

Schlussbericht November 2002

Abklärung des Windpotenzials am Piz Nair, Graubünden

Schlussbericht

ausgearbeitet durch
Andreas Reinhardt
Meteotest
Fabrikstr. 14, 3012 Bern

Diese Arbeit ist im Auftrag des Bundesamtes für Energiewirtschaft und der ABB
Energie Services Schweiz entstanden. Für den Inhalt und die
Schlussfolgerungen ist ausschliesslich der Autor dieses Berichtes verantwortlich.

Zusammenfassung

METEOTEST führte im Auftrag von ABB Energie Services Schweiz eine Windmessung unterhalb des Piz Nair, St. Moritz auf ca. 2'700 m.ü.M. durch.

Die Hauptresultate der Windmessung am Piz Nair sind in Tabelle 1 zusammengefasst. Die geplante Messperiode von 1 Jahr musste infolge der späten Installation (November 2001) wegen des drohenden Wintereinbruchs auf knapp 11 Monate verkürzt werden. Die Aussagekraft der Resultate wird dadurch jedoch nicht beeinträchtigt.

Tab. 1: Die wichtigsten Windkraftanlagen-spezifischen Standorteigenschaften.

Parameter	Messstation Murezzan
mittlere Windgeschwindigkeit der Messperiode (November 2001 – Oktober 2002) in 10 m	2.6 m/s
mittlere Windgeschwindigkeit der Messperiode in 20 m	2.7 m/s
mittlere Windgeschwindigkeit der Messperiode in 30 m	2.8 m/s
mittlere Windgeschwindigkeit in Nabenhöhe 45 m (Extrapolation der Messungen)	2.8 m/s
langjähriges Windpotenzial in Nabenhöhe 45 m	2.8 m/s
mittlere Windgeschwindigkeit in Nabenhöhe 50 m (Extrapolation der Messungen)	2.8 m/s
langjähriges Windpotenzial in Nabenhöhe 50 m	2.9 m/s

Abstract

METEOTEST carried out wind measurements on behalf of ABB Energy Services Switzerland below Piz Nair, St. Moritz at approx. 2'700 m.a.s.l.

The main results of the wind measurements at Piz Nair are summarized in the following table. It was planned to measure for one year but the measurement period had to be shortened to 11 months because of the late installation (November 2001) and the beginning of winter 2002/2003. The significance of the results is not affected.

The most important site characteristics for wind turbines.

Parameters	Measurement station Murezzan
Average wind speed during measurement period (November 2001 – October 2002) at 10 m	2.6 m/s
Average wind speed during measurement period at 20 m	2.7 m/s
Average wind speed during measurement period at 30 m	2.8 m/s
Average wind speed at hub height 45 m (extrapolation of measurements)	2.8 m/s
Long-term wind potential at hub height 45 m	2.8 m/s
Average wind speed at hub height 50 m (extrapolation of measurements)	2.8 m/s
Long-term wind potential at hub height 50 m	2.9 m/s

Résumé

Par ordre de ABB Energie Services Suisse *METEOTEST* a procédé à des mesurages de vent au-dessous du Piz Nair, St. Moritz, à une altitude de 2'700 m.s.m. env.

Les résultats principaux de ces mesurages sont résumés dans la table suivante. La période de mesurages prévue d'une année a dû être réduite à moins de 11 mois à cause de l'installation un peu tardive en novembre 2001 et à cause de l'arrivée imminente de l'hiver. La représentativité des résultats n'est pourtant pas affectée par cette réduction.

Les principales caractéristiques du site par rapport à l'installation d'éoliennes:

Paramètre	Site de mesurage Murezzan
Vitesse moyenne du vent pendant la période de mesurages (novembre 2001 – octobre 2002) à 10 m	2.6 m/s
Vitesse moyenne du vent pendant la période de mesurages à 20 m	2.7 m/s
Vitesse moyenne du vent pendant la période de mesurages à 30 m	2.8 m/s
Vitesse moyenne du vent au niveau de la nacelle (45 m; extrapolation des mesures)	2.8 m/s
Potentiel éolien à long terme au niveau de la nacelle (45 m)	2.8 m/s
Vitesse moyenne du vent au niveau de la nacelle (50 m; extrapolation des mesures)	2.8 m/s
Potentiel éolien à long terme au niveau de la nacelle (45 m)	2.9 m/s

Inhaltsverzeichnis

1. Ausgangslage	8
2. Ziel der Arbeit	10
3. Lösungsweg	11
3.1 Messkonzept	11
3.2 Messkonfiguration	11
3.3 Messresultate	12
3.4 Turbulenz	12
3.5 Extrapolation auf Nabenhöhen	12
3.6 Langjährige Abschätzung des Windpotenzials	12
3.7 Interpretation	12
3.8 Abschätzung der Unsicherheit	12
4. Hauptergebnisse	13
4.1 Messdaten	13
4.2 Resultate der Messungen	15
4.3 Abschätzung des Windpotenzials in Nabenhöhe	21
4.4 Abschätzung des langjährigen Windpotenzials	26
5. Interpretation	32
6. Abschätzung der Unsicherheit	33
6.1 Zusammenfassung	33
6.2 Nacheichung	33
6.3 Rechenfehler	34
6.4 Unsicherheit der aufbereiteten Daten	34
6.5 Unsicherheit von Monatmittelwerten und Mittelwert der Messperiode in Messhöhen	35
6.6 Unsicherheit der Extrapolation auf Nabenhöhe	35
6.7 Unsicherheit der Abschätzung des langjährigen Windpotenzials	35
6.8 Abweichungen zu anderen Messkonfigurationen	36
7. Anhang (Eichzertifikate)	38

Abbildungsverzeichnis

Abb. 1:	Die Standorte der Messstationen 'Murezzan' und 'Randolins' (© Bundesamt für Landestopografie, DV 606).	8
Abb. 2:	Skizze der Messanordnung Messstation 'Murezzan'.	9
Abb. 3:	Häufigkeitsverteilung der Windgeschwindigkeit am Standort 'Murezzan' in 10, 20 und 30 m Höhe. v_{med} ist die mittlere Windgeschwindigkeit.	16
Abb. 4:	Verlauf der Windgeschwindigkeit am Standort 'Murezzan' (gleitende Tagesmittelwerte) in 10, 20 und 30 m Höhe (links).	17
Abb. 5:	Lufttemperatur (gleitende Tagesmittelwerte) am Standort 'Murezzan' (rechts).	17
Abb. 6:	Tagesgang der Windgeschwindigkeit am Standort 'Murezzan' in 30 m Höhe.	18
Abb. 7:	Windrose am Standort Murezzan' in 30 m Höhe.	18
Abb. 8:	Turbulenzintensität am Standort 'Murezzan' in 30 m Höhe als Funktion der Windgeschwindigkeit.	19
Abb. 9:	Turbulenzrose am Standort 'Murezzan' in den Höhen 10, 20 und 30 m. Es wurden die Turbulenzwerte für Windgeschwindigkeiten grösser als 3 m/s (in 30 m Höhe) berücksichtigt.	19
Abb. 10:	Die berechnete Wind-Häufigkeitsverteilung in der Nabenhöhe (45 m und 50 m) am Standort 'Murezzan'.	23
Abb. 11:	Mittleres vertikales Windprofil am Standort 'Murezzan' für die Messperiode 21.11.01 – 30.10.02.	25
Abb. 12:	Vergleich der Windgeschwindigkeit zwischen der Messstation 'Murezzan' und den MeteoSchweiz Stationen Gornergrat und Naluns-Schlivera.	27
Abb. 13:	Die berechnete, langjährige Wind-Häufigkeitsverteilung in der Nabenhöhe (45 m und 50 m) am Standort 'Murezzan'.	31

Tabellenverzeichnis

Tab. 1:	Die wichtigsten Windkraftanlagen-spezifischen Standorteigenschaften.	1
Tab. 2:	Konfiguration der Station 'Murezzan'.	11
Tab. 3:	Konfiguration der Station 'Randolins'.	12
Tab. 4:	Messperioden.	13
Tab. 5:	Datenverfügbarkeit.	13
Tab. 6:	Datenformat der bereinigten Dateien der Station 'Murezzan'.	14
Tab. 7:	Monatliche Mittelwerte, maximale 10-Minuten-Mittelwerte der Windgeschwindigkeit (WG) und maximale 2-Sekunden-Böenspitzen (BS) am Standort 'Murezzan'. Die Datenreihen der Monate November 2001 (ab 21.11.2001), September 2002 (Lücke vom 28.9.02 bis 30.9.02) und Oktober 2002 (bis 30.10.02) sind nicht komplett.	15
Tab. 8:	Resultate der Temperaturmessung der Station 'Murezzan'.	15
Tab. 9:	Analyse der Turbulenzintensität am Standort 'Murezzan' in 30 m Höhe: Die Werte sind in Funktion der Windrichtung und Windgeschwindigkeit angegeben.	20
Tab. 10:	Die berechnete (45, 50 m) mittlere monatliche Windgeschwindigkeit (WG) am Standort 'Murezzan'. Die Datenreihen der Monate November 2001 (ab 21.11.2001), September 2002 (Lücke vom 28.9.02 bis 30.9.02) und Oktober 2002 (bis 30.10.02) sind nicht komplett.	22
Tab. 11:	Häufigkeitsverteilung der extrapolierten 10-Minuten Mittelwerte auf 45 m und 50 m nach Windgeschwindigkeitsklassen am Standort 'Murezzan'.	24
Tab. 12:	Korrelation der MeteoSchweiz-Stationen mit der Messstation 'Murezzan' in der Reihenfolge der Güte der Monatsmittel-Korrelation.	26
Tab. 13:	Verhältnisse der langjährigen Daten 1983–1997 (Langj.) und der Messperiode (MP) der Stationen Gornergrat und Naluns-Schlivera. Der unvollständige Monat November 2001 wurde nicht berücksichtigt.	28

Tab. 14:	Das langjährige Windpotenzial am Standort 'Murezzan' (WG = Windgeschwindigkeit). Die Mittelwerte der Monate Oktober und November stammen von unvollständigen Datenreihen. Das langjährige Mittel für den Monat November wurde durch den Vergleich mit der Station Gornergrat abgeschätzt.	29
Tab. 15:	Häufigkeitsverteilung der extrapolierten, langjährigen 10-Minuten Mittelwerte auf 45 m und 50 m nach Windgeschwindigkeitsklassen am Standort 'Murezzan'.	30
Tab. 16:	Resultate der Nacheichung der eingesetzten Ice-Free-II-Anemometer	34

1. Ausgangslage

METEOTEST führte im Auftrag von ABB Energie Services Schweiz eine Windmessung unterhalb des Piz Nair, St. Moritz auf ca. 2'700 m.ü.M. durch.

Dieser Schlussbericht dokumentiert die Ergebnisse nach einer Messdauer von knapp 1 Jahr. Das Hauptgewicht des Berichts liegt in der Darstellung der Messresultate in Grafiken und Tabellen.

Abbildung 1 zeigt den Standort der Messungen. Die Landeskoordinaten lauten 781.350/152.940. Abbildung 2 zeigt eine Skizze der Messstation 'Murezzan'.

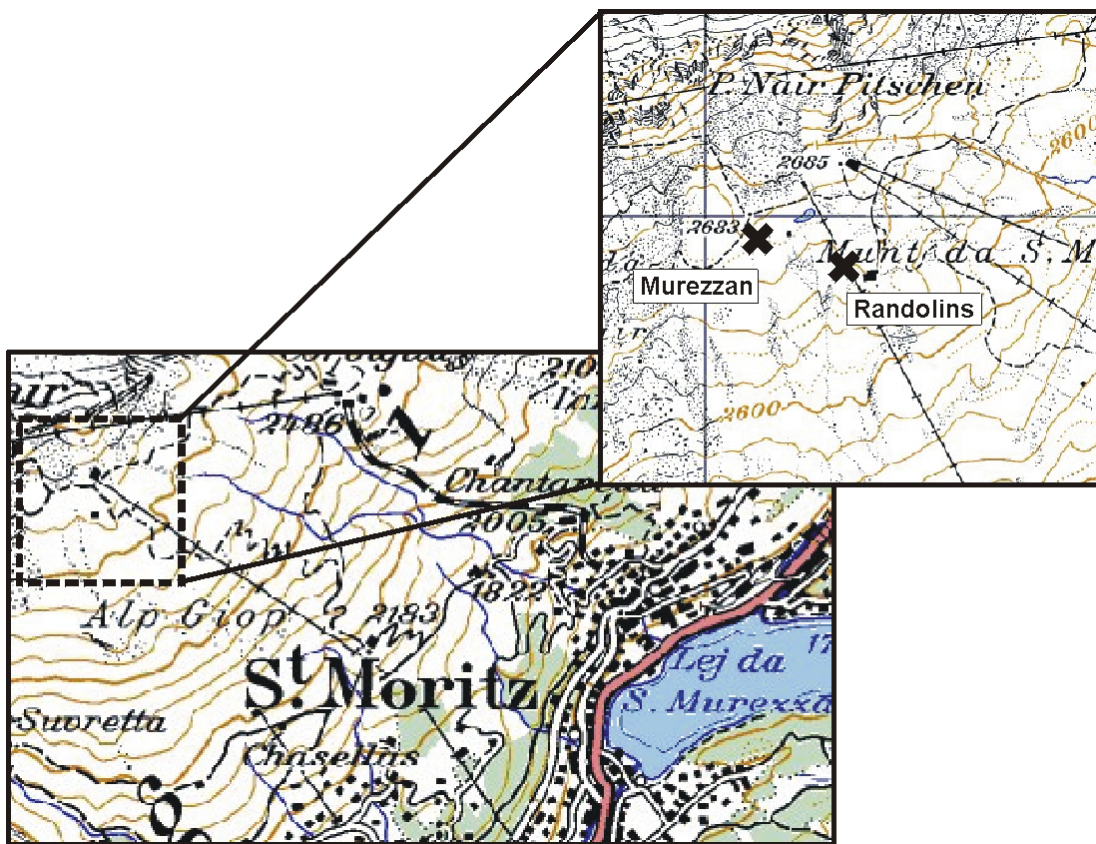


Abb. 1: Die Standorte der Messstationen 'Murezzan' und 'Randolins' (© Bundesamt für Landestopografie, DV 606).

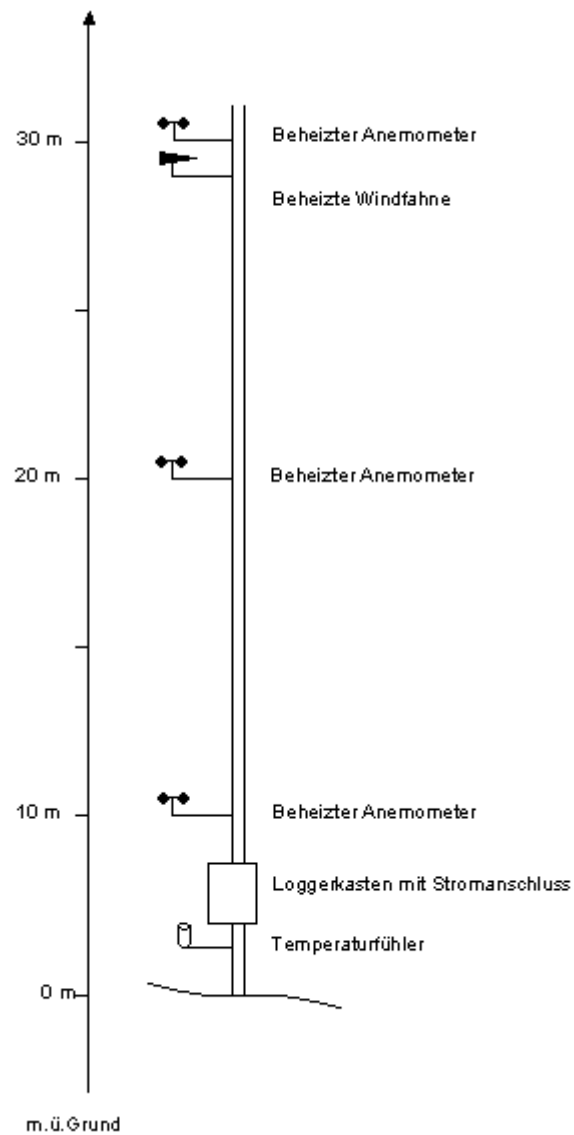


Abb. 2: Skizze der Messanordnung Messstation 'Murezzan'.

2. Ziel der Arbeit

Ziel der Arbeit ist die Abklärung des Windpotenzials mit Hilfe von Windmessungen für den Standort Piz Nair zur Errichtung einer Windkraftanlage. Dies beinhaltet folgende Punkte:

- Windgeschwindigkeit und -verteilung
- Windrichtungsverteilung
- Extrapolation in Nabenhöhe
- Abschätzung des langjährigen Windpotenzials
- Turbulenz

3. Lösungsweg

3.1 Messkonzept

Unterhalb des Piz Nair (St. Moritz, Graubünden) auf etwa 2700 m.ü.M. wurde am 21. November 2001 die 30 m hohe Messstation 'Murezzan' errichtet.

Messungen an der Station Murezzan (Abb. 2):

- Windgeschwindigkeit in drei Höhen (10, 20 und 30 m) mit je einem beheizten Sensor.
- Windrichtung 30 m über Grund mit einem beheizten Sensor
- Lufttemperatur 2 m über Grund

Aufgrund der hohen Vereisungsgefahr wurden für diesen Standort nur beheizte Windsensoren verwendet.

Das Messintervall beträgt 2 Sekunden. Daraus werden 10-Minuten-Mittelwerte gebildet und gespeichert. Ausserdem werden die Standardabweichung der Windgeschwindigkeit auf allen Niveaus und die Böenspitze auf 30 m alle 10 Minuten berechnet und gespeichert.

Zusätzlich werden die Daten einer schon bestehenden Windmessung an einem Skiliftmast (Station 'Randolins') in der Nähe (ca. 200 m) aufgezeichnet. Dieses Gerät dient zur Steuerung des Skiliftes. Mit einer von der Herstellerfirma übermittelten groben Kalibrationsfunktion wurde es möglich auch diese Werte aufzuzeichnen. Diese Messung diene als Sicherheitsmessung aus welcher im Falle eines Defekts der Messstation 'Murezzan' die Windwerte hätten rekonstruiert werden können. Diese Werte wurden nicht in die Auswertung einbezogen, da die Kenntnis der Genauigkeit zu klein ist.

An der 30 m hohen Messstation traten keine Defekte auf.

3.2 Messkonfiguration

Die folgenden Tabellen spezifizieren die verwendeten Datenlogger und Sensoren.

Tab. 2: Konfiguration der Station 'Murezzan'.

Datenlogger	Sensor	Typ	Messparameter	Serien-Nr.	Höhe
NRG 9200-Plus	Anemometer	NRG IceFree II	Windgeschwindigkeit	III29	10.5 m
	Anemometer	NRG IceFree II	Windgeschwindigkeit	II298	21.7 m
	Anemometer	NRG IceFree II	Windgeschwindigkeit	III28	30.3 m
	Windfahne	NRG IceFree II	Windrichtung	30266	29.4 m
	Temperatur	NRG 110S	Lufttemperatur	NRG	4.2 m

Tab. 3: Konfiguration der Station 'Randolins'.

Datenlogger	Sensor	Typ	Messparameter	Höhe
NRG 9200-Plus	Anemometer	nicht bekannt	Windgeschwindigkeit	ca. 15 m

3.3 Messresultate

In Kapitel 4.2 werden die während der Messperiode gesammelten Daten dargestellt, hauptsächlich Windverteilungen und Windrichtung.

3.4 Turbulenz

Die Analyse der Turbulenz am Standort ist massgebend für die Wahl einer geeigneten Windkraftanlage (Kapitel 4.2).

3.5 Extrapolation auf Nabenhöhen

Kapitel 4.3 beinhaltet die Extrapolation der Windstatistiken in die für die Windkraftanlage vorgesehene Nabenhöhe (45 m und 50 m über Grund).

3.6 Langjährige Abschätzung des Windpotenzials

Um Angaben über das langjährige Windpotenzial zu erhalten wurden die aufgezeichneten Daten am Standort 'Murezzan' mit langjährigen Daten benachbarter Meteostationen der MeteoSchweiz verglichen. In einem in Kapitel 4.4 beschriebenen Korrelationsverfahren können so die Messresultate am Standort relativiert werden.

3.7 Interpretation

In Kapitel 5 werden die Resultate erläutert. Insbesondere wird dabei auf die Eignung des Messstandortes für die Windkraft eingegangen.

3.8 Abschätzung der Unsicherheit

Am Ende des Berichts in Kapitel 6 werden die Unsicherheiten der verschiedenen Daten und Auswertungen analysiert. Die Resultate der Sensorkalibrationen wurden miteinbezogen. Im Anhang sind die Kalibrationsprotokolle der verwendeten Anemometer zu finden.

4. Hauptergebnisse

4.1 Messdaten

Messperioden

Tabelle 4 enthält die Messperioden der beiden Stationen.

Tab. 4: Messperioden.

Standort	Beginn	Ende
Murezzan	21.11.2001	30.10.02
Randolins	21.11.2001	30.10.02

Datenlücken

Die einzige Datenlücke (2 Tage) der Station Murezzan entstand am 28.9.02 bis am 30.9.02 durch einen vollen Speicher, weil die Speichereinheiten zu spät ausgetauscht wurden. Ansonsten funktionierten die beheizten Sensoren trotz zum Teil sehr tiefen Temperaturen einwandfrei. Der Datensatz der Station Randolins ist lückenfrei. Tabelle 5 listet die Datenverfügbarkeit pro Messniveau auf.

Tab. 5: Datenverfügbarkeit.

Standort	Messung	Datenverfügbarkeit
Murezzan	Windgeschwindigkeit 10 m	99.4%
	Windgeschwindigkeit 20 m	99.4%
	Windgeschwindigkeit 30 m	99.4%
	Windrichtung 30 m	99.4%
	Lufttemperatur 2 m	99.4%
Randolins	Windgeschwindigkeit ca. 15 m	100.0%

Datenformat

Die mit diesem Bericht abgelieferten Daten liegen in einem aufbereiteten Format vor und können so für Berechnungen oder Modellierungen problemlos übernommen werden. Folgende Umrechnungen der von den Loggern direkt gemessenen Rohdaten wurden vorgenommen:

- Anwendung der von den Herstellern empfohlenen Kalibrationsfunktionen für alle Sensoren.
- Addierung des Offsets der Windfahne (Differenz zwischen Nord der Windfahne und tatsächlichem Nord).
- Ersetzen von Fehlwerten mit der Fehlwertbezeichnung '-999'.

Die bereinigten Daten der Station 'Murezzan' liegen diesem Bericht als ASCII-Textdatei auf der CD-ROM bei ('murezzan.dat'). Die Werte sind in Spalten angeordnet und durch Kommas getrennt (Tab.6).

Tab. 6: Datenformat der bereinigten Dateien der Station 'Murezzan'.

Spalte	Bedeutung/Parameter
A	Datum [mmdyy] mm=Monat; dd=Tag; yy=Jahr
B	Zeit [hhmm] hh=Stunde; mm=Minute
C	mittlere Windgeschwindigkeit in 10 m [m/s]
D	mittlere Windgeschwindigkeit in 20 m [m/s]
E	mittlere Windgeschwindigkeit in 30 m [m/s]
F	Standardabweichung Windgeschwindigkeit in 10 m [m/s]
G	Standardabweichung Windgeschwindigkeit in 20 m [m/s]
H	Standardabweichung Windgeschwindigkeit in 30 m [m/s]
I	Böenspitze in 30 m [m/s]
J	Windrichtung [°]
K	Lufttemperatur [°C]

4.2 Resultate der Messungen

Die folgenden Tabellen und Grafiken zeigen die Resultate der bereinigten Messdaten der gesamten Messperiode.

In den Grafiken der zeitlichen Verläufe der Messungen werden gleitende Tagesmittelwerte dargestellt (Abb. 4 und 5): Zu jedem Zeitpunkt (alle 10 Minuten) wird der Mittelwert der Messungen von einem halben Tag vorher bis einen halben Tag nachher berechnet.

Tab. 7: Monatliche Mittelwerte, maximale 10-Minuten-Mittelwerte der Windgeschwindigkeit (WG) und maximale 2-Sekunden-Böenspitzen (BS) am Standort 'Murezzan'. Die Datenreihen der Monate November 2001 (ab 21.11.2001), September 2002 (Lücke vom 28.9.02 bis 30.9.02) und Oktober 2002 (bis 30.10.02) sind nicht komplett.

Monat	mittl. WG in 10 m [m/s]	mittl. WG in 20 m [m/s]	mittl. WG in 30 m [m/s]	max. 10- Min.- Mittel in 10 m	max. 10- Min.- Mittel in 20 m	max. 10- Min.- Mittel in 30 m	BS in 30 m [m/s]
November 2001	2.8	2.7	3.0	9.2	9.8	10.4	31.0
Dezember 2001	2.9	3.0	3.2	11.3	11.8	11.9	31.0
Januar 2002	1.9	1.9	2.0	13.1	13.5	14.0	34.0
Februar 2002	3.0	3.1	3.2	10.9	11.2	11.8	36.0
März 2002	2.7	2.8	2.8	12.9	13.3	13.9	36.0
April 2002	2.3	2.4	2.4	10.2	10.3	10.7	26.0
Mai 2002	2.7	2.8	2.8	11.3	12.0	12.8	26.0
Juni 2002	2.4	2.6	2.6	15.0	15.7	15.7	36.0
Juli 2002	2.9	3.0	3.1	10.2	10.4	10.9	28.0
August 2002	2.2	2.4	2.4	8.1	8.4	9.0	22.0
September 2002	2.0	2.1	2.1	7.4	7.6	8.1	20.0
Oktober 2002	3.4	3.5	3.5	13.4	14.2	14.7	37.0
Mittelwert aller Messungen	2.6	2.7	2.8				

Tab. 8: Resultate der Temperaturmessung der Station 'Murezzan'.

Parameter	Mittelwert	Minimum	Maximum	Standardabweichung
Temperatur	-0.6°C	-22.5°C	16.4°C	6.4°C

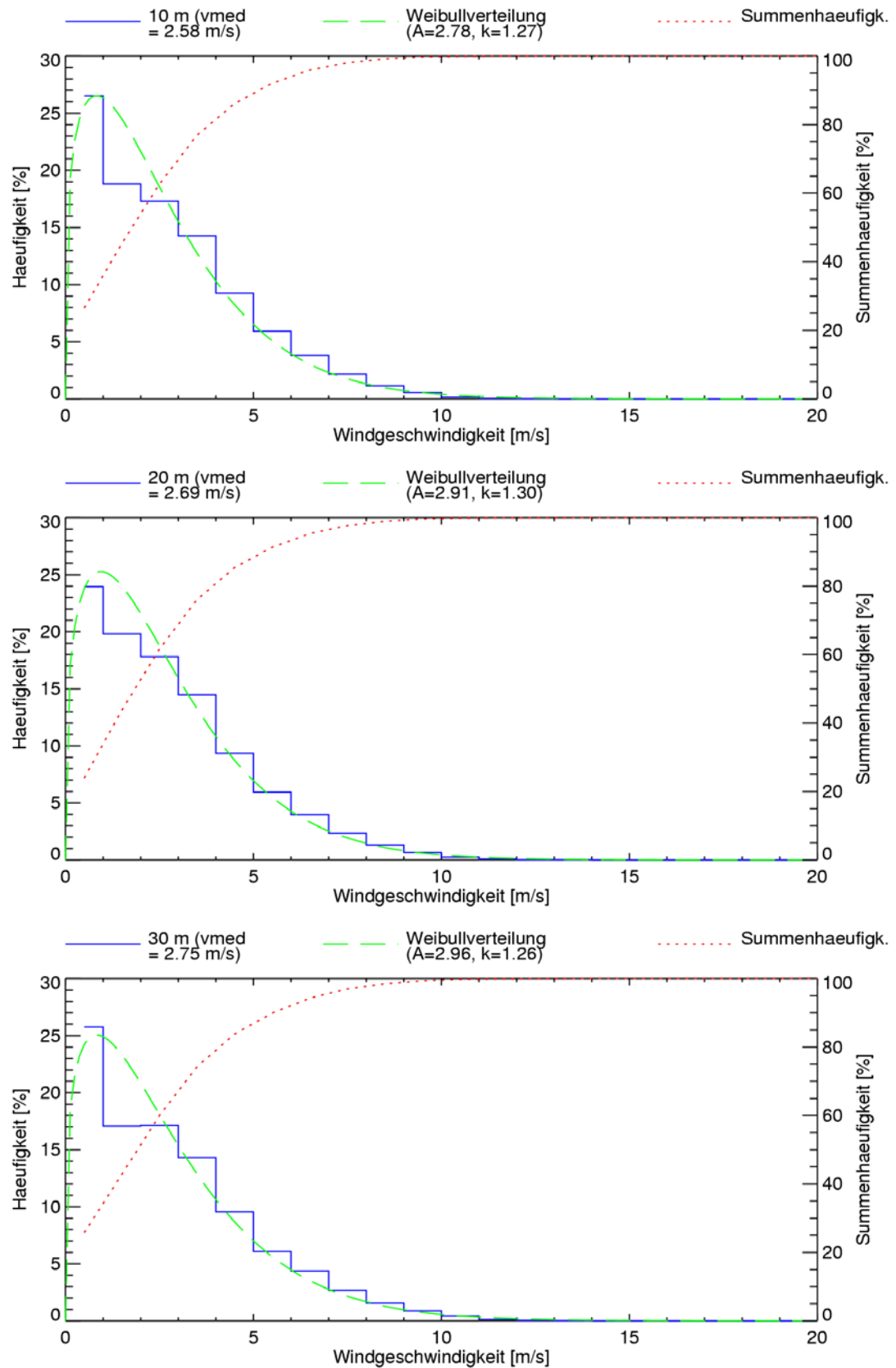


Abb. 3: Häufigkeitsverteilung der Windgeschwindigkeit am Standort 'Murezzan' in 10, 20 und 30 m Höhe. v_{med} ist die mittlere Windgeschwindigkeit.

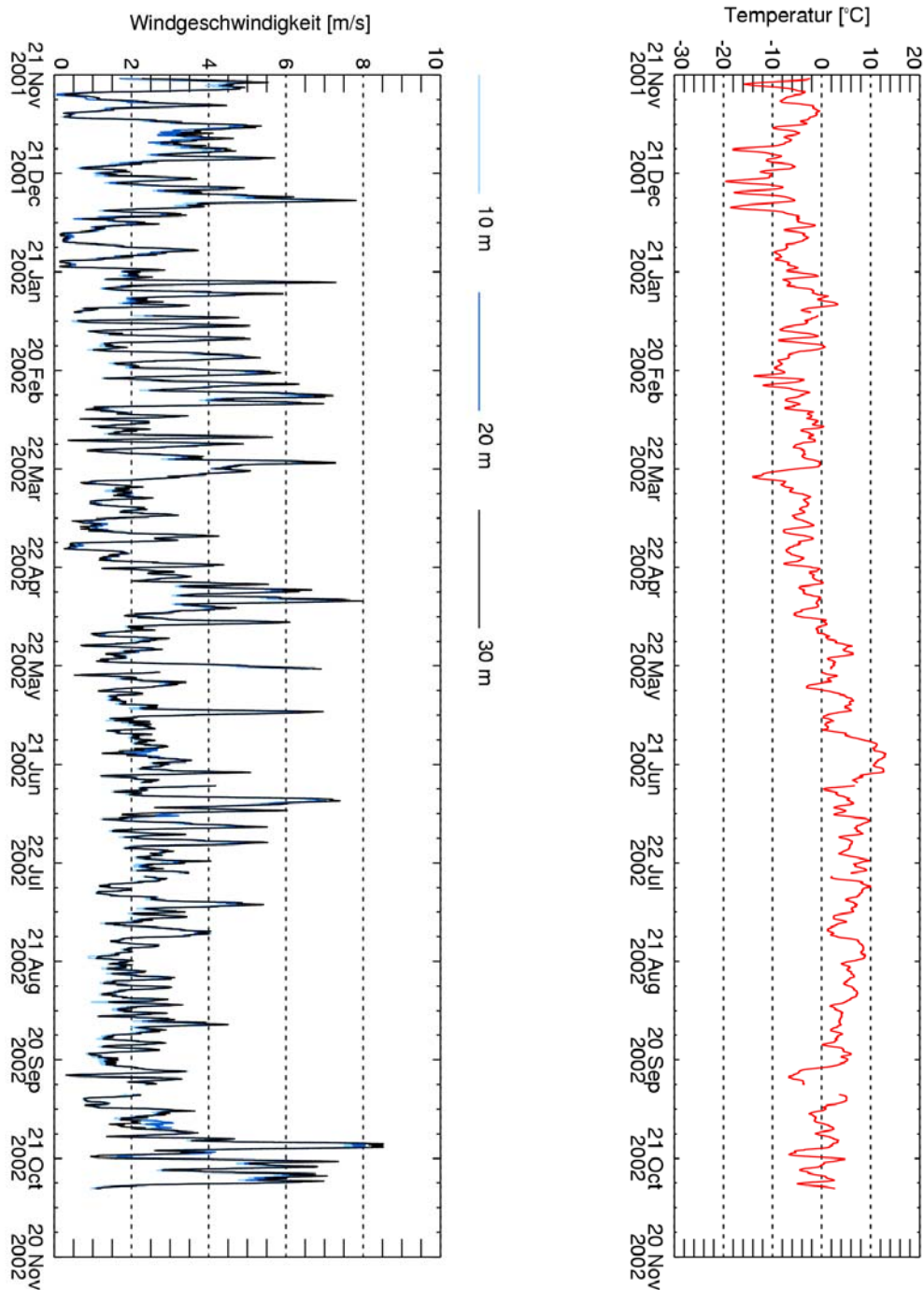


Abb. 4: Verlauf der Windgeschwindigkeit am Standort 'Murezzan' (gleitende Tagesmittelwerte) in 10, 20 und 30 m Höhe (links).

Abb. 5: Lufttemperatur (gleitende Tagesmittelwerte) am Standort 'Murezzan' (rechts).

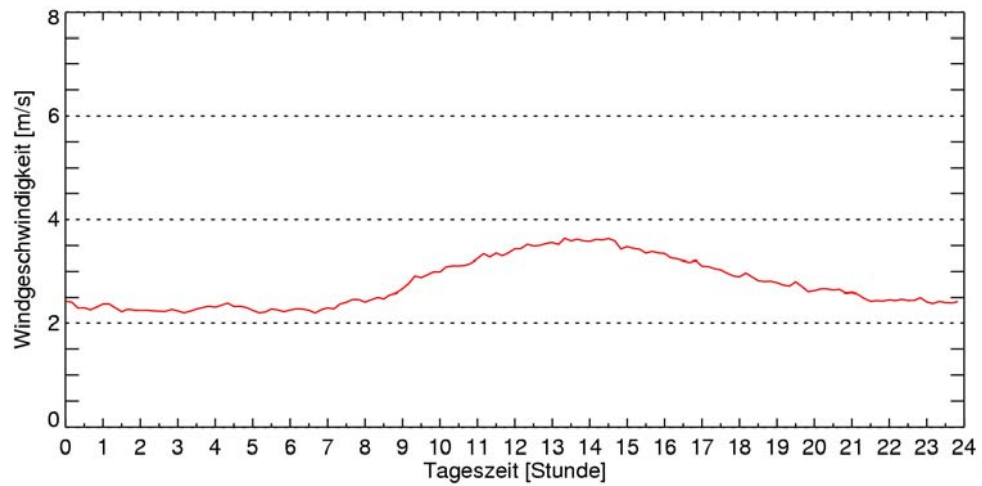


Abb. 6: Tagesgang der Windgeschwindigkeit am Standort 'Murezzan' in 30 m Höhe.

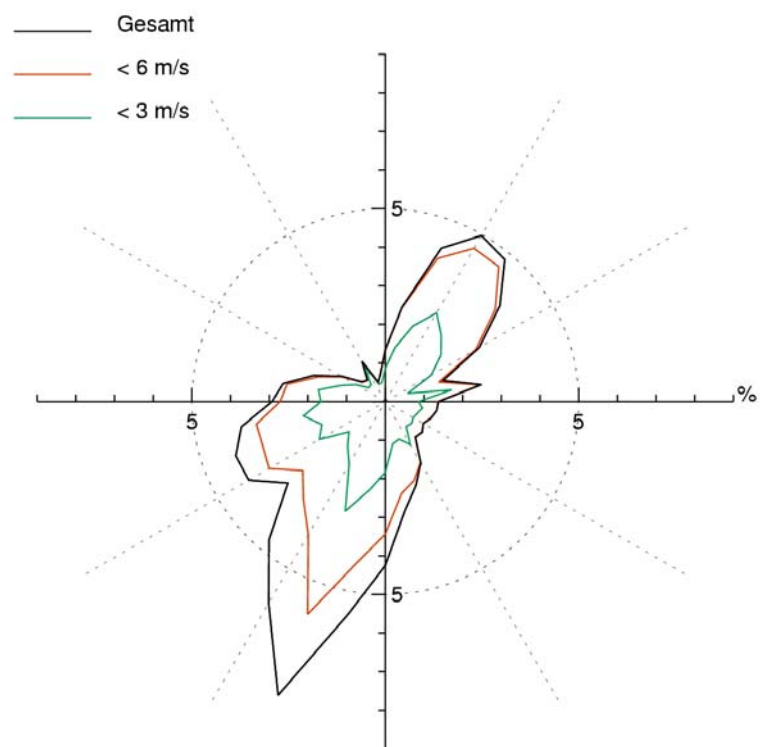


Abb. 7: Windrose am Standort 'Murezzan' in 30 m Höhe.

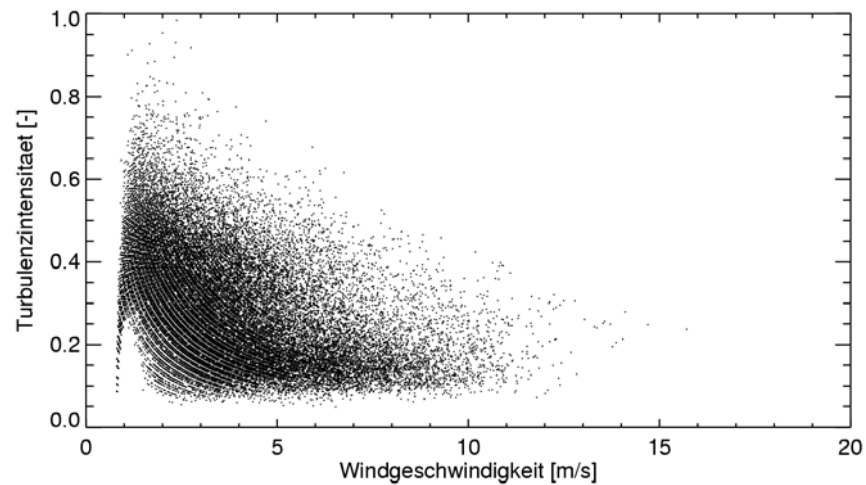


Abb. 8: Turbulenzintensität am Standort 'Murezzan' in 30 m Höhe als Funktion der Windgeschwindigkeit.

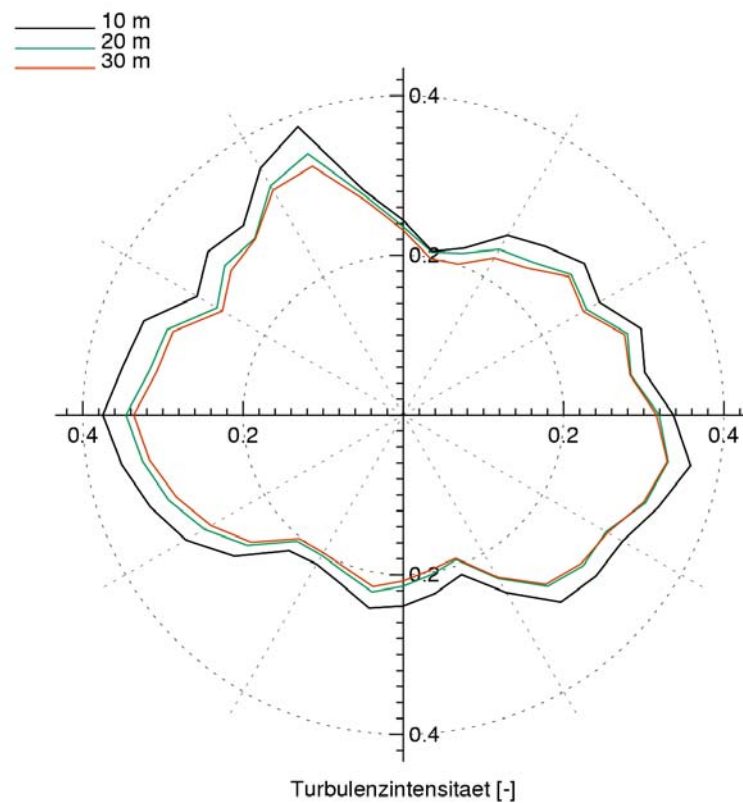


Abb. 9: Turbulenzrose am Standort 'Murezzan' in den Höhen 10, 20 und 30 m. Es wurden die Turbulenzwerte für Windgeschwindigkeiten grösser als 3 m/s (in 30 m Höhe) berücksichtigt.

Tab. 9: Analyse der Turbulenzintensität am Standort 'Murezzan' in 30 m Höhe:
Die Werte sind in Funktion der Windrichtung und Windgeschwindigkeit
angegeben.

Klasse [m/s]	345– 15°	15– 45°	45– 75°	75– 105°	105– 135°	135– 165°	165– 195°	195– 225°	225– 255°	255– 285°	285– 315°	315– 345°	Mittel- wert
0–1	0.25	0.25	0.25	0.24	0.27	0.26	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.26	0.25
1–2	0.40	0.39	0.40	0.40	0.42	0.39	0.40	0.40	0.40	0.41	0.40	0.40	0.40
2–3	0.28	0.29	0.31	0.31	0.33	0.30	0.31	0.30	0.34	0.33	0.34	0.32	0.31
3–4	0.23	0.23	0.28	0.29	0.29	0.26	0.25	0.25	0.29	0.31	0.30	0.31	0.27
4–5	0.21	0.22	0.27	0.31	0.32	0.21	0.22	0.22	0.27	0.32	0.27	0.29	0.25
5–6	0.21	0.22	0.26	0.33	0.32	0.15	0.19	0.20	0.26	0.33	0.28	0.33	0.23
6–7	0.20	0.20	0.23	0.34	0.34	0.14	0.18	0.18	0.26	0.33	0.26	-	0.21
7–8	0.48	0.18	0.22	0.25	0.35	0.10	0.18	0.17	0.25	0.32	0.16	0.39	0.19
8–9	-	0.15	0.17	0.13	-	-	0.18	0.16	0.23	0.30	0.24	-	0.18
9–10	-	0.11	0.10	-	-	-	0.18	0.16	0.23	0.28	0.20	-	0.18
10–11	-	0.16	0.18	-	-	-	0.19	0.16	0.24	0.27	0.36	-	0.19
11–12	-	-	-	-	-	-	0.17	0.16	0.26	0.26	-	-	0.19
12–13	-	-	-	-	-	-	0.17	0.13	0.30	0.26	-	-	0.21
13–14	-	-	-	-	-	-	0.18	0.12	0.25	0.26	-	-	0.23
14–15	-	-	-	-	-	-	-	-	0.21	0.23	-	-	0.22
15–16	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.24	-	-	0.24
16–	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Mittel- wert	0.28	0.27	0.30	0.33	0.34	0.29	0.26	0.24	0.30	0.34	0.33	0.34	0.29

4.3 Abschätzung des Windpotenzials in Nabenhöhe

Vorgehen zur Berechnung des Windpotenzials in Nabenhöhe

Zur Abschätzung des Windpotenzials für Windkraftanlagen wird für die Messstation 'Murezzan' die mittlere Windgeschwindigkeit in Nabenhöhe angegeben.

Das vertikale Profil der Windgeschwindigkeit v in Abhängigkeit der Höhe über Grund z folgt in der Regel einer Potenzfunktion:

$$v(z) = k \cdot z^\alpha \quad [\text{m/s}]$$

Für die Abschätzung der Windgeschwindigkeit in 45 und 50 m Höhe werden die Parameter k und α für jeden Messzeitpunkt (alle 10 Minuten) mittels einer Regression aus den Messungen in 10, 20 und 30 m bestimmt und die entsprechenden Windgeschwindigkeiten in 45 und 50 m Höhe berechnet. Im Gegensatz zur Methode der einmaligen Abschätzung des Parameters α können so die herrschenden Windverhältnisse zu jedem Zeitpunkt berücksichtigt werden. α variiert je nach Windrichtung, Windgeschwindigkeit und atmosphärischer Schichtung erheblich.

Bei einigen Windregimes, vorwiegend bei Flauten, folgt das vertikale Windprofil nicht einer Potenzfunktion. Eine Berechnung der Windgeschwindigkeiten nach oben beschriebener Methode führt dabei zu unplausiblen Werten. Deshalb wird die Berechnung der Windgeschwindigkeiten in Nabenhöhe unter den folgenden Bedingungen angepasst:

- Die gemessene Windgeschwindigkeit auf dem höchsten Messniveau ist 0 m/s. In diesem Fall wird auch für die Nabenhöhen 45 m und 50 m Windstille angenommen.
- Die Windgeschwindigkeit auf dem untersten und/oder mittleren Messniveau ist 0 m/s. In diesem Fall wird die Windgeschwindigkeit in den Nabenhöhen 45 m und 50 m gleich der gemessenen Geschwindigkeit auf dem obersten Messniveau gesetzt.
- Die Windgeschwindigkeit auf dem untersten und/oder mittleren Messniveau ist grösser als diejenige auf dem obersten Niveau. In diesem Fall wird die Windgeschwindigkeit in den Nabenhöhen 45 m und 50 m gleich der gemessenen Geschwindigkeit auf Mastspitze gesetzt.
- Die Windgeschwindigkeit in 10 m ist sehr klein (< 0.4 m/s) und auf den beiden oberen Messniveaus deutlich höher (> 2.0 m/s). In diesem Fall werden für die Berechnung der Windgeschwindigkeiten in 45 m und 50 m Höhe nur die Werte auf den zwei obersten Messniveaus benutzt.

Das Windpotenzial in Nabenhöhe

Tab. 10: Die berechnete (45, 50 m) mittlere monatliche Windgeschwindigkeit (WG) am Standort 'Murezzan'. Die Datenreihen der Monate November 2001 (ab 21.11.2001), September 2002 (Lücke vom 28.9.02 bis 30.9.02) und Oktober 2002 (bis 30.10.02) sind nicht komplett.

Monat	mittlere WG in 45 m [m/s]	mittlere WG in 50 m [m/s]
November 2001	3.0	3.1
Dezember 2001	3.4	3.4
Januar 2002	2.1	2.1
Februar 2002	3.3	3.3
März 2002	2.9	2.9
April 2002	2.4	2.4
Mai 2002	2.9	2.9
Juni 2002	2.6	2.6
Juli 2002	3.1	3.2
August 2002	2.4	2.5
September 2002	2.2	2.2
Oktober 2002	3.5	3.6
Mittelwert	2.8	2.8

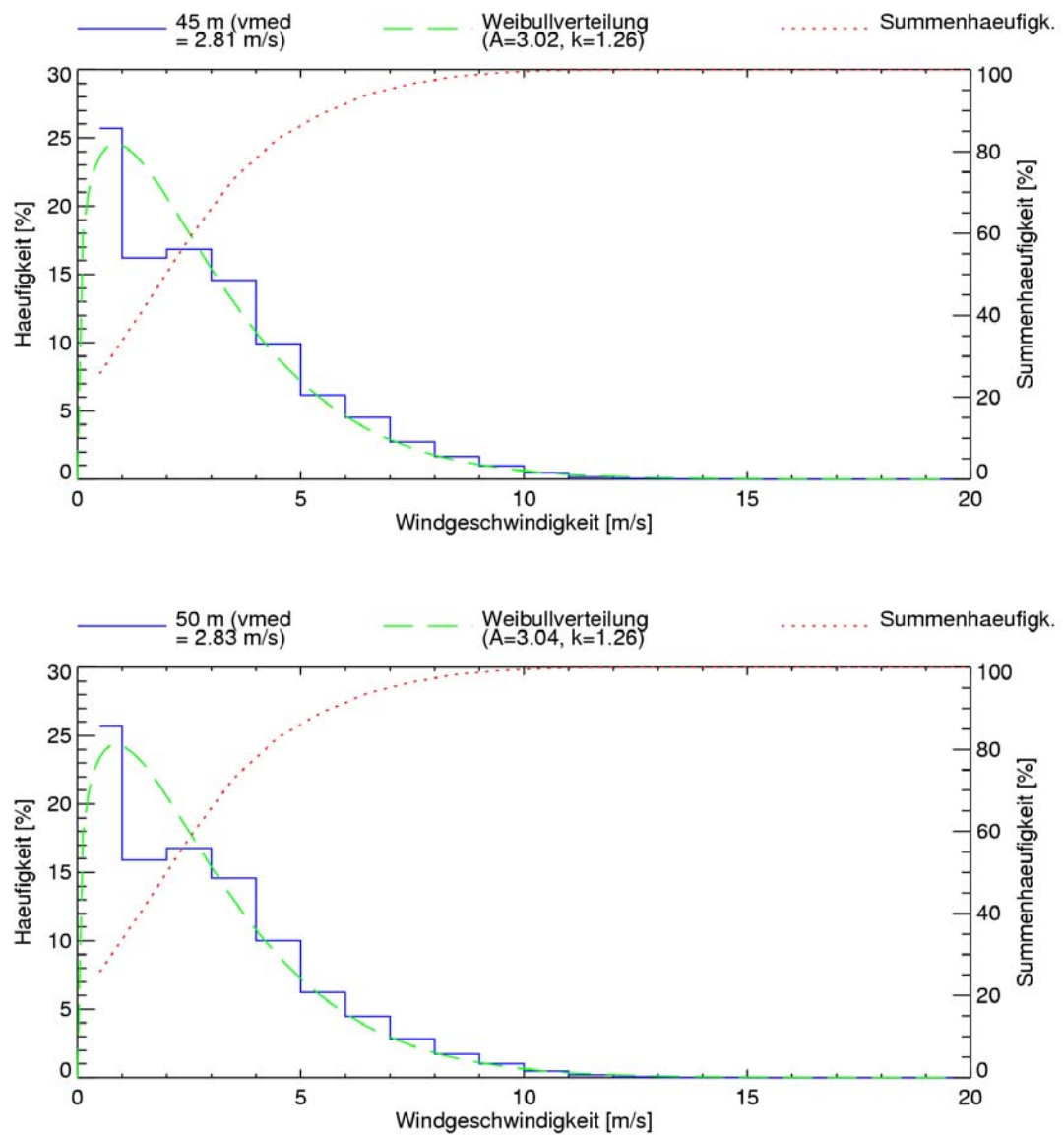


Abb. 10: Die berechnete Wind-Häufigkeitsverteilung in der Nabenhöhe (45 m und 50 m) am Standort 'Murezzan'.

Tab. 11: Häufigkeitsverteilung der extrapolierten 10-Minuten Mittelwerte auf 45 m und 50 m nach Windgeschwindigkeitsklassen am Standort 'Murezzan'.

Klasse [m/s]	Anzahl 10- min-Werte in 45 m	Anzahl 10- min-Werte in 50 m
0-1	12618	12609
1-2	7944	7797
2-3	8267	8231
3-4	7143	7150
4-5	4869	4916
5-6	3017	3056
6-7	2212	2188
7-8	1336	1385
8-9	817	848
9-10	473	490
10-11	241	245
11-12	78	94
12-13	27	32
13-14	8	9
14-15	5	5
15-16	2	2
16-17	0	0

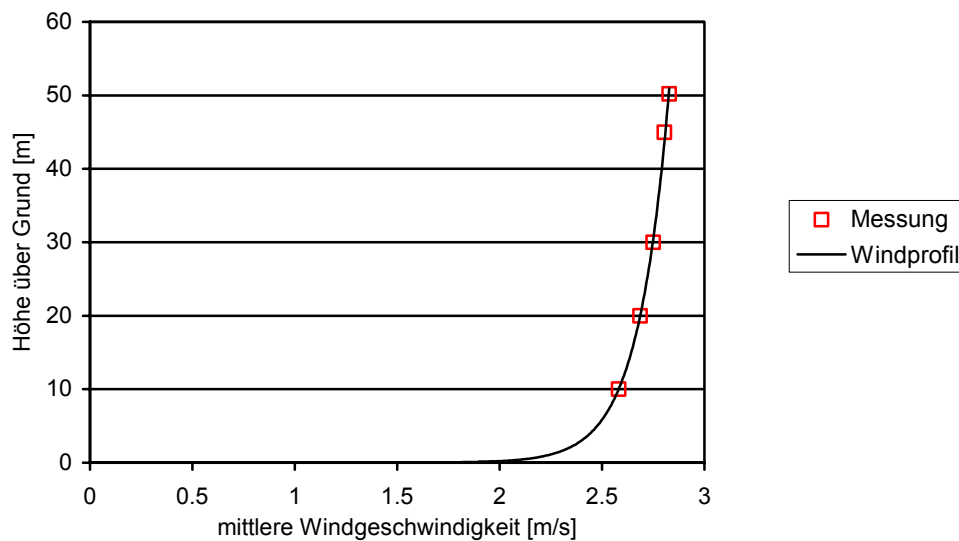
Diskussion der Extrapolation auf Nabenhöhe

Abb. 11: Mittleres vertikales Windprofil am Standort 'Murezzan' für die Messperiode 21.11.01 – 30.10.02.

In diesem Bericht wird die Windgeschwindigkeit für die Nabenhöhen 45 und 50 m angegeben. Die dazu verwendete Extrapolation basiert auf der Annahme einer Potenzfunktion.

Eine Potenzfunktion beschreibt für flache Gebiete das mittlere vertikale Windprofil recht genau. Im Gebirge hingegen ist die ungeprüfte Annahme einer Potenzfunktion gefährlich, da Phänomene wie Aufwinde, Turbulenz und Düseneffekte eine grosse Rolle spielen. Die Messdaten illustrieren denn auch die veränderten Bedingungen im Gebirge: Die Zunahme der Windgeschwindigkeit in der Höhe ist sehr gering im Vergleich zu Standorten in flachem Gelände.

Um eine genaue Extrapolation machen zu können, müsste das vertikale Windprofil bis in Nabenhöhe untersucht werden. Dies könnte mittels komplexer Modellierung oder SODAR-Messungen erreicht werden.

4.4 Abschätzung des langjährigen Windpotenzials

Wir schätzten das langjährige Windpotenzial mit einer MCP-Methode ab (Measure Correlate Predict). Der Name beschreibt das Prinzip: die Daten verschiedener permanenter Meteostationen werden mit den gemessenen Datenreihen korreliert. Anhand der Daten der am besten korrelierenden Meteostationen wird geprüft, ob die Messperiode über- oder unterdurchschnittlich viel Wind aufwies. Anhand dieser Resultate werden die langjährig zu erwartenden Windverhältnissen an der Messstation abgeschätzt. Es stehen uns die Meteostationen der MeteoSchweiz mit geeigneten, langjährigen Datensätzen zur Verfügung.

Im Zeitraum der Messperiode wurden die Monatsmittel von den schweizerischen Meteostationen mit dem Datensatz auf 30 m der Messstation ‚Murezzan‘ verglichen. Tabelle 12 zeigt die Stationen mit den besten Korrelationskoeffizienten. Die Daten der Stationen Gornergrat und Naluns-Schlivera zeigen beim Vergleich der Monatsmittelwerte der Windgeschwindigkeit die besten Korrelationen. Wir stützen die langjährige Abschätzung deshalb auf diese beiden Stationen.

Tab. 12: Korrelation der MeteoSchweiz-Stationen mit der Messstation 'Murezzan' in der Reihenfolge der Güte der Monatsmittel-Korrelation.

Station	Korrelation
	Monatsmittel mit Murezzan
Gornergrat	0.861
Naluns-Schlivera	0.792
Matro	0.705
Generoso	0.692
Les Attelas	0.672
Diablerets	0.647
Eggishorn	0.630
Cimetta	0.598
Titlis	0.597
St. Gallen	0.594

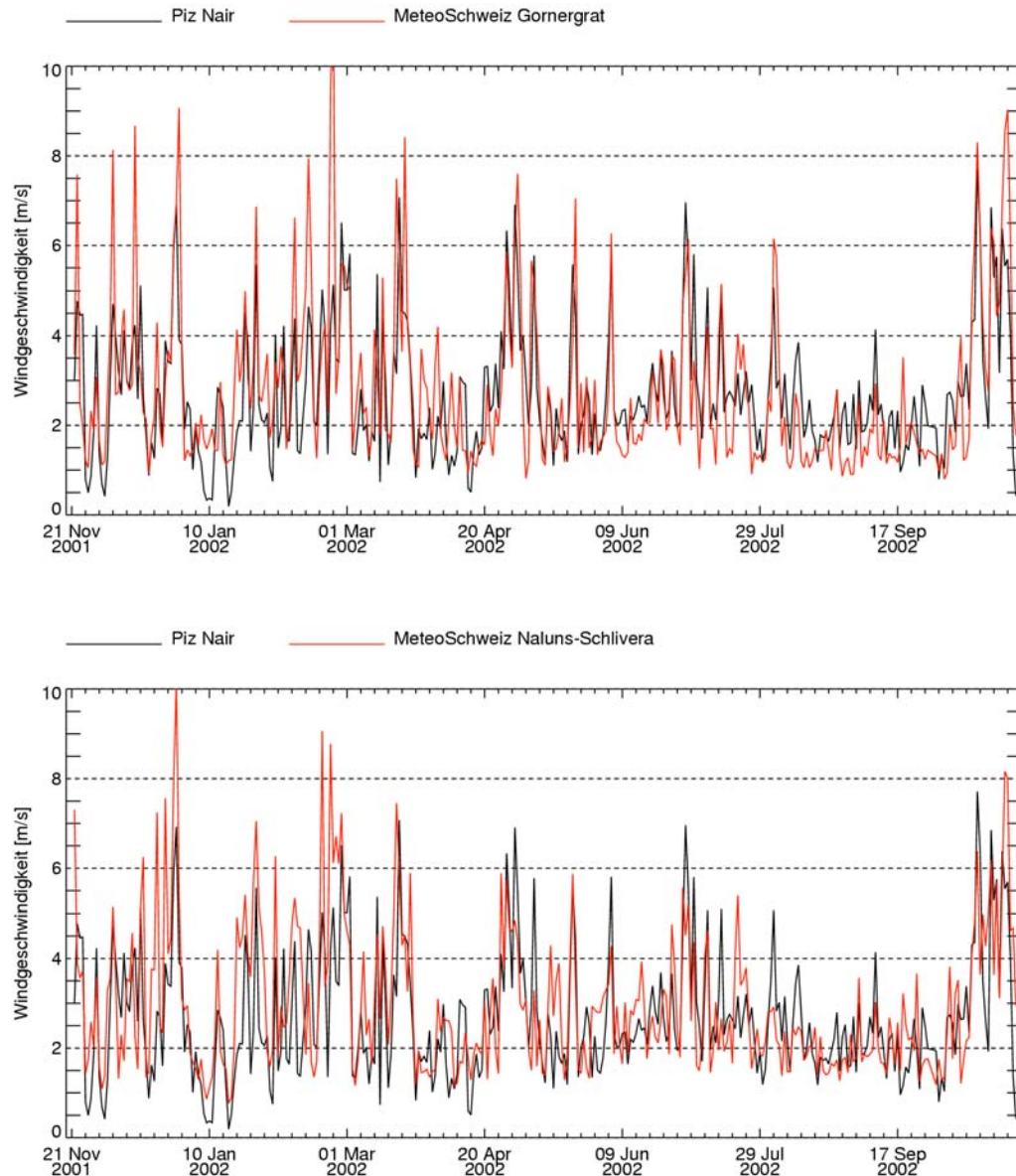


Abb. 12: Vergleich der Windgeschwindigkeit zwischen der Messstation 'Murezzan' und den MeteoSchweiz Stationen Gornergrat und Naluns-Schlivera.

Mit dem Datensatz der beiden Meteostationen wird ein Vergleich der langjährigen Daten mit der Messperiode angestellt. Durch die Bildung der Verhältnisse zwischen den langjährigen Monatsmitteln und den Monatsmitteln der Messperiode ergibt sich einen Faktor pro Monat. Das Resultat sagt aus, ob im entsprechenden Monat der Messperiode über- oder unterdurchschnittlich viel Wind gemessen wurde und quantifiziert den Unterschied. Aufgrund der hohen Korrelation zwischen den ausgewählten Meteostationen und der Messstation 'Murezzan' erfolgt bei letzteren auch eine gute Abschätzung des langjährigen Windpotenzials. Die Faktoren sind in Tabelle 13 wiedergegeben. Die Auswertungen ergaben, dass im langjährigen Mittel mit leicht mehr Wind (3.6%) zu rechnen ist als während der Messperiode von Dezember 2001 – Oktober 2002.

Tab. 13: Verhältnisse der langjährigen Daten 1983–1997 (Langj.) und der Messperiode (MP) der Stationen Gornergrat und Naluns-Schlivera. Der unvollständige Monat November 2001 wurde nicht berücksichtigt.

Monat	Verhältnis Langj./MP	Verhältnis Langj./MP	Mittelwert
	Gornergrat	Naluns-Schlivera	
Dezember 2001	0.935	0.902	0.918
Januar 2002	1.475	1.228	1.352
Februar 2002	0.754	0.771	0.762
März 2002	0.810	0.997	0.903
April 2002	1.228	1.137	1.183
Mai 2002	0.979	1.095	1.037
Juni 2002	1.174	0.929	1.051
Juli 2002	0.902	0.884	0.893
August 2002	1.105	1.071	1.088
September 2002	1.605	1.379	1.492
Oktober 2002	0.652	0.788	0.720
Mittelwert	1.056	1.017	1.036

Die aus den beiden Meteostationen gemittelten Faktoren werden mit den monatsweise gemessenen (10, 20 und 30 m) bzw. berechneten (45 und 50 m) Monatsmittelwerte der Windgeschwindigkeit des Messstandorts multipliziert. Die daraus resultierenden langjährig zu erwartenden Monatsmittel am Standort 'Murezzan' sind in Tabelle 14 angegeben.

Für den unvollständigen Monat November wurde das langjährige Monatsmittel folgendermassen abgeschätzt: Das langjährige Mittel der Meteostation Gornergrat der Periode Dezember – Oktober wurde mit dem langjährigen Monatsmittel November derselben Station verglichen. Der daraus resultierende Faktor wurde auf das langjährige Mittel der Station 'Murezzan' (Periode Dezember – Oktober) angewendet, um das langjährige Monatsmittel im November abzuschätzen zu können (Tab. 14).

Tab. 14: Das langjährige Windpotenzial am Standort 'Murezzan' (WG = Windgeschwindigkeit). Die Mittelwerte der Monate Oktober und November stammen von unvollständigen Datenreihen. Das langjährige Mittel für den Monat November wurde durch den Vergleich mit der Station Gornergrat abgeschätzt.

Monat	mittlere WG 10 m [m/s]	mittlere WG 20 m [m/s]	mittlere WG 30 m [m/s]	mittlere WG 45 m [m/s]	mittlere WG 50 m [m/s]
Januar	2.6	2.6	2.8	2.8	2.8
Februar	2.3	2.3	2.4	2.5	2.5
März	2.4	2.5	2.6	2.6	2.6
April	2.7	2.8	2.8	2.8	2.9
Mai	2.8	2.9	2.9	3.0	3.0
Juni	2.5	2.7	2.7	2.7	2.8
Juli	2.6	2.7	2.7	2.8	2.8
August	2.4	2.6	2.6	2.7	2.7
September	2.9	3.1	3.2	3.3	3.3
Oktober	2.4	2.5	2.5	2.6	2.6
November	2.9	3.0	3.1	3.2	3.2
Dezember	2.6	2.8	3.0	3.1	3.1
Jahresmittelwert	2.6	2.7	2.8	2.8	2.9

Tab. 15: Häufigkeitsverteilung der extrapolierten, langjährigen 10-Minuten Mittelwerte auf 45 m und 50 m nach Windgeschwindigkeitsklassen am Standort 'Murezzan'.

Klasse [m/s]	Anzahl 10- min-Werte in 45 m	Anzahl 10- min-Werte in 50 m
0-1	13599	13586
1-2	7762	7625
2-3	7564	7502
3-4	7039	7061
4-5	5092	5125
5-6	3210	3230
6-7	2103	2147
7-8	1343	1370
8-9	649	676
9-10	352	373
10-11	168	172
11-12	97	96
12-13	43	57
13-14	18	18
14-15	5	6
15-16	6	6
16-17	4	4
17-18	0	0
19-20	2	2
20-21	1	1
21-22	0	0

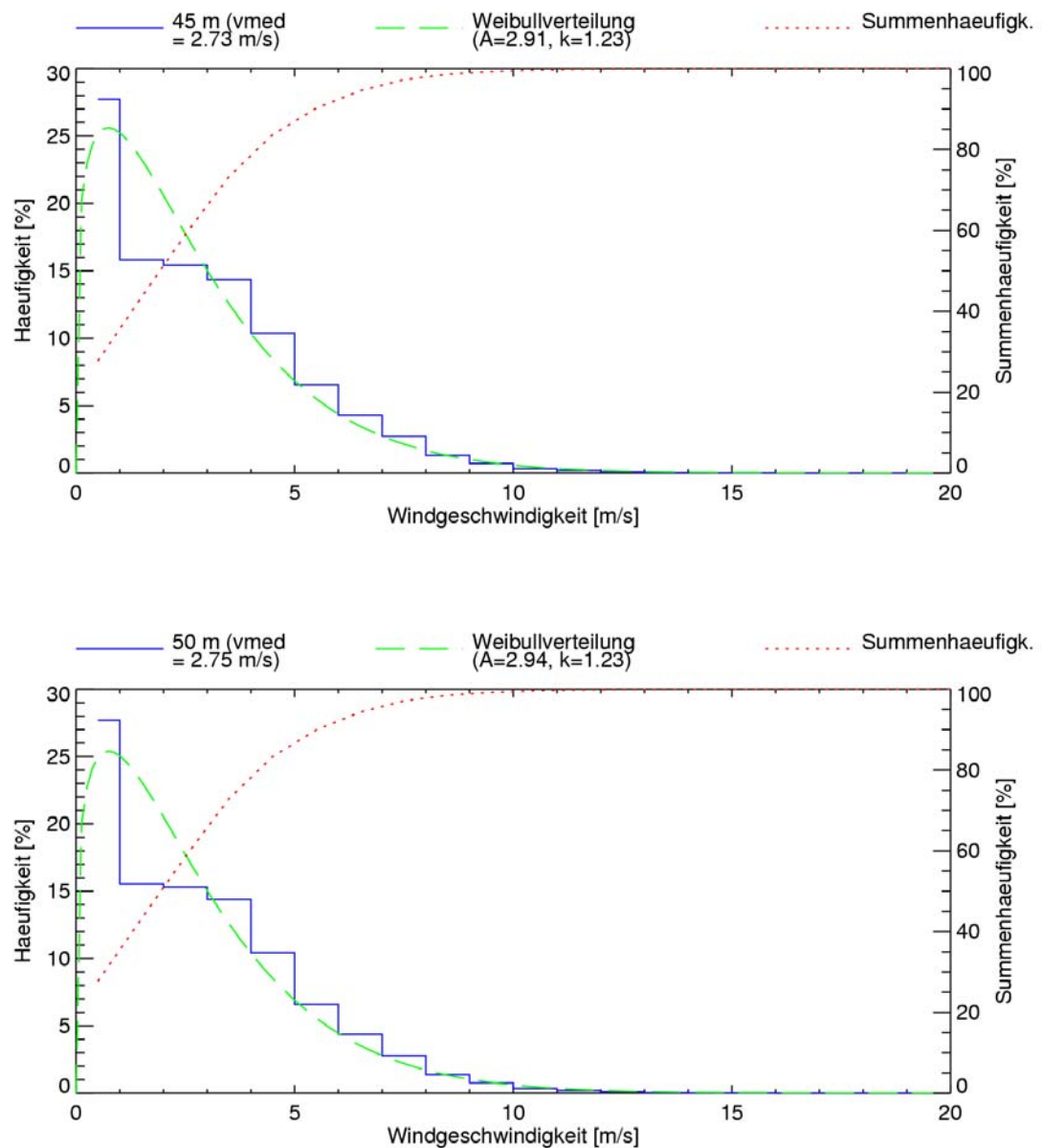


Abb. 13: Die berechnete, langjährige Wind-Häufigkeitsverteilung in der Nabenhöhe (45 m und 50 m) am Standort 'Murezzan'.

5. Interpretation

Die abgeschätzte, mittlere, langjährige Windgeschwindigkeit ist mit 2.9 m/s auf 50 m Höhe eher gering. Dies ist hauptsächlich auf die grosse Anzahl von Flauten (Abb. 3) zurückzuführen, welche den Mittelwert nach unten ziehen. Als Vergleich weist die im Tal liegende Meteostation Samedan (A-Netz) auf 1700 m.ü.M. eine mittlere, langjährige Windgeschwindigkeit von 2.2 m/s auf.

Der Standort der Messstation ist für die Installation einer Windkraftanlage ungünstig, da er durch die Flanken des Piz Nair im Nordosten und durch die Flanken des Piz Albana im Südwesten abgeschattet wird. Somit werden die Winde, die dem Verlauf des Haupttals (Nordost und Südwest) folgen abgeschwächt. Der durch das Suvretta Tal ziehende Wind aus Nordwesten wird durch den Piz Nair ebenfalls abgeschattet. Damit ist der Standort für keine Windrichtung gut exponiert. Die hohe Turbulenzintensität (Abb. 8) am Messstandort deutet denn auch darauf hin, dass der Wind von den Bergrücken verwirbelt wird. Zudem steht die Messstation selbst in einer flachen Mulde statt z.B. auf einer Rippe, was den Wind zusätzlich abschwächt.

Die Korrelation der Monatsmittel mit den MeteoSchweiz Stationen (Tab. 12) zeigte die besten Resultate mit den Stationen Gornergrat bei Zermatt und Naluns-Schlivera bei Scuol. Die nahegelegenen Stationen Samedan und Corvatsch sind anders exponiert als der Standort der Messstation 'Murezzan' und zeigen dementsprechend schlechte Korrelationen (< 0.4) mit unseren Messungen. Die Stationen Gornergrat und Naluns-Schlivera weisen eine der Messstation 'Murezzan' ähnliche Exposition auf.

Ein besser exponierter Standort (vor allem bezüglich der Hauptwindrichtungen Nordost und Südwest) wäre sicher geeigneter für die Windkraftnutzung.

6. Abschätzung der Unsicherheit

6.1 Zusammenfassung

In den folgenden Abschnitten werden die Unsicherheiten der verschiedenen Daten und Auswertungen analysiert. Es lassen sich zusammengefasst die folgenden Aussagen machen:

- Die Nacheichung der Anemometer im Windkanal zeigte, dass die Ice-Free-II-Anemometer grosse Abweichungen (6.3%) von der NRG-Standardkalibration aufweisen. Das benutzte Eichverfahren ist jedoch für eine genaue Kalibration der Ice-Free-II-Sensoren nicht geeignet (Kapitel 6.2).
- Der Rechenfehler ist vernachlässigbar (Kapitel 6.3).
- Die Unsicherheit der einzelnen 10-Minuten-Werte der Windgeschwindigkeit des bereinigten Datensatzes beträgt 1.3% für die Ice-Free-II-Anemometer (Kapitel 6.4).
- Die Unsicherheit der Mittelwerte der Windgeschwindigkeit in den Messhöhen beträgt 1.8% für Monate ohne Datenlücken und für den Mittelwert der Messperiode (Kapitel 6.5).
- Die Unsicherheit der Extrapolation auf Nabenhöhen kann für das komplexe Gelände des Standorts nicht abgeschätzt werden (Kapitel 6.6).
- Die Unsicherheit in der Bestimmung des langjährigen Windpotenzials wurde zu 10.3% für die Mittelwerte der Windgeschwindigkeit grob abgeschätzt (Kapitel 6.7).
- Die Unsicherheiten beziehen sich auf die Standardabweichung. Für das langjährige Windpotenzial in 30 m bedeutet dies konkret, dass mit einer Wahrscheinlichkeit von 84% ein langjähriges Mittel von 2.5 m/s (Mittelwert minus Standardabweichung bzw. Unsicherheit) übertroffen wird.
- Mögliche Abweichungen zu anderen Messkonfigurationen (bedingt durch andere Anemometer-Typen) wurden untersucht (Kapitel 6.8), aber in der Abschätzung der Unsicherheit nicht berücksichtigt, da wir bei der Angabe von Resultaten und Unsicherheiten das benutzte Messsystem voraussetzen.

6.2 Nacheichung

Alle Ice-Free-II-Anemometer wurden im Windkanal der Berner Fachhochschule nachgeeicht. Als Vergleichsanemometer diente das Ice-Free-II-Anemometer mit der Serien-Nr. III30.

Im Windkanal wurde für die Windgeschwindigkeiten von 3, 8, 12 und 18 m/s während jeweils 40 s ein Vergleich zwischen Referenz- und Testsensor durchgeführt. Referenz- und Testmessung wurden für jede Geschwindigkeit und jeden Sensor

direkt nacheinander durchgeführt, um gleiche Strömungsverhältnisse im Kanal sicherzustellen. Die Geschwindigkeiten wurden so gewählt, da die für Windkraftanlagen relevanten Werte in diesem Bereich liegen. Die Daten wurden mittels linearer Regression durch die Messpunkte ausgewertet. Der Vergleich mit der Ice-Free-II-Standardkalibrationsfunktion

$$v = x \cdot 0.541 \text{ m} + 0.80 \text{ m/s}$$

mit der Windgeschwindigkeit v [m/s] und den gemessenen Impulsen x [s⁻¹] wurde erreicht, indem der Achsenabschnitt der Regressionsgeraden durch 0.8 m/s gelegt wurde.

Die maximale prozentuale Abweichung beträgt bei den Ice-Free-II-Anemometer 6.3% (Anemometer Serien-Nr. II298, Tab. 16). Mit dieser Angabe wird die tatsächliche Abweichung wahrscheinlich überschätzt, weil der benutzte Windkanal für die Eichung der Ice-Free-Anemometer einen eher zu kleinen Durchmesser aufweist. Dadurch liegen die Anemometer wahrscheinlich nicht vollständig innerhalb der laminaren Luftströmung. Für die weitere Abschätzung der Unsicherheit wird deshalb die vom Hersteller genannte Unsicherheit von 1.3% verwendet.

Tab. 16: Resultate der Nacheichung der eingesetzten Ice-Free-II-Anemometer

Seriennummer Anemometer	Steigung Nacheichung [m]	Abweichung von 0.541 [%]
II298	0.575	6.28
III28	0.550	1.59
III29	0.545	0.66
Mittelwert	0.557	2.84

6.3 Rechenfehler

Während der ganzen Datenverarbeitung wird mit Zahlen vom Typ "Float" (6 signifikante Stellen) gerechnet. Erst die Schlussresultate werden gerundet. Fehler durch zu frühes Runden sind damit ausgeschlossen.

6.4 Unsicherheit der aufbereiteten Daten

Unsicherheit durch individuelle Anemometer-Unterschiede

In einer Studie von Lockhart and Bailey¹ wurde die Erkenntnis gewonnen, dass individuelle Kalibrationsfunktionen nicht unbedingt genauere Daten liefern als die Anwendung der von NRG empfohlenen Standardkalibrationsfunktion. Der Grund liegt darin, dass Unterschiede zwischen einer individuellen Kalibrationsfunktion und der

¹ Lockhart, T.J., Bailey, B.H., 1997: The Maximum Type 40 Anemometer Calibration Project.

NRG-Standardkalibrationsfunktion vorwiegend durch die unterschiedlichen Eichverfahren begründet sind, und nicht durch Unterschiede zwischen den einzelnen Anemometern.

Für die individuellen Anemometerunterschiede wird die Herstellerangabe der Unsicherheit des Kalibrationsfaktors von 1.3% als Unsicherheit angenommen.

Unsicherheit durch Installation

Der ideale Anemometerstandort ist auf der Spitze des Mastes, wo die Anströmung aus allen Richtungen frei erfolgen kann. Bei der üblichen Montage auf Auslegern sind Windfeldstörungen durch den Masten und den Ausleger selber möglich. Die Unsicherheit kann zwischen 0.2 und 3.0% betragen². Weil die Ausrichtung der Sensoren sorgfältig erfolgte und die Hauptwindrichtungen berücksichtigt wurden, gehen wir von einer Unsicherheit von 0.5% aus.

Gesamte Unsicherheit der aufbereiteten Daten

Die totale Unsicherheit der Einzelmessungen setzt sich aus der durch die Anemometer-Unterschiede verursachte Unsicherheit (1.3%) und der durch die Installation verursachte Unsicherheit (0.5%) zusammen. Die Unsicherheiten addieren sich zu einer totalen relativen Unsicherheit der Einzelwerte (10-Minuten-Mittel) des bereinigten Datensatzes von 1.8%.

6.5 Unsicherheit von Monatmittelwerten und Mittelwert der Messperiode in Messhöhen

Da es sich bei der Unsicherheit der Einzelmessung um systematische Abweichungen handelt, gilt diese Angabe (1.8%) auch für den Mittelwert der Messperiode und für Mittelwerte von Monaten mit vollständigen Daten.

Für die Monate November 2001 (Messbeginn 21.11.2001), September 2002 (Messlücke vom 28.9.02 bis 30.9.02) und Oktober 2002 (Messende 30.10.02) liegt die Unsicherheit aufgrund der Lücken leicht höher.

6.6 Unsicherheit der Extrapolation auf Nabenhöhe

Für die Unsicherheiten der Extrapolation auf Nabenhöhen machen wir keine Angaben, da im komplexen Gelände die Annahme einer Potenzfunktion mit zu vielen Unsicherheiten verbunden ist (Kapitel 4.3).

6.7 Unsicherheit der Abschätzung des langjährigen Windpotenzials

Die benutzen Daten zur Abschätzung des Windpotenzials decken mit 14 Jahren eine klimatologisch relevante Periode ab. Die daraus resultierende Unsicherheit

² Albers, A., Klug, H., 1999: Windmessung ist nicht gleich Windmessung. Erneuerbare Energien, Nr. 7.

wurde für eine Messung von einem Jahr in der Schweiz zu 8.5% abgeschätzt³. Hinzu kommt die Unsicherheit des Jahresmittelwerts der Messung von 1.8%. Die totale Unsicherheit für die Abschätzung des langjährigen Windpotenzials beträgt somit 10.3% in den Messhöhen 10, 20 und 30 m. Für die mittlere Leistungsdichte des Windes bedeutet dies eine Unsicherheit von ca. 31%. Für die Extrapolation auf Nabenhöhen kann aufgrund der Unsicherheit der Annahme einer Potenzfunktion im komplexen Gelände wiederum keine Angabe gemacht werden (Kapitel 6.6).

6.8 Abweichungen zu anderen Messkonfigurationen

Die gewählten Mess- und Kalibrationsverfahren zeigen im Vergleich zu anderen Verfahren (z.B. Messung mit Sonic-Anemometern oder Messen der Standardkalibrationsfunktion in einem anderen Windkanal) systematische Fehler, die bei einer Ertragsprognose unbedingt zu berücksichtigen sind. Im besten Fall wurde die Leistungskennlinie der zukünftigen Windkraftanlage mit demselben Anemometer-Typ in ähnlicher Umgebung aufgenommen, der für die Windmessungen gebraucht wurde.

Abweichung durch Anemometer-Typ

Je nach Form der Anemometer-Schale werden nur die horizontalen Windkomponenten oder aber der Gesamtbetrag des Windgeschwindigkeitsvektors inklusive Vertikalkomponenten erfasst. Die Unterschiede machen sich besonders bei geringen Windgeschwindigkeiten und über komplexem Terrain mit grossem Turbulenzanteil bemerkbar. Die typische Unsicherheit liegt im Bereich von 0.5–4%⁴.

Die Ice-Free-II-Anemometer sind auf die Vertikalkomponente des Windes eher sensibel. Diese wird aufgrund der grossen Turbulenz und der Neigung des Standortes beträchtlich sein. Die mögliche, systematische Überschätzung der horizontalen Windkomponente wird deshalb bei einigen Prozent liegen.

Unterschiede Windkanal–Outdoor

Im Windkanal wird eine möglichst turbulenzfreie, laminare Strömung erzeugt. Die Anemometer in dieser Umgebung messen denn auch nur die horizontale Windkomponente, egal ob sie sensibel auf Turbulenz reagieren würden oder nicht. Bei Freilandbedingungen, besonders über komplexem Gelände, treten Turbulenzen auf. Die hier verwendete Standardkalibrationsfunktion für die NRG-Anemometer wurde mittels Kalibrationen auf einem fahrenden Auto bei ruhigen Verhältnissen gewonnen. Sie entspricht deshalb eher den Messbedingungen als eine im Windkanal erlangte Standardkalibrationsfunktion.

³ *METEOTEST*, 1999: Planung von Windenergieanlagen – Leitfaden für die Schweiz.

⁴ Albers, A., Klug, H., Westermann, D. 2000: Outdoor Comparison of Cup Anemometers, Deutsches Windenergie-Institut, Proceedings to DEWEK 2000.

Windscherung

Im Falle eines Windgeschwindigkeitsunterschiedes zwischen der rechten und linken Seite eines Anemometers entsteht Windscherung. Es können dadurch Ungenauigkeiten entstehen, die bei einer guten Installation zwischen 0.2 und 0.5% betragen⁵.

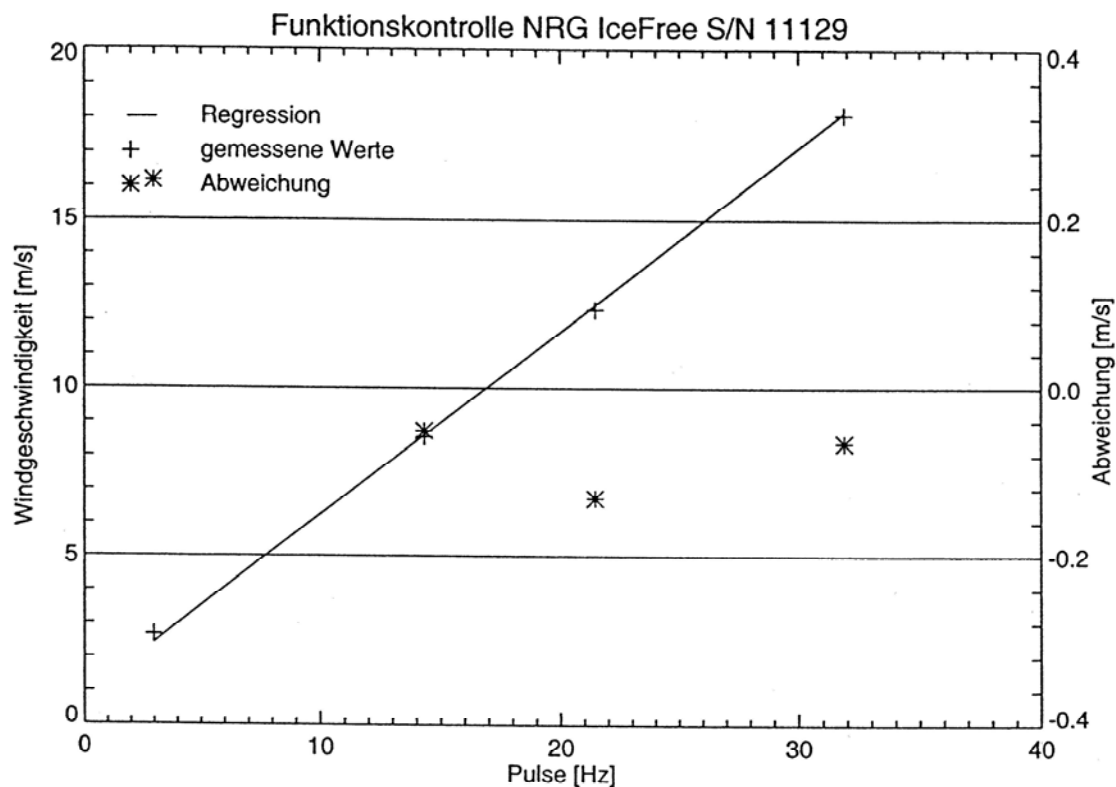
Overspeeding in Turbulenz

Eine weitere Unsicherheit ergibt sich aus der Eigenschaft der Anemometer, auf eine Windgeschwindigkeitserhöhung schneller zu reagieren als auf ein Abflauen des Windes. Simulationen haben jedoch gezeigt, dass dieses sogenannte "overspeeding" im pessimistischsten Falle zu einer Überschätzung von 0.2% führen kann und daher eher eine untergeordnete Rolle spielt⁶. Andererseits hat ein Versuch von *METEOTEST* ergeben, dass der Effekt des Overspeeding durchaus ausgeprägter sein kann und zu grösseren Überschätzungen führt.

⁵ Hunter, R.S., 1999: Wind Speed Measurement and Use of Cup Anemometry.

⁶ Albers, A., Klug, H., Westermann, D. 2000: Outdoor Comparison of Cup Anemometers, Deutsches Windenergie-Institut, Proceedings to DEWEK 2000.

7. Anhang (Eichzertifikate)



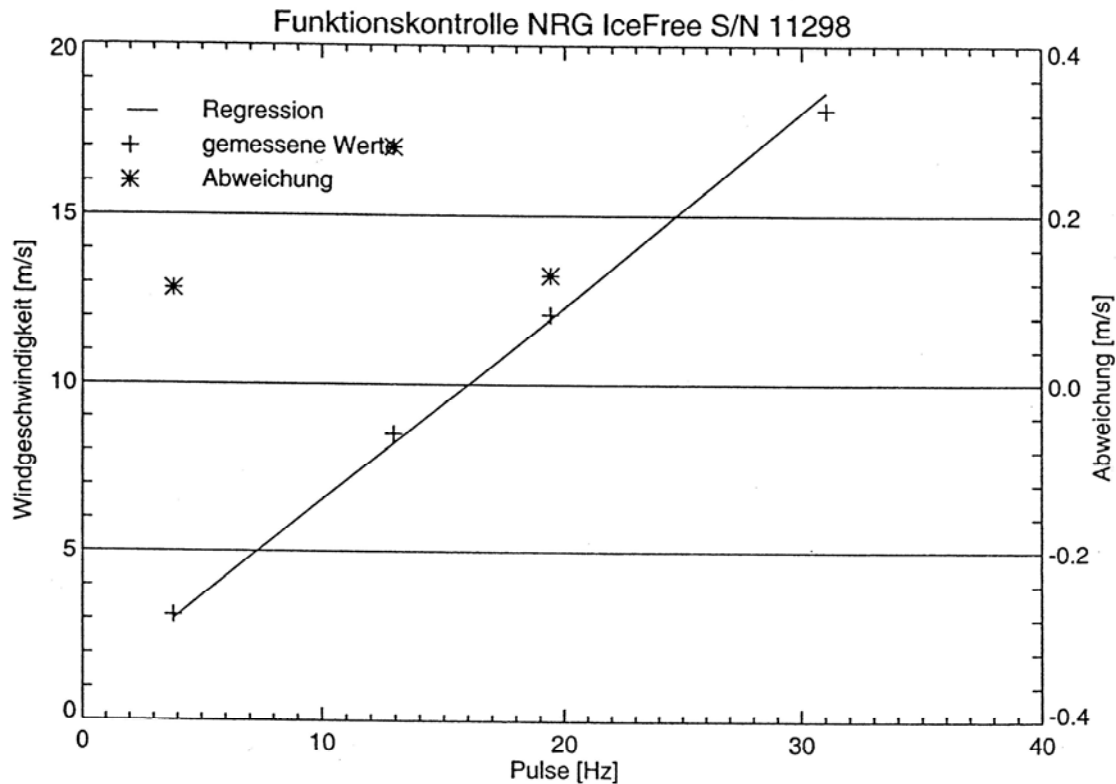
$y = 0.544562x + 0.800000$
 $r^2 = 0.999877$
 Abweichung von 0.541000: 0.658405%

Referenz Anemometer: NRG IceFree S/N 11130
 Test Anemometer: NRG IceFree
 Seriennummer: 11129
 Testintervall: 40s

Pulse	m/s Ref.	m/s Test
2.97500	2.66645	2.42007
14.3200	8.54712	8.59813
21.4500	12.3504	12.4809
31.8800	18.0958	18.1606

Ort, Datum: Ben, 13.11.02

Visum: RC



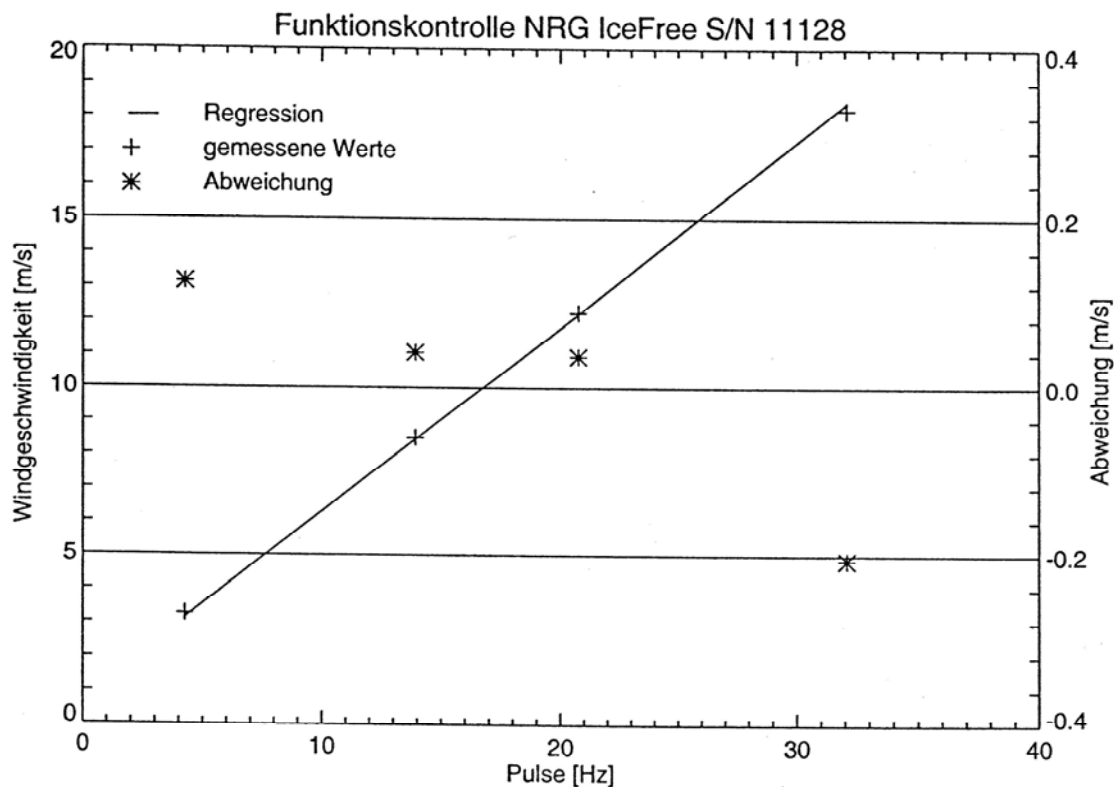
$y = 0.574981x + 0.800000$
 $r^2 = 0.999392$
 Abweichung von 0.541000: 6.28116%

Referenz Anemometer: NRG IceFree S/N 11130
 Test Anemometer: NRG IceFree
 Seriennummer: 11298
 Testintervall: 40s

Pulse	m/s Ref.	m/s Test
3.82500	3.11278	2.99930
12.9200	8.50925	8.22876
19.4200	12.0961	11.9661
31.0200	18.1120	18.6359

Ort, Datum: Bern 13.11.02

Visum: RC



$y = 0.549612x + 0.800000$
 $r^2 = 0.999967$
 Abweichung von 0.541000: 1.59177%

Referenz Anemometer: NRG IceFree S/N 11130
 Test Anemometer: NRG IceFree
 Seriennummer: 11128
 Testintervall: 40s

Pulse	m/s Ref.	m/s Test
4.25000	3.26155	3.13585
13.9200	8.49302	8.45059
20.7500	12.2422	12.2044
32.0700	18.2202	18.4260

Ort, Datum: Bern 13.11.02

Visum: PC