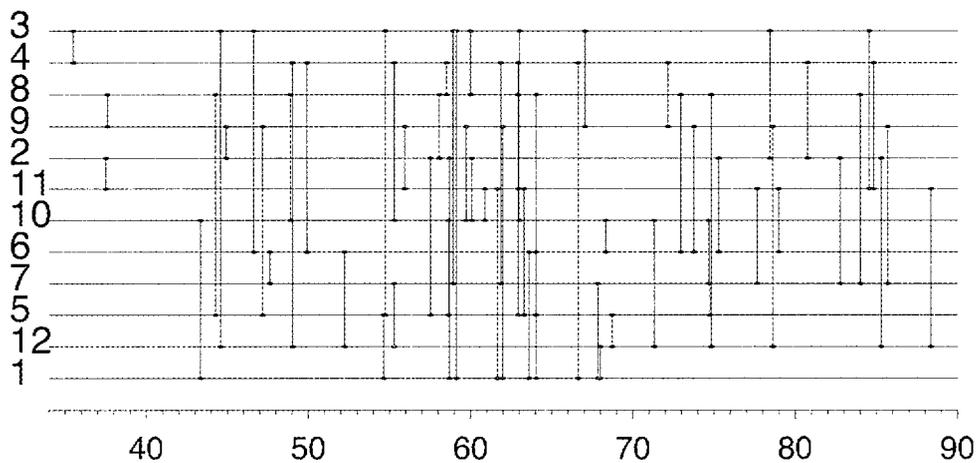


**Figur 5.12b:** Windfeld in 1200 m über *Meer* (oben) und Konzentrationen (300 m über *Grund*) der Dispersion einer fiktiven Quelle 8 Stunden nach Start für Klasse 12. Der Ausschnitt entspricht jenem von Figur 1 mit unterlegter Topographie und Flüssen.

## 2.4. Qualitätskriterien zur Unterscheidbarkeit der Klassen

Die in den Figuren 4.1 bis 4.6 dargestellten Windrichtungen der Stations- und SM-Daten machen Klassenunterschiede deutlich. Insbesondere lassen sich Klassen mit möglichst disjunkten Windrichtungsverteilungen gut unterscheiden. Wie bereits in Graber und Tinguely, 1999, auf Seiten 34-35 vorgestellt, ist ein Mass für die Unterscheidbarkeit der Klassen gegeben durch den Vergleich der Flächen der normierten Windrichtungsverteilungen von paarweise 2 Klassen, wie sie in den Figuren 4.1b bis 4.6b dargestellt sind: Zwei Klassen sind dann vollständig disjunkt, wenn diese Windrichtungsverteilungen keine Schnittmenge besitzen, wenn also bei beiden Klassenmitgliedern keine Stunden mit gleichem Windrichtungssektor gefunden werden. Das Mass der Disjunktion ist dann 100%. Stimmen 2 Klassen jedoch in der Windrichtungsverteilung vollständig überein, so beträgt ihre Disjunktion 0%.

In Figur 6 sind für paarweise 2 Klassen die so bestimmten Differenzen der Häufigkeitsflächen über alle Stationen gemittelt aufgetragen. Darin zeigt sich deutlich, dass etwa die Klasse 3 gegenüber 4 die geringste, die Klasse 11 gegenüber 12 die grösste Disjunktion und damit Unterscheidbarkeit aufweist, was sich bei Betrachtung der Figur 4 auch bestätigt.



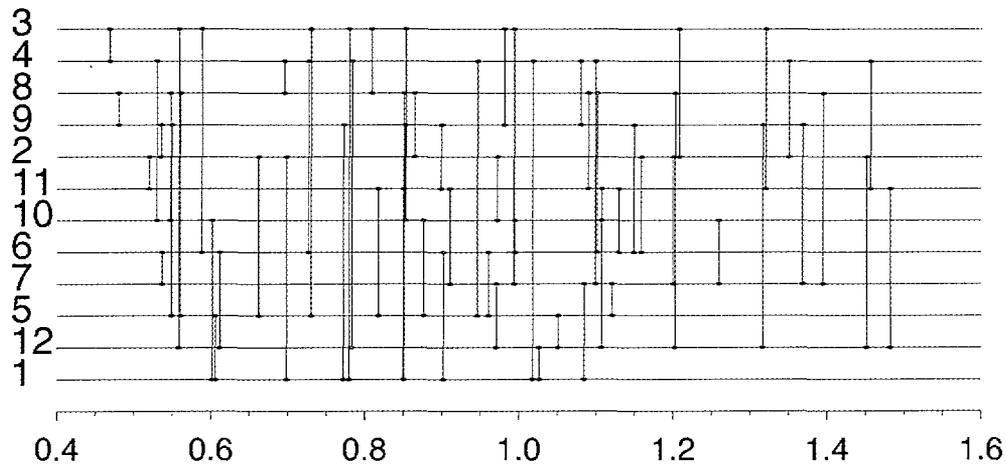
**Figur 6:** Die Abszisse bedeutet das Mass der Disjunktion für paarweise 2 Klassen in %, bestimmt aus den Mittelwerten über alle Stationen. Die entsprechenden beiden Klassen sind durch eine vertikale Linie verbunden. Definition der Disjunktion und Darstellung gemäss Graber und Tinguely, 1999, Seite 34-35.

Ein weiteres Kriterium der Qualität der gebildeten Klassen sind die paarweisen Distanzen zweier Klassen. In Analogie zur Distanz bei der Clusteranalyse ist die Distanz von Klasse  $c$  zu Klasse  $k$  wie folgt definiert:

$$d_{ck} = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N \left[ (u_{cj} - u_{kj})^2 + (v_{cj} - v_{kj})^2 \right]^{1/2}$$

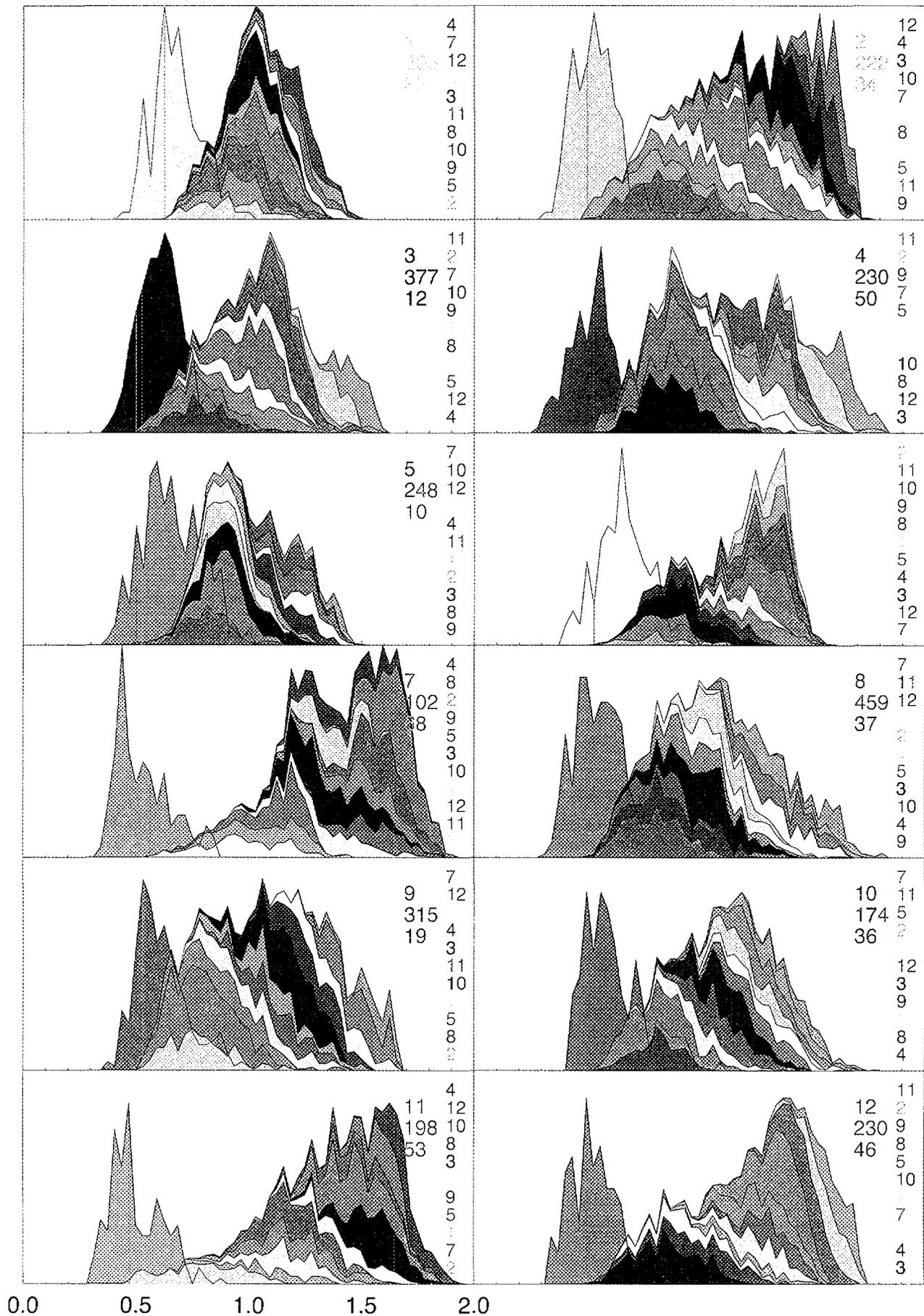
wobei  $c$  und  $k$  je über alle 12 Klassen laufen.

In der Figur 7 sind die paarweisen Distanzen von Klasse zu Klasse graphisch dargestellt. Wiederum zeigt die Klasse 3 gegenüber 4 die geringste und die Klasse 11 gegenüber 12 die grösste Distanz. Im Allgemeinen ist diese Qualitätsansprache und jene der Windrichtungsdisjunktion durchwegs konsistent.



**Figur 7:** Dimensionslose Distanzen (Abszisse) je zweier Klassen (durch vertikale Linien verbunden). Auf der Ordinate sind wiederum die Klassen angegeben.

Mit der folgenden Definition ist ein weiteres Mass für die Unterscheidbarkeit zweier Klassen gegeben: Die 2952 normierten Stundenwerte der Windkomponenten der Messkampagne haben zu jedem der 12 Klassenmittel der Windkomponenten eine Distanz. Zudem ist jede Stunde einer bestimmten Klasse zugeordnet. Nun wird die Häufigkeitsverteilung der Distanzen aller zur Klasse 1 gehörenden Stunden zum Klassenmittelwert der Klasse 1 gebildet. Weiter werden die Häufigkeitsverteilungen aller Distanzen der Stunden der Klasse 1 zu den Klassenmittelwerten der übrigen Klassen 2 bis 12 gebildet. Die erstgenannte Häufigkeitsverteilung weist natürlich kürzere Distanzen auf als die übrigen Verteilungen. Das Integral über die erste Häufigkeitsverteilung von Null an bis zur minimalen Distanz der Häufigkeitsverteilung einer andern Klasse stellt nun ein gutes Mass für die "Reinheit" oder "Separierungsgüte" der Klasse dar. In Figur 8 sind diese Häufigkeitsverteilungen für die Klasse 1 im Feld oben links eingezeichnet. Die Häufigkeitsverteilungen der Klasse 2 bis 12 sind kumulativ in der Reihenfolge entsprechend ihrer Nähe zur Verteilung der Klasse 1 im gleichen Feld dargestellt. Diese Reihenfolge ist am rechten Rand des Feldes von unten nach oben (also 2, 5, 9, etc.) gegeben. Der Beginn der nicht zur Klasse 1 gehörenden Häufigkeitsverteilungen ist mit einem vertikalen Strich markiert. Die Fläche rechts dieser Markierungslinie im Verhältnis zur gesamten Stundenzahl der Klasse 1 ergibt ein "Reinheitsmass": Keine anderen Stunden haben so kurze Distanzen zu den Klassenmittelwerten der Klasse 1. Unterhalb der Klassennummer im rechten Teil des Feldes sind noch die Anzahl der dieser Klasse angehörenden Stundenwerte und darunter das Reinheitsmass angegeben. In den andern Feldern der Figur 8 wiederholen sich die Darstellungen für die andern Klassen. Zur Verdeutlichung sind die Klassenhäufigkeiten entsprechend den Klassenfarben in Figur 2 und 3 eingefärbt. Betrachtet man die Klasse 3, so zeigt sich wiederum, dass die Klasse 4 sehr nahe liegt. Ein Beispiel für sehr gute Unterscheidbarkeit stellt das Klassenpaar 11 und 12 dar.



**Figur 8:** Darstellung der Separierungsgüte der Klassen und Definition des "Reinheitsmasses" einer Klasse (vertikale Linie im linken Teil der Teilfiguren für jede Klasse, Beschreibung siehe Text). Die Klassen sind entsprechend der Figur 2 eingefärbt.

In der Figur 9 werden die beiden wichtigsten Qualitätsmaße der Disjunktionen und der Distanzen von Klasse zu Klasse so dargestellt, dass ihre numerischen Werte leicht ablesbar sind, jedoch ist keine Rangordnung der Klassenpaare mehr ersichtlich.

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1		47	53	69	41	61	73	57	52	41	57	69
2	56		81	91	45	78	81	58	36	66	35	98
3	56	76		32	49	40	67	55	66	58	89	38
4	64	78	32		64	49	74	47	73	36	98	53
5	51	54	51	60		65	76	38	37	59	55	71
6	61	73	43	46	61		36	74	78	67	76	41
7	65	80	56	59	72	44		94	92	85	61	65
8	61	55	57	55	41	70	82		32	37	74	81
9	59	41	64	70	44	71	84	34		57	61	89
10	40	57	60	52	56	66	72	45	57		75	75
11	59	34	82	83	60	77	75	60	53	58		99
12	65	83	41	46	66	49	52	72	76	69	86	

**Figur 9:** Unteres Dreieck (Umsetzung der Figur 6): Prozentuale Disjunktionen von Klasse (horizontal) zu Klasse (vertikal). Oberes Dreieck (Umsetzung der Figur 7): Prozentuale Distanzen von Klasse zu Klasse.

Die vorgestellten Qualitätskriterien der Figuren 6 bis 9 werden zur Charakterisierung der Klassen im Kapitel 4 herangezogen.

### 3. Diagnose

Das Diagnoseverfahren realisiert die Bestimmung der Windfelder zur aktuellen Zeit und evaluiert damit die Ausbreitungsrichtung. Die aktuellen Windmessungen der permanenten Stationen sind online verfügbar, es sind dies die Nummern 23 bis 43. Die Stationen 1 bis 22 waren nur während der Feldmesskampagne aufgestellt, ebenso das SODAR, das die "Stationsnummern" 44 bis 46 belegt. Die Bodenwinde aus den SM-Daten, d.h. die virtuellen "Stationsnummern" 47 bis 71, liegen seit Oktober 2000 ebenfalls operationell vor, sie basieren auf meteorologischen Messungen von ganz Mitteleuropa.

#### 3.1. Diagnose aktueller Windfelder aufgrund von Messwerten

Im ersten Verfahren zur Diagnose der aktuellen Windfeldklassen werden nur die Winddaten der permanenten Stationen herangezogen. Die aktuell herrschende Windfeldklasse wird dabei so bestimmt, dass die aktuellen Stundenwerte aller permanent verfügbaren mit den mittleren Windwerten der 12 Klassen verglichen werden. Als Vergleichsalgorithmus dient die Distanz der aktuellen Werte (Stunde  $t$ ) zu den Mittelwerten für die Klasse  $c$ :

$$d_{tc} = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N \left[ (u_{tj} - u_{cj})^2 + (v_{tj} - v_{cj})^2 \right]^{1/2}$$

wobei wiederum die  $u'_{cj}$  und  $v'_{cj}$  die Mittel der West- und Südwindkomponente über die Mitglieder der Klasse  $c$  und  $u'_{tj}$  und  $v'_{tj}$  die normierte West-, bzw. Südkomponente des Windes der Station  $j$  zur Zeit  $t$  bedeuten. Für die 12 Klassen resultieren somit 12 Distanzen, wobei die geringste Distanz die der aktuellen Stunde am nächsten gelegene Klasse bezeichnet.

### **3.2. Diagnose aufgrund von Messwerten und Modelldaten**

Beim zweiten Diagnoseverfahren werden die Messwerte der permanenten Stationen zusammen mit den Daten aus dem Prognosemodell verwendet, um die Winddaten der temporären Stationen mit Hilfe multivariater Regression zu rekonstruieren. Dabei werden diejenigen Daten des Prognosemodells herangezogen, die den Zustand der Atmosphäre zur aktuellen Stunde auf Grund der vorhergehenden Prognoserechnung beschreiben. Da die Prognosezeit dieser Berechnung etwa 12 Stunden beträgt, spiegelt sie die aktuelle Wirklichkeit in den allermeisten Fällen sehr genau wieder und bietet zudem den Vorteil einer grossräumigen Information, wie sie aus den lokalen Messwerten allein nicht gewonnen werden kann. Die nachfolgend dargestellte Qualitätsprüfung bestätigt diese Aussage. Um die Koeffizienten der multivariaten Regression zu gewinnen, fanden alle Winddaten der permanenten Stationen während der Feldmesskampagne und zusätzlich die Temperaturen, relativen Feuchtigkeiten, Drucke und Globalstrahlungswerte an den Stationen und an den Gitterpunkten des SM als Prädiktoren der  $u$ - bzw.  $v$ -Komponenten der temporären Stationswinde Verwendung. Eine Überprüfung dieses Rekonstruktionsverfahrens mit den Daten der Messkampagne ergab ebenso gute Resultate wie bei der Untersuchung anhand der Daten um Mühleberg (siehe Graber und Tinguely, 1999).

Die aktuell herrschende Windfeldklasse wird nun so bestimmt, dass die aktuellen Stundenwerte aller permanent verfügbaren Daten und die rekonstruierten Stationswerte mit den mittleren Windwerten der 12 Klassen verglichen werden. Als Vergleichsalgorithmus werden wiederum die Distanzen der aktuellen Werte zu den Mittelwerten der Klassen bestimmt und die geringste Distanz zur Bezeichnung der aktuellen Windfeldklasse herangezogen, wie im vorhergehenden Abschnitt dargestellt.

Dieses Vorgehen der Diagnose lässt sich nun anhand des Datensatzes der Feldmesskampagne testen, wozu für die temporären Stationen die rekonstruierten Werte verwendet werden. In der Matrix der Figur 10 sind die so bestimmten Diagnosen dargestellt. Die Zeile zeigt die prozentuale Anzahl diagnostizierter Stunden der entsprechenden Klasse bei der jeweils in der Kolonne angegebenen "echten" Klasse. So wird beispielsweise die Klasse 10 in 93% der Fälle (sog. "Trefferquote") als Klasse 10 erkannt, während für 5% der Fälle Klasse 4 und für 2% der Fälle Klasse 8 diagnostiziert werden. Die mittlere Trefferquote über alle 12 Klassen beträgt 95%. Diese Grösse gibt einerseits ein Mass für die Güte der multivariaten Regression und stellt andererseits ein Qualitätsmass für die Unterscheidbarkeit der Klassen dar.

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1	93	0	0	1	0	0	0	2	1	0	1	0
2	1	95	0	0	0	0	0	0	1	0	3	0
3	0	0	93	2	0	0	0	2	0	0	0	3
4	0	0	0	97	0	0	0	1	0	0	0	0
5	2	2	4	0	84	1	0	3	5	0	0	0
6	1	0	2	3	0	90	3	0	0	0	0	2
7	0	0	0	0	0	0	99	0	0	0	0	0
8	0	0	0	2	0	0	0	96	0	1	0	0
9	2	2	0	0	1	0	0	5	91	0	0	0
10	0	0	0	5	0	0	0	2	0	93	0	0
11	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	99	0
12	0	0	3	0	0	0	0	0	0	0	0	97

**Figur 10:** Trefferquote: Prozentuale Anzahl der identifizierten Klassen (horizontal) bei der echten Klasse (vertikal) aufgrund der rekonstruierten Winde für die temporären Stationen.

## 4. Charakterisierung der Windfeldklassen

Die Windfeldklassen werden im folgenden beschrieben und ihre gegenseitige Unterscheidbarkeit diskutiert. Dabei stützt sich die Darstellung auf alle vorangehenden Figuren. Insbesondere wird jede Klasse zunächst aufgrund ihrer Windströmungscharakteristik und ihr Verhalten bei der Berechnung der Dispersion einer hypothetischen Quelle am Ort des Kernkraftwerks Gösgen beschrieben (Figuren 5.1 bis 5.12). Die Datengrundlage, wie sie verdichtet in den Figuren 4.1 bis 4.6 für die 12 Windklassen dargestellt sind, sollen allerdings auch im Auge behalten werden.

Jede Klasse wird durch eine Kurzbeschreibung mit wenigen Stichworten beschrieben, die die wichtigsten Charakteristiken der Klasse hervorhebt. Zu den Figuren 5.1 bis 5.12 sei nochmals bemerkt, dass die Windfelder auf den Höhen 800 m und 1200 m *über Meer* wiedergegeben sind, während die Konzentrationen zur Illustration für 20 m und 300 m *über Grund* berechnet wurden.

Die in den vorangehenden Kapiteln gegebenen Unterscheidungskriterien und Qualitätsmerkmale, wie sie in den Figuren 2 und 3, sowie 6 bis 10 dargestellt sind, werden für eine Gesamtwertung der Klassen herangezogen. Jeder Klasse ist ein Rang zugeordnet, der sich im Wesentlichen auf die Trefferquote von Figur 10 und auf die Separierungsgüte von Figur 8 stützt. Doch ist auch die Anzahl der Stunden berücksichtigt, die der betreffenden Klasse angehören. Es sei jedoch betont, dass bei einer mittleren Trefferquote von 95% eine hohe Qualität der Klassendiagnose vorliegt.

### **Klasse 1: Nordwestströmung mit südlicher Höhenströmung im Osten**

Im tiefer liegenden Windfeld auf 800 m über Grund der Figur 5.1.a. wird ein Überströmen des Jura mit einer Konvergenzzone im zentralen Mittelland sichtbar. Wie das tiefer liegende Windfeld, so zeigt auch das Höhenwindfeld in der Südwestecke des Gebiets eine Nordwest-Strömung. Dagegen wird auf dem oberen Niveau im nordöstlichen Teil eine Südströmung deutlich, die vor allem durch die SM-Daten erzeugt wird. Die Charakteristik der Ausbreitungswolke aufgrund der fiktiven Quelle wird von diesen Strömungen kaum beeinflusst, vielmehr folgt sie zunächst der Nord-Strömung im zentralen Mittelland, um nachher der allgemeinen Nordnordwest-Strömung des unteren Windniveaus zu folgen.

Nach den Figuren 6 und 7 weist die Klasse 1 eine gewisse Verwandtschaft mit Klasse 10 auf, was sich auch in der Distanz zu dieser Klasse in Figur 9 und in der Charakteristik der Ausbreitungswolke spiegelt. Berücksichtigt man die moderaten Werte bei Separierungsgüte (Figur 8) und Trefferquote (Figur 10), so resultiert für Klasse 1 insgesamt der **Rang 8**.

### **Klasse 2: Westströmung mit Rechtsdrehung im Südosten.**

Im westlichen Teil des betrachteten Gebietes herrscht auf beiden Niveaus eine deutliche Westströmung, die beim tieferen Niveau im Südosten nach rechts dreht. Die Ausbreitung der hypothetischen Quelle zeigt vor allem im bodennahen Bereich eine starke Aufweitung. Dies wird durch das untere Niveau des Windfeldes erklärbar, das östlich der Quelle eine Divergenz aufweist. Das darüber liegende Höhenwindfeld führt am östlichen Rand des Gebiets Luft aus Norden bis Nordosten heran, was eine Konvergenzzone im Südosten des Gebiets verursacht. Die Gestalt der Ausbreitungswolke ist offensichtlich ähnlich zu jener in Klasse 11, wenn auch diese Klasse ein deutlich homogeneres Windfeld zeigt.

Die durch die Figuren 6 und 7 aufgezeigte Verwandtschaft mit Klasse 9 bewirkt auf Grund der relativ kleinen Distanzen zwischen den beiden Klassen (Figur 9) eine gewisse Verwechslungsgefahr, was auch die Figur 10 bestätigt. Klasse 2 wird mit **Rang 9** belegt.

### **Klasse 3: Ostströmung mit Rechtsdrehung im Westen des Gebietes.**

Die mehrheitlich nordöstlichen Stationswinde im Mittelland spiegeln ein recht homogenes Bild wider, wobei ein Aufströmen am Jura-Südfuss feststellbar ist. Das tieferliegende Niveau des Windfeldes zeigt im ganzen Nordwesten eine Südostströmung, was denn auch der Ausbreitungswolke die entscheidende Gestalt gibt. Die Höhenwinde zeigen im Südwesten Einströmung von Südwesten her, was zu einer starken Konvergenz am Jurasüdfuss führt.

Die Klasse 3 liegt der Klasse 4 nahe und zeigt auch mit den Klassen 6 und 12 Verwandtschaft. Dies wird aus der Betrachtung der Ausbreitungswolke und der Figuren 6 und 7 deutlich. Generell weist diese Klasse keine hohe Separierungsgüte auf (Figur 8) und liegt auch mit der Trefferquote unter dem Durchschnitt (Figur 10). Damit kommt die Klasse 3 auf **Rang 11** zu liegen.

### **Klasse 4: Bodennahe Nordost-Strömung mit südöstlichen Höhenwinden.**

Die Klasse 4 zeigt sowohl bodennah als auch im Höhenwindfeld recht klare Windverhältnisse. Im Verhalten der Ausbreitungswolke zeigt sich, dass ein Teil der Luftmassen dem Jurasüdfuss Richtung Südwesten entlang gleitet, währenddem ein anderer Teil den Jura überströmt.

Die relative Nähe der Klasse 3 wurde schon angesprochen, jedoch zeigt Figur 10, dass die Stunden der Klasse 4 zu weniger als 0.5 % als Klasse 3 angesprochen werden. Sowohl bei der Separierungsgüte (Figur 8) als auch bei der Trefferquote (Figur 10) liegt diese Klasse über dem Durchschnitt. Die Klasse 4 wird dem **Rang 4** zugeordnet.

### **Klasse 5: Südströmung mit Linksdrehung nach Norden und Rechtsdrehung nach oben.**

Die Klasse 5 zeigt im westlichen Mittelland auf dem tieferen Windniveau eine klare West- bis Südwest-Strömung. Nördlich des Jura dreht dieses Windfeld in eine süd- bis südöstliche Strömung. Generell scheinen die Höhenwinde gegenüber dem tieferen Niveau nach rechts zu drehen. Im Osten weisen beide Niveaus eine deutliche Südströmung auf. Die Ausbreitungswolke folgt dieser Drehung des Windes von Südwest nach Südost über den Jura, was auf beiden Niveaus sichtbar ist. Die Klasse 5 ist augenscheinlich mit den Klassen 8 und 9 verwandt, was sich sowohl in der Separierungsgüte (Figur 8) als auch in den Distanzen (Figur 9) und Disjunktionen (Figur 6) niederschlägt. Die Trefferquote liegt mit 84 % mit Abstand am tiefsten, die Figur 10 zeigt denn auch 5 % Überschneidung mit Klasse 9 und 3 % Überschneidung mit Klasse 8. Damit wird Klasse 5 dem **Rang 12** zugeordnet.

### **Klasse 6: Nordostströmung.**

Die Betrachtung des oberen und unteren Niveaus der Winde zeigt mehrheitlich nicht homogene Windverhältnisse, wobei im Südwesten eine Konvergenzzone im Höhenwindfeld deutlich wird. Der Verlauf der Ausbreitungswolke wird aber auf beiden Niveaus von dieser Zone nicht stark beeinflusst, sondern zeigt im wesentlichen die Hauptrichtung der Strömung gut an. Die Klasse ist allerdings mit den Klassen 3 und 7 verwandt und weist auch mit Klasse 4 bei der Ausbreitungswolke eine gewisse Ähnlichkeit auf.

Dies wird ebenfalls deutlich, wenn die Figuren 6 und 7 herangezogen werden und schlägt sich auch in der unterdurchschnittlichen Separierungsgüte der Trefferquote (Figur 8) nieder. Damit kommt Klasse 6 auf den **Rang 10** zu liegen.

### **Klasse 7: Nordströmung.**

Die Klasse 7 zeigt sowohl bei den Stationsmittelwerten als auch bei den Windfeldern auf beiden Niveaus eine sehr gute Homogenität. Im Höhenwindfeld ist eine schwache Drehung von Nordnordost auf Nordnordwest im Westen des Gebietes sichtbar. Dies zeigt sich denn auch in der Ausbreitungswolke.

Wenn auch eine Nähe zu Klasse 6 in Figur 6 und 7 sichtbar wird, so ist bei Klasse 7 doch mit Abstand die beste Separierungsgüte (Figur 8) und eine überdurchschnittliche Trefferquote (Figur 10) feststellbar. Damit rückt Klasse 7 auf **Rang 1**.

### **Klasse 8: Südwestströmung mit Drehung nach links.**

Wie Klasse 7, so ist auch dieses Windfeld auf beiden Niveaus recht homogen und zeigt eine Südwest-Strömung im Südwesten, die gegen Norden hin in eine Südost-Strömung dreht. Entsprechend folgt auch die Ausbreitungswolke auf beiden Niveaus dieser Charakteristik. Damit liegt eine Ähnlichkeit zur Klasse 9 und, wie oben bereits erwähnt, zur Klasse 5 vor.

Dies kommt auch in der Distanz und der Windrichtungs-Disjunktion der Figuren 6 und 7 zum Ausdruck. Dank einer vernünftigen Separierungsgüte und einer hohen Trefferquote erreicht die Klasse 8 den **Rang 5**.

### **Klasse 9: Konvergenz südwestlicher und südöstlicher Strömungen.**

Besonders deutlich zeigt das Höhenwindfeld die südwestliche Strömung im westlichen Drittel des Gebiets und die südöstliche in den übrigen Gebietsteilen, was zu einer deutlich Nord-Süd verlaufenden Konvergenzlinie führt. Aber auch die Bodenwinde zeigen ein ähnliches Verhalten, wobei die Konvergenzlinie gegen Osten hin verschoben ist. Die Bodenwinde führen die

Ausbreitungswolke am Emissionsort zunächst noch für kurze Zeit nach Nordosten, biegen dann aber nach links und verfrachten die Luftmassen gegen Norden hin.

Die Figuren 6 und 7 decken Verwandtschaften zu den Klassen 8, 2 und 5 auf, was auch oben bereits erwähnt wurde und im Verlauf der Ausbreitungswolken der betreffenden Klassen sichtbar wird. Separationsgüte und Trefferquote sind entsprechen leicht unterdurchschnittlich, sodass die Klasse 9 in den **Rang 7** fällt.

#### **Klasse 10: Nordwestströmung am Jurasüdfuss mit südöstlicher Höhenströmung.**

Die Klasse 10 zeigt im Höhenwindfeld eine deutliche Dominanz der Südost-Strömung, was bei den SM-Daten gut sichtbar wird. Damit bildet sich eine starke Scherung mit der darunter liegenden Luftschicht, die, abgelesen an den mittleren Stationswinden, mehrheitlich eine Nordwest-Strömung zeigt. Diese Scherung wird im tieferen Windniveau sichtbar, das die Bodenmessungen bereits nicht mehr gut widerspiegelt, da das Niveau 800 m über Meer ja durchschnittlich gute 400 m über Grund liegt. Selbst im höheren Windniveau 1200 m über Meer führt die Scherung über dem Jura noch zu stark topographiebedingten Schwankungen. Entsprechend wird die Ausbreitungswolke durch diese Scherung stark beeinflusst, was zu einer extremen Aufweitung der Wolke führt.

Die Figuren 6 und 7 decken Verwandtschaften mit den Klassen 4, 1 und 8 auf. Die Separierungsgüte und die Trefferquote sind vernünftig, sodass die Klasse dem **Rang 6** zugeteilt wird.

#### **Klasse 11: Südwestströmung mit nordwestlicher Höhenströmung**

Die mittleren Stationswinde dieser Klasse zeigen im Mittelland eine südwestliche Kanalisierung entlang dem Jurasüdfuss an. Die Höhenwinde weisen eine deutlich nordwestliche Strömung auf, sodass sich mit der Höhe eine Rechtsdrehung ergibt. Dies wird denn auch im tieferen Windniveau deutlich und beeinflusst auch die Entwicklung der Ausbreitungswolke.

Die Klasse hat somit, wie bereits erwähnt, eine gewisse Nähe zu Klasse 2, was auch in den Figuren 6 und 7 zum Ausdruck kommt. Allerdings weist die Klasse eine ausgezeichnete Separierungsgüte und eine hohe Trefferquote auf, was sie auf den **Rang 2** rückt.

#### **Klasse 12: Nordostströmung mit Linksdrehung und südöstlichen Höhenwinden.**

Die Klasse 12 zeigt bei den mittleren Stationswinden im Mittelland eine durchgehende Nordost-Strömung, was im tieferliegenden Windfeld auch klar zum Ausdruck kommt. Auf dem höheren Niveau ist diese Strömungsrichtung allerdings nur noch über dem Jura sichtbar, währenddem im nördlichen bis südöstlichen Gebietsteil Südost-Strömungen vorherrschen. Im südwestlichen Gebietsteil drehen diese Winde mit der Höhe nach links, was auch bei der Ausbreitungswolke sichtbar wird.

Die Klasse 12 hat mit den Klassen 3 und 4 gewisse Ähnlichkeiten, wie aus den Figuren 6 und 7 hervorgeht. Die Figuren 8 und 10 zeigen aber eine sehr hohe Separierungsgüte und Trefferquote, sodass die Klasse 12 in den **Rang 3** eingeteilt wird.

## 5. Parametrisierung der Turbulenz

In den Berichten zur Windbank im unteren (Graber und Bürki, 1996) und oberen Aaretal (Graber und Tinguely, 1999) wurde vermehrt auf die Bedeutung der Turbulenz hingewiesen, ohne deren Einfluss abzuschätzen. Im Folgenden wird daher erstmals diese Thematik ausführlich behandelt und in eine Form gebracht, um sie im Routinebetrieb des Modells ADPIC einsetzen zu können. Zur Berechnung der Ausbreitung bei einer gegebenen Turbulenzsituation mit dem Modell ADPIC sind adäquate Turbulenzparameter zu bestimmen. Die Steuerung der Turbulenz im Modell ADPIC erfolgt über folgende Parameter:

- Stabilitätsklasse (A: sehr instabil, B: instabil, C: schwach instabil, D: neutral, E: leicht stabil, F: stabil). Der Begriff der Stabilität liegt in einer Schichtung der Temperatur begründet, da am Boden liegende Kaltluft aufgrund ihrer Schwere nicht aufsteigt. Wird dagegen der Boden durch Sonneneinstrahlung erhitzt, strebt sie aufwärts und regt den turbulenten Austausch an. Neben dieser thermisch induzierten Turbulenz wird durch Reibung oder Scherung, d.h. unterschiedliche Windrichtungen oder Windgeschwindigkeiten in übereinanderliegenden Luftschichten, mechanische Turbulenz erzeugt. In der Bodenschicht sind Corioliskräfte der Luftbewegungen vernachlässigbar.
- Standard-Abweichung der Windrichtung ( $\sigma_\theta$ ) in verschiedenen Höhen.
- Inverses der Monin-Obukhov Stabilitätslänge ( $L_s$ ) in der Bodenschicht (surface layer). Die Bodenschicht ist jene bodennahe Luftschicht von typischerweise 50 m Mächtigkeit, in der die latenten und fühlbaren Wärmeflüsse, sowie die Schubspannung (auch als Impulsfluss bezeichnet) mit der Höhe noch nicht ändert. Letzteres bedeutet, dass der Wind erst oberhalb dieser Schicht als Folge der Reibungskräfte der bewegten Luftmassen mit der Höhe dreht. Die Monin-Obukhov Länge stellt ein Mass für das Verhältnis von mechanisch zu thermisch erzeugter Turbulenz dar.
- Inverses der Monin-Obukhov Stabilitätslänge ( $L_h$ ) in der Mischungsschicht (mixing layer). Die Mischungsschicht wird bestimmt durch die aufgrund der Bodenerwärmung erzeugten aufsteigenden Warmluft und kompensierender Abwärtsbewegung der höheren Luftmasse. Dadurch ist diese Schicht sehr gut durchmischt, die Konzentration eines Spurengases oder die Temperatur ist kaum von der Höhe abhängig. Die Aufstiegshöhe der Warmluft ist durch die am Boden aufgenommene Energie bestimmt und damit von der Sonneneinstrahlungsintensität bzw. der Tageszeit abhängig. An einem sonnenreichen Sommertag kann die Mischungsschicht 1 bis 2 km über Grund betragen.
- Mischungsschichthöhe ( $h_m$ ), Definition siehe oben.
- Exponent des Potenzgesetzes in der Bodenschicht ( $p_s$ ). Die Windgeschwindigkeitsänderung mit der Höhe kann durch ein Potenzgesetz beschrieben werden (formaler Zusammenhang siehe unten).

Die Darstellung dieses Abschnitts folgt weitgehend den Ausführungen in Stull (1988), dem auch die meisten der Definitionen entnommen sind.

Zur Bestimmung der **Stabilitätsklasse** wird der Ansatz von Golder (1972) herangezogen. Danach besteht folgender Zusammenhang zwischen der Monin-Obukov-Länge  $L$  und der Rauigkeitslänge  $z_0$  (etwa jene Höhe, in der die Luftbewegung noch stark von den Rauigkeitselementen des Bodens gestört ist)

$$\frac{1}{L} = a + b \cdot \log(z_0)$$

wobei die Koeffizienten a und b von der Stabilitätsklasse gemäss folgender Tabelle aus Seinfeld (1986) abhängen:

Stabilitätsklasse	a	b
A	-0.096	+0.029
B	-0.037	+0.029
C	-0.002	+0.018
D	+0	+0
E	+0.004	-0.018
F	+0.035	-0.036

Die Stabilitätsklasse ergibt sich durch Einsetzen jener Koeffizienten, welche obige Gleichung am besten erfüllen.

Zur Bestimmung der Monin-Obukhov-Länge wird zunächst die Richardson-Zahl  $Ri$  berechnet, die ein Mass für die Turbulenz darstellt (bei stabiler Schichtung ist  $Ri > 0$ , bei instabiler Schichtung dagegen  $Ri < 0$ ). Sie lässt sich aus dem vertikalen Gradienten der potentiellen Temperatur  $\Delta\Theta/\Delta z$  zwischen der Luft in der Höhe  $z$  über Boden und dem Wert unmittelbar an der Bodenoberfläche bestimmen:

$$Ri = \frac{\frac{g}{\Theta} \frac{\Delta\Theta}{\Delta z}}{\left(\frac{\Delta m}{\Delta z}\right)^2}$$

wobei  $\Delta m/\Delta z$  den Gradienten der mittleren Windgeschwindigkeit darstellt. Zur Bestimmung der Wind- und Temperaturgradienten lassen sich die Messungen der 2 Niveaus am Meteoturm in Gösgen heranziehen. Daraus lässt sich ferner die Reibungsgeschwindigkeit  $u_*$  ableiten:

$$u_* = \frac{0.4 m}{\ln\left(\frac{h_s}{z_0} - \Psi_m\right)}$$

Darin ist  $m$  die mittlere Windgeschwindigkeit in der betrachteten Luftschicht,  $h_s$  die Dicke der Bodenluftschicht (ca. 50 m) und  $z_0$  die Rauigkeitslänge (etwa 0.1 m für niedere Vegetation, 1-3 m für Wald und Bebauung). Die universelle Funktion nach Businger and Dyer (1972) ist von der Stabilität abhängig, es gilt für stabile Verhältnisse:

$$\Psi_m = -4.7 Ri$$

und für instabile Verhältnisse:

$$\Psi_m = 2 \ln\left(\frac{1+x}{2}\right) + \ln\left(\frac{1+x^2}{2}\right) - \frac{2}{\tan(x)} + \frac{\pi}{2} \quad \text{mit} \quad x = (1-15Ri)^{0.25}$$

Die Bestimmung von  $L$  basiert auf der Kenntnis des fühlbaren Wärmeflusses  $H$ . Dieser hängt zusammen mit dem Energiebudget der bodennahen Luftschicht aus der Strahlungsbilanz  $Q^*$ , dem latenten Wärmefluss  $E$  und dem Wärmefluss im Boden,  $G$ :

$$Q^* = H + \lambda E + G$$

wobei

$$G = c_G Q^*$$

$$H = \frac{\gamma/s}{1 + \gamma/s} (Q^* - G) - \beta \quad \text{mit} \quad \beta = 20 \text{ Wm}^{-2} \quad \text{und} \quad \gamma = \frac{C_p}{L_v}$$

$$E/\gamma = \frac{1}{1 + \gamma/s} (Q^* - G) + \beta \quad \text{mit} \quad s = \frac{\partial q_s(T)}{\partial T}$$

Der Wärmefluss  $G$  zum Boden wird hier mit dem Koeffizienten  $c_G$  (ground flux coefficient, 0.1 tagsüber, 0.5 nachts) abgeschätzt. Weiter bedeuten  $C_p$  die spezifische Wärme von feuchter Luft bei konstantem Druck ( $1004.67 \cdot (1 + 0.84q) \text{ m}^2 \text{ s}^{-2} \text{ K}^{-1}$  für einen Wassergehalt  $q$  in g/g) und  $L_v$  die latente Verdunstungswärme ( $2.45 \cdot 10^6 \text{ Jkg}^{-1}$  bei  $20^\circ\text{C}$ ).

Nach Beljaars (1989) kann die Strahlungsbilanz bei Kenntnis der Wolkenbedeckung  $N$  ( $N = 0 \dots 1$  entsprechend unbedeckt bis ganz bedeckt), der aktuellen Sonnenelevation ( $\Phi$ ) und der Lufttemperatur  $T$  in 2 m über Boden wie folgt abgeschätzt werden:

$$Q^* = \frac{(1 - \alpha)K^+ + c_1 T^6 + c_2 N - \sigma T^4}{1 + c_3}$$

$$\text{mit} \quad K^+ = (990 \text{ Wm}^{-2} \cdot \sin \Phi - 30 \text{ Wm}^{-2}) \cdot (1 - 0.75 \cdot N^{3.4})$$

$$\text{und} \quad c_1 = 5.31 \cdot 10^{-13} \text{ Wm}^{-2} \text{ K}^{-6}, \quad c_2 = 60 \text{ Wm}^{-2}, \quad c_3 = 0.12$$

Die Albedo ( $\alpha$ , die Oberflächenreflektivität im Wertebereich 0 bis 1) wird mit dem mittleren Wert von 0.23 belegt, die Stefan Boltzmann-Konstante  $\sigma$  beträgt  $5.67 \cdot 10^{-8} \text{ Wm}^{-2} \text{ K}^{-4}$ . Damit lässt sich  $L$  berechnen aus  $H$  und  $u^*$  zu

$$L = - \frac{\rho C_p T u^*}{k g H}$$

mit der von Kármán-Konstante  $k$  (0.4), der Erdbeschleunigung  $g$  ( $9.81 \text{ ms}^{-2}$ ) und der Dichte  $\rho$  für feuchte Luft ( $1.18 \text{ kgm}^{-3}$ ).

Die Bestimmung der **Mischungsschichthöhe** ergibt sich nach van Ulden and Holtslag (1985) für eine neutrale Schichtung ( $h_n$ ) zu

$$h_n = \frac{0.2 \cdot u_*}{f}$$

mit dem Coriolis-Parameter  $f$ , der in mittleren Breiten mit  $10^{-4} \text{ s}^{-1}$  angesetzt werden kann. Gemäss denselben Autoren gilt für den stabilen Fall

$$h_m = 0.4 \cdot \left( \frac{u_* L}{f} \right)^{1/2} \leq h_n$$

Bei der instabil geschichteten Atmosphäre baut sich die Mischungsschicht, wie oben beschrieben, langsam auf. Das Schichtmodell von Batchvarova and Gryning (1990) trägt diesem Umstand Rechnung. Zur Bestimmung der Mischungsschichthöhe muss der vertikale Gradient der potentiellen Temperatur, die lapse rate ( $\Gamma$ ), in der stabilen Schicht über der Mischungsschicht bekannt sein. Er wird aus der Temperaturmessung auf 60 und 110 m am frühen Morgen bestimmt. Die weiteren Grössen ergeben sich aus den oben angegebenen Formeln, die Lösung ergibt sich durch Integration über den gewünschten Zeitraum, wobei eine zeitliche Auflösung von einer Stunde hinreichend genaue Resultate liefert:

$$\frac{dh}{dt} = \frac{H}{\Gamma C_p \rho} \left( \frac{h^2}{1.4h - 5kL} + \frac{8u_*^2 T}{\Gamma g(1.2h - 2.5kL)} \right)^{-1}$$

Ferner muss die Standard-Abweichungen der Windrichtung ( $\sigma_\theta$ ) abgeschätzt werden, was nach Weber (1997) mit Hilfe der Persistenz ( $P$ ) durch folgende Gleichungen erreicht wird:

$$\sigma_\theta = 101.24 (1 - P^{1.3761})^{0.5909} \quad (\text{in Winkel-Graden})$$

mit der Persistenz  $P = V_v / V_s$  aus dem skalaren ( $V_s$ ) und dem vektoriellen ( $V_v$ ) Mittel der Windkomponenten  $u$  und  $v$ :

$$V_s = \frac{1}{n} \sum_{t=1}^n (u_t^2 + v_t^2)^{1/2} \quad \text{und} \quad V_v = \left\{ \left( \frac{1}{n} \sum_{t=1}^n u_t \right)^2 + \left( \frac{1}{n} \sum_{t=1}^n v_t \right)^2 \right\}^{1/2}$$

wobei die Mittelung über  $n = 18$  Zehnminutenwerte läuft. Für die Berechnung werden die Windmessungen in verschiedenen Höhen am Meteoturm Gösgen verwendet.

Der Exponent ( $p = p_s$ ) des im Modell ADPIC verwendeten Potenzgesetzes in der Bodenschicht legt die vertikale Struktur der mittleren Windgeschwindigkeit  $m(z)$  bezüglich einer Referenzhöhe  $z_r$  fest:

$$\frac{m(z)}{m(z_r)} = \left( \frac{z}{z_r} \right)^p$$

Die beiden Windmessungen ergeben sich aus den Messungen in  $z_r = 10$  m und  $z = 110$  m am Meteoturm in Gösgen (Station 30 und 31), sodass sich durch Umformung des obigen Potenzgesetzes der Exponent wie folgt berechnen lässt:

$$p = \frac{\ln(m(z)/m(z_r))}{\ln(z/z_r)}$$

Zusammenfassend lassen sich somit die Turbulenzparameter für ADPIC aus den folgenden Daten der permanenten Messstationen bestimmen:

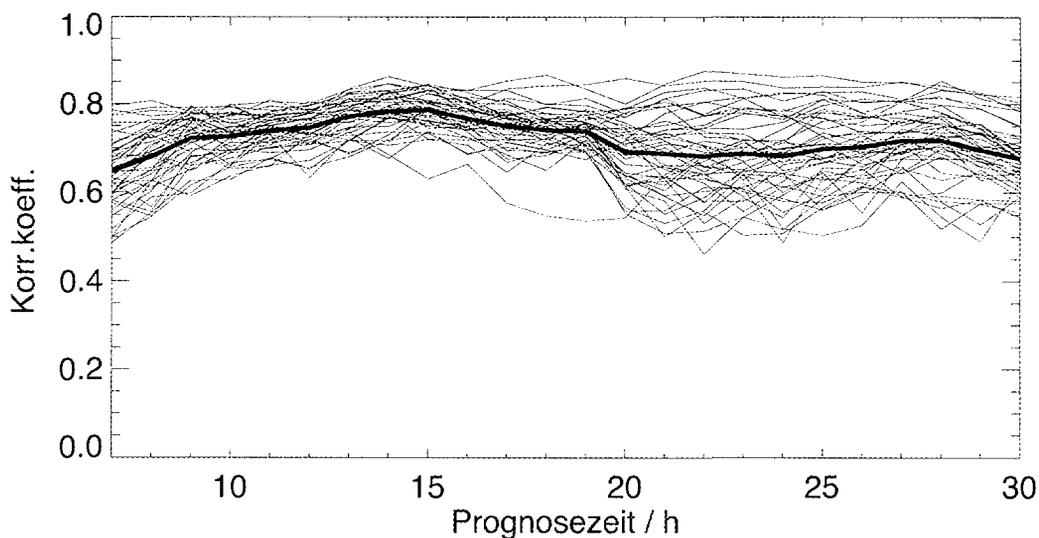
- Die Stabilitätsklasse A...F aus der Monin-Obukov-Länge und der Annahme einer mittleren Rauigkeitslänge von 0.8 m.
- Die Standard-Abweichung der Windrichtung ( $\sigma_\theta$ ) aus Windmessungen in verschiedenen Höhen am Meteoturm Gösgen.
- Monin-Obukov Stabilitätslänge ( $L_s = L$ ) in der Bodenschicht aus Temperatur- und Windmessungen in 2 Niveaus am Meteoturm Gösgen, zudem aus der Wolkenbedeckung und der Sonnenelevation gemäss der aktuellen Tageszeit.
- Die Monin-Obukov Stabilitätslänge ( $L_h$ ) in der Mischungsschicht wird jener in der Bodenschicht gleichgesetzt.
- Mischungsschichthöhe ( $h_m$  bzw.  $h_n$ ) je nach Stabilitätsklasse aus  $u^*$  und  $L$ .
- Exponent des Potenzgesetzes in der Bodenschicht ( $p = p_s$ ) aus den Windmessungen in 2 Niveaus am Meteoturm Gösgen.

Somit liegt eine Parametrisierung vor, die die aus aktuellen Messdaten bestimmte Turbulenz bei der Ausbreitungsrechnung berücksichtigt. Durch die Rekonstruktion der benötigten Messwerte aus den Modelldaten des SM liesse sich ferner eine Prognose der Turbulenzaktivität ableiten. Das Rekonstruktionsverfahren für die benötigten Messgrössen, soweit diese nicht Windwerte sind, müsste erst noch durchgeführt werden.

## 6. Prognose und on-line Betrieb

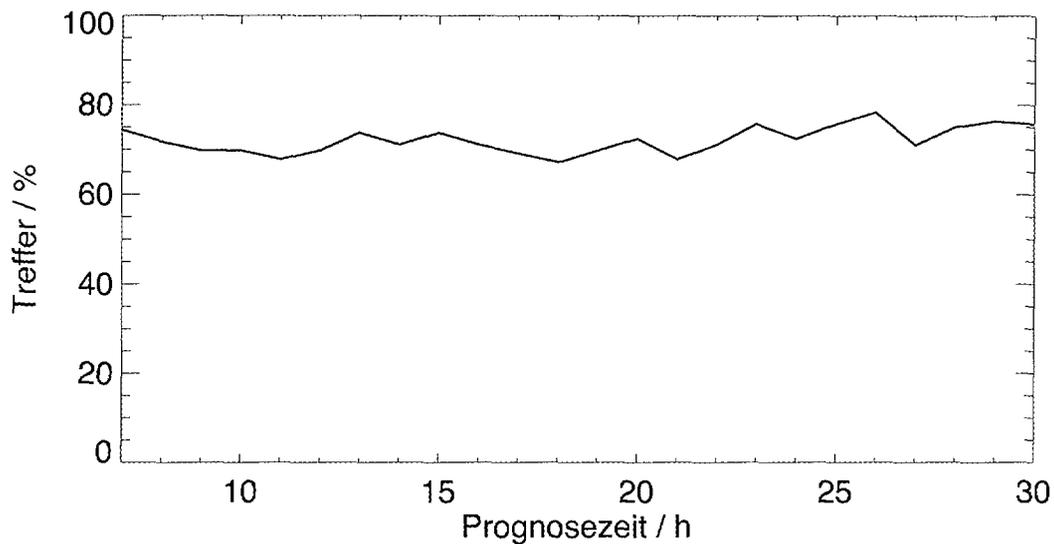
Im Bericht „Windbank oberes Aaretal“ (Graber und Tinguely, 1999) wurde die Möglichkeit des Einbezugs der SM-Daten zur Prognose der Windfelder untersucht. Im vorliegenden Bericht wird die Realisierung dieser Prognose erstmals vorgestellt. Damit lässt sich sowohl die Ausbreitung als auch der Konzentrationsverlauf über die kommenden 24 Stunden errechnen. Die Prognose der Windfeldklassen verläuft analog zur Diagnose mit multivariater Regression: Die Daten des Prognosemodells SM werden zur Rekonstruktion aller Stationen herangezogen. Wie bei der Diagnose lässt sich das Rekonstruktionsverfahren am Datensatz der Feldkampagne testen, das Resultat erbringt eine Trefferquote von 76% für die aus den SM-Daten rekonstruierten Daten und der daraus abgeleiteten Klassen. Aus dem Vergleich der rekonstruierten Daten mit den gemessenen der Feldkampagne ergibt sich ein Korrelationskoeffizient, der im Mittel über alle Stunden und alle Stationen 0.75 beträgt.

In der Figur 11 ist die Abhängigkeit dieses Korrelationskoeffizienten von der Prognosezeit dargestellt. Es sind alle Stationen übereinander gezeichnet, der Mittelwert ist dick ausgezogen und zeigt nach einem leichten Anstieg in den ersten 6 Stunden einen geringfügigen Abfall. Die Qualität der Prognose hängt also nicht signifikant von der Prognosedauer innerhalb der betrachteten 24 Stunden Prognosezeit ab.



**Figur 11:** Abhängigkeit des Korrelationskoeffizienten von der Prognosezeit, für alle 47 Stationen. Dicke Linie: Mittel über alle Stationen. (Die ersten 6 Stunden des Prognosemodells sind Einschwingzeit und werden nicht berücksichtigt.)

In der Figur 12 ist die Abhängigkeit der Trefferquote nach der Prognosezeitdauer aufgeschlüsselt: Die Streuung liegt zwischen 66 und 79%. Auch hier ist kein Nachlassen der Treffsicherheit mit wachsender Prognosezeit feststellbar.



**Figur 12:** Abhängigkeit der Trefferquote von der Prognosezeit.

Seit Beginn Oktober 2000 läuft eine Testinstallation des on-line Betriebs beim PSI. Zu diesem Zweck werden die 10-Minuten-Werte der permanenten Stationen von der MeteoSchweiz herangezogen; sie stehen für die ANETZ-Stationen (Automatisches Netz, Stationsnummern 23, 24, 26 bis 35 und 37) etwa eine Stunde nach Erfassung bereit. In der Regel dauert die Telefonübertragung für die Stationen des ENET (Ergänzungsnetz, die übrigen Stationsnummern) etwas länger, sodass etwa 2 Stunden nach der Erfassung mit dem Eintreffen dieser Daten zu rechnen ist. Die Daten des Prognosemodells SM liefern 2 mal täglich stets um 7 und 19 Uhr Prognosedaten für die nächsten 24 Stunden. Sobald eine Anzahl von wenigstens 14 Stationsdaten vorliegen, werden mit Hilfe dieser und der SM-Daten die übrigen Stationswinde rekonstruiert und durch Vergleich mit den Mittelwerten der 12 Klassen die zugehörigen Windfeldklassen bestimmt und in einer Tabelle eingetragen, die die Windwerte der vergangenen 24 Stunden enthält. Mit jedem neuen Datensatz treffen jeweils ergänzende Daten der ENET Stationen ein, die in einer Neuevaluation der Windfeldklasse der früheren Stunden verwertet werden. Stets nach dem Eintreffen neuer SM-Daten werden die daraus resultierenden Windfeldklassen der kommenden 24 Stunden berechnet.

Die Windklassenwerte für 24 Stunden Diagnose und 24 Stunden Prognose führen auf die entsprechenden Windfelder und stehen dann für die Berechnung einer Ausbreitung mit dem Modell ADPIC zur Verfügung. Bei der Testinstallation am PSI konnte die Ausbreitung einer fiktiven Quelle am Ort des Kernkraftwerks Gösigen mit einer Startzeit von 24 Stunden vor der aktuellen Zeit aufgrund der Windfelder dieses Zeitraums berechnet und graphisch dargestellt werden. Dadurch steht ein Instrument zur Notfallschutzplanung zur Verfügung, das mit minimalem Rechenaufwand sofort eine Übersicht über die aktuelle Ausbreitungssituation vermittelt. Mit den Windfeldern liegt die Ausbreitungsrichtung und erst zeitverzögert die Konzentration fest.

## 7. Ausblick

Die vorliegende Arbeit stellt eine Klassifizierung der Windfeldsituation im komplexen Gelände des Aaretals bei Gösigen vor. Mit dieser 3. Studie wird die Reihe der Windfeldklassierungen für die Umgebung schweizerischer Kernkraftwerke und damit das letzte der drei Projekte „Windbank“ abgeschlossen. Die erste Studie für die Kernanlagen im unteren Aaretal findet sich in Graber und Bürki (1996) beschrieben, die zweite Studie zum Umfeld des Kernkraftwerkes Mühleberg ist in Graber und Tinguely (1999) dargestellt.

Um den 2 obengenannten Projekten jeweils einen wissenschaftlich weiterführenden Reiz zu verleihen, wurden in jedem Projekt neue Wege beschritten, die jeweils zu einer Verbesserung der Diagnose und Prognose beitrugen. So ergab sich beispielsweise für die Klassendiagnose beim unteren Aaretal eine Trefferquote von 85%, währenddem diese für die Umgebung Mühleberg durch ein Rekonstruktionsverfahren und den Beizug der SM-Daten auf 96% gesteigert werden konnte. Dadurch werden die 3 Gebiete nicht in gleicher Art und nicht nach dem aus allen 3 Teilprojekten gewonnenen Optimum behandelt. Zur Sicherstellung gleich hoher Qualität erscheint es daher angebracht, eine Homogenisierung durchzuführen, sodass alle 3 Standorte nach der besten Methode behandelt werden. Dafür ist eine Neuberechnung der Klassifizierung und der Rekonstruktionsberechnung der Standorte notwendig.

Die Testversion des on-line Betriebs am PSI erlaubt noch keine Eingriffe in den Ablauf der Rechnung, beziehungsweise eine Wahl der ausgegebenen graphischen Darstellungen. Die Datenakquisition der Routinestationen und des Wetterprognosemodells SM von MeteoSchweiz, sowie das Preprocessing der Daten zur on-line Berechnung von Ausbreitungsszenarien laufen ohne manuelle Eingriffsmöglichkeit ab. Eine geeignete Oberfläche zur Steuerung des Ablaufs und zur Wahl der gewünschten Darstellung sollte in Zukunft noch erstellt werden. Insbesondere soll diese Oberfläche auch die Beeinflussung des Quellterms und die Wiederholung einer Ausbreitungsrechnung ermöglichen.

Die Wahl der Turbulenzparameter bei der Ausbreitungsrechnung wirkt sehr sensitiv auf die berechnete Konzentration. Die im vorliegenden Bericht dargestellte Parametrisierung schätzt die zur Ausbreitungsrechnung notwendigen Parameter aufgrund weniger meteorologischer Messungen der permanenten meteorologischen Messstationen ab. In einer künftigen Arbeit sollte die Sensitivität der berechneten Konzentrationen auf eine Variation der Turbulenzparameter im Rahmen der bei diesem Vorgehen gegebenen Fehlerschranken bestimmt werden. In einem weiteren Schritt sollten die Modelldaten des Prognosemodells SM zur Verbesserung der Schätzung dieser Parameter herangezogen werden. Dieses Verfahren müsste dann in die Software der on-line Diagnose eingebaut werden.

Die Beeinflussung der Schadstoffwolke durch Regen ist beträchtlich. Insbesondere fällt die Konzentration einer sich ausbreitenden Schadstoffwolke hinter einem Niederschlagsgebiet beträchtlich ab im Vergleich zur niederschlagsfreien Situation. Die gegenwärtige Ausbreitungsberechnung berücksichtigt nur eine über dem gesamten Rechengebiet homogene Verteilung des Niederschlags. Eine Implementierung besserer Routinen zur Modellierung des Niederschlags und dessen Auswirkung auf die Ausbreitungssituation würde daher wesentlich zur Qualitätssteigerung beitragen.

## Verdankungen

Die vorliegende Studie wurde im Auftrage der HSK durch das Bundesamt für Energie der Schweiz finanziert. Dem Projektbegleiter der HSK, Herrn Dr. G. Prohaska, danken wir für die Unterstützung des Projektes und die vielen Anregungen und Gespräche. Für wertvolle Vorarbeit und Diskussionen geht unser Dank auch speziell an die Herren Dr. F. Gassmann und Dr. R. Weber vom PSI, sowie an F. Schubiger und Dr. P. Kaufmann der MeteoSchweiz. Für die tatkräftige Mitarbeit bei der Evaluation der Standorte, dem Stellen und Betreuen der Stationen sei besonders den Herren R. Erne und R. Richter des PSI gedankt. Für die Vorarbeit zur Bestimmung der Turbulenzparameter sei Herrn M. Hutter bestens gedankt. Der MeteoSchweiz verdanken wir die Daten der Routinemessungen und des SM. Die numerischen Modelle des Lawrence Livermore Nat. Lab., California, wurden für diese Studie freundlicherweise zur Verfügung gestellt.

## Literaturverzeichnis

Die folgenden Publikationen dienen dem vorliegenden Projekt als Grundlage der Vorgehensweise und illustrieren die verwendete Klassifizierung zur Generierung der Windfeldklassen aus der Datenbank der Windmessungen.

Batchvarova E. and S. Gryning (1990): Applied model for the growth of the daytime mixed layer. *Boundary-Layer Meteorol.* **56**, 261-274.

Beljaars A.C.M. (1989): Description of a software library for the calculation of surface fluxes. Royal Netherlands Meteorological Institute, Technical Reports TR-112.

Golder D. (1972): Relations among stability parameters in the surface layer. *Boundary Layer Meteorol.* **3**, 47-58.

Graber W.K. and Bürki D. (1996): Projekt "Windbank unteres Aaretal": Klassifikation von Windfeldern als Grundlage der aktuellen Ausbreitungssituation. PSI-Bericht Nr. 96-11, 83 S.

Graber W.K. und Tinguely M. (1999): Projekt "Windbank oberes Aaretal": Klassifizierung, Diagnose und Prognose von Windfeldern in der Region des Kernkraftwerkes Mühleberg. PSI-Bericht Nr. 99-09, 56 S.

Graber, W.K. and Gassmann F. (2000): Real time modelling as an emergency decision support system for accidental release of air pollutants. *Math. and Computers in Simulation* **52**, 413-426.

Kaufmann P. and Weber R.O. (1996): Classification of mesoscale wind fields in the MISTRAL field experiment. *J. Appl. Meteorol.*, **35**, 1963-1979.

Majewski, D. (1991): The Europa-Modell of the Deutscher Wetterdienst. ECMWF Seminar Proceedings "Numerical methods in atmospheric models", Reading (GB), 9-13 September 1991, Vol 2, 147-191.

Schubiger, F. and De Morsier G. (1992): Erstellung von Anfangs- und Randfeldern für das hochauflösende Regionalmodell (HRM) und zugehörige Experimente. Arbeitsbericht der Schweiz. *Meteorol. Anstalt Nr. 169*, Zürich, 30 S.

Seinfeld J.S. (1986): *Atmospheric Chemistry and Physics of Air Pollution*. John Wiley, New York.

Stull, R.B. (1988): An introduction to boundary layer meteorology. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, Boston, London, 666 pp.

Taylor A., Sugiyama G., Walker H., Foster C. (1994): User's guide to the MATHEW/ADPIC Models. Lawrence Livermore Nat. Lab., Univ. of California, Regional Atmospheric Sciences Div., UCRL-MA-103581 Rev.2.

Van Ulden A.P. and Holtslag A.A.M. (1985): Estimation of atmospheric boundary layer parameters for diffusion applications. *J.Clim.Appl.Meteorol.* **24**, 1196-1207.

Weber R.O. (1997): Estimators for the standard deviation of horizontal wind direction. *J. Applied Meteorol.* **36**, 1403-1415.