



Abteilung Luftfremdstoffe

---

Projekt "Windbank unteres Aaretal"

Klassifikation von Windfeldern als Grundlage zur  
Diagnose der aktuellen Ausbreitungssituation

Werner K. Graber und Daniel Bürki

---

Paul Scherrer Institut  
CH - 5232 Villigen PSI  
Telefon 056 310 21 11  
Telefax 056 310 21 99

**PSI-Bericht Nr. 96-11**

**Abteilung Luftfremdstoffe**

**Projekt "WINDBANK unteres Aaretal"**

**Klassifikation von Windfeldern als Grundlage zur  
Diagnose der aktuellen Ausbreitungssituation**

**Werner K. Graber und Daniel Bürki**

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einleitung: Ziel und Vorgehen</b>	<b>2</b>
<b>2</b>	<b>Das Experiment</b>	<b>3</b>
<b>3</b>	<b>Klassifizierung der Winddaten</b>	<b>8</b>
3.1	Clusteranalyse . . . . .	8
3.2	Umverteilung . . . . .	14
3.3	Anzahl der Klassen . . . . .	24
<b>4</b>	<b>Die Klassenidentifikation</b>	<b>37</b>
4.1	Die Trefferquote . . . . .	37
4.2	Berücksichtigung des vertikalen Temperaturgradienten . . . . .	42
<b>5</b>	<b>Die Wahl der repräsentativen Standorte</b>	<b>46</b>
<b>6</b>	<b>Die interpolierten Windfelder der klassierten Winddaten</b>	<b>57</b>
<b>7</b>	<b>Berechnung von Ausbreitungsszenarien</b>	<b>71</b>
7.1	Ausbreitung unter der Annahme anhaltender Winde bei gleicher Windklasse . . . . .	71
7.2	Berechnung klassentypischer Ausbreitungssituationen . . . . .	74
7.3	Die Charakterisierung der 13 Windklassen . . . . .	77
7.4	Möglichkeiten für eine künftige Prognose der Ausbreitung aufgrund eines prognostischen Windfeldmodells . . . . .	82
<b>8</b>	<b>Verdankungen</b>	<b>83</b>
<b>9</b>	<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>83</b>

## Zusammenfassung

Im Rahmen des Projektes "WINDBANK", einem Auftrag des Bundesamtes für Energiewirtschaft der Schweiz an das Paul Scherrer Forschungsinstitut, wurden im Gebiet des unteren Aaretals und des angrenzenden Schwarzwaldes im zweiten Halbjahr 1995 Windmessungen durchgeführt, die im Folgejahr ausgewertet wurden. Das Projekt "WINDBANK" hat zum Ziel, die regionale Windsituation über alle im Zeitraum der Messungen auftretenden Wetterlagen zu erfassen und diese nach meteorologischen Gesichtspunkten zu klassifizieren. Die Windfelder umfassen ein Gebiet von rund 40 km Durchmesser um die Kernanlagen KKB (Kernkraftwerk Beznau) und KKL (Kernkraftwerk Leibstadt), sowie das Paul Scherrer Institut (PSI, Villigen) und ermöglichen im Rahmen der Notfallschutzplanung eine rasche Bestimmung der Gefahrensektoren, sowie die rechnerische Bestimmung der Schadstoffausbreitung.

Eine Klassifikation der Windfelder in 13 Klassen ergab bei optimaler Unterscheidbarkeit der Klassen das ausgewogenste Resultat. Die Identifikation des Windfeldes für einen einzelnen Stundenwert aufgrund einer ausgewählten Anzahl repräsentativer Stationen führt auf eine Trefferquote von etwa 90 % über alle Stunden während des gesamten Untersuchungszeitraums. Da die meisten dieser repräsentativen Stationen routinemässig betrieben werden, kann die Methode zur Echtzeiterfassung des aktuell herrschenden Windfeldes herangezogen werden. Die Analyse der Windfelder wird durch die Verwendung einer Interpolationsroutine zur Erzeugung von dreidimensionalen, divergenzfreien Windfeldern und die Berechnung typischer Ausbreitungsverhältnisse für die 13 Klassen abgerundet.

## **1 Einleitung: Ziel und Vorgehen**

Bei der Abschätzung von Auswirkungen eines Störfalls bei Kernanlagen stellt die Kenntnis des herrschenden Windfeldes eine wesentliche Komponente dar. Die vorliegende Arbeit setzt sich zum Ziel, eine Analyse dieser Windsituation zu erstellen, auf deren Basis eine jederzeit verfügbare Echtzeitdiagnose aufgebaut werden kann. Aufbauend auf dem diagnostischen Windfeld lassen sich anschliessend Prognoseszenarien für die Ausbreitung von Luftfremdstoffen erarbeiten.

Es wird angestrebt, die Bestimmung der Windsituation in einer automatisierten, jedoch robusten und wenig Rechenzeit erfordernden Art und ohne zu grossen messtechnischen Aufwand vorzunehmen. Die Festlegung der Windsituation in wenigen, für ein Gebiet typischen Klassen erwies sich als geeignet. Im Falle des Projektes MISTRAL (Modell für Immissions-Schutz bei Transport und Ausbreitung von Luftfremdstoffen) im Rahmen von ReKLIP (Regionales Klimaprogramm der Oberrheinischen Universitäten) gelang diese Klassifikation mit Erfolg, wie Kaufmann 1996 und Weber und Kaufmann 1995 dokumentieren. Das in der vorliegenden Arbeit gewählte Vorgehen stützt sich auf diese Erfahrungen. Die Untersuchung betrifft das Gebiet von den Kernkraftwerken Beznau, Leibstadt und dem Forschungsinstitut PSI im unteren Aaretal und weist einen Perimeter von etwa 40 km auf.

### **Das Vorgehen im Überblick**

Die Klassifikation des Windfeldes stützt sich auf eine zeitlich begrenzte Intensivmessperiode, die sich vom 1. Juli bis 31. Oktober 1995 erstreckt. In dieser Zeit wurden, zusätzlich zu den permanent bestehenden Stationen im Zielgebiet, Bodenstationen zur Erfassung des Windes, der Temperatur und der relativen Luftfeuchtigkeit aufgestellt, um einen möglichst detaillierten Datensatz zu gewinnen. Nach Bereinigung und Homogenisierung dieses Datensatzes wurde eine Clusteranalyse, basierend auf den Distanzen der Windvektoren aller Stationsdaten, vorgenommen. Es zeigte sich, dass eine Anzahl von 13 Klassen bei hinreichender Genauigkeit der Windfelder statistisch signifikant unterschieden werden kann. Für die Identifikation der Klassen im Hinblick auf eine Echtzeitdiagnose wurden anschliessend repräsentative Standorte und unterschiedliche Kriterien ausgewählt. Die Qualität dieser Auswahlkriterien sind nach der erzielten Trefferquote der herrschenden Windklasse bewertet.

### **Inhaltsübersicht**

Im folgenden wird zunächst das 4 Monate dauernde Experiment zur Erhebung der Winddaten und Klassenbildung dargestellt. Darauf wird die Methode der Clusteranalyse mit anschliessender Umverteilung und Neubildung der Klassen beschrieben und die Wahl der Anzahl von 13 Klassen beurteilt und anhand der Klassenmittelwerte und -streuungen aller Stationen begründet.

Die anschliessende Klassenidentifikation wird mit Hilfe der Trefferquote für verschiedene Auswahlkriterien und unter zusätzlicher Berücksichtigung des vertikalen Temperaturgradienten untersucht. Die Wahl der repräsentativen Standorte stellt einen wesentlichen Aspekt der Klassenidentifikation dar, sie wird im entsprechenden Paragraphen ausführlich dargestellt.

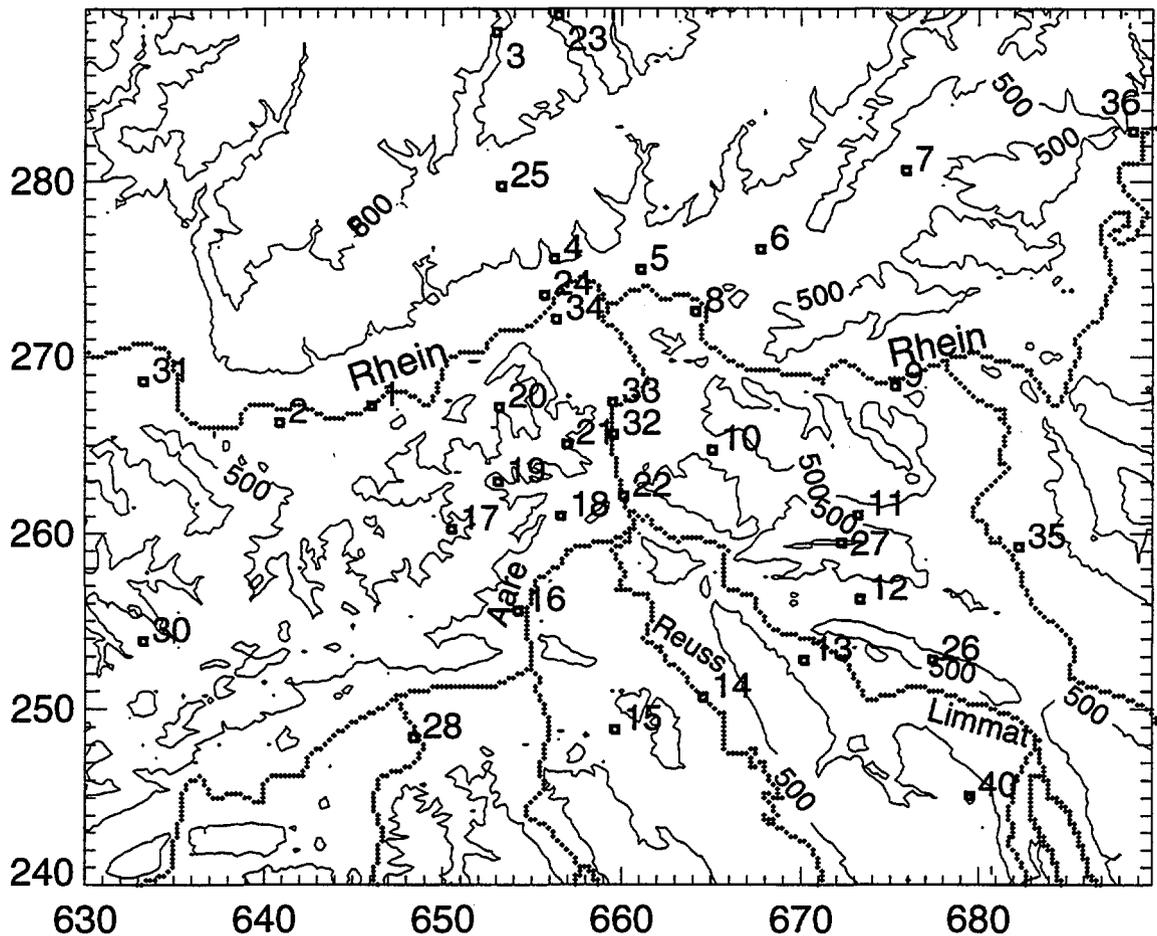
Ein weiteres Kapitel ist der Berechnung der den 13 Klassen zugeordneten Windfelder gewidmet. Eine ausführliche Darstellung der Bewertung der Klassifizierungsmethode bildet den Inhalt des anschliessenden Kapitels. Schliesslich werden die Möglichkeiten zur Prognostizierung einfacher Ausbreitungsszenarien dargestellt, wobei der Prognose die Annahme der Windpersistenz zugrunde liegt. Ein Ausblick befasst sich mit der Möglichkeit weitergehender Verbesserungen der Prognoseleistung der Ausbreitungsrechnung unter Beziehung eines routinemässig laufenden mesoskaligen numerischen Modells der SMA (Schweizerische Meteorologische Anstalt), dem "Schweizer Modell" SM.

## **2 Das Experiment**

Im Zeitraum vom 1. Juli bis 31. Oktober 1995 wurde die Intensivmesskampagne durchgeführt. Einerseits wurden für die Datenerhebung routinemässig betriebene Bodenstationen berücksichtigt, die im Untersuchungsgebiet liegen oder aufgrund ihrer weitreichenden Repräsentativität für die Erfassung der höherliegenden Strömung geeignet sind. Andererseits wurden Lücken in diesem Netz durch gezielt gesetzte Stationen ergänzt. Die Kriterien zur Platzierung dieser Stationen fordern eine der Topographie Rechnung tragende Stationendichte. So muss insbesondere darauf geachtet werden, dass die wichtigen Täler im Untersuchungsgebiet mit wenigstens einer Station belegt sind, um die kanalisierende Wirkung des Tales bei unterschiedlichen Anströmungsverhältnissen zu erfassen. Ein Blick auf die Karte (Figur 1) zeigt, dass das Gebiet westlich des PSI besonders stark gegliedert ist und dadurch erhöhte Aufmerksamkeit fordert.

Die zusätzlich eigens für dieses Experiment aufgestellten Messstationen sind mit einem Windmesser zur Erfassung der Windrichtung mittels Fahne und der Windgeschwindigkeit mittels Schalenanemometer der Firma Vaisala ausgerüstet. Die Temperatur wird mit einem linearisierten Temperaturfühler der Firma Yellow Springs Incorp. und die Feuchte mit einem Humicap-Sensor der Firma Vaisala gemessen. Die Fühler befinden sich auf einem abgespannten, teleskopartig ausziehbaren Antennenmast, der auf ca. 12 m ausgezogen wurde. Die Datenaufzeichnung erfolgt auf einem Datenlogger der Firma ELSYS, die Werte werden im 1-Sekunden-Rhythmus abgefragt und als 2.5 min-Mittelwerte auf einem Kreditkartenspeicher festgehalten. Diese Mittelung wurde gewählt, um mit dem Datensatz des MISTRAL-Projektes kompatibel zu sein. Die gesamte Bodenstation ist mit 12V-Autobatterien und einem Solarpanel unterbruchsfrei betreibbar, der Kreditkartenspeicher muss ca. alle 14 Tage ausgewechselt werden.

**Figur 1. Plazierung der Windstationen im Projekt "Windbank", Flüsse, Seen und die Höhenlinien für 500 m und 800 m sind eingetragen, Ordinate und Abszisse zeigen das Schweizerische Kilometernetz an. KKB: Station 33, KKL: Station 34, PSI: Station 32**



Nach einer ausführlichen Rekognoszierung konnten Stationsstandorte ermittelt werden, die eine besonders hohe Repräsentativität versprachen. Dabei ist die wichtigste Frage, ob nicht Hindernisse im Wege stehen, die eine lokale Verfälschung des Windes bewirken. Zusätzlich mussten die lokalen Gegebenheiten, insbesondere die Infrastruktur und die Bewilligung zum zeitlich begrenzten Betrieb der Stationen von Landbesitzer und Gemeinden, abgeklärt werden.

Die Platzierung ergab nun folgende Standorte für die zusätzlichen Stationen, die eigens zum Zweck des vorliegenden Projektes aufgestellt wurden (in Klammern sind jeweils die Koordinaten der Bodenstationen in Einheiten des Schweizerischen Kilometer-rasters und die Höhe in Metern über Meer angegeben, die beiliegende Karte in Figur 1 gibt die Nummern der Stationen wider):

- 3. Albbecken, Staudamm der Schluchseewerke (653.000,288.420, 744)
- 4. Eschbach (656.275,275.575, 538)
- 5. Tiengen (661.110,274.950, 342)
- 6. Willmendingen (667.750,276.125, 369)
- 7. Wilchingen (675.875,280.575, 420)
- 8. Rietheim (664.125,272.550, 321)
- 9. Weiach (675.250,268.330, 376)
- 10. Endingen (665.050,264.740, 421)
- 11. Schleinikon (673.175,261.050, 467)
- 12. Daenikon (673.275,256.225, 419)
- 13. Spreitenbach, Hochhaus (670.175,252.775, 480)
- 14. Stetten (664.550,250.650, 367)
- 15. Dottikon (659.625,248.825, 420)
- 16. Schinznach (654.200,255.575, 347)
- 17. Effingen, Reservoir Nr. 220 (650.500,260.240, 448)
- 18. Riniken, Pumphaus (656.625,261.000, 378)
- 19. Moenthal (653.100,262.950, 490)
- 20. Laubberg (653.150,267.125, 480)
- 21. Geissberg (656.950,265.050, 622)
- 22. Siggenthal, Chaemihuetten (660.125,262.125, 352)
- 23. Schwarzabecken (656.470,289.375, 716)

Die Datenausbeute dieser Stationen liegt über 95 %, sodass eine ausgezeichnete Überdeckung des Zeitraumes erreicht wurde.

Zwei Fremdstationen von privaten Betreibern sind wie folgt platziert (Ost-West- und Nord-Süd-Position im Schweizer-Kilometer-Raster, Höhe in Meter über Meer):

- 1. Laufenburg (Kommunikationsturm der EGL) (646.075,267.200, 340)
- 2. Sisseln (Meteoturm der Firma Roche) (640.850,266.250, 306)

Zwei weitere Stationen mit Fremddaten liegen auf deutschem Gebiet:

- 24. Dogern (655.700,273.500, 310)
- 25. Bierbronnen (DWD-Station) (653.300,279.700, 758)

Ergänzend konnte auf folgende Stationen von Routinenetzen gegriffen werden (ANETZ und ENET der Schweizerischen Meteorologischen Anstalt (SMA), Angabe mit ANETZ- bzw. ENET-Nummer und Kürzel, AMETIS des Flughafens Kloten):

- 26. Gubrist (AMETIS) 677.400,252.800, 643
- 27. 68 Laegern LAE 672.252,259.461, 868
- 28. 40 Buchs-Suhr BUS 648.400,248.380, 387
- 29. 235 Mosen/Aesch 660.250,232.950, 453
- 30. 39 Ruenenberg RUE 633.250,253.840, 610
- 31. 217 Moehlin 633.250,268.600, 350
- 32. 72 PSI Wuerenlingen PSI 659.540,265.600, 334
- 33. 60 Beznau BEZ 659.500,267.400, 327
- 34. 64 Leibstadt LEI 656.350,272.100, 341
- 35. 32 Zuerich-Kloten KLO 682.280,259.220, 436
- 36. 43 Schaffhausen SHA 688.700,282.800, 437
- 37. 20 Napf NAP 638.130,205.970,1407
- 38. 245 Bargaen 686.590,294.750, 437
- 39. 216 St. Chrischona 618.700,269.000, 660
- 40. 242 Uetliberg 679.500,245.100, 920

Die Einbindung der Daten dieser Stationen in die Datenbank für das gesamte Projekt bot von der Datenaquisition her kein Problem, da der Link zur Datenbank der SMA für die ANETZ-Daten installiert ist. Die ENET- und AMETIS-Daten wurden von der SMA in Payerne zur Verfügung gestellt, zusammen mit den ANETZ-Stationen beträgt ihre Datenausbeute während der 4 Monate 99 %.

Die Daten von Beznau und Leibstadt werden von einem 70 m, beziehungsweise 110 m hohen Meteoturm auf 2 Niveaus erfasst. Da das obere Niveau den Höhenwind erfasst, wurden daraus für die Datenbank des Projektes eigene "Stationen" deklariert:

- 41. 60 Beznau 70 m BEZ 659.500,267.400, 397
- 42. 64 Leibstadt 110 m LEI 656.350,272.100, 451

Auf dem Areal des PSI stand ferner ein SODAR, das mit Hilfe von vertikal ausgesandten Schallwellen und der Dopplerverschiebung der Rückstreuung zur Bestimmung der 3 Windkomponenten zu einem vertikalen Profil führt. Dieses Windprofil wurde in den Datensatz so eingearbeitet, dass die Mittelwerte über die Höhenschichten von 0 bis 100 müG, von 100 bis 200 müG, von 200 bis 300 müG und von 300 bis 400 müG als getrennte "Stationen" angesprochen wurden:

- 43. 72 PSI SODAR 659.540,265.600, 384
- 44. 72 PSI SODAR 659.540,265.600, 484
- 45. 72 PSI SODAR 659.540,265.600, 584
- 46. 72 PSI SODAR 659.540,265.600, 684

Da die Höhenreichweite des SODAR stark von der Durchmischung der Atmosphäre abhängt, liegen tagsüber nur spärlich Daten von den höheren beiden Schichten vor, sodass diese für die Clusteranalyse nicht berücksichtigt wurden. Die Daten der unteren 2 Niveaus liegen während der 4 Messmonate zu 88 % der Zeit vor.

Die Datenbereinigung erfolgte manuell aufgrund einer graphischen Darstellung der Zeitreihen der Vektorkomponenten des Windes (u bedeutet Westwind, v bedeutet Südwind), der Temperatur und der Feuchte, indem Ausreisser durch Vergleich der naheliegenden Stationen detektiert wurden. Die detektierten Ausreisser wurden im Datensatz markiert und bei der Stundenmittelung, beziehungsweise bei der Distanzberechnung der Klassenanalyse nicht berücksichtigt.

Anschliessend wurden die Stundenmittelwerte aller Stationen über den gesamten Zeitraum bestimmt. Unter Berücksichtigung der vorgängig beschriebenen Diskriminierung von Ausreissern verbleiben ca. 97 % gültige Daten während der insgesamt 2951 Stunden dauernden Messkampagne im Zeitintervall der 4 Monate. Die Ausreisser liegen mehr oder weniger zufällig verteilt, sodass keine Stunde weniger als 38 gültige Stationswerte aufweist und daher alle Stunden für die Clusteranalyse herangezogen werden können.

### 3 Klassifizierung der Winddaten

#### 3.1 Clusteranalyse

Die Klassifizierung der Windfelder stützt sich auf das Vorgehen von Kaufmann und Weber 1995. Dabei wurde zunächst eine Normalisierung der einzelnen Stundenwerte vorgenommen, um die Wirkung von einzelnen Starkwindepisoden zu eliminieren, da diese zu isolierten Klassenbildungen führen würden, die sich in der Windgeschwindigkeit deutlich, in der Windrichtung dagegen nur unwesentlich von andern Klassen unterscheiden. Freilich muss später bei der Windfeldbestimmung in Echtzeit nach erfolgter Klassenidentifikation wiederum auf die herrschende Windgeschwindigkeit skaliert werden. Die Normierung erfolgt nach folgender Definition des Normierungsfaktors  $s_t$  für die Stunde  $t$ :

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

wobei  $u_{tj}$  und  $v_{tj}$  die West-, bzw Südkomponente des Windes der Station  $j$  zur Zeit  $t$  bedeutet. Die Summierung erfolgt über die  $N$  Stationen, die im vorliegenden Fall maximal 44 beträgt, die als ungültig deklarierten Ausreisserdaten aber, wie oben besprochen, weglässt. Die Normierung ist damit gegeben durch:

$$u'_{tj} = \frac{u_{tj}}{s_t} \quad \text{und} \quad v'_{tj} = \frac{v_{tj}}{s_t} \quad (2)$$

wobei hier  $u'_{tj}$  und  $v'_{tj}$  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 der selben Klasse zugeordnet.

Ein nächster Schritt nimmt die Clusteranalyse nach dem "complete linkage Verfahren" vor. Die Einteilung nach Klassen erfolgt aufgrund eine Distanzfunktion, die ein Mass zur Unterscheidbarkeit der Winvektoren aller Stationen darstellt. Die Distanz der Windvektoren zur Stunde  $t$  gegenüber der Stunde  $\tau$  ist wie folgt festgesetzt:

$$d_{t\tau} = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N [(u'_{tj} - u'_{\tau j})^2 + (v'_{tj} - v'_{\tau j})^2]^{1/2} \quad (3)$$

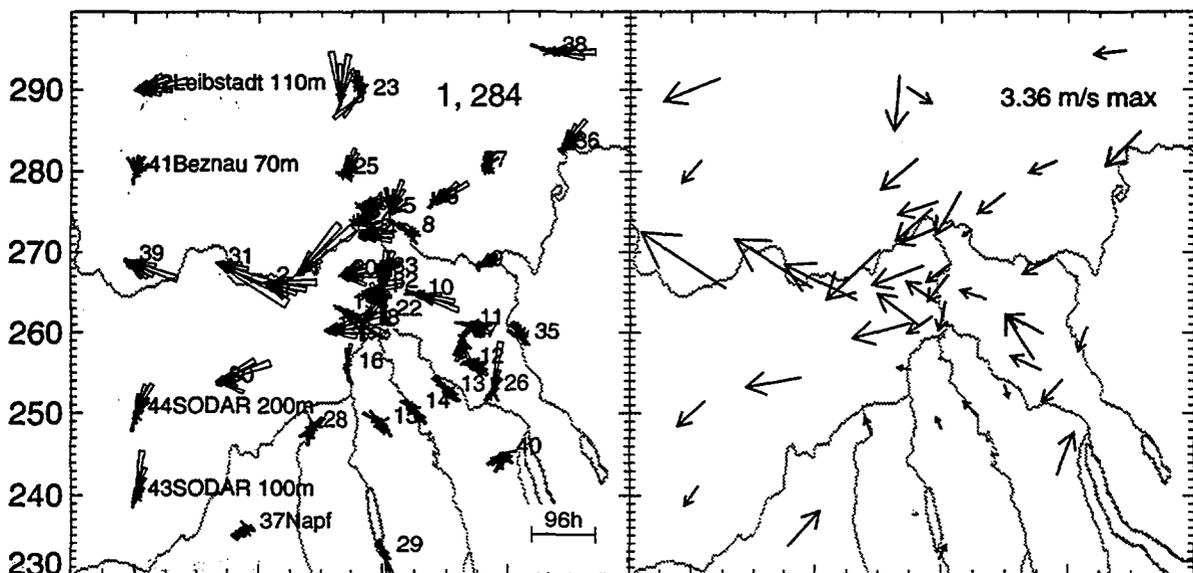
wobei der Stationenindex  $j$  wiederum über die verfügbaren Stationsdaten zur Zeit  $t$  läuft. Unterscheiden sich zwei Stundenwerte nur in der Windgeschwindigkeit, nicht

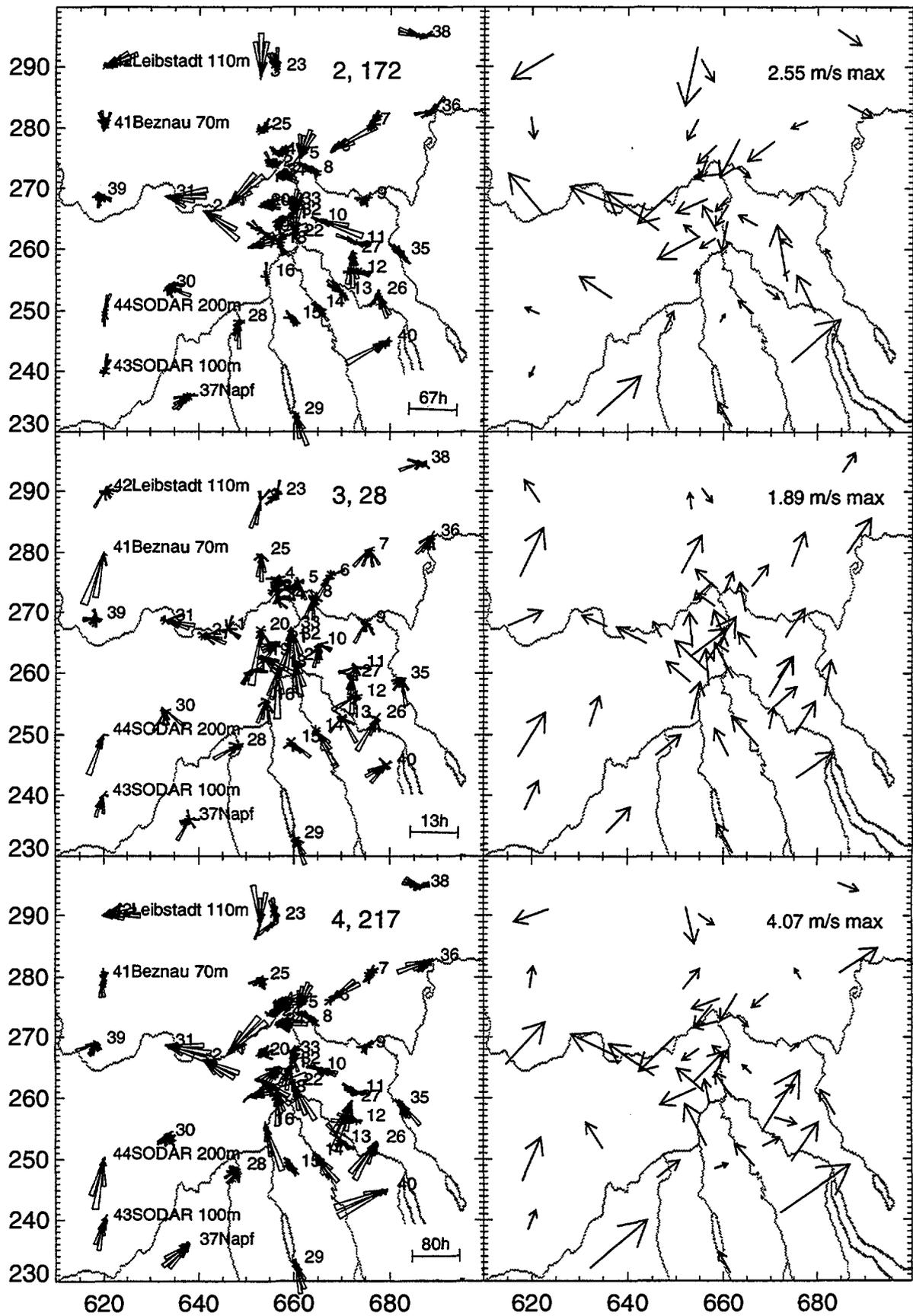
aber in der Windrichtung, so wird aufgrund der vorgängig geschilderten Normierung die Distanz Null. Dagegen weist ein Windfeld, bei dem alle Winde um 180 Grad gedreht sind, eine Distanz von 2 auf. Dies stellt die maximal erreichbare Distanz dar, wie aus der definierenden Gleichung (3) hervorgeht. Aufgrund der Normierung durch Gleichung (1) ist die Distanz eine dimensionslose Grösse. Die Berechnung der Distanzen jeder Stunde gegenüber jeder anderen Stunde führt somit zu einer Distanzmatrix mit Diagonalsymmetrie. Liegen von einer Station zu einer Stunde gemäss Datenbereinigung keine gültigen Daten vor, so wird wie im Falle der Normierung nur über Stationen mit gültigen Werten gemittelt.

Die Clusteranalyse nach dem complete linkage Verfahren wird mit Hilfe der IMSL-Routine (IMSL Fortran Subroutines for Mathematical Applications) in einem Fortran-Programm nach Kaufmann 1996 für eine Anzahl von 13 Klassen durchgeführt. Die Methode erreicht eine Clusteranalyse mit einer ausgewogenen Anzahl von Vertretern in jeder Klasse und vermeidet die mit anderen Verfahren häufig erzielte Bildung sehr kleiner Klassen.

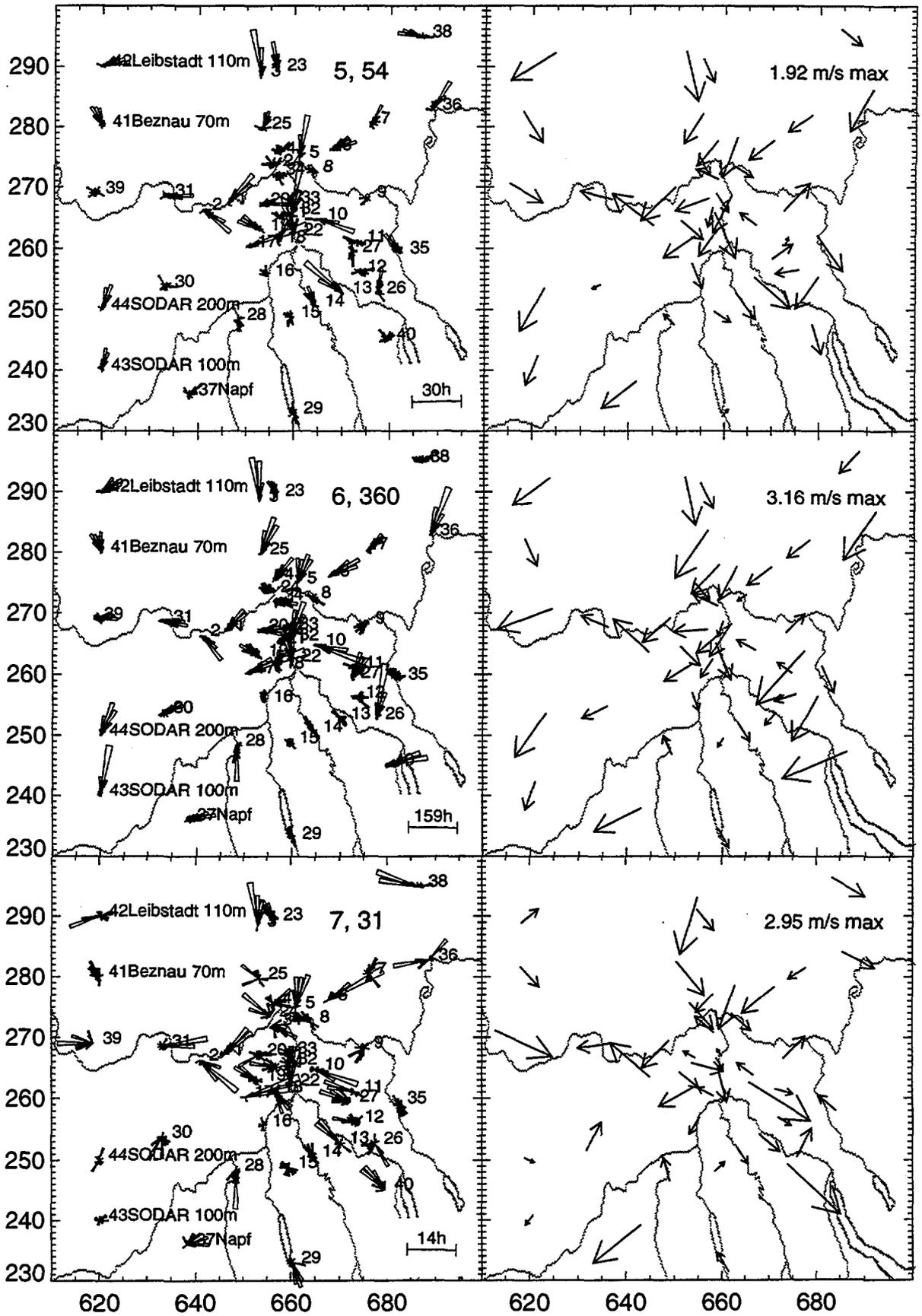
Nach der Clusteranalyse lassen sich die Mittelwerte und -streuungen aller 13 Klassen berechnen, wie in Figur 2 dargestellt.

**Figur 2:** Die 13 Klassen nach der Clusteranalyse, dargestellt über dem Untersuchungsgebiet der Figur 1: Die linke Seite der Figur zeigt die Häufigkeitsverteilung in 10 Grad Intervallen innerhalb der Klasse (Klassennummer, Anzahl beobachteter Stundenmittelwerte der Klasse und die Masszahl für die Sektorlängen in Anzahl Stunden sind eingeblendet), die rechte Seite zeigt den mittleren Wind (die Angabe der maximalen Windgeschwindigkeit ist eingeblendet). Unterlegt ist das Flusssystem, Ordinate und Abszisse geben das Schweizerische Kilometernetz wieder, die 5 verbal gekennzeichneten Station sind der Übersichtlichkeit halber geographisch verschoben.

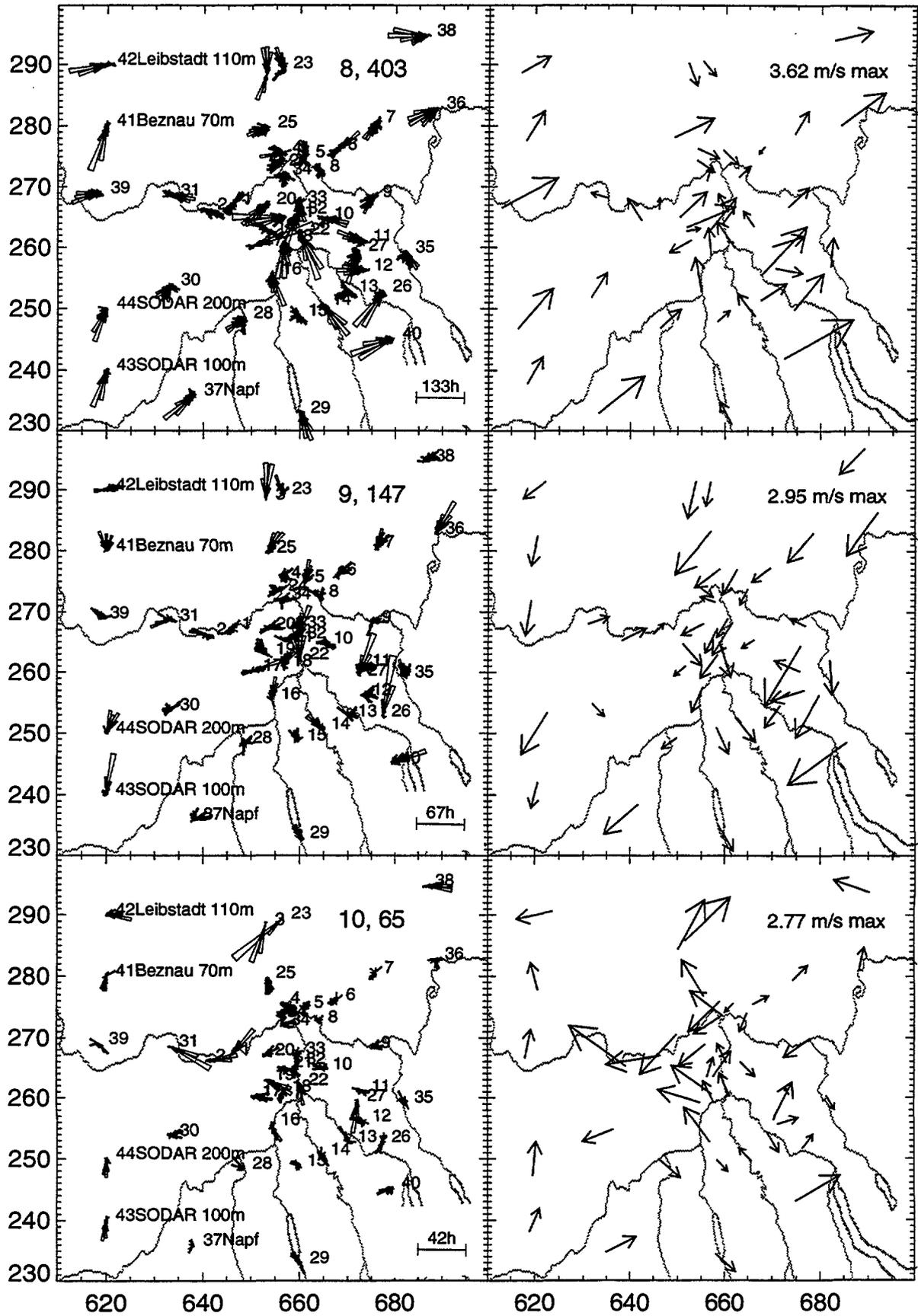




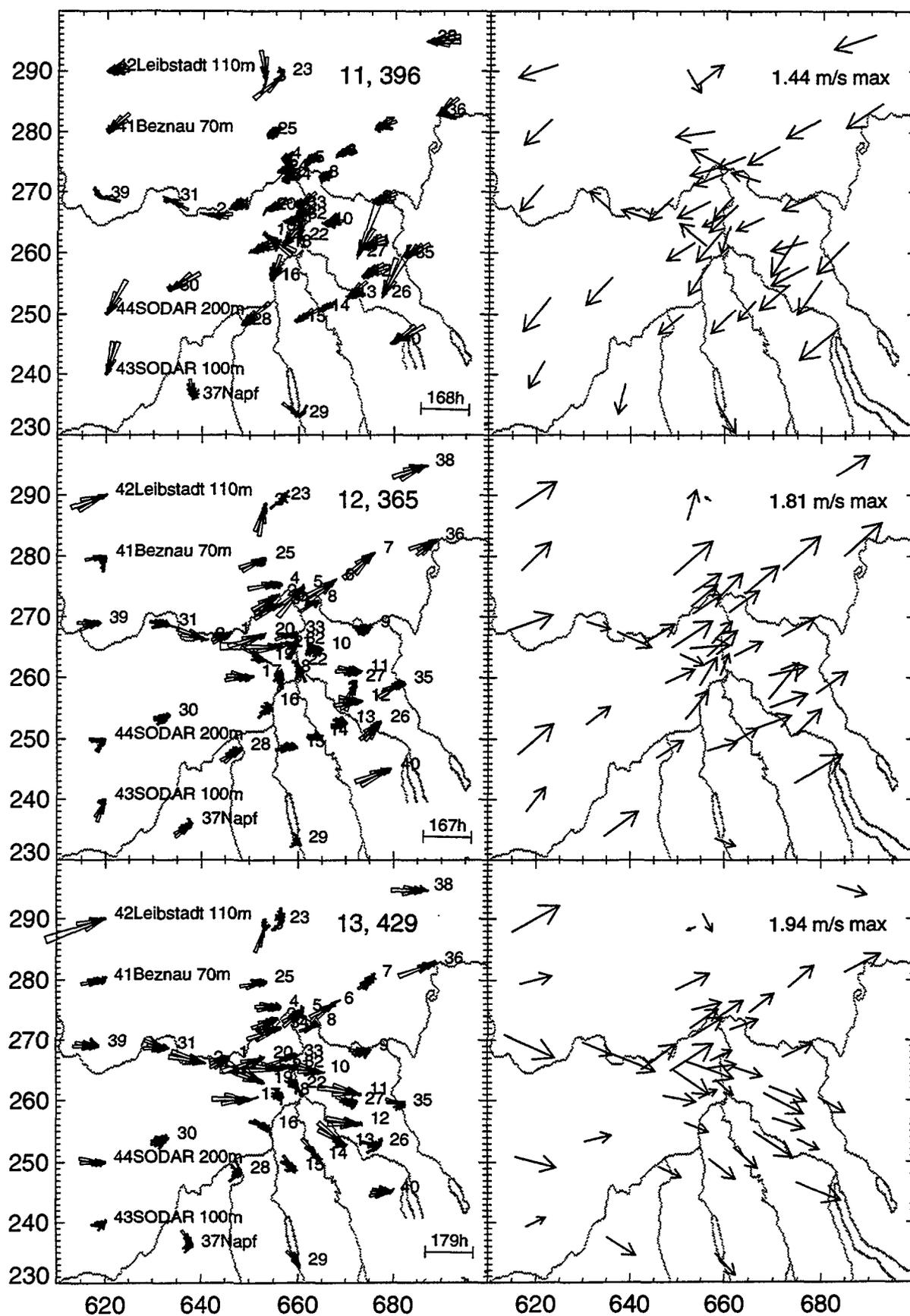
Fortsetzung der Figur 2.



Fortsetzung der Figur 2.



Fortsetzung der Figur 2.



Fortsetzung der Figur 2.

## 3.2 Umverteilung

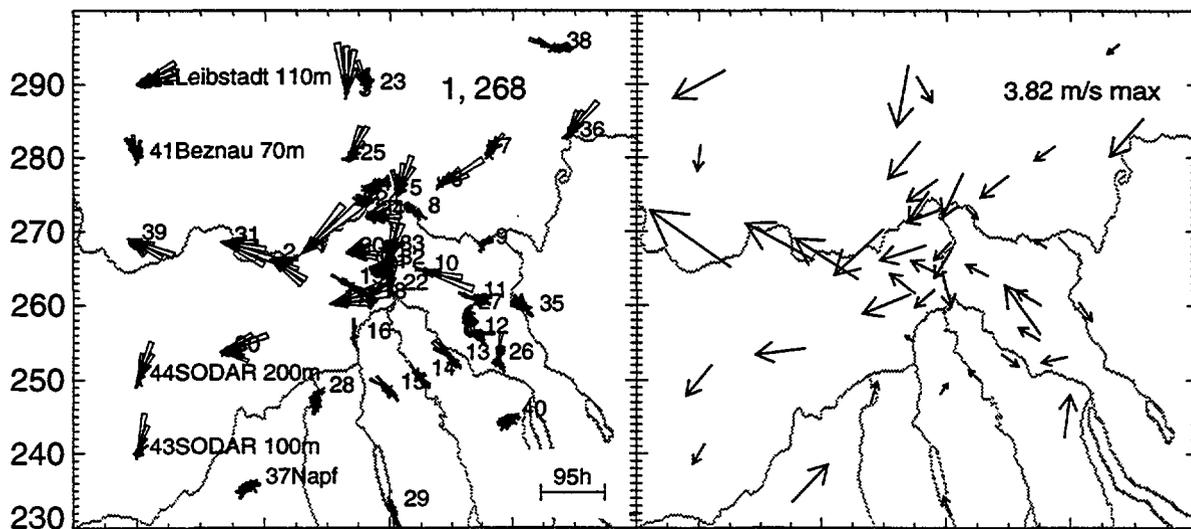
Bei der Darstellung in Figur 2 fällt auf, dass die Streuungen der Windgeschwindigkeiten innerhalb einer Klasse gross sind, was die "Klassenschärfe" für die betreffende Station in Frage stellt. Aus diesem Grunde wurde nach der Clusteranalyse eine Umverteilung vorgenommen, indem die Distanz eines einzelnen Stundenwertes  $t$  zu allen 13 Klassen gemäss dem folgenden Distanzmass bestimmt wurde:

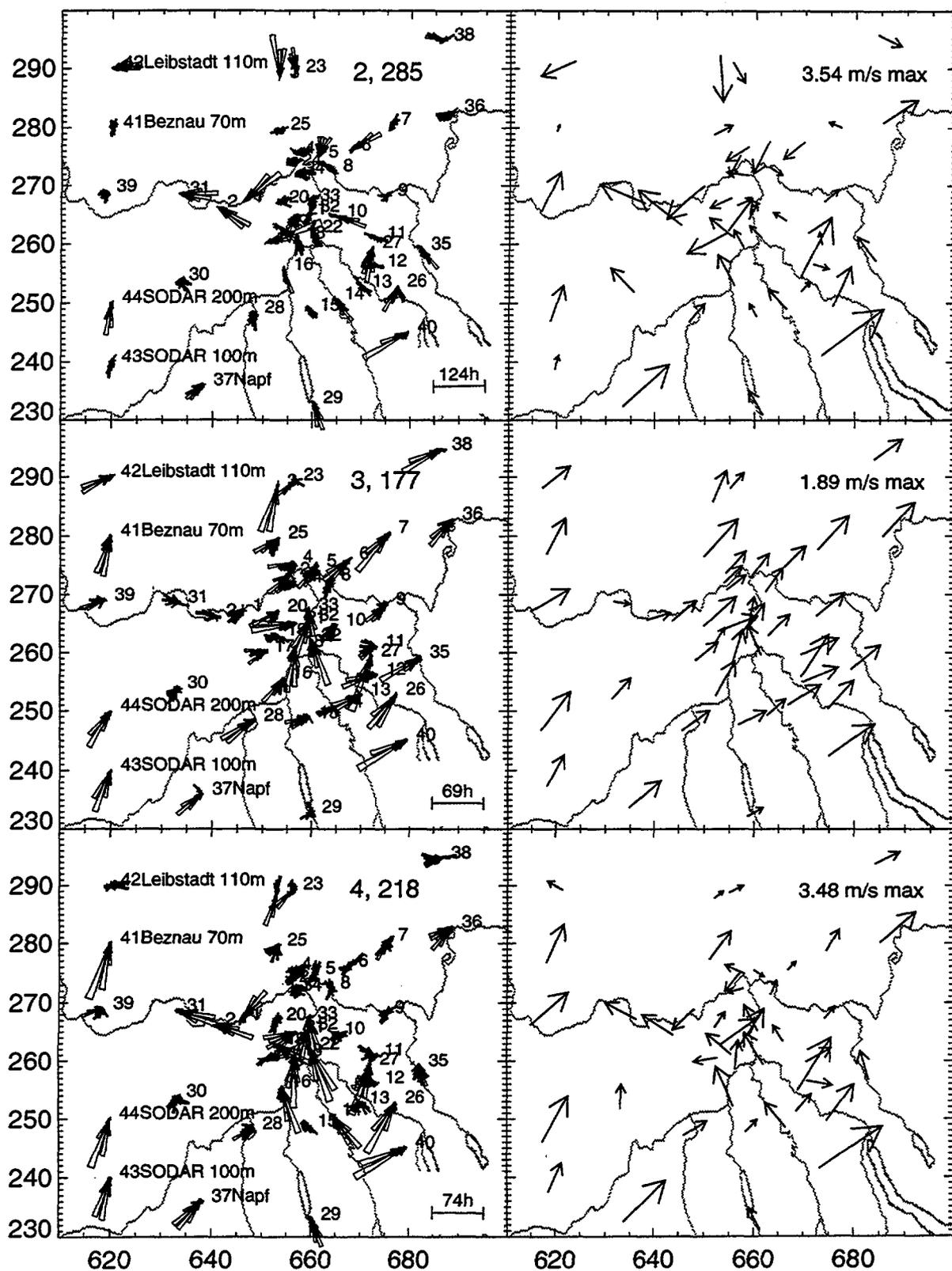
$$d_{tc} = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N [(u'_{tj} - u_{cj})^2 + (v'_{tj} - v_{cj})^2]^{1/2} \quad (4)$$

wobei  $u_{cj}$  und  $v_{cj}$  die Mittel der West- und Südwindkomponente über die Mitglieder der Klasse  $c$  bilden. Von den 13 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 der der ursprünglichen Klasseneinteilung überein, so war die erste Zuordnung bereits "richtig", andernfalls wird die Stunde umverteilt.

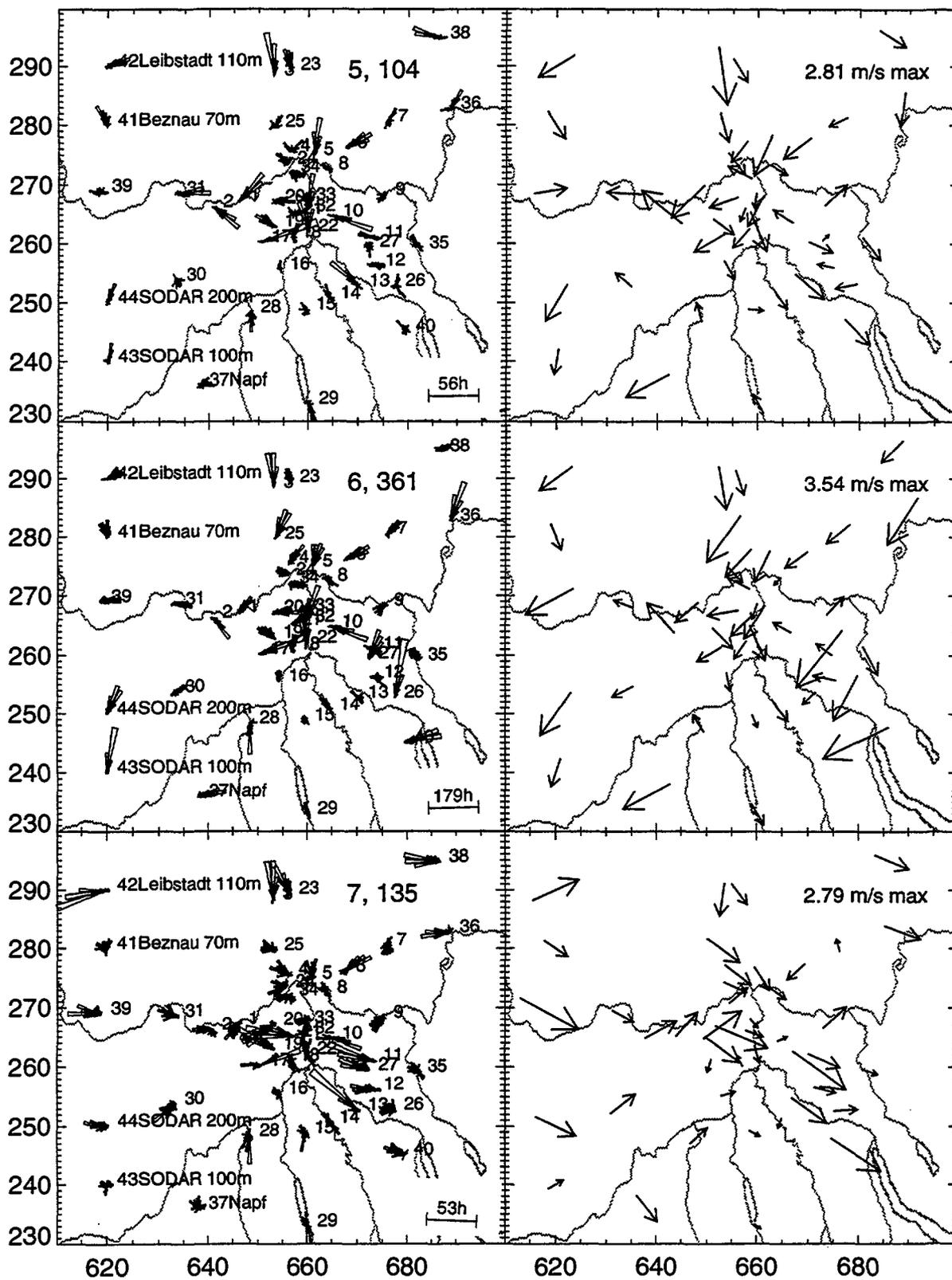
Ist diese Berechnung und Neuordnung für alle Stunden vollzogen, so liegt eine neue Clusterbildung nach der 1. Umverteilung vor, deren Mittelwerte wiederum berechnet werden können. Diese Umverteilung wird nun so oft wiederholt, bis in einem Durchgang durch alle Stunden keine Änderung der Klasseneinteilung mehr erfolgt. Die so bestimmte Klasseneinteilung ist stabil. Figur 3 zeigt die damit gewonnenen, deutlich schärferen Klassen, bei denen die Streuungen der Windrichtungshäufigkeiten kleiner sind im Vergleich zu Figur 2.

**Figur 3: Häufigkeitsverteilungen und Klassenmittel nach Clusteranalyse in 13 Klassen und Umverteilung. Die Bezeichnungen entsprechen der Figur 2.**

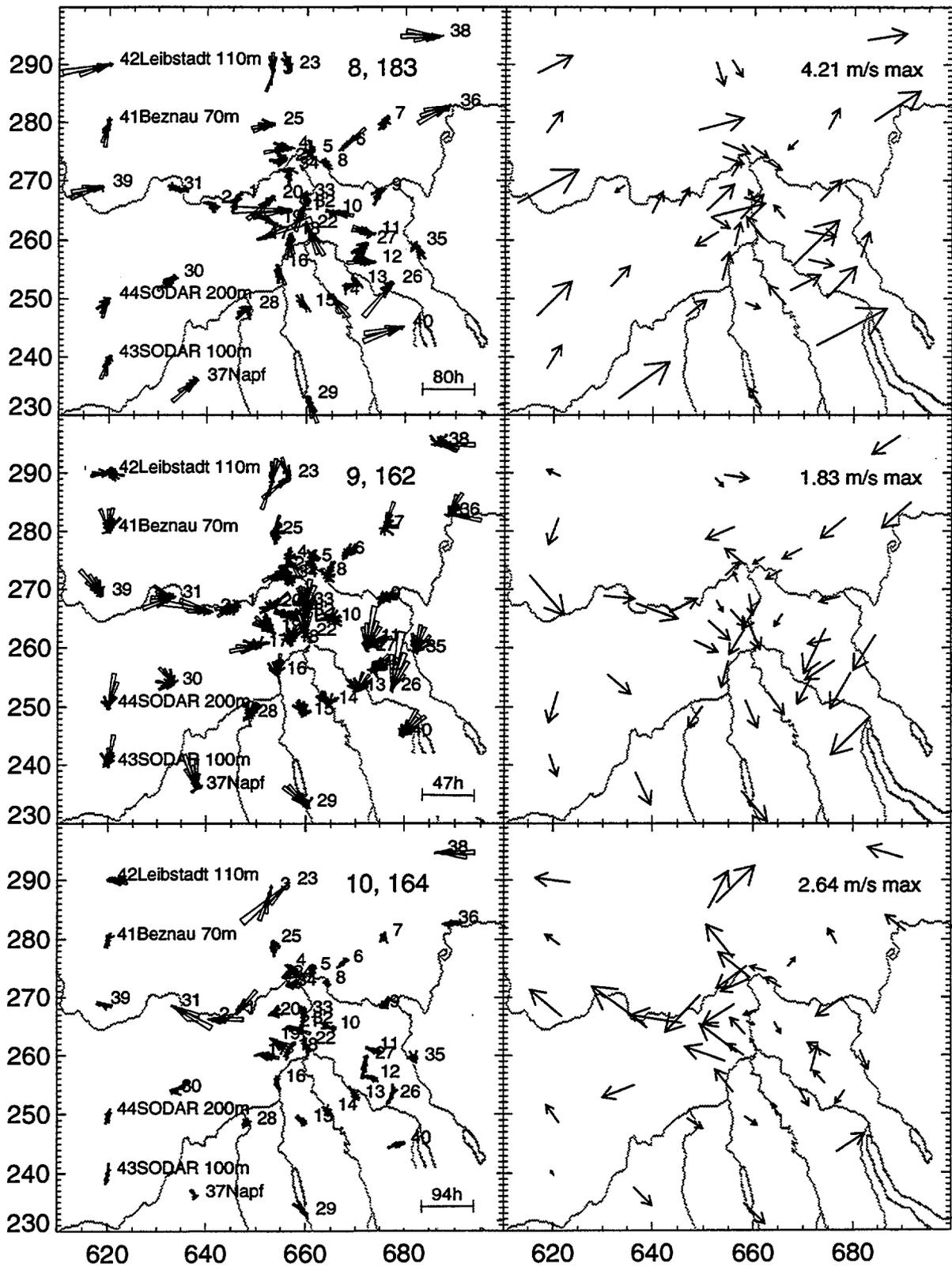




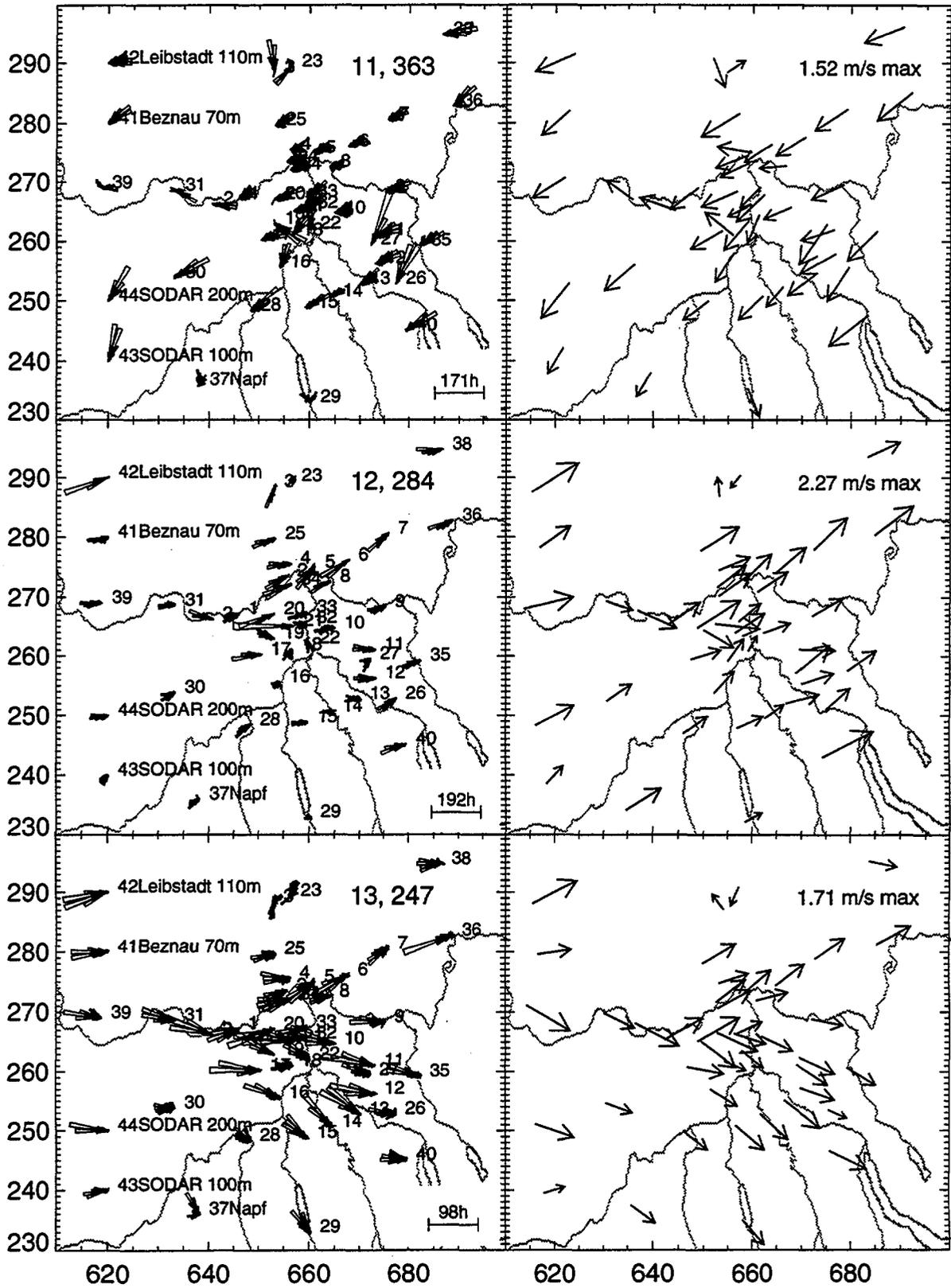
Fortsetzung der Figur 3.



Fortsetzung der Figur 3.



Fortsetzung der Figur 3.



Fortsetzung der Figur 3.

Als wichtiges Kriterium dieser Wahl gilt die 13x13-Matrix der Distanzen von Klasse zu Klasse. In Analogie zur Distanz bei der Clusteranalyse ist die Distanz von Klasse c zu Klasse k wie folgt definiert:

$$d_{ck} = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N [(u_{cj} - u_{kj})^2 + (v_{cj} - v_{kj})^2]^{1/2} \quad (5)$$

wobei c und k je über alle 13 Klassen laufen. In der Tabelle 1 sind die Distanzmatrizen vor und nach der Umverteilung einander gegenübergestellt.

**Tabelle 1.a) Matrix der Distanzen von Klasse zu Klasse nach der Clusteranalyse und vor der Umverteilung, Angabe in Prozenten der maximalen Klassendistanz von 1.561 (die linke Kolonne gibt nach der Klassennummer die Anzahl der Mitglieder an):**

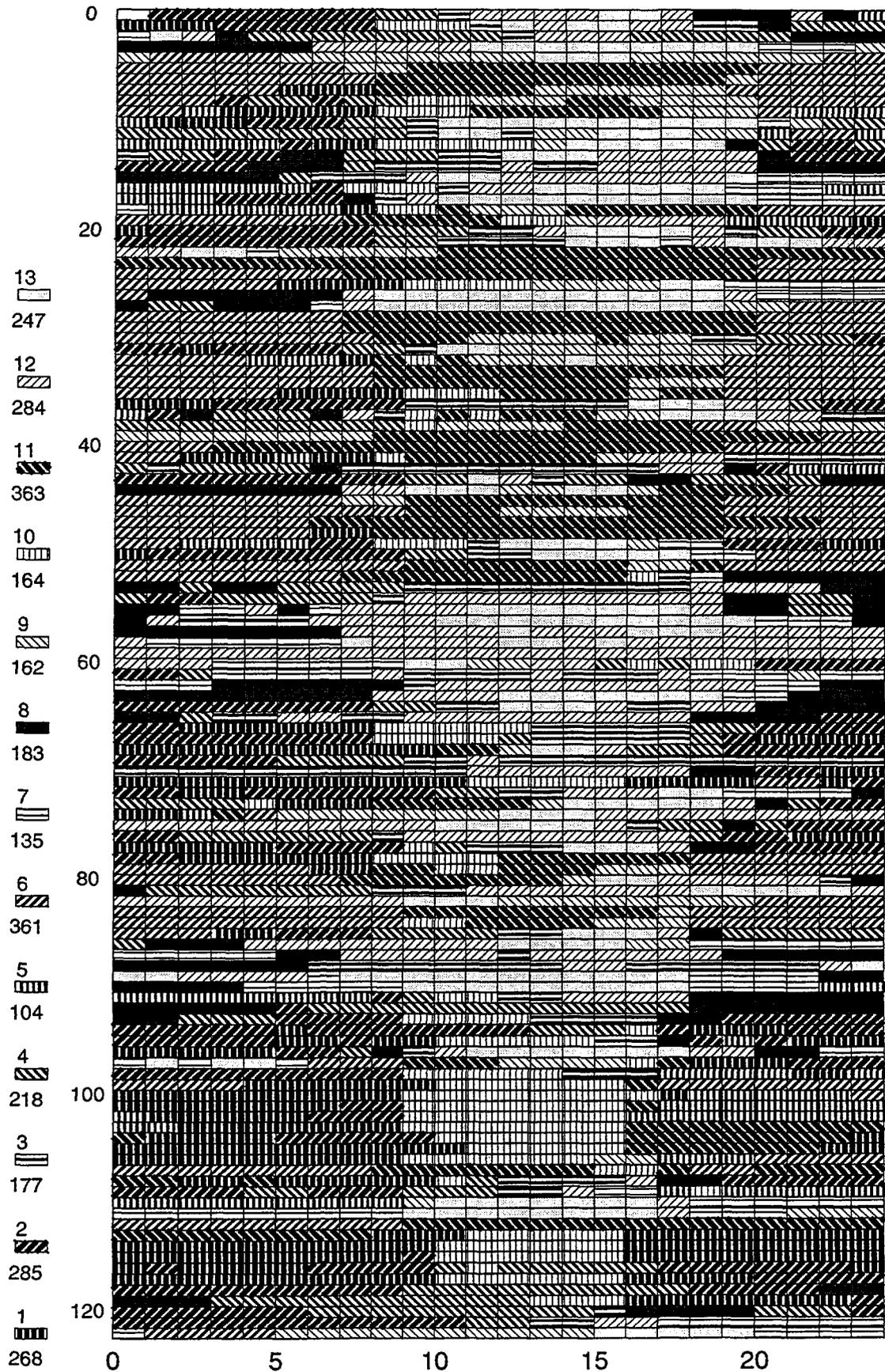
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
1 284	0	31	71	54	48	49	61	78	60	45	49	90	88
2 172	31	0	65	38	46	55	45	59	69	52	65	79	81
3 28	71	65	0	47	78	89	67	39	87	54	81	48	65
4 217	54	38	47	0	68	81	56	35	85	46	80	65	76
5 54	48	46	78	68	0	33	43	77	39	72	50	84	73
6 360	49	55	89	81	33	0	56	89	28	80	47	99	89
7 31	61	45	67	56	43	56	0	55	61	72	71	72	63
8 403	78	59	39	35	77	89	55	0	85	64	90	39	51
9 147	60	69	87	85	39	28	61	85	0	82	41	89	75
10 65	45	52	54	46	72	80	72	64	82	0	65	71	79
11 396	49	65	81	80	50	47	71	90	41	65	0	99	90
12 365	90	79	48	65	84	99	72	39	89	71	99	0	29
13 429	88	81	65	76	73	89	63	51	75	79	90	29	0

**Tabelle 1.b) Distanzmatrix nach der Umverteilung, Angabe in Prozenten der maximalen Klassendistanz von 1.967:**

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
1 268	0	48	79	73	44	61	89	88	74	34	50	91	93
2 285	48	0	56	31	55	88	77	50	91	47	74	69	83
3 177	79	56	0	32	68	92	47	35	69	69	86	27	44
4 218	73	31	32	0	66	94	69	36	88	64	83	53	72
5 104	44	55	68	66	0	39	61	73	51	45	43	71	65
6 361	61	88	92	94	39	0	82	99	48	65	38	96	87
7 135	89	77	47	69	61	82	0	45	55	77	83	33	30
8 183	88	50	35	36	73	99	45	0	83	81	96	38	58
9 162	74	91	69	88	51	48	55	83	0	66	42	65	51
10 164	34	47	69	64	45	65	77	81	66	0	42	80	76
12 363	50	74	86	83	43	38	83	96	42	42	0	95	86
13 284	91	69	27	53	71	96	33	38	65	80	95	0	24
14 247	93	83	44	72	65	87	30	58	51	76	86	24	0

Auch aus dieser Darstellung wird deutlich, dass die Klassenschärfe mit der Umverteilung zunimmt und insbesondere eine ausgeglichene Verteilung der Mitgliederzahlen auf die 13 Klassen erfolgt.

Die zeitliche Abfolge der Klassen ist in Figur 4 dargestellt. Die Zahlen der einzelnen Klassenmitglieder, also die für die jeweilige Klasse gefundene Anzahl Stunden aus der Gesamtheit der 2951 Stunden, sind darin ebenfalls angegeben. In der Figur 4 zeigt sich, dass die Windfelder meist mit Sonnenauf- und -untergang deutlich wechseln: Ein Tagesregime lässt sich von einem Nachtregime unterscheiden, wie dies aufgrund meteorologischer Überlegungen (Bildung von nächtlichen Inversionsschichten) auch zu erwarten ist.



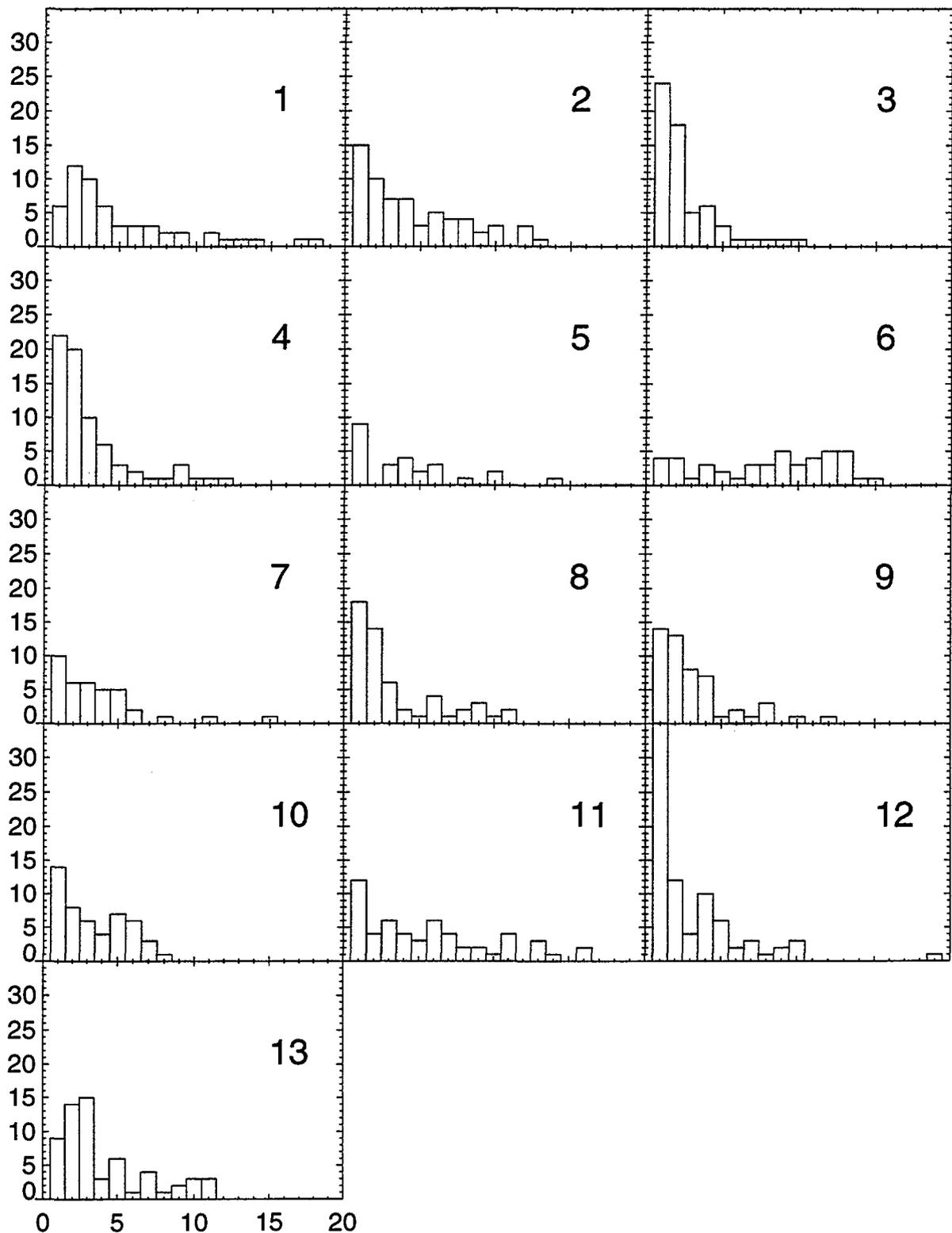
**Figur 4.** Darstellung der zeitlichen Abfolge der Klassen, entsprechend der Legende auf der linken Seite, die neben der Klassennummer noch die zugehörige Anzahl der Stundenwerte angibt. Die Ordinate gibt die Tage vom 1. Juli bis 31. Oktober an, die Abszisse bezeichnet die Tageszeit in Stunden.

Andererseits wird auch deutlich, dass die Persistenz einer Klasse sehr variabel ist. Die Persistenzanalyse in der Figur 5 zeigt die Verteilung der Persistenz für alle Klassen. Darin wird deutlich, dass zum Beispiel die Klasse 4 10 mal eine Persistenz von 3 Stunden aufweist. Von den insgesamt 2951 Stundenwerten gehören nach Figur 4 also 218 Stunden der Klasse 4 an, wovon 30 Stunden der "Unterklasse" mit 3 Stunden Persistenz zugeordnet sind.

Im Hinblick auf eine mögliche Echtzeit-Prognose sind die Klassenübergänge von besonderem Interesse. Die Häufigkeiten der Übergänge sind zu diesem Zweck in der Tabelle 2 aufgeführt. Daraus lässt sich beispielsweise ablesen, dass die Klasse 3 im Ganzen 31 mal in die Klasse 12 wechselt. Dieser Wechsel tritt am häufigsten auf. Die Summe aller Übergänge beträgt 709. Wie allerdings schon aus der Figur 4 ersichtlich ist, kommt dieser Darstellung der Klassenübergänge rein statistische Bedeutung zu, insbesondere lässt sich daraus keine Prognose im Sinne von häufigsten Übergängen in einer Folge von mehr als einigen Stunden ableiten.

**Tabelle 2. Statistik der bei 13 Klassen eingetretenen Klassenübergänge: Anzahl der Übergänge von der Klasse mit Spaltenindex in die Klasse mit Zeilenindex.**

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
1	0	17	0	0	10	12	0	0	0	8	7	0	0
2	23	0	0	18	8	1	1	10	0	2	0	0	0
3	0	1	0	28	0	0	0	5	1	9	0	17	1
4	0	27	10	0	0	0	0	23	1	5	0	5	0
5	4	3	1	0	0	5	5	1	2	2	1	1	0
6	1	0	0	0	4	0	4	0	15	0	21	0	0
7	0	0	1	2	0	0	0	5	3	0	0	10	17
8	0	5	5	13	0	1	9	0	0	0	0	20	1
9	0	0	1	0	1	6	5	0	0	6	21	0	11
10	19	11	1	9	1	1	0	0	1	0	6	0	0
11	7	0	0	0	1	19	0	0	12	17	0	0	0
12	0	0	31	0	0	0	5	10	3	0	0	0	31
13	0	0	12	1	0	0	8	0	13	0	0	27	0



**Figur 5. Verteilung der Persistenz der einzelnen Klassen der Figur 4. Die Ordinate zeigt die absolute Häufigkeit der in der Abszisse angegebenen Persistenzdauer (in Stunden) der betreffenden Klasse.**

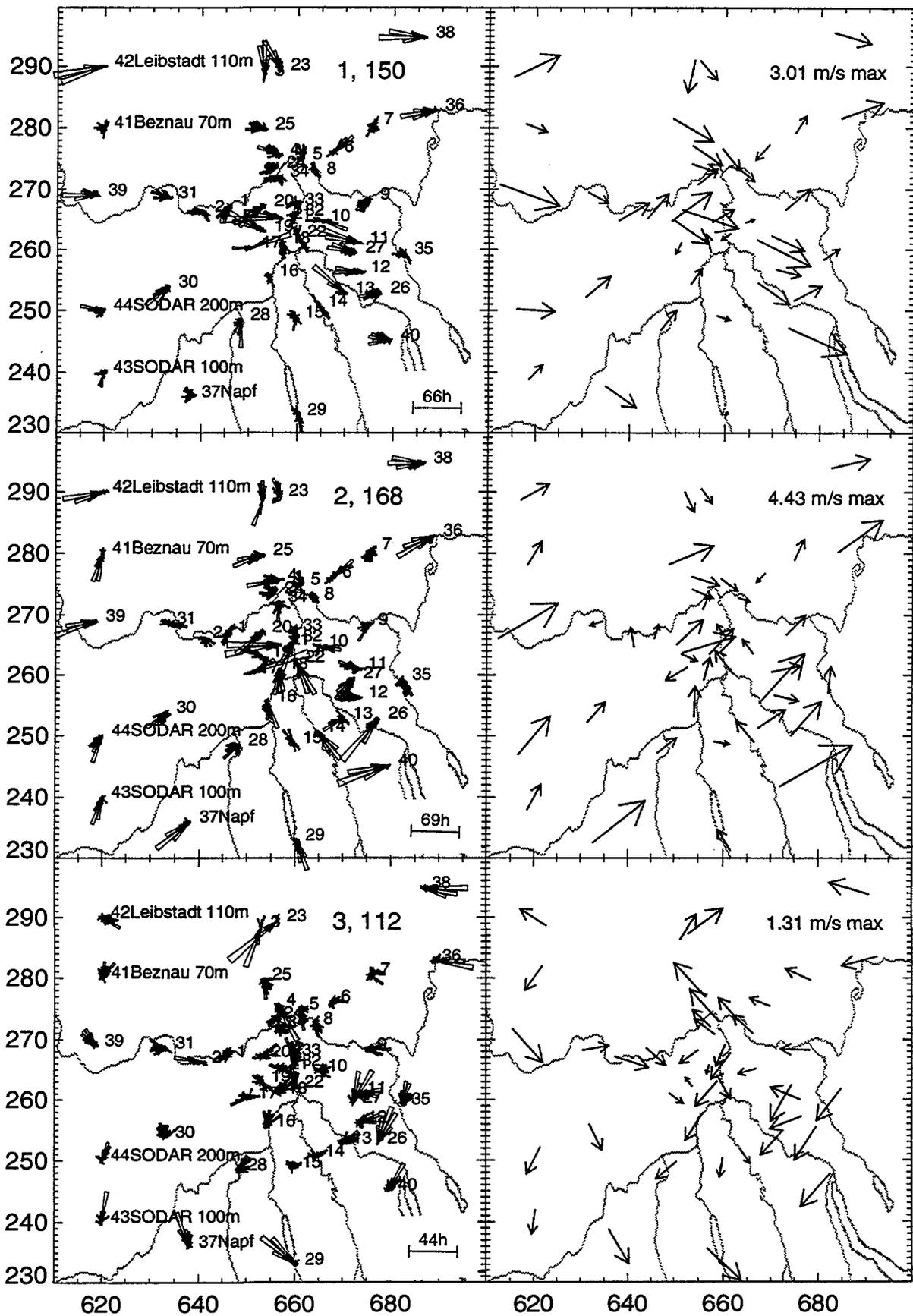
### 3.3 Anzahl der Klassen

Im folgenden wird untersucht, welchen Einfluss die Wahl der Anzahl der Klassen auf die Schärfe und damit auf die Unterscheidbarkeit der Klassen ausübt. Dadurch soll auch die für die weitere Untersuchung auf die Anzahl von 13 Klassen beschränkte Wahl der Klassenzahl begründet werden.

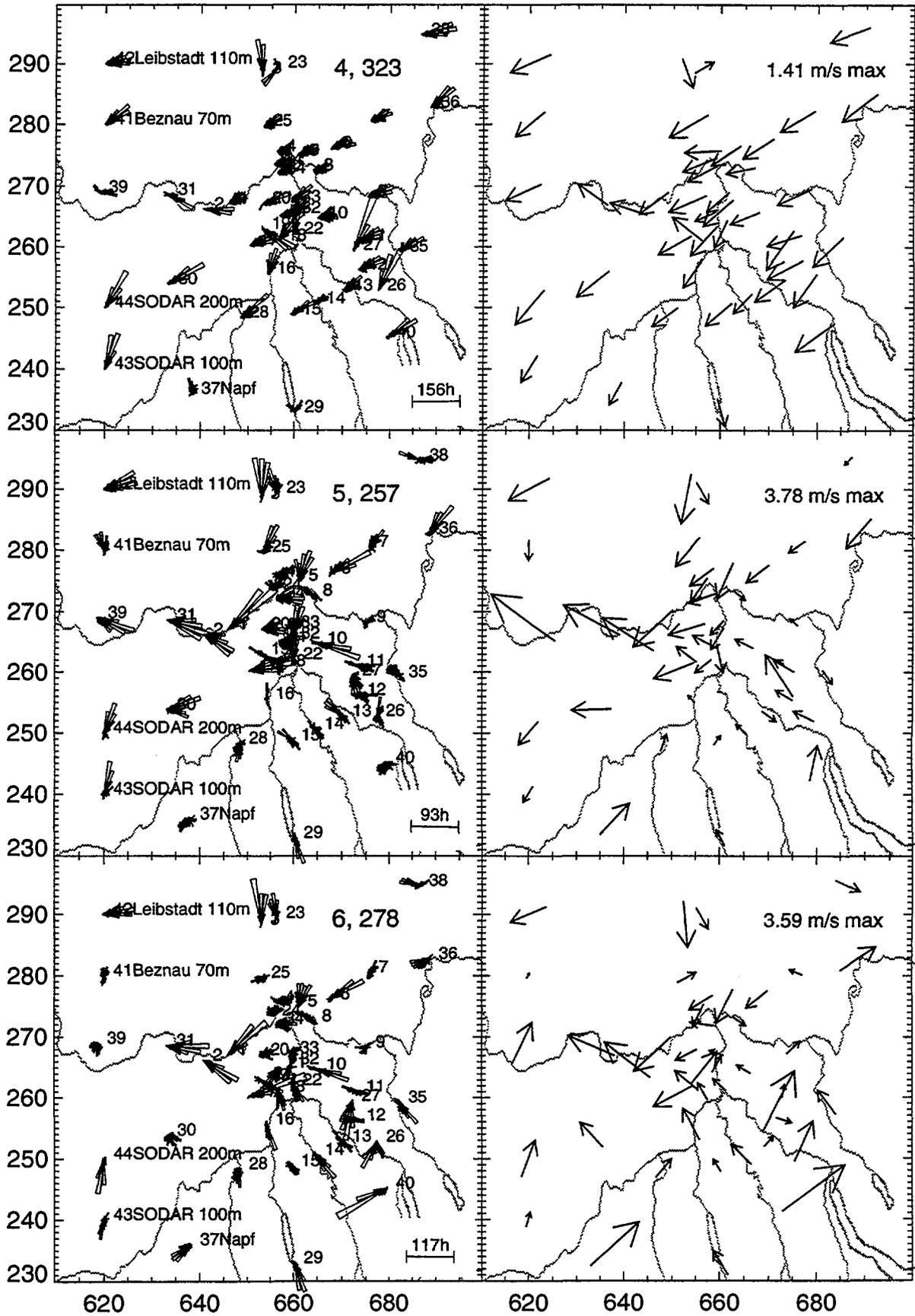
Mit einer Klassenzahl von 15 und anschließender Umverteilung ergeben sich die in Figur 6 dargestellten Mittelwerte und Streuungen, sowie die in Figur 7 dargestellte zeitliche Abfolge der Klassen im Beobachtungszeitraum. Die Klassen wurden nach der Clusteranalyse und Umverteilung so numeriert, dass ein Vergleich mit Figur 3 und 4, der Analyse mit 13 Klassen, möglichst viele Klassen ähnlich sind. Die Tabelle 3 zeigt die Distanzmatrix von Klasse zu Klasse.

**Tabelle 3. Distanzmatrix für 15 Klassen nach der Umverteilung, Angabe in Prozenten der maximal aufgetretenen Klassendistanz von 1.741:**

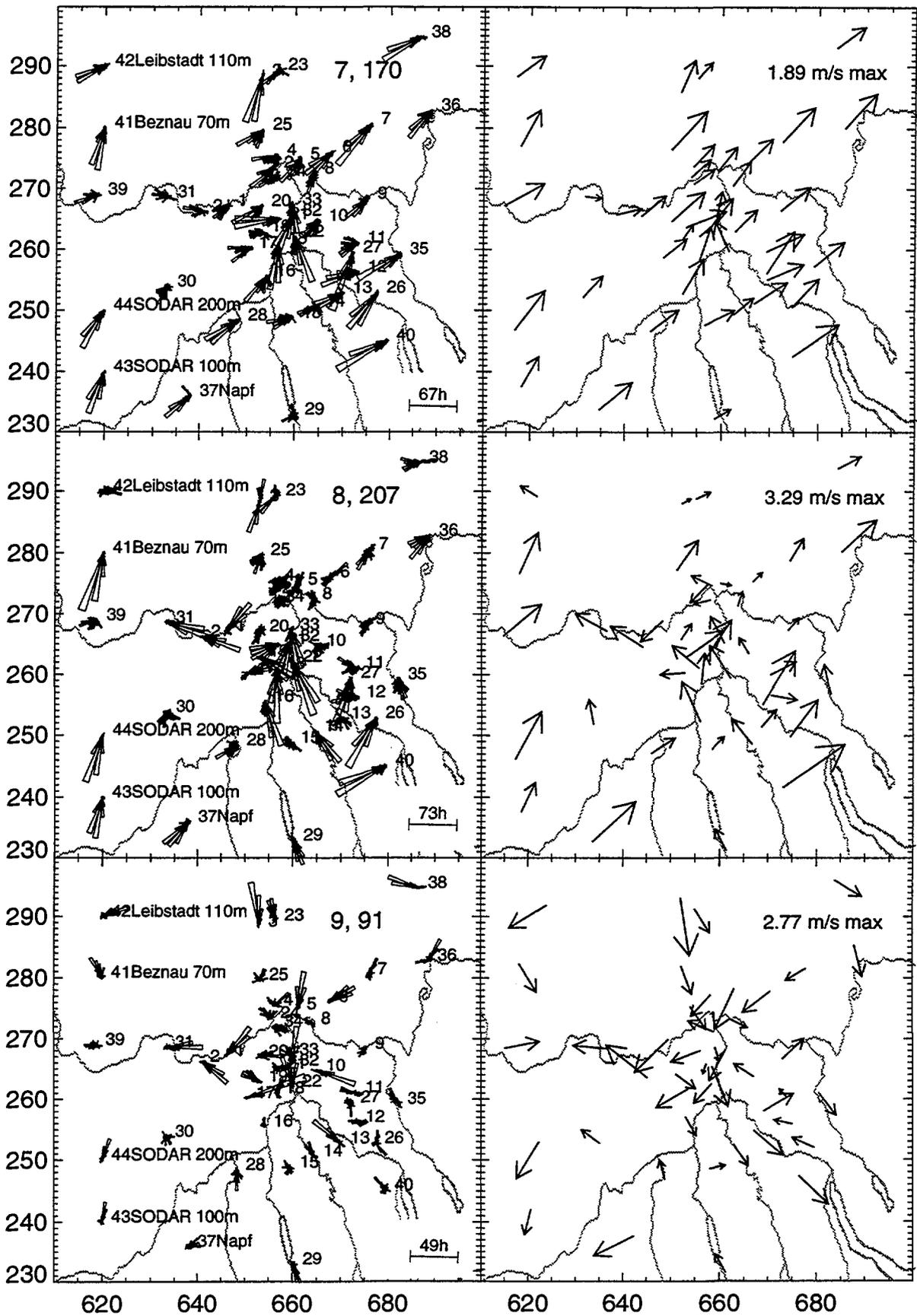
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
1	150	0	33	68	86	73	59	45	55	58	75	50	79	72	32	36
2	168	33	0	78	91	73	41	36	30	66	85	70	89	70	40	57
3	112	68	78	0	37	62	74	72	74	53	56	37	43	49	75	67
4	323	86	91	37	0	48	70	94	79	50	48	52	33	49	99	92
5	257	73	73	62	48	0	38	79	63	35	44	62	52	38	85	86
6	278	59	41	74	70	38	0	59	31	46	66	74	75	46	67	78
7	170	45	36	72	94	79	59	0	35	74	90	71	94	67	26	45
8	207	55	30	74	79	63	31	35	0	64	81	76	86	55	52	68
9	91	58	66	53	50	35	46	74	64	0	33	45	46	52	73	68
10	232	75	85	56	48	44	66	90	81	33	0	44	26	65	91	84
11	118	50	70	37	52	62	74	71	76	45	44	0	38	68	65	52
12	169	79	89	43	33	52	75	94	86	46	26	38	0	63	95	85
13	148	72	70	49	49	38	46	67	55	52	65	68	63	0	76	77
14	275	32	40	75	99	85	67	26	52	73	91	65	95	76	0	24
15	253	36	57	67	92	86	78	45	68	68	84	52	85	77	24	0



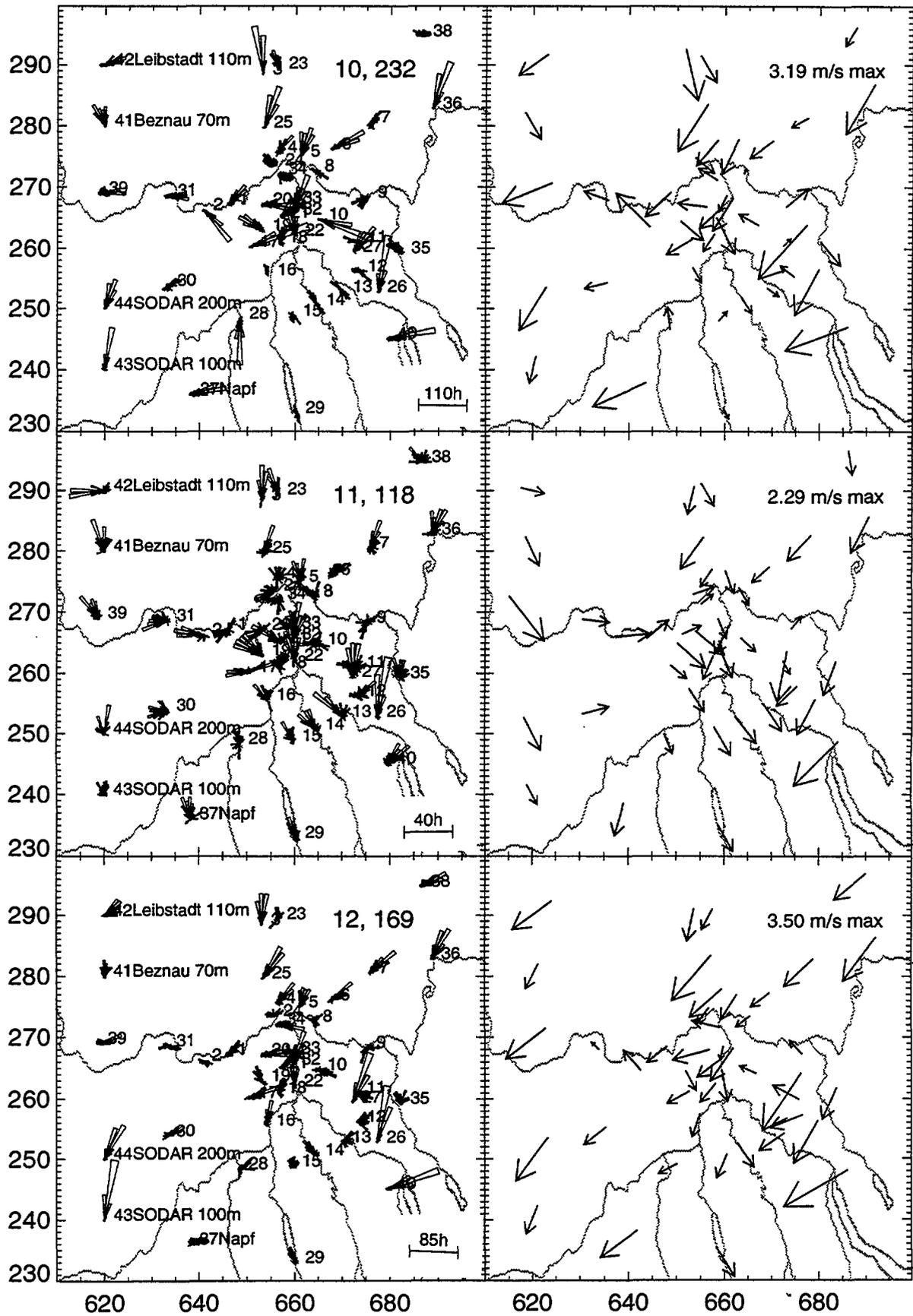
**Figur 6.** Häufigkeitsverteilungen und Klassenmittel nach Clusteranalyse in 15 Klassen und Umverteilung. Die Bezeichnungen entsprechen derjenigen von Figur 2.



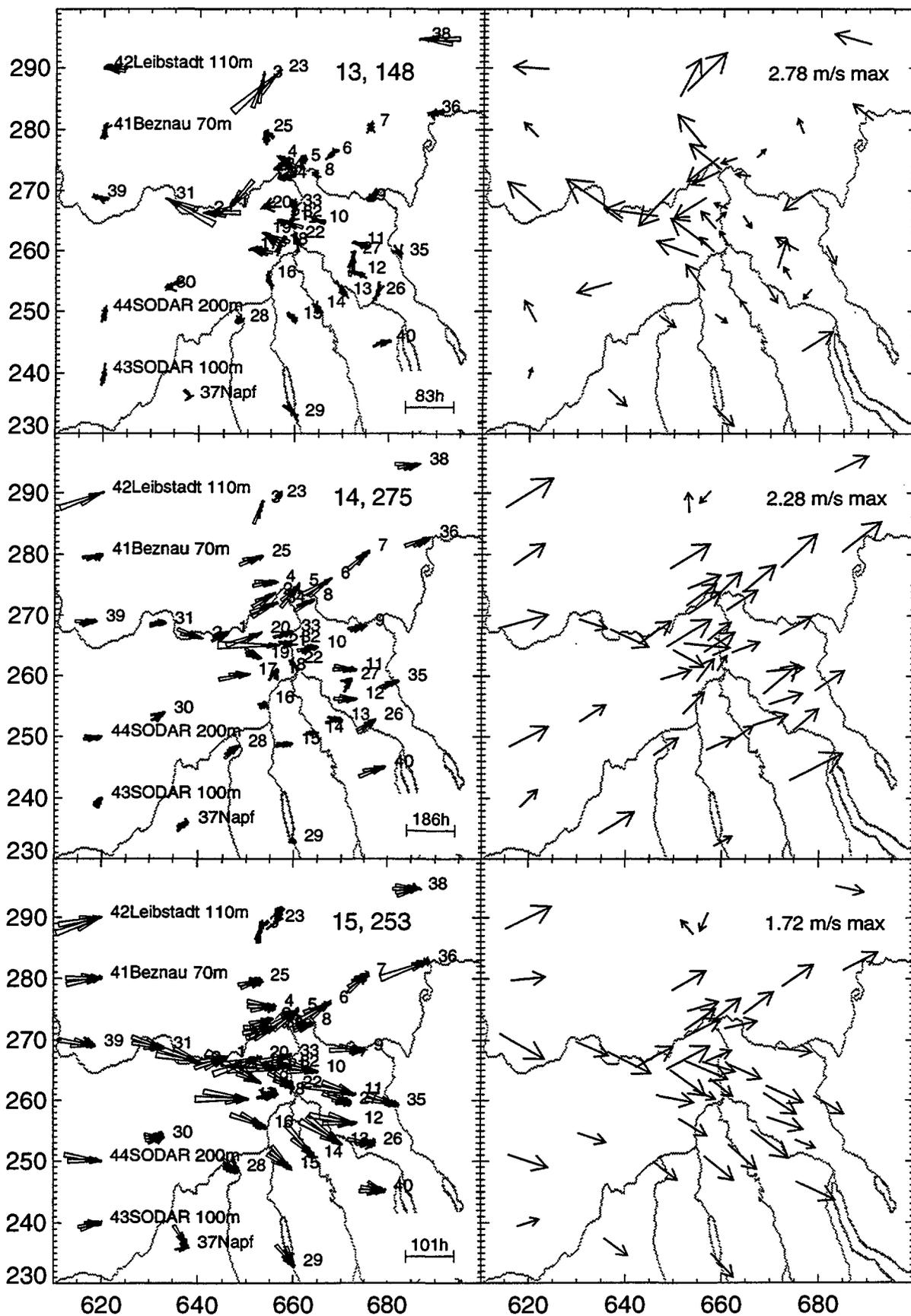
Fortsetzung der Figur 6.



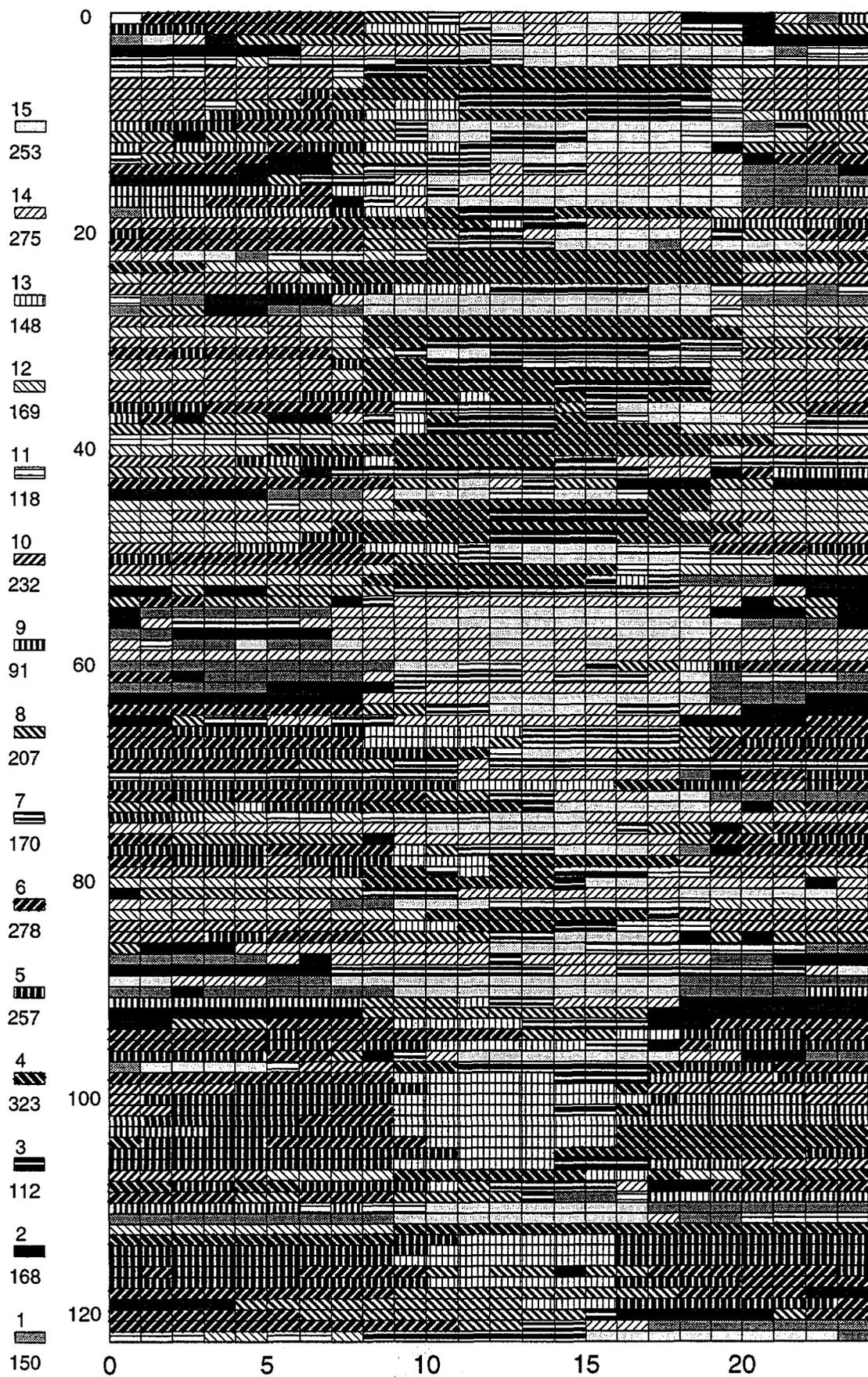
Fortsetzung der Figur 6.



Fortsetzung der Figur 6.



Fortsetzung der Figur 6.



Figur 7. Wie Figur 4, jedoch für eine Anzahl von 15 Klassen

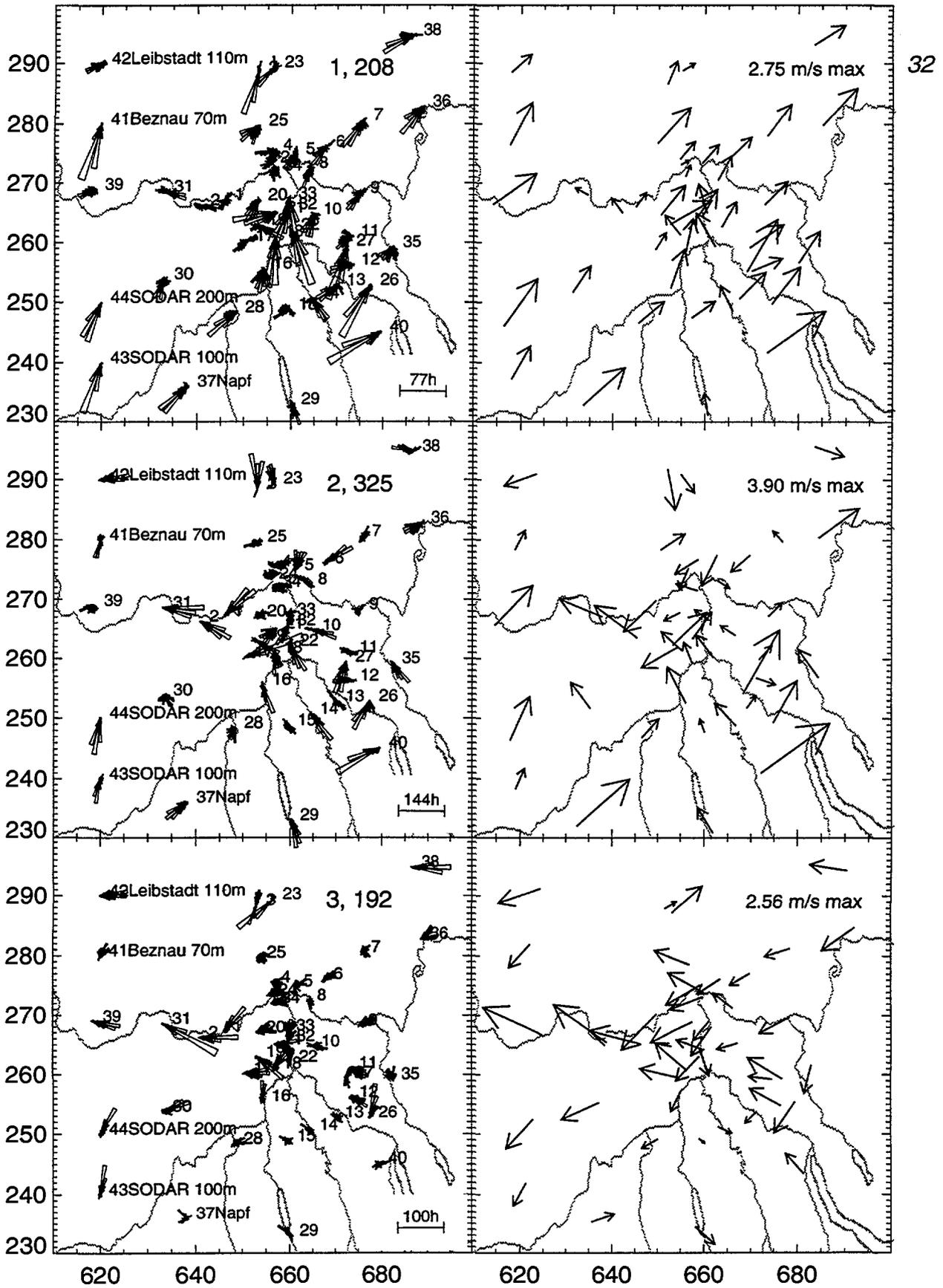
Es zeigt sich, dass die Klassen 4 bis 15, ausgenommen die Anzahl ihrer Mitglieder, ähnlich zu entsprechenden Klassen der 13er Klassierung sind. Die Klassen 1 und 2 bedeuten eine Aufspaltung der früheren Klasse 8, wohingegen die Klasse 3 eine Neubildung darstellt und kaum eine Ähnlichkeit mit Klassen der vorgängigen Klassifizierung aufweist, aber auch eine geringe Anzahl von Mitgliedern besitzt. Die Klassenaufspaltung in Klasse 1 und 2 erweist sich als verzichtbar, da ihre Distanz gering ist, sodass die Beschränkung auf 13 Klassen keine Einbusse darstellt.

Eine Klassenzahl von 12 Klassen ergibt die in Figur 8, 9 und Tabelle 4 dargestellten Resultate.

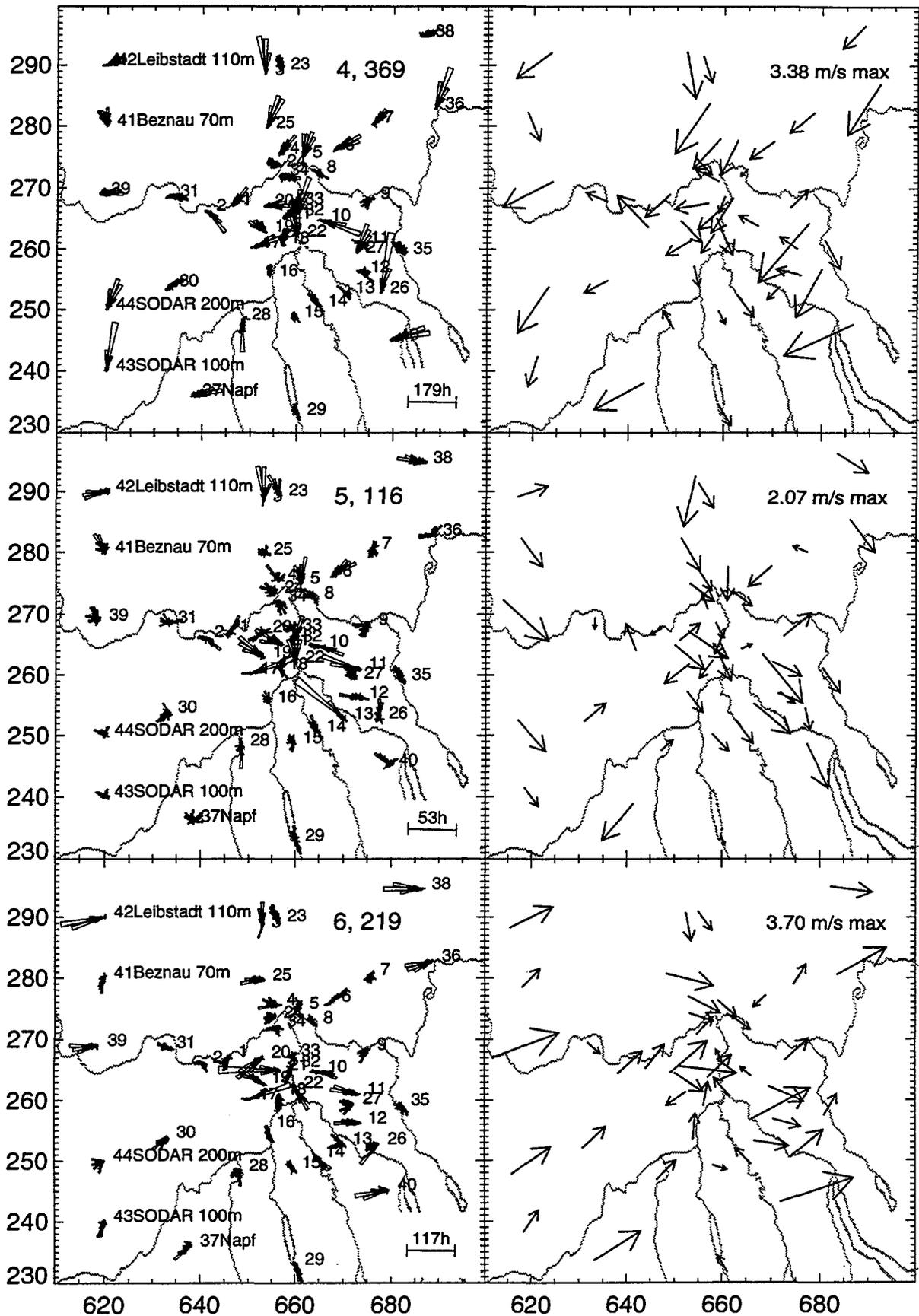
**Tabelle 4. Distanzmatrix für 12 Klassen nach der Umverteilung, Angabe in Prozenten der maximalen Klassendistanz von 1.733:**

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
1	208	0	39	81	89	64	37	75	44	70	91	34	55
2	325	39	0	64	73	61	44	76	37	43	76	60	74
3	192	81	64	0	48	63	85	45	46	34	34	89	87
4	369	89	73	48	0	44	83	45	76	46	41	93	85
5	116	64	61	63	44	0	47	42	68	52	60	59	47
6	219	37	44	85	83	47	0	70	58	70	90	32	44
7	156	75	76	45	45	42	70	0	67	62	39	70	59
8	141	44	37	46	76	68	58	67	0	48	68	59	72
9	310	70	43	34	46	52	70	62	48	0	54	80	82
10	304	91	76	34	41	60	90	39	68	54	0	99	93
11	314	34	60	89	93	59	32	70	59	80	99	0	26
12	297	55	74	87	85	47	44	59	72	82	93	26	0

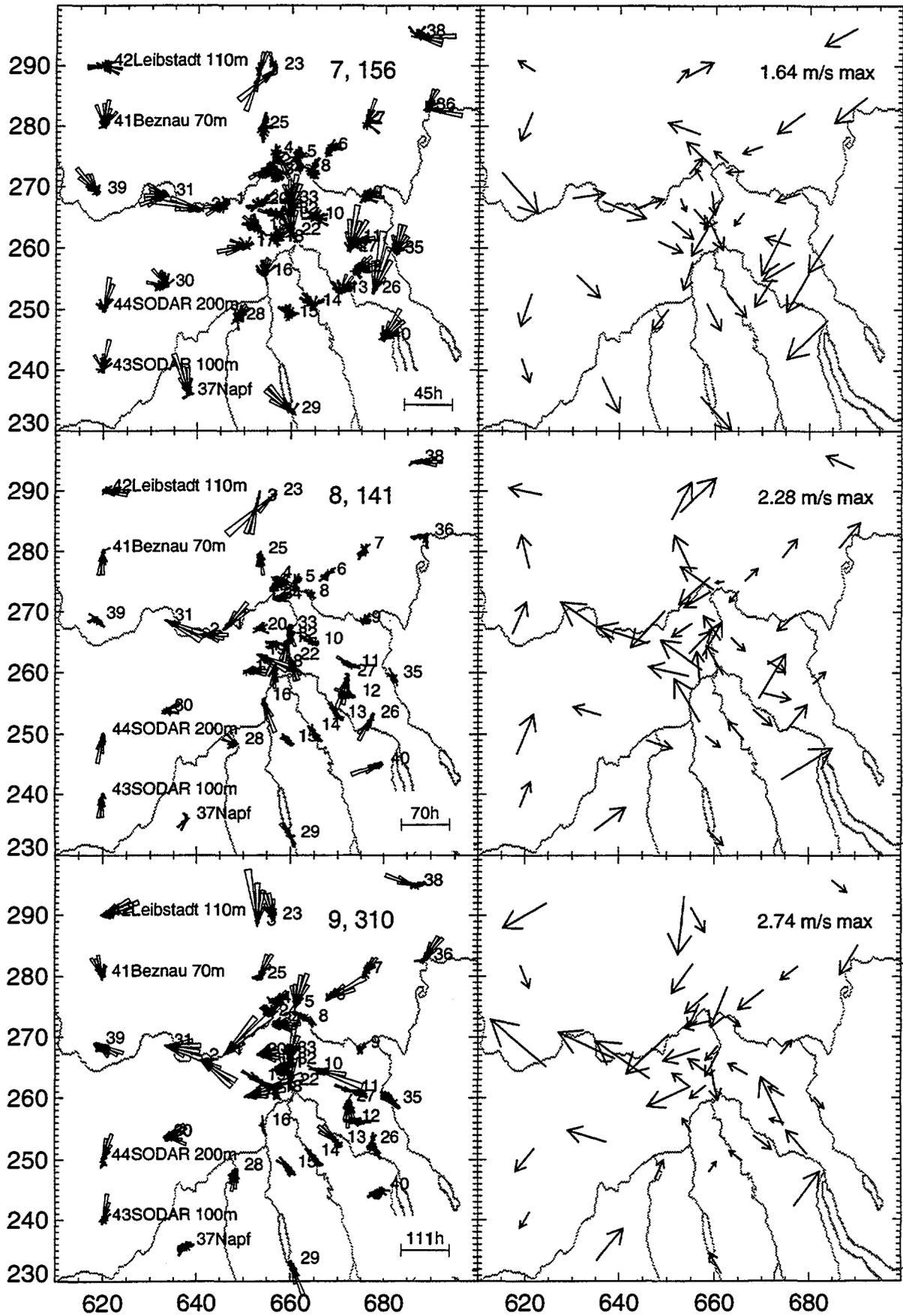
Wiederum sind die Klassen mit der Klassifizierung in 13 Klassen weitgehend identisch. Unterschiede ergeben sich allerdings bei der Klasse 9, die eine Verschmelzung der Klassen 1 und 2 der 13er-Klassenbildung darstellt. Hier fällt auf, dass die Reduktion von 13 auf 12 Klassen eine deutliche Einbusse der Qualität ergibt, da die Distanz von Klasse 1 zu Klasse 2 der 13er-Klassenbildung in der Tabelle 1.b) diese Aufteilung durchaus sinnvoll erscheinen lässt. Ebenfalls untersucht, hier aber nicht dargestellt, wurde eine Klassenbildung mit 10 Klassen, die das Resultat von vorhin bestätigt. Im folgenden wird daher nur noch auf die Klassenbildung mit 13 Klassen eingegangen.



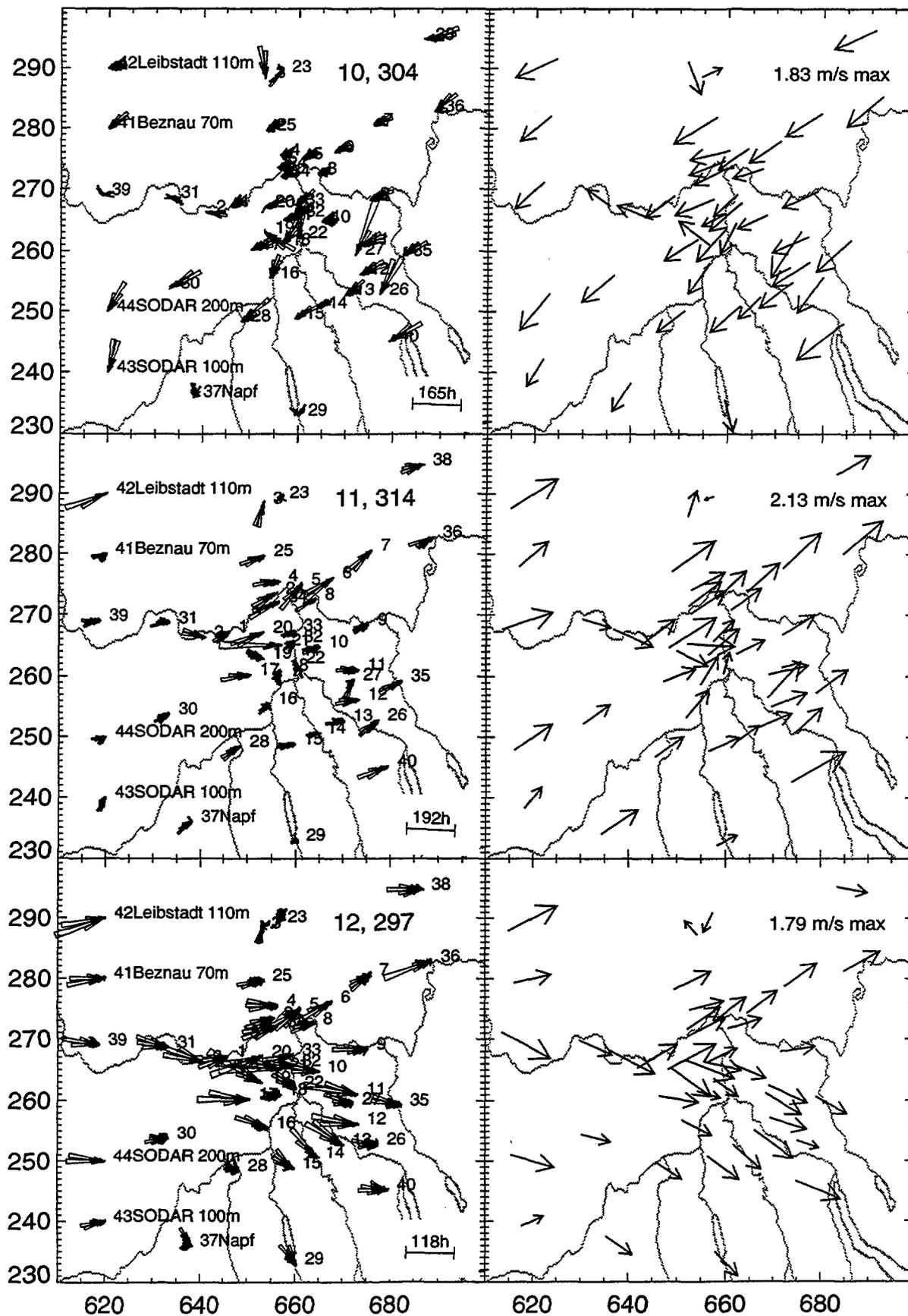
Figur 8. Häufigkeitsverteilungen und Klassenmittel nach Clusteranalyse in 12 Klassen und Umverteilung. Die Bezeichnungen entsprechen derjenigen von Figur 2.



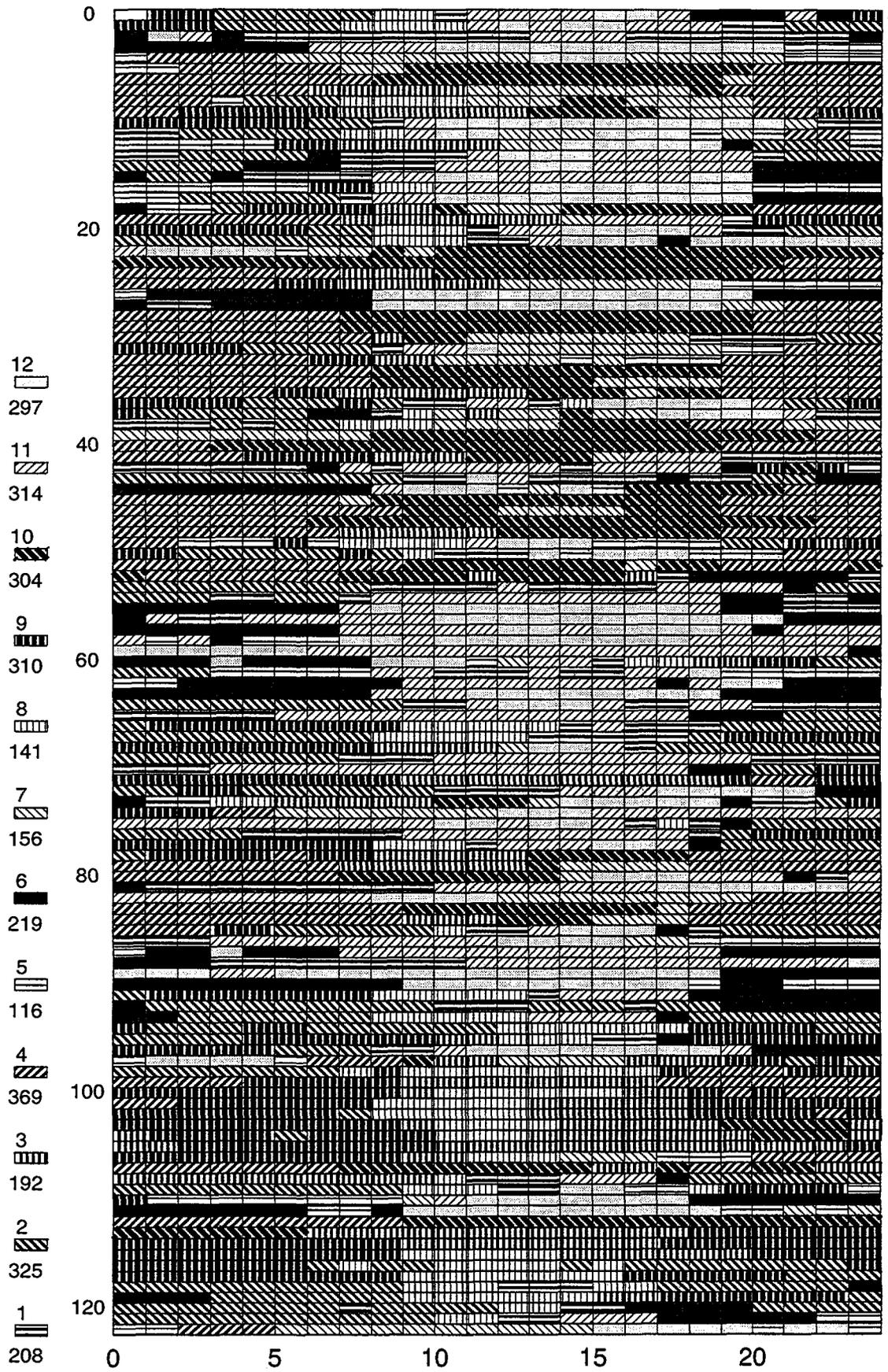
Fortsetzung der Figur 8.



Fortsetzung der Figur 8.



Fortsetzung der Figur 8.



Figur 9. Wie Figur 4, jedoch für eine Anzahl von 12 Klassen

## 4 Die Klassenidentifikation

### 4.1 Die Trefferquote

Nachdem die Klassen aufgrund der viermonatigen Messkampagne festliegen, soll für die Echtzeitdiagnose aus den stündlichen Messwerten einer möglichst geringen Anzahl repräsentativer Stationen die jeweils herrschende Windklasse bestimmt werden. Als Testdaten zur Erarbeitung der Trefferquote der gewählten Kriterien und Stationen dienen naheliegenderweise wiederum die Stundenwerte des Intensivexperiments. Zur Bestimmung der zur Stunde  $t$  herrschenden Klasse werden die Distanzen des aktuellen Stundenwertes zu allen 13 Klassen wie folgt bestimmt:

$$d_{tc} = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N [(u'_{tj} - u_{cj})^2 + (v'_{tj} - v_{cj})^2]^{1/2} \quad (6)$$

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. Das Minimum dieser 13 Werte bezeichnet die angesprochene Klasse. Bei diesen Testdaten ist die Trefferquote bei Auswahl aller Stationen klarerweise 100 %, sie nimmt jedoch, je nach Wahl der repräsentativen Standorte, ab, sodass diese Trefferquote ein ideales Mass für die Bewertung der Wahl der repräsentativen Stationen und auch der Klassifizierungsmethode selbst, einschliesslich der Beurteilung der Klassenschärfen, darstellt.

Als Beispiel seien die Stationen 1, 2, 17, 19, 20, 21 und ferner die Stationen von Nummer 26 bis Nummer 44 ausgewählt; ihre Trefferquoten sind in der Tabelle 5 aufgeführt.

**Tabelle 5. Anzahl der identifizierten Klassen (horizontal) bei der echten Klasse (vertikal) aufgrund der Stationen 1,2,17,19,20,21 und 26 bis 44:**

		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
1	268	238	3	0	0	2	0	0	0	0	24	1	0	0
2	285	8	245	0	17	4	0	0	4	0	7	0	0	0
3	177	0	0	150	12	0	0	0	4	2	1	0	5	3
4	218	0	18	10	177	0	0	0	9	0	4	0	0	0
5	104	3	1	0	0	94	4	1	0	1	0	0	0	0
6	361	1	0	0	0	3	347	0	0	6	0	4	0	0
7	135	0	0	0	0	1	0	117	2	2	0	0	6	7
8	183	0	0	3	5	0	0	4	165	0	0	0	6	0
9	162	0	0	1	0	0	2	0	0	153	0	4	0	2
10	164	4	4	0	0	5	0	0	0	1	135	15	0	0
11	363	12	0	0	0	1	5	0	0	12	7	326	0	0
12	284	0	0	6	0	0	0	4	11	1	0	0	239	23
13	247	0	0	0	0	0	0	2	0	4	0	0	14	227

Die horizontale Kopfzeile der Tabelle bezeichnet die aufgrund der obigen minimalen Distanzforderung und der Beschränkung auf die repräsentativen Stationen identifizierten Klassen, die linke Spalte gibt die echten Klassen an. Die Diagonale der Matrix stellt die Treffer dar, die Trefferquote ist definiert als Verhältnis dieser Treffer zur Anzahl der Klassenmitglieder, die in der 2. Spalte von links ausgewiesen sind. So weist die Klasse 1 zum Beispiel 238 Treffer bei 268 Mitgliedern, also eine Trefferquote von 89 %, auf. Andererseits werden 24 Stunden fälschlicherweise als Klasse 10 identifiziert. Die Gesamtheit der Fehlidentifikationen gibt ein Mass für die Fehler, mit den Treffern zusammen ergibt sich die Anzahl der Mitglieder der betreffenden Klasse. Den Treffer ausgenommen, ergibt die Summe einer Kolonne die Anzahl derjenigen Stunden, die als nicht der echten Klasse zugehörig identifiziert wurden.

Bei der Beurteilung der Fehlidentifikationen muss allerdings berücksichtigt werden, wie stark sich dieser Fehler auf das diagnostizierte Windfeld auswirkt. Je weniger die echte Klasse von der fehlidentifizierten Klasse abweicht, umso geringer wirkt sich die Fehlidentifikation aus, das heisst, die Fehlerquote muss mit der entsprechenden Distanz von Klasse zu Klasse gewichtet werden.

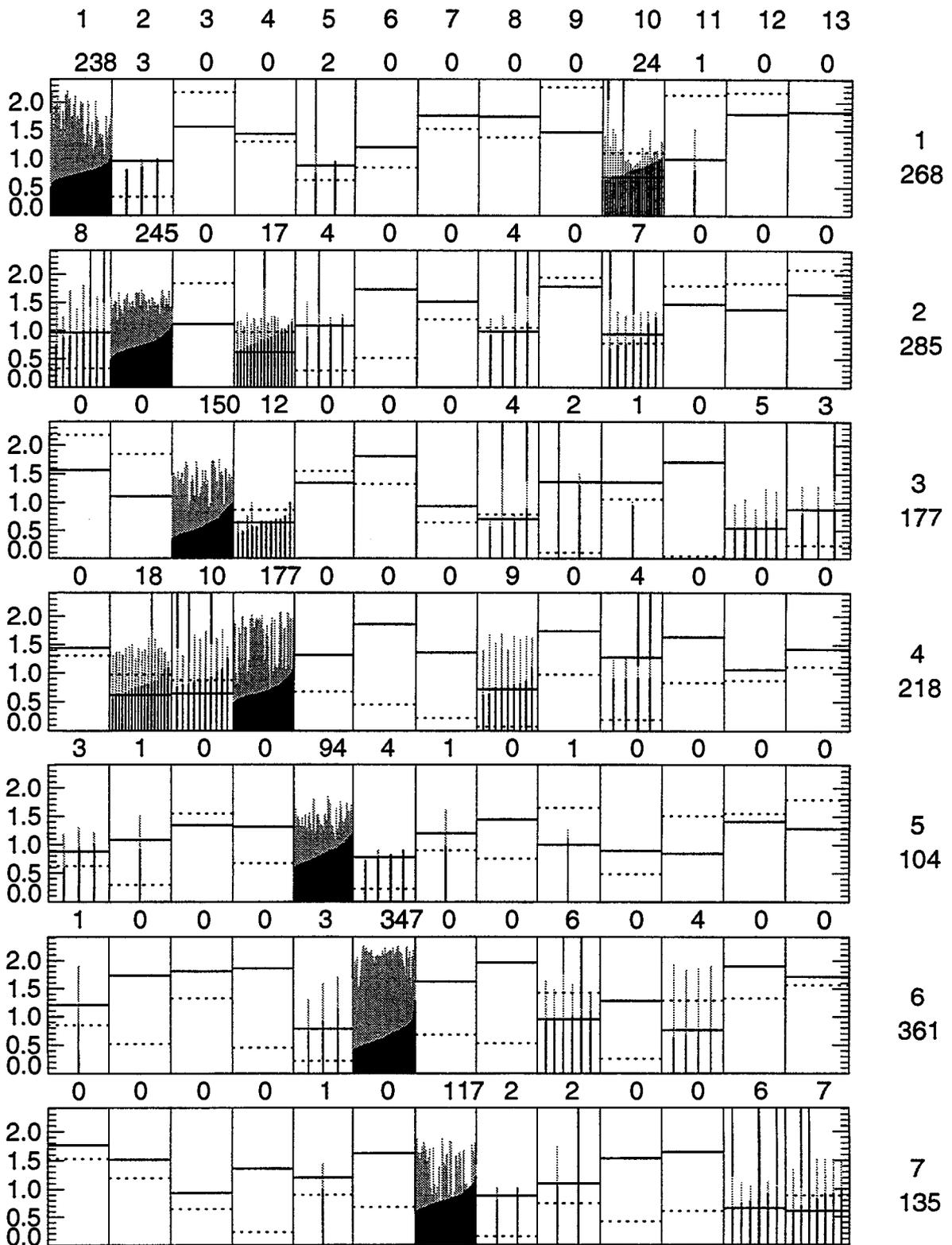
Eine kompakte Darstellung der Tabelle 5 ist in Tabelle 6 gegeben, die nunmehr die Zahl der identifizierten Klassen in Prozent der jeweiligen Klassenmitgliederzahl angibt. Durch einen Schrägstrich getrennt ist zudem die Distanz von Klasse zu Klasse in Prodezen (pro zehn, in Anlehnung an Prozent) zur maximalen Klassen-Klassen-Distanz angegeben. Letzteres stellt somit eine Benotung oder Güteansprache der Identifikation dar. In Tabelle 6 fällt auf, dass die Fehler im wesentlichen nur bei geringen Klassen-Klassen-Distanzen auftreten, die Auswirkung auf das diagnostizierte Windfeld hält sich demnach in Grenzen.

**Tabelle 6. Darstellung wie in Figur 5, jedoch ist die Anzahl der identifizierten Klassen in Prozent der Anzahl der Klassenmitglieder (2. Zeile von links) angegeben, durch getrennt ist ferner die Distanz von Klasse zu Klassen in Prodezen der maximalen Distanz aufgelistet.**

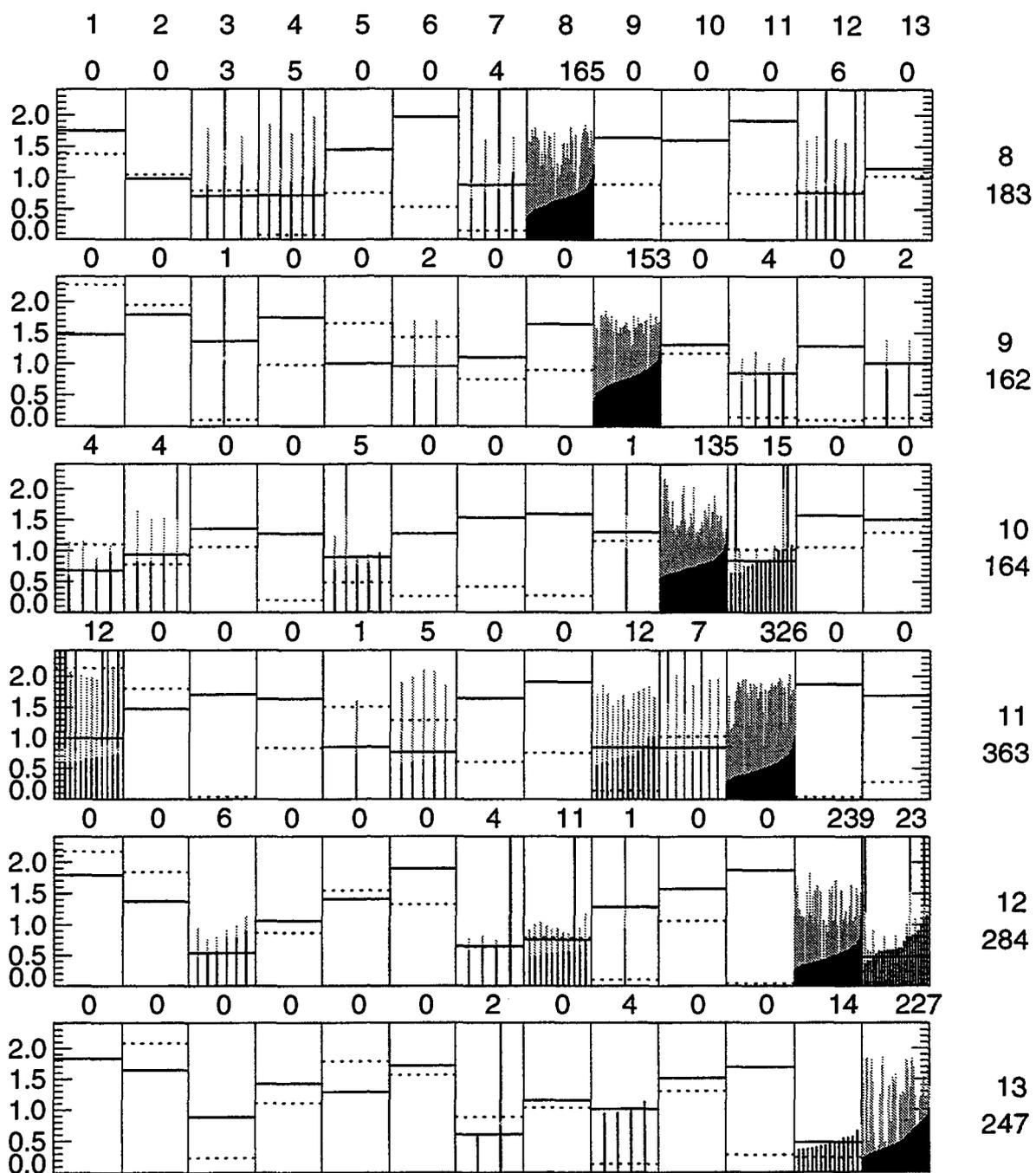
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
1 268	89/0	1/4	0/7	0/7	1/4	0/6	0/8	0/8	0/7	9/3	0/5	0/9	0/9
2 285	3/4	86/0	0/5	6/3	1/5	0/8	0/7	1/5	0/9	2/4	0/7	0/6	0/8
3 177	0/7	0/5	85/0	7/3	0/6	0/9	0/4	2/3	1/6	1/6	0/8	3/2	2/4
4 218	0/7	8/3	5/3	81/0	0/6	0/9	0/6	4/3	0/8	2/6	0/8	0/5	0/7
5 104	3/4	1/5	0/6	0/6	90/0	4/3	1/6	0/7	1/5	0/4	0/4	0/7	0/6
6 361	0/6	0/8	0/9	0/9	1/3	96/0	0/8	0/9	2/4	0/6	1/3	0/9	0/8
7 135	0/8	0/7	0/4	0/6	1/6	0/8	87/0	1/4	1/5	0/7	0/8	4/3	5/3
8 183	0/8	0/5	2/3	3/3	0/7	0/9	2/4	90/0	0/8	0/8	0/9	3/3	0/5
9 162	0/7	0/9	1/6	0/8	0/5	1/4	0/5	0/8	94/0	0/6	2/4	0/6	1/5
10 164	2/3	2/4	0/6	0/6	3/4	0/6	0/7	0/8	1/6	82/0	9/4	0/8	0/7
11 363	3/5	0/7	0/8	0/8	0/4	1/3	0/8	0/9	3/4	2/4	90/0	0/9	0/8
12 284	0/9	0/6	2/2	0/5	0/7	0/9	1/3	4/3	0/6	0/8	0/9	84/0	8/2
13 247	0/9	0/8	0/4	0/7	0/6	0/8	1/3	0/5	2/5	0/7	0/8	6/2	92/0

Als Beispiel sei die Angabe 9/3 der ersten Zeile und zehnten Kolonne herausgegriffen: Anstelle der echten Klasse 1 wird fälschlicherweise in 9 % der 268 Stundenwerte die Klasse 10 identifiziert. Auf der gleichen Zeile in der ersten Kolonne bedeutet die Angabe 89/0, dass in 89 % der 268 Stundenwerte die Klasse 1 identifiziert wird. Diese Angabe zeigt die Trefferquote für die Klasse 1 an. Die Qualität der Identifikation einer Einzelstunde misst sich auch wesentlich an dem absoluten Minimum der 13 Distanzen gegenüber den Klassen, was ja die Bestimmungsgrundlage der Identifikation darstellt. Zudem ist der Unterschied dieses Minimums im Vergleich zum zweitkleinsten Wert von Interesse, da ein geringer Unterschied die Chancen einer Fehlidentifikation anzeigt. In Figur 10 sind diese Zusammenhänge dargestellt: Wiederum weist die horizontale Zeile die identifizierten Klassen auf, unter der Klassennummer ist jeweils noch die Zahl der Klassenmitglieder aufgeführt. Die rechte Kolonne spricht die echten Klassen an. Jeder Platz der so gebildeten 13x13-Matrix trägt in einer Kopfzeile die Zahl der Identifikationen und als ausgezogene *vertikale* Linien die zugehörigen Minimaldistanzen entsprechend der Skala in der linken Kolonne; horizontal sind diese vertikalen Linien in aufsteigender Reihenfolge gleichmässig auf die Kastenbreite verteilt, um einen raschen optischen Überblick über die Anzahl der identifizierten Stundenwerte zu geben. Als gepunktete Fortsetzung der ausgezogenen vertikalen Linien sind ferner die zweitkleinsten Distanzen aufgezeichnet. Die "robusten" Identifikationen zeichnen sich durch einen möglichst grossen Unterschied zwischen erst- und zweitkleinster Distanz aus. Im Falle der Fehlidentifikationen wurden ferner jene Distanzen zusätzlich über der gepunkteten Linie noch mit einer ausgezogenen vertikalen Linie markiert, wenn auch die zweitkleinste Distanz nicht die echte Klasse bezeichnet, was aber nur noch bei wenigen Ausreissern der Fall ist.

Zwei Resultate lassen sich leicht aus der Figur 10 ableiten: 1. ist der Unterschied zwischen erst- und zweitkleinster Distanz bei Fehlidentifikationen meist gering und 2. ist die zweitkleinste Distanz bei Fehlidentifikationen meist ein Treffer, wie die wenigen bis zum oberen Rand reichenden Linien in den Kästen mit Fehlidentifikationen belegen. Leider lässt sich dieser Umstand für die Echtzeit-Diagnose nicht nutzen. Die Figur 10 enthält zusätzlich in jedem Kästchen als *horizontal ausgezogene* Linie noch den Klassen-Klassen-Unterschied, wonach sich die Fehlidentifikation im oben besprochenen Sinn bewerten lässt. Die *horizontal strichlierte* Linie gibt den Klassen-Klassen-Unterschied des mittleren Temperaturgradienten (in 10 Grad Einheiten bezüglich der Abszisse) zwischen den Stationen Kloten (35) und Uetliberg (40) an, wie im anschliessenden Abschnitt dargestellt wird.



Figur 10. Graphische Darstellung der Tabelle 6, Erklärung siehe Text.



Fortsetzung der Figur 10.

## 4.2 Berücksichtigung des vertikalen Temperaturgradienten

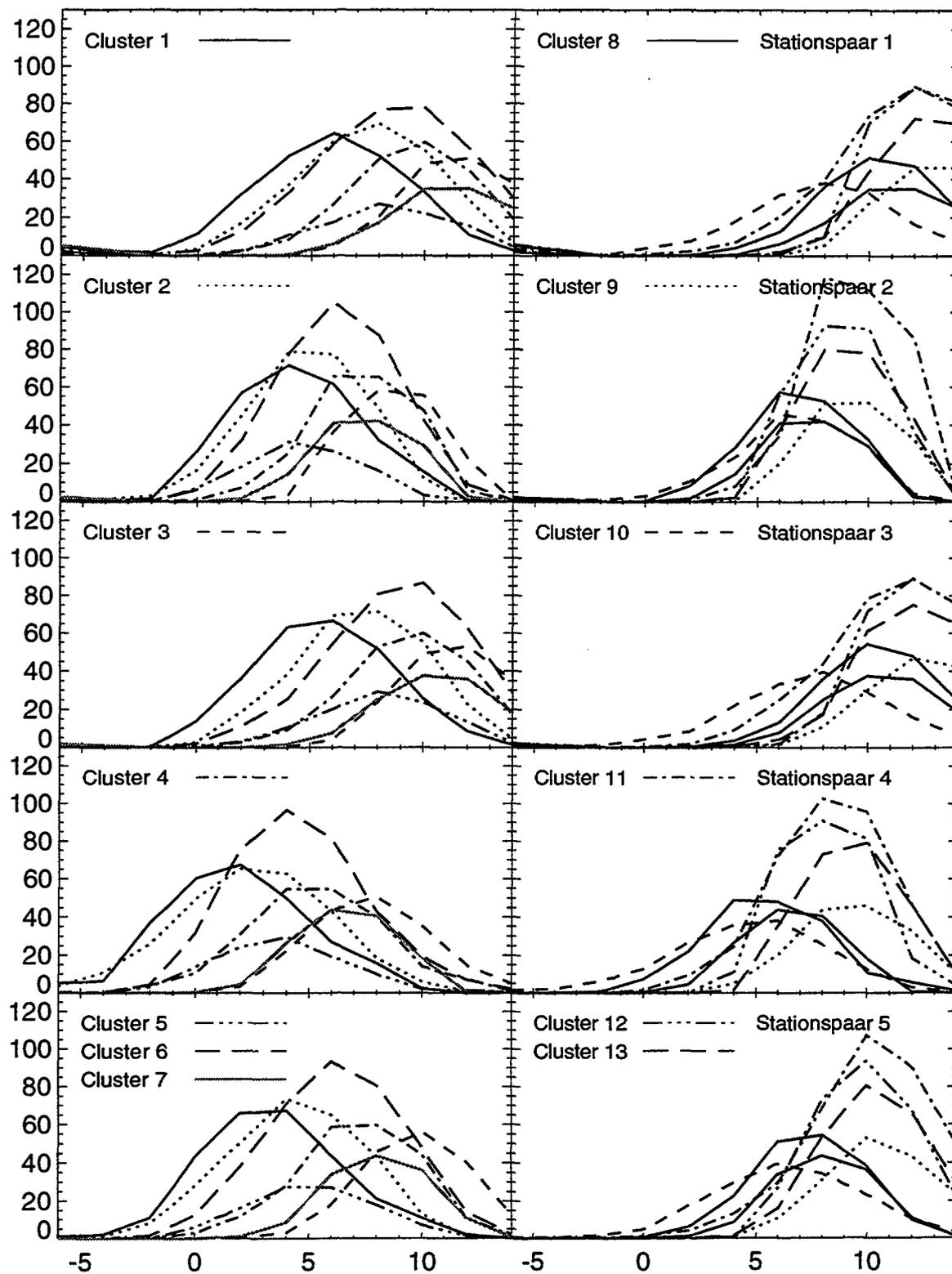
Die Tatsache der unterschiedlichen Tag- und Nachtregimes, wie sie in der Zeitreihendarstellung der Figur 4 ersichtlich ist, lässt hoffen, dass eine Berücksichtigung der vertikalen Temperaturgradienten eine Erhöhung der Trefferquote erbringt, da sowohl diese Temperaturgradienten als auch die unterschiedlichen Windregimes im Tag-Nacht-Vergleich ein Indiz für die Bildung einer Inversion sein können. Allerdings ist die Verteilung der Temperaturdifferenzen über die Klassen relativ breit, wie in Figur 11 dargestellt. Diese Figur basiert auf den Temperaturdifferenzen der folgenden Stationenpaare:

1. Temperatur in Buchs (Station 28) minus Temperatur auf dem Napf (Station 37)
2. PSI (32) - Laegern (27)
3. PSI (32) - Napf (37)
4. PSI (32) - St. Chrischona (39)
5. PSI (32) - Uetliberg (40)
6. Kloten (35) - Uetliberg (40)
7. Kloten (35) - Laegern (27)
8. Sisseln (2) - St. Chrischona (39)
9. Schleinikon (11) - Laegern (27)
10. PSI(22) - Geissberg (21)

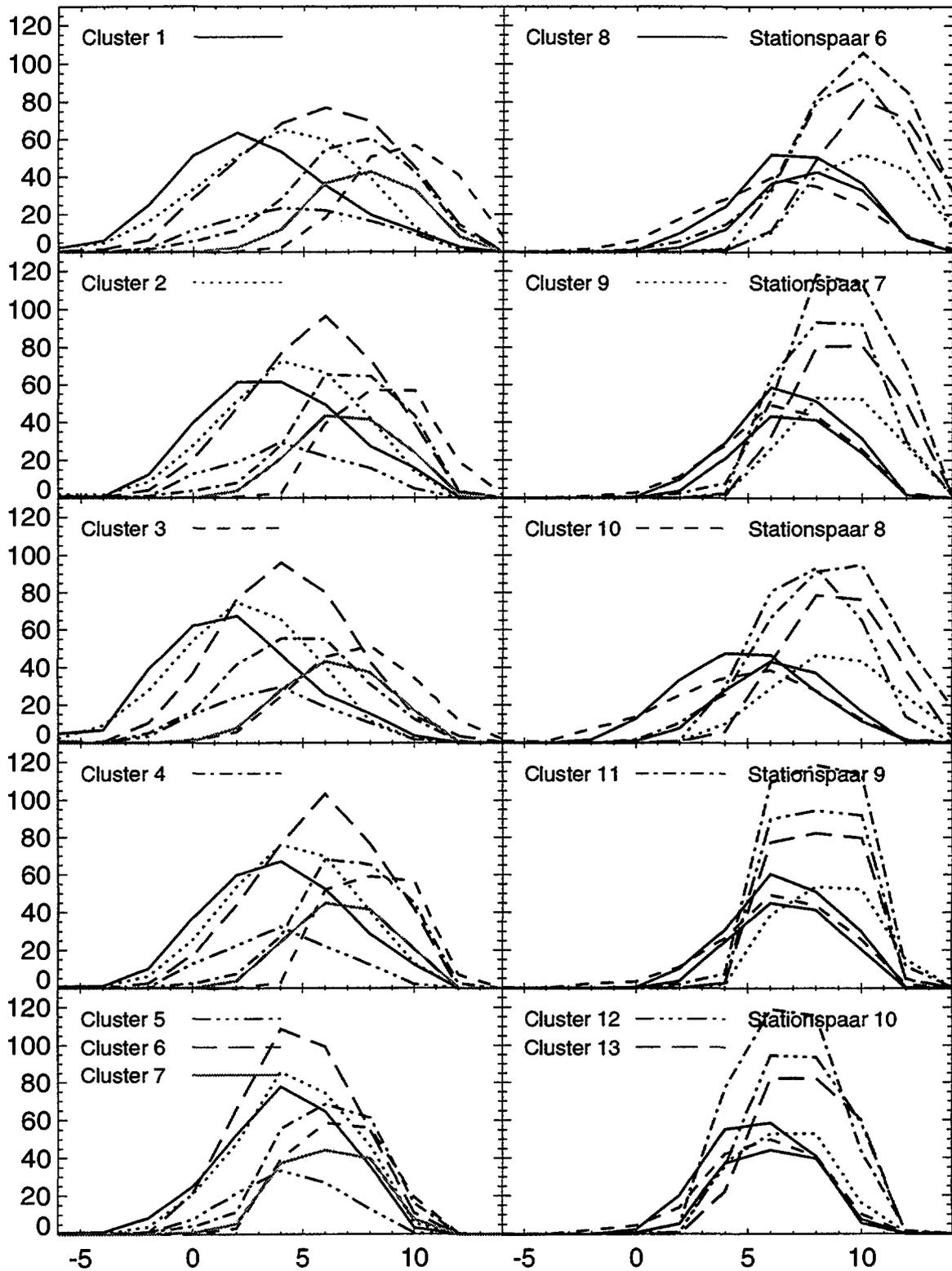
Die Figur 11 zeigt für die 3., 5., und 7. Temperaturdifferenz eine vernünftige Klassenselektivität, die restlichen Temperaturdifferenzen sind zu breit und unscharf verteilt, um eine substantielle Verbesserung der Trefferquote zu erbringen. Die Beurteilung der Erhöhung der Trefferquote erfolgt aufgrund der erweiterten Distanz, die wie folgt definiert ist:

$$d_{tc} = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N [(u'_{tj} - u_{cj})^2 + (v'_{tj} - v_{cj})^2]^{1/2} + 0.025 \frac{1}{N_T} \sum_{i=1}^{N_T} [(\Delta T_{ti} - \Delta T_{ci})^2]^{1/2} \quad (7)$$

Darin bedeutet  $N_T$  die Anzahl der berücksichtigten Temperaturdifferenzen und  $\Delta T_{ti}$  die Temperaturdifferenz zwischen den Stationspaaren gemäss obiger Zusammenstellung zur Zeit  $t$ . Weiter ist  $\Delta T_{ci}$  die Temperaturdifferenz im Mittel über die Klasse  $c$ , ebenfalls zwischen den Stationen gemäss obiger Aufstellung bestimmt. Der Faktor 0.025 wurde aufgrund einer Untersuchung mit Faktoren von 0.01 bis 0.1 in Inkrementen von 0.005 ermittelt, um eine ausgewogene Gewichtung der Temperaturdifferenz gegenüber der Windkomponentendistanz zu erzielen.



**Figur 11.** Verteilung der Temperaturdifferenzen (-6 bis +14 Grad auf der Abszisse) der Stationspaare 1 bis 5 über die 13 Klassen, die Häufigkeit in Stunden ist aus der Ordinate ersichtlich. Die Klassen (Cluster) sind in allen Teilfiguren mit dem selben Linientyp gekennzeichnet.



Fortsetzung der Figur 11.

Die folgenden Tabellen stellen die selben Bewertungskriterien dar, wie die in Tabelle 6 gegebenen. Zunächst wurden die minimalen Distanzen nach der Definition von Gleichung (7) für die 5 Temperaturdifferenzen der Stationspaare 2,4,6,7 und 8 bestimmt:

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
1 268	90/0	1/4	0/7	0/7	1/4	0/6	0/8	0/8	0/7	6/3	1/5	0/9	0/9
2 285	2/4	87/0	0/5	6/3	1/5	0/8	0/7	1/5	0/9	3/4	0/7	0/6	0/8
3 177	0/7	0/5	86/0	6/3	0/6	0/9	0/4	1/3	1/6	0/6	0/8	3/2	2/4
4 218	0/7	6/3	6/3	82/0	0/6	0/9	0/6	6/3	0/8	1/6	0/8	0/5	0/7
5 104	4/4	1/5	1/6	0/6	89/0	4/3	0/6	0/7	1/5	0/4	0/4	0/7	0/6
6 361	1/6	0/8	0/9	0/9	1/3	94/0	0/8	0/9	2/4	0/6	2/3	0/9	0/8
7 135	0/8	0/7	0/4	0/6	0/6	0/8	89/0	1/4	1/5	0/7	0/8	3/3	5/3
8 183	0/8	1/5	3/3	2/3	0/7	0/9	2/4	88/0	0/8	0/8	0/9	4/3	0/5
9 162	0/7	0/9	1/6	0/8	0/5	1/4	0/5	0/8	95/0	0/6	2/4	0/6	1/5
10 164	2/3	1/4	1/6	0/6	2/4	1/6	0/7	0/8	1/6	84/0	9/4	0/8	0/7
11 363	3/5	0/7	0/8	0/8	1/4	1/3	0/8	0/9	3/4	1/4	90/0	0/9	0/8
12 284	0/9	0/6	2/2	0/5	0/7	0/9	2/3	3/3	0/6	0/8	0/9	86/0	7/2
13 247	0/9	0/8	0/4	0/7	0/6	0/8	2/3	0/5	2/5	0/7	0/8	5/2	91/0

Das Resultat für nur eine Temperaturdifferenz  $N_T=1$  (Stationspaar Nummer 6) lautet:

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
1 268	90/0	2/4	0/7	0/7	1/4	0/6	0/8	0/8	0/7	6/3	1/5	0/9	0/9
2 285	2/4	86/0	0/5	6/3	1/5	0/8	0/7	1/5	0/9	3/4	0/7	0/6	0/8
3 177	0/7	0/5	86/0	6/3	0/6	0/9	0/4	2/3	1/6	0/6	0/8	3/2	2/4
4 218	0/7	7/3	5/3	82/0	0/6	0/9	0/6	5/3	0/8	1/6	0/8	0/5	0/7
5 104	5/4	1/5	1/6	0/6	87/0	5/3	1/6	0/7	1/5	0/4	0/4	0/7	0/6
6 361	1/6	0/8	0/9	0/9	1/3	93/0	0/8	0/9	2/4	0/6	2/3	0/9	0/8
7 135	0/8	0/7	0/4	0/6	0/6	0/8	87/0	1/4	1/5	0/7	0/8	6/3	4/3
8 183	0/8	1/5	2/3	1/3	0/7	0/9	2/4	90/0	0/8	0/8	0/9	4/3	0/5
9 162	0/7	0/9	1/6	0/8	0/5	1/4	0/5	0/8	95/0	0/6	2/4	0/6	1/5
10 164	3/3	1/4	1/6	0/6	2/4	1/6	0/7	0/8	1/6	82/0	9/4	0/8	0/7
11 363	3/5	0/7	0/8	0/8	1/4	1/3	0/8	0/9	3/4	2/4	89/0	0/9	0/8
12 284	0/9	0/6	2/2	0/5	0/7	0/9	1/3	4/3	0/6	0/8	0/9	85/0	7/2
13 247	0/9	0/8	0/4	0/7	0/6	0/8	3/3	0/5	2/5	0/7	0/8	5/2	90/0

Aus dem Vergleich beider Tabellen ergibt sich eindeutig, dass die Berücksichtigung nur einer Temperaturdifferenz (derjenigen des Stationenpaares 6) genügt. Diese beiden Stationen, Kloten (35) und Uetliberg (40), liegen 484 Höhenmeter auseinander und zeigen lokale Inversionen in den Tälern des Untersuchungsgebietes gut an. Vergleicht man die letzte Tabelle mit Tabelle 6, der Rechnung ohne Temperaturgradienten, so zeigt sich, dass die Berücksichtigung dieses einen Gradienten doch zu einer substantiellen Verbesserung der Trefferquote führt.

## 5 Die Wahl der repräsentativen Standorte

Zur Gewinnung von Kriterien zur Wahl einer möglichst begrenzten Zahl repräsentativer Stationen wird einerseits die meteorologische Intuition herangezogen. Andererseits ist zu erwarten, dass die Berücksichtigung jener Stationen, die eine möglichst geringe Varianz der Windrichtungshäufigkeiten für die Klassenmittelwerte aufweisen, zum Erfolg führen. Das letztere Kriterium ist in der Tabelle 7 zusammengestellt, indem für jede Station und jede Klasse eine visuell erzielte Benotung der Schärfe der Windrichtung vorgenommen wurde: Die Varianzen der Windrichtungshäufigkeiten der Figur 3 (nach der Umverteilung) wurde mit 1 (gut), 2 (mittel) oder 3 (schlecht) charakterisiert und jene Stationen, die bei entsprechenden Klassen bereits vor der Umverteilung, also aufgrund der Figur 2, eine geringe Varianz aufweisen, tragen die Bewertung 0. Durch Summation über eine Kolonne entstand so eine Rangordnung (letzte Zeile) für die Stationen über jeweils sämtliche Klassen.

**Tabelle 7.a) Benotung der Stationen 1 bis 22 aufgrund der Streuung der Windrichtung für die 13 Klassen (Zeilen)**

Station	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22
1	0	0	2	2	2	2	2	3	1	2	2	2	3	3	3	3	0	3	0	1	1	3
2	0	0	1	2	1	1	2	3	1	0	3	3	2	2	2	3	0	2	2	1	2	3
3	3	1	2	3	1	1	1	1	1	2	2	2	3	3	3	2	3	1	0	1	1	1
4	0	1	3	1	1	2	3	2	3	3	3	2	3	1	3	0	0	2	1	2	1	2
5	0	1	1	2	1	1	2	3	3	2	3	2	0	1	3	3	0	1	0	0	1	1
6	1	0	0	1	1	0	1	1	2	0	1	3	3	2	3	3	0	1	1	1	1	1
7	1	1	1	3	1	0	3	2	2	1	1	2	1	3	3	3	0	1	1	3	1	2
8	3	3	3	2	3	3	2	3	2	3	0	0	2	1	3	2	1	1	1	1	0	1
9	3	3	2	2	1	2	2	3	3	3	3	3	1	3	2	3	2	2	1	1	1	3
10	0	0	0	1	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	1	1	0	1	2	3	2
11	2	1	1	2	2	2	2	2	1	2	2	1	2	2	1	1	2	0	0	1	2	1
12	2	0	1	1	0	0	0	1	2	2	2	0	1	2	1	1	2	1	2	0	0	2
13	2	0	2	1	1	1	2	1	1	1	0	0	1	1	2	1	1	2	0	0	0	2
Total	21	11	23	25	20	20	29	30	27	26	25	23	27	29	36	28	14	21	10	14	14	28

**Tabelle 7.b) Benotung der Stationen 23 bis 44 aufgrund der Streuung der Windrichtung für die 13 Klassen (Fortsetzung von Tabelle 7)**

Station	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44
1	3	2	1	2	2	3	2	0	0	2	2	1	2	2	1	3	0	2	2	0	1	2
2	1	2	3	2	0	1	0	1	0	1	3	1	3	3	0	3	2	0	2	0	2	3
3	2	3	1	1	2	1	0	2	1	0	1	3	2	1	1	1	1	0	0	3	1	1
4	3	2	3	0	0	2	2	2	0	1	3	2	1	1	0	3	2	0	1	0	2	0
5	1	3	2	3	3	2	1	3	1	0	2	2	1	1	2	3	2	3	2	0	1	1
6	2	2	1	0	0	1	2	2	1	0	3	2	2	0	1	3	1	0	2	1	0	1
7	1	2	2	3	2	1	1	2	0	3	3	2	2	2	2	1	0	1	3	3	3	3
8	3	3	1	1	2	2	0	2	3	1	2	3	3	0	0	0	0	0	1	1	1	2
9	3	1	1	0	0	3	1	3	2	3	1	1	2	1	3	3	3	0	1	3	1	1
10	0	2	1	3	0	3	3	2	0	3	3	2	3	3	3	0	3	1	2	1	1	2
11	2	2	0	0	1	1	3	0	2	1	1	2	2	2	2	1	3	0	0	0	1	0
12	3	0	1	1	2	1	3	2	2	3	3	0	1	2	1	1	0	0	2	0	1	2
13	3	1	1	2	1	3	1	1	0	1	0	0	2	0	3	1	1	1	1	0	2	0
Total	33	27	20	22	17	30	21	24	12	21	27	21	30	18	25	25	20	10	21	12	21	18

Im Hinblick auf das Ziel der Echtzeitdiagnose der herrschenden Klasse muss insbesondere sorgfältig erwogen werden, welche der nicht routinemässig betriebenen Stationen unabdingbar notwendig sind, da diese erst wieder installiert und mit einer direkten Datenleitung über Modem versehen werden müssten. Sicher sollen aber alle auf längere Zeit operationell arbeitenden Systeme herangezogen werden. Im folgenden werden also schrittweise jeweils einige Stationen weggelassen und die Treffer- bzw. Fehlerquoten evaluiert. Die Evaluationstabellen entsprechen in ihrer Art jener der Tabelle 6.

#### Weglassen der Stationen 4,3 und 23:

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
1 268	95/0	0/4	0/7	0/6	1/3	0/4	0/7	0/7	0/6	3/3	1/4	0/8	0/8
2 285	0/4	92/0	0/5	4/2	0/4	0/7	0/6	1/4	0/7	2/4	0/7	0/6	0/7
3 177	0/7	0/5	96/0	1/3	0/7	0/9	0/4	2/3	0/7	0/6	0/9	1/2	1/4
4 218	0/6	8/2	3/3	86/0	0/6	0/8	0/5	2/3	0/7	0/5	0/8	0/5	0/6
5 104	4/3	1/4	0/7	0/6	92/0	2/3	0/5	0/6	1/4	0/4	0/4	0/7	0/6
6 361	1/4	0/7	0/9	0/8	1/3	93/0	0/7	0/8	2/4	0/5	3/4	0/9	0/8
7 135	0/7	0/6	0/4	0/5	1/5	0/7	96/0	1/3	0/5	0/6	0/8	1/3	1/3
8 183	0/7	1/4	2/3	2/3	0/6	0/8	1/3	92/0	0/7	0/6	0/9	2/3	0/5
9 162	0/6	0/7	0/7	0/7	0/4	1/4	1/5	0/7	98/0	0/5	1/3	0/7	0/5
10 164	4/3	2/4	1/6	2/5	1/4	0/5	0/6	0/6	1/5	82/0	8/4	0/7	0/7
11 363	2/4	0/7	0/9	0/8	1/4	1/4	0/8	0/9	1/3	1/4	95/0	0/9	0/9
12 284	0/8	0/6	1/2	0/5	0/7	0/9	0/3	1/3	0/7	0/7	0/9	96/0	0/2
13 247	0/8	0/7	0/4	0/6	0/6	0/8	1/3	0/5	0/5	0/7	0/9	2/2	97/0

**Zusätzlich Weglassen der Stationen 24,25,43,44,16 und 15:**

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
1 268	94/0	1/4	0/7	0/6	1/3	0/4	0/7	0/7	0/6	4/3	0/4	0/8	0/8
2 285	1/4	92/0	0/5	4/2	1/4	0/7	0/6	1/4	0/7	2/4	0/7	0/6	0/8
3 177	0/7	0/5	93/0	1/3	0/6	0/8	0/4	2/3	0/7	0/6	0/9	3/2	2/4
4 218	0/6	8/2	3/3	84/0	0/6	0/8	0/5	4/3	0/7	0/5	0/8	0/5	0/6
5 104	3/3	1/4	0/6	0/6	94/0	2/3	0/5	0/6	0/4	0/4	0/4	0/7	0/6
6 361	2/4	0/7	0/8	0/8	0/3	93/0	0/7	0/8	2/4	0/5	3/4	0/9	0/8
7 135	0/7	0/6	1/4	0/5	1/5	1/7	92/0	1/3	0/5	0/6	0/8	1/3	3/3
8 183	0/7	2/4	3/3	2/3	0/6	0/8	2/3	91/0	0/7	0/7	0/9	1/3	0/5
9 162	0/6	0/7	0/7	0/7	0/4	2/4	0/5	0/7	94/0	0/5	1/4	0/7	2/5
10 164	4/3	2/4	1/6	1/5	1/4	0/5	1/6	0/7	1/5	80/0	9/4	0/7	0/7
11 363	2/4	0/7	0/9	0/8	0/4	1/4	0/8	0/9	1/4	3/4	94/0	0/9	0/9
12 284	0/8	0/6	2/2	0/5	0/7	0/9	1/3	1/3	0/7	0/7	0/9	95/0	1/2
13 247	0/8	0/8	0/4	0/6	0/6	0/8	1/3	0/5	1/5	0/7	0/9	2/2	96/0

**Zusätzlich Weglassen der Stationen 10,14,13,12,22,11 und 9:**

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
1 268	91/0	2/4	0/8	0/6	1/3	0/5	0/8	0/8	0/7	5/3	1/4	0/9	0/9
2 285	2/4	89/0	0/6	3/3	2/4	0/7	0/7	1/4	0/8	2/4	0/7	0/7	0/8
3 177	0/8	0/6	89/0	2/3	0/6	0/9	0/4	2/3	1/7	0/6	0/8	4/2	2/4
4 218	0/6	9/3	5/3	79/0	0/6	0/8	0/6	7/3	0/8	0/5	0/8	0/5	0/6
5 104	4/3	2/4	0/6	0/6	89/0	3/3	0/5	0/6	2/5	0/4	0/4	0/7	0/6
6 361	1/5	0/7	0/9	0/8	1/3	94/0	0/7	0/9	3/4	0/5	2/3	0/9	0/8
7 135	0/8	0/7	0/4	0/6	0/5	1/7	92/0	1/4	0/5	0/7	0/8	3/3	4/3
8 183	0/8	1/4	3/3	3/3	0/6	0/9	4/4	90/0	0/7	0/7	0/9	1/4	0/5
9 162	0/7	0/8	1/7	0/8	0/5	1/4	0/5	0/7	95/0	0/6	2/4	0/6	1/5
10 164	2/3	1/4	2/6	0/5	2/4	1/5	0/7	0/7	1/6	83/0	9/4	0/8	0/7
11 363	2/4	0/7	0/8	0/8	1/4	1/3	0/8	0/9	3/4	2/4	90/0	0/9	0/8
12 284	0/9	0/7	4/2	0/5	0/7	0/9	1/3	1/4	0/6	0/8	0/9	89/0	5/2
13 247	0/9	0/8	0/4	0/6	0/6	0/8	2/3	0/5	0/5	0/7	0/8	4/2	94/0

**Zusätzlich Weglassen der Stationen 7,6,8,18,16 und 5:**

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
1 268	89/0	3/4	0/7	0/7	1/4	0/6	0/9	0/8	0/7	6/3	1/5	0/9	0/9
2 285	2/4	86/0	0/5	6/3	2/5	0/8	0/7	1/5	0/9	2/4	0/7	0/7	0/8
3 177	0/7	0/5	86/0	4/3	0/6	0/9	0/4	2/3	1/6	0/7	0/8	5/2	2/4
4 218	0/7	7/3	6/3	79/0	0/6	0/9	0/6	6/3	0/8	1/6	0/8	0/5	0/7
5 104	4/4	2/5	0/6	0/6	88/0	4/4	1/6	0/7	2/5	0/4	0/4	0/7	0/6
6 361	1/6	0/8	0/9	0/9	1/4	93/0	0/8	0/9	2/4	0/6	3/3	0/9	0/8
7 135	0/9	0/7	0/4	0/6	1/6	0/8	87/0	2/4	1/5	0/7	0/8	4/3	4/3
8 183	0/8	1/5	3/3	2/3	0/7	0/9	2/4	90/0	0/8	0/8	0/9	2/3	0/5
9 162	0/7	0/9	0/6	0/8	0/5	1/4	0/5	0/8	94/0	0/6	3/4	0/6	2/5
10 164	3/3	1/4	2/7	0/6	2/4	1/6	0/7	0/8	1/6	80/0	10/4	0/8	0/7
11 363	2/5	0/7	0/8	0/8	1/4	2/3	0/8	0/9	3/4	3/4	90/0	0/9	0/8
12 284	0/9	0/7	4/2	0/5	0/7	0/9	2/3	3/3	0/6	0/8	0/9	85/0	6/2
13 247	0/9	0/8	0/4	0/7	0/6	0/8	3/3	0/5	1/5	0/7	0/8	6/2	90/0

Bei der nunerzielten Stationenkonfiguration (Stationen 1,2,17,19-21 und 27-42) ist ein vernünftiges Mass zwischen Aufwand (vier Stationen neu stellen) und Ertrag (mittlere Trefferquote 88 %) erzielt. Es sei nochmals darauf hingewiesen, dass die Fehlinterpretation mit den Prozeduren der Klasse-zu-Klasse-Distanzen bewertet werden müssen. Die Echtzeitdiagnose ist mit dieser Anzahl Stationen durchaus sinnvoll. Um diese Stationenwahl besser werten zu können, ist in Figur 12 eine Analyse nach der in Figur 10 gegebenen Art abgebildet.

Die weitere Einschränkung der Stationen zeigt folgende Ergebnisse:

**Zusätzlich Weglassen der Stationen 20,17,19 und 21:**

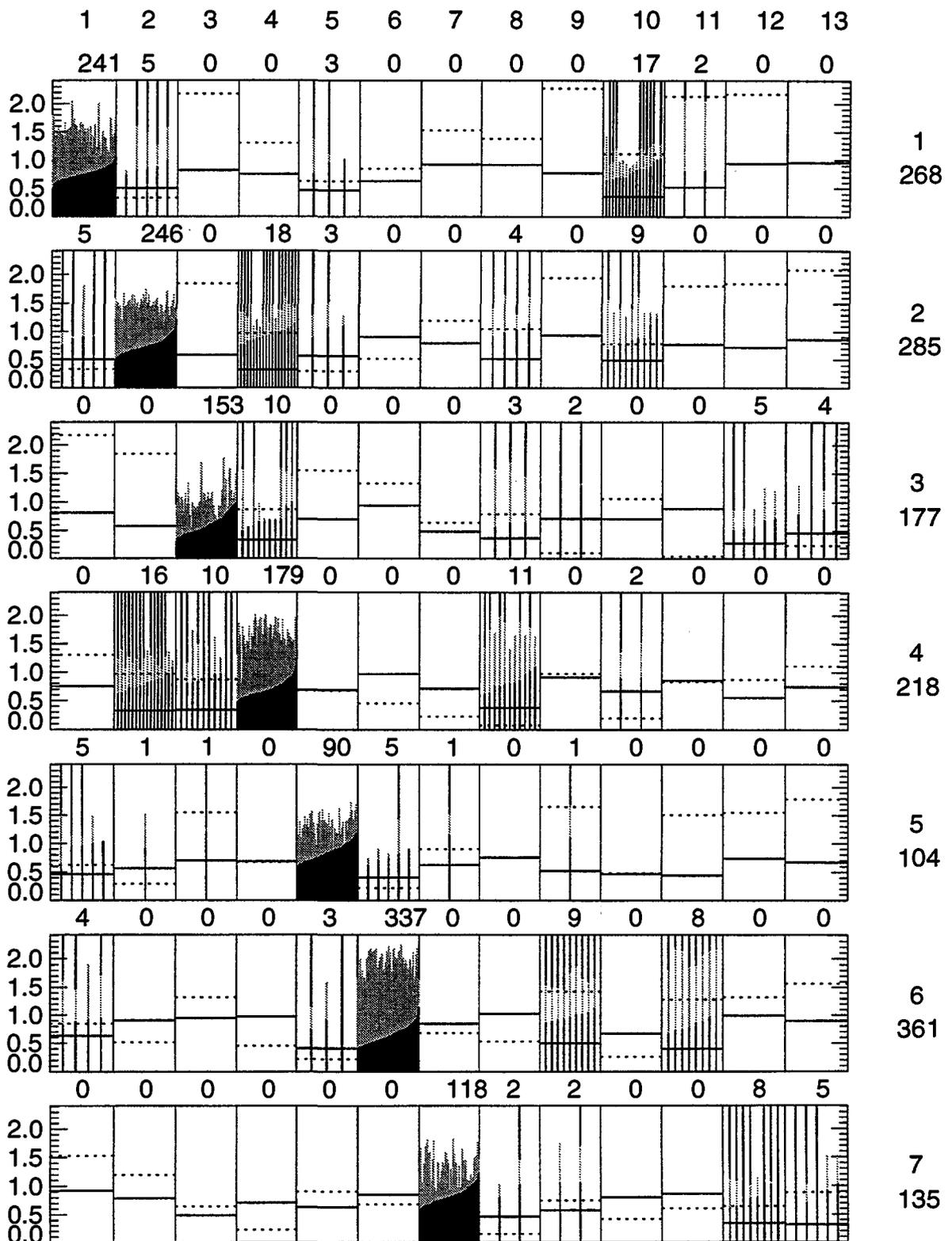
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
1 268	87/0	5/4	0/7	0/6	1/4	0/6	0/8	0/8	0/7	7/3	1/5	0/8	0/8
2 285	2/4	86/0	0/5	7/2	1/5	0/8	0/7	1/4	0/9	2/4	0/7	0/6	0/7
3 177	0/7	0/5	81/0	6/3	0/6	0/8	0/4	5/3	1/6	1/6	0/8	5/2	3/3
4 218	0/6	8/2	7/3	74/0	0/6	0/9	0/6	9/3	0/8	1/6	0/8	0/4	0/6
5 104	5/4	2/5	1/6	0/6	82/0	4/4	5/5	0/6	2/5	0/3	0/4	0/6	0/5
6 361	1/6	0/8	0/8	0/9	1/4	94/0	0/7	0/9	2/4	0/6	2/3	0/9	0/8
7 135	0/8	0/7	0/4	0/6	0/5	1/7	83/0	1/4	7/5	0/6	0/7	5/3	4/2
8 183	0/8	1/4	5/3	3/3	0/6	0/9	2/4	83/0	0/8	1/7	0/9	5/3	0/5
9 162	0/7	0/9	0/6	0/8	0/5	2/4	2/5	0/8	93/0	0/6	2/3	0/6	1/4
10 164	5/3	3/4	2/6	0/6	2/3	1/6	0/6	0/7	1/6	76/0	10/4	0/7	0/6
11 363	3/5	0/7	0/8	0/8	1/4	2/3	0/7	0/9	7/3	4/4	85/0	0/8	0/7
12 284	0/8	0/6	4/2	0/4	0/6	0/9	3/3	5/3	0/6	0/7	0/8	82/0	7/2
13 247	0/8	0/7	0/3	0/6	0/5	0/8	3/2	0/5	2/4	0/6	0/7	6/2	88/0

Dieses Resultat wird beim Betrieb mit den heute schon verfügbaren Routinestationen erreicht und kann, nach Etablieren einer on-line Verbindung zu den Stationen 1 und 2, zur Echtzeitdiagnose herangezogen werden. Die Trefferquote liegt noch bei guten 85 %. Es sei in Erinnerung gerufen, dass die Kenntnis des Temperaturgradienten des Stationspaares 6 bei allen Rechnungen beibehalten wurde.

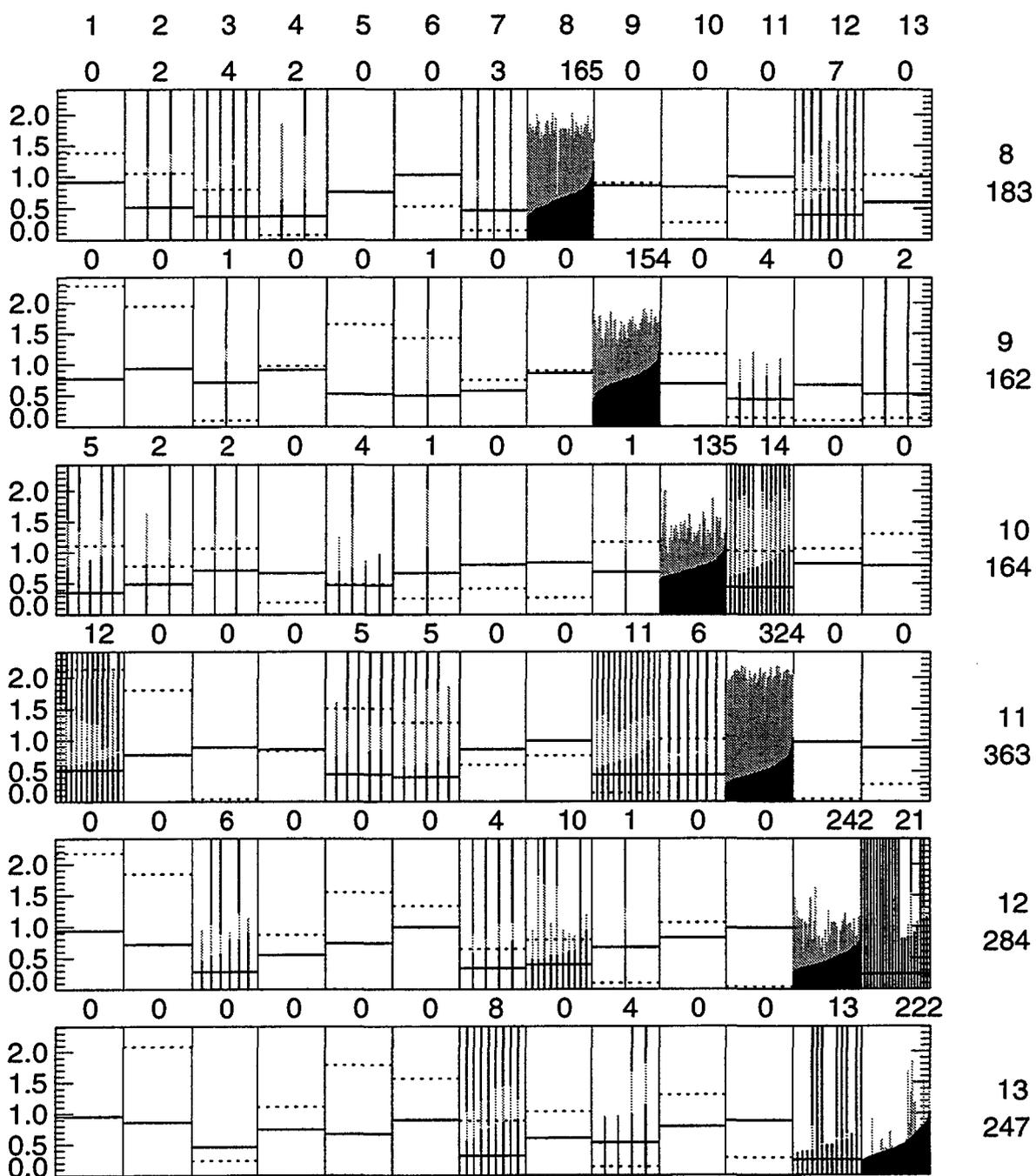
Da die Realisierung der Echtzeitdiagnose mit dieser Anzahl Stationen möglich erscheint, ist in Figur 13 wiederum eine Analyse nach der in Figur 10 dargestellten Art aufgeführt. Zur übersichtlichen Darstellung der Resultate der oben gezeigten Stationsreduktionen hält die folgende Tabelle 8.a) den Durchschnitt der erzielten Trefferquoten über alle Klassen fest:

**Tabelle 8.a) Mittlere Trefferquote über alle Klassen bei der kumulativen Reduktion der Stationen um die jeweils in der ersten Zeile angegebene Station**

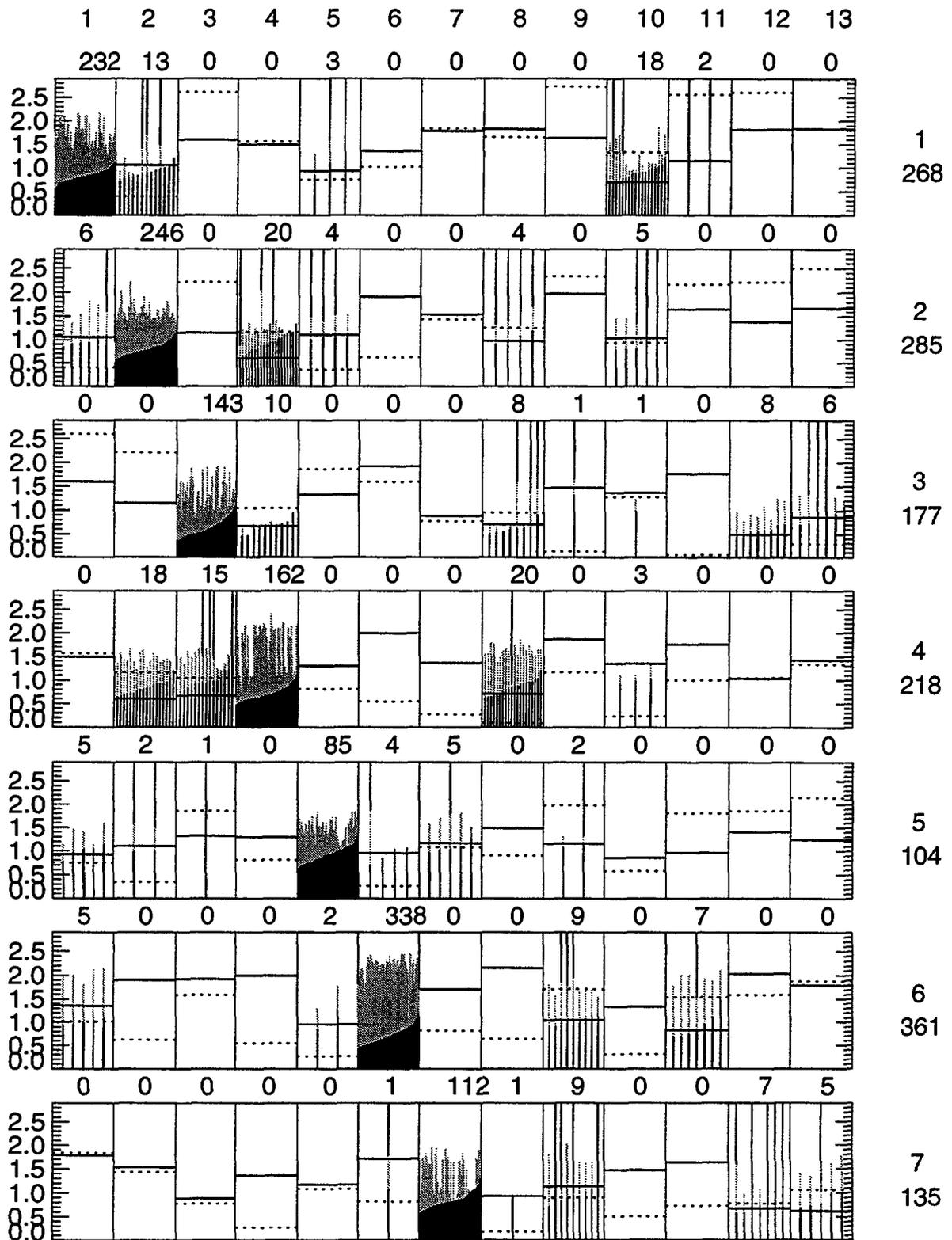
ohne Station	4	3	23	24	25	43	44	16	15	10	14	13	12	22	11	9	7	6	8	18	5	20	17	19	21
Trefferquote	94	94	94	94	93	93	92	92	92	92	92	92	91	91	91	90	89	89	89	89	88	88	87	86	85



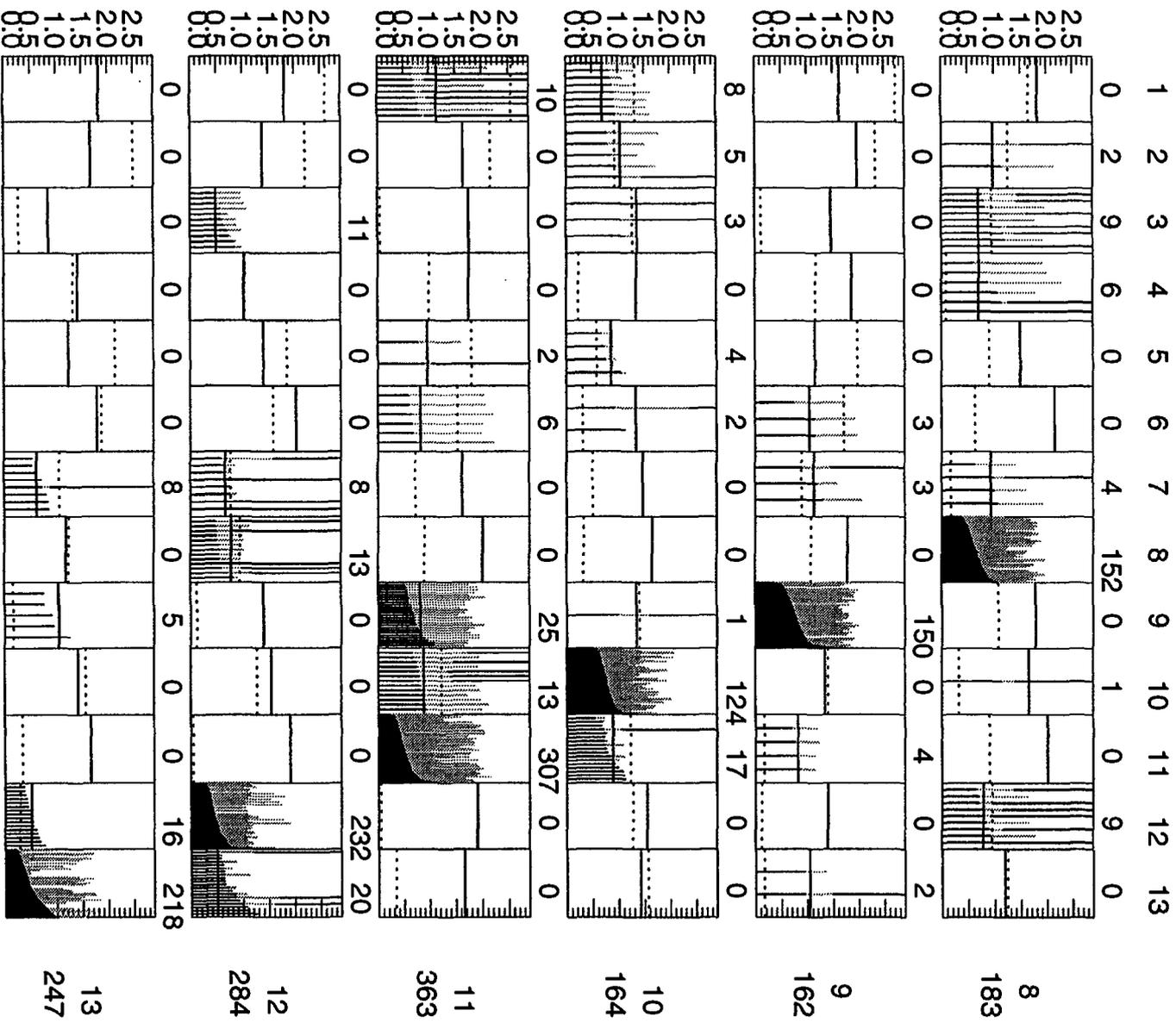
Figur 12. Graphische Darstellung nach kumulativem Weglassen bis und mit Station 5 unter Berücksichtigung des Temperaturgradienten, Erklärung siehe Figur 10. (gleiche Stationenkonfiguration, jedoch ohne Temperaturgradient).



Fortsetzung der Figur 12.



**Figur 13. Graphische Darstellung nach kumulativem Weglassen von Stationen gemäss Tabelle 8 bis und mit Station 21, Erklärung siehe Figur 10.**



Fortsetzung der Figur 13.

Die folgende Tabelle 8.b) bildet die Fortsetzung der Tabelle 8.a) und hält bei fortschreitender Reduktion von Stationen wiederum den Durchschnitt der erzielten Trefferquoten über alle Klassen fest:

**Tabelle 8.b) Fortsetzung der Tabelle 8.a)**

ohne Station	38	29	36	34	33	30	28	27	26	35	2	1	31	42	41	32	37
Trefferquote	84	83	82	82	81	81	80	79	77	76	74	72	68	63	58	53	50

Es verbleiben nunmehr nur noch die Stationen 39 (St. Chrischona) und 40 (Üetliberg), die auf eine mittlere Trefferquote von 50 % führen. Für eine Trefferquote von 79 %, also bei Berücksichtigung der Stationen 1, 2, 26, 27, 31, 32, 35, 37, und 39 bis 42, ist in Figur 14 nochmals eine Analyse gezeigt. Daraus wird ersichtlich, dass mit zunehmender Fehlerzahl im wesentlichen die gleichen Klassen fehlidentifiziert werden, sodass aufgrund der Tabelle 8 auf die ungefähre Anzahl der klassenbezogenen Fehlidentifikationen geschlossen werden kann.

Die Bevorzugung der Routinestationen in der vorangehenden Reduktionsabfolge erbringt allerdings nicht die optimale Trefferquote bei einer möglichst geringen Anzahl von Stationen. Aus diesem Grund ist in der folgenden Tabelle 9 noch eine Reduktionsabfolge aufgeführt, die auf der Benotung der Tabelle 7 und auf der meteorologischen Erfahrung beruht und vor allem Stationen mit grossem Repräsentativitätsvolumen berücksichtigt.

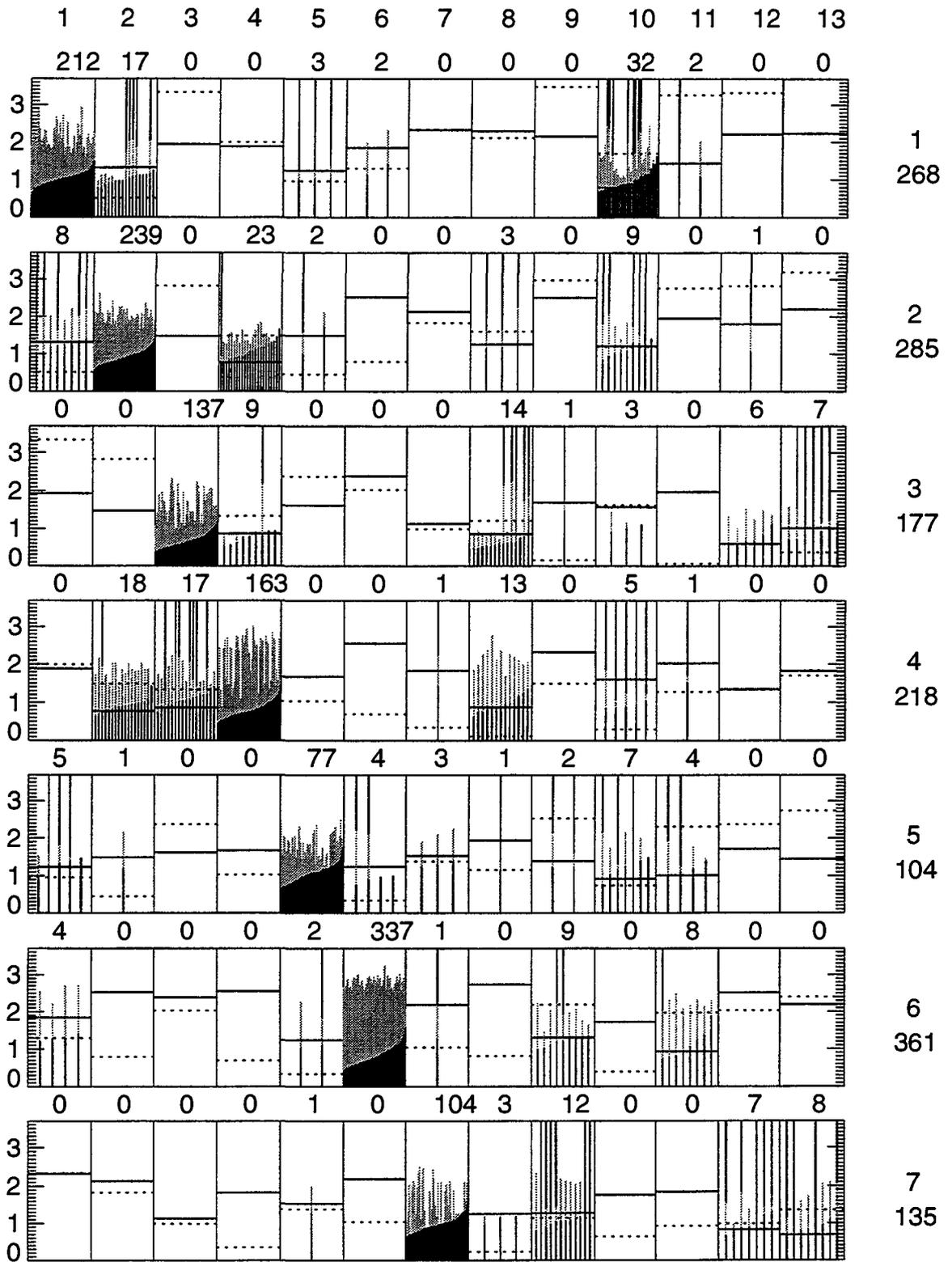
**Tabelle 9.a) Mittlere Trefferquote über alle Klassen bei der kumulativen Reduktion der Stationen um die jeweils in der ersten Zeile angegebene Station (andere Stationenreihenfolge im Vergleich zu Tabelle 8)**

ohne Station	15	23	28	8	35	14	7	16	22	13	33	9	24	10	11	4	38	37	30	3	12	26	43	41	34	
Trefferquote	94	94	94	94	94	94	94	94	93	93	93	92	92	92	92	91	91	91	91	91	91	90	88	88	87	86

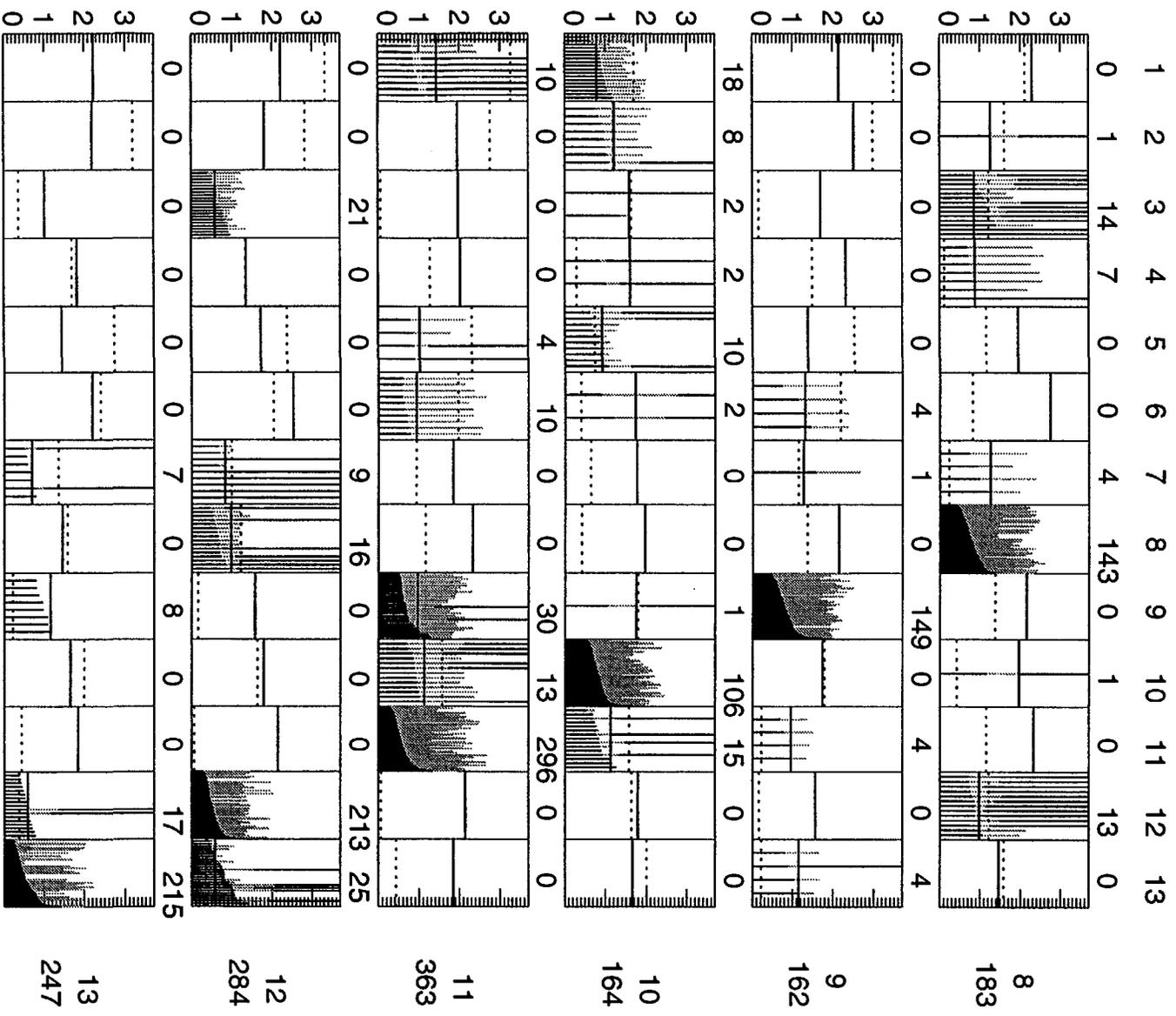
**Tabelle 9.b) Fortsetzung der Tabelle 9.a)**

ohne Station	18	32	1	29	5	25	39	6	44	36	27	20	21	17	31	42	19
Trefferquote	86	84	84	84	83	81	81	80	79	79	75	75	73	70	68	65	59

Es zeigt sich, dass dieses Vorgehen im Vergleich zu der Tabelle 8 bei einer gleichen Anzahl von Stationen bessere Resultate liefert, da das bevorzugte Weglassen der zusätzlichen, befristet aufgestellten Stationen kein optimales Vorgehen im Sinne einer möglichst hohen Trefferquote darstellt. Dennoch kann gezeigt werden, dass bei Weglassen von 25 Stationen die Trefferquote im Mittel noch 86 % beträgt, eine Reduktion auf nur 8 Stationen die mittlere Trefferquote dagegen auf 75 % verringert.



**Figur 14. Graphische Darstellung nach kumulativem Weglassen von Stationen gemäss Tabelle 8 bis und mit Station 27, Erklärung siehe Figur 10.**



Fortsetzung der Figur 14.

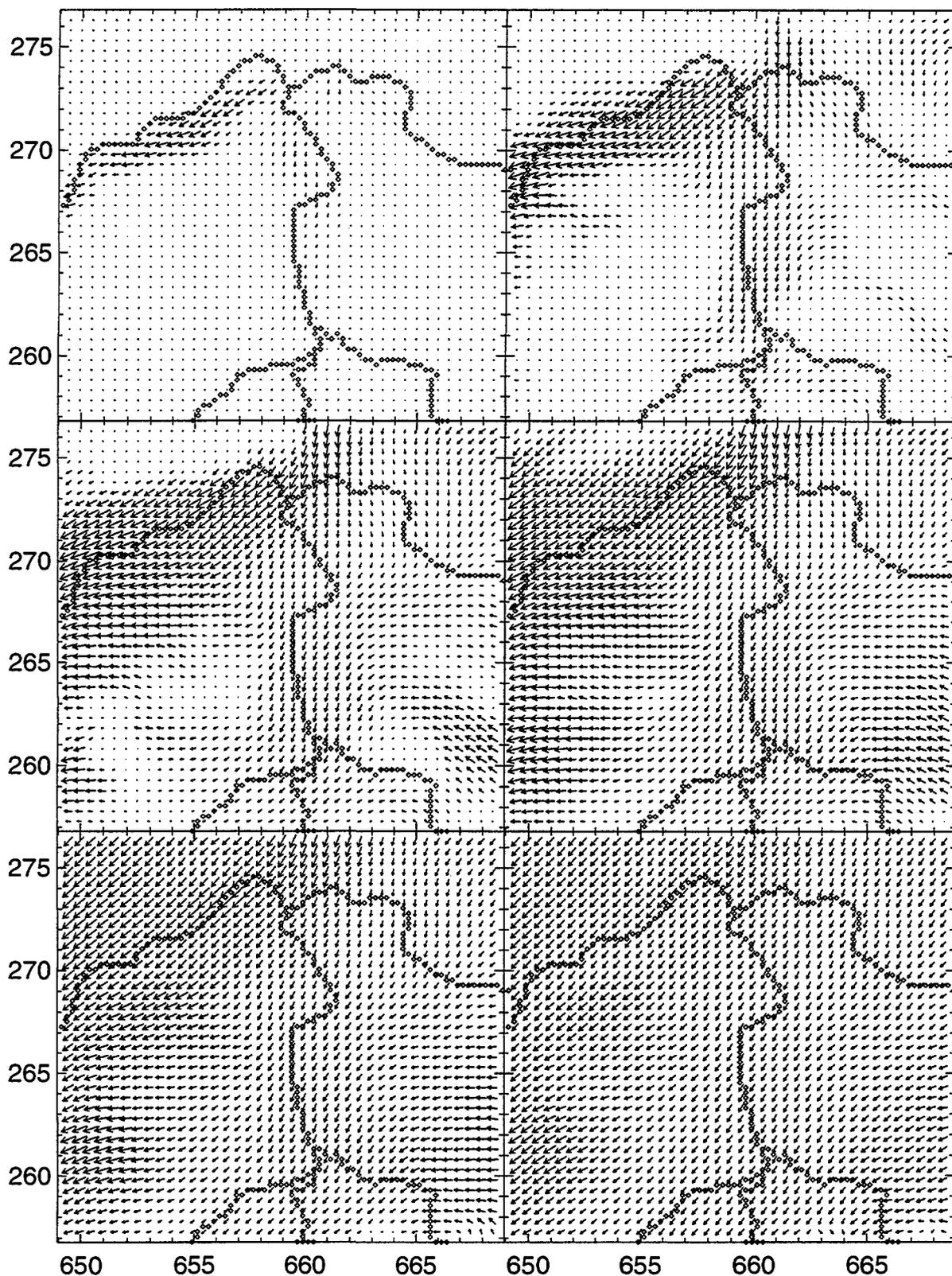
## 6 Die interpolierten Windfelder der klassierten Winddaten

In einem nächsten Schritt wurden die Klassen, die ja einzig auf Stationsdaten basieren, hinsichtlich ihres Windfeldes untersucht. Zu diesem Zweck wurden die 2 weitverbreiteten diagnostische Windfeld-Modelle des Lawrence Livermore Nat. Lab., California, eingesetzt:

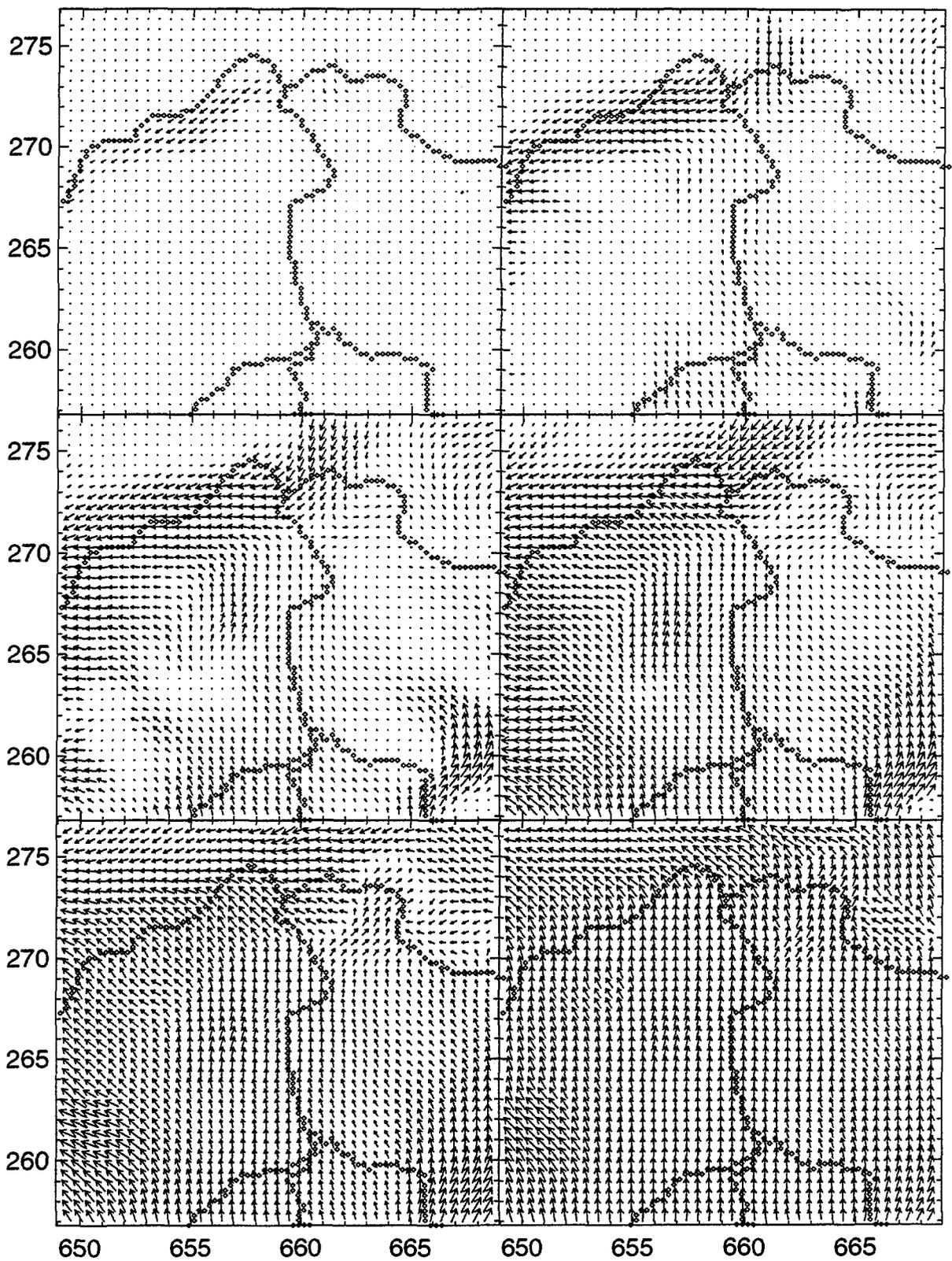
- **MEDIC:** Das Modell interpoliert ein dreidimensionales Windfeld auf ein regelmässiges Gitter aufgrund einer Kombination von Bodenstationen und Daten für das Windprofil innerhalb des Untersuchungsgebiets. Im vorliegenden Fall wurden dazu einerseits die SODAR-Daten und andererseits die Daten von Beznau 70 m und Leibstadt 110 m verwendet. Die Interpolation ist ein komplexer Prozess mit anwendungsorientierten Steuerparametern.
- **MATHEW:** Das Modell korrigiert die Resultate des Modells MEDIC im Hinblick auf Divergenzfreiheit, gleichbedeutend mit der Forderung nach Massenerhaltung, was bei einer Interpolation ja nicht a priori gegeben ist. Dadurch wird verhindert, dass sich bei einer nachfolgenden Ausbreitungsrechnung Material in einer Gitterzelle ansammelt oder aus ihr herausgesaugt wird.

Die Modelle sind in Taylor et al. (1994) genauer beschrieben. Neben den Steuergrössen zur Gebietsgrösse sind auch die zeitlichen Steuergrössen und die Angaben über den vorandenen Eingabedatensatz der Boden- und Höhenwinde enthalten. Die zeitliche Steuerung ist darauf angelegt, das Ausbreitungsmodell ADPIC daran anzuschliessen, es werden also soviele Windfelder berechnet, als nachher für die zeitliche Abfolge der Ausbreitung gewünscht wird. Dabei müssen als Eingabedaten die Winddaten an allen Stationen zu allen diesen Zeiten bereitgestellt werden, denn die Modelle haben reinen Diagnosewert und enthalten keine prognostischen Gleichungen. Weiter wird die Grenzschichthöhe mit dem für das Schweizer Mittelland typischen Wert von 700 m eingegeben. Die "surface layer", definiert durch die bodennächste Schicht, in der sich der turbulente Austausch mit der Höhe nicht ändert, wird ebenfalls entsprechend den Erfahrungen im Schweizer Mittelland mit 50 m angegeben.

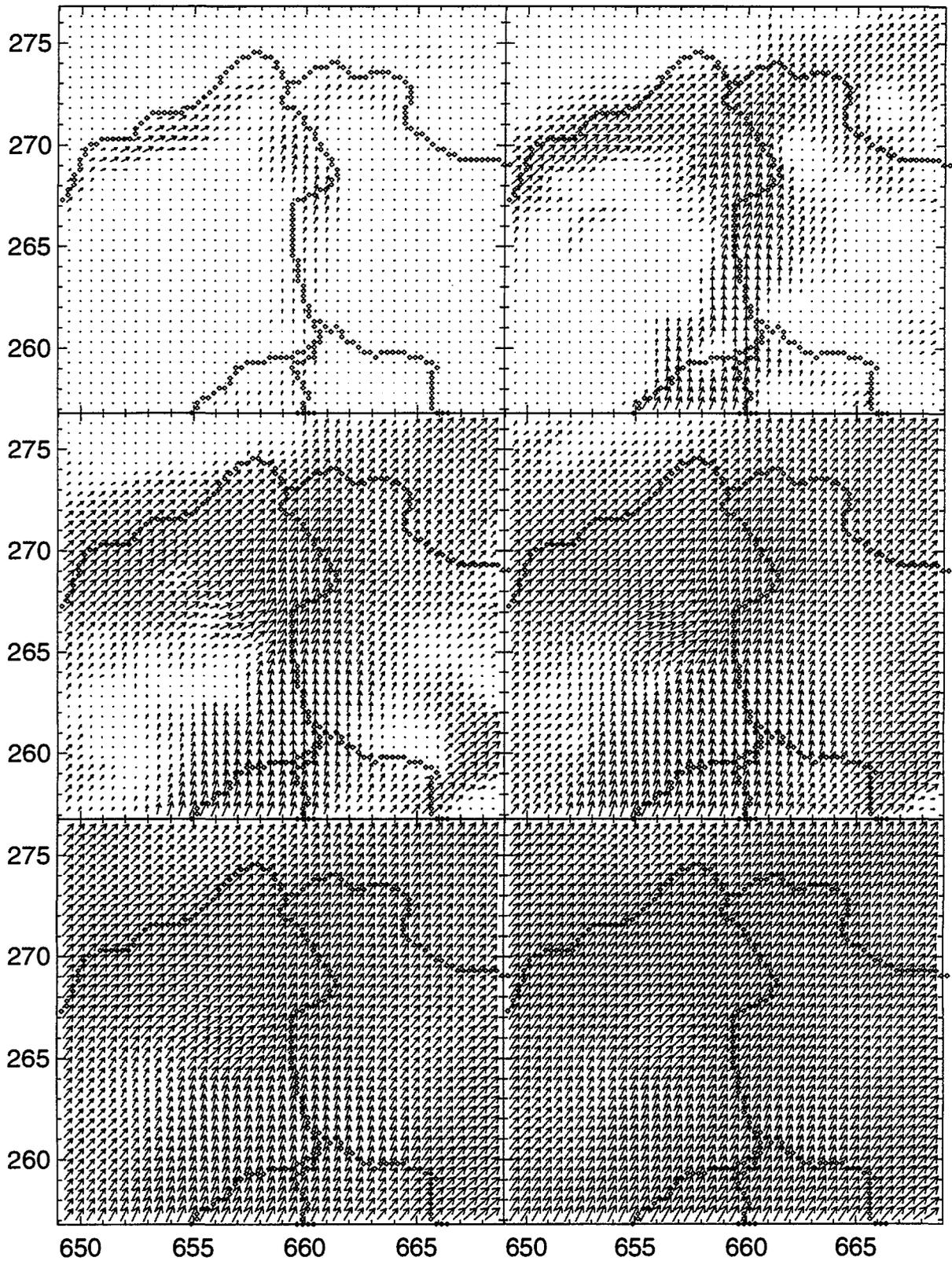
Für das Modell MATHEW sind ferner die Stabilitätsklassen für die einzelnen zeitlich folgenden Rechnungen der Windfelder in Pasquill-Gifford Stabilitätsklassen (Klasse 1 labile, 4 neutrale Schichtung, hier gewählt, und 6 stabile Schichtung) einzugeben. Wird die Rechnung für die 44 zur Verfügung stehenden Stationen mit den Klassenmittelwerten für die jeweiligen Klassen durchgeführt, so entstehen die in Figur 15 für verschiedene Höhen dargestellten Windfelder für die 13 Klassen. Im Abschnitt 7.3. werden diese Windfelder aufgrund der Figur 15 genauer beschrieben.



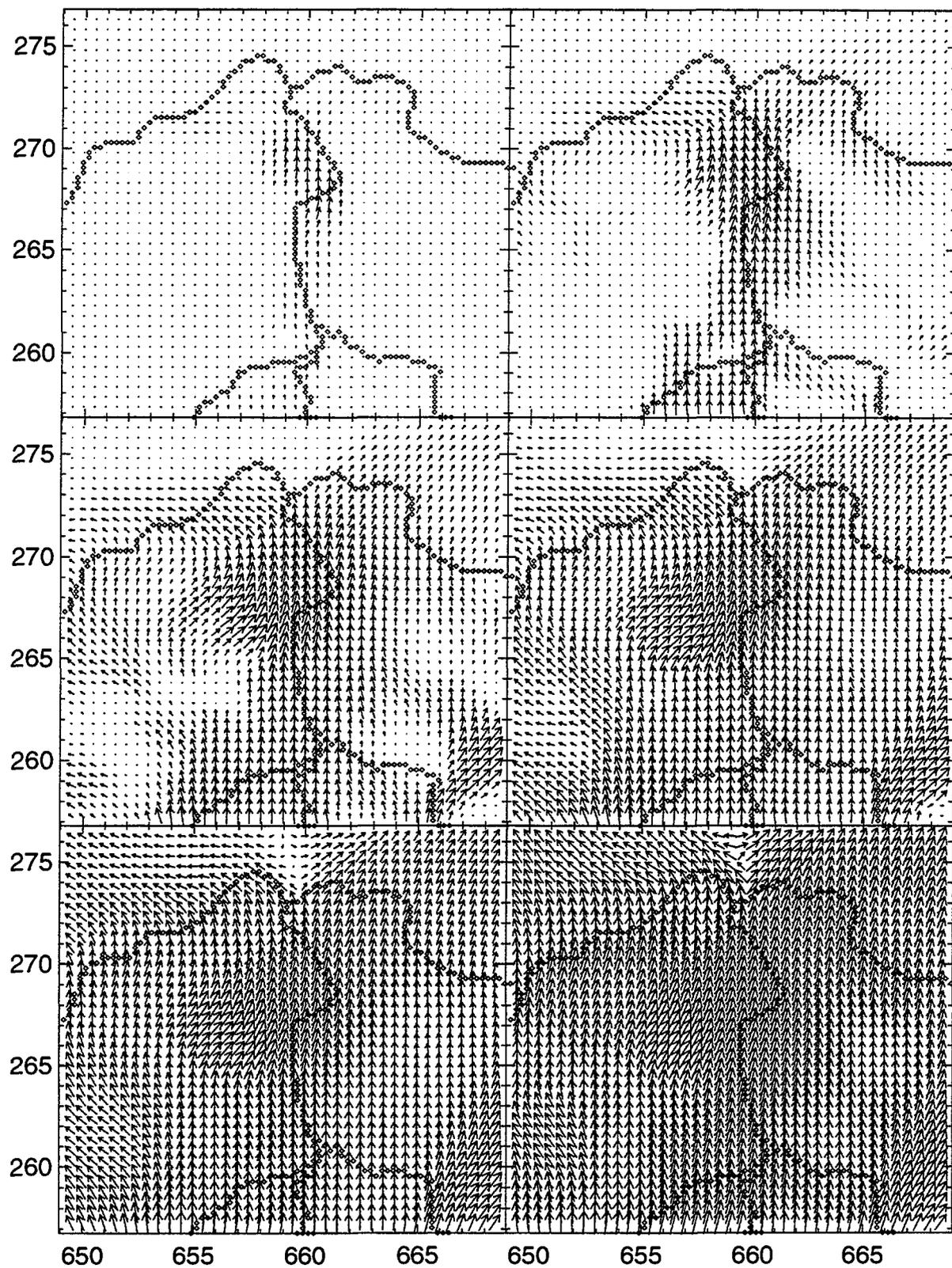
Figur 15.a) Windfeld aufgrund einer Interpolation der Werte der Klasse 1, für die Höhen 400, 500, 600, 700, 850 und 1100 m über Meer im Schweizerischen Kilometernetz mit unterlegten Flussläufen dargestellt. Die maximale Windgeschwindigkeit beträgt 2.17 m/s (normierter Wind).



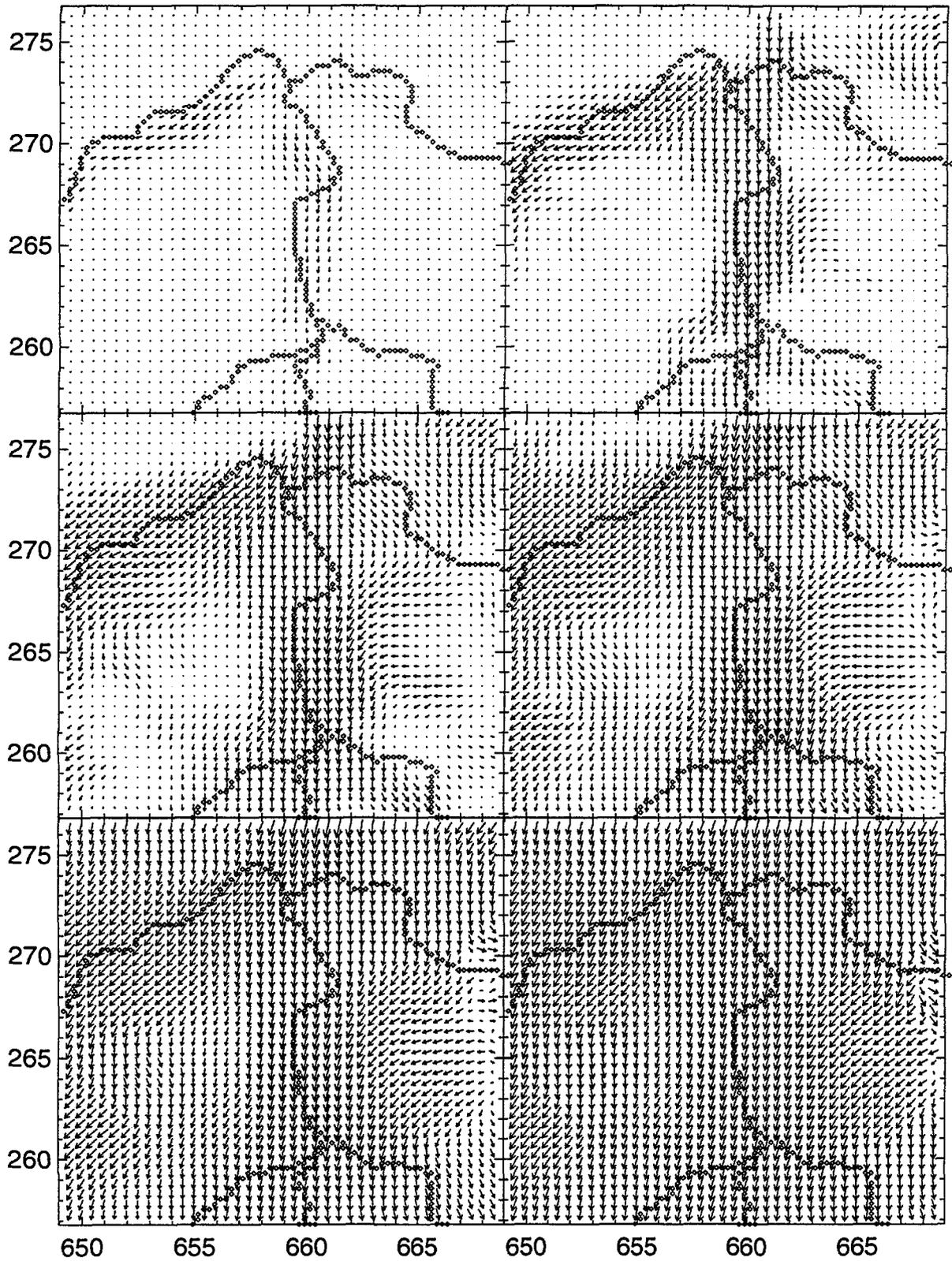
Figur 15.b) Wie Figur 15.a), jedoch für die Klasse 2. Die maximale Windgeschwindigkeit beträgt 2.09 m/s (normierter Wind).



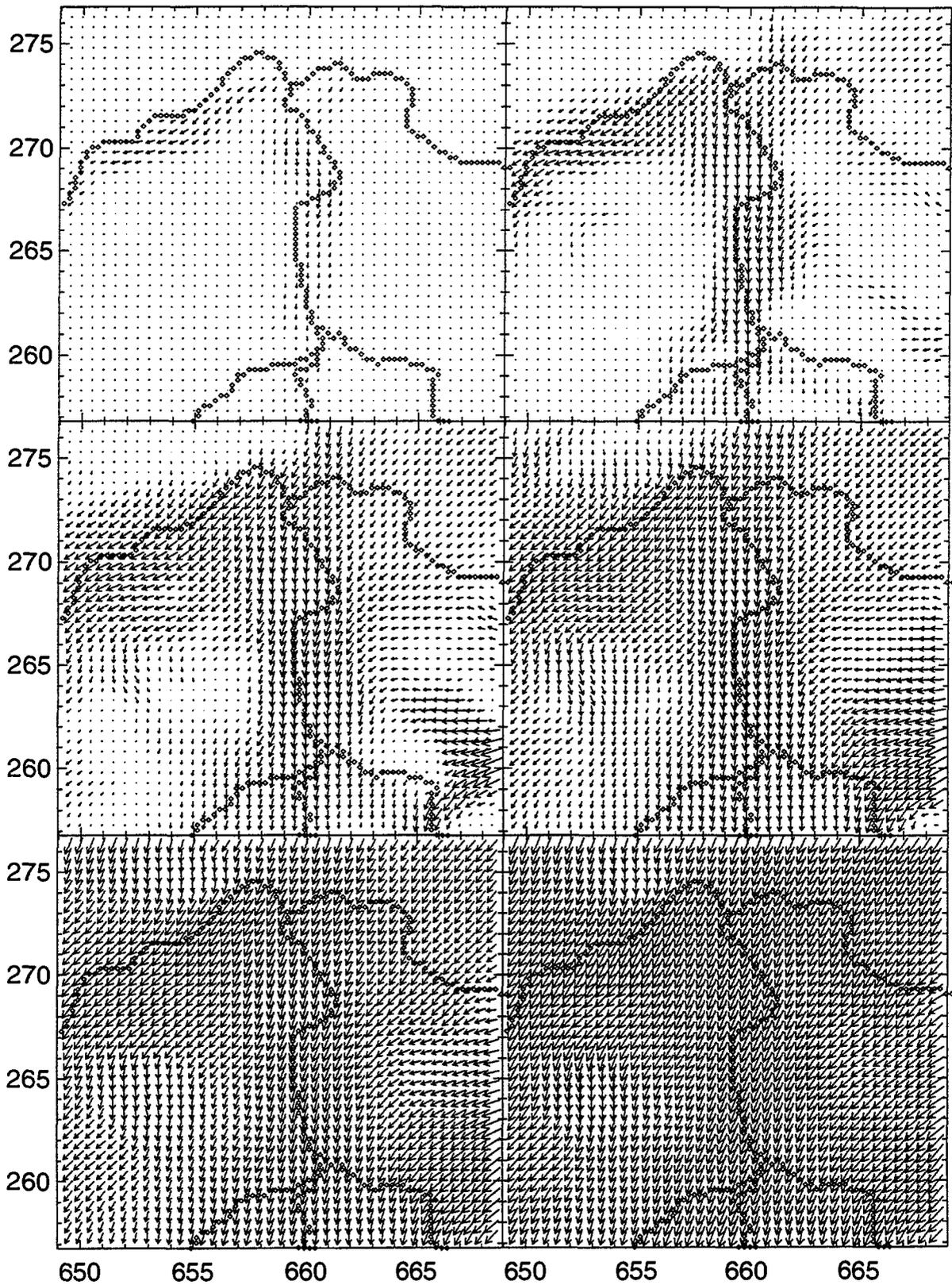
**Figur 15.c) Wie Figur 15.a), jedoch für die Klasse 3. Die maximale Windgeschwindigkeit beträgt 2.00 m/s (normierter Wind).**



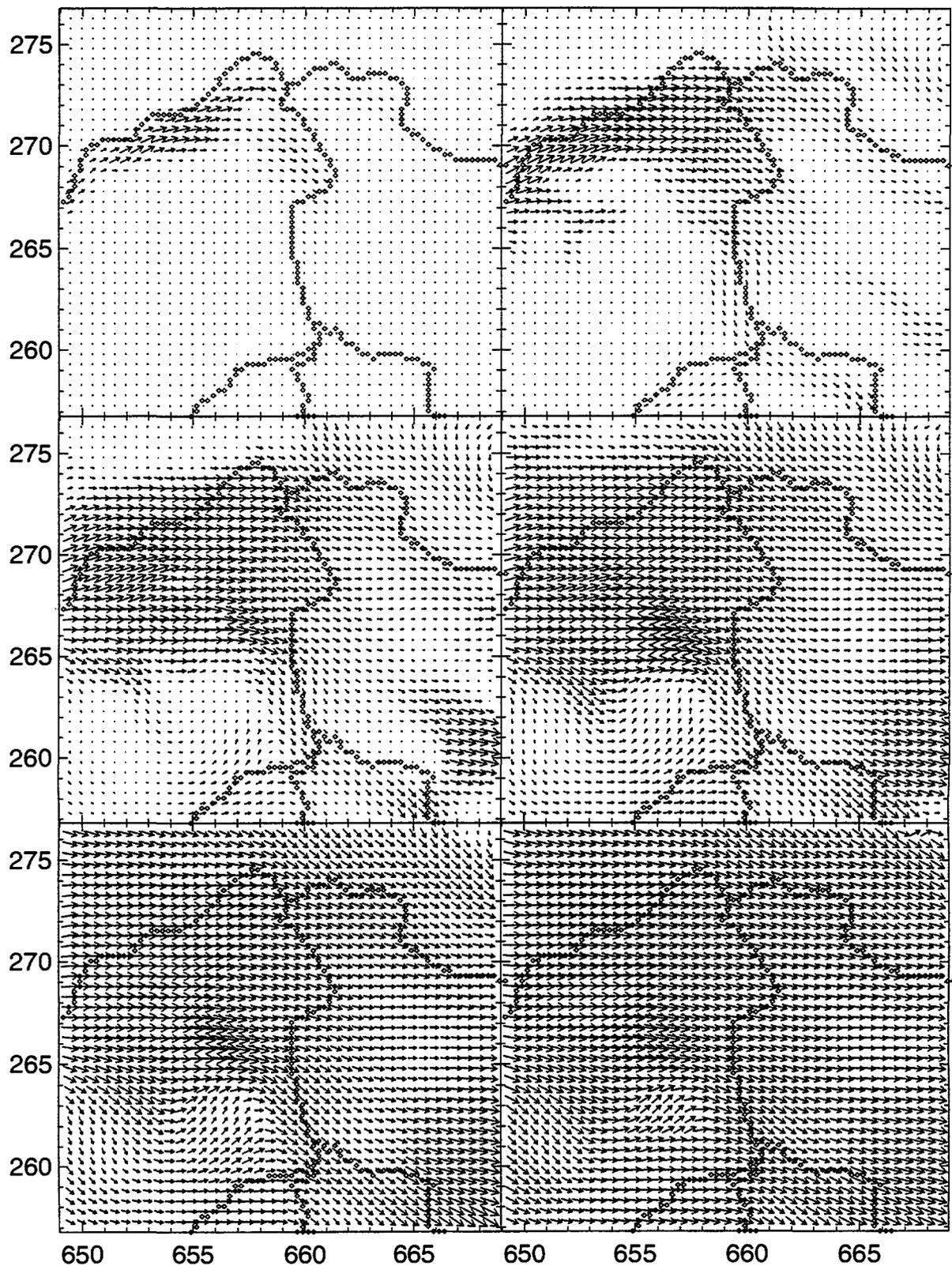
**Figur 15.d) Wie Figur 15.a), jedoch für die Klasse 4. Die maximale Windgeschwindigkeit beträgt 2.45 m/s (normierter Wind).**



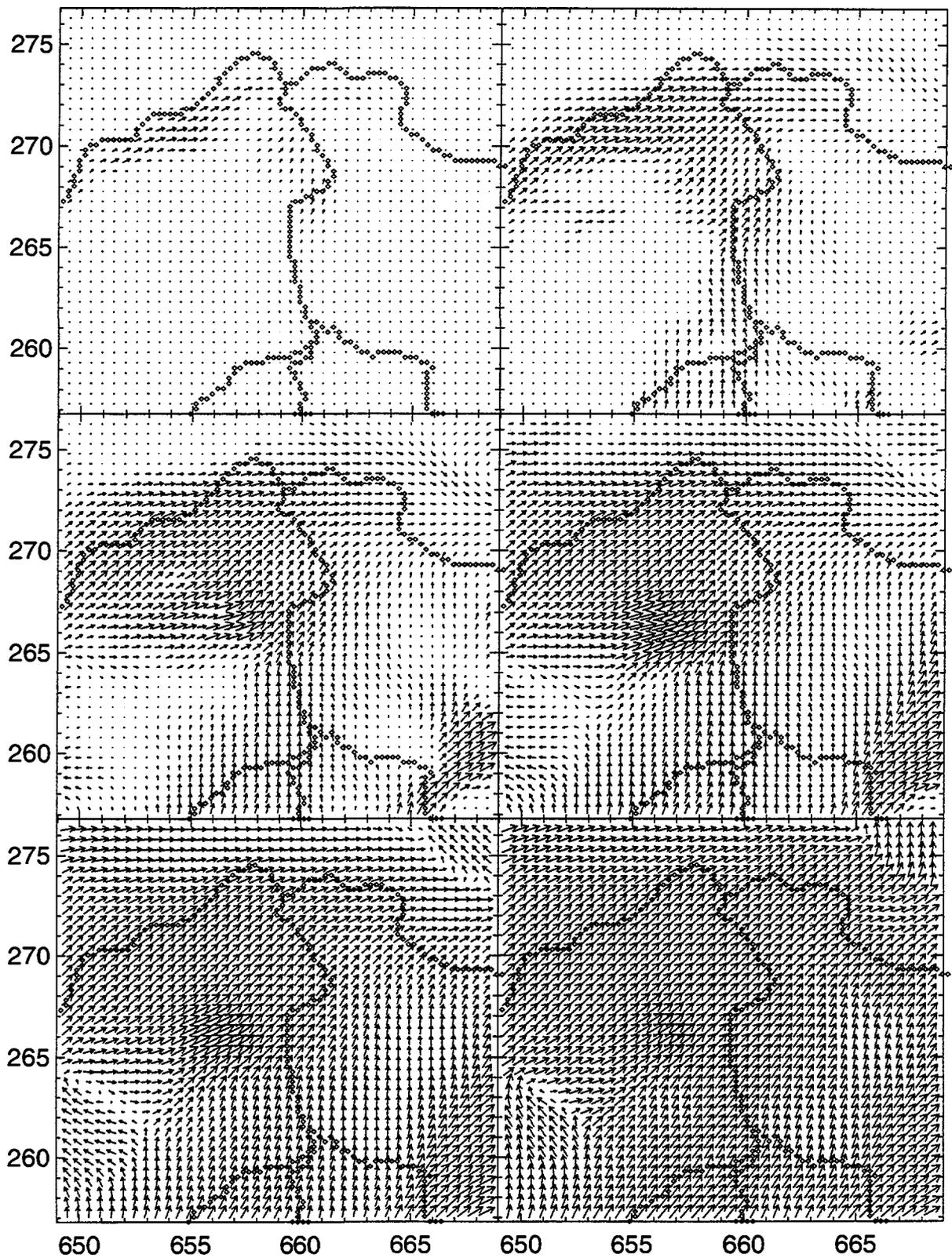
**Figur 15.e) Wie Figur 15.a), jedoch für die Klasse 5. Die maximale Windgeschwindigkeit beträgt 2.01 m/s (normierter Wind).**



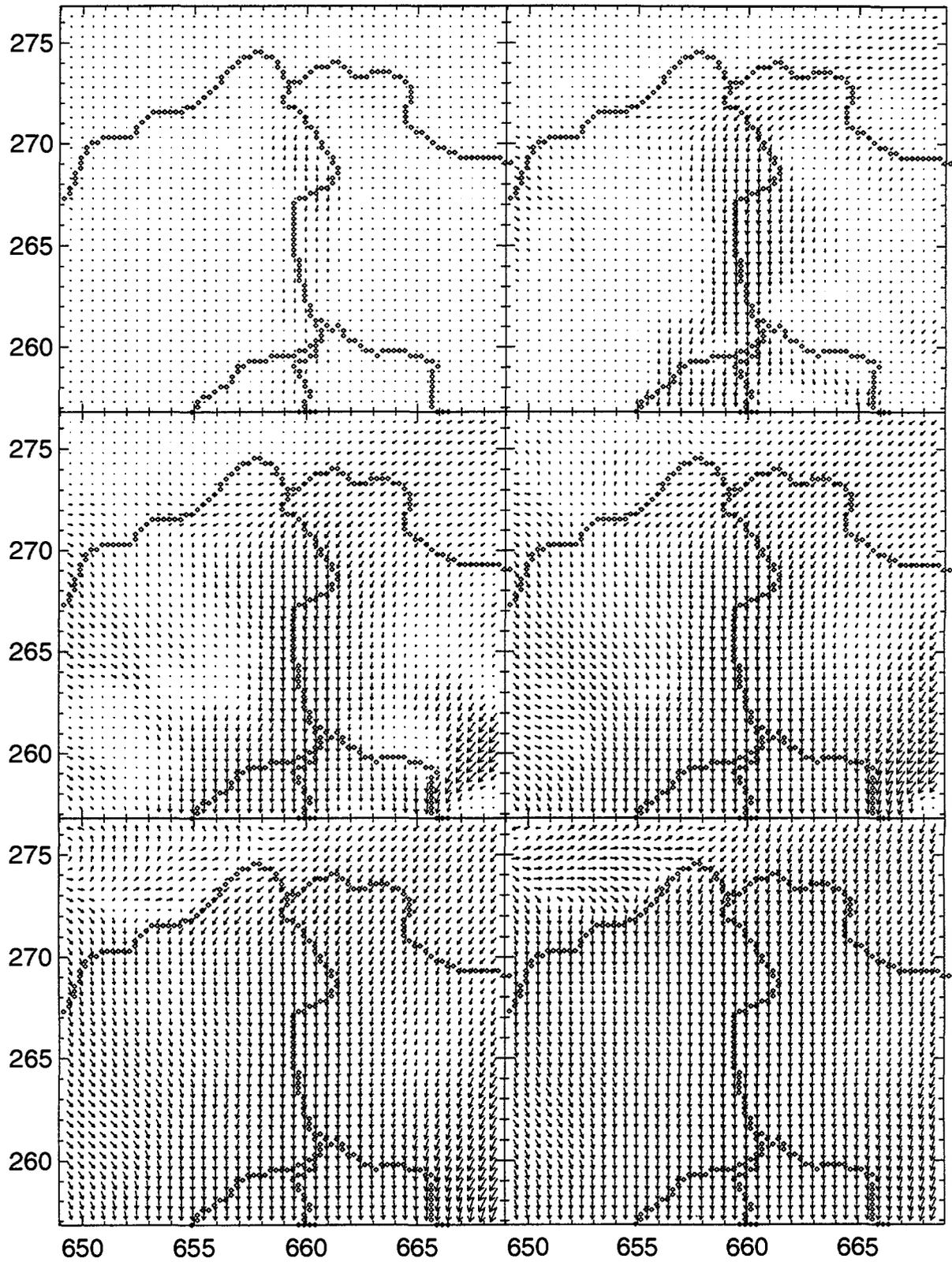
Figur 15.f) Wie Figur 15.a), jedoch für die Klasse 6. Die maximale Windgeschwindigkeit beträgt 2.54 m/s (normierter Wind).



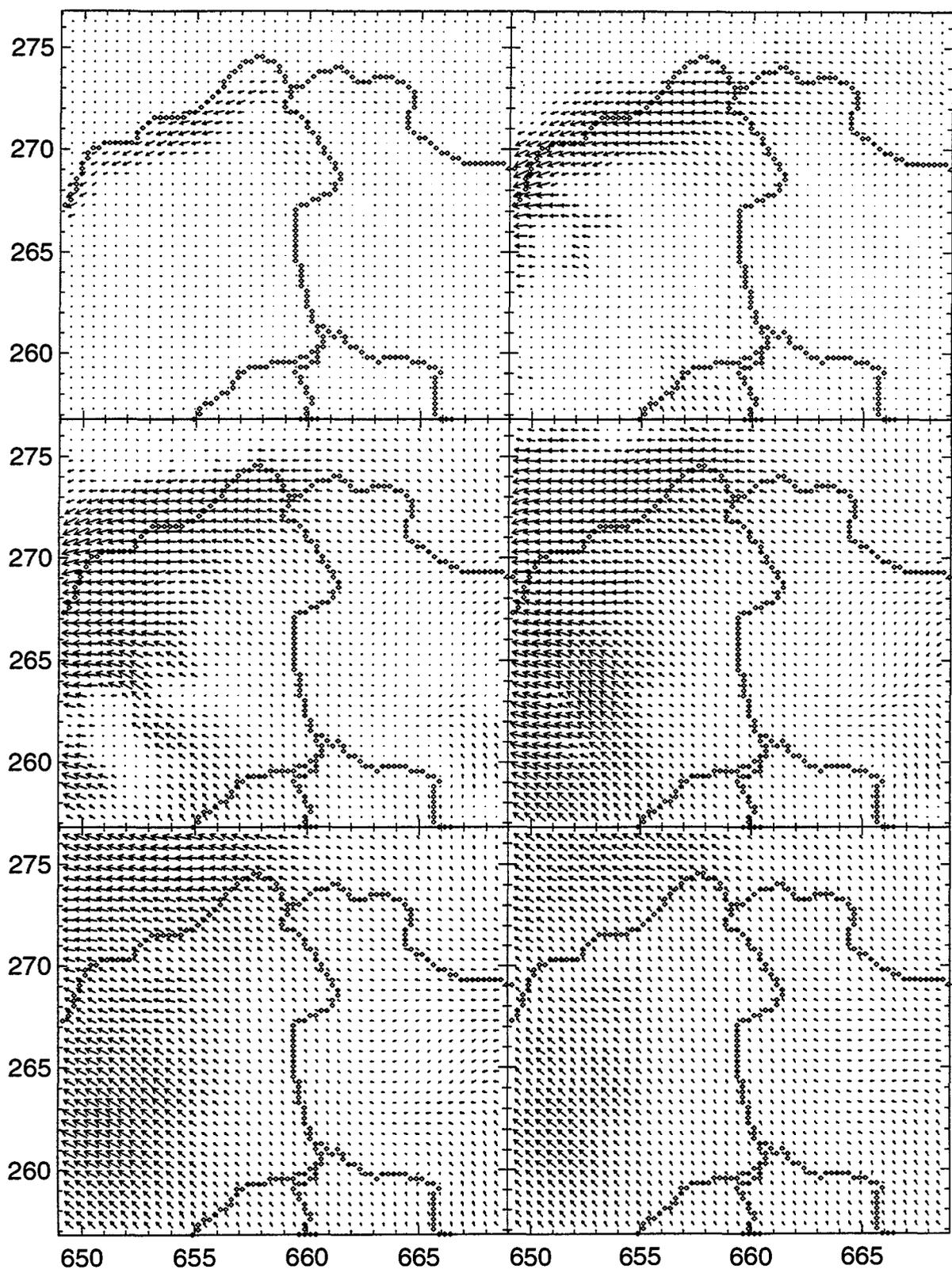
Figur 15.g) Wie Figur 15.a), jedoch für die Klasse 7. Die maximale Windgeschwindigkeit beträgt 2.96 m/s (normierter Wind).



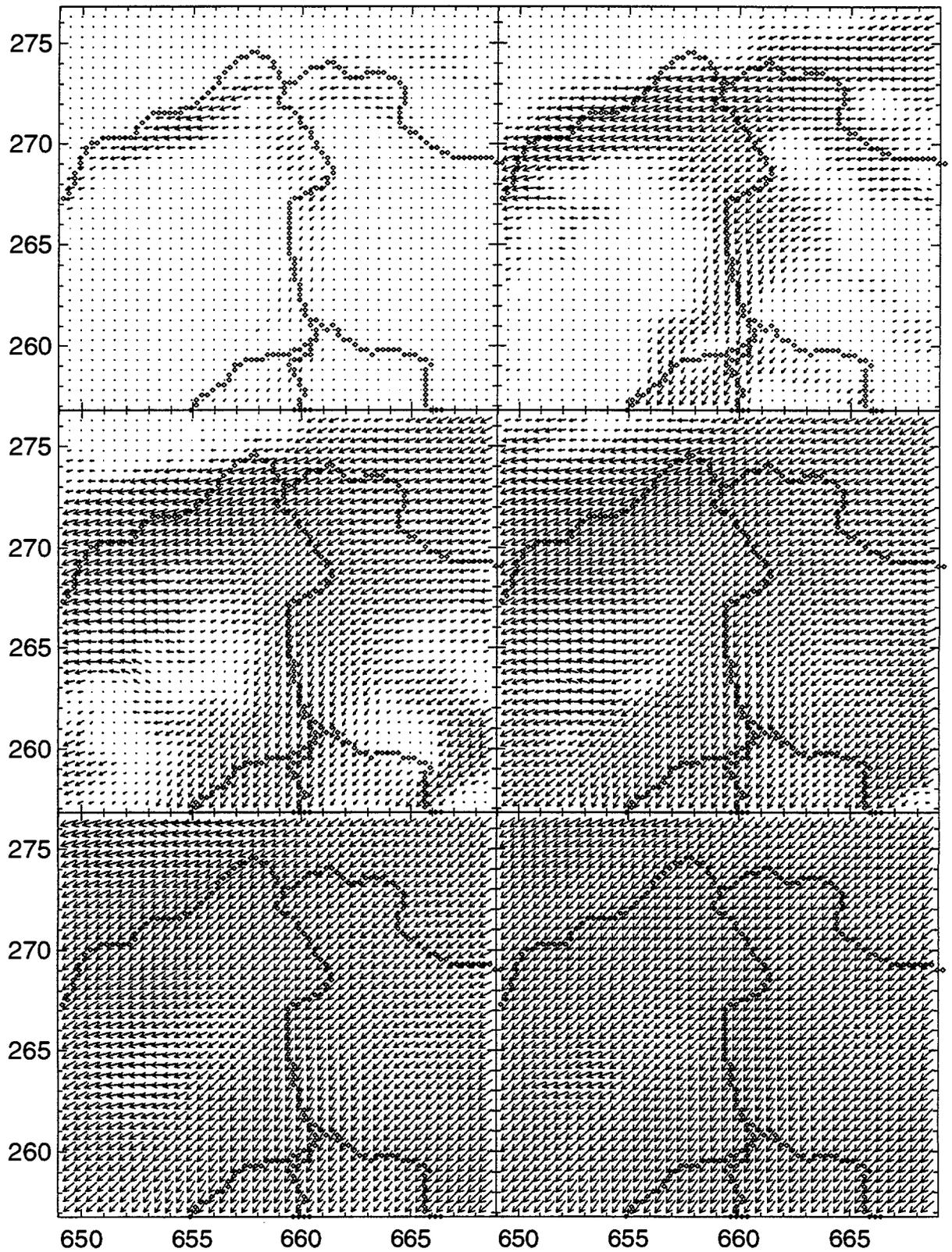
**Figur 15.h) Wie Figur 15.a), jedoch für die Klasse 8. Die maximale Windgeschwindigkeit beträgt 2.78 m/s (normierter Wind).**



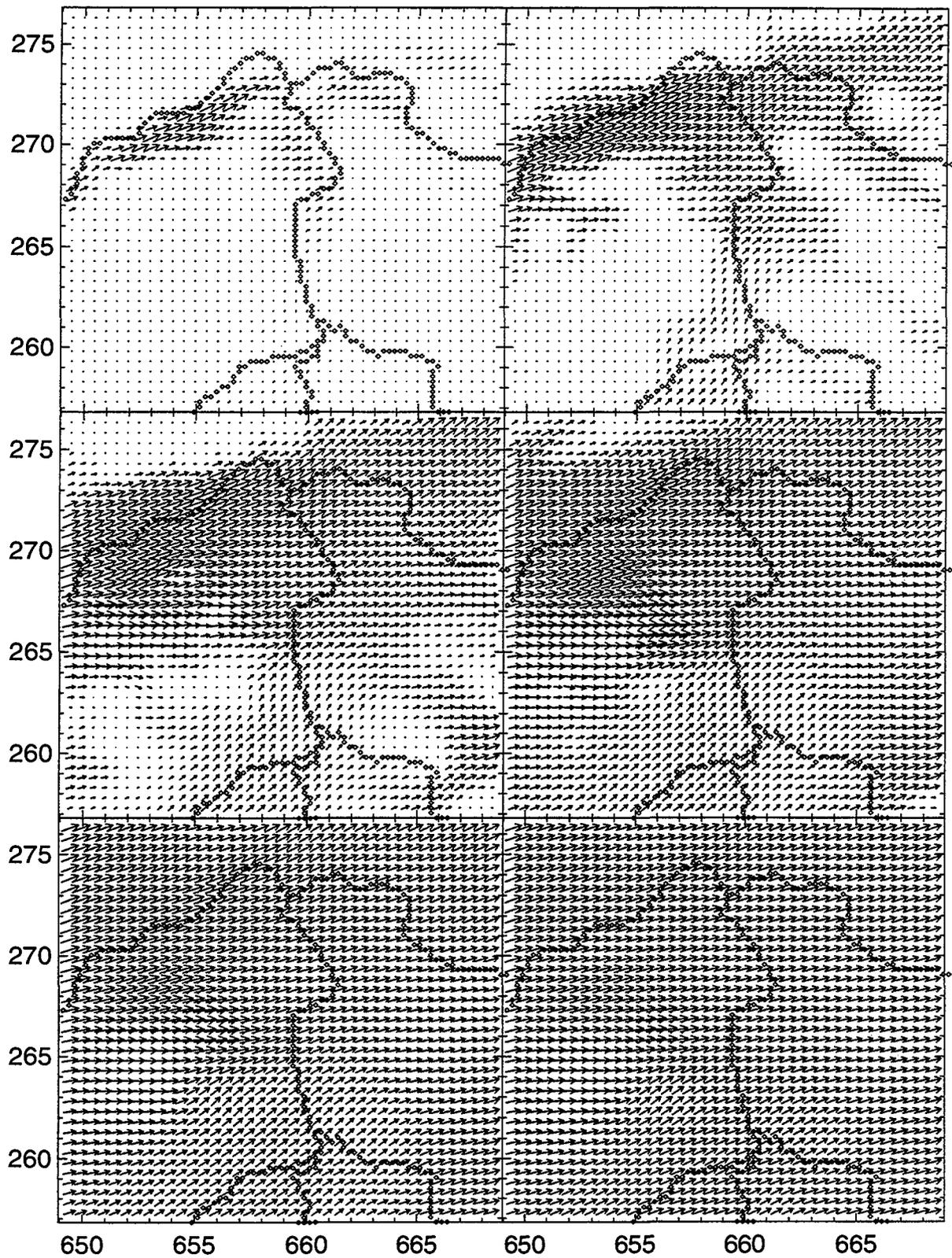
**Figur 15.i) Wie Figur 15.a), jedoch für die Klasse 9. Die maximale Windgeschwindigkeit beträgt 1.61 m/s (normierter Wind).**



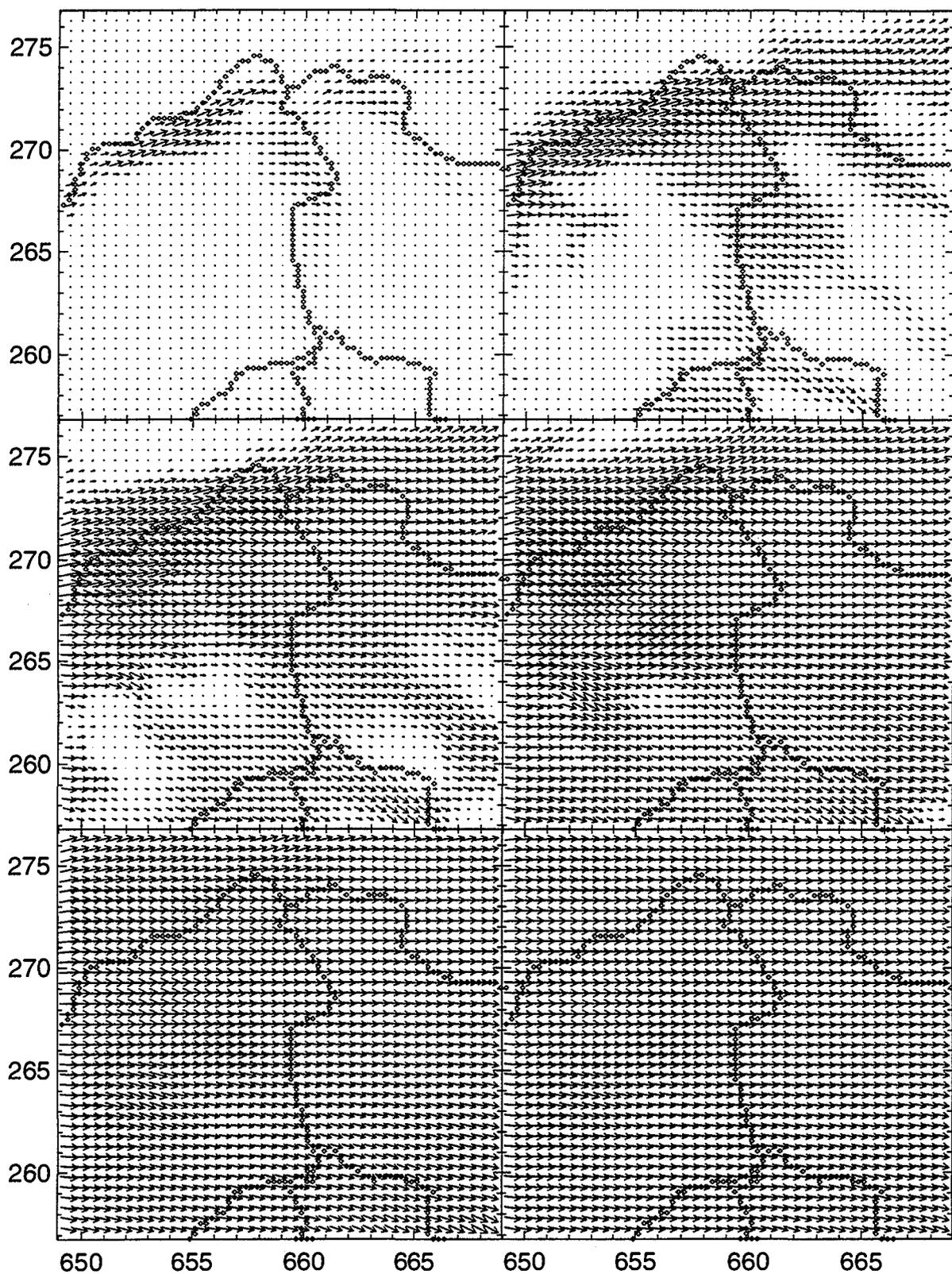
Figur 15.j) Wie Figur 15.a), jedoch für die Klasse 10. Die maximale Windgeschwindigkeit beträgt 1.85 m/s (normierter Wind).



**Figur 15.k) Wie Figur 15.a), jedoch für die Klasse 11. Die maximale Windgeschwindigkeit beträgt 1.90 m/s (normierter Wind).**



Figur 15.1) Wie Figur 15.a), jedoch für die Klasse 12. Die maximale Windgeschwindigkeit beträgt 2.65 m/s (normierter Wind).



Figur 15.m) Wie Figur 15.a), jedoch für die Klasse 13. Die maximale Windgeschwindigkeit beträgt 2.40 m/s (normierter Wind).

## **7 Berechnung von Ausbreitungsszenarien**

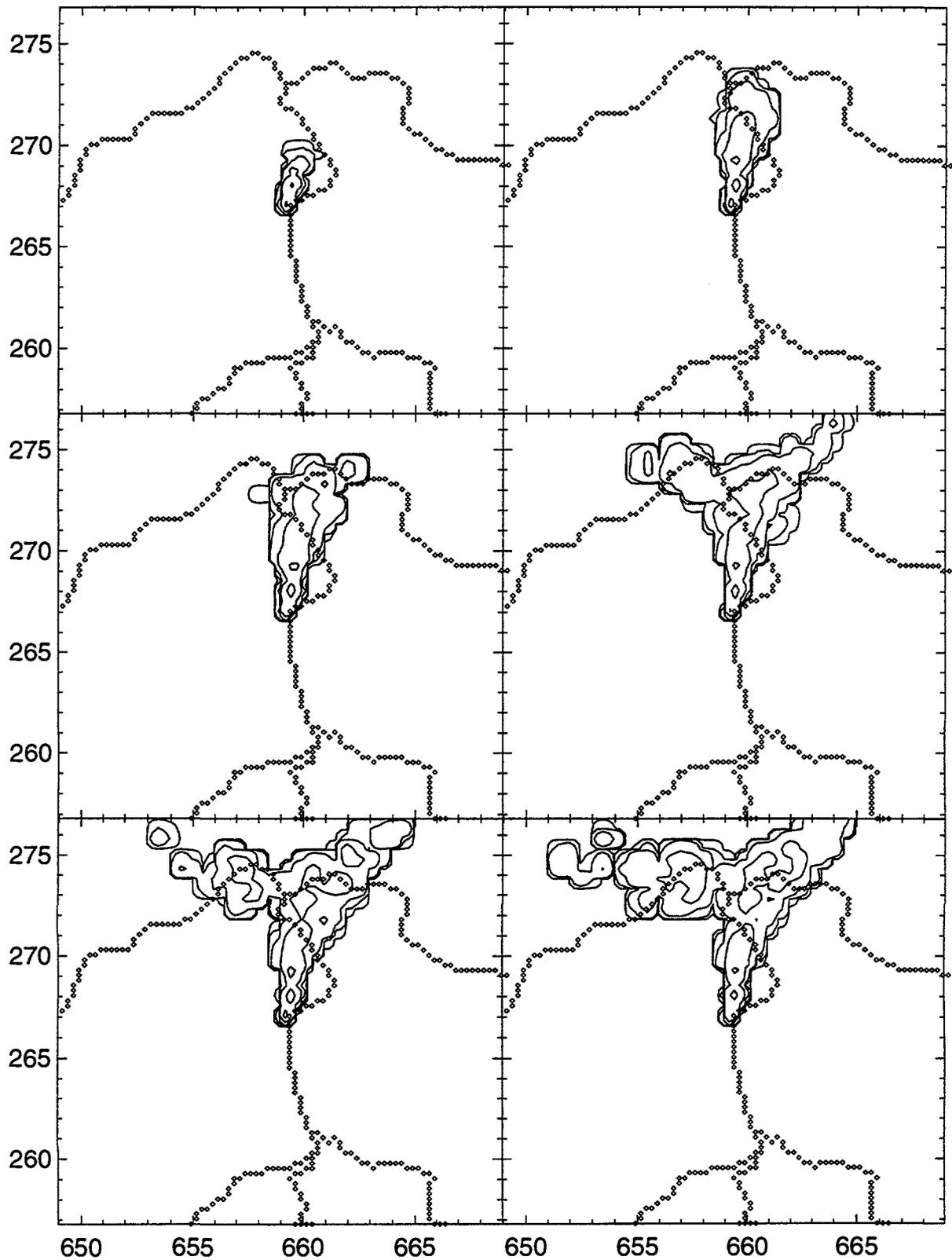
### **7.1 Ausbreitung unter der Annahme anhaltender Winde bei gleicher Windklasse**

Nach der im vorangehenden Kapitel beschriebenen Berechnung von divergenzfreien Windfeldern je Klasse lässt sich eine Ausbreitungsrechnung anschliessen, die eine typische Situation bei der entsprechenden Windklasse zeigt. Dieser Ausbreitung, wenn sie als Verlängerung der aktuellen Windsituation in die Zukunft aufgefasst wird, liegt somit die Annahme der Persistenz der in Echtzeit diagnostizierten Windfeldklasse zugrunde.

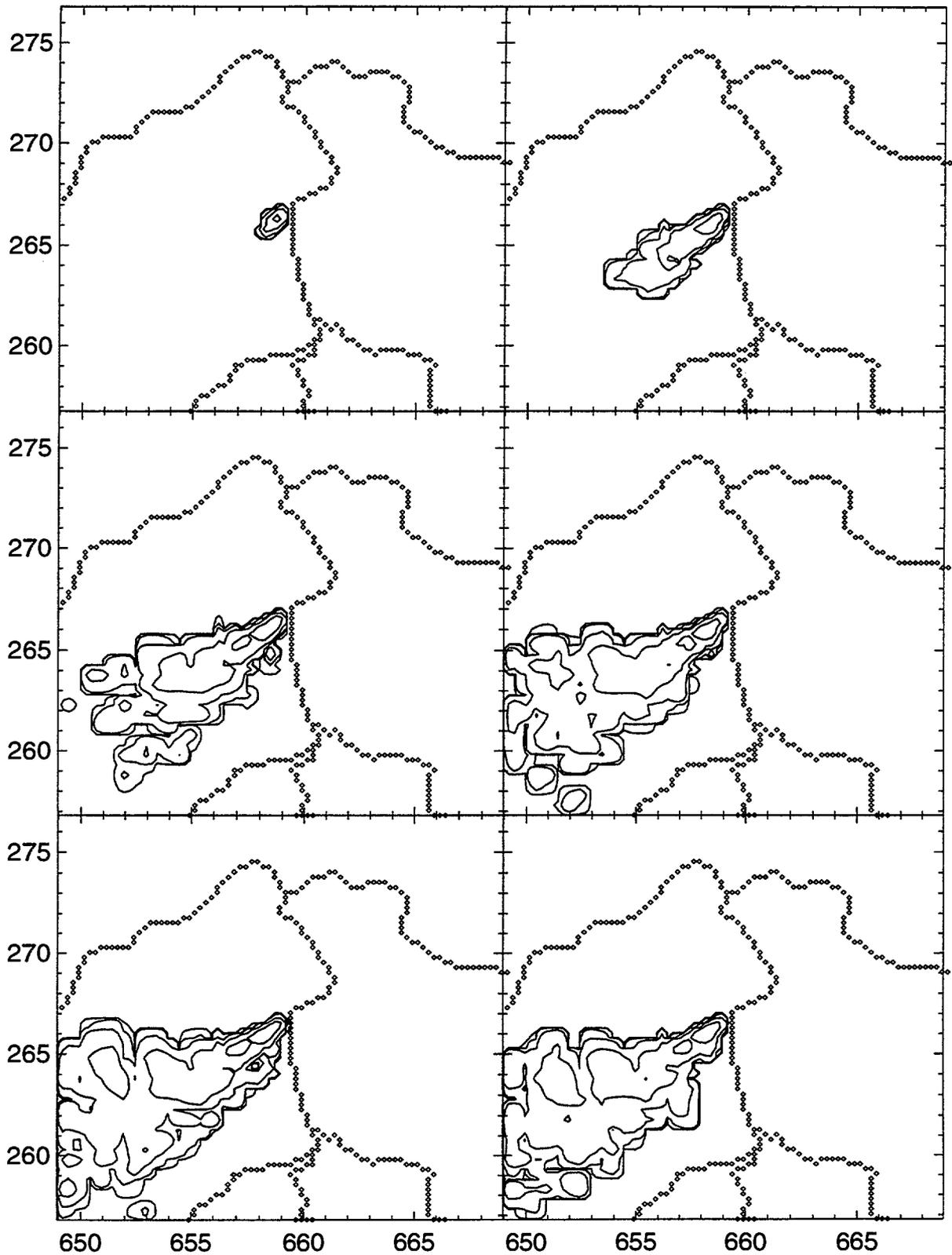
Die Berechnung der Ausbreitung wurde im Anschluss an die Modelle MEDIC und MATHEW mit dem Modell ADPIC durchgeführt, das ebenfalls vom Lawrence Livermore Nat. Lab., California, stammt. Das Modell beruht auf einem Partikel-Trajektorien-Modell, das nach der Monte-Carlo-Methode vorgeht und ein Ensemble von Trajektorien berechnet, bei dem nebst dem Wind noch eine mit der herrschenden Turbulenz normierte, zufallsgenerierte Abweichung bei jedem Zeitschritt angenommen wird. Die getroffenen Annahmen für die Quelle, für die Turbulenzparameter und die Grössen zur Spezifizierung des Zustandes der planetaren Grenzschicht lauten:

- Startort der hypotetischen Quelle: Paul Scherrer Institut, Villigen
- Dauer der Emission: 24 Stunden
- Ausgabe-Intervall: jede halbe Stunde
- Anzahl emittierter Partikel: 10000
- Emissionshöhe 70 m
- Mischschichthöhe 700 m, zeitunabhängig

Aus Platzgründen muss verzichtet werden, die gesamte Anzahl der Klassen darzustellen. Die beiden interessantesten Klassen, 4 und 11, wurden ausgewählt und sind in Figur 16 dargestellt. Die Darstellung erfolgt jeweils in Stundenschritten, beginnend mit der Situation eine Stunde nach dem Beginn der Emission. Der weitere Verlauf der Emission sprengt den Rahmen des gewählten Kartenausschnittes. Die unterschiedliche Ausbreitung eignet sich gut, um die einzelnen Klassen zu charakterisieren. Im Abschnitt 7.3. wird diese Charakterisierung vorgenommen.



**Figur 16.a) Ausbreitung einer hypothetischen Quelle am Standort der Station 32 (PSI) bei Windklasse 4 nach einer bis 6 Stunden in Zeitabständen von je einer Stunde, dargestellt mit Isolinien bei jeder Zehnerpotenz von 0.0001 bis 0.1, relative Einheiten.**



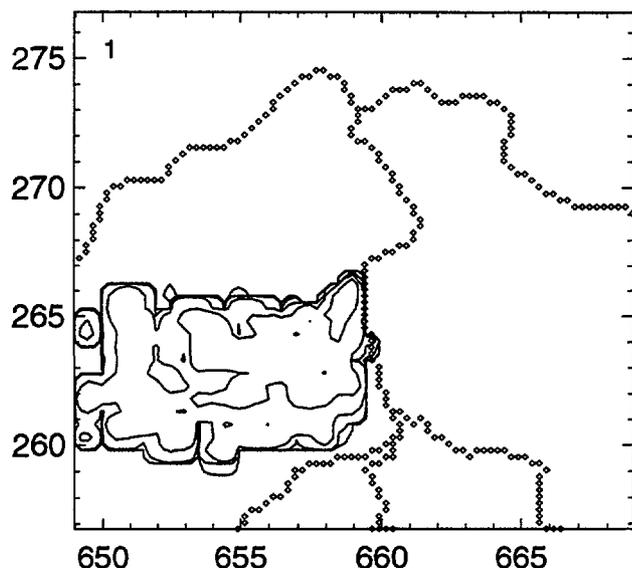
Figur 16.b) Wie Figur 16.a), jedoch für die Klasse 11.

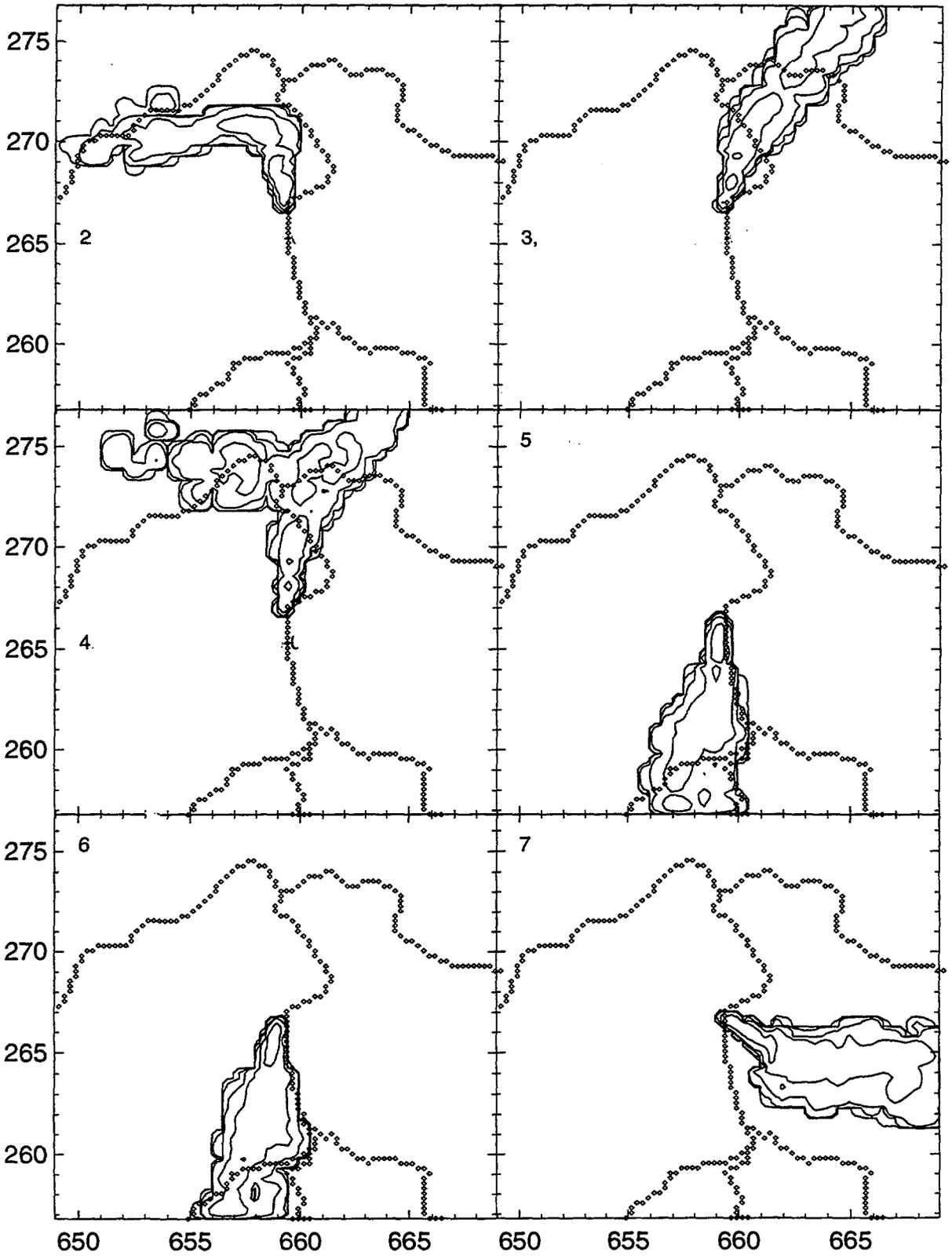
## 7.2 Berechnung klassentypischer Ausbreitungssituationen

Um die einzelnen Klassen charakterisieren zu können sind in der Figur 17 die Ausbreitungssituationen für alle 13 Klassen jeweils 6 Stunden nach Beginn einer hypothetischen Emission aufgezeichnet. Im Abschnitt 7.3. folgt eine ausführliche Diskussion der Klassenunterschiede, die sich aufgrund der Figur 17 sehr deutlich charakterisieren lassen.

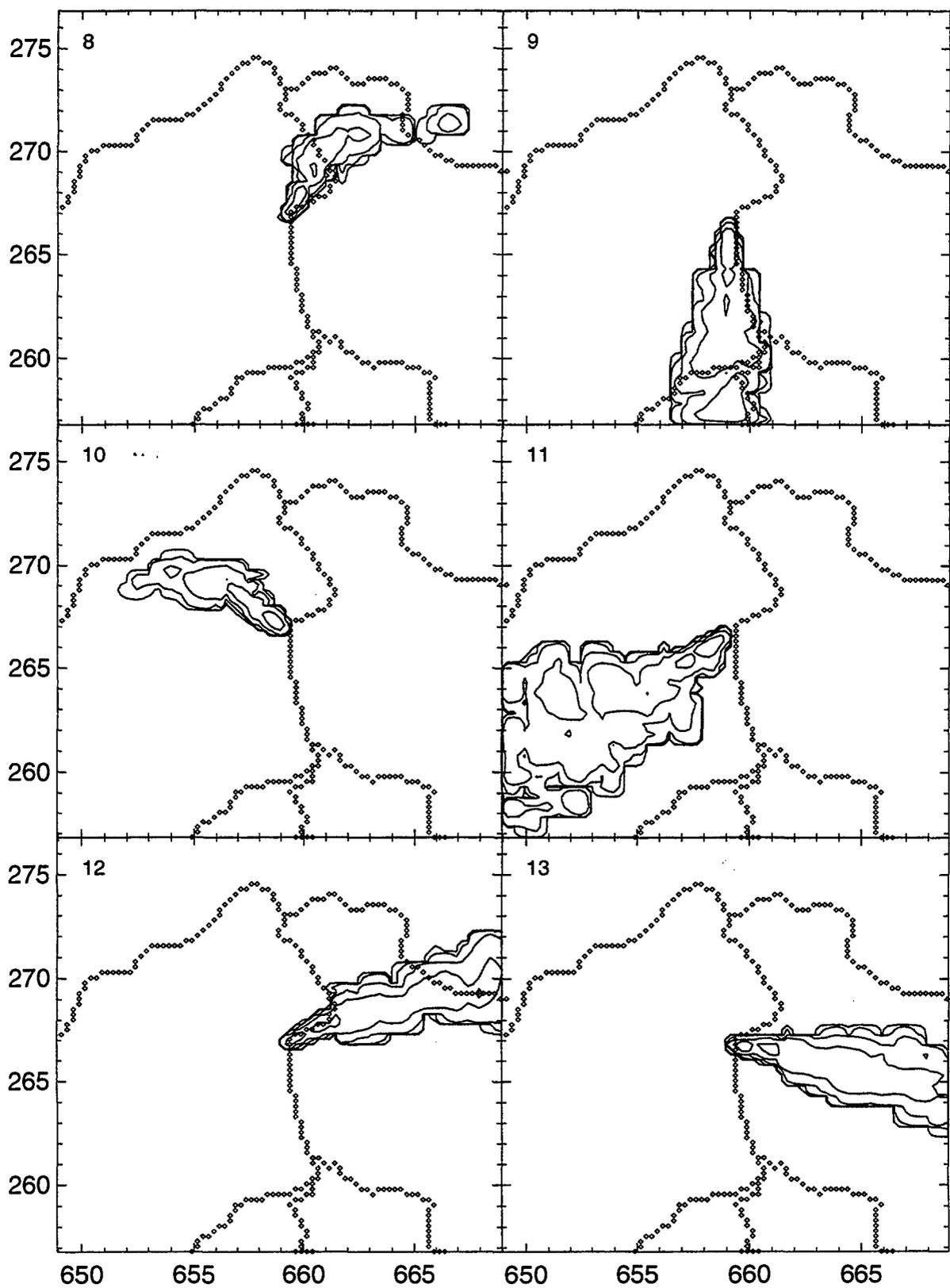
Mit der Figur 17 liegt für alle Klassen die typische Ausbreitung von Luftfremdstoffen aus einer hypothetischen Quelle bei der Station 32 (PSI) unter der Annahme der Persistenz der aktuell herrschenden Windklasse vor. Damit ist eine erste Einschätzung der Lage möglich, solange die Windklasse nicht ändert. Es soll im Abschnitt 7.4. ein Vorschlag zur Prognostizierung von Windfeldklassen aufgezeigt werden.

**Figur 17. Ausbreitung einer hypothetischen Quelle am Standort der Station 32 (PSI) nach 6 Stunden für alle Windklassen (Angabe der Klassennummer am linken Rand), dargestellt mit Isolinien bei jeder Zehnerpotenz von 0.0001 bis 0.1, relative Einheiten.**





Fortsetzung der Figur 17.



Fortsetzung der Figur 17.

### 7.3 Die Charakterisierung der 13 Windklassen

Überblickt man die Wind- und Ausbreitungsfelder der Figuren 15 und 17 des vorherigen Kapitels und die in der Figur 3 gegebenen mittleren Windwerte und die zugehörigen Streuungen je Station, so wird eine Charakterisierung der Windfelder anhand herausragender und gut unterscheidbarer Strömungsmuster möglich. Im folgenden ist diese Charakterisierung klassenweise zusammengestellt und jeweils mit einer prägnanten Kurzform überschrieben.

**1. Schwache NE-Lage mit Konvergenzzone im unteren Aaretal.**

Das Windfeld der Figur 15.a) zeigt in den unteren 3 Niveaus die durch Rheintal und Aaretal kanalisierten Strömungen. Die höhergelegenen Windrichtungen (ab 4. Niveau) in der SE-Ecke des Untersuchungsgebietes zeigen von Osten her eine Einströmung, die sich mit dem Nordwind in der NE-Ecke im Bereich des unteren Aaretals in einer Konvergenzzone verbindet. Im obersten der dargestellten Niveaus verliert die Strömung bereits mehrheitlich den topographischen Einfluss und zeigt die NE-Lage an.

**2. SW-Lage mit Ostwind im Rheintal unterhalb der Aaremündung.**

Die Höhenwinde aus SW werden in Figur 3 aufgrund der umliegenden hochgelegenen Stationen deutlich. Im Ausschnitt mit der Windfeldberechnung (Figur 15.b) zeigt sich diese Höhenströmung durch eine bis ins oberste Niveau durch die Topographie abgelenkte Süd-Strömung. Markant tritt in den untersten Niveaus die im Rheintal schön beobachtbare Gegenströmung auf. Aufgrund abfließender Bewegungen vom Schwarzwald her ergibt sich mit dem Südwind im unteren Aaretal eine ausgeprägte Konvergenzzone.

**3. Durchgehende SSW-Lage.**

Die SSW-Strömung dieser Klasse ist, wie aus Figur 3 und Figur 15.c) ersichtlich ist, so dominant, dass nur wenig topographisch induzierte Abweichungen auftreten: So etwa fällt die kanalisierende Wirkung des Aaretals nach dem Zusammenfließen von Aare, Reuss und Limmat bis in grössere Höhen auf.

**4. SW-Lage mit Bifurkation bei der Aaremündung**

Aus der Figur 3 wird die SW-Lage aufgrund der hochgelegenen Stationen durchwegs sichtbar. Im kleineren Ausschnitt der Figur 15.d) zeigt sich zusätzlich die über alle Niveaus hinweg feststellbare Aufteilung der Strömung vor dem Schwarzwald, also im Bereich der Aaremündung. Offensichtlich bildet der Schwarzwald bei dieser Windklasse eine Art Blockade, die die Strömung zur Teilung zwingt. Diese topographisch induzierte Divergenzzone macht sich bis ins oberste Niveau der Darstellung in Figur 15.d) bemerkbar.

### 5. **N-Lage**

Die Figur 3 zeigt Höhenwinde, die auf eine Bisenlage (NE-Winde) schliessen lassen. Eine abfliessende Bewegung vom Schwarzwald her mit Nordwind begleiten diese Lage. Bei den Bodenstationen, die in Tälern liegen, zeigt sich eine entsprechende Ablenkung in Talrichtung. Aufgrund der Figur 15.e) wird deutlich, dass dies im unteren Aaretal zu einem Nordwind führt, wogegen das Rheintal unterhalb der Aaremündung NE-Wind anzeigt. So erklärt sich auch die Divergenzzone im Bereich der Aaremündung. Nördlich des Zusammenflusses von Aare, Reuss und Limmat konvergieren die Nordwinde des Aaretals mit den E-Winden der Bisenlage, was sich bis ins oberste Niveau feststellen lässt.

### 6. **NE-Lage mit Süd-Kanalisation in den Nord-Süd verlaufenden Tälern.**

Dieser Klasse liegt wiederum eine Bisenlage zugrunde, wie aus den Höhenwinden in Figur 3 und Figur 15.f) hervorgeht. Sie muss im Vergleich zur Klasse 11 (Figur 15.k) auf Unterscheidungsmerkmale hin untersucht werden: Auffallend ist in den untersten 3 Niveaus der Figur 15.f) die Kanalisation durch das untere Aaretal und in Figur 3 die stärkere Variabilität von Station zu Station im Vergleich zu Klasse 11.

### 7. **NW-Lage.**

Die aus den Höhenstationen der Figur 3 ableitbare NW-Richtung der hohen Luftschichten wird zum Boden hin markant durch das Rhein- und Limmattal kanalisiert, wie die unteren 4 Niveaus der Figur 15.g) zeigen. Im SW-Bereich des Untersuchungsgebiets lässt sich auch eine südliche Umströmung der Hügel feststellen, die Strömung nimmt dort eine Wellencharakteristik an, die bis ins oberste Niveau sichtbar bleibt. Generell verliert sich der Einfluss der Topographie mit zunehmender Höhe, ohne jedoch bis zum obersten der angezeigten Niveaus gänzlich zu verschwinden.

### 8. **SW-Lage mit SW-Wind im Rheintal unterhalb der Aaremündung.**

Die Klasse 8 zeigt aufgrund der Figur 3 für den Höhenwind eine SW-Strömung ähnlich derjenigen in Klasse 2. Jedoch wird der Unterschied zur Klasse 2 vor allem im Rheintal unterhalb der Aaremündung deutlich (Figur 15.h): Die Klasse 8 weist in diesem Bereich eine SW-Strömung auf, wogegen in Klasse 2 die Gegenströmung auftritt. Im SW-Teil des Untersuchungsgebiets wird die Strömung durch die Hügel aufgeteilt, was zu einer starken Divergenzzone in diesem Gebiet führt.

### 9. **NE-Lage mit Konvergenz im Südbereich des Untersuchungsgebietes.**

Die Höhenwinde in Figur 3 zeigen hier im Osten NE-Winde, im Westen dagegen eher NW-Winde an. Dies lässt sich bis zum Boden hin beobachten, wie in Figur 15.i) deutlich wird: So ist bereits im 3. Niveau eine deutliche Konvergenz der Winde sichtbar, was bis zum obersten der dargestellten Niveaus gilt.

**10. SE-Lage.**

Die Höhenwinde zeigen bei den Höhenstationen der Figur 3 mehrheitlich SE-Wind, allerdings treten auch schwächere NW-Winde auf. In der Figur 15.j) lassen sich diese SE-Winde ebenfalls ablesen, wobei in tieferen Schichten eine topographisch induzierte Ablenkung durch das Rheintal unterhalb der Aaremündung deutlich wird.

**11. NE-Lage.**

Die Höhenwinde zeigen durchwegs NE-Winde an, was auf eine Bisenlage schliessen lässt. Ebenfalls im bodennahen Bereich weichen nur wenig Stationen von dieser NE-Strömung ab. Wie die Figur 15.k) zeigt, wird dadurch das Windfeld recht homogen und zeigt nur im Bereich der Hügel des SW-Teils einige topographisch bedingte Unregelmässigkeiten.

**12. WSW-Lage.**

In Figur 3 zeigen die Höhenwinde meist in Übereinstimmung mit den Bodenwinden eine WSW-Richtung des Windes an. Einzig im Rheintal unterhalb der Aaremündung wirkt sich das Tal kanalisierend aus. Die Figur 15.l) zeigt ein recht homogenes Strömungsmuster, wesentliche Irregularitäten sind einzig über dem stark hügeligen Gelände der SW-Ecke des Untersuchungsgebiets sichtbar.

**13. W-Lage mit Divergenzzone entlang dem Rhein.**

Die Windrichtungen der Figur 3 zeigen bereits ein sehr einheitliches Strömungsmuster, das auf eine Divergenzzone entlang dem Rhein oberhalb der Aaremündung weist. Diese Charakteristik wird auch in Figur 15.m) in den unteren Niveaus deutlich und verliert sich mit zunehmender Höhe. Auf den obersten der dargestellten Niveaus geht das Muster schliesslich in eine homogene W-Strömung über.

Wie aus den bewertenden Darstellungen der Figuren 12 bis 14 hervorgeht, sind bei einer bestimmten Wahl repräsentativer Stationen noch Fehlidentifikationen von Windklassen möglich. Eine Analyse dieser Fehlidentifikationen im Licht der betrachteten Klassencharakteristiken führt auf zusätzliche Kriterien zur Klassenidentifikation aufgrund herausragender Merkmale einzelner Stationen, die durch die Distanzbildung über alle repräsentativen Stationen verwischt wurden. So zeigt sich beispielsweise eine oft beobachteten Gegenströmung im Rheintal. Diese Tatsache liesse sich durch Berücksichtigung einer Stationen im Rheintal zu einer Verbesserung der Trefferquoten heranziehen und sollte deshalb in Zukunft einer genauen Prüfung unterzogen werden. Andererseits heben sich Höhenwinde oft deutlich gegenüber Bodenwinden ab, sodass eine getrennte Bewertung einer einzelnen, allein für das Höhenwindfeld repräsentativen Station empfehlenswert ist. In der folgenden Zusammenstellung sind einige Verbesserungsvorschläge für die wesentlichen Fehldiagnosen angegeben. Diese Vorschläge ergeben sich aus der bewertenden Darstellung der Figur 13.

1. **Schwache NE-Lage mit Konvergenzzone im unteren Aaretal.**  
Die Fehldiagnosen in dieser Klasse weisen oft auf die Klasse 10, deren Distanz zur Klasse 1 klein ist. Jedoch ergibt sich aus der Darstellung in Figur 4, dass sich diese beiden Klassen unterschiedlichen Tages- bzw. Nachtzeiten zugehören. Aufgrund dieses Unterscheidungsmerkmals liesse sich eine Verbesserung der Identifikation erhoffen.
2. **SW-Lage mit Ostwind im Rheintal unterhalb der Aaremündung.**  
Abweichungen der Trefferquote zeigen sich durch die Ansprache der Klasse 4 in 20 Fällen. Diese Fehlidentifikation ist allerdings in Anbetracht der äusserst geringen Distanz der beiden Klassen nicht von grosser Bedeutung.
3. **Durchgehende SSW-Lage.**  
Die Klasse 4 wird hier 10 mal fälschlicherweise identifiziert. Hier kommt das spezielle Verhalten der Gegenströmung im Rheintal unterhalb der Aaremündung zustatten. So könnte wohl allein die Information der Windrichtung in Sisseln (Station 2) zu einer Diskriminierung der beiden Klassen herangezogen werden.
4. **SW-Lage mit Bifurkation bei der Aaremündung**  
Symmetrisch zur vorhergehenden Klasse wird hier die Klasse 3 in 15 Fällen fehldiagnostiziert. Damit kann auch das selbe Argument zu einer Verbesserung führen.
5. **N-Lage**  
Diese Klasse weist kaum Fehlidentifikation auf, sie ist also mit grosser Sicherheit identifizierbar.
6. **NE-Lage mit Süd-Kanalisation in den Nord-Süd verlaufenden Tälern.**  
Hier tritt manchmal die Klasse 9 als Fehlidentifikation auf. Wie im Falle der Klasse 1 kann auch hier der Tag-Nacht-Unterschied im Auftreten dieser beiden Klassen zu einer Verbesserung genutzt werden.
7. **NW-Lage.**  
Die Identifikation der Klasse 12 anstelle der richtigen Klasse 7 ist aus den bisherigen Erfahrungen nicht erklärlich, jedoch liegen die Klassen anhand ihrer Distanz nicht weit auseinander.
8. **SW-Lage mit SW-Wind im Rheintal unterhalb der Aaremündung.**  
Die Fehlidentifikation der Klasse 12 ist zwar sehr selten, doch ist in der Berücksichtigung der Station Sisseln oder Effingen eine Chance zur weiteren Verbesserung gegeben.
9. **NE-Lage mit Konvergenz im Südbereich des Untersuchungsgebietes.**  
Die Klasse ist recht eindeutig identifizierbar.

**10. SE-Lage.**

Die Fehlidentifikation als Klasse 11 ist in 17 Fällen aufgetreten. Dieser Fehler kann durch eine auf die Stationen Uetliberg und Lägeren beschränkte Betrachtung der von diesen hochgelegenen Stationen angezeigten Windrichtungen (sog. "Höhenwindkriterium") reduziert werden.

**11. NE-Lage.**

Symmetrisch zur vorhergehenden Klasse wird hier die Klasse 10 einige Male fehlidentifiziert. Diesem Fehler kann entsprechend mit dem selben Höhenwindkriterium begegnet werden. Eine höhere Fehlerquote von 25 trifft auf die Klasse 9. Hier kann allerdings wiederum die Tatsache der Gegenströmung im Rheintal zu Hilfe kommen. Die Station Sisseln (Nummer 2) wird auch hier die besten Diskriminierungsergebnisse liefern.

**12. WSW-Lage.**

Symmetrisch zur Fehlidentifikation der Klasse 12 bei der wahren Klasse 8 kann auch hier die Station Sisseln oder Effingen zur Verbesserung herangezogen werden. Grössere Fehler treten durch die Fehlidentifikation der Klasse 13 auf. Wie im vorhergehenden Fall kann auch hier ein Höhenwindkriterium eine Verbesserung bringen.

**13. W-Lage mit Divergenzzone entlang dem Rhein.**

Wiederum liegt der Fall mit der Fehlidentifikation der Klasse 12 symmetrisch zum vorhergehenden. Abhilfe kann somit aus der Anwendung eines Höhenwindkriteriums erhofft werden.

Allein schon die Tatsache, dass eine Charakterisierung der Winde in konsistenter Weise gelingt, weist darauf hin, dass das Vorgehen der Klassifizierung einer physikalischen Ursächlichkeit Rechnung trägt. Ebenso basieren die möglichen Verbesserungsvorschläge auf physikalisch plausiblen Überlegungen.

## **7.4 Möglichkeiten für eine künftige Prognose der Ausbreitung aufgrund eines prognostischen Windfeldmodells**

Wie bereits dargestellt, ist eine Prognose aufgrund einer regelmässigen Sukzession von Windfeldklassen nicht möglich. Dies zwingt zu anderen Lösungen, wenn nicht bei der Persistenzprognose halt gemacht werden darf, die ja aufgrund der Persistenzanalyse nur selten mehrere Stunden gilt. Ein gangbarer Weg ist durch Verwendung eines Modells gegeben, das auf den Rechenmodellen der Wetterdienste basiert. So wird von der SMA täglich 2 mal ein hochauflösendes numerisches Modell für eine Prognoseperiode von 48 Stunden gestartet. Das sogenannte "Schweizer Modell" (SM) wird vom grossräumigen Wetterlagenmodell gesteuert und liefert eine stündliche Zeitauflösung bei einer räumlichen Auflösung von 15 km. Die Ausgabedaten dieses Modells können laufend genutzt werden, um den zeitlichen Verlauf der Winddaten an den Orten aller Stationen des vorliegenden Untersuchungsgebiets räumlich zu interpolieren. Dadurch ergibt sich die Möglichkeit, Prognosen für die Abfolge der künftigen Windfeldklassen herzuleiten.

In einer ersten Studie hat sich gezeigt, dass eine Reihe von Messstationen des ANETZes von den interpolierten SM-Windfeldern sehr gut vorhergesagt werden. Insbesondere die Windrichtung liefert Abweichungen von wenigen 10 Grad. Je nach Lage der Windmessstation unterschätzen die Modellinterpolationen die Windgeschwindigkeiten, was darauf zurückzuführen ist, dass diese Windstationen oft an hochgelegenen Bergkämmen liegen, wo der Wind sehr lokal durch die Überströmungssituation beschleunigt wird. Die vom Modell prognostizierten Windwerte besitzen aber eine Repräsentativität entsprechend der Gitterweite von 15 km. Es muss daher untersucht werden, in welchem Masse diese Abweichung für die einzelnen Stationen systematisch ist und somit korrigiert werden kann.

Eine weitere wesentliche Untersuchung wird sich anschliessen müssen, die aufgrund des vorgehend dargestellten Datensatzes im Vergleich mit Modellrechnungen eruiert, welche Stationsdaten mit genügender Genauigkeit vorausgesagt werden, um die Qualität der Windklassierung zu gewährleisten. Doch scheint dieser Weg der einzig gangbare zu sein, um zu einer sinnvollen Prognose über eine Zeitspanne der Grössenordnung eines Tages zu gelangen.

## 8 Verdankungen

Die vorliegende Studie wurde im Auftrage der HSK durch das Bundesamt für Energiewirtschaft der Schweiz finanziert. Im besonderen sei die Unterstützung durch den Projektbegleiter der HSK, Herrn Dr. G. Prohaska gedankt. Für wertvolle Vorarbeit und Diskussionen geht unser Dank auch speziell an die Herren Dr. F. Gassmann und Dr. P. Kaufmann des PSI. 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. Der Schweizerischen Meteorologischen Anstalt, der Firma La Roche in Sisseln, dem Elektrizitätswerk in Laufenburg und dem Deutschen Wetterdienst verdanken wir die Daten der Routinemessungen. Die numerischen Modelle des Livermore Nat. Lab., Californien, wurden für diese Studie freundlicherweise zur Verfügung gestellt.

## 9 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.

- Gassmann F., Feller W., Kaufmann P., Megariti V., Kamber K., Muntwiler M., Moussiopoulos N. (1993): Development of a tool for air pollution management and emergency response. *in: Zanetti P. et al. (eds): Air Pollution, 623-636.*
- Kaufmann, P. (1996): Bodennahe regionale Windfelder ueber komplexer Topographie. *Diss, ETH Nr. 11565, 1996.*
- Kaufmann P., Weber R.O. (1995): Wind field classification in complex terrain. *7th Meeting on Mount meteorol., Breckenridge, CO July 1995.*
- Kaufmann P., Weber R.O. (1994): Cluster analysis of wind fields in complex terrain. Proc. Conf. Air Pollution '94, Barcelona, 1994. *in: Baldasano J.M. et al. (ed.): Pollution control and monitoring, 253-260.*
- 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.
- Weber R.O., Kaufmann P. (1995): Automated classification scheme for wind fields. *J. Appl. Meteorol., 34, 1133-1141.*