



universität
wien

DIPLOMARBEIT

Titel der Diplomarbeit

Feuchteflussdivergenz aus COPS-Daten

angestrebter akademischer Grad

Magistra der Naturwissenschaften (Mag. rer.nat.)

Verfasserin / Verfasser:	Felizitas Zeitz
Matrikel-Nummer:	0204978
Studienrichtung (lt. Studienblatt):	A 415
Betreuerin / Betreuer:	o. Univ.-Prof. Dr. Reinhold Steinacker

Wien, im August 2009

Zusammenfassung

Konvektive Ereignisse zählen in den Sommermonaten zu den größten Naturgefahren in unseren Breiten. Deshalb ist eine genaue Vorhersage dieser sowohl für die Wissenschaft als auch für die breite Öffentlichkeit von großer Bedeutung. Daher soll die Genauigkeit von Vorhersagemodellen, speziell im Bereich des konvektiven Niederschlages, laufend verbessert werden.

Im Rahmen der Feldmesskampagne COPS (convective and orographically induced Precipitation Study) wurde vom Institut für Meteorologie und Geophysik der Universität Wien im Sommer 2007 ein eigenes Messnetz aufgebaut. Unter anderem lieferten 100 HOBO Boden-Messstationen 1-minütige Messwerte für Temperatur, Feuchte, Wind, Windböen, Druck und Niederschlag.

In dieser Arbeit wurde speziell die Feuchteflussdivergenz untersucht, da die Feuchteflussdivergenz als wesentlicher Indikator für konvektiven Niederschlag betrachtet werden kann. In einem ersten, wesentlichen Schritt wurden dafür die Winddaten bearbeitet. Aus den in 3 m Höhe gemessenen Winddaten musste auf den 10-m-Wind mit Hilfe des logarithmischen Windprofils extrapoliert werden. Dazu benötigt man die Rauheitslänge jeder Station, da die Beschaffenheit der Umgebung des Aufstellortes der Messstation einen wesentlichen Einfluss auf das logarithmische Windprofil hat. Anschließend wurden diese Daten den Rohdaten, gemessen in 3 m Höhe, gegenübergestellt und analysiert.

In einem zweiten Schritt wurde mit Hilfe des Analyseprogrammes VERA (Vienna Enhanced Resolution Analysis) (Steinacker, et al., 2000) die Feuchteflussdivergenz aus diesen beiden Datensätzen für besondere Zeitpunkte berechnet. Speziell untersucht wurden die IOPs (Intensive Observation Period) 8b, 9c, 13a und 13b, welche während des 6. COPS Workshops als besonders interessant eingestuft wurden.

Abschließend wurde noch der Zusammenhang zwischen der Feuchteflussdivergenz und Niederschlagsereignissen qualitativ untersucht. Es wurden einzelne ergiebige Niederschlagsereignisse ausgewählt und analysiert. Aus dem zu erwartenden Zusammenhang zwischen Feuchteflussdivergenz und Niederschlag wird versucht abzuleiten, ob sich ein Signal in der Feuchteflussdivergenz erkennen lässt, das dann in Vorhersagemodelle einfließen kann.

Abstract

In summer time, convective events are the major natural hazards in mid latitudes. Therefore, an exact prediction is of both, public and scientific, importance.

In the framework of the international project COPS the Department of Meteorology and Geophysics, University of Vienna established a field experiment in the Black Forest region in Germany. The department built up a meteorological network with 100 HOBO weather stations, measuring temperature, moisture, wind, wind gusts, pressure and precipitation every minute.

This work put the focus on the moisture flux in this area, considering especially wind data. As the wind was measured at a 3 m level, the wind information was extrapolated to 10 m height with the logarithmic wind profile. For this purpose, we needed the roughness length for each of the 100 weather stations, as the canopy has a main influence to the logarithmic wind profile.

Selected IOPs (intensive observation periods) have been chosen and the difference in signal of moisture flux divergence between the raw data and the modified data set was compared, also by using VERA.

Furthermore, we studied moisture flux patterns before, during and after precipitation events.

Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung	1
Abstract	3
1 Einleitung	7
1.1 Motivation.....	7
1.2 Gliederung der Arbeit.....	8
2 COPS	10
2.1 COPS – das Projekt	10
2.2 Aufstellung.....	12
2.3 Daten.....	15
2.4 IOPs	16
3 Modifikation des Datensatzes	18
3.1 Allgemeines	18
3.2 Logarithmisches Windprofil	20
3.2.1 Allgemeines	20
3.2.2 Rauhigkeitslänge	21
3.3 Mittelung.....	26
3.4 10 m Wind	28
4 Ergebnisse der Winddaten	30
4.1 IOP 8b (15. Juli 2007)	30
4.1.1 Großwetterlage.....	30
4.1.2 Stationen mit geringer Rauhigkeitslänge.....	32
4.1.3 Stationen mit unterschiedlichen Rauhigkeitslängen	36
4.1.4 Stationen mit hoher Rauhigkeitslänge.....	39
4.2 IOP 9c.....	44
4.2.1 Großwetterlage.....	44
4.2.2 Stationen mit geringer Rauhigkeitslänge.....	46
4.2.3 Stationen mit unterschiedlichen Rauhigkeitslängen	48
4.2.4 Stationen mit hoher Rauhigkeitslänge.....	50
4.3 IOP 13a.....	54
4.3.1 Großwetterlage.....	54
4.3.2 Stationen mit geringer Rauhigkeitslänge.....	56
4.3.3 Stationen mit unterschiedlichen Rauhigkeitslängen	58
4.3.4 Stationen mit hoher Rauhigkeitslänge.....	60

4.4	IOP 13b.....	63
4.4.1	Großwetterlage.....	63
4.4.2	Stationen mit geringer Rauigkeitslänge.....	65
4.4.3	Stationen mit unterschiedlichen Rauigkeitslängen	67
4.4.4	Stationen mit hoher Rauigkeitslänge.....	69
4.5	Zusammenfassung.....	73
5	Feuchteflussdivergenz	75
5.1	Theorie.....	75
5.2	VERA	77
5.3	Ergebnisse.....	81
6	Feuchteflussdivergenz und Niederschlag	91
6.1.	Vorgangsweise.....	91
6.2.	Ergebnisse.....	92
7	Zusammenfassung und Ausblick	96
8	Literaturverzeichnis.....	98
9	Lebenslauf.....	101

1 Einleitung

1.1 Motivation

Niederschlagsvorhersage ist nach wie vor eine Herausforderung in der Meteorologie. Speziell die genaue räumliche sowie zeitliche Vorhersage von Konvektion bleibt eine Hürde in der Kurzfristprognose für Unwetter (Banacos u. Schultz, 2005). Jährlich sterben Menschen durch Unwetter in Österreich; sowohl durch Blitzschlag als auch durch Sturm, Muren oder Hochwasser (Statistik Austria, 2008). Der volkswirtschaftliche Schaden durch Gewitter ist immens. Allein der von der Österreichischen Hagelversicherung bezifferte Hagelschaden für versicherte Flächen im Jahr 2008 betrug rund 100 Millionen Euro (Hagelversicherung, 2009).

Im Rahmen der Feldmesskampagne COPS sollte speziell der konvektive Niederschlag untersucht werden, um diesen besser in Vorhersagemodelle einfließen zu lassen. COPS ermöglichte es, einen Datensatz zu erheben, der sowohl in seiner räumlichen als auch zeitlichen Auflösung einzigartig ist. Aufgrund dieser Dichte an Daten konnten erstmals extrem kleine Skalen untersucht werden. 100 HOBO Messstationen lieferten über einen Zeitraum von etwas mehr als drei Monaten minütliche Messwerte von Temperatur, Druck, Wind, Windrichtung, Böen, Feuchte und Niederschlag. Die Messstationen waren in einem Raster von 12 Reihen zu je 8 Stationen im Abstand von etwa 1 km rund um die Ortschaft Deckenpfronn aufgebaut. Vier weitere Stationen wurden entlang des Teinachtals aufgebaut. Diese vielen Messstationen des Institutes für Meteorologie und Geophysik waren unter anderem mit Stangen mit einer Höhe von 3 m ausgestattet. In dieser Höhe waren die Windmessgeräte montiert. Zu diesem Thema ergaben sich zwei große Überlegungen. Einerseits werden in der Meteorologie Winddaten standardmäßig in einer Höhe von 10 m erhoben. Andererseits wurden, um das 1 x 1 km Aufstellraster aufrechtzuhalten, nicht immer WMO-konforme Aufstellorte gewählt. Um diesen Überlegungen Rechnung zu tragen, wurde der Wind mit Hilfe eines logarithmischen Windprofils auf 10 m

Höhe extrapoliert. Dazu benötigt man die Rauigkeitslänge jeder einzelnen Station. Diese Kategorisierung wurde für jede Station vorgenommen. Anschließend wurde untersucht, ob die 10 m Winddaten im Vergleich zu den 3 m Winddaten einheitlichere und somit für größere Gebiete repräsentative Ergebnisse liefern. Des Weiteren wurde auch die Feuchteflussdivergenz mit Hilfe von VERA sowohl mit den 3 m Daten als auch mit den 10 m Daten errechnet, grafisch dargestellt und qualitativ miteinander verglichen.

In einem letzten Schritt wurden spezielle Niederschlagsereignisse aus diesem immensen Datensatz selektiert und die Veränderung der Feuchteflussdivergenz bei eintretendem Niederschlag beobachtet. Ziel war es, ein Signal in der Feuchteflussdivergenz zu erkennen, welches zeitgerecht in Vorhersagen einfließen kann um den Niederschlag auch entsprechend zu prognostizieren bzw. um vor Gewitter zu warnen.

1.2 Gliederung der Arbeit

Diese Arbeit besteht aus insgesamt sieben Kapiteln. Kapitel 1 (Einleitung) dient dem Überblick über die gesamte Diplomarbeit.

Im Kapitel 2 (COPS) werden die allgemeinen Rahmenbedingungen beleuchtet. Generelle Informationen zur Messkampagne, Angaben zur Aufstellung der Messgeräte sowie zu den gewonnenen Daten werden hier gegeben.

Kapitel 3 (Modifikation des Datensatzes) beinhaltet die vorgenommenen Kategorisierung nach der Rauigkeitslänge und des vertikalen Hinderniswinkels, sowie alle Angaben zur Mittelung, um den Wind in 10m Höhe zu gewinnen. Theoretische Aspekte sowie praktische Ansätze werden hier erläutert.

Im Kapitel 4 werden die genauen Ergebnisse der Windanalysen vorgestellt. Jede einzelne untersuchte IOP wird sowohl von der Großwetterlage als auch von den mikroskaligen Ergebnissen her exakt analysiert.

Kapitel 5 (Feuchteflussdivergenz) beschäftigt sich zuerst mit der Theorie der Feuchte in der Atmosphäre; danach mit VERA, dem am Institut für Meteorologie und Geophysik der Universität Wien entwickelten Analyseverfahren. Im Anschluss werden die Ergebnisse der Feuchteflussdivergenz präsentiert und kommentiert.

Im Kapitel 6 (Feuchteflussdivergenz und Niederschlag) wird zu ausgesuchten Terminen gezeigt, wie sich die Feuchteflussdivergenz bei Einsetzen von Niederschlag verhält.

Kapitel 7 beinhaltet die Zusammenfassung der Ergebnisse, sowie einen Ausblick auf noch offene Fragen zu diesem Thema.

2 COPS

2.1 COPS – das Projekt

« The Convective and Orographically-induced Precipitation Study » (COPS), eine Feldmesskampagne innerhalb des deutschen Priority Programms 1167 „Quantitative Precipitation Forecast PQP (Praecipitatio Quantiativae Predictio)“ (COPS-Homepage, 2008), fand vom Juni bis zum August 2007 im Südwesten Deutschlands bzw. Osten Frankreichs statt. Das übergeordnete Ziel dieser Studie ist die Qualitätsverbesserung der Vorhersagen von orografisch induziertem, konvektivem Niederschlag durch 4-dimensionale Beobachtungen und Modellierung der Lebenszyklen von konvektiven Ereignissen (Wulfmeyer, et al., 2008). Institute und Wissenschaftler aus acht Ländern nahmen an der Kampagne teil, um die Entstehung von Konvektion in Mittelgebirgen zu untersuchen. Die quantitative Niederschlagsvorhersage in Gebirgsregionen ist für Modelle nach wie vor eine große Herausforderung und resultiert aus einer schwachen räumlichen und zeitlichen Vorhersagequalität. Zwei Fehler können für die COPS-Region in aktuellen Modellen identifiziert werden; im Luv wird die Niederschlagsmenge überschätzt und im Lee unterschätzt. Diese Fehler gelten sowohl für die Wettervorhersage als auch für Klimasimulationen. Ein weiteres Problem ist die inadäquate Wiedergabe des Tagesganges. Da das Einsetzen der Konvektion zu früh prognostiziert wird, wird auch das Einsetzen von konvektivem Niederschlag zu früh prognostiziert (Wulfmeyer, et al., 2008).

Abb. 2.1 zeigt die Region, in der die Messungen in Rahmen von COPS durchgeführt wurden. Das genaue Gebiet erstreckt sich über die Vogesen im östlichen Frankreich über das Rheintal bis zum Schwarzwald. In dieser Region gibt es einerseits die höchste Gewitteraktivität Deutschlands, andererseits die schlechteste Niederschlagsvorhersagequalität (Wulfmeyer, et al., 2008). Die roten Punkte in Abb. 2.1 zeigen die Lage der fünf Supersites und zwar von West nach Ost: Mastratzheim (Frankreich), Achern (Rheintal), Hornisgrinde, AMF Heselbach und Deckenpfronn.



Abb. 2.1 COPS- Region (COPS-Homepage, 2008)

Der Gerätepark des Institutes für Meteorologie und Geophysik war rund um die Supersite S (ganz im Osten des Bildes) aufgebaut und bestand aus folgenden Messgeräten:

- 100 automatische HOBO Wetterstationen
- 4 Sonic-Anemometer
- 2 automatische MAWS-Wetterstationen
- 1 Mikroregenradar
- 1 Energiebilanzsystem
- 1 Distrometer
- 1 Radiosondenmesssystem

In dieser Arbeit werden die Ergebnisse der HOBO-Messgeräte behandelt. Diese Geräte der Marke Onset zeichnen sich besonders durch ihre relativ einfache Handhabung, unkomplizierte Programmierung sowie ihr günstiges Preis/Leistungsverhältnis aus.

2.2 Aufstellung

Die Aufstellung der Messgeräte erfolgte in einem annähernd exakten Raster von 12 Reihen in West-Ost-Ausrichtung zu je 8 Geräten. 4 Geräte wurden noch zusätzlich entlang des Teinachtals aufgestellt. Die Nummerierung der Stationen erfolgt mit 1 für die südlichste und 12 für die nördlichste Reihe sowie mit .1 für die westlichste bis .8 für die östlichste Station in der jeweiligen Reihe. Das Gebiet der Aufstellung liegt im Lee des Schwarzwaldes, ca. 30 km südwestlich von Stuttgart, rund um die Ortschaft Deckenpfronn. Die rund 100 km² große untersuchte Region ist schwach verbaut. Wiesen und Felder sind vorherrschend. Die größte Ortschaft ist Deckenpfronn mit rund 3000 Einwohnern. Die Landschaft verläuft in sanften Hügeln mit einer mittleren Stationshöhe von 530 m (Stuhl, 2008).

Die genauen Koordinaten sowie die exakte Höhe der einzelnen Stationen sind der Tab. 2.1 zu entnehmen (Stuhl, 2008).

Station	Höhe [m]	geogr. Länge [°]	geogr. Breite [°]	Station	Höhe [m]	geogr. Länge [°]	geogr. Breite [°]
1.1	573.9	8.77839	48.60496	7.3	591.8	8.80345	48.66129
1.2	493.3	8.78825	48.60566	7.4	527.5	8.81777	48.66090
1.3	554.6	8.80833	48.60604	7.5	565.8	8.83003	48.66031
1.4	547.0	8.81655	48.60594	7.6	579.2	8.84286	48.66055
1.5	508.6	8.82973	48.60615	7.7	557.8	8.85387	48.65993
1.6	494.1	8.84416	48.60565	7.8	507.9	8.87030	48.66210
1.7	457.1	8.85977	48.60533	8.1	537.4	8.77464	48.67061
1.8	431.8	8.87208	48.60598	8.2	559.2	8.78978	48.66883
2.1	535.0	8.77501	48.61409	8.3	541.7	8.80286	48.66930
2.2	483.2	8.78873	48.61587	8.4	507.6	8.81649	48.67012
2.3	567.4	8.80500	48.61463	8.5	493.8	8.82884	48.67040
2.4	551.9	8.81849	48.61611	8.6	568.1	8.84434	48.66897
2.5	511.3	8.83043	48.61481	8.7	534.4	8.85711	48.67056
2.6	514.3	8.84380	48.61651	8.8	491.5	8.87136	48.66976
2.7	491.8	8.85778	48.61508	9.1	570.8	8.77528	48.67912
2.8	469.8	8.87402	48.61426	9.2	549.1	8.79322	48.67884
3.1	466.3	8.77589	48.62611	9.3	559.6	8.80411	48.67649
3.2	586.7	8.78832	48.62517	9.4	519.9	8.81763	48.68037
3.3	572.5	8.80355	48.62481	9.5	505.6	8.82937	48.67723
3.4	560.9	8.81564	48.62592	9.6	472.7	8.84315	48.67777
3.5	541.6	8.82728	48.62453	9.7	452.1	8.85792	48.67869
3.6	515.9	8.84383	48.62494	9.8	434.7	8.87259	48.67760

Station	Höhe [m]	geogr. Länge [°]	geogr. Breite [°]	Station	Höhe [m]	geogr. Länge [°]	geogr. Breite [°]
3.7	519.0	8.85439	48.62450	10.1	576.1	8.77748	48.68878
3.8	486.7	8.87425	48.62471	10.2	547.0	8.78851	48.68859
4.1	494.9	8.77687	48.63333	10.3	525.4	8.80334	48.68599
4.2	572.3	8.79003	48.63401	10.4	556.2	8.82209	48.68829
4.3	594.8	8.79941	48.63328	10.5	547.2	8.82795	48.68890
4.4	548.9	8.81767	48.63284	10.6	513.8	8.84363	48.68665
4.5	550.1	8.82904	48.63375	10.7	447.5	8.86209	48.68668
4.6	518.2	8.84313	48.63251	10.8	527.9	8.87190	48.68745
4.7	506.8	8.85451	48.63362	11.1	480.6	8.77743	48.69528
4.8	502.5	8.87295	48.63344	11.2	545.8	8.79114	48.69601
5.1	564.0	8.78000	48.64235	11.3	515.0	8.80449	48.69585
5.2	578.5	8.78903	48.64187	11.4	499.6	8.81634	48.69585
5.3	541.2	8.80162	48.64365	11.5	504.3	8.83159	48.69731
5.4	575.6	8.81799	48.64361	11.6	526.2	8.84576	48.69540
5.5	566.8	8.82893	48.64224	11.7	488.8	8.85547	48.69691
5.6	528.4	8.84426	48.64019	11.8	515.2	8.87401	48.69615
5.7	523.6	8.85899	48.63814	12.1	554.6	8.78291	48.70591
5.8	525.9	8.86834	48.64283	12.2	522.5	8.78946	48.70511
6.1	479.6	8.77784	48.65190	12.3	557.1	8.80351	48.70442
6.2	539.2	8.79074	48.65144	12.4	528.9	8.81431	48.70608
6.3	561.2	8.80449	48.65142	12.5	542.6	8.83037	48.70498
6.4	571.9	8.81672	48.65128	12.6	519.2	8.84353	48.70271
6.5	555.5	8.83037	48.65104	12.7	541.1	8.85550	48.70749
6.6	551.1	8.84178	48.65103	12.8	502.5	8.86857	48.70534
6.7	531.4	8.86028	48.65037	13.1	671.6	8.61363	48.67884
6.8	515.6	8.87287	48.65178	13.2	633.0	8.65362	48.68362
7.1	552.7	8.77801	48.66031	13.3	625.1	8.68311	48.67937
7.2	580.1	8.78898	48.65970	13.4	528.7	8.74198	48.68025

Tab. 2.1 Stationsübersicht mit Höhen- und Koordinatenangaben

Der genaue Aufstellplan (Abb. 2.2) zeigt leichte Abweichungen von einem 1 x 1 km Abstand. Diese Abweichungen ergaben sich aus mehreren Gründen. Als erster ist zu nennen, dass die Aufsteller versuchten, meteorologisch günstige Aufstellorte zu wählen. Im speziellen Fall bedeutete meteorologisch günstig: homogener Untergrund, keine vertikalen Hindernisse (speziell für die Windmessung) und flaches Gelände (keine Mulden und Hänge), sodass die Messwerte der Stationen für einen größeren Bereich repräsentativ sind. Auch wurde versucht, die Stationen abseits von stark befahrenen Straßen oder Wegen aufzustellen, um Vandalismus oder sonstiger Zerstörung z.B. durch landwirtschaftliche Maschinen vorzubeugen. Mancher Grundbesitzer verweigerte das Aufstellen unserer Wetterstationen auf seinem Boden. Aus all diesen Gründen mussten

Kompromisse bei der Aufstellung eingegangen werden. Das bedeutet, dass die Ergebnisse einiger Stationen zwar korrekt für den unmittelbaren Aufstellungsort gemessen wurden, jedoch nicht immer WMO (World Meteorological Organisation) -konforme Aufstellbedingungen (WMO Guide, 2006) vorhanden waren. Sämtliche meteorologischen Parameter werden sehr stark von ihrer Umgebung beeinflusst und repräsentieren daher oft nur die unmittelbare Umgebung, nicht aber einen größeren Bereich.

Die Aufstellung der Messstationen an sich war meist unproblematisch. Der Zeitaufwand dafür betrug etwa 2 Stunden pro Station. Ab dem 18. Mai 2007 wurden die Stationen aufgebaut und sämtliche relevanten Daten wurden für jede Station in ein eigenes Stationsblatt, eine Art Tagebuch der Station, vermerkt. Es wurden auch Fotografien in alle Haupthimmelsrichtungen von der Station im Mittelpunkt gemacht, um die Umgebung festzuhalten. Diese Bilder erwiesen sich im Nachhinein als äußerst sinnvoll; speziell für Personen, die nicht an der Aufstellung beteiligt waren bzw. überhaupt nicht vor Ort waren.

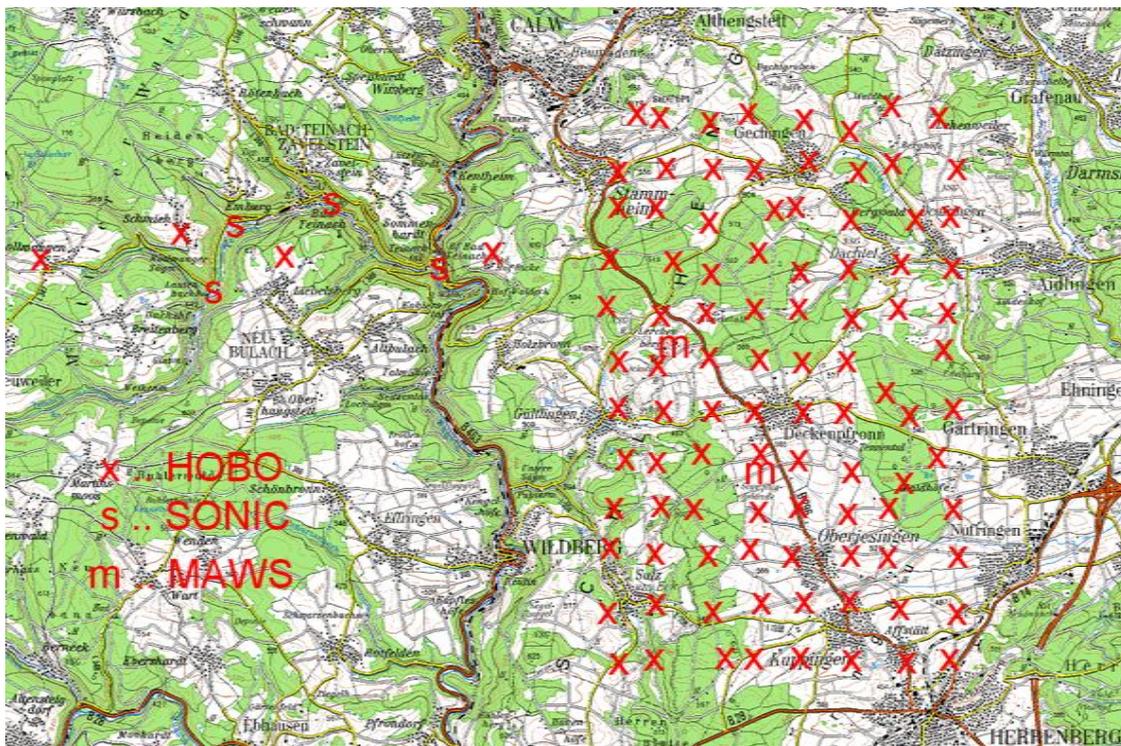


Abb. 2.2 Aufstellplan des Messnetzes der Uni Wien. HOBO-Messgeräte sind mit x, Sonic-Ultraschallanemometer mit s, MAWS-Wetterstationen mit m bezeichnet (Schneider, et al., 2008)

Jede HOBO-Station war mit einem Windmessgerät, einem Temperatur- und Feuchtefühler, einem Drucksensor und einem Niederschlagsmessgerät ausgestattet.

2.3 Daten

Das Messnetz wurde von Studenten und Mitarbeitern des Instituts für Meteorologie und Geophysik der Universität Wien betreut. Die Logger der Messstationen wurden so programmiert, dass Speicherplatz für etwa einen Monat vorhanden war. Aus Sicherheitsgründen wurden die Speicher der Geräte aber alle zwei Wochen ausgelesen und die Logger neu gestartet. Es wurden auch die Geräte an sich auf etwaige Schäden kontrolliert, wie z.B. Anschlüsse oder Sensorausfall. In diesem Fall wurde auf dem Stationsblatt der Schaden vermerkt und behoben bzw. der Sensor getauscht.

In dieser Diplomarbeit wurde mit den zumindest teilweise qualitätskontrollierten 2d-Datensätzen gearbeitet. Zur Verfügung standen 100 Datensätze im Textformat (z.B. 1.1-2d.txt). 2d bezieht sich auf den Level des Bearbeitungsstandes der Daten laut WMO (WMO Guide, 2006), wobei zweckmäßige Anpassungen mittels Buchstaben innerhalb der einzelnen Levels vorgenommen wurden. Im konkreten Fall bedeutet 2d, dass

- die Lokalzeit auf UTC korrigiert wurde. Nicht alle Laptops, die zum Auslesen der Daten verwendet wurden, waren auf UTC eingestellt (2a)
- eine händische Korrektur der Niederschlagswerte vorgenommen wurde. Dies war notwendig, da beim Auslesen des Niederschlagsloggers die Niederschlagswippe betätigt werden musste (2a)
- der Druckbias beseitigt wurde (2a)
- eine linear gewichtete Interpolation über kleine Lücken (< 3 Min.) stattfand (2b)
- grobe Fehler aus dem Datensatz entfernt wurden (2c)
- die systematischen Fehler mittels der Qualitätskontrolle (Steinacker, et al., 2000) aus dem Datensatz entfernt wurden (2d). Die Qualitätskontrolle wurde allerdings nur für die Parameter Druck und Temperatur vorgenommen. Die Qualitätskontrolle der restlichen Parameter steht noch aus.

2.4 IOPs

Tage mit besonderen synoptischen Eigenschaften wurden als IOP (intensive observation period) bezeichnet und fortlaufend nummeriert. Besondere Eigenschaften waren z.B. Frontdurchgänge oder spezielle Anzeichen für Konvektion. Während des COPS-Zeitraums von drei Monaten wurden insgesamt 38 dieser Tage identifiziert, wobei die Nummerierung vom synoptischen System

abhängig war. Dauerten die Auswirkungen eines Systems länger als einen Tag, wurde die gleiche Nummerierung mit dem Zusatz a, b, c, und d vergeben. Lediglich die IOPS 2, 6, 10 und 12 bestanden aus einem Einzeltag. Alle anderen Ereignisse dauerten länger als einen Tag. In dieser Diplomarbeit wurden die IOP 8b (15. Juli 2007), 9c (20. Juli 2007), 13a (1. Aug. 2007) und 13b (2. Aug. 2007) untersucht. Im 6. COPS-Workshop wurden speziell diese Tage ausgewählt, da an diesen Tagen starke Konvektion vorhergesagt wurde bzw. stattfand.

3 Modifikation des Datensatzes

3.1 Allgemeines

Die Eigenschaften der Atmosphäre nahe der Erdoberfläche sind nicht typisch für den Rest der Atmosphäre, da die Erdoberfläche die untersten Luftschichten maßgeblich beeinflusst. Die Erdoberfläche ist die Grenze für atmosphärische Transporte und vertikale Flüsse und modifiziert die untersten 100 bis max. 3000 m der Atmosphäre. Diese Schicht heißt Grenzschicht und setzt sich aus der Prantlschicht (bis 200m) und der Ekmanschicht (bis zum Oberrand der Grenzschicht) zusammen. Sie ist definiert als jener Teil der Troposphäre, der direkt von der Erdoberfläche beeinflusst wird und innerhalb einer Zeitskala von weniger als 1 h auf Oberflächeneinflüsse reagiert. Die darüber liegenden Luftschichten werden als freie Atmosphäre bezeichnet (Stull, 1997).

Tab 3.1 zeigt die wesentlichsten Unterschiede zwischen der Grenzschicht und der freien Atmosphäre.

	Prantlschicht	Freie Atmosphäre
Wind	Nahezu logarithmisch	Nahezu geostrophisch
Reibung	Stark an der Erdoberfläche	Kleine viskose Dissipation
Turbulenz	Näherungsweise durchgehend turbulent	Turbulenz nur in konvektiven Wolken oder CAT (clear air turbulence)
Vertikaler Transport	Turbulenzdominiert	Es dominiert der mittlere Austausch auf Cumulusskala
Dispersion	Sofortige turbulente Durchmischung (horizontal und vertikal)	Kleine molekulare Dispersion, horizontaler Transport durch mittlen Wind

Tab. 3.1 Gegenüberstellung der Eigenschaften der atmosphärischen Grenzschicht zur freien Atmosphäre (Rubel, WS 2007)

In der Meteorologie sollte der Wind in 10 m Höhe gemessen werden (WMO Guide, 2006), um die charakteristischen Einflüsse wie z.B. Turbulenz, Reibung, Dispersion oder vertikalen Transport in den untersten Atmosphärenschichten zu eliminieren bzw. gar nicht zu zulassen (Stull, 1997).

Abb. 3.1 zeigt eine HOBO Wetterstation mit Niederschlagsmesser in 3 m Entfernung. Die Lage dieser Station wird als WMO-konform bezeichnet und liefert Ergebnisse, die für ein größeres Gebiet repräsentativ sind.



Abb. 3.1 HOBO Wetterstation mit Anemometer in 3 m Höhe

Als weitere WMO-konforme Station aufgrund der Umgebung sind z.B. die Stationen 2.1, 3.6, 5.4 oder 11.3 zu nennen. Diese zeichneten sich dadurch aus, dass sie keinerlei Hindernisse wie z.B. Bäume, Sträucher oder Häuser in der Nähe aufwiesen und dass sie auf planem Untergrund mit geringem Bewuchs standen.

Als Stationen die nicht den WMO-Aufstellrichtlinie entsprechen, sind z.B. die im Wald stehenden Stationen 2.3 oder die Stationen 9.1 bis 9.3 zu nennen. Dadurch

sind die Messergebnisse dieser Stationen nicht für größere Bereiche repräsentativ. In Abb. 3.2 kann ein Beispiel dazu betrachtet werden.



Abb. 3.2 HOBO Messstation mit hoher Rauigkeitslänge

3.2 Logarithmisches Windprofil

3.2.1 Allgemeines

Da der Mensch die meiste Zeit seines Lebens in der untersten Atmosphärenschicht direkt am Boden verbringt, wurde diese auch ausführlich untersucht. Die Veränderung der Windgeschwindigkeit mit der Höhe beeinflusst den Menschen direkt. Gebäude, Brücken, Schneezäune etc. um nur einige Beispiele anzuführen, beeinflussen den Wind maßgeblich (Stull, 1997). Innerhalb der atmosphärischen Grenzschicht verändert sich die Windgeschwindigkeit normalerweise (bei neutraler Schichtung) annähernd logarithmisch zur Höhe und nähert sich erst in der freien Atmosphäre dem geostrophischen Wind an.

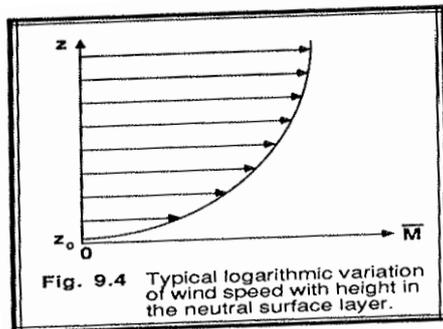


Abb. 3.3 Typische logarithmische Veränderung der Windgeschwindigkeit mit der Höhe bei neutraler Schichtung (Stull, 1997)

3.2.2 Rauhigkeitslänge

Üblicherweise nimmt der Wind mit der Höhe logarithmisch zu und nähert sich in der freien Atmosphäre dem geostrophischen Wind an. Aufgrund der Reibung am Boden beträgt die Windgeschwindigkeit am Boden Null. Abhängig vom Bewuchs des Untergrundes, von umliegender Bepflanzung, Hindernissen und Objekten sowie der sonstigen Lage, konvergiert die Windgeschwindigkeit in unterschiedlichen Höhen gegen Null. Diese Höhe kann von einigen Millimetern z.B. über dem offenen Meer oder bei durchgehenden Schneedecken bis hin zu mehreren Metern z.B. im Wald oder in einer Großstadt betragen. Diese Höhe nennt man in der Meteorologie Rauhigkeitslänge (z_0) und wird in Meter angegeben (Stull, 1997).

Die WMO empfiehlt folgende Einteilung:

Terrain classification from Davenport (1960) Adapted by Wieringa (1980) in terms of aerodynamic roughness length z_0		
Class	Short terrain description	Z_0 [m]
1	Open sea, fetch at least 5 km	0,0002
2	Mud flats, snow; no vegetation, no obstacles	0,005
3	Open flat terrain; grass, few isolated obstacles	0,03
4	Low crops; occasional large obstacles, $x/H > 20$	0,1
5	High crops; scattered obstacles, $15 < x/H < 20$	0,25
6	Parkland, bushes; numerous obstacles, $x/H \sim 10$	0,5
7	Regular large obstacle coverage (suburb, forest)	1
8	City centre with high- and low-rise buildings	≥ 2

Tab. 3.2 Terrainklassifikation, wie im World Meteorological Organisation Manual empfohlen (WMO Guide, 2006), x ist die Distanz zum Hindernis, H ist die Höhe des Hindernisses

Die Einteilung der HOBO Wetterstationen erfolgte subjektiv nach den bereits erwähnten Fotos, die bei der Aufstellung zu jeder HOBO-Station archiviert wurden. Bei der Klassifizierung wurden die Empfehlungen der WMO eingehalten und die Klassen 3 bis 7 herangezogen. Weiters ist anzumerken, dass die Hauptwindrichtung und die Änderung des Bewuchses mit der Zeit bei der Einteilung nicht berücksichtigt wurde (z.B. Maispflanzen, die im Mai noch kleine Pflanzen und im August mannshoch waren oder Rapsfelder, die im Laufe des Sommers geerntet wurden).

Schließlich ergab sich folgendes Bild, wobei die Farblegende die Klassen erklärt:

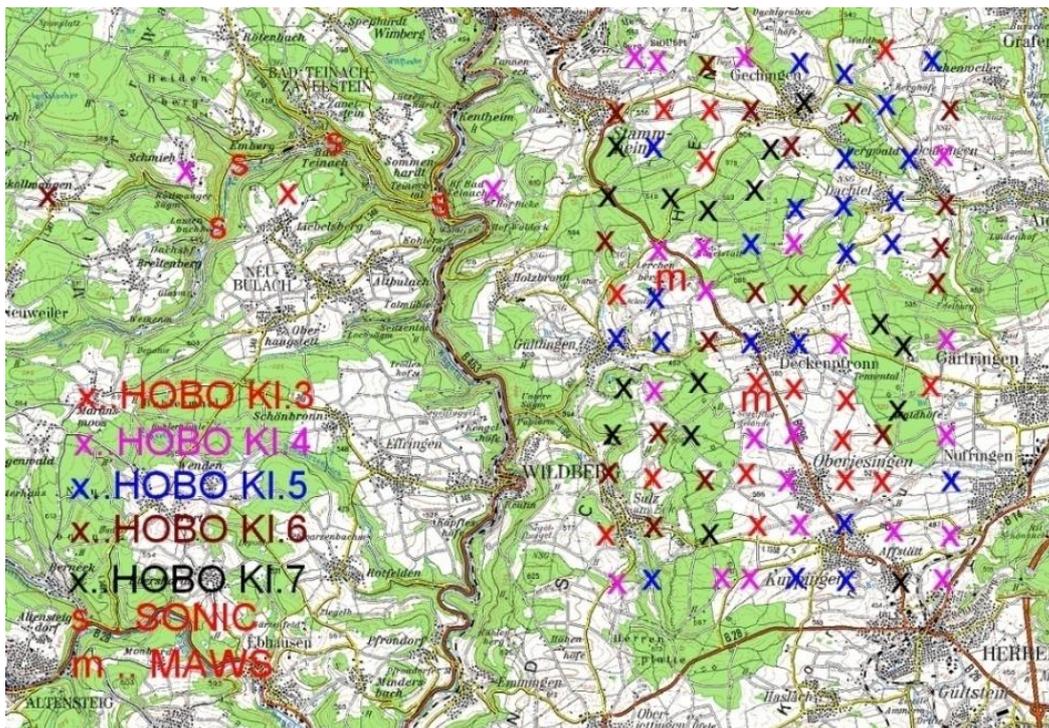


Abb. 3.4 Stationsmessnetz nach der Einteilung in die Klassen der Rauigkeitslängen

Durch die vorgenommenen Klassifizierung ergibt sich folgende Häufigkeitsverteilung pro Rauigkeitslänge (Klasse):

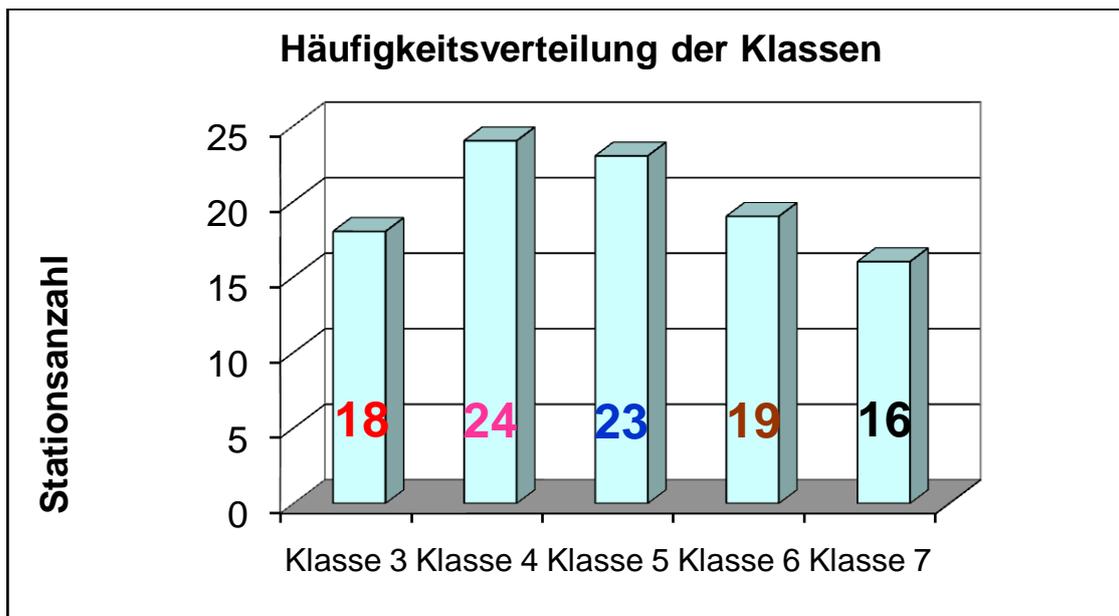


Abb. 3.5 Häufigkeitsverteilung der unterschiedlichen WMO Klassen

Die Stationen der Klassen 5 – 7, das heißt mit einer Rauigkeitslänge 0,25 m und 1 m, entsprechen nicht mehr den vor der WMO-gewünschten Aufstellbedingungen. Jedoch musste im Rahmen dieser Kampagne über diese Problematik hinweg gesehen werden, da ansonsten das 1 x 1 km Raster der Aufstellung nicht realisiert hätte werden können.

Mit Hilfe dieser Klasseneinteilung konnte nun der 3-m-Wind unter Zuhilfenahme des logarithmischen Windprofils auf 10 m extrapoliert werden. Die Standardmethoden konnten in diesem Fall nicht angewendet werden, da nur eine Messung in einer Höhe vorhanden ist. Bei der Standardmethode müssen Windgeschwindigkeiten in mehreren Höhen vorhanden sein, um so die Schubspannungsgeschwindigkeit zu berechnen. Bei den vorhandenen Daten war dies nicht der Fall. Es existiert nur eine Messung in 3 m Höhe. Eine weitere Methode zur Berechnung des logarithmischen Windprofils ist eine Berechnung, bei der die atmosphärische Stabilität berücksichtigt wird. Da diese Daten Großteils nicht zur Verfügung standen, konnte aber auch diese Methode nicht angewendet werden. Dadurch kam folgende Formel zur Anwendung, in der der mittlere Hinderniswinkel berücksichtigt wird (Sevruk u. Zahlavova, 1994):

$v_H = \frac{\log(H/z_0)}{\log(h/z_0)} (1 - 0.024\alpha)v_h$	(3.1)
--	-------

wobei

v_H die gesuchte Windgeschwindigkeit [m/s],

v_h die Windgeschwindigkeit [m/s] im Messniveau,

z_0 die Rauigkeitslänge [m],

H die Höhe [m] über Grund, für die die gesuchte Windgeschwindigkeit gelten soll,

h die Höhe [m] der Windgeschwindigkeit im Messniveau,

α der mittlere vertikale Winkel [Grad] zu Hindernissen rund um die Station ist.

Auch für den vertikalen Hinderniswinkel gibt die WMO Empfehlungen ab, die in der untenstehenden Aufstellung zu sehen sind.

Class	Angle [°]	Description
Exposed site	0 – 5	Only a few small obstacles such as bushes, group of trees, a house
Mainly exposed site	6 – 12	Small groups of trees or bushes, one or two houses
Mainly protected site	13 – 19	Parks, forest edges, village centers, farms, groups of houses, yards
Protected site	20 – 26	Young forest, small forest clearing, part with big trees, leeward of big hills

Tab. 3.3 Vertikaler Hinderniswinkel nach WMO Vorgabe (WMO Guide, 2006)

Wie die Rauigkeitslänge wurde auch der vertikale Hinderniswinkel jeder Wetterstation zugeordnet. Nachfolgende Tabelle zeigt, mit welchem vertikalen Hinderniswinkel bei welcher Rauigkeitslänge gerechnet wurde.

Klasse	Rauhigkeitslänge [m]	Vertikaler Hinderniswinkel [°]
3	0,03	2
4	0,1	7
5	0,25	13
6	0,5	19
7	1	26

Tab. 3.4 Zuordnung von vertikalem Hinderniswinkel und Rauigkeitslänge

Abb. 3.6 zeigt das Stationsnetz mit Angabe der Rauigkeitslänge (z_0) in [m] und des vertikalen Hinderniswinkels (α) in [°]. Diese Einteilung wurde selbst definiert.

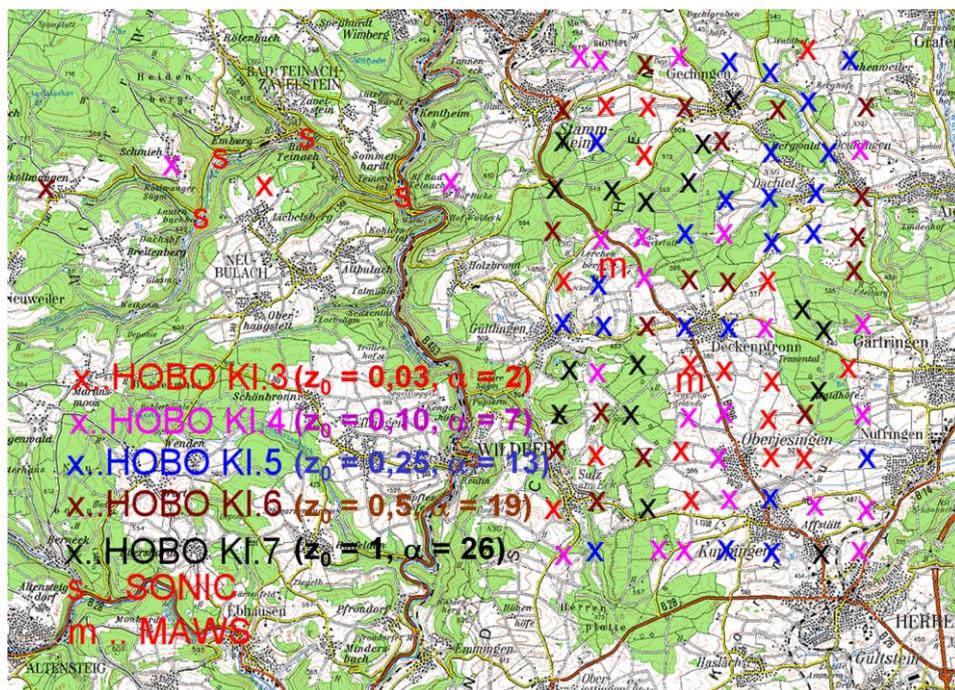


Abb. 3.6 wie Abb. 3.4. plus zusätzlicher Angabe der Rauigkeitslänge (z_0) und dem vertikalen Hinderniswinkel (α)

3.3 Mittelung

Es wurden drei unterschiedliche zeitliche Mittelungen vorgenommen. Eine zeitliche Mittelbildung war notwendig, um die kleinräumigen Turbulenzen speziell in der Windgeschwindigkeit sowie in der Windrichtung zu eliminieren. Kleinräumige Turbulenzen befinden sich in unserem Fall auf einer Skala von einigen Metern bis etwa 100 m und werden unmittelbar durch die Umgebung der Station beeinflusst. Einzelne Hindernisse neben einer Messstation beeinflussen den Wind sowohl in seiner Richtung als auch Geschwindigkeit maßgeblich. Durch eine Mittelung können so genau diese vermieden werden.

Eine Mittelung über 24h und zwar von 06 UTC des zu beobachtenden Tages bis 06 UTC (24 h Mittel) des darauffolgenden Tages wurde vorgenommen. Eine Mittelung von 06 UTC bis 18 UTC (12 h Tagesmittel) um die Tagessituation darzustellen, sowie eine Mittelung von 18 UTC bis 06 UTC (12 h Nachtmittel) des darauffolgenden Tages, um die nächtlichen Gegebenheiten zu reflektieren. Da im Normalfall zwischen Tag und Nacht große Unterschiede in der Stabilität und

dadurch sowohl in der Windrichtung als auch in der Windgeschwindigkeit existieren, wurde diese Unterscheidung zwischen Tag und Nacht vorgenommen.

Arithmetisch gemittelt wurden die Parameter Temperatur, Druck und Feuchte. Da es sich hier um skalare Größen handelt, stellt dies auch kein Problem dar. Folgende Formel kam zur Anwendung (Schönwiese, 1992):

$a = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n a_i = \frac{1}{n} (a_1 + a_2 + \dots + a_n)$	(3.2)
--	-------

Als Variationsmaß wird die Standardabweichung verwendet:

$s = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum (a'_i)^2}$	(3.3)
--	-------

Wobei a'_i für die Abweichung vom arithmetischen Mittelwert steht. Hier werden nicht die linearen sondern die quadratischen Abweichungen vom Mittelwert verwendet (Schönwiese, 1992).

Der Wind als vektorielle Größe wird durch seine Geschwindigkeit und seine Richtung beschrieben und kann dadurch nicht arithmetisch gemittelt werden. Bei der Mittelbildung des Windes müssen die besonderen Eigenschaften von zirkulären Daten berücksichtigt werden. Dazu wird der Windvektor \mathbf{V} in seine Komponenten u und v (zweidimensional) zerlegt, die anschließend als skalare Größen behandelt werden können. Die Größe φ repräsentiert die Windrichtung im meteorologischen Sinne, d.h. 0° im Norden, 90° im Osten, 180° im Süden und 270° im Westen. Diese Zerlegung in die Windkomponenten erhält man durch die Umrechnung in Polarkoordinaten.

$u = -V \sin \varphi$	(3.4)
$v = -V \cos \varphi$	(3.5)

Anschließend können u und v arithmetisch gemittelt werden und durch die Rückrechnung

$V = \sqrt{u^2 + v^2}$	(3.6)
------------------------	-------

erhält man einen gemittelten Windvektor \mathbf{v} für die Windgeschwindigkeit, sowie durch die Gleichung

$\varphi = \arctan \frac{u}{v}$	(3.7)
---------------------------------	-------

eine gemittelte Windrichtung aus den gemittelten zweidimensionalen Windkomponenten (Schönwiese, 1992).

Der Niederschlag wurde im jeweiligen Zeitraum akkumuliert. Bei den Böen wurde der Höchstwert im Zeitintervall übernommen.

3.4 10 m Wind

Die Parameter Windgeschwindigkeit und Windrichtung wurden sowohl vektoriell (siehe Beschreibung in Kapitel 3.3) als auch skalar gemittelt und daraus der 10-m-Wind berechnet. Aus dem vektoriellen 10 m Windmittel wurde anschließend noch die gemittelte Windrichtung berechnet (3.7).

Als Referenzdaten für den Wind wurde der Datensatz der Uni Bonn verwendet. Die Universität Bonn betrieb eine Messstation auf der Supersite S (siehe Abb. 2.2).

Unter anderem wurde der Wind in unterschiedlichen Höhen gemessen. Es fanden Messungen in 0,64 m; 1,2 m; 2,3 m; 4,37 m und 8,37 m statt. Die Aufstellbedingungen an der Supersite S waren WMO konform und somit für ein größeres Gebiet repräsentativ. Mit Formel (3.1) konnte auch hier der 10 m Wind problemlos eruiert werden. Auch die Windrichtung, die in der Höhe von 8,37 m gemessen wurde, konnte gut als Referenz verwendet werden und ergänzt so die Ergebnisse der Uni Wien. Die Daten der Uni Bonn wurden an der Uni Wien nicht mehr qualitätskontrolliert.

Das Ziel der Modifikation der Daten auf 10 m ist ein homogeneres Ergebnis, als aufgrund der vielen unterschiedlichen Rauigkeitslängen zu erwarten war. Durch die Extrapolation sollen sowohl bei der Windgeschwindigkeit als auch bei der Windrichtung für größere Gebiete repräsentative Ergebnisse erreicht werden.

Grundsätzlich ist eine hohe Auflösung des Messnetzes erwünscht, da dadurch eine Fülle an Messungen vorhanden ist. In diesem speziellen Fall ist aber durch die komplexe Topografie und durch die nicht immer optimalen Aufstellplätze mit sehr ausgeprägten und sehr kleinräumigen Turbulenzen zu rechnen. Diese Turbulenzen würden die Ergebnisse zu sehr verfälschen.

4 Ergebnisse der Winddaten

4.1 IOP 8b (15. Juli 2007)

4.1.1 Großwetterlage

Mitteleuropa lag im Einflussbereich eines Keils, der sich von der Ostsee bis zum Mittelmeer erstreckte, mit einer warmen und relativ trockenen Luftmasse (Abb. 4.1).

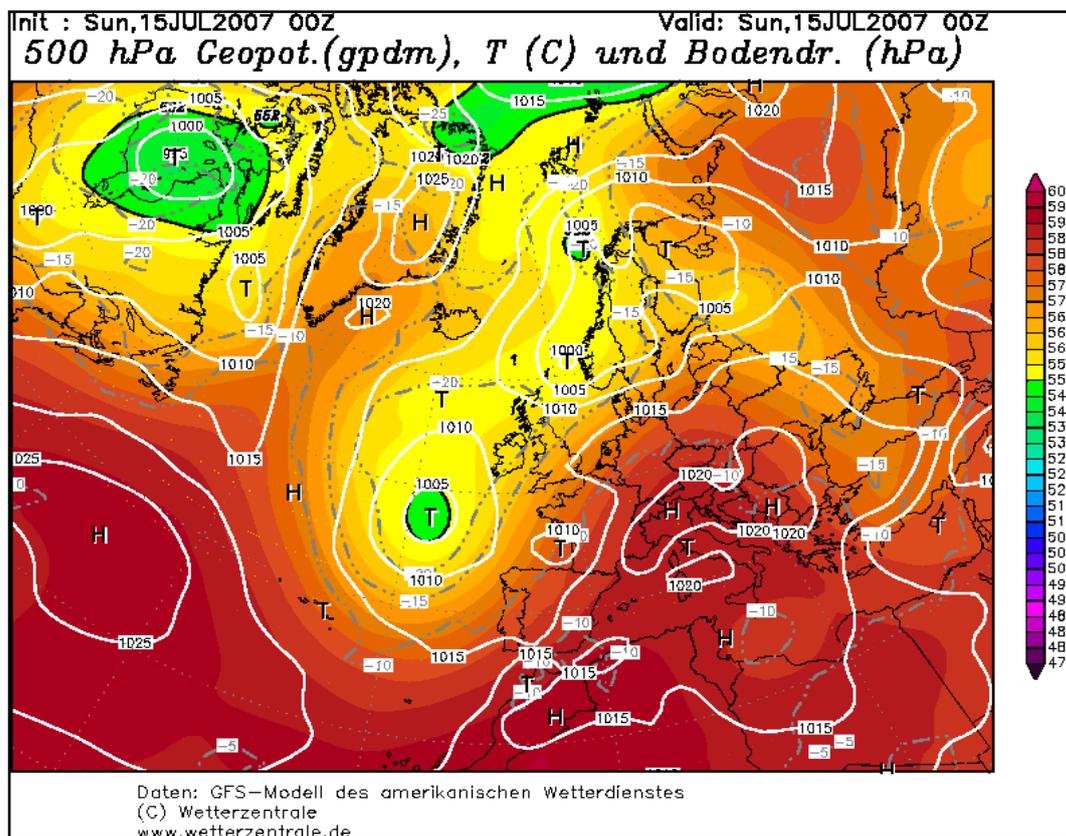


Abb. 4.1 GFS-Darstellung der Großwetterlage vom 15. Juli 2007, 12 UTC (www.wetterzentrale.de, 2009)

Speziell entlang des Rheintales und über dem Schwarzwald lag eine sehr trockene und warme Luftmasse. Wegen geringer Instabilität der Luftmasse

wurden in der COPS-Region nur vereinzelt konvektive Ereignisse erwartet (COPS-Homepage, 2008)

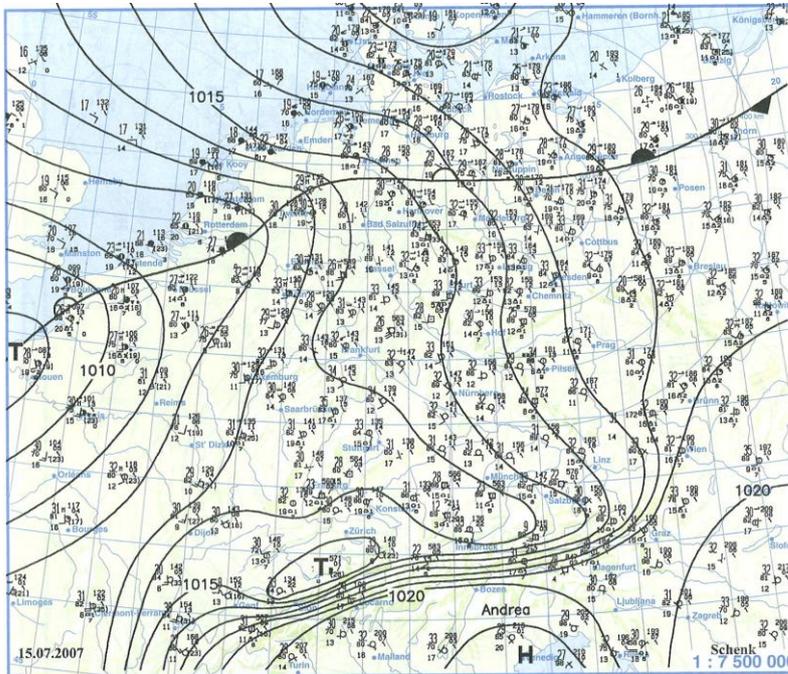


Abb. 4.2 Wetterlage über Deutschland am 15.7.2007, 12 UTC, (Berliner Wetterkarte)

Verifiziert wurde die Prognose der COPS-Homepage mit den, beim Deutschen Wetterdienst, gemeldeten Wetterdaten der Station 10738 Stuttgart-Echterdingen (Deutscher Wetterdienst, 2009).

T_{mit} [°C]	RF [%]	ff [m/s]	SO [h]	Bedeckungs- grad [1/8]	RR [mm]	pp [hPa]
25,8	57	1,6	14,8	1/8	0.0	970

T_{mit} ist die gemittelte Tagestemperatur gemessen 2m über Grund, RF ist die relative Luftfeuchte, ff ist die Windgeschwindigkeit (skalar gemittelt), SO ist die Sonnenscheindauer, RR ist die Höhe des gefallenen Niederschlages und pp ist das Mittel des Drucks bei 24 Messungen (Deutscher Wetterdienst, 2009).

Der 15. Juli 2007 war ein warmer, trockner Sommertag mit einer sehr langen Sonnenscheindauer und wenig Wolken. Es fiel an diesem Tag kein Niederschlag an der Messstation in Stuttgart-Echterdingen (siehe auch Abb. 4.2).

4.1.2 Stationen mit geringer Rauigkeitslänge

Als Stationen mit geringer Rauigkeitslänge wurden die Stationen 3.4 bis 3.6, 4.4 bis 4.6 und 5.4 bis 5.6 ausgewählt (siehe

Abb. 3.4). Davon entfielen die Stationen 3.4, 3.6, 4.6, 5.4 bis 5.6 auf Klasse 3, d.h. sie wiesen eine Rauigkeitslänge von 0,03 m auf. Die Stationen 3.5, 4.4 und 4.5 wiesen eine Rauigkeitslänge von 0,1 m (Klasse 4) auf. Diese Stationen befanden sich rund um Supersite S und zeichneten sich durch relativ offenes und flaches Gelände aus.

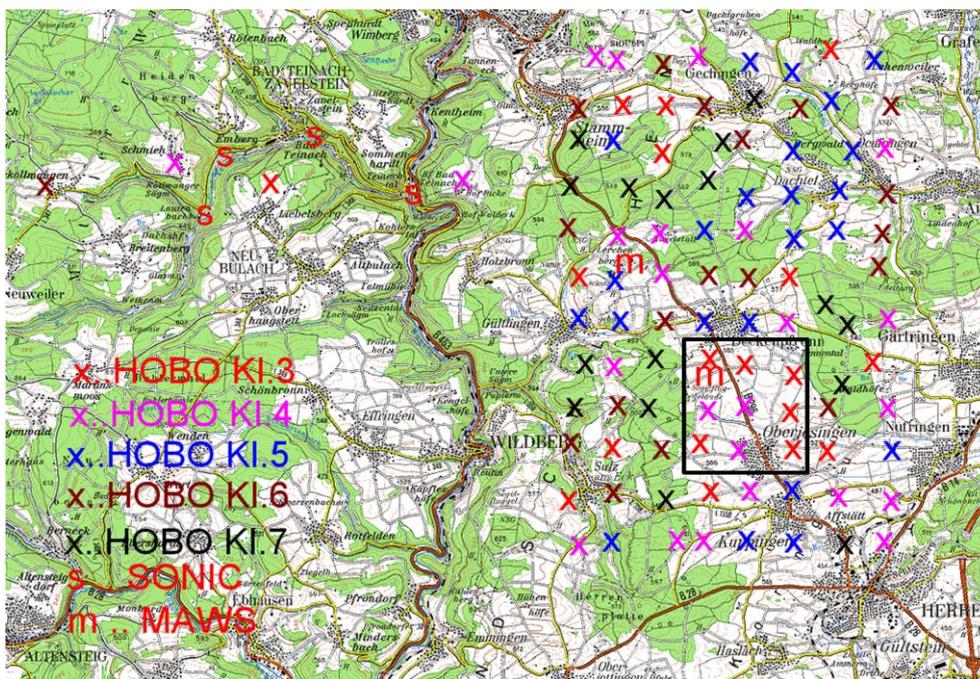


Abb. 4.3 zeigt in der Markierung die ausgewählten Stationen mit den geringen Rauigkeitslängen

Die zu erwartenden Ergebnisse bezüglich des Windes sollten wegen der doch recht homogenen Umgebungsbedingungen ein einheitliches Bild zeigen und für

ein größeres Gebiet repräsentativ sein. Das Ziel ist zu zeigen, dass mit der Extrapolation die unterschiedlichen Rauigkeitslängen korrigiert und einheitliche Windgeschwindigkeiten und -richtungen erzielt werden können.

Die Ergebnisse (Abb. 4.4) zeigten beim vektoriell gemittelten Wind, sowohl in 3 m als auch in 10 m Höhe ein sehr einheitliches Bild. Anzumerken ist, dass der 15. Juli 2007 ein gradientschwacher, heißer Sommertag mit geringen Windgeschwindigkeiten war. Die mittlere Windgeschwindigkeit beim 3 m Wind betrug 0,23 m/s mit einer Standardabweichung von 0,17 m/s; beim 10 m Wind betrug die mittlere Windgeschwindigkeit 0,33 m/s bei einer Standardabweichung von 0,17 m/s. Da sowohl der Genauigkeitsbereich als auch die Anlaufgeschwindigkeit der Messsensoren bei $\pm 0,5$ m/s lag, bewegten sich alle vektoriellen Ergebnisse im Ungenauigkeitsbereich der Messgeräte. Dadurch müssen diese Daten mit Vorsicht betrachtet werden. Die skalar ermittelte Windgeschwindigkeit in 10 m Höhe lag etwas höher, bei 1,64 m/s (Standardabweichung 0,73 m/s). Die Station 4.4, die am nächsten der Referenzstation der Uni Bonn lag, lieferte bei der vektoriellen Mittelung des extrapolierten 10 m Windes die gleichen Werte für Windgeschwindigkeit und Windrichtung wie die Messstation der Uni Bonn. Daraus ließ sich schließen, dass die Geräte ähnliche Ergebnisse liefern, was bei unterschiedlichen Gerätetypen durchaus nicht selbstverständlich ist. Bei der skalaren Mittelung wichen alle Stationen der Uni Wien von der Referenzstation der Uni Bonn ab. Die skalare Berechnung wurde vorgenommen um darzustellen, dass diese Berechnung in der Meteorologie nicht zielführend ist und um einen weiteren Referenzwert anzugeben. Da die Ergebnisse der skalaren Berechnung keine verwertbaren Resultate lieferten, wird in weiterer Folge darauf nicht mehr eingegangen.

Die Windgeschwindigkeiten waren so gering, dass die Windrichtung (Winde aus süd-östlicher Richtung) generell schwer zu bestimmen war. Dadurch erklären sich starke Schwankungen bei einer Windrichtung, die zwischen Südwest und Ost lag.

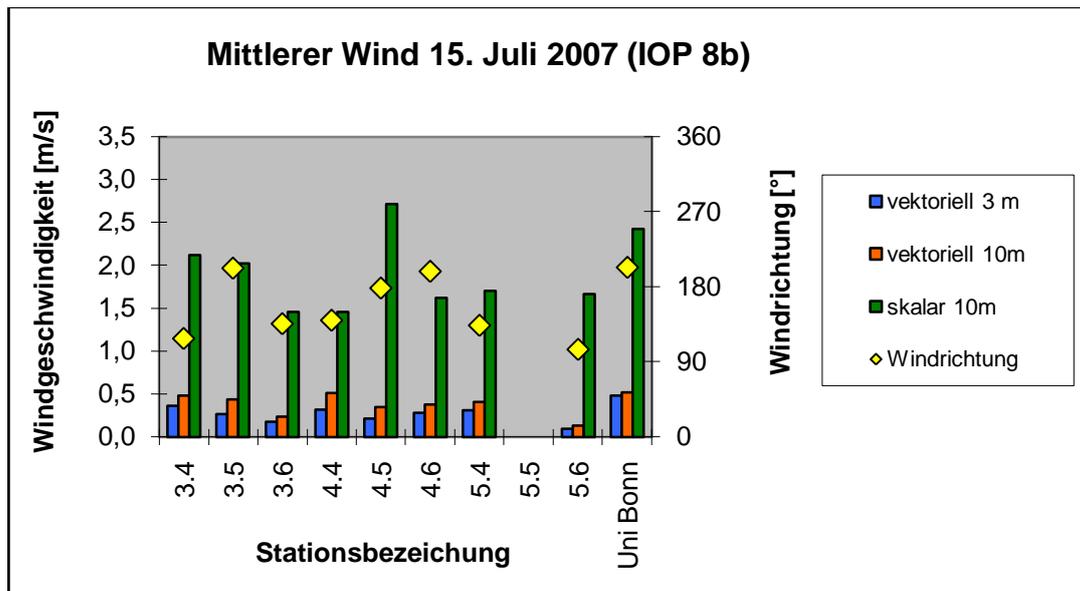


Abb. 4.4 Windanalyse vom 15.7.2007 (24 h Mittel), Stationen mit geringer Rauigkeitslänge (Station 5.5 meldete zu diesem Zeitpunkt keine Daten)

Die Ergebnisse für die Mittelung von 06 UTC bis 18 UTC (Abb. 4.5) zeigten leicht höhere Windgeschwindigkeiten als bei der 24 h Mittelung. Da tagsüber Konvektion aufgrund der Sonneneinstrahlung eintrat, wurde die Windgeschwindigkeit forciert. Beim vektoriell gemittelten 10 m Wind ergab sich eine mittlere Windgeschwindigkeit von 1,11 m/s mit einer Standardabweichung von 0,45 m/s, beim vektoriell gemittelten 3 m Wind betrug die mittlere Windgeschwindigkeit von 0,77 m/s mit einer Standardabweichung von 0.3 m/s. Auch hier lagen die Standardabweichungen im Toleranzbereich des Messgerätes. Die Windrichtung war einheitlich aus südöstlicher Richtung.

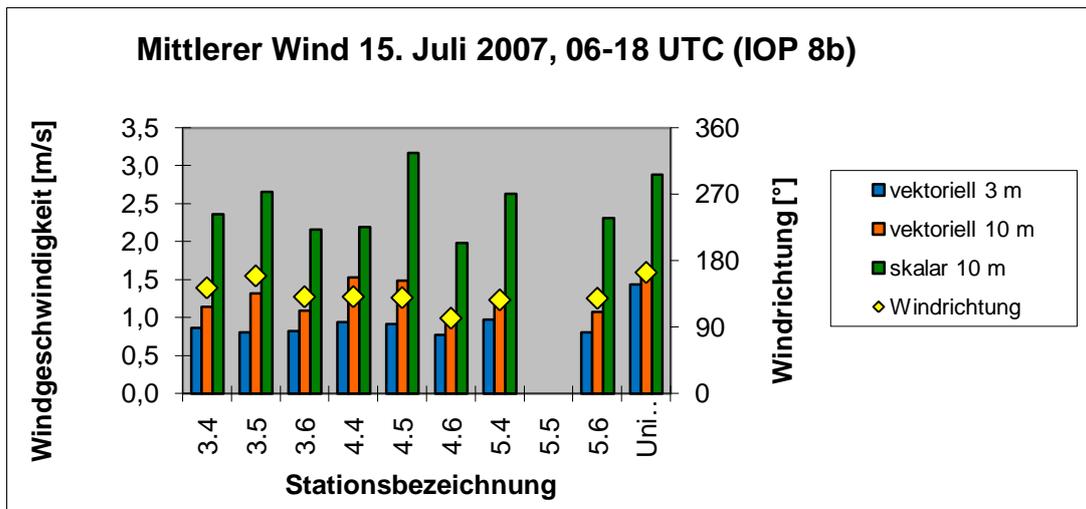


Abb. 4.5 Windanalyse vom 15. Juli 2007 (Mittelung von 06 UTC bis 18 UTC), Stationen mit geringer Rauigkeitslänge (Station 5.5 meldete zu diesem Zeitpunkt keine Daten)

Bei der Mittelung von 18 UTC bis 06 UTC des darauffolgenden Tages (Abb. 4.6) ergab sich speziell für die Windrichtung ein sehr einheitliches Bild. Der Wind wehte aus westlicher Richtung. Wie in der Nacht zu erwarten, zeigten sich geringe Windgeschwindigkeiten. Aufgrund der fehlenden Konvektion, „schief“ der Wind ein. Der Mittelwert beim vektorieell berechneten 10 m Wind betrug 0,81 m/s (Standardabweichung 0,46 m/s), beim vektorieell berechneten 3 m Wind betrug die Windgeschwindigkeit 0,57 m/s (Standardabw. 0,34 m/s).

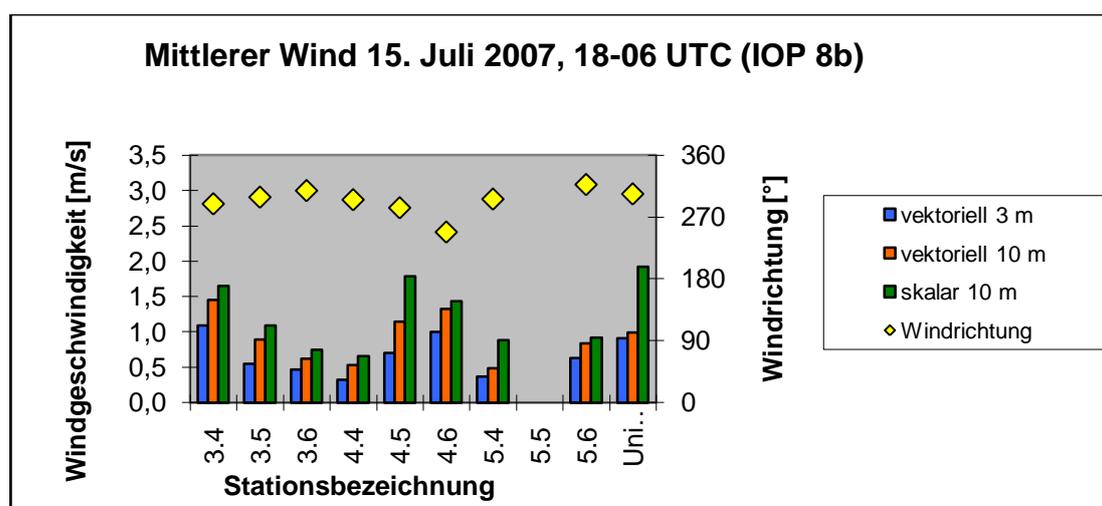


Abb. 4.6 Windanalyse vom 15. Juli 2007 (Mittelung von 18 UTC bis 06 UTC), Stationen mit geringer Rauigkeitslänge (Station 5.5 meldete zu diesem Zeitpunkt keine Daten)

4.1.3 Stationen mit unterschiedlichen Rauigkeitslängen

Als Stationen mit unterschiedlichen Rauigkeitslängen wurden die Stationen 5.1 bis 5.3, 6.1 bis 6.3 und 7.1 bis 7.3 ausgewählt (Abb. 4.7). Innerhalb dieser neun Stationen sind sämtliche Rauigkeitslängen vorhanden.

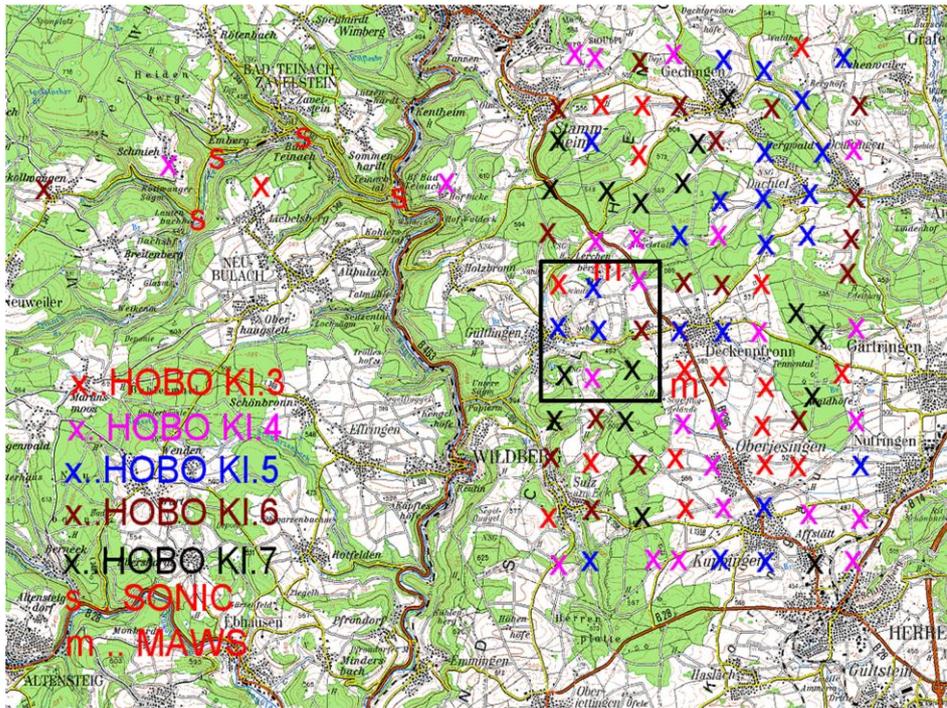


Abb. 4.7 zeigt in der Markierung die ausgewählten Stationen mit den unterschiedlichen Rauigkeitslängen

Obwohl sehr unterschiedliche Umgebungsbedingungen in dieser Gruppe von Messstationen vorlagen, zeigten sich die Windgeschwindigkeiten sehr einheitlich und geringer als in der Gruppe mit den „guten“ Umgebungsbedingungen (Klasse 3 und Klasse 4).

Im Mittel lagen sie bei 0,42 m/s, mit einer Standardabweichung von 0,22 m/s (Abb. 4.8). Der Grund ist gerade durch die unterschiedlichen Rauigkeitslängen zu sehen. Durch die Abschattungen der Wälder wurden einfach nicht die Windgeschwindigkeiten in Bodennähe erreicht, die die Stationen mit den WMO konformen Aufstellbedingungen erreichten. Auch dann nicht, wenn die

Messstation an sich in einer WMO-repräsentativen Umgebung aufgebaut war. Hier beeinflussten nahestehende Hindernisse trotzdem die Windergebnisse. Bei der Windrichtung ergab sich ein anderes Bild. Hier zeigten sich, bis auf eine Ausnahme, Windrichtungen aus Ost bis Süd. Die Station 5.3 war hier ein Ausreißer. Hier lag die Windrichtung bei 357° , was einem Nordwind entspricht. Erstaunlicherweise waren diese Ergebnisse den Daten der Uni Bonn ähnlicher, als die Ergebnisse der Stationen mit den geringen Rauigkeitslängen.

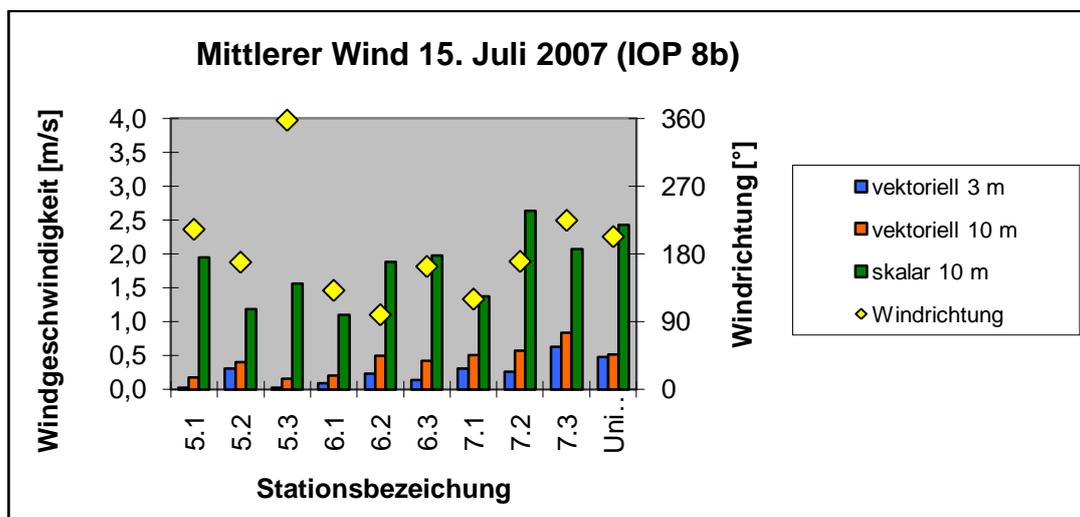


Abb. 4.8 Windanalyse vom 15.7.2007 (24 h Mittel), Stationen mit unterschiedlichen Rauigkeitslängen

Beim 12 h Tagesmittel (Abb. 4.9) in der Gruppe mit unterschiedlichen Rauigkeitslängen für den 15. Juli 2007 ergaben sich wiederum einerseits sehr schwache und andererseits sehr einheitliche Windgeschwindigkeiten, die auch zu den Daten der Uni Bonn sehr ähnlich waren. Die vektoriellen Mittel zeigten im Vergleich mit den Daten der Uni Bonn ein sehr ähnliches Bild. Die mittlere 10 m Windgeschwindigkeit lag bei $0,87 \text{ m/s}$ mit einer Standardabweichung von $0,47 \text{ m/s}$. Die Station 5.2 lieferte die geringste Windgeschwindigkeit. Diese Station war auf einem leicht nach Norden abfallenden Hang aufgebaut. Die Windrichtung lag wie im 24 h Mittel zwischen 90° und 180° . Auch hier war die Station 5.3 mit Nordwind eine Ausnahme. Die Station 5.3 lag geschützt im Wald.

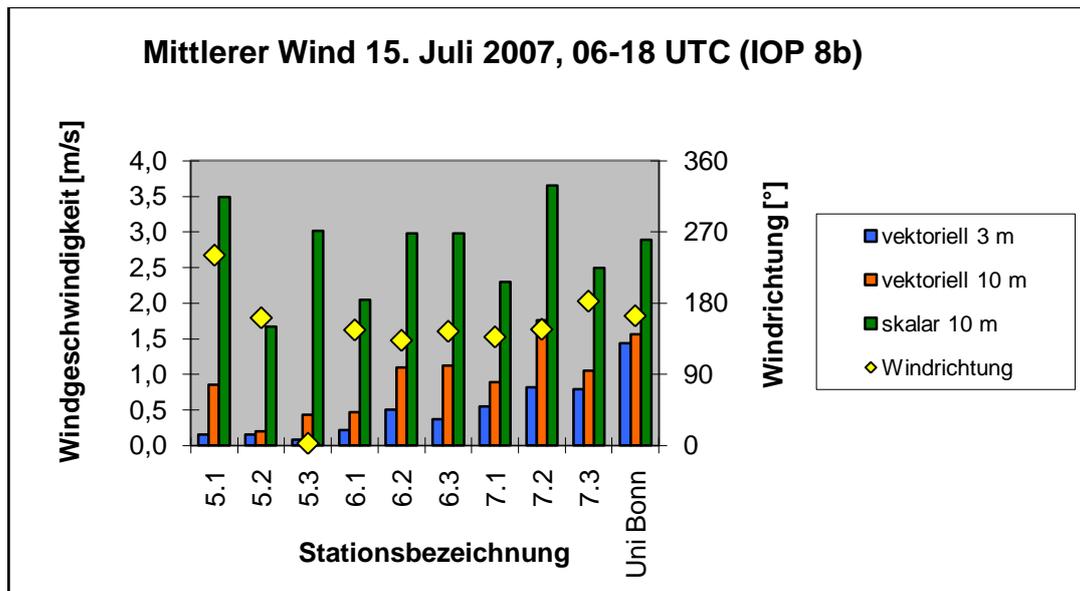


Abb. 4.9 Windanalyse vom 15.7.2007 (Mittelung von 06 UTC bis 18 UTC), Stationen mit unterschiedlichen Rauigkeitslängen

Bei der Mittelung von 18 h bis 6 h (UTC) des darauffolgenden Tages (siehe Abb. 4.10) zeigte die Windgeschwindigkeit wie auch beim 12 h Mittel ein sehr inhomogenes Bild. Im Mittel lagen die Windgeschwindigkeiten bei 0,52 m/s (Standardabweichung 0,33 m/s). Speziell bei den Stationen 5.3, 6.1, 6.3 und 7.1 lagen die vektoriellen Mittelwerte sowohl bei den 3 m als auch bei den 10 m Ergebnissen unter 0,5 m/s. Bei solch geringen Windgeschwindigkeiten ergeben sich Probleme mit der Windrichtungsmessung, da sich bei so schwachen Winden mikroskalige Turbulenzen und Einflüsse noch stärker bemerkbar machen und dadurch Ergebnisse liefern, die nur für einen sehr begrenzten Raum gültig sind.

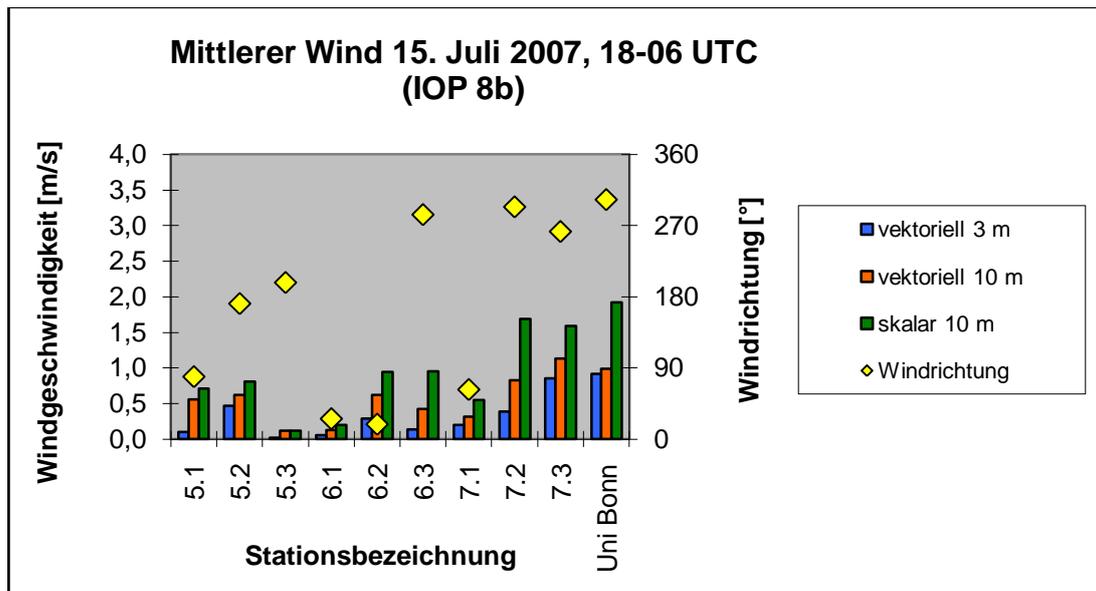


Abb. 4.10 Windanalyse vom 15.7.2007 (Mittelung von 18 UTC bis 06 UTC), Stationen mit unterschiedlichen Rauigkeitslängen

4.1.4 Stationen mit hoher Rauigkeitslänge

Für die Betrachtung der Stationen mit hoher Rauigkeitslänge wurden die Stationen 4.1 bis 4.3, 5.1 bis 5.3 und 6.1 bis 6.3 gewählt (Abb. 4.11). Bei diesen Stationen lagen die Rauigkeitslängen zwischen 0,1 m und 1 m. Vertreten sind 4 Stationen mit einer Rauigkeitslänge von 1 m (Klasse 7), 2 Stationen mit 0,5 m (Klasse 6), 2 Stationen mit 0,25 m (Klasse 5) und eine Station mit einer Rauigkeitslänge von 0,1 m (Klasse 4). Dieses Stationenfeld stellte das mit der höchsten Rauigkeitslänge innerhalb der 100 Stationen dar.

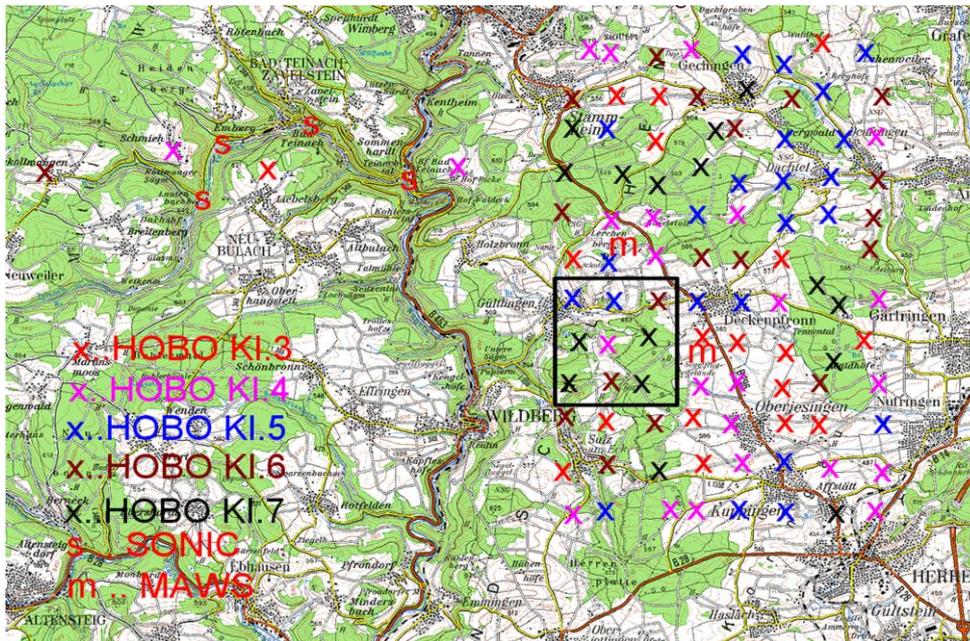


Abb. 4.11 zeigt in der Markierung die ausgewählten Stationen mit den hohen Rauigkeitslängen

Trotz Rauigkeitslängen der Klasse 6 und Klasse 7 ergaben sich im 24 h Mittel (Abb. 4.12) ein erstaunlich homogene Ergebnisse in der Windanalyse. Im Vergleich zu den Daten der Uni Bonn erhielten wir auch hier, trotz der hohen Rauigkeitslängen, ähnliche Ergebnisse. Scheinbar war hier die Berücksichtigung der Rauigkeitslänge ausreichend, um die Windgeschwindigkeit entsprechend zu korrigieren bzw. anzupassen. Die mittlere Windgeschwindigkeit für den vektoriell berechneten 10 m Wind betrug 0,35 m/s (Standardabweichung 0,14 m/s). Auch hier ist wieder anzumerken, dass die Windgeschwindigkeiten mit unter 0,5 m/s sehr gering sind und dadurch mit Vorsicht betrachtet werden müssen. Selbst beim 3 m Wind erhielten wir sehr homogene Ergebnisse. Wobei ein Vergleich mit den Daten der Uni Bonn zeigte, dass die 10 m Windergebnisse ein ähnlicheres Ergebnis lieferten als die des 3 m Windes. Hier schien die Extrapolation auf 10 m ein „korrekteres“ Windergebnis zu liefern. Ein anderes Bild ergab sich bei der Windrichtung. Hier ergaben sich sehr unterschiedliche Ergebnisse. Wegen der niedrigen Windgeschwindigkeiten und auch der Aufstellplätze, die größtenteils im Wald lagen, war dieses Ergebnis nicht weiter verwunderlich.

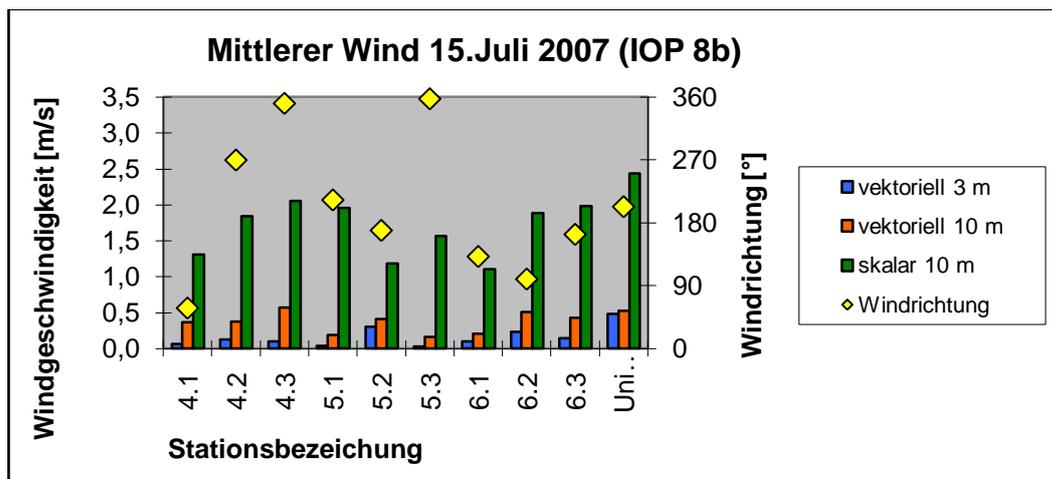


Abb. 4.12 Windanalyse vom 15.7.2007 (24 h Mittel), Stationen mit hohen Rauigkeitslängen

Beim 12 h Tagesmittel (06 UTC bis 18 UTC) ergaben sich etwas geringere Windgeschwindigkeiten im Vergleich zu den Ergebnissen der Uni Bonn (Abb. 4.13). Die mittlere Windgeschwindigkeit beim vektoruell errechneten 10 m Wind betrug 0,69 m/s (Standardabweichung 0,39 m/s). Die Windrichtungen zeigten auch hier ein sehr uneinheitliches Bild. Obwohl fast alle der betrachteten Stationen im dichten Wald standen, lieferten hier speziell die Stationen 4.1 und 5.2 viel geringere Windgeschwindigkeiten als die anderen. Station 4.1 lag geschützt im Wald. Station 5.2 mit einer Rauigkeitslänge der Klasse 4 (0,1 m) lag auf einem nach Norden abfallenden Hang.

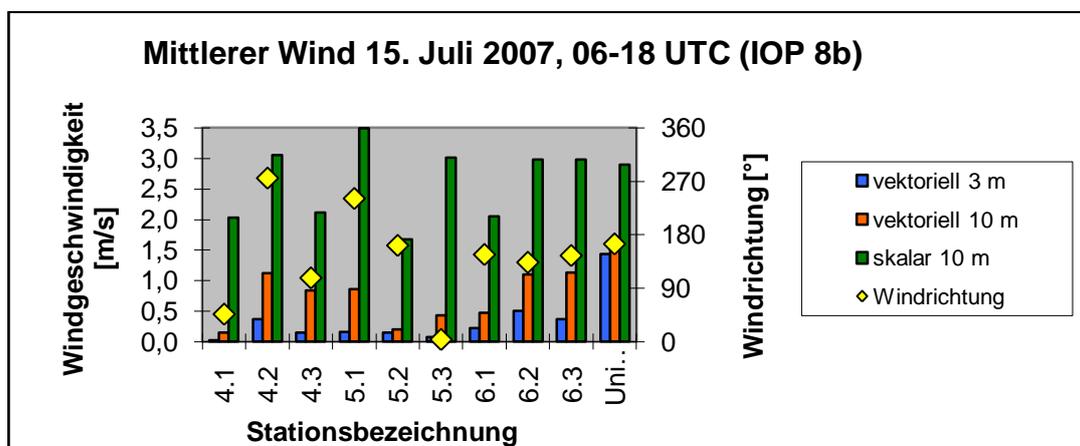


Abb. 4.13 Windanalyse vom 15.7.2007 (Mittelung von 06 UTC bis 18 UTC), Stationen mit hohen Rauigkeitslängen

Die Windgeschwindigkeiten beim Nachtmittel (18 UTC bis 6 UTC des darauffolgenden Tages) waren, wie auch bei den Nachtmittel zuvor, sehr gering (Abb. 4.14). Im Mittel lagen die Windgeschwindigkeiten bei 0,57 m/s (Standardabweichung 0,46 m/s) für den 10 m Wind (vektorielle Berechnung). Die Station 4.3 lieferte die höchsten Windgeschwindigkeiten; während die Stationen 5.3 und 6.1 mit 0,12 m/s kaum messbare Windgeschwindigkeiten lieferten. Die Windrichtungen zeigten komplett unterschiedliche Werte.

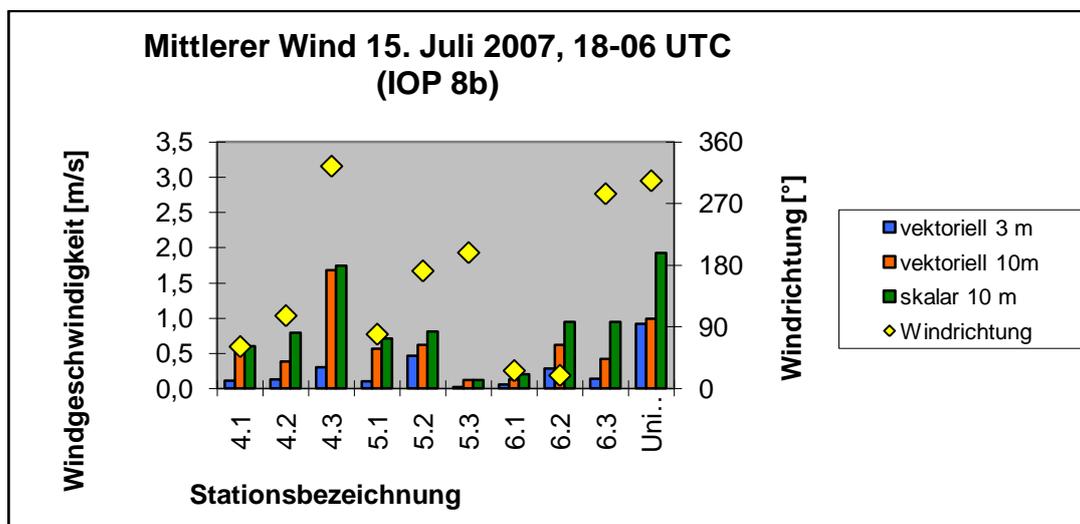


Abb. 4.14 Windanalyse vom 15.7.2007 (Mittelung von 18 UTC bis 06 UTC), Stationen mit hohen Rauigkeitslängen

Zu IOP 8b lässt sich abschließend bemerken, dass an diesem gradient- und dadurch windschwachen Tag sich nur schwer allgemeine Aussagen über den Wind machen lassen. An so einem gradientschwachen Tag prägen schwächere, lokale Zirkulation aufgrund der Topographie (Hänge, Mulden, etc.) die Windgeschwindigkeit und Windrichtung. An gradientstärkeren Tagen dominiert die synoptisch, großräumige Strömung. Die vektoruell gemittelten 3 m Winde lagen nur in einem einzigen untersuchten Fall über 1 m/s (Station 3.4 mit 1,1 m/s bei der Mittelung von 18–06 UTC). In 74,3 % aller untersuchten Stationen wurde eine Windgeschwindigkeit unter 0,5 m/s errechnet. Beim vektoruell gemittelten 10 m Wind überschritten die Windgeschwindigkeit nur in 3 Fällen 1,5 m/s (Station 4.4 mit 1,53 m/s, Station mit 7.2 mit 1,75 m/s (beide Mittelung

untertags) und Station 4.3 mit 1,68 m/s (beim Nachtmittel). In 74,3 % aller untersuchten Fälle wurde eine Windgeschwindigkeit unter 1 m/s erreicht und noch 44,8 % aller untersuchten Fälle zeigten eine Windgeschwindigkeit unter 0,5 m/s. Bis auf Abb. 4.5 (Mittelung der Stationen mit geringer Rauigkeitslänge untermittags) zeigen alle Ergebnisse eine große Variabilität in der Windgeschwindigkeit und Windrichtung

4.2 IOP 9c

4.2.1 Großwetterlage

Der seit Tagen anhaltende Hochdruckkeil über Mitteleuropa zog langsam ostwärts. Es näherte sich ein Tiefdrucksystem mit Zentrum über den Britischen Inseln. Die dazugehörige Kaltfront mit niedrigeren Temperaturen wurde erwartet (Abb. 4.15).

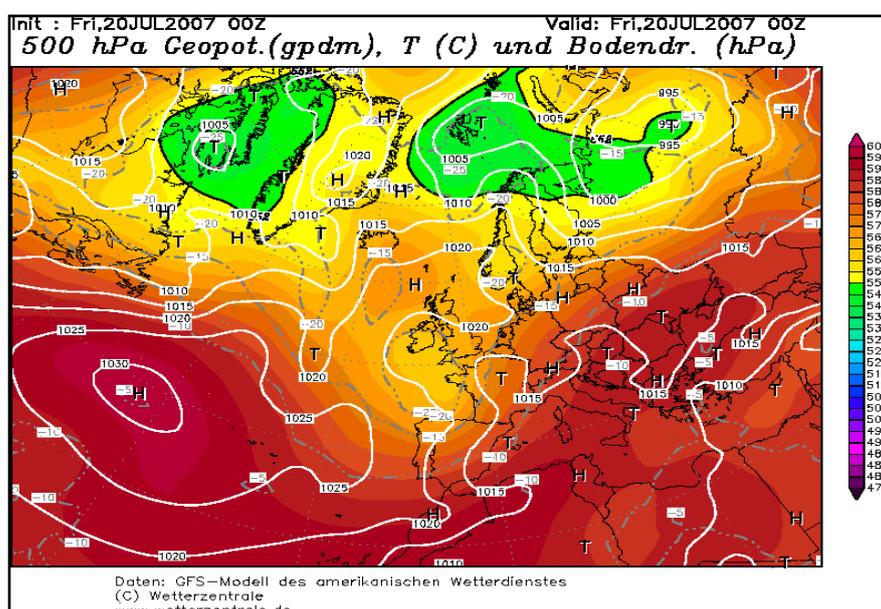


Abb. 4.15 GFS Darstellung der Großwetterlage vom 20. Juli 2007, 12 UTC (www.wetterzentrale.de, 2009)

Starke konvektive Niederschläge mit Überflutungen in Deutschland aufgrund der sich annähernden Kaltfront wurden prognostiziert. Speziell in der COPS Region wurde wegen der zusätzlichen orographischen Hebung starke Konvektion erwartet (COPS-Homepage, 2008).

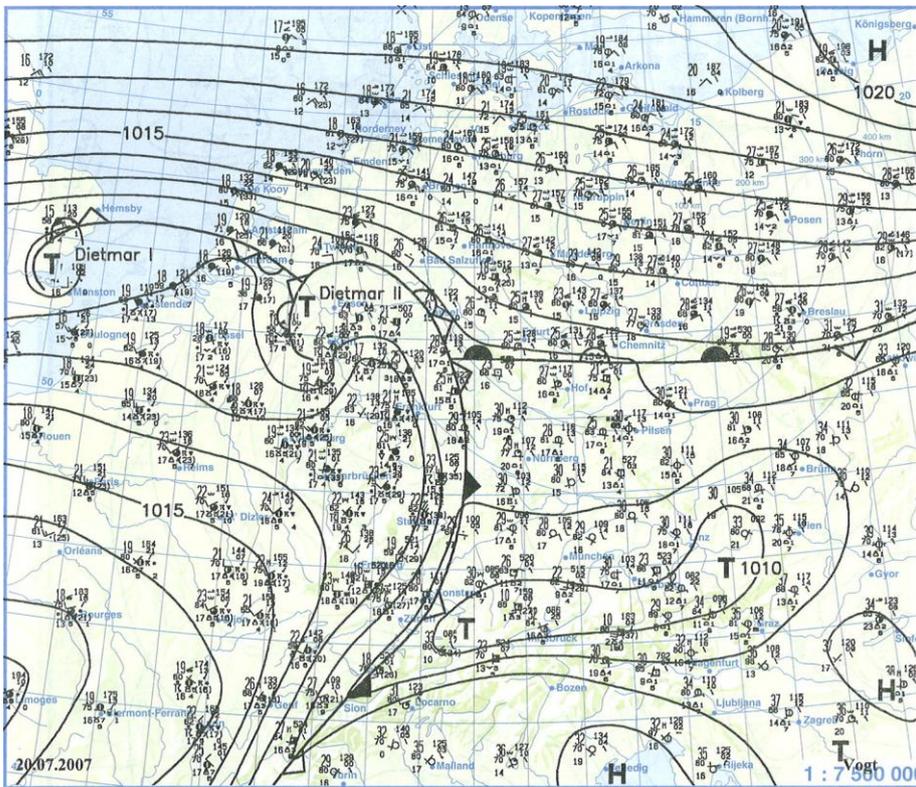


Abb. 4.16 Wetterlage über Deutschland vom 20. Juli 2007, 12 UTC (Berliner Wetterkarte)

Auch hier wurde die Prognose der COPS-Homepage mit den, beim Deutschen Wetterdienst, gemeldeten Wetterdaten der Station 10738 Stuttgart-Echterdingen (Deutscher Wetterdienst, 2009) verifiziert.

T _{mit} [°C]	RF [%]	ff [m/s]	SO [h]	Bedeckungs- grad [1/8]	RR [mm]	pp [hPa]
22,7	72	3,0	11,9	5/8	4,4	969

Der 20. Juli 2007 war ein mäßig warmer, schwüler Tag mit einer relativ langen Sonnenscheindauer (siehe auch Abb. 4.16). Aber auch Wolken waren vorhanden.

Es fiel an diesem Tag Niederschlag an der Messstation in Stuttgart-Echterdingen (Deutscher Wetterdienst, 2009).

4.2.2 Stationen mit geringer Rauigkeitslänge

Bei der Extrapolation auf 10 m ergaben sich sehr einheitliche Windgeschwindigkeiten (Abb. 4.17). Im Mittel lagen die Windgeschwindigkeiten des vektoriell berechneten 10 m Wind bei 1,5 m/s (Standardabweichung 0,51 m/s). Bei der Windrichtung zeigte sich ebenfalls ein sehr einheitlicher Westwind. Auch im Vergleich zu den Ergebnissen der Uni Bonn ergaben sich vergleichbare Werte. Lediglich die Ergebnisse der Station 4.4 zeigten etwas geringere Windgeschwindigkeit (0,48 m/s) beim vektoriellen 10 m Wind. Diese Station lag in unmittelbarer Nähe zur Referenzstation der Uni Bonn. Die Station stand auf einem leicht nach Westen abfallenden Hang in freiem Gelände. Eventuell lag eine leichte Überstömung der Station vor oder es gibt Diffluenzeffekte beim vorherrschenden Westwind.

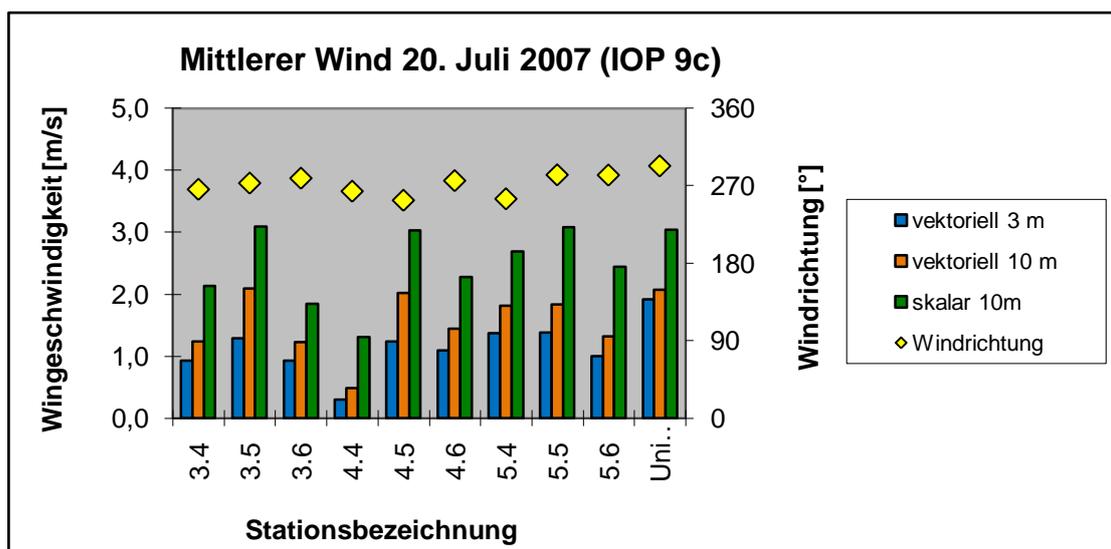


Abb. 4.17 Windanalyse vom 20.7.2007 (24h Mittel), Stationen mit geringen Rauigkeitslängen

Die Ergebnisse des Mittels untertags zeigten ein sehr ähnliches Bild wie das 24 h Mittel (Abb. 4.18). Insgesamt lagen aber, wie zu erwarten, die Windgeschwindigkeiten höher (Mittelwert 2,33 m/s, Standardabweichung 0,77 m/s). Der Wind war wieder einheitlicher aus West. Auch hier lieferte die Analyse der Station 4.4 die geringsten Windgeschwindigkeiten.

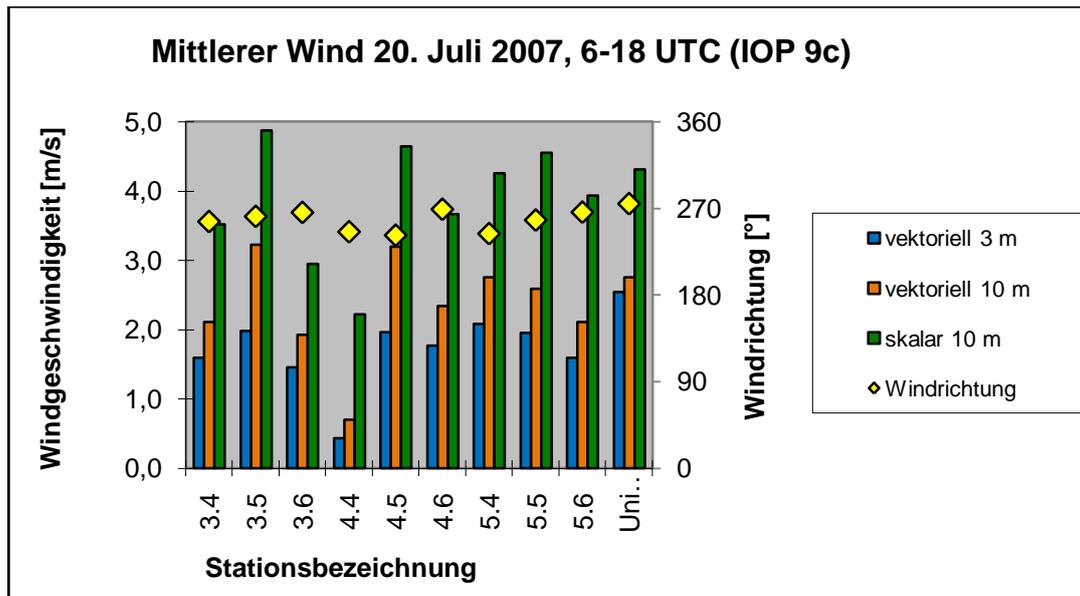


Abb. 4.18 Windanalyse vom 20.7.2007 (Mittelung von 06 UTC bis 18 UTC), Stationen mit geringen Rauheitslängen

Die Ergebnisse der Analysen für das 12 h Nachtmittel (Abb. 4.19) zeigten vektoruell geringe gemittelte Windgeschwindigkeiten (z.B. vektorieller gemittelter 10 m Wind: 0,9 m/s, Standardabweichung 0,41 m/s). Die Windrichtung wies einheitlich aus Nordwest.

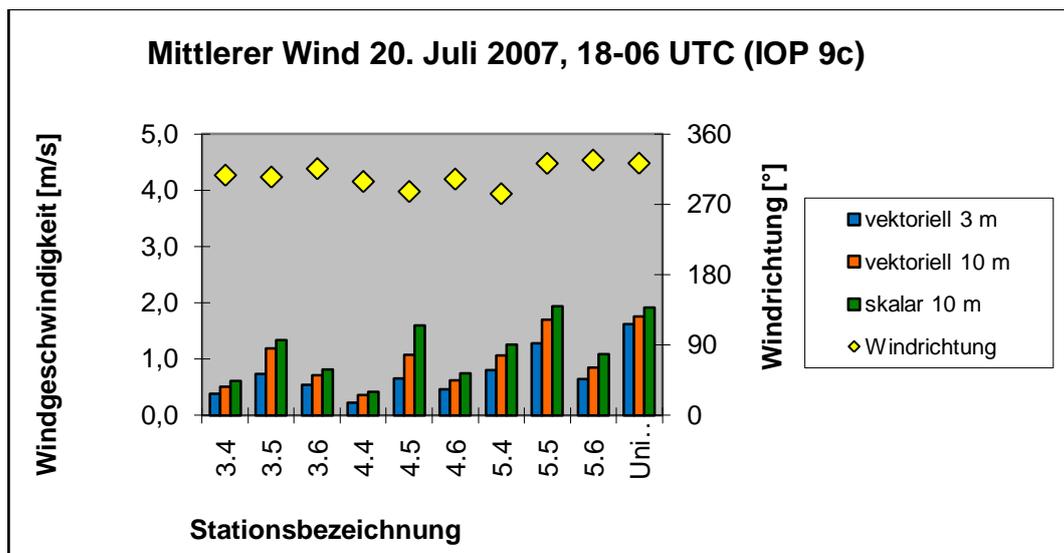


Abb. 4.19 Windanalyse vom 20.7.2007 (Mittelung von 18 UTC bis 06 UTC), Stationen mit geringen Rauigkeitslängen

4.2.3 Stationen mit unterschiedlichen Rauigkeitslängen

Auch bei den Stationen mit den unterschiedlichen Rauigkeitslängen zeigte sich ein ähnliches Bild wie bei den Stationen mit niedrigen Rauigkeitslängen (Abb. 4.20). Die Windrichtung (auch aus West) zeigte etwas mehr Schwankungsbreite. Die geringste Windgeschwindigkeit wies Station 7.1 auf. Diese Station lag im Lee eines Waldes auf einer Neigung, die in westliche Richtung abfällt.

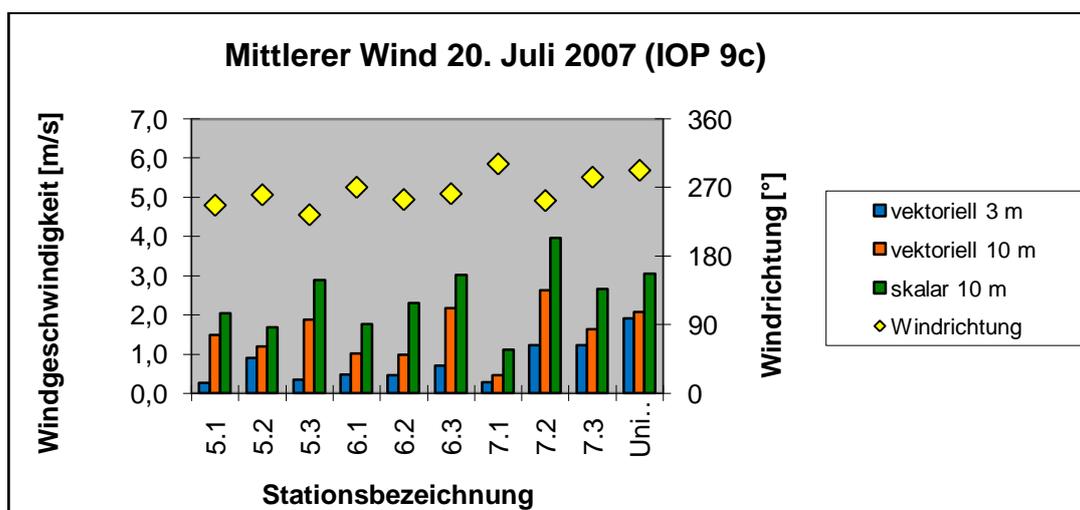


Abb. 4.20 Windanalyse vom 20.7.2007 (24 h Mittel), Stationen mit unterschiedlichen Rauigkeitslängen

Die Ergebnisse der Windgeschwindigkeit des 12 h Tagesmittels (Abb. 4.21) ergaben hier etwas höhere Geschwindigkeiten (10 m Mittel vektoriell: 2,58 m/s, Standardabweichung 1,17 m/s). Bei der Windrichtung erhielten wir trotz der unterschiedlichen Rauigkeitslängen wieder ein sehr einheitliches Bild mit Westwind. Obwohl zu erwarten war, dass die verschiedenen Aufstellbedingungen sehr wohl auch die Windrichtungen durch Turbulenzbildung beeinflussten. Hier scheint die zeitliche Mittelung die entsprechenden Korrekturen vorzunehmen.

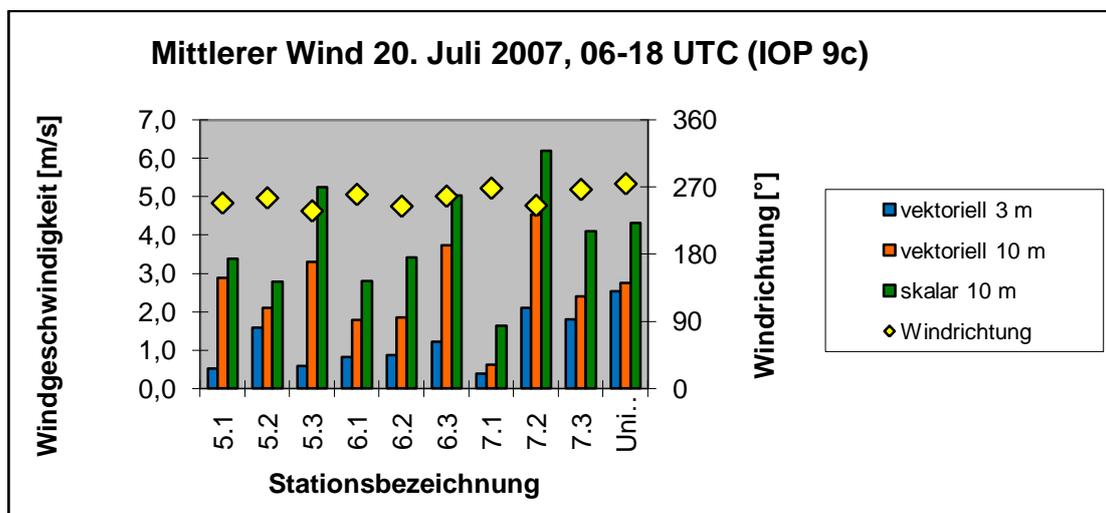


Abb. 4.21 Windanalyse vom 20.7.2007 (Mittelung von 06 UTC bis 18 UTC), Stationen mit unterschiedlichen Rauigkeitslängen

Beim 12 h Nachtmittel (Abb. 4.22) ergaben sich wieder sehr geringe Windgeschwindigkeiten und entsprechend uneinheitliche dazugehörige Windrichtungen, jedoch meist aus Nordwest. Die Schwankungen ließen sich wieder mit der sehr geringen Windgeschwindigkeit erklären. Die Windgeschwindigkeiten lagen im Vergleich zu den Daten der Uni Bonn niedriger.

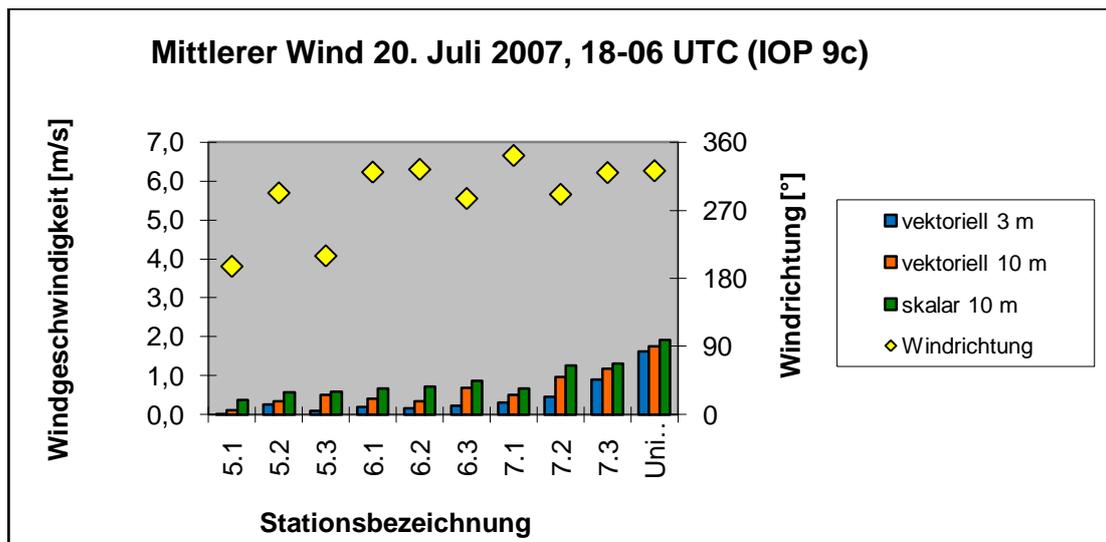


Abb. 4.22 Windanalyse vom 20.7.2007 (Mittelung von 18 UTC bis 06 UTC), Stationen mit unterschiedlichen Rauigkeitslängen

4.2.4 Stationen mit hoher Rauigkeitslänge

Bei den Stationen mit hohen Rauigkeitslängen betrug der vektoruell gemittelte 10 m Wind 1,33 m/s (Standardabweichung 0,63 m/s). Die Windrichtung ergab ein erstaunlich einheitliches Bild mit Wind aus West (Abb. 4.23). Bei den Stationen mit hoher Rauigkeitslänge lieferte die Station 4.3 die geringsten Werte in bezug auf die Windgeschwindigkeit des vektoruell gemittelten 10 m Windes. Station 4.2 lieferte die höchsten Windgeschwindigkeiten. Diese Station stand im Luv eines Waldes, an einem nach Westen abfallenden Hang und war somit gut exponiert, was sich in der Windgeschwindigkeit widerspiegelte.

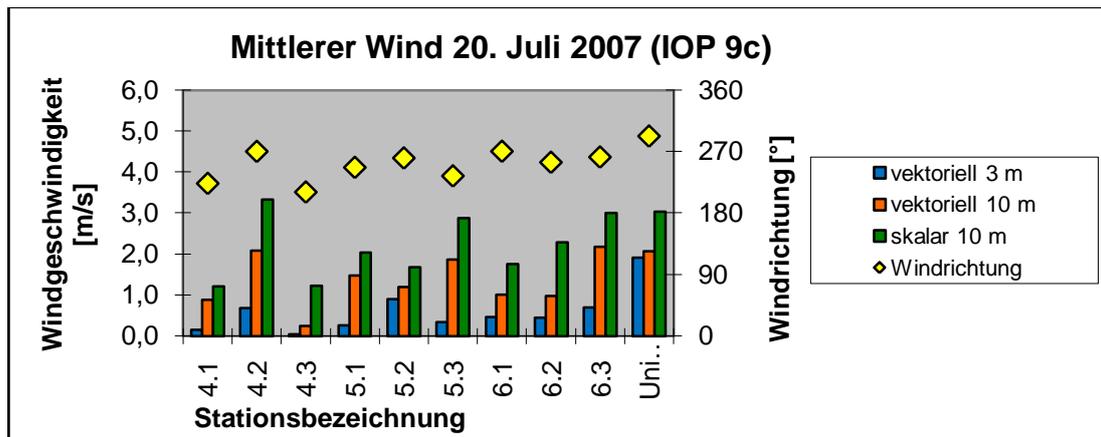


Abb. 4.23 Windanalyse vom 20.7.2007 (24h Mittel), Stationen mit hohen Rauigkeitslängen

Das 12 h Tagesmittel (Abb. 4.24) zeigte ähnliche Ergebnisse wie das 24 h Mittel. Die Windgeschwindigkeiten waren wie bei allen Tagesmitteln höher (vektoriell gemittelter 10 m Wind 2,45 m/s, Standardabweichung 1,12m/s), speziell Station 4.2 lieferte hier die höchste Windgeschwindigkeit (4,04 m/s). Die Windrichtung war einheitlich West. Auch hier lieferte die Station 4.3 als Station mit höchster Rauigkeitslänge die niedrigsten Windgeschwindigkeiten.

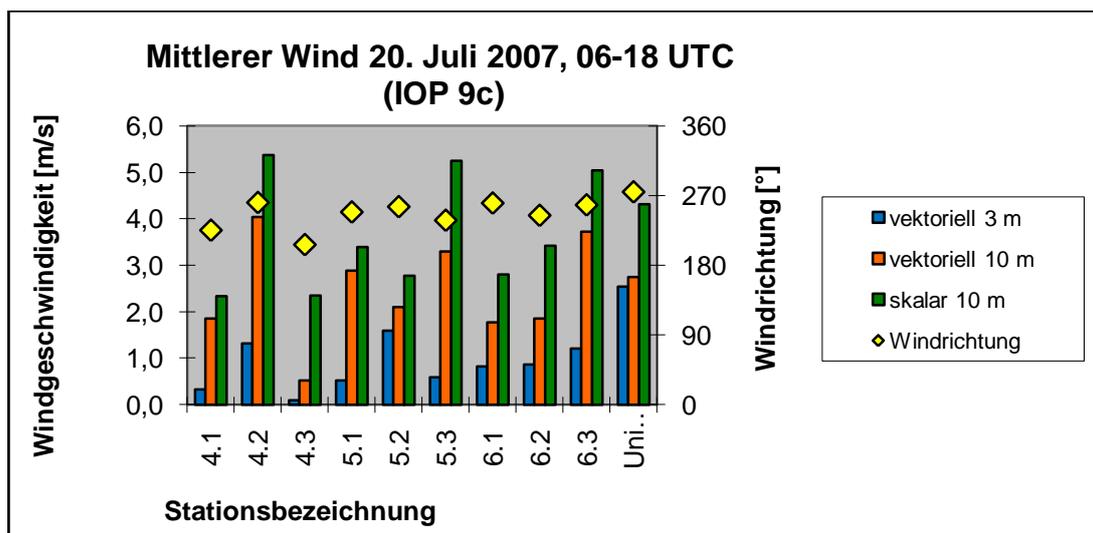


Abb. 4.24 Windanalyse vom 20.7.2007 (Mittelung von 06 UTC bis 18 UTC), Stationen mit hohen Rauigkeitslängen

Beim 12 h Nachtmittel zeigten sich die geringsten Windgeschwindigkeiten für alle untersuchten Fälle von IOP 9c mit 0,36 m/s (Standardabweichung 0,24 m/s) für den vektoriell gemittelten 10 m Wind (Abb. 4.25). Auch diese geringen Windgeschwindigkeiten lagen im Bereich der Ungenauigkeit des Messgerätes. Dadurch war die Windrichtung sehr kritisch zu betrachten und lieferte ein sehr uneinheitliches Bild. Auch in der Nacht zeigte die Station 4.2 die höchsten Windgeschwindigkeiten.

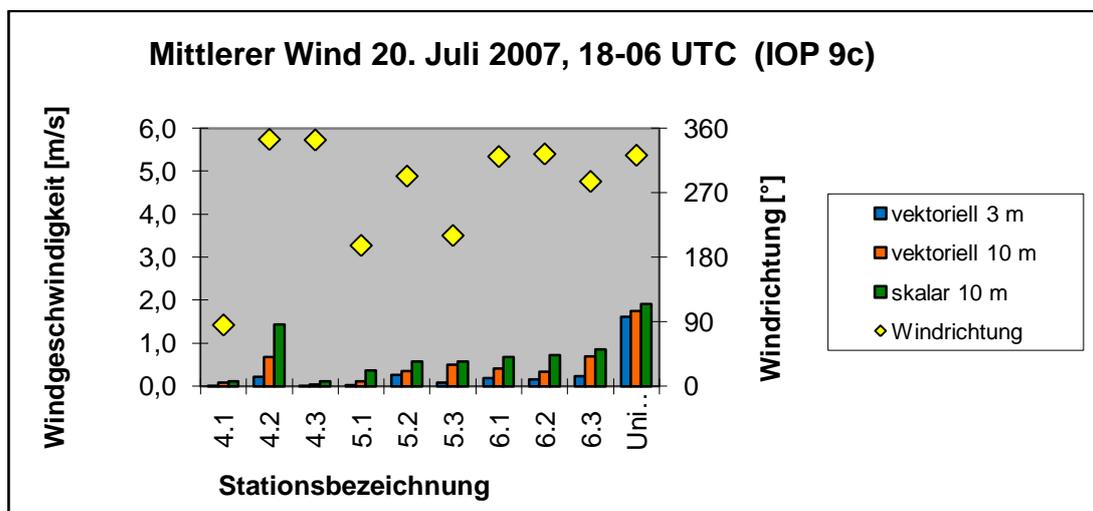


Abb. 4.25 Windanalyse vom 20.7.2007 (Mittelung von 18 UTC bis 06 UTC), Stationen mit hohen Rauheitslängen

Da die Windgeschwindigkeiten am 20 Juli 2007 höher als am 15. Juli 2007 waren, erzielten wir bei der Windrichtung einheitlichere Ergebnisse. In 27,2 % aller untersuchten Fälle lag die Windgeschwindigkeit über 2 m/s, in 9,9 % lag sie über 3 m/s und nur in 2 Fällen über 4 m/s (Station 4.2 mit 4,04 m/s und Station 7.2 mit 4,53 m/s, beide beim 12 h Tagesmittel). Beim 12 h Nachtmittel wurde nur in 5 von 27 Fällen eine Windgeschwindigkeit über 1 m/s erreicht. Durch die geringen nächtlichen Windgeschwindigkeiten erklären sich auch die starken Schwankungen der Windrichtung zu dieser Zeit. Die 24h Mittel und die 12h Tagesmittel aller Stationsgruppen lieferten Windrichtungen aus West mit einer geringen Abweichung.

Die Windgeschwindigkeiten variierten nach wie vor stark. Hier schienen die Modifikationsmaßnahmen aufgrund der Extrapolation keine verlässliche Korrektur zu zulassen um ein einheitliches Ergebnis in der Windgeschwindigkeit zu erhalten.

4.3 IOP 13a

4.3.1 Großwetterlage

Die Achse eines über Westeuropa liegenden Keils, der sich vom Mittelmeer bis zu den Britischen Inseln erstreckte, überquert die COPS-Region im Laufe des Nachmittags (siehe Abb. 4.26).

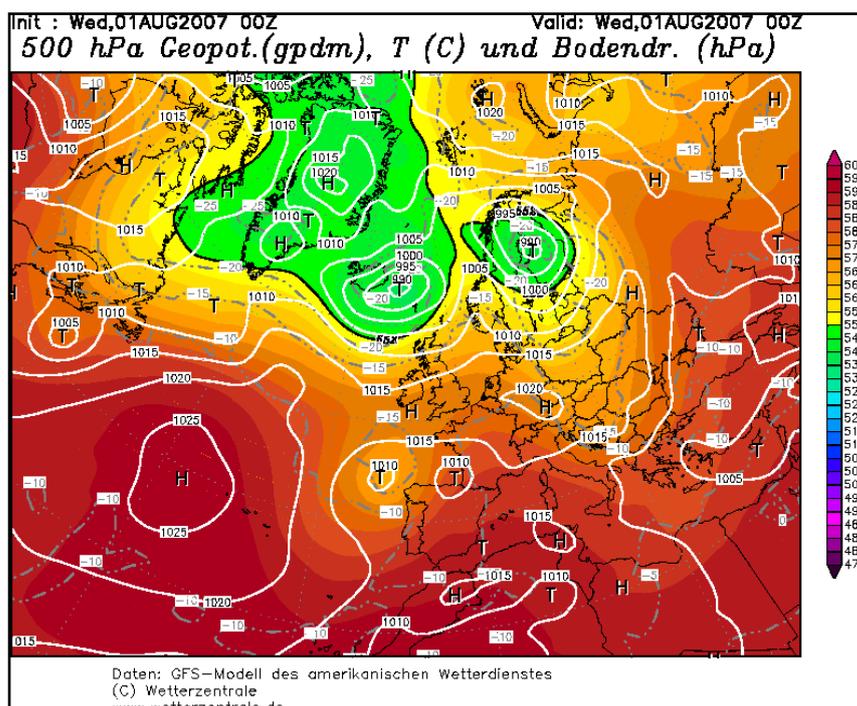


Abb. 4.26 GFS-Darstellung der Großwetterlage vom 1. Aug. 2007, 12 UTC (www.wetterzentrale.de, 2009)

Vor dem herannahenden Trog über dem Golf von Biskaya fand starke Warmluftadvektion über Frankreich statt und beeinflusste die COPS-Region am Nachmittag und Abend. Trockene Luftmassen über der COPS-Region verhinderten ausgiebige Konvektion. Während des Tages wurden nur vereinzelte niedrige Cumuli erwartet. Im Laufe der Nacht zog ein Tiefdruckgebiet aus Südwesten kommend über die COPS-Region (COPS-Homepage, 2008).

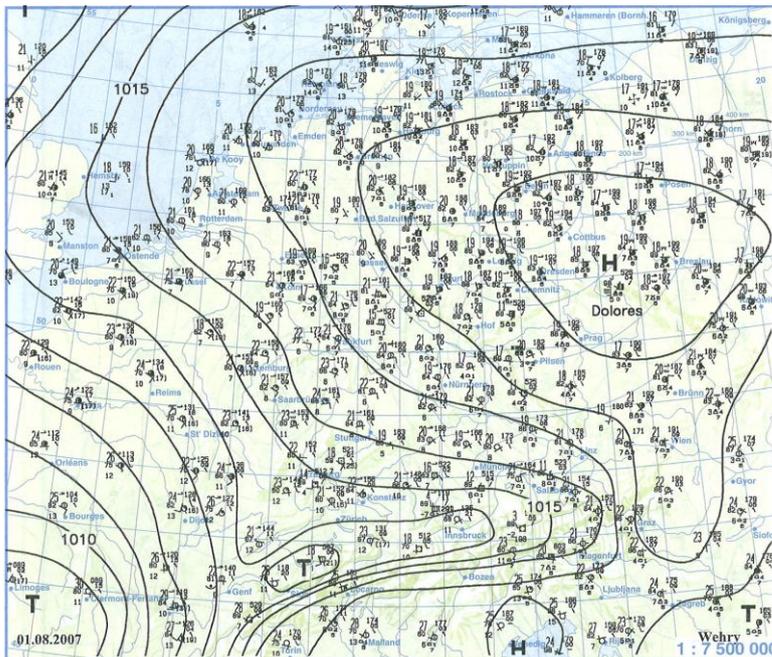


Abb. 4.27 Wetterlage über Deutschland 1. August 2007, 12 UTC (Berliner Wetterkarte)

Verifiziert wurde die Prognose der COPS-Homepage mit den, beim Deutschen Wetterdienst, gemeldeten Wetterdaten der Station 10738 Stuttgart-Echterdingen (Deutscher Wetterdienst, 2009).

T_{mit} [°C]	RF [%]	ff [m/s]	SO [h]	Bedeckungs- grad [1/8]	RR [mm]	pp [hPa]
15,9	57	2,3	7,8	1/8	0.3	970

Der 1. August 2007 war ein kühler, gradientschwacher Tag mit einer geringen Sonnenscheindauer (siehe auch Abb. 4.27). An der Messstation in Stuttgart-Echterdingen wurde 0,3 mm Niederschlag gemessen (Deutscher Wetterdienst, 2009).

4.3.2 Stationen mit geringer Rauigkeitslänge

Sämtliche mittleren Winde lieferten ein sehr einheitliches Bild für den 1. Aug. 2007, auch im Vergleich zu den Daten der Uni Bonn (Abb. 4.28). Der vektoriell gemittelte 10 m Wind lag im Mittel für die untersuchten Stationen bei 1,47 m/s, mit einer relativ geringen Standardabweichung von 0,26 m/s. Die Windrichtung war Südost.

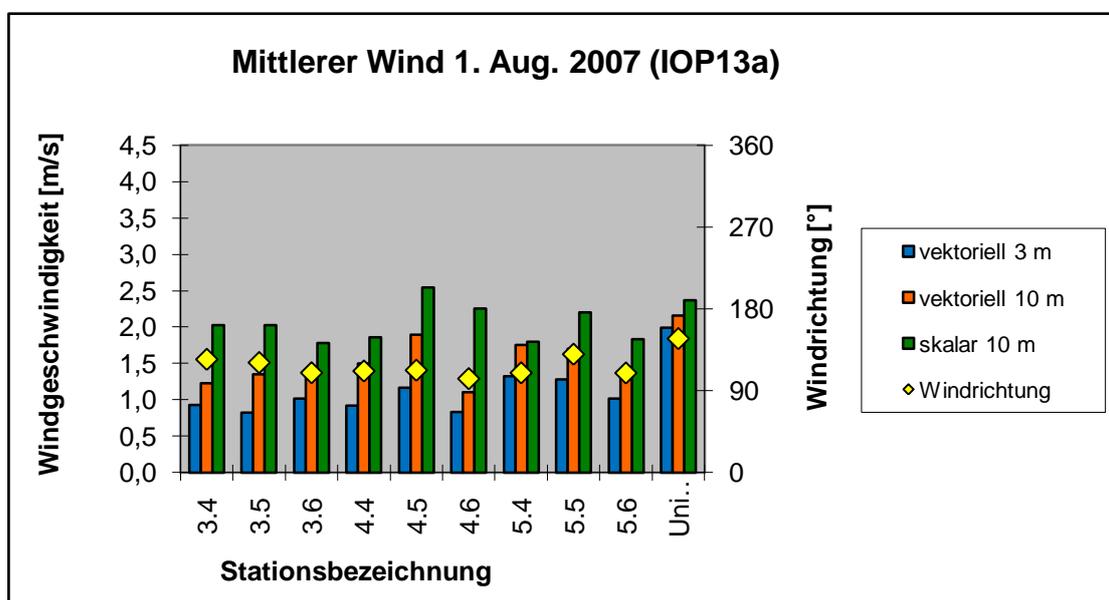


Abb. 4.28 Windanalyse vom 1.8.2007 (24h Mittel), Stationen mit geringen Rauigkeitslängen

Auch beim 12 h Tagesmittel ergaben sich mit einem vektoriell gemittelten 10 m Wind von 2,84 m/s und einer Standardabweichung von 0,32 m/s sehr einheitliche Resultate. Der Wind wehte aus östlicher Richtung (siehe Abb. 4.29).

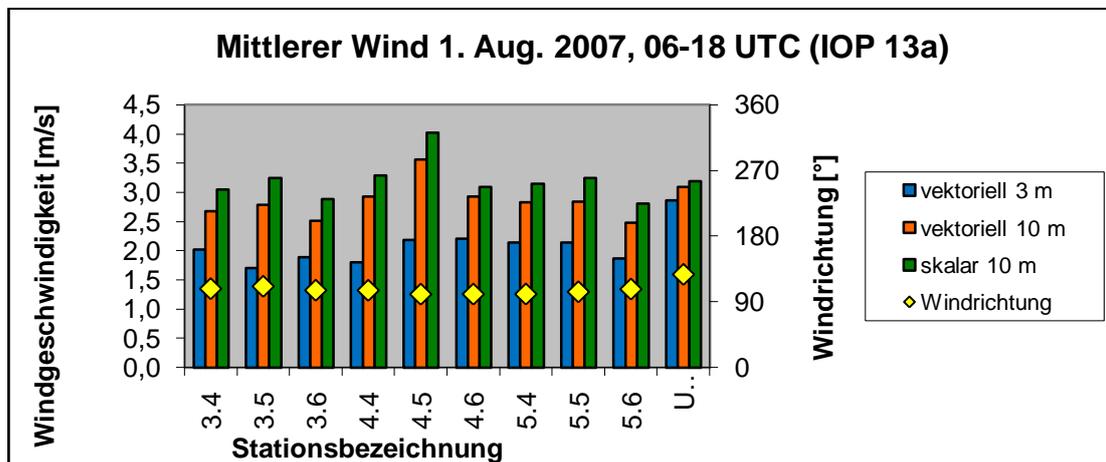


Abb. 4.29 Windanalyse vom 1.8.2007 (Mittlung von 06 UTC bis 18 UTC), Stationen mit geringen Rauheitslängen

Die Ergebnisse des Nachtmittels (Abb. 4.30) lagen wieder niedriger als tagsüber. Im Durchschnitt lag der vektoriell gemittelte 10 m Wind bei 0,67 m/s (Standardabweichung 0,41 m/s). Aufgrund der geringen Windgeschwindigkeiten ergaben sich wieder unterschiedliche Windrichtungen für den betrachteten Bereich.

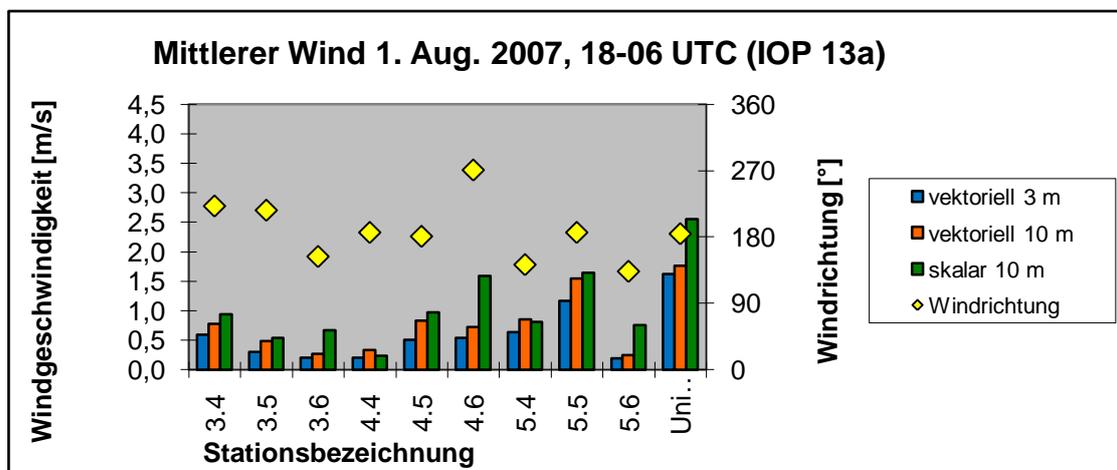


Abb. 4.30 Windanalyse vom 1.8.2007 (Mittlung von 18 UTC bis 06 UTC), Stationen mit geringen Rauheitslängen

4.3.3 Stationen mit unterschiedlichen Rauigkeitslängen

An diesem Tag zeigten sich mittlere 10 m Winde von 1,47 m/s mit einer Standardabweichung von 0,85 m/s (Abb. 4.31). Die Windrichtung ergab kein einheitliches Bild. Der Wind schwankte zwischen Nordost (Station 5.3) und Südost (Station 7.3). Die Stationen 6.2 und 6.3 mit den höchsten Windgeschwindigkeiten lagen beide auf nach Süden abfallenden Hängen und somit gut exponiert, was sich in den hohen Windgeschwindigkeiten zeigte.

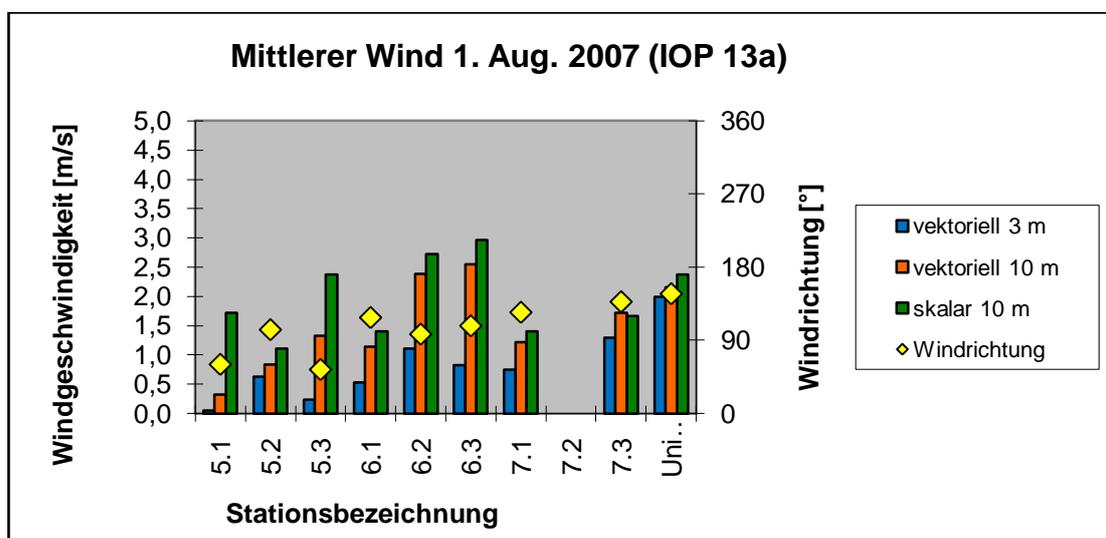


Abb. 4.31 Windanalyse vom 1.8.2007 (24h Mittel), Stationen mit unterschiedlichen Rauigkeitslängen (Station 7.2 lieferte keine verwertbaren Daten)

Bei den Ergebnissen des Tagesmittels zeigten sich erstmals sehr uneinheitliche Ergebnisse (Abb. 4.32). Die vektoruell gemittelte 10 m Windgeschwindigkeit lag bei 2,06 m/s mit einer Standardabweichung von 1,23 m/s. Bei den Ergebnissen der Uni Bonn lagen die gemittelten Ergebnisse des 3 m Windes und des 10 m Windes sehr knapp beieinander. Bei den Stationen der Uni Wien zeigten sich teilweise sehr große Unterschiede zwischen den zwei Winden. Hier ergab die Extrapolation keine Vereinheitlichung der Windgeschwindigkeit, sondern spiegelte das uneinheitliche Ergebnis der unterschiedlichen Rauigkeitslängen wider.

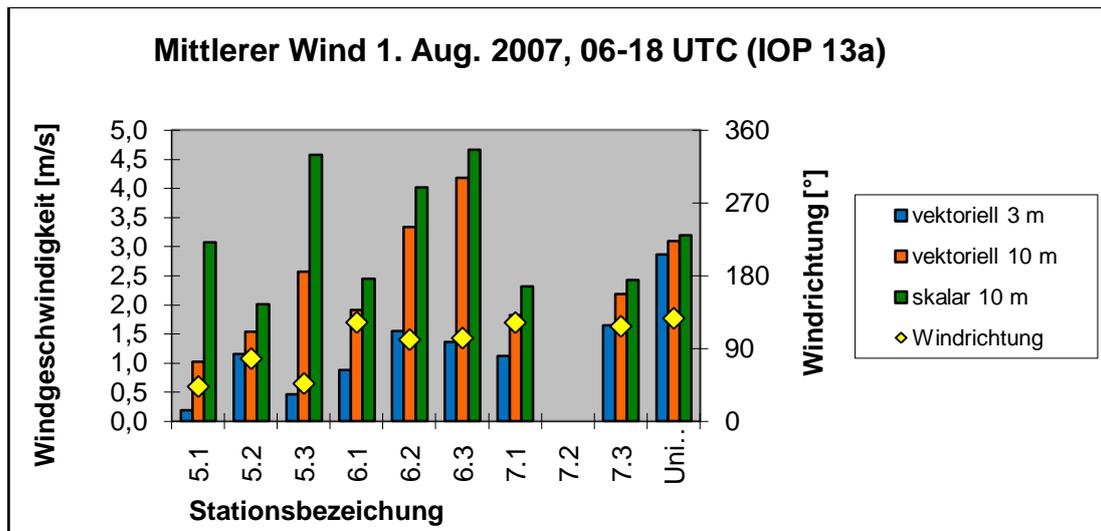


Abb. 4.32 Windanalyse vom 1.8.2007 (Mittelung von 06 UTC bis 18 UTC), Stationen mit unterschiedlichen Rauigkeitslängen (Station 7.2 lieferte keine verwertbaren Daten)

Auch das Nachtmittel (Abb. 4.33) lieferte unterschiedliche Ergebnisse. Das Mittel des 10 m Windes lag bei 0,74 m/s (Standardabweichung 0,52 m/s). Auch bei der Windrichtung ergab sich kein einheitliches Ergebnis; speziell bei den Stationen mit sehr geringen Windgeschwindigkeiten. Die Stationen 6.2 und 7.3 lieferten etwas höhere Windgeschwindigkeiten. Auch Station 7.3 lag an einem nach Süden abfallenden Hang, wie Station 6.2.

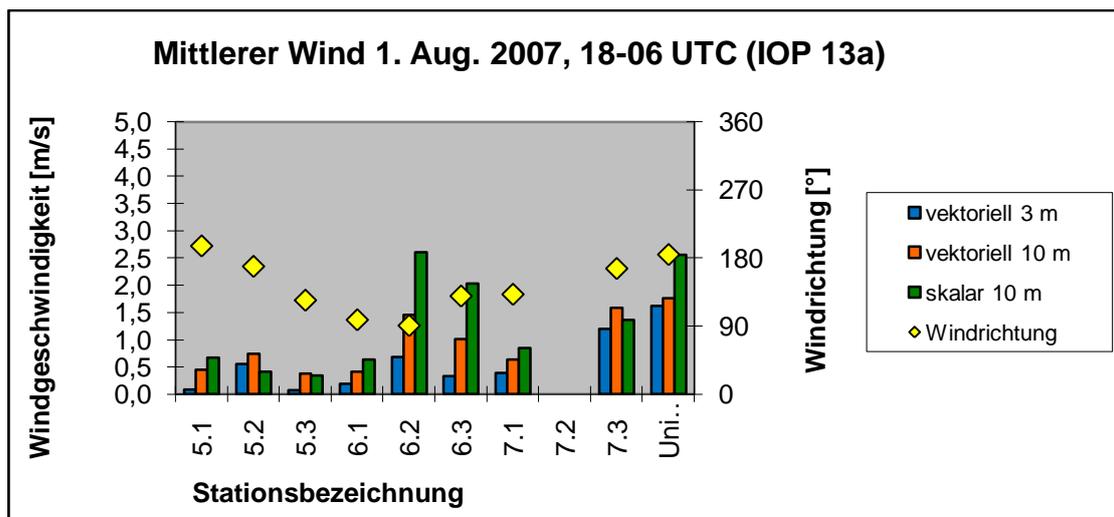


Abb. 4.33 Windanalyse vom 1.8.2007 (Mittelung von 18 UTC bis 06 UTC), Stationen mit unterschiedlichen Rauigkeitslängen (Station 7.2 lieferte keine verwertbaren Daten)

4.3.4 Stationen mit hoher Rauigkeitslänge

Bei den Stationen mit den hohen Rauigkeitslängen zeigten sich die geringsten gemittelten Windgeschwindigkeiten für den 1. August 2007 mit 1,19 m/s für den vektoriell gemittelten 10 m Wind und einer Standardabweichung von 0,82 m/s (Abb. 4.34). Die Windrichtung lag zwischen Ost und Süd

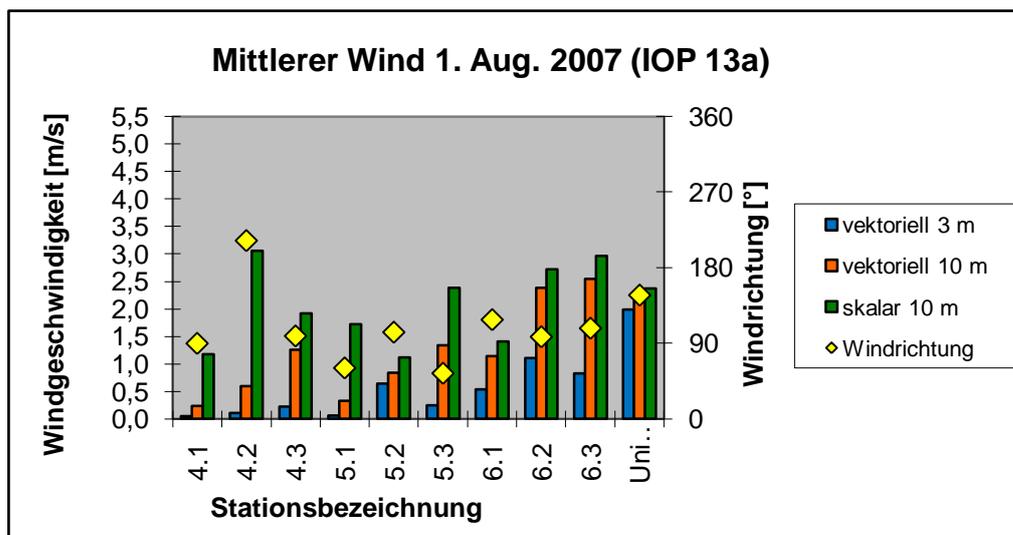


Abb. 4.34 Windanalyse vom 1.8.2007 (24h), Stationen mit hohen Rauigkeitslängen

Beim 12 h Tagesmittel (Abb. 4.35) lag die vektoriell gemittelte 10 m Windgeschwindigkeit bei 2,07 m/s (Standardabweichung 1,17 m/s). Der Wind kam aus östlicher Richtung mit Ausnahme der Stationen 4.2, hier war die Windrichtung Nordwest.

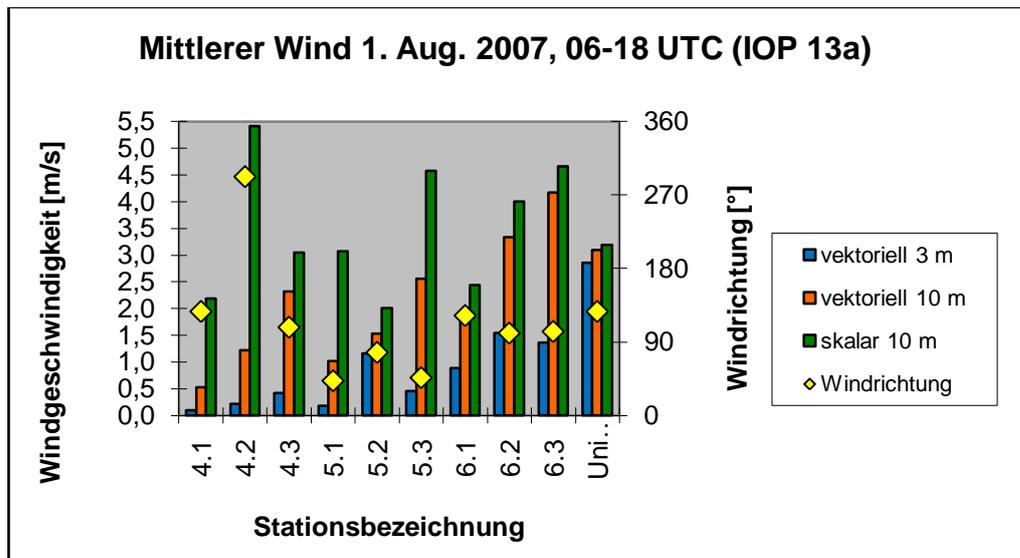


Abb. 4.35 Windanalyse vom 1.8.2007 (Mittelung von 06 UTC bis 18 UTC), Stationen mit hohen Rauigkeitslängen

Auch hier zeigten sich für das Nachtmittel (Abb. 4.36) sehr geringe Windgeschwindigkeiten (0,75 m/s für den vektoruell gemittelten 10 m Wind mit einer Standardabweichung von 0,48 m/s). Station 4.2 und Station 6.2 lieferten die höchsten Windgeschwindigkeiten. Auch die Windrichtungen schwankten stark und ergaben Richtungen zwischen Nord und Süd über Ost. Station 6.2 lag bei Ostwind in Lee eines Waldes.

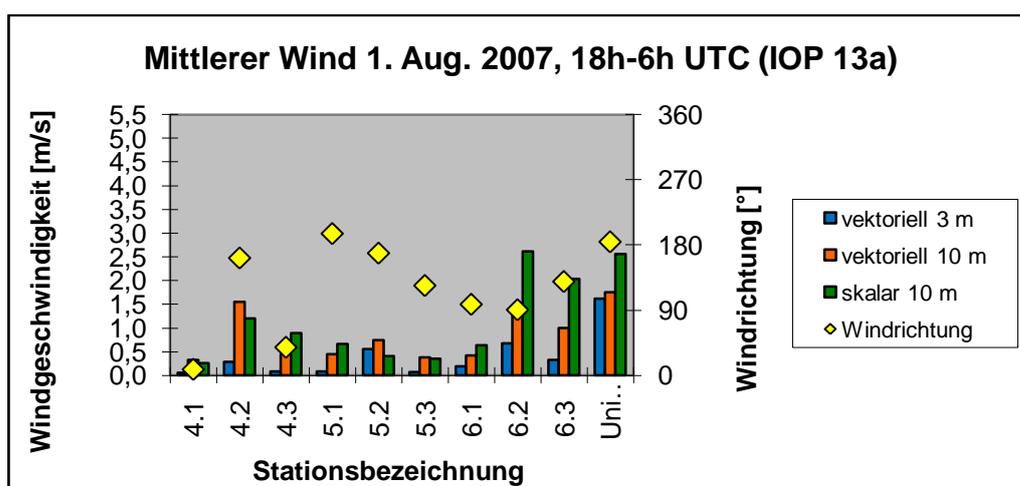


Abb. 4.36 Windanalyse vom 1.8.2007 (18h UTC bis 6h UTC), Stationen mit hohen Rauigkeitslängen

Auch die am 1. August 2007 gemessenen Windgeschwindigkeiten sind eher als gering zu bezeichnen. In 30,0 % aller untersuchten Fälle lag die Windgeschwindigkeit des vektoruell gemittelten 10 m Windes bei über 2 m/s. In 3 Fällen über 3 m/s (Station 4.5 mit 3,56 m/s und Station 6.2 mit 3,33 m/s, beide untertags). Nur in 1 Fall über 4 m/s (Station 6.3 mit 4,18 m/s, ebenfalls untertags). Bei der Mittelung von 18 bis 06 UTC des darauffolgend Tages erreichte der Wind in nur 5 Fällen eine Geschwindigkeit über 1 m/s. Dies erklärte wieder die starke Schwankung in der Windrichtung während der Nacht, da hier die Einflüsse der kleinräumigen Zirkulationen vorherrschend waren.

Speziell die Ergebnisse der Stationen mit den geringen Rauigkeitslängen zeigten, sowohl in der Windrichtung als auch Windgeschwindigkeit sehr homogene Ergebnisse (Abb. 4.28 und Abb. 4.29). Es wurden auf offenem Gelände anscheinend Ergebnisse erreicht, die für ein größeres Gebiet repräsentativ sind. Die Ergebnisse der Stationen mit höheren bzw. unterschiedlichen Rauigkeitslängen schienen hier nur für ihren unmittelbaren Aufstellort gültig zu sein.

4.4 IOP 13b

4.4.1 Großwetterlage

In den frühen Morgenstunden wurde eine Kaltfront mit starker Bewölkung und auch konvektiven Wolken über der COPS Region erwartet. In der unteren Troposphäre wurden Windgeschwindigkeiten von 15 – 20 m/s erwartet (Abb. 4.37).

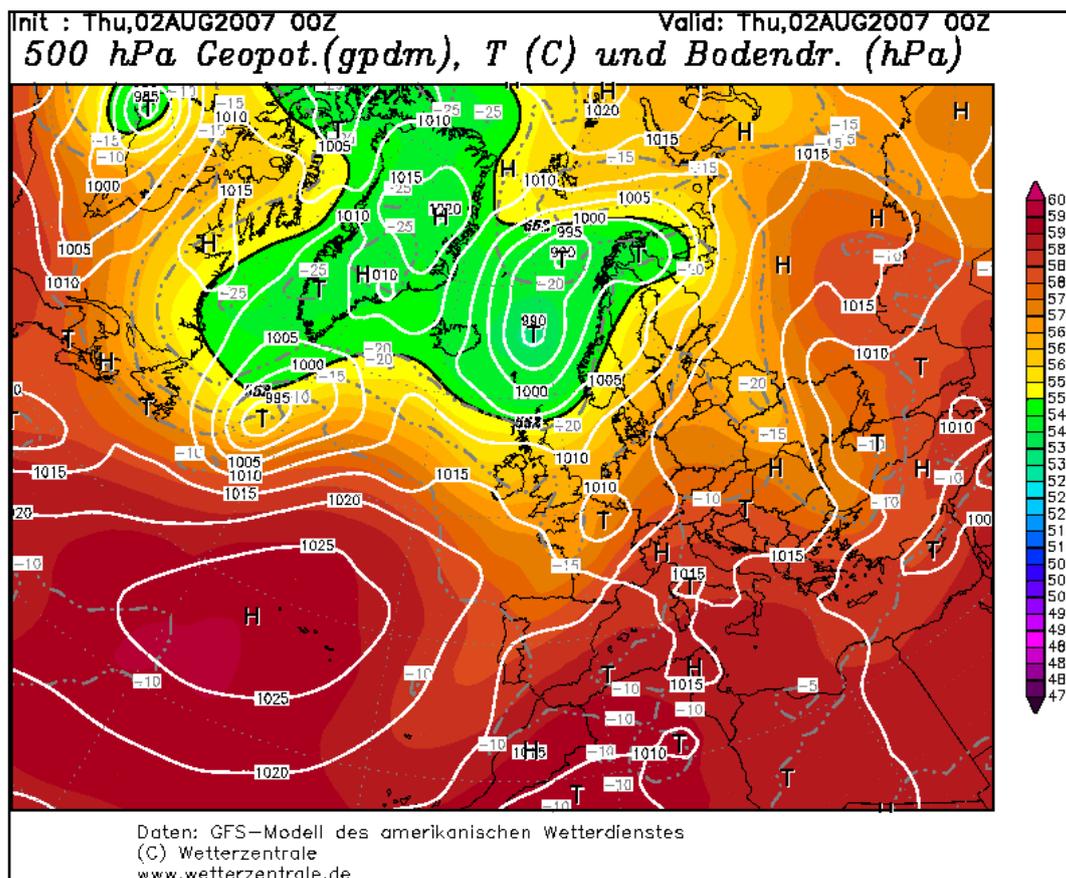


Abb. 4.37 GFS-Darstellung der Großwetterlage vom 2. Aug. 2007, 12 UTC (www.wetterzentrale.de, 2009)

Die COPS Region lag im Einflussbereich einer südwestlichen Strömung durch einen Keil der sich von Österreich bis zum Baltikum ausdehnte. Ein eingelagerter Kurzwellentrog mit einer schwach ausgeprägten Kaltfront überquerte die COPS Region gegen 12.00 UTC. Südlich des über Holland liegenden Bodentiefs wurden hohe Windgeschwindigkeiten (15 – 20 m/s) erwartet (COPS-Homepage, 2008).

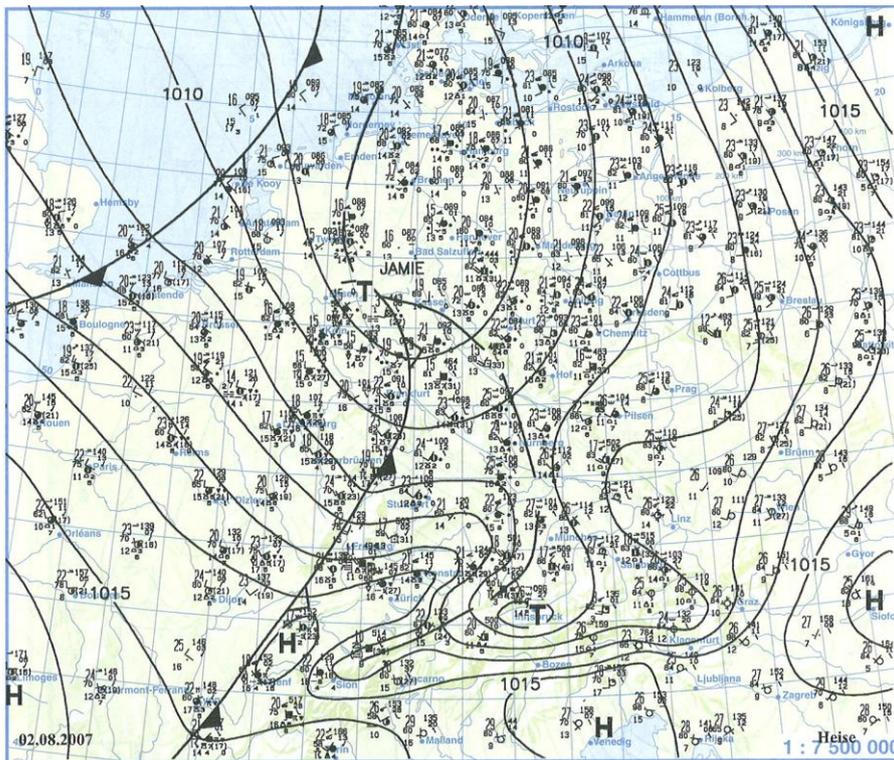


Abb. 4.38 Wetterlage über Deutschland vom 2. Aug. 2007, 12 UTC (Berliner Wetterkarte)

Verifiziert wurde die Prognose der COPS-Homepage wieder mit den, beim Deutschen Wetterdienst, gemeldeten Wetterdaten der Station 10738 Stuttgart-Echterdingen (Deutscher Wetterdienst, 2009).

T_{mit} [°C]	RF [%]	ff [m/s]	SO [h]	Bedeckungs- grad [1/8]	RR [mm]	pp [hPa]
18,2	68	3,5	2,9	6/8	1,1	967

Der 2. August 2007 war ein kühler Sommertag mit einer sehr geringen Sonnenscheindauer und vielen Wolken (siehe auch Abb. 4.38). An diesem Tag

wurde geringer Niederschlag an der Messstation in Stuttgart-Echterdingen gemessen (Deutscher Wetterdienst, 2009). Hohe Windgeschwindigkeiten wurden nicht erreicht.

4.4.2 Stationen mit geringer Rauigkeitslänge

Die mittlere Windgeschwindigkeit für den vektoriell gemittelten 10 m Wind betrug 2,78/s, mit einer Standardabweichung von 0,9 m/s. Obwohl die in Abb. 4.39 angeführten Stationen geringe Rauigkeitslängen und repräsentative Aufstellbedingungen widerspiegeln, lagen die ermittelten Windgeschwindigkeiten für diesen gradientstarken Tag doch weit auseinander. Die Windrichtung war West mit einer einheitlich, leicht südlichen Komponente.

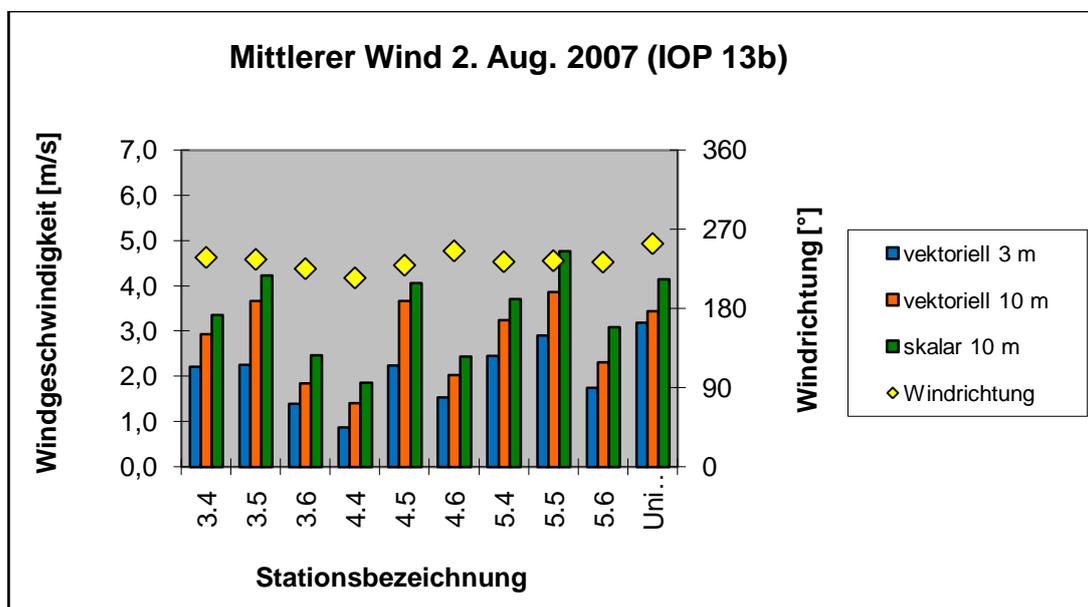


Abb. 4.39 Windanalyse vom 2. 8. 2007 (24h Mittel), Stationen mit geringer Rauigkeitslänge

Das Mittel untertags erreichte die höchsten berechneten Windgeschwindigkeiten (Abb. 4.40). Im Durchschnitt betrug die Geschwindigkeit des vektoriell

gemittelten 10 m Windes 4,41 m/s mit einer Standardabweichung von 1,25 m/s. Auch hier lagen die Windrichtungen einheitlich bei Südwest.

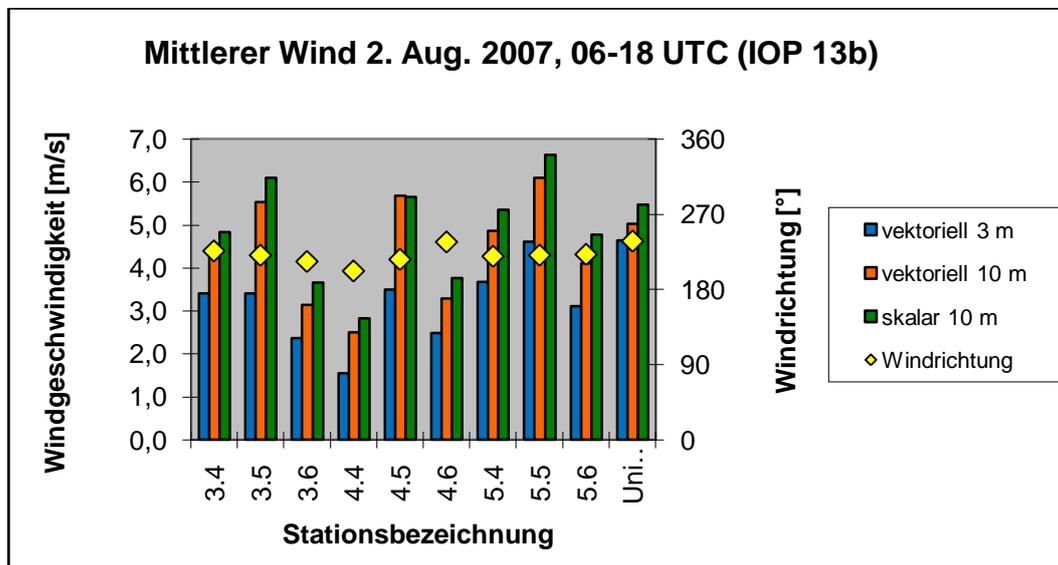


Abb. 4.40 Windanalyse vom 2.8.2007 (Mittelung von 06 UTC bis 18 UTC), Stationen mit geringer Rauigkeitslänge

Wie erwartet wurde, waren die Windgeschwindigkeiten in der Nacht wieder niedriger als tagsüber (Abb. 4.41). Die Geschwindigkeit des vektoriell gemittelten 10 m Windes lag bei 1,6 m/s (Standardabweichung 0,71 m/s). Die Windrichtung war West. Im Vergleich zu den Daten der Uni Bonn lieferten nur 4 Stationen ähnliche Werte. Alle anderen Ergebnisse lagen unter dem Referenzwert der Uni Bonn. Wie auch beim Mittel untertags und beim 24h-Mittel streuten die Werte sowohl beim 3 m- als auch beim 10m Wind sehr. Die Windrichtung war einheitlich West.

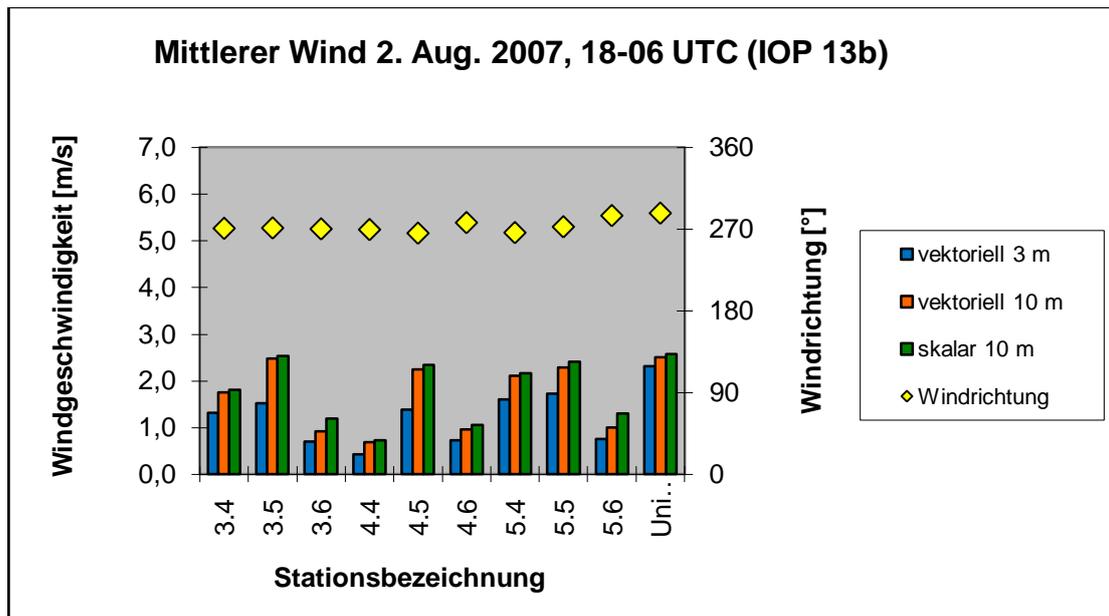


Abb. 4.41 Windanalyse vom 2.8.2007 (Mittlung von 18 UTC bis 06 UTC), Stationen mit geringer Rauigkeitslänge

4.4.3 Stationen mit unterschiedlichen Rauigkeitslängen

Der vektoriell gemittelte 10 m Wind für diese Stationen betrug 1,91 m/s mit einer Standardabweichung von 1,18 m/s (Abb. 4.42). Speziell die Windgeschwindigkeit an der Station 5.1 lag mit einem gemittelten 10 m Wind von 4,04 m/s sehr hoch und damit sogar höher als der Referenzwert der Uni Bonn. Die Windrichtung war annähernd Südwest.

Durch einen Ausfall lieferten die Sensoren der Station 7.2 ab 19.11 UTC keine Daten. Dadurch konnte nur ein 12 h Mittel untertags errechnet werden. Eine 24 h Mittelung sowie das 12 h Nachtmittel fehlen in diesem Fall.

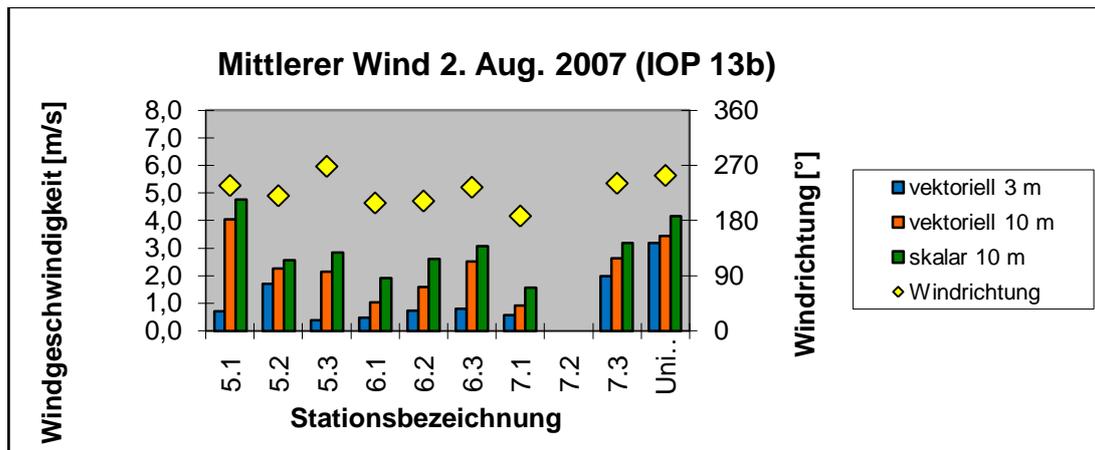


Abb. 4.42 Windanalyse vom 2.8.2007 (24 h Mittel), Stationen mit unterschiedlichen Rauigkeitslängen (Station 7.2 lieferte ab 19.11 UTC keine verwertbaren Daten)

Wie in Abb. 4.43 ersichtlich und wie zu erwarten war, lagen auch hier die Windgeschwindigkeiten beim Tagesmittel insgesamt höher als beim 24 h Mittel. Im Durchschnitt betragen die Windgeschwindigkeit 3,86 m/s (Standardabweichung 1,73 m/s) beim vektoriell gemittelten 10 m Wind. Auch hier riss Station 5.1 mit einem Wert von 7,54 m/s aus. Wie beim 24 h Mittel wehte der Wind auch beim Tagesmittel aus Südwest.

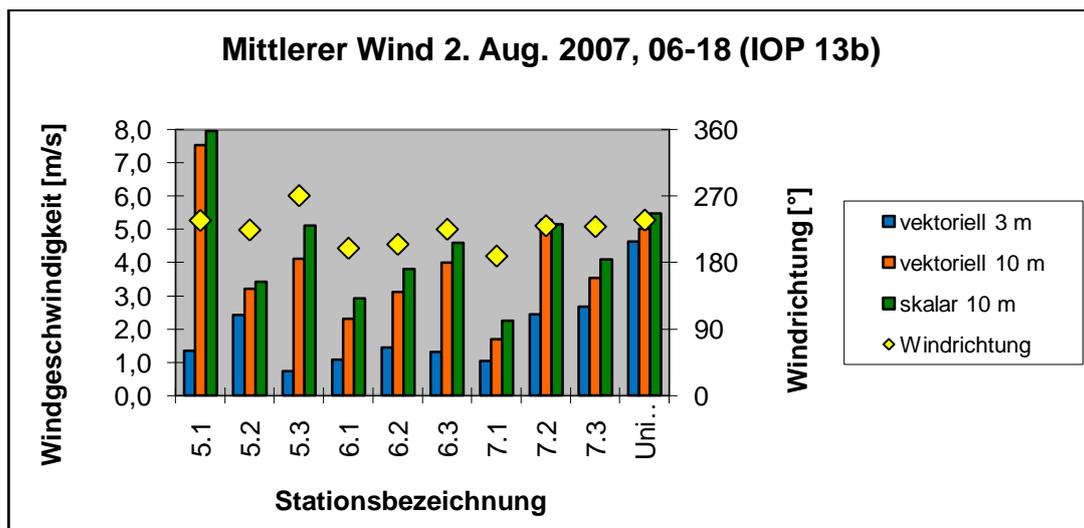


Abb. 4.43 Windanalyse vom 2.8.2007 (Mittelung von 06 UTC bis 18 UTC), Stationen mit unterschiedlichen Rauigkeitslängen

Beim Nachtmittel erhielten wir wieder sehr geringe Windgeschwindigkeiten (siehe Abb. 4.44). Die Windgeschwindigkeit für den vektoriell gemittelten 10 m Wind betrug 0,71 m/s mit einer Standardabweichung von 0,67 m/s. Aufgrund der sehr geringen Windgeschwindigkeiten ergaben sich wieder unterschiedliche Windrichtungen.

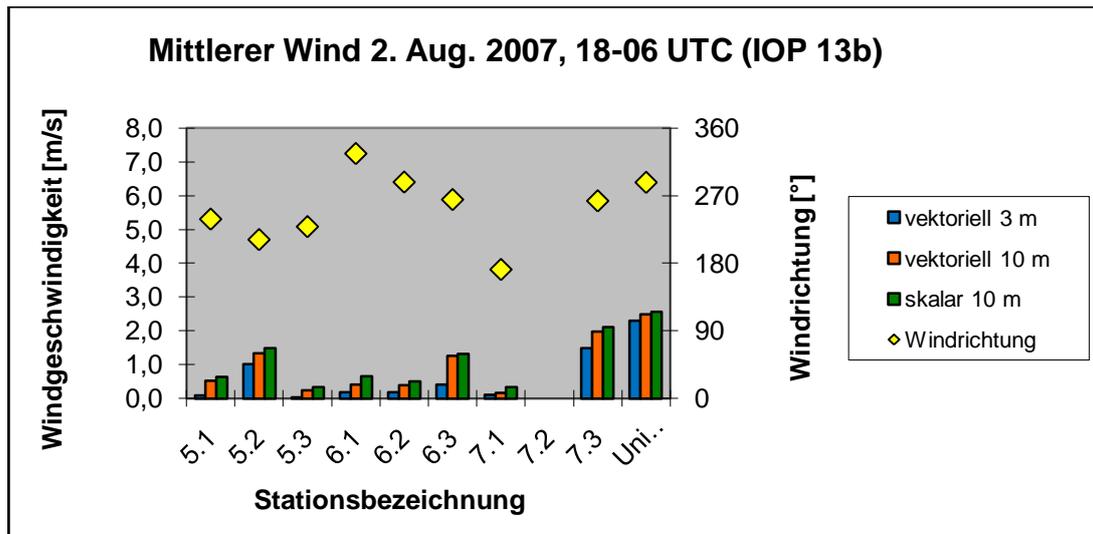


Abb. 4.44 Windanalyse vom 2.8.2007 (Mittelung von 18 UTC bis 06 UTC), Stationen mit unterschiedlichen Rauheitslängen (Station 7.2 lieferte ab 19.11 UTC keine verwertbaren Daten)

4.4.4 Stationen mit hoher Rauheitslänge

Bei den Stationen mit den hohen Rauheitslängen erhielten wir einen vektoriell gemittelten Wind von 2,39 m/s (Standardabweichung 0,58 m/s). Die Stationen 4.2 und 5.1 ergaben hier besonders hohe Windgeschwindigkeiten. 4.2 liegt im Luv des Waldes und 5.1 liegt an einem nach West abfallenden Hang. Die Stationen 4.1, 4.3 und 6.1 mit sehr geringen Windgeschwindigkeiten liegen alle im Wald mit einer sehr hohen Rauheitslänge. Obwohl die Windgeschwindigkeiten ein sehr uneinheitliches Bild ergeben, zeigt die Windrichtung mit Südwestwind ein einheitliches Ergebnis (siehe Abb. 4.45).

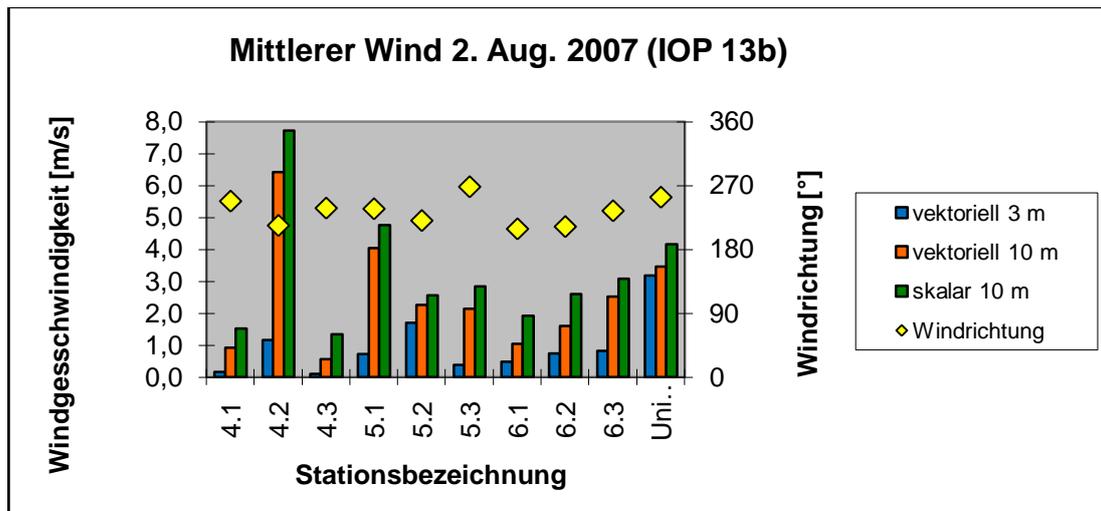


Abb. 4.45 Windanalyse vom 2.8.2007 (24 h Mittel), Stationen mit hohen Rauheitslängen

In Abb. 4.46 sieht man die einheitlich höheren Windgeschwindigkeiten beim Tagesmittel. Im Mittel lagen die Windgeschwindigkeiten für den vektoriell gemittelten 10 m Wind bei 3,73 m/s mit einer Standardabweichung von 2,07 m/s. Auch hier lieferten die Stationen 4.2 und 5.1 signifikant höhere Windgeschwindigkeiten. Die Windrichtung war wieder Südwest.

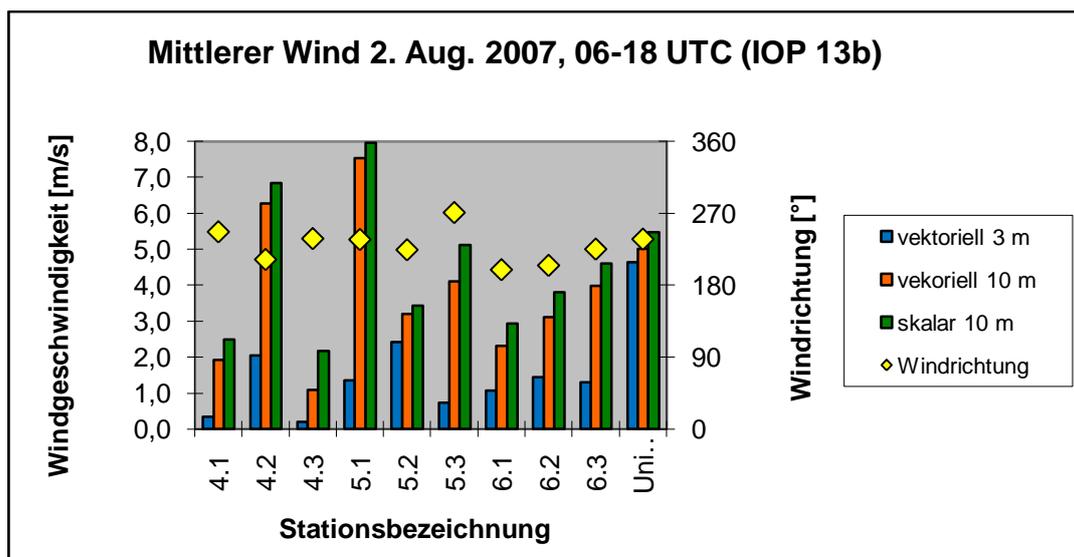


Abb. 4.46 Windanalyse vom 2.8.2007 (Mittelung von 06 UTC bis 18 UTC), Stationen mit hohen Rauheitslängen

Beim 12 h Nachtmittel (Abb. 4.47) erhielten wir extrem geringe Windgeschwindigkeiten. Der vektoriell gemittelte 10 m Wind betrug 0,65 m/s (Standardabweichung 0,56 m/s). Wegen der extrem geringen Windgeschwindigkeit erhielten wir ein sehr uneinheitliches Bild in der Windrichtung. Eine Westkomponente konnte jedoch ausgemacht werden.

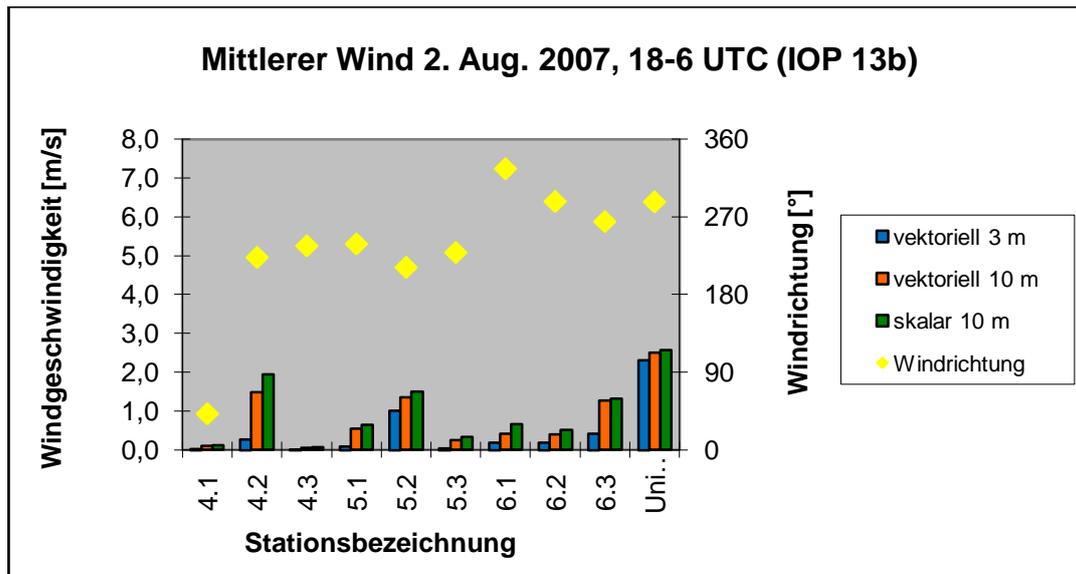


Abb. 4.47 Windanalyse vom 2.8.2007 (Mittelung von 18 UTC bis 06 UTC), Stationen mit hohen Rauigkeitslängen

An diesem gradientstärksten aller untersuchten Tage wurden speziell in der Windrichtung bei den Stationen mit geringen Rauigkeitslängen sehr einheitliche Windrichtungen festgestellt. Beim 12h Mittel untermittags lag die mittlere Windgeschwindigkeit bei 4,41 m/s. Bei diesen hohen Windgeschwindigkeiten lieferte die Windrichtungsmessung Werte, die für einen größeren Bereich repräsentativ sind.

Die höchsten Windgeschwindigkeiten lieferte die Gruppe mit den unterschiedlichen Rauigkeitslängen. Die höchste errechnete Windgeschwindigkeit beim 10 m Wind war 7,54 m/s an der Station 5.1 mit einer

Rauhigkeitslänge von 1 m (Klasse 7) beim der Mittelung von 06 bis 18 UTC. Das 12h Mittel untermittags dieser Stationen lag bei 3,86 m/s. Das zeigt, dass genau bei dieser Station die Extrapolation einen Extremwert liefert, der nur für die unmittelbare Umgebung repräsentativ ist.

4.5 Zusammenfassung

Insgesamt wurde durch die Modifikation der Daten auf 10 m Höhe ein homogeneres Ergebnis erhofft, als aufgrund der vielen unterschiedlichen Rauigkeitslängen zu erwarten war. Durch die Extrapolation sollten bei der Windgeschwindigkeit für größere Gebiete repräsentative und einheitliche Ergebnisse erreicht werden.

Nicht immer wurden diese Ergebnisse auch tatsächlich erreicht. An gradientenschwachen Tagen oder bei den Nachtmitteln waren die Ergebnisse der Windrichtung oft uneinheitlich wie z.B. in Abb. 4.12 oder Abb. 4.25 ersichtlich. Da zu diesen Terminen aber auch extrem geringe Windgeschwindigkeiten vorherrschten, wirkten sich durch die Topographie erzeugte Störungen als mikroskalige Turbulenzen in der Windrichtung aus, die nicht durch das logarithmische Windprofil korrigiert werden konnten. Hingegen ist auffallend, dass die Windrichtungen bei den Stationen mit hohen Rauigkeitslängen ein erstaunlich einheitliches Bild lieferten wie z.B. in Abb. 4.18, Abb. 4.28 oder Abb. 4.40 ersichtlich. Ein einheitlicheres Bild wurde eher bei der Windgeschwindigkeit erwartet, was jedoch nicht immer der Fall war.

Die Ergebnisse der Windgeschwindigkeiten fielen insgesamt auch nicht wie erwartet aus. Sofern schon die 3 m Windmittel ähnlich bzw. für ein größeres Gebiet repräsentativ waren, waren es auch die Ergebnisse der 10 m Windmittel. Selbst an den gradientstarken Tagen wie dem 20. Juli oder dem 2. August wurden einheitliche Windgeschwindigkeiten beim 10 m Wind nur bei den Tagesmitteln über offenem Gelände mit geringer Rauigkeitslänge erreicht (Abb. 4.29). Offensichtlich ist selbst noch der 10 m Wind zu stark von der Oberflächengestaltung beeinflusst. Durch die hohen Wälder (bis zu 25 m) rund um das Messnetz, reichte eine Extrapolation auf 10 m nicht aus, um einheitliche und für ein großes Gebiet repräsentative Ergebnisse zu erhalten. Es müsste über die Baumgrenze hinweg extrapoliert werden.

Trotzdem wurden viele kleinräumige Turbulenzen eliminiert und so ein Mehrwert gegenüber den ungemittelten und nicht extrapolierten Rohdaten geschaffen, sodass diese Daten für die Berechnung der Feuchteflussdivergenz herangezogen werden konnten.

5 Feuchteflussdivergenz

5.1 Theorie

Die Gleichung für die Feuchteflussdivergenz (FFD) lässt sich aus der Erhaltungsgleichung für Wasserdampf (in Druckkoordinaten) herleiten. q ist die spezifische Feuchte. S ist ein Speicherterm für den Wasserdampf und ergibt sich aus der Differenz von Verdunstung (E Evaporation) und Niederschlag (P Precipitation) (Banacos u. Schultz, 2005)

$\frac{dq}{dt} = S$	(5.1)
---------------------	-------

wobei die Eulerrelation gilt

$\frac{d}{dt} = \frac{\partial}{\partial t} + u \frac{\partial}{\partial x} + v \frac{\partial}{\partial y} + \omega \frac{\partial}{\partial p}$	(5.2)
---	-------

u , v und w stellen die Komponenten des dreidimensionalen Windes in Druck-Koordinaten dar. Mit Hilfe der Kontinuitätsgleichung

$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial \omega}{\partial p} = 0$	(5.3)
--	-------

lässt sich Gleichung (5.1) in der folgenden Form darstellen

$\frac{\partial q}{\partial t} + u \frac{\partial q}{\partial x} + v \frac{\partial q}{\partial y} + \omega \frac{\partial q}{\partial p} + q \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial \omega}{\partial p} \right) = E - P$	(5.4)
--	-------

oder in Form

$\frac{\partial q}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(qu) + \frac{\partial}{\partial y}(qv) + \frac{\partial}{\partial p}(q\omega) = E - P$	(5.5)
--	-------

Die Haushaltsgleichung für den Wasserdampf lautet somit

$\underbrace{\frac{\partial q}{\partial t}}_{\text{lokalzeitlich he}} + \underbrace{\nabla \cdot (q\mathbf{V}_h)}_{\text{-horizontale FFD}} + \underbrace{\frac{\partial}{\partial p}(q\omega)}_{\text{-vertikale FFD}} = \underbrace{E - P}_{\text{Quellen und Senken}}$	(5.6)
---	-------

wobei $\nabla = \hat{i} \frac{\partial}{\partial x} + \hat{j} \frac{\partial}{\partial y}$ der horizontale Nabla-Operator ist, und $\mathbf{V}_h = (u, v)$ die Horizontalkomponenten des Windes darstellen. Gleichung (5.6) drückt den Feuchtehaushalt eines Luftpaketes, bestehend aus dem Term der lokalzeitlichen Änderung von q , dem Term der horizontalen Feuchteflussdivergenz (FFD) und dem Term der vertikalen Feuchteflussdivergenz (FFD), sowie den Quellen und Senken (E-P) aus.

Die horizontale Feuchteflussdivergenz lässt sich folgendermaßen ausdrücken

$FFD = \nabla \cdot (q\mathbf{V}_h) = \mathbf{V}_h \cdot \nabla q + q \nabla \cdot \mathbf{V}_h$	(5.7)
--	-------

$FFD = \underbrace{\left(u \frac{\partial q}{\partial x} + v \frac{\partial q}{\partial y} \right)}_{\text{Advektionsterm}} + q \underbrace{\left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} \right)}_{\text{Divergenzterm}}$	(5.8)
--	-------

Der Advektionsterm in Gleichung (5.8) repräsentiert die horizontale Advektion der spezifischen Feuchte. Die Advektion ist mit einem negativen Vorzeichen definiert (Bergmann-Schaefer, 2001). Der Divergenzterm ist das Produkt von spezifischer Feuchte und der horizontalen Divergenz (Kaufmann, 2006).

5.2 VERA

VERA (Vienna Enhanced Resolution Analysis) (Steinacker, et al., 2000) ist ein objektives Analyseverfahren, welches an der Universität Wien entwickelt wurde. Unregelmäßig verteilte Beobachtungswerte werden auf ein regelmäßiges Gitter interpoliert. Mithilfe der Fingerprintmethode kann jede noch so komplexe Topographie berücksichtigt werden (Steinacker, et al., 2006).

Im Jahr 1995 wurde mit der Entwicklung von VERA am Institut für Meteorologie und Geophysik begonnen. Seitdem wird das Analyseverfahren ständig erweitert und laufend weiterentwickelt. VERA kann sowohl skalare als auch vektorielle Felder, die an Messstationen erhoben wurden, auf ein regelmäßig verteiltes Gitter bringen. Mesoskalige Strukturen, die kleiner als der mittlere Stationsabstand sind, können mit intelligent eingesetztem Vorwissen aufgelöst werden.

Das Verfahren ist zweigeteilt. Der erste Schritt ist die Fehlerkorrektur (Häberli, et al., 2004). Alle Messwerte werden hinsichtlich ihrer räumlichen physikalischen Konsistenz überprüft. Der zweite Schritt ist die Interpolation, wofür ein auf der thin-plate-spline Methode zurückzuführender Variationsansatz verwendet wird. Der Vorteil dieser Methode liegt darin, dass kein first-guess-Feld z.B. ein prognostisches Modellfeld notwendig ist und dass kein a priori Wissen über Struktur oder gewichtete Funktionen erforderlich ist (Steinacker, et al., 2006). Spezielle Fingerprints der zu untersuchenden Region berücksichtigen die jeweilige Topographie, bringen so a priori Wissen in die Analyse ein und liefern realistische Ergebnisse beim Downscaling.

Das Herzstück von VERA ist ein Variationsalgorithmus, der die Quadrate der räumlichen ersten und/oder zweiten Ableitungen des Messfeldes minimiert. Dabei wird davon ausgegangen, dass sich viele Feldverteilungen meteorologischer Parameter (z.B. Druck oder Temperatur) so verhalten, dass ihre „Krümmung“ minimal ist. Das entspricht dem Prinzip des minimalen

Aufwandes, das in der Natur oft zu beobachten ist (z.B. bei der Oberfläche einer Seifenblase). Man stelle sich ein Gitterpunktfeld mit konstanten Abständen vor, das teilweise mit bekannten Werten gefüllt ist. Diese stammen von Messungen an Stationen. An den unbekanntem Gitterpunkten soll das Messfeld interpoliert werden. Für unsere Zwecke gibt es zwei Forderungen an die Interpolationsfunktion: Erstens soll sie durch alle gegebenen Punkte exakt durchführen. Zweitens sind wir nur an den Werten der Funktion an den Gitterpunkten interessiert und nicht an der stetigen Funktion zwischen den Gitterpunkten (Steinacker, et al., 2000).

Folgendes Minimierungskriterium führt zur Interpolation in einer Dimension (Steinacker, et al., 2000)

$I = \sum \left[\frac{\partial \Psi}{\partial x} \right]^2 dx \rightarrow \text{Min}$	(5.9)
--	-------

Die Minimierung der Quadrate der zweiten Ableitungen des 1D-Feldes nach der räumlichen Koordinate führt zu einer Kurve mit minimaler Krümmung. Beim Variationsansatz kommt ein weiterer Term hinzu, der die Differenz zwischen tatsächlichem und erwartetem Wert an den Gitterpunkten enthält. Um den Ansatz zu lösen wird diskretisiert und ein Gleichungssystem aufgestellt (Steinacker, et al., 2000).

Die Feuchteflussdivergenz wird an jedem Gitterpunkt aus den Analysefeldern von potentieller Temperatur, äquivalentpotentieller Temperatur und dem horizontalen Windfeld berechnet (Kaufmann, 2006; Schneider et al., 2008).

Die potentielle Temperatur wird als Merkmal von Luftmassen verwendet, wenn bei vertikalen Bewegungen dieser Luftmassen keine Phasenübergänge von Wasser (Verdampfen oder Kondensieren) stattfinden. Sie entspricht der Temperatur, die ein Luftpaket annimmt, wenn es trockenisentrope auf ein

Druckniveau von 1000 hPa gebracht werden würde. Die potentielle Temperatur berücksichtigt die isentrope Erwärmung oder Abkühlung bei vertikalen Verlagerungen. Beim Heben oder Senken eines Luftpaketes verändert sich seine Temperatur, die potentielle Temperatur bleibt gleich. Folgende Gleichung stellt die potentielle Temperatur dar (Bergmann-Schaefer, 2001):

$\Theta = T \left(\frac{p_0}{p} \right)^{\frac{R}{c_p}}$	(5.10)
---	--------

T ist die aktuelle Temperatur [K], p_0 entspricht 1000 hPa (Referenzdruck), p repräsentiert den Druck im Ausgangsniveau des Luftpaketes [hPa], R ist die Gaskonstante für trockene Luft ($287 \text{ Jkg}^{-1}\text{K}^{-1}$) und c_p ist die spezifische Wärme bei konstantem Druck ($\sim 1005 \text{ Jkg}^{-1}\text{K}^{-1}$) (Bergmann-Schaefer, 2001).

Die äquivalentpotentielle Temperatur stellt ein Maß für den statischen Energiegehalt einer Luftmasse dar und lautet

$\Theta_e = \Theta \exp \left(\frac{Lq}{Tc_p} \right)$	(5.11)
---	--------

Θ ist die potentielle Temperatur [K], T die aktuelle Temperatur [K], q stellt die spezifische Feuchte [gkg^{-1}], c_p die spezifische Wärme bei konstantem Druck ($\sim 1005 \text{ Jkg}^{-1}\text{K}^{-1}$) und L bezeichnet die Phasenumwandlungswärme ($\sim 2,5 \times 10^6 \text{ Jkg}^{-1}$) (Bergmann-Schaefer, 2001).

Über die Beziehung

$q = m/(1 + m)$	(5.12)
-----------------	--------

lassen sich m und q ineinander umrechnen. Zahlenmäßig sind sie praktisch gleich (Bergmann-Schaefer, 2001). Das Mischungsverhältnis m ist das Verhältnis der

Masse von Wasserdampf und trockener Luft (Foken, 2003). In weiterer Folge werden wir den Begriff der spezifischen Feuchte q verwenden.

Innerhalb einer Luftmasse ist die äquivalentpotentielle Temperatur eine Erhaltungsgröße, da sie auch bei isentropen Zustandsänderungen mit Kondensation oder Verdunstung konstant bleibt, die potentielle Temperatur ändert sich jedoch dabei. Der gesamte Wärmeinhalt eines hypothetisch auf 1000 hPa gebrachten Luftpaketes wird durch die äquivalentpotentielle Temperatur repräsentiert (Kaufmann, 2006).

Das Windfeld kann direkt aus den VERA-Analysefeldern verwendet werden, das Feuchtemaß muss aus den Analysen von potentieller und äquivalentpotentieller Temperatur berechnet werden. In der Literatur wird meist das Mischungsverhältnis (Beckmann, 1990) oder die spezielle Feuchte (van Delden, 1998), seltener der Taupunkt (Hirt, 1982) verwendet.

Bei der Betrachtung der Größenordnungen der einzelnen Parameter der Gleichung 5.11 ergibt sich für den Exponenten ein kleiner Wert ($L \sim 10^6 \text{ Jkg}^{-1}$, $q \sim 10^{-3} \text{ gkg}^{-1}$, $c_p \sim 10^3 \text{ Jkg}^{-1}\text{K}^{-1}$ und $T \sim 10^2 \text{ K}$).

Wegen der Näherung $e^x \cong 1+x$ für kleine x kann Gleichung 5.11 in folgender Form geschrieben werden

$\Theta_e \cong \Theta \left[1 + \frac{Lq}{c_p T} \right] = \Theta + \frac{Lq}{c_p} \underbrace{\frac{\Theta}{T}}_{\sim 1}$	(5.13)
--	--------

Bei einem Druck von p_0 sind potentielle und die aktuelle Temperatur gleichzusetzen (Bergmann-Schaefer, 2001), dadurch ergibt sich ~ 1 für den letzten Bruch in Gleichung 5.12 und die äquivalentpotentielle Temperatur lautet

$\Theta_e \cong \Theta + \frac{Lq}{c_p}$	(5.14)
--	--------

Daraus ergibt sich für das Mischungsverhältnis folgender Ansatz:

$m \cong q \cong (\Theta_e - \Theta) \frac{c_p}{L}$	(5.15)
---	--------

Diese Gleichung für das Mischungsverhältnis wurde für die Berechnungen der Feuchteflussdivergenz an jedem Gitterpunkt herangezogen.

5.3 Ergebnisse

Nachstehende Grafiken zeigen die errechnete Feuchteflussdivergenz mit dem 3 m Wind bzw. 10 m Wind. Die Analysen mit dem 10 m Wind zeigen, wie bei den höheren Windgeschwindigkeiten erwartet wurde, ausgeprägtere Zentren von Feuchteflussdivergenz bzw. -konvergenz, weil in der Analyse mit dem extrapolierten Winddaten gerechnet wurde. Diese Zentren zeigen eindeutigere und verstärkte Ergebnisse gegenüber der Analysen mit dem 3 m Wind.

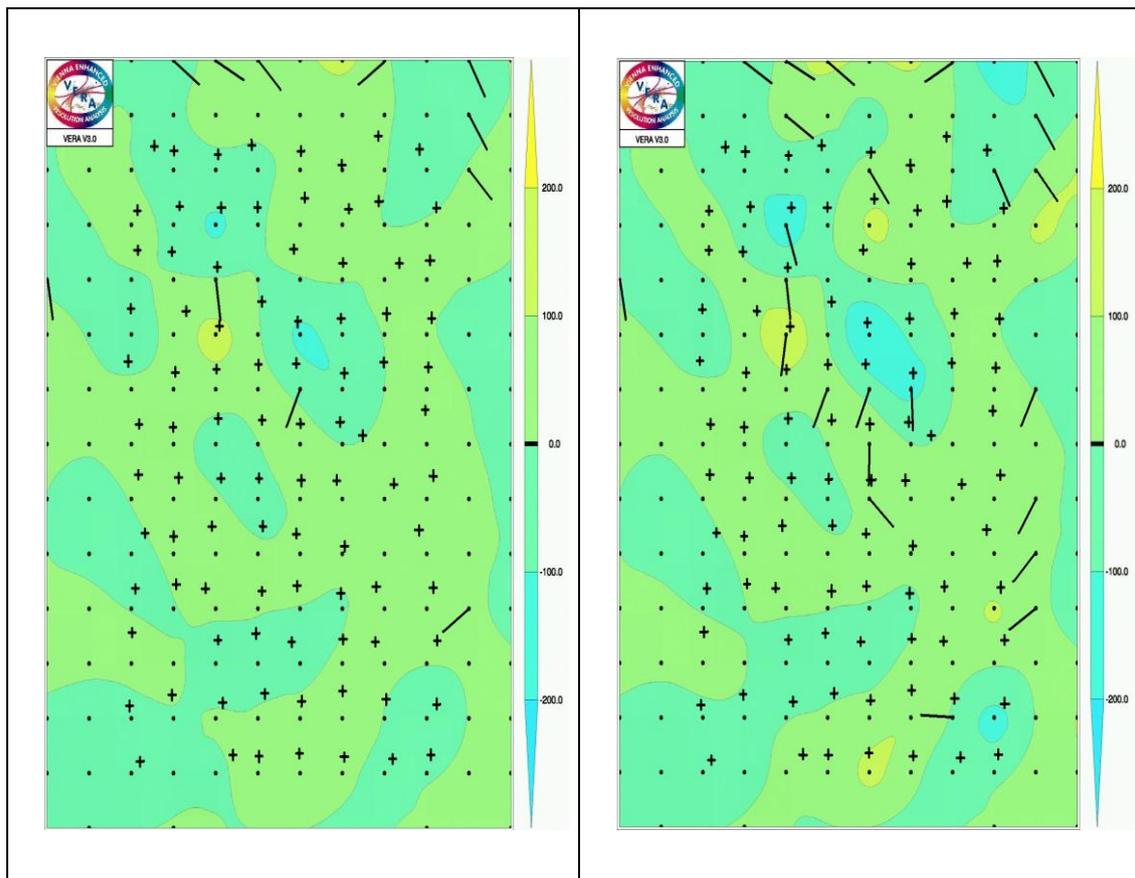


Abb. 5.1 VERA-Analysen 15.7.07. Linkes Bild: Feuchteflussdivergenz [$10^{-4} \text{ gkg}^{-1}\text{s}^{-1}$] mit 3 m Wind [m/s], rechtes Bild: Feuchteflussdivergenz [$10^{-4} \text{ gkg}^{-1}\text{s}^{-1}$] mit 10 m Wind [m/s], beide untertags (12hTagesmittel), + ist eine Messstation, . ist ein Gitterpunkt, gelb = Divergenz, blau = Konvergenz

Abb. 5.1 zeigt links ein Feuchteflussdivergenzmaximum um Station 9.3. Diese Station mit einer Rauigkeitslänge der Klasse 7 lag im Wald. Die hellblauen Feuchteflusskonvergenzen liegen bei Stationen mit einer geringen Rauigkeitslänge auf freien Flächen. Beim Bild rechts sind die Werte räumlich ausgeprägter und somit für größere Bereiche repräsentativ. Außerdem treten weitere Feuchteflussdivergenzmaxima zwischen Station 3.8 und 4.8 (Rauigkeitslänge Klasse 5 und Klasse 4), zwischen 10.5 und 11.5 (Rauigkeitslänge Klasse 6 und 5) sowie um Station 1.5 (Rauigkeitslänge Klasse 5) auf. Ein weiterer Konvergenzbereich liegt um Station 2.8 (Rauigkeitslänge Klasse 4). Die weiteren Feuchteflussdivergenzmaxima und -minima liegen außerhalb der von der Uni Wien betriebenen Wetterstationen. Deshalb wird darauf nicht weiter eingegangen.

Anzumerken ist weiters, dass aufgrund geringer Windgeschwindigkeiten teilweise keine Windfiedern angezeigt werden. Da sehr schwacher Wind wehte, ist die Interpretation der Grafiken schwierig.

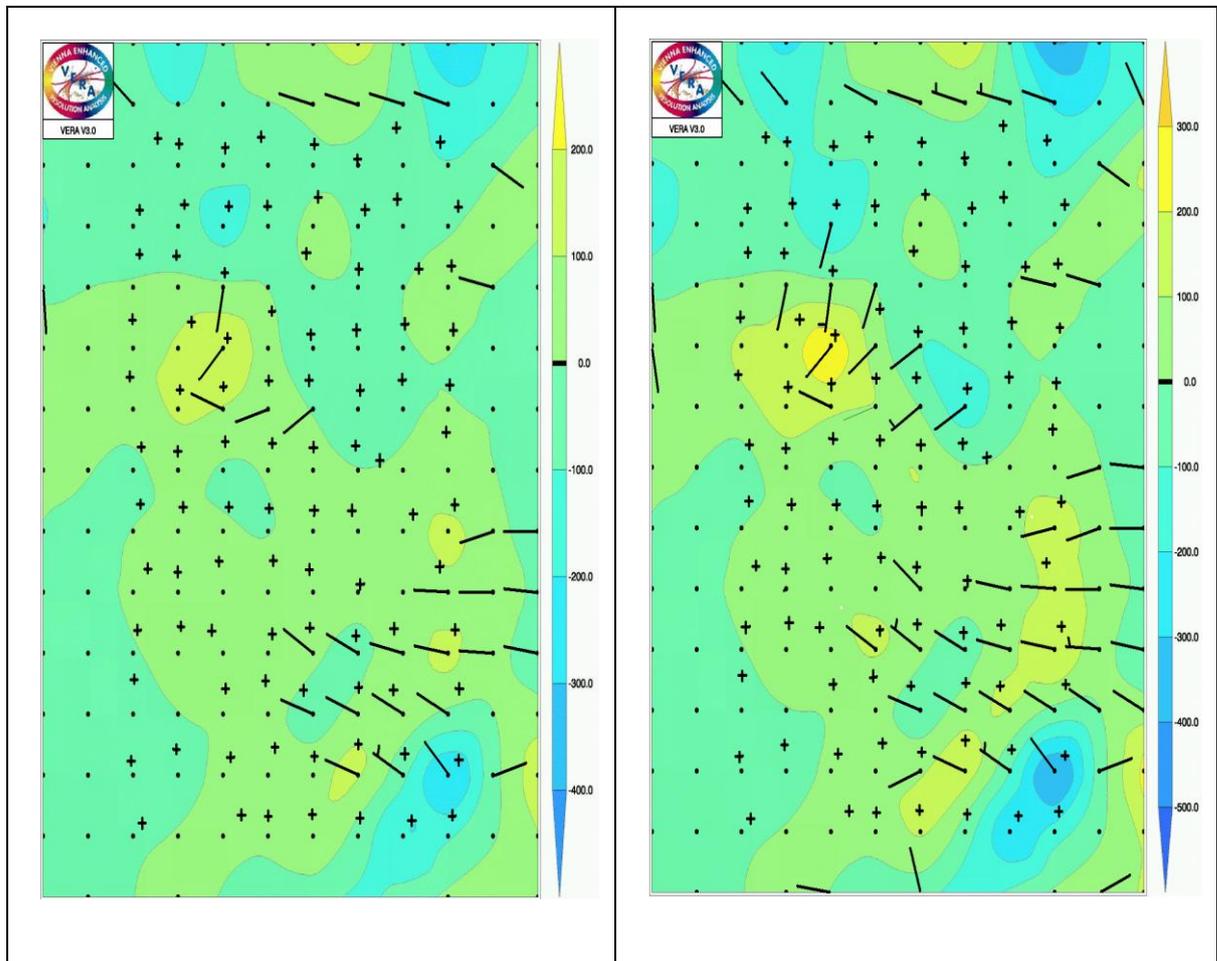


Abb. 5.2 VERA-Analysen 15.7.07. Linkes Bild: Feuchteflussdivergenz [$10^{-4} \text{ gkg}^{-1}\text{s}^{-1}$] mit 3 m Wind [m/s], rechtes Bild: Feuchteflussdivergenz [$10^{-4} \text{ gkg}^{-1}\text{s}^{-1}$] mit 10 m Wind [m/s], beides Nachtmittel, + ist eine Messstation, . ist ein Gitterpunkt, gelb = Divergenz, blau = Konvergenz

Das Nachtmittel (6h UTC bis 6h UTC des darauffolgenden Tages) zeigt ein ähnliches Muster wie das Tagesmittel; allerdings sind die Feuchteflussdivergenz bzw. -konvergenzbereiche ausgeprägter (Abb. 5.2). Es werden sowohl höhere Absolutwerte erreicht als auch größere räumliche Ausdehnungen der jeweiligen Bereiche. Auch hier werden aufgrund der geringen Windgeschwindigkeiten teilweise keine Windfiedern angezeigt.

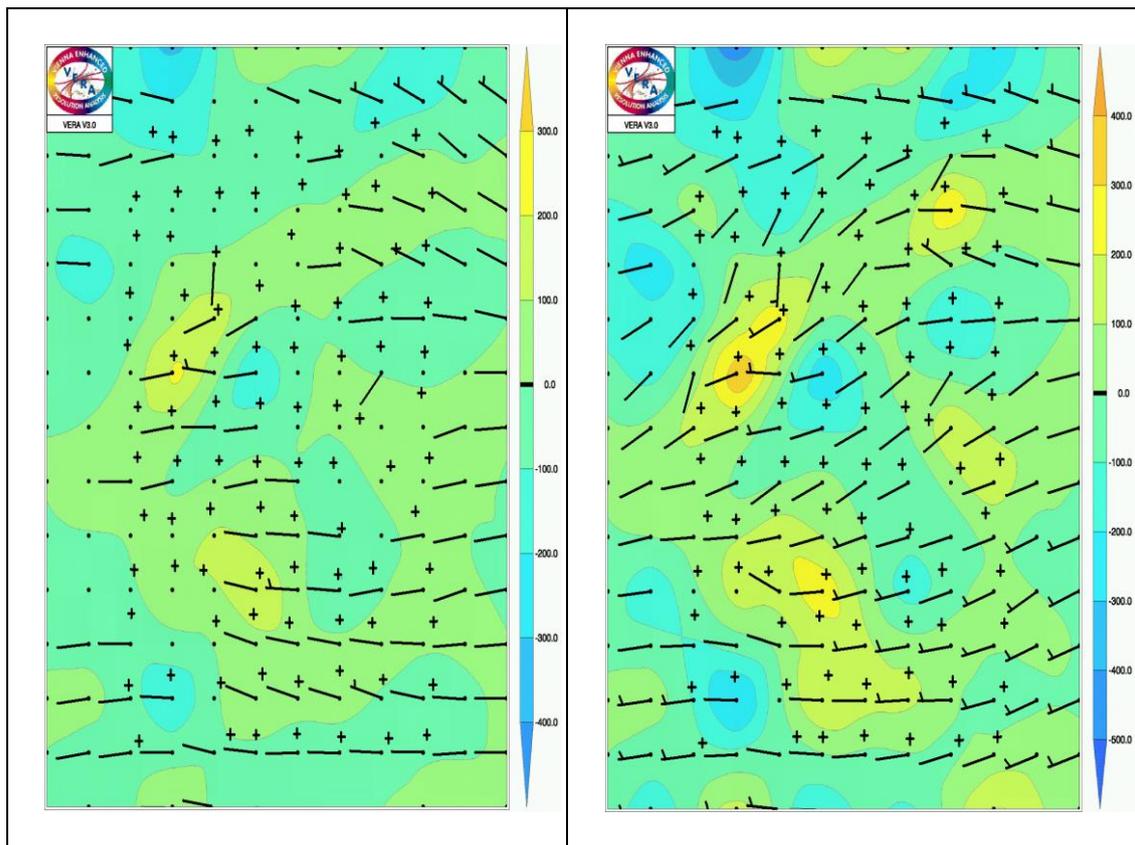


Abb. 5.3 VERA-Analysen 20.7.07. Linkes Bild: Feuchteflussdivergenz [$10^{-4} \text{ gkg}^{-1}\text{s}^{-1}$] mit 3 m Wind [m/s], rechtes Bild: Feuchteflussdivergenz [$10^{-4} \text{ gkg}^{-1}\text{s}^{-1}$] mit 10 m Wind [m/s], beide untertags (12h Tagesmittel), + ist eine Messstation, . ist ein Gitterpunkt, gelb = Divergenz, blau = Konvergenz

Beim Tagesmittel für den 20. Juli 2007 zeigt sich ein stärker ausgeprägtes Windfeld (siehe Abb. 5.3). Im linken Bild befinden sich Feuchteflussdivergenzmaxima um die Stationen 8.2 bis 9.3, sowie 4.3 und 4.4., das sind dieselben Bereiche wie am 15. Juli beobachtet wurden. Feuchteflussdivergenzminima befinden sich um Station 2.2, 7.4, sowie 12.1 und 12.2 wie auch 12.8. Rechts zeigen sich diese Bereiche jeweils ausgeprägter. Weitere Feuchteflussdivergenzmaxima zeigen sich in der rechten Grafik um Station 6.8 (Rauhigkeitslänge der Klasse 4) und Station 11.7 (Rauhigkeitslänge der Klasse 5). Weitere Minima traten um Station 4.6 (Rauhigkeitslänge der Klasse 3) und Station 9.7 (Rauhigkeitslänge der Klasse 5) auf.

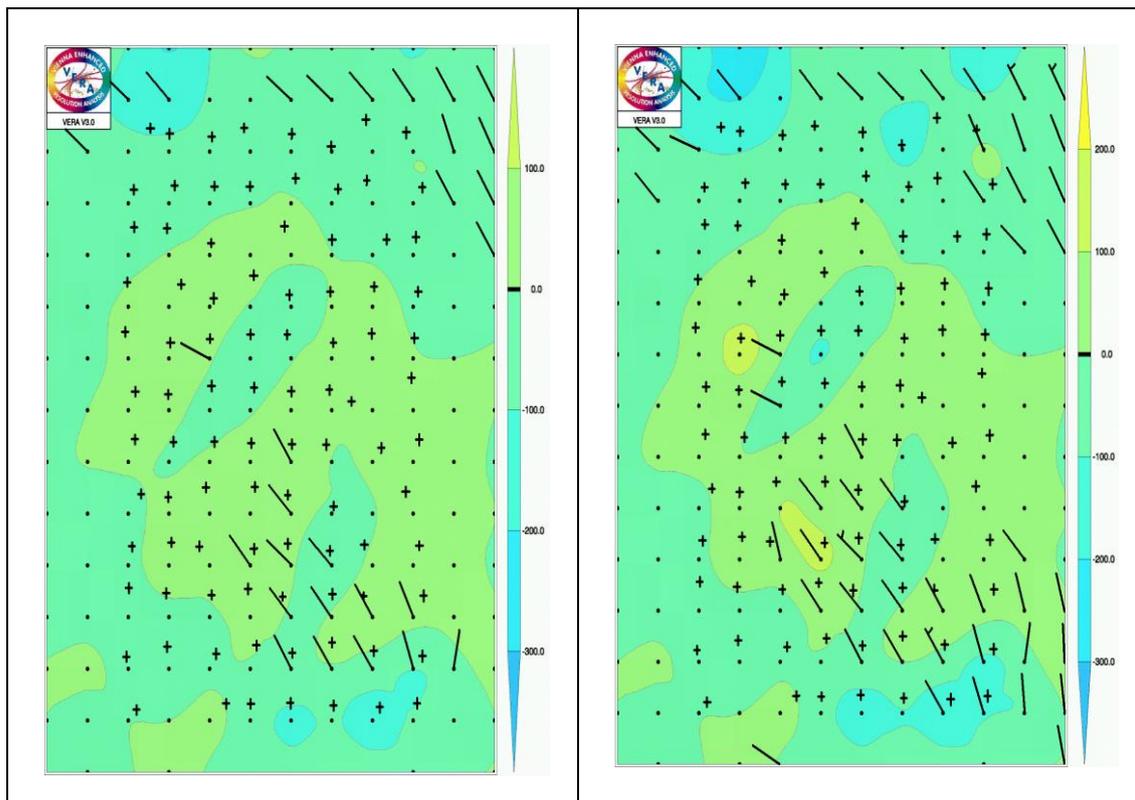


Abb. 5.4 VERA-Analysen 20.7.07. Linkes Bild: Feuchteflussdivergenz [$10^{-4} \text{ gkg}^{-1}\text{s}^{-1}$] mit 3 m Wind [m/s], rechtes Bild: Feuchteflussdivergenz [$10^{-4} \text{ gkg}^{-1}\text{s}^{-1}$] mit 10 m Wind [m/s], beide Nachtmittel, + ist eine Messstation, . ist ein Gitterpunkt, gelb = Divergenz, blau = Konvergenz

In Abb. 5.4 zeigt sich wieder ein sehr schwaches Windfeld aus Südost. Schwache Feuchteflussdivergenzminima sind in der ersten Reihe der Stationen der Uni Wien zu erkennen. Diese Stationen weisen eine Rauigkeitslänge der Klassen 4 und 5 auf. Bei der Grafik mit dem 10 m Wind sind diese Minima wie auch vorher ausgeprägter vorhanden. Weitere Feuchteflussdivergenzminima ergeben sich um Station 8.4 (Rauigkeitslänge der Klasse 6) und 12.7 (Rauigkeitslänge der Klasse 3). Feuchteflussdivergenzmaxima zeigen sich in der rechten Grafik um Station 4.4 und 8.2 (Rauigkeitslänge der Klasse 4).

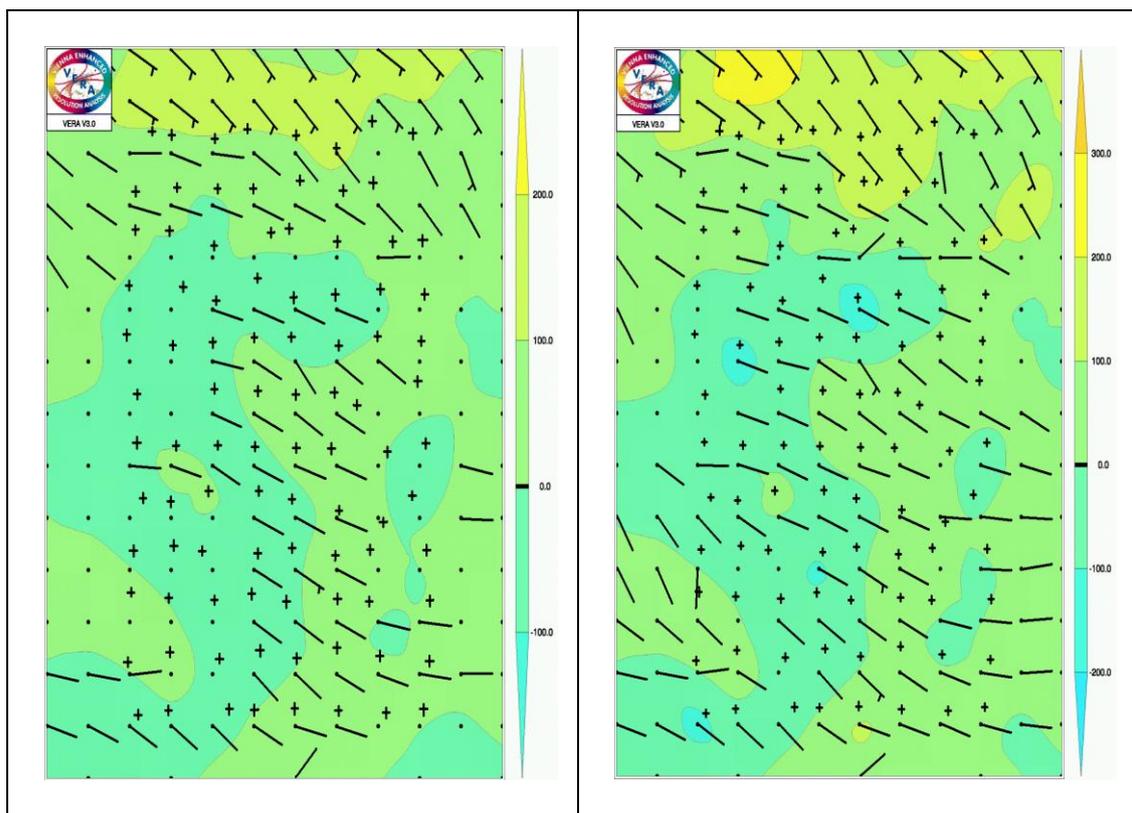


Abb. 5.5 VERA-Analysen 1.8.07. Linkes Bild: Feuchteflussdivergenz [$10^{-4} \text{ gkg}^{-1}\text{s}^{-1}$] mit 3 m Wind [m/s], rechtes Bild: Feuchteflussdivergenz [$10^{-4} \text{ gkg}^{-1}\text{s}^{-1}$] mit 10 m Wind [m/s], beide untertags (12h Tagesmittel), + ist eine Messstation, . ist ein Gitterpunkt, gelb = Divergenz, blau = Konvergenz

Trotz eines stärkeren Windfeldes zeigt sich ein sehr unausgeprägtes Bild links (Abb. 5.5) bei der Feuchteflussdivergenz. In der linken Grafik ergibt sich in Reihe 12 eine etwas ausgeprägtere Feuchteflussdivergenz. Bei der Grafik mit dem 10 m Wind zeigen sich Feuchteflussdivergenzmaxima wieder in Reihe 12, sowie um Station 1.5 (Rauhigkeitslänge der Klasse 5) und Station 10.8 (Rauhigkeitslänge der Klasse 4). Feuchteflusskonvergenzbereiche ergeben sich um Station 1.1 (Rauhigkeitslänge der Klasse 4), 4.4, 8.2 und 9.5 (Rauhigkeitslänge der Klasse 5).

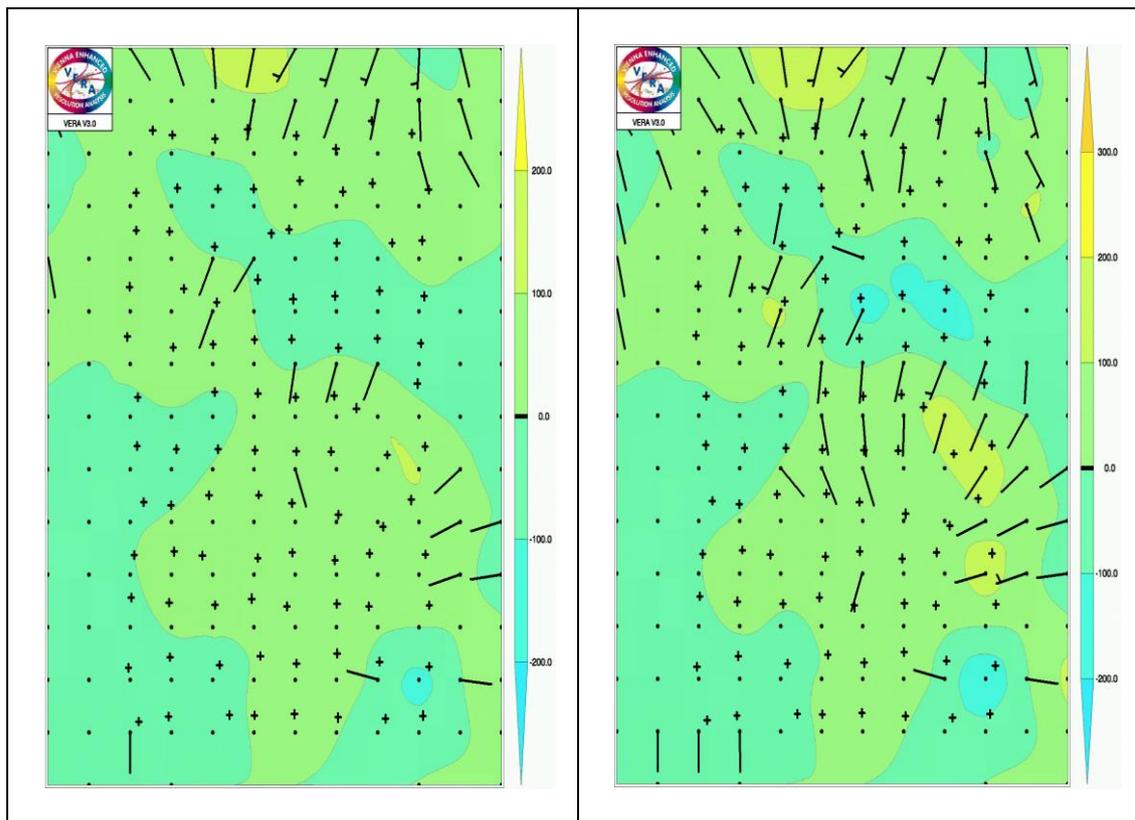


Abb. 5.6 VERA-Analysen 1.8.07. Linkes Bild: Feuchteflussdivergenz [$10^{-4} \text{ gkg}^{-1}\text{s}^{-1}$] mit 3 m Wind [m/s], rechtes Bild: Feuchteflussdivergenz [$10^{-4} \text{ gkg}^{-1}\text{s}^{-1}$] mit 10 m Wind [m/s], beide Nachtmittel, + ist eine Messstation, . ist ein Gitterpunkt, gelb = Divergenz, blau = Konvergenz

Beim Nachtmittel für den 1. August (siehe Abb. 5.6 links) zeigt sich ein schwacher Feuchteflussdivergenzbereich um Station 6.8 (Rauhigkeitslänge der Klasse 4) und ein Konvergenzbereich um Station 2.8 (ebenfalls Rauhigkeitslänge der Klasse 4). Das Windfeld ist wieder schwach ausgeprägt. In der rechten Grafik (10 m Wind-Analysen) zeigt sich ein etwas ausgeprägteres Windfeld und somit auch ausgeprägtere Feuchteflussdivergenz bzw. -konvergenzbereiche. Feuchteflussdivergenzmaxima zeigen sich um Station 4.8, um die Stationen 6.7, 6.8 sowie 7.8 und um Station 9.3. Minima ergeben sich um Station 2.8, 9.5 bis 9.7.

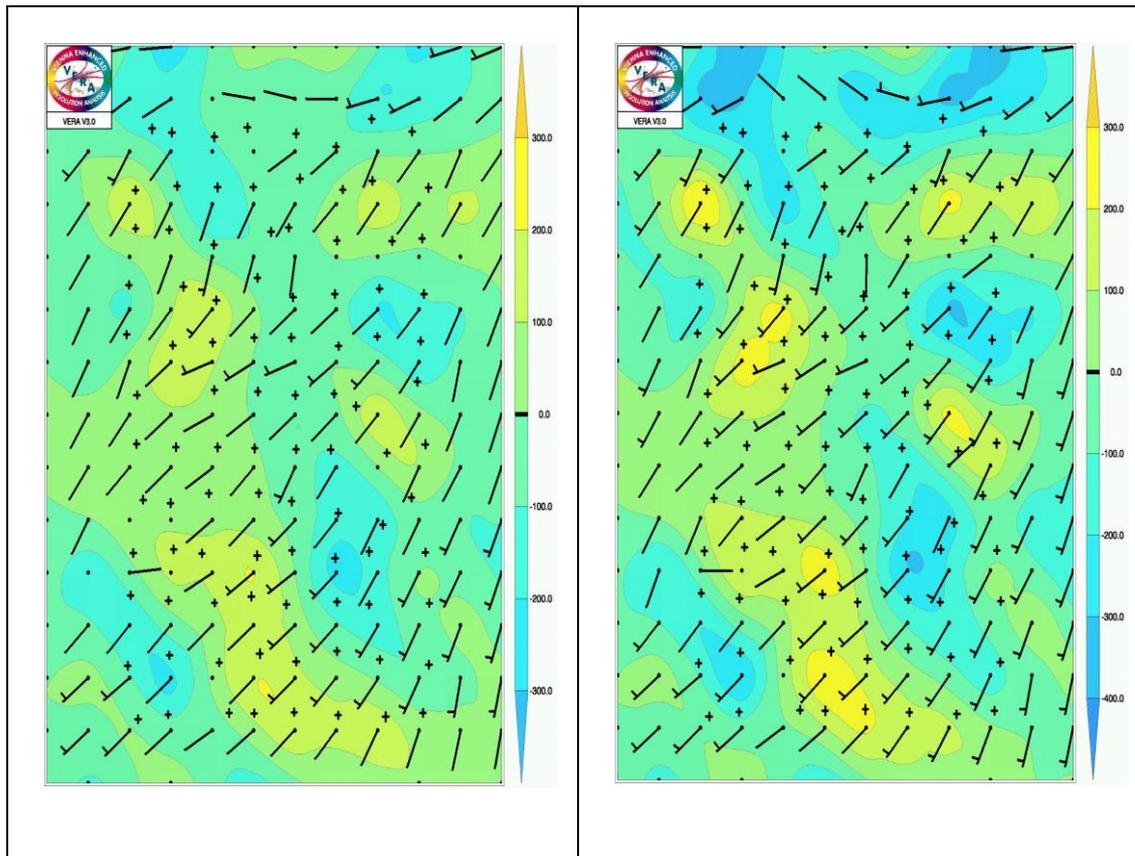


Abb. 5.7 VERA-Analysen 2.8.07. Linkes Bild: Feuchteflussdivergenz [$10^{-4} \text{ gkg}^{-1}\text{s}^{-1}$] mit 3 m Wind [m/s], rechtes Bild: Feuchteflussdivergenz [$10^{-4} \text{ gkg}^{-1}\text{s}^{-1}$] mit 10 m Wind [m/s], beide untertags (12h Tagesmittel), + ist eine Messstation, . ist ein Gitterpunkt, gelb = Divergenz, blau = Konvergenz

Am gradientstärksten aller untersuchten Tage, dem 2. August, zeigen sich in beiden Grafiken der Abb. 5.7 stark ausgeprägte Feuchteflussdivergenz- und -konvergenzzonen. Allerdings sind hier schon sämtliche Bereiche in der 3 m Windgrafik zu erkennen. In der 10 m Windgrafik kommen keine neuen Bereiche hinzu, diese sind nur ausgeprägter, sowohl an Intensität als auch in der räumlichen Ausdehnung.

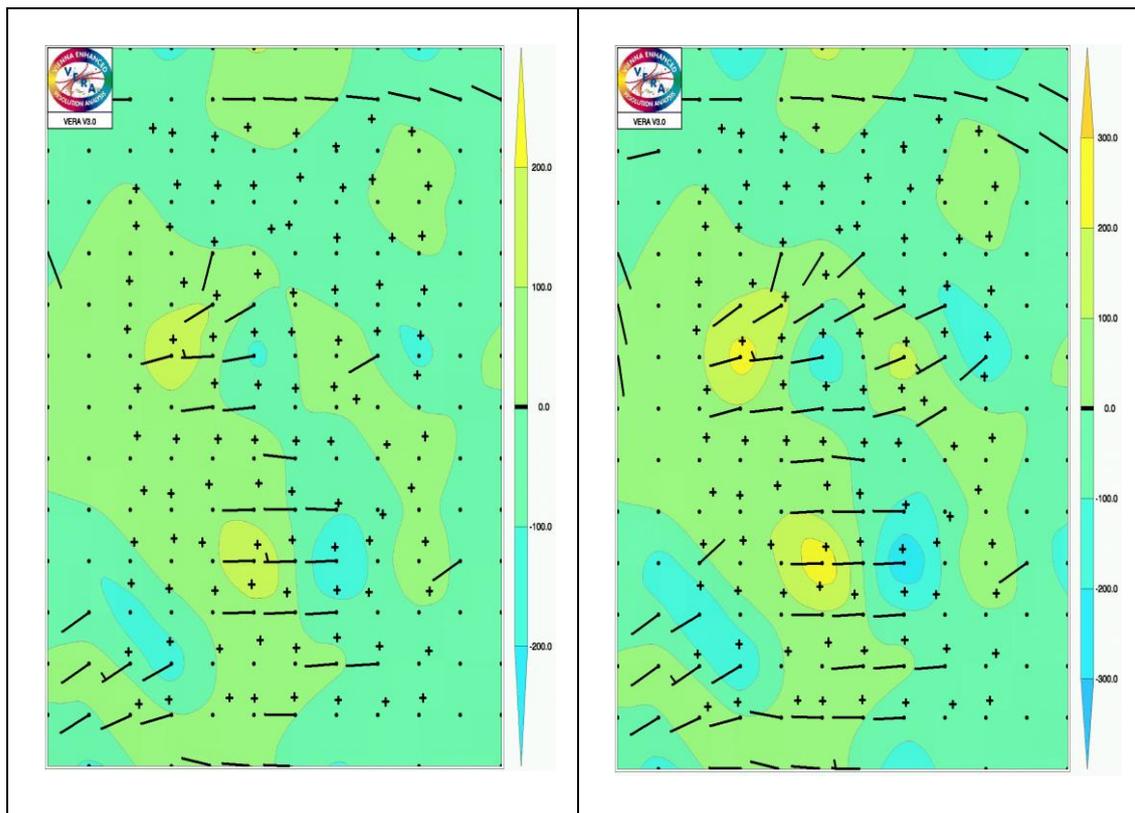


Abb. 5.8 VERA-Analysen 2.8.07. Linkes Bild: Feuchteflussdivergenz [$10^{-4} \text{ gkg}^{-1}\text{s}^{-1}$] mit 3 m Wind [m/s], rechts Bild: Feuchteflussdivergenz [$10^{-4} \text{ gkg}^{-1}\text{s}^{-1}$] mit 10 m Wind [m/s], beide Nachtmittel, + ist eine Messstation, . ist ein Gitterpunkt, gelb = Divergenz, blau = Konvergenz

Das Nachtmittel für den 3 m Wind zeigt in Abb. 5.8 schwache Feuchteflussdivergenzmaxima um Station 4.4 und 8.2. Minima sind um Station 2.2 und 3.1, 4.6, 8.4 und 8.8 (Rauhigkeitslänge der Klasse 6) gegeben. In der Grafik für den 10 m Wind zeigen sich dieselben Zentren, allerdings wieder verstärkt.

Abschließend lässt sich festhalten, dass Feuchteflussdivergenzbereiche um die Stationen 8.2, 8.3 und 9.3 sowie 4.4 liegen. Dies zeigt sich in allen vorgenommenen Analysen. Die Stationen 8.2 und 8.3 hatten eine Rauhigkeitslänge von 0,1 m und lagen per se als freistehende Stationen auf

Feldern, aber doch von Wäldern umgeben. Die Station 9.3 hatte eine Rauigkeitslänge von 1 m und lag mitten im Wald (siehe Abb. 3.4).

Alle Konvergenz- bzw. Divergenzbereiche waren auch in der Analyse mit dem 3 m Wind in den Grafiken ersichtlich. In den Grafiken mit dem 10 m Wind treten diese Bereiche sowohl in deren Intensität als auch räumlichen Ausdehnung deutlicher hervor, da das Windfeld die bestimmende Komponente der Feuchteflussdivergenz ist (Schneider, et al., 2008).

6 Feuchteflussdivergenz und Niederschlag

6.1. Vorgangsweise

In einem letzten qualitativen Schritt wurde untersucht, ob spezielle Signale der Feuchteflussdivergenz bei einsetzendem Niederschlag erkennbar sind. Mit einer Gitterpunktsanalyse wurden die Feuchteflussdivergenz- und Niederschlagswerte an einem bestimmten Gitterpunktwert aus den VERA-Analysen extrahiert. Die Feuchteflussdivergenz wurde mit dem 10 m Wind berechnet. Der Gitterpunkt wurde so gewählt, dass die umliegenden Stationen eine geringe Rauigkeitslänge aufweisen und die dazugehörigen Werte dadurch für ein größeres Gebiet repräsentativ waren. Es wurde der Gitterpunkt (0/1) gewählt. Dieser Gitterpunkt liegt etwa zwischen den Messstationen 4.4 und 4.5. Diese Stationen und auch die umgebenden wiesen eine geringe Rauigkeitslänge (Klasse 3 und Klasse 4) auf. Da sich aufgrund der Interpolation auf Gitterpunkte geringe negative Niederschlagswerte ergeben können, wurden diese im Bedarfsfall händisch korrigiert.

Es wurden konvektive Niederschlagsereignisse ausgewählt und folgende Termine untersucht:

20. Juni 2007 21.24 - 22.24 UTC

8. Juli 2007 17.00 - 19.00 UTC

21. Aug. 2007 15.00 – 16.00 UTC

6.2. Ergebnisse

Abb. 6.1 zeigt die Gegenüberstellung von Feuchteflussdivergenz und Niederschlag am 20. Juni 2007 im Zeitraum von einer Stunde. Zu diesem Zeitpunkt gab es auch an den umliegenden Wetterstationen Niederschlagsaufzeichnungen. Die meisten Niederschläge fielen zwischen 21.51 und 21.54 UTC. Kurz davor erreichte die Feuchteflussdivergenz ein Maximum. Die zwei Maxima sind leicht verschoben. Das Maximum der Feuchteflussdivergenz trat vor dem Maximum des Niederschlags ein.

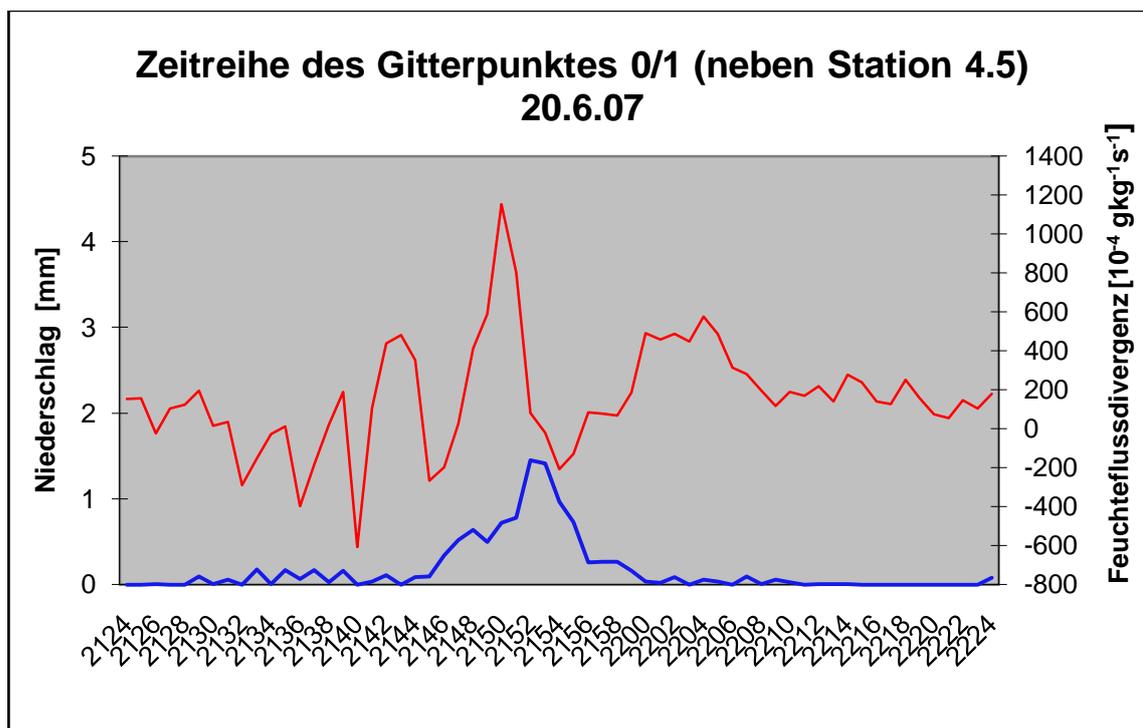


Abb. 6.1 Gitterpunktdarstellung von Feuchteflussdivergenz und Niederschlag vom 20. Juni 2007. Die rote Linie zeigt die Feuchteflussdivergenz, die blaue zeigt den Niederschlag und die Horizontalachse den Zeitraum [hhmm in UTC]

Abb. 6.2 zeigt die Gegenüberstellung von Feuchteflussdivergenz und Niederschlag am 8. Juli 2007 im Zeitraum von 2 Stunden (17.00 bis 19.00 UTC). Hier schwankte die Feuchteflussdivergenz wesentlich mehr. Signifikante Sprünge von Feuchteflusskonvergenz zu Feuchteflussdivergenz waren an den Maxima des Niederschlags ersichtlich (17.54 UTC und 18.21 UTC). Auch hier treten die Maxima leicht verschoben auf. Im Gegensatz zu Abb. 6.1 liegt das Maximum des Niederschlags diesmal vor dem Maximum der Feuchteflussdivergenz.

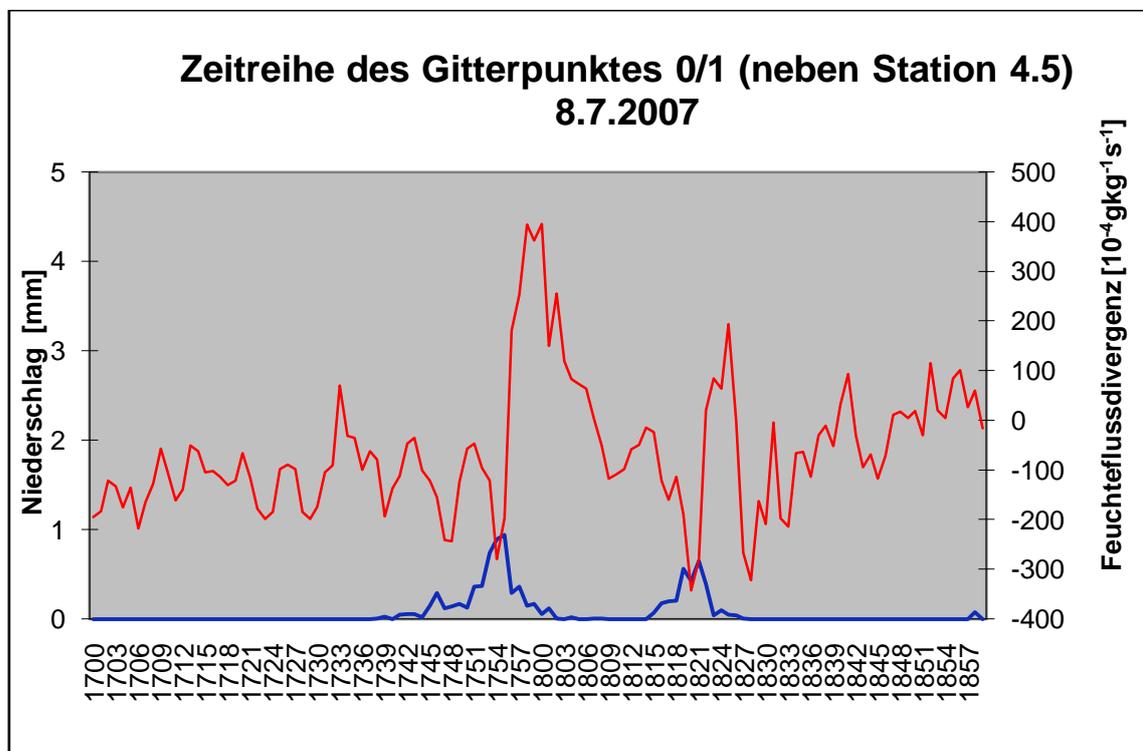


Abb. 6.2 Gitterpunktsdarstellung von Feuchteflussdivergenz und Niederschlag vom 8. Juli 2007. Die rote Linie zeigt die Feuchteflussdivergenz, die blaue zeigt den Niederschlag und die Horizontalachse den Zeitraum [hhmm in UTC]

In Abb. 6.3 ließ sich Feuchteflussdivergenz und Niederschlag nur schwer in Zusammenhang bringen. Es war ab 15.24 UTC ein Wechsel von Feuchteflussdivergenz zu Feuchteflusskonvergenz, jedoch lässt sich dies nicht mit einem Niederschlagsmaxima in Verbindung bringen. Auch waren die Absolutwerte der Feuchteflussdivergenz sehr gering im Vergleich zu Abb. 6.1 und Abb. 6.2. Hier ist jedoch anzumerken, dass es sich nicht um kurze, heftige Regenschauer wie in Abb. 6.1 und Abb. 6.2 handelt, sondern um leichte, langanhaltende Niederschläge.

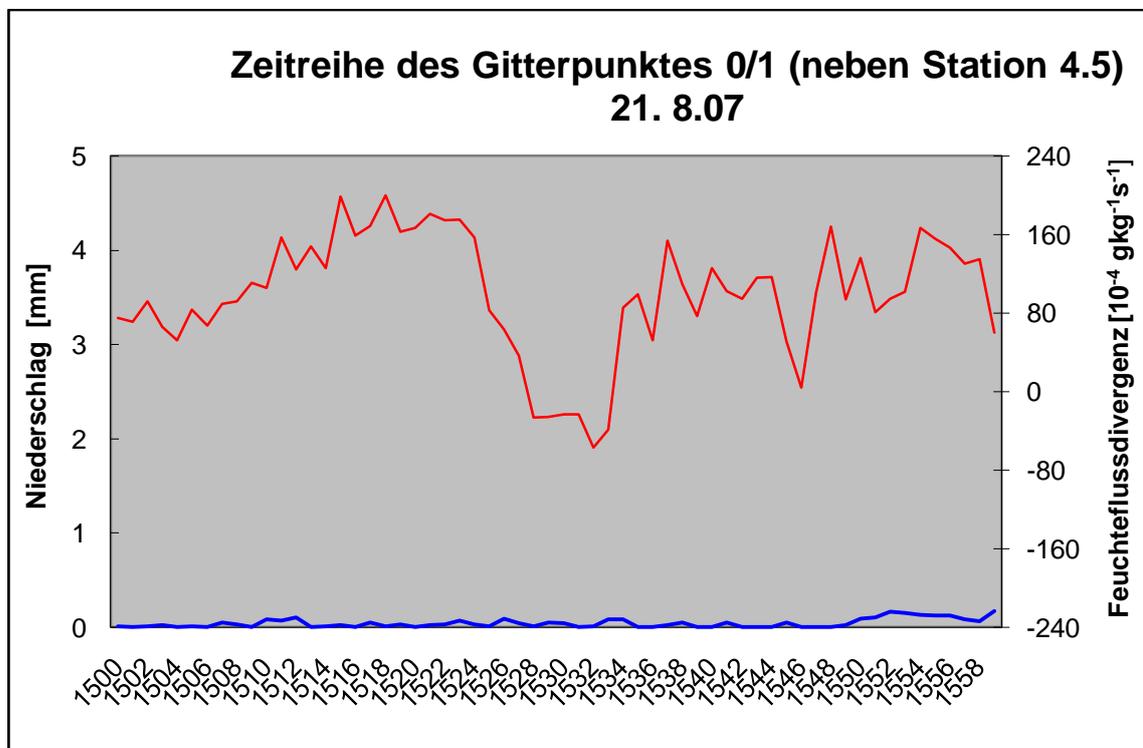


Abb. 6.3 Gitterpunktsdarstellung von Feuchteflussdivergenz und Niederschlag vom 21. Aug. 2007. Die rote Linie zeigt die Feuchteflussdivergenz, die blaue zeigt den Niederschlag und die Horizontalachse den Zeitraum [hhmm in UTC]

Die Gegenüberstellung von Feuchteflussdivergenz und Niederschlag lieferte sehr interessante Ergebnisse. In den ersten beiden Fällen ist ein starkes Signal der Feuchteflussänderung bei großen Niederschlagsmengen vorhanden. Allerdings trat dieses Signal sehr kurz vor Einsetzen des Niederschlags auf, dass der

Zusammenhang nur ganz kurzfristig für Prognosen verwendet werden kann. Trotzdem sollte überlegt werden, ob der Zusammenhang von Feuchteflussdivergenz und Niederschlag bei schauerartigen Niederschlägen genutzt werden könnte. Es müssten aber noch weitere Niederschlagsereignisse untersucht werden.

7 Zusammenfassung und Ausblick

Wie es in Feldstudien oft üblich ist, entsprechen die gewonnenen Daten nicht immer meteorologischen Standardbestimmungen. Der COPS-Datensatz der Uni Wien ist zwar in seiner räumlichen und zeitlichen Auflösung einzigartig, jedoch mussten in anderen Bereichen Abstriche gemacht werden. In unserem Fall fand die Windmessung für Betrag und Richtung in 3 m Höhe statt (meteorologischer Standard: 10 m). Außerdem entsprachen nicht alle Aufstellplätze der Messgeräte meteorologisch konformen Bedingungen. Stationen im Wald oder in der Umgebung von Bäumen, Büschen oder direkt am Waldrand repräsentieren zwar die unmittelbare Umgebung, nicht aber einen größeren Bereich und liefern dadurch oft keine allgemein gültigen Daten.

In dieser Arbeit wurde untersucht, ob sich mit einer Extrapolation der Winddaten auf 10 m Höhe diese „Fehler“ in der Aufstellung korrigieren lassen. Mithilfe des logarithmischen Windprofils wurden sowohl die Höhe als auch die Rauigkeitslänge und somit ungünstige Aufstellbedingungen berücksichtigt. Die Daten der Universität Bonn dienten als Referenzdaten. Wie in Kapitel 4 beschrieben, ergaben sich speziell an gradientstarken Tagen relativ einheitliche und somit für ein größeres Gebiet repräsentative Ergebnisse. Allerdings reichte die Extrapolation auf 10 m oftmals nicht aus, um einheitliche Ergebnisse zu erzielen.

Bei den VERA-Analysen der Feuchteflussdivergenz, wie in Kapitel 5 beschrieben, lieferten die modifizierten 10 m Winddaten keine zusätzliche Information. Alle Feuchteflussdivergenz- bzw. -konvergenzgebiete waren bereits in den Analysen mit den 3 m Winddaten ersichtlich. Allerdings zeigte sich in den Analysen mit dem 10 m Wind, dass die Ergebnisse sowohl in der Intensität als auch in der räumlichen Ausbreitung wesentlich ausgeprägter waren. Dadurch werden die Muster verstärkt und lassen sich eindeutiger erkennen. Da der 10 m Wind außerdem höhere Windgeschwindigkeiten aufwies, waren in den Analysen auch

mehr Windfiedern eingezeichnet (Abb. 5.3 oder Abb. 5.6). Somit ist die vorherrschende Windrichtung leichter zu erkennen. Insgesamt fällt dadurch die gesamte Interpretation der Analyse leichter und wird aussagekräftiger.

Die Ergebnisse bei der Gegenüberstellung von Feuchteflussdivergenz und Niederschlägen waren unterschiedlich. Es zeigte sich bei Abb. 6.1 und bei Abb. 6.2 jeweils ein Sprung von Feuchteflusskonvergenz zu -divergenz, jedoch einmal knapp vor dem Niederschlagsmaximum und einmal knapp nach dem Niederschlagsmaximum. Zu beiden untersuchten Terminen gab es schauerartige Niederschläge. Dies ist ein eindeutiges Ergebnis des Zusammenhanges der beiden Parameter. Da das Signal der Feuchteflussdivergenzänderung aber in beiden Fällen kurz mit vor oder nach dem Einsetzen des Niederschlags auftrat, kann diese Information nur für ganz kurzfristige Prognosen herangezogen werden. Im dritten untersuchten Fall (Abb. 6.3) ließ sich die Feuchteflussdivergenz in keinen Zusammenhang mit dem Niederschlag bringen. Allerdings handelte es sich hier nicht um schauerartige Niederschläge, sondern um langanhaltenden „Landregen“.

Um aussagekräftigere Resultate zu erhalten, müssten mehr Niederschlagsereignisse untersucht werden. Obwohl die Messkampagne in den Sommermonaten Juni bis August stattfand, konnten nur diese drei Niederschlagsereignisse mit signifikantem Niederschlag ausgemacht werden. Außerdem wurden die Ergebnisse in Kapitel 6 nur einer qualitativen Bearbeitung unterzogen. In einer weiteren Arbeit wäre noch Raum für eine quantitative Untersuchung des Zusammenhangs von Feuchteflussdivergenz und Niederschlag aus dem COPS-Datensatz. Um den Rahmen einer Diplomarbeit nicht zu sprengen, wurde in dieser Arbeit davon Abstand genommen.

8 Literaturverzeichnis

Banacos, P.C.; Schultz, D.M. 2006. The Use of Moisture Flux Convergence in Forecasting Convective Initiation: Historical and Operational Perspectives. *Weather and Forecasting*. 20, S. 351-366

Beckmann, S.K. 1990. A study of 12-h NGM low-level moisture flux convergence centers and the location of severe thunderstorms and heavy rain. *American Meteorological Society*. S. 78-83.

Bergmann-Schaefer. 2001. *Lehrbuch der Experimentalphysik, Erde und Planeten, Band 7*. Berlin : Walter de Gruyter, ISBN 3110168375.

Berliner Wetterkarte. Ausgabe vom 15.Juli, 20. Juli, 1. Aug. und 2. Aug. (alle 2007).

COPS-Homepage. www.cops2007.de. abgerufen am 28.11.2007.

Deutscher Wetterdienst. www.dwd.de. abgerufen am 03. 07 2009.

Foken, T. 2003. *Angewandte Meteorologie*. Heidelberg : Springer Verlag, ISBN 3540003223.

Häberli, C.;Grohn, I.; Steinacker, R.; Pöttschacher, W.; Dorninger, M. 2004. Performance of the surface observation network during MAP. *Meteorologische Zeitschrift*. 13, S. 109 - 121.

Hagelversicherung, Österreichische. 2009. 2009. persönliche Auskunft

Hirt, W.D. 1982. Short-term prediction of convective development using dew point convergence. *Ninth conference on Weather and Forecasting Analysis*. AMS, S. 201-205.

Kaufmann, H. 2006. Die mesoskalige Analyse der Feuchteflussdivergenz im Alpenraum. *Diplomarbeit*. Wien, 2006.

Rubel, F. WS 2007. VO Atmosphärische Grenzschicht. Uni Wien. WS 2007.

Schneider, S.; Stuhl B.; Steinacker; R.; Dorninger, M. 2008. COPS 2007 - das Institut für Meteorologie und Geophysik Wien auf Forschungseinsatz im Schwarzwald. *ÖGM Bulletin*. Wien, Bd. 1.

Schneider, S.; Chimani, B.; Kaufmann, H.; Bica, B.; Lotteraner, Ch.; Tschannett, S.; Steinacker, R. 2008. Nowcasting of a supercell storm with VERA. *Meteorology and Atmospheric Physics*. Volume 102, S. 23 - 26.

Schönwiese, Ch. 1992. *Praktische Statistik für Meteorologen und Geowissenschaftler*. Berlin : Borntraeger, ISBN 3443010296.

Sevruk, B.; Zahlavova, L. 1994. Classification system of precipitation gauge site exposure: evaluation and application. *International Journal of Climatology*. S. 681 - 689.

Statistik Austria. 2008. persönliches Gespräch mit Dr. Waltraud Rath am 25.Aug.2008.

Steinacker, R.; Ratheiser, M.; Bica, B.; Chimani, B.; Dorninger, M.; Gepp, W.; Lotteraner, Ch.; Schneider, S.; Tschannett, S. 2006. A Mesoscale Data Analysis and Downscaling Method over Complex Terrain. *Monthly Weater Review*. Vol. 134, Issue 10.

Steinacker, Reinhold, Häberli, C. und Pötttschacher, W. 2000. A Transparent Method for the Analysis and Quality Evaluation of Irregularly Distributed and Noisy Observational Data. *Monthly Weather Review*. Vol. 128, Bd. No. 7, Seite 2303-2316.

Stuhl, B. 2008. Qualitätskontrolle meteorologischer Mesonetzdaten. *Diplomarbeit, Wien*. 2008.

Stull, R.B. 1997. *An Introduction to Boundary Layer Meteorology*. Netherlands : Kluwer Academic Publishers, ISBN 9027727694.

van Delden, A. 1998. The synoptic setting of thundery low and associated prefrontal squall line in western Europe. *Meteorology and Atmospheric Physics*. S. 113-131.

VERA Homepage. 2009. <http://www.univie.ac.at/amk/vera/>. abgerufen am 15. 05 2009.

WMO Guide. 2006. *Guide to Meteorological Instruments and Methods of Observation*. Genf, Schweiz : Secretariat of the WMO, 2006.

Wulfmeyer, V.; Behrendt, A.; Bauer, H.-S. 2008. The Convective and Orographically-induced Precipitation Study. *Bulletin of the American Meteorological Society*. Oktober 2008.

www.wetterzentrale.de. 2009. www.wetterzentrale.de. *GFS*. abgerufen am 07. 03 2009.

Ich habe mich bemüht, sämtliche Inhaber der Bildrechte ausfindig zu machen und ihre Zustimmung zur Verwendung der Bilder in dieser Arbeit eingeholt. Sollte dennoch eine Urheberrechtsverletzung bekannt werden, ersuche ich um Meldung bei mir.

Diese Diplomarbeit wurde im Rahmen des Projektes P19658-N10 vom FWF unterstützt.

9 Lebenslauf

Name: Felizitas Daniela Zeitz
Geboren am: 15. Dezember 1967
Familienstand: in Partnerschaft lebend, 2 Kinder

Schulbildung:

1974 - 1982 Volks- und Hauptschule in Neulengbach
1982 – 1987 HAK St. Pölten
Seit WS 2002 Studium der Meteorologie an der Uni Wien

Berufliche Bildung:

07/87 – 12/87 Bürocity GmbH
01/88 – 03/91 Agfa-Gevaert GmbH
04/91 – 09/01 NCR Österreich GmbH
09/06 – 02/08 IBM Österreich GmbH
02/08 – 11/08 Universität Wien