

**Arbeitsgemeinschaft**



Bottwarbahnstraße 4 • 74081 Heilbronn  
Tel. 07131 / 390 709-0  
m.rau@ibmrau.de

**METCON**

Umweltmeteorologische Beratung  
Dr. Klaus Bigalke

Jappopweg 9h • 25421 Pinneberg  
Tel. 04101 / 857092-0  
info@metcon-umb.de • www.metcon-umb.de

---

## Dokumentation

### Synthetische Ausbreitungsklassenzeitreihen (SynAKTerm<sup>®</sup>) und Ausbreitungsklassenstatistiken (SynAKS<sup>®</sup>) in der Version 3.0

Pinneberg / Heilbronn, den 1. Februar 2024

*Version 1.0*

**Projektleitung:**

*Dr. Klaus Bigalke* METCON

*Dipl.-Ing. Matthias Rau* IB Rau

**Projektbearbeitung:**

*Dr. Klaus Bigalke* METCON

*Dr. Alexander Lohse* METCON

*M. Sc. Rike Wachsmann* METCON

*Dipl.-Ing. Matthias Rau* IB Rau

*M. Sc. Theresa Szyszka* IB Rau

*B. Sc. Fabian Hüftle* IB Rau

*Dipl.-Ing. Katja Anke* IB Rau

Versionshinweis:

*In dieser Dokumentation beschriebene Datensätze und Kenngrößen beziehen sich auf die Versionen 3.0.0 und 3.0.1 der SynAKTerm.*

Rechtliche Hinweise:

*SynAKS®, SynAKTerm® und SynRepAKTerm® sind eingetragene Marken.*

*Messdaten stammen aus dem Climate Data Center (CDC) des Deutschen Wetterdienstes und wurden durch die Autoren aufbereitet.*

*Dieser Bericht ist urheberrechtlich geschützt. Texte, Abbildungen und Daten dürfen nur mit schriftlicher Genehmigung und nach Vorlage eines Belegexemplars verwendet werden.*

## Inhaltsverzeichnis

1. Ausgangssituation .....	1
2. Berechnungsverfahren .....	5
2.1. Ausbreitungsklasse versus Obukhovlänge .....	5
2.2. Verfahrenskonzept .....	6
2.3. Datenbasis .....	11
2.3.1. Reanalysedaten .....	11
2.3.2. Clusteranalyse .....	12
2.3.3. Topographie .....	13
2.3.4. Bedeckung .....	14
2.4. Modell METRAS-PC.....	16
2.5. Prognostische Windfeldberechnungen .....	18
2.5.1. Modellgebiete und Testrechnungen .....	18
2.5.2. Produktionsrechnungen .....	19
2.6. Berechnung der synthetischen Ausbreitungsklassenzeitreihen .....	24
3. Voruntersuchungen .....	26
3.1. Auswahl Reanalysedaten .....	26
3.2. Anzahl und Verteilung Cluster .....	34
3.2.1. Differenzierung Cluster nach Teilgebieten.....	34
3.2.2. Anzahl und Verteilung Cluster im Parameterraum .....	37
3.3. METRAS-PC Modellversion .....	41
3.4. Vergleich zu SynAKTerm 2.0 .....	44
4. Qualitätssicherung.....	51
4.1. Windfeldmodellierung.....	51
4.2. Qualitätssicherung im Berechnungsverfahren .....	52
4.3. Flächendeckende Plausibilitätsprüfung .....	54
4.4. Vergleich mit Messdaten .....	54
4.5. Plausibilitätsprüfung im Einzelfall .....	54
4.6. Repräsentativitätsprüfung im Einzelfall.....	55
5. Vergleich mit Messungen .....	58
5.1. Zur (Un-)Vergleichbarkeit von Modell und Messung .....	58
5.2. Messnetz des Deutschen Wetterdienstes.....	63
5.3. Räumliche Repräsentativität der Stationen.....	65
5.4. Bewertungsmethodik.....	74

5.4.1. Subjektive Bewertung.....	74
5.4.2. Korrelation.....	75
5.4.3. Trefferquoten .....	82
5.5. Ergebnisse .....	88
6. Zusammenfassung.....	113
Literatur .....	115
Anhang A: Vergleiche SynAKTerm - Stationsmessungen.....	119

## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1:	Illustration des statistisch-dynamischen Verfahrens zur Berechnung synthetischer Windstatistiken (Erläuterungen im Text). .....	7
Abbildung 2:	Illustration des modifizierten statistisch-dynamischen Verfahrens zur Berechnung synthetischer Ausbreitungsklassenzeitreihen SynAKTerm® (Erläuterungen im Text).....	9
Abbildung 3:	Beispiel einer Reduzierung von 87.600 Reanalysepunkten auf 150 Clusterpunkte. Jeder Punkt ist durch die geostrophischen Windkomponenten $u$ und $v$ ( $x$ - und $y$ -Achse) und einen Temperaturgradienten (Farbe des Datenpunktes) definiert.....	12
Abbildung 4:	Abbildung der realen topographischen Verhältnisse (links) auf mittlere Geländehöhen (Mitte) und Landnutzungen (rechts) in jeder Modell-Gitterzelle.....	14
Abbildung 5:	Auf Basis der physikalischen Gesetze für die Atmosphäre und Daten zum Modellgebiet und der großräumigen meteorologischen Situation berechnet METRAS-PC die bodennahen Windsysteme. ....	17
Abbildung 6:	Geländehöhen im Rechengebiet und Teilgebiet (magenta) ungefiltert (links) und gefiltert (rechts). 19	
Abbildung 7:	Beispiel für ein mit METRAS-PC berechnetes bodennahes Windfeld im Bereich Schwarzwald / Rheintal bei leicht stabil geschichteter Atmosphäre und schwachem geostrophischen Wind aus Westen (Achsenbeschriftung UTM-Koordinaten).....	22
Abbildung 8:	Beispiel für ein mit METRAS-PC um Mitternacht berechnetes bodennahes thermisches Windsystem ohne übergeordneten Wind (Achsenbeschriftung UTM-Koordinaten). ....	23
Abbildung 9:	Lage der Reanalysepunkte der NCAR2-, NCEP-CFS- und ERA5-Reanalysen. ....	31
Abbildung 10:	Geländere relief in Reanalysedatensätzen unterschiedlicher Auflösung. ....	32
Abbildung 11:	Charakteristische Windrichtungsverteilungen in Reanalyse-Datensätzen unterschiedlicher Auflösung. ....	33
Abbildung 12:	Relative Clusterhäufigkeiten als Funktion von Windgeschwindigkeit, Windrichtung und potentielltem Temperaturgradienten.....	35
Abbildung 13:	Beispiel einer Reduzierung von 87.600 Reanalysepunkten (links oben) auf 120 Clusterpunkte (rechts oben) oder 120 bzw. 150 äquidistante Clusterpunkte (unten). Jeder Punkt ist durch die geostrophischen Windkomponenten $u$ und $v$ ( $x$ - und $y$ -Achse) und einen Temperaturgradienten in $K/m$ (Farbe des Datenpunktes) definiert.....	39
Abbildung 14:	Synthetische Windrosen (Version 3.0) in Google Earth© im Gebiet um einen Standort in Eybach. 55	
Abbildung 15:	Windrichtungsverteilungen an der DWD-Station Geisenheim und Bezugsfläche der zugehörigen SynAKTerm (cyan). ....	59

Abbildung 16:	Windrichtungsverteilungen an der DWD-Station Königswinter-Heiderhof und Bezugsflächen der benachbarten SynAKTerm (cyan). .....	60
Abbildung 17:	Windrichtungsverteilungen an der DWD-Station Stuttgart-Echterdingen und Bezugsflächen der benachbarten SynAKTerm (cyan). .....	61
Abbildung 18:	Darstellung des realen Geländes (links oben) durch Modellgitter unterschiedlicher räumlicher Auflösung. ....	62
Abbildung 19:	DWD-Messstationen in Süddeutschland. ....	65
Abbildung 20:	Luftbilder (Google Earth) der DWD-Station Krölpa-Rockendorf mit eingezeichneten Umkreisen (gelb) von 100 m (links) und 250 m (rechts, Blickrichtung Nord). ....	66
Abbildung 21:	Luftbilder (Google Earth) der DWD-Station Saarbrücken-Enzheim mit eingezeichneten Umkreisen (gelb) von 100 m (links) und 250 m (rechts, Blickrichtung Ost). ....	67
Abbildung 22:	Luftbilder (Google Earth) der DWD-Station Freudenstadt mit eingezeichneten Umkreisen (gelb) von 100 m (links) und 250 m (rechts, Blickrichtung Süd). ....	68
Abbildung 23:	Luftbilder (Google Earth) der DWD-Station Bad Soden-Salmünster mit eingezeichneten Umkreisen (gelb) von 100 m (links) und 250 m (rechts, Blickrichtung Nordnordost). ....	69
Abbildung 24:	Luftbilder (Google Earth) der DWD-Station Kahler Asten mit eingezeichneten Umkreisen (gelb) von 100 m (links) und 250 m (rechts, Blickrichtung West). ....	70
Abbildung 25:	Luftbilder (Google Earth) der DWD-Station Klippeneck mit eingezeichneten Umkreisen (gelb) von 100 m (links) und 250 m (rechts, Blickrichtung Nord). ....	71
Abbildung 26:	Luftbilder (Google Earth) der DWD-Station Regensburg mit eingezeichneten Umkreisen (gelb) von 100 m (links) und 250 m (rechts, Blickrichtung Südsüdost). ....	72
Abbildung 27:	Luftbilder (Google Earth) der DWD-Station Zugspitze mit eingezeichneten Umkreisen (gelb) von 100 m (links) und 250 m (rechts, Blickrichtung Südwest). ....	73
Abbildung 28:	Gemessene (rot) und synthetische (blau) Windgeschwindigkeiten an der Station Walldürn für 30-Tage-Zeiträume mit minimaler (oben), maximaler (Mitte) und mittlerer Korrelation (unten) aus dem Zeitraum 2011-2020. ....	79
Abbildung 29:	Gemessene (rot) und synthetische (blau) Windrichtungen an der Station Walldürn für 30-Tage-Zeiträume mit minimaler (oben), maximaler (Mitte) und mittlerer Korrelation (unten) aus dem Zeitraum 2011-2020. ....	80
Abbildung 30:	Gemessene (rot) und synthetische (blau) Windgeschwindigkeiten an der Station Münsingen (oben) und Windrichtungen an der Station Sipplingen (unten) für 30-Tage-Zeiträume mit mittleren Korrelationen aus dem Zeitraum 2011-2020. ....	81
Abbildung 31:	Schematisierte Skizze eines Frontdurchgangs und dessen Darstellung in Reanalysedaten und SynAKTerm. ....	83

Abbildung 32:	Gemessene (gelb) und synthetische (blau) Windgeschwindigkeiten an der Station Walldürn für 30-Tage-Zeiträume mit minimaler (oben), maximaler (Mitte) und mittlerer Trefferquote (unten) aus dem Zeitraum 2011-2020.....	86
Abbildung 33:	Gemessene (gelb) und synthetische (blau) Windrichtungen an der Station Walldürn für 30-Tage-Zeiträume mit minimaler (oben), maximaler (Mitte) und mittlerer Trefferquote (unten) aus dem Zeitraum 2011-2020.....	87
Abbildung 34:	Reales Geländere relief und Messung (links) sowie 500 m-Modellraster und SynAKTerm (rechts) bei Andernach.....	91
Abbildung 35:	Windrose und Umgebung der DWD-Station Gailingen.....	95
Abbildung 36:	Lage der DWD-Station Köln-Bonn mit umgebenden Geländere relief und Hauptwindrichtungen gemessen (rot) und synthetisch (blau).....	102
Abbildung A.1:	Datenblätter der Messung (oben) und SynAKTerm 3.0 (unten) an der DWD-Station Aachen-Orsbach (2012/2011-2020).....	120
Abbildung A.2:	Datenblätter der Messung (oben) und SynAKTerm 3.0 (unten) an der DWD-Station Alsfeld (2011-2020). 121	
Abbildung A.3:	Datenblätter der Messung (oben) und SynAKTerm 3.0 (unten) an der DWD-Station Altmühlsee (2011-2020).....	122
Abbildung A.4:	Datenblätter der Messung (oben) und SynAKTerm 3.0 (unten) an der DWD-Station Andernach (2012/2011-2020).....	123
Abbildung A.5:	Datenblätter der Messung (oben) und SynAKTerm 3.0 (unten) an der DWD-Station Aubstadt (2011-2020).....	124
Abbildung A.6:	Datenblätter der Messung (oben) und SynAKTerm 3.0 (unten) an der DWD-Station Augsburg (2011-2020).....	125
Abbildung A.7:	Datenblätter der Messung (oben) und SynAKTerm 3.0 (unten) an der DWD-Station Bad Hersfeld (2011-2020).....	126
Abbildung A.8:	Datenblätter der Messung (oben) und SynAKTerm 3.0 (unten) an der DWD-Station Bad Kissingen (2011-2020).....	127
Abbildung A.9:	Datenblätter der Messung (oben) und SynAKTerm 3.0 (unten) an der DWD-Station Bad Marienberg (2013/2011-2020).....	128
Abbildung A.10:	Datenblätter der Messung (oben) und SynAKTerm 3.0 (unten) an der DWD-Station Bad Soden - Salmünster (2011-2017/2020).....	129
Abbildung A.11:	Datenblätter der Messung (oben) und SynAKTerm 3.0 (unten) an der DWD-Station Balingen-Bronnhaupten (2011-2020).....	130

Abbildung A.12: Datenblätter der Messung (oben) und SynAKTerm 3.0 (unten) an der DWD-Station Bamberg (2011-2020).....	131
Abbildung A.13: Datenblätter der Messung (oben) und SynAKTerm 3.0 (unten) an der DWD-Station Berus (2011-2020). 132	
Abbildung A.14: Datenblätter der Messung (oben) und SynAKTerm 3.0 (unten) an der DWD-Station Birkelbach (2011-2020).....	133
Abbildung A.15: Datenblätter der Messung (oben) und SynAKTerm 3.0 (unten) an der DWD-Station Büchel (Flugplatz) (2011-2020).....	134
Abbildung A.16: Datenblätter der Messung (oben) und SynAKTerm 3.0 (unten) an der DWD-Station Chieming (2011-2020).....	135
Abbildung A.17: Datenblätter der Messung (oben) und SynAKTerm 3.0 (unten) an der DWD-Station Deuselbach (2011-2020).....	136
Abbildung A.18: Datenblätter der Messung (oben) und SynAKTerm 3.0 (unten) an der DWD-Station Dogern (2011-2020).....	137
Abbildung A.19: Datenblätter der Messung (oben) und SynAKTerm 3.0 (unten) an der DWD-Station Donaueschingen (2011-2019/2020).....	138
Abbildung A.20: Datenblätter der Messung (oben) und SynAKTerm 3.0 (unten) an der DWD-Station Dörrmoschel-Felsbergerhof (2011-2020).....	139
Abbildung A.21: Datenblätter der Messung (oben) und SynAKTerm 3.0 (unten) an der DWD-Station Eisenach (2011-2020).....	140
Abbildung A.22: Datenblätter der Messung (oben) und SynAKTerm 3.0 (unten) an der DWD-Station Erfurt-Weimar (2011-2020).....	141
Abbildung A.23: Datenblätter der Messung (oben) und SynAKTerm 3.0 (unten) an der DWD-Station Ergersheim-Neuherberg (2013/2011-2020). ....	142
Abbildung A.24: Datenblätter der Messung (oben) und SynAKTerm 3.0 (unten) an der DWD-Station Eschwege-Eltmannshausen (2011-2020). ....	143
Abbildung A.25: Datenblätter der Messung (oben) und SynAKTerm 3.0 (unten) an der DWD-Station Feldberg/Schwarzwald (2011-2020). ....	144
Abbildung A.26: Datenblätter der Messung (oben) und SynAKTerm 3.0 (unten) an der DWD-Station Feuchtwangen-Heilbronn (2011-2020). ....	145
Abbildung A.27: Datenblätter der Messung (oben) und SynAKTerm 3.0 (unten) an der DWD-Station Fichtelberg/Oberfranken-Hüttelstadt (2011-2020). ....	146
Abbildung A.28: Datenblätter der Messung (oben) und SynAKTerm 3.0 (unten) an der DWD-Station Frankenberg-Geismar (2013/2011-2020).....	147



Abbildung A.29: Datenblätter der Messung (oben) und SynAKTerm 3.0 (unten) an der DWD-Station Frankfurt/Main (2015/2011-2018/2020).....	148
Abbildung A.30: Datenblätter der Messung (oben) und SynAKTerm 3.0 (unten) an der DWD-Station Frasdorf-Greimelberg (2016/2011-2020). ....	149
Abbildung A.31: Datenblätter der Messung (oben) und SynAKTerm 3.0 (unten) an der DWD-Station Freiburg (2011-2020).....	150
Abbildung A.32: Datenblätter der Messung (oben) und SynAKTerm 3.0 (unten) an der DWD-Station Freudenstadt (2011-2020).....	151
Abbildung A.33: Datenblätter der Messung (oben) und SynAKTerm 3.0 (unten) an der DWD-Station Friedrichshafen (2011-2020). ....	152
Abbildung A.34: Datenblätter der Messung (oben) und SynAKTerm 3.0 (unten) an der DWD-Station Fürstzell (2011-2020).....	153
Abbildung A.35: Datenblätter der Messung (oben) und SynAKTerm 3.0 (unten) an der DWD-Station Gailingen (2011-2020).....	154
Abbildung A.36: Datenblätter der Messung (oben) und SynAKTerm 3.0 (unten) an der DWD-Station Garmisch-Partenkirchen (2011-2020). ....	155
Abbildung A.37: Datenblätter der Messung (oben) und SynAKTerm 3.0 (unten) an der DWD-Station Geibelsee (2011-2020).....	156
Abbildung A.38: Datenblätter der Messung (oben) und SynAKTerm 3.0 (unten) an der DWD-Station Geisenheim (2011-2020).....	157
Abbildung A.39: Datenblätter der Messung (oben) und SynAKTerm 3.0 (unten) an der DWD-Station Gießen-Wettenberg (2011-2020). ....	158
Abbildung A.40: Datenblätter der Messung (oben) und SynAKTerm 3.0 (unten) an der DWD-Station Gottfrieding (2011-2020).....	159
Abbildung A.41: Datenblätter der Messung (oben) und SynAKTerm 3.0 (unten) an der DWD-Station Großer Arber (2011-2020).....	160
Abbildung A.42: Datenblätter der Messung (oben) und SynAKTerm 3.0 (unten) an der DWD-Station Günzburg (2011-2020).....	161
Abbildung A.43: Datenblätter der Messung (oben) und SynAKTerm 3.0 (unten) an der DWD-Station Hahn (2011-2020). 162	162
Abbildung A.44: Datenblätter der Messung (oben) und SynAKTerm 3.0 (unten) an der DWD-Station Halblech-Bayerniederhofen (2014/2011-2020).....	163
Abbildung A.45: Datenblätter der Messung (oben) und SynAKTerm 3.0 (unten) an der DWD-Station Harburg (2011-2020).....	164

Abbildung A.46: Datenblätter der Messung (oben) und SynAKTerm 3.0 (unten) an der DWD-Station Heilbronn (2018/2011-2020).	165
Abbildung A.47: Datenblätter der Messung (oben) und SynAKTerm 3.0 (unten) an der DWD-Station Hohenpeißenberg (2011-2020).	166
Abbildung A.48: Datenblätter der Messung (oben) und SynAKTerm 3.0 (unten) an der DWD-Station Hoherodtskopf-Vogelsberg (2011-2020).	167
Abbildung A.49: Datenblätter der Messung (oben) und SynAKTerm 3.0 (unten) an der DWD-Station Hornisgrinde (2011-2020).	168
Abbildung A.50: Datenblätter der Messung (oben) und SynAKTerm 3.0 (unten) an der DWD-Station Idar-Oberstein (2011-2020).	169
Abbildung A.51: Datenblätter der Messung (oben) und SynAKTerm 3.0 (unten) an der DWD-Station Ingolstadt (2011-2020).	170
Abbildung A.52: Datenblätter der Messung (oben) und SynAKTerm 3.0 (unten) an der DWD-Station Kahler Asten (2011-2020).	171
Abbildung A.53: Datenblätter der Messung (oben) und SynAKTerm 3.0 (unten) an der DWD-Station Kaisersbach-Cronhütte (2012/2011-2020).	172
Abbildung A.54: Datenblätter der Messung (oben) und SynAKTerm 3.0 (unten) an der DWD-Station Kall-Sistig (2011-2020).	173
Abbildung A.55: Datenblätter der Messung (oben) und SynAKTerm 3.0 (unten) an der DWD-Station Kandern-Gupf (2011-2020).	174
Abbildung A.56: Datenblätter der Messung (oben) und SynAKTerm 3.0 (unten) an der DWD-Station Kempten (2011-2020).	175
Abbildung A.57: Datenblätter der Messung (oben) und SynAKTerm 3.0 (unten) an der DWD-Station Kleiner Feldberg / Taunus (2013/2011-2020).	176
Abbildung A.58: Datenblätter der Messung (oben) und SynAKTerm 3.0 (unten) an der DWD-Station Klippeneck (2011-2020).	177
Abbildung A.59: Datenblätter der Messung (oben) und SynAKTerm 3.0 (unten) an der DWD-Station Köln-Bonn (2011-2020).	178
Abbildung A.60: Datenblätter der Messung (oben) und SynAKTerm 3.0 (unten) an der DWD-Station Königswinter-Heiderhof (2011-2018/2020).	179
Abbildung A.61: Datenblätter der Messung (oben) und SynAKTerm 3.0 (unten) an der DWD-Station Konstanz (2011-2019/2020).	180
Abbildung A.62: Datenblätter der Messung (oben) und SynAKTerm 3.0 (unten) an der DWD-Station Krölpa-Rockendorf (2017/2011-2020).	181

Abbildung A.63: Datenblätter der Messung (oben) und SynAKTerm 3.0 (unten) an der DWD-Station Kümmersbrück (2011-2020).....	182
Abbildung A.64: Datenblätter der Messung (oben) und SynAKTerm 3.0 (unten) an der DWD-Station Lahr (2011- 2020). 183	183
Abbildung A.65: Datenblätter der Messung (oben) und SynAKTerm 3.0 (unten) an der DWD-Station Langquaid- Oberschneidhart (2011-2020).....	184
Abbildung A.66: Datenblätter der Messung (oben) und SynAKTerm 3.0 (unten) an der DWD-Station Laupheim (2011-2020).....	185
Abbildung A.67: Datenblätter der Messung (oben) und SynAKTerm 3.0 (unten) an der DWD-Station Lautertal- Hörgenau (2011-2020).....	186
Abbildung A.68: Datenblätter der Messung (oben) und SynAKTerm 3.0 (unten) an der DWD-Station Lautertal- Oberlauter (2011-2020). ....	187
Abbildung A.69: Datenblätter der Messung (oben) und SynAKTerm 3.0 (unten) an der DWD-Station Lechfeld (2011-2020).....	188
Abbildung A.70: Datenblätter der Messung (oben) und SynAKTerm 3.0 (unten) an der DWD-Station Leutkirch- Herlazhausen (2011-2020).....	189
Abbildung A.71: Datenblätter der Messung (oben) und SynAKTerm 3.0 (unten) an der DWD-Station Lindau (2011- 2020). 190	190
Abbildung A.72: Datenblätter der Messung (oben) und SynAKTerm 3.0 (unten) an der DWD-Station Mannheim (2019/2011-2020).....	191
Abbildung A.73: Datenblätter der Messung (oben) und SynAKTerm 3.0 (unten) an der DWD-Station Meiningen (2011-2020).....	192
Abbildung A.74: Datenblätter der Messung (oben) und SynAKTerm 3.0 (unten) an der DWD-Station Memmingen (2012/2011-2020). ....	193
Abbildung A.75: Datenblätter der Messung (oben) und SynAKTerm 3.0 (unten) an der DWD-Station Meßstetten- Appental (2018/2011-2020).....	194
Abbildung A.76: Datenblätter der Messung (oben) und SynAKTerm 3.0 (unten) an der DWD-Station Michelstadt- Vielbrunn (2011-2020). ....	195
Abbildung A.77: Datenblätter der Messung (oben) und SynAKTerm 3.0 (unten) an der DWD-Station Mittenwald (2011-2020).....	196
Abbildung A.78: Datenblätter der Messung (oben) und SynAKTerm 3.0 (unten) an der DWD-Station Mönchengladbach-Hilderath (2011-2020).....	197
Abbildung A.79: Datenblätter der Messung (oben) und SynAKTerm 3.0 (unten) an der DWD-Station Mühlacker (2011-2020).....	198

Abbildung A.80: Datenblätter der Messung (oben) und SynAKTerm 3.0 (unten) an der DWD-Station Mühldorf (2011-2020).....	199
Abbildung A.81: Datenblätter der Messung (oben) und SynAKTerm 3.0 (unten) an der DWD-Station München-Flughafen (2012/2011-2020). ....	200
Abbildung A.82: Datenblätter der Messung (oben) und SynAKTerm 3.0 (unten) an der DWD-Station München-Stadt (2011-2020). ....	201
Abbildung A.83: Datenblätter der Messung (oben) und SynAKTerm 3.0 (unten) an der DWD-Station Münsingen-Apfelstetten (2011-2020). ....	202
Abbildung A.84: Datenblätter der Messung (oben) und SynAKTerm 3.0 (unten) an der DWD-Station Neuburg-Donau (2011-2016/2020).....	203
Abbildung A.85: Datenblätter der Messung (oben) und SynAKTerm 3.0 (unten) an der DWD-Station Neuburg-Donau (2018/2011-2020).....	204
Abbildung A.86: Datenblätter der Messung (oben) und SynAKTerm 3.0 (unten) an der DWD-Station Neuhaus am Rennweg (2011-2018/2020). ....	205
Abbildung A.87: Datenblätter der Messung (oben) und SynAKTerm 3.0 (unten) an der DWD-Station Neuhütten / Spessart (2011-2020). ....	206
Abbildung A.88: Datenblätter der Messung (oben) und SynAKTerm 3.0 (unten) an der DWD-Station Neumarkt-Höhenberg (2016/2011-2020). ....	207
Abbildung A.89: Datenblätter der Messung (oben) und SynAKTerm 3.0 (unten) an der DWD-Station Neu-Ulrichstein (2012/2011-2020). ....	208
Abbildung A.90: Datenblätter der Messung (oben) und SynAKTerm 3.0 (unten) an der DWD-Station Neuwied-Feldkirchen-Hüllenberg (2012/2011-2020). ....	209
Abbildung A.91: Datenblätter der Messung (oben) und SynAKTerm 3.0 (unten) an der DWD-Station Nörvenich (2011-2020).....	210
Abbildung A.92: Datenblätter der Messung (oben) und SynAKTerm 3.0 (unten) an der DWD-Station Nümbrecht auf dem Lindchen (2011-2014/2020).....	211
Abbildung A.93: Datenblätter der Messung (oben) und SynAKTerm 3.0 (unten) an der DWD-Station Nürnberg-Barweiler (2011-2020). ....	212
Abbildung A.94: Datenblätter der Messung (oben) und SynAKTerm 3.0 (unten) an der DWD-Station Nürnberg (2011-2020).....	213
Abbildung A.95: Datenblätter der Messung (oben) und SynAKTerm 3.0 (unten) an der DWD-Station Oberstdorf (2011-2020).....	214
Abbildung A.96: Datenblätter der Messung (oben) und SynAKTerm 3.0 (unten) an der DWD-Station Oberzent-Beerfelden-Vogelherd (2013/2011-2020). ....	215

Abbildung A.97: Datenblätter der Messung (oben) und SynAKTerm 3.0 (unten) an der DWD-Station Offenbach-Wetterpark (2011-2020).	216
Abbildung A.98: Datenblätter der Messung (oben) und SynAKTerm 3.0 (unten) an der DWD-Station Öhringen (2015/2011-2020).	217
Abbildung A.99: Datenblätter der Messung (oben) und SynAKTerm 3.0 (unten) an der DWD-Station Perl-Sinzig-Renglichberg (2013/2011-2020).	218
Abbildung A.100: Datenblätter der Messung (oben) und SynAKTerm 3.0 (unten) an der DWD-Station Pforzheim-Ispringen (2011-2020).	219
Abbildung A.101: Datenblätter der Messung (oben) und SynAKTerm 3.0 (unten) an der DWD-Station Regensburg (2011-2020).	220
Abbildung A.102: Datenblätter der Messung (oben) und SynAKTerm 3.0 (unten) an der DWD-Station Rheinstetten (2011-2020).	221
Abbildung A.103: Datenblätter der Messung (oben) und SynAKTerm 3.0 (unten) an der DWD-Station Roding-Wetterfeld (2011-2018/2020).	222
Abbildung A.104: Datenblätter der Messung (oben) und SynAKTerm 3.0 (unten) an der DWD-Station Roth (2011-2020).	223
Abbildung A.105: Datenblätter der Messung (oben) und SynAKTerm 3.0 (unten) an der DWD-Station Roth bei Prüm (2011-2020).	224
Abbildung A.106: Datenblätter der Messung (oben) und SynAKTerm 3.0 (unten) an der DWD-Station Rothalmünster (2011-2020).	225
Abbildung A.107: Datenblätter der Messung (oben) und SynAKTerm 3.0 (unten) an der DWD-Station Runkel-Ennerich (2011-2020).	226
Abbildung A.108: Datenblätter der Messung (oben) und SynAKTerm 3.0 (unten) an der DWD-Station Saarbrücken-Enzheim (2011-2020).	227
Abbildung A.109: Datenblätter der Messung (oben) und SynAKTerm 3.0 (unten) an der DWD-Station Schleiz (2011-2020).	228
Abbildung A.110: Datenblätter der Messung (oben) und SynAKTerm 3.0 (unten) an der DWD-Station Schmücke (2011-2020).	229
Abbildung A.111: Datenblätter der Messung (oben) und SynAKTerm 3.0 (unten) an der DWD-Station Sembach (2021-2021 / 2011-2020).	230
Abbildung A.112: Datenblätter der Messung (oben) und SynAKTerm 3.0 (unten) an der DWD-Station Sipplingen (2011-2020).	231
Abbildung A.113: Datenblätter der Messung (oben) und SynAKTerm 3.0 (unten) an der DWD-Station Stuttgart-Echterdingen (2011-2020).	232

Abbildung A.114: Datenblätter der Messung (oben) und SynAKTerm 3.0 (unten) an der DWD-Station Stuttgart-Schnarrenberg (2011-2020).	233
Abbildung A.115: Datenblätter der Messung (oben) und SynAKTerm 3.0 (unten) an der DWD-Station Stimpfach-Weipertshofen (2011-2020).	234
Abbildung A.116: Datenblätter der Messung (oben) und SynAKTerm 3.0 (unten) an der DWD-Station Stötten (2011-2020).	235
Abbildung A.117: Datenblätter der Messung (oben) und SynAKTerm 3.0 (unten) an der DWD-Station Straubing (2011-2020).	236
Abbildung A.118: Datenblätter der Messung (oben) und SynAKTerm 3.0 (unten) an der DWD-Station Tholey (2011-2020).	237
Abbildung A.119: Datenblätter der Messung (oben) und SynAKTerm 3.0 (unten) an der DWD-Station Trier-Petrisberg (2011-2020).	238
Abbildung A.120: Datenblätter der Messung (oben) und SynAKTerm 3.0 (unten) an der DWD-Station Ulm-Mähringen (2011-2020).	239
Abbildung A.121: Datenblätter der Messung (oben) und SynAKTerm 3.0 (unten) an der DWD-Station Vogtareuth (Kläranlage) (2011-2020).	240
Abbildung A.122: Datenblätter der Messung (oben) und SynAKTerm 3.0 (unten) an der DWD-Station Waging am See (2011-2020).	241
Abbildung A.123: Datenblätter der Messung (oben) und SynAKTerm 3.0 (unten) an der DWD-Station Waibstadt (2011-2020).	242
Abbildung A.124: Datenblätter der Messung (oben) und SynAKTerm 3.0 (unten) an der DWD-Station Waldmünchen (2011-2020).	243
Abbildung A.125: Datenblätter der Messung (oben) und SynAKTerm 3.0 (unten) an der DWD-Station Waldsee, Bad Reute (2011-2020).	244
Abbildung A.126: Datenblätter der Messung (oben) und SynAKTerm 3.0 (unten) an der DWD-Station Walldürn (2011-2020).	245
Abbildung A.127: Datenblätter der Messung (oben) und SynAKTerm 3.0 (unten) an der DWD-Station Wasserkuppe (2011-2020).	246
Abbildung A.128: Datenblätter der Messung (oben) und SynAKTerm 3.0 (unten) an der DWD-Station Weiden (2011-2020).	247
Abbildung A.129: Datenblätter der Messung (oben) und SynAKTerm 3.0 (unten) an der DWD-Station Weihenstephan-Dürnast (2011-2020).	248
Abbildung A.130: Datenblätter der Messung (oben) und SynAKTerm 3.0 (unten) an der DWD-Station Weilheim-Bierbronnen (2011-2020).	249

<i>Abbildung A.131: Datenblätter der Messung (oben) und SynAKTerm 3.0 (unten) an der DWD-Station Weinbiet (2011-2020).....</i>	<i>250</i>
<i>Abbildung A.132: Datenblätter der Messung (oben) und SynAKTerm 3.0 (unten) an der DWD-Station Weingarten (2011-2020).....</i>	<i>251</i>
<i>Abbildung A.133: Datenblätter der Messung (oben) und SynAKTerm 3.0 (unten) an der DWD-Station Weißenburg-Emetzheim (2015/2011-2020). ....</i>	<i>252</i>
<i>Abbildung A.134: Datenblätter der Messung (oben) und SynAKTerm 3.0 (unten) an der DWD-Station Wielenbach (Demollstraße) (2019/2011-2020). ....</i>	<i>253</i>
<i>Abbildung A.135: Datenblätter der Messung (oben) und SynAKTerm 3.0 (unten) an der DWD-Station Winterbach-Remstal (2011-2020).....</i>	<i>254</i>
<i>Abbildung A.136: Datenblätter der Messung (oben) und SynAKTerm 3.0 (unten) an der DWD-Station Wunsiedel-Schönbronn (2011-2020).....</i>	<i>255</i>
<i>Abbildung A.137: Datenblätter der Messung (oben) und SynAKTerm 3.0 (unten) an der DWD-Station Zugspitze (2011-2020).....</i>	<i>256</i>
<i>Abbildung A.138: Datenblätter der Messung (oben) und SynAKTerm 3.0 (unten) an der DWD-Station Zwiesel (2011-2020).....</i>	<i>257</i>

## Tabellenverzeichnis

<i>Tabelle 1: Mittlere Windgeschwindigkeit und Anzahl von Clustern (aus 130 Clustern) mit einer Häufigkeit von weniger 0,2 % an den Jahresstunden.....</i>	<i>37</i>
<i>Tabelle 2: Vergleich der mit alter und neuer METRAS-Version sowie NCAR2- und JRA55-Reanalysen berechneten SynAKTerm 3.0 (2011-2020) mit Messdaten.....</i>	<i>44</i>
<i>Tabelle 3: (Mehrseitige Tabelle) Mittlere Windgeschwindigkeiten und Windrosen (links: Messung, Mitte: SynAKTerm 2.0, rechts: SynAKTerm 3.0) an DWD-Stationen im Teilgebiet Kraichgau-Hohenlohe.....</i>	<i>50</i>
<i>Tabelle 4: Bewertungen SynAKTerm 3.0 an DWD-Messstationen. (Fortsetzung nächste Seite) .....</i>	<i>110</i>



## 1. Ausgangssituation

Beginnend mit einem Pilotprojekt in den Jahren 2001 / 2002 für den Großraum Stuttgart hat die Arge METCON / IB Rau sukzessive für nahezu ganz Deutschland etwa südlich einer Linie Papenburg – Bremen – Wittenberg – Angermünde zunächst synthetische Windstatistiken auf Basis prognostischer mesoskaliger Simulationsrechnungen mit dem Modell METRAS-PC berechnet ([1], [2]). Im Jahre 2007 wurden erstmals in einer weiteren Pilotstudie auf Basis der inzwischen flächendeckend vorliegenden modellierten Daten synthetische Ausbreitungsklassenstatistiken (SynAKS<sup>1</sup>) entwickelt [7]. Aufgrund des erfolgreichen Abschlusses der Pilotstudie einerseits sowie der zwischenzeitlich zunehmenden Nachfrage nach synthetischen Daten für Ausbreitungsrechnungen andererseits wurden in den Jahren 2011 bis 2014 zunächst weitere Pilotprojekte zur Entwicklung synthetischer Ausbreitungsklassenzeitreihen (SynAKTerm) sowie so genannter synthetisch repräsentativer Ausbreitungsklassenzeitreihen (SynRepAKTerm) durchgeführt und schließlich mit der flächendeckenden Bereitstellung von SynRepAKTerm für den größten Teil Deutschlands abgeschlossen ([3], [4], [5], [8], [9]). Die SynRepAKTerm sind Ausbreitungsklassenzeitreihen für ein so genanntes „synthetisch repräsentatives Jahr“. Darunter ist ein Einzeljahr zu verstehen, das es in Realität nie gegeben hat, dessen meteorologische Charakteristik aber in guter Näherung den Verhältnissen eines 10-jährigen Bezugszeitraums entspricht. Die SynRepAKTerm haben daher den Vorteil, dass sie per se gemäß der Forderung der TA Luft [30] für einen langjährigen Zeitraum (hier ein 10-Jahres-Zeitraum) repräsentativ sind und somit kein repräsentatives Jahr bestimmt werden muss.

Die bisher vorliegenden synthetischen Daten für Deutschland entsprechen für die SynAKS dem Stand 2013 (Version 2.0b) und für die SynRepAKTerm dem Stand 2014 (Version 2.0).

Die diesen Daten zugrundeliegenden prognostischen Simulationsrechnungen wurden bereits im Zeitraum 2001 – 2006 mit METRAS-PC in der Version 1.0 durchgeführt ([1], [23], [27]). Die Modellrechnungen beruhen auf topographischen Eingangsdaten mit Stand um die Jahrtausendwende und auf meteorologischen Eingangsdaten („Cluster“), die aus einer Clusteranalyse der NCAR/NCEP-Reanalysedaten des Bezugszeitraums 1985 – 1995 stammen [18]. Ursprünglich war dies auch der Bezugszeitraum der daraus abgeleiteten SynAKS.

Seit 2006 wurden die METRAS-Modellergebnisse mithilfe neuerer NCAR/NCEP-Reanalysedaten zweimal neu ausgewertet und synthetische Daten für aktuellere Bezugszeiträume abgeleitet, zunächst für die Dekade 1998 – 2007, dann noch einmal für die Dekade 2001 – 2010. Seitdem hat keine Aktualisierung mehr stattgefunden.

---

<sup>1</sup> SynAKS®, SynAKTerm® und SynRepAKTerm® sind eingetragene Warenzeichen.

Seit etwa zehn Jahren werden synthetische SynAKS und SynRepAKTerm zunehmend von Gutachtern für Immissionsprognosen nach TA Luft ([29], [30]) oder in Anlehnung an TA Luft eingesetzt. Dieser Trend gilt deutschlandweit, insbesondere für Bundesländer mit komplexen orographischen Strukturen. Hauptgrund für die zunehmende Akzeptanz der synthetischen Daten ist die Tatsache, dass die charakteristischen meteorologischen Ausbreitungsverhältnisse an Standorten, in deren Umgebung keine Messungen in ausreichender Qualität vorliegen, durch die objektiv erzeugten synthetischen Daten in der Regel sehr viel besser repräsentiert werden als durch die Übertragung von Messdaten, die immer zum Teil durch die subjektive Einschätzung des Bearbeiters geprägt ist.

Die zunehmende Nutzung synthetischer Daten und deren Akzeptanz durch die Genehmigungsbehörden haben dazu geführt, dass in der neuen TA Luft 2021 [30] neben meteorologischen Messdaten die Verwendung modellierter Daten wie der SynAKS und SynAKTerm nun explizit zugelassen ist. Voraussetzung ist allerdings, dass (wie bei gemessenen Daten auch) deren Qualität nachgewiesen ist und sie repräsentativ für einen mehrjährigen Zeitraum sind, der allerdings nicht zu weit in der Vergangenheit liegen sollte.

Sowohl die Aktualisierung der TA Luft als auch eine Reihe anderer zwischenzeitlicher Entwicklungen ergaben die Notwendigkeit für eine Aktualisierung der synthetischen Daten:

- SynAKTerm statt SynRepAKTerm:  
Die neue TA Luft 2021 sieht die Berechnung nasser Deposition vor. Dazu hat das Umweltbundesamt einen bundesweiten Niederschlagsdatensatz veröffentlicht, dessen Verwendung zwingend vorgeschrieben ist. Da sich die Niederschlagsdaten nur auf reale Einzeljahre beziehen, die SynRepAKTerm jedoch auf synthetische, nicht reale Jahre, lassen sich beide Datensätze nicht miteinander kombinieren. Somit müssen die SynRepAKTerm durch SynAKTerm ersetzt werden.
- Mit dem Übergang von SynRepAKTerm auf SynAKTerm besteht wieder die Notwendigkeit, ein repräsentatives Jahr aus den SynAKTerm (ortsabhängig) zu bestimmen.
- Zwischen den bisherigen SynAKS und SynRepAKTerm sind aufgrund des historisch bedingten Berechnungsverfahrens und inhaltlichen Gehalts an manchen Standorten Differenzen zu erkennen, die Nicht-Fachleuten häufig nur schwer vermittelbar sind. Durch einheitliche Neuberechnungen können beide Datentypen in inhaltliche Übereinstimmung gebracht werden, da die 10-jährige SynAKS zukünftig aus den SynAKTerm für zehn Einzeljahre abgeleitet wird.
- Der bisherige Bezugszeitraum 2001 – 2010 liegt inzwischen mehr als ein Jahrzehnt zurück. Er ist auf eine neue Dekade zu aktualisieren.

- Die neue TA Luft fordert einen Qualitätsnachweis der synthetischen Daten. Hierzu befindet sich die VDI 3783 Blatt 22 in Vorbereitung. Inhalte der neuen Richtlinie sind zurzeit noch nicht bekannt. Sie reiht sich jedoch in mehrere so genannte Evaluierungsrichtlinien ein, die im Kern immer eine Evaluierung von Modell oder Rechenverfahren und Anwendern einerseits und von exemplarischen Ergebnissen der Modelle oder Rechenverfahren andererseits fordern. Beispielsweise fordert die Evaluierungsrichtlinie VDI 3783 Blatt 7 [32] die Evaluierung eines prognostischen Modells anhand physikalischer Mindestanforderungen, Dokumentation und Nachweis der Ergebnisgüte sowie die Evaluierung der Modellanwender. Zur Zeit der damaligen Modellrechnungen gab es beide VDI-Richtlinien noch nicht, so dass die damals verwendete Version 1.0 von METRAS-PC noch nicht evaluiert war. Inzwischen liegt eine evaluierte METRAS-Version vor, und bei METCON ist auch der Evaluierungsprozess als Modellanwender erfolgt.
- Die synthetischen Daten der Version 2 sind aus historischen Gründen für eine Vielzahl kleinerer, unregelmäßig verteilter Teilgebiete erzeugt worden und liegen auf einem Gauß-Krüger-Koordinatenraster vor. Bei einer Neuberechnung kann auf ein Raster im offiziell gültigen UTM-Koordinatensystem gewechselt werden, was nur noch einen Zonenwechsel (UTM 32 / UTM 33) in ganz Deutschland erfordert.
- Im Zuge einer Aktualisierung kann geprüft werden, ob für den meteorologischen Antrieb neuere Reanalysedaten mit ggf. besserer Qualität und in höherer Auflösung als die damals verwendeten vorliegen.
- Die damaligen Modellrechnungen beruhen auf inzwischen veralteten Landnutzungsdaten. Inzwischen liegen aktuellere Daten in besserer Auflösung auch für die angrenzenden Auslandsgebiete vor.
- Für die Höhendaten liegen heute besser auflösende Datensätze vor.
- Mit den CDC-Daten des Deutschen Wetterdienstes liegen heute räumlich differenziertere Bedeckungsdaten für die Bestimmung der Ausbreitungsklassen vor als noch vor zwei Jahrzehnten.

Daneben bietet ein Update der synthetischen Daten auch die Möglichkeit, kleinere Korrekturen in den Berechnungsverfahren vorzunehmen.

Aus den vorstehend genannten Gründen wurde in den vergangenen Jahren eine Weiterentwicklung der SynAKS / SynAKTerm (Version 3.0) und eine Aktualisierung auf die Dekade 2011 – 2020 vorgenommen. Nach Fertigstellung der synthetischen Daten für diese Dekade soll eine laufende Fortschreibung erfolgen.

Im Kapitel 2 ist das aktualisierte Berechnungsverfahren ausführlich dokumentiert. Voruntersuchungen zur Auswahl neuer Eingangsdaten, zu dem verwendeten prognostischen Modell und dem Vergleich zur Version 2.0 der synthetischen Daten werden im Kapitel 3 erläutert. Im Kapitel 4 folgt die Dokumentation der Qualitätssicherung der SynAKTerm 3.0. Der Vergleich mit Messdaten stellt einen so umfangreichen Teil der Qualitätssicherung dar, dass ihm ein eigenes Kapitel 5 und der Anhang A gewidmet sind. Der Bericht schließt mit einer Zusammenfassung ab (Kapitel 6).

## 2. Berechnungsverfahren

Obwohl die synthetischen Daten in der Version 2.0 schon seit ungefähr 15 Jahren regelmäßig von Gutachtern und Behörden eingesetzt werden, kommt es häufig noch zu Missverständnissen, die deshalb vorab geklärt werden sollen: Synthetische Ausbreitungsklassenzeitreihen (SynAKTerm) und Ausbreitungsklassenstatistiken (SynAKS) sind

- *nicht* gemessen,
- *nicht* aus gemessenen Windstatistiken interpoliert oder anders abgeleitet,
- enthalten *keine* direkten Informationen aus bodennahen Messungen und
- sind – anders als Messungen – *nicht* als punktbezogene Informationen zu verstehen.

Synthetische Ausbreitungsklassenzeitreihen (SynAKTerm) werden vielmehr ohne Messungen vor Ort durch Zusammenführung von topographischen und meteorologisch-statistischen Informationen sowie aus den Ergebnissen von Modellrechnungen künstlich („synthetisch“) hergestellt. Sie repräsentieren die mittleren Verhältnisse über Bezugsflächen, die der räumlichen Auflösung der zugrunde liegenden Modellrechnungen entsprechen. Sowohl in der aktuellen Version 3.0 als auch der Vorgängerversion haben die Bezugsflächen eine Größe von 500 x 500 m<sup>2</sup>. In der neuen Version 3.0 liegen sie jedoch nicht mehr im Gauß-Krüger-System, sondern auf einem UTM-Raster im Bezugssystem ETRS89 an den Schnittpunkten voller und halber Kilometer vor. Synthetische Ausbreitungsklassenstatistiken (SynAKS) werden aus den SynAKTerm abgeleitet, indem die Häufigkeitsverteilungen von Windrichtung, Windgeschwindigkeit und Ausbreitungsklasse in den Klassen der TA Luft bestimmt werden.

### 2.1. Ausbreitungsklasse versus Obukhovlänge

Ausbreitungsrechnungen nach TA Luft erfordern als meteorologische Eingangsdaten nicht zwingend Ausbreitungsklassen. Vielmehr nennt die TA Luft als meteorologische Eingangsgröße zur Charakterisierung der Turbulenz vorrangig die Obukhovlänge und ermöglicht alternativ die Vorgabe von Ausbreitungsklassen. In solchen Fällen können den Ausbreitungsklassen tabellarisch vorliegende Werte der Obukhovlänge zugewiesen werden.

Die TA Luft suggeriert hier eine beliebige Austauschbarkeit beider Größen, die jedoch dem konzeptionellen, auch historisch bedingten Ansatz der Ausbreitungsrechnung nach TA Luft nicht entspricht. In der Ausbreitungsrechnung wird von einem horizontal homogen vorliegenden, also eher integralen atmosphärischen Turbulenzzustand ausgegangen<sup>2</sup>. Die meteorologischen

---

<sup>2</sup> Lediglich bei Berücksichtigung von Bebauung wird im Einflussbereich der Gebäude eine erhöhte Turbulenz angenommen.

Eingangsdaten zur Charakterisierung der Turbulenz sollten daher idealerweise die mittleren Verhältnisse im Rechengebiet widerspiegeln.

Die Obukhovlänge ist eine aus lokalen Mess- oder Modellgrößen abgeleitete Kennzahl, die räumlich und zeitlich stark fluktuieren kann und deshalb zur Beschreibung des integralen Turbulenzzustandes innerhalb eines (größeren) Rechengebietes nur bedingt geeignet ist. Die Ausbreitungsklasse beruht dagegen (neben Tages- und Jahreszeit sowie Windgeschwindigkeit in 10 m Höhe) auf dem Bedeckungsgrad, der insbesondere bei visueller Bestimmung die mittleren Verhältnisse im Umkreis von etlichen Kilometern um einen Messort beschreibt. Sie repräsentiert deshalb eher den integralen Turbulenzzustand, nicht jedoch die lokalen Verhältnisse. Wird der Ausbreitungsklasse erst im Rahmen der Ausbreitungsrechnung eine Obukhovlänge zugewiesen, so repräsentiert dann auch die Obukhovlänge eher die integralen Verhältnisse.

Aus diesen Überlegungen heraus werden die SynAKTerm nicht mit Obukhovlängen (die direkt aus den Modellrechnungen zur Verfügung stehen würden), sondern mit Ausbreitungsklassen (die u.a. aus Bedeckungsdaten abgeleitet werden) bereitgestellt.

## 2.2. Verfahrenskonzept

Die Erdoberfläche mit ihren wechselnden Geländehöhen und Flächennutzungen beeinflusst die Windverhältnisse und andere atmosphärische Größen ganz erheblich. Jedoch ist oberhalb der bodennahen Grenzschicht, die sich in Mitteleuropa über einige hundert Meter bis etwa 2 km Höhe erstrecken kann, der Einfluss des Bodens nur noch gering. Die atmosphärischen Verhältnisse werden dort fast nur noch von der großräumigen Wetterlage bestimmt.

Die Grundidee des Verfahrens zur Berechnung synthetischer Windstatistiken beruht auf dem Konzept des statistisch-dynamischen Ansatzes, wie er zum Beispiel in [15] beschrieben wird. Dieser Ansatz geht davon aus, dass das lokale bodennahe Windklima eindeutig von wenigen Parametern des übergeordneten großskaligen Windklimas und deren langjährigen Häufigkeiten sowie der Geländeoberfläche bestimmt wird. Das großskalige Windklima wird durch die Häufigkeit einer Anzahl charakteristischer Klassen („Cluster“) und deren mittleren Windrichtungen und Windgeschwindigkeiten sowie der atmosphärischen Schichtung charakterisiert. Die Charakterisierung der Geländeoberfläche erfolgt durch die topographischen Gegebenheiten (Landnutzung, Geländehöhe). Außerdem wird angenommen, dass thermodynamisch bedingte Windsysteme im Vergleich zu der durch den großskaligen Druckgradienten (geostrophischer Wind) angetriebenen Strömung vernachlässigbar sind. Wird jede dieser großskaligen, repräsentativen Situationen mit einem geeigneten Windfeldmodell stationär simuliert, so resultieren daraus die jeweils zugehörigen mesoskalig geprägten bodennahen Strömungsmuster. Die bodennahe Windstatistik an jedem Gitterpunkt ergibt sich dann aus der Wichtung des für jedes Cluster am Gitterpunkt bodennah simulierten Windes mit dessen relativer Häufigkeit.

Diese Grundidee ist in der Abbildung 1 illustriert: Zu jeder großräumigen Wettersituation („Antriebswind 1“, „Antriebswind 2“ usw.) wird jeweils eine so genannte dynamische Modellsimulation durchgeführt. Daraus werden eindeutige, mit diesen Wettersituationen verbundene Bodenwindfelder berechnet. Während die Höhenwinde recht homogen sind, stellen sich bodennah unter Umständen sehr heterogene Windfelder ein. Jede Höhenwindsituation ist im langjährigen Mittel mit einer bestimmten Auftrittshäufigkeit verknüpft. Somit tritt auch das zugehörige Bodenwindfeld mit der gleichen Häufigkeit auf. Für jeden Ort im Modellgebiet kann durch gewichtete Mittelung aller dort berechneten Bodenwinde eine Windstatistik abgeleitet werden. In der Abbildung 1 ist rechts beispielhaft skizziert, wie damit eine 30°-Windrichtungsverteilung im Höhenwind (blau) auf eine bodennahe Windrichtungsverteilung (grün) an einen bestimmten Ort abgebildet wird.

Mit diesen Modellrechnungen können alle dynamisch bedingten Einflüsse des Geländes auf das bodennahe Windklima erfasst werden. Dazu gehören beispielsweise Leewirbel hinter Bergen, Kanalisierungen des Windes in Tälern oder Abbremsen des Windes über rauem Gelände (Wald, Bebauung).

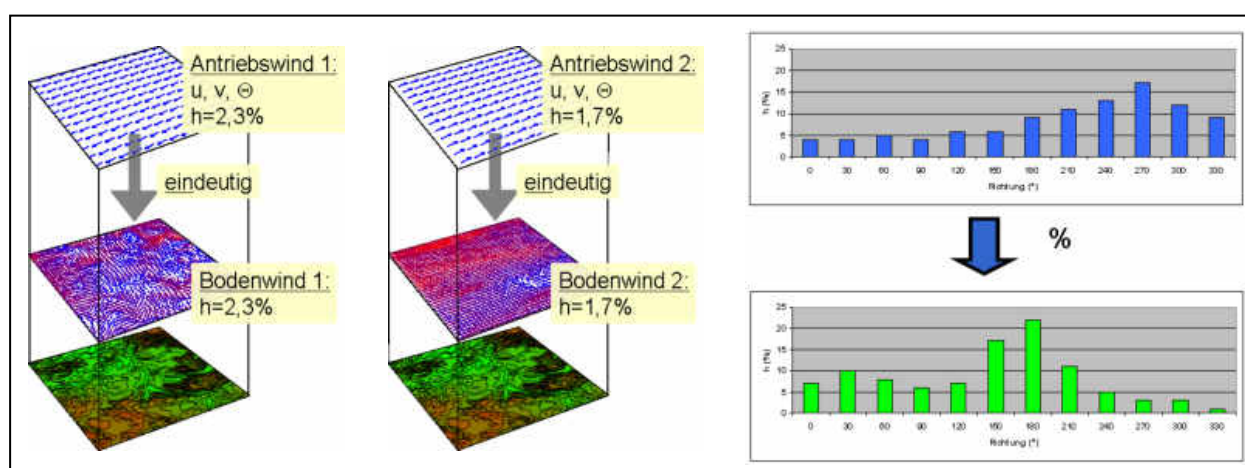


Abbildung 1: Illustration des statistisch-dynamischen Verfahrens zur Berechnung synthetischer Windstatistiken (Erläuterungen im Text).

In vielen Teilen Deutschlands ist eine wesentliche Voraussetzung dieses kurz geschilderten statistisch-dynamischen Ansatzes, der lediglich dynamische Windsysteme berücksichtigt, nicht erfüllt. Häufig spielen thermisch bedingte Windsysteme, wie zum Beispiel Kaltluftwindsysteme, eine erhebliche Rolle. Nächtliche Kaltluftabflusssysteme bilden sich bevorzugt bei schwachwindigen Strahlungswetterlagen mit dem Einsetzen einer negativen Strahlungsbilanz kurz vor Sonnenuntergang aus und können bis in die Vormittagsstunden anhalten. Nach [37] können solche Kaltluftwindsysteme beispielsweise in Tälern des Nordschwarzwaldes in Einzelfällen bis zu 17 Stunden andauern und sich auch unter reduzierten Ausstrahlungsbedingungen (Bewölkung) ausbilden. Da sich mit der nächtlichen Ausstrahlung die

bodennahen Luftschichten vom Boden ausgehend stabilisieren und häufig von den Strömungsverhältnissen der darüber liegenden Luftschichten abkoppeln, können Kaltluftabflüsse auch dann noch beobachtet werden, wenn oberhalb der Bodeninversion ein übergeordneter Wind mit schwacher bis mittlerer Windgeschwindigkeit vorliegt. In Messungen zeigt sich der Einfluss thermisch bedingter Windsysteme auf die charakteristischen lokalen Windverhältnisse häufig in Form ausgeprägter „Kaltluftsektoren“ in den Windrichtungsverteilungen unter stabilen Schichtungsverhältnissen.

Um diesem Phänomen in den synthetischen Windstatistiken Rechnung tragen zu können, wurde das statistisch-dynamische Verfahren erweitert. In dem modifizierten statistisch-dynamischen Verfahren werden neben den stationären dynamischen Modellrechnungen zusätzliche Modellrechnungen für windschwache Strahlungswetterlagen durchgeführt, um regional bedeutsame thermische Windsysteme wie diese nächtlichen Kaltluftabflüsse zu erfassen. Je nach Auftretenshäufigkeit solcher Wetterlagen werden diese dann in die statistische Auswertung der Modellrechnungen für jeden Ort eingebunden.

Um nicht nur lokal charakteristische Windstatistiken, sondern räumlich und zeitlich hoch auflösende bodennahe Zeitreihen der Wind- und Ausbreitungsbedingungen zu erhalten, werden über die repräsentativen Cluster und deren langjährigen Häufigkeiten hinaus weitere Informationen zum zeitlichen Ablauf der meteorologischen Antriebssituationen und zur Bestimmung der Ausbreitungsklassen benötigt.

Der um diese Informationen erweiterte Verfahrensablauf ist in der Abbildung 2 als Prinzipskizze dargestellt und wird nachfolgend in seinen einzelnen Schritten erläutert.



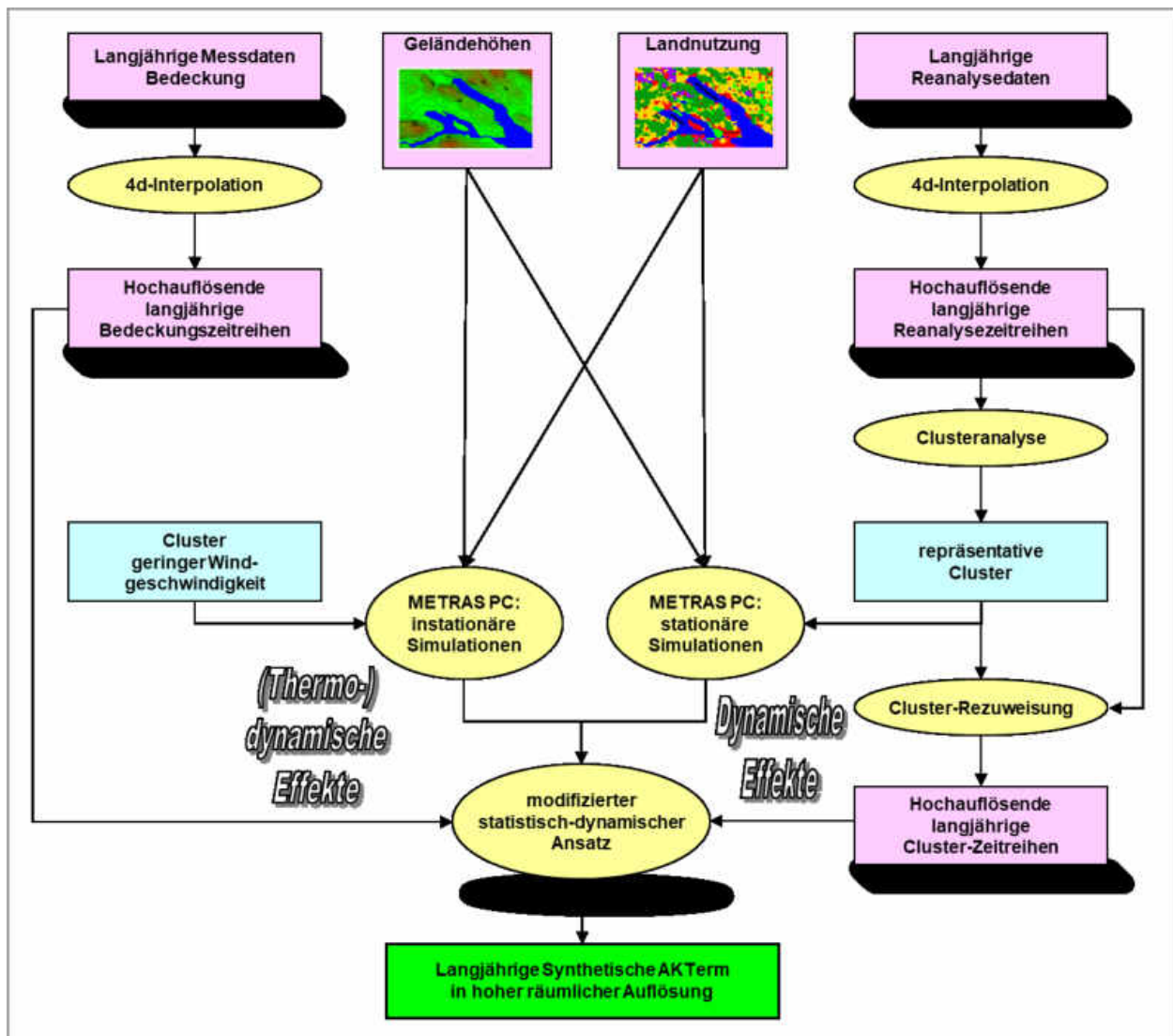


Abbildung 2: Illustration des modifizierten statistisch-dynamischen Verfahrens zur Berechnung synthetischer Ausbreitungsklassenzeitreihen SynAKTerm® (Erläuterungen im Text).

Für die Modellrechnungen direkt benötigt werden räumlich hochauflösende Datensätze der *Geländehöhen* und der *Landnutzungen*.

Aus *langjährigen Reanalysedaten* werden die von der atmosphärischen Grenzschicht unbeeinflussten Windverhältnisse („geostrophischer Wind“) und die atmosphärische Schichtung abgeleitet. Beides wird als Antrieb der prognostischen Modellrechnungen benötigt. Mit einem vierdimensionalen Interpolationsverfahren werden die Reanalysedaten auf die gewünschten räumlichen und zeitlichen Auswertintervalle der bodennahen Ausbreitungszeitreihen interpoliert.

Die so gewonnenen *hochauflösenden, langjährigen Reanalysezeitreihen* werden einer *Clusteranalyse* unterzogen, um charakteristische, *repräsentative Cluster* von Antriebsdaten für die Modellrechnungen zu erhalten. Neben diesen Clustern werden zusätzlich *Cluster geringer*

*Windgeschwindigkeit* definiert, die die übergeordneten Antriebssituationen für thermodynamisch geprägte Lagen charakterisieren.

Für jedes repräsentative Cluster und jedes Cluster geringer Windgeschwindigkeit werden prognostische Modellrechnungen als *stationäre bzw. instationäre Simulationen* durchgeführt. Sie liefern räumlich hochaufgelöste Windfelder, die sich unter den von den Clustern repräsentierten großräumigen Wetterlagen einstellen.

Um nicht nur Windstatistiken, sondern auch Zeitreihen der bodennahen Windverhältnisse bestimmen zu können, werden neben den repräsentativen Clustern auch Informationen zu der zeitlichen Abfolge der großräumigen meteorologischen Situationen benötigt. Eine erneute Durchführung der Clusteranalyse auf Basis der repräsentativen Cluster und langjährigen Reanalysezeitreihen („*Cluster-Rezuweisung*“) führt auf *hochauflösende, langjährige Clusterzeitreihen*, die an jedem Ort und zu jedem Zeitpunkt eine Zuordnung zwischen meteorologischer Antriebssituation und prognostisch simuliertem Bodenwindfeld ermöglichen.

Die aktuell herrschende Ausbreitungsklasse hängt nach VDI 3783 Blatt 6 [31] von Datum, Uhrzeit, Windgeschwindigkeit in 10 m Höhe sowie dem Bedeckungsgrad ab. Folglich müssen zusätzlich zu den Cluster-Zeitreihen auch Informationen über die zeitliche Abfolge der Bedeckungsverhältnisse vorliegen.

Die langjährigen Messdaten der Bedeckung, die an räumlich und zeitlich inhomogen verteilten Stationen vorliegen, werden mit einem vierdimensionalen Interpolationsverfahren auf hochauflösende, langjährige Bedeckungszeitreihen umgerechnet. Dabei ist insbesondere die topographische Lage der Messstation zu berücksichtigen.

Aus den Bedeckungszeitreihen, den Clusterzeitreihen und den prognostisch berechneten Windfeldern lassen sich dann auf Basis des modifizierten statistisch-dynamischen Ansatzes langjährige synthetische Ausbreitungsklassenzeitreihen (SynAKTerm) in hoher räumlicher und zeitlicher Auflösung ableiten.

Für eine langjährige SynAKTerm lässt sich analog zu einer gemessenen AKTerm das repräsentative Jahr gemäß VDI 3783 Blatt 20 [35] bestimmen. Langjährige (in der Regel 10 Jahre) SynAKTerm können auch zu synthetischen Ausbreitungsklassenstatistiken SynAKS gemäß TA Luft [30] zusammengefasst werden.

In den folgenden Abschnitten 2.3 bis 2.6 werden die einzelnen Bausteine des Verfahrens zur Berechnung der synthetischen Ausbreitungsklassenzeitreihen SynAKTerm für Deutschland im Detail erläutert.

Die im Rahmen der Weiterentwicklung durchgeführten Voruntersuchungen zur Festlegung der Verfahrensbausteine sind in dem separaten Kapitel 3 dokumentiert.

## 2.3. Datenbasis

### 2.3.1. Reanalysedaten

Als Datenbasis für die meteorologischen Antriebsdaten der Windfeldmodellierungen wird eine charakteristische großskalige Klimatologie der von direkten Bodeneinflüssen unbeeinflussten unteren Atmosphäre benötigt. Anders als noch vor 20 Jahren, als die Entwicklung der synthetischen Wind- und Ausbreitungsklassenstatistiken begann, liegen inzwischen eine Vielzahl frei verfügbarer Datensätze aus den unterschiedlichsten Quellen vor. In einer vorab durchgeführten Analyse wurden diese Datensätze auf ihre Eignung für den hier vorgesehenen Anwendungszweck hin analysiert (siehe Abschnitt 3.1).

Als Datenbasis zur Berechnung der synthetischen AKTerm in der Version 3.0 wurden die JRA55-Reanalysedaten der Japan Meteorological Agency [19] ausgewählt.

Die JRA55-Reanalysedaten basieren auf einer 4d-Datenassimilation von Messdaten (Bodenmessungen, Radiosonden, Satelliten usw.) in einem globalen Vorhersagemodell, das eine horizontale räumliche Auflösung von ca. 55 km aufweist. Die hier verwendeten JRA55-Reanalysedaten liegen seit 1958 zu täglich vier Terminen (0<sup>00</sup>, 6<sup>00</sup>, 12<sup>00</sup> und 18<sup>00</sup> UTC) auf einem globalen 1,25°-Gitter und allen Hauptdruckniveaus vor. Über Deutschland beträgt der mittlere Abstand zwischen den Stützstellen etwa 90 km in West-Ost- und 140 km in Süd-Nord-Richtung.

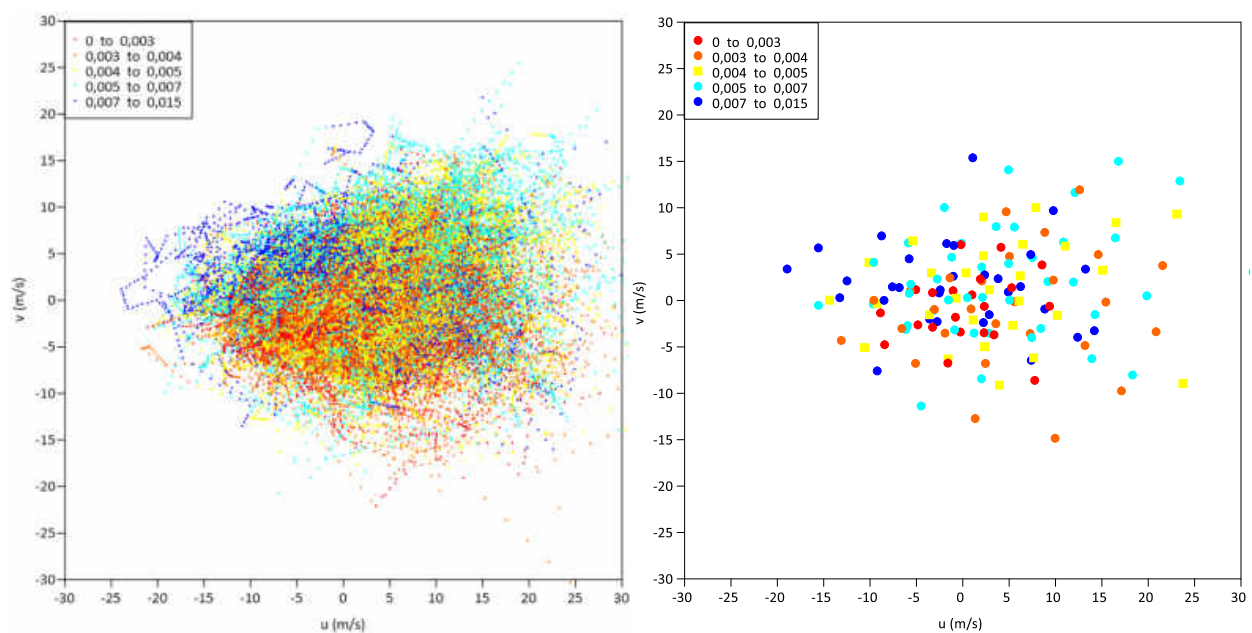
Aus den Reanalysedaten werden im ersten Schritt an allen Stützstellen der in der unteren Grenzschicht vorliegende geostrophische Wind in Betrag und Richtung aus den Druckgradienten in x- und y-Richtung berechnet. Die Umrechnung auf einheitliche Höhe über Grund erfolgt unter Zuhilfenahme der geopotentiellen Höhen der Hauptdruckflächen sowie der Temperaturgradienten zwischen den Druckniveaus. Der charakteristische Temperaturgradient für die Grenzschicht wird aus Geopotential und Temperaturen der Hauptdruckniveaus von 1.000 hPa bis 700 hPa mittels linearer Regression berechnet.

Im zweiten Schritt erfolgt die räumliche und zeitliche Interpolation von geostrophischem Wind und Schichtung auf die zehnjährige stündliche Zeitreihe 2011-2020 und auf ein 500 m-Raster im UTM32-System.

Die JRA55-Reanalysedaten zeigen in ihrer räumlichen Variabilität die Einflüsse überregionaler topographischer Strukturen, wie bspw. der Alpen oder langer Mittelgebirgsketten, wie Böhmer Wald / Oberpfälzer Wald. Regionale topographische Strukturen werden dagegen in den Daten nicht abgebildet. Damit liegt eine geeignete Skalentrennung zwischen den als Antriebsdaten verwendeten Reanalysen und den prognostischen Modellrechnungen mit einer Auflösung von 500 m bei typischen Gebietsgrößen von 100 x 100 km<sup>2</sup> vor.

### 2.3.2. Clusteranalyse

Eine zehnjährige Antriebszeitreihe umfasst knapp über 87.600 meteorologische Situationen, die aufgrund limitierter Rechenressourcen nicht alle simuliert werden können. Daher müssen die 87.600 Situationen mittels einer Clusteranalyse auf eine handhabbare Zahl meteorologischer Situationen reduziert werden, für die dann einzeln Simulationsrechnungen durchgeführt werden. Eine Clusteranalyse funktioniert prinzipiell so, dass alle Datenpunkte, die eine ähnliche meteorologische Situation beschreiben, mithilfe einer gewichteten Mittelung zu einem neuen Datenpunkt zusammengefasst werden. Die Abbildung 3 veranschaulicht diesen prinzipiellen Vorgang.



*Abbildung 3: Beispiel einer Reduzierung von 87.600 Reanalysepunkten auf 150 Clusterpunkte. Jeder Punkt ist durch die geostrophischen Windkomponenten  $u$  und  $v$  ( $x$ - und  $y$ -Achse) und einen Temperaturgradienten (Farbe des Datenpunktes) definiert.*

Auf der linken Seite sind alle Datenpunkte einer zehnjährigen Zeitreihe dargestellt. Jeder Datenpunkt ist definiert durch die beiden Komponenten  $u$  und  $v$  des geostrophischen Windes, die auf den  $x$ - und  $y$ -Achsen aufgetragen sind. Die Farbe eines Datenpunktes entspricht der zugehörigen Temperaturschichtung. Als Ergebnis der Clusteranalyse (rechts) liegen Modellantriebsdaten für eine begrenzte Anzahl meteorologischer Situationen vor, die in ihren statistischen Eigenschaften mit den ursprünglich 87.600 Situationen in guter Näherung übereinstimmen. Diese verdichteten Situationen (Cluster) werden dann mit dem Windfeldmodell simuliert.

Die Clusteranalyse erfolgt mit einem  $k$ -means-Algorithmus prinzipiell in folgenden Schritten:

1. Festlegung der gewünschten Anzahl an Clustern. Für jedes Cluster wird ein zufälliger Clustermittelpunkt festgelegt.
2. Alle Datenpunkte werden demjenigen Cluster zugewiesen, zu dem sie die geringste Distanz aufweisen.
3. Die Clustermittelpunkte werden neu berechnet.
4. Die Schritte 2. und 3. werden solange wiederholt, bis keine Verschiebungen von Datenpunkten in andere Cluster mehr auftreten.

Die euklidische Distanzberechnung zwischen Datenpunkten und Clustermittelpunkten erfolgt im Parameterraum der beiden geostrophischen Windkomponenten und des Temperaturgradienten. Alle Parameter werden auf ein einheitliches Intervall  $[-1,1]$  normiert und gehen gleich gewichtet in die Distanzberechnung ein.

Anhand von Voruntersuchungen (Abschnitt 3.2) konnte festgestellt werden, dass die auf Basis von 150 so genannten äquidistanten Clustern berechneten bodennahen Windstatistiken die gemessenen charakteristischen Windverhältnisse gut wiedergeben. Die Cluster werden dabei unterschieden nach 18 Richtungsklassen, 5 Geschwindigkeits- und 4 Stabilitätsklassen. Für die zehnjährigen Reanalysezeitreihen erfolgt eine Rezuweisung dieser Cluster mit der Methodik der Clusteranalyse auf die ca. 87.600 Datenpunkte. Die prognostischen Modellrechnungen basieren dann auf den 150 häufigsten Clustern der Rezuweisung. Eine deutliche Erhöhung der Clusteranzahl und damit verbunden eine verfeinerte Auflösung der meteorologischen Antriebsituation führt, ebenso wie irregulär verteilte Clusterpunkte, zu keiner nennenswerten Verbesserung in den berechneten Windstatistiken, wie ebenfalls umfangreiche Voruntersuchungen gezeigt haben.

### 2.3.3. Topographie

Neben den meteorologischen Antriebsdaten müssen für die Modellrechnungen Topographiedaten, d.h. die Geländehöhen und die Landnutzungen, bereitgestellt werden. Hierfür werden die mit METRAS-PCL [28] auf einem 30 m-Raster bereitgestellten Geländehöhen aus dem EU-DEM Copernicus Land Monitoring Service genutzt. Über METRAS-PCL steht ebenfalls ein Datensatz der Oberflächenbedeckung auf Basis des LBM-DE 2012 zur Verfügung [28]. Dieser Datensatz weist eine Auflösung von rund 10 m auf.

Die mit METRAS-PCL ausgelieferten Topographiedaten decken nur Deutschland ab. Die prognostischen Modellgebiete reichen jedoch weit über die Gebiete hinaus, in denen die SynAKTerm berechnet werden, so dass auch Topographiedaten aus dem benachbarten Ausland benötigt werden. Für diese Auslandsbereiche mit geringeren Genauigkeitsansprüchen werden die CORINE-Landnutzungsdaten [10] und Geländehöhen aus dem GlobDEM50-Datensatz [21] verwendet.

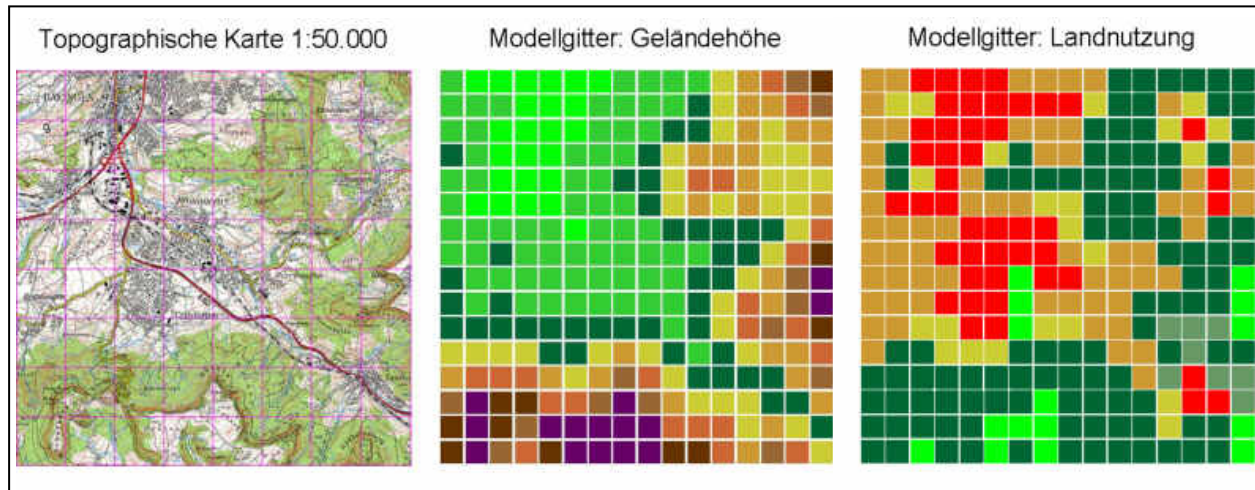


Abbildung 4: Abbildung der realen topographischen Verhältnisse (links) auf mittlere Geländehöhen (Mitte) und Landnutzungen (rechts) in jeder Modell-Gitterzelle.

Die Abbildung 4 zeigt beispielhaft für einen Gebietsausschnitt einer topographischen Karte, wie die realen Verhältnisse unter Verwendung gerasterter Topographiedaten auf ein ebenfalls gerastertes Modellgitter abgebildet werden. Bei den Modellrechnungen wird das einzelne Rechengebiet in einheitliche Gitterzellen von  $500 \times 500 \text{ m}^2$  Grundfläche aufgeteilt. Innerhalb jeder Gitterzelle „sieht“ das Modell nur eine mittlere Geländehöhe und die prozentualen Anteile der verschiedenen Landnutzungskategorien (Wasser, Wiese, Acker, Wald, Bebauung, usw.). Alle räumlichen Differenzierungen innerhalb einer Gitterzelle werden vom Modell nicht aufgelöst und deshalb in ihrer Wirkung auf die Strömungsverhältnisse auch nicht berücksichtigt. Dies ist für die Anwendung synthetischer Wind- und Ausbreitungsklassenstatistiken von großer Wichtigkeit und bedeutet z. B., dass ein Tal mindestens eine Breite von 500 m aufweisen muss, um näherungsweise auf dem Gitter abgebildet werden zu können. In der mittleren Abbildung ist das niedrige Gelände grün dargestellt, Höhenzüge sind braun und violett. Das nach Südosten verlaufende Tal wird von dem Modellraster gerade noch aufgelöst. Die Ortschaften heben sich auf dem Modellgitter als überwiegend bebaute Bereiche rot ab (rechts), landwirtschaftliche Flächen sind braun, Wälder in unterschiedlichen Grüntönen zu erkennen.

#### 2.3.4. Bedeckung

Der Bedeckungsgrad ist neben Windgeschwindigkeit, Datum, Uhrzeit und geographischer Lage eine notwendige Eingangsgröße zur Berechnung der Ausbreitungsklasse nach Klug-Manier [31].

Aus dem Datennetz des Deutschen Wetterdienstes liegen im Climate Data Center (CDC) unter <https://cdc.dwd.de/portal/> frei verfügbar Bedeckungsdaten von knapp 600 Stationen vor. Diese Stationen

- liegen unregelmäßig verteilt über Deutschland,
- sind (mehrfach) verlegt worden, auch im Zeitraum 2011 – 2020,

- unterscheiden sich in den Messzeiträumen und überlappen nur z.T. mit 2011-2020,
- haben unterschiedliche Messintervalle (stündlich, mehrstündlich, ganztägig, nur tags, etc.) und
- weisen unregelmäßige Datenlücken auf.

Die räumlich und zeitlich inhomogenen Bedeckungsdaten werden in einem mehrstufigen Verfahren auf stündliche Zeitreihen in einem 500 m-Raster im UTM-System umgerechnet.

Dazu wird in einem ersten Schritt geprüft, ob es an den Stationen Verlegungen gegeben hat. Ggf. werden die Messreihen in separate Reihen je Stationskoordinate aufgesplittet.

In einem zweiten Schritt werden die Datenreihen an jeder Station bzw. Stationskoordinate zeitlich homogenisiert. Datenlücken von bis zu 6 Stunden aufgrund von Messausfällen und / oder von nur mehrstündigen Messintervallen werden durch lineare Interpolation aufgefüllt. Das Auffüllen von Datenlücken ist plausibel, solange sich die Bewölkungssituation nicht schlagartig bzw. innerhalb eines kurzen Zeitraums markant ändert. In unseren Breiten stellt sich die Wetterlage im Mittel alle 4 Tage um. Allerdings kommt es auch in kürzeren Abständen zu markanten Änderungen der Bewölkung, bspw. beim Durchzug von Fronten oder insbesondere im Sommer im Laufe des Tages durch Konvektion. Ein 6-stündiger Zeitraum zum Auffüllen von Lücken scheint in diesem Kontext gerade noch vertretbar zu sein.

Schließlich erfolgt die raumzeitliche Interpolation auf ein 500 m-Raster im UTM-System. Die Interpolation erfolgt je Rasterpunkt und Stunde separat. Dabei werden zwei Interpolationsansätze miteinander kombiniert:

1. Die Bewölkung ist markant von der topographischen Lage und der Höhe über NHN abhängig. In Regionen mit großen Höhenunterschieden kann die Bedeckung auch kleinräumig stark variieren. Die Abhängigkeit der Bedeckung von der Höhe über NHN wird deshalb mittels linearer Regression bestimmt. Für die lineare Regression gibt es folgende Mindestanforderungen:
  - Mindestens 4 Stationen liegen in einem maximalen Suchradius um den Ziel-Rasterpunkt.
  - Zwischen niedrigster und höchstgelegener Station besteht eine Höhendifferenz von mindestens 100 m.
  - Es werden maximal die 10 nächstgelegenen Stationen innerhalb des Suchradius verwendet.
2. Als zweiter Interpolationsalgorithmus wird eine  $1/r^2$ -Interpolation verwendet. Dabei gehen maximal die 5 nächstgelegenen Stationen innerhalb eines maximalen Suchradius um den Ziel-Rasterpunkt in die Interpolation ein.

Zwischen beiden Interpolationsverfahren wird je Ziel-Rasterpunkt und Stunde nach folgenden Kriterien entschieden:

- Liegt die nächstgelegene Station weniger als 500 m vom Ziel-Rasterpunkt entfernt, so wird deren Bedeckungsgrad direkt ohne Interpolation verwendet.
- Ist das Bestimmtheitsmaß der linearen Regression größer als 0,8, so wird nur mittels linearer Regression auf die Höhe des Ziel-Rasterpunktes interpoliert.
- Ist das Bestimmtheitsmaß der linearen Regression kleiner als 0,3, so wird nur mittels  $1/r^2$ -Interpolation auf den Ziel-Rasterpunkt interpoliert.
- Liegt das Bestimmtheitsmaß zwischen 0,3 und 0,8, so werden die Ergebnisse der beiden Interpolationsansätze gewichtet gemittelt:  $N_{UTM} = R^2 * N_{LR} + (1-R^2) * N_{rint}$ . Dabei ist N der Bedeckungsgrad, R das Bestimmtheitsmaß der linearen Regression („LR“) und „rint“ kennzeichnet die  $1/r^2$ -Interpolation.

Der maximale Suchradius wird auf 300 km gesetzt, um auch im Extremfall ausreichend Messstationen zu finden. Da maximal 10 bzw. 5 Stationen in die Interpolation eingehen, wird dieser Suchradius in aller Regel nicht ausgenutzt.

## 2.4. Modell METRAS-PC

Basis für die synthetischen Ausbreitungsklassenzeitreihen bilden Modellrechnungen mit dem prognostischen nicht-hydrostatischen Strömungsmodell METRAS-PC<sup>3</sup>. Das Modell zählt zu der Klasse der mesoskaligen prognostischen nicht-hydrostatischen Strömungsmodelle. Es handelt sich um eine frei verfügbare Version des an der Universität Hamburg entwickelten wissenschaftlichen Modells METRAS [24], [23], [27]. Die Auswahl der Modellversion erfolgte anhand der in Abschnitt 3.3 beschriebenen Voruntersuchungen.

METRAS-PC beruht auf den grundlegenden atmosphärischen Zustandsgleichungen, wie z.B. den Bewegungsgleichungen, dem ersten Hauptsatz der Thermodynamik und der Kontinuitätsgleichung. Das Modellgebiet wird mit einem dreidimensionalen Maschennetz von Gitterpunkten überzogen (Arakawa-C-Gitter). An jedem dieser Gitterpunkte werden die Modellgleichungen numerisch gelöst. Die Randbedingungen sind numerisch so formuliert, dass sich die Strömung an allen Rändern des Modellgebietes frei einstellen kann. Damit werden Einflüsse der Ränder auf die Berechnungsergebnisse im Modellinnern minimiert.

---

<sup>3</sup> METRAS PC wurde gemeinsam von Dr. K.H. Schlünzen, S. Dierer, H. Pankus (Meteorologisches Institut, Universität Hamburg) und Dr. K. Bigalke (METCON Umweltmeteorologische Beratung, Pinneberg) im Auftrag des Umweltbundesamtes im FE Projekt 104 04 354 aufbauend auf dem Modell METRAS entwickelt.“



In das Modell geht die großräumige meteorologische Situation über den Druckgradienten bzw. den geostrophischen Wind und die atmosphärische Stabilität ein. Weitere Eingangsdaten sind die Geländehöhen und Flächennutzungen sowie die geographische Lage.

Im stationären Simulationsmodus berechnet METRAS-PC dreidimensionale Windfelder, wie sie sich im dynamischen Gleichgewicht unter den topographischen Gegebenheiten (Gelände relief, Landnutzung) und den großräumigen meteorologischen Bedingungen einstellen (Abbildung 5). Im instationären Simulationsmodus werden zusätzlich die zeitabhängigen Energieflüsse am Boden berücksichtigt. In diesem Modus werden thermische Windsysteme, Temperatur und Feuchte sowie weitere diagnostisch abgeleitete Größen berechnet.

Aufgrund der umfassenden Modellphysik können mit METRAS-PC alle auf der regionalen Skala relevanten Prozesse realitätsnah berechnet werden. Die horizontale räumliche Auflösung liegt typischerweise zwischen 50 m und 1 km, die typische vertikale Auflösung bei 20 m bodennah bis 1 km am Modelloberrand. Das Modellgitter kann in alle Raumrichtungen nicht-äquidistant gewählt werden.

Die Ergebnisgüte des Modells ist in einer Reihe von Veröffentlichungen dokumentiert, z.B. in [11], [20], [25], [26].

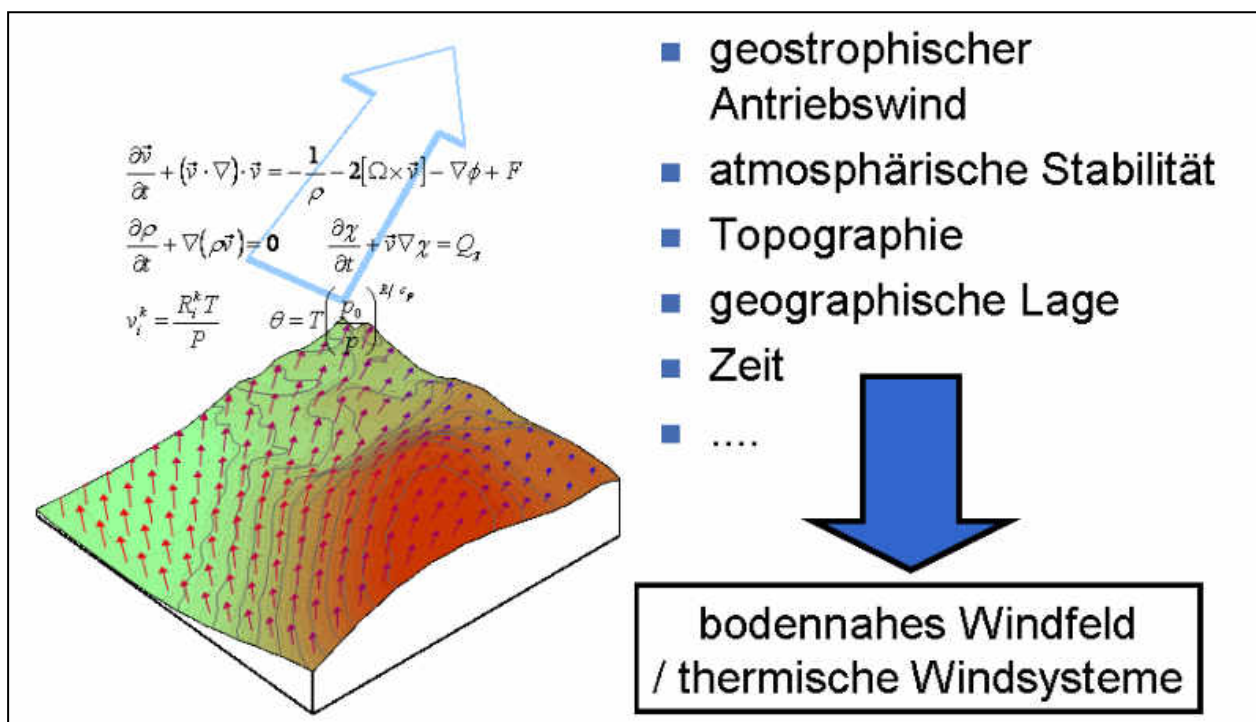


Abbildung 5: Auf Basis der physikalischen Gesetze für die Atmosphäre und Daten zum Modellgebiet und der großräumigen meteorologischen Situation berechnet METRAS-PC die bodennahen Windsysteme.

## 2.5. Prognostische Windfeldberechnungen

### 2.5.1. Modellgebiete und Testrechnungen

Bei numerischen Berechnungen sind die seitlichen Ränder eines Modellgebietes ebenso wie der obere Rand künstliche Ränder ohne Entsprechung in der Natur. Obwohl die seitlichen Randbedingungen in METRAS-PC als so genannte „offene Ränder“ implementiert sind und sich die Strömungsverhältnisse dort weitgehend frei einstellen können, sollten Modellergebnisse in Randnähe nicht interpretiert werden, da sie aufgrund numerischer Einflüsse unrealistische Verhältnisse widerspiegeln können. Hinzu kommt, dass die realen Verhältnisse im Untersuchungsgebiet auch von topographischen Einflüssen außerhalb über mehr oder weniger große Entfernungen beeinflusst sein können. Diese Einflüsse können von METRAS-PC nur berücksichtigt werden, wenn die entsprechenden Geländestrukturen im Modellgebiet enthalten sind.

Trotz heutzutage sehr leistungsfähiger Rechner ist bei einer Auflösung von 500 x 500 m<sup>2</sup> die Anzahl der Gitterpunkte, die mit einem vertretbaren Rechenaufwand berechnet werden können, beschränkt. Unter anderem aus diesem Grund ist es notwendig, die Berechnungen der synthetischen Ausbreitungsklassenzeitreihen auf einzelne Teilgebiete aufzuteilen. Die Modellgitter jedes einzelnen Teilgebietes sind horizontal äquidistant mit einer Gitterweite von 500 m. Der Modelloberrand liegt in ca. 12 km Höhe. Die vertikale Gitterauflösung reicht von 20 m bodennah bis zu 1 km am Modelloberrand.

Allerdings ist das eigentliche Rechengebiet deutlich größer zu wählen, da die Einflüsse topographischer Strukturen außerhalb des Teilgebietes auf das Strömungsfeld innerhalb des Teilgebietes möglichst realistisch erfasst werden müssen. Grundsätzlich sind deshalb vorab für jedes einzelne Teilgebiet Testrechnungen zur Festlegung der erforderlichen Rechengebietsgröße erforderlich. Dabei wird anhand von unterschiedlich großen Rechengebieten und den individuellen meteorologischen Initialisierungsdaten für das jeweilige Teilgebiet für unterschiedliche Cluster untersucht, welches Modellgebiet zu einer möglichst realitätsnahen Darstellung der Verhältnisse im eigentlichen Untersuchungsgebiet (Teilgebiet) geeignet ist.

Aus den langjährigen Entwicklungsarbeiten zur vorherigen Version 2.0 der Syn(Rep)AKTerm lagen bereits umfangreiche Erfahrungen zu den Wechselwirkungen zwischen Teilgebietsgrößen, Rechengebietsgrößen und regionalen topographischen Strukturen in weiten Teilen Deutschlands vor. Auf Basis dieser Erfahrungen wurde entschieden, alle Teilgebiete mit einer Randzugabe von mindestens 52 km zu allen Seiten zu rechnen. Bei Teilgebietsgrößen von (in der Regel) 150 x 150 km<sup>2</sup> weisen die Rechengebiete dann Mindestgrößen von mindestens 254 x 254 km<sup>2</sup> auf. Schneiden die so zugeschnittenen Modellgebiete Geländestrukturen ungünstig, z. B. weil ein

Rand entlang einer Gipfelkette verläuft, so werden die Modellgebiete geeignet erweitert, im Einzelfall ggf. auch geringfügig verkleinert.

Die Teilgebiete werden zuzüglich einer umlaufenden Randzugabe von 2 km äquidistant mit 500 m aufgelöst. Außerhalb wächst die Gitterweite je Gitterpunkt um maximal 20 % bis zu einer maximalen Gitterweite von 2 km an. Das Aspektverhältnis ist also immer kleiner oder gleich 1:4. Zwischen den Teilgebieten liegen jeweils 2,5 km breite Randstreifen, in denen die synthetischen Ausbreitungsklassenzeitreihen unter Einbeziehung der prognostischen Windfelder aller benachbarten Gebiete berechnet werden.

Um numerische Einflüsse und solche aufgrund des Aspektverhältnisses von 1:4 vom Rand her zu minimieren, werden die Geländehöhen im Modellgitter gemäß VDI 3783 Blatt 16 [34] gefiltert. In der Abbildung 6 ist links ein Modellgebiet mit unveränderten Geländehöhen und rechts mit den gefilterten Geländehöhen dargestellt.

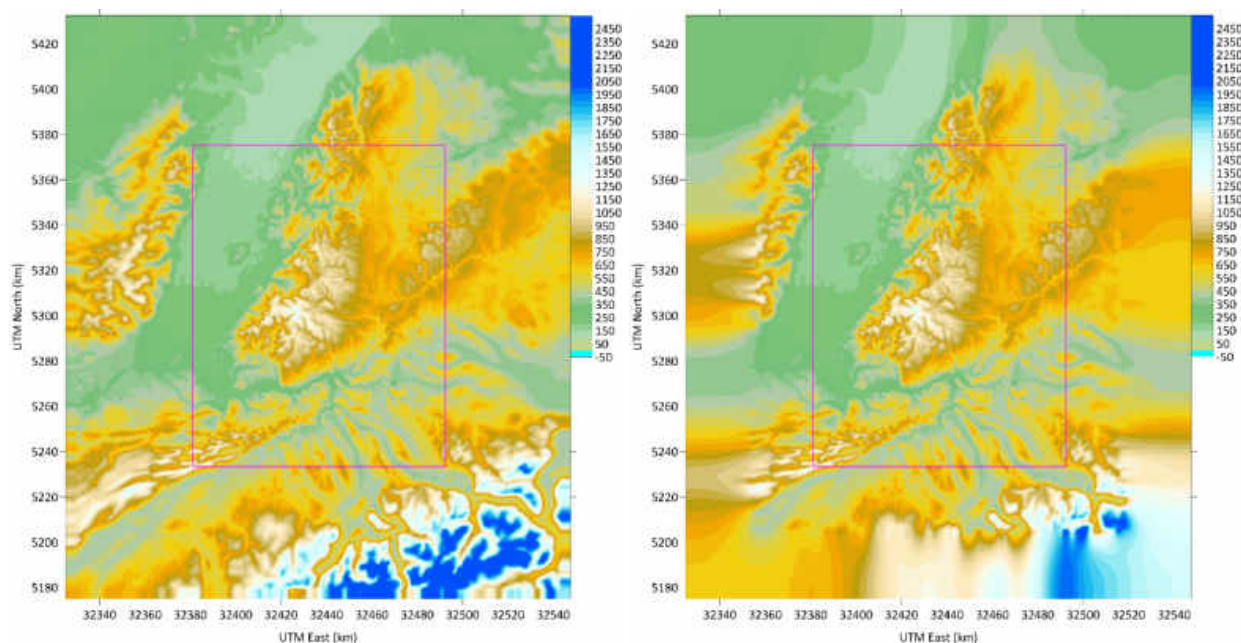


Abbildung 6: Geländehöhen im Rechengebiet und Teilgebiet (magenta) ungefiltert (links) und gefiltert (rechts).

## 2.5.2. Produktionsrechnungen

Für jedes der 150 Cluster eines jeden Teilgebietes wird eine Modellrechnung unter Berücksichtigung der dynamischen Einflüsse des Geländes (Rauigkeit, Relief) und der großräumigen Wetterlage durchgeführt. Die Simulationszeit wird so gewählt, dass sich näherungsweise stationäre Strömungsverhältnisse im Modellgebiet einstellen. Abhängig von der atmosphärischen Schichtung sowie Anströmrichtung und -geschwindigkeit sind zum Einstellen quasistationärer Verhältnisse im Modellgebiet häufig Simulationszeiträume von mehreren Stunden nötig. In die Berechnung der synthetischen Ausbreitungsklassenzeitreihen gehen jeweils

halbstündig gemittelte Windfelder zum Ende des Simulationszeitraums ein. Über das Erreichen näherungsweise stationärer Verhältnisse wird aus fachlicher Erfahrung anhand der Visualisierung der simulierten Windfelder in ihrem zeitlichen und räumlichen Verlauf entschieden.

Die Clusterdaten für Simulationsrechnungen eines Teilgebietes werden, wie in Abschnitt 2.3.2 erläutert, mit der Clusteranalyse aus der JRA55-Reanalysezeitreihe 2011-2020 etwa im Mittelpunkt des Teilgebietes abgeleitet. Jedes der 150 Cluster je Teilgebiet enthält einen charakteristischen Antriebssatz, bestehend aus geostrophischen Windkomponenten und potentielltem Temperaturgradienten innerhalb der Grenzschicht. Oberhalb der Grenzschicht, die bei ca. 1.500 m über Grund angesetzt wird, wird bis zum Modelloberrand immer der potentielle Temperaturgradient der Standardatmosphäre (0,35 K/100 m) angesetzt.

Ein Beispiel eines mit METRAS-PC berechneten bodennahen Windfeldes ist in der Abbildung 7 gegeben. Es handelt sich hier um den Hochschwarzwald mit dem Rheintal im Westen und Süden sowie Schweizer Jura im Südwesten. Gezeigt ist eine Anströmung mit einem schwachen Höhenwind aus Westen bei leicht stabil geschichteter Atmosphäre. Die Lenkung des bodennahen Windes durch das Gelände ist überall deutlich zu sehen. Im Rheintal weht durchgehend mehr oder weniger ein Südwind, der zwischen Kaiserstuhl und Schwarzwald auf Südsüdost kanalisiert und beschleunigt wird. Über dem Hochschwarzwald liegt die eher ungestörte Höhenwindströmung vor. In den Tälern des Schwarzwaldes und der Schweizer Gebirgszüge liegen überwiegend Kanalisierungen in Richtung der jeweiligen Talachsen vor. Dabei kann es lokal auch zu bodennahen Winden kommen, die der ungestörten Anströmrichtung entgegengesetzt sind, so beispielsweise im Rheintal bei Basel.

Alle in der Abbildung 7 sichtbaren Effekte auf das bodennahe Windfeld sind rein dynamischer Natur, d.h. auf die Wirkung des Geländereiefs und die unterschiedliche Bodenrauigkeit durch Bewuchs und Bebauung zurückzuführen. Neben diesen dynamischen Strömungseinflüssen werden in den synthetischen Ausbreitungsklassenzeitreihen auch nächtliche Kaltluftwindssysteme durch eine beschränkte Anzahl instationärer, thermodynamischer Modellrechnungen berücksichtigt. Hierzu werden je Teilgebiet eine Modellrechnung ohne einen großräumigen Wind und zwölf Rechnungen mit einem schwachen großräumigen Wind aus den Richtungen 0°, 30°, 60° usw. bis 330° durchgeführt. Alle Rechnungen werden für einen 1. August um 1800 WOZ unter Annahme einer bis 1.800 m Höhe durchmischten (neutralen) Grenzschicht und einer darüber liegenden Standardatmosphäre gestartet und über 12 Stunden Simulationszeit durchgeführt.

Die quasi-stationären thermodynamischen Windsysteme bilden sich typischerweise in den späten Abendstunden aus und halten dann für mehrere Stunden an. In die synthetischen Ausbreitungsklassenzeitreihen gehen jeweils Strömungsfelder aus diesem quasi-stationären Zustand ein. Ein Beispiel eines solchen nächtlichen Windsystems zeigt die Abbildung 8. Im Schwarzwald findet man in den sehr heterogenen Strömungsstrukturen überwiegend von den

Bergen in die Täler wehende Winde. Dort organisieren sich die zusammenlaufenden Strömungen talabwärts (Bergwinde). Markant tritt bei Freiburg die aus dem Dreisamtal austretende Strömung hervor. Dieser nächtliche und oft sehr kräftige Bergwind ist dort als der „Höllentäler“ bekannt. Im Rheintal treffen die vom Schwarzwald und aus den Vogesen wehenden Bergwinde aufeinander und konvergieren zu einem Südwind.

Die beiden Beispiele zeigen, dass mit METRAS-PC sowohl die dynamisch bedingten und von steilem Geländere relief ausgelösten Strömungscharakteristiken (z.B. Kanalisierungen, Nachlaufzonen, Wirbel) als auch thermodynamische Windsysteme (z.B. Kaltluft, Berg-Tal-Winde) wiedergegeben werden. Sie spiegeln sich deshalb auch in den synthetischen Ausbreitungsklassenzeitreihen wider.

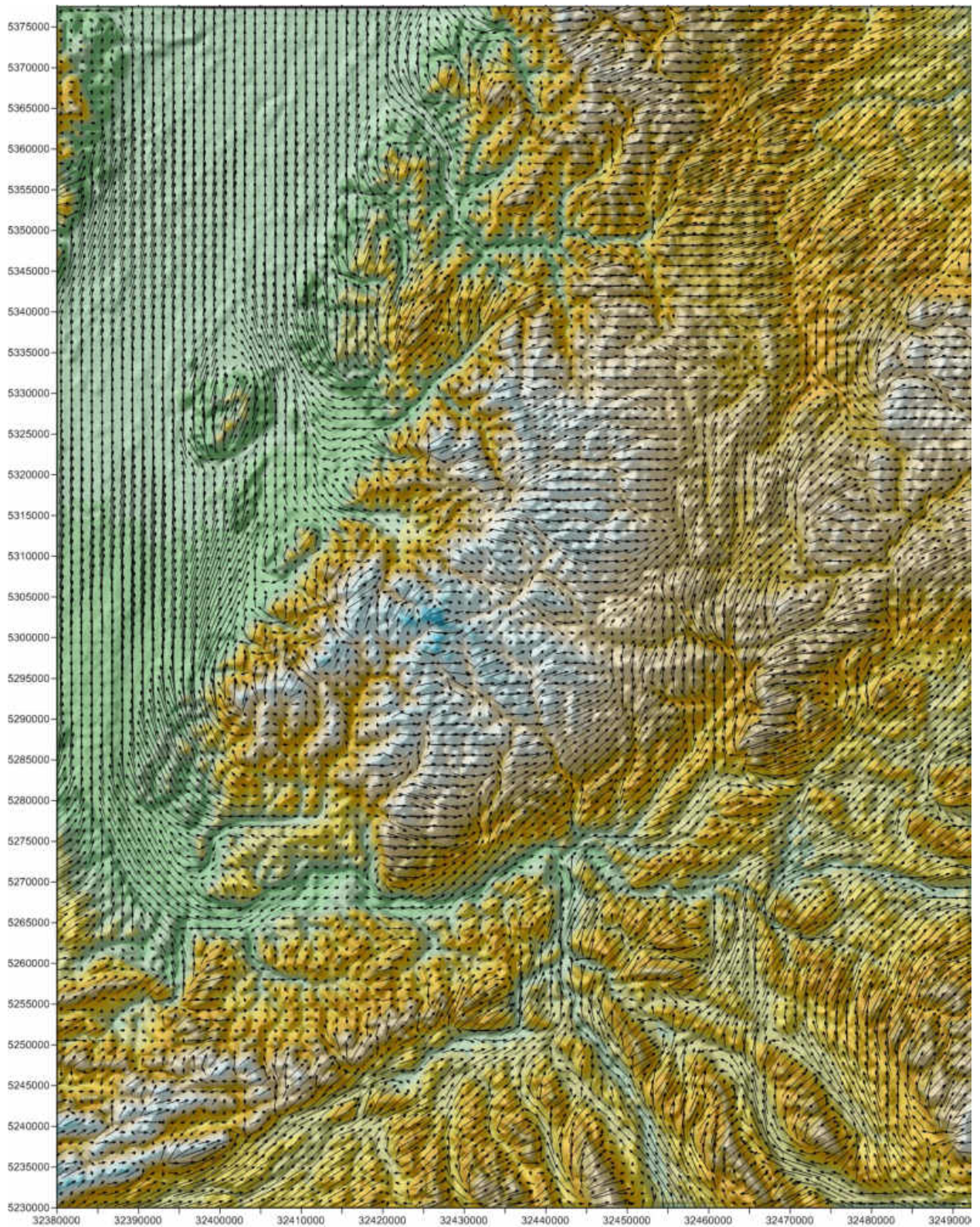


Abbildung 7: Beispiel für ein mit METRAS-PC berechnetes bodennahes Windfeld im Bereich Schwarzwald / Rheintal bei leicht stabil geschichteter Atmosphäre und schwachem geostrophischen Wind aus Westen (Achsenbeschriftung UTM-Koordinaten).

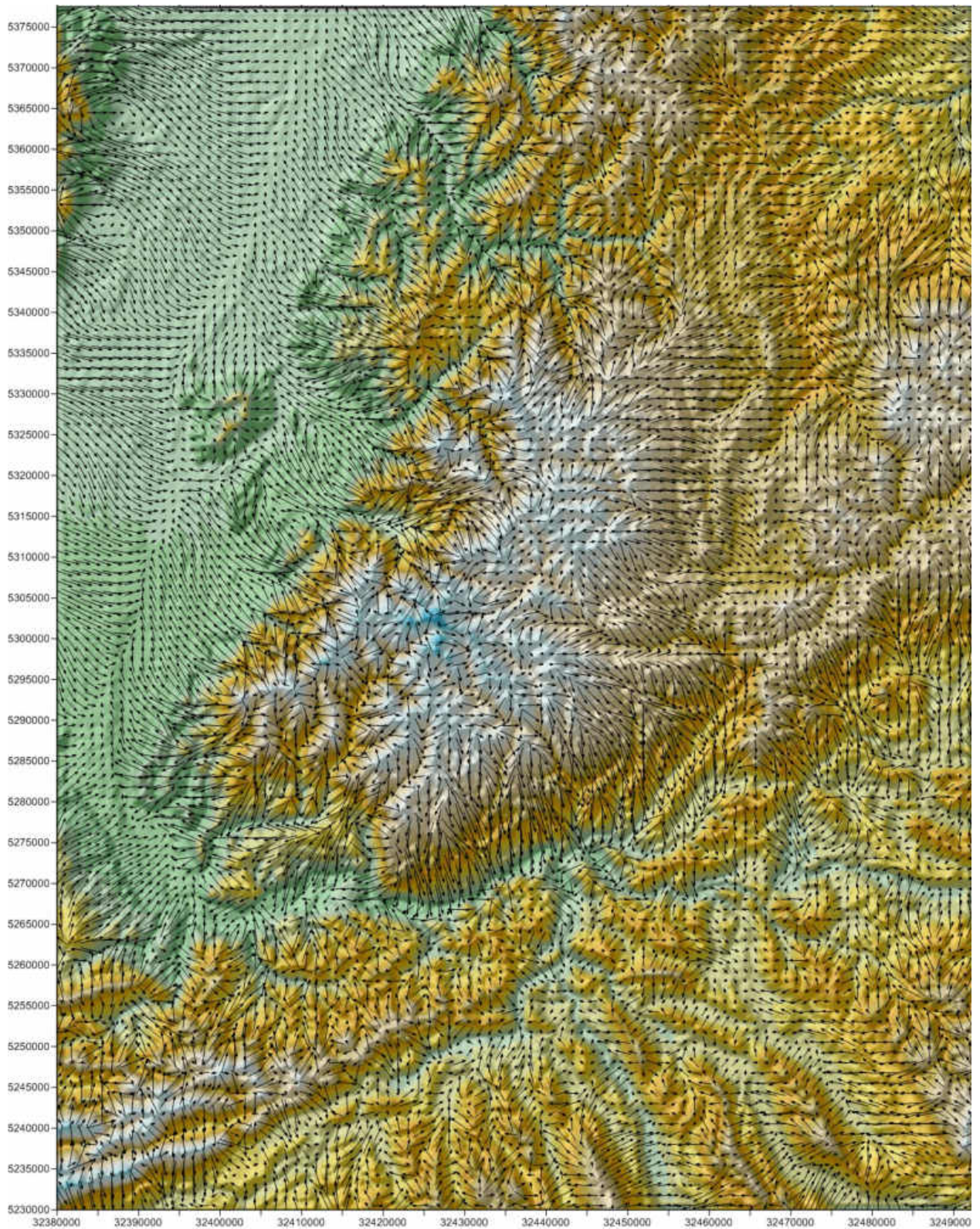


Abbildung 8: Beispiel für ein mit METRAS-PC um Mitternacht berechnetes bodennahes thermisches Windsystem ohne übergeordneten Wind (Achsenbeschriftung UTM-Koordinaten).

## 2.6. Berechnung der synthetischen Ausbreitungsklassenzeitreihen

Die synthetisch repräsentativen Ausbreitungsklassenzeitreihen werden aus den dynamischen und thermodynamischen Modellrechnungen nach dem in Abschnitt 2.2 skizzierten Verfahrenskonzept in den nachfolgend beschriebenen Schritten abgeleitet. Berechnungsbasis sind neben den Ergebnissen der Modellrechnungen die an jedem Berechnungspunkt im 500 m-Raster vorliegenden Reanalyse- und Bedeckungszeitreihen (Abschnitte 2.3.1 und 2.3.4).

Die hochaufgelöst vorliegenden Reanalysezeitreihen werden stundenweise an jedem Rasterpunkt abgearbeitet. Zunächst wird mit der Methodik der Rezuweisung aus der Clusteranalyse der aktuellen Stunde eines der 150 berechneten „dynamischen“ Cluster zugeordnet. Aus dem jeweils rezugewiesenen Cluster der stationären Modellläufe geht die an jedem Gitterpunkt in ca. 10 m ü. Gr.<sup>4</sup> berechnete Windgeschwindigkeit und Windrichtung in die synthetische Ausbreitungsklassenzeitreihe für diesen Ortspunkt ein. Zusätzlich wird die berechnete Windgeschwindigkeit mit einem Faktor umskaliert, der dem Verhältnis der Geschwindigkeiten von Reanalysezeitreihe zu Cluster entspricht. Die Ausbreitungsklasse ergibt sich gemäß [31] aus der korrigierten bodennahen Windgeschwindigkeit am Gitterpunkt, dem (synthetischen) Bedeckungsgrad sowie dem aktuellen Datum und der Uhrzeit.

In schwachwindigen Nächten bilden sich lokale Kaltluftsysteme bzw. Berg-Talwind-Systeme aus. Im Mittel über das Jahr können diese über bis zu acht Nachtstunden dominant sein. Abhängig von der im Cluster berechneten Windgeschwindigkeit wird bei mindestens drei Stunden durchgehend vorliegenden stabilen Ausbreitungsklassen davon ausgegangen, dass ein lokales Kaltluftsystem vorliegt. Unter diesen Voraussetzungen wird der mit dem stationären Modellauf berechnete Wind mit einer Wahrscheinlichkeit von 50 % durch die Ergebnisse der thermodynamischen Rechnungen ersetzt. Die Ersetzung wird über eine gleichverteilte Zufallszahl gesteuert. Der Wind wird, ebenfalls zufallsgesteuert, zur Hälfte durch das Ergebnis der Rechnung ohne großräumigen Wind und zur Hälfte durch die Rechnung, deren großräumige Windrichtung (mit 1 m/s) der großräumigen Windrichtung des gerade betrachteten Clusters entspricht, ersetzt. Abschließend wird das natürliche Mäandern der Windrichtung in der synthetisch gewonnenen Ausbreitungsklassenzeitreihe durch zufällige Änderung der berechneten Windrichtung auf eine benachbarte Windrichtung mithilfe einer gaußverteilten Wahrscheinlichkeitsfunktion angenähert.

Wie im Abschnitt 2.5.1 erläutert, haben die Teilgebiete eine Größe von ca. 150 x 150 km<sup>2</sup>. Um die Fläche von Deutschland oder allgemein größere Regionen abzudecken, müssen eine Vielzahl von Teilgebieten gerechnet werden. Da für jedes Teilgebiet jeweils eigene charakteristische

---

<sup>4</sup> Der vom Modell berechnete Wind gilt etwa in 10 m über der Verdrängungshöhe, die von der Rauigkeit der Landnutzung abhängt.



Sätze an Clustern bestimmt werden, liegen in den überlappenden Bereichen ggf. mehrere Sätze an Modellrechnungen vor, die in der Auswertung sinnvoll miteinander zu kombinieren sind.

Vorab wird jedem der 500 m-Rasterpunkte ein eigener Satz an Wichtungsfaktoren zugewiesen. Diese Faktoren entscheiden darüber, mit welchen Gewichten die in unterschiedlichen benachbarten Teilgebieten berechneten Cluster und deren Windfelder am jeweiligen Punkt in die synthetische Ausbreitungsklassenzeitreihe eingehen. Die Summe aller Wichtungsfaktoren ist an jedem Rasterpunkt eins. Im Inneren eines Teilgebietes ist das eigene Gewicht dieses Teilgebiets eins, zu den Rändern hin nimmt das eigene Gewicht zugunsten der Gewichte benachbarter Teilgebiete ab. Sowohl die dynamisch als auch die thermodynamisch dominierten Windfelder werden aus den Ergebnissen aller benachbarten Teilgebiete entsprechend gewichtet aufsummiert.

Im Normalfall liegen die Ergebnisse der prognostisch berechneten Windfelder genau an den 500 m-Rasterpunkten vor. In Randbereichen oder im Übergang zwischen verschiedenen UTM-Zonen kann es zu räumlichen Verschiebungen zwischen den Rasterpunkten und den Berechnungspunkten der prognostischen Windfeldberechnungen kommen. In solchen Fällen werden die Windfelder vor der gewichteten Mittelbildung einer  $1/r^2$ -Interpolation auf die Rasterpunkte unterzogen.

### 3. Voruntersuchungen

Im einführenden Kapitel 1 ist die Notwendigkeit und die Zielsetzung der Weiterentwicklung der synthetischen Ausbreitungsklassenzeitreihen auf eine neue Version 3.0 erläutert worden. Neben der Fortschreibung auf den aktuelleren Bezugszeitraum 2011 - 2020 wurde auch geprüft, inwieweit die Berechnung sich auch auf neue oder alternative Datensätze stützen kann.

Die Verwendung der neuen Gelände- und Landnutzungsdaten (Abschnitt 2.3.3) ist in jedem Fall sinnvoll, da es sich hier einerseits um aktuellere und somit den Bezugszeitraum besser repräsentierende Daten und andererseits um räumlich besser auflösende Daten handelt als sie für die Version 2.0 verwendet wurden.

Auch der Nutzung der Bedeckungsdaten von den Messstationen des Deutschen Wetterdienstes ist grundsätzlich der Vorzug zu geben gegenüber den für die Version 2.0 noch verwendeten klimatologischen Mittelwerten in ihrer jahres- und tageszeitlichen Verteilung.

Fraglich war dagegen, welchen der inzwischen verfügbaren Reanalysedaten der Vorzug zu geben ist und welche Anzahl und Verteilung an Clustern unter Abwägung zwischen Ressourcenaufwand und Qualitätsgewinn genutzt werden soll. Auch sollte untersucht werden, ob die neue Modellversion METRAS-PCL zu qualitativ hochwertigeren synthetischen Ausbreitungsklassenzeitreihen führt als die vorherige Version METRAS-PC. Die zu den einzelnen Punkten durchgeführten Voruntersuchungen werden in den nachfolgenden Abschnitten zusammengefasst.

#### 3.1. Auswahl Reanalysedaten

Im Vergleich zu Anfang der 2000-er Jahre, als die ersten synthetischen Datensätze entwickelt wurden, stehen heute eine Vielzahl globaler und auch regionaler Reanalysedatensätze zur Verfügung, die vor allem im Rahmen der Klimaforschung gewonnen werden. Viele davon sind frei verfügbar. Hervorzuheben sind vor allem Datensätze amerikanischer (NOAA, NCEP, ...), japanischer (JMA) und europäischer (ECMWF, DWD, DKRZ) Forschungsinstitute und Wetterdienste.

Regionale Datensätze beruhen auf dem Downscaling globaler Datensätze mithilfe höher auflösender Modelle. Die räumliche Auflösung der regionalen Datensätze reicht inzwischen bis auf wenige Kilometer herunter.

Eine besonders hohe Auflösung von Reanalysedaten als Antriebsdaten ist für die Berechnung der SynAKTerm nicht unbedingt von Vorteil. Eine wesentliche Voraussetzung zur Berechnung qualitativ hochwertiger SynAKTerm mittels statistisch-dynamischen Downscalings ist die Verwendung von Antriebsdaten, die topographisch weitgehend ungestört sind. Erst die prognostischen Modellrechnungen sollen den Einfluss der regionalen und lokalen

topographischen Gegebenheiten auf die lokalen Windverhältnisse abbilden. Wie wichtig dieses Grundprinzip für die Qualität der synthetischen Daten ist, wurde schon in den ersten Projekten (2001-2002) herausgearbeitet. Es gilt, dass die Antriebsdaten nur solche topographischen Effekte beinhalten dürfen, die von den prognostischen Modellrechnungen nicht aufgelöst werden können und umgekehrt. Bspw. sollten bei einem prognostischen Modellgebiet von 100 x 100 km<sup>2</sup> im Südwesten Deutschlands die Antriebsdaten den überregionalen Effekt der Alpen beinhalten, nicht aber die Umströmung des Südschwarzwaldes. Deshalb muss bei der Auswahl geeigneter Reanalysedaten auf eine saubere Skalentrennung zu dem prognostischen mesoskaligen Modell geachtet werden.

Darüber hinaus entspricht die nominelle Auflösung von Reanalysedaten nicht immer der realen, physikalischen Auflösung. So wird bspw. das Geländere relief im COSMO-Modell des Deutschen Wetterdienstes einer Filterung unterzogen und die räumliche Repräsentativität entspricht aus numerischen Gründen eher 3 x 3 Gitterzellen. Eine nominelle Auflösung von 2 km würde dann einer tatsächlichen Repräsentativität von etwa 6 km entsprechen.

Reanalysedaten zur Berechnung der SynAKTerm sind daher nach den folgenden Kriterien auszuwählen:

- freie Verfügbarkeit
- Gebietsabdeckung Mitteleuropa
- zeitliche Repräsentativität für mindestens den Ziel-Zeitraum 2011 – 2020
- räumliche Repräsentativität nicht zu stark von der Skala des Auswertgebietes der mesoskaligen Modellrechnungen abweichend
- Bereitstellung von Größen, aus denen geostrophischer Wind und Schichtung innerhalb der Grenzschicht in mindestens 6-stündlicher Auflösung, besser stündlicher Auflösung, abgeleitet werden können.

Unter diesen Gesichtspunkten wurden folgende Reanalysedaten geprüft<sup>5</sup>:

- ASR der Byrd Polar Research Center Polar Meteorology Group
- COSMO-REA des Deutschen Wetterdienstes
- ERA-Interim des European Center of Medium Weather Forecast (ECMWF)
- ERA40 des European Center of Medium Weather Forecast (ECMWF)
- ERA5 des European Center of Medium Weather Forecast (ECMWF)

---

<sup>5</sup> Die Voruntersuchungen spiegeln den Stand verfügbarer Reanalysedaten bis Ende 2020 wider.

- ERA20C des European Center of Medium Weather Forecast (ECMWF)
- JRA25 der Japan Meteorological Agency (JMA)
- JRA55 der Japan Meteorological Agency (JMA)
- NASA MERRA der NASA GMAO
- NASA MERRA-2 der NASA GMAO
- CFSR des NCEP
- NCEP/DOE Reanalysis AMIP-II (R2)
- NCEP/DOE Reanalysis I (R1)
- NOAA-CIRES 20th Century Reanalyses (20CR)
- NOAA-CIRES 20th Century Reanalyses (20CRV2c)
- NOAA-CIRES 20th Century Reanalyses (20CRV3)

Die überwiegende Zahl der oben aufgelisteten Datensätze erfüllt ein oder mehrere der aufgeführten Prüfkriterien nicht.

Die meisten Reanalysen decken nicht vollständig den benötigten Zeitraum ab 2011 ab (ASR, ERA40, ERA20C, NASA MERRA, NOAA-CIRES). Die COSMO-REA des Deutschen Wetterdienstes sind bisher nur eingeschränkt frei verfügbar und ermöglichen noch nicht die Berechnung der als Antriebsdaten benötigten horizontalen Druckgradienten innerhalb der Grenzschicht („geostrophischer Wind“) und vertikalen potentiellen Temperaturgradienten.

Vier Datensätze blieben nach der Vorprüfung in der engeren Auswahl:

- ERA5 des ECMWF mit einer räumlichen Auflösung von  $0,28^\circ \times 0,28^\circ$  (entspricht ca. 31 km in Nord-Süd- und 20 km in West-Ost-Richtung) [14]
- CFSR (Climate Forecast System Reanalysis) des NCEP mit einer räumlichen Auflösung von  $0,5^\circ \times 0,5^\circ$  (entspricht ca. 55 km in Nord-Süd- und 37 km in West-Ost-Richtung) [22]
- JRA55 der JMA mit einer räumlichen Auflösung von  $1,25^\circ \times 1,25^\circ$  (entspricht ca. 140 km in Nord-Süd- und 90 km in West-Ost-Richtung) [19]
- NCAR2 (NCEP/DOE) Reanalysis AMIP-II (R2) mit einer räumlichen Auflösung von  $2,5^\circ \times 2,5^\circ$  (entspricht ca. 278 km in Nord-Süd- und 184 km in West-Ost-Richtung) [18]

Der letzte Datensatz lag auch schon den bisherigen Berechnungen der SynAKTerm zugrunde, wurde damals aber nur für den Zeitraum 1985 – 1995 analysiert und aufbereitet. Die angegebenen räumlichen Auflösungen entsprechen den auf regulärem Gitter und Druckleveln

frei verfügbaren Daten. Sie sind nicht zwingend identisch mit der tatsächlich im globalen Modell auf in der Regel hybriden Gittern verwendeten Auflösung.

In einer separaten Veröffentlichung [6] sind umfangreiche Voruntersuchungen zu den NCAR2-, CFSR- und ERA5-Reanalysen dokumentiert. Die JRA55-Daten wurden kurz nach Berichtserstellung verfügbar und sind darin noch nicht enthalten. Nachfolgend werden die vier Reanalysen nur beispielhaft in ihrer räumlichen Auflösung und Eignung als Antriebsdaten für die Berechnung der synthetischen AKTerm vorgestellt.

Die Abbildung 9 zeigt die räumliche Verteilung der Rasterpunkte, an denen die NCAR2-, NCEP-CFS- und ERA5-Reanalysen bereitgestellt werden. Die JRA55-Reanalysepunkte sind nicht eingezeichnet, weisen jedoch die doppelte Auflösung der blau markierten NCAR2-Punkte auf. Schon anhand der Punktdichte ist offensichtlich, dass die NCAR2-Daten die Mittelgebirge gar nicht und die Alpen nur näherungsweise auflösen können. Die CFS- und ERA5-Daten könnten dagegen große Mittelgebirgszüge zumindest näherungsweise auflösen.

Wie das Gelände tatsächlich durch die verschiedenen Datensätze aufgelöst wird, wird anhand der Abbildung 10 sichtbar. In den NCAR2-Daten ist der Geländegradient zwischen Norddeutscher Tiefebene im Norden und den Alpen im Süden erkennbar. Die Alpen werden jedoch nur näherungsweise in ihrer bogenförmigen Längserstreckung von Westen nach Osten aufgelöst. In den JRA55-Daten kommt der sich über Hunderte Kilometer erstreckende Alpenbogen bereits deutlicher zum Vorschein. Darüber hinaus deuten sich ein linksrheinischer Höhenzug (Vogesen – Eifel) sowie im Osten ein Höhenzug aus Böhmerwald, Oberpfälzer Wald und Thüringer Wald / Rhön an. Andere, eher regionale Mittelgebirgsstrukturen sind nicht zu erkennen. Das Geländere relief im CFS-Datensatz und noch einmal stärker im ERA5-Datensatz löst weitere Mittelgebirgsstrukturen wenigstens näherungsweise auf. Hierzu zählen Eifel, Rothaargebirge und Harz, aber auch Vogesen und (Süd-)Schwarzwald. Von der Mittelgebirgskette Böhmerwald – Thüringer Wald löst sich nach Osten das Erzgebirge heraus. Durch die Trennung der genannten Mittelgebirgszüge werden das Rheintal von den Alpen bis zur Kölner Bucht sowie das Donautal vom Ursprung bis östlich von Passau ebenfalls näherungsweise abgebildet.

Die CFS- und ERA5-Daten enthalten somit teilweise bereits topographische Strukturen, deren Längenskala sich unterhalb der mesoskaligen prognostischen Modellgebietsgröße bewegt. Andererseits lösen die JRA55-Daten einige topographische Strukturen nicht mehr auf, deren charakteristische Längenskalen knapp oberhalb der typischen Modellgebietsgrößen von 150 x 150 km<sup>2</sup> liegen. Eine optimale Skalentrennung zwischen Antriebsdaten und Modellrechnungen läge vermutlich bei einer räumlichen Auflösung zwischen JRA55 und CFS.

Anhand von vier über Deutschland verteilten Punkten werden die langjährigen Windrichtungsverteilungen und Mittel der Windgeschwindigkeit in der unteren Grenzschicht für die vier Reanalysedatensätze verglichen (Abbildung 11).

Punkt 1 liegt bei Bruchhausen-Vilsen südlich von Bremen in der Norddeutschen Tiefebene. Hier unterscheiden sich die langjährigen Windrichtungsverteilungen der vier Datensätze kaum voneinander. Allerdings nimmt die mittlere Windgeschwindigkeit mit zunehmender Auflösung der Datensätze von 9,3 m/s (NCAR2) auf 9,9 m/s (CFS und ERA5) zu.

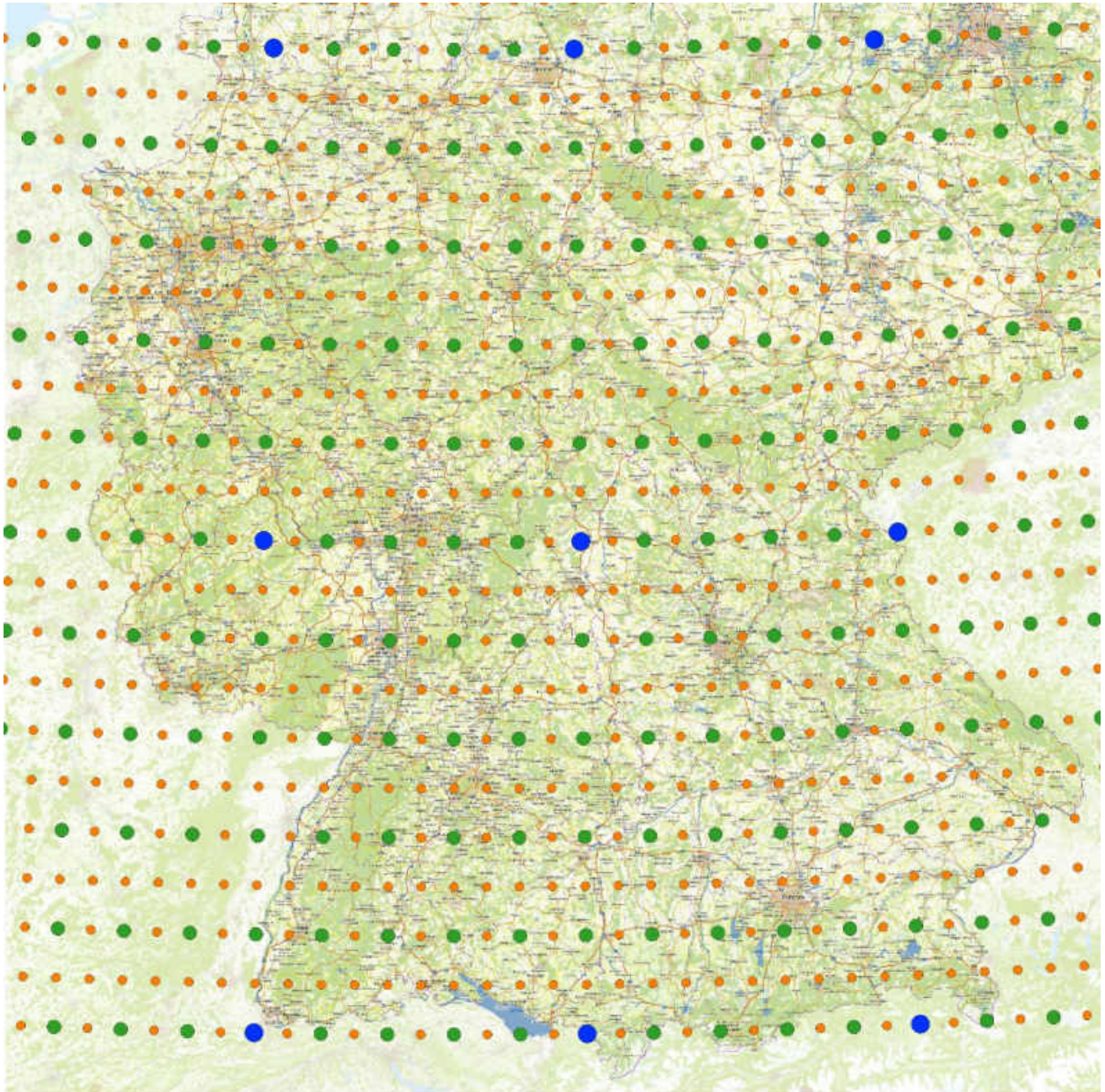
Punkt 2 im Landkreis Landshut repräsentiert den Bereich zwischen Alpenvorland und Bayerischem Wald. Während die Windrose der NCAR2-Daten praktisch unbeeinflusst ist von dem quer zur Hauptwindrichtung verlaufenden überregionalen Höhenzug Böhmerwald – Thüringer Wald, nimmt mit zunehmender Auflösung der Reanalysedaten deren Einfluss zu. Die ERA5-Daten zeigen bereits eine Windrichtungsverteilung, wie sie regional typisch für den Verlauf des Donautals ist. Obwohl die Windgeschwindigkeiten nur wenig variieren, sind sie doch bei der höchsten Auflösung wieder am höchsten.

Punkt 3 befindet sich im Rheintal zwischen Eifel und Westerwald bei Bad Hönningen. Die Windrosen von NCAR2 und JRA55 lassen keinen Einfluss dieser Mittelgebirge oder des Rheintals erkennen. Die hochauflösenden Datensätze von CFS und ERA5 zeigen dagegen deutlich gegen den Uhrzeigersinn gedrehte Windrosen mit einem Hauptmaximum aus Südwesten. Das entspricht zwar noch nicht einer kanalisierenden Wirkung des Rheintals, aber durchaus eine Umlenkung eher westlicher Winde durch die Lücke zwischen Eifel und Rothaargebirge (vgl. Abbildung 10). Die mittleren Windgeschwindigkeiten sind tendenziell bei den hochauflösenden Datensätzen gut 10 % höher.

Der letzte Punkt 4 liegt in Lee des Thüringer Waldes südlich von Erfurt. Die NCAR2-Windrose zeigt keinen Einfluss der Mittelgebirge. Im JRA55-Datensatz ist in der geringen Drehung der Windrose Richtung Nordwest eine leichte Leitwirkung des überregionalen Höhenzuges bereits zu erkennen. Die CFS- und ERA5-Datensätze zeigen in ihrer schärferen Bündelung diese Leitwirkung noch deutlicher. Gleichzeitig sind die Windgeschwindigkeiten mit 10,2 m/s bzw. 10,5 m/s deutlich höher als in den geringer auflösenden Datensätzen (8,2 m/s bzw. 8,4 m/s).

Insgesamt unterstreicht die Analyse der charakteristischen Windverteilungen den Eindruck, dass eine adäquate Skalentrennung zwischen Antriebsdaten und Modellrechnungen knapp oberhalb des räumlichen Auflösungsvermögens der JRA55-Reanalyse liegen dürfte. Die früher dokumentierten Voruntersuchungen [6] bestätigen zudem den Eindruck, dass die geostrophischen Windgeschwindigkeiten in den CFS- und ERA5-Reanalysen für die hier vorgesehenen Anwendungen tendenziell zu hoch liegen.

Als Fazit aus den früheren und den hier dokumentierten Voruntersuchungen kann festgehalten werden, dass sich von allen frei verfügbaren Reanalysedatensätzen die JRA55-Daten am besten als Antrieb zur Berechnung der synthetischen Ausbreitungsklassenzeitreihen auf der vorgesehenen Skala (Auflösung 500 m, Gebietsgrößen 150<sup>2</sup> km<sup>2</sup>) eignen.



- Reanalysepunkte\_EPSG-4258\_NCAR-NCEP-Reanalyse\_II\_2.5°
- Reanalysepunkte\_EPSG-4258\_NCEP-CFS\_0.5°
- Reanalysepunkte\_EPSG-4258\_ERA5\_0.25°

Abbildung 9: Lage der Reanalysepunkte der NCAR2-, NCEP-CFS- und ERA5-Reanalysen.

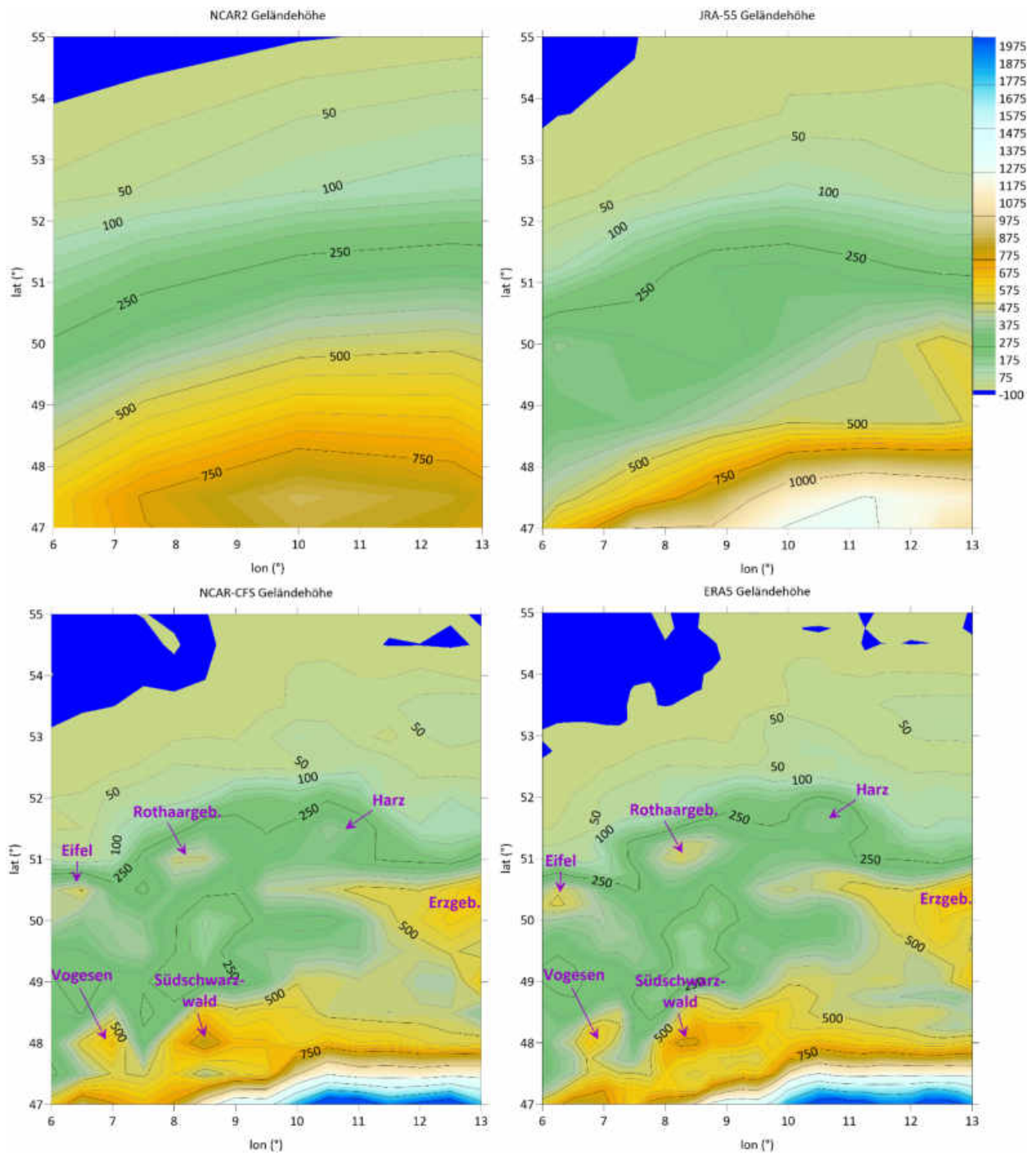


Abbildung 10: Geländeerief in Reanalysedatensätzen unterschiedlicher Auflösung.



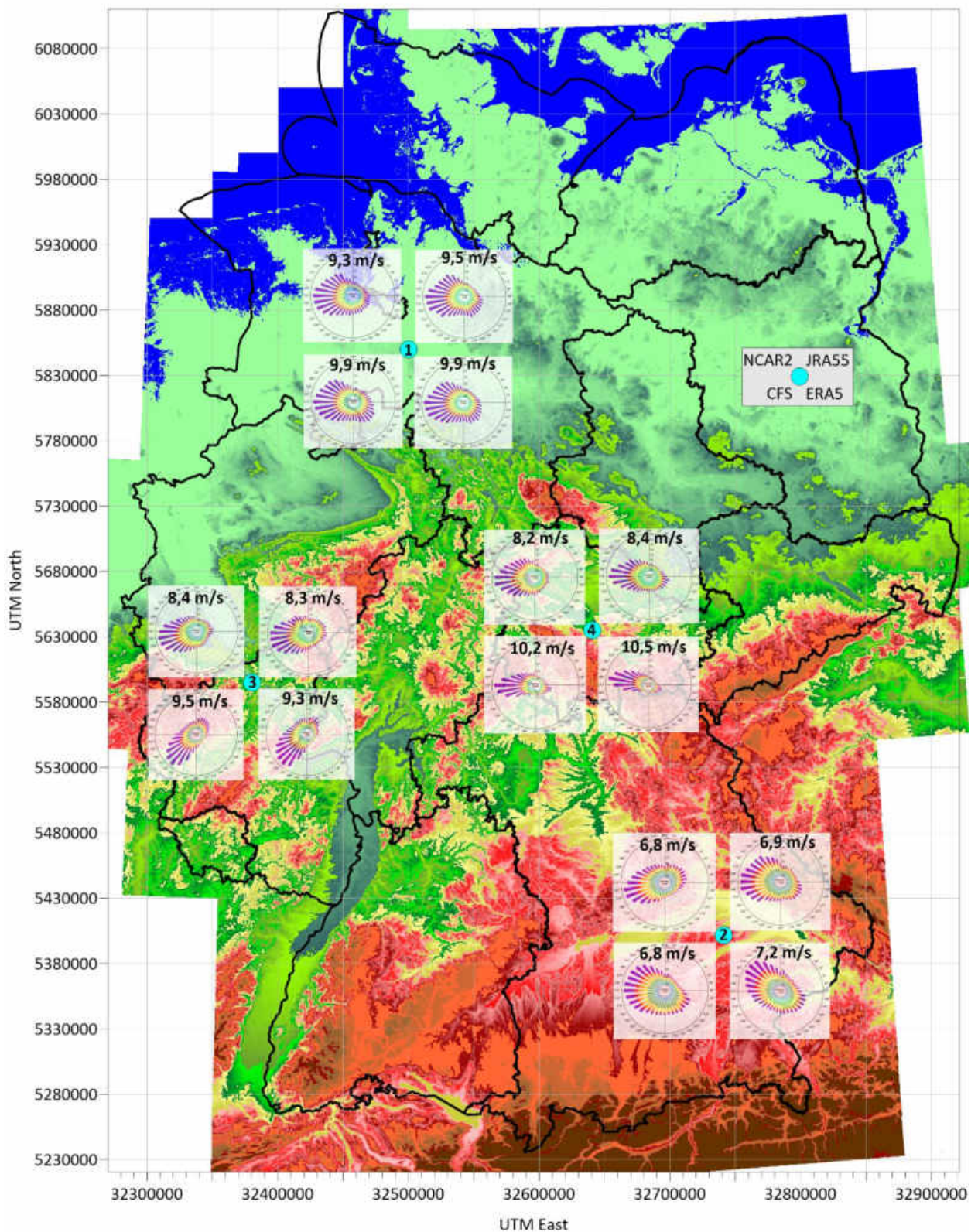


Abbildung 11: Charakteristische Windrichtungsverteilungen in Reanalyse-Datensätzen unterschiedlicher Auflösung.

## 3.2. Anzahl und Verteilung Cluster

Die Cluster definieren die meteorologischen Antriebsdaten, mit denen jede prognostische mesoskalige Modellrechnung angetrieben wird. Grundsätzlich lassen sich die bodennahen charakteristischen Windverhältnisse an einem Ort nur dann gut abbilden, wenn für das betreffende Modellgebiet hinreichend viele, unterschiedliche meteorologische Antriebssituationen gerechnet worden sind. Die Herausforderung besteht darin, die ganze Bandbreite der in den Reanalysedaten für das Gebiet tatsächlich auftretenden Antriebssituationen mit möglichst wenig Clustern repräsentativ abzudecken. Andererseits sollen die Cluster die Reanalysedaten nicht nur im Mittel gut repräsentieren, sondern möglichst auch eher seltene, extremere Ereignisse soweit möglich abbilden. Nur dann werden sich solche Situationen auch in den synthetischen Ausbreitungsklassenzeitreihen widerspiegeln.

Zu mehreren Fragestellungen wurden Voruntersuchungen anhand der JRA55-Reanalysedaten durchgeführt, deren Fragestellungen und Ergebnisse hier beispielhaft vorgestellt und zusammengefasst werden.

### 3.2.1. Differenzierung Cluster nach Teilgebieten

Die prognostischen Modellrechnungen müssen aus Kapazitätsgründen getrennt in mehreren Teilgebieten erfolgen. Sowohl aus verfahrens- als auch rechentechnischen Gründen wäre es von Vorteil, wenn alle Teilgebiete mit den gleichen Clustern berechnet werden könnten. Fraglich ist allerdings, ob die räumlich variierenden Reanalysedaten mit einem beschränkten, einheitlichen Satz an Clustern hinreichend repräsentiert werden können.

Zur Untersuchung dieser Fragestellung wurde eine Clusteranalyse für einen zusammengeführten Datensatz (geostrophische Windkomponenten, potentieller Temperaturgradient) aus 10-jährigen Zeitreihen von 21 regelmäßig über Deutschland verteilten Reanalysepunkten durchgeführt. Im Ergebnis lieferte die Clusteranalyse 130 Cluster, die jeweils durch die beiden geostrophischen Windkomponenten und einen Temperaturgradienten definiert sind. Anschließend wurden zehn unregelmäßig über Deutschland verteilte Punkte ausgewählt, die jeweils charakteristisch unterschiedliche topographische Ortslagen repräsentieren (z.B. Norddeutsche Tiefebene, Lee Mittelgebirgszug, Rhein-Main-Ebene, Voralpenland, Rheingraben, etc.). Für die 10-jährigen Reanalysezeitreihen an diesen Punkten wurde eine Cluster-Rezuweisung vorgenommen (Abschnitt 2.3.2) und die Häufigkeitsverteilungen der Cluster analysiert.

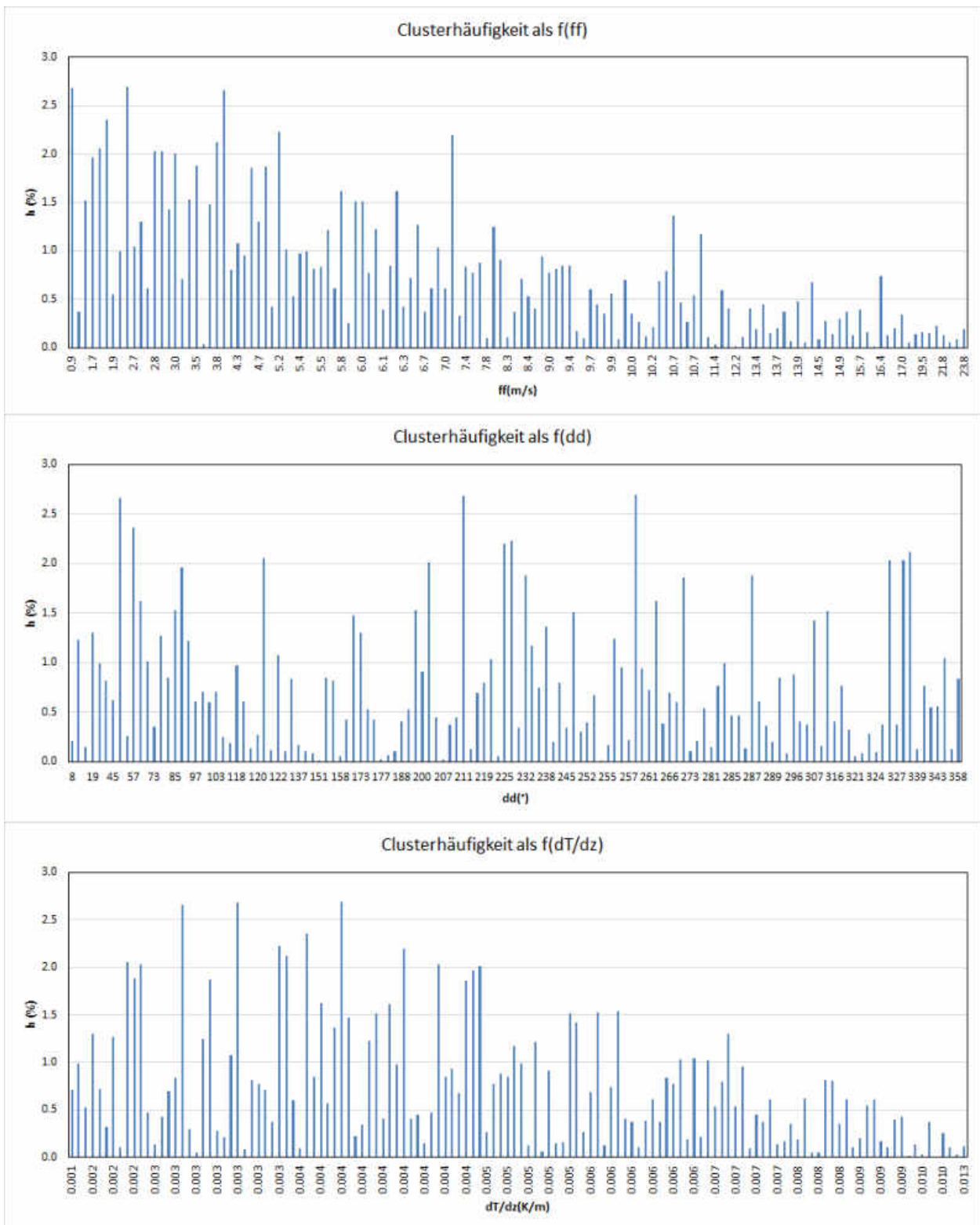


Abbildung 12: Relative Clusterhäufigkeiten als Funktion von Windgeschwindigkeit, Windrichtung und potentiellen Temperaturgradienten.

Beispielhaft sind in Abbildung 12 die relativen Häufigkeiten der 130 Cluster gegen ihre Windgeschwindigkeit (oben), Windrichtung (Mitte) und potentiellen Temperaturgradienten (unten) an einem Ortspunkt nahe Pfullendorf zwischen Bodensee und Schwäbischer Alb aufgetragen.

Einerseits spiegeln die dargestellten Clusterhäufigkeiten natürlich nur die Häufigkeiten der synoptischen Lagen über Süddeutschland wider. Allerdings sind die Cluster nicht in festen Geschwindigkeits-, Richtungs- oder Schichtungsintervallen definiert, so dass die Abszissen der Histogramme keine linearen Achsen der Definitionsgrößen Geschwindigkeit, Richtung, Schichtung darstellen. Große Häufigkeiten können daher mit geringer Clusterdichte im betroffenen Parameterbereich einhergehen und umgekehrt. Sie weisen deshalb nicht automatisch auch auf große (kleine) Häufigkeiten der Antriebssituationen hin.

Wesentlicher an den Darstellungen ist, welche Cluster nur sehr selten auftreten und daher für die Berechnung synthetischer Ausbreitungsklassenzeitreihen an diesem Ort von untergeordneter Bedeutung sind. Über die ganze Bandbreite der drei Parameter treten immer wieder einzelne Cluster mit sehr geringer Häufigkeit auf. Jedoch lassen sich auch systematische Trends erkennen.

Auffallend ist die deutlich abnehmende Häufigkeit von Clustern hoher Windgeschwindigkeiten. Offensichtlich gibt es vergleichsweise viele Cluster hoher Windgeschwindigkeit, die für die Verhältnisse an diesem Ortspunkt nur eine geringe Rolle spielen.

Weniger gehäuft treten Cluster geringer Häufigkeiten in Abhängigkeit von der Anströmrichtung oder der Stabilität auf. Im Bereich südöstlicher Winde (um  $150^\circ$ ) liegen mehrere benachbarte Cluster sehr geringer Häufigkeit. Hinsichtlich der Stabilität kann lediglich festgestellt werden, dass wenige Cluster mit sehr stabiler Schichtung an diesem Ortspunkt kaum eine Rolle spielen.

Das dargestellte Beispiel ist charakteristisch für die Ergebnisse dieser Untersuchung: Werden Cluster anhand einer einheitlichen Clusteranalyse über ganz Deutschland definiert, so ergeben sich daraus einige charakteristische Clusterdefinitionen, die in einigen der Teilgebiete als Antriebsdaten keine Rolle spielen. Davon betroffen sind vor allem (a) Cluster hoher Windgeschwindigkeit und (b) Cluster mit Anströmrichtungen um Nordost oder Südost.

Bei 130 Clustern läge die mittlere Häufigkeit jedes Clusters bei etwa 0,77 %. Als ausgesprochen geringe Häufigkeit kann bei dieser Clusterzahl  $\frac{1}{4}$  davon bzw. ein Wert von 0,2 % angesehen werden. In Tabelle 1 sind die Anzahl von Clustern mit Häufigkeiten von weniger als 0,2 % mit der Lage der ausgewerteten Punkte und deren mittleren Windgeschwindigkeit aufgeführt.

Von den 130 Clustern, die einheitlich für ganz Deutschland analysiert wurden, treten im Alpenvorland teilweise mehr als 30 Cluster nur ausgesprochen selten auf und sind deshalb für die Berechnung der SynAKTerm nur von geringer Bedeutung. Dagegen sind nördlich der Mittelgebirge fast alle Cluster statistisch relevant und nur auf einzelne Cluster könnte im Rahmen der Simulationsrechnungen auch verzichtet werden. Auffällig ist der Zusammenhang mit der mittleren Windgeschwindigkeit in der Region. Neben der Windgeschwindigkeit sind es aber auch Cluster mit nordöstlichen oder südöstlichen Anströmrichtungen, die abhängig von der Region keine oder nur geringe Relevanz aufweisen.

Als Fazit dieser Voruntersuchung lässt sich festhalten, dass einer Clusteranalyse je Teilgebiet der Vorzug zu geben ist gegenüber einer einheitlichen, einmaligen Clusteranalyse für größere Regionen bzw. für ganz Deutschland.

<b>Lage</b>	<b>mittl. Windgeschw. (m/s)</b>	<b>Anzahl Cluster h &lt; 0,2 %</b>
Alpenvorland westlich München	5,1	31
Alpenvorland zwischen Bodensee und Schwäb. Alb	5,4	28
Rheingraben nahe Breisach	5,5	24
Donautal östl. Regensburg	5,5	15
Rhein-Main-Ebene bei Frankfurt am Main	6,2	9
Südseite Erzgebirge südöstl. Annaberg-Buchholz	6,2	9
Nordseite Erzgebirge bei Zwickau	6,5	4
Ostseite Harz bei Halberstadt	6,7	3
Niederrheinisches Tiefland bei Aachen	7,1	6
Norddeutsche Tiefebene bei Oldenburg	7,9	5

*Tabelle 1: Mittlere Windgeschwindigkeit und Anzahl von Clustern (aus 130 Clustern) mit einer Häufigkeit von weniger 0,2 % an den Jahresstunden.*

### **3.2.2. Anzahl und Verteilung Cluster im Parameterraum**

Offensichtlich können die bodennah vorherrschenden Windverhältnisse umso besser mit den prognostischen Modellrechnungen differenziert werden, je mehr meteorologische Antriebssituationen berechnet werden.

Andererseits führt nicht jede Zunahme an berechneten Antriebssituationen zwingend zu einer besseren Differenzierung der bodennahen Windcharakteristiken. Hierfür ist auch entscheidend, wie häufig die (zusätzlich) berechneten Antriebssituationen auftreten und ob sich damit überhaupt charakteristisch andere bodennahe Windverhältnisse einstellen als mit bereits berechneten Situationen. Dies leuchtet sofort ein, wenn man an ein Tal denkt, in dem sich der bodennahe Wind über einen breiten Sektor an Anströmwindrichtungen nicht dreht. Von solchen lokalen Effekten abgesehen führen unterschiedliche Antriebssituationen aber auch in der Fläche eines gesamten Teilgebietes häufig zu keinen oder nur geringen Unterschieden in den bodennahen Windverhältnissen. Dies gilt insbesondere für höhere Windgeschwindigkeiten oder geringe Schichtungsänderungen.

Angesichts der enormen Rechenressourcen, die durch die prognostischen Modellrechnungen in Anspruch genommen werden, gilt es, einen vernünftigen Kompromiss zwischen Anzahl und Lage der Cluster im Parameterraum und Anforderungen an die Qualität der Ergebnisse zu finden. Anhand mehrerer Teilgebiete wurden eine Vielzahl von Clusteranalysen, Modellrechnungen und Bewertungen der erzielten Ergebnisqualitäten durchgeführt. Diese Untersuchungen erfolgten auf Basis der METRAS-PCL-Version (vgl. auch Abschnitt 3.3). Sie sind zu umfangreich, um hier in allen Details dargestellt werden zu können und werden deshalb an dieser Stelle nur im Ergebnis zusammengefasst.

Die Abbildung 13 zeigt links oben die Verteilung der Datenpunkte einer JRA55-Reanalysezeitreihe 2011-2020 aus einem Teilgebiet im Raum Kraichgau-Hohenlohe im Parameterraum der aus den beiden geostrophischen Windkomponenten und dem potentiellen Temperaturgradienten bestehenden Antriebsdaten. Die u-Komponente ist auf der Abszisse, die v-Komponente auf der Ordinate abgetragen. Die Farbe des Datenpunktes steht für einen Bereich des Temperaturgradienten (K/m). Die Punktwolke besteht aus 87.600 Datentripeln und ist nicht gleichmäßig im Parameterraum verteilt. Beispielsweise treten Südost- und Nordwestwinde häufiger auf als Südwest- und Nordostwinde. Die Südostwinde (u negativ, v positiv!) tendieren zu stabileren Schichtungen (blaue Punkte) als Winde aus Nordwest (u positiv, v negativ, rote Punkte). Bei den Nordwestwinden treten zudem extremere Windgeschwindigkeiten auf. Mit zunehmenden Windgeschwindigkeiten dünnt die Punktwolke im Außenbereich immer weiter aus.

Die drei anderen Grafiken der Abbildung 13 verdeutlichen, wie die große Menge der Datentripel der Reanalysezeitreihe auf vergleichsweise wenige, repräsentative Cluster eingedampft werden kann.

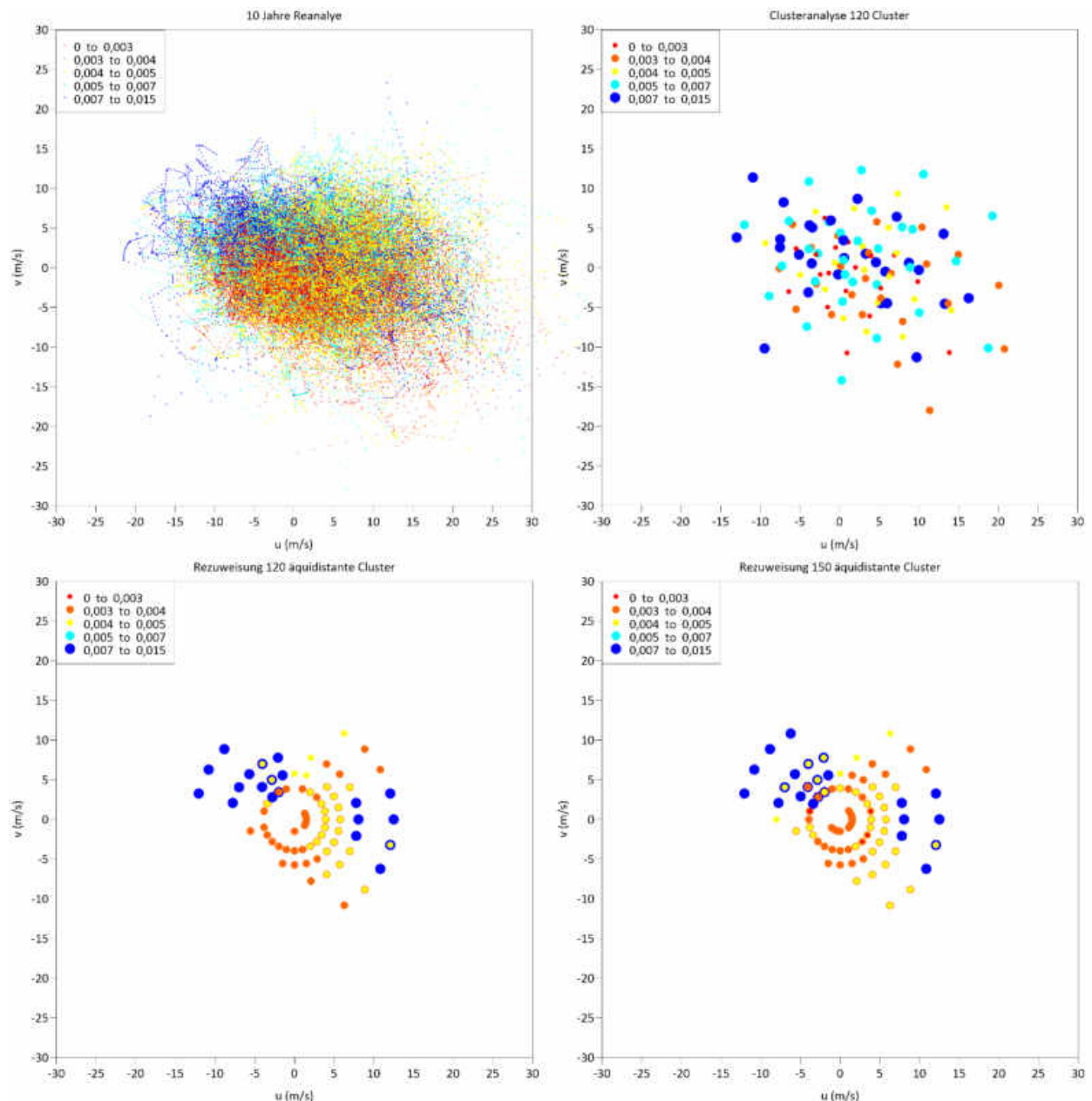


Abbildung 13: Beispiel einer Reduzierung von 87.600 Reanalysepunkten (links oben) auf 120 Clusterpunkte (rechts oben) oder 120 bzw. 150 äquidistante Clusterpunkte (unten). Jeder Punkt ist durch die geostrophischen Windkomponenten  $u$  und  $v$  ( $x$ - und  $y$ -Achse) und einen Temperaturgradienten in  $K/m$  (Farbe des Datenpunktes) definiert.

Rechts oben sind die Ergebnisse einer Clusteranalyse dargestellt, bei der die 10-jährige Zeitreihe unter Gleichgewichtung der drei Parameter auf 120 Cluster reduziert wurde. Einige Charakteristiken der Reanalyse-Punktswolke finden sich auch in der Cluster-Punktswolke wieder. So sind beispielsweise Nordwest- und Südostwinde häufiger als Winde aus den beiden anderen Quadranten. Die Südostwinde zeigen tendenziell stabilere Schichtung als die Nordwestwinde. Auch finden sich bei Nordwestwinden mehr Cluster hoher Windgeschwindigkeit.

Einen potentiellen Nachteil dieser Clusteranalyse kann man anhand der Punktwolke erahnen. Die Clusterpunkte sind unregelmäßig im Parameterraum verteilt, nehmen jedoch in ihrer Dichte (völlig korrekt) mit zunehmender Windgeschwindigkeit ab. Die größere Häufigkeit kleiner und mittlerer Windgeschwindigkeiten und bestimmter Windrichtungen führt jedoch dazu, dass im Zentrum der Clusterwolke manche Cluster sehr dicht beieinander liegen und somit ausgesprochen ähnliche Antriebssituationen repräsentieren. Das könnte dazu führen, dass Antriebssituationen, unter denen sich vergleichbare bodennahe Windverhältnisse einstellen, quasi unnötig „doppelt“ gerechnet werden. Da die Clusterzahl beschränkt ist, können dadurch andererseits manche anderen Situationen weniger stark differenziert werden. Beispielsweise differenzieren die Cluster im Bereich von Windgeschwindigkeiten zwischen 5 und 10 m/s aus nordwestlichen Richtungen nur wenig in der Windrichtung. Darüber hinaus besteht durch einige Cluster mit Windgeschwindigkeiten nahe 0 m/s die Möglichkeit, dass bei der Zuordnung von Reanalysepunkten zu Clustern etliche Reanalysepunkte Clustern mit mehr oder weniger entgegengesetzten Windrichtungen zugeordnet werden, weil die Distanz im Parameterraum bei ähnlichen Windgeschwindigkeiten und Schichtungen trotz anderer Windrichtung gering ist. Jedoch führt eine entgegengesetzte Windrichtung im Ergebnis zu komplett anderen bodennahen Strömungsmustern.

Die beiden unteren Grafiken in Abbildung 13 zeigen die 120 bzw. 150 häufigsten Cluster aus so genannten „äquidistant“ definierten Clustern. Diese Cluster decken den Parameterraum in vordefinierten Klassen von Windrichtungen, Windgeschwindigkeiten und Schichtungen ab. Auf den ersten Blick scheint die Punktwolke der Reanalysedaten durch diese Cluster weniger gut repräsentiert zu werden. Allerdings täuschen die für mehrere Stabilitäten übereinander liegenden Datenpunkte eine geringere Dichte der Wolke vor als sie tatsächlich ist. Die Antriebssituationen mit geringen bis mittleren Windgeschwindigkeiten werden jedoch in den Windrichtungen deutlich besser aufgelöst als durch die Standard-Clusteranalyse. Dafür werden Starkwindereignisse weniger gut erfasst.

Im Vergleich der auf Basis der drei unterschiedlichen Clustersätze berechneten SynAKTerm mit Messungen aus drei Teilgebieten zeigten sich zwischen den Ergebnissen der drei Antriebsdatensätze nur geringe Unterschiede in den berechneten Windgeschwindigkeiten und Windrichtungsverteilungen, die zudem keine klare Tendenz für oder wider einen der Antriebsdatensätze aufweisen. Lediglich in den Trefferquoten der synthetischen zu gemessenen Zeitreihen (vgl. Abschnitt 5.4.3) gibt es einen schwachen Zusammenhang zwischen Clusterhäufigkeit und Trefferquoten. In Zeitfenstern, in denen überwiegend Cluster mit größerer Auftretenshäufigkeit vorliegen, liegen die Trefferquoten tendenziell höher als in Zeitfenstern, in denen überwiegend Cluster mit geringer Auftretenshäufigkeit vorliegen. Das ist kein überraschender Befund, weil die seltener auftretenden Cluster eine größere Parameterbandbreite der Reanalysedaten abdecken müssen und damit zwangsläufig die tatsächlich vorliegenden



Situationen etwas schlechter repräsentieren als Cluster mit größerer Häufigkeit. Zumindest scheinen damit aber die 150 äquidistanten Cluster wenn auch nicht in den mittleren Häufigkeitsverteilungen, so doch in den Zeitreihen zu etwas besseren Ergebnissen zu führen als die geringere Clusterzahl.

Gegenüber der Standard-Clusteranalyse haben die äquidistanten Cluster einen weiteren praktischen Vorteil. Sie werden nur einmalig bestimmt und können für jeden Analysezeitraum durch Rezuweisung mit passenden Häufigkeiten belegt werden. Damit erleichtern sie eine künftige Fortschreibung der synthetischen Daten. Im Gegensatz hierzu müssten Cluster aus der Standardanalyse streng genommen für jeden Berechnungszeitraum neu bestimmt und damit die prognostischen Modellrechnungen wiederholt werden.

Im Ergebnis führten die Voruntersuchungen zu dem Schluss, dass die Produktion der synthetischen Daten auf Basis der häufigsten 150 „äquidistanten Cluster“ erfolgt. Hierfür sprechen folgende Punkte:

- Die höhere Anzahl Cluster löst zumindest tendenziell die Antriebssituationen besser auf.
- Diese Cluster sind in der maximalen Windgeschwindigkeit stärker beschränkt und sparen daher Ressourcen, da die Simulationszeit mit zunehmender Windgeschwindigkeit rasch ansteigt.
- Diese Cluster vereinfachen die Fortschreibung der synthetischen Daten auf Zeiträume nach 2020.
- Die größere Clusterzahl führt in den Zeitreihen zu geringfügig höheren Trefferquoten.

### **3.3. METRAS-PC Modellversion**

Im Rahmen der Voruntersuchungen wurden zunächst die SynAKTerm 3.0 für drei Teilgebiete in Baden-Württemberg und Bayern auf Basis von Modellrechnungen mit METRAS-PCL 5 berechnet. Als Antriebsdaten dienten 150 „äquidistante Cluster“, abgeleitet aus der JRA55-Reanalyse für 2011-2020. Parallel wurden die Messdaten von 38 Stationen des Deutschen Wetterdienstes aus diesen Teilgebieten für den Zeitraum 2011-2020 aufbereitet.

Der erste subjektive Vergleich der SynAKTerm 3.0 mit den Stationsmessungen und den SynAKTerm 2.0 führte zu dem überraschenden Ergebnis, dass

1. die Windrichtungsverteilungen (Windrosen) an einzelnen Stationen etwas besser, an anderen Stationen etwas schlechter, insgesamt jedoch ähnlich gut mit den Messungen übereinstimmten wie die der Version 2.0 und

2. die Windgeschwindigkeiten mit der neuen Version 3.0 im Mittel etwa um 0,5 m/s unterschätzt werden, während die frühere Version 2.0 diese im Mittel nahezu getroffen hatte.

Neben den Änderungen im Berechnungsverfahren (Abschnitt 2) kommen als weitere mögliche Ursachen für die schlechtere Qualität nur der Wechsel in den Antriebsdaten von der NCAR2- auf die JRA55-Reanalyse und der Wechsel in der prognostischen Modellversion von METRAS-PC 1.0 auf METRAS-PCL 5 infrage. Um dieser Frage weiter nachzugehen, wurden exemplarisch für ein Teilgebiet im nordwestlichen Bayern vier Sätze an SynAKTerm 3.0 komplett neu berechnet:

- METRAS-PC 1.0 in Kombination mit NCAR2-Reanalyse für 2011-2020
- METRAS-PC 1.0 in Kombination mit JRA55-Reanalyse für 2011-2020
- METRAS-PCL 5 in Kombination mit NCAR2-Reanalyse für 2011-2020
- METRAS-PCL 5 in Kombination mit JRA55-Reanalyse für 2011-2020

Zusätzlich lagen die SynAKTerm 2.0 für den Zeitraum 2001-2010 zum Vergleich vor.

In dem Teilgebiet liegen 13 Messstationen des Deutschen Wetterdienstes. Der Vergleich verschiedener Kenngrößen für die vier Datensätze mit diesen Messstationen wird in Tabelle 2 zusammengefasst. Je Kenngröße enthält die Tabelle vier Spalten für die vier Kombinationen von verwendetem Modell mit Reanalyse-Datensatz.

Unter „Windrose“ ist markiert, welche der vier synthetischen Windrosen rein subjektiv als am besten mit der gemessenen Windrose übereinstimmend bewertet wurde. In der letzten Zeile ist die Anzahl der jeweils besten Übereinstimmungen je Datensatz aufsummiert. Der Datensatz mit dem ersten Rang in der „Bestenliste“ ist jeweils grün markiert. Bei den Windrosen führt METRAS-PC 1.0 in Kombination mit der JRA55-Reanalyse die Bestenliste mit großem Abstand an.

In den Folgespalten wird die mittlere Windgeschwindigkeit mit den Messungen verglichen. Je Stationszeile ist oben das berechnete Jahresmittel und unten dessen Abweichung zum gemessenen Jahresmittel aufgeführt. Mit Ausnahme von drei Stationen liefert jeweils METRAS-PC 1.0 die beste Übereinstimmung mit den Messungen. Die beiden Reanalysesätze unterscheiden sich in der „Bestenliste“ nur wenig, wobei aber die NCAR2-Reanalyse einen hauchdünnen Vorsprung gegenüber der JRA55-Reanalyse hat.

Der mittlere Fehler in der mittleren Windgeschwindigkeit liegt bei -0,3 m/s. Die alte Version SynAKTerm 2.0 weist in diesem Teilgebiet einen mittleren Fehler von +0,2 m/s auf, allerdings liegen nur an 10 der 13 Stationen und nicht immer vollständige Messreihen innerhalb der Dekade 2001-2010 vor.

Es folgen die Gegenüberstellungen von Korrelationskoeffizienten und Trefferquoten der Zeitreihen für die Windrichtung („dd“) und Windgeschwindigkeit („ff“). Diese Fehlermaße und die

Bedeutung ihrer Werte werden in den Abschnitten 5.4.2 und 5.4.3 vorgestellt und diskutiert. An dieser Stelle sei nur erwähnt, dass höhere Werte eine bessere Übereinstimmung zwischen den synthetischen und gemessenen Zeitreihen bedeuten.

Die Korrelation der Windrichtungen zeigt mit der alten Modellversion und der JRA55-Reanalyse am häufigsten die besten Werte, mit deutlichem Abstand gefolgt von der neuen Modellversion mit der gleichen Reanalyse. Synthetische Daten auf Basis der NCAR-Reanalyse zeigt mit beiden Modellversionen die geringste Übereinstimmung.

Auch in der Korrelation der Windgeschwindigkeiten werden mit der NCAR-Reanalyse die geringsten Übereinstimmungen berechnet. In der „Bestenliste“ führt die neue Modellversion knapp vor der alten, in der mittleren Korrelation liegt sie knapp zurück, so dass hier keine der beiden Modellversionen einen klaren Vorteil zeigt.

In den Trefferquoten ist sowohl bezüglich der Windrichtung als auch der Windgeschwindigkeit das Ergebnis sehr eindeutig. In der Windrichtung zeigt METRAS-PC 1.0 in 12 von 13 Fällen die höhere Trefferquote, in der Windgeschwindigkeit in 9 von 13 Fällen<sup>6</sup>.

Zusammengefasst ergibt sich ein sehr deutlicher Vorsprung der älteren Modellversion METRAS-PC 1.0 vor der neueren Version METRAS-PCL-5 und der JRA55-Reanalyse vor der NCAR2-Reanalyse.

Diese eindeutigen Ergebnisse haben zu der Entscheidung geführt, die SynAKTerm 3.0 entgegen der ursprünglichen Planung mit der älteren Modellversion METRAS-PC 1.0 und auf Basis der JRA55-Reanalyse zu berechnen.

---

<sup>6</sup> Die Werte in Tabelle 2 können sich ggf. von an anderer Stelle dokumentierten Werten geringfügig unterscheiden, da sie noch auf vorläufigen Berechnungen im Rahmen der Voruntersuchungen beruhen.

METRAS-Version Reanalyse	Windrose				ff (m/s)				Korrelation dd				Korrelation ff				Trefferquote dd				Trefferquote ff			
	alt		neu		alt		neu		alt		neu		alt		neu		alt		neu		alt		neu	
	JRA	NCAR	JRA	NCAR	JRA	NCAR	JRA	NCAR	JRA	NCAR	JRA	NCAR	JRA	NCAR	JRA	NCAR	JRA	NCAR	JRA	NCAR	JRA	NCAR	JRA	NCAR
Altmühlsee	x				2.7	2.7	2.1	2.0	0.61	0.56	0.62	0.56	0.66	0.58	0.65	0.58	0.74	0.62	0.71	0.63	0.63	0.61	0.57	0.55
Bamberg	x				2.1	2.4	1.7	1.9	0.45	0.35	0.32	0.27	0.45	0.38	0.48	0.40	0.71	0.67	0.65	0.64	0.66	0.62	0.70	0.68
Ergersheim-Neuheberg	x				3.6	3.5	3.2	2.9	0.74	0.69	0.74	0.67	0.77	0.67	0.77	0.69	0.80	0.68	0.78	0.70	0.73	0.66	0.71	0.62
Feuchtwangen-Heilbronn	x				2.8	2.8	2.4	2.4	0.73	0.64	0.74	0.66	0.70	0.59	0.68	0.55	0.77	0.64	0.75	0.65	0.69	0.64	0.64	0.59
Geibelsee	x				2.3	2.4	2.2	2.1	0.73	0.67	0.72	0.65	0.60	0.50	0.62	0.53	0.71	0.59	0.66	0.55	0.70	0.67	0.70	0.65
Harburg	x				2.4	2.3	2.1	2.0	0.64	0.56	0.63	0.53	0.59	0.50	0.52	0.43	0.71	0.59	0.67	0.61	0.63	0.61	0.57	0.51
Ingolstadt			x		2.7	2.7	2.4	2.2	0.66	0.59	0.65	0.59	0.60	0.50	0.62	0.53	0.66	0.56	0.66	0.59	0.67	0.60	0.70	0.65
Kümmersbrück	x				2.2	2.2	1.8	1.7	0.49	0.46	0.48	0.41	0.62	0.54	0.55	0.49	0.70	0.62	0.68	0.65	0.72	0.70	0.68	0.67
Neuburg-Donau	x				2.8	2.7	2.2	2.1	0.64	0.57	0.63	0.54	0.57	0.47	0.60	0.49	0.65	0.54	0.66	0.56	0.66	0.59	0.68	0.63
Neumarkt-Höhenberg	x				2.9	2.8	3.0	2.8	0.78	0.69	0.70	0.56	0.72	0.65	0.73	0.63	0.74	0.63	0.70	0.59	0.67	0.62	0.60	0.53
Nürnberg	x				2.4	2.5	2.1	2.1	0.63	0.57	0.62	0.56	0.63	0.52	0.59	0.56	0.74	0.63	0.73	0.65	0.72	0.70	0.65	0.63
Roth			x		2.2	2.4	2.1	2.1	0.68	0.56	0.68	0.52	0.63	0.51	0.64	0.54	0.74	0.64	0.72	0.65	0.70	0.65	0.69	0.66
Weißenburg-Emetzheim			x		2.5	2.9	2.2	2.5	0.53	0.44	0.54	0.42	0.59	0.52	0.59	0.53	0.75	0.68	0.73	0.67	0.64	0.66	0.62	0.65
Mittel					2.6	2.6	2.3	2.2	0.64	0.57	0.62	0.53	0.63	0.53	0.62	0.53	0.72	0.62	0.70	0.63	0.68	0.64	0.65	0.62
Summe Beste	10	1	2	0	6	7	3	0	10	0	5	0	7	0	8	0	12	0	2	0	9	1	4	0

Tabelle 2: Vergleich der mit alter und neuer METRAS-Version sowie NCAR2- und JRA55-Reanalysen berechneten SynAKTerm 3.0 (2011-2020) mit Messdaten.

### 3.4. Vergleich zu SynAKTerm 2.0

Die Berechnungsmethodik der SynAKTerm 3.0 unterscheidet sich in mehreren Punkten, die für die Ergebnisse durchaus relevant sein können, von der Vorgängerversion 2.0. Insbesondere zählen hierzu der Wechsel in den Reanalysedaten von NCAR2 auf JRA55, eine andere Methodik der Clusteranalyse und Clusterdefinitionen, und die punkt- statt gebietsbezogene Verwendung von Reanalyse- und Bedeckungsdaten.

Vor der endgültigen Berechnung der neuen Datenversion wurden für einige Stationen im Bereich Kraichgau-Hohenlohe die SynAKTerm 3.0 mit der Vorgängerversion 2.0 und mit Messungen rein qualitativ verglichen. In diesem Vergleich ging es im Sinne einer orientierenden Einschätzung darum festzustellen, ob mit den neuen Berechnungsverfahren auch für die aktuelle Dekade 2011-2020 synthetische Daten in vergleichbarer Qualität wie für die Dekade 2001-2010 erzeugt werden können.

Eine detailliertere Analyse wäre auch deshalb schwierig, weil nur ein Teil der Messungen beide Dekaden vollständig, am gleichen Messort und in gleicher Messhöhe abdeckt. In Einzelfällen sind sogar dann schon systematische Änderungen in den Windstatistiken einer Station beobachtet worden, wenn lediglich die Messinstrumente ausgetauscht werden. Insofern ist nur ein qualitativer Vergleich bei vertretbarem Aufwand möglich.

Aus diesen Gründen wurden nur die Messungen der Dekade 2011-2020 (an einigen Stationen auch nur Teilzeiträume) den SynAKTerm 2.0 für 2001-2010 und den SynAKTerm 3.0 für 2011-2020 gegenübergestellt. Dabei wird angenommen, dass Änderungen in den Windstatistiken von Dekade zu Dekade gering sind im Vergleich zu Differenzen zwischen synthetischen Daten und Messungen oder den beiden Versionen der synthetischen Daten.

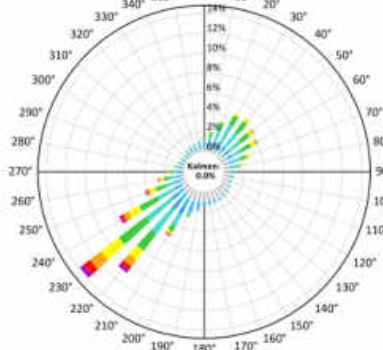
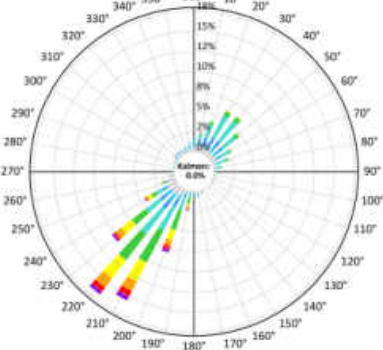
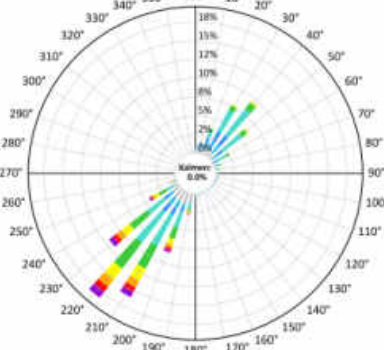
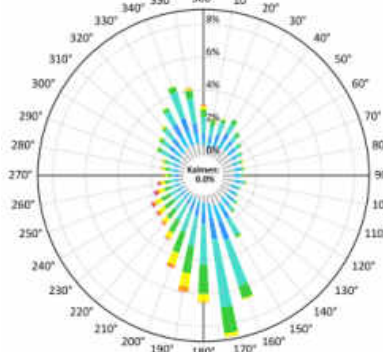
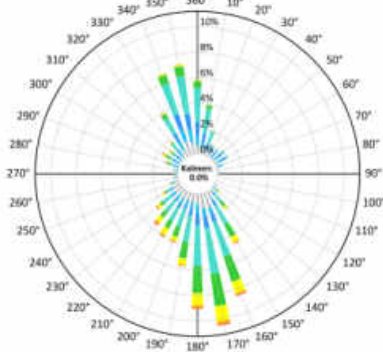
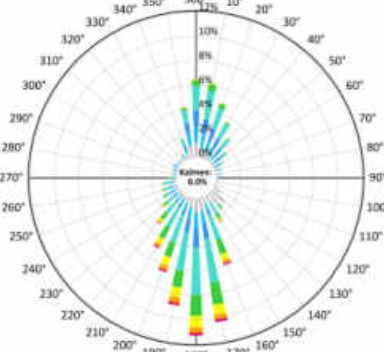
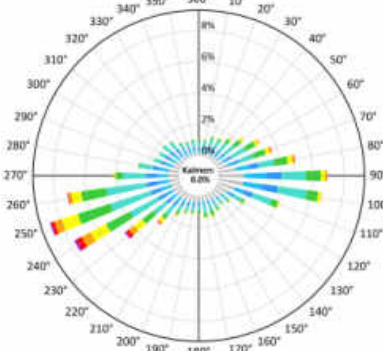
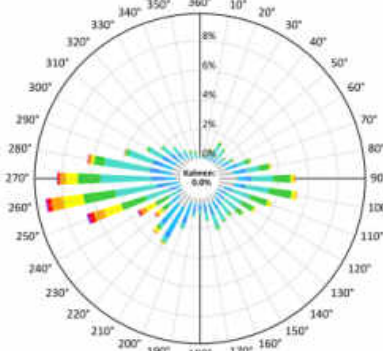
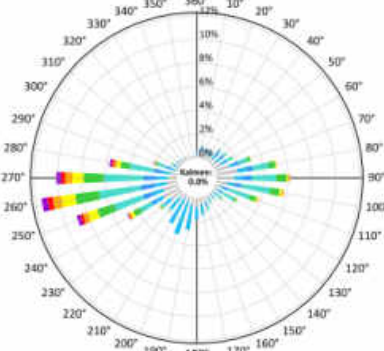
In der mehrseitigen Tabelle 3 sind die mittleren Windgeschwindigkeiten und Windrichtungsverteilungen (als Windrosen) der drei Datentypen an allen Stationen des betrachteten Teilgebietes gegenübergestellt.

An den meisten Stationen liegt eine subjektiv gute Übereinstimmung zwischen gemessenen und synthetischen Windrosen sowie Windgeschwindigkeiten beider Versionen vor. In den mittleren Windgeschwindigkeiten trifft die Datenversion 3.0 die gemessenen Werte an drei Stationen besser, aber an sieben Stationen schlechter als die Vorgängerversion 2.0. Die mittleren Abweichungen sind mit 0,0 m/s bzw. 0,1 m/s bei beiden Versionen nahezu identisch. Allerdings liegt die betragsmäßig mittlere Abweichung bei der Version 3.0 mit 0,31 m/s etwas höher als bei Version 2.0 (0,24 m/s). Bei den Windrichtungsverteilungen kehrt sich das Bild allerdings um: Nur bei Mannheim zeigt die Version 3.0 eine geringfügig schlechtere Übereinstimmung mit der Messung. An acht Stationen (Mühlacker, Waibstadt, Oberzent-Beerfelden-Vogelherd, Michelstadt-Vielbrunn, Walldürn, Kaisersbach-Cronhütte, Stötten, Stimpfach-Weipertshofen) werden die Windrosen subjektiv als (teilweise deutlich) besser übereinstimmend eingeschätzt. An den verbleibenden sechs Stationen sind die Unterschiede zwischen beiden Versionen entweder verschwindend gering oder beide Versionen stimmen gleich gut oder schlecht mit der Messung überein.

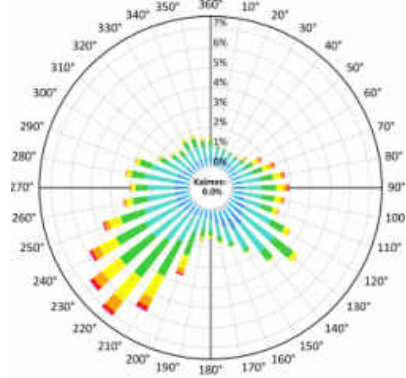
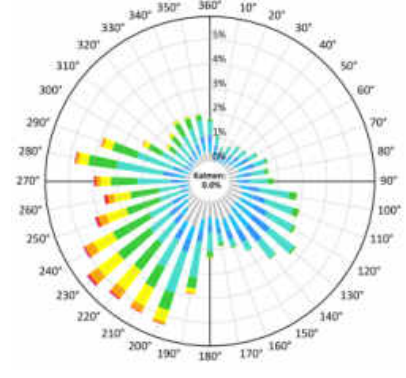
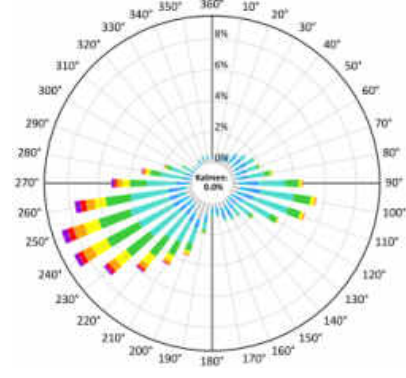
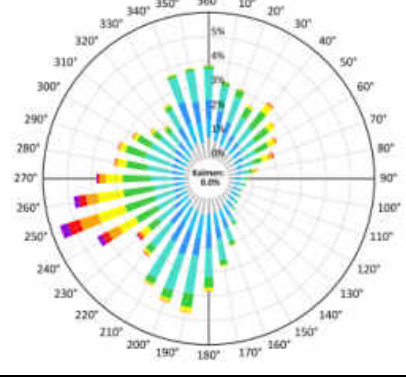
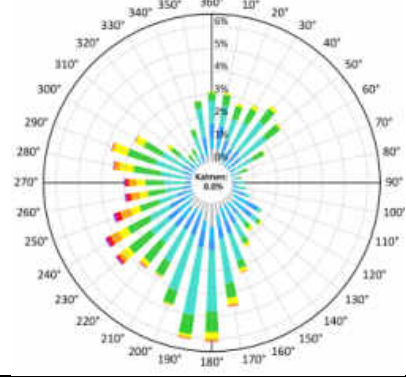
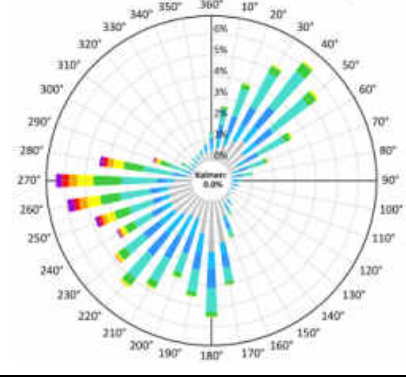
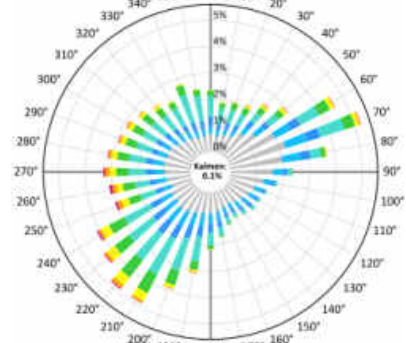
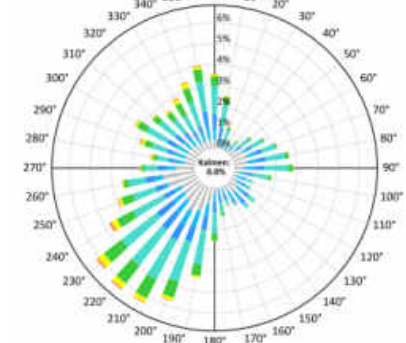
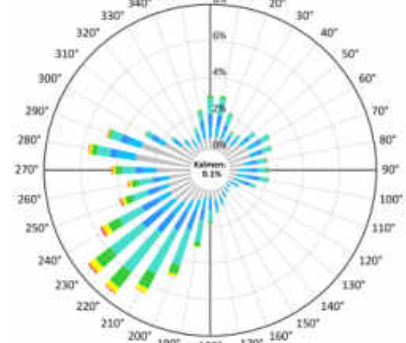
Insgesamt gilt für den Vergleich beider synthetischen Datenversionen anhand des Teilgebietes:

- Die Windgeschwindigkeiten sind in der Version 3.0 im Mittel um 0,1 m/s geringer als in der Version 2.0.
- Die mittleren betragsmäßigen Abweichungen der Windgeschwindigkeiten gegenüber den Messungen sind bei Version 3.0 geringfügig höher als bei Version 2.0 (0,31 m/s statt 0,24 m/s).
- Die Windrichtungsverteilungen werden an mehr als der Hälfte aller Stationen mit der Version 3.0 (teilweise deutlich) besser getroffen als mit der Vorgängerversion 2.0. Eine geringfügig schlechtere Verteilung liegt nur an einer Station vor.

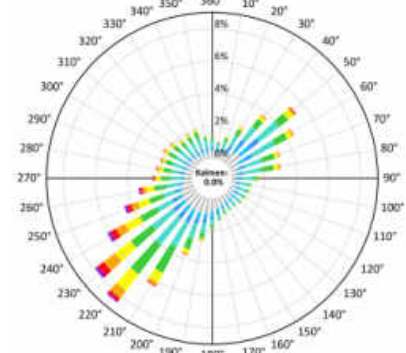
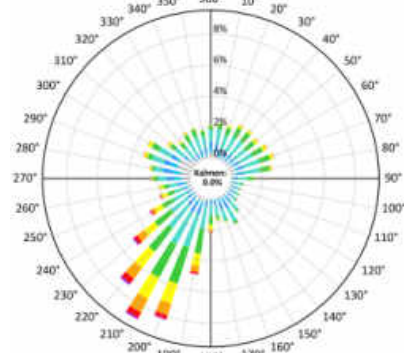
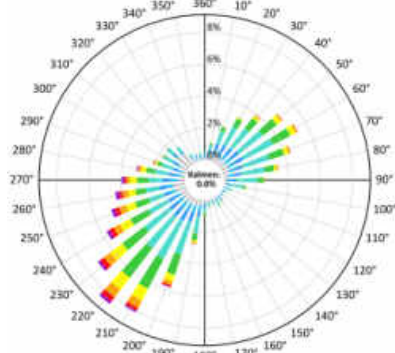
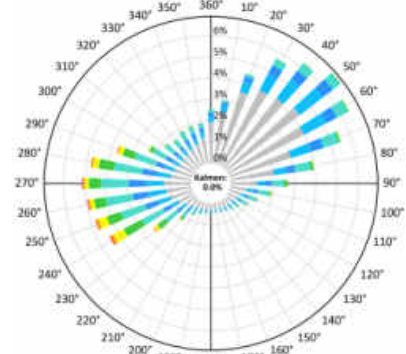
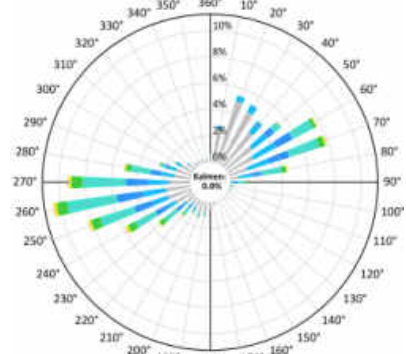
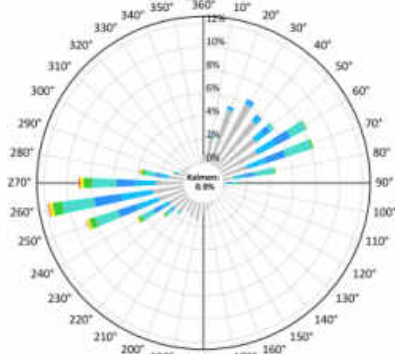
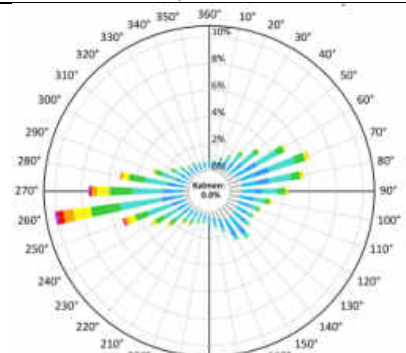
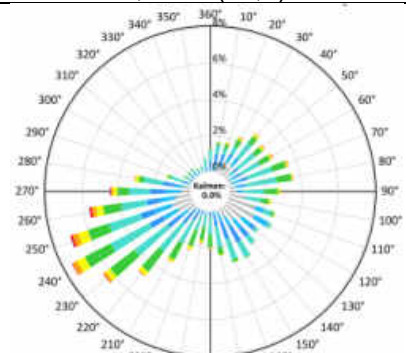
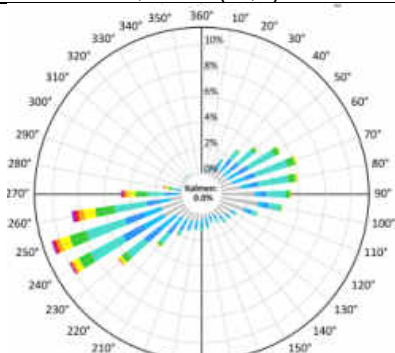
Im Rahmen der Voruntersuchung konnte festgestellt werden, dass die Qualität der SynAKTerm 3.0 gegenüber der Version 2.0 zumindest in diesem Teilgebiet als mindestens gleichwertig oder besser eingeschätzt werden. Im Wesentlichen bestätigt sich dieses Ergebnis auch für die anderen, später berechneten Teilgebiete (vgl. Abschnitt 5.5).

Messung (2011-2020)	SynAKTerm 2.0 2001-2010	SynAKTerm 3.0 (2011-2020)
<b>Rheinstetten</b>		
3,3 m/s	3,6 m/s (+0,3)	3,7 m/s (+0,4)
		
<b>Mannheim</b>		
2,9 m/s	3,0 m/s (+0,1)	2,9 m/s (0,0)
		
<b>Pforzheim</b>		
3,0 m/s	3,2 m/s (+0,2)	2,8 m/s (-0,2)
		

Messung (2011-2020)	SynAKTerm 2.0 2001-2010	SynAKTerm 3.0 (2011-2020)
<b>Mühlacker</b>		
2,1 m/s	2,2 m/s (+0,1)	2,0 m/s (-0,1)
<b>Waibstadt</b>		
3,0 m/s	2,6 m/s (-0,4)	2,6 m/s (-0,4)
<b>Oberzent-Beerfelden-Vogelherd</b>		
2,6 m/s	2,4 m/s (-0,2)	2,8 m/s (+0,2)

Messung (2011-2020)	SynAKTerm 2.0 2001-2010	SynAKTerm 3.0 (2011-2020)
<b>Michelstadt-Vielbrunn</b>		
3,7 m/s	3,1 m/s (-0,6)	3,4 m/s (-0,3)
		
<b>Heilbronn</b>		
3,2 m/s	3,3 m/s (+0,1)	2,6 m/s (-0,6)
		
<b>Stuttgart-Echterdingen</b>		
2,4 m/s	2,6 m/s (+0,2)	2,2 m/s (-0,2)
		



Messung (2011-2020)	SynAKTerm 2.0 2001-2010	SynAKTerm 3.0 (2011-2020)
<b>Walldürn</b>		
3,4 m/s	3,6 m/s (+0,2)	3,5 m/s (+0,1)
		
<b>Winterbach-Remstal</b>		
1,9 m/s	1,9 m/s (0,0)	1,6 m/s (-0,3)
		
<b>Öhringen</b>		
2,8 m/s	2,9 m/s (+0,1)	2,5 m/s (-0,3)
		

Messung (2011-2020)	SynAKTerm 2.0 2001-2010	SynAKTerm 3.0 (2011-2020)
<b>Kaisersbach-Cronhütte</b>		
1,8 m/s	2,3 m/s (+0,5)	2,4 m/s (+0,6)
<b>Stötten</b>		
4,3 m/s	3,7 m/s (-0,6)	3,6 m/s (-0,7)
<b>Stimpfach-Weipertshofen</b>		
2,7 m/s	2,7 m/s (0,0)	3,0 m/s (+0,3)

Tabelle 3: (Mehrseitige Tabelle) Mittlere Windgeschwindigkeiten und Windrosen (links: Messung, Mitte: SynAKTerm 2.0, rechts: SynAKTerm 3.0) an DWD-Stationen im Teilgebiet Kraichgau-Hohenlohe.

## 4. Qualitätssicherung

Die Qualität der SynAKTerm und SynAKS wird durch eine Vielzahl von Maßnahmen geprüft bzw. sichergestellt. Diese Schritte zur Qualitätssicherung erfolgen sowohl im Berechnungsprozess (Abschnitte 4.1 und 4.2) als auch anhand der fertigen Datensätze (Abschnitte 4.3 bis 4.6).

### 4.1. Windfeldmodellierung

Die Ergebnisgüte des Modells METRAS ist in einer Reihe von Veröffentlichungen dokumentiert, so z.B. in [11] und [20]. Es erfüllt weitestgehend die in der VDI-Richtlinie 3783, Blatt 7 [32] bzgl. der Qualitätssicherung gestellten Anforderungen hinsichtlich Zugänglichkeit, Vollständigkeit, Evaluierung, Nachweis der Ergebnisgüte und Tests durch Dritte. Vollständig evaluiert im Sinne der Richtlinie wurde seitens der Modellentwickler die Modellversion METRAS-PCL 5.

- **Verfügbarkeit:**

Das Modell ist bei der Universität Hamburg frei verfügbar.

- **Vollständigkeit:**

Das Modell ist vollständig bzgl. der notwendigen Modelleigenschaften für die Mesoskalen Beta und Gamma. Für eine genaue Modellbeschreibung wird auf die Literatur verwiesen ([23], [24], [26], [27], [28]).

- **Evaluierung:**

Das Modell METRAS-PCL wurde vollständig nach der VDI-Richtlinie VDI 3783, Blatt 7 seitens der Modellentwickler und in der Arge IB Rau / METCON durch die Anwender Dr. Klaus Bigalke und Dr. Alexander Lohse evaluiert [32]. Die Modellversion METRAS PC ist seitens der Modellentwickler nicht vollständig formal evaluiert, erfüllt aber ebenfalls die Anforderungen der VDI-Richtlinie.

- **Nachweis der Ergebnisgüte:**

Die Ergebnisgüte des Modells ist in einer Reihe von Veröffentlichungen dokumentiert, z.B. in [25], [38], [20].

- **Test durch Dritte:**

Das Modell ist nicht nur durch die Modellentwickler und die Autoren ausgiebig getestet worden, sondern wird darüber hinaus bei über 20 externen Institutionen eingesetzt.

Über diese Anforderungen hinaus werden weitere Maßnahmen zur Qualitätssicherung getroffen:

1. Das Modell METRAS-PC wird mit charakteristischen Klassen des großskaligen Windklimas angetrieben. Dahinter steht die Philosophie, dass das bodennahe Windklima nur dann realitätsnah bestimmt werden kann, wenn alle topographischen Einflüsse nur durch das Modell selbst berechnet, nicht aber zusätzlich über die Modellantriebsdaten

vorgegeben werden. Häufig werden bei anderen Modellen / Verfahren zunächst bodennah gemessene Winddaten mit Hilfe eindimensionaler Modellrechnungen auf Höhenwinddaten umgerechnet, die dann zum Antrieb der dreidimensionalen Modellrechnungen verwendet werden. Dabei wird außer Acht gelassen, dass jede bodennahe Messung mehr oder weniger durch die Umgebungstopographie oder sogar lokale Effekte (z.B. Bebauung, Bewuchs) geprägt ist, so dass die daraus abgeleiteten Höhenwinde bereits Topographie- bzw. Bebauungseinflüsse enthalten können. Gerade in topographisch stark gegliedertem Gelände wie den Mittelgebirgen ist dies von elementarer Bedeutung, wenn man berücksichtigt, dass die Strömung bis zur doppelten Höhe ausgeprägter Erhebungen großräumig beeinflusst werden kann.

2. Das Modell METRAS-PC wird mit sogenannten offenen Rändern betrieben, an denen sich die Strömung frei einstellen kann. Im Gegensatz zu festen (Einström-) Randbedingungen passen sich die Strömungsverhältnisse im Modellgebiet vor allem in Randnähe besser an die topographischen Strukturen an. Insbesondere ist auch ein vom Modell berechneter Wechsel von Ein- zu Ausströmen und umgekehrt über den Rand möglich. Dieser Qualitätsgewinn in den Simulationsergebnissen kostet allerdings einen erheblichen Mehraufwand an Rechnerressourcen und Bearbeitungszeit, da aufgrund der offenen Ränder die Einschwingzeiten des Modells bis zum Erreichen quasi-stationärer Verhältnisse stark anwachsen.
3. Mesoskalige Modelle sind komplexe Programmwerkzeuge, deren Ergebnisse regelmäßig auf Plausibilität und Anzeichen möglicher Fehler (zum Beispiel numerische Instabilitäten) geprüft werden müssen. Von daher ist eine automatisierte Berechnung von der Modellanwendung bis zur statistischen Auswertung, die bei der Fülle der Modellrechnungen und gleichartiger Verarbeitungsschritte nahe liegen würde, nicht möglich. Bei der Erstellung synthetischer Ausbreitungsklassenstatistiken werden die Ergebnisse jeder einzelnen Clusterrechnung anhand von Laufprotokollen und graphisch aufbereiteten Modellergebnissen für den gesamten Simulationszeitraum von langjährig erfahrenen Anwendern geprüft. Im Einzelfall wird entschieden, ob die vorliegenden Ergebnisse für die statistische Auswertung geeignet sind oder ob gegebenenfalls Restarts / Neuinitialisierungen erforderlich werden.

## 4.2. Qualitätssicherung im Berechnungsverfahren

Ein Arbeitsleitfaden zur Qualitätssicherung im Berechnungsverfahren regelt alle einzelnen Berechnungsschritte im Detail, um sicherzustellen, dass jeder Schritt mit den jeweils korrekten Eingabedaten und mit für alle Teilgebiete einheitlichen Parametereinstellungen vorgenommen sowie alle notwendigen Prüfschritte vollzogen werden.

Der Arbeitsleitfaden regelt detailliert unter anderem, folgende Arbeitsschritte:

- Zusammenstellung und Aufbereitung von Rohdaten zur Bedeckung
- Zusammenstellung und Aufbereitung von Reanalysedaten
- Bearbeitungsschritte zu Clusteranalysen und Definition der Antriebs-Cluster
- Kriterien zur Festlegung der Grenzen eines neuen Teilgebiets
- Zusammenstellung der Rohdaten von Geländehöhen und Landnutzungen für die Modellrechnungen
- Koordinatentransformation zur Zusammenstellung von Daten unterschiedlicher Systeme
- Analyse des Geländes im Teilgebiet und einer weiten Umgebung zur Festlegung aus fachlicher Sicht geeigneter Modellgebiete
- Aufbereitung mehrerer Modellgitter zur Vorbereitung von Testrechnungen
- Filterverfahren zur Glättung der Randtopographie der Modellgitter (dadurch werden numerische Störeinflüsse auf die Modellergebnisse minimiert)
- Vorbereitung, Durchführung und Analyse von Testrechnungen, vor allem zur Auswahl eines geeigneten Modellgebietes
- Aufbereitung der Modellantriebsdaten für die Produktionsrechnungen auf Basis der Cluster
- Vorbereitung, Durchführung und Analyse der Produktionsrechnungen
- Protokollierung jeder einzelnen Produktionsrechnung
- Visualisierung von Zeitreihen und Strömungsfeldern jeder Produktionsrechnung
- Einzelkontrolle und visuelle Analyse jeder Produktionsrechnung und Festlegung des Auswertzeitraums; ggf. Wiederholung, Restart, Modifikation der Rechnung oder im Extremfall Aussortieren einer Rechnung
- analog Vorbereitung, Durchführung und Analyse der Modellrechnungen für die thermodynamischen Strömungssysteme
- Zusammenstellung und Aufbereitung der Modellergebnisse für die Auswertung
- Zusammenstellung der Informationen aus Clusteranalyse, Clusterzeitreihen, Modellgebieten und Modellergebnissen für die statistische Auswertung
- Durchführung der statistischen Auswertungen zu SynAKTerm® und SynAKS®
- Aufbereitung von Messdaten zur Qualitätskontrolle

- Qualitätskontrolle der SynAKTerm® / SynAKS® anhand subjektiver und objektiver Bewertungsverfahren
- Erstellung von Datenarchiven der resultierenden SynAKTerm® / SynAKS®

### 4.3. Flächendeckende Plausibilitätsprüfung

Die SynAKTerm jedes neu berechneten Teilgebietes werden als Windrosen und Jahresmittel der Windgeschwindigkeit aufbereitet und flächenhaft vor dem Hintergrund der Topographie dargestellt. Diese Darstellungen werden von fachlich langjährig erfahrenen Modellierern und Anwendern flächendeckend für jedes neu berechnete Teilgebiet auf Plausibilität geprüft. Dabei geht es im Wesentlichen um die Frage, ob sich die berechneten Windrichtungsverteilungen im Kontext der umgebenden lokalen und regionalen topographischen Strukturen plausibel erklären lassen und die mittleren Windgeschwindigkeiten zu Landnutzungen und Geländere relief passen.

Die flächendeckende Plausibilitätsprüfung ermöglicht keine Bewertung einzelner synthetischer Datensätze. Sie ermöglicht aber gegebenenfalls die Identifizierung größerer Bereiche oder Regionen, in denen die Datensätze möglicherweise nicht die gewünschte Qualität erreichen.

### 4.4. Vergleich mit Messdaten

Innerhalb jedes neu berechneten Teilgebietes werden die dort vorliegenden Messdaten aus dem Stationsnetz des Deutschen Wetterdienstes zu AKTerm aufbereitet. Die nahe der Stationen berechneten SynAKTerm werden mit den gemessenen AKTerm verglichen. Diese Vergleiche umfassen

- Prüfung der räumlichen Repräsentativität von Messung und synthetischem Datensatz
- subjektive Bewertung der Übereinstimmung von Windrichtungsverteilung (Windrosen) und mittlerer Windgeschwindigkeit
- objektive Bewertung der 10-jährigen Zeitreihen anhand von Korrelationskoeffizienten und Trefferquoten

Der Vergleich mit Messdaten wird ausführlich im Kapitel 5 erläutert.

### 4.5. Plausibilitätsprüfung im Einzelfall

Durch den stationsbezogenen Vergleich mit Messdaten (Abschnitt 4.4) kann nicht die Qualität von Hunderttausenden synthetischen Datensätzen im Vorfeld geprüft werden.

Wenn eine SynAKS oder SynAKTerm für einen Standort angefordert wird, erfolgt, sofern durch den Gutachter nicht explizit eine Repräsentativitätsprüfung (Abschnitt 4.6) gefordert wird, eine Vorprüfung dahingehend, ob die synthetischen Daten räumlich repräsentativ sind. Eine

Einschränkung der Repräsentativität wäre dann gegeben, wenn die zu erwartenden Windverhältnisse und damit auch Ausbreitungen am Standort durch kleinskalige topographische Strukturen dominiert werden, die durch die synthetischen Daten nicht aufgelöst werden können. Zur Beurteilung werden die Windrose am Standort sowie die Windrosen im Umfeld des Standortes vor dem Hintergrund einer topographischen Karte oder eines Luftbildes beurteilt.

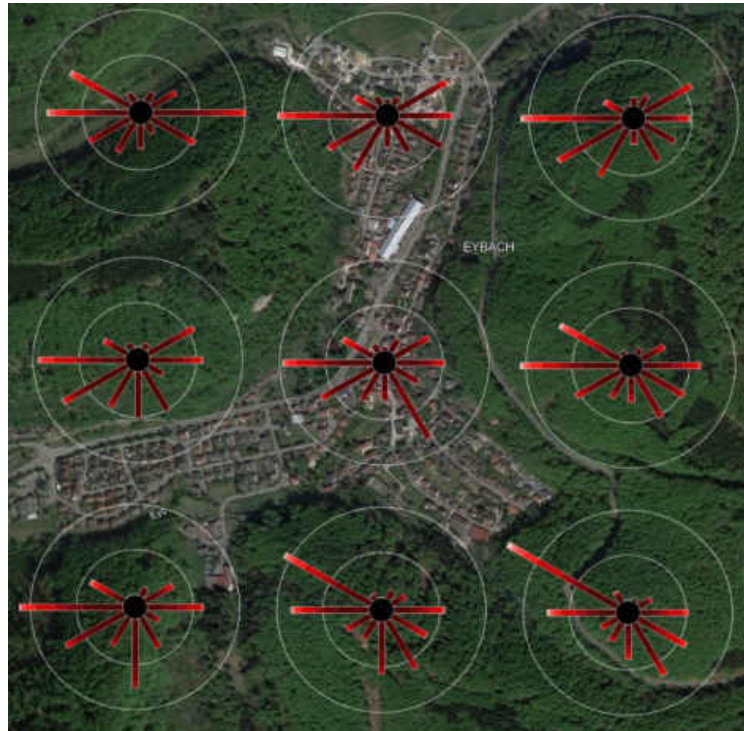


Abbildung 14: Synthetische Windrosen (Version 3.0) in Google Earth© im Gebiet um einen Standort in Eybach.

In dem fiktiven Beispiel der Abbildung 14 läge der Standort in Eybach östlich von Geislingen an der Steige. Das sehr enge Eybachtal verläuft hier von Nord nach Süd. Keiner der um den Standort liegenden synthetischen Datensätze löst diese kleinräumige, aber ausgeprägte Topographie hinreichend fein auf und zeigt die zu erwartenden Hauptwindrichtungen entlang der Talachse.

In diesem Fall würde der Immissionsgutachter darüber in Kenntnis gesetzt werden, dass für den Standort direkt, keine hinreichend repräsentativen synthetischen Daten zur Verfügung gestellt werden können.

#### 4.6. Repräsentativitätsprüfung im Einzelfall

Die Repräsentativitätsprüfung im Einzelfall erfolgt auf Anforderung eines Immissionsgutachters und für die von ihm verantwortete Vorgehensweise und zielt auf die Empfehlung und Bereitstellung einer geeigneten SynAKTerm oder SynAKS ab.

Die SynAKTerm sowie die SynAKS liegen flächendeckend in einer räumlichen Auflösung von 500 m vor und repräsentieren die langjährigen mittleren Verhältnisse auf den umgebenden

Rasterflächen von 500 x 500 m<sup>2</sup>. Damit ist aber noch nicht gesagt, dass sie automatisch für jede Ausbreitungsrechnung an einem Standort innerhalb dieser Rasterflächen geeignet sind. Oder anders gesagt: Für eine Ausbreitungsrechnung ist nicht automatisch die dem Anlagenstandort nächstgelegene SynAKTerm bzw. SynAKS geeignet.

Im Rahmen einer Repräsentativitätsprüfung wird im Einzelfall untersucht, welche der benachbarten SynAKTerm / SynAKS repräsentativ für die meteorologischen Verhältnisse ist, die im Rahmen einer Ausbreitungsrechnung als Antriebsdaten benötigt werden. Die Repräsentativitätsprüfung („RP“) weist damit gewisse Parallelen zu einer „Qualifizierten Prüfung der Übertragbarkeit von Windrichtung und Windgeschwindigkeit sowie der Ausbreitungsklasse“ („QPR“) auf, wie sie in VDI-RL 3783 Blatt 20 [35] beschrieben wird. Im Gegensatz zu der QPR geht es bei der RP jedoch in der Regel nicht um die Übertragung von synthetischen Daten an einen anderen Standort, da ja bereits für jeden Standort ein eigener synthetischer Datensatz vorliegt. Vielmehr geht es um die Prüfung, welche der vielen SynAKTerm /SynAKS innerhalb des Rechengebietes der Ausbreitungsrechnung unter Berücksichtigung der gewählten Vorgehensweise am besten geeignet ist.

Die Festlegung der Vorgehensweise im Rahmen der Ausbreitungsrechnung liegt in der Verantwortung des Gutachters für die Immissionsprognose. Mit „Vorgehensweise“ ist hier die Wahl des Ausbreitungsmodells (AUSTAL, LASAT, ...), ggf. eines Windfeldmodells (diagnostisch, prognostisch, ...), ohne / mit Berücksichtigung von Gebäuden, Größe des Rechen- und Beurteilungsgebietes, Lage und Höhe der Quelle(n), Art der Immissionen (Stoffe, Geruch), usw. zu verstehen.

Die Repräsentativitätsprüfung umfasst in der Regel folgende Untersuchungspunkte, die je nach Anforderung der speziellen Aufgabenstellung modifiziert oder ergänzt werden können:

- Qualitative Standortbeschreibung, Einbettung in die regionale Topographie
- Beschreibung des Verwendungszwecks der SynAKTerm / SynAKS im Rahmen der vom Immissionsgutachter benannten Vorgehensweise
- Räumliche Analyse synthetischer Winddaten im erweiterten Untersuchungsgebiet um den Anlagenstandort mit Bezug auf die topographischen Gegebenheiten und regionalen Anströmverhältnisse
- Abschätzung subskaliger topographischer Einflüsse auf die Windverhältnisse am Standort
- Abschätzung der räumlichen Repräsentativität der SynAKTerm / SynAKS am Standort bzw. in dessen direkter Nachbarschaft
- Abschätzung der topographischen Einflüsse auf die Windverhältnisse im Rechengebiet auf Basis von Topographieanalyse und synthetischen Winddaten



- Bewertung der Vorgehensweise hinsichtlich einer realitätsnahen Abbildung der topographischen Einflüsse auf die Windverhältnisse; Abgrenzung der vom Windfeldmodell zu reproduzierenden topographischen Einflüsse und der mit der SynAKTerm / SynAKS vorzugebenden Einflüsse im Sinne der VDI 3783 Blatt 13 Abschnitt 4.7.1 [33]
- Auswahl einer SynAKTerm / SynAKS im Rechengebiet gemäß den im vorherigen Prüfschnitt definierten Anforderungen

Im Ergebnis wird für die vom Immissionsgutachter genannte Vorgehensweise entweder die Verwendung der ausgewählten SynAKTerm / SynAKS an einem definierten Ersatz-Anemometerstandort empfohlen oder festgestellt, dass keine der in Standortumgebung vorliegenden SynAKTerm / SynAKS (für diese Vorgehensweise) geeignet ist.

## 5. Vergleich mit Messungen

Der landläufigen Meinung entsprechend bilden Messungen „die Realität“ ab, so dass Modelle als umso besser angesehen werden, je besser ihre Ergebnisse mit Messungen übereinstimmen. Auf Albert Einstein soll jedoch die Aussage zurückgehen: *„Nobody believes models (theory), except for the people who made them. Everybody believes measurements (experiments), except for the people who made them.“*

Letztlich lässt sich zwar die Qualität der synthetischen Daten nur anhand von Vergleichen mit Messungen beurteilen. Jedoch ist es für einen fachlich angemessenen Vergleich unverzichtbar, einige Vorüberlegungen zur grundsätzlichen Vergleichbarkeit beider Arten von Daten anzustellen.

### 5.1. Zur (Un-)Vergleichbarkeit von Modell und Messung

Der Wind ist eine zeitlich und räumlich hoch variable meteorologische Größe und wird u.a. von dem Geländere relief und der Art der Bodenbedeckung in einer weiten Umgebung geprägt.

Windmessungen stellen per se zunächst einmal nur Punktwerte dar. Inwieweit sie für einen größeren Umkreis um die Station räumlich repräsentativ sind, hängt in hohem Maße von den lokalen, aber auch größerräumigen Gegebenheiten der Stationsumgebung ab. Leicht nachvollziehbar ist, dass eine Windrichtungsmessung innerhalb einer städtischen Straßenschlucht eine völlig andere Windrichtung zeigt als eine ansonsten gleichartige Messung 50 m weiter in der senkrecht einmündenden Nebenstraße. Aber auch im vermeintlich freien Gelände beeinflussen Gebäude und Baumgruppen und das fast nie homogene Geländere relief der Umgebung die Messungen meist erheblich. Eine „regionale Repräsentativität“, wie sie häufig Flughafenstationen unterstellt wird, liegt höchstens in Ausnahmefällen vor. Im Abschnitt 5.3 werden einige Beispiele zur Einschätzung der räumlichen Repräsentativität von Messstandorten gegeben.

Welchen Einfluss bereits eine sehr geringe räumliche Verschiebung auf die langjährig gemessene Windverteilung haben kann, zeigt das Beispiel der DWD-Station *Geisenheim* in Abbildung 15. Ende 2006 wurde die Windmessung um gut 60 m nach Süden verlegt und dabei auch die Messhöhe von 10 m auf 12 m geändert. Diese geringe Lageverschiebung führte zu einer signifikanten Änderung der langjährigen Windrichtungsverteilung, während die jahresgemittelte Windgeschwindigkeit mit 2,5 m/s (2007-2021) gegenüber 2,4 m/s (1995-2006) nahezu gleich blieb. An dem neuen Standort wäre aufgrund der etwas größeren Distanz zu Bäumen und Gebäuden im Nordosten zu erwarten gewesen, dass es leichte Verschiebungen bei Anströmrichtungen aus Nordost bis Südost bei leichter Erhöhung der Windgeschwindigkeit gibt. Tatsächlich hat sich jedoch die gesamte Windrose um etwa 20° im Uhrzeigersinn gedreht, in den Nordwestsektoren etwas geringer, und die Häufigkeitsverteilung ist insbesondere im Westen über

die Sektoren glatter als in den Vorjahren. Eine mögliche Ursache für die Differenzen könnte auch eine falsche Einnordung der Messinstrumente sein. Da die Verschiebung aber nicht über alle Sektoren gleich ist, muss auch die minimale Standortverlegung an einer ansonsten vergleichsweise frei gelegenen Station eine Rolle spielen.

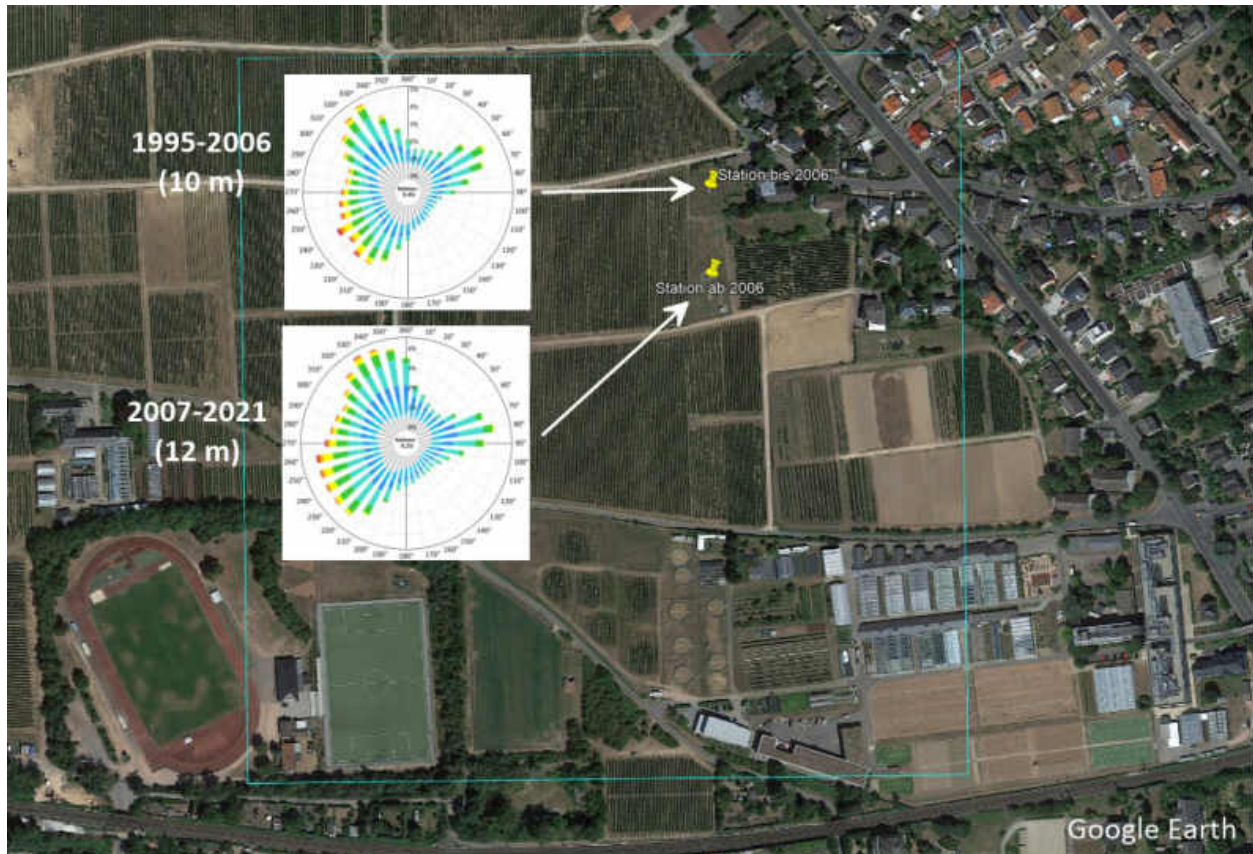


Abbildung 15: Windrichtungsverteilungen an der DWD-Station Geisenheim und Bezugsfläche der zugehörigen SynAKTerm (cyan).

Zum Vergleich ist in Abbildung 15 auch die Bezugsfläche von  $500 \times 500 \text{ m}^2$  des korrespondierenden synthetischen Datensatzes mit blauem Rahmen eingezeichnet. Offensichtlich müssen schon allein deshalb Differenzen zwischen synthetischen und gemessenen Daten zu erwarten sein, weil sich die charakteristischen Windverhältnisse bereits innerhalb dieser Bezugsfläche signifikant ändern.

Ein weiteres Beispiel für die hohe Variabilität gemessener charakteristischer Windverhältnisse auch auf kleinem Raum unter vergleichsweise homogenen Geländebedingungen zeigt die Abbildung 16. Die Station *Königswinter-Heiderhof* wurde im Jahr 2020 um etwa 2 km nach Südosten verlegt. Die alte und neue Stationslage ist in der Abbildung eingetragen, ebenso die langjährige Windrichtungsverteilung an der alten Position und seit der Stationsverlegung. Das Gelände weist ein nur geringes Relief auf, der Höhenunterschied zwischen beiden Stationen beträgt knapp 12 m und die alte Station mag leicht von einigen Bäumen entlang der benachbarten Straße beeinflusst gewesen sein.

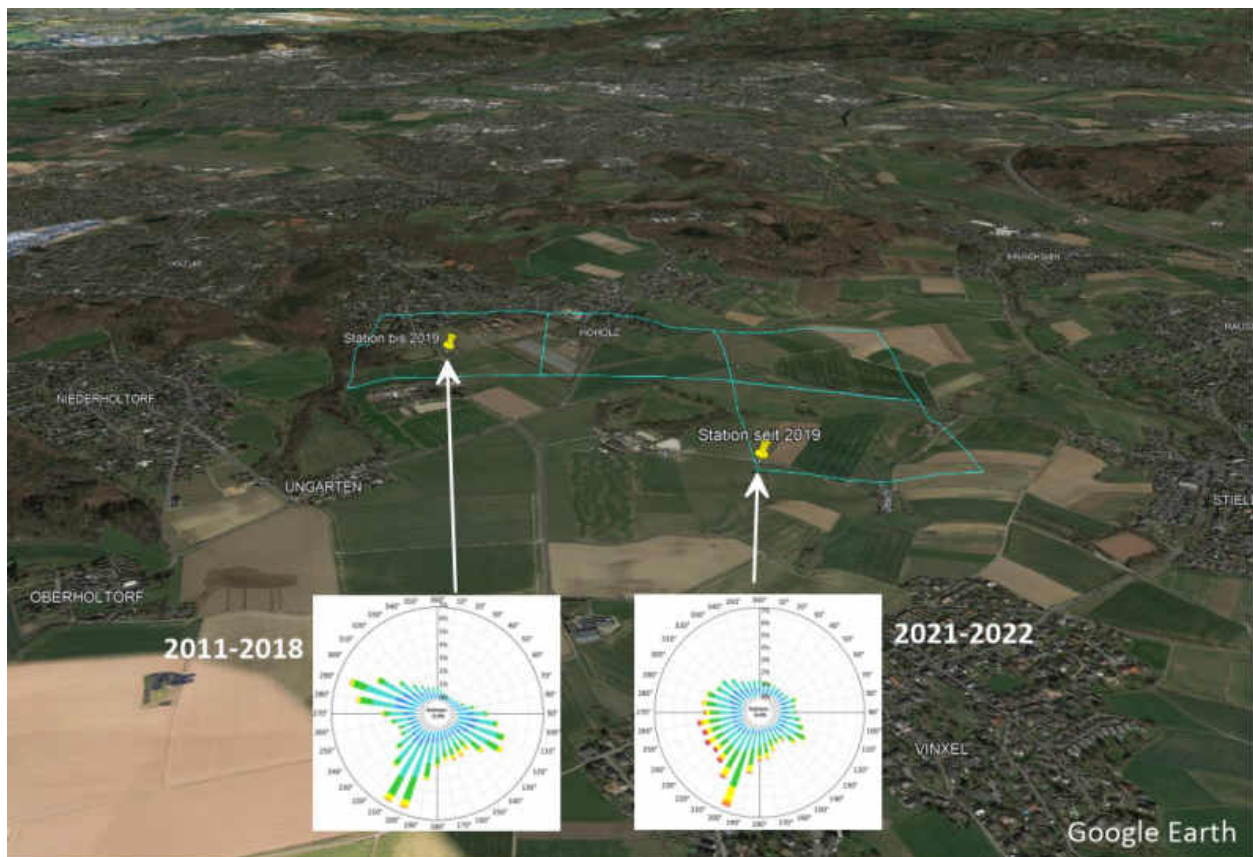


Abbildung 16: Windrichtungsverteilungen an der DWD-Station Königswinter-Heiderhof und Bezugsflächen der benachbarten SynAKTerm (cyan).

Gemessen an den geringen Unterschieden in der Stationsumgebung weisen die Windrosen zwischen beiden Standorten eine so unterschiedliche Charakteristik auf, dass sie sich nur schwer aus den Stationslagen erklären lässt. Am alten Standort liegt eine dreigipflige Verteilung mit Hauptmaximum aus Südsüdwest und zwei nur wenig schwächeren Nebenmaxima aus Westnordwest und Ost-südost vor. Die mittlere Windgeschwindigkeit beträgt 2,8 m/s. Am neuen Standort liegt ein schmales Hauptmaximum bei Südsüdwest ( $200^\circ$ ) vor, das Nebenmaximum aus Südost ist nur noch sehr schwach ausgeprägt. Ansonsten treten sehr gleichmäßig verteilt Winde aus Südsüdwest bis Nordwest auf. Die Windgeschwindigkeit ist mit 3,1 m/s um 0,3 m/s höher als am alten Standort. Auch die Station Königswinter-Heidershof belegt, wie stark sich kleinräumige Einflüsse von Relief und Oberflächenbeschaffenheit auf die Windverhältnisse auswirken können. Auch hier wären Differenzen zwischen synthetischen und gemessenen Daten zu erwarten, weil sich derartige Einflüsse subskalig innerhalb der Bezugsflächen abspielen.

Das dritte Beispiel zeigt eine vermeintlich regional repräsentative Flughafenstation (Abbildung 17). In Stuttgart-Echterdingen wurde im Jahr 1995 die Station lediglich 300 m parallel zur Landebahn verschoben. Die 10-jährigen Windrichtungsverteilungen vor und nach Verlegung zeigen eine signifikant andere Charakteristik. Das Häufigkeitsmaximum dreht unter Abschwächung um  $20^\circ$  von Westsüdwest auf Südwest, das erste Nebenmaximum um  $10^\circ$  von

Ost in Richtung Nordosten. Das ursprünglich dritte Nebenmaximum aus Nordwest ist verschwunden und die Häufigkeiten nehmen am neuen Standort von Südwesten nach Norden stetig ab.

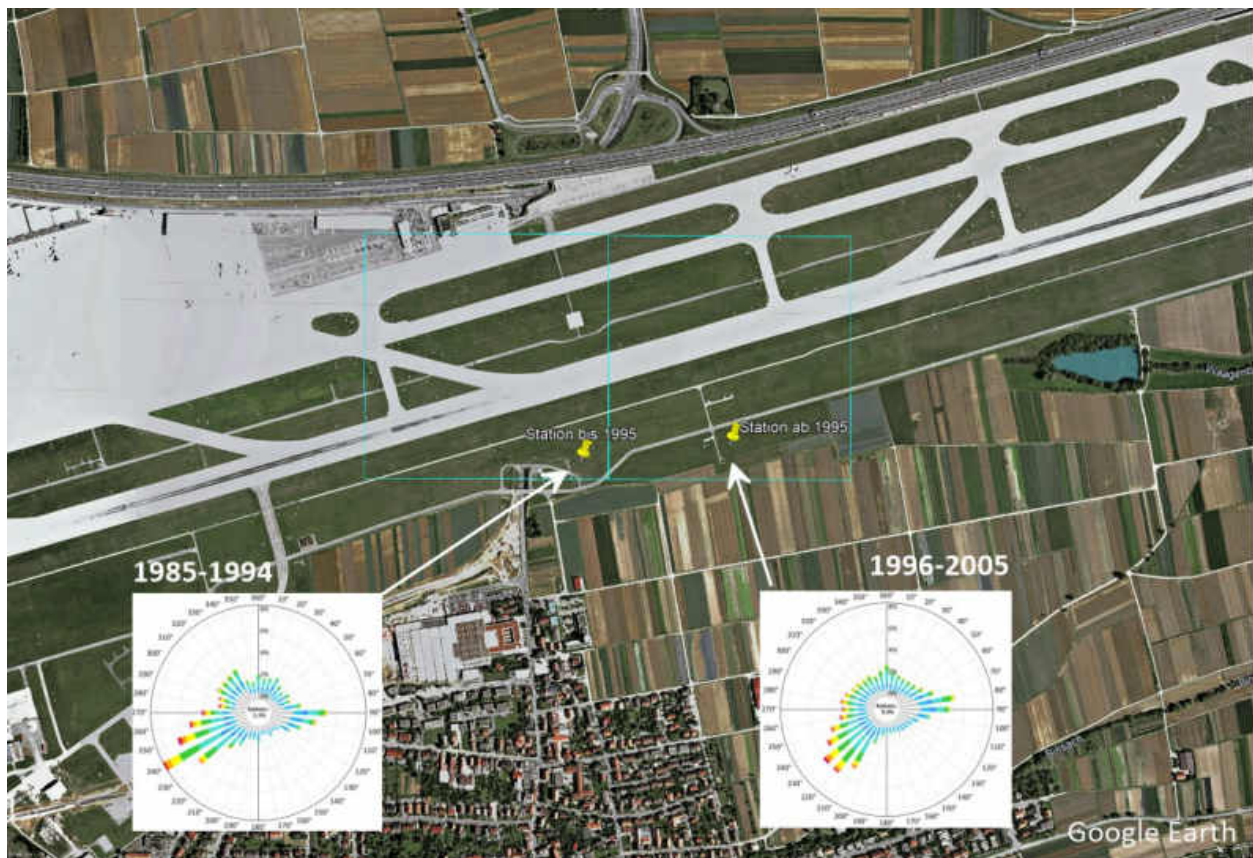


Abbildung 17: Windrichtungsverteilungen an der DWD-Station Stuttgart-Echterdingen und Bezugsflächen der benachbarten SynAKTerm (cyan).

Die drei Stationsbeispiele<sup>7</sup> belegen eindrücklich, wie stark viele Messungen auch in dem qualitätsgesicherten Stationsnetz des Deutschen Wetterdienstes von kleinräumigen Umgebungsbedingungen geprägt sind. Zu diesen Standorteinflüssen kommen zusätzlich Mess-, Wartungs- und Auswertefehler. Deshalb muss davon ausgegangen werden, dass die Windmessungen des DWD-Messnetzes keineswegs generell die charakteristischen Verhältnisse in einer größeren Stationsumgebung widerspiegeln. Flughafenstationen sind hiervon nicht ausgenommen.

Die synthetischen Daten beruhen auf Modellrechnungen mit einer räumlichen Auflösung von konstant 500 m. Im Gegensatz zu Messungen gelten sie also nicht punktuell, sondern stellen Mittelwerte über Flächen von 500 m x 500 m dar und „sehen“ auch die umgebende Topographie

<sup>7</sup> Als weiteres Beispiel wird im Abschnitt 5.5 die DWD-Station Gailingen genauer analysiert.

in einer entsprechenden räumlichen Auflösung. Topographische Strukturen ähnlicher oder sogar geringerer Ausdehnung werden in ihrer Wirkung auf die Windverhältnisse nicht erfasst.

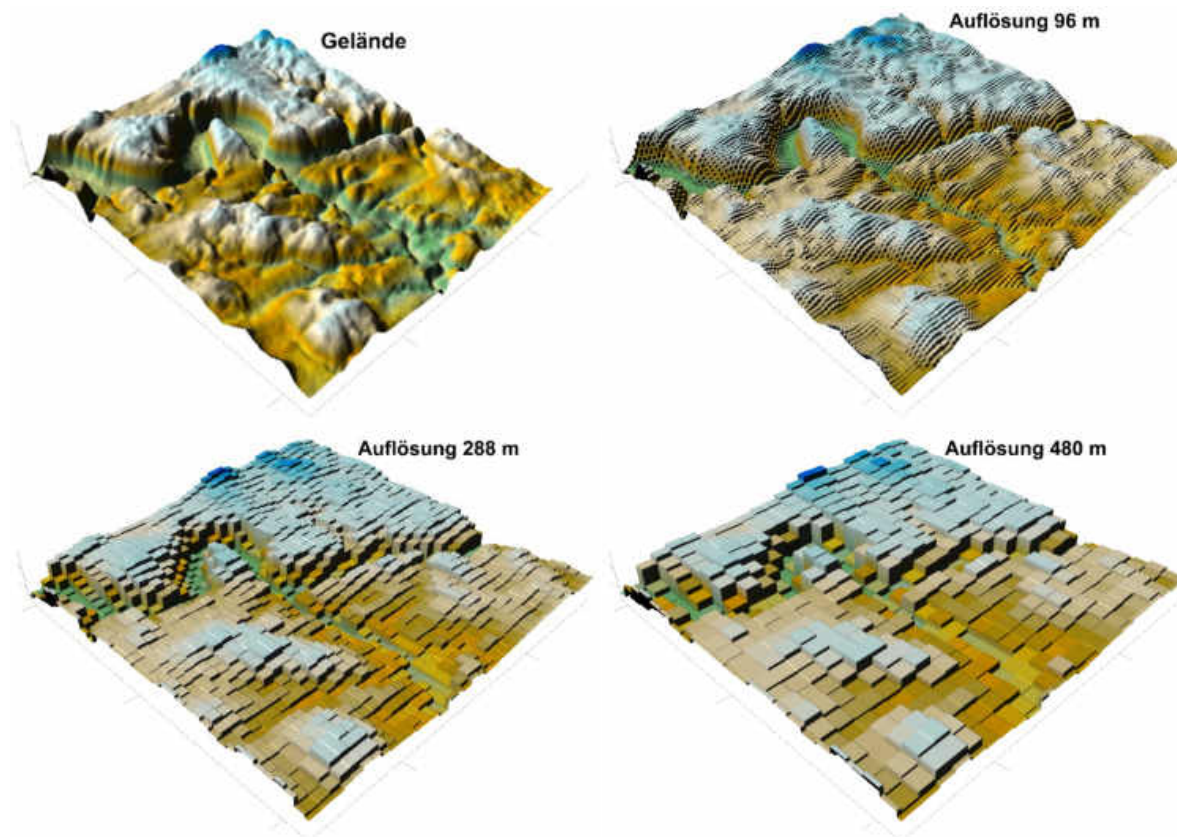


Abbildung 18: Darstellung des realen Geländes (links oben) durch Modellgitter unterschiedlicher räumlicher Auflösung.

Ein Beispiel für die von der Gitterauflösung abhängige Darstellung des Geländereiefs ist in Abbildung 18 gegeben. Im realen Gelände liegen neben den dominanten mäandernden Talverläufen viele kleine Seitentäler, Mulden und Hügel vor. Diese Feinstrukturen gehen mit abnehmender Gitterauflösung immer weiter verloren. In der Auflösung von rund 500 m ist das mäandernde Haupttal noch enthalten und auch das größere Seitental wird noch näherungsweise aufgelöst. Neben der großen Hochfläche im Hintergrund heben sich im Bildvordergrund noch zwei kleinere Höhenzüge ab. Die vielen kleinen Mulden und Hügel können auf diesem Raster jedoch nicht mehr dargestellt werden.

**Eine Vergleichbarkeit von synthetischen Daten mit Messungen wäre streng genommen nur dann gegeben, wenn beide Datenarten identische räumliche Repräsentativität aufweisen – was in den seltensten Fällen gegeben sein dürfte. Vielmehr müssen sich beide Arten von Daten aufgrund unterschiedlicher räumlicher Repräsentativität in aller Regel unterscheiden.**

**Näherungsweise Identität kann nur darüber erreicht werden, dass synthetische Daten über ein wie auch immer geartetes Korrekturverfahren an die Messdaten justiert werden.**

Berücksichtigt man die oben exemplarisch dargestellte lokale Variabilität von Messungen, dann muss allerdings erwartet werden, dass synthetische Daten, die an Messungen justiert wurden, abseits der Messorte die realen Verhältnisse weniger gut abbilden. Die SynAKTerm werden deshalb *nicht* an Messdaten justiert.

Unter Berücksichtigung dieser Einschränkungen können Messungen gut zur Bewertung der Qualität der synthetischen Daten herangezogen werden, wenn sie nicht oder nur wenig lokal beeinflusst sind und die im weiteren Umkreis umgebende Topographie charakteristische Größenskalen von mehr als 500 m hat.

Testrechnungen haben gezeigt, dass sich eine noch bessere Übereinstimmung mit Messungen erzielen ließe, wenn die synthetischen Daten mit einer höheren Auflösung berechnet würden. So konnte beispielsweise für die DWD-Station auf dem Wendelstein gezeigt werden, dass die Messung mit einem langjährigen Jahresmittel von 6,6 m/s von synthetischen Daten mit 500 m Auflösung mit nur 2,5 m/s im Jahresmittel schlecht reproduziert wird. Synthetische Daten, die mit 150 m Auflösung gerechnet wurden, zeigen dagegen ein Jahresmittel von 5,1 m/s, das der Messung schon recht nahe kommt. Im Umkehrschluss ließ sich daraus folgern, dass die Messung nur einen Repräsentativitätsradius von etwa 25 m hat und einen Speed-Up-Faktor von 2-3 aufweist.

Laut Anhang 2 Ziff. 2.1 der TA Luft sollen die meteorologischen Antriebsdaten *für den Ort im Rechengebiet, an dem sie vorgegeben werden, charakteristisch sein*. Wird die Ausbreitung mit Windfeldmodell und Gelände gerechnet, so bedeutet dieser Passus, dass die meteorologischen Daten die Verhältnisse in Umgebung der so genannten EAP (Ersatz-Anemometerposition) charakteristisch beschreiben sollen. Wird dagegen ohne Gelände mit homogener Meteorologie gerechnet, so sollen die meteorologischen Antriebsdaten für die mittleren Verhältnisse im Ausbreitungsraum charakteristisch sein. Es geht also keineswegs um eine Punktgenauigkeit.

Die SynAKTerm sind als meteorologische Antriebsdaten für Ausbreitungsrechnungen entwickelt worden. Die meisten Ausbreitungsrechnungen erfolgen für Rechengebiete mit Ausdehnungen von einigen 100 m bis wenige Kilometer Kantenlänge. Da die SynAKTerm per se mittlere Verhältnisse über ihre Bezugsflächen beschreiben, entsprechen sie den Anforderungen der TA Luft nach charakteristisch repräsentativen Daten häufig besser als (punktuelle) Messungen, die keine entsprechende räumliche Repräsentativität aufweisen.

## 5.2. Messnetz des Deutschen Wetterdienstes

Zum Vergleich der SynAKTerm mit AKTerm auf Basis von Messungen werden ausschließlich Daten aus dem Messnetz des Deutschen Wetterdienstes herangezogen. DWD-Stationen werden

nach WMO-Standards<sup>8</sup> eingerichtet und betrieben, die Daten unterliegen einer abgestuften Qualitätskontrolle. Damit werden lokale Einflüsse in der Regel gering gehalten. Gewisse Einschränkungen hinsichtlich der WMO-Standards können allerdings bei früher eingerichteten Stationen bestehen [12].

Stationen aus anderen Messnetzen werden nicht zum Vergleich herangezogen. Die Luftmessnetze der Länder umfassen zwar an einigen Standorten auch meteorologische Messungen. Die Standorte sind aber nach ihrer Eignung für Immissionsmessungen ausgewählt und deshalb in der Regel für Windmessungen nicht hinreichend räumlich repräsentativ. Standorte anderer Messnetze (z.B. Meteo Group) genügen erfahrungsgemäß häufig nicht den Anforderungen der VDI 3783 Blatt 21 [36] oder den WMO-Kriterien an Windmessstationen. Zudem sind die nötigen Informationen zu den Standorten meist nicht frei zugänglich.

Die Abbildung 19 gibt einen Überblick über die Lage der DWD-Messstationen etwa südlich einer Linie Mönchengladbach – Eschwege, an deren Standorten bisher SynAKTerm berechnet wurden. Die farbig hinterlegte Geländehöhe vermittelt auch einen ersten Eindruck zur regionalen topographischen Lage der Stationen. So ist beispielsweise bei den Stationen Lahr, Rheinstetten und Mannheim offensichtlich, dass sie im von Süden nach Norden verlaufenden Rheintal liegen und daher – abgesehen von möglichen lokalen Einflüssen – eine entsprechende Kanalisierung in den Windrosen zu sehen sein dürfte. Auch beispielsweise Köln-Bonn, Ingolstadt oder Straubing liegen in mehr oder minder breiten Tallagen, allerdings anderer Orientierung und entsprechend anderer zu vermutender Kanalisierung. Im Gegensatz hierzu sind beispielsweise Hornisgrinde, Feldberg, Klippeneck, Großer Arber oder Kahler Asten Stationen in Gipfel- oder zumindest Höhenlage mit vermutlich höheren Windgeschwindigkeiten (Speed-Up-Effekt) und Windrichtungsverteilungen, die sehr stark von der lokalen Stationslage bezüglich Kuppen, Grate etc. abhängen. Andererseits ist aus dieser Abbildung allein nicht ersichtlich, dass beispielsweise Weinbiet in Bezug zur Umgebung ebenfalls in sehr exponierter Höhenlage liegt. Insofern ist für jede einzelne Station eine Einschätzung der räumlichen Repräsentativität und möglicher lokaler Einflüsse entweder aufgrund der Umgebungsbebauung (oder Vegetation) oder des kleinräumigen Geländereiefs vorzunehmen.

---

<sup>8</sup> WMO: World Meteorological Organization



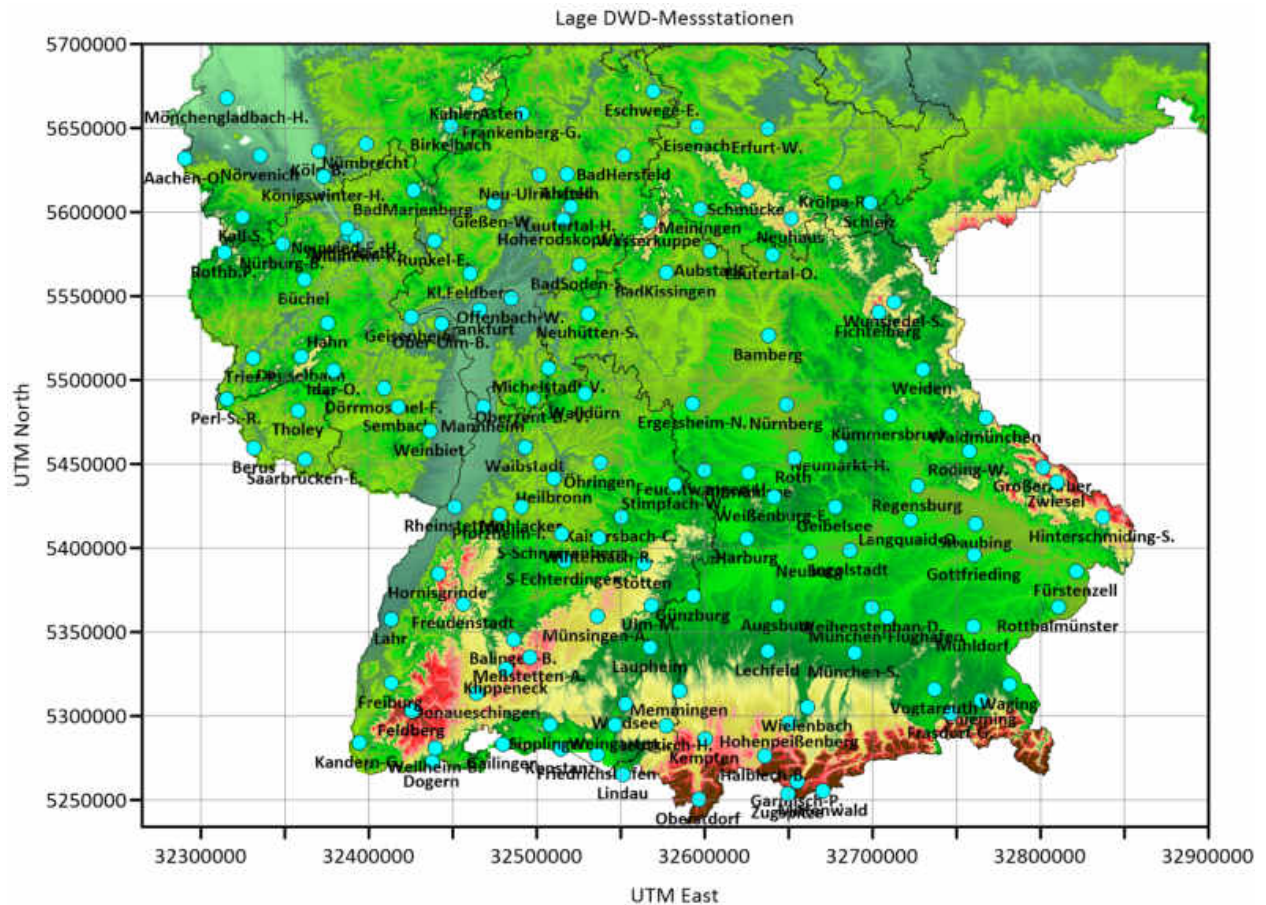


Abbildung 19: DWD-Messstationen in Süddeutschland.

### 5.3. Räumliche Repräsentativität der Stationen

Alle DWD-Stationen wurden vor dem Vergleich einer genauen Analyse der räumlichen Repräsentativität unterzogen. Diese Analyse kann immer nur bis zu einem gewissen Grad objektiv sein, da sich kaum objektiv bestimmbare Kriterien für die räumliche Repräsentativität definieren lassen. Zumindest kann aber eingeschätzt werden, ob eine Stationsmessung mehr oder weniger stark von lokalen Gegebenheiten gestört oder beeinflusst sein kann.

Die Vorgehensweise einer solchen Einschätzung der räumlichen Repräsentativität wird hier am Beispiel von acht sehr unterschiedlich gelegenen Stationen Krölpa-Rockendorf, Saarbrücken-Enzheim, Freudenstadt, Bad Soden-Salmünster, Kahler Asten, Klippeneck, Regensburg und Zugspitze beschrieben.



Abbildung 20: Luftbilder (Google Earth) der DWD-Station Krölpa-Rockendorf mit eingezeichneten Umkreisen (gelb) von 100 m (links) und 250 m (rechts, Blickrichtung Nord).

Die Station *Krölpa-Rockendorf* (Abbildung 20) befindet sich im Kotschautal im thüringischen Vogtland. Die Messhöhe beträgt 12 m. Im Umkreis von 100 m um den Messmast liegen, abgesehen von dem kleinen Stationsgebäude, nur Felder. Lokale Einflüsse auf die Messungen sind nicht erkennbar. Das Gelände weist über einen Umkreis von 250 m um die Station hinaus ein von Norden nach Süden gerichtetes, aber gleichmäßiges Gefälle auf. Die umgebende Topographie kann somit von dem Windfeldmodell sehr gut aufgelöst werden. Insgesamt wird die *räumliche Repräsentativität* der Messung im Vergleich zur SynAKTerm als *sehr gut* bewertet.



Abbildung 21: Luftbilder (Google Earth) der DWD-Station Saarbrücken-Enzheim mit eingezeichneten Umkreisen (gelb) von 100 m (links) und 250 m (rechts, Blickrichtung Ost).

Die Station *Saarbrücken-Enzheim* (Abbildung 21) liegt am südlichen Rand des Flughafens auf einem Hochplateau. Die Messhöhe beträgt 10 m. Im Umkreis von 100 m um den Messmast befinden sich außer dem Stationsgebäude in südliche Richtung noch einige Häuser und Bäume. Wahrscheinlich wirken in den Sektoren zwischen Südwest und Südost lokale Einflüsse auf die Messungen. Das Gelände ist im Umkreis von 250 m um die Station weitgehend eben. Erst in deutlich größeren Entfernungen ist das Gelände strukturiert. Die umgebende Topographie kann somit von dem Windfeldmodell sehr gut aufgelöst werden. Insgesamt wird die *räumliche Repräsentativität* der Messung im Vergleich zur SynAKTerm als *gut* bewertet.



Abbildung 22: Luftbilder (Google Earth) der DWD-Station Freudenstadt mit eingezeichneten Umkreisen (gelb) von 100 m (links) und 250 m (rechts, Blickrichtung Süd).

Die Station *Freudenstadt* (Abbildung 22) liegt im nordöstlichen Schwarzwald. Die Messung wird auf dem Friedrichturm in einer Höhe von 34 m vorgenommen. Im Umkreis von 100 m um den Turm sind eine Reihe von Gebäuden und Bäumen zu erkennen. Aufgrund der großen Messhöhe dürften diese die Messungen nur geringfügig beeinflussen. Das Gelände hat im Umkreis von 250 m überwiegend den Charakter eines Hochplateaus, wenngleich es nach Westen bereits abzufallen beginnt. Die umgebende Topographie kann, je nach Lage der Gitterpunkte, von dem Windfeldmodell gut aufgelöst werden. Insgesamt wird die *räumliche Repräsentativität* der Messung im Vergleich zur SynAKTerm deshalb als *gut* bewertet.



Abbildung 23: Luftbilder (Google Earth) der DWD-Station Bad Soden-Salmünster mit eingezeichneten Umkreisen (gelb) von 100 m (links) und 250 m (rechts, Blickrichtung Nordnordost).

Die Station *Bad Soden-Salmünster* (Abbildung 23) liegt zwischen Spessart und Vogelsberg im Kinzigtal. Die Messhöhe beträgt 10 m. Auf dem Luftbild sind im Umkreis von 100 m neben den Klärbecken etliche Bäume zu erkennen. Die Auswertung der Messungen führt auf eine Rauigkeitslänge von mehr als 0,3 – 0,4 m, so dass erhebliche lokale Einflüsse vor allem des Bewuchses vorliegen. Das Gelände ist dagegen im Umkreis von 250 m weitgehend eben, in der weiteren Umgebung aber durch das Kinzigtal geprägt. Die umgebende Topographie kann von dem Windfeldmodell sehr gut aufgelöst werden. Insgesamt wird die *räumliche Repräsentativität* der Messung im Vergleich zur SynAKTerm wegen der lokalen Einflüsse nur als *befriedigend* bewertet.

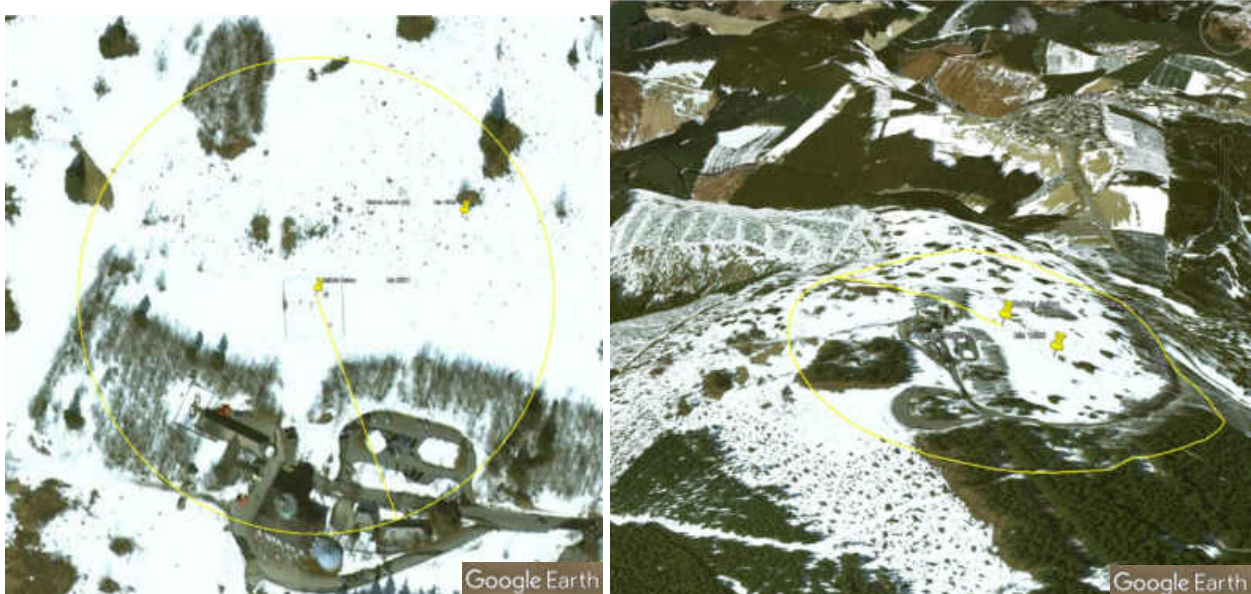


Abbildung 24: Luftbilder (Google Earth) der DWD-Station Kahler Asten mit eingezeichneten Umkreisen (gelb) von 100 m (links) und 250 m (rechts, Blickrichtung West).

Die DWD-Messung auf dem *Kahlen Asten* (Abbildung 24) im Rothaargebirge erfolgt an einem Mast in 27 m Höhe. Im Umkreis von 100 m sind zwar insbesondere im Süden einige Gebäude und Bäume zu erkennen. Aufgrund ihrer Entfernung und der großen Messhöhe ist jedoch anzunehmen, dass keine oder nur sehr geringe lokale Einflüsse auf die Messung vorliegen. Die Station liegt jedoch auf dem Gipfel des Kahlen Asten und bereits in einem Umkreis von 250 m beginnen die Berghänge zu allen Seiten abzufallen. Auch bei günstiger Lage der Gitterpunkte wird die Kuppe unzureichend von dem Windfeldmodell aufgelöst. Dadurch kann insbesondere der Speed-Up-Effekt über der Kuppe nicht hinreichend widergegeben werden. Insgesamt wird die *räumliche Repräsentativität* der Messung im Vergleich zur SynAKTerm deshalb als *schlecht* bewertet.



Abbildung 25: Luftbilder (Google Earth) der DWD-Station Klippeneck mit eingezeichneten Umkreisen (gelb) von 100 m (links) und 250 m (rechts, Blickrichtung Nord).

Die Station *Klippeneck* (Abbildung 25) liegt am westlichen Rand der Schwäbischen Alb auf einer Höhe von rund 975 m NHN. Die Messhöhe beträgt 15 m. Im Umkreis von 100 m um den Messmast liegen überwiegend Felder, ein Parkplatz, vereinzelte Bäume und 2-3 Häuser. Der Wald im Westen befindet sich am Hang unterhalb des Plateaus und dürfte die Messungen kaum beeinflussen. Eine leichte lokale Beeinflussung der Messungen könnte also nur bei nördlichen Windrichtungen gegeben sein. Direkt westlich der Station fällt das Gelände bis Deckingen steil um 300 m ab. Der Umkreis von 250 m um die Station enthält nach Osten nur das Hochplateau. In westliche Richtung umfasst es dagegen den sehr steil abfallenden Hang. Die Topographie der direkten Stationsumgebung, insbesondere die steile Kante am Westrand mit einem zu erwartenden ausgeprägten Speed-Up-Effekt, wird somit von dem Windfeldmodell nicht wiedergegeben. Die *räumliche Repräsentativität* der Messung im Vergleich zur SynAKTerm ist daher als *sehr schlecht* zu bewerten.



Abbildung 26: Luftbilder (Google Earth) der DWD-Station Regensburg mit eingezeichneten Umkreisen (gelb) von 100 m (links) und 250 m (rechts, Blickrichtung Südsüdost).

Die Station *Regensburg* (Abbildung 26) liegt am nördlichen Stadtrand an einem Hang oberhalb der Naab. Die Messhöhe beträgt 15 m. Auf dem Luftbild ist im Umkreis von 100 m östlich der Station lockere städtische Bebauung mit Baumgruppen zu erkennen. Westlich der Station zieht sich ein breiter Baumstreifen von Nord nach Süd, weiter westlich folgt wieder städtische Bebauung. Die Messung dürfte trotz der etwas größeren Messhöhe erheblich lokal beeinflusst sein. In der rechten Abbildungshälfte ist zu erkennen, dass die Station mittig an einem Hang liegt. Im Umkreis von 250 m liegen sowohl die Kuppe als auch die Talsohle. Die Topographie der Stationsumgebung kann von dem Windfeldmodell aufgrund der verwendeten Auflösung nicht exakt wiedergegeben werden. Insgesamt wird die *räumliche Repräsentativität* der Messung im Vergleich zur SynAKTerm sowohl wegen der lokalen Einflüsse als auch des kleinräumigen Geländereiefs als *sehr schlecht* bewertet.



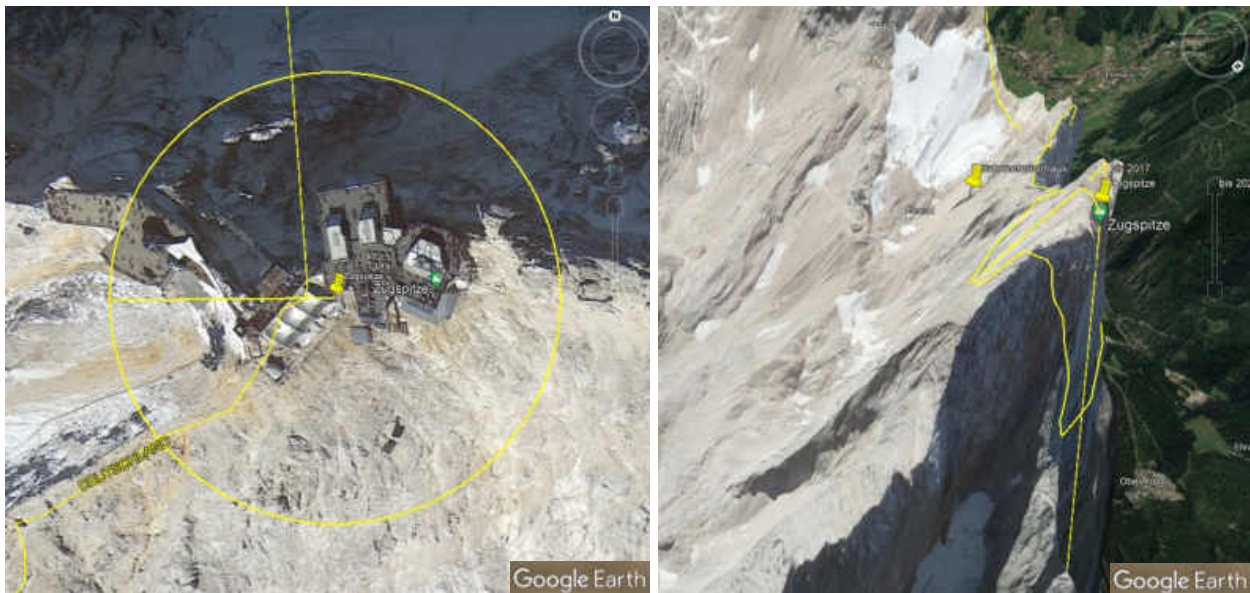


Abbildung 27: Luftbilder (Google Earth) der DWD-Station Zugspitze mit eingezeichneten Umkreisen (gelb) von 100 m (links) und 250 m (rechts, Blickrichtung Südwest).

Die Station *Zugspitze* (Abbildung 27) befindet sich nahe des Gipfels. Die Messhöhe beträgt gut 15 m. Im Umkreis von 100 m liegen die Bergstation der Seilbahn und weitere Gebäude. Mögliche lokale Einflüsse durch die Gebäude sind jedoch völlig untergeordnet gegenüber denen des umgebenden Geländereiefs. Schon in einem Umkreis von 250 m fällt das Gelände sowohl nach Norden als auch nach Süden extrem steil ab. Das Modellgitter des Windfeldmodells kann dieses steile Gelände auch nicht näherungsweise abbilden. Insgesamt kann die *räumliche Repräsentativität* der Messung im Vergleich zur SynAKTerm insbesondere wegen des Geländes nur als *sehr schlecht* bewertet werden. An dieser Station treten extreme Speed-Up-Effekte auf, die sich in einem gemessenen Jahresmittel der Windgeschwindigkeit von 6,9 m/s niederschlagen.

Diese acht Beispiele demonstrieren eine ganze Bandbreite von Stationslagen, die auf sehr gute bis hin zu sehr schlechten räumlichen Repräsentativitäten der Windmessungen des DWD-Messnetzes schließen lassen. Die Erfahrung zeigt allerdings, dass eine als schlecht eingeschätzte räumliche Repräsentativität der Messung nicht zwangsläufig in einer schlechten Übereinstimmung zwischen synthetischen und gemessenen Daten resultiert und umgekehrt. Die Gründe hierfür können vielfältig sein. Denkbar sind unerkannte Einflüsse an der Messstation, ggf. nicht validierte Messdaten oder nicht erkannte messtechnische Probleme ebenso wie mit den Rechnungen nicht erfasste thermische Windsysteme oder noch komplexere Ursachen wie eine für die Region ungünstige Skalentrennung zwischen Antriebsdaten und Modellrechnungen.

## 5.4. Bewertungsmethodik

Die Bewertung der Qualität der synthetischen Ausbreitungsklassenzeitreihen im Vergleich zu Messungen stellt ein ausgesprochen schwieriges Unterfangen dar. Die im Abschnitt 5.1 ausführlich erläuterte Tatsache, dass beide Typen von Daten grundsätzlich eine unterschiedliche räumliche Repräsentativität aufweisen und deshalb, streng genommen, überhaupt nicht miteinander vergleichbar sind, erleichtert diese Aufgabenstellung nicht gerade.

Ein wesentliches Kriterium für die Bewertung ist auch der beabsichtigte Anwendungszweck, der bei den synthetischen Ausbreitungsklassenzeitreihen natürlich in erster Linie in der Ausbreitungsrechnung liegt. Damit folgen sofort zusätzliche Fragen zur Bewertung der Ergebnisse von Ausbreitungsrechnungen, wie beispielsweise Höhe der berechneten Maximalkonzentrationen (Jahresmittel, Stundenmittel, ...), deren Quellentfernung und Lage oder Form der Konzentrationsverteilung. Jeder der genannten Parameter hängt jeweils spezifisch von den charakteristischen Häufigkeitsverteilungen von Windrichtung, Windgeschwindigkeit und Turbulenz (Stabilität bzw. Ausbreitungsklasse) ab. Darüber hinaus spielt insbesondere bei zeitabhängigen Emissionen und/oder der Bestimmung von Kurzzeitwerten der tages- und jahreszeitliche Verlauf dieser meteorologischen Parameter eine wichtige Rolle.

Eindeutige und allgemeingültige Bewertungsmaßstäbe können deshalb nicht formuliert werden. Ganz allgemein lässt sich aber feststellen, dass die synthetischen Häufigkeitsverteilungen die *wesentlichen Charakteristiken* von Messungen vergleichbarer räumlicher Repräsentativität hinsichtlich der Häufigkeitsverteilungen von Windrichtung, Windgeschwindigkeit und Ausbreitungsklasse wiedergeben sollten. Darüber hinaus sollten die zeitlichen Verläufe der synthetischen und gemessenen Zeitreihen „hinreichend“ miteinander korrelieren.

Die im vorliegenden Bericht vorgenommene Untersuchung der Qualität der SynAKTerm 3.0 beruht auf einer subjektiven Benotung der langjährigen Windrichtungsverteilungen und mittleren Windgeschwindigkeiten sowie auf objektiv berechneten Korrelationen und Trefferquoten. Diese werden in den folgenden Unterabschnitten 5.4.1 bis 5.4.3 erläutert. Eine abschließende Bewertung jedes einzelnen Datensatzes mithilfe einer Gesamtnote erfolgt auch deshalb nicht, weil offensichtlich die subjektive Einschätzung der räumlichen Repräsentativität von Stationen (Abschnitt 5.3) nur wenig aussagekräftig hinsichtlich der tatsächlichen Übereinstimmung ist (Abschnitt 5.5).

### 5.4.1. Subjektive Bewertung

In einem ersten Schritt werden je Station und korrespondierender SynAKTerm die erstellten Datenblätter (Anhang A) einer subjektiven Bewertung unterzogen. Dabei wird eingeschätzt, wie gut die Charakteristiken der Windrichtungshäufigkeiten (Windrosen) übereinstimmen und mit Noten von 1 (sehr gut) bis 5 (sehr schlecht) bewertet.

Als zweites Kriterium wird das Jahresmittel der Windgeschwindigkeit betrachtet und die Differenzen bestimmt. Hier erfolgt keine Notenvergabe. Tendenziell kann in Anlehnung an [35] eine Differenz unter 0,5 m/s als gute, zwischen 0,5 m/s und 1 m/s als befriedigende und größer als 1 m/s als schlechte Übereinstimmung bewertet werden. Dabei ist aber auch zu berücksichtigen, dass mit zunehmenden Windgeschwindigkeiten eher relative als absolute Differenzen betrachtet werden sollten.

In [35] wird zum Vergleich der Messdaten zweier Stationen die jeweilige Skalierung der Windgeschwindigkeit auf eine einheitliche Messhöhe von 10 m und Rauigkeit von 0,10 m empfohlen. Bei den Messdaten wird die Rauigkeitslänge  $z_0$  gemäß [13] aus den Windmessungen bestimmt. Im Modell liegt die Rauigkeitslänge dagegen als flächengewichteter Mittelwert aus klassierten Rauigkeitslängen der unterschiedlichen Landnutzungsanteilen innerhalb der  $500 \times 500 \text{ m}^2$  großen Gitterzellen vor. Fraglich ist, ob aufgrund des unterschiedlichen physikalischen Gehalts beider Berechnungsansätze skalierte Windgeschwindigkeiten tatsächlich besser vergleichbar sind als die unskalierten Windgeschwindigkeiten. Bei extremen Messhöhen oder extrem unterschiedlichen Rauigkeiten zwischen Messung und Modell ist der direkte Vergleich der nicht skalierten Windgeschwindigkeiten zwar fragwürdig, mögliche Skalierungsfehler nehmen aber auch mit stark von 10 m Anemometerhöhe oder 0,10 m Rauigkeit abweichenden Daten zu. In diesem Bericht werden daher die Windgeschwindigkeiten unskaliert angegeben und ausgewertet.

Die Ausbreitungsklassen oder deren Häufigkeitsverteilungen werden hier nicht weiter betrachtet. Die Ausbreitungsklasse nach Klug / Manier ist im Wesentlichen eine Funktion von geographischer Lage, Jahres- und Tageszeit sowie der Windgeschwindigkeit. Bei einer guten Qualität der synthetischen Windgeschwindigkeit ist tendenziell auch von einer guten Qualität der synthetisch bestimmten Ausbreitungsklassen auszugehen. Der Bedeckungsgrad als zusätzliche Eingangsgröße entscheidet meist nur noch über eine Abweichung um eine Ausbreitungsklasse. Die Güte des in die Berechnungen einfließenden Bedeckungsgrades (Abschnitt 2.3.4) dürfte deshalb nur von sekundärer Bedeutung für die Qualität der synthetisch bestimmten Ausbreitungsklassen sein.

#### 5.4.2. Korrelation

Ein einfaches Maß zur Prüfung eines linearen Zusammenhangs zweier Zeitreihen einer meteorologischen Größe ist der (empirische) Korrelationskoeffizient  $r(x,y)$ :

$$r(x,y) = \frac{\sum_i (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_i (x_i - \bar{x})^2 \sum_i (y_i - \bar{y})^2}}$$

Darin bezeichnen  $x_i$  und  $y_i$  die zum Zeitpunkt  $i$  in beiden Zeitreihen auftretenden Größen, beispielsweise die Windgeschwindigkeit, und  $\bar{x}$  und  $\bar{y}$  die jeweiligen Mittelwerte der Zeitreihen.

Der Korrelationskoeffizient nimmt Werte zwischen -1 und +1 ein. Bei Werten um 0 besteht kein linearer Zusammenhang zwischen beiden Zeitreihen. Je stärker der Korrelationskoeffizient gegen 1 geht, umso stärker ist die Korrelation oder der lineare Zusammenhang. Negative Werte bis hin zu -1 bedeuten eine negative Korrelation.

Dieser Korrelationskoeffizient wird zur Prüfung des Zusammenhangs und gleichsinnigen zeitlichen Verlaufs gemessener und synthetischer Windgeschwindigkeiten verwendet.

Eine systematische Abweichung zwischen beiden Zeitreihen schlägt sich nicht in der Korrelation nieder. Die Korrelation einer Zeitreihe  $X$  mit einer Zeitreihe  $X+const$  ist folglich 1. Die Korrelation ist daher unabhängig von einer systematischen Über- oder Unterschätzung der Windgeschwindigkeit.

Die Korrelation zwischen zwei Zeitreihen der Windrichtung lässt sich wegen deren zyklischen Wertebereiche und dem Fehlen wohldefinierter Mittelwerte ungleich schwerer bestimmen. Hier wird ein so genannter zirkulärer Korrelationskoeffizient  $r_c(x,y)$  nach [17] bestimmt:

$$r_c(x,y) = \frac{\sum_i \sin(x_i - \bar{X}) \sin(y_i - \bar{Y})}{\sqrt{\sum_i \sin^2(x_i - \bar{X}) \sum_i \sin^2(y_i - \bar{Y})}}$$

Statt der einfachen Differenzen und euklidischen Normen wird zunächst die Sinusfunktion angewendet. Die Größen  $\bar{X}$  und  $\bar{Y}$  stehen nun nicht mehr für die Mittelwerte der Zeitreihen, sondern werden aus dem linearen Gleichungssystem

$$\begin{aligned}\bar{X} + \bar{Y} &= \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i + y_i) \\ \bar{X} - \bar{Y} &= \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - y_i)\end{aligned}$$

bestimmt. Durch diese Wahl von  $\bar{X}$  und  $\bar{Y}$  wird sowohl der positive als auch der negative Beitrag zur Gesamtkorrelation maximiert.

Der zirkuläre Korrelationskoeffizient lässt sich ähnlich interpretieren wie der einfache Korrelationskoeffizient. Gegen 1 laufende Werte deuten einen sehr starken und Werte nahe 0 einen sehr geringen linearen Zusammenhang zwischen den beiden Zeitreihen an.

Anhand der Abbildungen 28 und 29 wird an einigen Beispielen für die Station Walldürn aufgezeigt, wie gut oder schlecht bei bestimmten Werten des (zirkulären) Korrelationskoeffizienten synthetische und gemessene Zeitreihen der Windgeschwindigkeit (Windrichtung) miteinander korrelieren. Dargestellt ist jeweils der 30-Tage-Zeitraum aus dem zehnjährigen Datensatz 2011-2020 mit der geringsten (oben), höchsten (Mitte) und mittleren Korrelation (unten). Dabei entspricht der dargestellte Zeitraum der mittleren Korrelation jeweils dem ersten 30-Tage-Zeitraum aus der zehnjährigen Zeitreihe, dessen Korrelation identisch zur mittleren Korrelation

aller (überlappenden) 30-Tage-Zeiträume der zehn Jahre ist. Datenlücken werden bei der Korrelationsberechnung ignoriert. Die dargestellten 30-Tage-Zeiträume entsprechen daher nicht immer zwingend „echten“ 30-Tage-Fenstern.

Der minimale 30-Tage-Korrelationskoeffizient der Windgeschwindigkeit beträgt bei Walldürn 0,22. Dieser Zeitraum scheint von markanten Tagesgängen der Windgeschwindigkeit mit nahezu Windstille in der Nacht und mittleren Windgeschwindigkeiten tagsüber geprägt gewesen zu sein (Abbildung 28 oben). Solche Tagesgänge können von den synthetischen Daten verfahrensbedingt nur eingeschränkt nachvollzogen werden. So gibt es nur gelegentlich miteinander korrespondierende Zeitabschnitte, wie beispielsweise nach Stunde 22.700 oder um Stunde 23.300.

Der maximale 30-Tage-Korrelationskoeffizient der Windgeschwindigkeit beträgt bei Walldürn 0,92. In diesem Zeitraum stimmen synthetische und gemessene Zeitreihe meist ausgezeichnet miteinander überein (Abbildung 28 Mitte). Minima, Maxima und zeitliche Verläufe der Messung werden sehr gut reproduziert. Auffallend ist lediglich, dass die starken kurzzeitigen, stündlichen Variationen der Messungen von den synthetischen Daten nicht wiedergegeben werden können. Diese Einschränkung beruht in erster Linie darauf, dass die als Antriebsdaten verwendeten Reanalysedaten nur in Intervallen von 6 Stunden vorliegen. Darüber hinaus scheint es gelegentlich zu einem leichten zeitlichen Versatz der synthetischen gegenüber der gemessenen Zeitreihe zu kommen, beispielsweise ganz am Anfang der Zeitreihe oder nach Stunde 35.500. Auf mögliche Ursachen hierzu wird im Abschnitt 5.4.3 eingegangen.

Die untere Zeitreihe in Abbildung 28 entspricht einem 30-Tage-Zeitraum, in dem der Korrelationskoeffizient dem mittleren Korrelationskoeffizienten des Gesamtzeitraums 2011-2020 entspricht. Dieser Zeitabschnitt illustriert folglich, wie gut synthetische und gemessene Zeitreihen im Mittel über die 10 Jahre miteinander korrelieren. Der 10-jährige Korrelationskoeffizient beträgt für diese Station „nur“ 0,76. Dennoch wird der zeitliche Verlauf der Messung sehr gut von der synthetischen Zeitreihe nachvollzogen. Sowohl die witterungsbedingten Schwankungen über mehrere Tage (beispielsweise über rund eine Woche zwischen den Stunden 15.800 und 16.100) als auch kurzzeitige Schwankungen im Zeitraum eines Tages (beispielsweise die lokalen Minima und Maxima bei Stunde 15.600 bis 15.626) werden durch die synthetische Zeitreihe abgebildet. Die synthetische Zeitreihe vollzieht auch Windspitzen meist in guter Näherung nach, so z.B. bei den Stunden 15.950, 16.030, 16.100 und 16.220 oder die Geschwindigkeitsminima bei 15.770 oder 16.000.

Die Abbildung 29 enthält entsprechende Darstellungen der Windrichtungs-Zeitreihen an der Station Walldürn. Der minimale zirkuläre 30-Tage-Korrelationskoeffizient aus dem Zeitraum 2011-2020 beträgt 0,14. Die Interpretation der Abbildung wird dadurch erschwert, dass die besonders starken Ausschläge beider Zeitreihen lediglich mit (meist kleinen) Winddrehungen

über Nord ( $0^\circ = 360^\circ$ ) zusammenhängen. Der grundsätzliche Windrichtungsverlauf wird von der synthetischen Zeitreihe durchaus wiedergegeben, was besonders gut in den Zeiträumen um die Stunden 74.700, 74.900 oder 75.100 zu erkennen ist. Die Messung zeigt jedoch sehr starke kurzzeitige Fluktuationen auf Skalen von einer oder wenigen Stunden. Wie schon bei der Windgeschwindigkeit erläutert kann die synthetische Zeitreihe verfahrensbedingt derart kurzzeitige Fluktuationen nicht abbilden. Die Ursache solcher Fluktuationen dürfte zumindest zeitweise auch in instationären thermischen Windsystemen liegen, die ebenfalls in den synthetischen Daten nur teilweise enthalten sind.

Die mittlere Zeitreihe der Abbildung 29 gehört zu dem 30-Tage-Zeitraum mit dem höchsten zirkulären Korrelationskoeffizienten (0,94) des Zeitraums 2011-2020. Abgesehen von den kurzzeitigen Fluktuationen der Messung und wenigen Ausreißern liegen beide Zeitreihen fast perfekt aufeinander.

In der unteren Abbildung 29 ist ein 30-Tage-Zeitraum dargestellt, in dem der zirkuläre Korrelationskoeffizient dem mittleren zirkulären Korrelationskoeffizienten über 2011-2020 entspricht. Auch in der Windrichtung bestätigt sich, was bereits bei der Windgeschwindigkeit festgestellt wurde. Trotz eines zirkulären Korrelationskoeffizienten von „nur“ 0,74 wird die gemessene Zeitreihe praktisch über den gesamten Zeitraum sehr gut getroffen. Lediglich in kurzen Zeitfenstern, beispielsweise nach Stunde 18.600 oder bei 19.100 zeigt die synthetische Reihe eine dem gemessenen Wind fast entgegengesetzte Windrichtung.

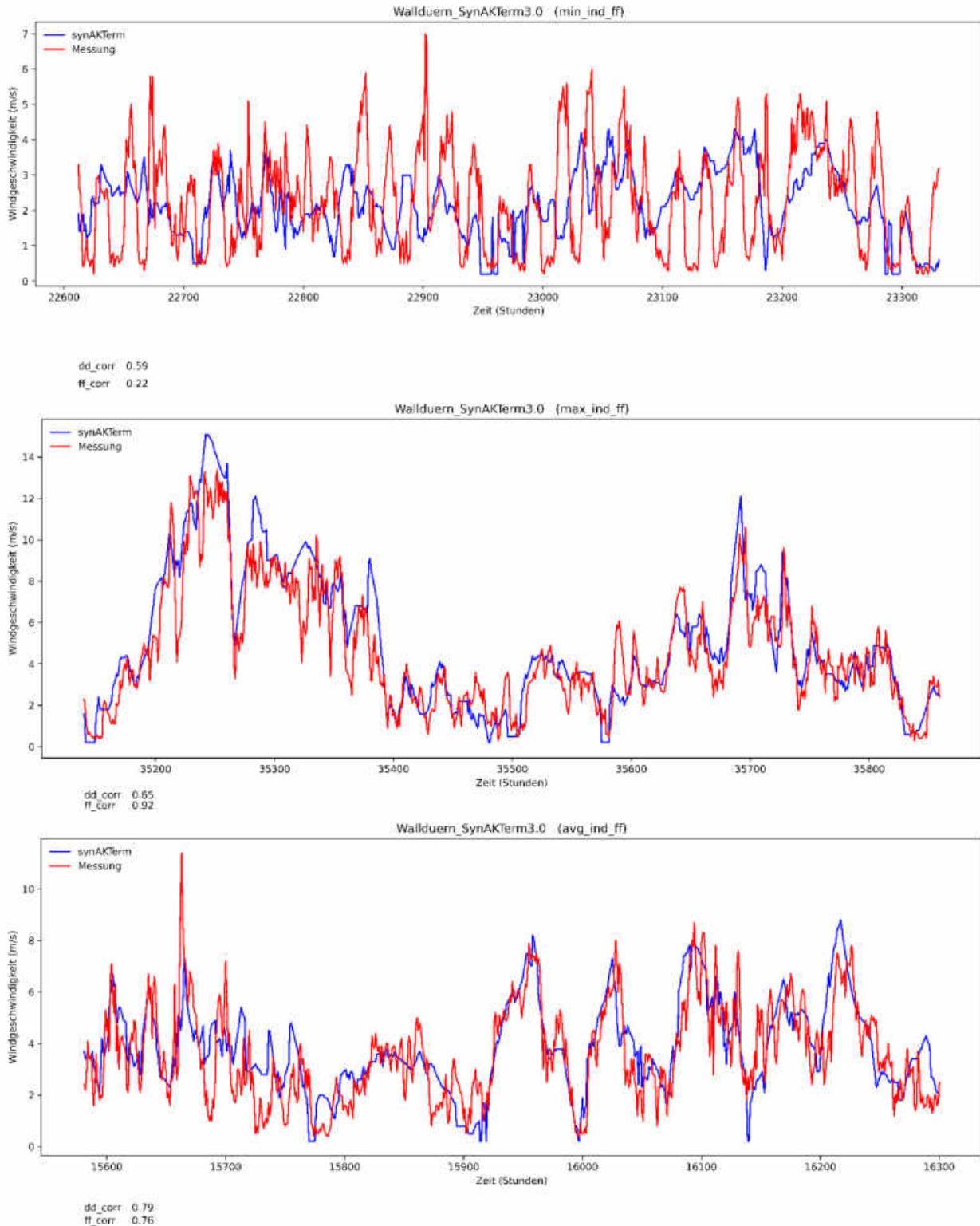


Abbildung 28: Gemessene (rot) und synthetische (blau) Windgeschwindigkeiten an der Station Waldürn für 30-Tage-Zeiträume mit minimaler (oben), maximaler (Mitte) und mittlerer Korrelation (unten) aus dem Zeitraum 2011-2020.

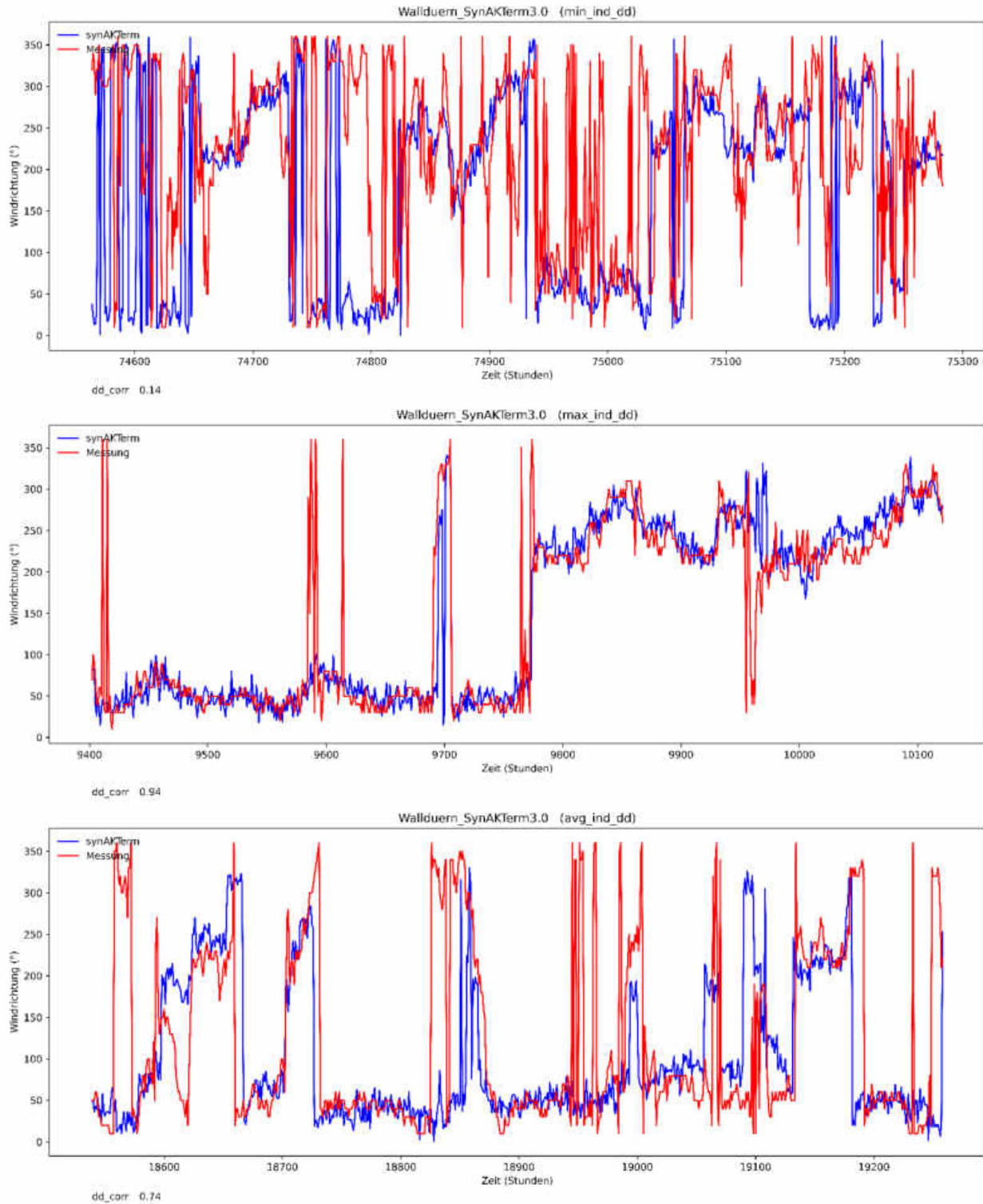


Abbildung 29: Gemessene (rot) und synthetische (blau) Windrichtungen an der Station Wallduern für 30-Tage-Zeiträume mit minimaler (oben), maximaler (Mitte) und mittlerer Korrelation (unten) aus dem Zeitraum 2011-2020.



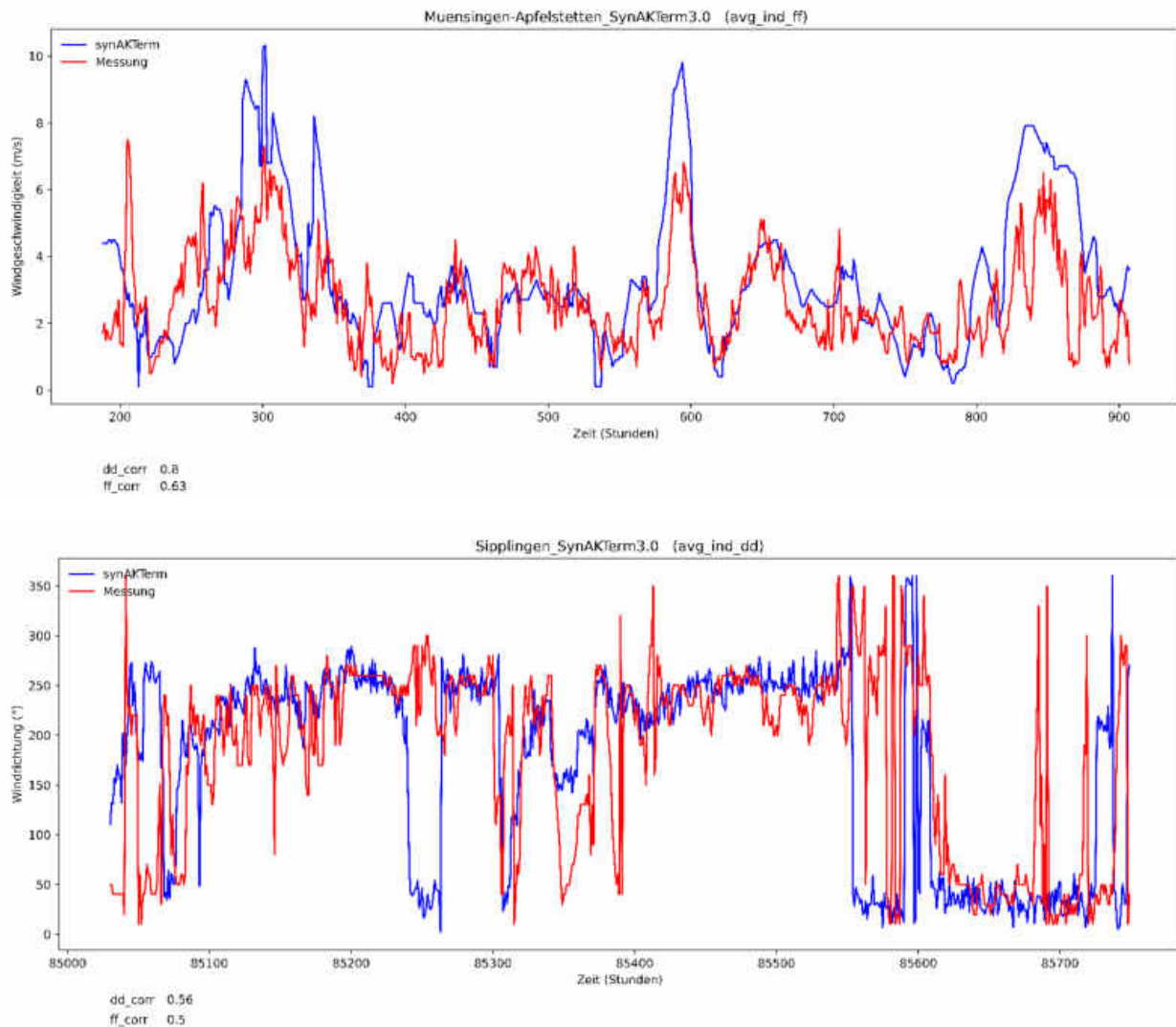


Abbildung 30: Gemessene (rot) und synthetische (blau) Windgeschwindigkeiten an der Station Münsingen (oben) und Windrichtungen an der Station Sipplingen (unten) für 30-Tage-Zeiträume mit mittleren Korrelationen aus dem Zeitraum 2011-2020.

Der über alle Stationen der bisher berechneten Teilgebiete gemittelte Korrelationskoeffizient liegt für die Windgeschwindigkeit bei 0,64 und für die Windrichtung bei 0,58. Die mittleren Korrelationskoeffizienten für die Windgeschwindigkeit an der Station Münsingen-Apfelstetten ( $r = 0,63$ ) und die Windrichtung an der Station Sipplingen ( $r_c = 0,56$ ) entsprechen recht genau den mittleren Korrelationskoeffizienten über alle bisher ausgewerteten Stationen. In der Abbildung 30 sind jeweils 30-Tage-Zeiträume der Windgeschwindigkeit in Münsingen-Apfelstetten und der Windrichtung in Sipplingen dargestellt, deren Korrelation diesen mittleren Werten entspricht. An beiden Zeitserien zeigt sich, dass trotz vermeintlich geringer Korrelationskoeffizienten die synthetischen Reihen die Messungen in ihrem zeitlichen Verlauf insgesamt gut reproduzieren.

Die dargestellten Beispiele der Zeitreihen für mittlere und extreme (zirkuläre) Korrelationskoeffizienten belegen, dass die erzielten Korrelationskoeffizienten in einem weiten Wertebereich um 0,6 recht guten Übereinstimmungen in den zeitlichen Verläufen von

synthetischen und gemessenen Zeitreihen entsprechen. Dass Werte um 0,9 (die üblicherweise als Indiz für gute Korrelation interpretiert werden) nur in Ausnahmefällen berechnet werden, liegt vor allem an den kurzzeitigen Fluktuationen in den Messungen, die von den synthetischen Daten verfahrenstechnisch nicht reproduziert werden können. Im Übrigen wäre zu hinterfragen, ob die synthetischen Daten überhaupt Kurzzeitfluktuationen beinhalten sollten, die eher nur sehr lokale und zeitlich begrenzte Effekte widerspiegeln, während die synthetischen Daten für ihre Anwendung in der Ausbreitungsrechnung eher den mittleren Verhältnissen auf größerer räumlicher Skala (~500 m) entsprechen sollten.

#### 5.4.3. Trefferquoten

Die Korrelationskoeffizienten geben Auskunft über die Güte des zeitlichen Zusammenhangs von synthetischen und gemessenen Zeitreihen, nicht jedoch über das Maß der Übereinstimmung der gemessenen und berechneten Werte. Für deren Bewertung bieten sich Trefferquoten an, wie sie beispielsweise auch im Rahmen der Evaluierung prognostischer Modelle verwendet werden [32].

Die Windgeschwindigkeit einer SynAKTerm zählt als Treffer, wenn sie um nicht mehr als  $\pm 0,5$  m/s oder  $\pm 10$  % vom gemessenen Wert abweicht. Diese Fehlermaße orientieren sich an den Bewertungsmaßstäben der VDI 3783 Blatt 20 [35].

Die Windrichtung einer SynAKTerm zählt als Treffer, wenn sie um nicht mehr als  $\pm 20^\circ$  vom gemessenen Wert abweicht. Gemessene Windrichtungen werden häufig nicht genauer angegeben als in  $10^\circ$ -Schritten. Darüber hinaus weist häufig auch die Einnordung der Messinstrumente einen Fehler in dieser Größenordnung auf. Und schließlich mäandriert die Windrichtung bei neutraler Schichtung typischerweise um  $\pm 15^\circ$ - $20^\circ$ . Insofern ist ein geringeres Fehlermaß als  $\pm 20^\circ$  zur Bewertung nicht geeignet.

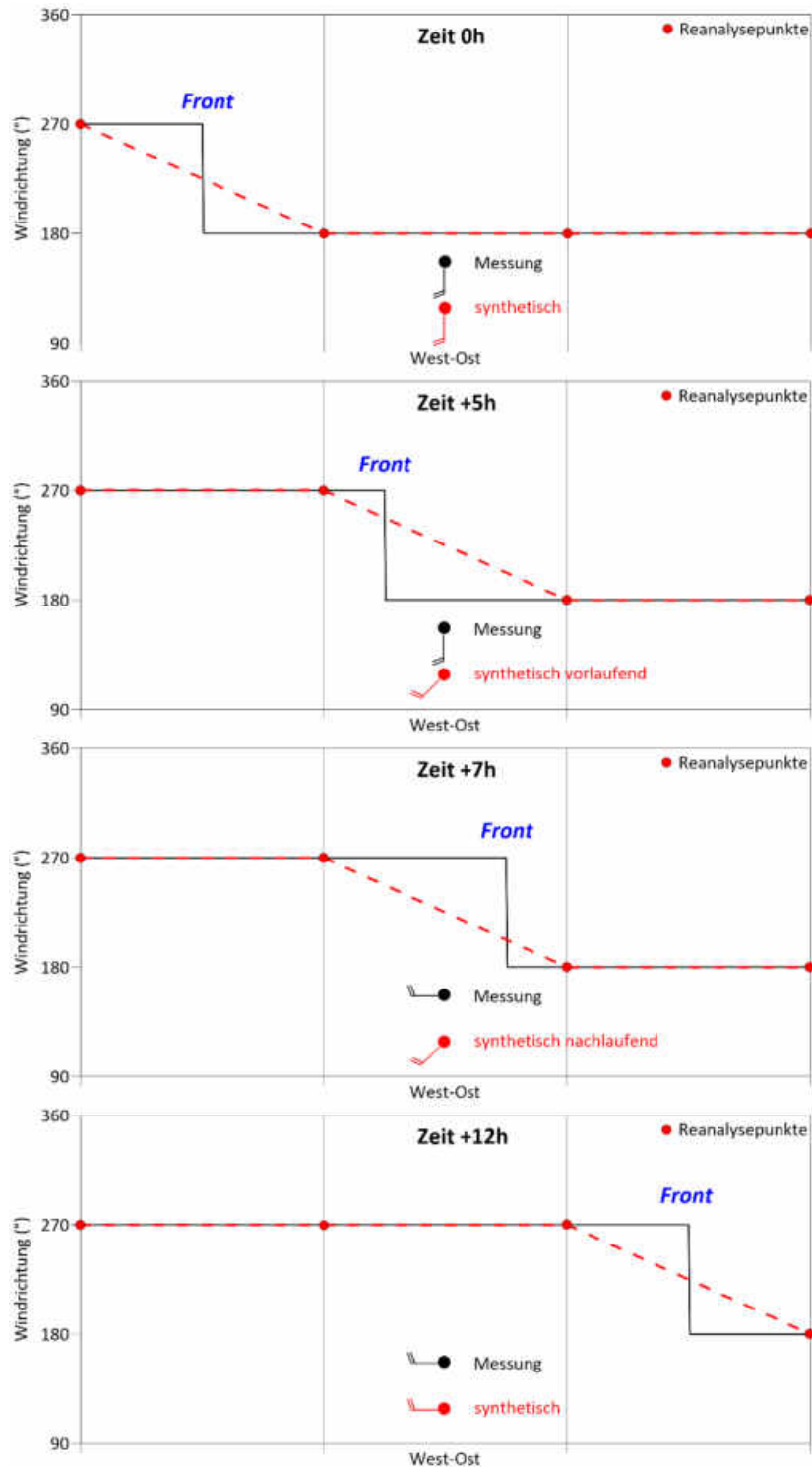


Abbildung 31: Schematisierte Skizze eines Frontdurchgangs und dessen Darstellung in Reanalysedaten und SynAKTerm.

Bereits im Abschnitt 5.4.2 zur Korrelation von synthetischen und gemessenen Zeitreihen wurde festgestellt, dass es gelegentlich zu einem zeitlichen Versatz zwischen beiden Zeitreihen kommt. Eine mögliche Ursache ist in der zeitlichen und räumlichen Auflösung der Reanalysedaten begründet und wird in Abbildung 31 skizziert. Allerdings ist dort lediglich die Wirkung der

räumlichen Auflösung skizziert, die sich noch mit der Wirkung der zeitlichen Auflösung von 6 Stunden, die nicht in der Skizze enthalten ist, überlagert.

Angenommen, eine Front mit einem Windsprung um 90° bewege sich konstant von West nach Ost. In den Reanalysedaten zeige sich ein damit korrespondierender Windsprung, der allerdings aufgrund der räumlichen Auflösung nicht als punktueller Sprung, sondern als allmählicher Übergang zwischen zwei Stützstellen aufgelöst wird. Das schwarze Windsymbol zeigt die Messung, die beim Frontdurchgang zum Zeitpunkt +6h einen Sprung in der Windrichtung um 90° aufweist. Das rote Windsymbol (synthetisch) weist zum Zeitpunkt +5h bereits eine zu frühe Winddrehung auf, die erst zum Zeitpunkt +9h vollständig vollzogen sein wird.

Die Skizze illustriert, dass zeitgleiche Änderungen zwischen synthetischen und gemessenen Zeitreihen aufgrund der zeitlichen und räumlichen Auflösung der Antriebsdaten nur in Ausnahmefällen vorliegen werden. In der Regel werden die synthetischen Daten in ihrem zeitlichen Verhalten mal den Messungen leicht vorauslaufen, mal nachlaufen. Aufgrund der zeitlichen Auflösung der Reanalysedaten wird sich dies überwiegend in einem Zeitfenster von +/- 3 Stunden abspielen.

Die Berechnung der Trefferquoten trägt diesem verfahrensbedingten zeitlichen Versatz<sup>9</sup> dadurch Rechnung, dass nicht nur zeitgleiche synthetische und gemessene Werte miteinander verglichen werden. Ein Treffer liegt auch dann vor, wenn der synthetische Wert eine Messung im Zeitfenster +/- 3 Stunden innerhalb der Fehlergrenzen trifft.

Die Abbildungen 32 und 33 verdeutlichen, wieder am Beispiel der Station Walldürn, den Wertebereich der berechneten Trefferquoten und mit welchen Übereinstimmungen in den Zeitreihen diese verbunden sind.

Die mittleren Trefferquoten beziehen sich wieder auf 30-Tage-Zeiträume und liegen in Walldürn für die Windgeschwindigkeit zwischen 0,55 und 0,87 bei einem Mittelwert von 0,72. Für die Windrichtung liegen sie zwischen 0,54 und 0,95 bei einem Mittelwert von 0,81.

Die Zeitfenster mit den minimalen Trefferquoten zeigen tatsächlich in der Windgeschwindigkeit zu Beginn eine längere Witterungsphase mit deutlicher Überschätzung der Windgeschwindigkeit. In der Windrichtung zeigen sich drei Witterungsabschnitte, in denen sich in Realität offensichtlich ein ganz anderes Strömungssystem eingestellt hat als modelliert wurde.

Die Zeitfenster mit maximalen Trefferquoten zeigen dagegen über den gesamten Zeitraum ein sehr gutes Maß an Übereinstimmung zwischen synthetischen und gemessenen

---

<sup>9</sup> Streng genommen ist der zeitliche Versatz nicht verfahrensbedingt, sondern liegt nur an der zeitlichen Verfügbarkeit der gewählten JRA55-Reanalyse. Bei einem Reanalysedatensatz mit höherer zeitlicher Auflösung würde auch der zeitliche Versatz entsprechend geringer ausfallen. Ähnliches gilt für die räumliche Auflösung, die aber aus Gründen der Skalentrennung nicht viel höher sein darf.

Windgeschwindigkeiten und -richtungen. Auch in den Zeitfenstern mit mittleren Trefferquoten liegen überwiegend sehr gute Übereinstimmungen zwischen beiden Zeitreihen vor.

Wie schon im Abschnitt zu den Korrelationskoeffizienten ist auch anhand dieser Abbildungen zu erkennen, dass die Messungen sehr viel stärkere Kurzzeitfluktuationen enthalten als die synthetischen Zeitreihen. Dieser (durchaus nicht unerwünschte) Effekt, der einer „Glättung“ entspricht, verhindert höhere mittlere Trefferquoten.

Die über alle Stationen der bisher berechneten Teilgebiete gemittelte Trefferquote liegt für die Windgeschwindigkeit bei 0,65 und für die Windrichtung bei 0,69.

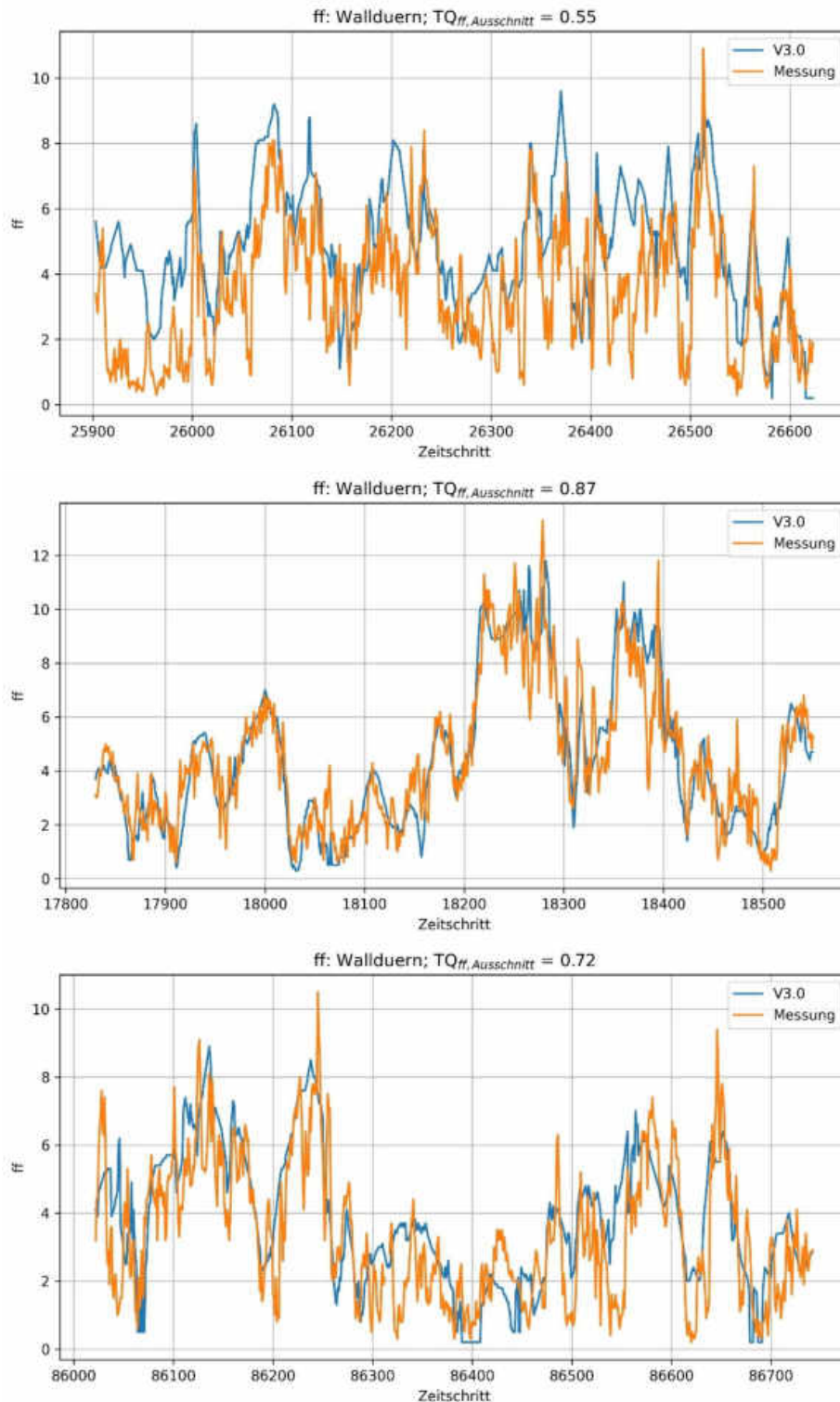


Abbildung 32: Gemessene (gelb) und synthetische (blau) Windgeschwindigkeiten an der Station Wallduarn für 30-Tage-Zeiträume mit minimaler (oben), maximaler (Mitte) und mittlerer Trefferquote (unten) aus dem Zeitraum 2011-2020.

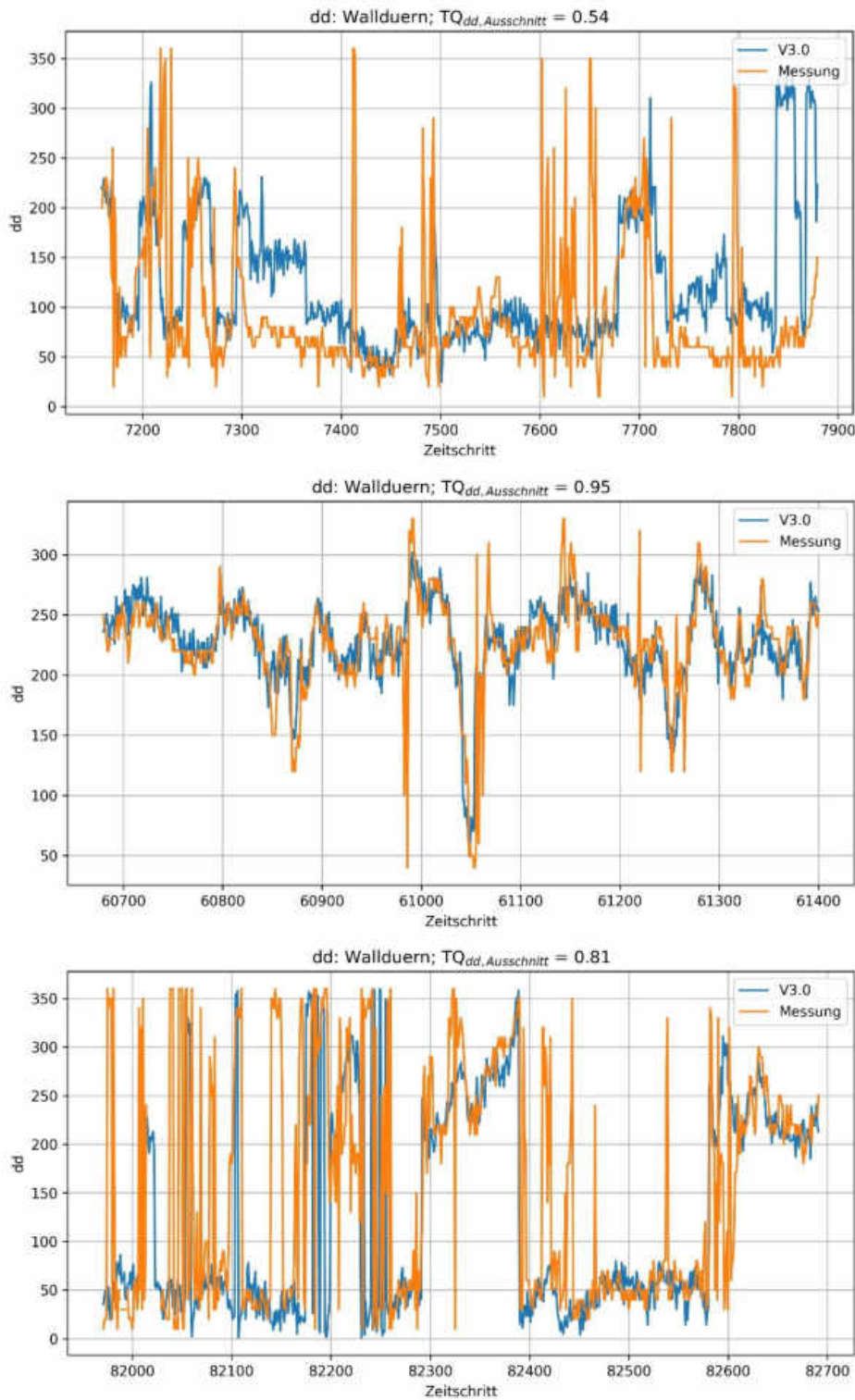


Abbildung 33: Gemessene (gelb) und synthetische (blau) Windrichtungen an der Station Wallduern für 30-Tage-Zeiträume mit minimaler (oben), maximaler (Mitte) und mittlerer Trefferquote (unten) aus dem Zeitraum 2011-2020.

## 5.5. Ergebnisse

Zum Vergleich mit den bisher berechneten SynAKTerm stehen die in Abbildung 19 dargestellten rund 140 Stationsmessungen aus dem Messnetz des Deutschen Wetterdienstes zur Verfügung. Die Datenblätter aller ausgewerteten Stationsmessungen und zugehörigen SynAKTerm finden sich im Anhang A. Die wesentlichen Vergleichsmaße zur Bewertung der Übereinstimmung zwischen SynAKTerm und Messung für diese Stationen sind in Tabelle 4 zusammengefasst.



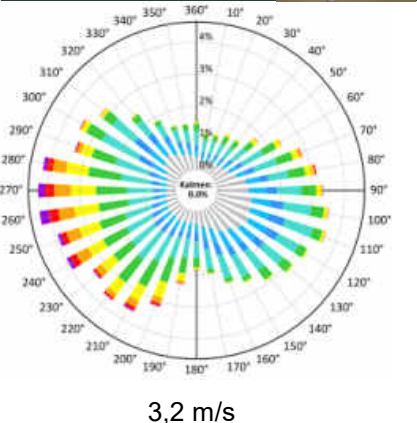
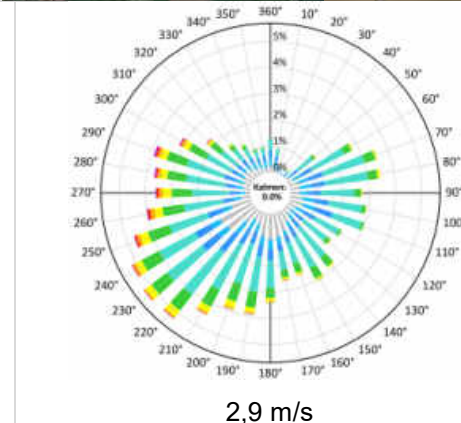
Nicht alle Stationen sind von ihrer räumlichen Repräsentativität her für einen Vergleich mit den synthetischen Daten geeignet. Die subjektive Einschätzung der räumlichen Repräsentativität ist in Tabelle 4 in Form einer Note angegeben. Stationen mit Note 1 sind nach Einschätzung anhand Luftbildern von keinen lokalen Einflüssen (benachbarte Gebäude, Baumgruppen, etc.) betroffen und das umgebende Geländere relief kann vom Modellgitter mit 500 m gut aufgelöst werden. Bei Stationen mit Note 5 wird eine starke Beeinflussung der Messung durch lokale Besonderheiten (Bäume, Gebäude, etc.) angenommen und/oder das Relief ist in Stationsumgebung kleinräumig so stark strukturiert, dass es von dem Modellgitter mit 500 m nicht hinreichend aufgelöst werden kann. Beispiele für alle Noten sind im Abschnitt 5.3 erläutert worden. Dabei ist jedoch zu berücksichtigen, dass für die Güte der aufgelösten Topographie nicht die Gitterauflösung (hier: 500 m) allein relevant ist, sondern auch die Lage der Gitterpunkte bzgl. der Geländestrukturen. So wird bspw. eine zentral innerhalb einer Gitterzelle liegende Bergkuppe vom Modell besser abgebildet als eine Bergkuppe im Schnittpunkt von vier Gitterzellen. Die Ergebnisse zeigen jedoch, dass der Zusammenhang zwischen der räumlichen Repräsentativität einer Messstation und der Übereinstimmung mit den SynAKTerm weniger stark ausgeprägt ist als erwartet.

Im Nachfolgenden werden beispielhaft einige SynAKTerm im Vergleich zu den korrespondierenden Messungen diskutiert. Die Beispiele wurden so ausgewählt, dass möglichst unterschiedliche Charakteristiken erfasst werden. Dargestellt sind jeweils oben zwei Luftbilder der Stationsumgebung analog zu den Darstellungen in Abschnitt 5.3. Die Bilder links zeigen einen 100 m-Umkreis um die Station und sind immer nach Norden ausgerichtet. Die Bilder rechts sind schräge Aufsichten auf das Gelände mit 250 m-Umkreis mit unterschiedlichen Blickrichtungen. Darunter werden links die gemessene Windrose und rechts die der SynAKTerm mit den jahresgemittelten Windgeschwindigkeiten gezeigt. Daneben sind die Einschätzung der räumlichen Repräsentativität der Messung als Note (1 bis 5) sowie die Korrelationen ( $r$ ) und Trefferquoten ( $tq$ ) angegeben.

Hinsichtlich der Frage, inwieweit der Vergleich von synthetischen Daten mit Messdaten überhaupt möglich ist, wird an dieser Stelle noch einmal dringend auf Abschnitt 5.1 verwiesen.



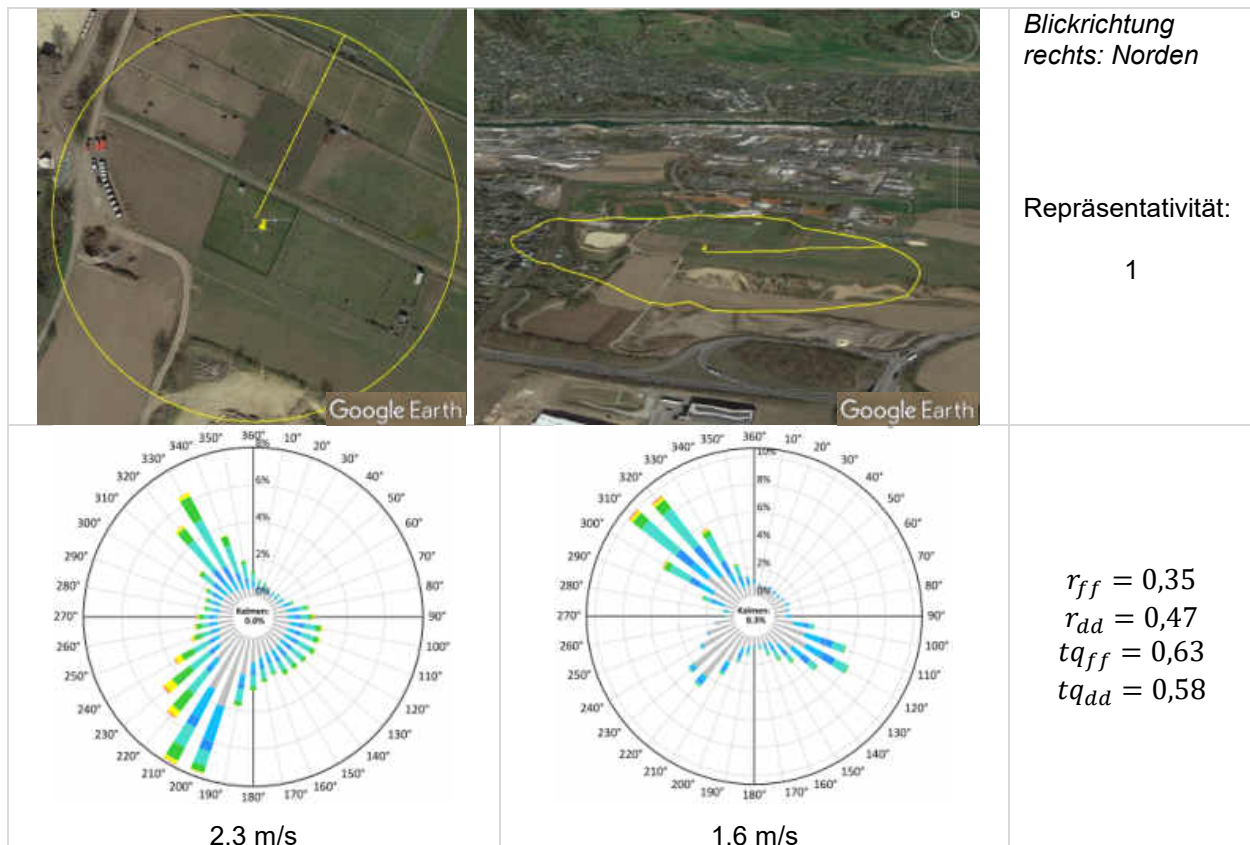
Altmühlsee (vgl. Abbildung A.15)

		<p>Blickrichtung rechts: Osten</p> <p>Repräsentativität:  1</p>
 <p>3,2 m/s</p>	 <p>2,9 m/s</p>	<p><math>r_{ff} = 0,69</math>  <math>r_{dd} = 0,62</math>  <math>tq_{ff} = 0,68</math>  <math>tq_{dd} = 0,75</math></p>

Die Station liegt direkt am nördlichen Ufer des Altmühlsees im Fränkischen Seenland. Die weitere Stationsumgebung ist weitgehend eben. Abgesehen von dem Rauigkeitssprung entlang des Seeufers wird die räumliche Repräsentativität der Station als sehr hoch eingeschätzt. Allerdings kann der Verlauf des Ufers vom Modellraster nicht genau nachvollzogen werden.

Die Messung zeigt eine sehr breite Häufigkeitsverteilung mit Hauptwindrichtungen zwischen Südwest und Nordwest und einem ebenfalls breiten Sekundärmaximum zwischen Südost und Ostnordost. Aber auch nördliche und südliche Winde treten mit nennenswerten Häufigkeiten auf. Die SynAKTerm zeigt eine ähnliche Charakteristik mit breiter Richtungsverteilung von Südwest bis Westnordwest und um Ost. Sowohl das Hauptmaximum als auch das Nebenmaximum sind gegen den Uhrzeigersinn auf Südwest bzw. Ostnordost gedreht. Die mittlere Windgeschwindigkeit wird mit 2,9 m/s gegenüber 3,2 m/s leicht unterschätzt. Eine mögliche Ursache hierfür kann die Stationslage direkt am Ufer bei überwiegend auflandigen Winden sein, die im Modell nicht in dieser Schärfe aufgelöst werden kann. Sowohl die Korrelationskoeffizienten als auch die Trefferquoten sind jedoch leicht überdurchschnittlich.

Andernach (vgl. Abbildung A.4)



Die Station liegt im nördlichen Rheinland-Pfalz am linken Rheinufer im Neuwieder Becken. Im Umkreis um die Station liegen keine größeren Strömungshindernisse vor und das Gelände scheint vergleichsweise eben, so dass es vom Modellgitter aufgelöst werden kann. Deshalb wird die Repräsentativität als sehr hoch eingestuft.

Die gemessene Windrose zeigt ein Hauptmaximum bei Südsüdwest und ein Nebenmaximum bei Nordwest. Auch Winde um Ost-südost sind noch etwas häufiger vertreten. Die SynAKTerm weist zwar ebenfalls ein (Haupt-)Maximum bei Nordwest auf. Das Südwestmaximum ist jedoch nur sehr schwach ausgeprägt, dafür treten Ost-südostwinde gehäuft auf. Die Windgeschwindigkeit wird mit 1,6 m/s gegenüber den gemessenen 2,3 m/s deutlich unterschätzt. Die sehr unterschiedliche Richtungsverteilung drückt sich auch in dem vergleichsweise geringen zirkulären Korrelationskoeffizienten  $r_{dd}$  aus. Auch die anhand der Windrosen erkennbare unterschiedliche Verteilung der Windgeschwindigkeitsklassen auf die Windrichtungen drückt sich in einem geringen Korrelationskoeffizienten  $r_{ff}$  aus. Die Trefferquoten fallen unterdurchschnittlich aus.

Die Übereinstimmung zwischen SynAKTerm und Messung kann an der Station Andernach nicht befriedigen. Die Station eignet sich jedoch gut, um zu illustrieren, welche Effekte auch zu einer mangelnden Übereinstimmung beitragen können.

In Abbildung 34 ist links das reale Geländere relief mit der gemessenen Windrose dargestellt, auf der rechten Seite das Geländere relief im Modellraster und die Windrosen der SynAKTerm am Messort sowie 1 km südlich davon. Die 1 km südlicher gelegene Windrose stimmt in ihrer

Charakteristik recht gut mit der Messung überein, wenngleich Haupt- und Nebenmaximum noch vertauscht sind. Eine mögliche Erklärung hierfür deuten die gestrichelten violetten Linien an. Die Station liegt im Einmündungsbereich des Nettetals in das Rheintal. Das Südwestmaximum steht offensichtlich im Zusammenhang mit einem Ausströmen aus dem Tal. Die große Häufigkeit geringer Windgeschwindigkeiten aus Südwesten lassen häufige nächtliche Kaltluftabflüsse aus dem Nettetal vermuten. In der Modellorographie (rechts) befindet sich die Stationslage bereits mehr im Einfluss des Rheintals. Geht man von dort jedoch 1 km nach Süden, so übernimmt das Nettetal einen starken Einfluss und Südwestwinde, ebenfalls mit häufig geringen Windgeschwindigkeiten, nehmen deutlich auf Kosten der Südostwinde aus dem Rheintal zu. Die Vertauschung von Haupt- und Nebenmaximum lässt sich damit allerdings noch nicht erklären.

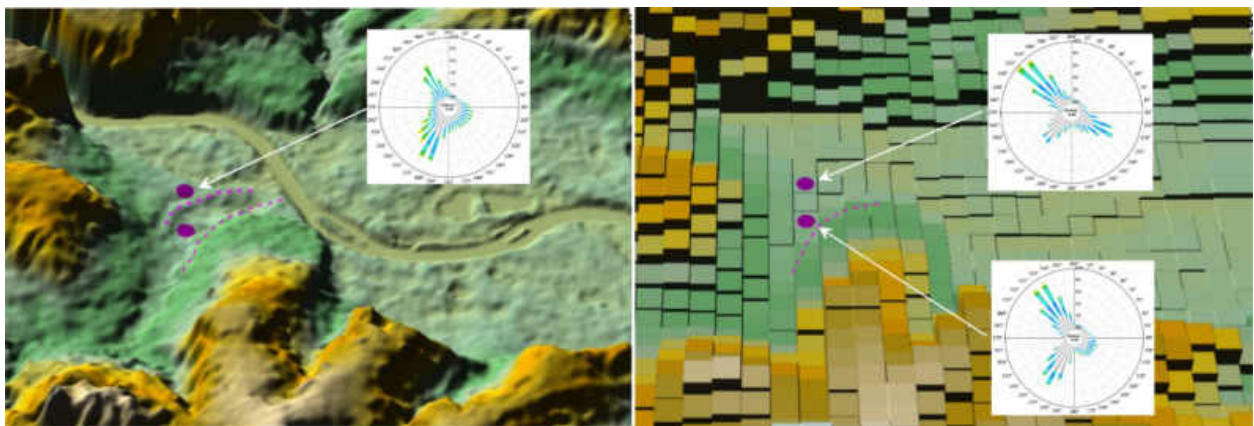
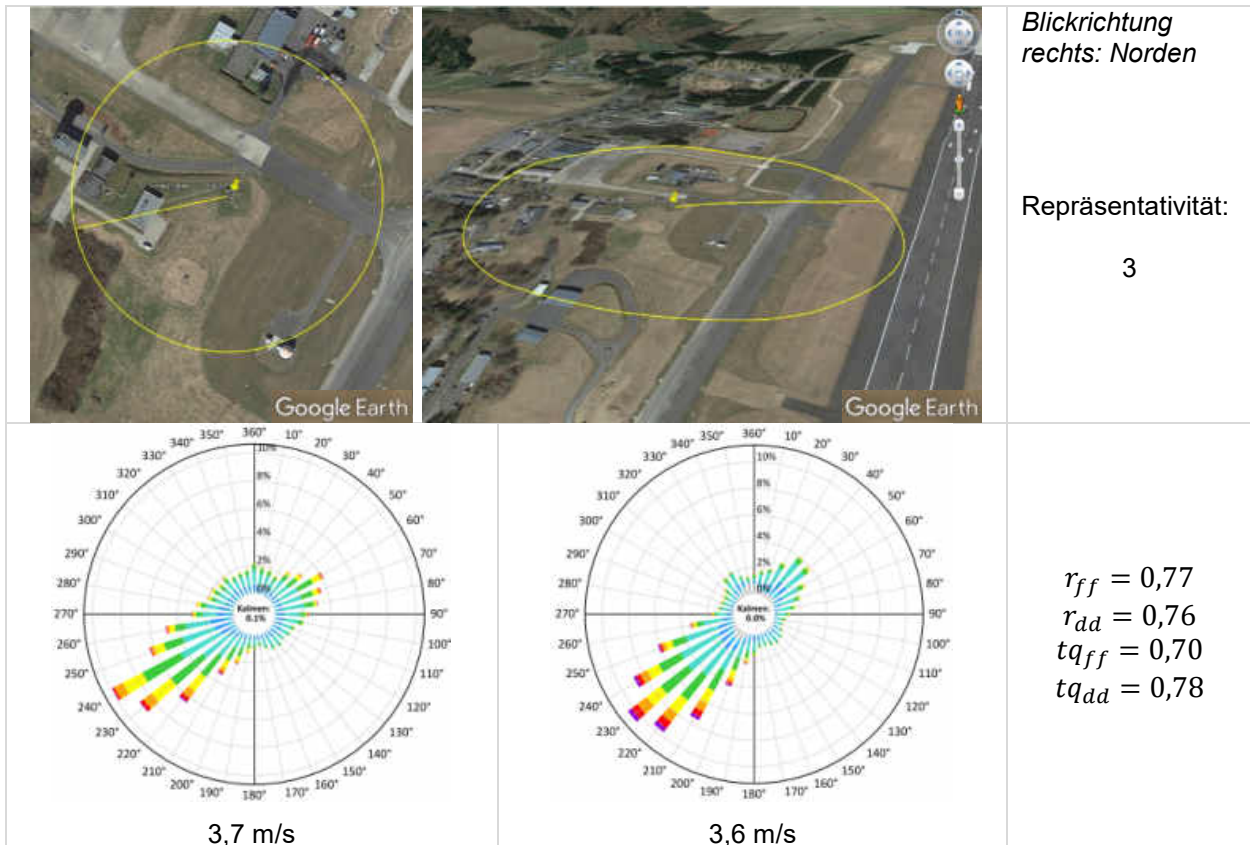


Abbildung 34: Reales Geländere Relief und Messung (links) sowie 500 m-Modellraster und SynAKTerm (rechts) bei Andernach.

Das Beispiel der Station Andernach macht besonders deutlich, wie einerseits aufgrund des 500 m-Modellrasters leichte Verschiebungen im Geländeeinfluss auf die Windcharakteristiken möglich sind, andererseits aber auch der räumlichen Repräsentativität von Messungen enge Grenzen gesetzt sind – häufig entgegen dem Augenschein der Stationsumgebung.

Büchel (Flugplatz) (vgl. Abbildung A.15)

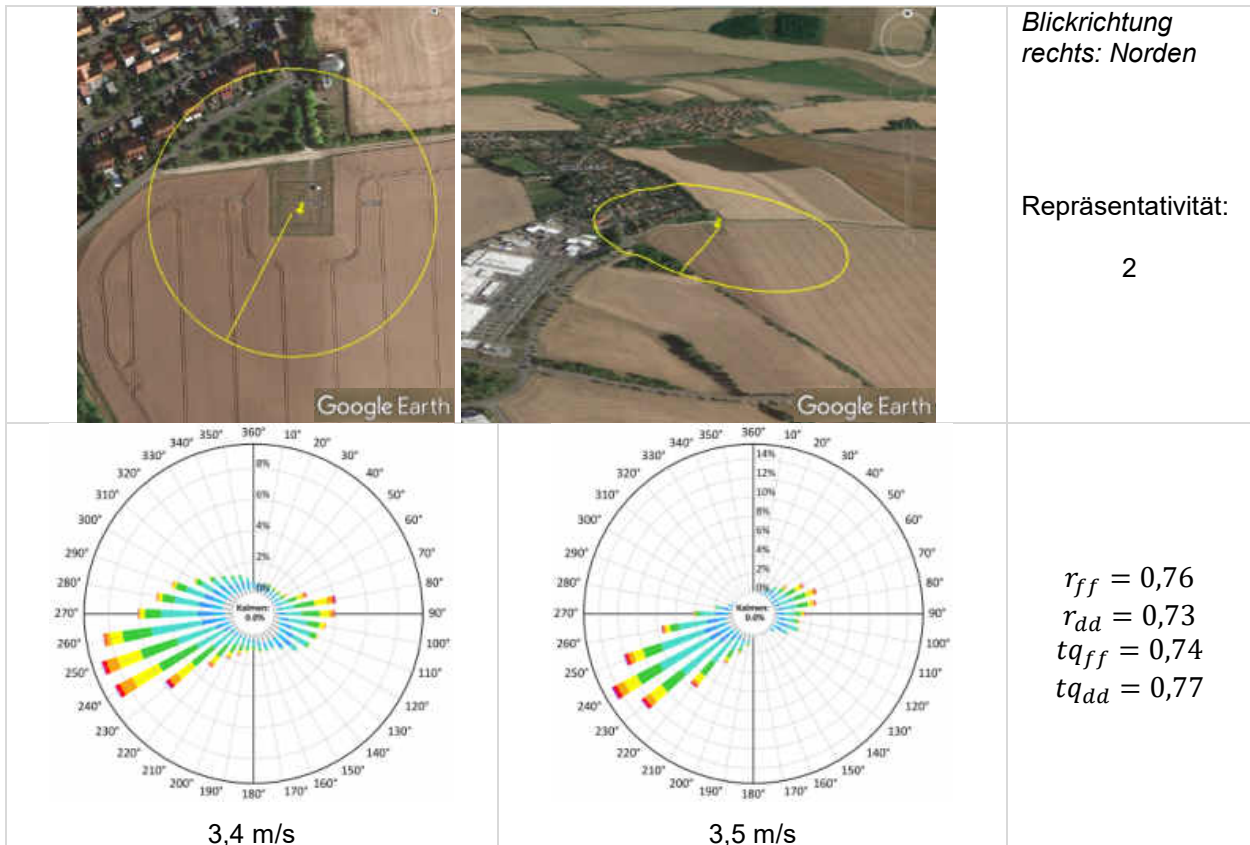


An der Station Büchel im Landkreis Cochem-Zell beträgt die Messhöhe 10 m. Im Umkreis von 100 m finden sich diverse Gebäude, so dass von einer lokalen Beeinflussung der Messungen, insbesondere bei westlichen und nördlichen Anströmrichtungen, ausgegangen werden muss. Das umgebende Gelände ist dagegen weitgehend eben und kann vom Modellgitter gut aufgelöst werden. Wegen der lokalen Einflüsse wird die Repräsentativität jedoch nur als befriedigend eingestuft.

Die gemessene Windrichtungsverteilung ist zweigipflig und weist ein Hauptmaximum bei Westsüdwest auf. Ein Nebenmaximum liegt bei ostnordöstlichen Richtungen vor. Alle anderen Windrichtungen kommen etwa gleich häufig, aber selten vor.

Die SynAKTerm weist hohe Übereinstimmung mit gleicher Charakteristik auf. Das Hauptmaximum ist leicht um etwa 10° nach Südwest verschoben, das Nebenmaximum ebenfalls leicht Richtung Nordost. Die mittleren Windgeschwindigkeiten sind mit 3,6 m/s gegenüber 3,7 m/s nahezu deckungsgleich. Die sehr gute Übereinstimmung drückt sich auch in vergleichsweise hohen Korrelationen und Trefferquoten aus.



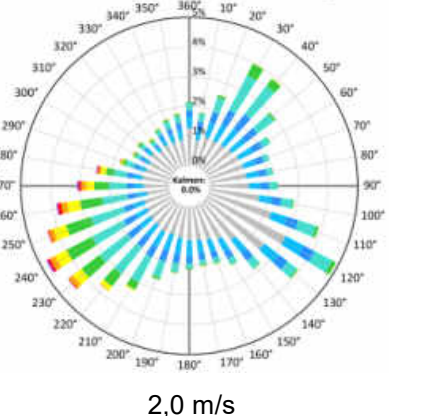
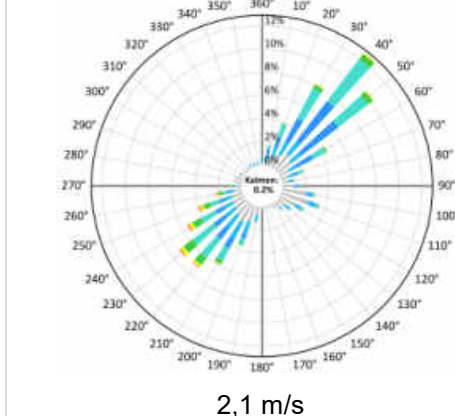
Eisenach (vgl. Abbildung A.21)



Die Station Eisenach liegt am nach Nordosten auslaufenden Hang des Thüringer Waldes. Die Messhöhe dort beträgt 12 m. Die Station steht frei auf einem Feld. Lediglich ab 20 m Entfernung stehen in nördliche Richtungen einige Bäume, so dass bei Winden um Nord trotz der Messhöhe leichte lokale Einflüsse vorliegen können. Das Gelände weist im großen Umkreis ein weitgehend homogenes leichtes Gefälle auf, so dass das umgebende Relief vom Modellgitter gut aufgelöst werden kann. Die Repräsentativität wird als gut eingeschätzt.

Die Messung zeigt Westsüdwest als Hauptwindrichtung und Osten als deutlich schwächeres Nebenmaximum bei einem Jahresmittel von 3,4 m/s. Die Richtungsverteilung der SynAKTerm weist nur um 10° abweichend das gleiche Haupt- und Nebenmaximum auf. Lediglich westnordwestliche Winde treten hier seltener auf. Das Jahresmittel ist mit 3,5 m/s fast deckungsgleich mit der Messung. Die sehr gute Übereinstimmung drückt sich auch in überdurchschnittlich hohen Korrelationen und Trefferquoten aus.

Gailingen (vgl. Abbildung A.35)

		<p>Blickrichtung rechts: Osten</p> <p>Repräsentativität:  1</p>
 <p>2,0 m/s</p>	 <p>2,1 m/s</p>	<p><math>r_{ff} = 0,44</math>  <math>r_{dd} = 0,36</math>  <math>tq_{ff} = 0,65</math>  <math>tq_{dd} = 0,58</math></p>

Die Station Gailingen befindet sich etwa auf halber Strecke zwischen den Gemeinden Gailingen (D) im Osten und Dörflingen (CH) im Westen. Abgesehen von zwei Hofgebäuden 40 m östlich der Station gibt es in der Umgebung keine erkennbaren lokalen Einflüsse auf die Windmessungen in 12 m Höhe. Nördlich von Gailingen verläuft von Nordwest nach Südost ein bis zu 1,5 km breiter und 150 m hoher Höhenzug (Fronberg und Rauhenberg). Die Station liegt im sanft auslaufenden südlichen Hangbereich, so dass das umgebende Geländere relief vom Modellgitter aufgelöst werden kann. Die räumliche Repräsentativität wurde, auch aufgrund der Messhöhe, als hoch eingeschätzt.

Die Messung zeigt eine breite Häufigkeitsverteilung über alle Windrichtungen, wobei daraus drei Maxima hervortreten. Ein breiteres Hauptmaximum liegt bei Südwest, zwei schmalere Nebenmaxima bei Südost und Nordost. Die SynAKTerm steht hierzu in deutlichem Kontrast. Im Grunde werden die drei Hauptwindrichtungen zwar auch von der SynAKTerm ausgewiesen. Jedoch fehlt die breite Verteilung über die restlichen Windrichtungen fast vollständig und das Hauptmaximum liegt im Nordosten statt Südwesten. Die mittlere Windgeschwindigkeit stimmt dagegen mit einer Abweichung von nur +0,1 m/s sehr gut überein. Die Korrelationskoeffizienten zeigen einen weit unterdurchschnittlichen zeitlichen Zusammenhang zwischen SynAKTerm und Messung. Die Trefferquoten sind leicht unterdurchschnittlich.

Gailingen ist die einzige Station, an der trotz der als sehr gut eingeschätzten Repräsentativität derart große Unterschiede zwischen Messung und SynAKTerm auftreten. Sie bildet damit einen

Ausnahmefall unter allen Stationsvergleichen. Eine eindeutige Ursache hierfür ist nicht auf den ersten Blick erkennbar. Allerdings gibt es bei genauerer Analyse der Daten einige Hinweise.

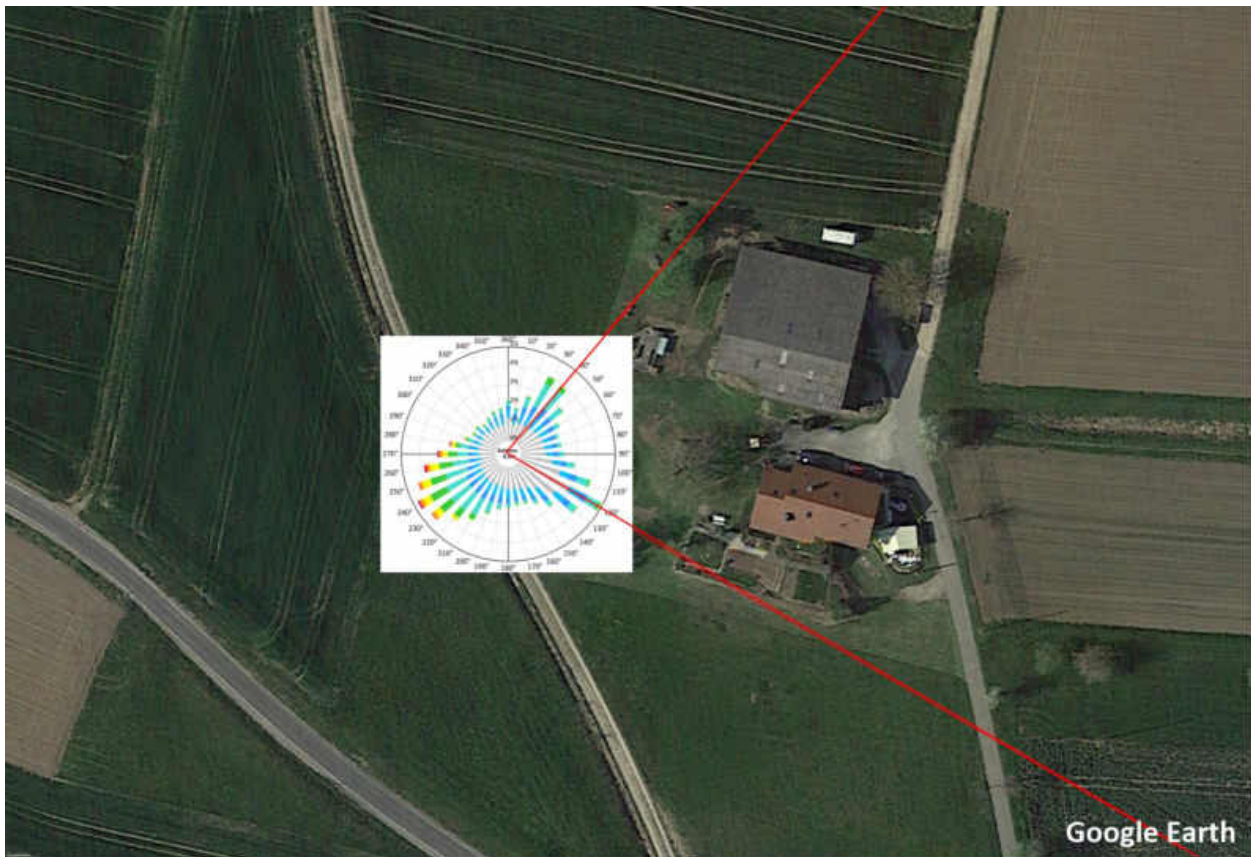


Abbildung 35: Windrose und Umgebung der DWD-Station Gailingen.

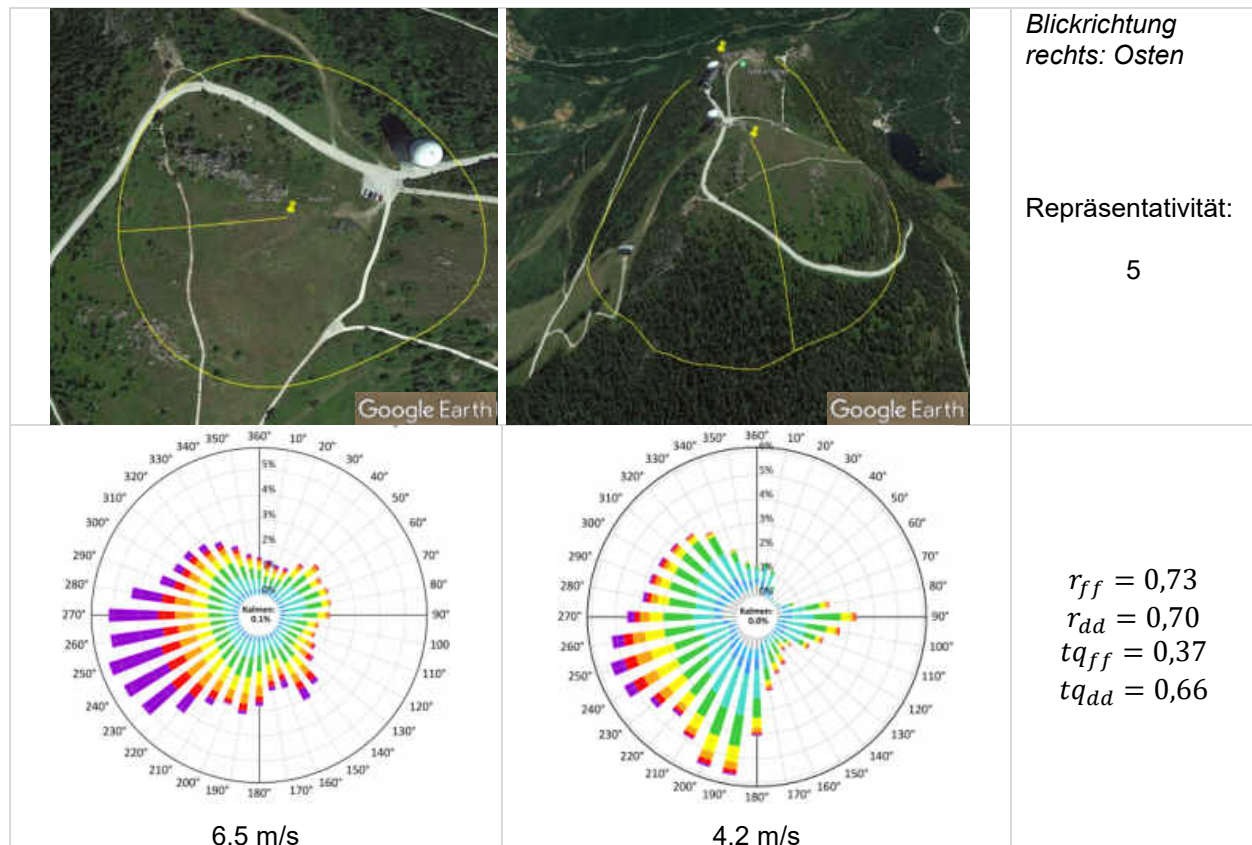
Abbildung 35 zeigt ein Luftbild der Stationsumgebung mit der am Messort eingezeichneten Windrose. Auffällig ist, dass exakt in Lee der Hofgebäude ein relatives Minimum der Windrichtungshäufigkeiten vorliegt und die beiden Maxima sich in den beiden ersten frei angeströmten Richtungssektoren daneben zeigen. Möglicherweise haben diese in immerhin erst 40 m Entfernung liegenden Gebäude entgegen der ersten Einschätzung und trotz der Messhöhe von 12 m doch einen erheblichen Einfluss auf die Charakteristik der Windrichtungsverteilung. Man kann nur spekulieren, ob die beiden Nebenmaxima ohne Gebäudeeinfluss zu einem einzigen Maximum aus Ost bis Nordost verschmelzen würden.

Die weitere Analyse zeigt, dass die nordöstlichen und südöstlichen Winde nachts etwa doppelt so häufig auftreten wie tagsüber und folglich mit einem nächtlichen thermischen Windsystem verbunden sind, bei dem schwache Winde das Gehöft umströmen. In der SynAKTerm führen die nächtlichen Kaltluftwindsysteme überwiegend zu Winden aus Nordost. Summiert man die dynamisch dominierten Winde aus dem Südwestsektor, so treten diese in den Messungen zu 35 % und in der SynAKTerm zu 38 % auf, was wiederum in guter Näherung übereinstimmt.

Auch das Beispiel Gailingen illustriert eindrücklich, warum der Vergleich synthetischer Daten mit Messungen ohne tieferes Verständnis der räumlichen Repräsentativität beider Arten von Daten in die Irre führen kann.



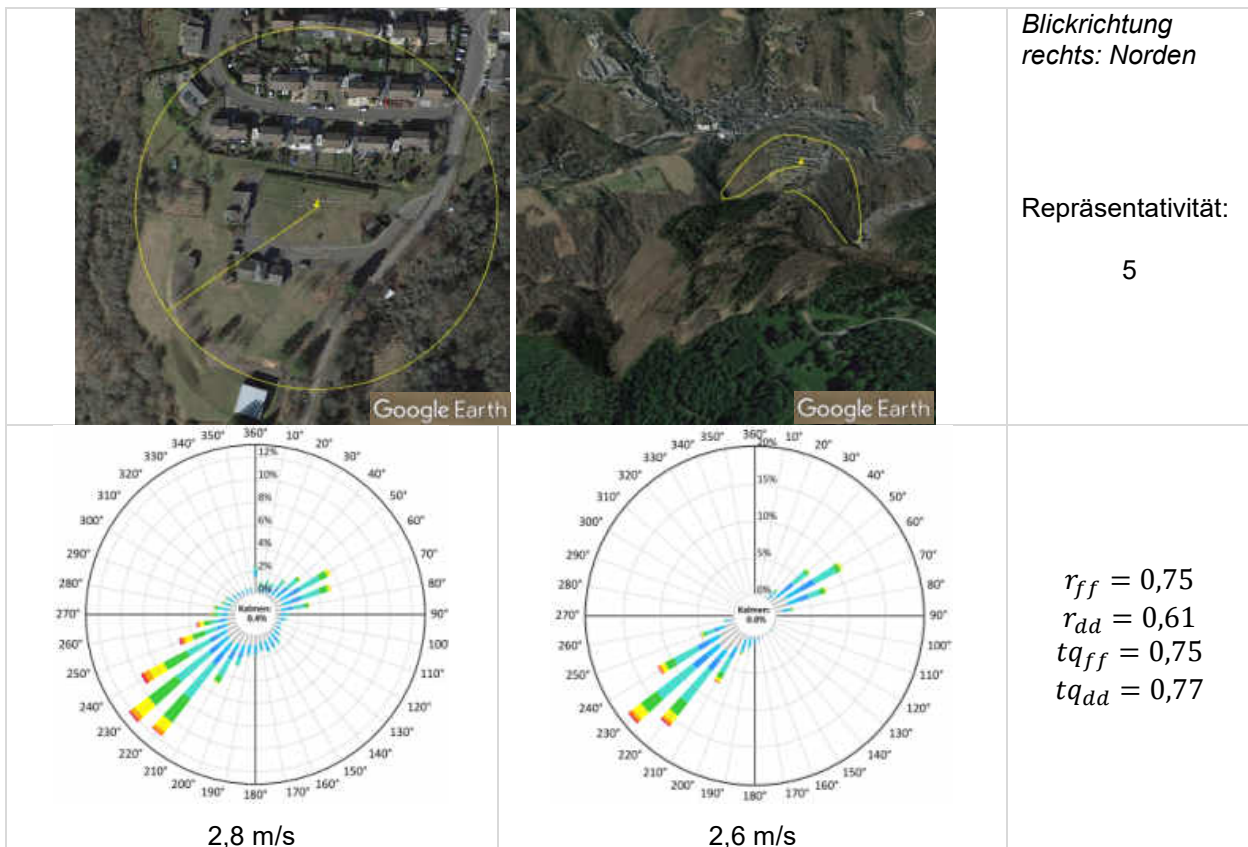
Großer Arber (vgl. Abbildung A.41)



Der Große Arber ist mit 1.455 m NHN die höchste Erhebung des Bayerischen Waldes. Die Station befindet sich im westlichen Kuppenbereich und misst in 15 m Höhe. Im Umkreis von 250 m um die Station fällt das Gelände bereits nach allen Seiten sehr steil ab. Das Relief der Stationsumgebung kann vom Modellgitter nicht adäquat aufgelöst werden und Speed-Up-Effekte müssen unterschätzt werden. Die Repräsentativität wird deshalb als sehr schlecht eingestuft.

Die Messung zeigt eine breite Windrichtungsverteilung, überwiegend um West bis Südwest, aber auch nennenswerte Anteilen südöstlicher und nordöstlicher Winde und eine hohe jahresgemittelte Windgeschwindigkeit von 6,5 m/s. Die SynAKTerm weist trotz völlig anderem Repräsentativitätsbereich eine ähnlich breite Richtungsverteilung um West auf, in der sich allerdings Südsüdwest als sekundäres Maximum zusätzlich heraushebt. Auf der Ostseite sind die Häufigkeiten schmaler auf Ost gebündelt. Die Windgeschwindigkeit ist zwar mit 4,2 m/s vergleichsweise hoch, kann aber natürlich den lokalen Speed-Up-Effekt der Messung nicht abbilden. Gemessen an der exponierten Stationslage muss die Übereinstimmung als erstaunlich gut bewertet werden. Dies drückt sich auch in relativ hohen Korrelationskoeffizienten und Trefferquote für die Windrichtung aus. Die Trefferquote der Windgeschwindigkeit ist dagegen wegen des fehlenden Speed-Up-Effekts unterdurchschnittlich.



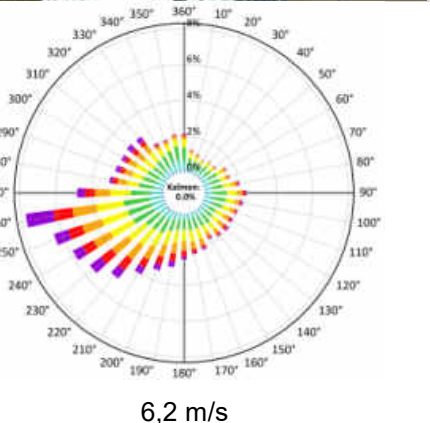
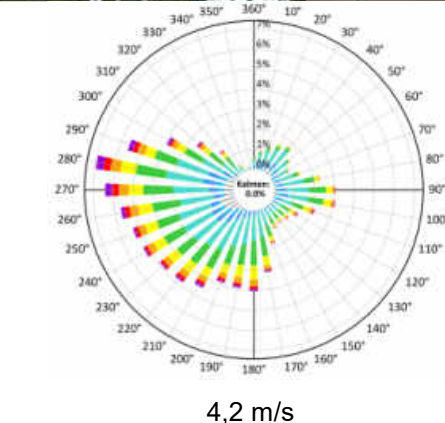
Idar-Oberstein (vgl. Abbildung A.50)



Idar-Oberstein liegt an der Nahe am Rand des Hunsrück. Die DWD-Station befindet sich am südlichen Ortsrand auf einem Höhenzug. In nur 40 m Entfernung stehen rund um die Station, insbesondere aber in nördliche Richtung, etliche Gebäude. Trotz einer Messhöhe von 14,5 m ist mit einem lokalen Einfluss auf die Windmessung zu rechnen. Ab etwa 70 m Distanz beginnt das Gelände nach Westen und Osten steil abzufallen. Dieses kleinräumige Geländere relief kann vom Modellgitter nicht aufgelöst werden. Die Repräsentativität der Station wird deshalb als sehr schlecht eingestuft.

Dennoch stimmt die SynAKTerm ausgezeichnet mit der Messung überein. Beide Datensätze haben das Hauptmaximum bei Südwestwind und ein Nebenmaximum bei Ostnordostwind. Die SynAKTerm ist lediglich geringfügig stärker kanalisiert und zeigt praktisch keine Nordwest- und Südostwinde. Auch die mittleren Windgeschwindigkeiten sind mit 2,6 m/s gegenüber 2,8 m/s sehr gut getroffen. Die gute Übereinstimmung der Windrosen und Jahresmittel spiegelt sich auch in überdurchschnittlichen Korrelationskoeffizienten und Trefferquoten wider.

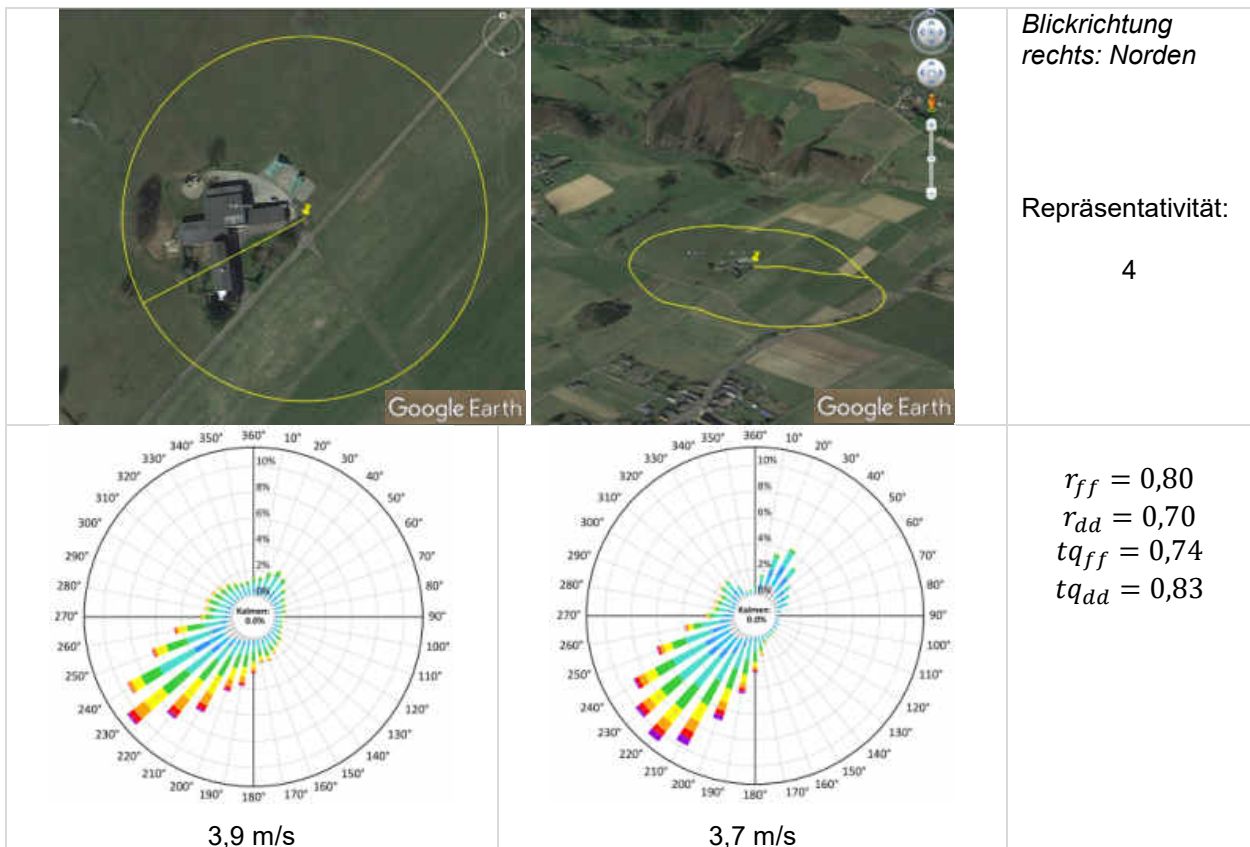
Kahler Asten (vgl. Abbildung A.52)

		<p>Blickrichtung rechts: Westen</p> <p>Repräsentativität:  4</p>
 <p>6,2 m/s</p>	 <p>4,2 m/s</p>	<p><math>r_{ff} = 0,83</math>  <math>r_{dd} = 0,79</math>  <math>tq_{ff} = 0,34</math>  <math>tq_{dd} = 0,78</math></p>

Der Kahle Asten ist mit 842 m NHN der dritthöchste Berg des Rothaargebirges. Die Messstation liegt auf der überwiegend unbewaldeten Kuppe. Nur in südliche Richtung befinden sich zwischen 70 m und 120 m Entfernung einige Gebäude, so dass die Messung in 27 m Höhe wenig lokal beeinflusst ist. Das Gelände beginnt ab etwa 200 m Umkreis allmählich abzufallen. Das Relief kann demnach nur näherungsweise vom Modellgitter aufgelöst werden. Die Repräsentativität wird deshalb als schlecht bewertet.

Gemessen werden hauptsächlich west- bis südwestliche Winde, wobei alle anderen Windrichtungen fast gleichverteilt auftreten. Lediglich im Nordostsektor liegt ein breites Häufigkeitsminimum vor. Das Jahresmittel von 6,2 m/s weist aufgrund der exponierten Lage einen deutlichen Speed-Up-Effekt auf. Auch die SynAKTerm zeigt die asymmetrisch zu beiden Seiten abnehmende Häufigkeitsverteilung um west- bis südwestliche Richtungen, wobei das Maximum aber leicht nach Westnordwest verdreht ist. Im Vergleich zur Messung sind hier Nordnordwest und Südost unterrepräsentiert. Die mittlere Windgeschwindigkeit zeigt mit 4,2 m/s keinen nennenswerten Speed-Up-Effekt. Korrelationen und Trefferquote der Windrichtung sind hoch, lediglich die Trefferquote der Windgeschwindigkeiten ist aus dem genannten Grund gering. Die Qualität der SynAKTerm wird als gut bewertet.

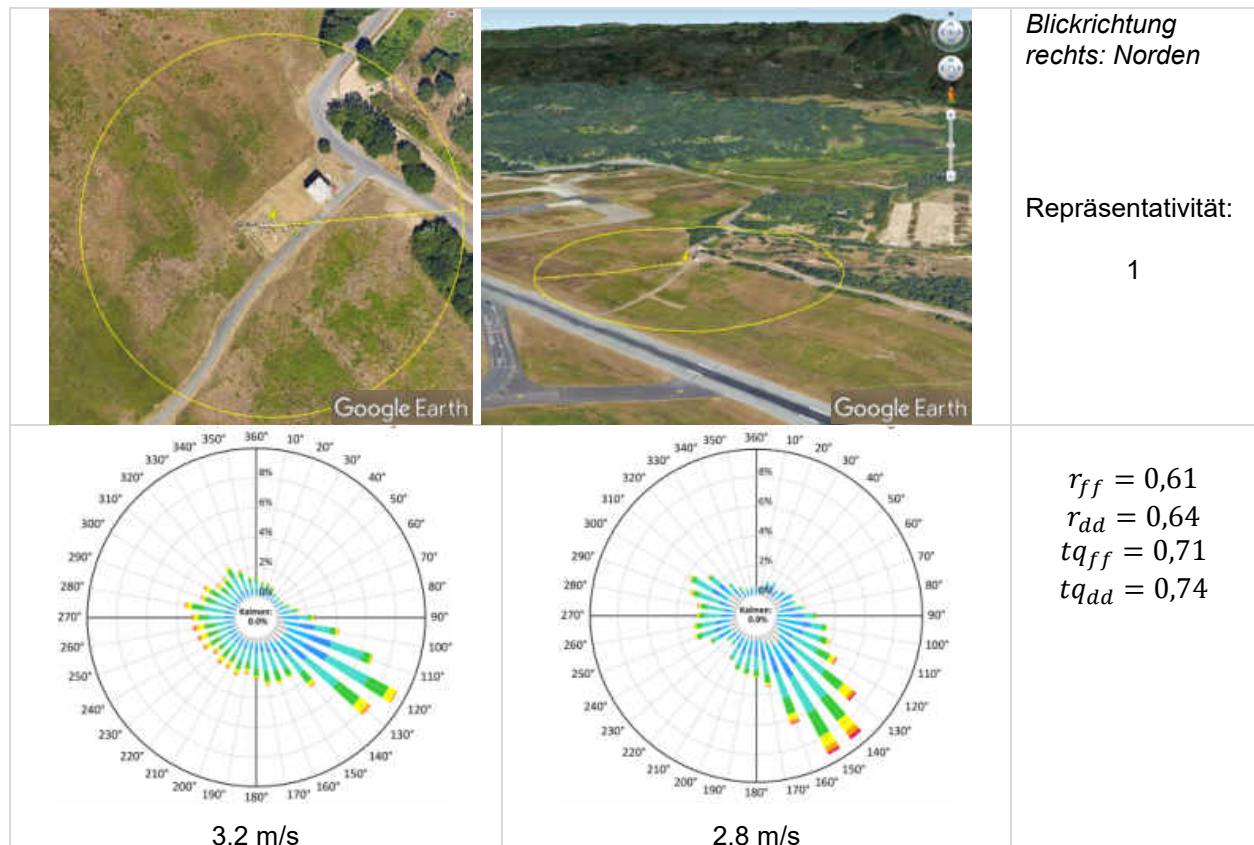
Kall-Sistig (vgl. Abbildung A.54)



Die Station befindet sich in der Nordeifel in vergleichsweise ebener Umgebung. Allerdings wird in nur 10 m Höhe und geringer Distanz direkt neben einem größeren Gebäudekomplex gemessen, so dass von Störungen der Messung bei allen Windrichtungen ausgegangen werden muss. Die Stationsrepräsentativität wird deshalb als schlecht bewertet.

Die Messung zeigt ein ausgeprägtes Häufigkeitsmaximum um Südwest. In Nordnordost liegt ein sehr schwaches sekundäres Maximum. Die SynAKTerm stimmt ausgezeichnet mit der Messung überein, das Maximum ist lediglich um etwa 10° gedreht und Nordnordostwinde sind geringfügig häufiger. Auch das Jahresmittel der Windgeschwindigkeit weicht mit 3,7 m/s gegenüber 3,9 m/s kaum von der Messung ab. Korrelation und Trefferquoten sind sehr hoch. Es kann nur spekuliert werden, ob die eingeschränkte Repräsentativität des Messortes hier weniger zum Tragen kommt, weil der Wind überwiegend parallel am Gebäudekomplex vorbeiweht.

Köln-Bonn (vgl. Abbildung A.59)



Auf dem Flughafen Köln-Bonn wird in 10 m Höhe gemessen. Außer dem dreistöckigen (!) Stationsgebäude gibt es nur einige Bäume oder Büsche in östliche Richtungen. Auch das Gelände ist in der weiteren Umgebung eben, so dass von einer sehr guten Repräsentativität ausgegangen wird. Einschränkungen könnten bei nordöstlichen Windrichtungen vorliegen, diese treten allerdings fast nie auf.

Die gemessene Windrose weist ein ausgeprägtes einzelnes Maximum aus Südosten (110° bis 130°) auf. Bis auf den Nordostsektor sind die anderen Windrichtungen relativ gleichmäßig verteilt. Das Jahresmittel der Windgeschwindigkeit beträgt 3,2 m/s. Die SynAKTerm zeigt die gleiche Charakteristik, allerdings ist die Hauptwindrichtung gegenüber der Messung um etwa 30° auf Südsüdost gedreht. Die Windgeschwindigkeit ist mit 2,8 m/s etwas geringer. Die Korrelation der Windgeschwindigkeit ist leicht unterdurchschnittlich, die anderen Korrelationen und Trefferquoten leicht überdurchschnittlich.

Die gemessene Hauptwindrichtung ist insofern erstaunlich, weil die Startbahn in 140° ausgerichtet ist und damit um 20° aus der (hier gemessenen) Hauptwindrichtung gedreht. Außerdem verläuft über fast 2 km von der Station ausgehend nach Südosten (135°) die Grenze zwischen einem Waldstreifen und dem Rasen des Flughafens, von der eine gewisse Leitwirkung auf die bodennahe Windrichtung zu erwarten wäre.

Bei [16] wird die stärker südöstliche Ausrichtung der Windrose einerseits mit nächtlichen thermischen Windsystemen und andererseits mit dem Bergischen Höhenrand erklärt. In

Abbildung 36 ist das umgebende Geländere relief dargestellt. Eingezeichnet sind in rot und blau die Hauptwindrichtungen von Messung und SynAKTerm. Der Bergische Höhenrand scheint demnach eher eine Kanalisierung der Strömung auf rund  $140^\circ$  zu begünstigen, wie sie auch der Ausrichtung der Landebahn entspricht. Allerdings umzieht die Station von Nordosten bis Süden ein schwacher Höhenzug, der in Richtung  $130^\circ$  auf einer Breite von maximal 500 m um etwa 20 m eingeschnitten ist. Dieser schwach ausgeprägte Geländeeinschnitt entspricht der Richtung des gemessenen Hauptmaximums und könnte deshalb dessen kleine Abweichung von der etwas größerräumigen Ausrichtung der Geländekante des Bergischen Landes erklären. Das Modellgitter kann dagegen diese nur lokalen und schwach ausgeprägten Geländestrukturen nicht oder nur näherungsweise abbilden. Deshalb ist der synthetische Datensatz in der Hauptwindrichtung eher an der Kante des Bergischen Landes orientiert.

Auch dieses Stationsbeispiel von Köln-Bonn belegt, dass sich selbst bei frei gelegenen Flughafenstationen die räumliche Repräsentativität von Messung und synthetischem Datensatz unterscheiden kann und die direkte Vergleichbarkeit damit einschränkt.

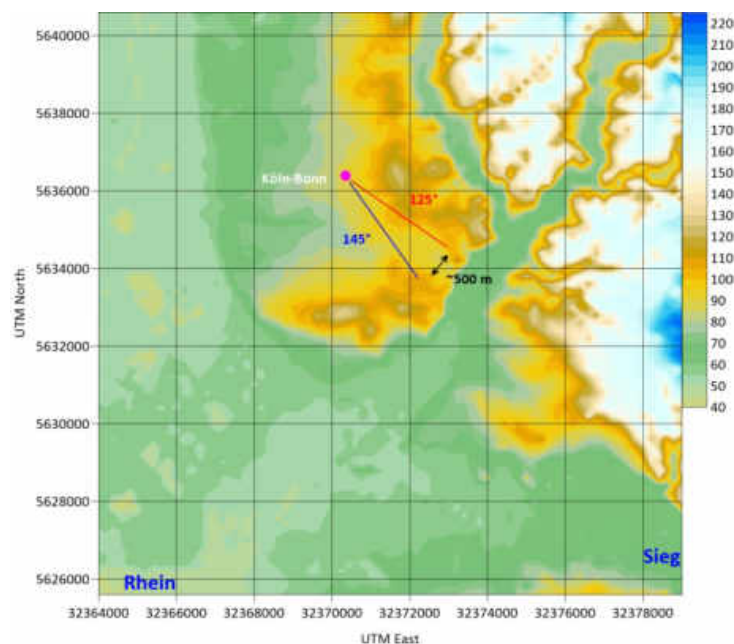
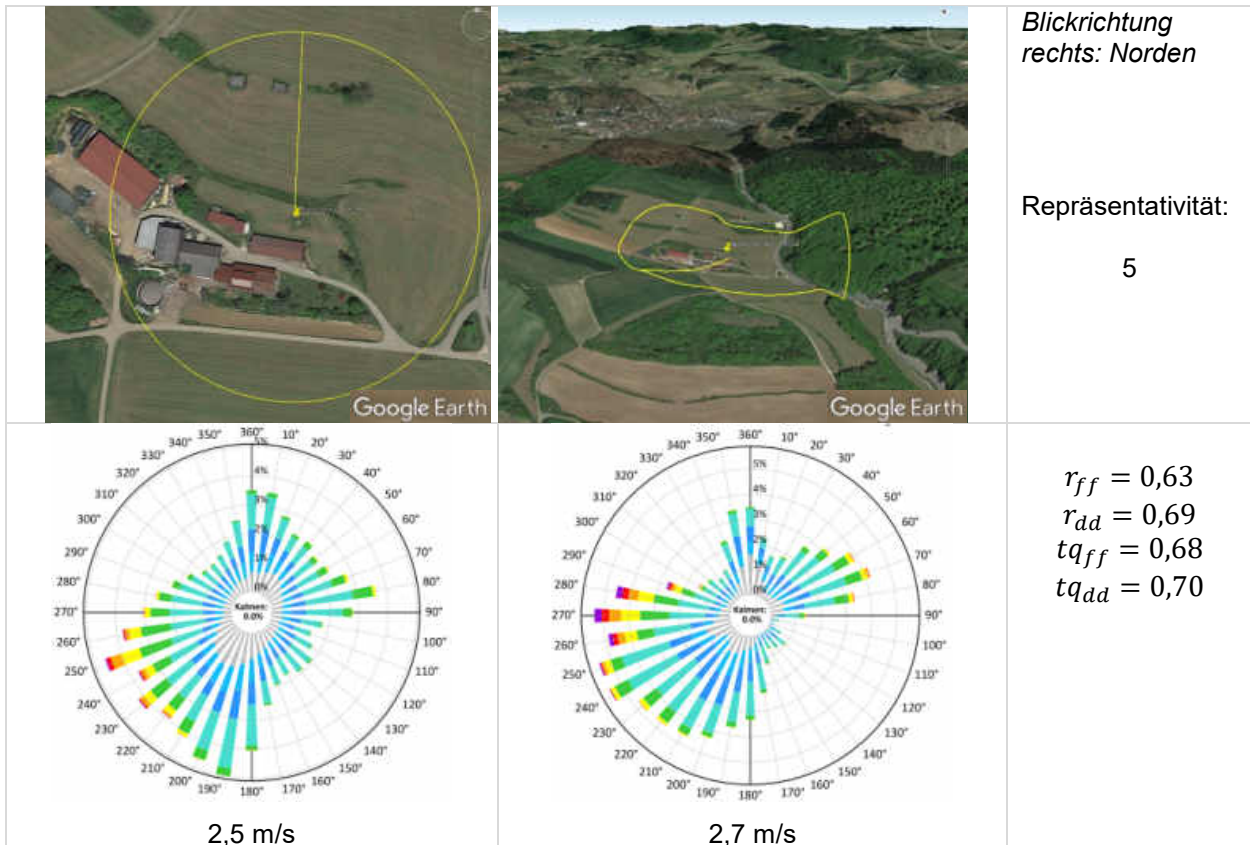


Abbildung 36: Lage der DWD-Station Köln-Bonn mit umgebenden Geländere relief und Hauptwindrichtungen gemessen (rot) und synthetisch (blau).

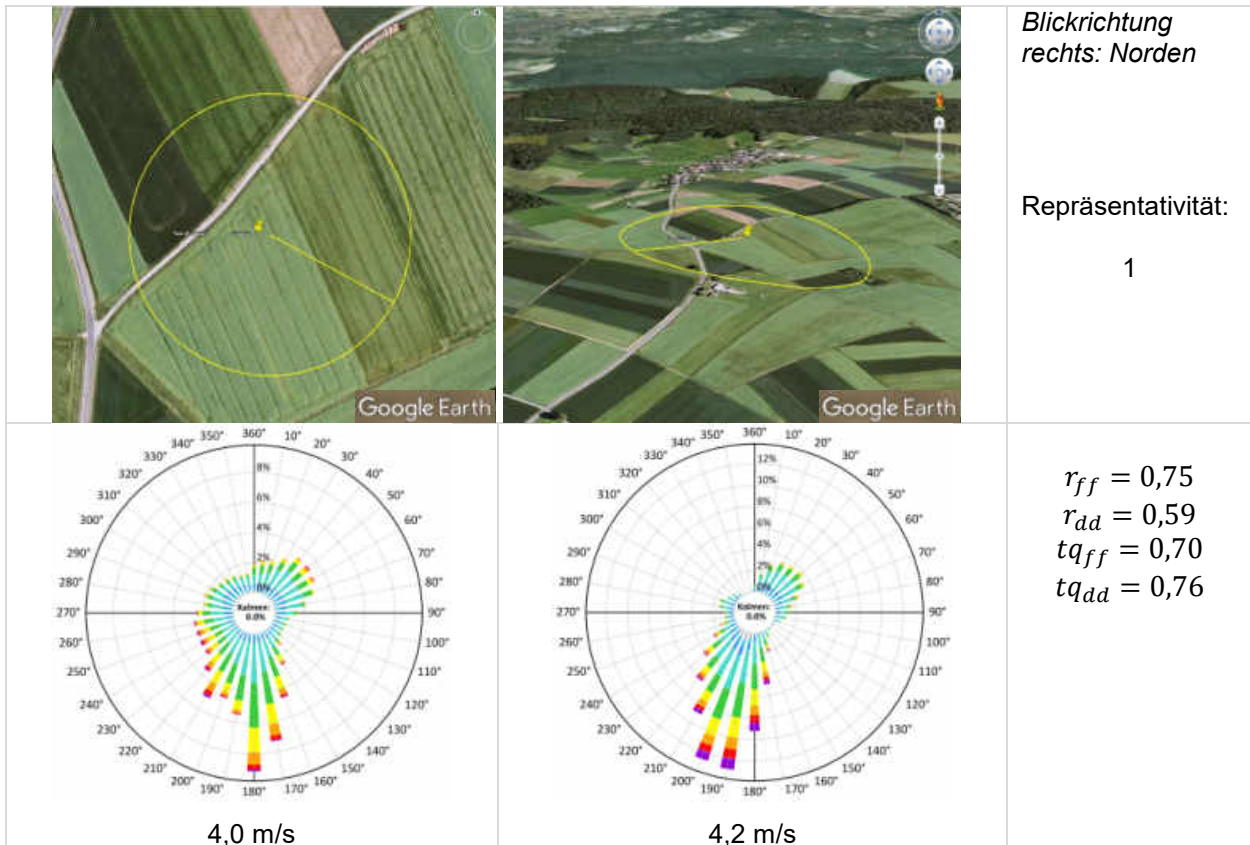
Münsingen-Apfelstetten (vgl. Abbildung A.83)



Münsingen-Apfelstetten ist eine Station auf der Schwäbischen Alb. Die Messhöhe beträgt 10 m. Von Süden bis Westen liegen im 100 m-Umkreis mehrere Gebäude des benachbarten Gehöfts. Deshalb ist von einer deutlich gestörten Messung mindestens bei Anströmungen aus diesen Richtungen auszugehen. Auch das Gelände weist bereits innerhalb eines Umkreises von 250 m ein Relief auf, so dass es vom Modellgitter, je nach Lage, möglicherweise weniger gut aufgelöst werden kann. Daher wird die räumliche Repräsentativität als sehr schlecht eingestuft.

Die Messung zeigt eine breite Häufigkeitsverteilung aus fast allen Richtungen, wobei vor allem südliche bis westliche Windrichtungen am häufigsten auftreten. Sekundäre Maxima gibt es zudem bei nördlichen und östlichen Winden. Das Jahresmittel der Windgeschwindigkeit liegt bei 2,5 m/s. Die SynAKTerm weist ebenfalls Nebenmaxima um Nord und Ostnordost aus bei einer nur geringfügig höheren Windgeschwindigkeit von 2,7 m/s. Das Hauptmaximum zieht sich ebenfalls sehr breit über den südwestlichen Sektor. Allerdings ist es gegenüber der Messung etwas im Uhrzeigersinn gedreht. Korrelationen und Trefferquoten sind leicht überdurchschnittlich.

Neu-Ulrichstein (vgl. Abbildung A.89)

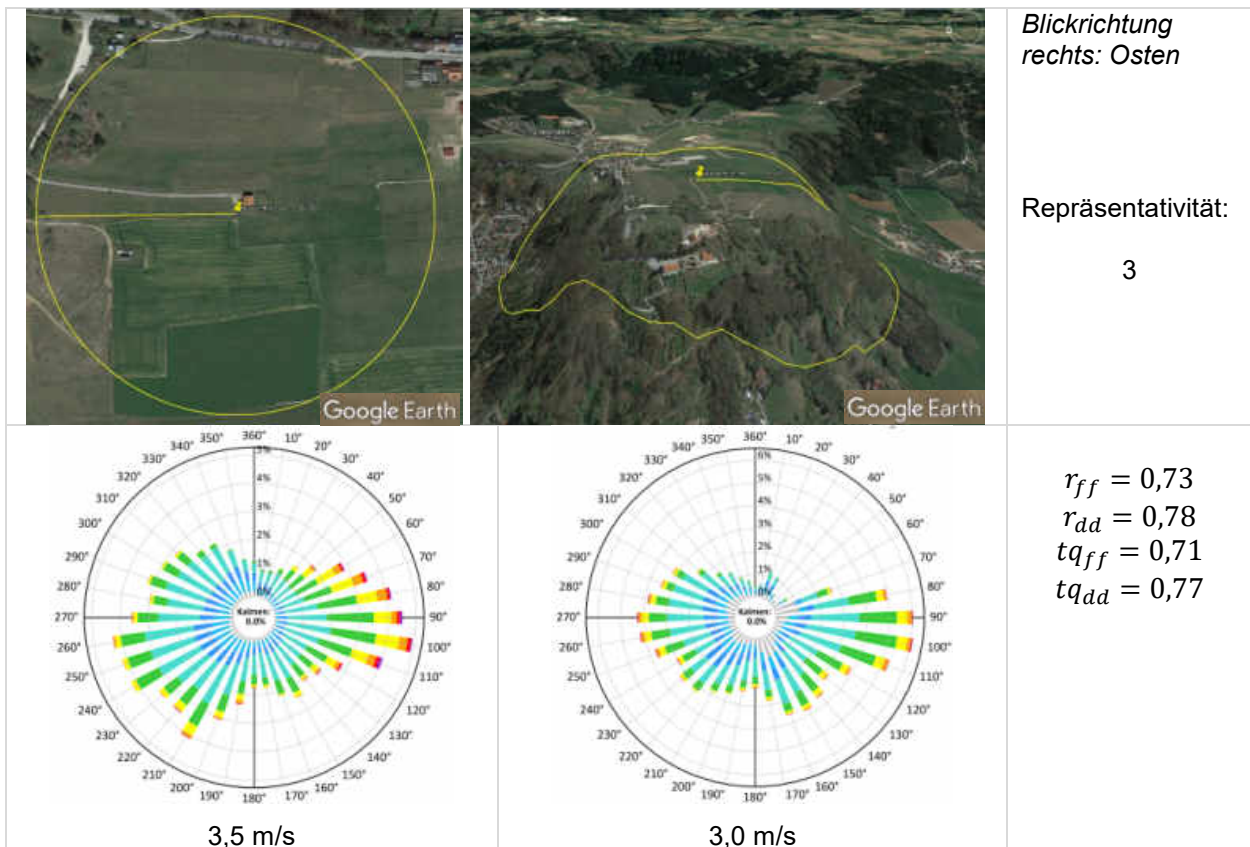


Neu-Ulrichstein ist eine frei gelegene Station nordwestlich der hessischen Gemeinde Homberg (Ohm). In der Stationsumgebung liegen nur Felder und auch das Relief ist weitgehend homogen, so dass die Repräsentativität als sehr gut eingestuft wird.

Haupt- und Nebenmaximum von SynAKTerm und Messung stimmen bis auf eine Differenz von 10° bis 20° gut überein. Auch die jahresgemittelten Windgeschwindigkeiten unterscheiden sich nur um 0,2 m/s und die Trefferquoten und Korrelationen sind hoch.



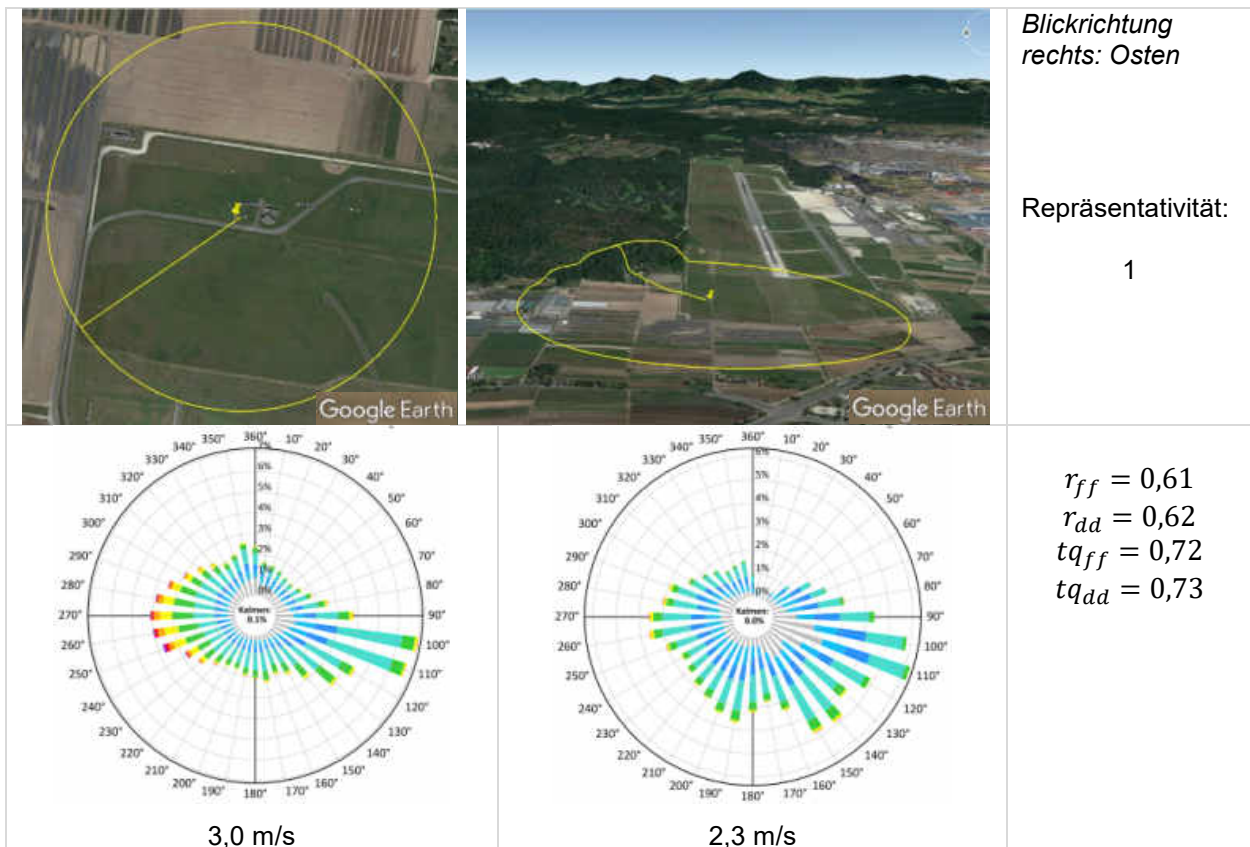
Neumarkt-Höhenberg (vgl. Abbildung A.88)



Die Messung erfolgt oberhalb von Neumarkt (Oberpfalz) auf dem Plateau des Höhenbergs in 10 m Höhe. In der näheren Stationsumgebung gibt es keine nennenswerten Strömungshindernisse. Allerdings fällt das Gelände im Umkreis von 250 m zu allen Seiten steil ab, so dass die exponierte Kuppenlage vom Modellraster nicht aufgelöst werden kann.

Die gemessenen Windrichtungen sind relativ breit um West und Ost verteilt, wobei die höheren Windgeschwindigkeiten in den Ostsektoren auftreten. Eine vergleichbare Charakteristik zeigt auch die SynAKTerm. Hier sind nur die Häufigkeiten bei östlichen Windrichtungen etwas höher als bei westlichen Windrichtungen. Das Jahresmittel der Windgeschwindigkeit ist, wohl auch wegen geringerem Speed-Up-Effekt, um 0,5 m/s geringer als in der Messung. Korrelationen und Trefferquoten weisen hohe Werte auf.

Nürnberg (vgl. Abbildung A.94)



Die Station Nürnberg misst auf dem Flughafen in 10 m Höhe. Um die Station herum liegen keine Strömungshindernisse vor. Auch das Gelände ist in größerem Umkreis nahezu eben, so dass die Repräsentativität der Station hoch ist.

Der gemessene Wind weht überwiegend aus Ostsudost. Auch Winde in einem breiten Sektor um West sind häufig, wobei diese die höheren Geschwindigkeiten aufweisen. Im Mittel werden 3,0 m/s gemessen. Die SynAKTerm unterschätzt die Windgeschwindigkeit deutlich um 0,7 m/s. Die Windrose zeigt dagegen eine gute Übereinstimmung in der Charakteristik mit Haupt- und Nebenmaximum in den gleichen Sektoren wie die Messung. Das Südostmaximum ist lediglich etwas breiter und Südsüdwestwinde etwas häufiger als gemessen. Die Korrelation der Windgeschwindigkeit ist unterdurchschnittlich, die der Windrichtung und die Trefferquoten dagegen überdurchschnittlich.

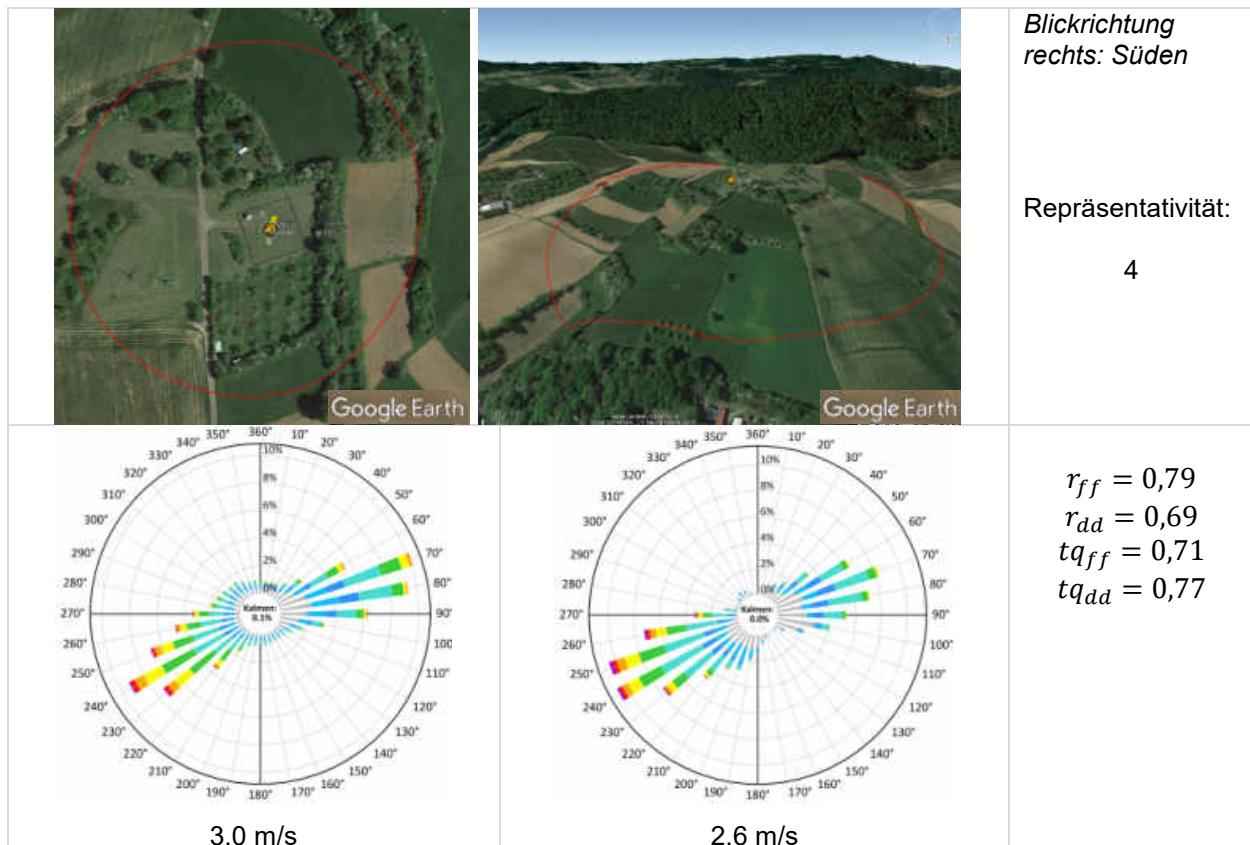
Saarbrücken-Enzheim (vgl. Abbildung A.108)

		<p>Blickrichtung rechts: Osten</p>
		<p>Repräsentativität:  2</p>
<p style="text-align: center;">3,6 m/s</p>	<p style="text-align: center;">3,2 m/s</p>	<p><math>r_{ff} = 0,77</math>  <math>r_{ad} = 0,78</math>  <math>tq_{ff} = 0,76</math>  <math>tq_{ad} = 0,82</math></p>

Hierbei handelt es sich wieder um eine Flughafenstation mit 10 m Messhöhe. Das Luftbild zeigt in der Umgebung einige Gebäude und Bewuchs, die sich auf die Messung auswirken können. Das Geländere relief ist dagegen in ausreichendem Umkreis homogen, so dass es vom Modellgitter gut aufgelöst werden kann. Deshalb wird die Repräsentativität noch als gut eingestuft.

Die gemessene Windcharakteristik zeigt eine Südwest-Nordost-Verteilung, wobei der Wind häufiger aus Südwesten und dann mit höheren Geschwindigkeiten weht. Diese Charakteristik wird einschließlich der asymmetrischen Abnahme der Häufigkeiten in Richtung Westen und Süden sehr gut von der SynAKTerm widergegeben. Lediglich die mittlere Windgeschwindigkeit wird mit 3,2 m/s gegenüber 3,6 m/s leicht unterschätzt. Korrelationen und Trefferquoten sind hoch.

Waibstadt (vgl. Abbildung A.123)



Gemessen wird auf einem kleinen Höhenzug oberhalb von Waibstadt im Kraichgau in 10 m über Grund. In Umgebung der Station stehen einige Bäume, die die Messung beeinflussen könnten. Das Gelände fällt schon auf geringe Distanzen zu allen Seiten ab, allerdings moderat. Die Repräsentativität der Station wird deshalb nur als befriedigend eingeschätzt.

Gemessen wird eine zweigipflige Häufigkeitsverteilung mit einem Maximum bei Ostnordost und nur wenig schwächerem Nebenmaximum bei Westsüdwest. Die mittlere Windgeschwindigkeit beträgt 3,0 m/s. Die SynAKTerm zeigt ebenfalls zwei Maxima in den gleichen Sektoren. Der Häufigkeitsschwerpunkt ist aber von Nordost nach Südwest verschoben. Die Windgeschwindigkeit wird mit 2,6 m/s leicht unterschätzt. Die Korrelationen und Trefferquoten sind vergleichsweise hoch.

An vielen der hier vorgestellten Beispiele wird deutlich, dass die Bewertung der Übereinstimmung synthetischer Daten mit Stationsmessungen ein äußerst komplexes Unterfangen ist, für das keine eindeutige, objektive Lösung besteht. Hierfür gibt es vor allem zwei Gründe.

Zum einen ist die räumliche Repräsentativität von Stationsmessung und SynAKTerm praktisch nie vergleichbar, so dass streng genommen ein Vergleich nicht zulässig ist. Andererseits bieten nur die Messungen eine Möglichkeit, die Qualität der synthetischen Daten zumindest einzuschätzen.

Zum anderen sind Korrelationskoeffizienten und Trefferquoten zwar objektiv bestimmte Maße der Übereinstimmung zweier Datensätze. Sie passen aber nicht immer zu der subjektiven Bewertung insbesondere anhand der Windrichtungsverteilung (Windrose). An den Stationen werden teilweise Korrelationskoeffizienten und Trefferquoten berechnet, die im Vergleich zur subjektiven Bewertung überdurchschnittlich hoch sind. Umgekehrt zeigen viele Stationen eine subjektiv bessere Übereinstimmung als allein aus Korrelationskoeffizienten und Trefferquoten anzunehmen wäre.

Die Beispiele belegen klar, dass die Bewertung der Qualität modellierter Daten weder allein anhand einzelner objektiver Übereinstimmungsmerkmale oder Fehlergrößen noch anhand subjektiver Bewertungen oder der Betrachtung nur einzelner Stationen zielführend ist. Vielmehr muss sich immer ein Gesamtbild verschafft werden aus vielen Stationen, sorgfältiger Einschätzung der räumlichen Repräsentativität der Stationen im Vergleich zu den synthetischen Daten, objektiven Fehlermaßen wie Korrelation und Trefferquoten und subjektiver Bewertung von Häufigkeitsverteilungen. Für ein belastbares Gesamtbild braucht es sowohl die subjektiven als auch die objektiven Bewertungskriterien.

DWD-Station	ID	räumliche Repräsentativität	Windgeschwindigkeit (m/s)			Bewertung Windrose	Korrelation		Trefferquote	
			Messung	synth.	Differenz		ff	dd	ff	dd
Aachen-Orsbach	15000	1	4.6	4	-0.6	1	0.85	0.74	0.74	0.81
Alsfeld	90	1	3.2	3.4	0.2	3	0.80	0.70	0.75	0.66
Altmühlsee	6096	1	3.2	2.9	-0.3	2	0.69	0.62	0.68	0.75
Andernach	161	1	2.3	1.6	-0.7	4	0.35	0.47	0.63	0.58
Aubstadt	7392	1	2.6	2.8	0.2	2	0.61	0.50	0.68	0.70
Augsburg	232	1	2.9	3.3	0.4	4	0.67	0.50	0.64	0.58
Bad Hersfeld	2171	5	2.8	2.5	-0.3	3	0.65	0.44	0.68	0.67
Bad Kissingen	2597	3	2.9	2	-0.9	2	0.66	0.49	0.66	0.67
Bad Marienberg	3167	2	3.6	3.6	0	4	0.72	0.76	0.70	0.74
Bad Soden-Salmünster	13900	3	1.9	2.3	0.4	1	0.58	0.59	0.66	0.71
Balingen-Bronnhaupten	13965	1	3	3	0	2	0.70	0.67	0.75	0.77
Bamberg	282	1	2.2	2.1	-0.1	2	0.47	0.46	0.67	0.72
Berus	460	4	4.2	3.4	-0.8	1	0.80	0.81	0.69	0.83
Birkelbach	7416	4	3.7	2.6	-1.1	3	0.75	0.62	0.57	0.74
Büchel (Flugplatz)	766	3	3.7	3.6	-0.1	1	0.77	0.76	0.70	0.78
Chieming	856	1	3	2.4	-0.6	2	0.58	0.54	0.61	0.60
Deuselbach	953	3	3.8	2.7	-1.1	3	0.71	0.68	0.60	0.70
Dogern	1013	1	2.1	2.2	0.1	2	0.48	0.44	0.65	0.68
Donaueschingen (Landeplatz)	11	1	2.7	2.7	0	3	0.40	0.30	0.66	0.61
Dörrmoschel-Felsbergerhof	1011	2	4.8	4.1	-0.7	2	0.84	0.76	0.71	0.81
Eisenach	7368	2	3.4	3.5	0.1	1	0.76	0.73	0.74	0.77
Erfurt-Weimar	1270	1	4.2	3.7	-0.5	1	0.81	0.76	0.75	0.77
Ergersheim-Neuherberg	15122	1	3.7	2.9	-0.8	3	0.76	0.75	0.70	0.81
Eschwege-Eltmannshausen	13701	4	3	2.4	-0.6	2	0.60	0.44	0.71	0.70
Feldberg (Schwarzwald)	1346	5	7.9	4.4	-3.5	3	0.69	0.56	0.29	0.64
Feuchtwangen-Heilbronn	7369	2	2.9	2.8	-0.1	2	0.69	0.73	0.71	0.78
Fichtelberg/Oberfranken-Hüttlstadt	1357	3	2.5	2.6	0.1	2	0.70	0.59	0.70	0.70
Frankenberg-Geismar	5851	1	3.9	3.4	-0.5	2	0.69	0.48	0.69	0.78
Frankfurt-Main	1420	1	3.4	2.5	-0.9	1	0.66	0.70	0.63	0.73
Frasdorf-Greimelberg	15520	3	2.8	2	-0.8	2	0.54	0.43	0.66	0.59
Freiburg	1443	2	2.6	2.1	-0.5	2	0.65	0.15	0.63	0.60
Freudenstadt	1468	2	3.5	2.9	-0.6	1	0.76	0.72	0.69	0.77
Friedrichshafen	1490	1	3.5	2.7	-0.8	1	0.46	0.35	0.54	0.57
Fürstzell	5856	3	2.9	2.9	0	3	0.64	0.62	0.67	0.64
Gailingen	6099	1	2	2.1	0.1	5	0.44	0.36	0.65	0.58
Garmisch-Partenkirchen	1550	2	1.5	1	-0.5	3	-0.08	0.20	0.64	0.40
Geibelsee	1587	2	2.8	2.4	-0.4	3	0.61	0.75	0.74	0.73
Geisenheim	1580	2	2.5	2	-0.5	4	0.33	0.50	0.62	0.58
Gießen-Wettenberg	1639	2	3.2	2.8	-0.4	3	0.64	0.70	0.71	0.75
Gottfrieding	7395	1	2.7	2.6	-0.1	1	0.66	0.61	0.68	0.70
Großer Arber	1832	5	6.5	4.2	-2.3	2	0.73	0.70	0.37	0.66
Günzburg	1886	2	2.7	4	1.3	2	0.69	0.69	0.52	0.75
Hahn	5871	1	4.2	3.3	-0.9	2	0.75	0.79	0.66	0.80
Halblech-Bayerniederhofen	15214	1	2.6	1.6	-1	3	0.31	0.12	0.63	0.55
Harburg	2023	3	3.5	2.2	-1.3	4	0.64	0.64	0.62	0.71
Heilbronn	15547	1	3.2	2.6	-0.6	3	0.75	0.43	0.74	0.74
Hinterschmiding-Sonndorf	15801	3	2.6	2.1	-0.5	5	0.00	0.00	0.00	0.00
Hohenpeißenberg	2290	5	4	2.9	-1.1	2	0.71	0.55	0.52	0.63
Hoherodskopf-Vogelsberg	7396	4	4.7	4.2	-0.5	1	0.68	0.72	0.55	0.73
Hornisgrinde	2349	5	6.5	4.2	-2.3	2	0.75	0.68	0.35	0.75
Idar-Oberstein	2385	5	2.8	2.6	-0.2	1	0.75	0.61	0.75	0.77
Ingolstadt	2410	3	2.5	2.7	0.2	2	0.59	0.67	0.69	0.67
Kahler Asten	2483	4	6.2	4.2	-2	1	0.83	0.79	0.34	0.78
Kaisersbach-Cronhütte	2485	4	1.8	2.4	0.6	3	0.62	0.49	0.64	0.72
Kall-Sistig	2497	4	3.9	3.7	-0.2	1	0.80	0.70	0.74	0.83
Kandern-Gupf	2377	1	3.1	2.6	-0.5	3	0.38	0.37	0.66	0.66
Kempten	2559	5	2	2.8	0.8	5	0.59	0.38	0.61	0.51
Kleiner Feldberg-Taunus	2601	5	4.2	4	-0.2	2	0.71	0.73	0.63	0.73
Klippeneck	2638	5	4.1	2.4	-1.7	5	0.56	0.60	0.40	0.60
Köln-Bonn	2667	1	3.2	2.8	-0.4	2	0.61	0.64	0.71	0.74
Königswinter-Heiderhof	603	1	2.8	3	0.2	3	0.70	0.67	0.72	0.76
Konstanz bis 20.10.2020	2712	3	2.2	2.3	0.1	3	0.60	0.29	0.71	0.53
Krölpa-Rockendorf	13711	1	3.2	2.3	-0.9	1	0.70	0.65	0.68	0.79
Kümmersbruck	2773	3	2.2	2	-0.2	3	0.51	0.50	0.72	0.66

Tabelle 4: Bewertungen SynAKTerm 3.0 an DWD-Messstationen. (Fortsetzung nächste Seite)

DWD-Station	ID	räumliche Repräsentativität	Windgeschwindigkeit (m/s)			Bewertung Windrose	Korrelation		Trefferquote	
			Messung	synth.	Differenz		ff	dd	ff	dd
Lahr	2812	1	2.7	2.5	-0.2	2	0.68	0.45	0.78	0.76
Langquaid-Oberschneidhart	13676	1	2.3	2.2	-0.1	3	0.58	0.60	0.72	0.63
Laupheim	2886	2	2.8	3.7	0.9	2	0.71	0.68	0.56	0.75
Lautertal-Hörgenau	2897	1	4	4.2	0.2	2	0.83	0.69	0.71	0.79
Lautertal-Oberlauter	867	1	3.2	2.3	-0.9	2	0.59	0.63	0.66	0.69
Lechfeld	2905	2	3	3.4	0.4	3	0.69	0.57	0.64	0.57
Leutkirch-Herlazhausen	7403	1	2.7	4	1.3	3	0.63	0.43	0.46	0.66
Lindau	6102	1	3.5	2.6	-0.9	3	0.21	0.02	0.50	0.47
Mannheim	5906	1	2.9	2.9	0	3	0.70	0.28	0.72	0.72
Meiningen	3231	3	3.1	2.3	-0.8	1	0.62	0.65	0.69	0.79
Memmingen	3244	1	2.8	3.5	0.7	2	0.70	0.57	0.61	0.67
Meßstetten-Appental	3268	3	2.7	3.2	0.5	4	0.71	0.58	0.64	0.59
Michelstadt-Vielbrunn	3287	1	3.7	3.4	-0.3	2	0.77	0.74	0.70	0.77
Mittlenwald	6103	2	3.6	2.7	-0.9	1	0.53	0.35	0.50	0.68
Mönchengladbach-Hilderath	3321	4	3.2	3	-0.2	2	0.73	0.76	0.75	0.80
Mühlacker	3362	2	2.1	2	-0.1	3	0.65	0.55	0.69	0.71
Mühlendorf	3366	1	2.5	2.5	0	3	0.63	0.51	0.66	0.62
Mülheim-Kärlich	6242	3	0	1.6	1.6	5	0.00	0.00	0.00	0.00
München-Flughafen	1262	1	3	3.6	0.6	2	0.66	0.64	0.57	0.65
München-Stadt	3379	1	2.8	3.1	0.3	2	0.67	0.64	0.65	0.65
Münsingen-Apfelstetten	3402	4	2.5	2.7	0.2	3	0.63	0.69	0.68	0.70
Neuburg-Donau ab 31.05.2017	3484	3	2.4	2.6	0.2	2	0.58	0.67	0.66	0.68
Neuburg-Donau bis 30.05.2017	3484	3	2.4	2.6	0.2	3	0.52	0.66	0.67	0.67
Neuhaus am Rennweg	3513	3	3.9	3.6	-0.3	2	0.75	0.79	0.66	0.77
Neuhütten-Spessart	7412	4	2.5	1.3	-1.2	5	0.70	0.64	0.59	0.64
Neumarkt-Höhenberg	3534	3	3.5	3	-0.5	2	0.73	0.78	0.71	0.77
Neu-Ulrichstein	7410	1	4	4.2	0.2	1	0.75	0.59	0.70	0.76
Neuwied-Feldkirchen-Hüllenberg	15044	2	2.9	2.3	-0.6	2	0.47	0.57	0.65	0.62
Nörvenich	3623	3	3.1	2.7	-0.4	2	0.67	0.71	0.70	0.73
Nümbrecht auf dem Lindchen	3657	5	3.8	3.2	-0.6	2	0.74	0.75	0.67	0.79
Nürnberg-Barweiler	3660	5	3.3	2.9	-0.4	3	0.68	0.66	0.67	0.76
Nürnberg	3668	1	3	2.3	-0.7	2	0.61	0.62	0.72	0.73
Ober-Olm-Bellen	15976	1	3.5	3	-0.5	1	0.00	0.00	0.00	0.00
Oberstdorf	3730	1	2	1.5	-0.5	4	0.12	0.11	0.60	0.41
Oberzent-Beerfelden-Vogelherd	7391	2	2.6	2.8	0.2	3	0.65	0.74	0.69	0.41
Offenbach-Wetterpark	7341	3	2.3	2.5	0.2	1	0.72	0.68	0.77	0.75
Öhringen 2015-2020	3761	3	2.8	2.5	-0.3	1	0.75	0.69	0.76	0.75
Perl-Sinz-Renglichberg	3905	1	4.6	4.2	-0.4	1	0.83	0.82	0.76	0.72
Pforzheim-Ispringen	3925	3	3	2.8	-0.2	2	0.69	0.68	0.69	0.70
Regensburg	4104	5	2.4	2.3	-0.1	3	0.43	0.48	0.71	0.64
Rheinstetten	4177	1	3.3	3.7	0.4	1	0.73	0.69	0.66	0.80
Roding-Wetterfeld	4225	4	2.1	2.2	0.1	2	0.60	0.56	0.72	0.66
Roth	4280	3	2.6	2.2	-0.4	3	0.64	0.69	0.75	0.78
Roth bei Prüm	4279	2	3.7	3.9	0.2	2	0.72	0.73	0.68	0.75
Rotthalmünster	13932	2	2.1	2.8	0.7	1	0.65	0.55	0.58	0.70
Runkel-Ennerich	6344	3	2.9	2.4	-0.5	4	0.63	0.60	0.70	0.70
Saarbrücken-Ensheim	4336	1	3.6	3.2	-0.4	1	0.77	0.78	0.76	0.82
Schleiz	4464	2	3.8	3.4	-0.4	2	0.69	0.69	0.69	0.79
Schmücke	4501	4	4.8	4.2	-0.6	1	0.77	0.80	0.63	0.82
S-Echterdingen	4931	1	2.4	2.2	-0.2	4	0.60	0.46	0.72	0.65
Sembach	15978	1	3	3.2	0.2	1	0.00	0.00	0.00	0.00
Siplingen	6107	4	2.7	3.1	0.4	1	0.58	0.56	0.54	0.66
S-Schnarrenberg	4928	5	2.9	2	-0.9	3	0.63	0.61	0.65	0.70
Stimpfach-Weipertshofen	4880	3	2.7	3	0.3	2	0.70	0.69	0.68	0.74
Stötten	4887	2	4.3	3.6	-0.7	3	0.76	0.73	0.64	0.74
Straubing	4911	2	2.6	2.5	-0.1	3	0.50	0.57	0.69	0.63
Tholey	5029	4	3.8	3.3	-0.5	1	0.76	0.80	0.69	0.79
Trier-Petrisberg	5100	4	3.5	2.4	-1.1	2	0.70	0.75	0.66	0.76
Ulm-Mähringen	15444	1	2.8	3.1	0.3	2	0.62	0.59	0.67	0.68
Vogtareuth (Kläranlage)	6211	1	1.8	2	0.2	3	0.44	0.39	0.66	0.58
Waging am See	2573	1	2.3	2.6	0.3	2	0.62	0.41	0.68	0.64
Waibstadt	13674	3	3	2.6	-0.4	1	0.79	0.69	0.71	0.77
Waldmünchen	7370	1	2.9	2.4	-0.5	4	0.60	0.54	0.65	0.64
Waldsee, Bad Reute	5319	1	2.7	3.3	0.6	3	0.64	0.47	0.60	0.66

Tabelle 4 (Fortsetzung): Bewertungen SynAKTerm 3.0 an DWD-Messstationen.

DWD-Station	ID	räumliche Repräsentativität	Windgeschwindigkeit (m/s)			Bewertung Windrose	Korrelation		Trefferquote	
			Messung	synth.	Differenz		ff	dd	ff	dd
Walldürn	5327	3	3.4	3.5	0.1	2	0.76	0.74	0.72	0.80
Wasserkuppe	5371	4	6.3	4.8	-1.5	3	0.77	0.74	0.50	0.75
Weiden	5397	3	2.3	2.3	0	5	0.54	0.49	0.68	0.63
Weihenstephan-Dürnast	5404	1	2.8	3.3	0.5	3	0.66	0.61	0.61	0.64
Weilheim-Bierbronnen	5412	3	3.6	2.6	-1	2	0.57	0.59	0.56	0.61
Weinbiet	5426	5	6.2	3	-3.2	2	0.76	0.76	0.21	0.78
Weingarten	4094	2	2.2	2.8	0.6	2	0.55	0.18	0.58	0.65
Weißenburg-Emetzheim	5440	1	3.2	2.5	-0.7	2	0.61	0.53	0.68	0.76
Wielenbach (Demollstraße)	5538	4	1.8	1.9	0.1	3	0.59	0.27	0.66	0.57
Winterbach-Remstal	10510	1	1.9	1.6	-0.3	3	0.55	0.53	0.75	0.67
Wunsiedel-Schönbrunn	7394	4	3.5	3.1	-0.4	2	0.62	0.57	0.62	0.70
Zugspitze	5792	5	6.9	3.9	-3	4	0.60	-0.12	0.32	0.41
Zwiesel	5800	4	1.9	1.4	-0.5	5	0.45	0.28	0.69	0.53

Tabelle 4 (Fortsetzung): *Bewertungen SynAKTerm 3.0 an DWD-Messstationen.*



## 6. Zusammenfassung

Vor inzwischen mehr als 20 Jahren hat die Arge IB Rau / METCON mit der Entwicklung von zunächst synthetischen Windstatistiken, darauf aufbauend von synthetischen Ausbreitungsstatistiken (SynAKS®) und schließlich synthetischen Ausbreitungsklassenzeitreihen (SynAKTerm® und SynRepAKTerm®) begonnen. Die bisher vorliegenden synthetischen Daten entsprechen für die SynAKS dem Stand von 2013 (Version 2.0b) und für die SynRepAKTerm dem Stand von 2014 (Version 2.0). Alle Datensätze decken den Bezugszeitraum 2001-2010 ab.

Seit der letzten Aktualisierung hat es neue Entwicklungen im Bereich frei verfügbarer Rohdaten, der Modellierung und der rechtlichen Rahmenbedingungen im Immissionsschutz gegeben. Zudem erfüllt der bisherige Bezugszeitraum nicht mehr die Anforderungen beispielsweise der TA Luft an die Aktualität der für die Ausbreitungsrechnung genutzten meteorologischen Daten. Aus diesen Gründen hat die Arge IB Rau / METCON in 2019 mit der Entwicklung einer neuen Version 3.0 synthetischer Daten als SynAKS und SynAKTerm für den Bezugszeitraum 2011-2020 begonnen und Mitte 2023 die ersten Daten für den süddeutschen Raum freigegeben.

In Voruntersuchungen (Abschnitt 3) wurden frei verfügbare Reanalyse-Datensätze recherchiert und auf ihre Eignung untersucht. Besondere Bedeutung hat hier die Skalentrennung zwischen Reanalysedaten und prognostischen Modellrechnungen. Auf Basis von Clusteranalysen wurde eine geeignete Methode zur Festlegung der Anzahl von Clustern und deren Verteilung im Parameterraum der Antriebsdaten für Modellrechnungen entwickelt. Systematische Vergleiche von SynAKTerm, die auf Basis unterschiedlicher Reanalysen und Modellversionen berechnet wurden, mit Messdaten führten zur finalen Auswahl der Reanalyse und Modellversion. Schließlich wurde anhand von Vergleichen mit Messdaten überprüft, dass die SynAKTerm der Version 3.0 mindestens vergleichbare, meist aber bessere Qualität als die SynAKTerm der Version 2.0 aufweisen.

Das nach den Voruntersuchungen festgelegte Berechnungsverfahren wird in Abschnitt 2 beschrieben. Es basiert auf Daten der JRA55-Reanalyse, Clusteranalysen mit der Zielvorgabe von 150 so genannten äquidistanten Clustern im Parameterraum, Bedeckungsdaten aus dem CDC des DWD, topographischen Daten aus COPERNICUS und CORINE sowie GlobDEM50, Modellrechnungen für die 150 Cluster sowie weitere Rechnungen thermodynamischer Windsysteme mit dem prognostischen Modell METRAS-PC und dem Verfahren eines erweiterten statistisch-dynamischen Downscalings.

Die Qualität der SynAKTerm und SynAKS wird durch eine Reihe abgestufter Maßnahmen sichergestellt (Abschnitt 4). Dies beginnt mit dem ausgewählten Modell, festgelegten Qualitätssicherungsschritten bereits im Berechnungsverfahren, gefolgt von flächendeckenden Plausibilitätsprüfungen, punktuellen Messvergleichen und finalen Repräsentativitätsprüfungen im einzelnen Anwendungsfall.

Der Vergleich der SynAKTerm 3.0 mit Messdaten wird einschließlich Bewertungskriterien ausführlich im Abschnitt 5 vorgestellt und diskutiert. Einen wichtigen Schwerpunkt bilden dabei Überlegungen zur grundsätzlichen (Nicht-)Vergleichbarkeit beider Datenarten im Abschnitt 5.1. Im Ergebnis kann eine überwiegend gute Qualität der SynAKTerm festgestellt werden. Eine generell bessere Übereinstimmung an Messstationen mit großer räumlicher Repräsentativität und schlechterer Übereinstimmung bei eingeschränkter räumlicher Repräsentativität lässt sich jedoch nicht nachweisen.

Die Daten der neuen Version 3.0 werden über die metSoft GbR ([www.metsoft.de](http://www.metsoft.de)) vertrieben und stehen mit Stand Januar 2024 in Deutschland südlich der UTM-Nord-Koordinate 5.677.500 und westlich der UTM-Ost-Koordinate 33.268.000 für die aktuelle Dekade 2011-2020 zur Verfügung. Die fortschreitende Berechnung bis in den norddeutschen Raum ist zurzeit in der Bearbeitung. Eine ggf. jährliche Fortschreibung für die Jahre ab 2021 ist aufgrund des Berechnungsverfahrens und der Datenbasis grundsätzlich möglich und auch geplant.

## Literatur

- [1] Arge METCON / IB Rau (2005): Berechnung von synthetischen Windstatistiken mit einem mesoskaligen prognostischen Modell für ein viertes Teilgebiet in Baden-Württemberg (Hohenlohe). *Abschlussbericht im Auftrag der Landesanstalt für Umweltschutz Baden-Württemberg (LfU), Karlsruhe.*
- [2] Arge METCON / IB Rau (2007): Synthetische Windstatistiken Baden-Württemberg. Hinweise für Anwender. *Bericht im Auftrag der Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg (LUBW), Karlsruhe.*
- [3] Arge METCON / IB Rau (2012): Synthetische Ausbreitungsklassenzeitreihen für Baden-Württemberg. Abschlussbericht im Auftrag der Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg (LUBW), Karlsruhe.
- [4] Arge METCON / IB Rau (2013): Synthetische Ausbreitungsklassenstatistiken für Baden-Württemberg. Hinweise für Anwender. *Bericht im Auftrag der Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg (LUBW), Karlsruhe.*
- [5] Arge METCON / IB Rau (2014): Synthetisch repräsentative Ausbreitungsklassenzeitreihen für Baden-Württemberg. Hinweise für Anwender. *Bericht im Auftrag der Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg (LUBW), Karlsruhe.*
- [6] Arge METCON / IB Rau (2020): Aktualisierung der synthetischen Ausbreitungsklassenzeitreihen (SynAKTerm) und Ausbreitungsklassenstatistiken (SynAKS) für Baden-Württemberg. Teilprojekt 1: Aktualisierung Datenbasis und Berechnungsverfahren. *Abschlussbericht im Auftrag der Landesanstalt für Umweltschutz Baden-Württemberg (LfU), Karlsruhe.*
- [7] Bigalke, K., Ahrens, D., Rau, M. (2008): Synthetische Ausbreitungsklassenstatistiken zur Verwendung in Immissionsprognosen - Eine Alternative zu "klassischen" Übertragungsverfahren. *Gefahrstoffe - Reinhalt. Luft*, 68, 326-333.
- [8] Bigalke, K. et al. (2013): Synthetische Ausbreitungsklassenstatistiken SynAKS für Deutschland. Berechnung – Qualitätssicherung – Anwendung. Dokumentation. Arbeitsgemeinschaft METCON - IB Rau, Heilbronn, Pinneberg. Abrufbar unter <https://www.metsoft.de/downloads>.
- [9] Bigalke, K. et al. (2013): Synthetisch repräsentative Ausbreitungsklassenzeitreihen SynRepAKTerm für Deutschland. Berechnung – Qualitätssicherung – Anwendung. Dokumentation. Arbeitsgemeinschaft METCON - IB Rau, Heilbronn, Pinneberg. Abrufbar unter <https://www.metsoft.de/downloads>.

- [10] Büttner, G., Kosztra, B., Maucha, G. Pataki, R. (2010): Implementation and achievements of CLC2006. Final Report to EEA, Copenhagen by ETC-SIA.
- [11] Dierer, S. (1997): Die Validierung des mesoskaligen Transport- und Strömungsmodells METRAS. Diplomarbeit, Meteorologisches Institut, Universität Hamburg.
- [12] DWD (2014): Merkblatt. Bestimmung der in AUSTAL2000 anzugebenden Anemometerhöhe. Deutscher Wetterdienst, Offenbach.
- [13] DWD (2023): Merkblatt. Effektive Rauigkeitslänge aus Windmessungen. Deutscher Wetterdienst, Offenbach.
- [14] ECMWF (2020): ERA5-Reanalysedaten. Dokumentation unter <https://confluence.ecmwf.int/display/CKB/ERA5%3A+data+documentation> (letzter Abruf am 23.10.2020).
- [15] Frank, H. P., Landberg, L. (1997): Modelling the wind climate of Ireland. *Boundary-Layer Meteorol.*, 85, 359-377.
- [16] Hartwig, C., Wieczorrek, Y., Birkenstock, S., Langen, M., Ginzler, S., Kossmann, M. (2022): Lokale und regionale Windsysteme in der Kölner Bucht sowie der kanalisierende Effekt des Rheintals. *Immissionsschutz* 01.22, 4-17.
- [17] Jammalamadaka, S. Rao, SenGupta, A. (2001): Topics in circular statistics. Series on multivariate analysis, Vol. 5. World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd., Singapore.
- [18] Kanamitsu, M. et al. (2002): NCEP-DEO AMIP-II Reanalysis (R-2). November 2002. *Bul. of the Atmos. Met. Soc.* 1631-1643.
- [19] Kobayashi, S., Ota, Y u. Harada, Y. (2015): The JRA55 Reanalysis: General Specifications and Basic Characteristics. *J. Meteor. Soc. Japan*, 93, 5-48.
- [20] Lüpkes, C.; Schlünzen, K.H. (1996): Modeling the arctic convective boundary-layer with different turbulence parameterizations. *Boundary-Layer Meteorol.* 79, 107-130.
- [21] metSoft GbR (2006): GlobDEM50 - Deutschland, Digitales Höhenmodell. Heilbronn.
- [22] Saha, S. et al. (2014): The NCEP Climate Forecast System Version 2. *J. Climate*, 27, 2185-2208.
- [23] Schatzmann, M.; Schlünzen, K.H.; Dierer, S.; Pankus, H. (1998): Entwicklung einer allgemein verfügbaren PC-Version des mesoskaligen Modells METRAS. Bericht an das Umweltbundesamt. FuE Projekt 104 04 354.
- [24] Schlünzen, K.H. (1988): Das mesoskalige Transport- und Strömungsmodell METRAS – Grundlagen, Validierung, Anwendung. *Hamburger Geophysikalische Einzelschriften*, A88.

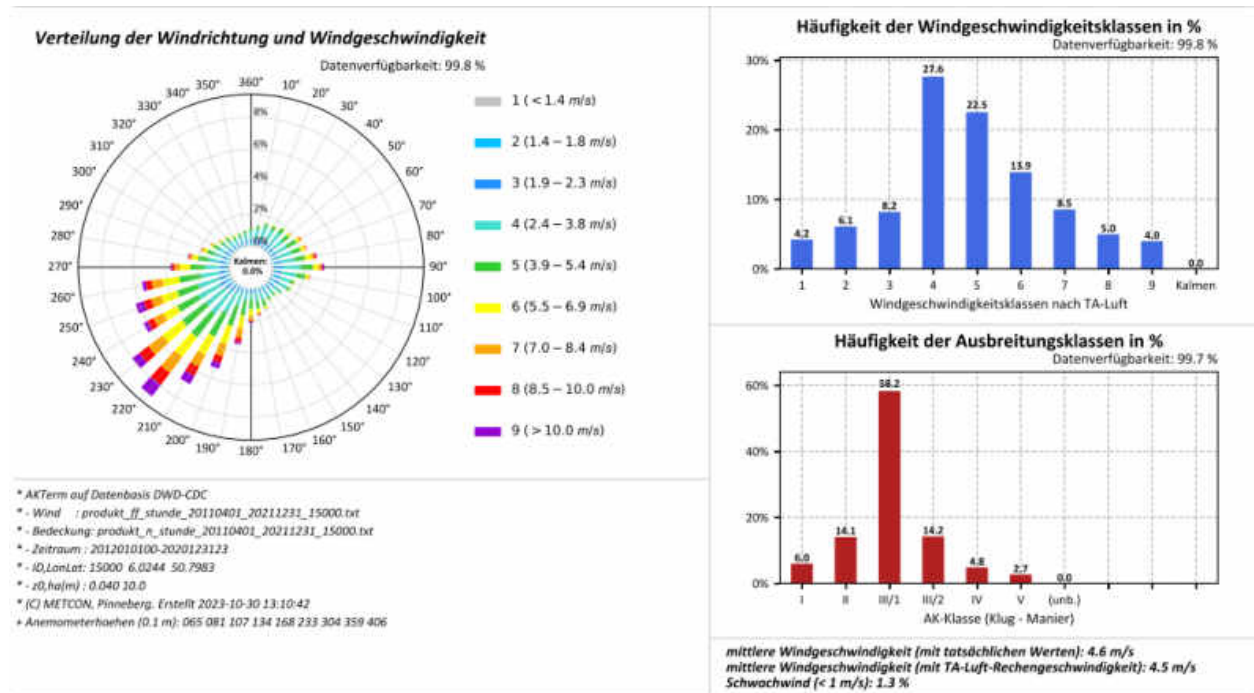
- [25] Schlünzen, K.H. (1990): Numerical study on the inland penetration of sea breeze fronts at a coastline with tidally flooded mudflats. *Beitrag Phys. Atmosph.*, 63 (3/4), 243-256.
- [26] Schlünzen, K.H. (1996): Validierung hochauflösender Regionalmodelle. *Ber. Zentr. Meeres- und Klimaforschung HH*, A23.
- [27] Schlünzen, K.H.; Bigalke, K. (1998): METRAS-PC, Version 1.0. Benutzerhandbuch. Herausgeber: Meteorologisches Institut der Universität Hamburg.
- [28] Schlünzen, K.H., Grawe, D., Petrik, R., Schenk, E., Weiner, O. (2018): Referenzimplementierung eines prognostischen mesoskaligen Windfeldmodells für die Ausbreitungsrechnungen nach Anhang 3 der TA Luft zur Berücksichtigung von Geländeunebenheiten bei Steigungen 1:5. *Bericht im Auftrag des Umweltbundesamtes, FKZ 3712 43 241*.
- [29] TA Luft (2002):- Erste Allgemeine Verwaltungsvorschrift zum Bundesimmissionsschutzgesetz (Technische Anleitung zur Reinhaltung der Luft – TA Luft) vom 24.07.2002, Gemeinsames Ministerialblatt, Nr. 25-29 S. 511 ff.: Hrsg.: Bundesminister des Inneren, 2002.
- [30] TA Luft (2021): Neufassung der Ersten Allgemeinen Verwaltungsvorschrift zum Bundesimmissionsschutzgesetz (Technische Anleitung zur Reinhaltung der Luft – TA Luft), GMBI 2021 Nr. 48-54, S. 1050 vom 18. August 2021.
- [31] VDI (2023): Umweltmeteorologie - Atmosphärische Ausbreitungsmodelle - Bestimmung der Ausbreitungsklassen nach Klug/Manier. *VDI 3783, Blatt 6, Beuth-Verlag, Berlin*.
- [32] VDI (2017): Umweltmeteorologie. Prognostische mesoskalige Windfeldmodelle. Evaluierung für dynamisch und thermisch bedingte Strömungsfelder. *VDI 3783 Blatt 7, Ausgabe Mai 2017, Beuth-Verlag, Berlin*.
- [33] VDI (2010): Umweltmeteorologie. Qualitätssicherung in der Immissionsprognose. Anlagenbezogener Immissionsschutz. Ausbreitungsrechnung gemäß TA Luft. *VDI 3783 Blatt 13, Ausgabe Januar 2010, Beuth-Verlag, Berlin*.
- [34] VDI (2020): Umweltmeteorologie. Prognostische mesoskalige Windfeldmodelle. Verfahren zur Anwendung in Genehmigungsverfahren nach TA Luft. *VDI 3783 Blatt 16, Ausgabe Oktober 2020, Beuth-Verlag, Berlin*.
- [35] VDI (2017): Umweltmeteorologie – Übertragbarkeitsprüfung meteorologischer Daten zur Anwendung im Rahmen der TA Luft. *VDI 3783, Blatt 20, Ausgabe März 2017, Beuth-Verlag, Berlin*.

- [36] VDI (2017): Umweltmeteorologie. Qualitätssicherung meteorologischer Daten für die Ausbreitungsrechnung nach TA Luft und GIRL. VDI-Richtlinie 3783, Blatt 21, Beuth Verlag, Berlin.
- [37] Wagner, P. (1994): Das Bergwindssystem des Kinzigtals (Nordschwarzwald) und seine Darstellung im mesoskaligen Strömungsmodell MEMO. Freiburger Geographische Hefte, Nr. 45, ISSN 0071-0048.
- [38] Walz, U. (1997): Bewertung eines mesoskaligen Modells für die Simulation arktischer Kaltluftausbrüche anhand von Flugzeugmessungen. Diplomarbeit, Meteorologisches Institut, Universität Hamburg.

## Anhang A: Vergleiche SynAKTerm - Stationsmessungen

Dieser Anhang enthält Datenblätter der aus den Messungen abgeleiteten AKTerm aller DWD-Stationen im Bereich der bisher gerechneten Teilgebiete. Ihnen gegenübergestellt sind die Datenblätter der SynAKTerm 3.0 an den Rasterpunkten, die den Stationen jeweils am nächsten liegen.

Die Gegenüberstellung der Datenblätter an den Stationen besagt nicht, dass eine Vergleichbarkeit von synthetischen und gemessenen Daten dort überhaupt gegeben ist. Die räumliche Repräsentativität beider Arten von Daten kann je nach Stationslage höchst unterschiedlich sein und somit die Vergleichbarkeit erheblich einschränken oder sogar ganz verbieten. Für Details und Hinweise zur fachlich angemessenen Interpretation von Messungen und synthetischen Daten siehe Abschnitt 5.



Für den Vergleich gemessener und synthetischer Daten sind die Hinweise im Abschnitt 5.1 zu beachten.

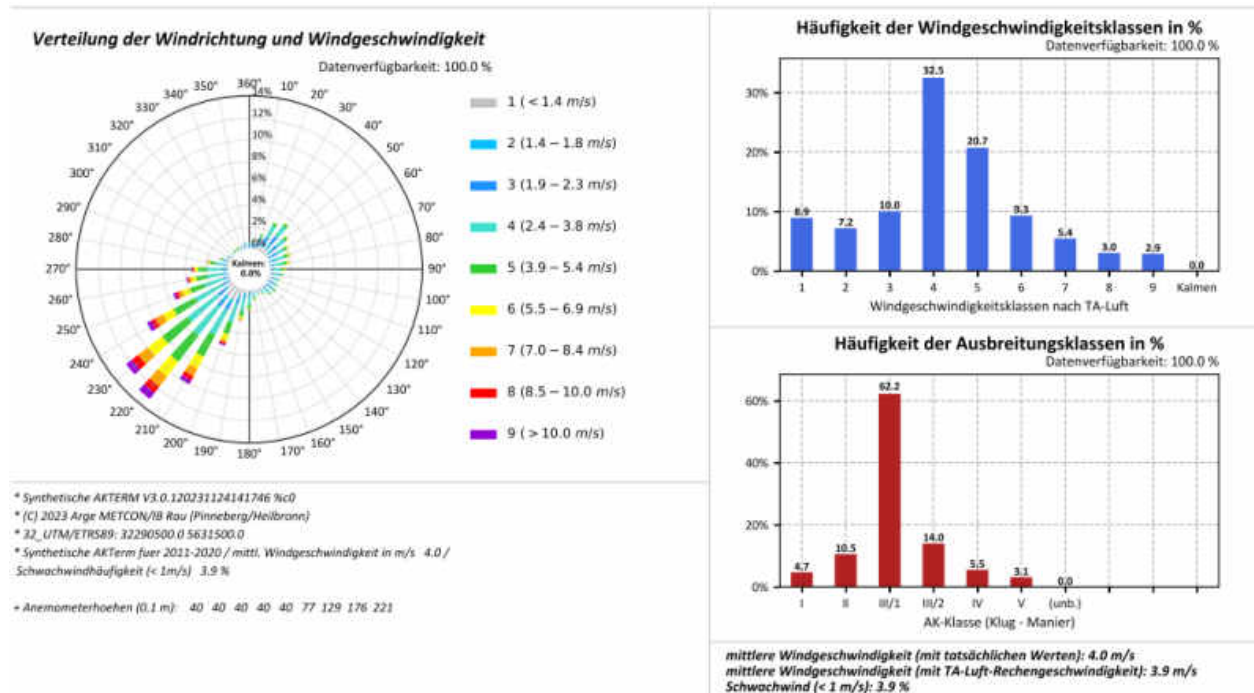
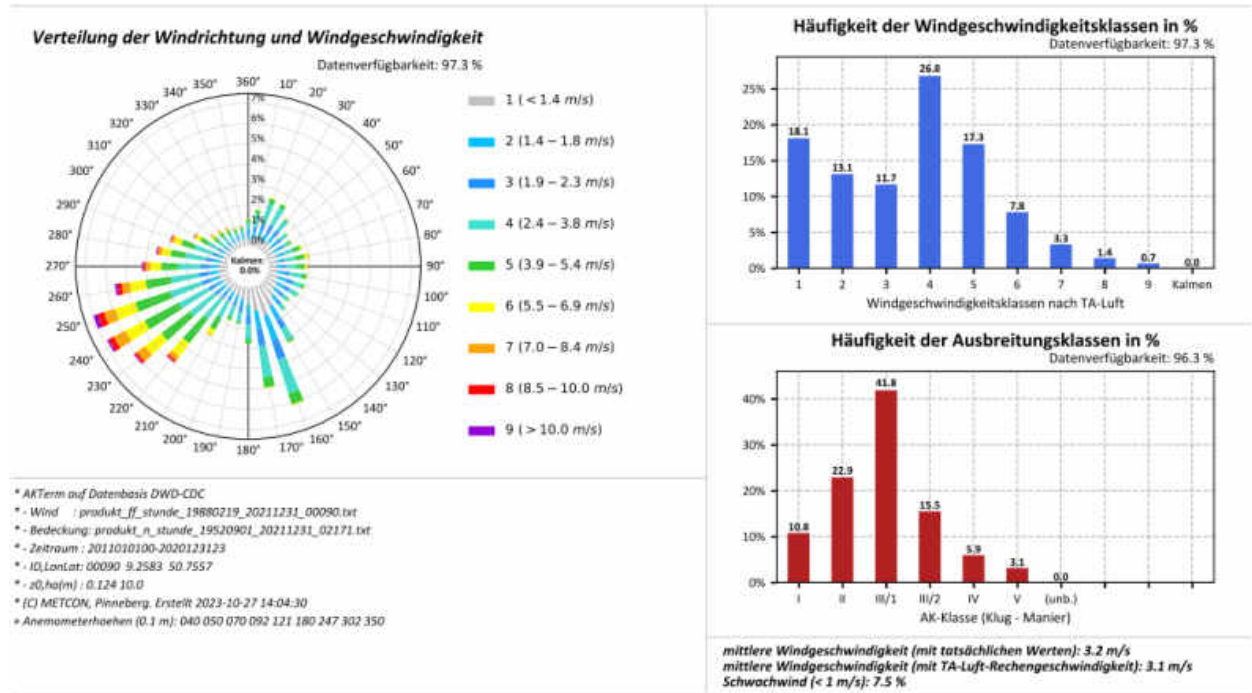


Abbildung A.1: Datenblätter der Messung (oben) und SynAKTerm 3.0 (unten) an der DWD-Station Aachen-Orsbach (2012/2011-2020).





Für den Vergleich gemessener und synthetischer Daten sind die Hinweise im Abschnitt 5.1 zu beachten.

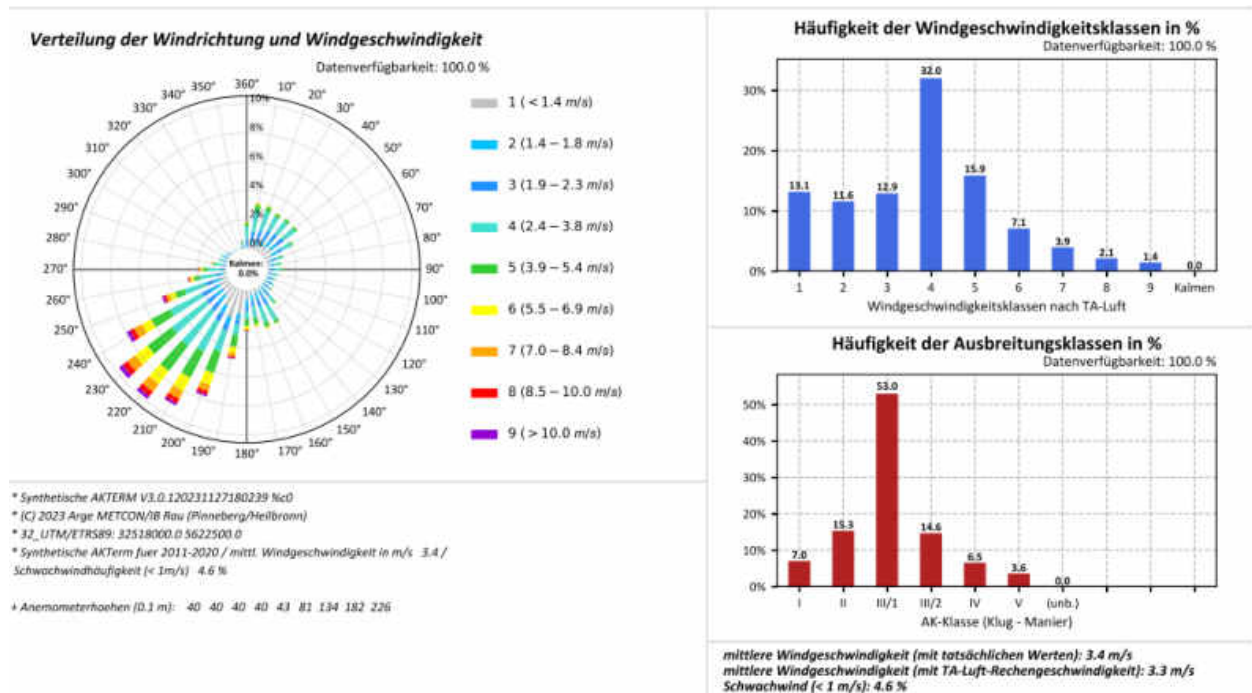
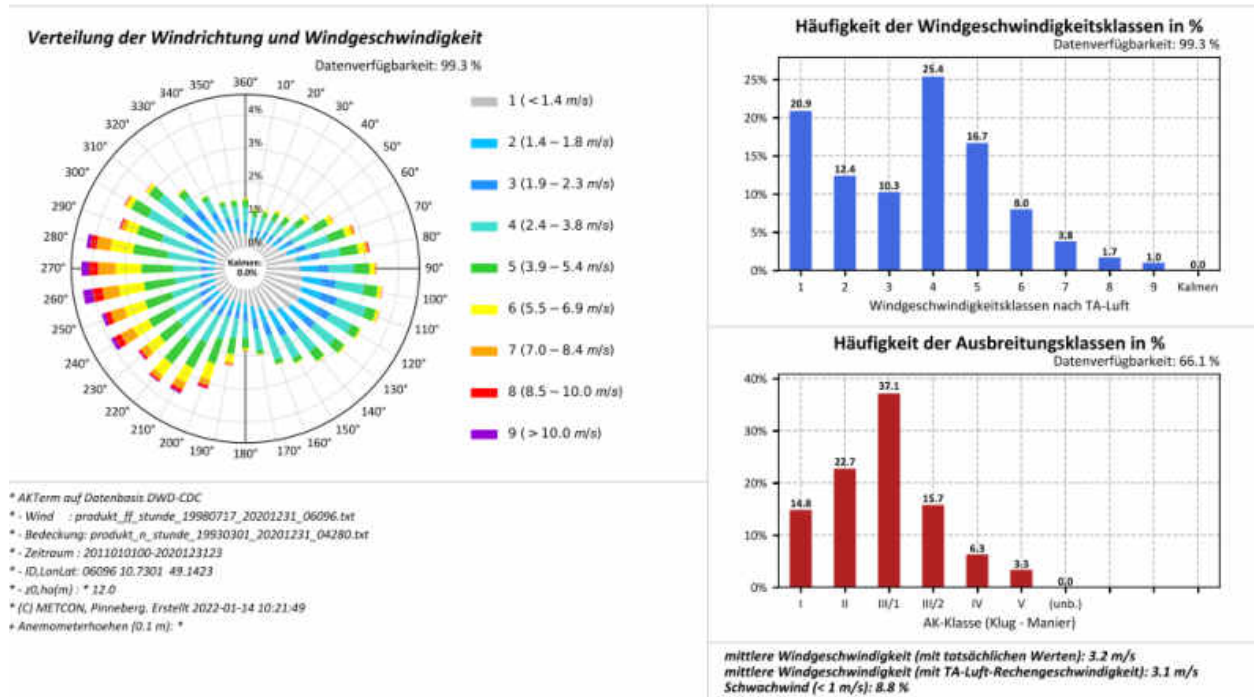


Abbildung A.2: Datenblätter der Messung (oben) und SynAKTerm 3.0 (unten) an der DWD-Station Alsfeld (2011-2020).



Für den Vergleich gemessener und synthetischer Daten sind die Hinweise im Abschnitt 5.1 zu beachten.

Diese Station wird im Abschnitt 5.5 diskutiert.

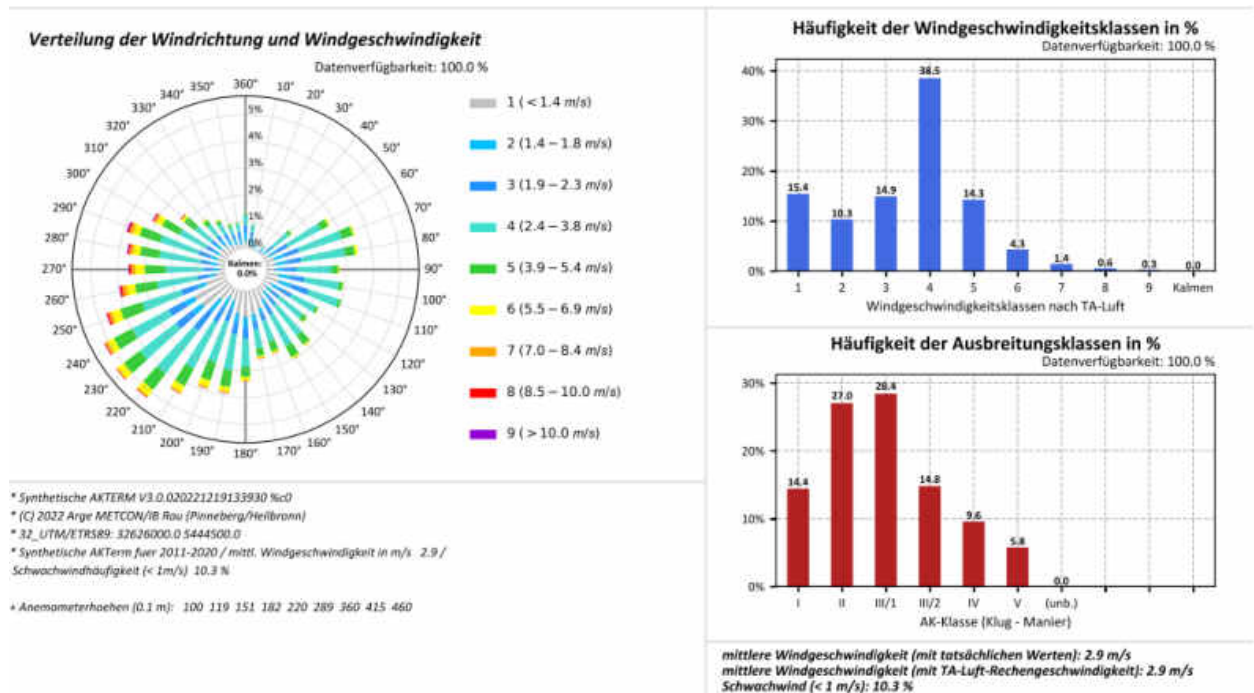
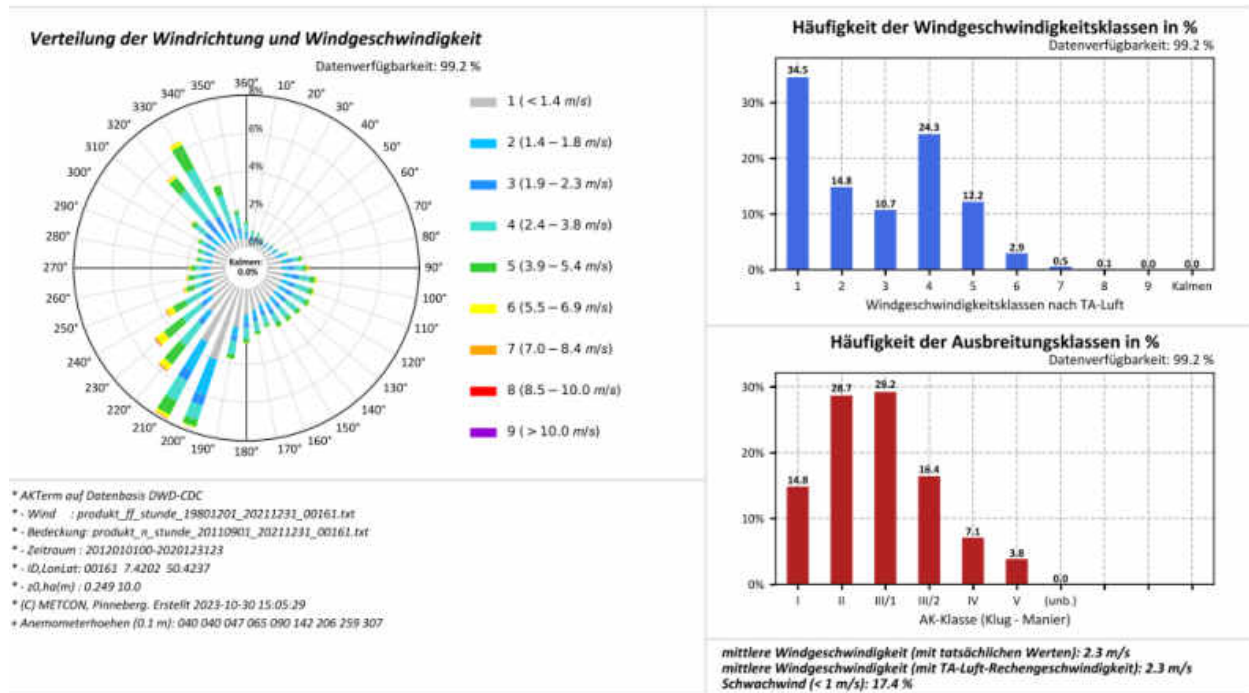


Abbildung A.3: Datenblätter der Messung (oben) und SynAKTerm 3.0 (unten) an der DWD-Station Altmühlsee (2011-2020).

Dokumentation SynAKTerm® 3.0



Für den Vergleich gemessener und synthetischer Daten sind die Hinweise im Abschnitt 5.1 zu beachten.

Diese Station wird im Abschnitt 5.5 diskutiert.

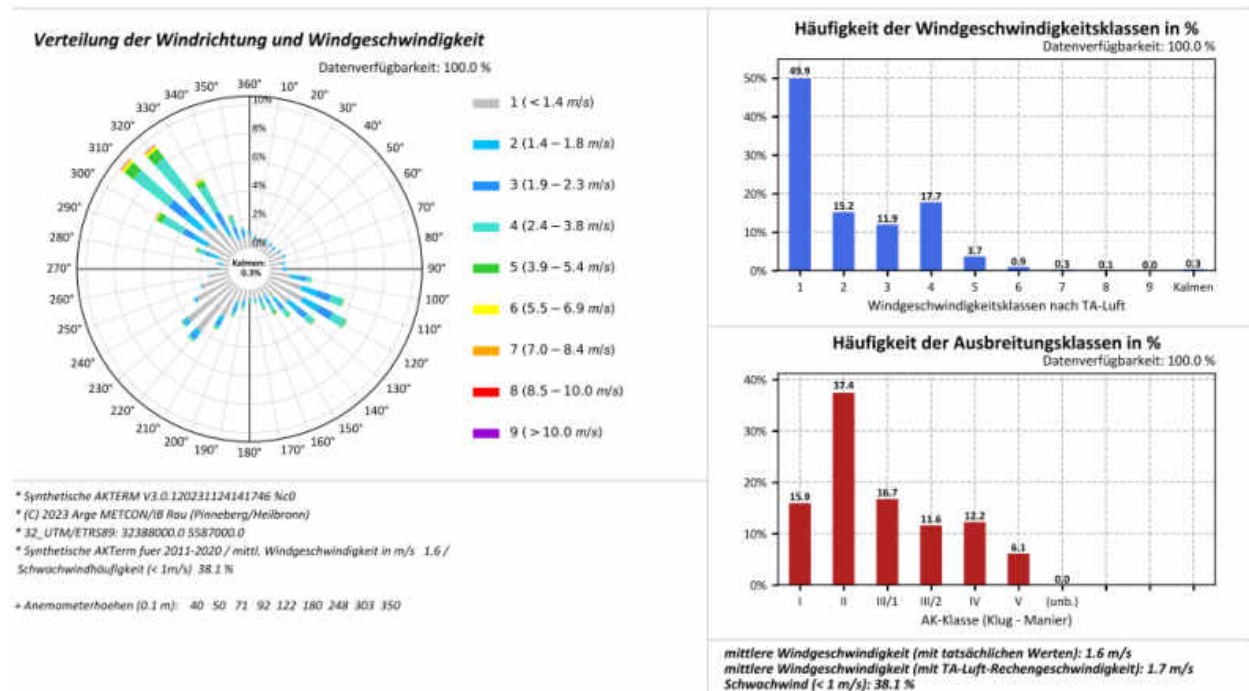
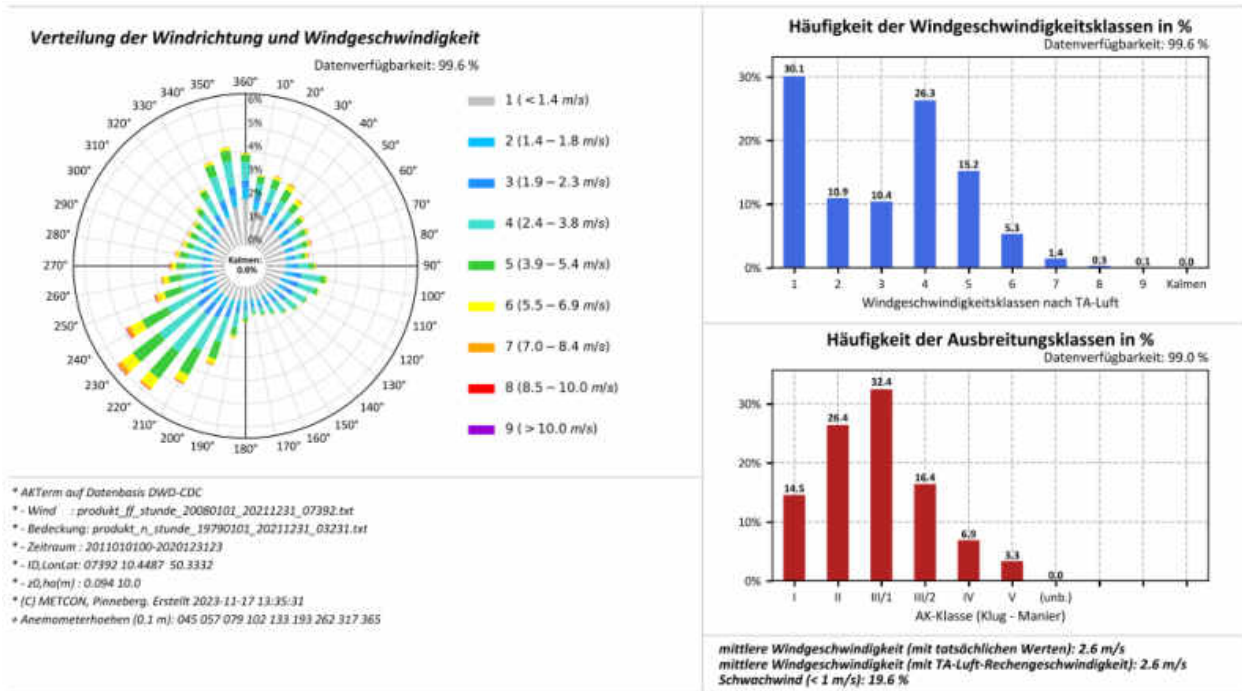


Abbildung A.4: Datenblätter der Messung (oben) und SynAKTerm 3.0 (unten) an der DWD-Station Andernach (2012/2011-2020).



Für den Vergleich gemessener und synthetischer Daten sind die Hinweise im Abschnitt 5.1 zu beachten.

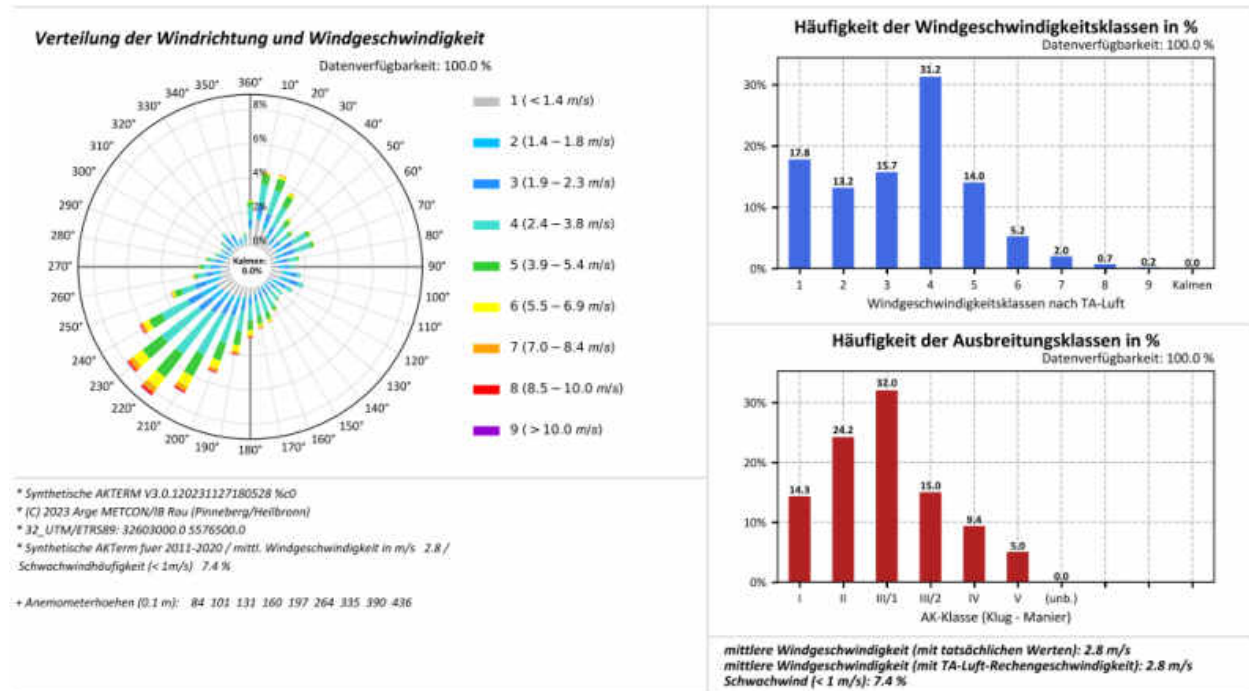
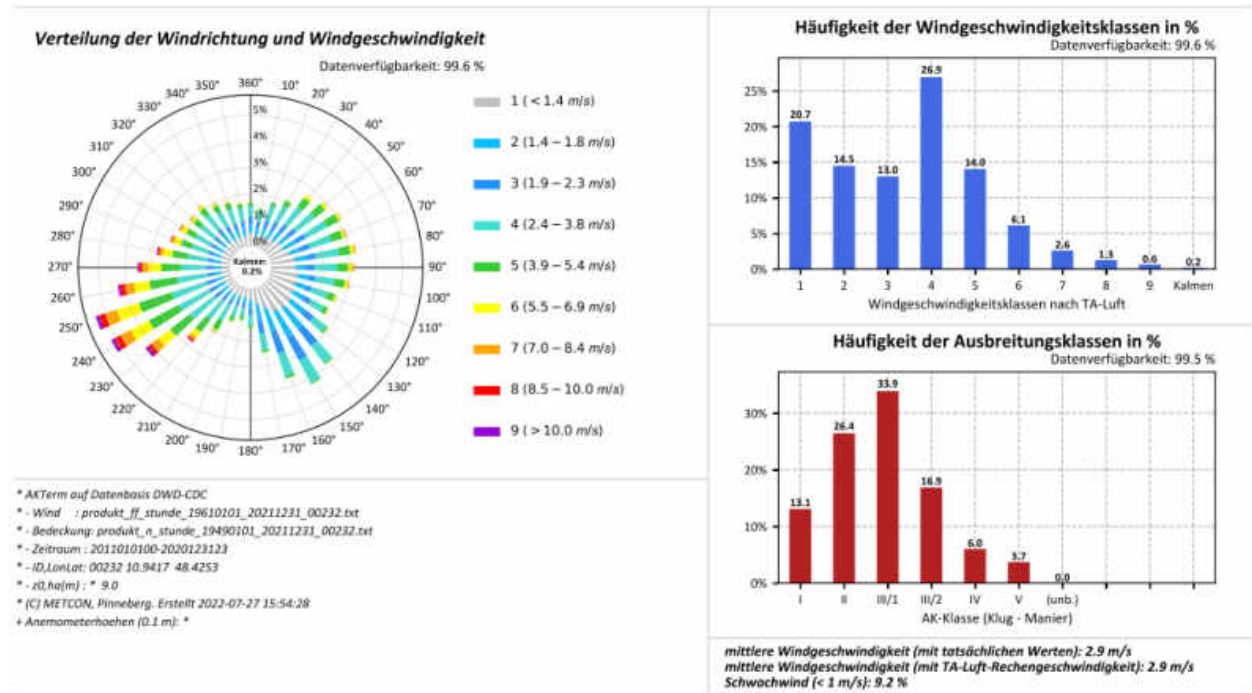


Abbildung A.5: Datenblätter der Messung (oben) und SynAKTerm 3.0 (unten) an der DWD-Station Aubstadt (2011-2020).



Für den Vergleich gemessener und synthetischer Daten sind die Hinweise im Abschnitt 5.1 zu beachten.

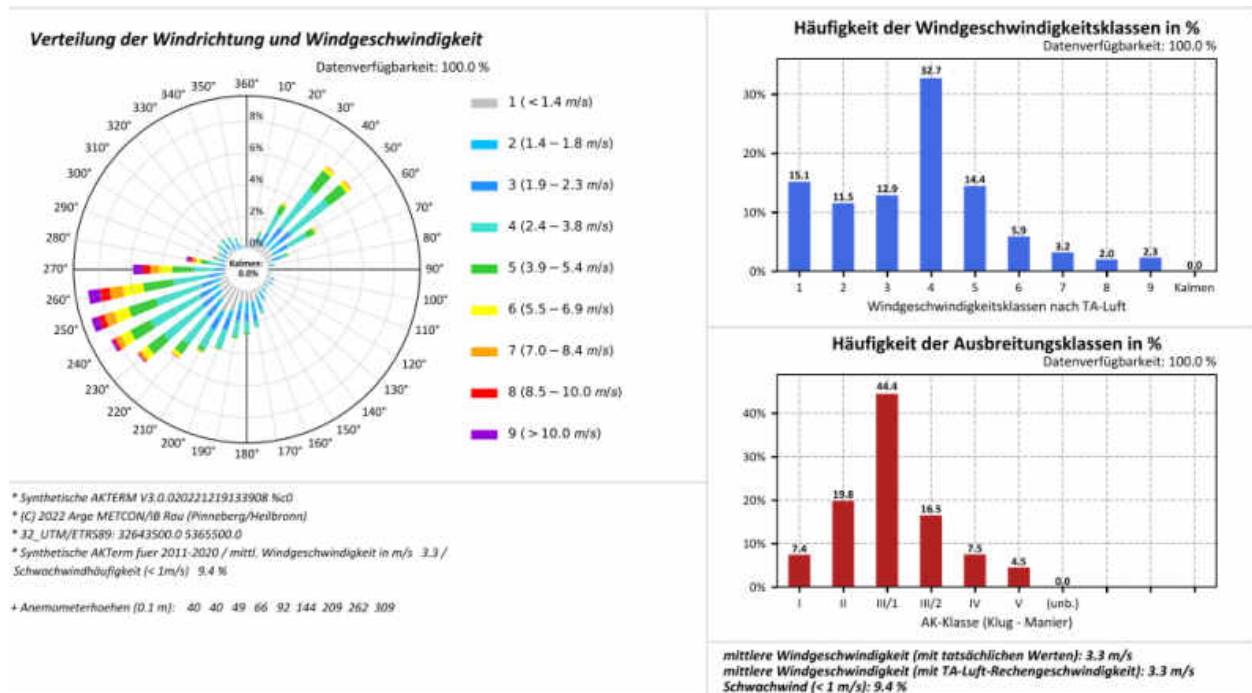
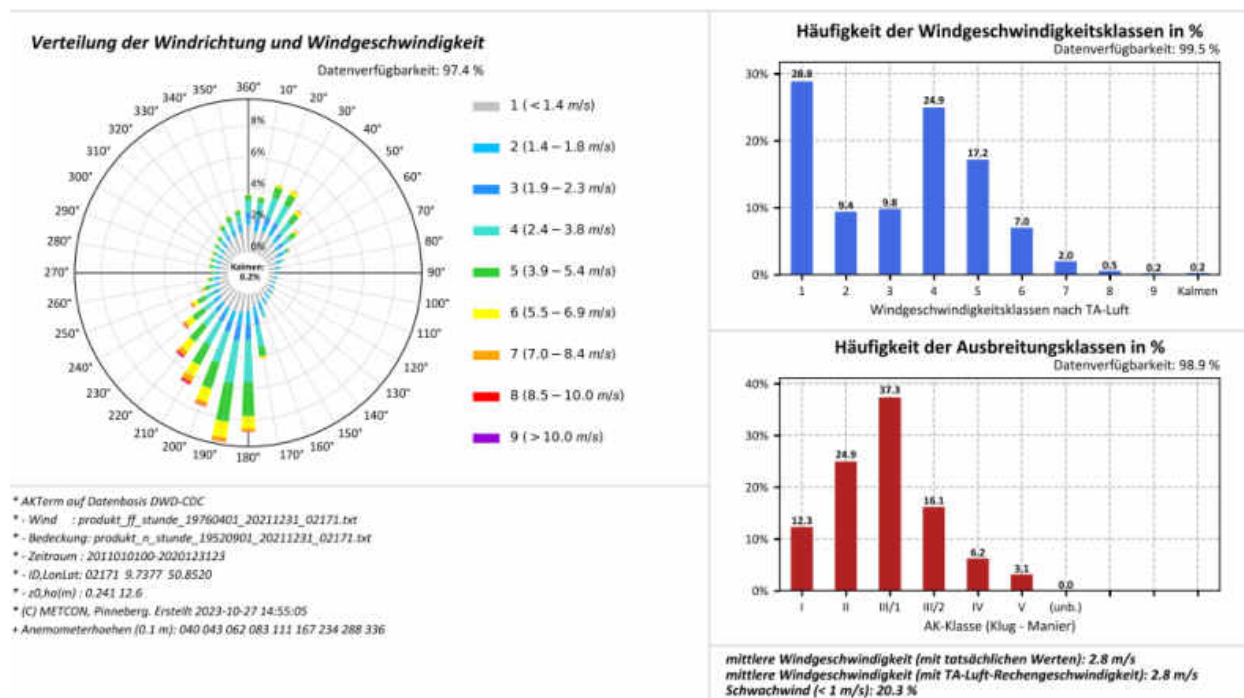


Abbildung A.6: Datenblätter der Messung (oben) und SynAKTerm 3.0 (unten) an der DWD-Station Augsburg (2011-2020).



Für den Vergleich gemessener und synthetischer Daten sind die Hinweise im Abschnitt 5.1 zu beachten.

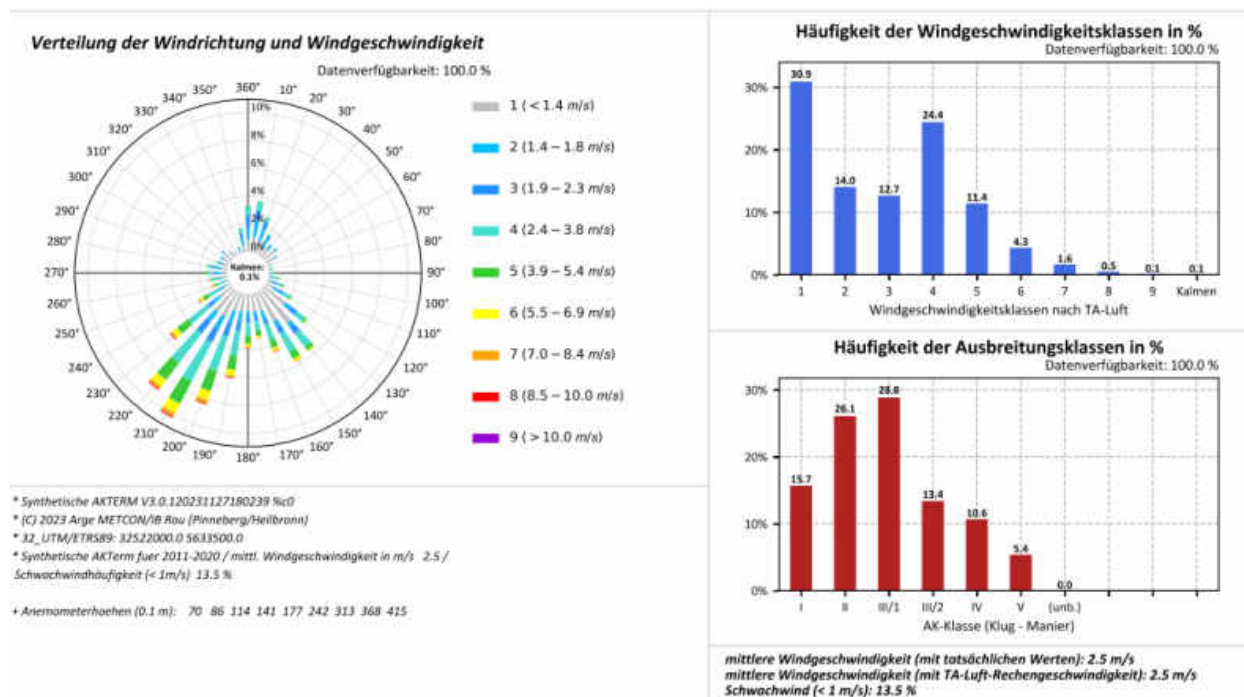
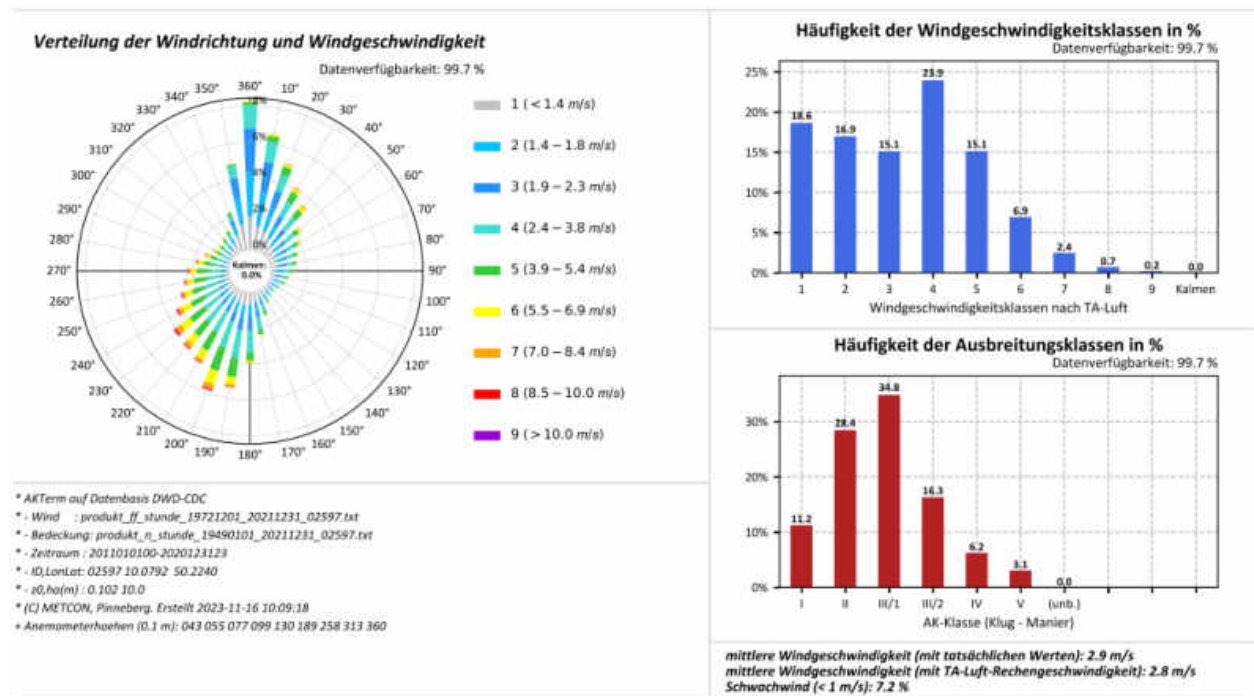


Abbildung A.7: Datenblätter der Messung (oben) und SynAKTerm 3.0 (unten) an der DWD-Station Bad Hersfeld (2011-2020).



Für den Vergleich gemessener und synthetischer Daten sind die Hinweise im Abschnitt 5.1 zu beachten.

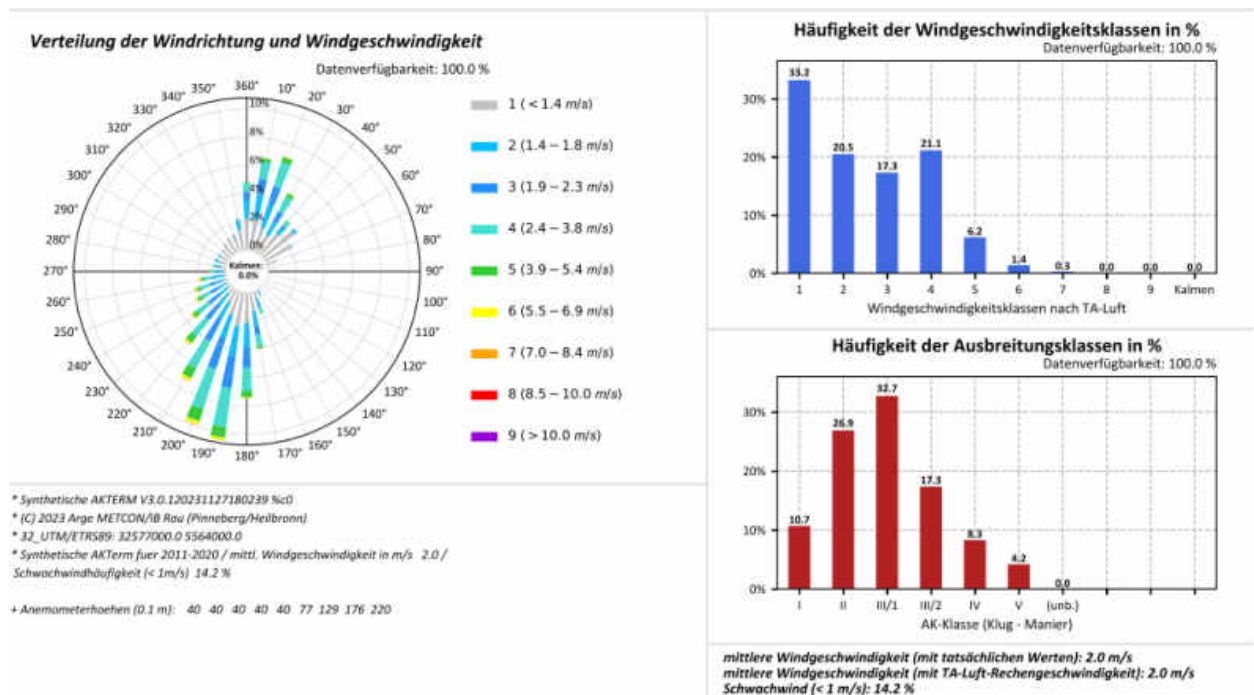
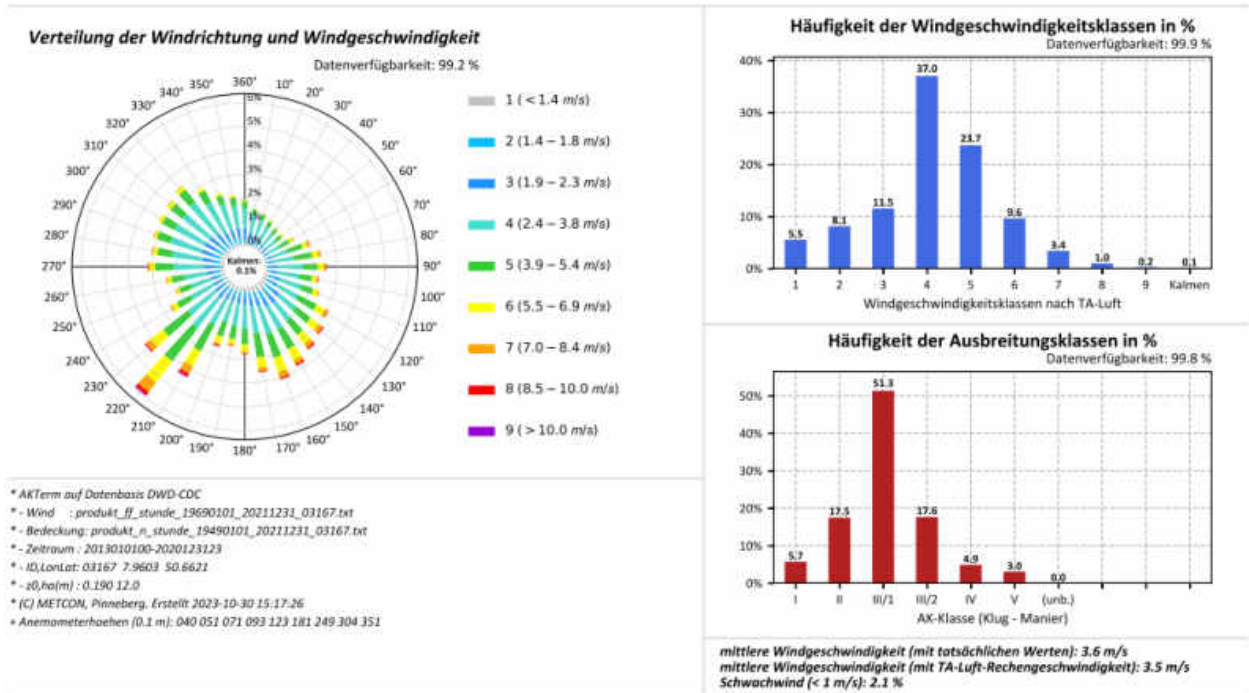


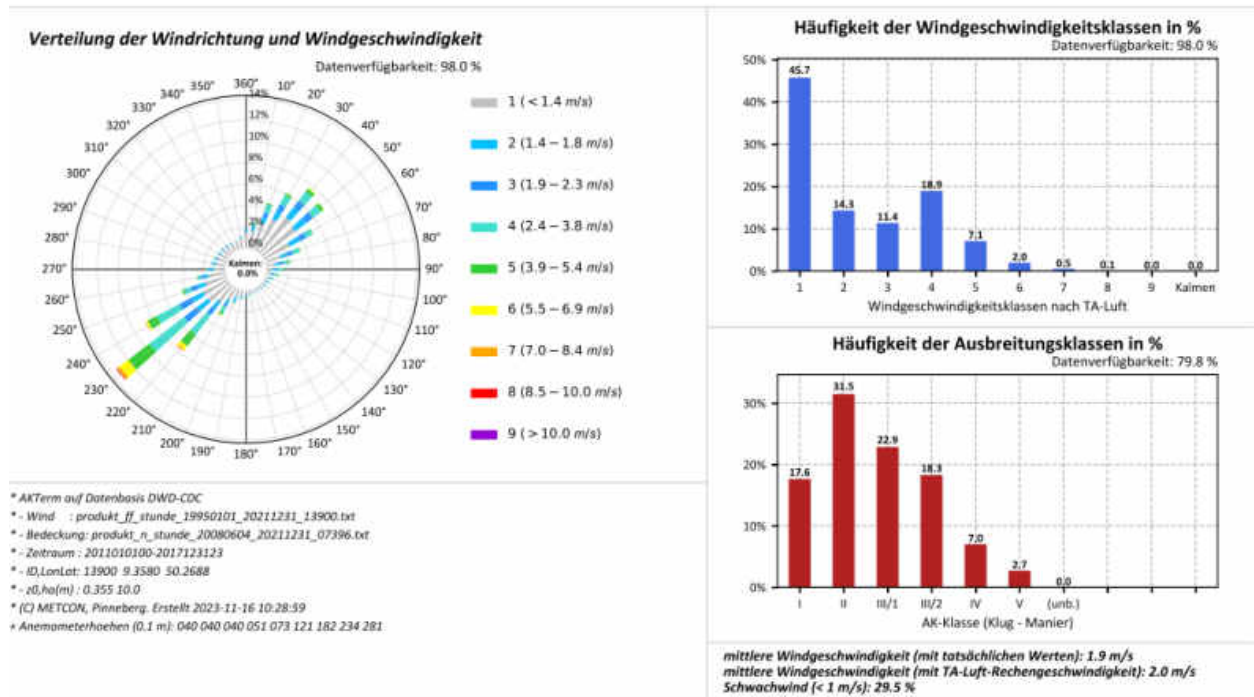
Abbildung A.8: Datenblätter der Messung (oben) und SynAKTerm 3.0 (unten) an der DWD-Station Bad Kissingen (2011-2020).



Für den Vergleich gemessener und synthetischer Daten sind die Hinweise im Abschnitt 5.1 zu beachten.

Abbildung A.9: Datenblätter der Messung (oben) und SynAKTerm 3.0 (unten) an der DWD-Station Bad Marienberg (2013/2011-2020).





Für den Vergleich gemessener und synthetischer Daten sind die Hinweise im Abschnitt 5.1 zu beachten.

Diese Station wird im Abschnitt 5.3 diskutiert.

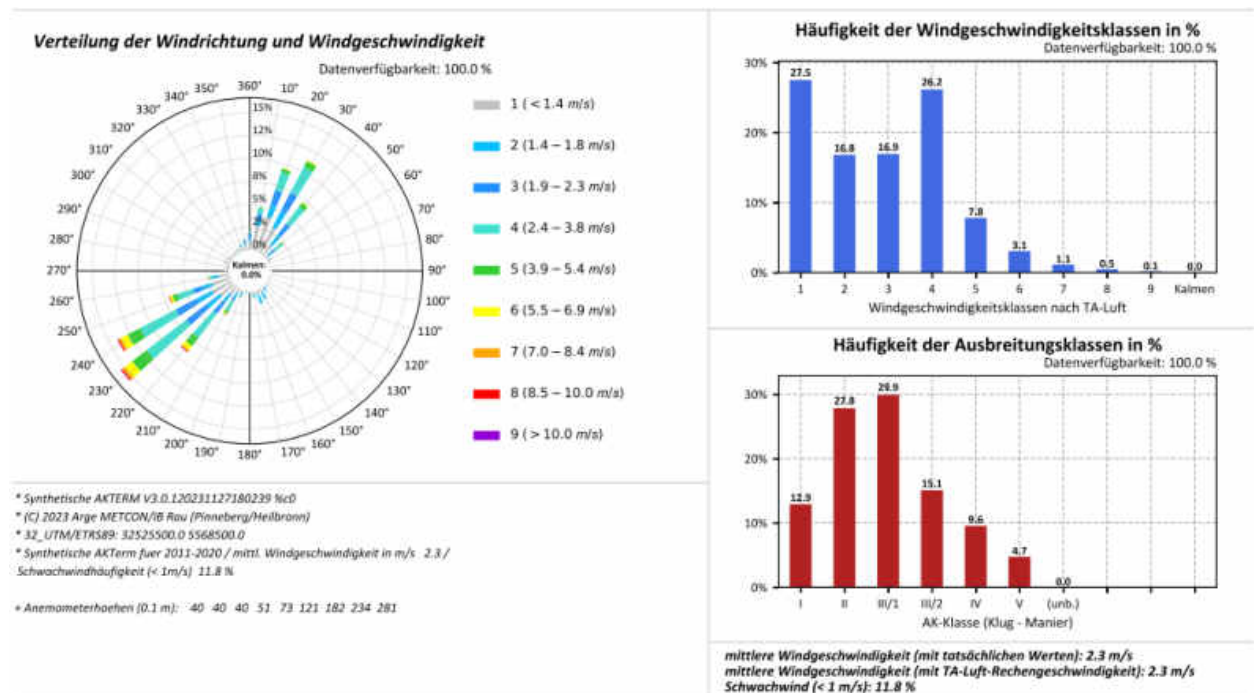
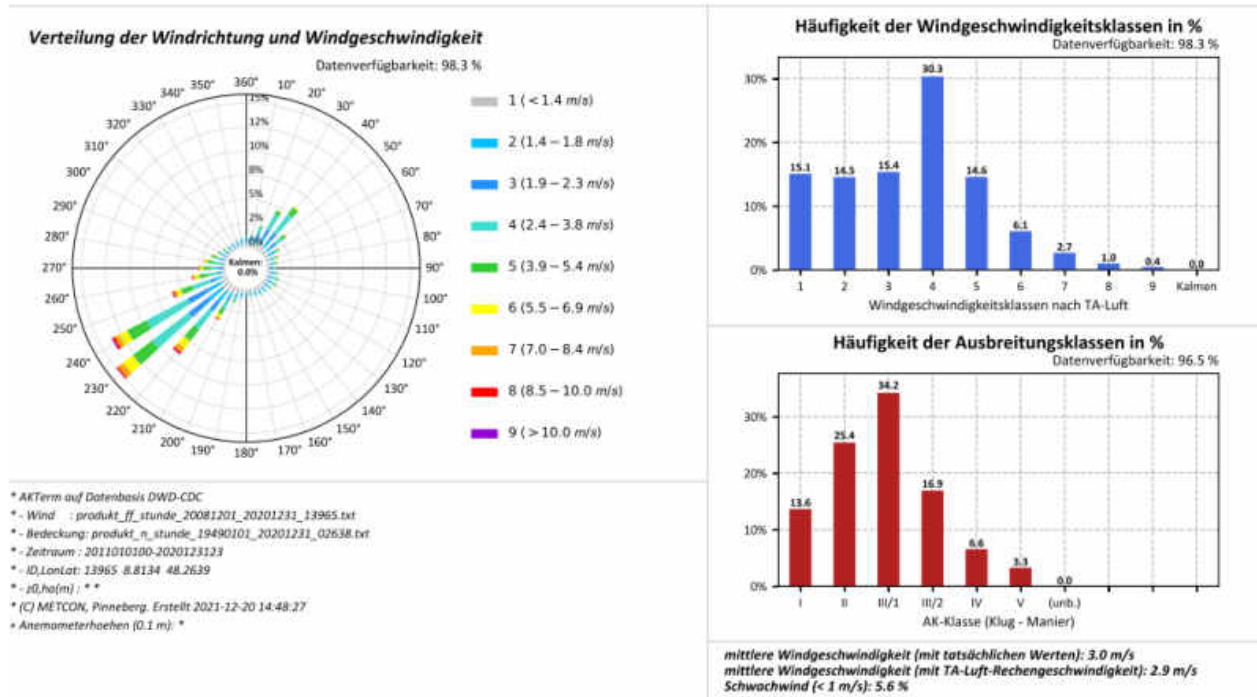


Abbildung A.10: Datenblätter der Messung (oben) und SynAKTerm 3.0 (unten) an der DWD-Station Bad Soden - Salmünster (2011-2017/2020).



Für den Vergleich gemessener und synthetischer Daten sind die Hinweise im Abschnitt 5.1 zu beachten.

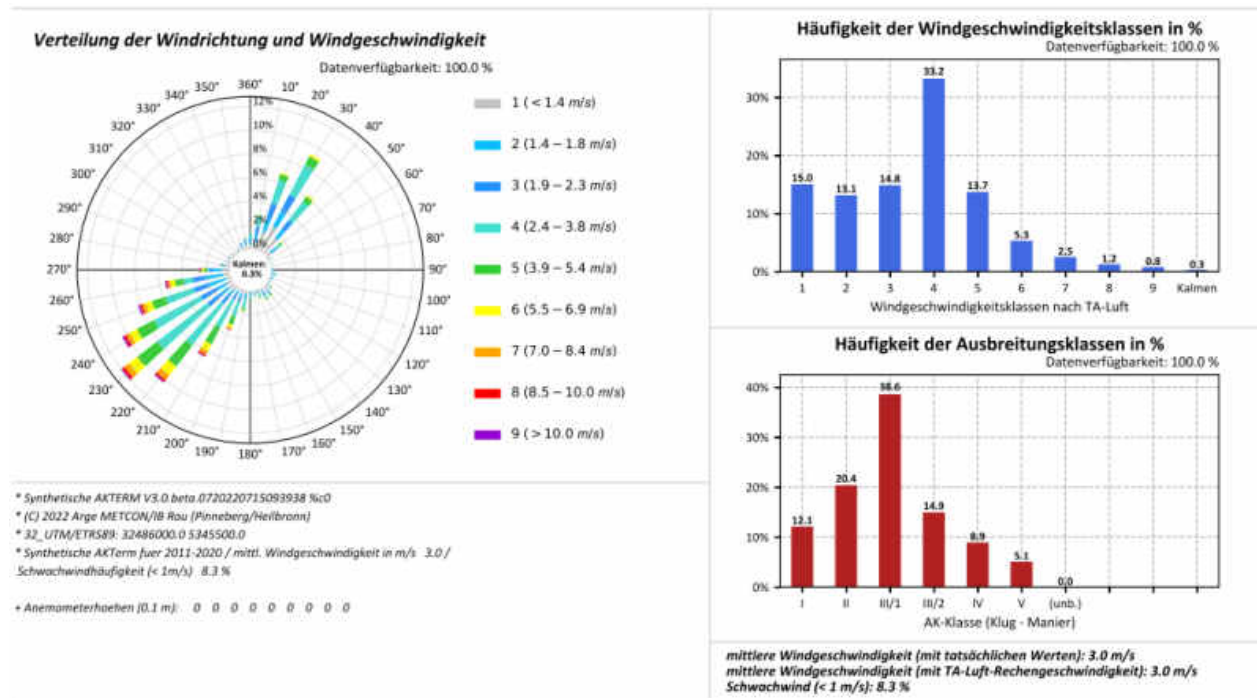
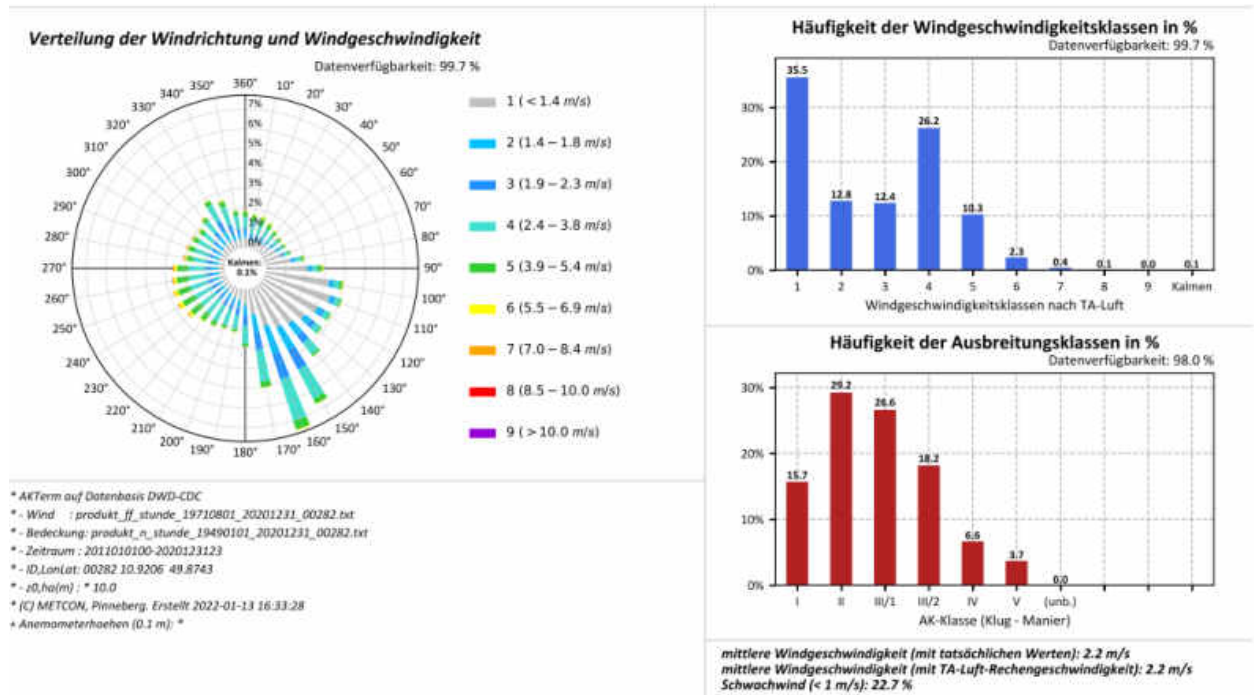


Abbildung A.11: Datenblätter der Messung (oben) und SynAKTerm 3.0 (unten) an der DWD-Station Balingen-Bronnhaupten (2011-2020).



Für den Vergleich gemessener und synthetischer Daten sind die Hinweise im Abschnitt 5.1 zu beachten.

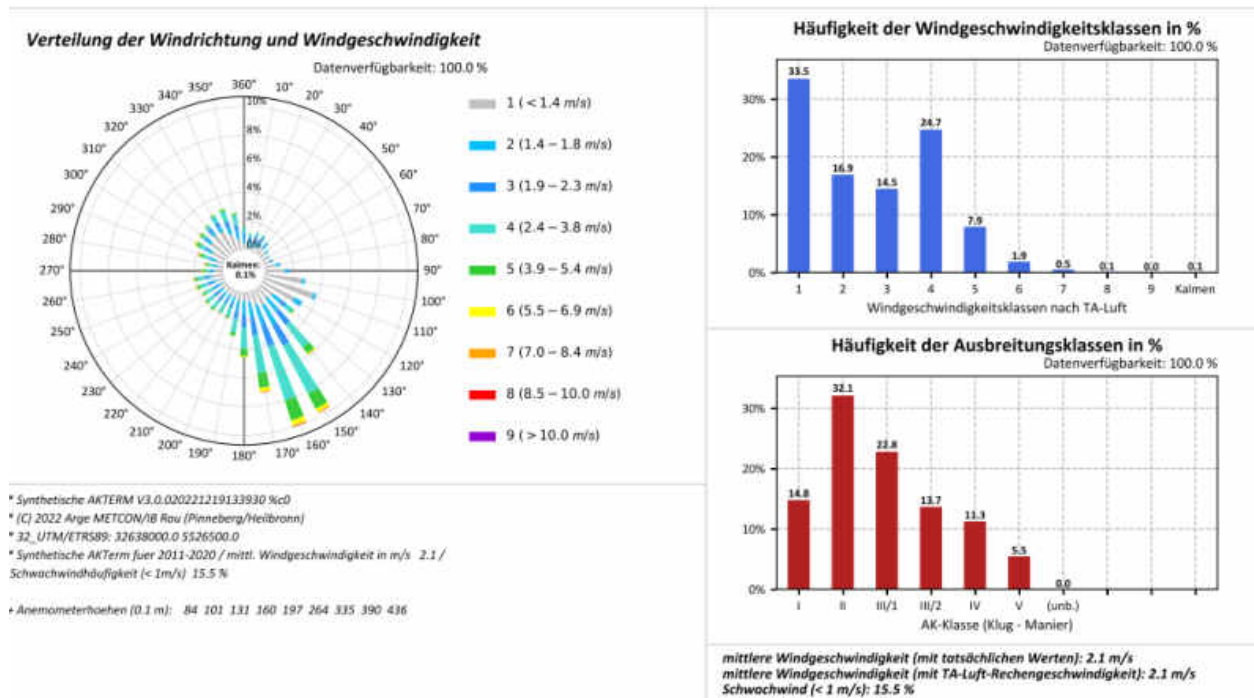
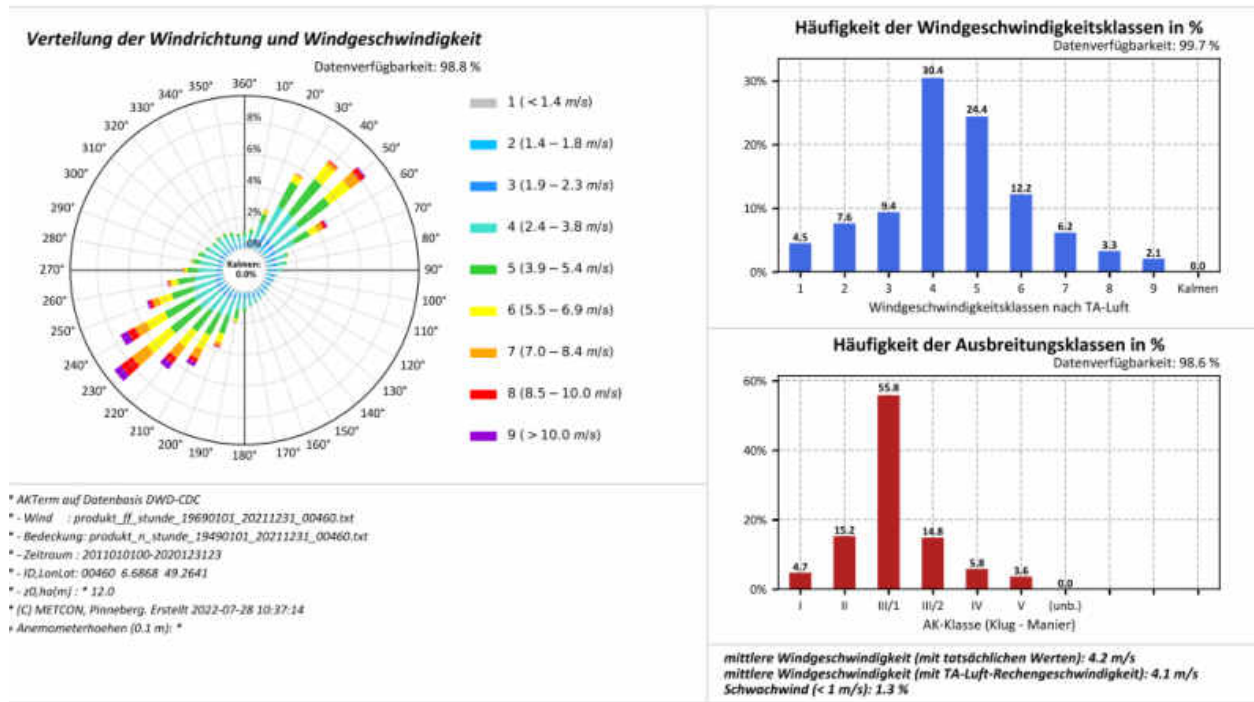


Abbildung A.12: Datenblätter der Messung (oben) und SynAKTerm 3.0 (unten) an der DWD-Station Bamberg (2011-2020).



Für den Vergleich gemessener und synthetischer Daten sind die Hinweise im Abschnitt 5.1 zu beachten.

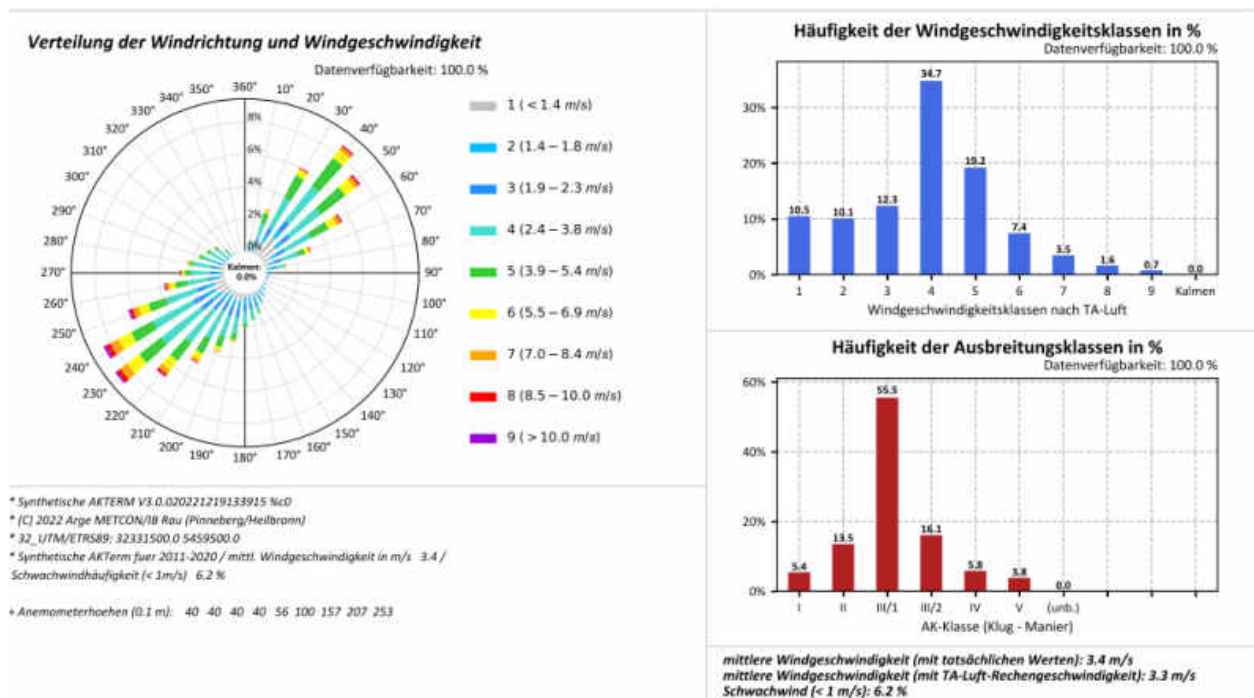
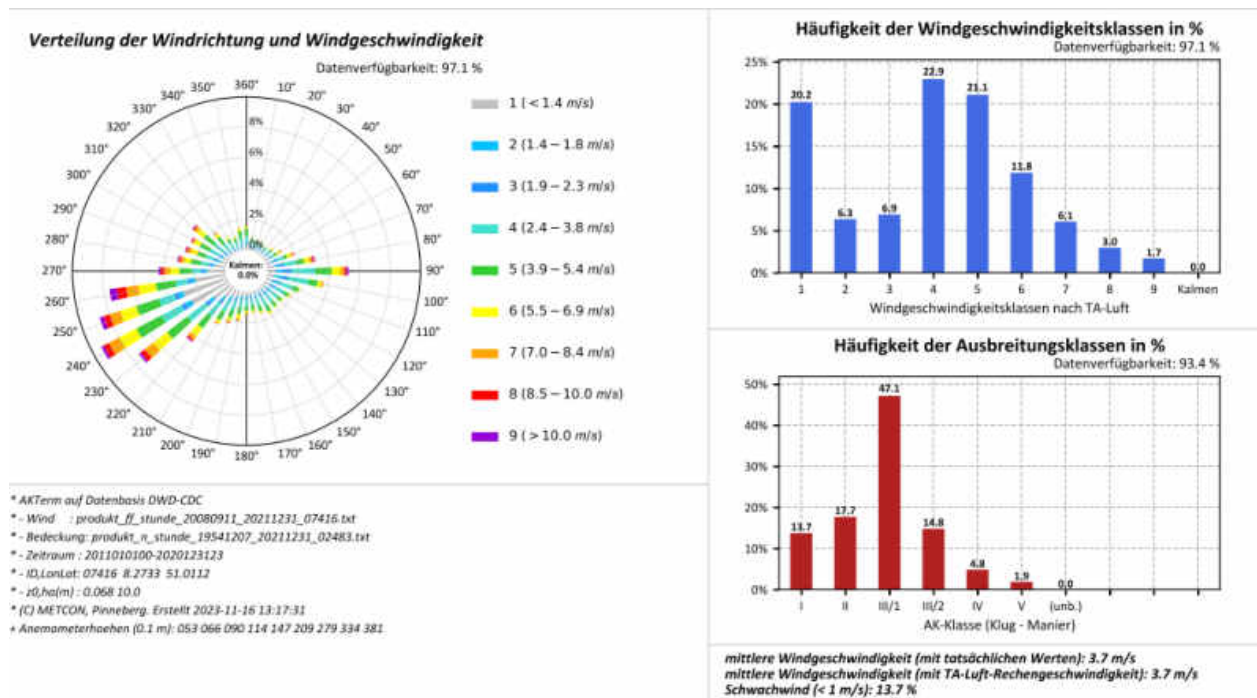


Abbildung A.13: Datenblätter der Messung (oben) und SynAKTerm 3.0 (unten) an der DWD-Station Berus (2011-2020).



Für den Vergleich gemessener und synthetischer Daten sind die Hinweise im Abschnitt 5.1 zu beachten.

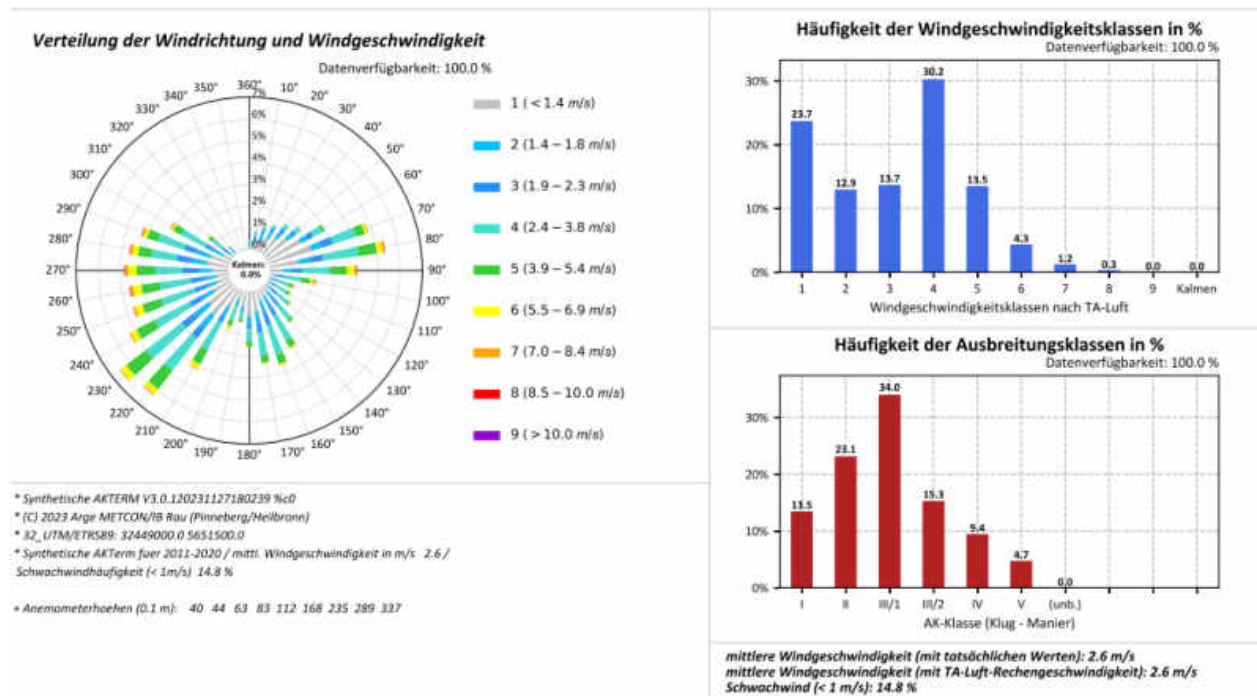
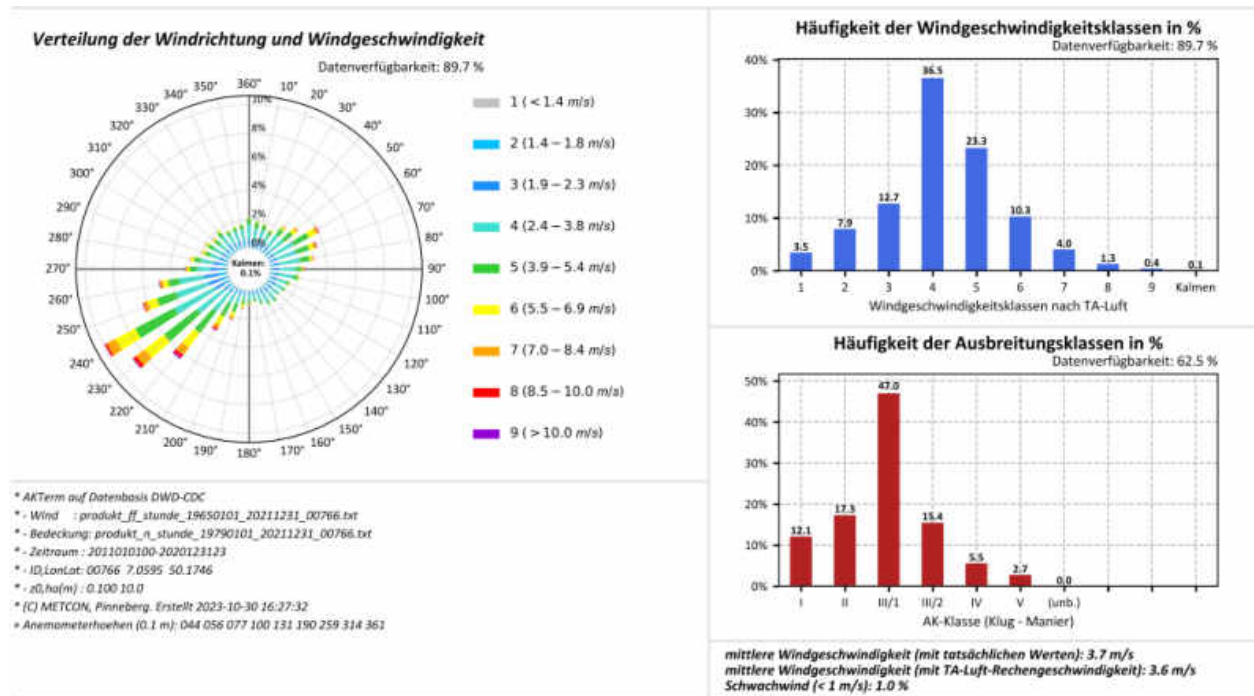


Abbildung A.14: Datenblätter der Messung (oben) und SynAKTerm 3.0 (unten) an der DWD-Station Birkelbach (2011-2020).



Für den Vergleich gemessener und synthetischer Daten sind die Hinweise im Abschnitt 5.1 zu beachten.

Diese Station wird im Abschnitt 5.5 diskutiert.

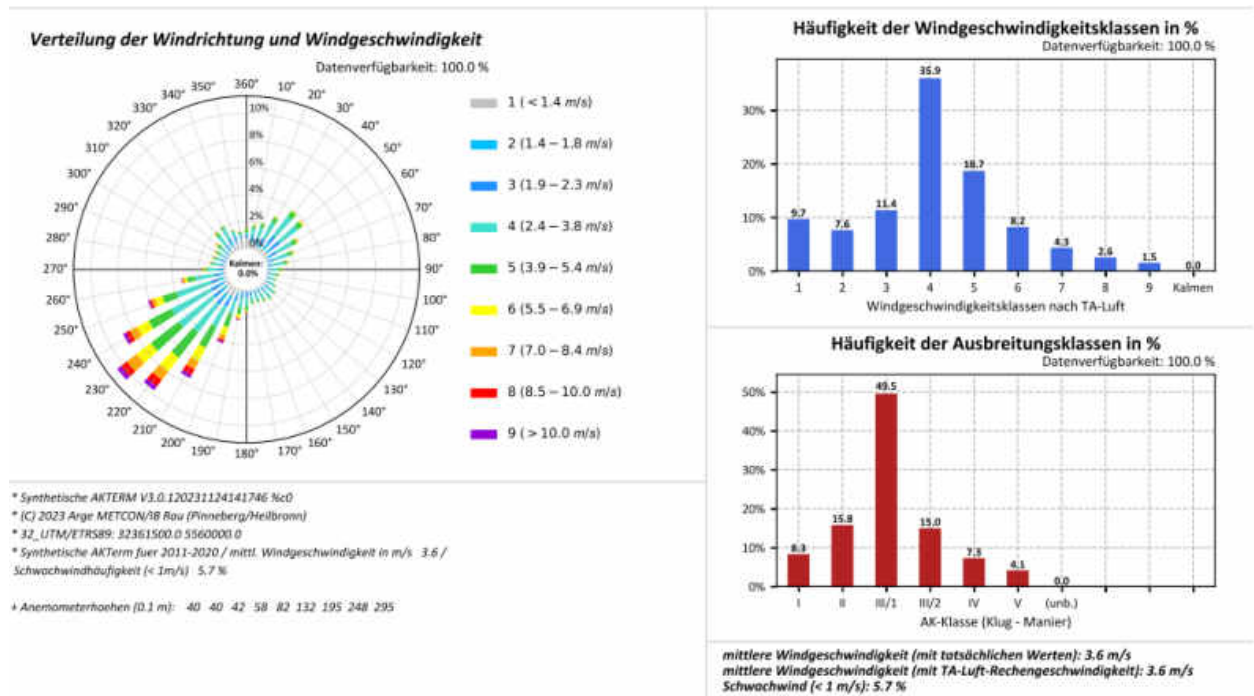
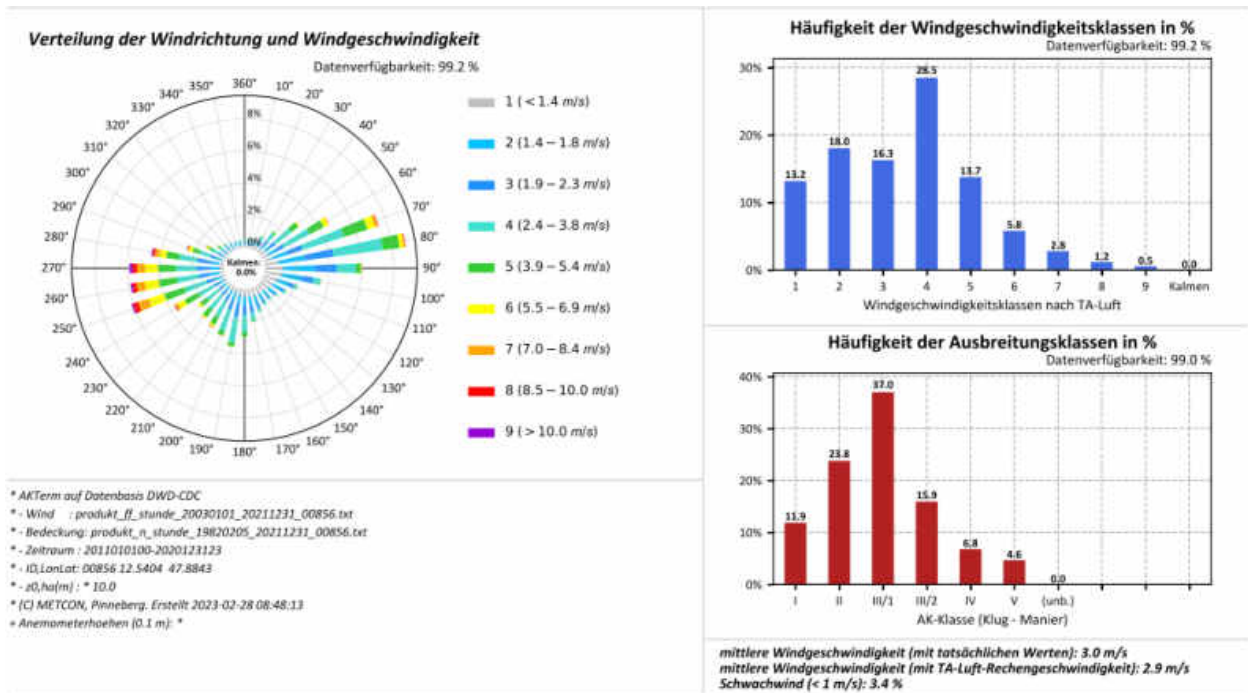


Abbildung A.15: Datenblätter der Messung (oben) und SynAKTerm 3.0 (unten) an der DWD-Station Büchel (Flugplatz) (2011-2020).



Für den Vergleich gemessener und synthetischer Daten sind die Hinweise im Abschnitt 5.1 zu beachten.

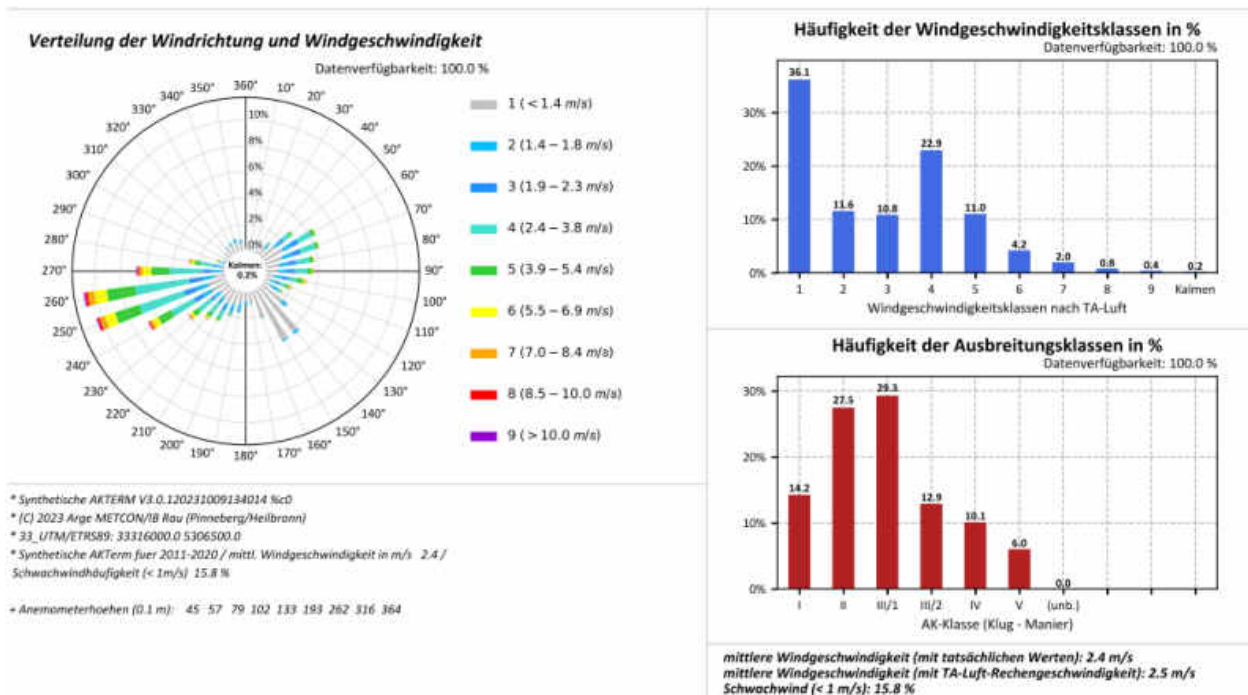
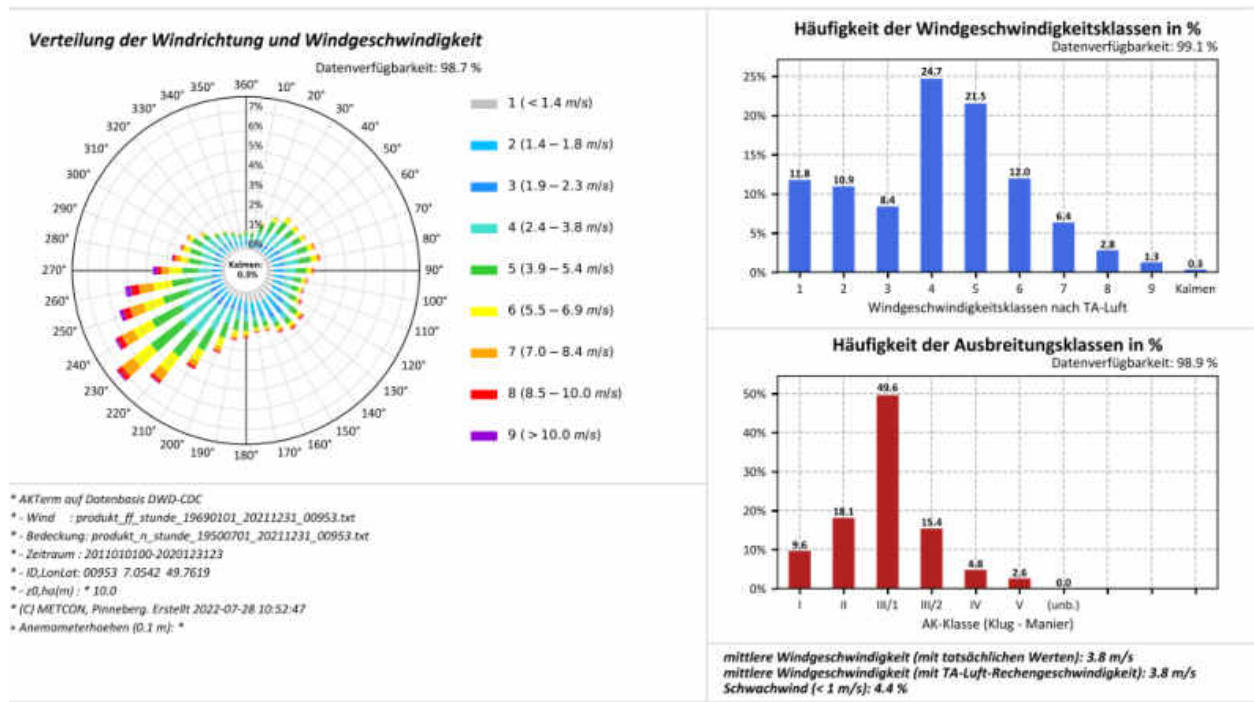


Abbildung A.16: Datenblätter der Messung (oben) und SynAKTerm 3.0 (unten) an der DWD-Station Chieming (2011-2020).



Für den Vergleich gemessener und synthetischer Daten sind die Hinweise im Abschnitt 5.1 zu beachten.

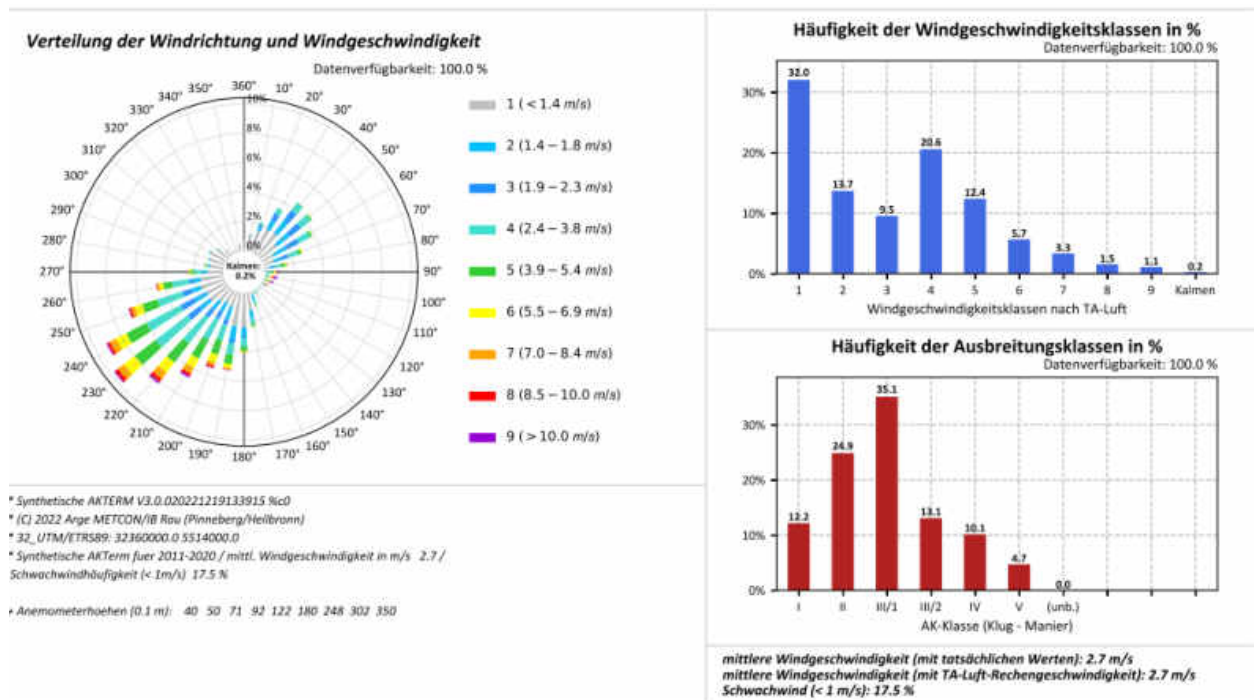
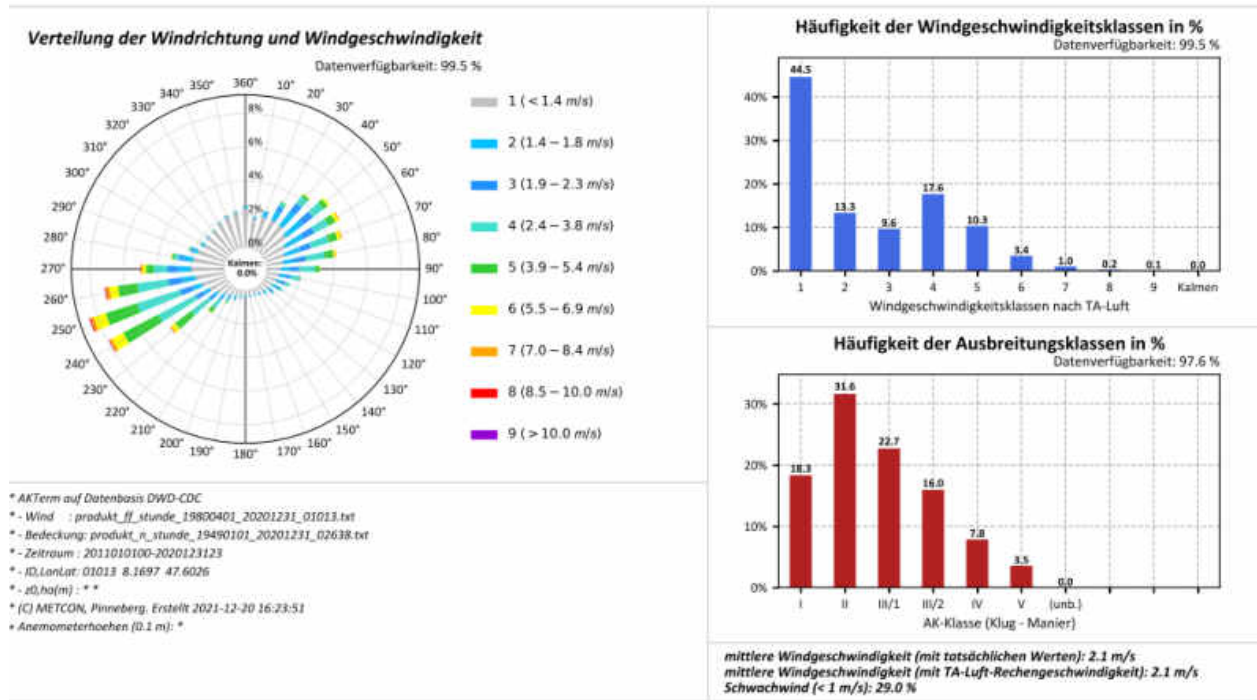


Abbildung A.17: Datenblätter der Messung (oben) und SynAKTerm 3.0 (unten) an der DWD-Station Deuselbach (2011-2020).





Für den Vergleich gemessener und synthetischer Daten sind die Hinweise im Abschnitt 5.1 zu beachten.

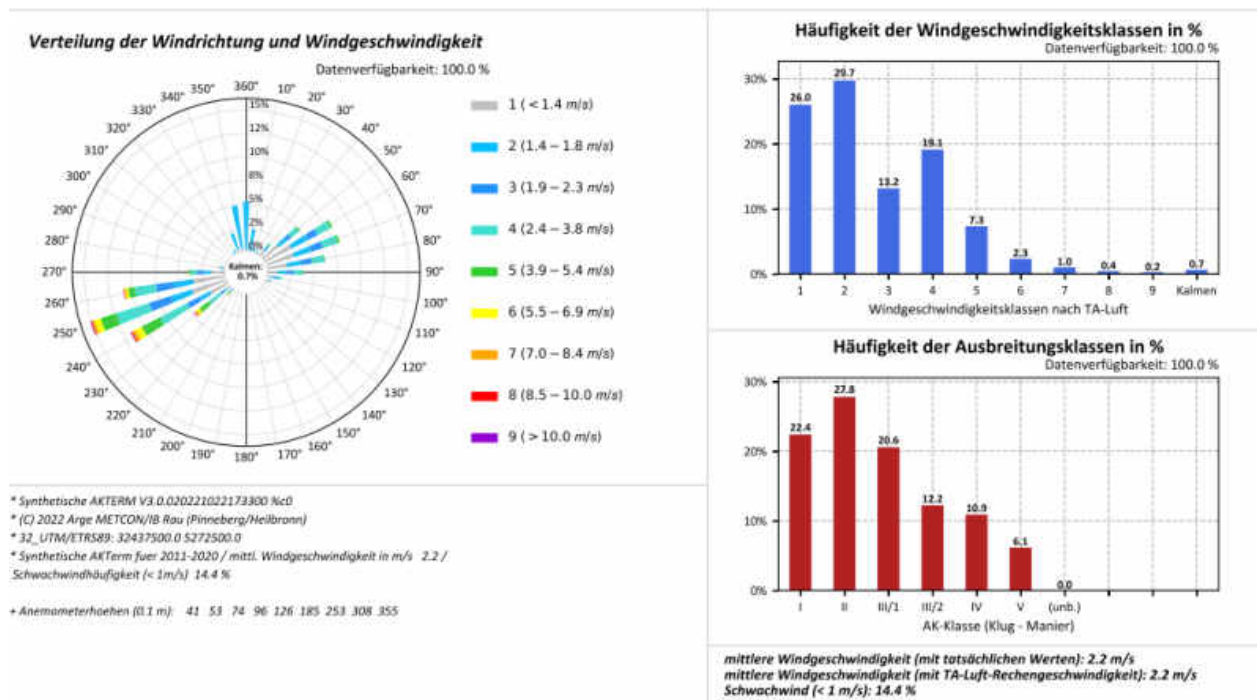
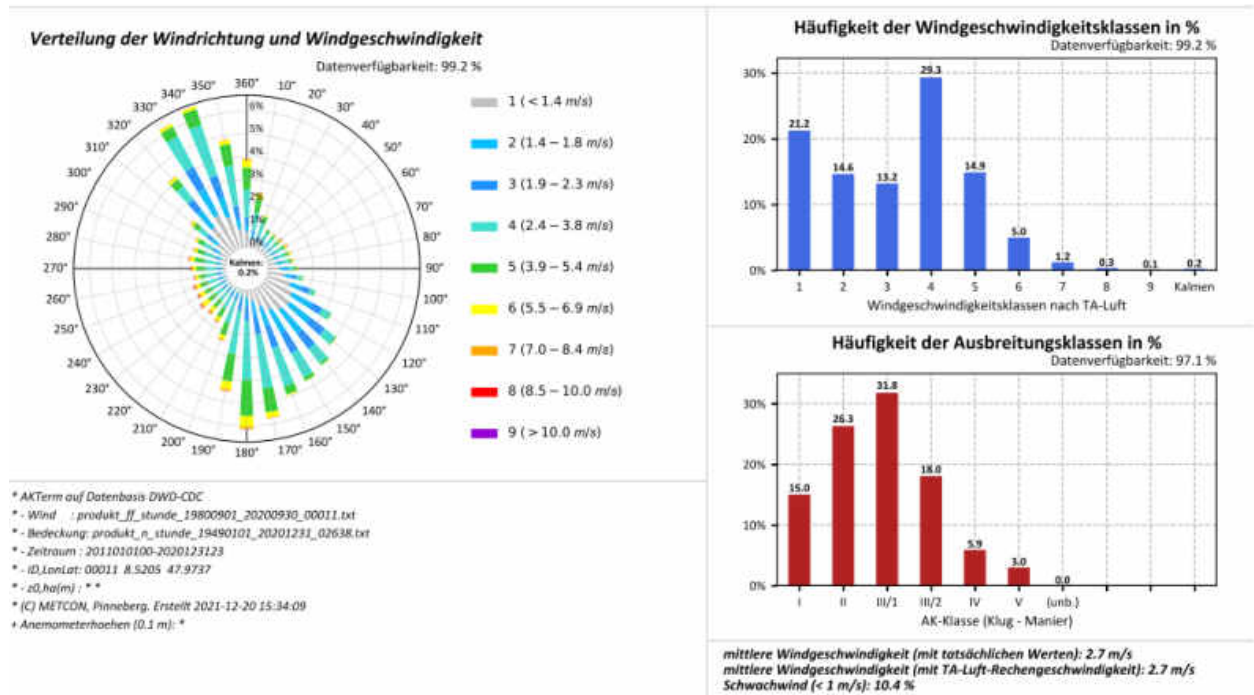


Abbildung A. 18: Datenblätter der Messung (oben) und SynAKTerm 3.0 (unten) an der DWD-Station Dogern (2011-2020).



Für den Vergleich gemessener und synthetischer Daten sind die Hinweise im Abschnitt 5.1 zu beachten.

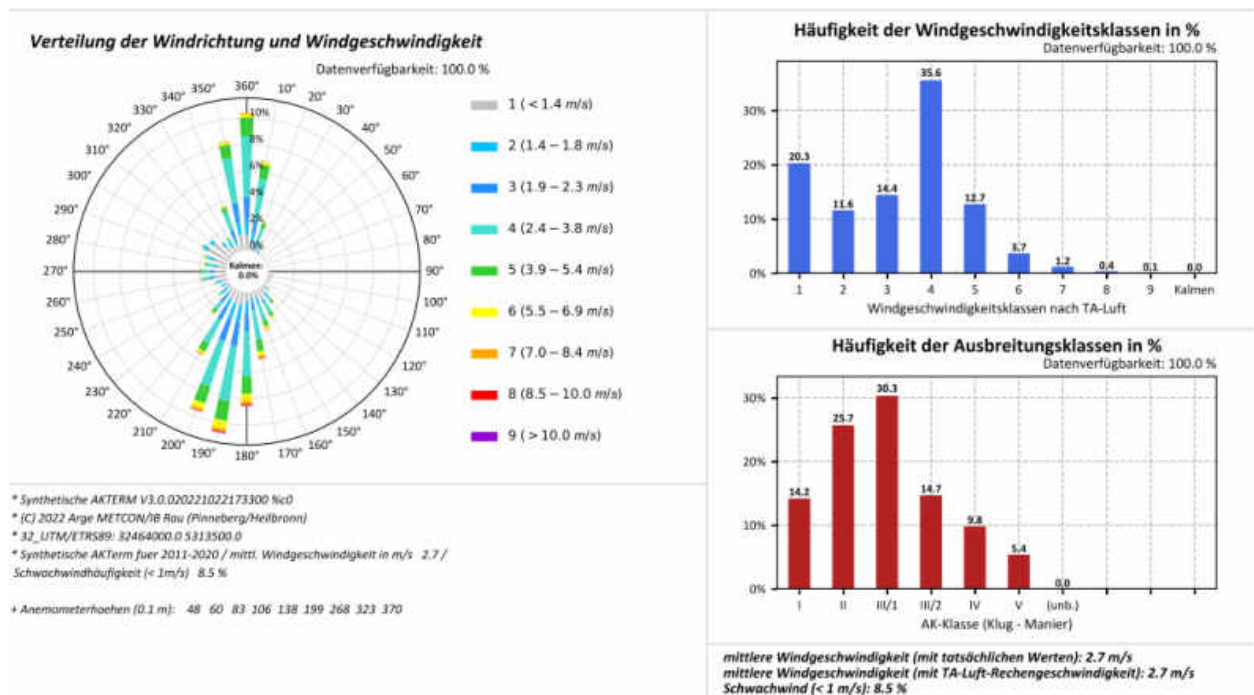
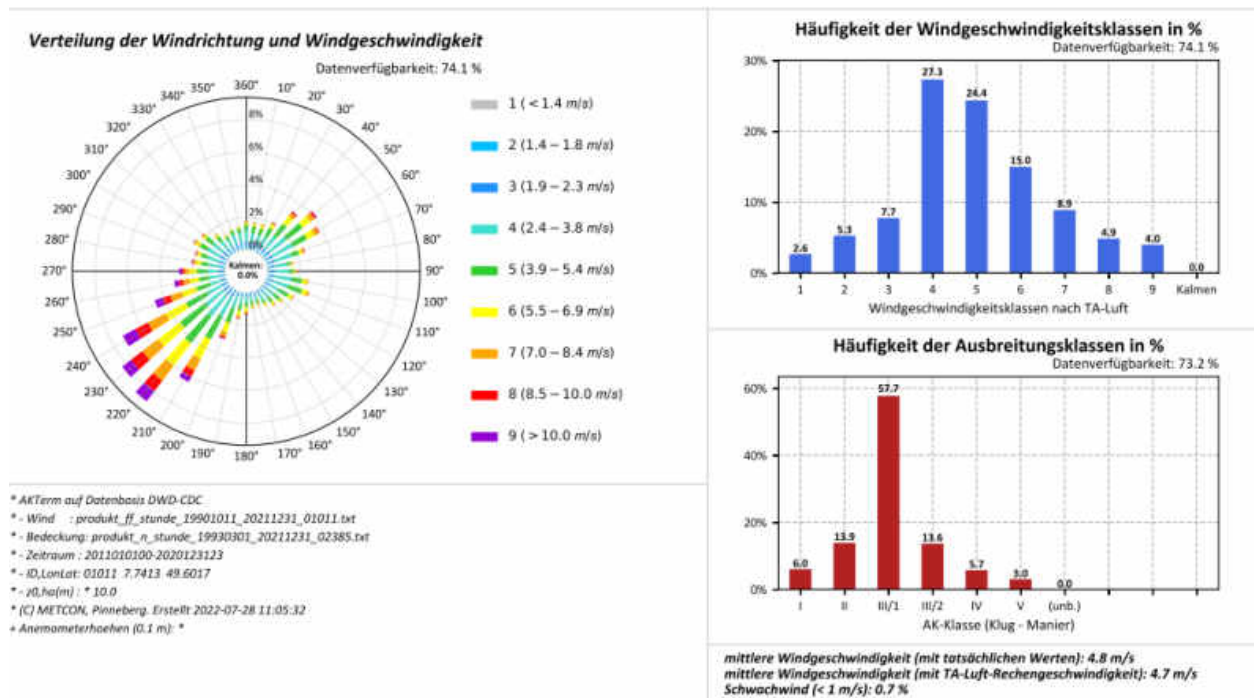


Abbildung A. 19: Datenblätter der Messung (oben) und SynAKTerm 3.0 (unten) an der DWD-Station Donauessingen (2011-2019/2020).



Für den Vergleich gemessener und synthetischer Daten sind die Hinweise im Abschnitt 5.1 zu beachten.

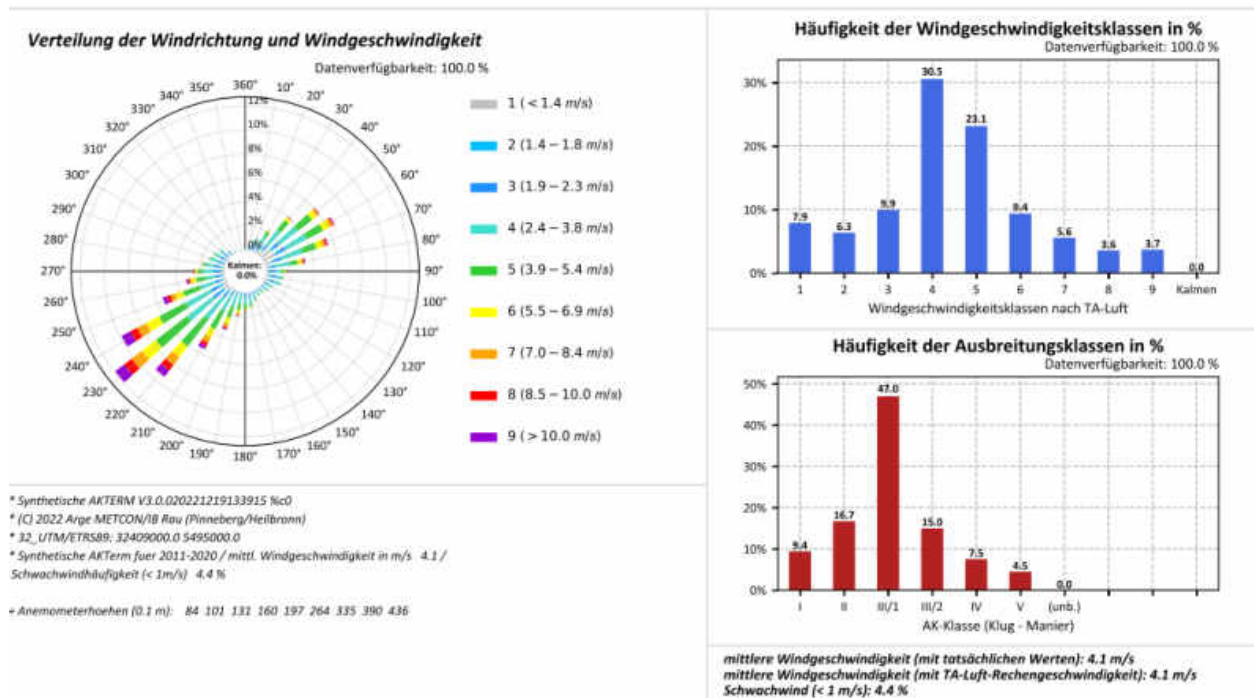
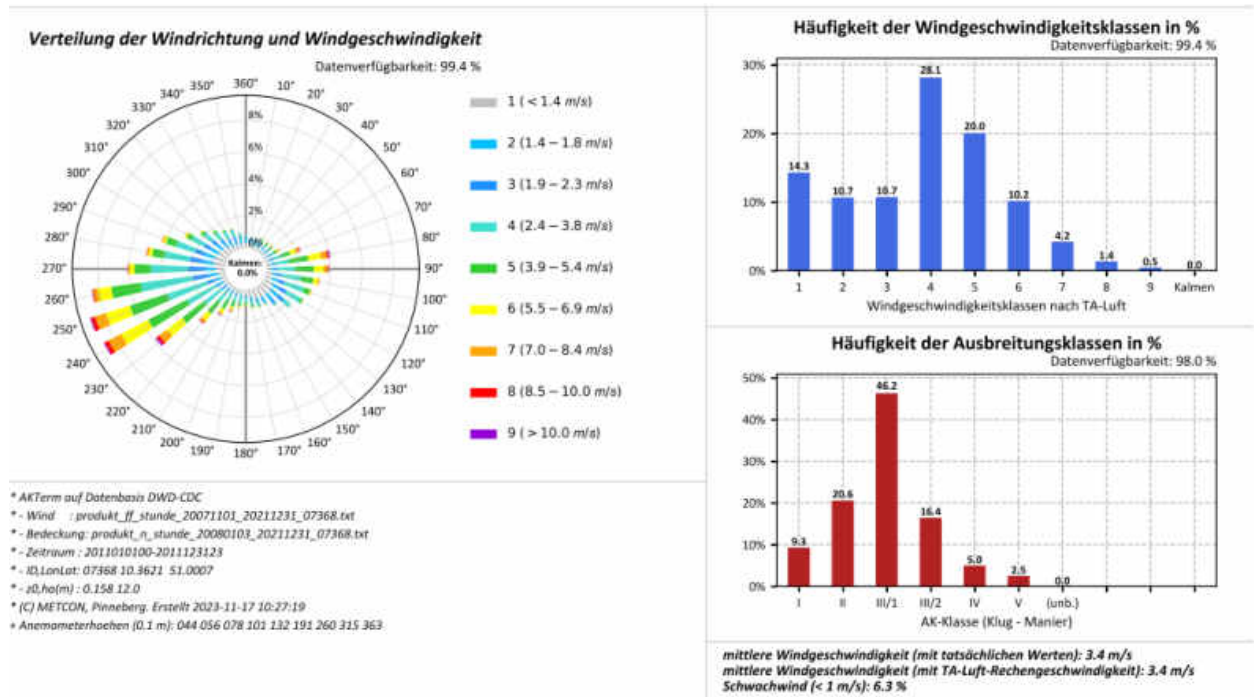


Abbildung A.20: Datenblätter der Messung (oben) und SynAKTerm 3.0 (unten) an der DWD-Station Dörrmoschel-Felsbergerhof (2011-2020).



Für den Vergleich gemessener und synthetischer Daten sind die Hinweise im Abschnitt 5.1 zu beachten.

Diese Station wird im Abschnitt 5.5 diskutiert.

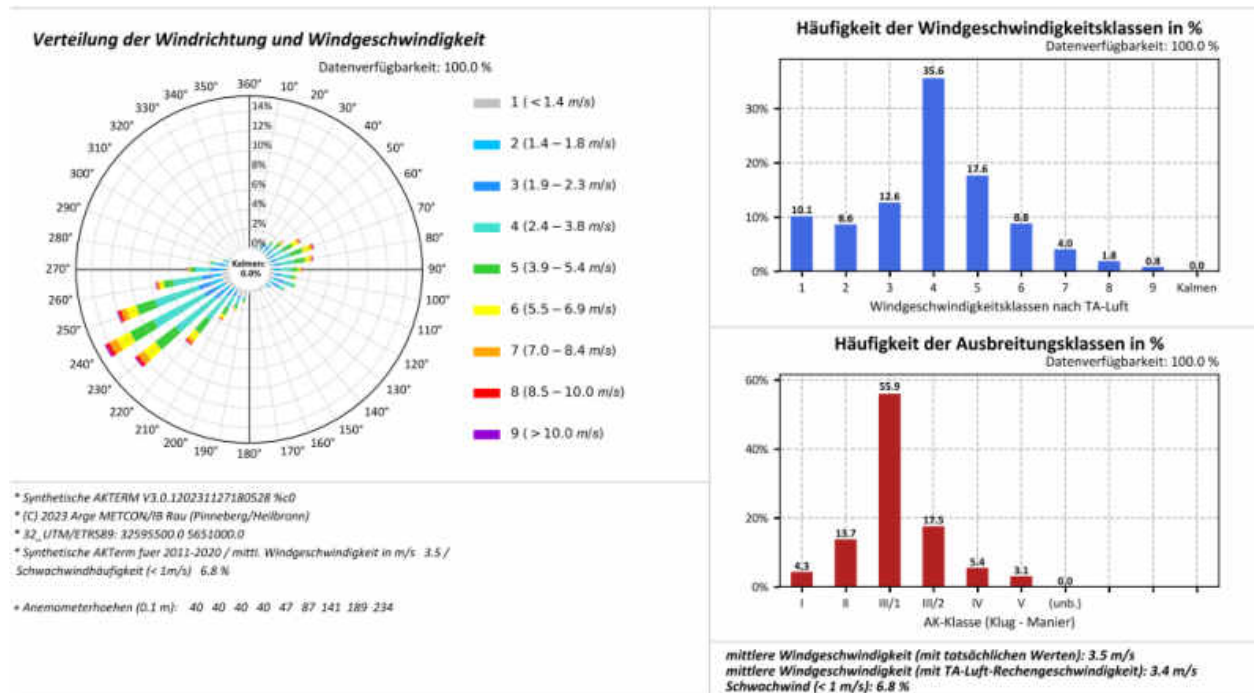
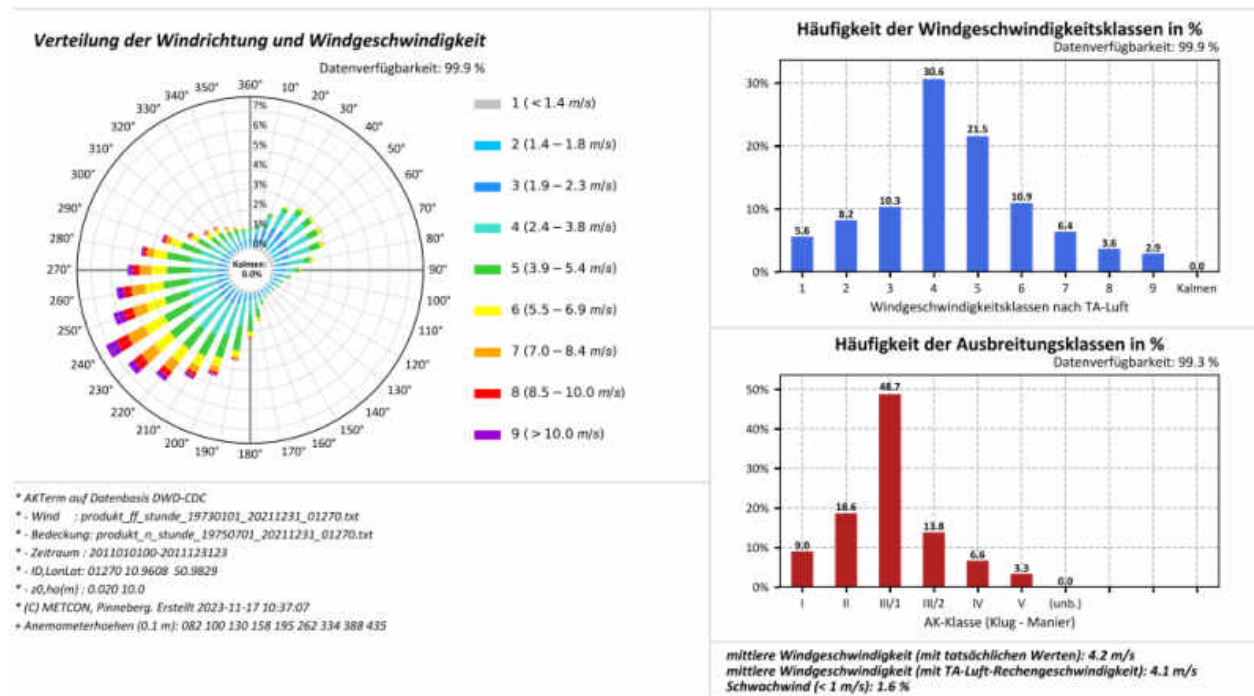


Abbildung A.21: Datenblätter der Messung (oben) und SynAKTerm 3.0 (unten) an der DWD-Station Eisenach (2011-2020).



Für den Vergleich gemessener und synthetischer Daten sind die Hinweise im Abschnitt 5.1 zu beachten.

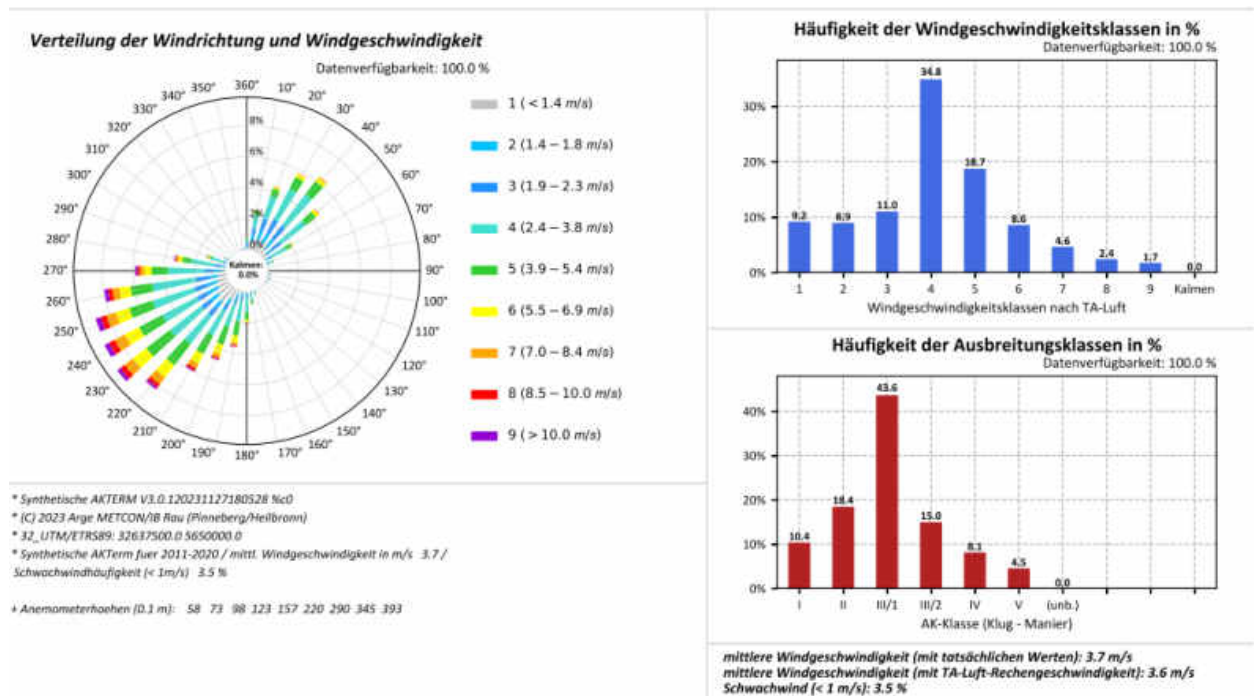
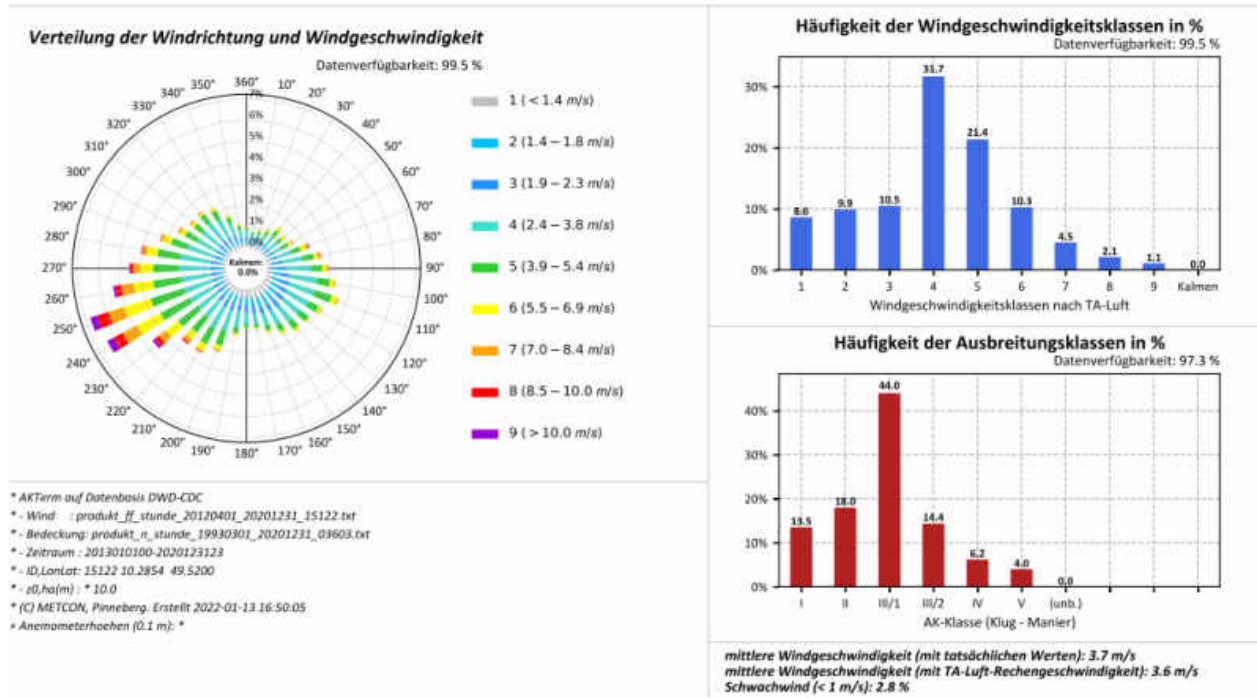


Abbildung A.22: Datenblätter der Messung (oben) und SynAKTerm 3.0 (unten) an der DWD-Station Erfurt-Weimar (2011-2020).



Für den Vergleich gemessener und synthetischer Daten sind die Hinweise im Abschnitt 5.1 zu beachten.

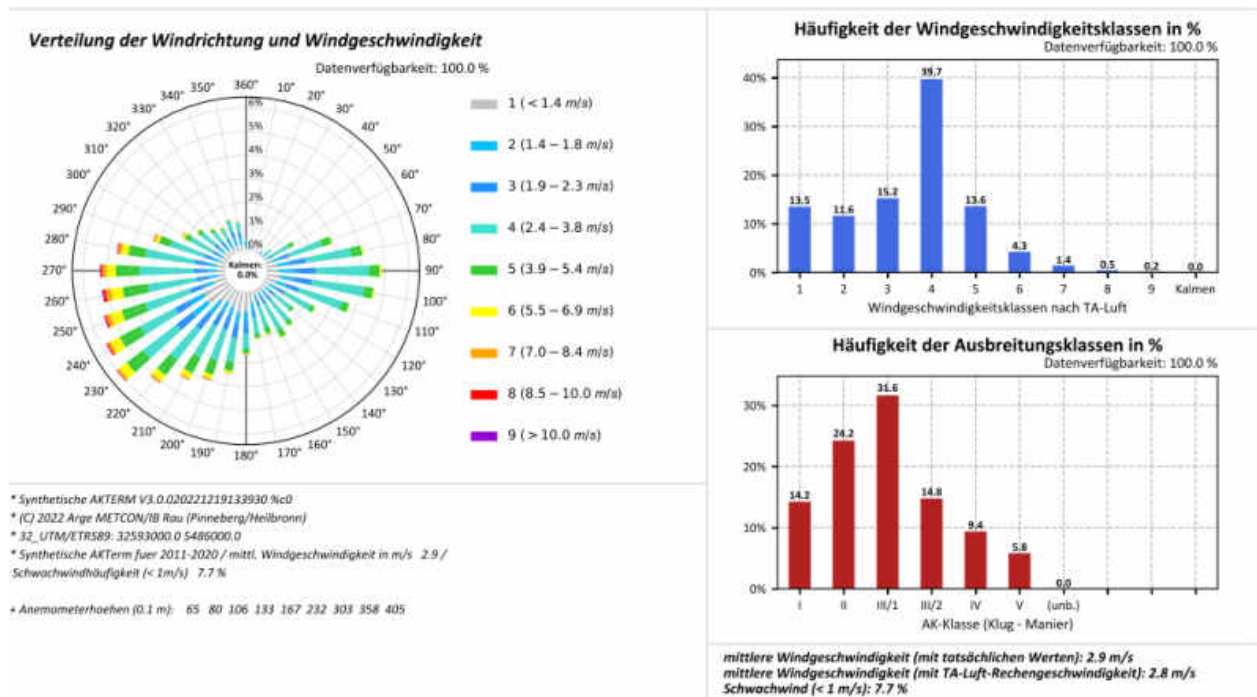
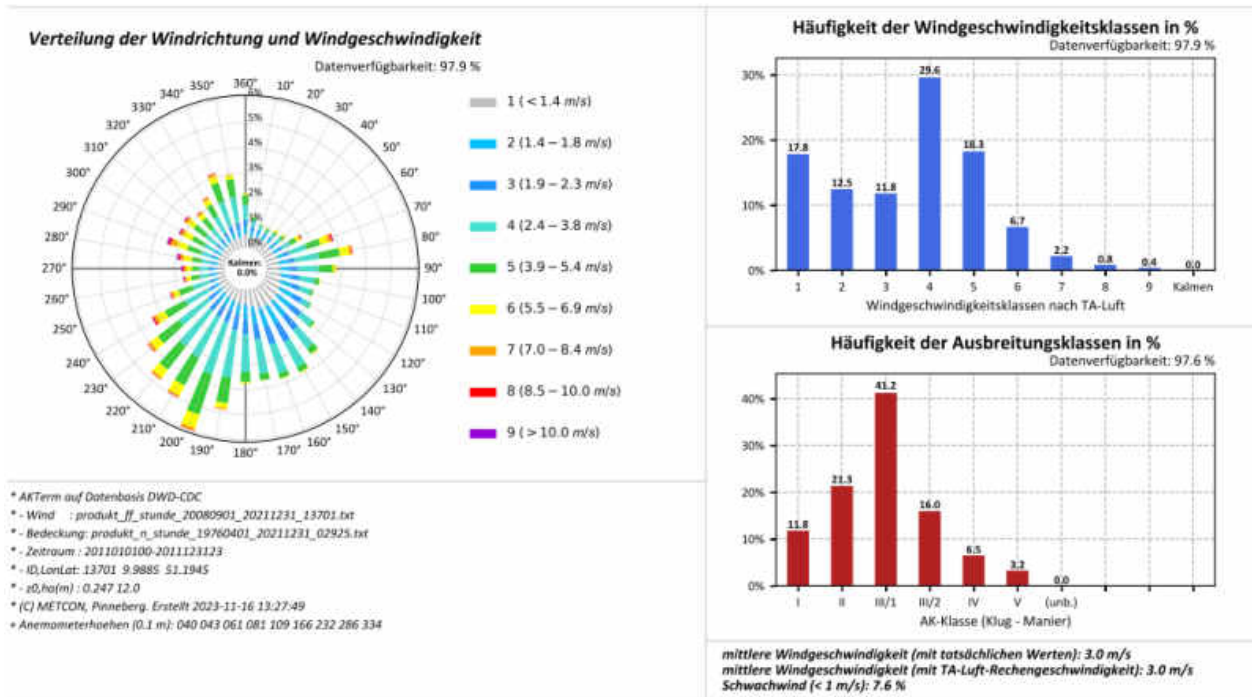
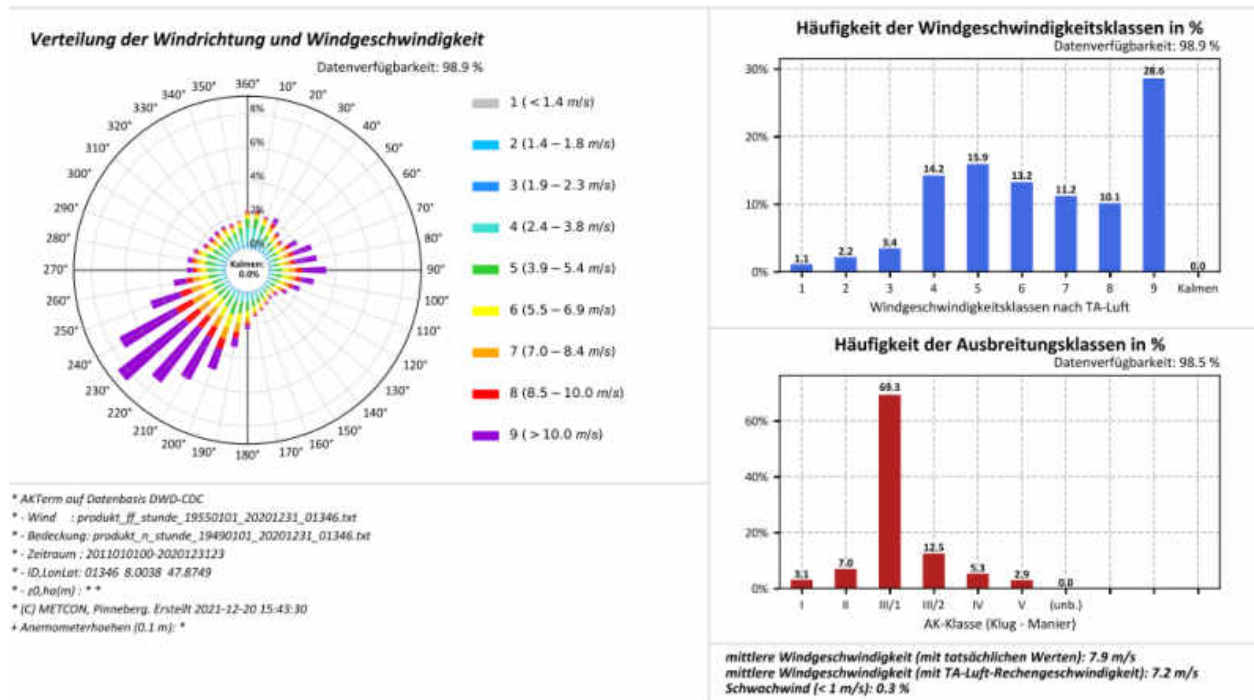


Abbildung A.23: Datenblätter der Messung (oben) und SynAKTerm 3.0 (unten) an der DWD-Station Ergersheim-Neuherberg (2013/2011-2020).



Für den Vergleich gemessener und synthetischer Daten sind die Hinweise im Abschnitt 5.1 zu beachten.

Abbildung A.24: Datenblätter der Messung (oben) und SynAKTerm 3.0 (unten) an der DWD-Station Eschwege-Eltmannshausen (2011-2020).



Für den Vergleich gemessener und synthetischer Daten sind die Hinweise im Abschnitt 5.1 zu beachten.

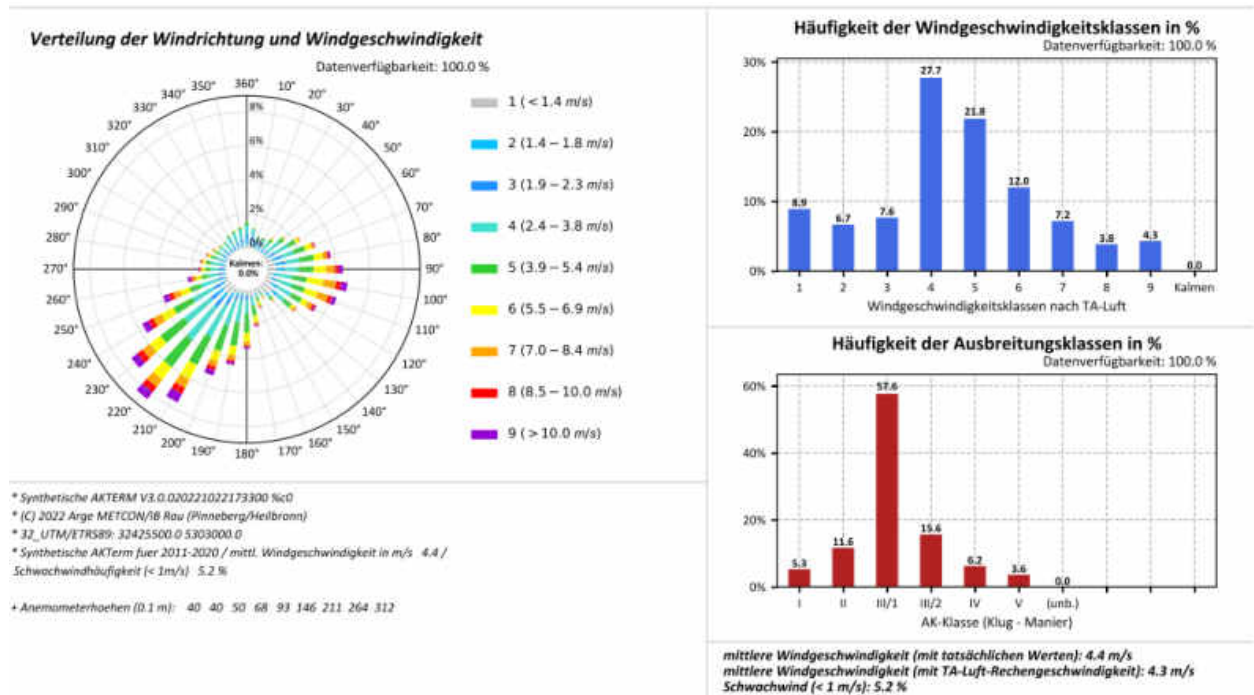
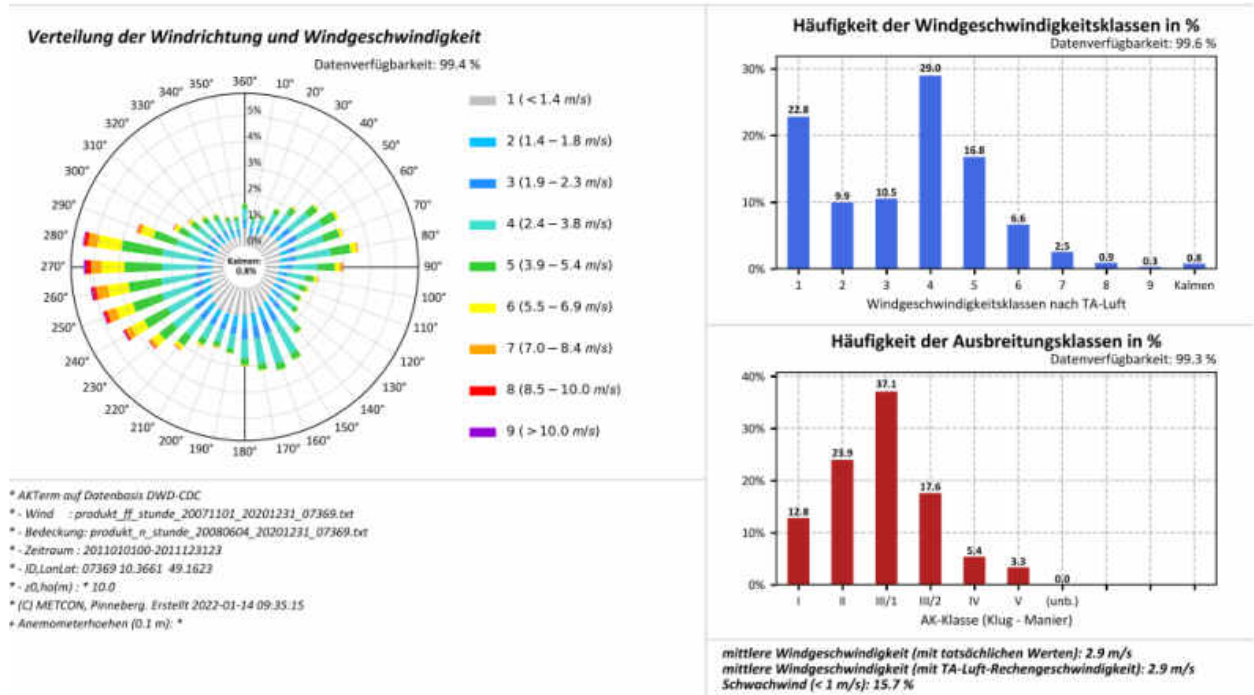


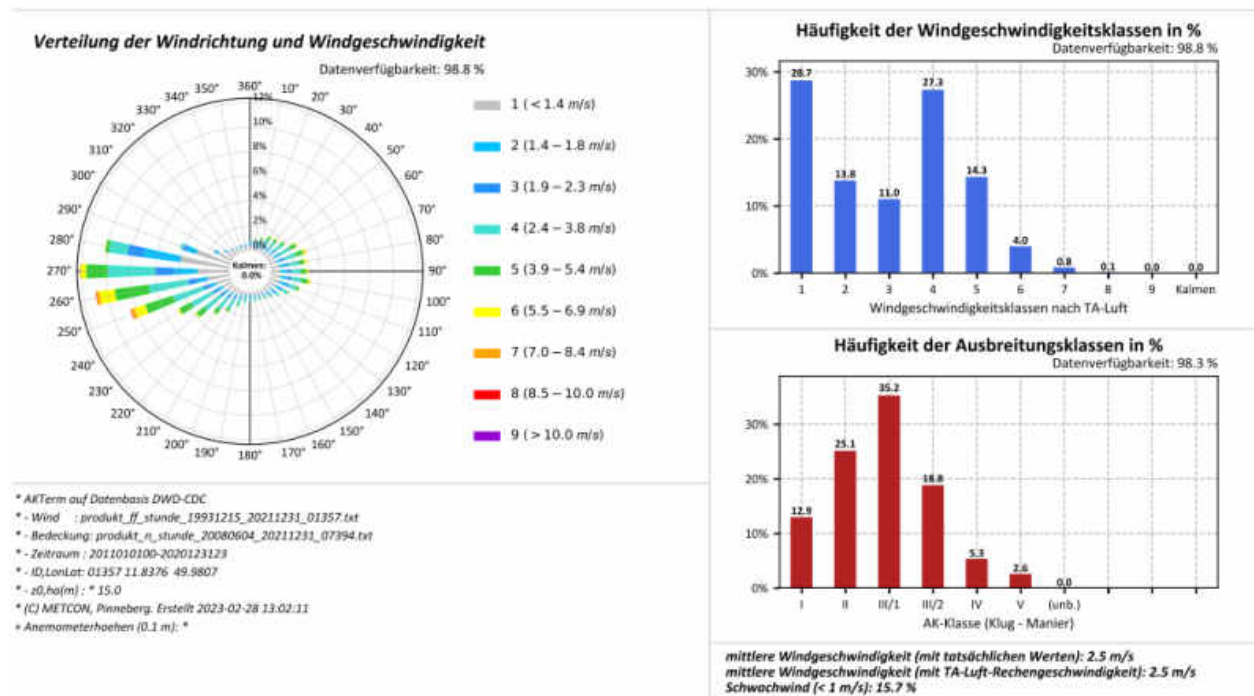
Abbildung A.25: Datenblätter der Messung (oben) und SynAKTerm 3.0 (unten) an der DWD-Station Feldberg/Schwarzwald (2011-2020).





Für den Vergleich gemessener und synthetischer Daten sind die Hinweise im Abschnitt 5.1 zu beachten.

Abbildung A.26: Datenblätter der Messung (oben) und SynAKTerm 3.0 (unten) an der DWD-Station Feuchtwangen-Heilbronn (2011-2020).



Für den Vergleich gemessener und synthetischer Daten sind die Hinweise im Abschnitt 5.1 zu beachten.

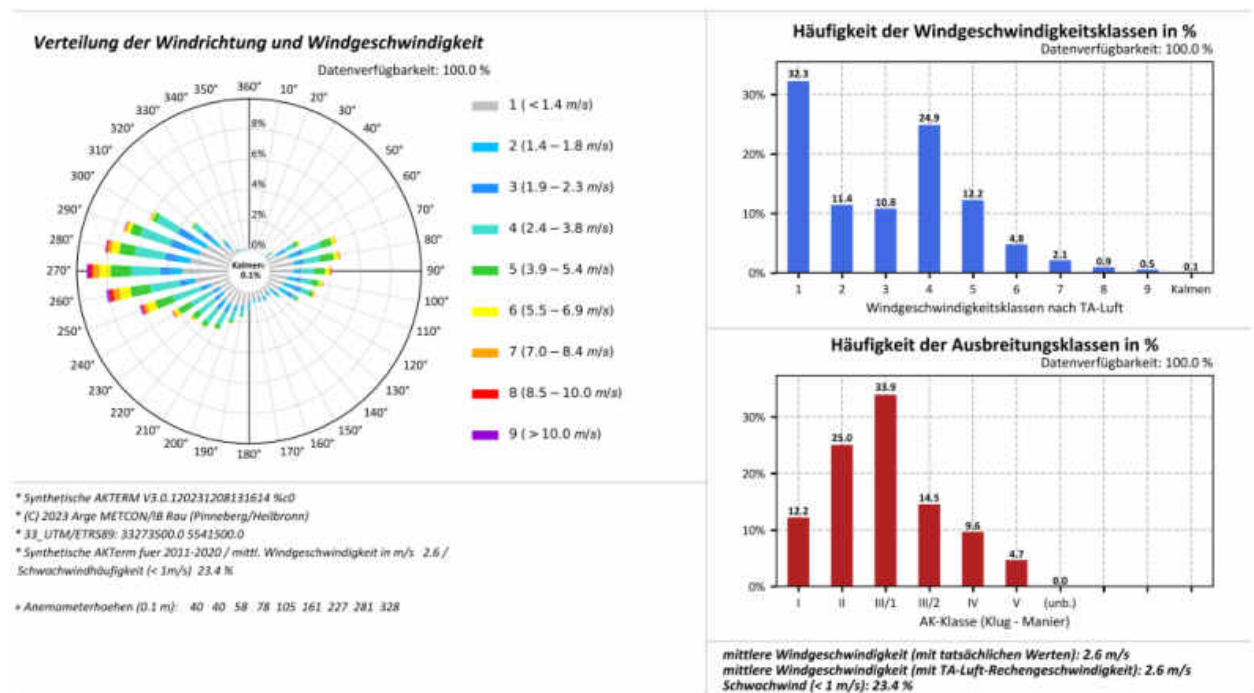
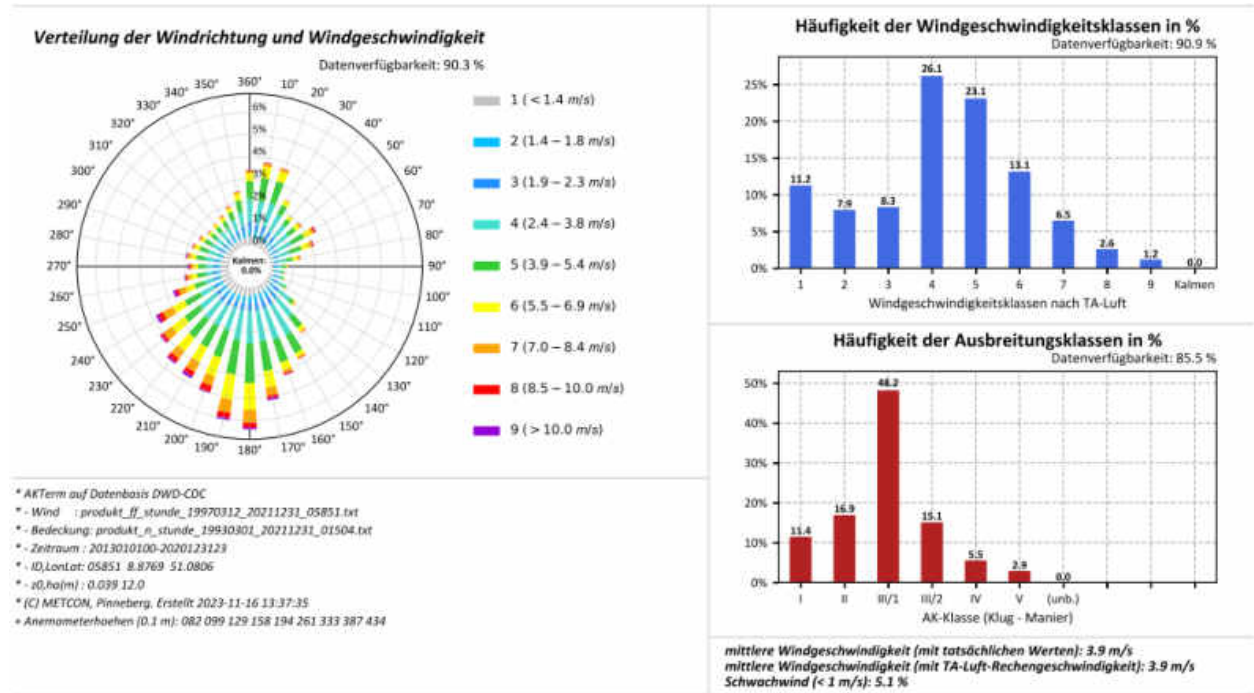


Abbildung A.27: Datenblätter der Messung (oben) und SynAKTerm 3.0 (unten) an der DWD-Station Fichtelberg/Oberfranken-Hüttelstadt (2011-2020).



Für den Vergleich gemessener und synthetischer Daten sind die Hinweise im Abschnitt 5.1 zu beachten.

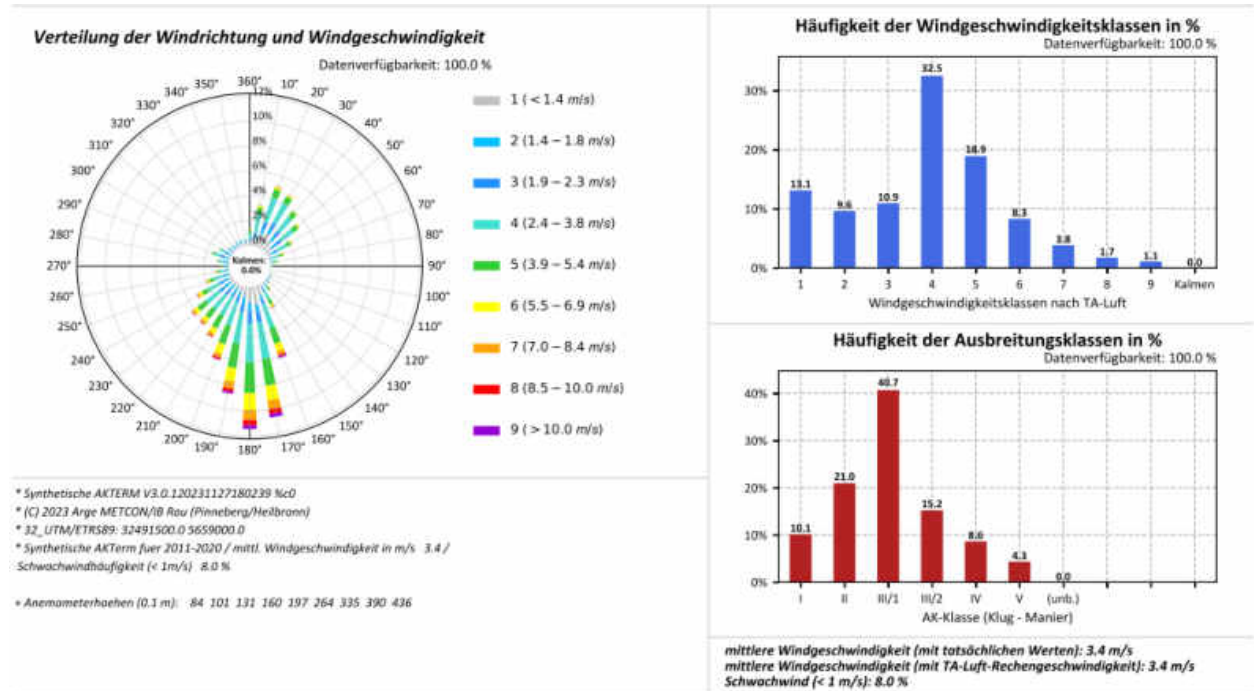
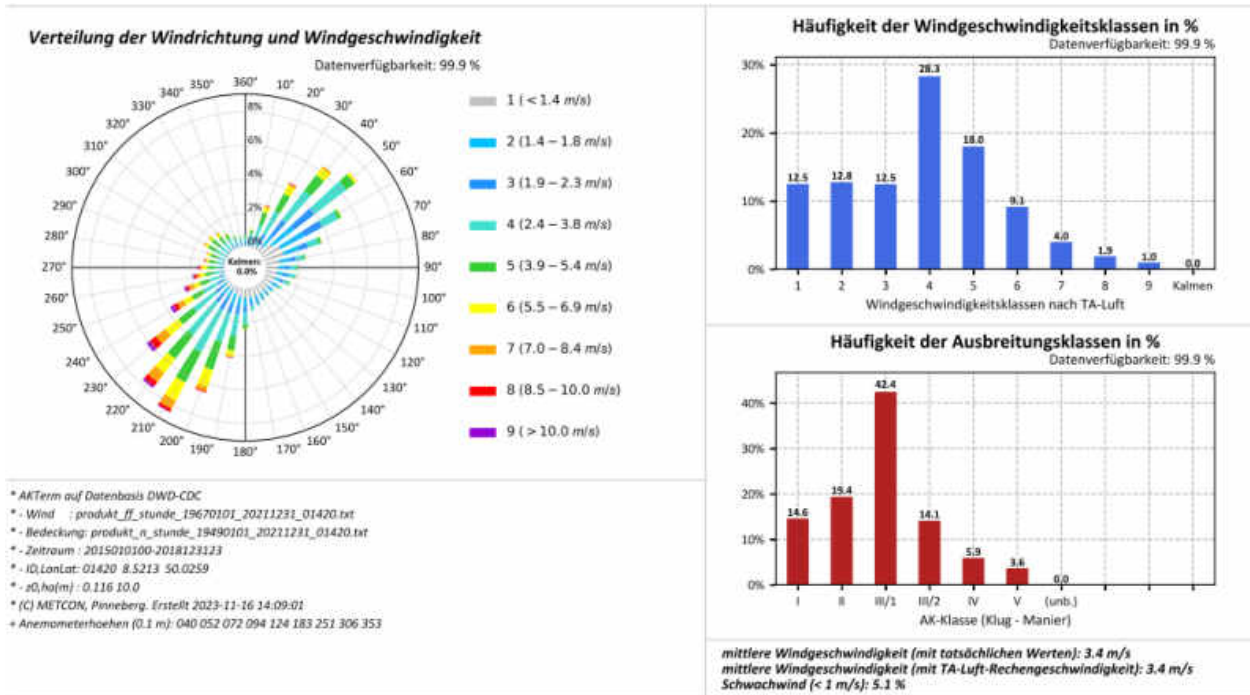


Abbildung A.28: Datenblätter der Messung (oben) und SynAKTerm 3.0 (unten) an der DWD-Station Frankenberg-Geismar (2013/2011-2020).



Für den Vergleich gemessener und synthetischer Daten sind die Hinweise im Abschnitt 5.1 zu beachten.

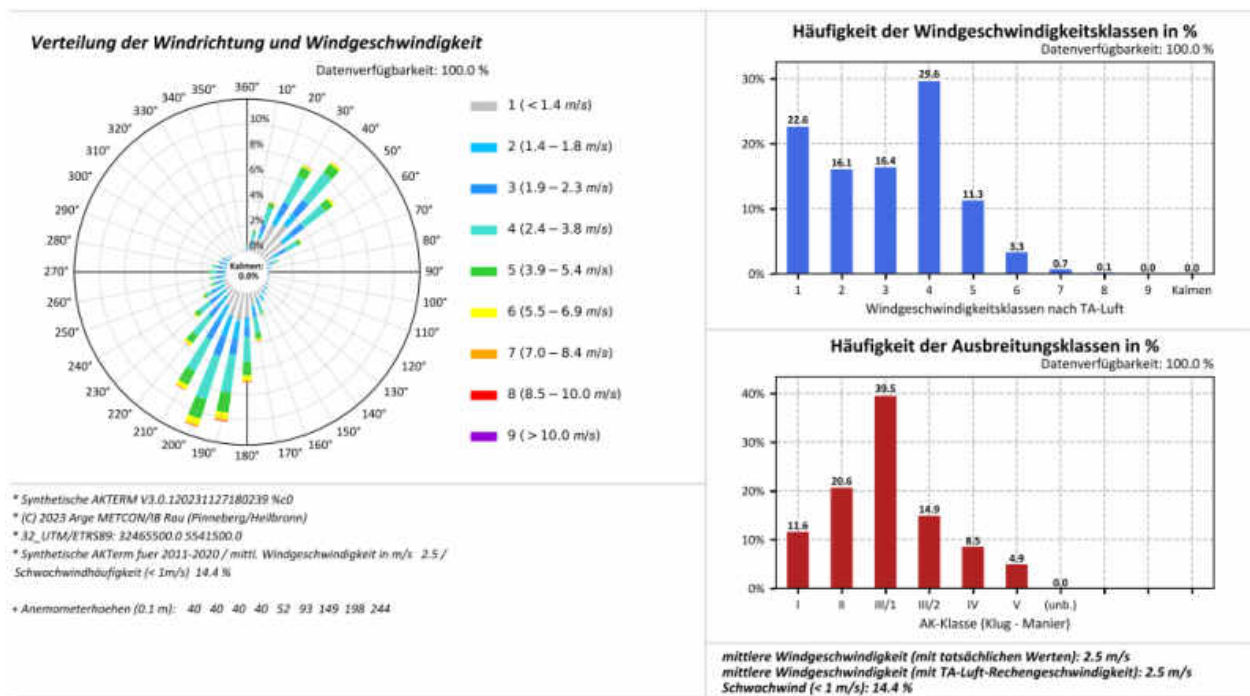
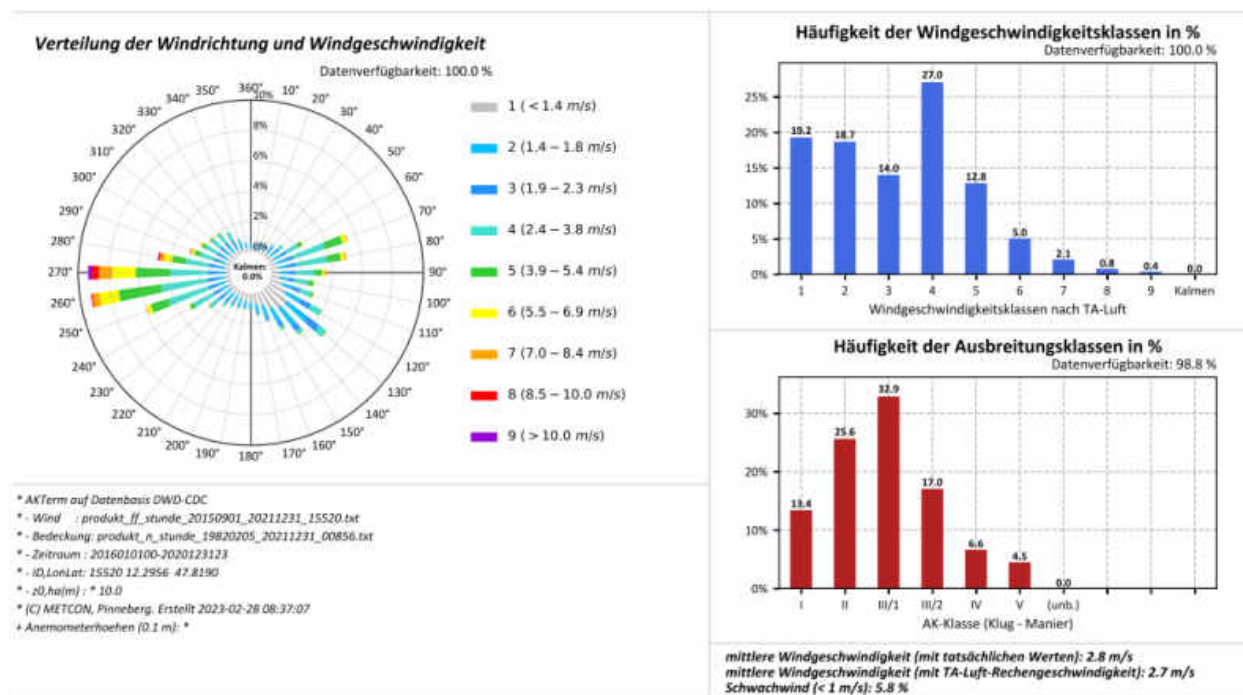


Abbildung A.29: Datenblätter der Messung (oben) und SynAKTerm 3.0 (unten) an der DWD-Station Frankfurt/Main (2015/2011-2018/2020).



Für den Vergleich gemessener und synthetischer Daten sind die Hinweise im Abschnitt 5.1 zu beachten.

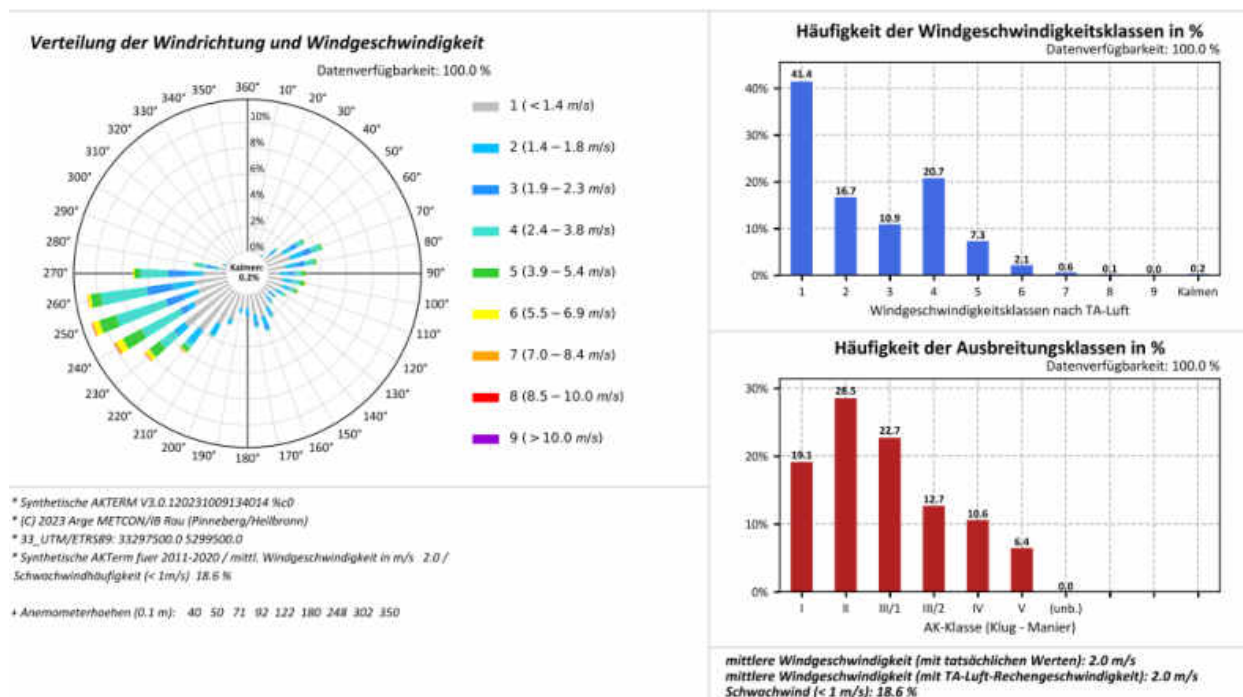
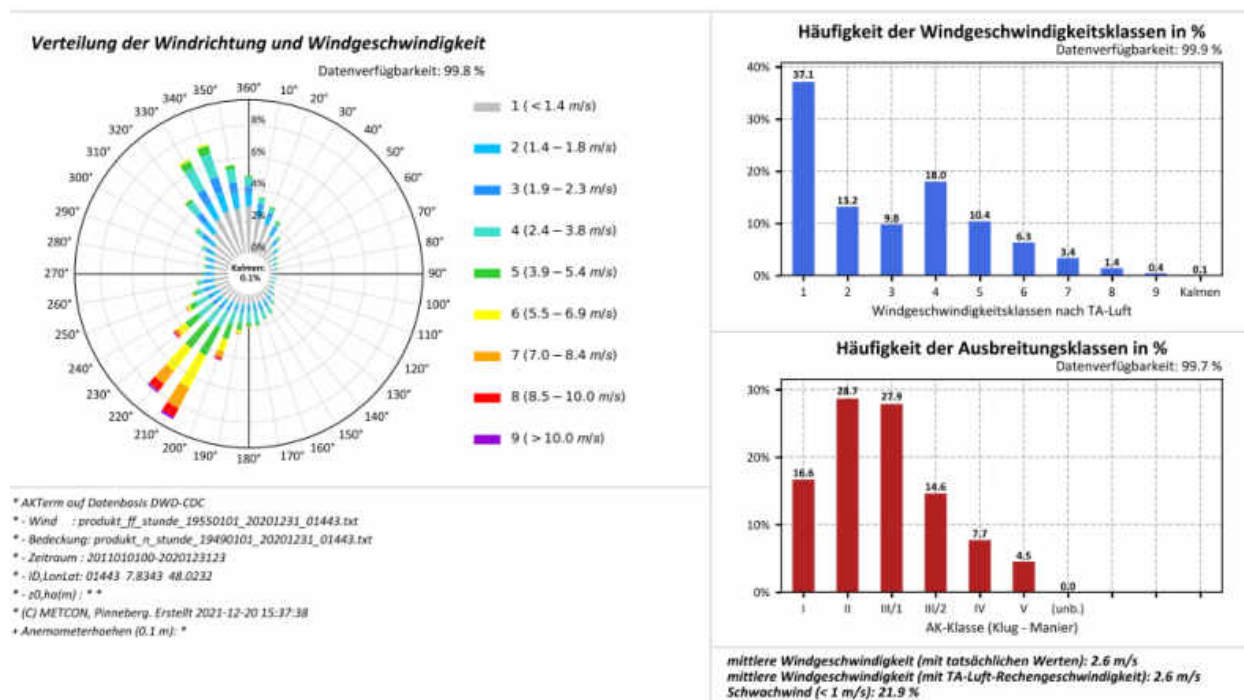


Abbildung A.30: Datenblätter der Messung (oben) und SynAKTerm 3.0 (unten) an der DWD-Station Frasdorf-Greimelberg (2016/2011-2020).



Für den Vergleich gemessener und synthetischer Daten sind die Hinweise im Abschnitt 5.1 zu beachten.

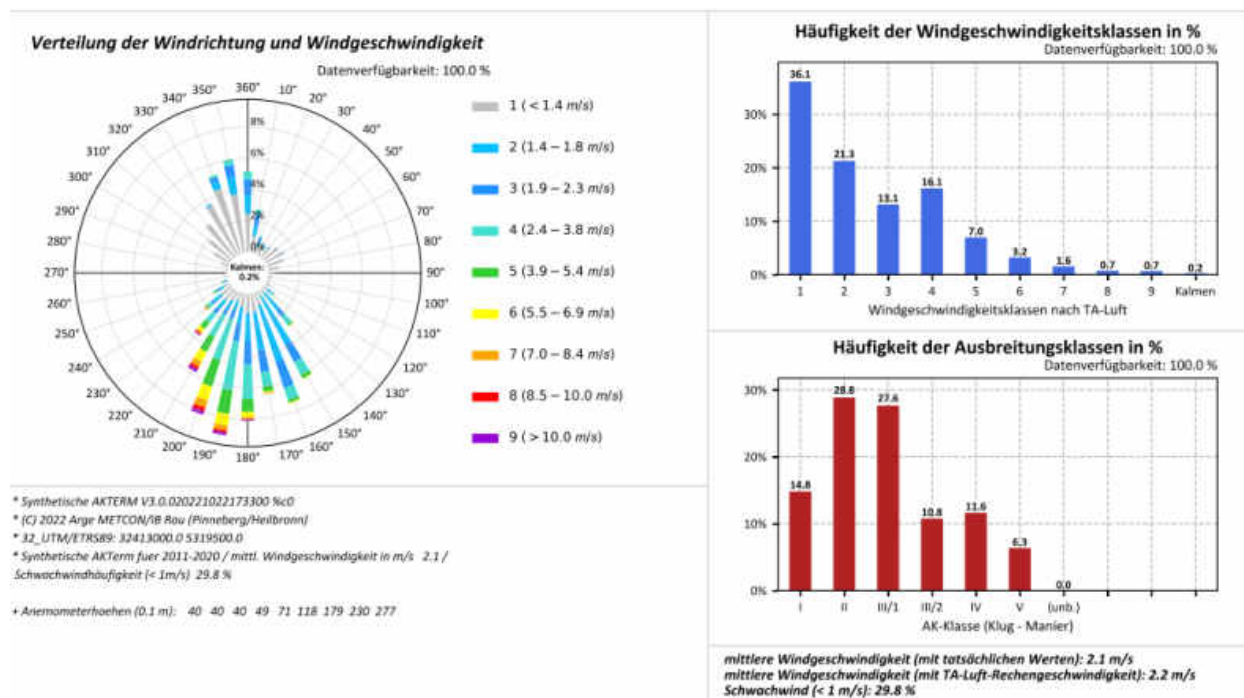
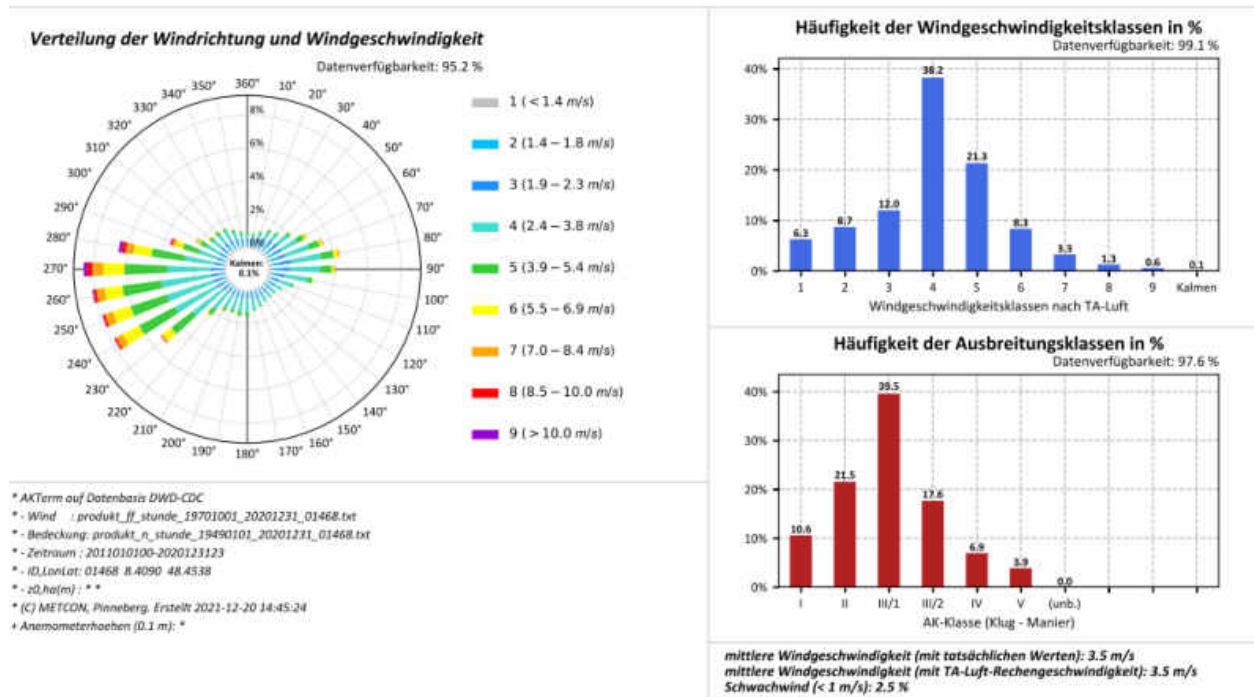


Abbildung A.31: Datenblätter der Messung (oben) und SynAKTerm 3.0 (unten) an der DWD-Station Freiburg (2011-2020).



Für den Vergleich gemessener und synthetischer Daten sind die Hinweise im Abschnitt 5.1 zu beachten.

Diese Station wird im Abschnitt 5.3 diskutiert.

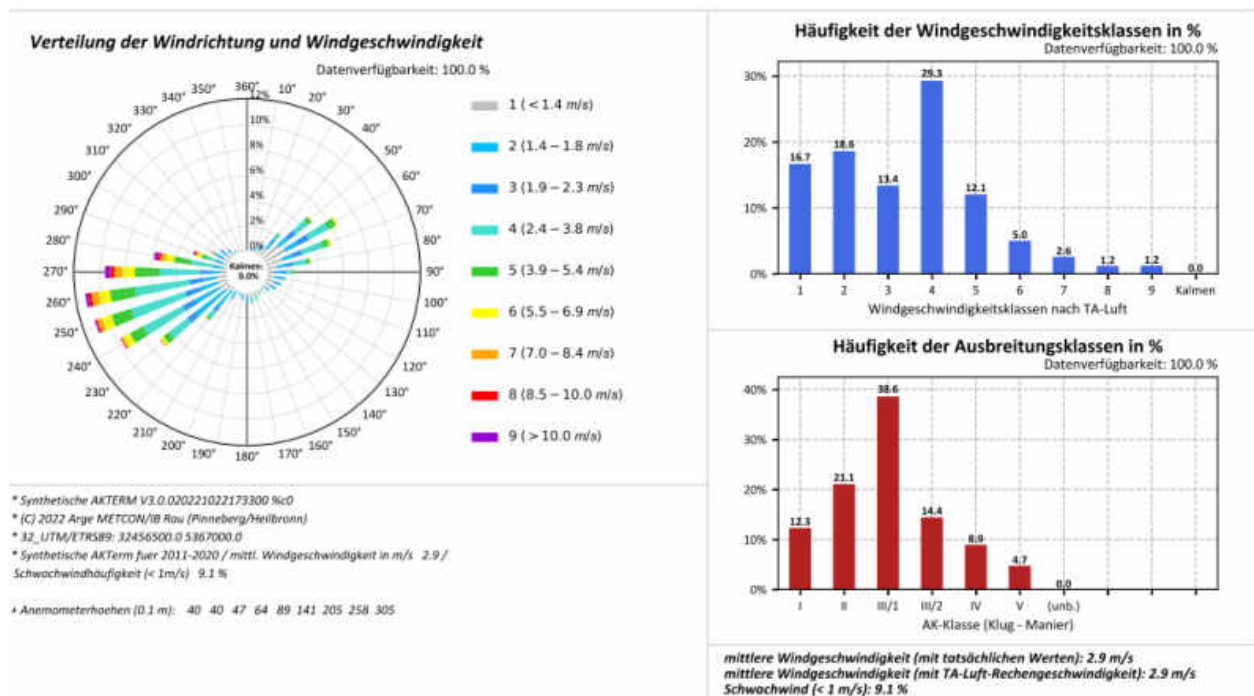
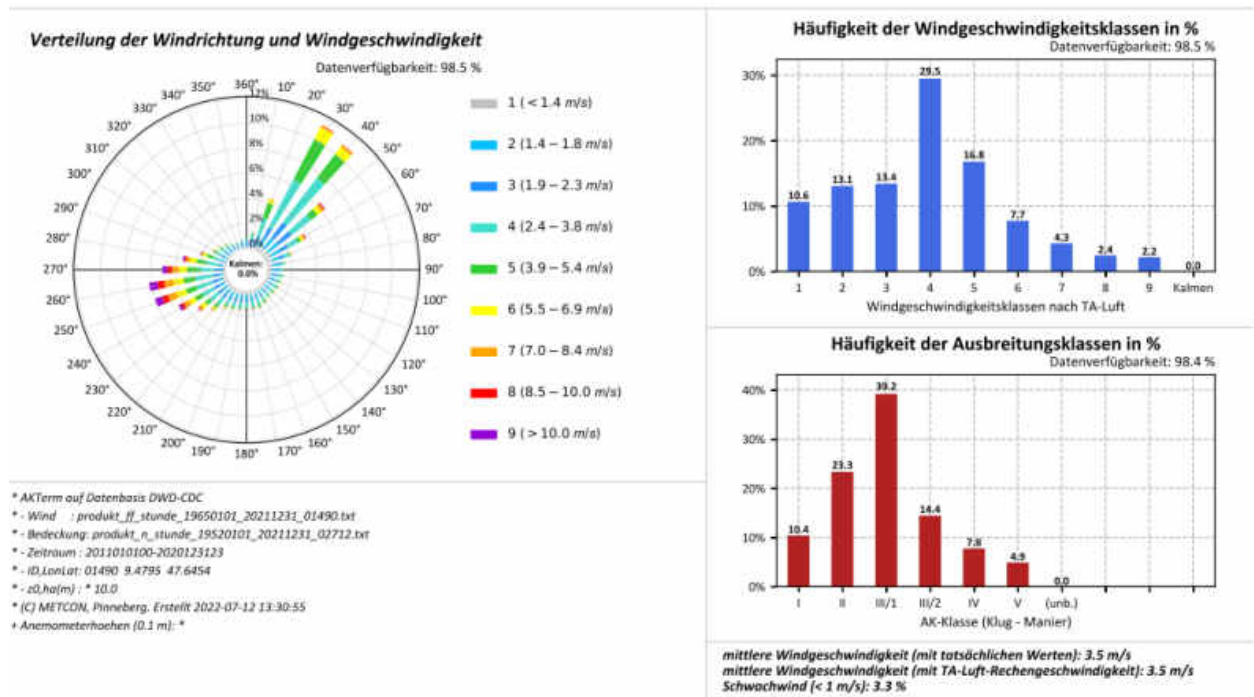


Abbildung A.32: Datenblätter der Messung (oben) und SynAKTerm 3.0 (unten) an der DWD-Station Freudenstadt (2011-2020).



Für den Vergleich gemessener und synthetischer Daten sind die Hinweise im Abschnitt 5.1 zu beachten.

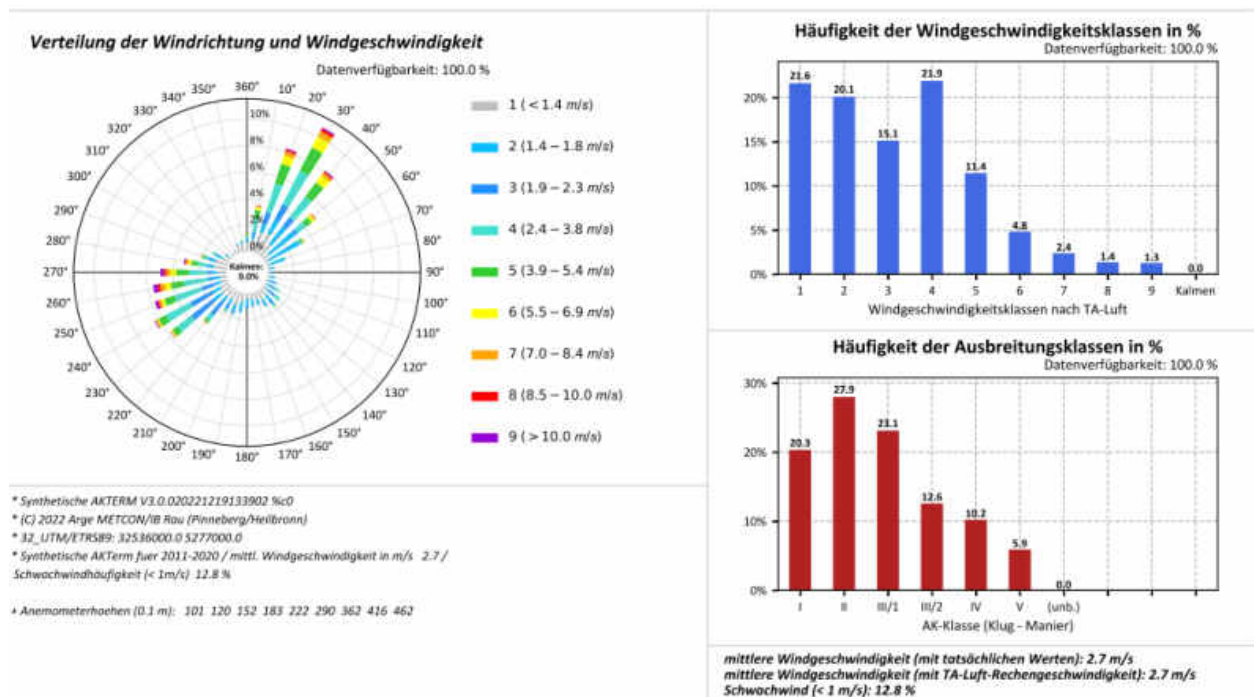
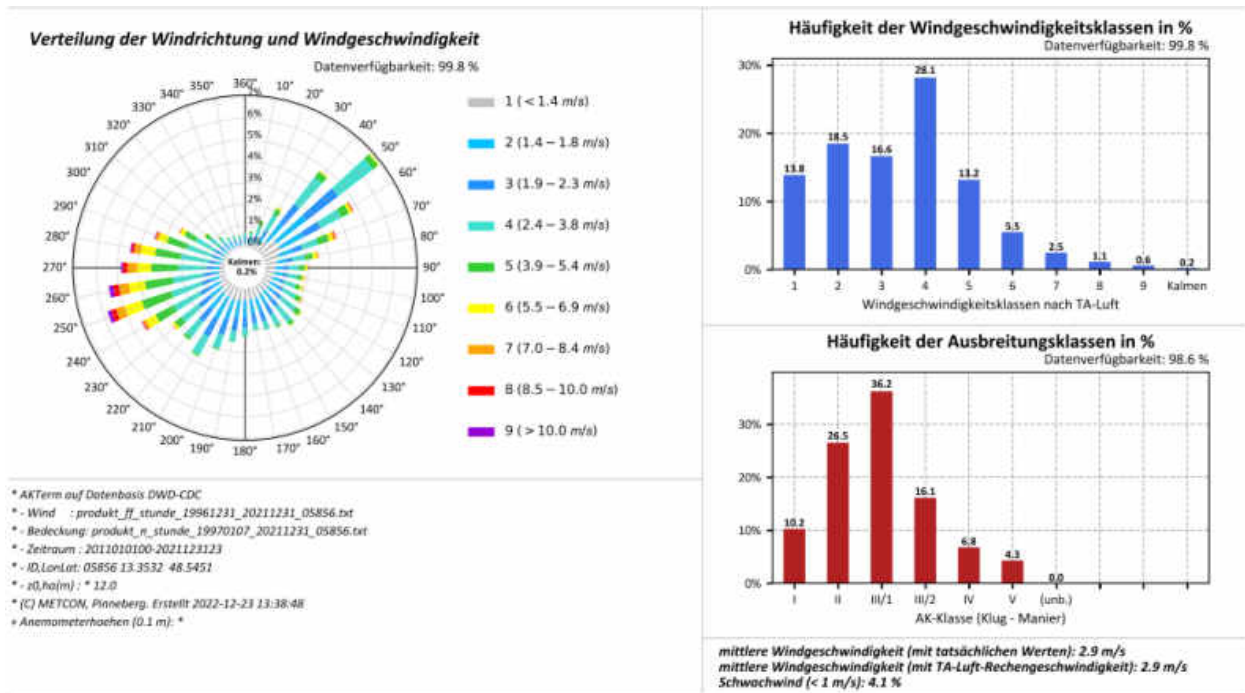


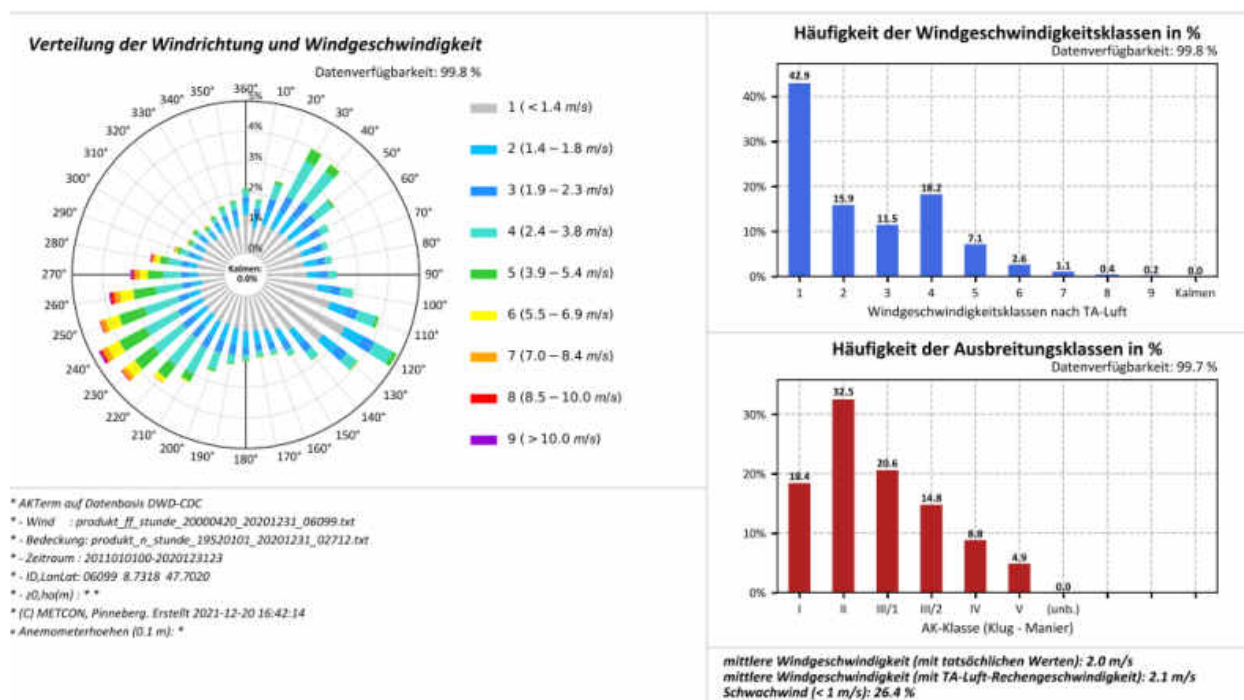
Abbildung A.33: Datenblätter der Messung (oben) und SynAKTerm 3.0 (unten) an der DWD-Station Friedrichshafen (2011-2020).





Für den Vergleich gemessener und synthetischer Daten sind die Hinweise im Abschnitt 5.1 zu beachten.

Abbildung A.34: Datenblätter der Messung (oben) und SynAKTerm 3.0 (unten) an der DWD-Station Fürstenzell (2011-2020).



Für den Vergleich gemessener und synthetischer Daten sind die Hinweise im Abschnitt 5.1 zu beachten.

Diese Station wird im Abschnitt 5.5 diskutiert.

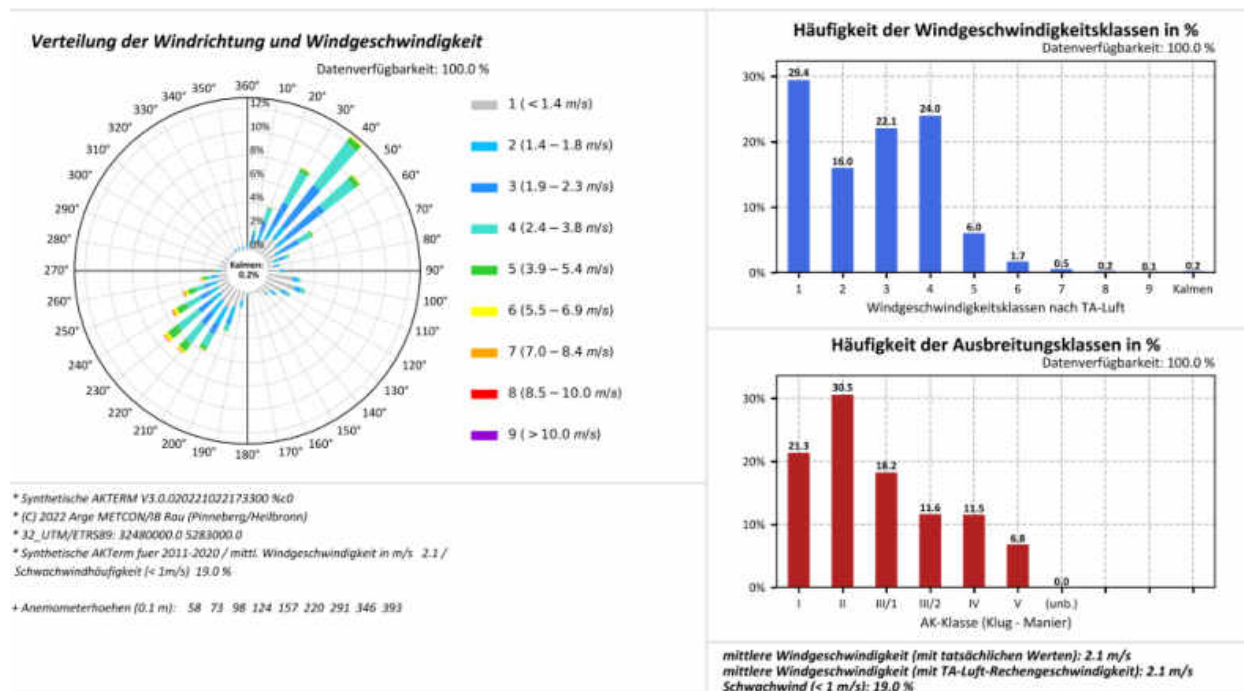
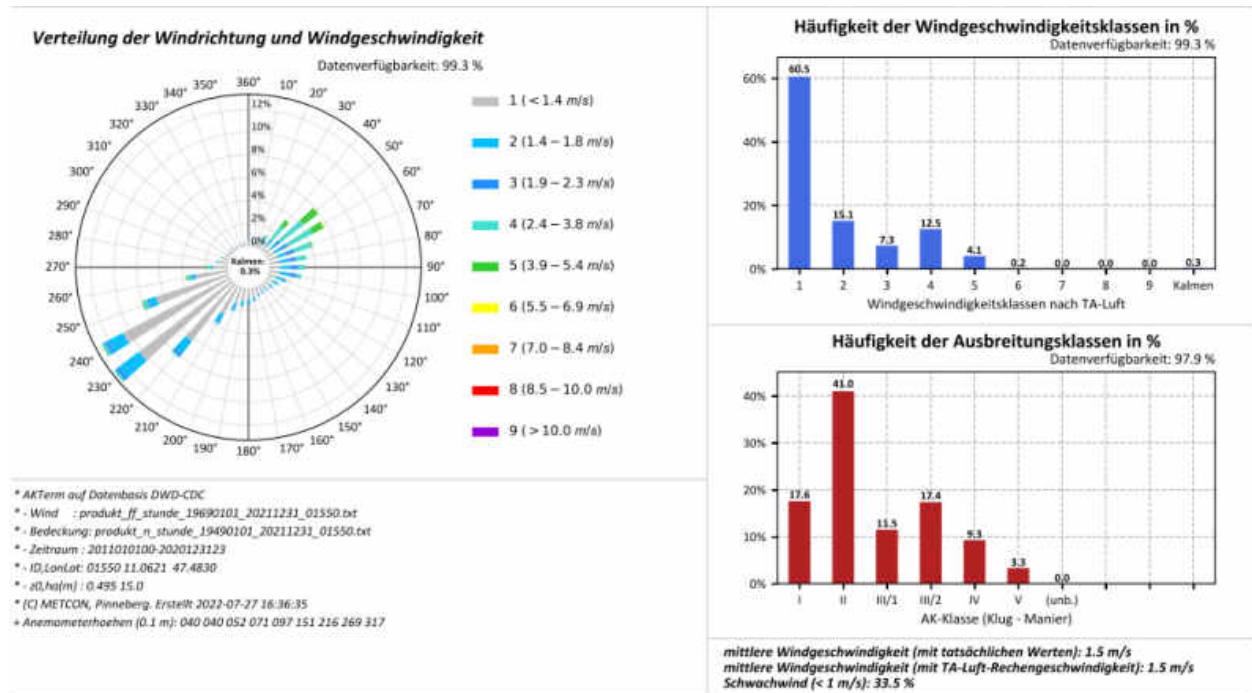
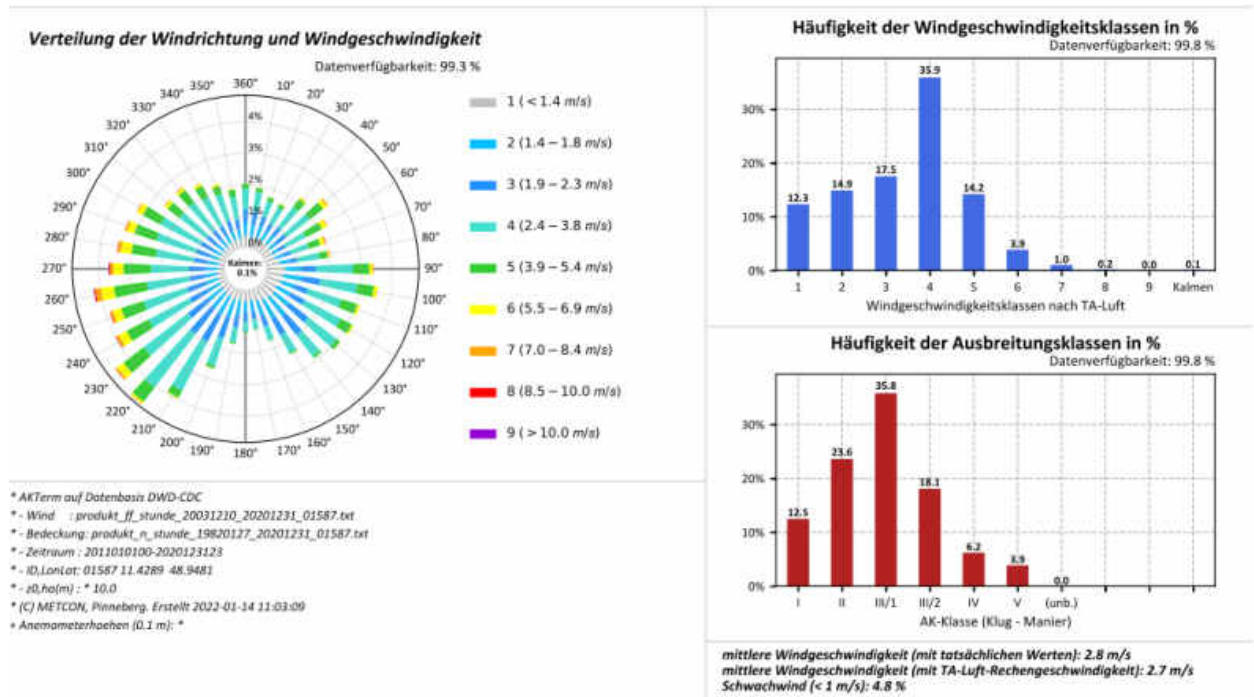


Abbildung A.35: Datenblätter der Messung (oben) und SynAKTerm 3.0 (unten) an der DWD-Station Gailingen (2011-2020).



Für den Vergleich gemessener und synthetischer Daten sind die Hinweise im Abschnitt 5.1 zu beachten.

Abbildung A.36: Datenblätter der Messung (oben) und SynAKTerm 3.0 (unten) an der DWD-Station Garmisch-Partenkirchen (2011-2020).



Für den Vergleich gemessener und synthetischer Daten sind die Hinweise im Abschnitt 5.1 zu beachten.

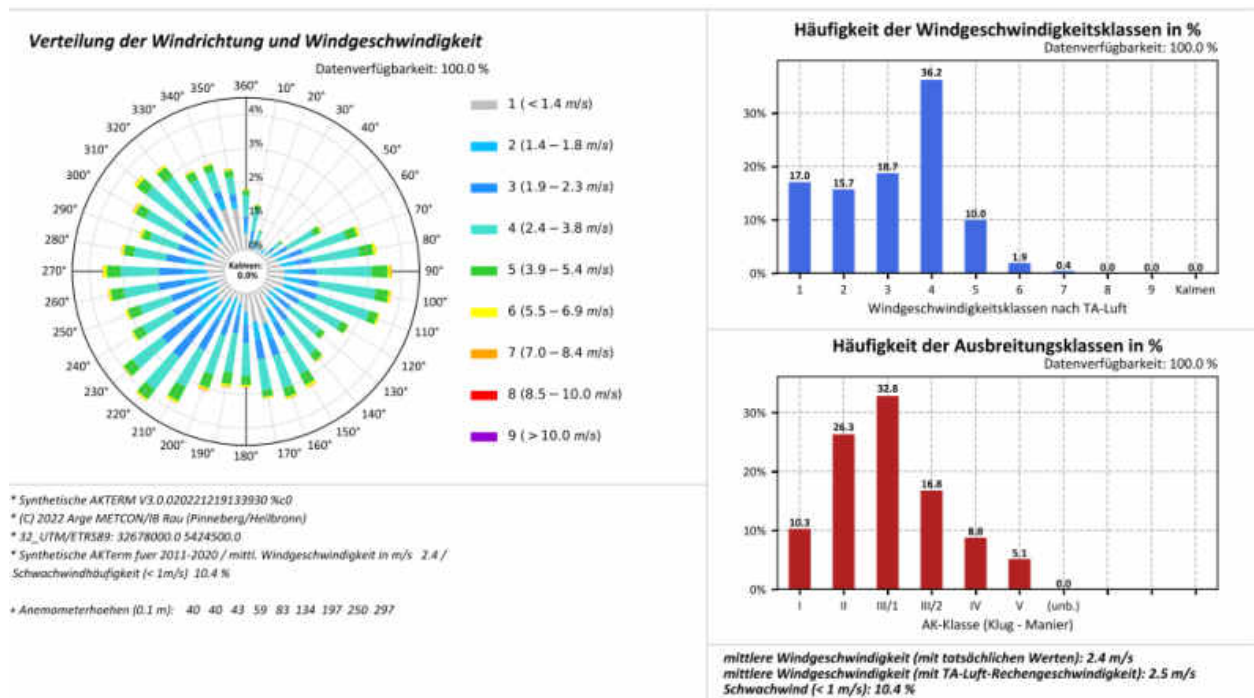
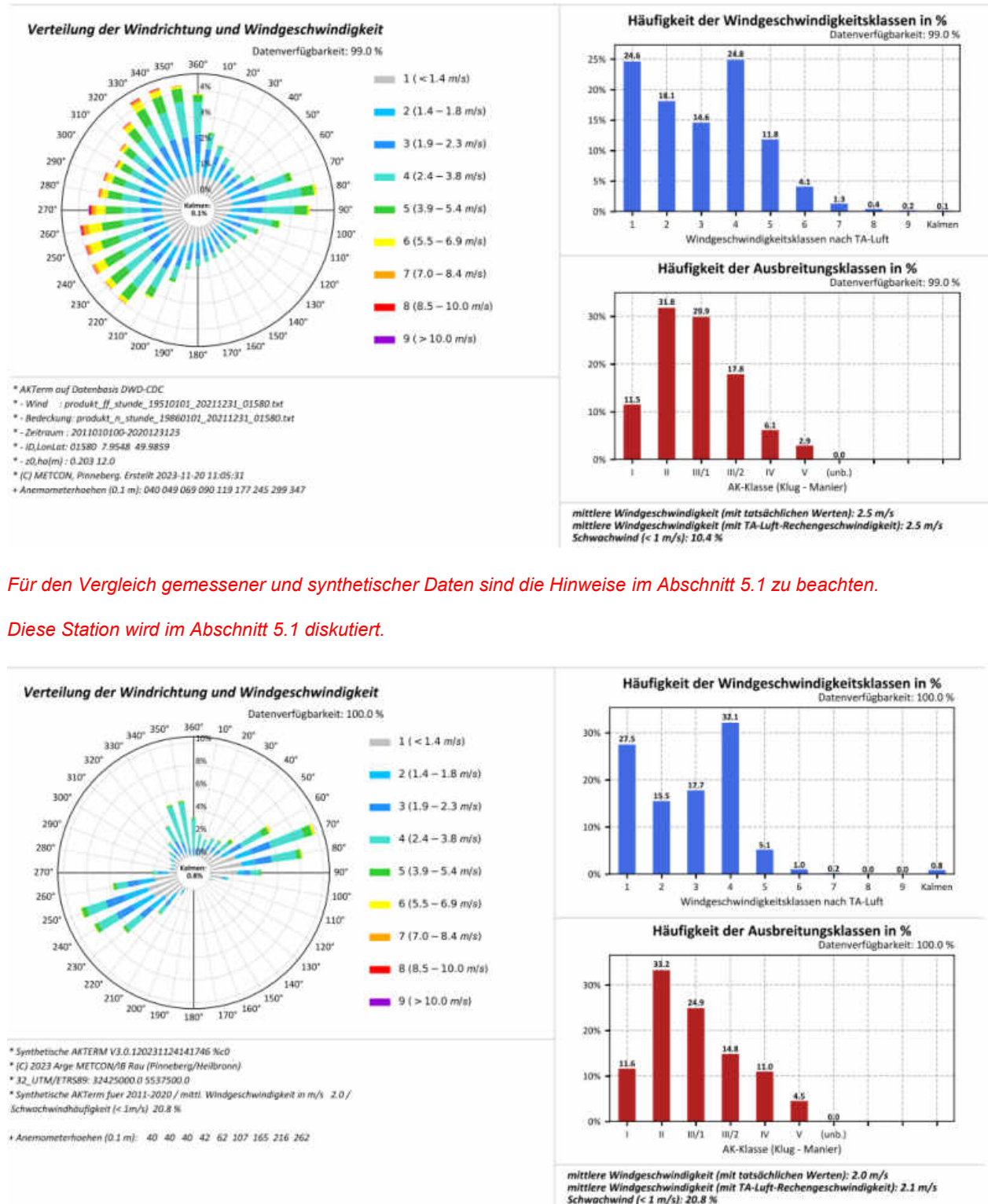


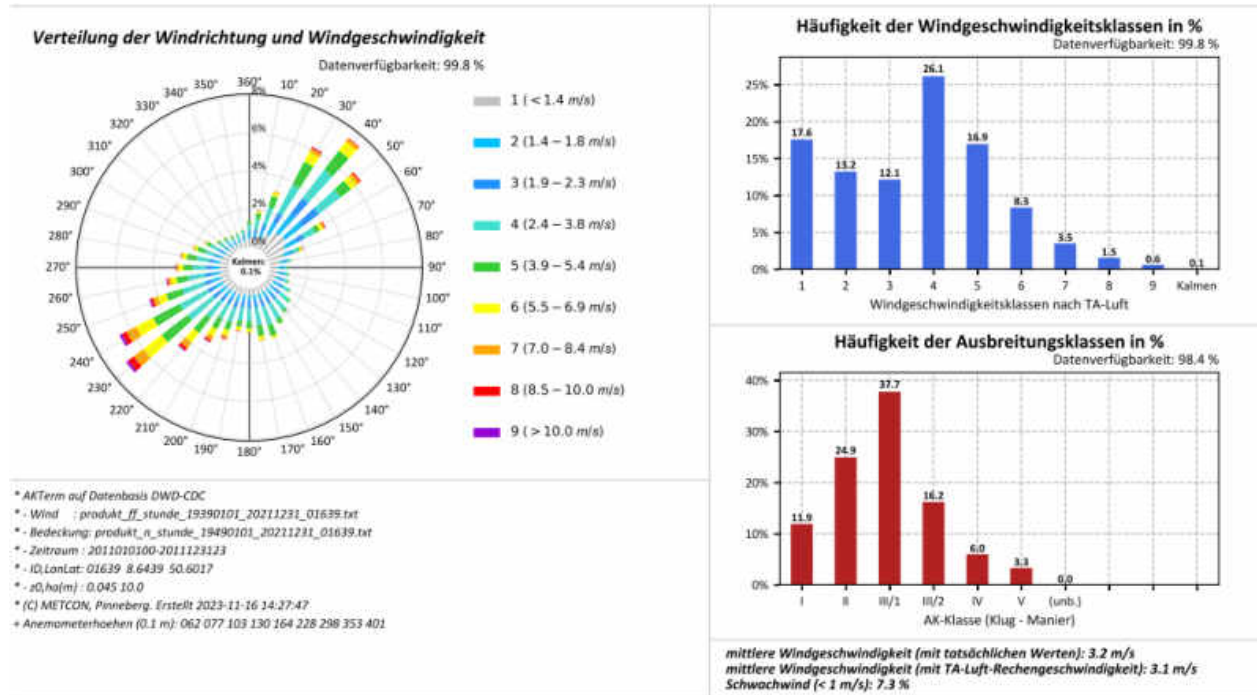
Abbildung A.37: Datenblätter der Messung (oben) und SynAKTerm 3.0 (unten) an der DWD-Station Geibelsee (2011-2020).



Für den Vergleich gemessener und synthetischer Daten sind die Hinweise im Abschnitt 5.1 zu beachten.

Diese Station wird im Abschnitt 5.1 diskutiert.

Abbildung A.38: Datenblätter der Messung (oben) und SynAKTerm 3.0 (unten) an der DWD-Station Geisenheim (2011-2020).



Für den Vergleich gemessener und synthetischer Daten sind die Hinweise im Abschnitt 5.1 zu beachten.

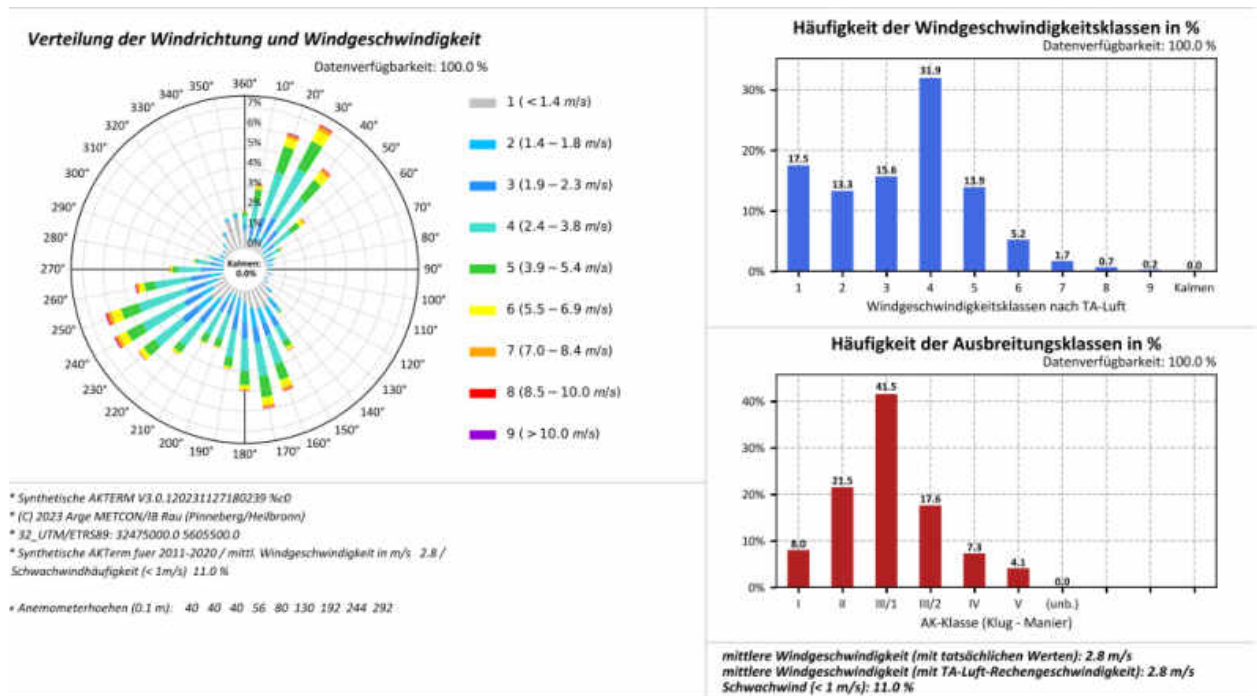
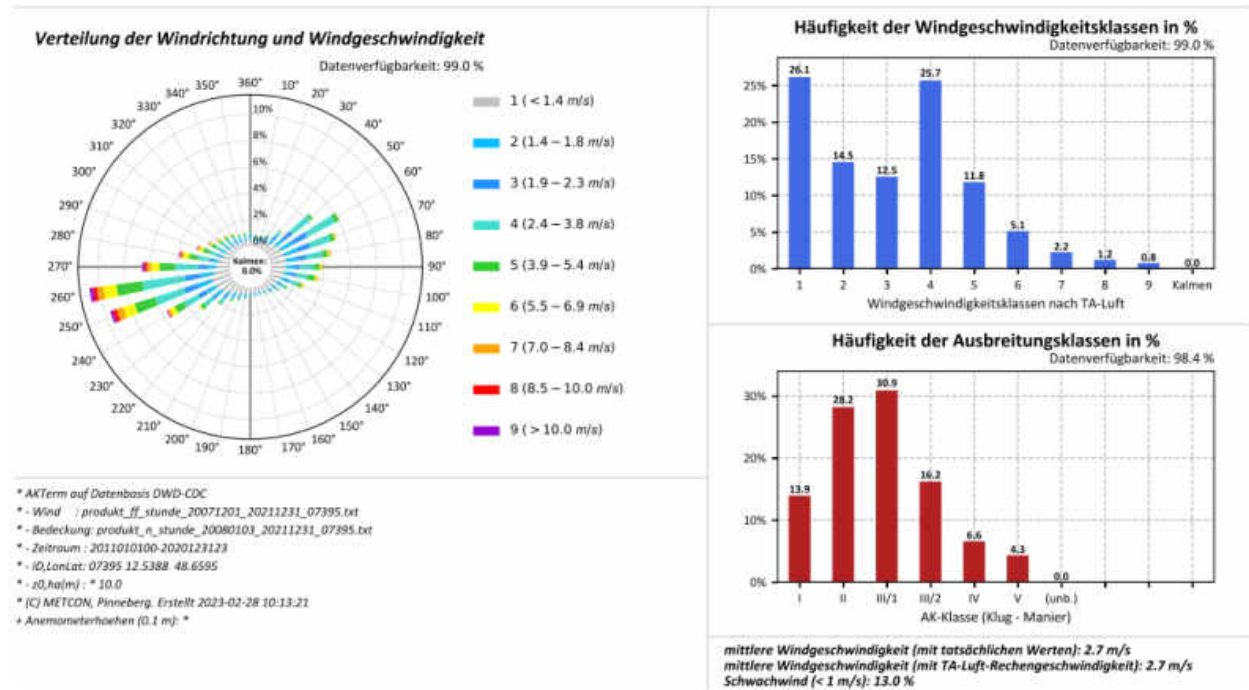
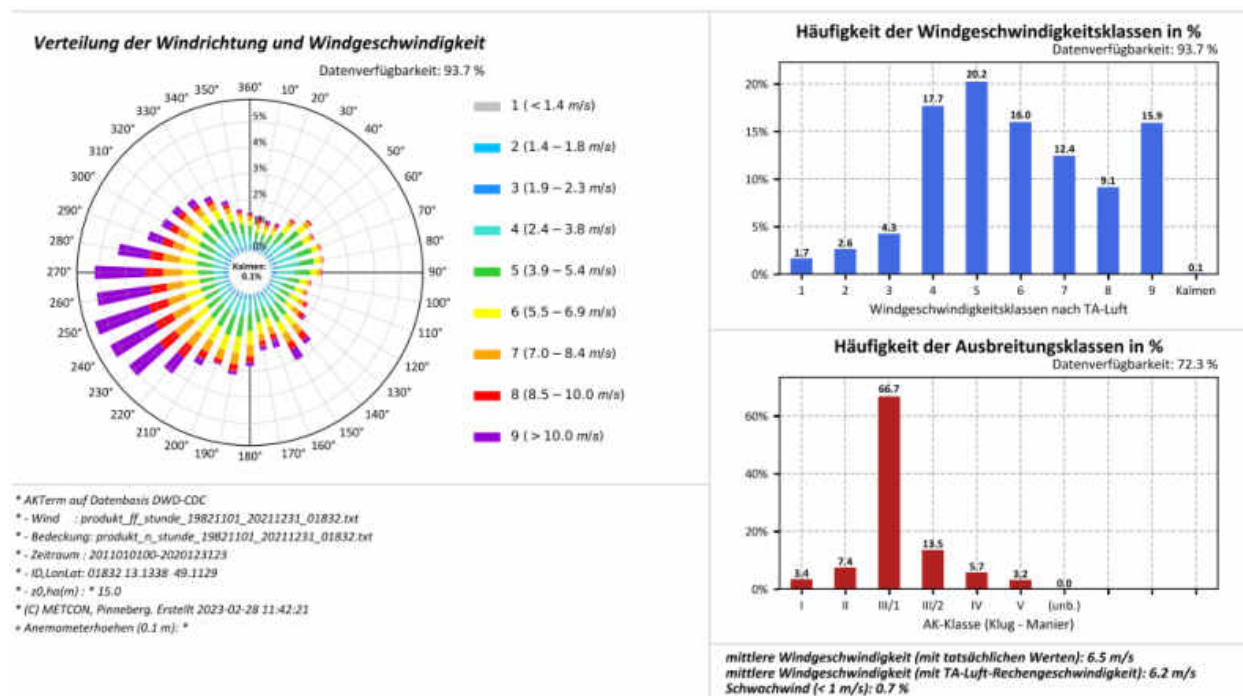


Abbildung A.39: Datenblätter der Messung (oben) und SynAKTerm 3.0 (unten) an der DWD-Station Gießen-Wettenberg (2011-2020).



Für den Vergleich gemessener und synthetischer Daten sind die Hinweise im Abschnitt 5.1 zu beachten.

Abbildung A.40: Datenblätter der Messung (oben) und SynAKTerm 3.0 (unten) an der DWD-Station Gottfrieding (2011-2020).



Für den Vergleich gemessener und synthetischer Daten sind die Hinweise im Abschnitt 5.1 zu beachten.

Diese Station wird im Abschnitt 5.5 diskutiert.

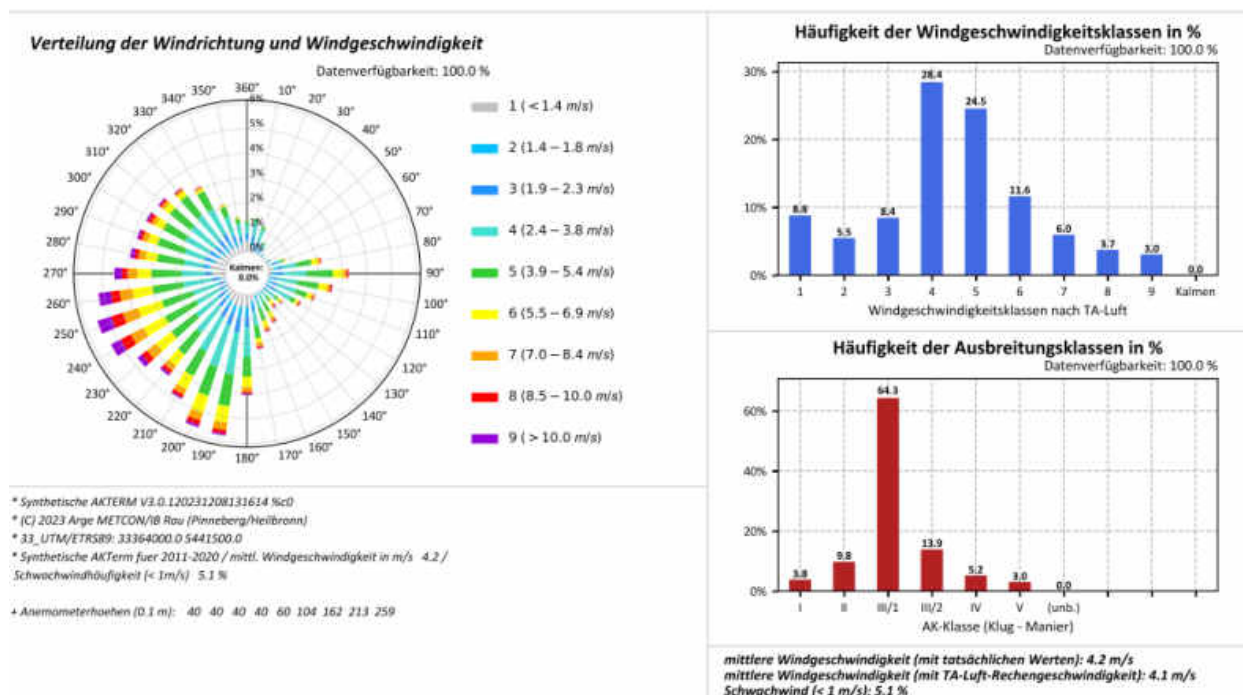
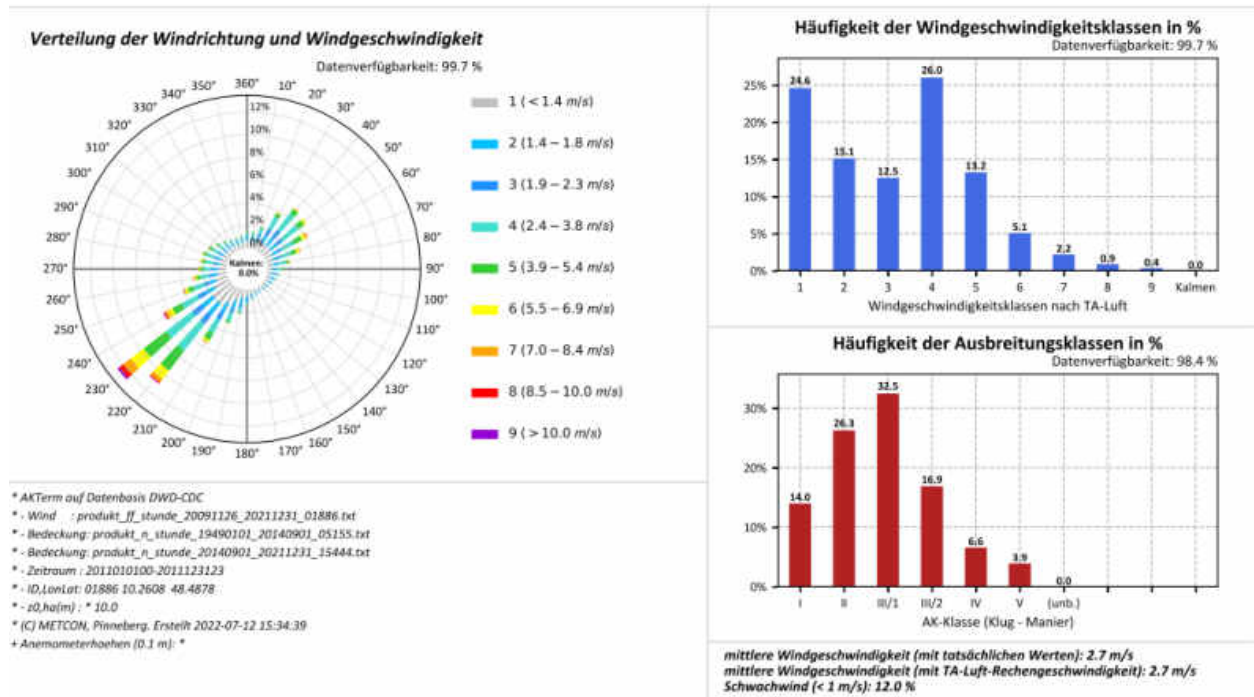


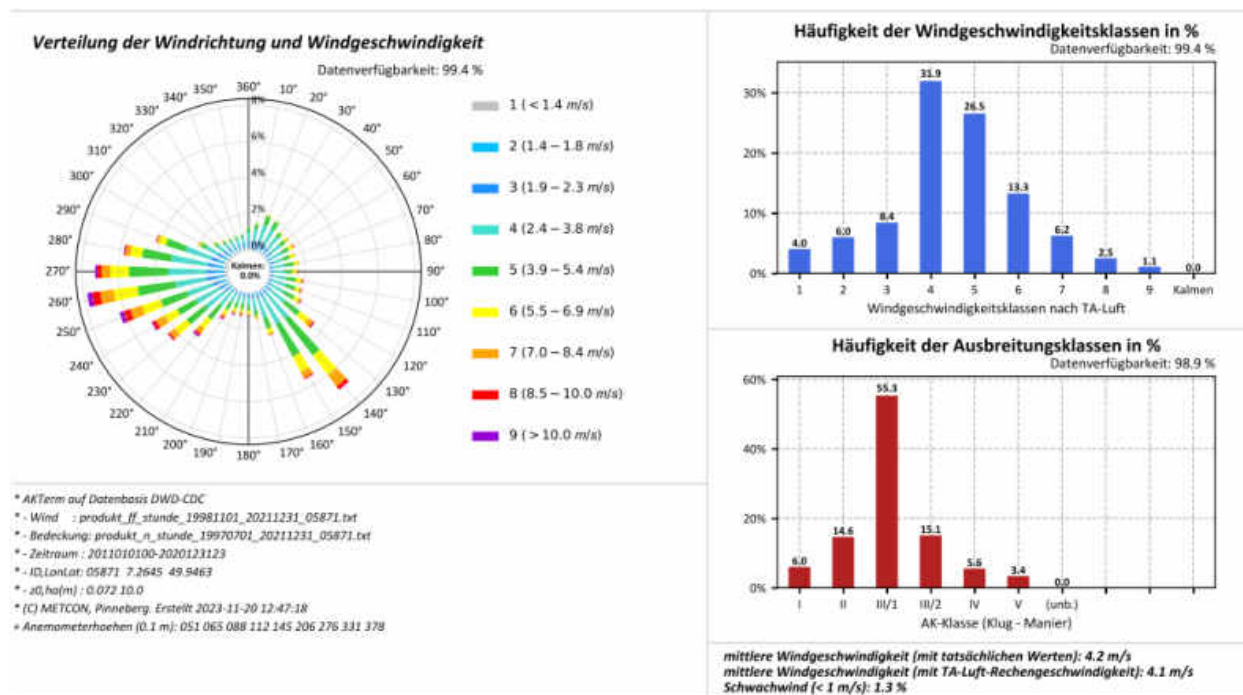
Abbildung A.41: Datenblätter der Messung (oben) und SynAKTerm 3.0 (unten) an der DWD-Station Groß Arber (2011-2020).





Für den Vergleich gemessener und synthetischer Daten sind die Hinweise im Abschnitt 5.1 zu beachten.

Abbildung A.42: Datenblätter der Messung (oben) und SynAKTerm 3.0 (unten) an der DWD-Station Günzburg (2011-2020).



Für den Vergleich gemessener und synthetischer Daten sind die Hinweise im Abschnitt 5.1 zu beachten.

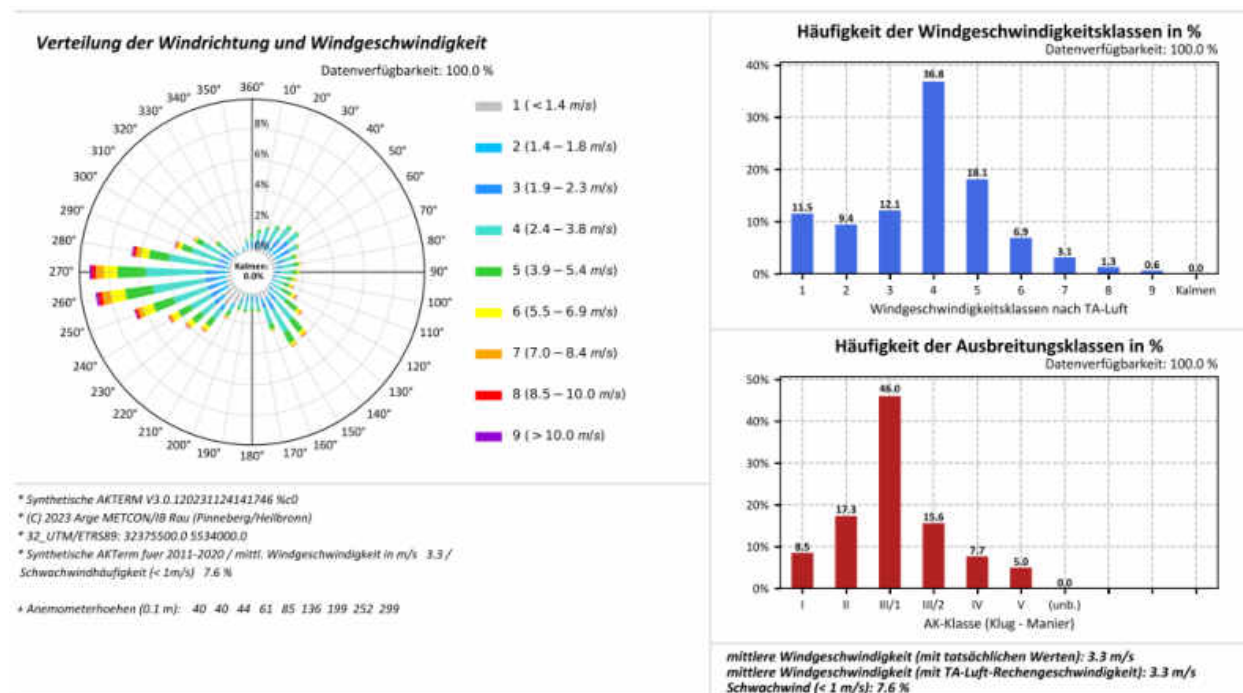
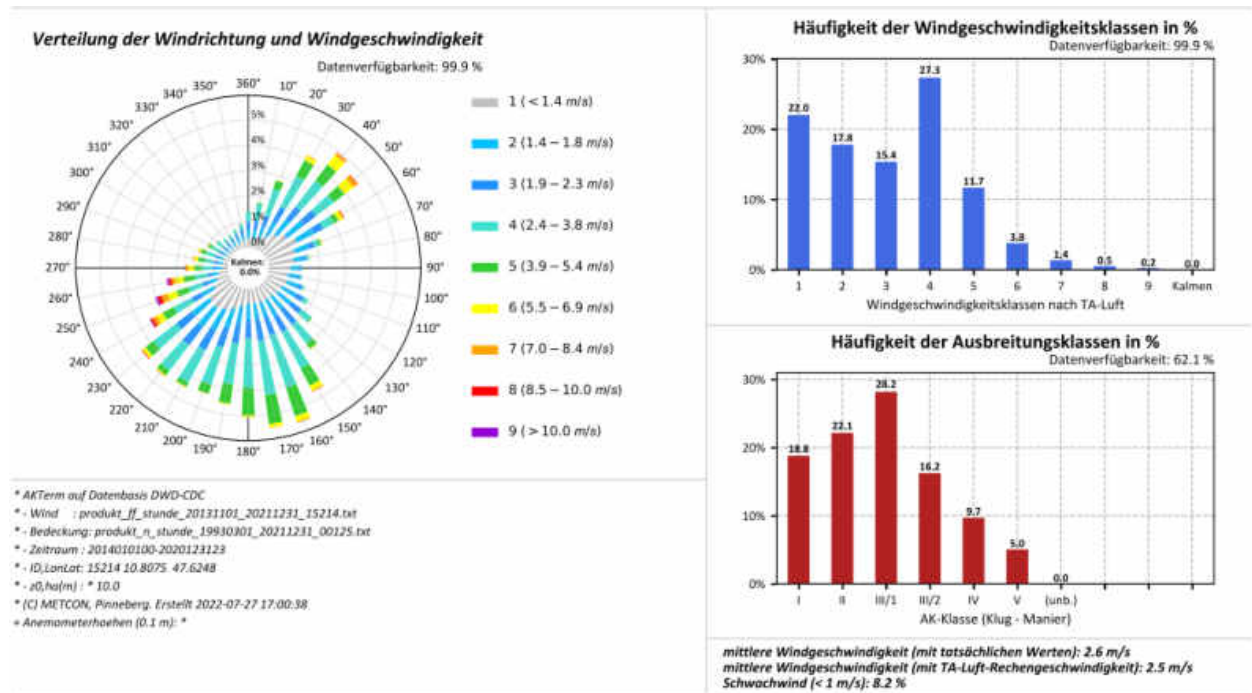


Abbildung A.43: Datenblätter der Messung (oben) und SynAKTerm 3.0 (unten) an der DWD-Station Hahn (2011-2020).



Für den Vergleich gemessener und synthetischer Daten sind die Hinweise im Abschnitt 5.1 zu beachten.

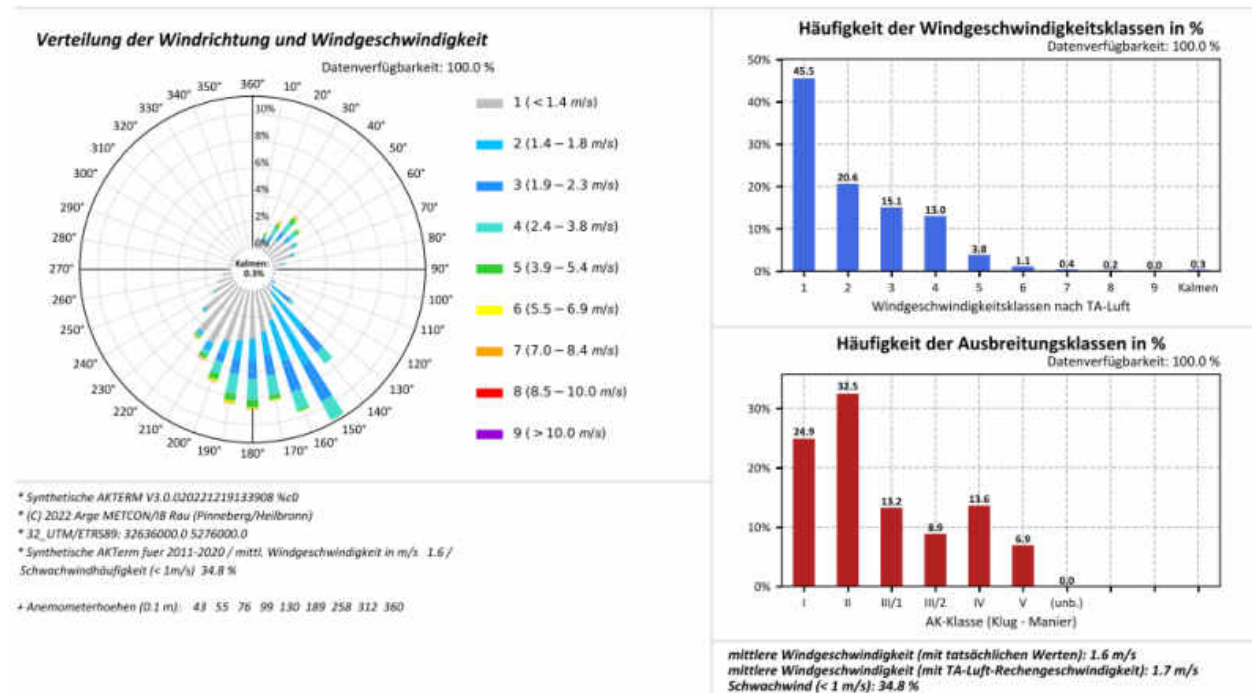
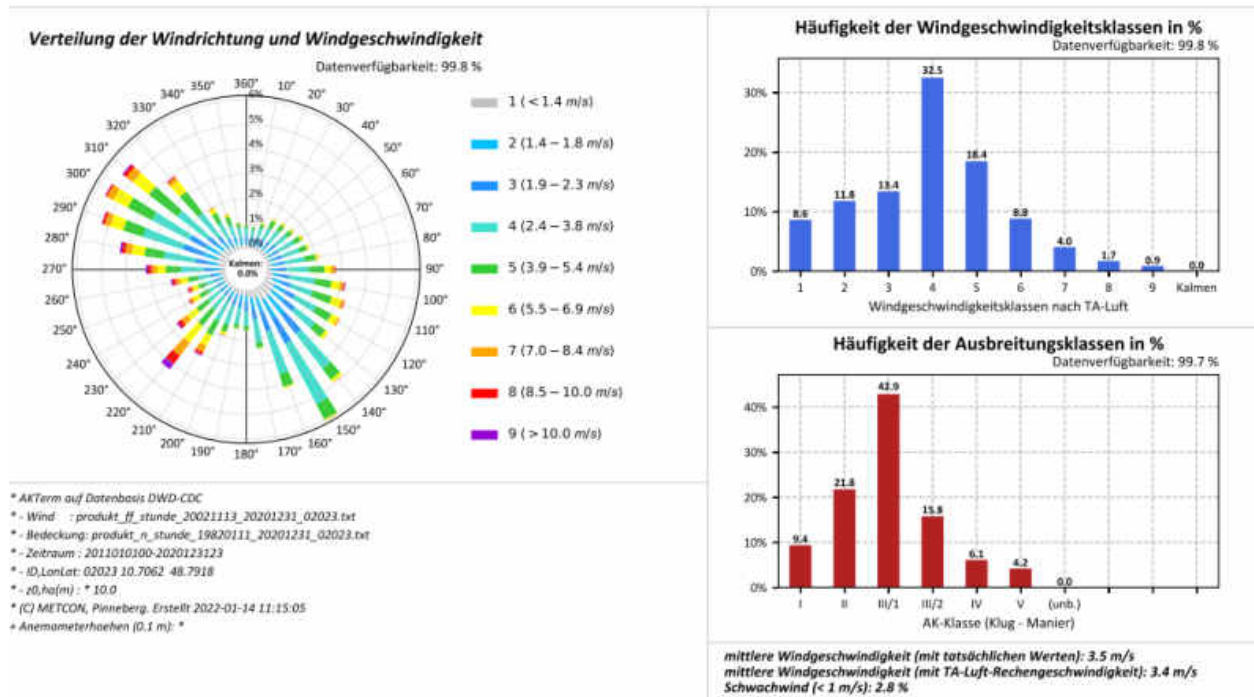


Abbildung A.44: Datenblätter der Messung (oben) und SynAKTerm 3.0 (unten) an der DWD-Station Halblech-Bayerniederhofen (2014/2011-2020).



Für den Vergleich gemessener und synthetischer Daten sind die Hinweise im Abschnitt 5.1 zu beachten.

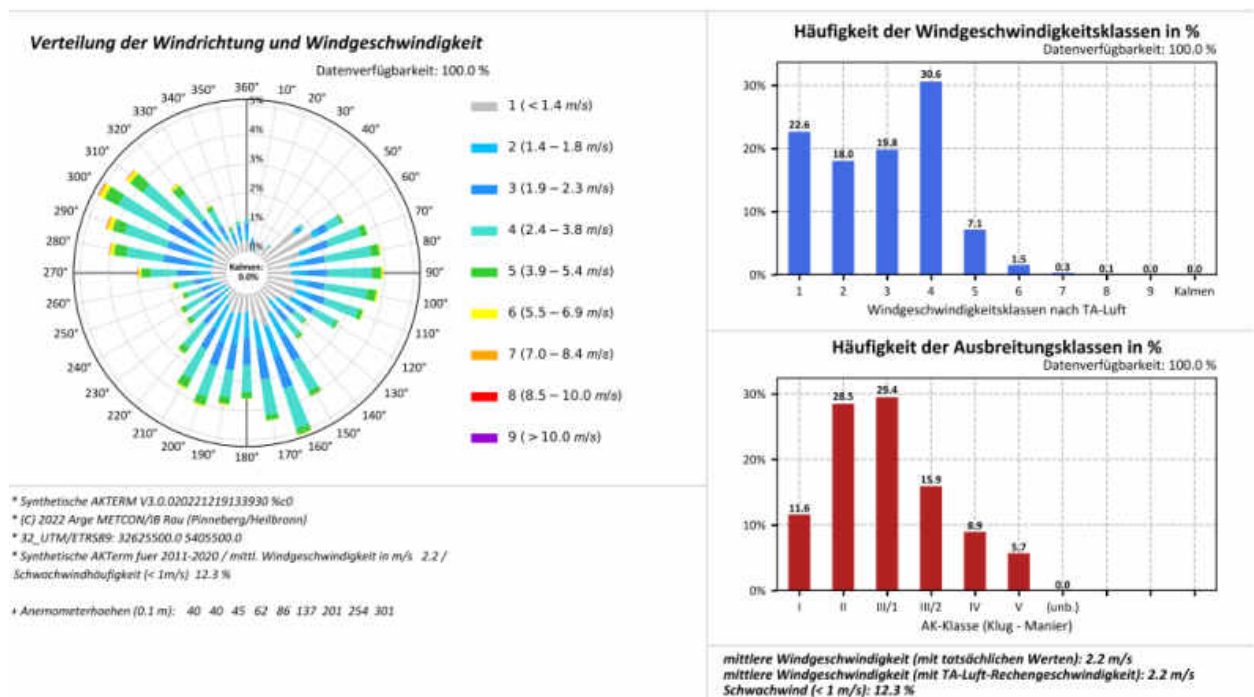
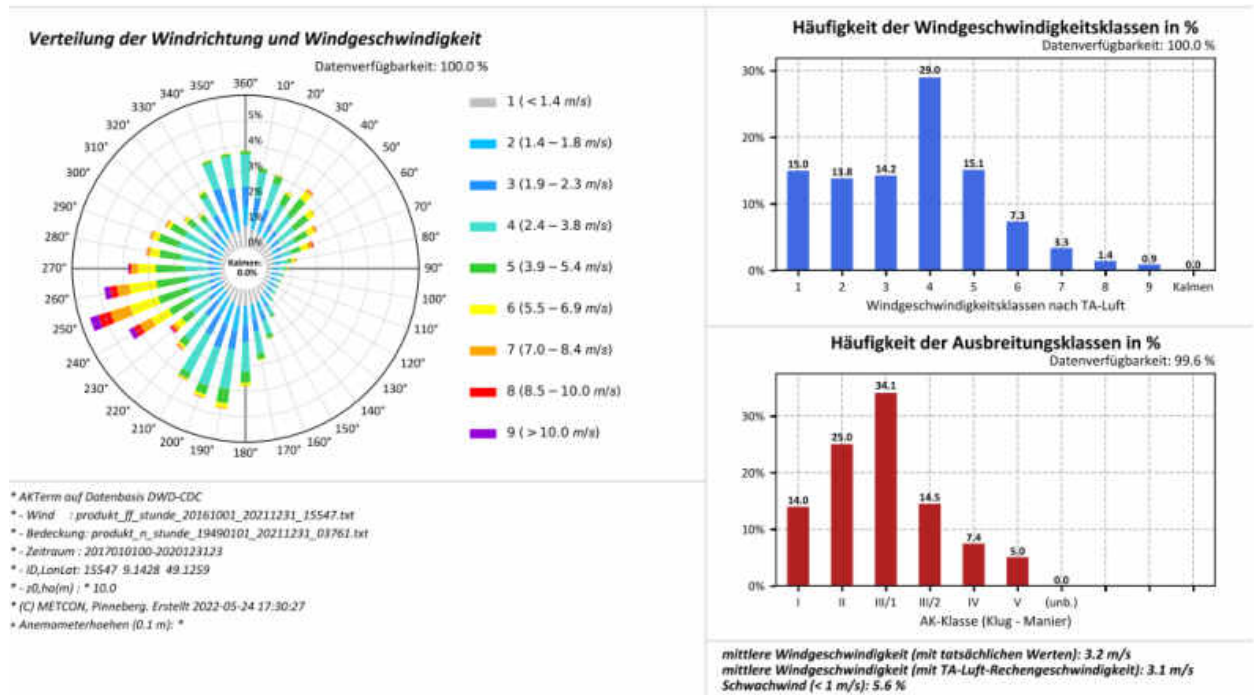


Abbildung A.45: Datenblätter der Messung (oben) und SynAKTerm 3.0 (unten) an der DWD-Station Harburg (2011-2020).



Für den Vergleich gemessener und synthetischer Daten sind die Hinweise im Abschnitt 5.1 zu beachten.

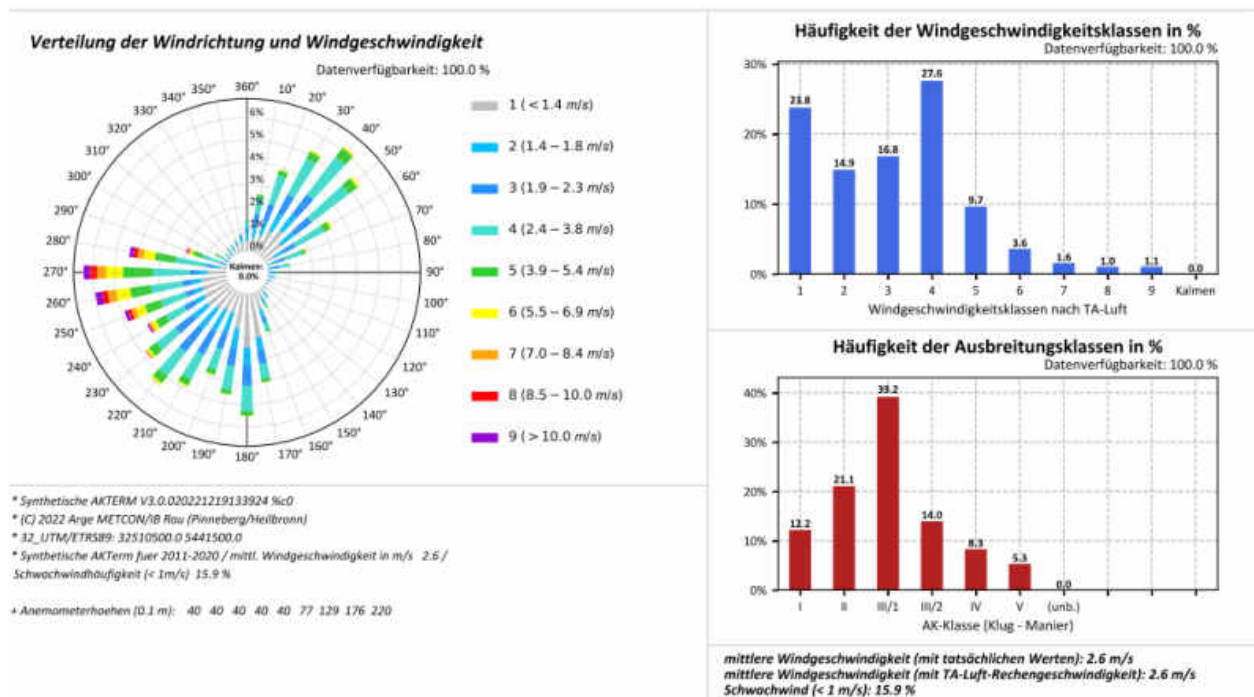
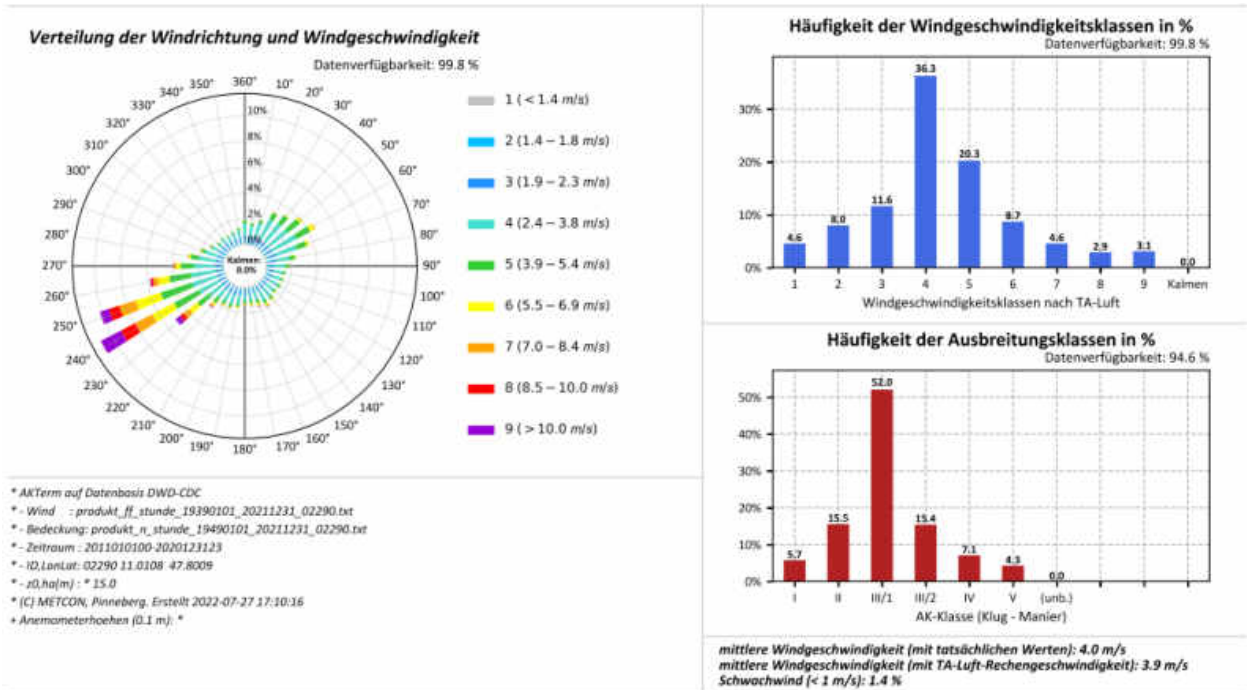


Abbildung A.46: Datenblätter der Messung (oben) und SynAKTerm 3.0 (unten) an der DWD-Station Heilbronn (2018/2011-2020).



Für den Vergleich gemessener und synthetischer Daten sind die Hinweise im Abschnitt 5.1 zu beachten.

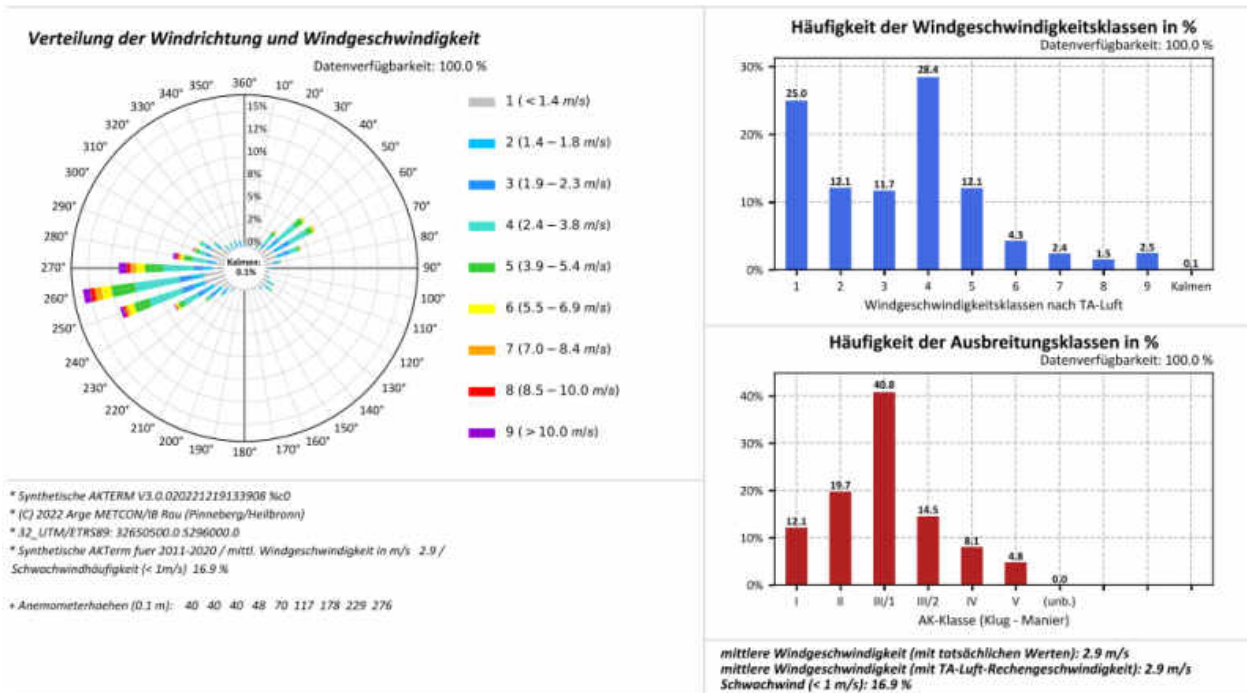
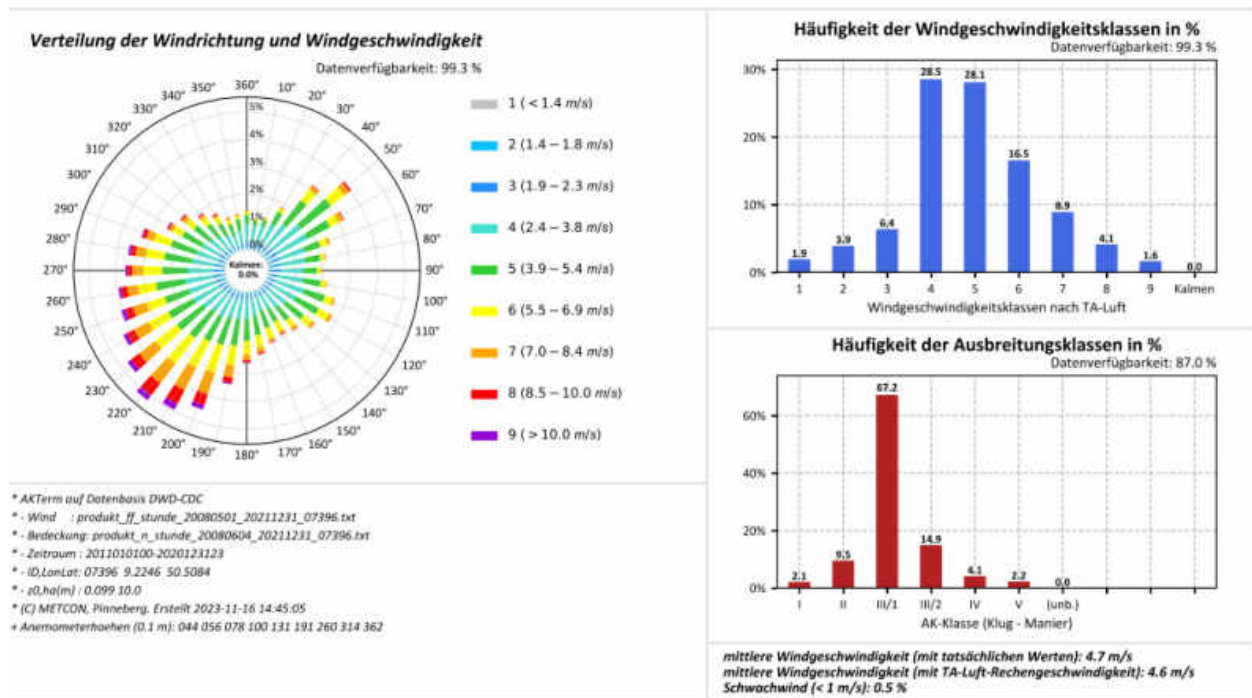


Abbildung A.47: Datenblätter der Messung (oben) und SynAKTerm 3.0 (unten) an der DWD-Station Hohenpeißenberg (2011-2020).



Für den Vergleich gemessener und synthetischer Daten sind die Hinweise im Abschnitt 5.1 zu beachten.

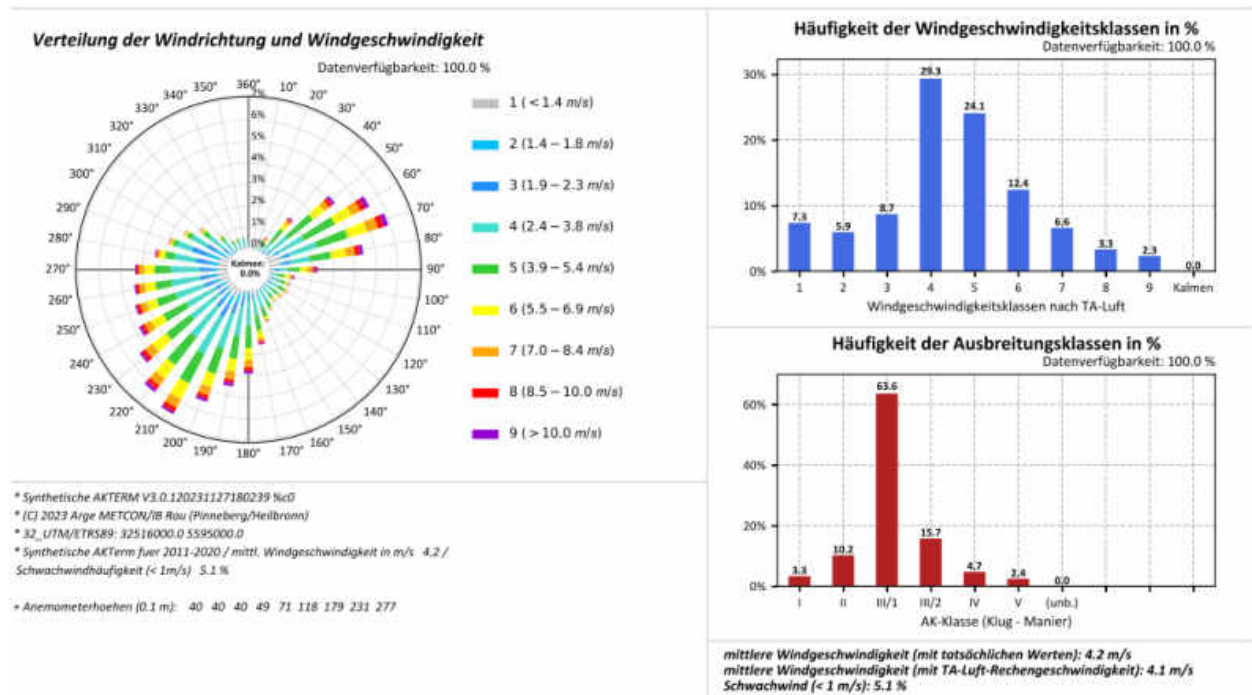
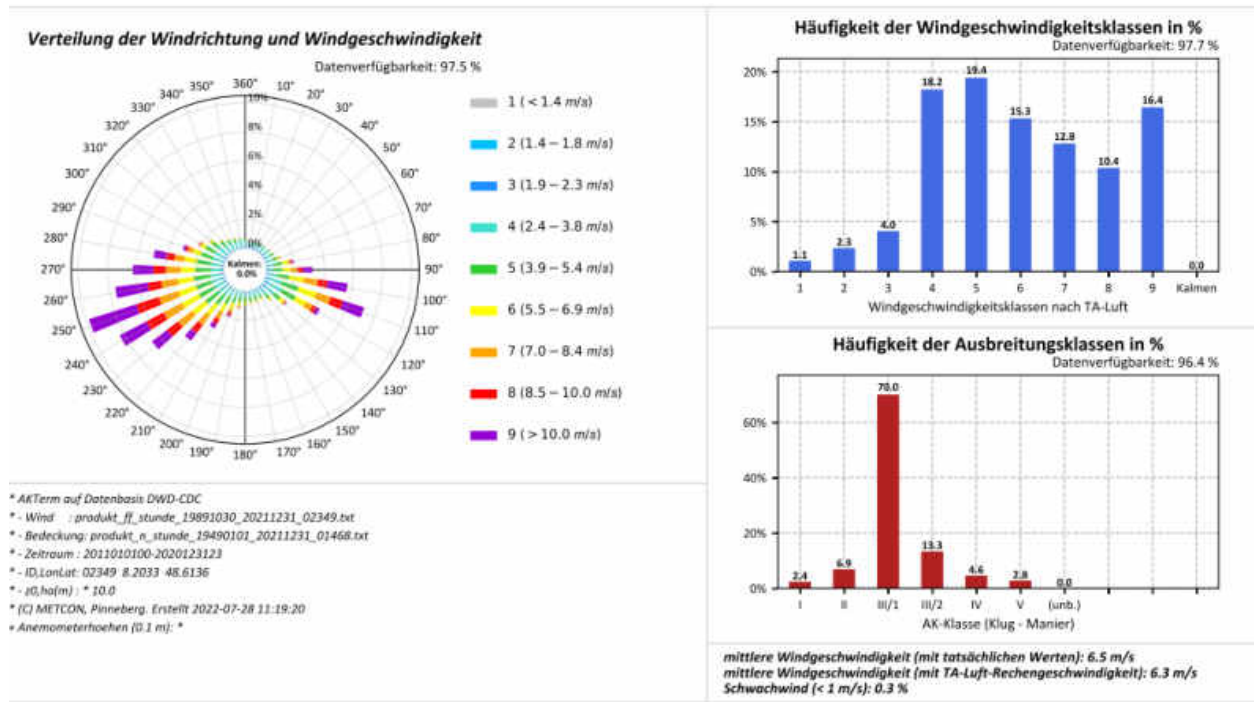


Abbildung A.48: Datenblätter der Messung (oben) und SynAKTerm 3.0 (unten) an der DWD-Station Hoherodtskopf-Vogelsberg (2011-2020).



Für den Vergleich gemessener und synthetischer Daten sind die Hinweise im Abschnitt 5.1 zu beachten.

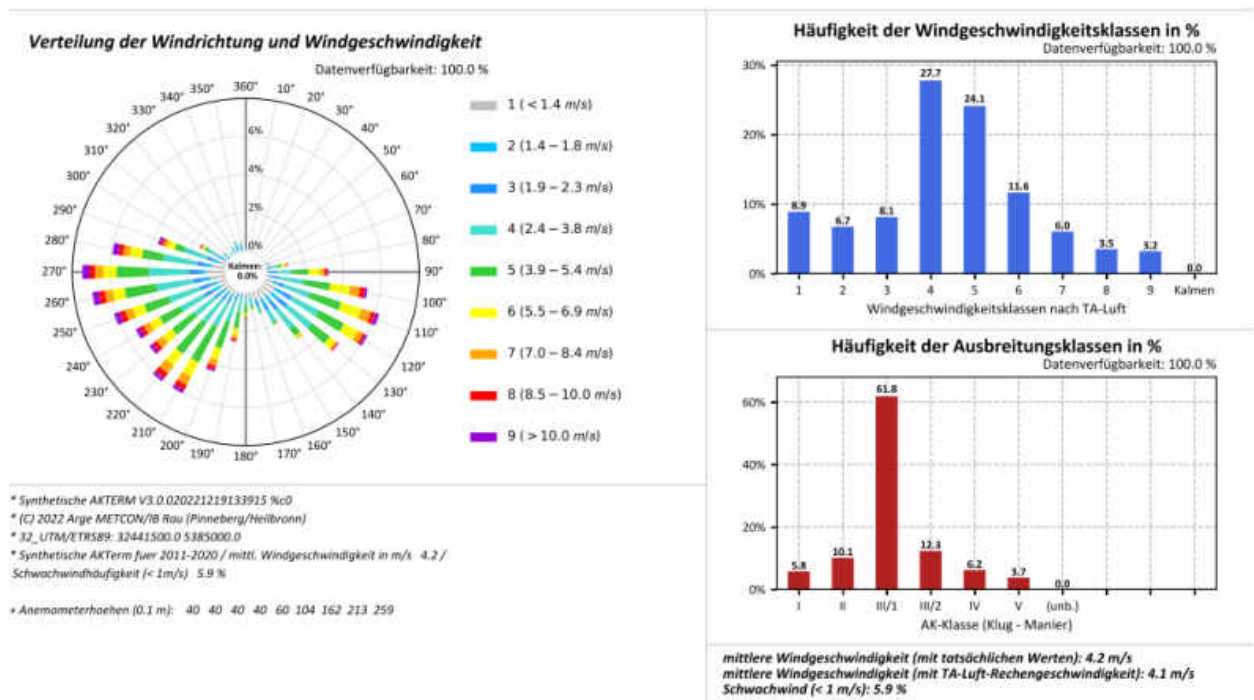
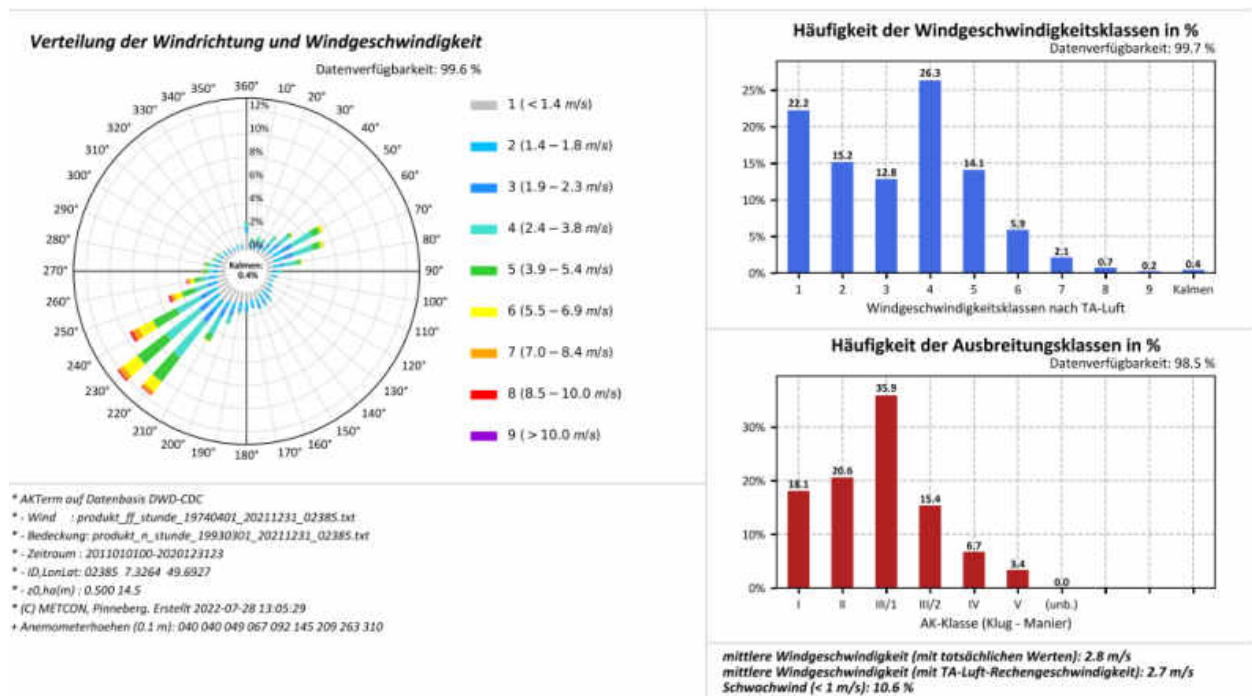


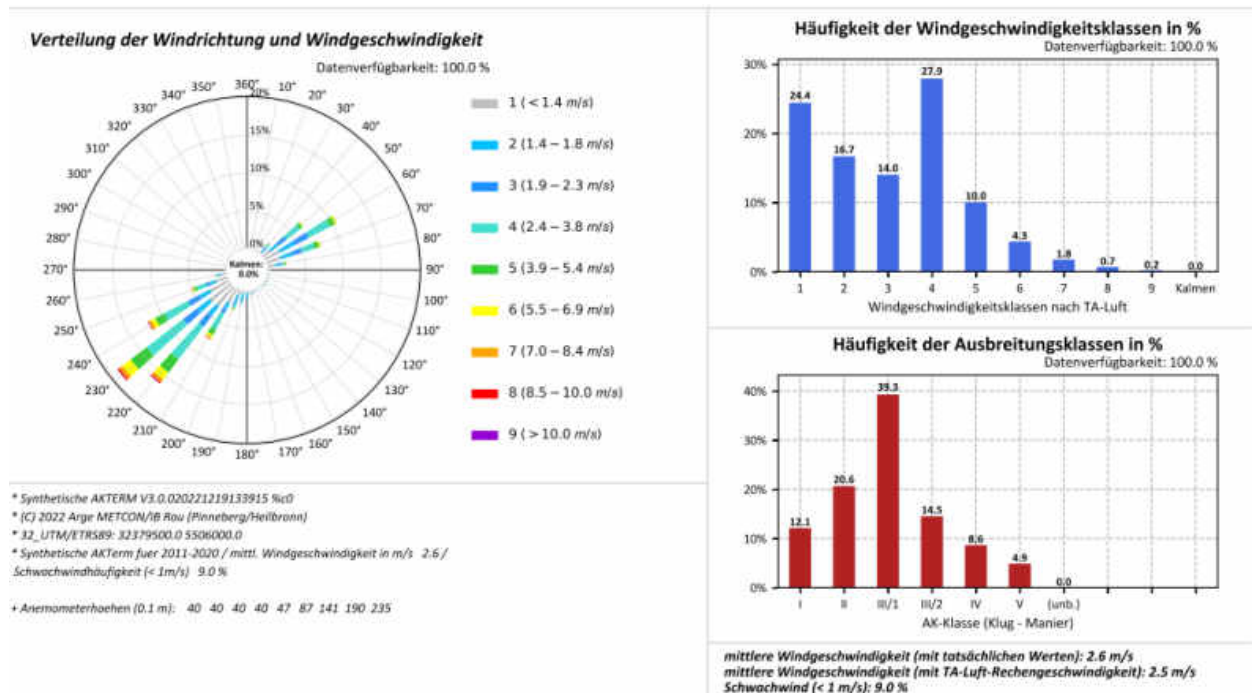
Abbildung A.49: Datenblätter der Messung (oben) und SynAKTerm 3.0 (unten) an der DWD-Station Hornisgrinde (2011-2020).

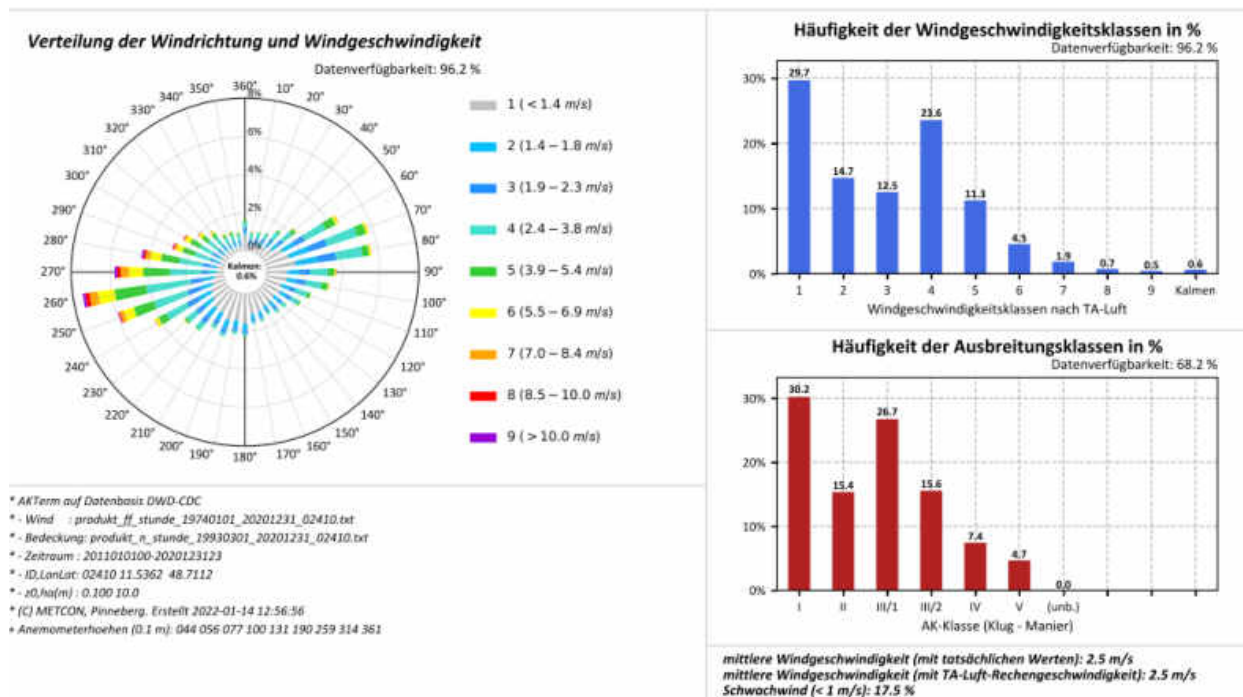




Für den Vergleich gemessener und synthetischer Daten sind die Hinweise im Abschnitt 5.1 zu beachten.

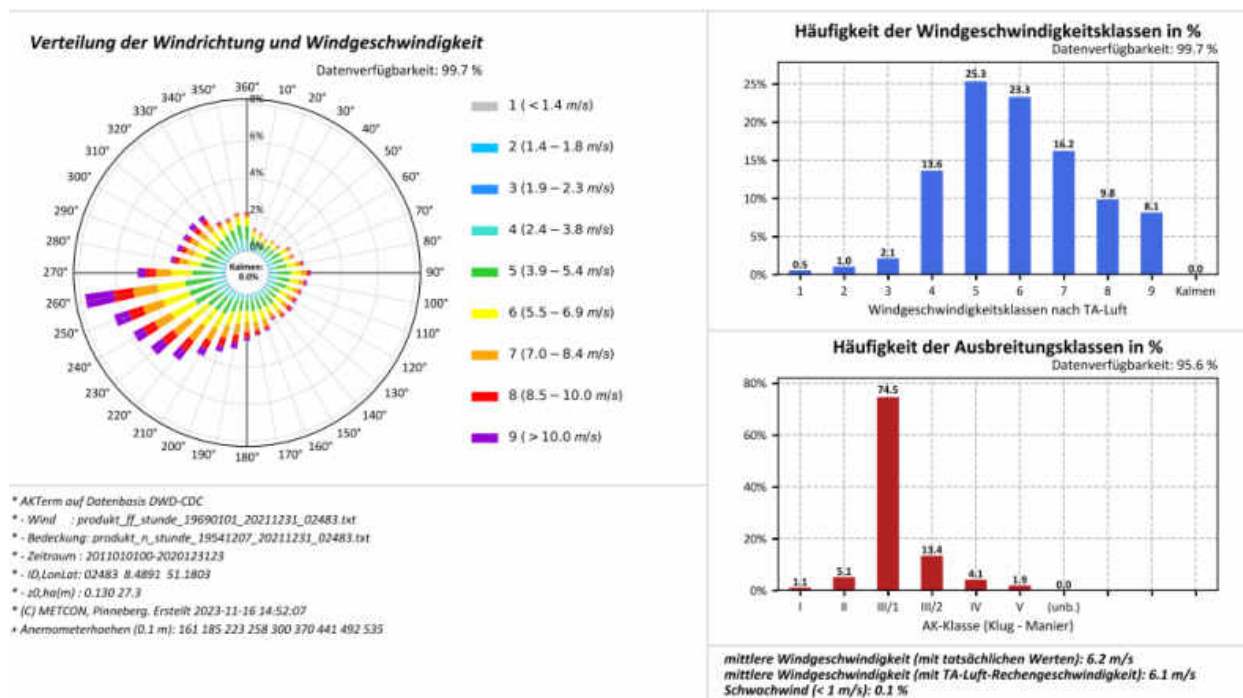
Diese Station wird im Abschnitt 5.5 diskutiert.





Für den Vergleich gemessener und synthetischer Daten sind die Hinweise im Abschnitt 5.1 zu beachten.

Abbildung A.51: Datenblätter der Messung (oben) und SynAKTerm 3.0 (unten) an der DWD-Station Ingolstadt (2011-2020).



Für den Vergleich gemessener und synthetischer Daten sind die Hinweise im Abschnitt 5.1 zu beachten.

Diese Station wird in den Abschnitten 5.3 und 5.5 diskutiert.

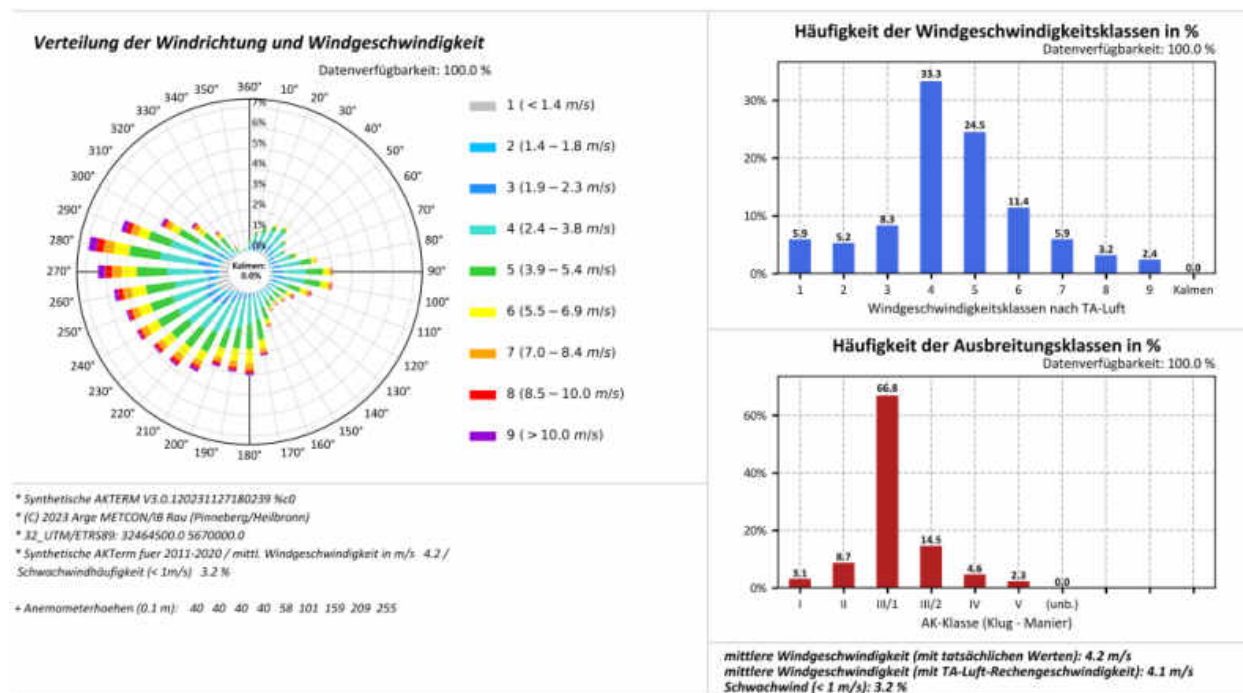
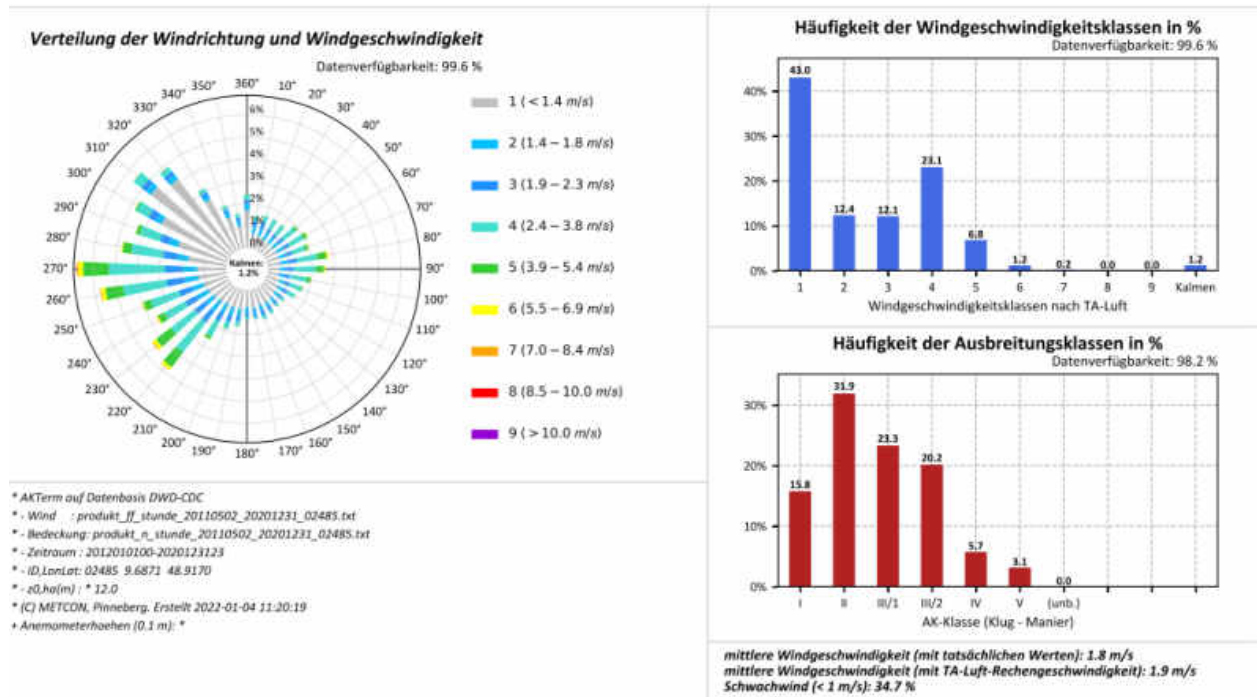


Abbildung A.52: Datenblätter der Messung (oben) und SynAKTerm 3.0 (unten) an der DWD-Station Kahler Asten (2011-2020).

Dokumentation SynAKTerm® 3.0



Für den Vergleich gemessener und synthetischer Daten sind die Hinweise im Abschnitt 5.1 zu beachten.

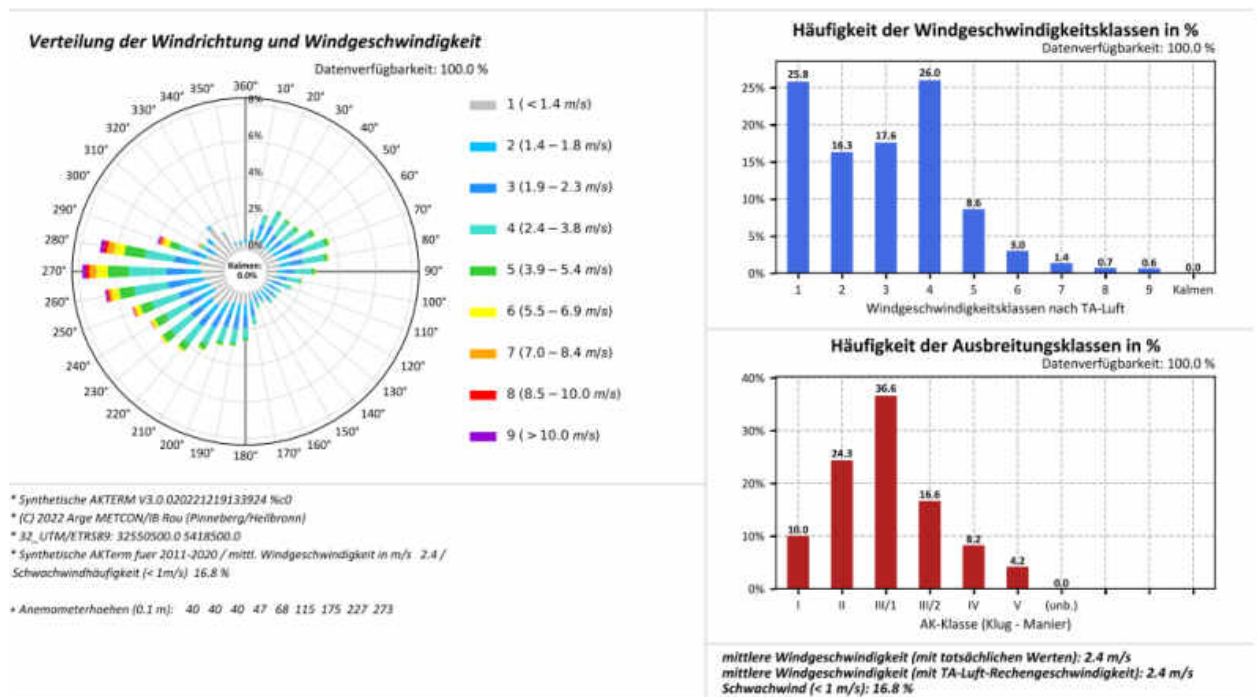
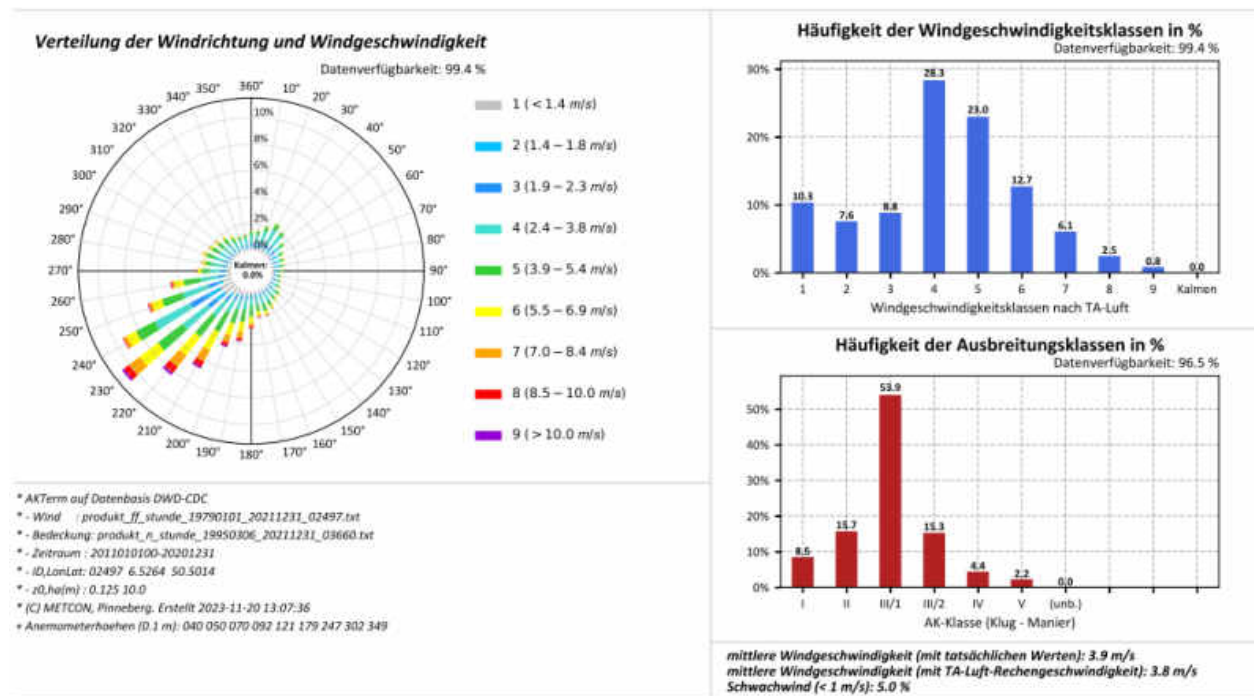


Abbildung A.53: Datenblätter der Messung (oben) und SynAKTerm 3.0 (unten) an der DWD-Station Kaisersbach-Cronhütte (2012/2011-2020).



Für den Vergleich gemessener und synthetischer Daten sind die Hinweise im Abschnitt 5.1 zu beachten.

Diese Station wird im Abschnitt 5.5 diskutiert.

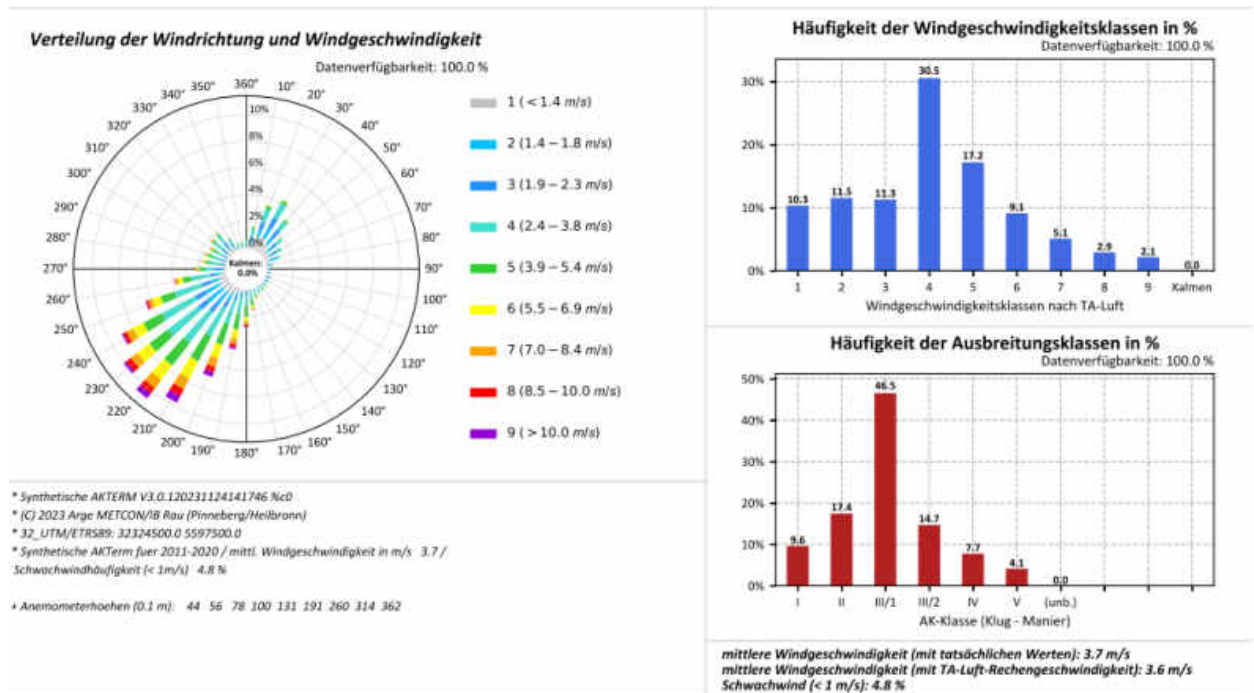
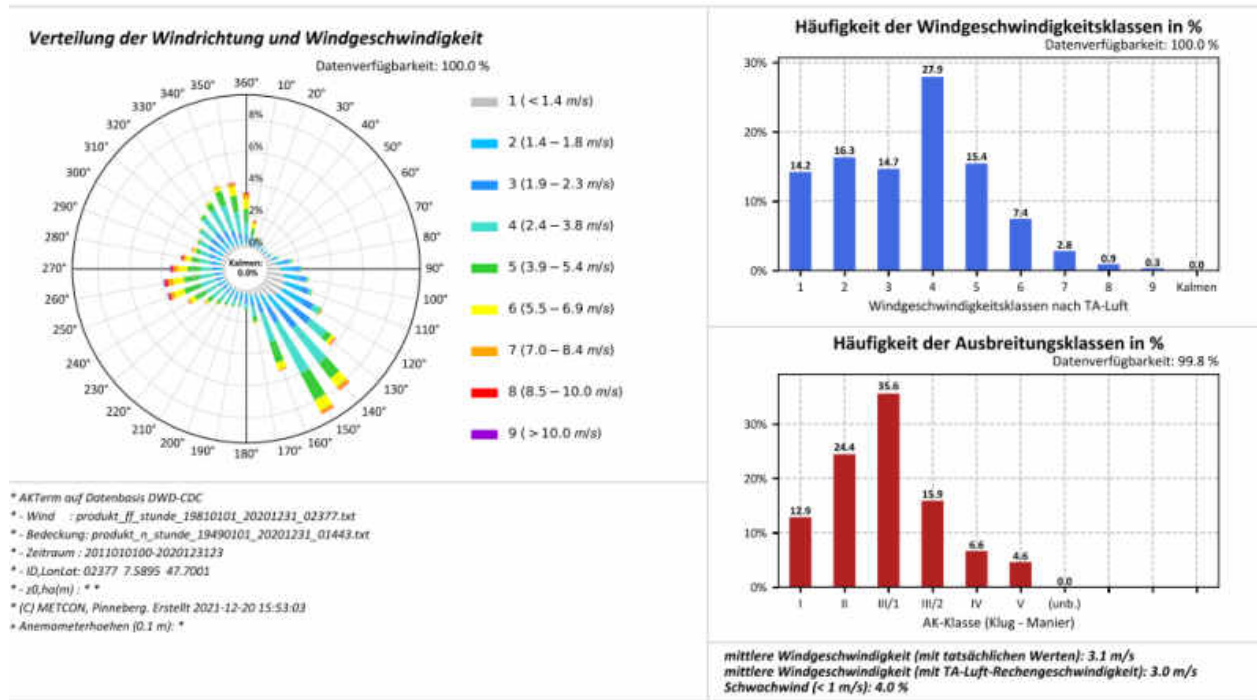


Abbildung A.54: Datenblätter der Messung (oben) und SynAKTerm 3.0 (unten) an der DWD-Station Kall-Sistig (2011-2020).



Für den Vergleich gemessener und synthetischer Daten sind die Hinweise im Abschnitt 5.1 zu beachten.

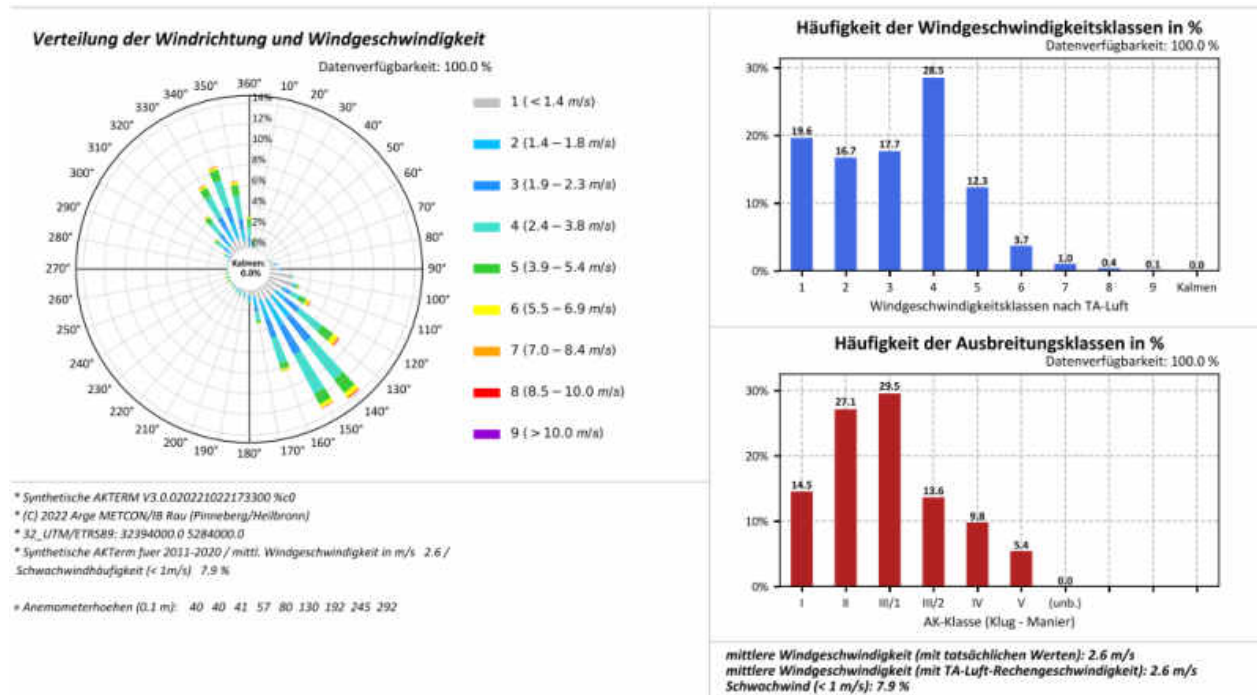
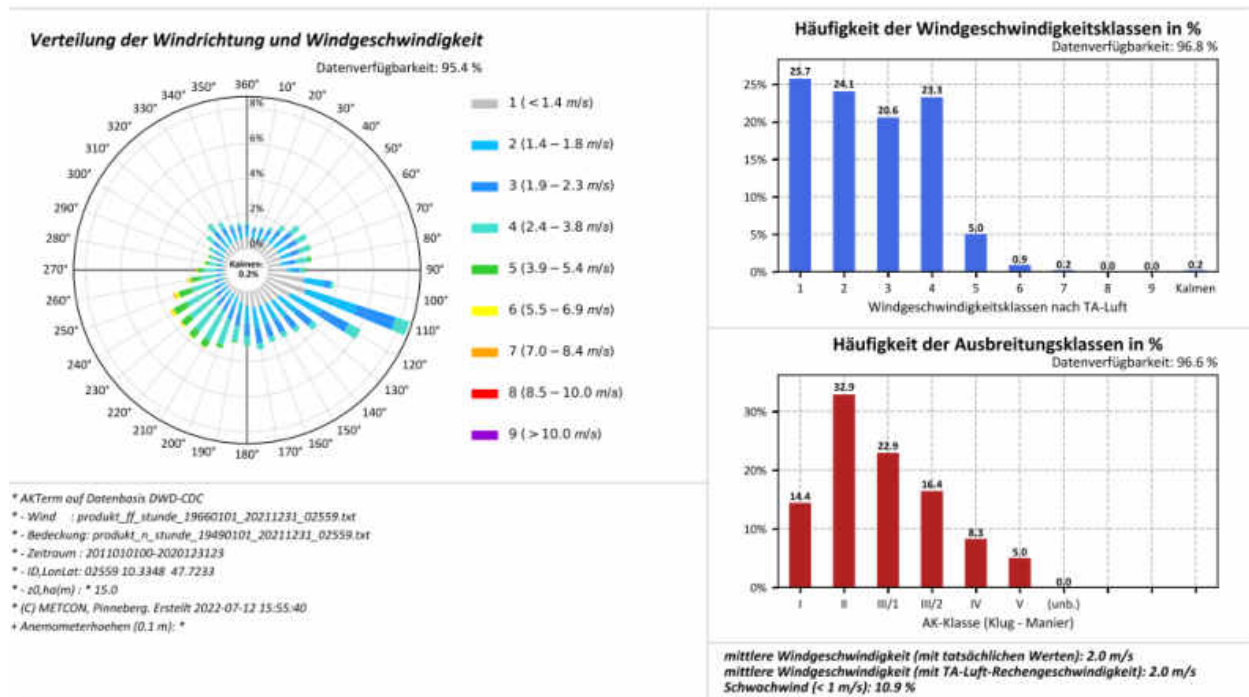


Abbildung A.55: Datenblätter der Messung (oben) und SynAKTerm 3.0 (unten) an der DWD-Station Kandern-Gupf (2011-2020).



Für den Vergleich gemessener und synthetischer Daten sind die Hinweise im Abschnitt 5.1 zu beachten.

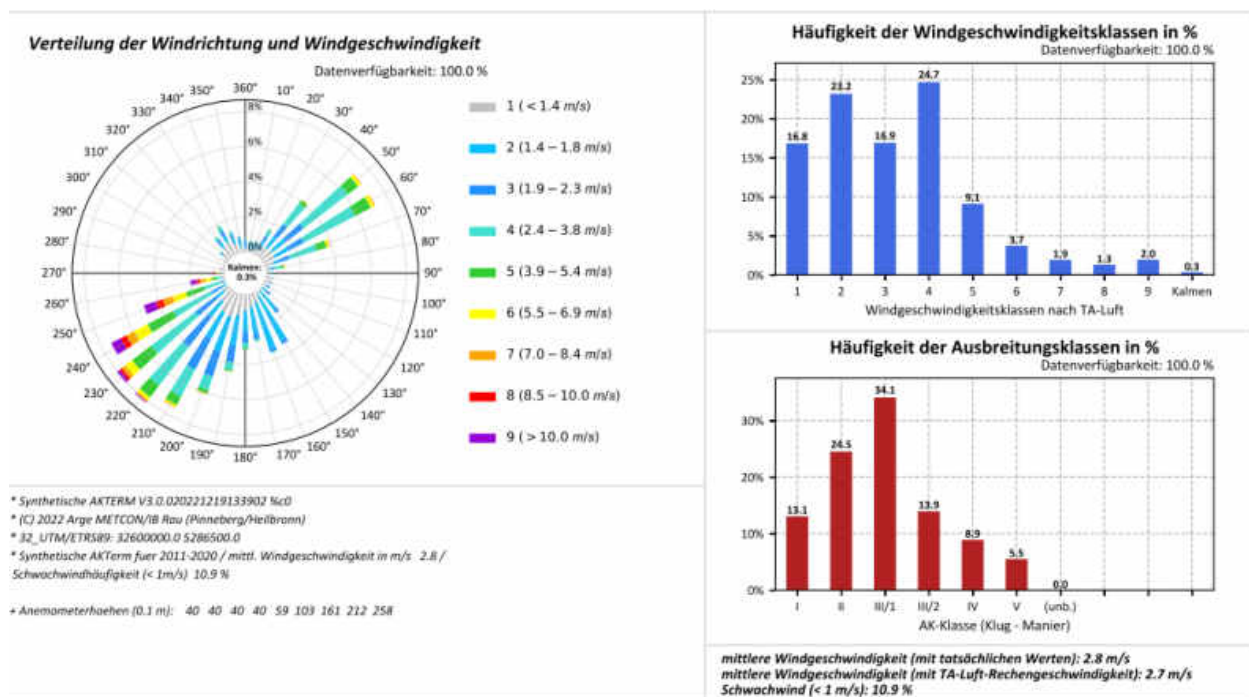
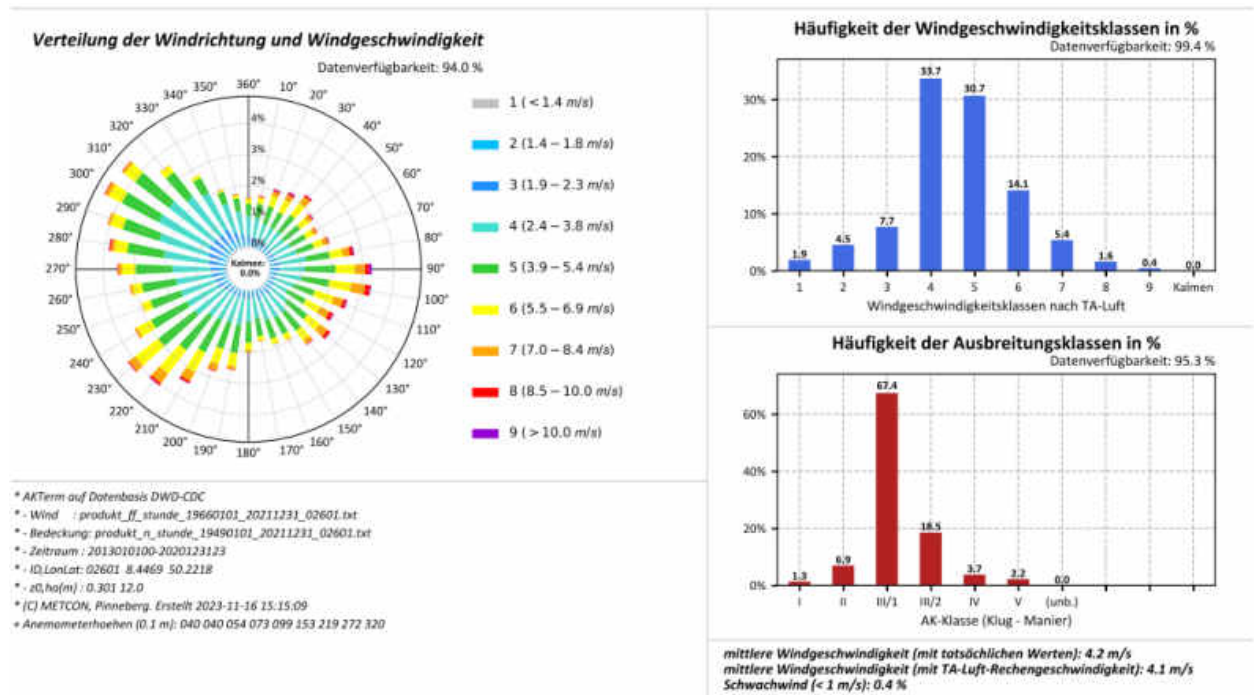


Abbildung A.56: Datenblätter der Messung (oben) und SynAKTerm 3.0 (unten) an der DWD-Station Kempton (2011-2020).



Für den Vergleich gemessener und synthetischer Daten sind die Hinweise im Abschnitt 5.1 zu beachten.

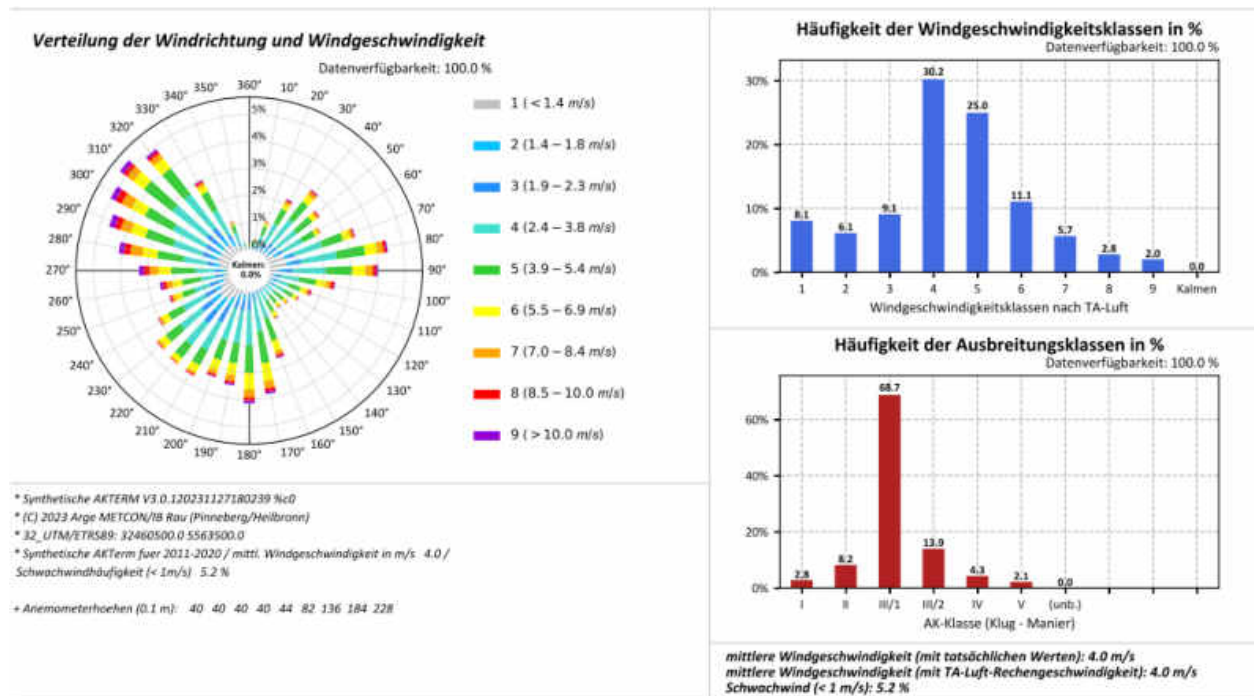
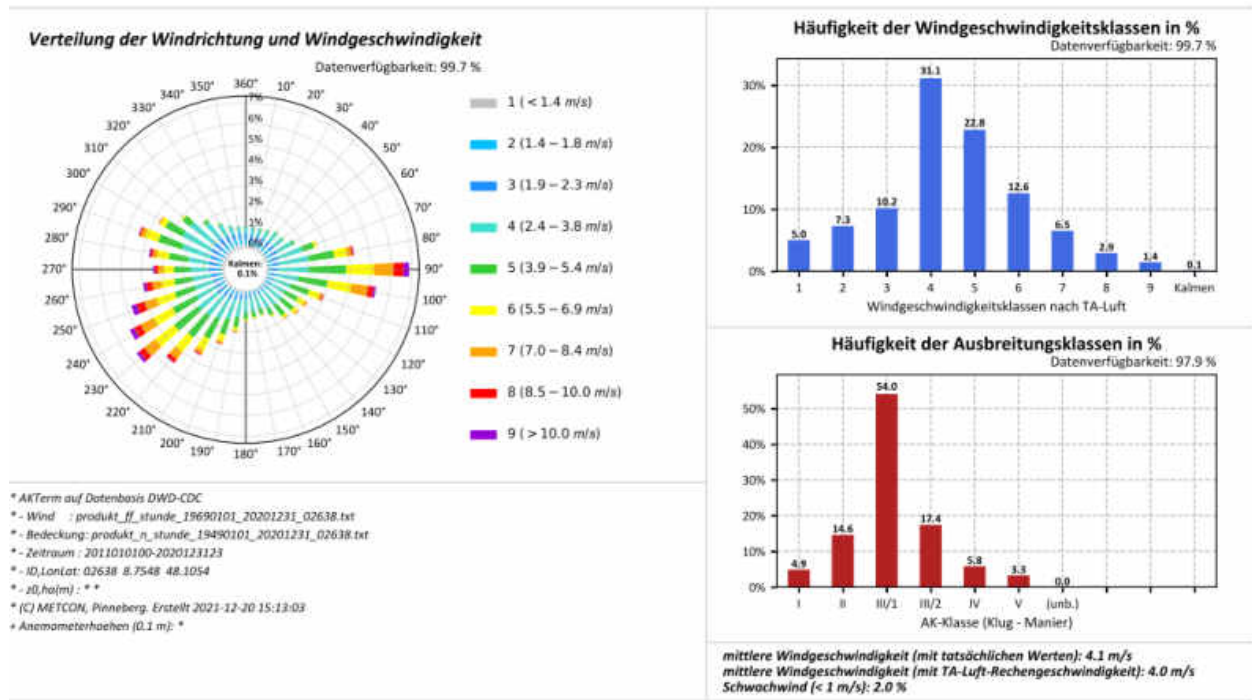


Abbildung A.57: Datenblätter der Messung (oben) und SynAKTerm 3.0 (unten) an der DWD-Station Kleiner Feldberg / Taunus (2013/2011-2020).





Für den Vergleich gemessener und synthetischer Daten sind die Hinweise im Abschnitt 5.1 zu beachten.

Diese Station wird im Abschnitt 5.3 diskutiert.

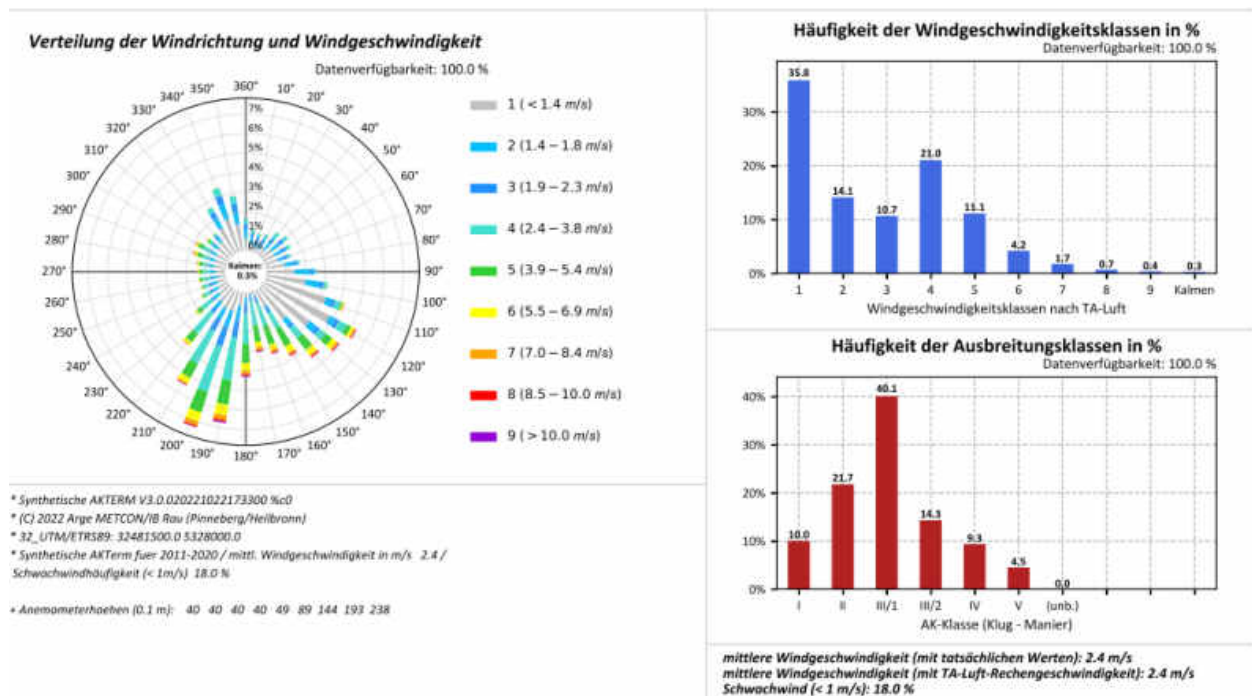
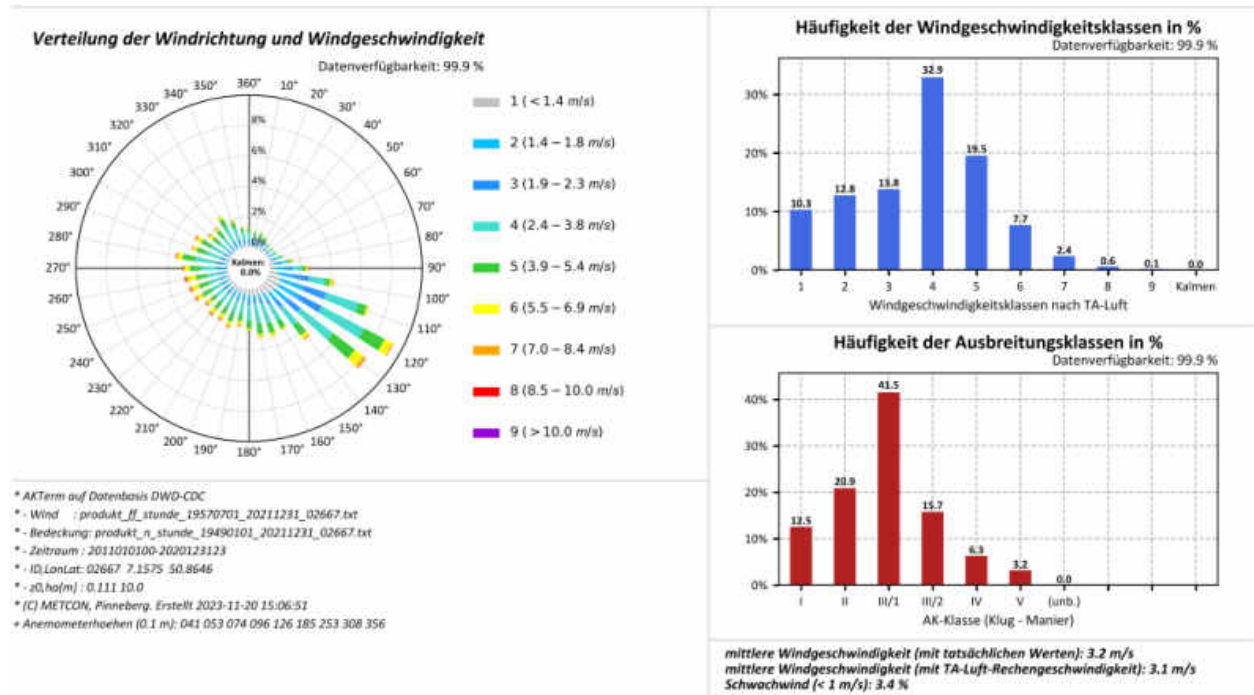


Abbildung A.58: Datenblätter der Messung (oben) und SynAKTerm 3.0 (unten) an der DWD-Station Klippeneck (2011-2020).



Für den Vergleich gemessener und synthetischer Daten sind die Hinweise im Abschnitt 5.1 zu beachten.

Diese Station wird im Abschnitt 5.5 diskutiert.

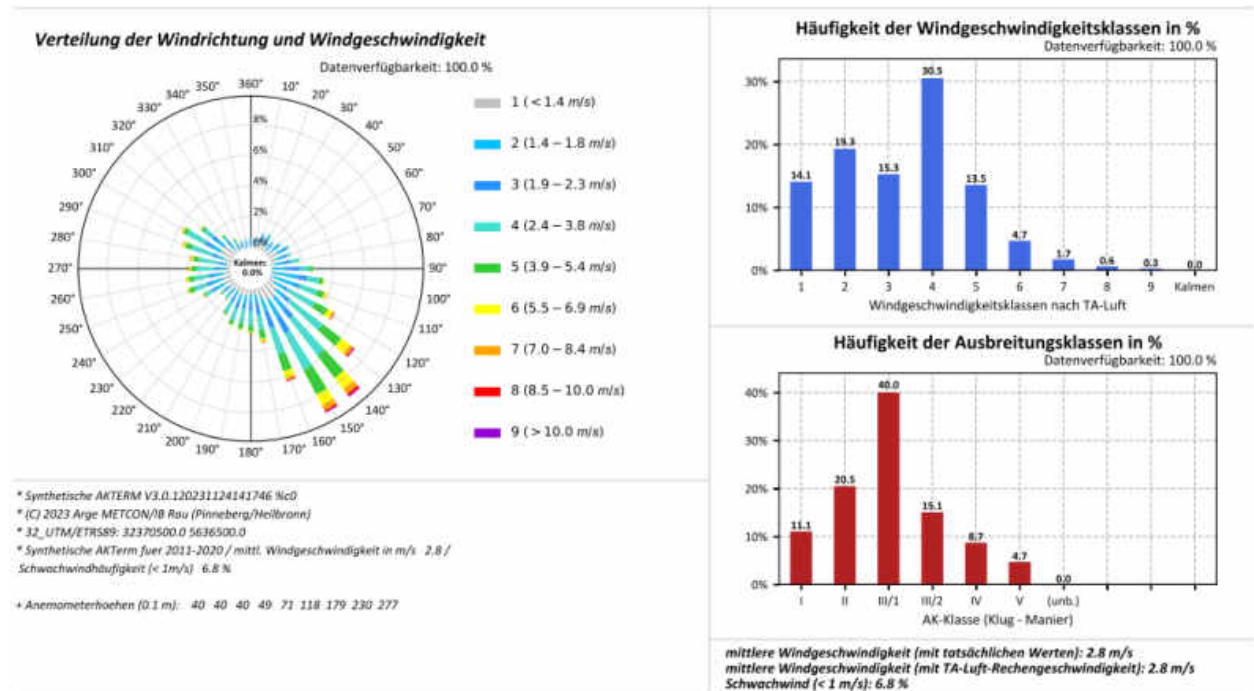
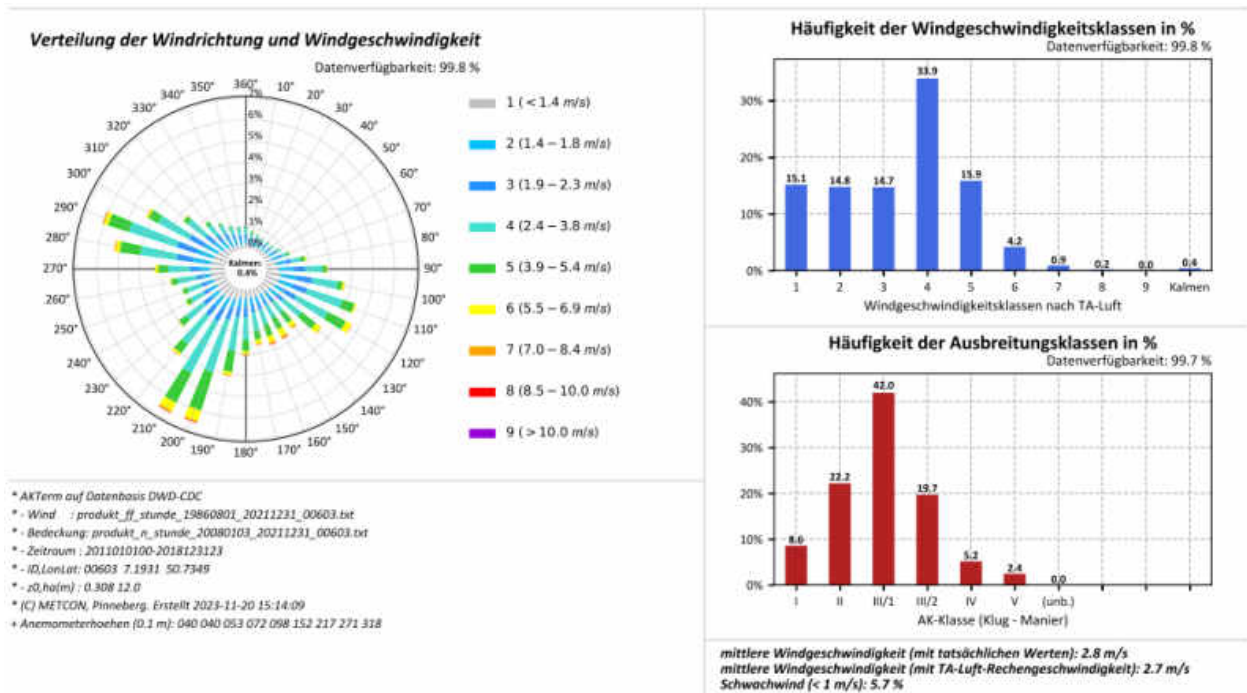


Abbildung A.59: Datenblätter der Messung (oben) und SynAKTerm 3.0 (unten) an der DWD-Station Köln-Bonn (2011-2020).



Für den Vergleich gemessener und synthetischer Daten sind die Hinweise im Abschnitt 5.1 zu beachten.

Diese Station wird im Abschnitt 5.1 diskutiert.

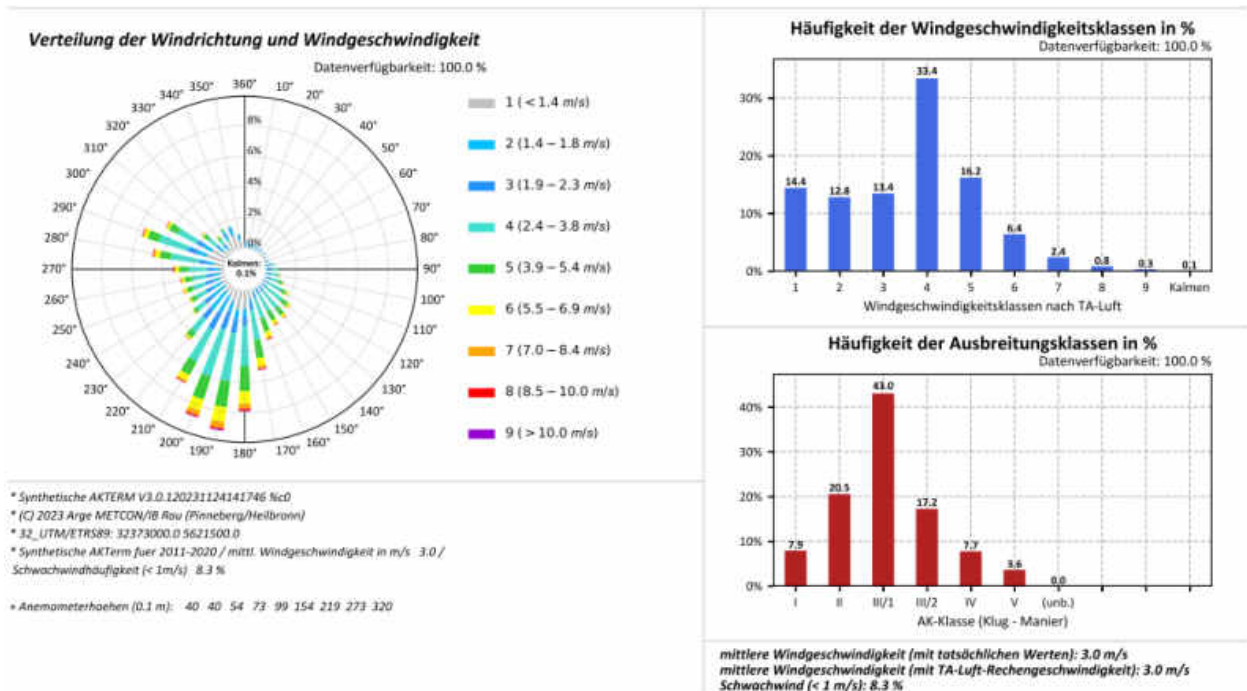
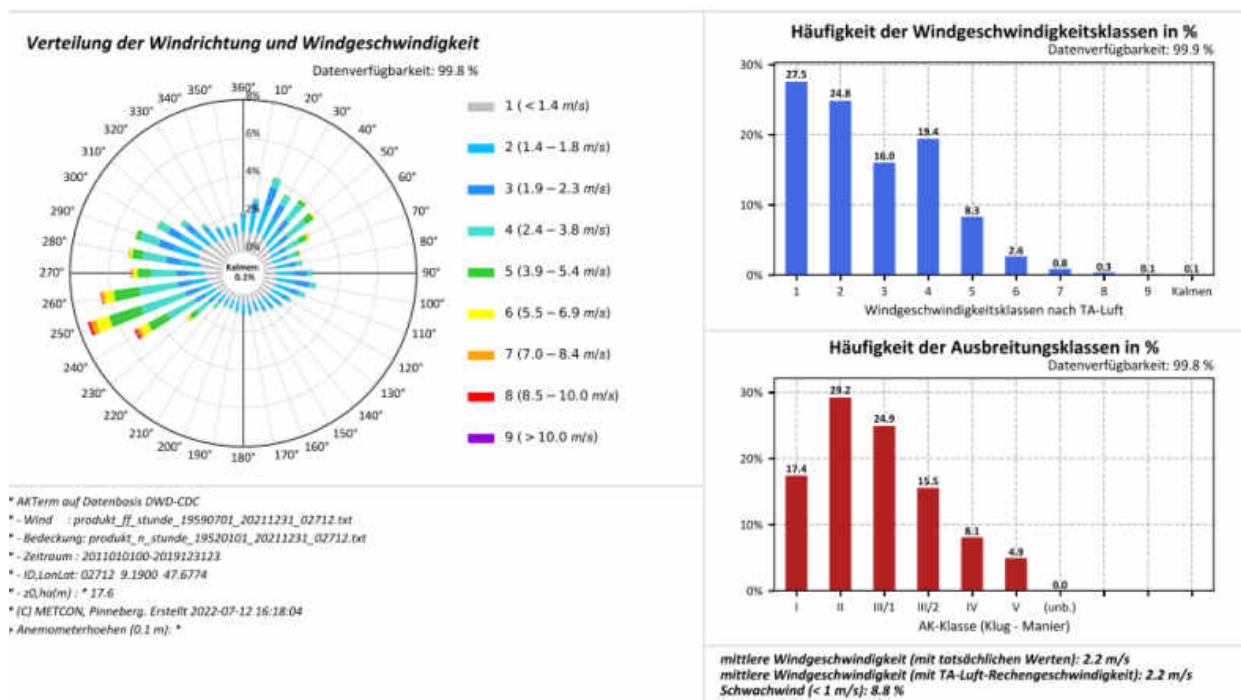


Abbildung A.60: Datenblätter der Messung (oben) und SynAKTerm 3.0 (unten) an der DWD-Station Königswinter-Heiderhof (2011-2018/2020).



Für den Vergleich gemessener und synthetischer Daten sind die Hinweise im Abschnitt 5.1 zu beachten.

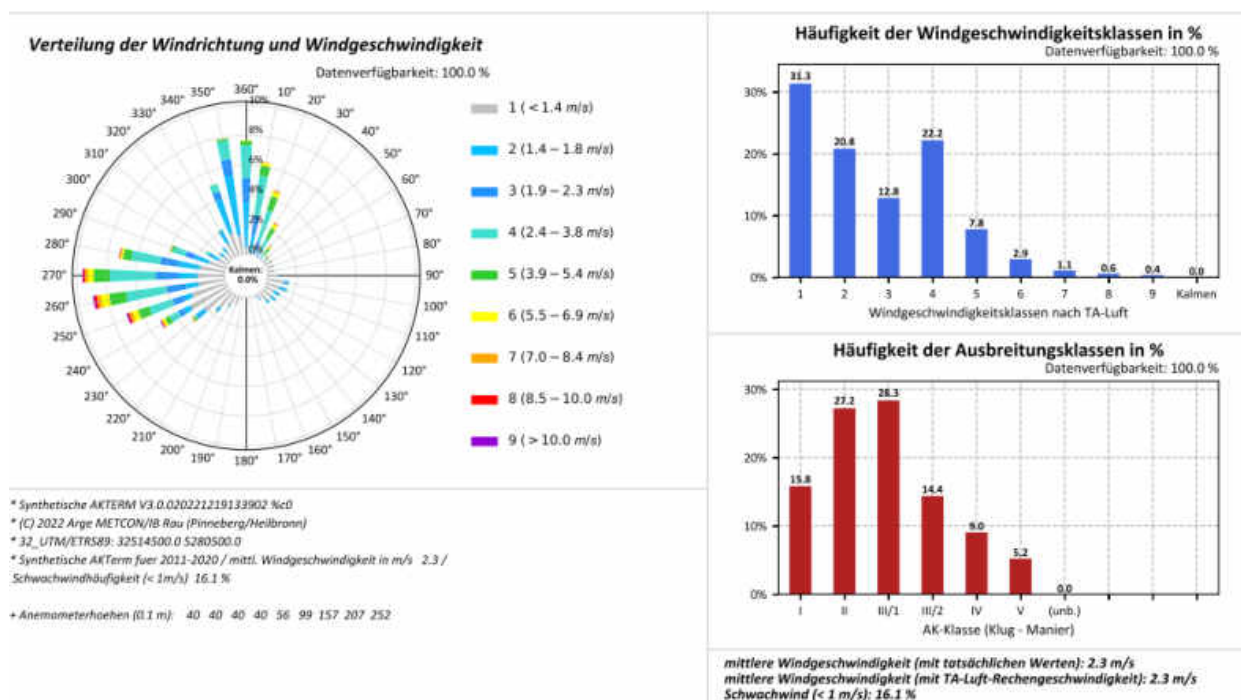
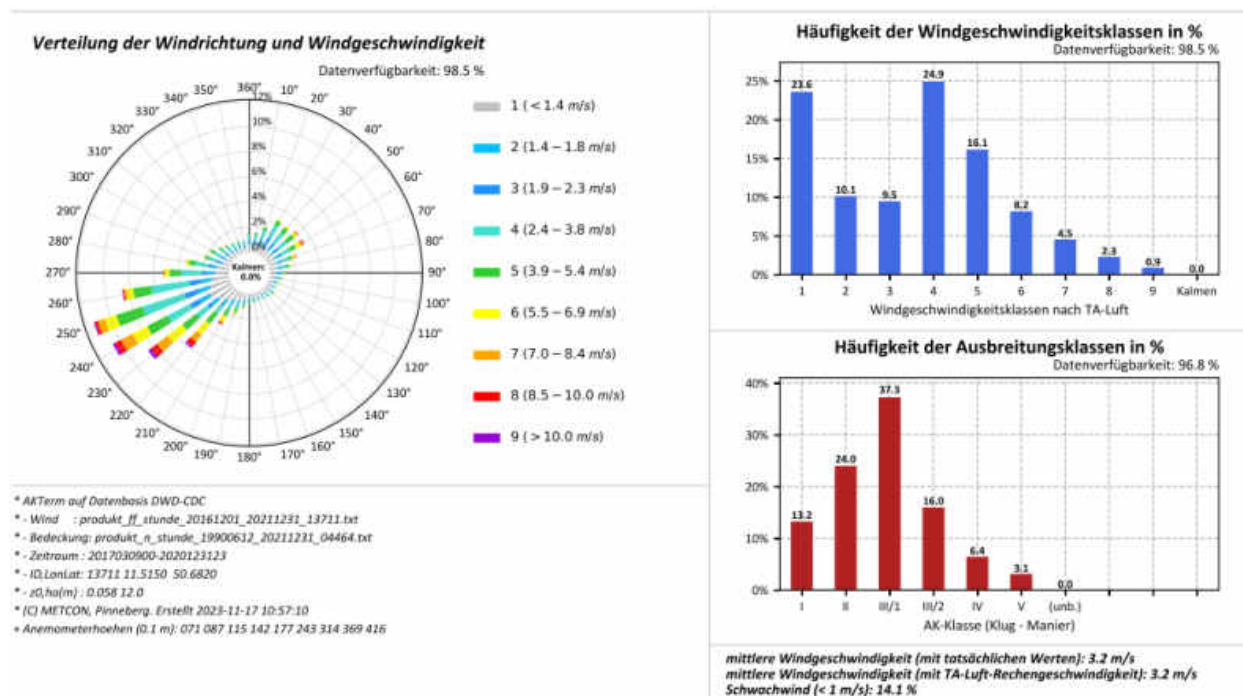


Abbildung A.61: Datenblätter der Messung (oben) und SynAKTerm 3.0 (unten) an der DWD-Station Konstanz (2011-2019/2020).



Für den Vergleich gemessener und synthetischer Daten sind die Hinweise im Abschnitt 5.1 zu beachten.

Diese Station wird im Abschnitt 5.3 diskutiert.

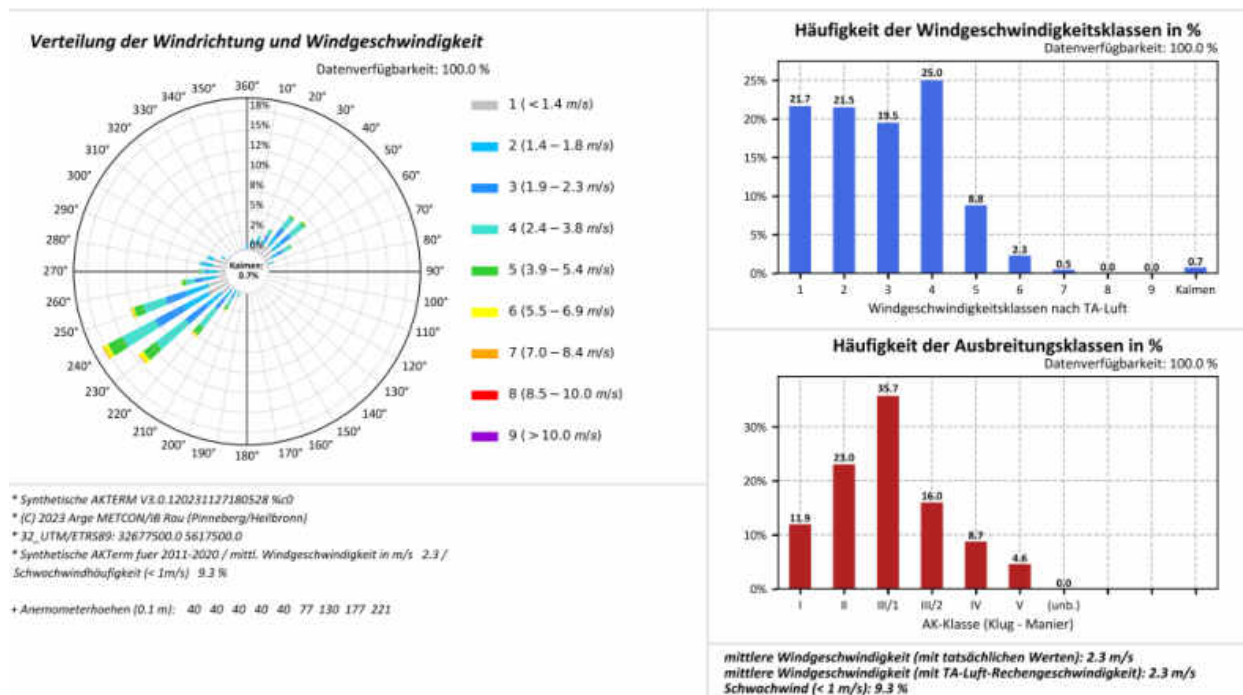
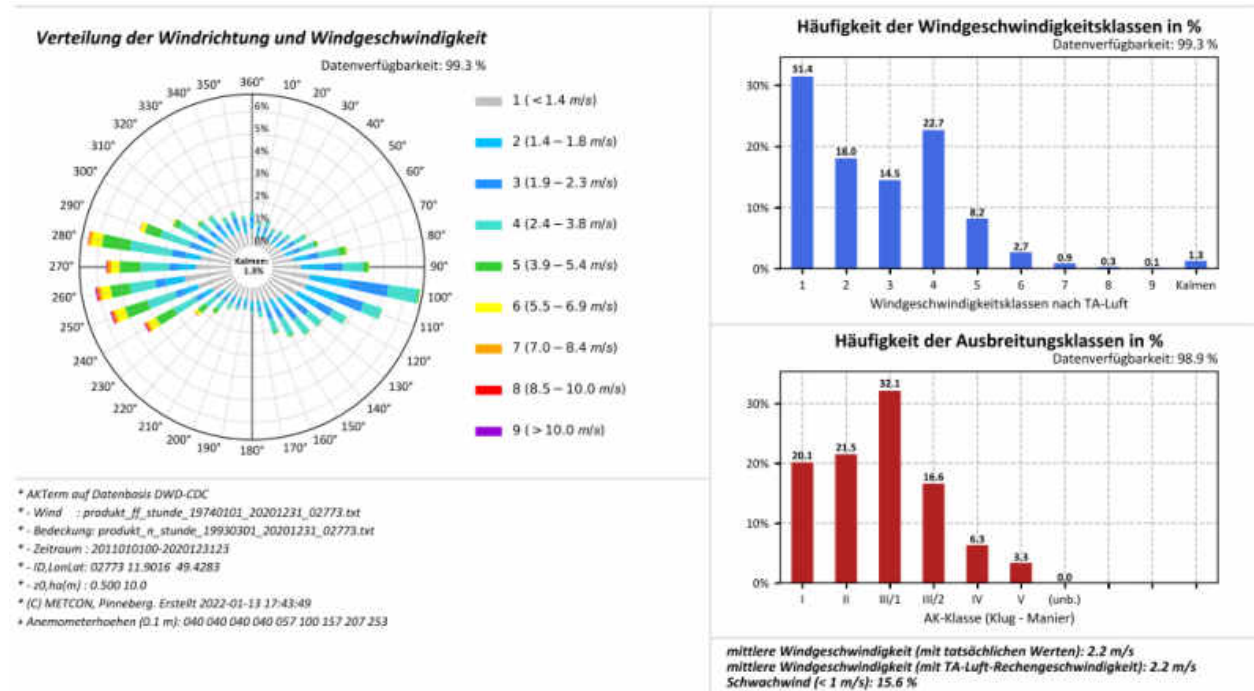
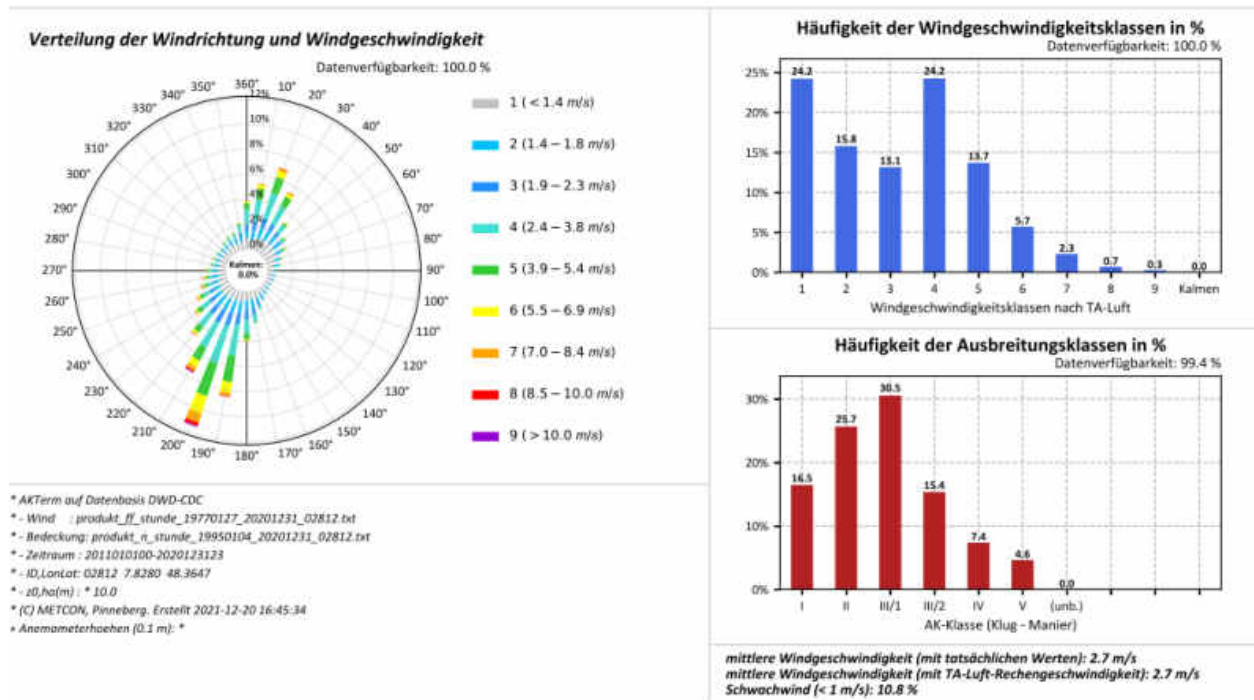


Abbildung A.62: Datenblätter der Messung (oben) und SynAKTerm 3.0 (unten) an der DWD-Station Krölpä-Rockendorf (2017/2011-2020).



Für den Vergleich gemessener und synthetischer Daten sind die Hinweise im Abschnitt 5.1 zu beachten.

Abbildung A.63: Datenblätter der Messung (oben) und SynAKTerm 3.0 (unten) an der DWD-Station Kümmersbrück (2011-2020).



Für den Vergleich gemessener und synthetischer Daten sind die Hinweise im Abschnitt 5.1 zu beachten.

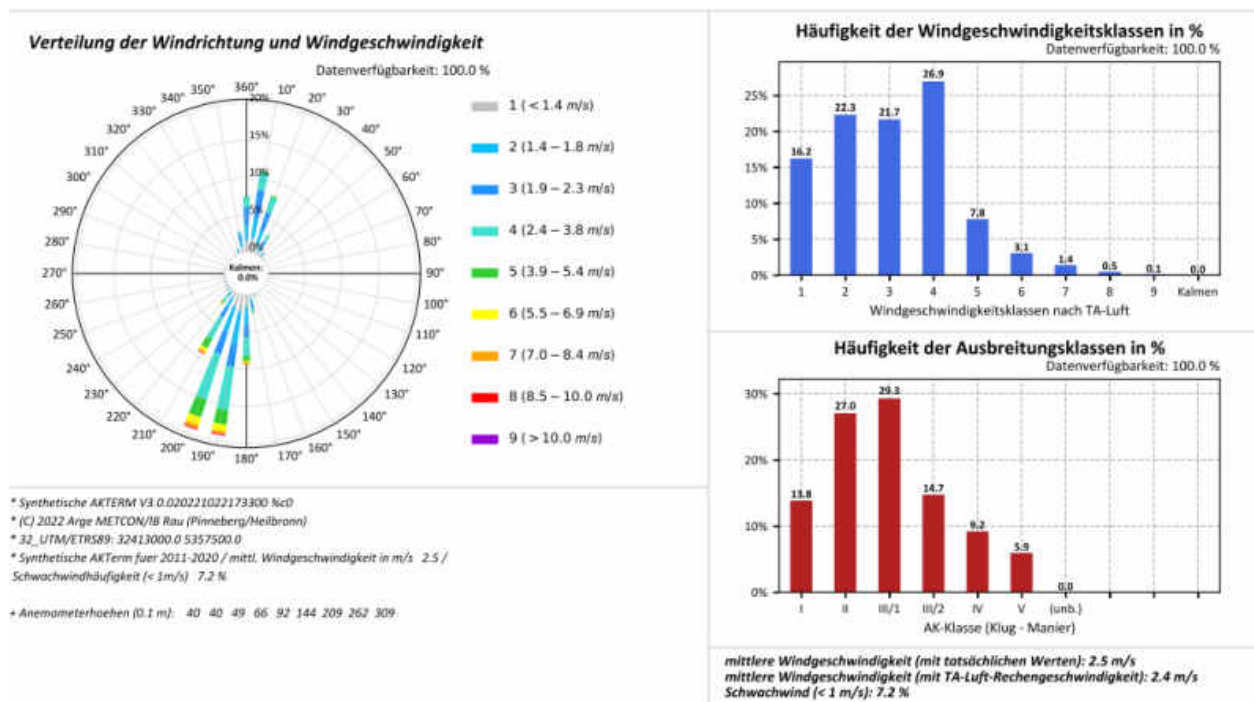
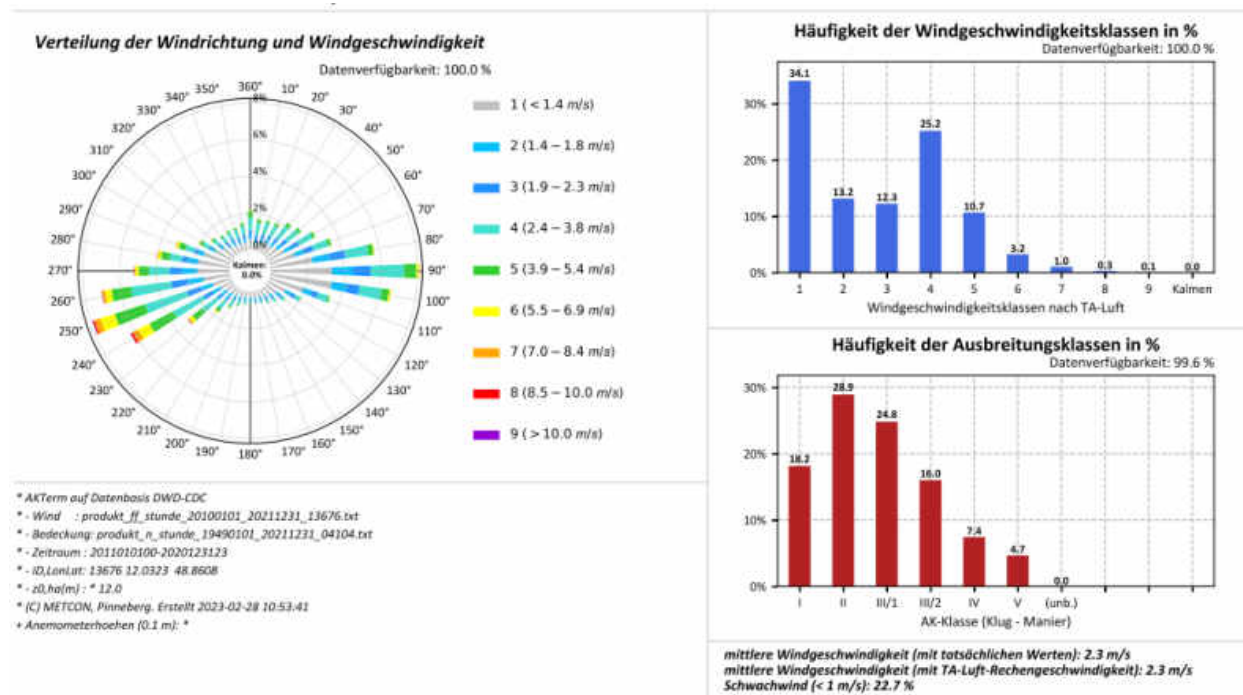


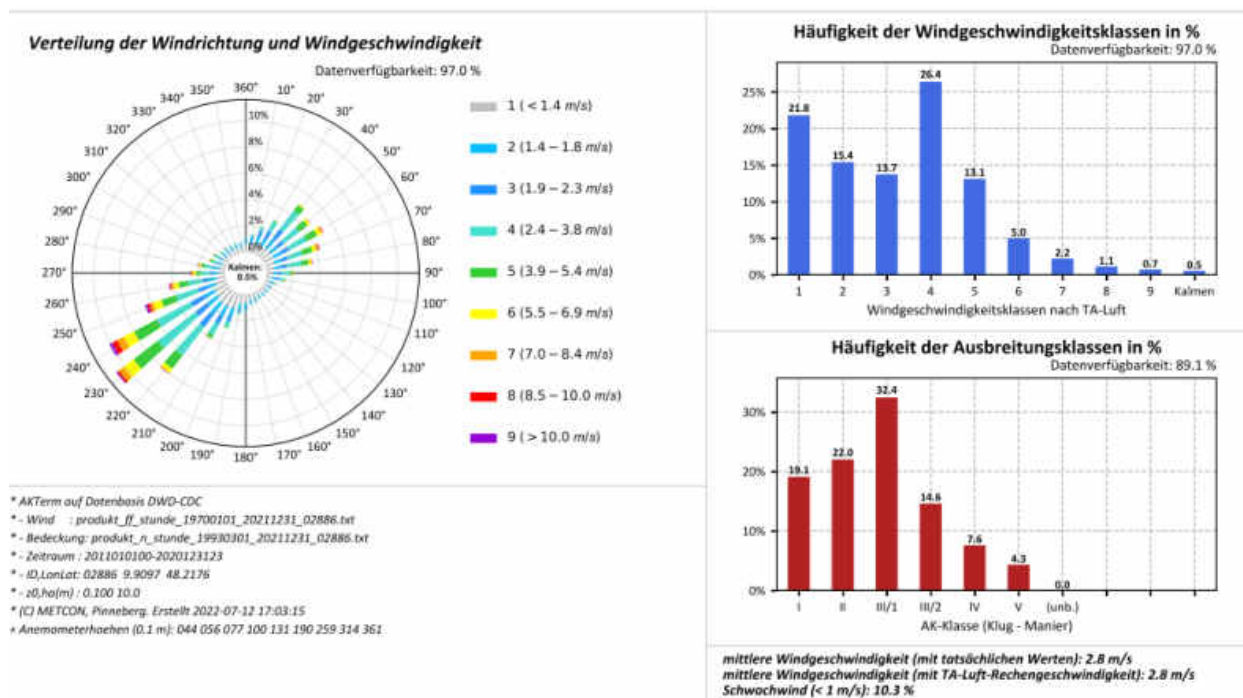
Abbildung A.64: Datenblätter der Messung (oben) und SynAKTerm 3.0 (unten) an der DWD-Station Lahr (2011-2020).



Für den Vergleich gemessener und synthetischer Daten sind die Hinweise im Abschnitt 5.1 zu beachten.

Abbildung A.65: Datenblätter der Messung (oben) und SynAKTerm 3.0 (unten) an der DWD-Station Langquaid-Oberschneidhart (2011-2020).





Für den Vergleich gemessener und synthetischer Daten sind die Hinweise im Abschnitt 5.1 zu beachten.

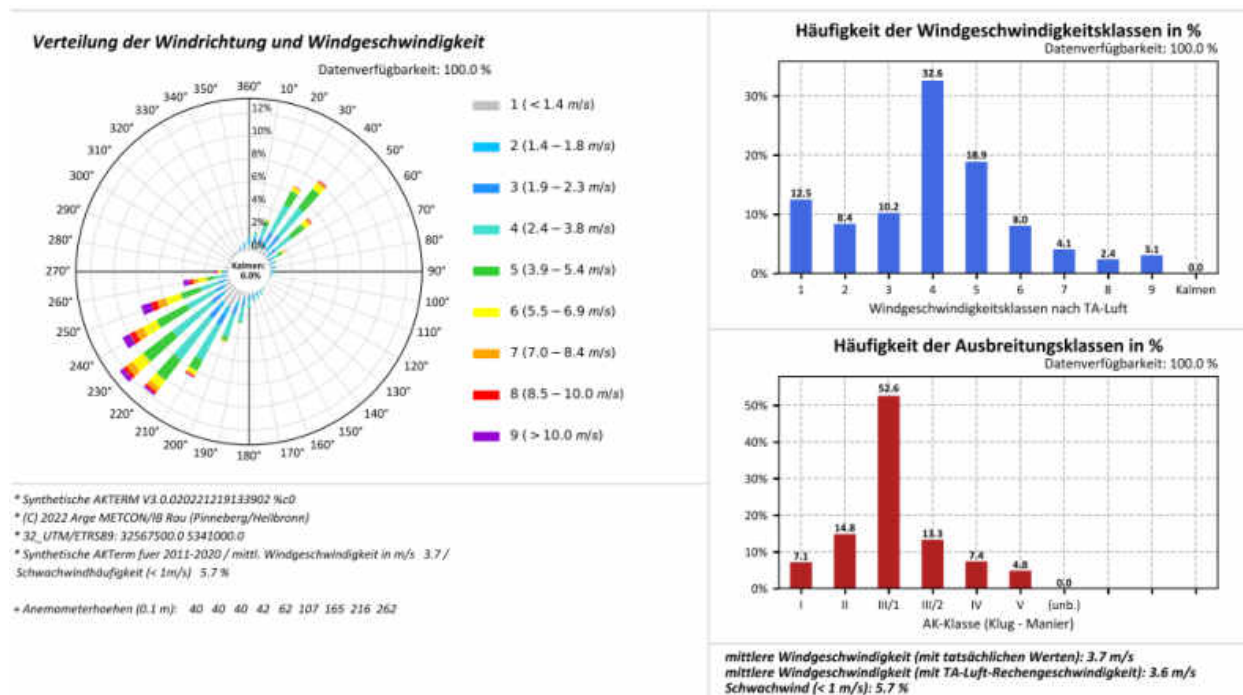
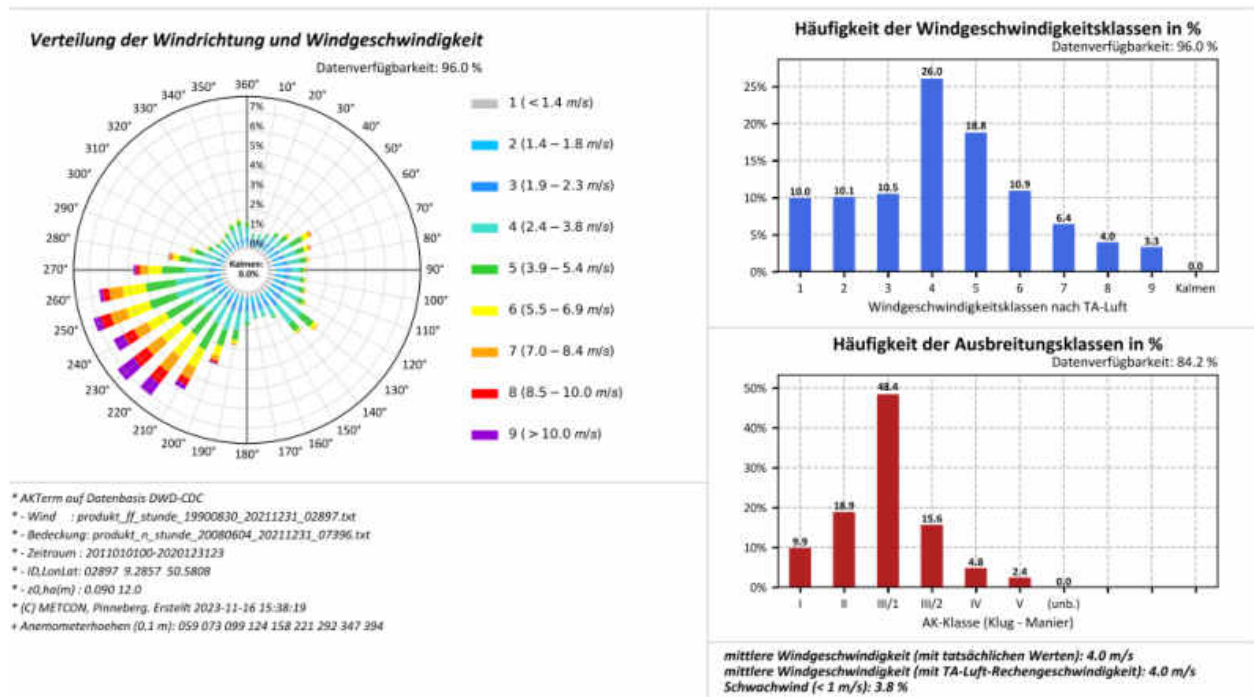


Abbildung A.66: Datenblätter der Messung (oben) und SynAKTerm 3.0 (unten) an der DWD-Station Laupheim (2011-2020).



Für den Vergleich gemessener und synthetischer Daten sind die Hinweise im Abschnitt 5.1 zu beachten.

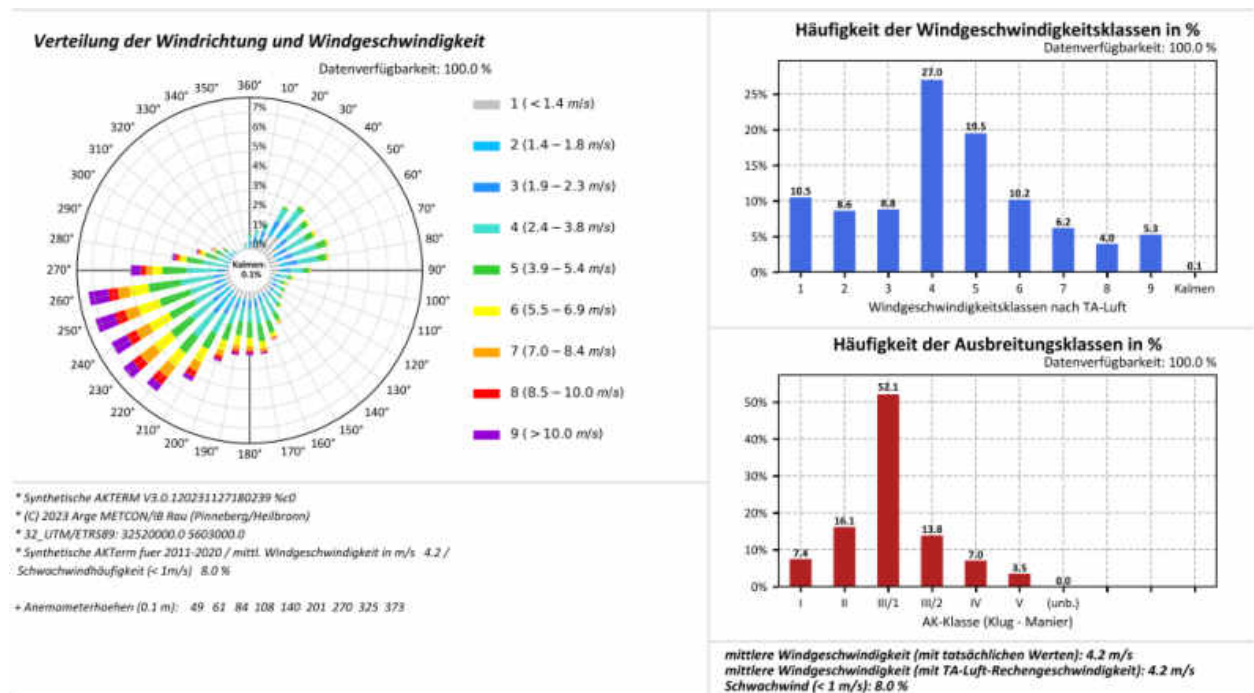
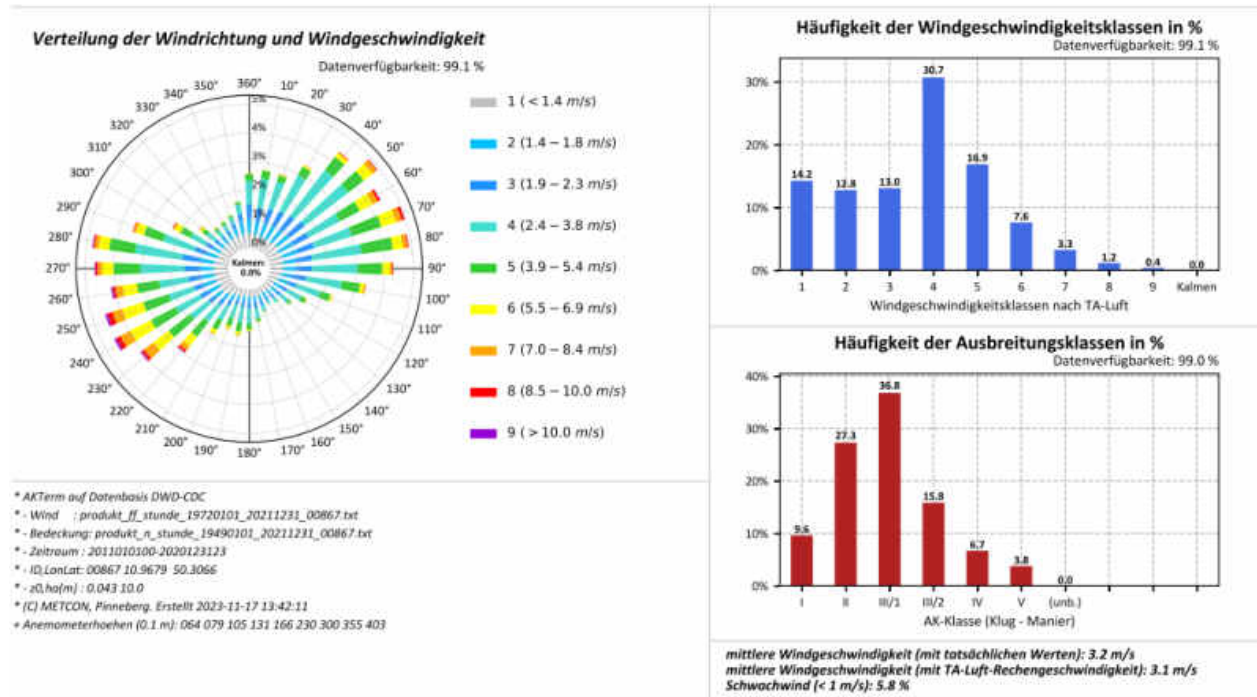


Abbildung A.67: Datenblätter der Messung (oben) und SynAKTerm 3.0 (unten) an der DWD-Station Lautertal-Hörgenau (2011-2020).



Für den Vergleich gemessener und synthetischer Daten sind die Hinweise im Abschnitt 5.1 zu beachten.

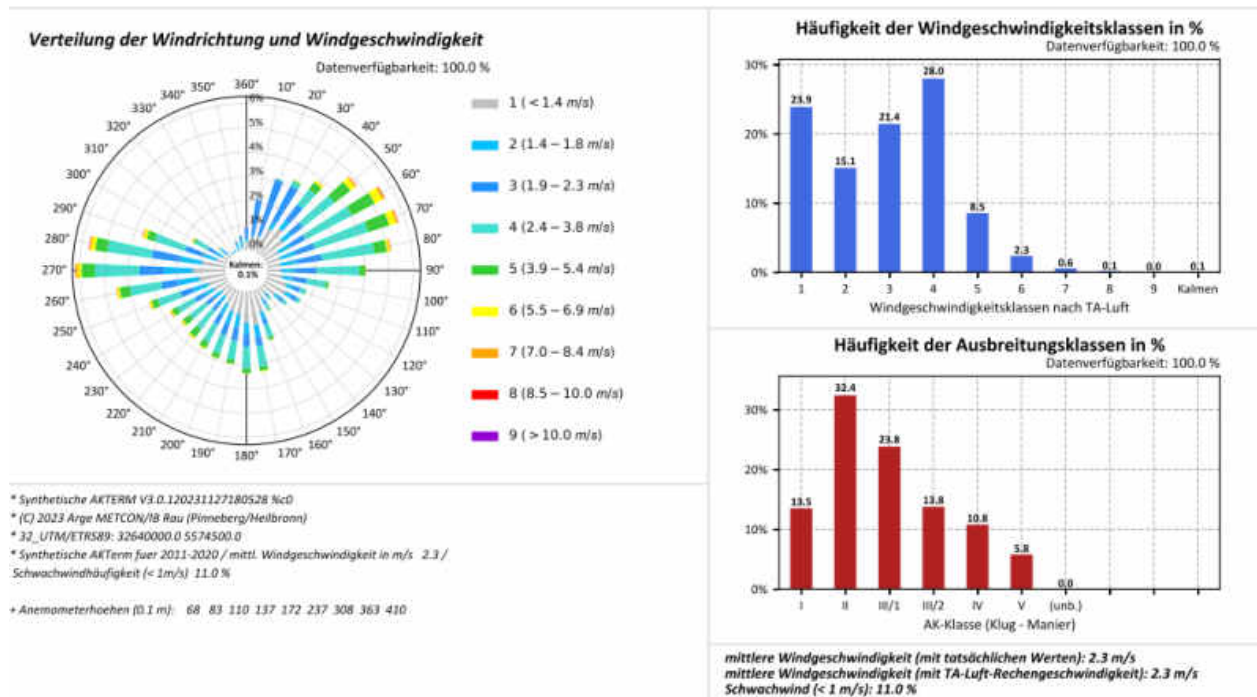
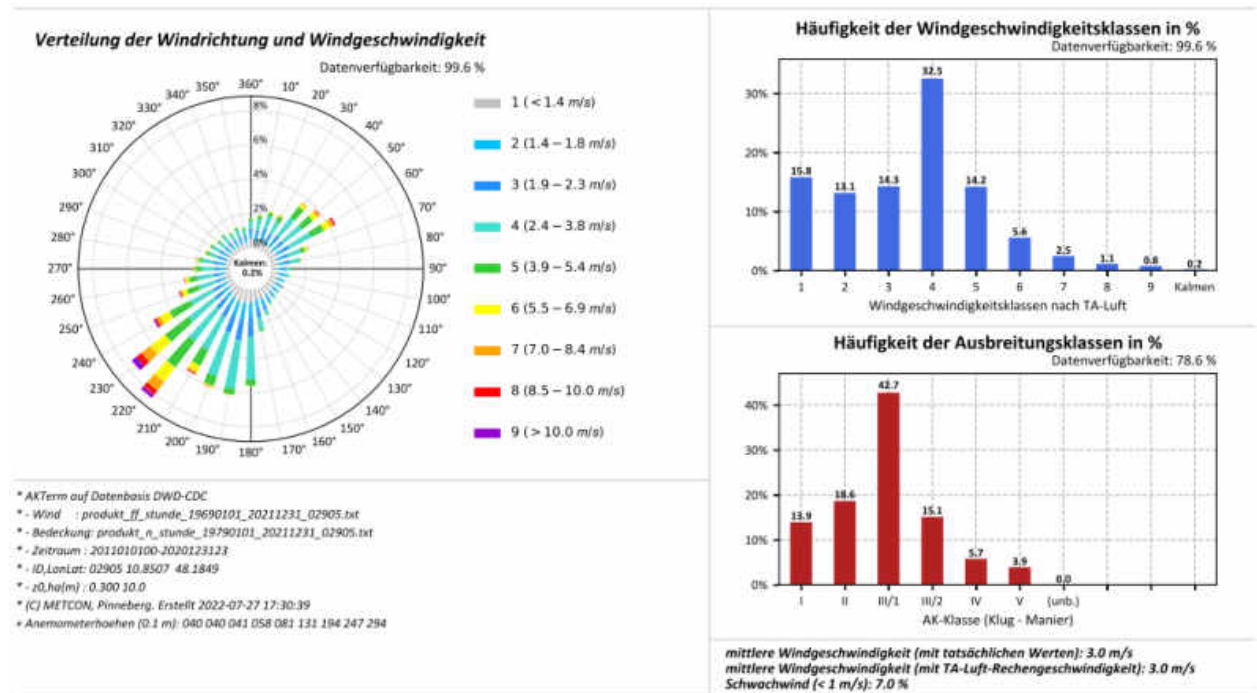


Abbildung A.68: Datenblätter der Messung (oben) und SynAKTerm 3.0 (unten) an der DWD-Station Lautertal-Oberlauter (2011-2020).



Für den Vergleich gemessener und synthetischer Daten sind die Hinweise im Abschnitt 5.1 zu beachten.

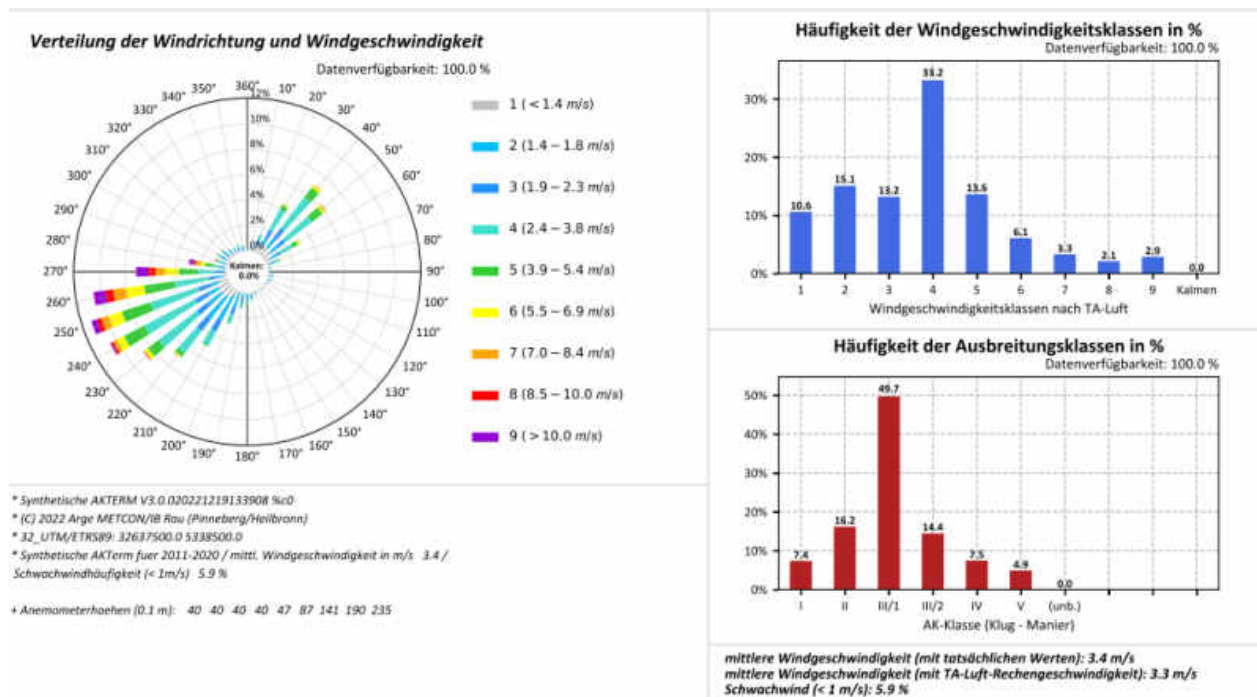
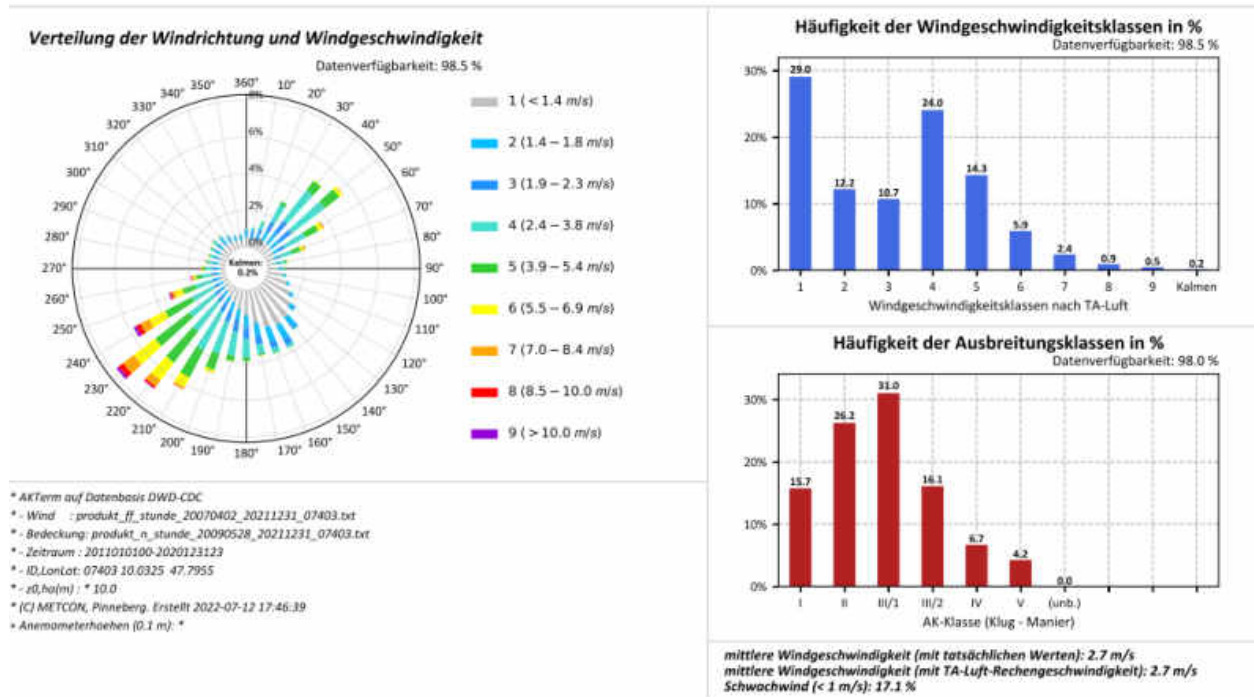


Abbildung A.69: Datenblätter der Messung (oben) und SynAKTerm 3.0 (unten) an der DWD-Station Lechfeld (2011-2020).



Für den Vergleich gemessener und synthetischer Daten sind die Hinweise im Abschnitt 5.1 zu beachten.

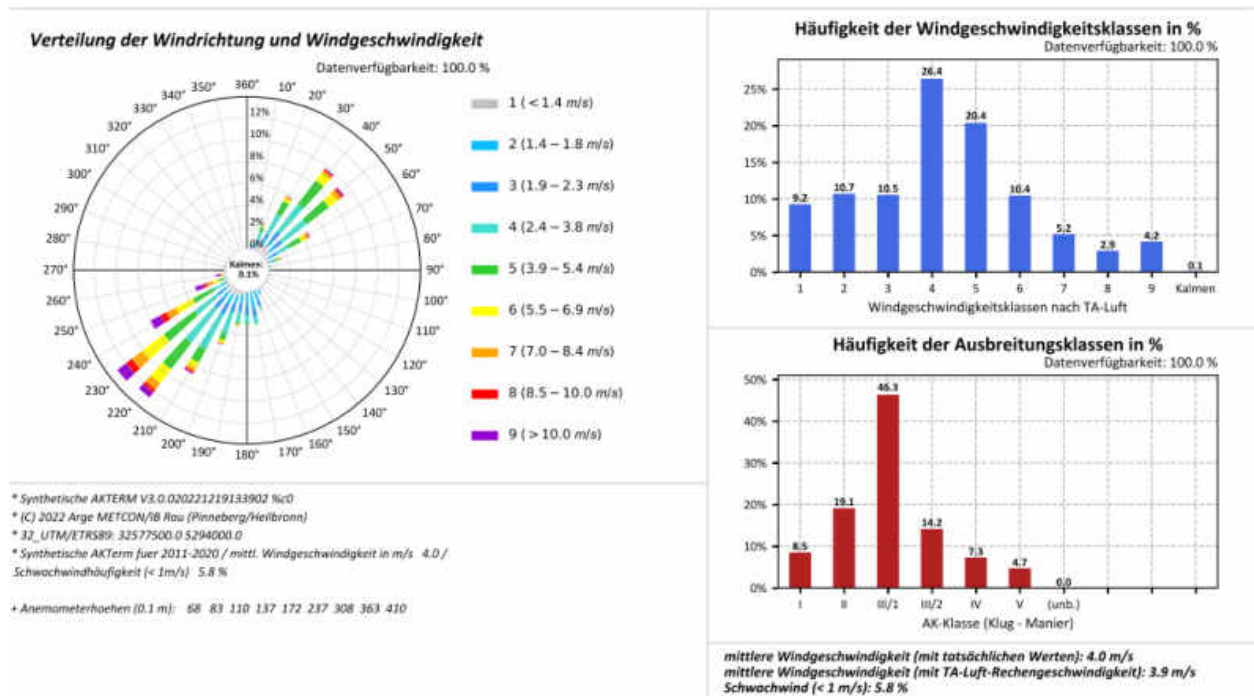
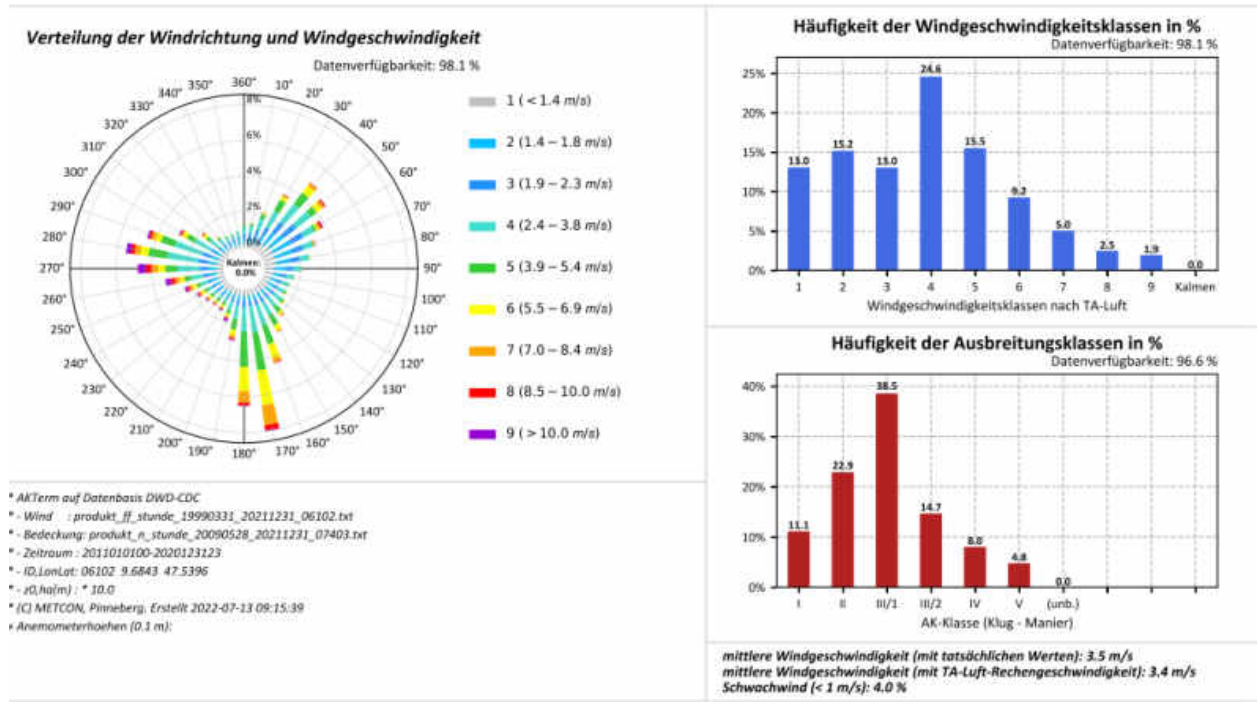


Abbildung A.70: Datenblätter der Messung (oben) und SynAKTerm 3.0 (unten) an der DWD-Station Leutkirch-Herlazhausen (2011-2020).



Für den Vergleich gemessener und synthetischer Daten sind die Hinweise im Abschnitt 5.1 zu beachten.

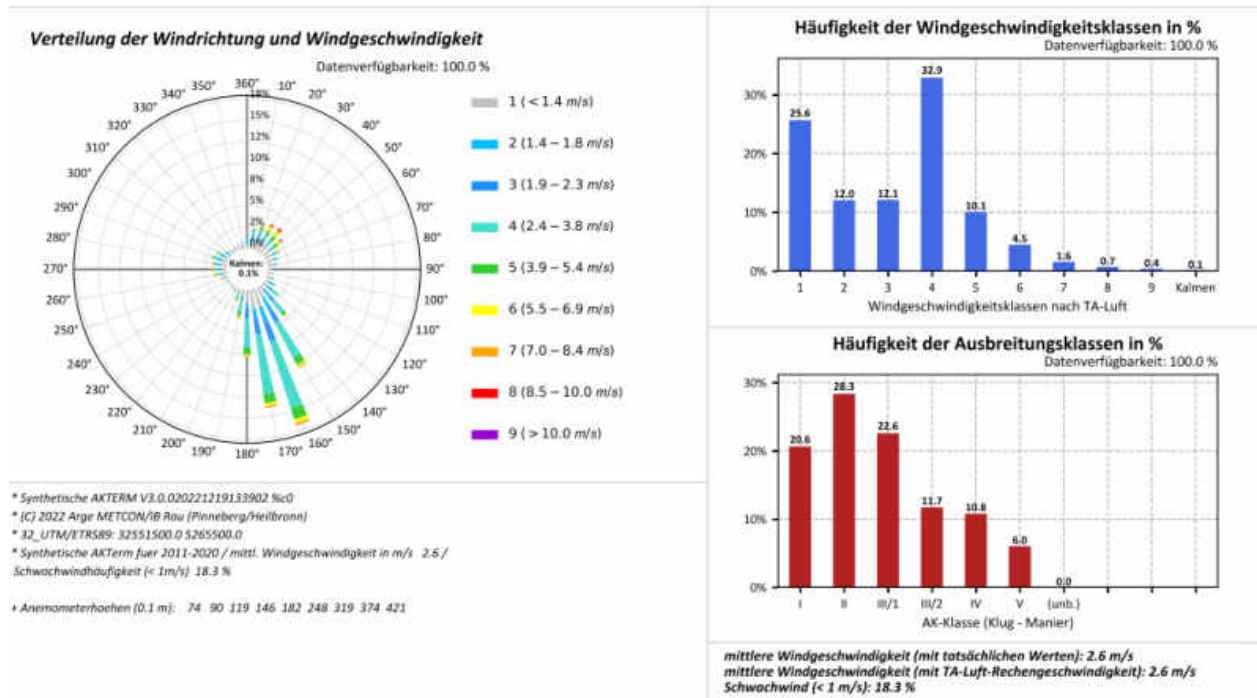
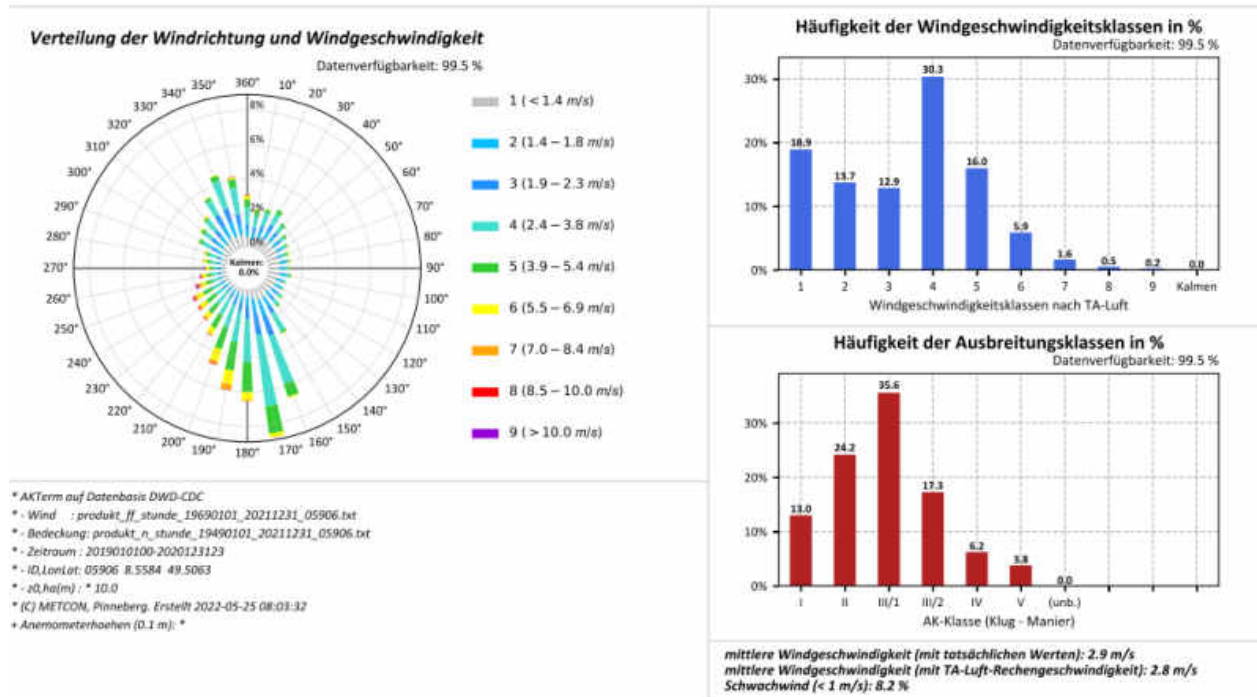


Abbildung A.71: Datenblätter der Messung (oben) und SynAKTerm 3.0 (unten) an der DWD-Station Lindau (2011-2020).



Für den Vergleich gemessener und synthetischer Daten sind die Hinweise im Abschnitt 5.1 zu beachten.

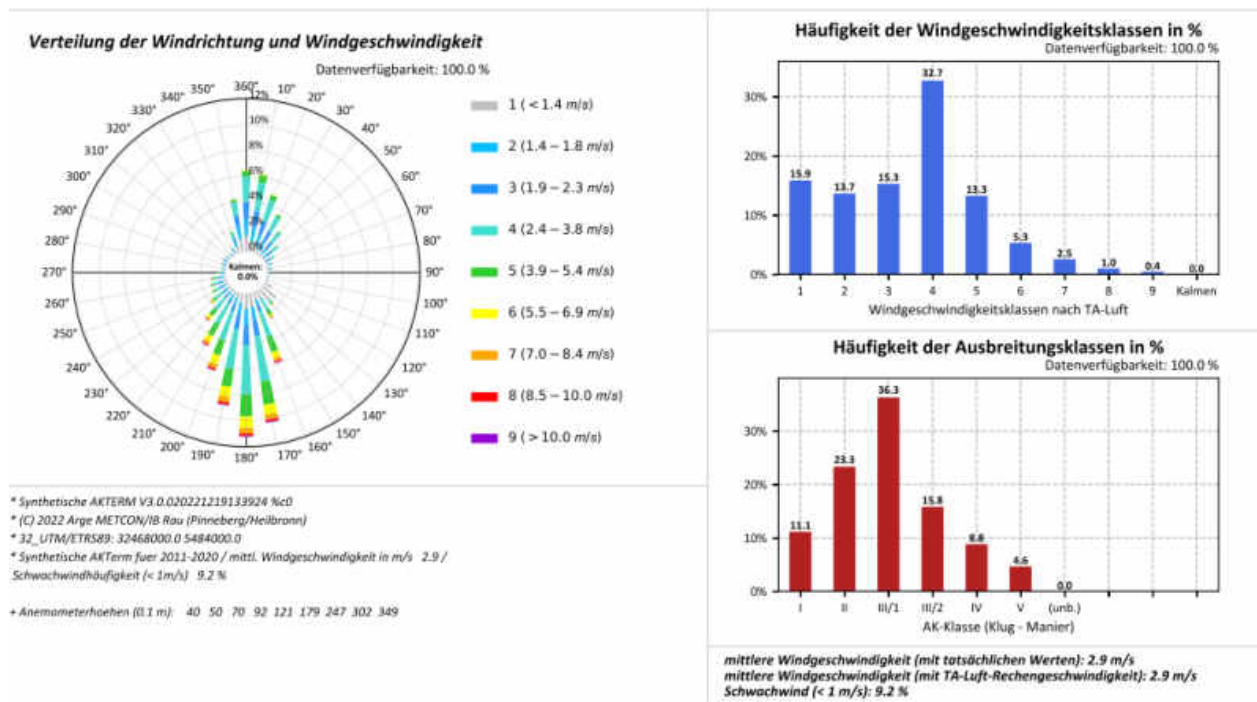
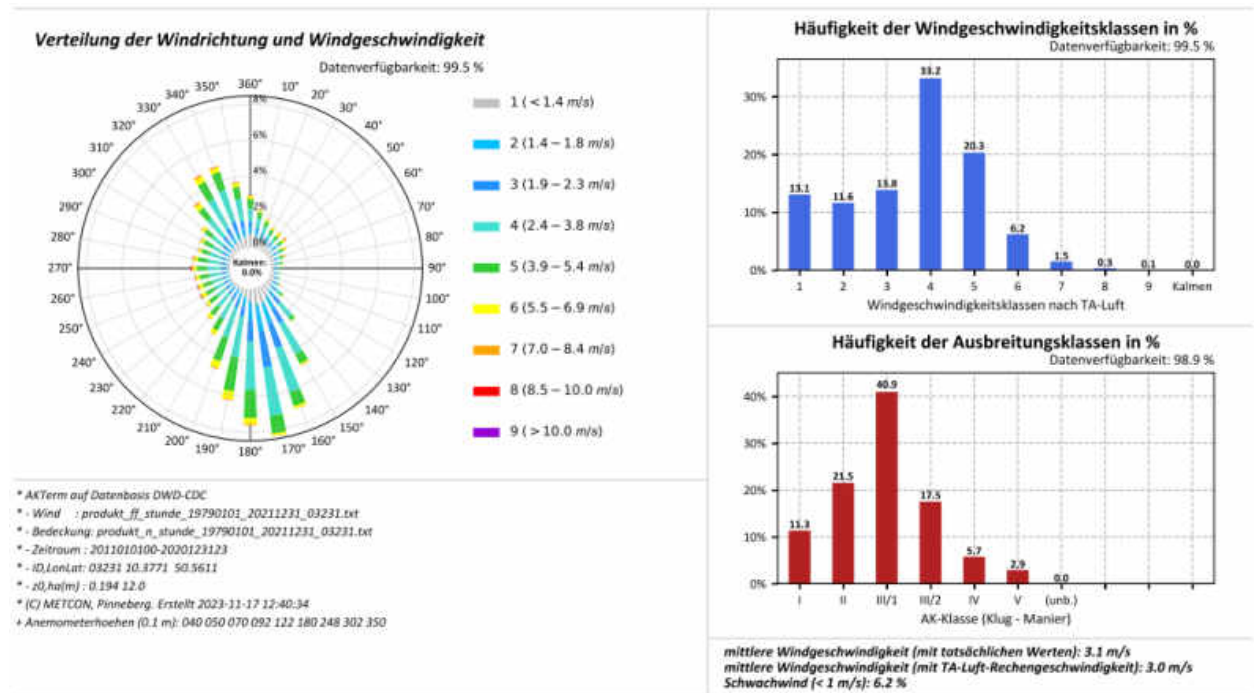


Abbildung A.72: Datenblätter der Messung (oben) und SynAKTerm 3.0 (unten) an der DWD-Station Mannheim (2019/2011-2020).



Für den Vergleich gemessener und synthetischer Daten sind die Hinweise im Abschnitt 5.1 zu beachten.

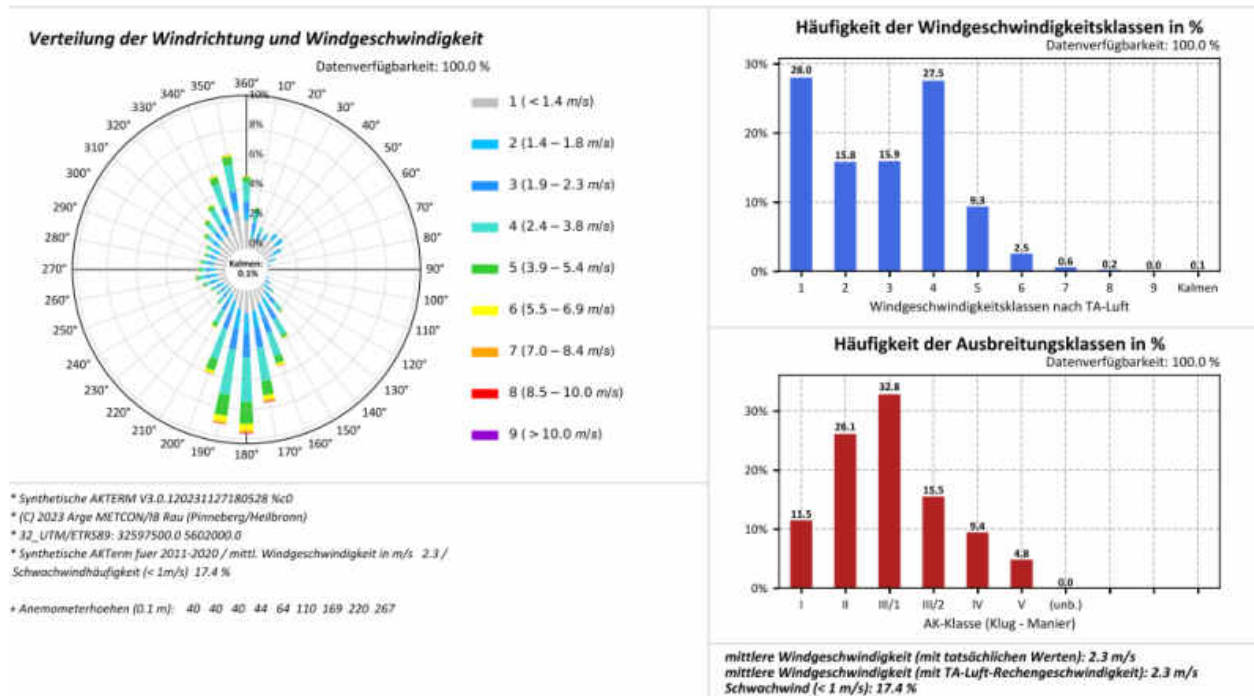
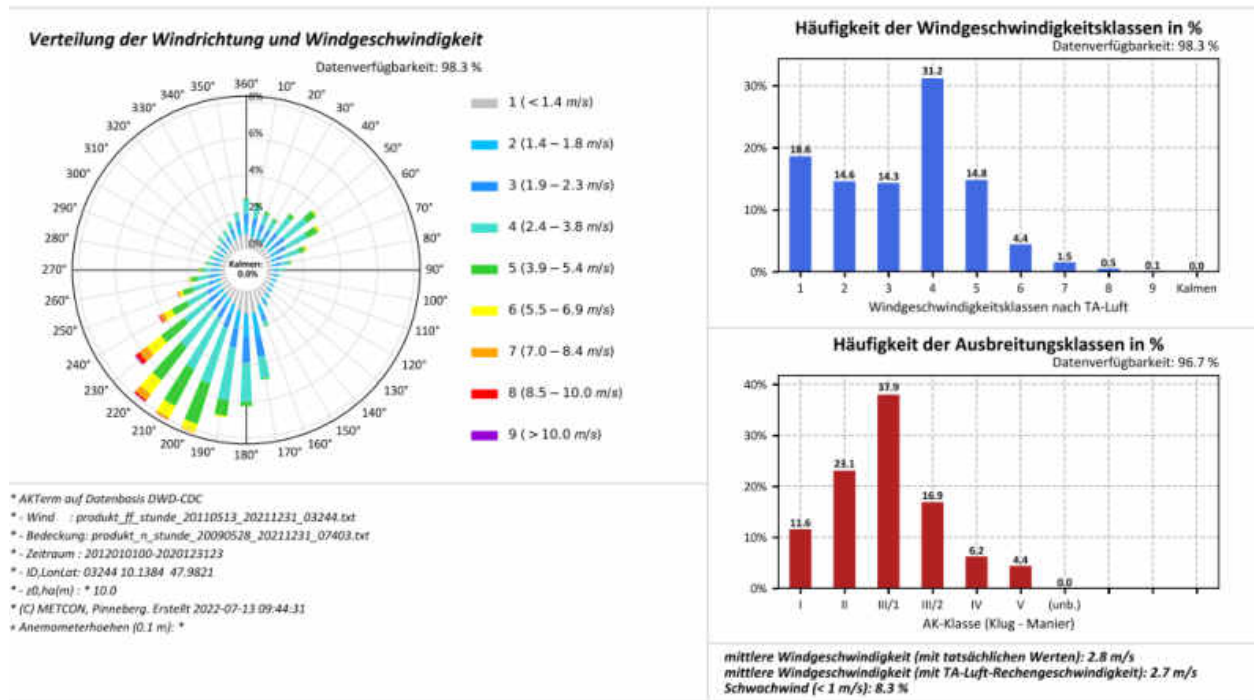


Abbildung A.73: Datenblätter der Messung (oben) und SynAKTerm 3.0 (unten) an der DWD-Station Meiningen (2011-2020).





Für den Vergleich gemessener und synthetischer Daten sind die Hinweise im Abschnitt 5.1 zu beachten.

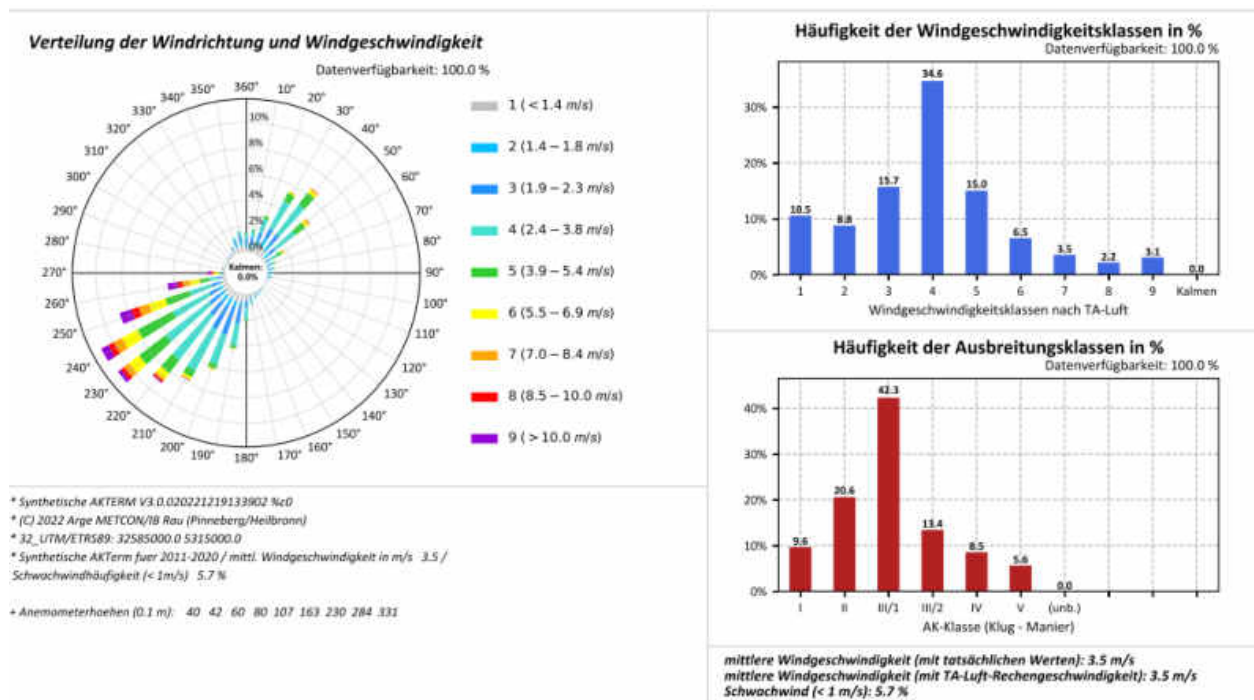
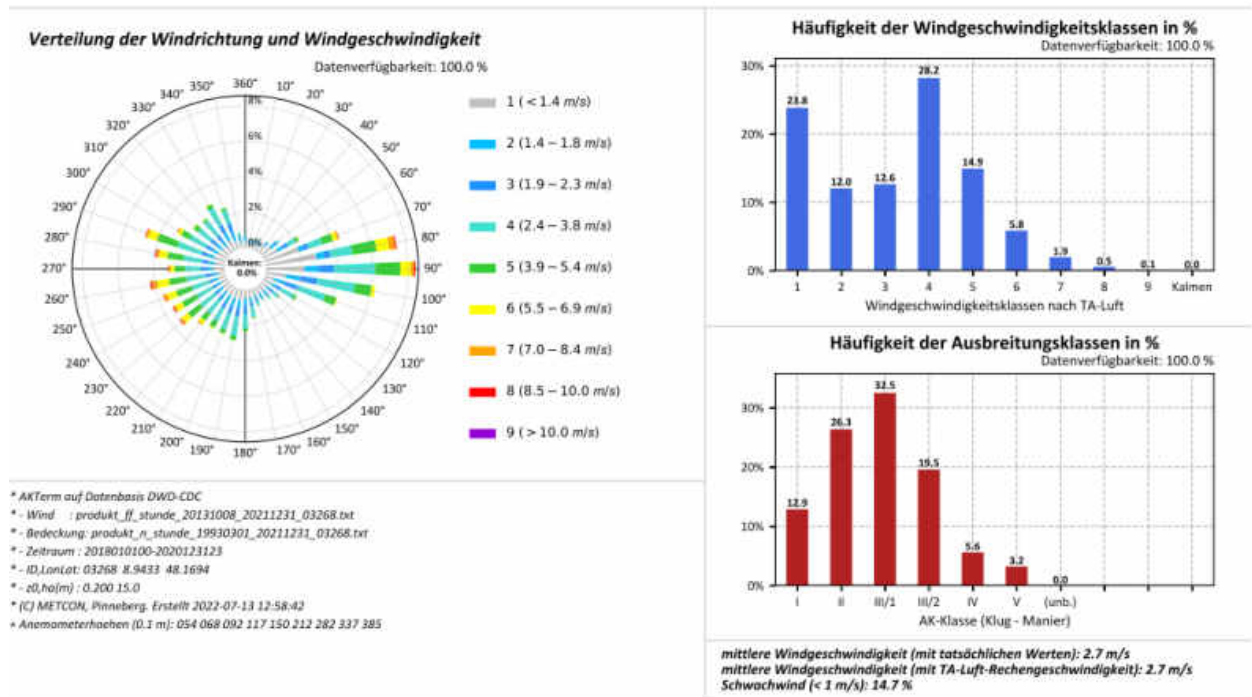


Abbildung A.74: Datenblätter der Messung (oben) und SynAKTerm 3.0 (unten) an der DWD-Station Memmingen (2012/2011-2020).



Für den Vergleich gemessener und synthetischer Daten sind die Hinweise im Abschnitt 5.1 zu beachten.

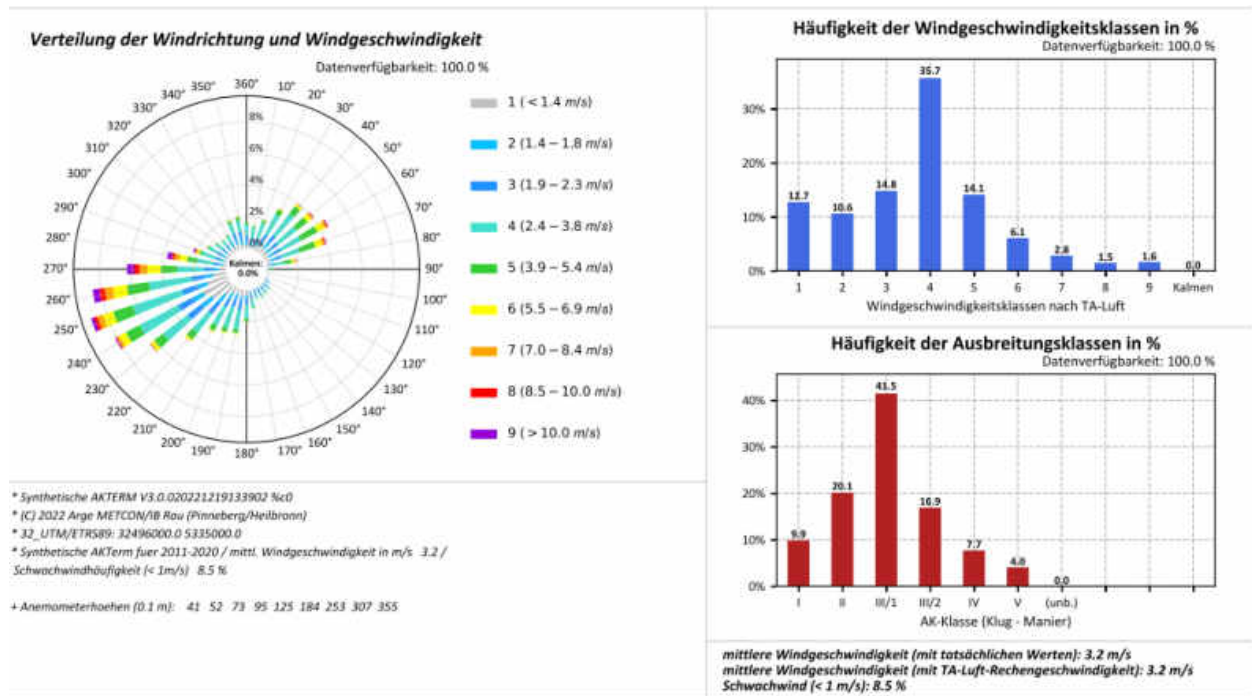
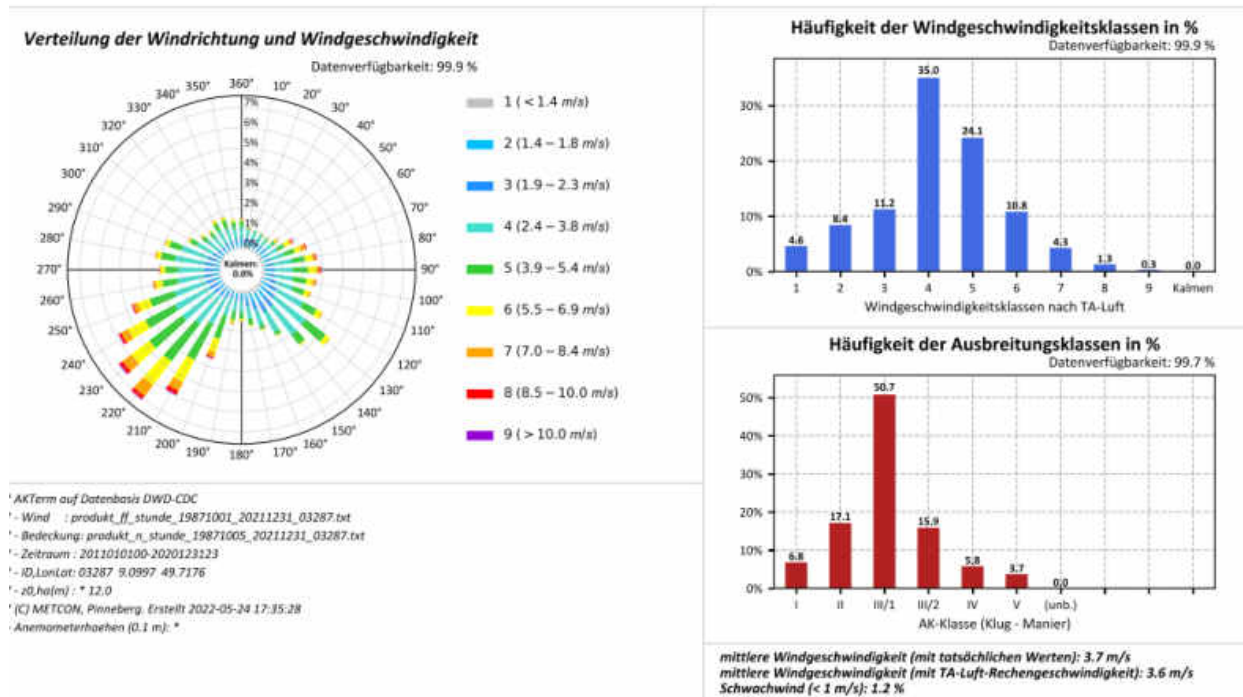


Abbildung A.75: Datenblätter der Messung (oben) und SynAKTerm 3.0 (unten) an der DWD-Station Meßstetten-Appental (2018/2011-2020).



Für den Vergleich gemessener und synthetischer Daten sind die Hinweise im Abschnitt 5.1 zu beachten.

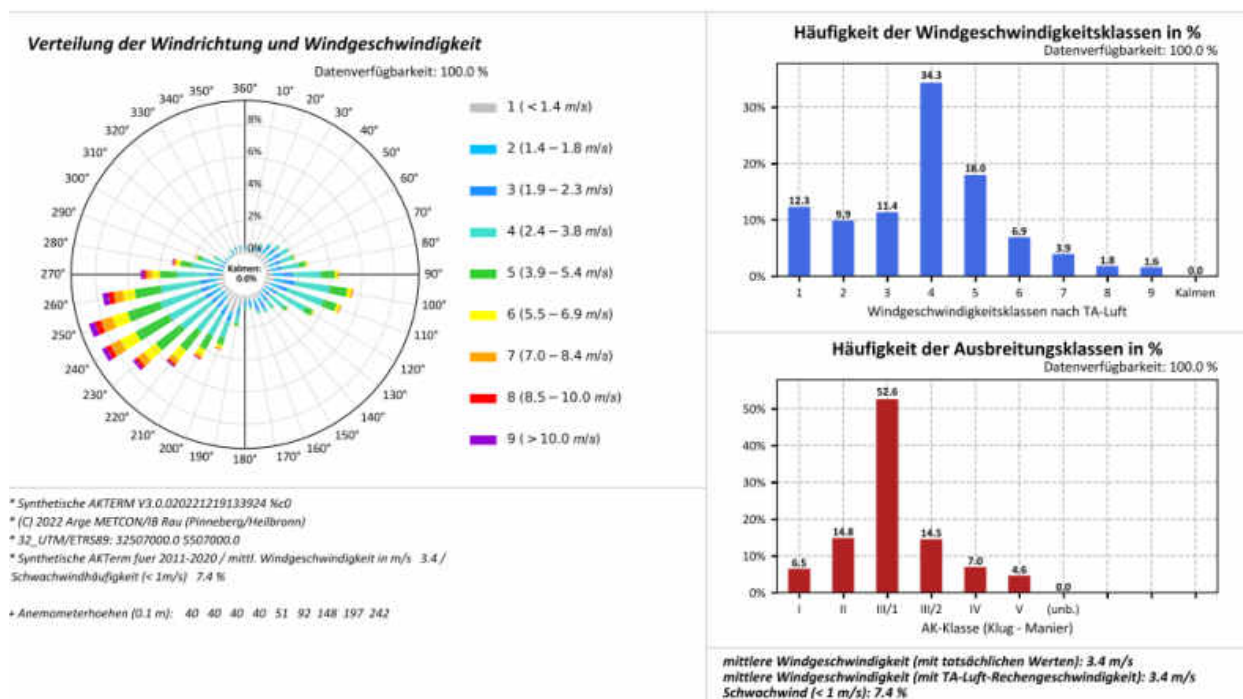
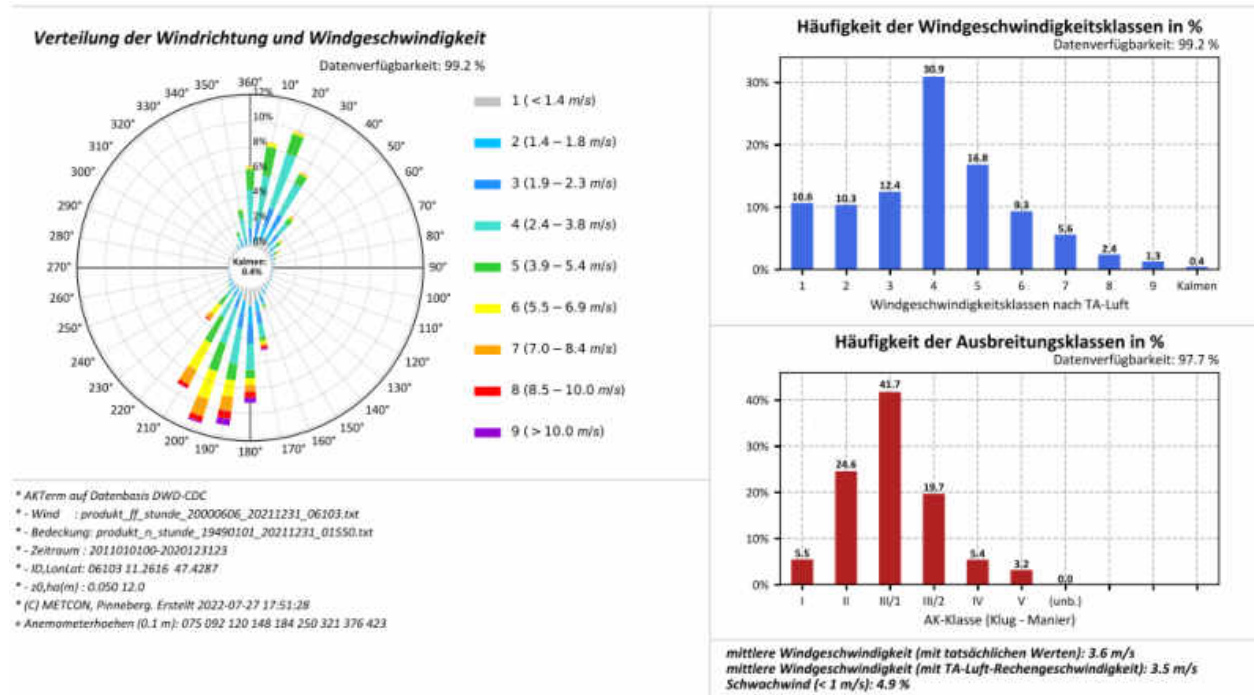


Abbildung A.76: Datenblätter der Messung (oben) und SynAKTerm 3.0 (unten) an der DWD-Station Michelstadt-Vielbrunn (2011-2020).



Für den Vergleich gemessener und synthetischer Daten sind die Hinweise im Abschnitt 5.1 zu beachten.

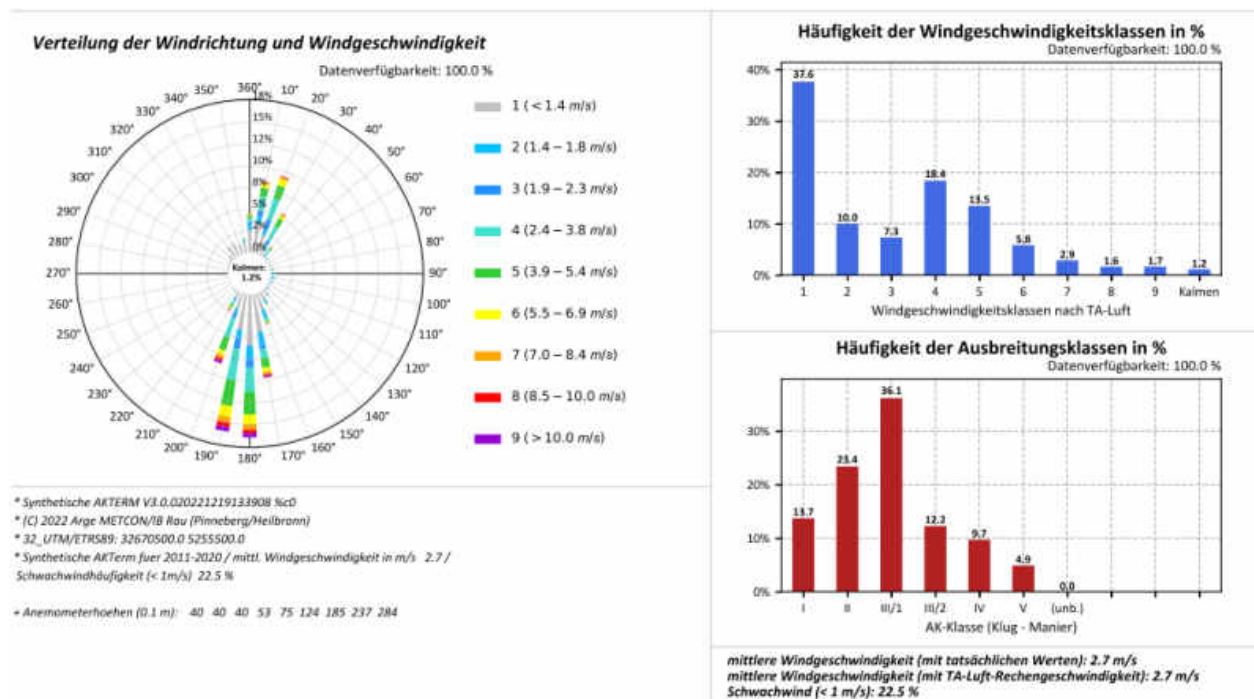
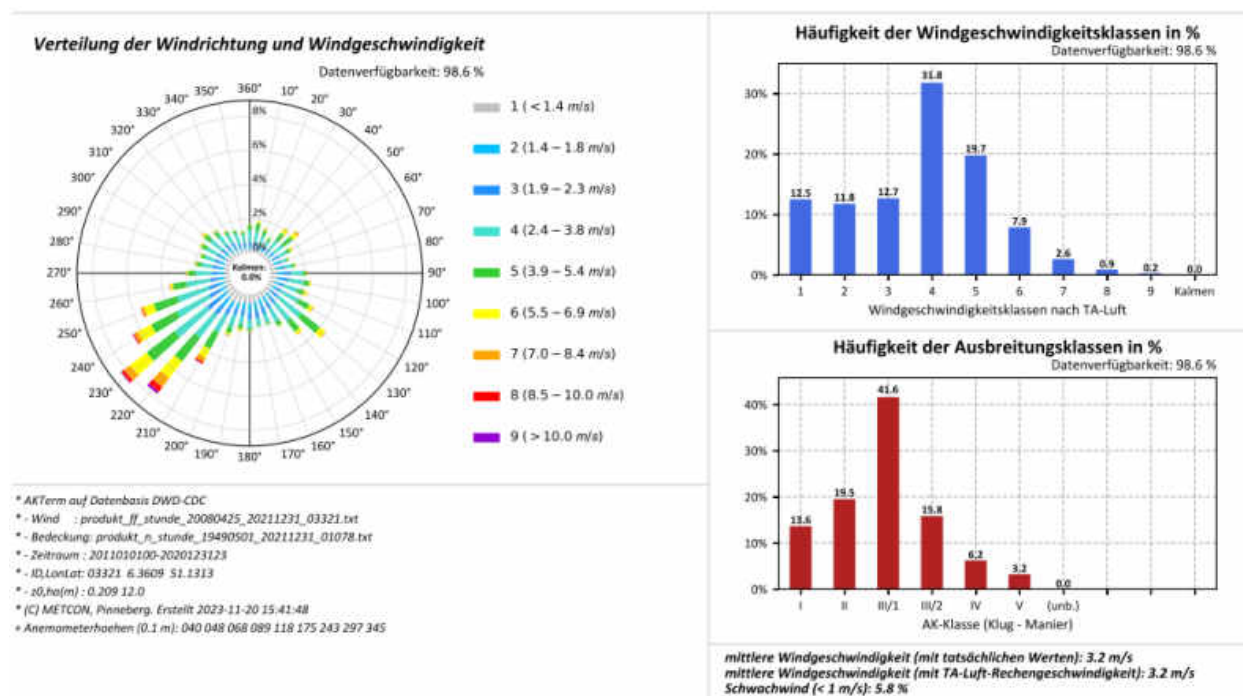


Abbildung A.77: Datenblätter der Messung (oben) und SynAKTerm 3.0 (unten) an der DWD-Station Mittenwald (2011-2020).



Für den Vergleich gemessener und synthetischer Daten sind die Hinweise im Abschnitt 5.1 zu beachten.

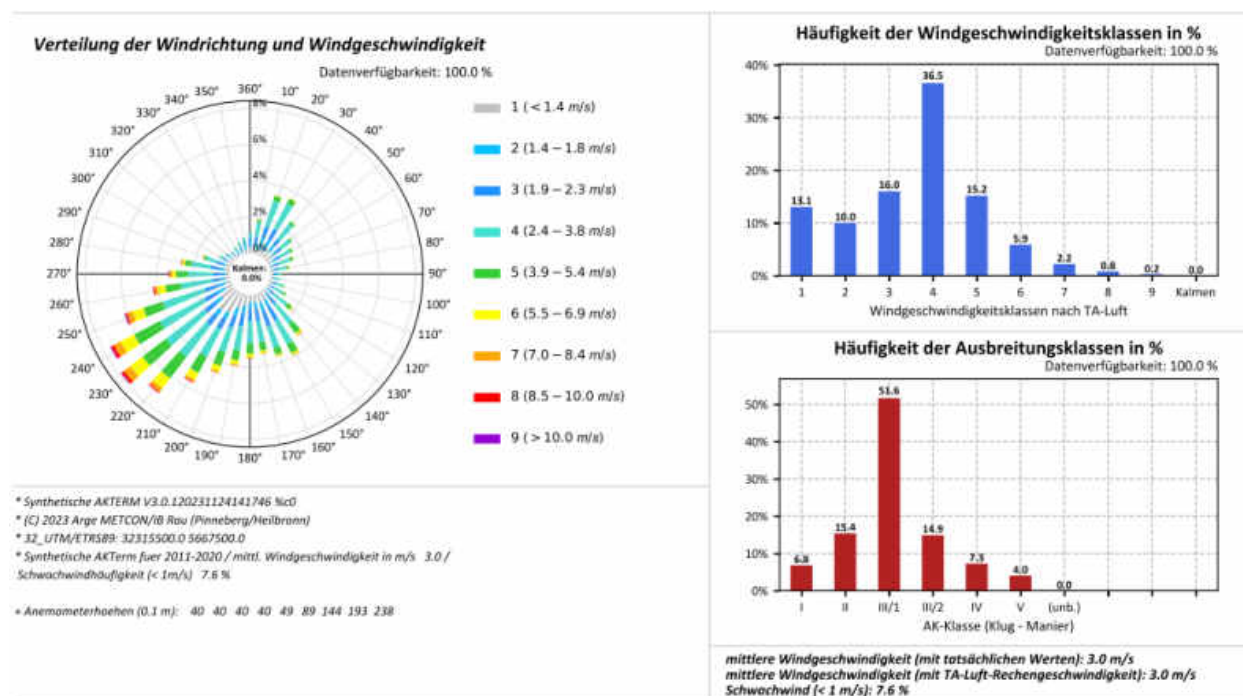
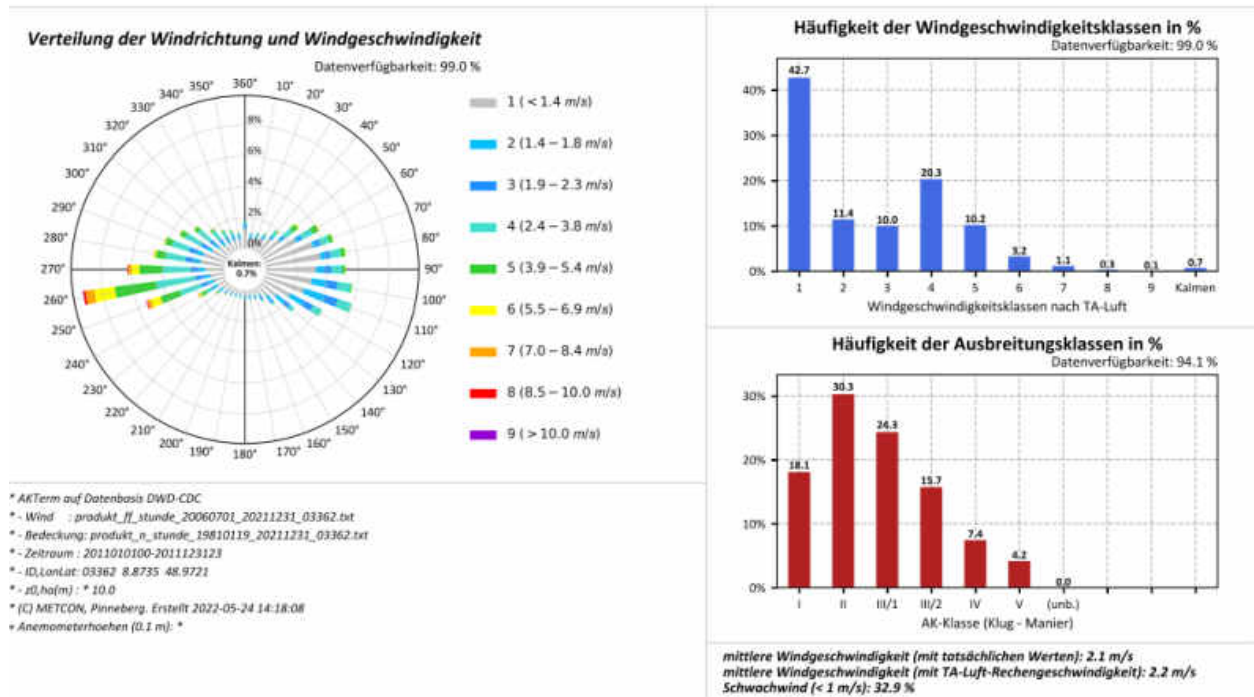


Abbildung A.78: Datenblätter der Messung (oben) und SynAKTerm 3.0 (unten) an der DWD-Station Mönchengladbach-Hilderath (2011-2020).



Für den Vergleich gemessener und synthetischer Daten sind die Hinweise im Abschnitt 5.1 zu beachten.

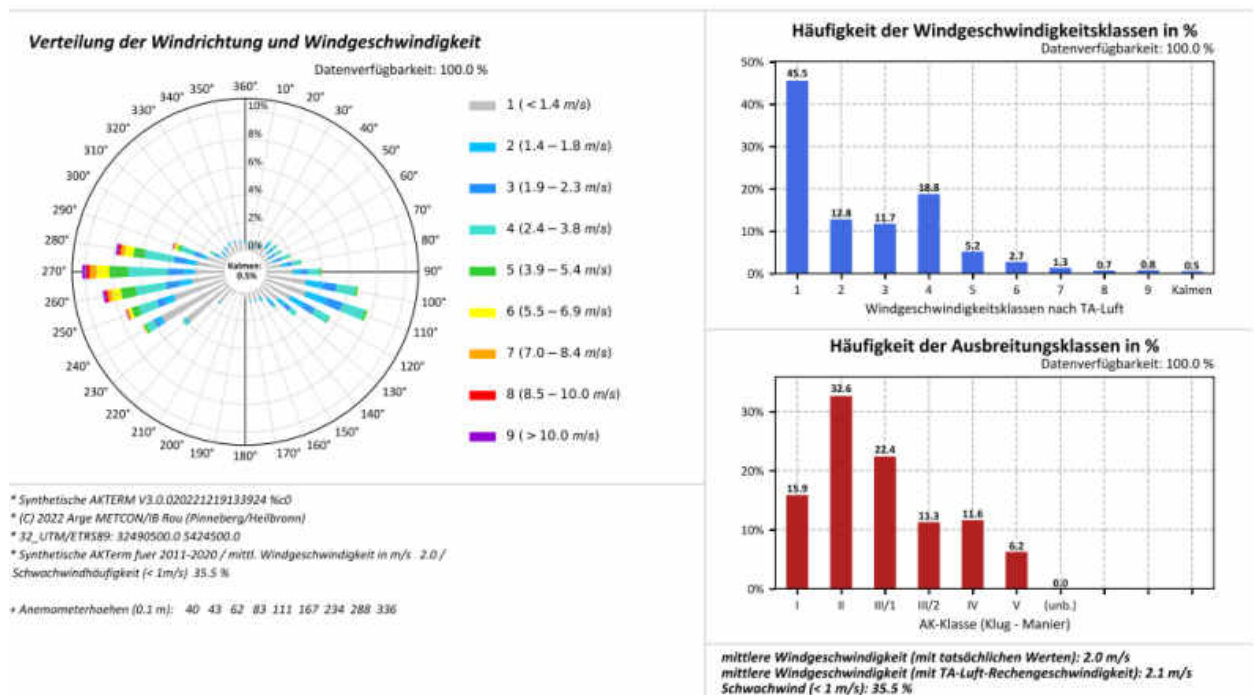
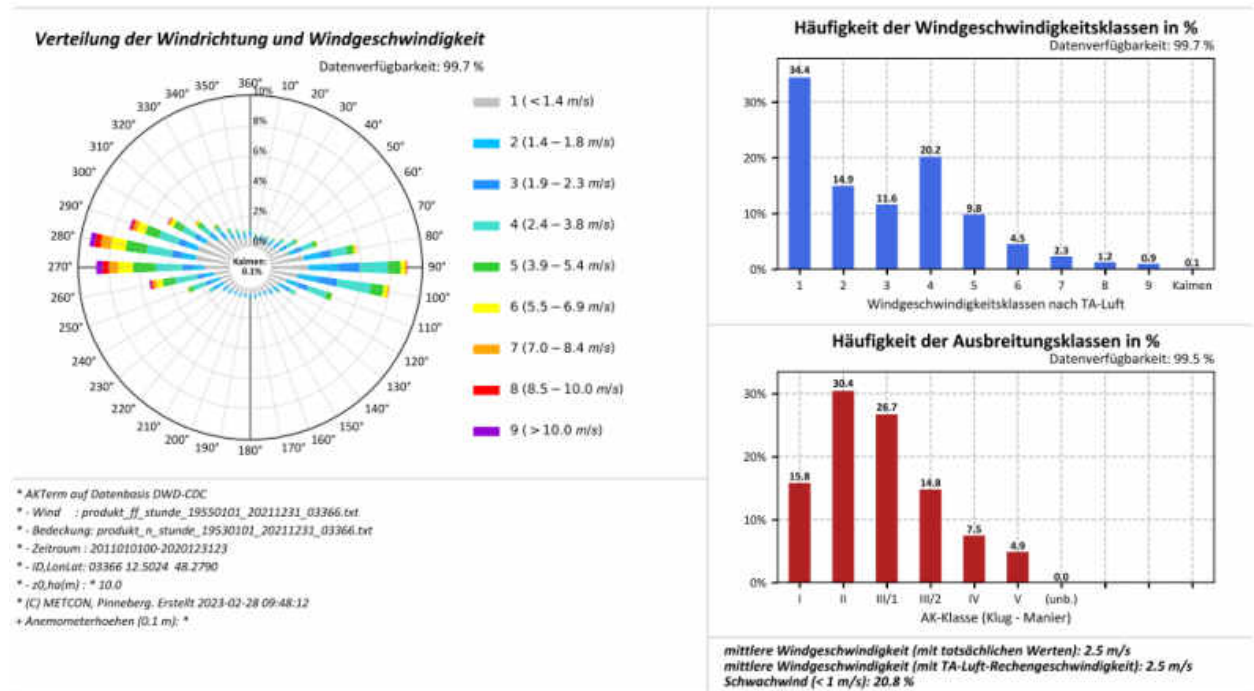


Abbildung A.79: Datenblätter der Messung (oben) und SynAKTerm 3.0 (unten) an der DWD-Station Mühlacker (2011-2020).



Für den Vergleich gemessener und synthetischer Daten sind die Hinweise im Abschnitt 5.1 zu beachten.

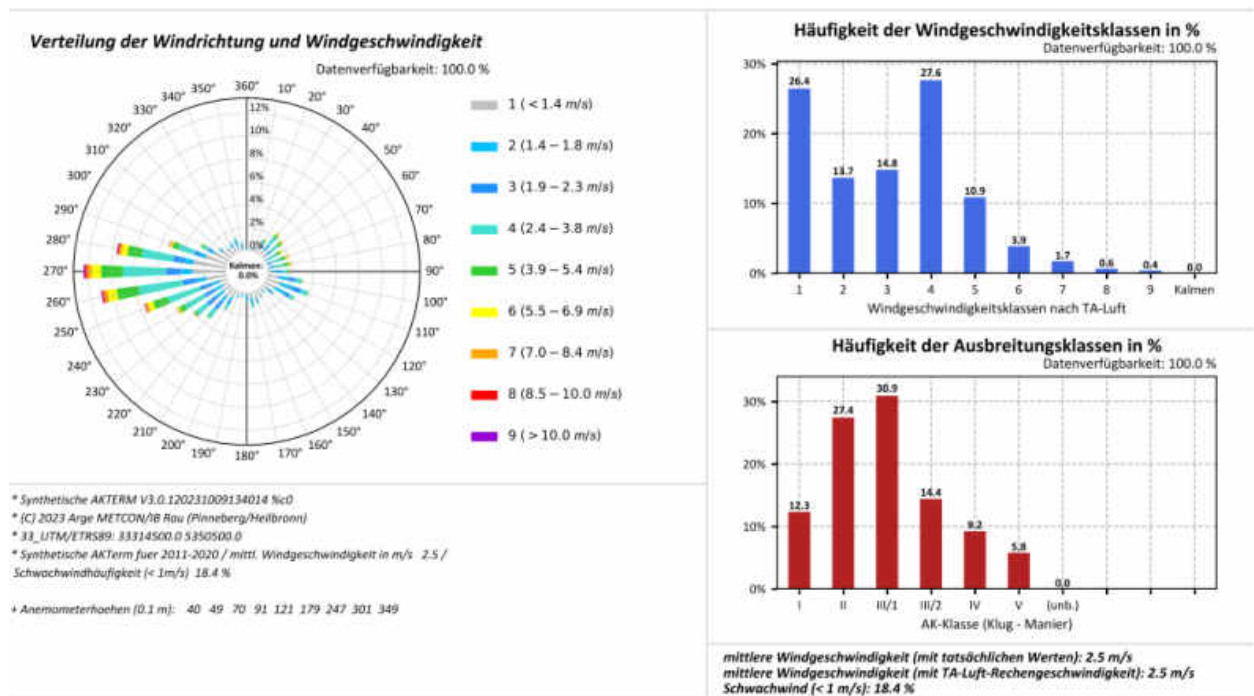
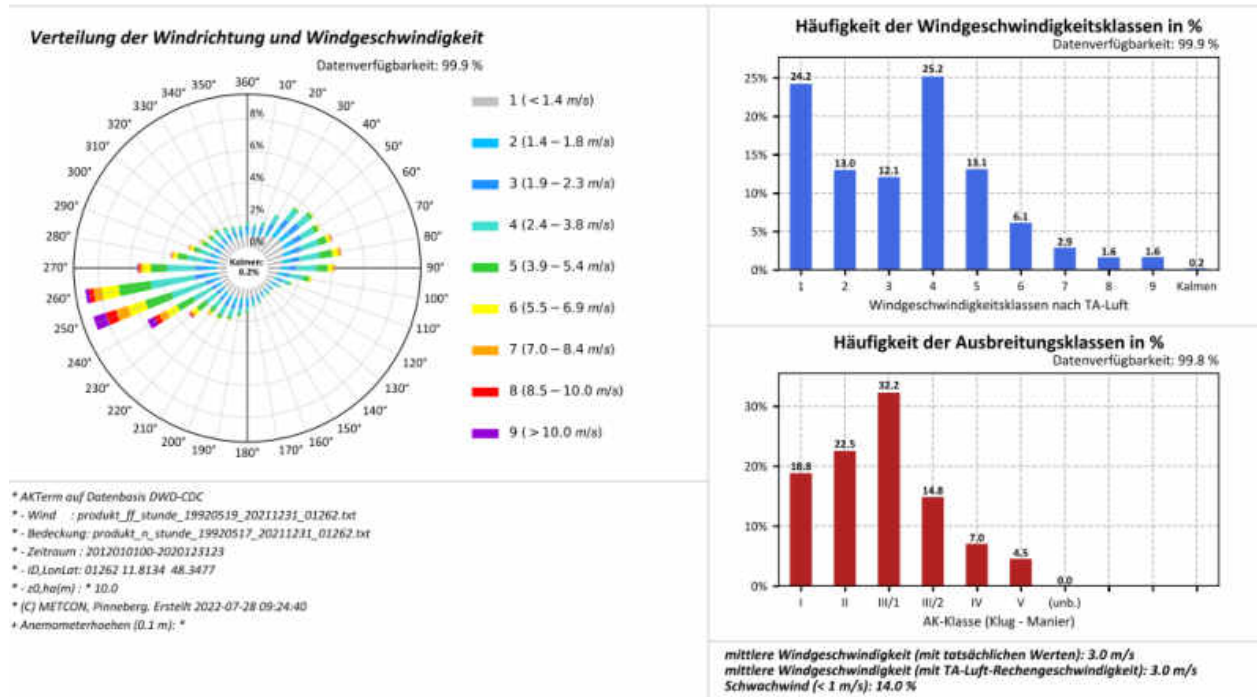


Abbildung A.80: Datenblätter der Messung (oben) und SynAKTerm 3.0 (unten) an der DWD-Station Mühldorf (2011-2020).



Für den Vergleich gemessener und synthetischer Daten sind die Hinweise im Abschnitt 5.1 zu beachten.

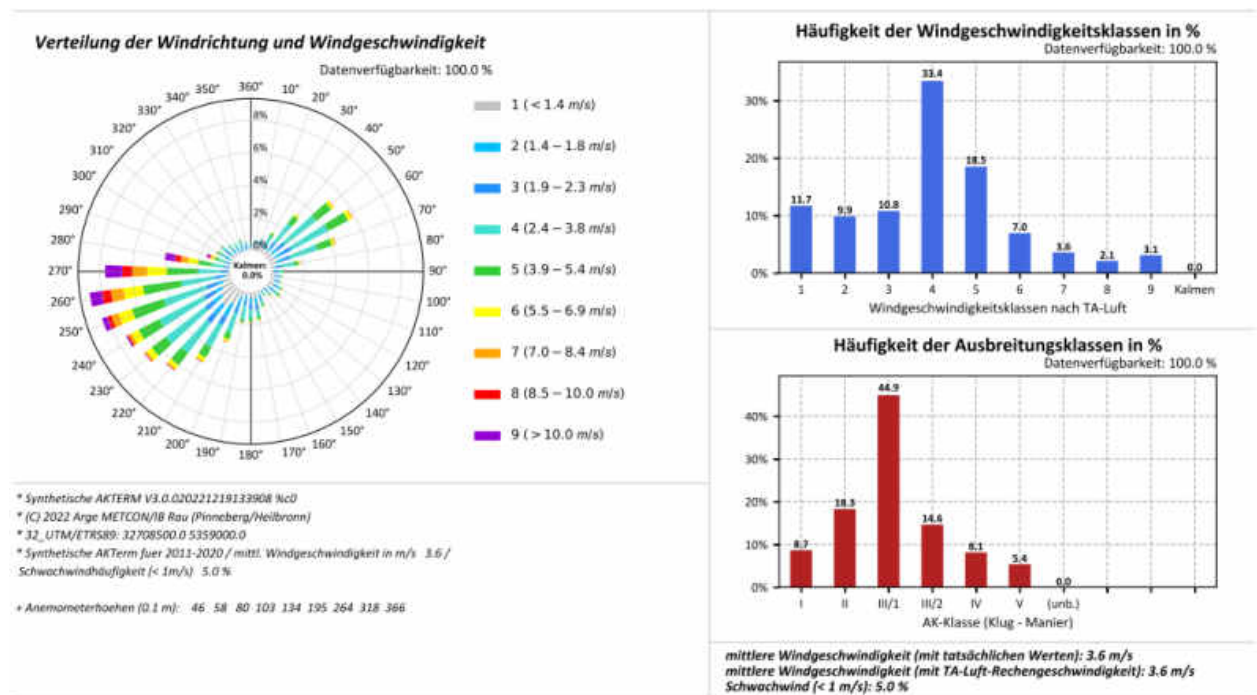
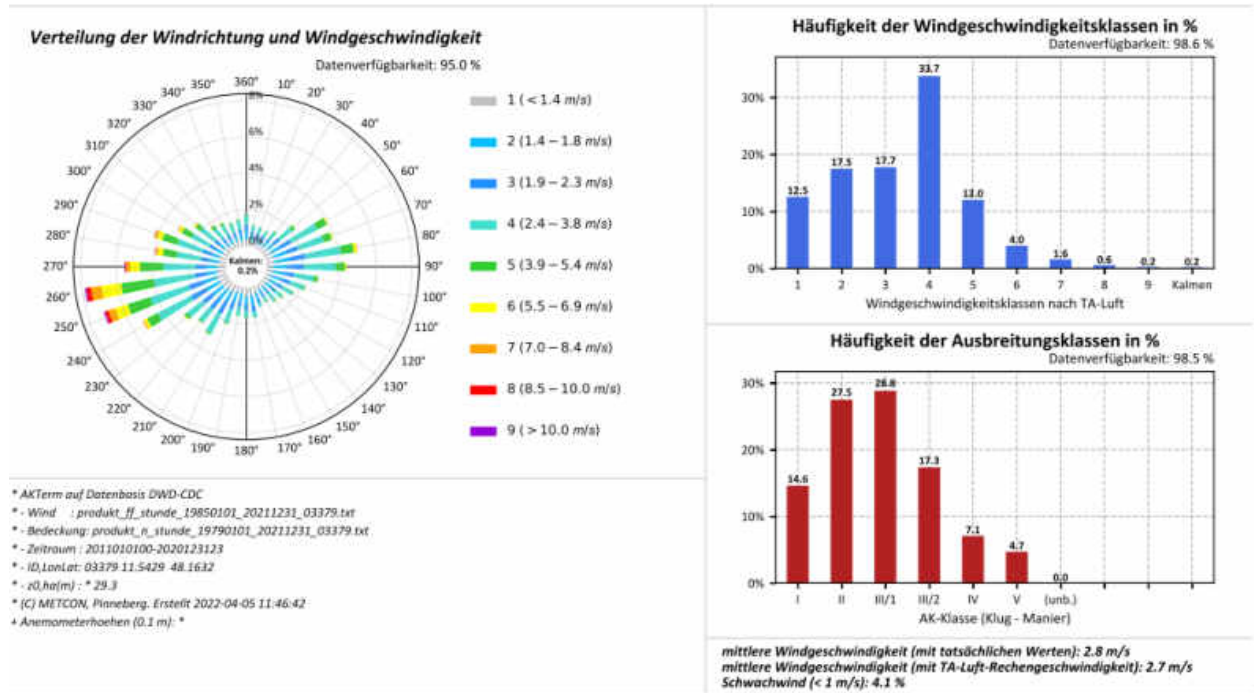


Abbildung A.81: Datenblätter der Messung (oben) und SynAKTerm 3.0 (unten) an der DWD-Station München-Flughafen (2012/2011-2020).





Für den Vergleich gemessener und synthetischer Daten sind die Hinweise im Abschnitt 5.1 zu beachten.

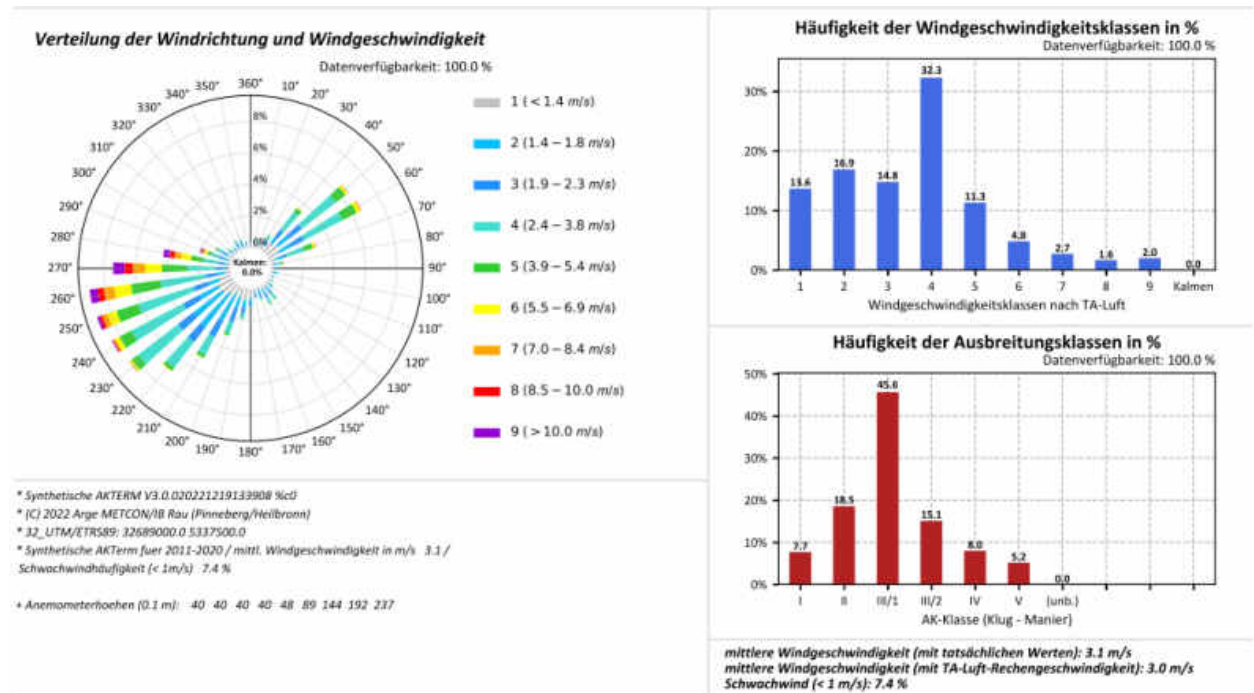
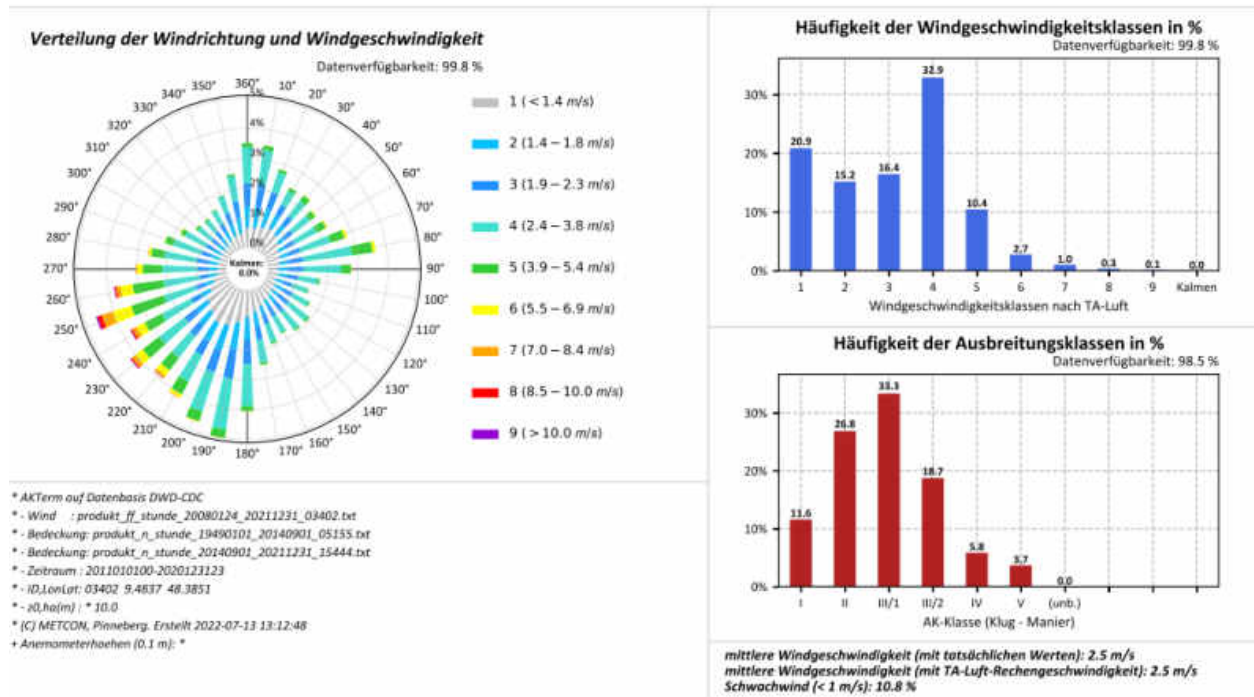


Abbildung A.82: Datenblätter der Messung (oben) und SynAKTerm 3.0 (unten) an der DWD-Station München-Stadt (2011-2020).



Für den Vergleich gemessener und synthetischer Daten sind die Hinweise im Abschnitt 5.1 zu beachten.

Diese Station wird im Abschnitt 5.5 diskutiert.

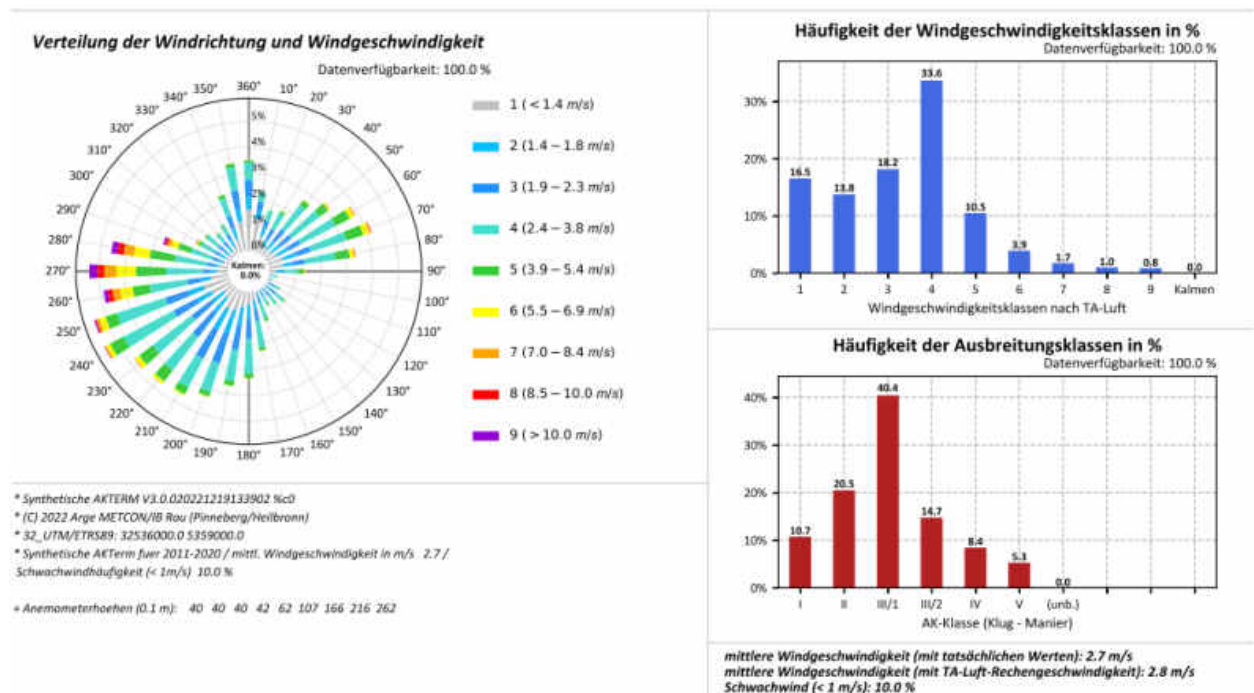
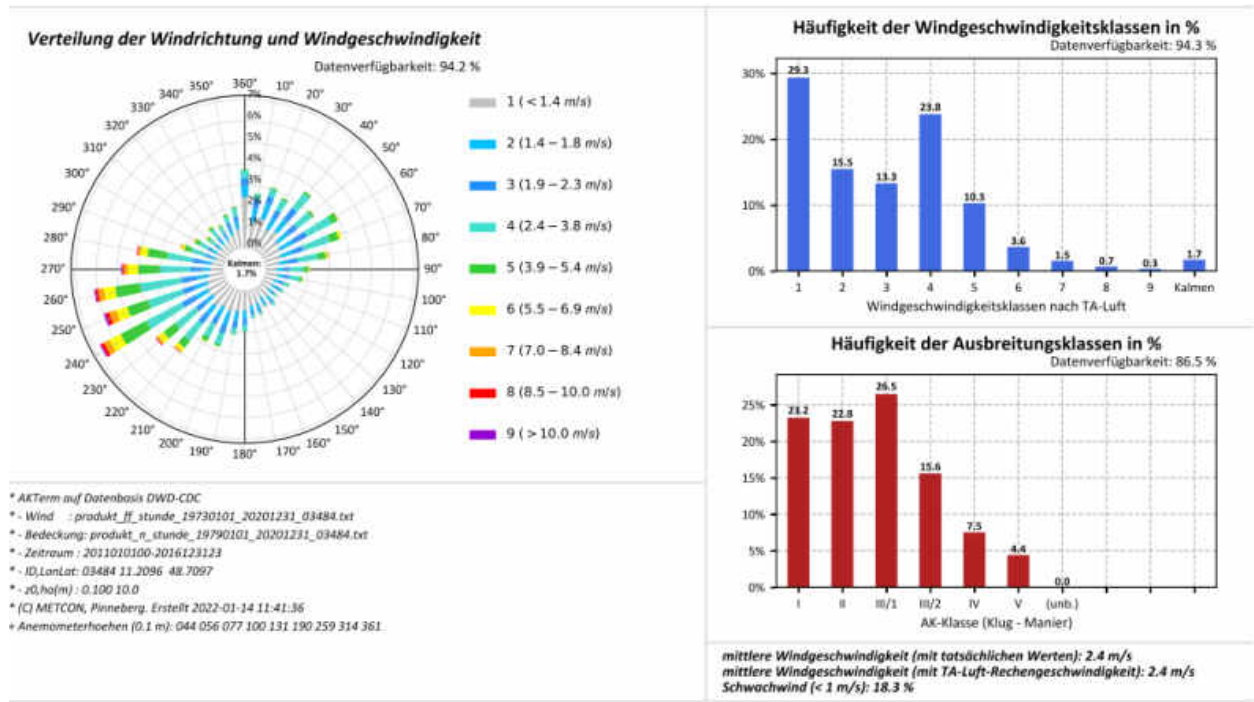


Abbildung A.83: Datenblätter der Messung (oben) und SynAKTerm 3.0 (unten) an der DWD-Station Münsingen-Apfelstetten (2011-2020).



Für den Vergleich gemessener und synthetischer Daten sind die Hinweise im Abschnitt 5.1 zu beachten.

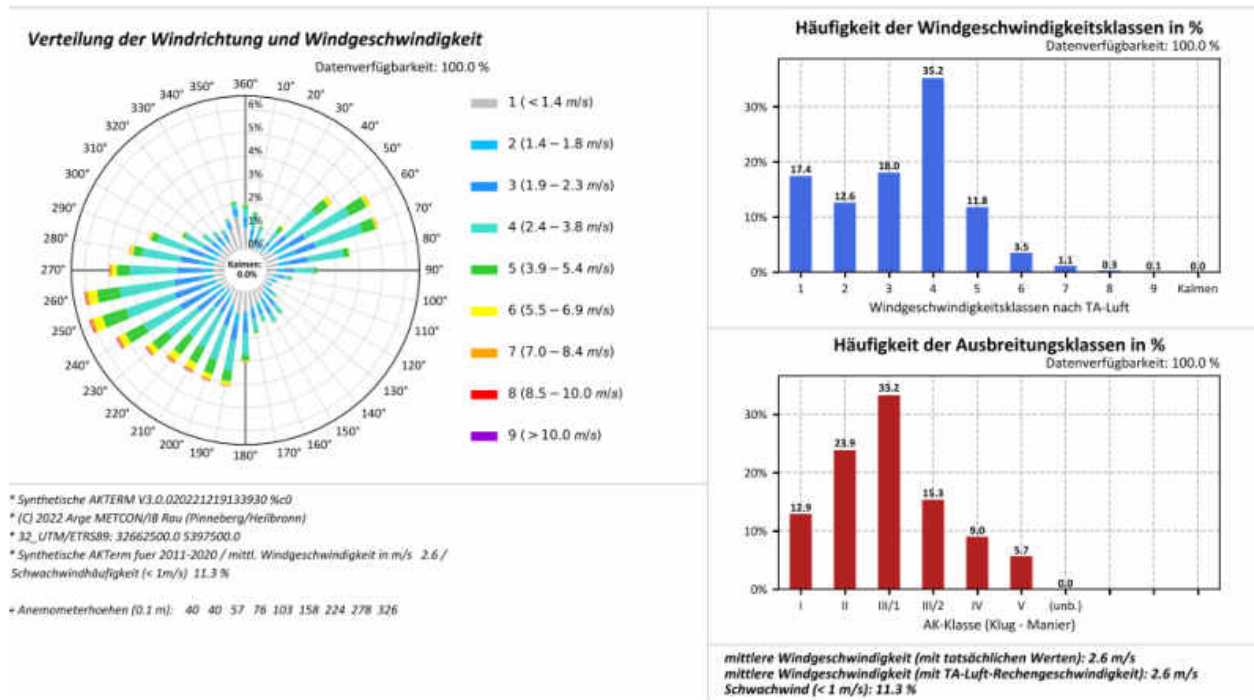
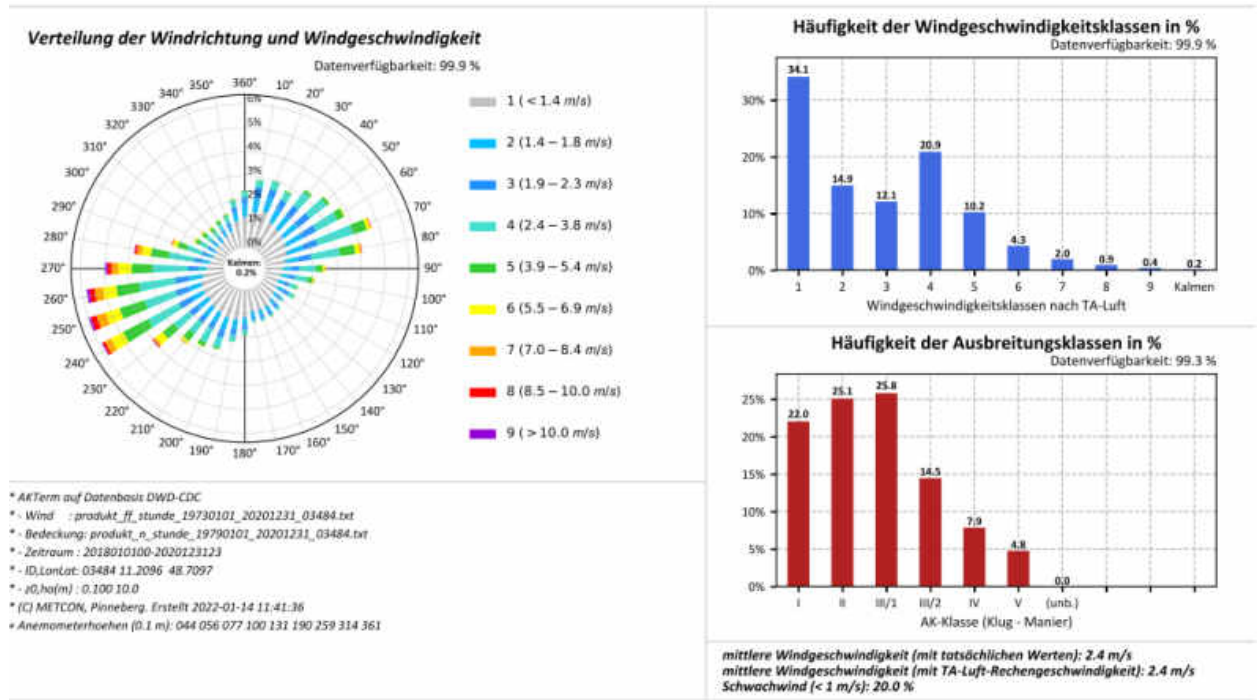


Abbildung A.84: Datenblätter der Messung (oben) und SynAKTerm 3.0 (unten) an der DWD-Station Neuburg-Donau (2011-2016/2020).



Für den Vergleich gemessener und synthetischer Daten sind die Hinweise im Abschnitt 5.1 zu beachten.

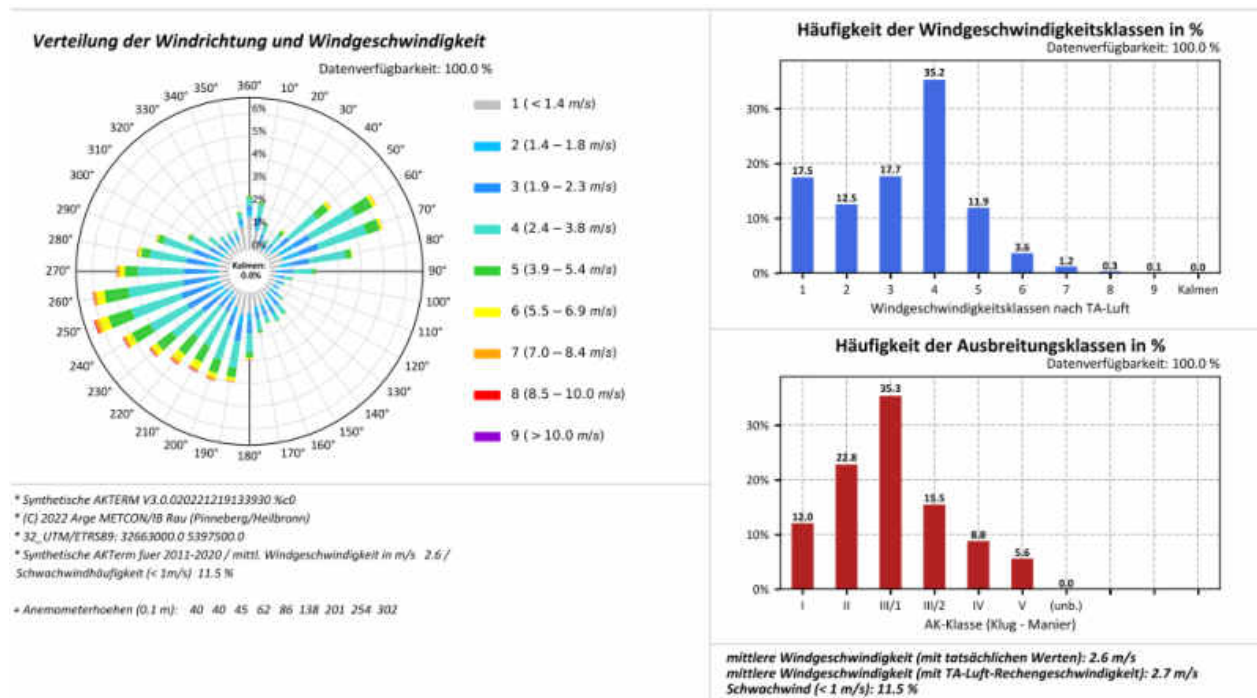
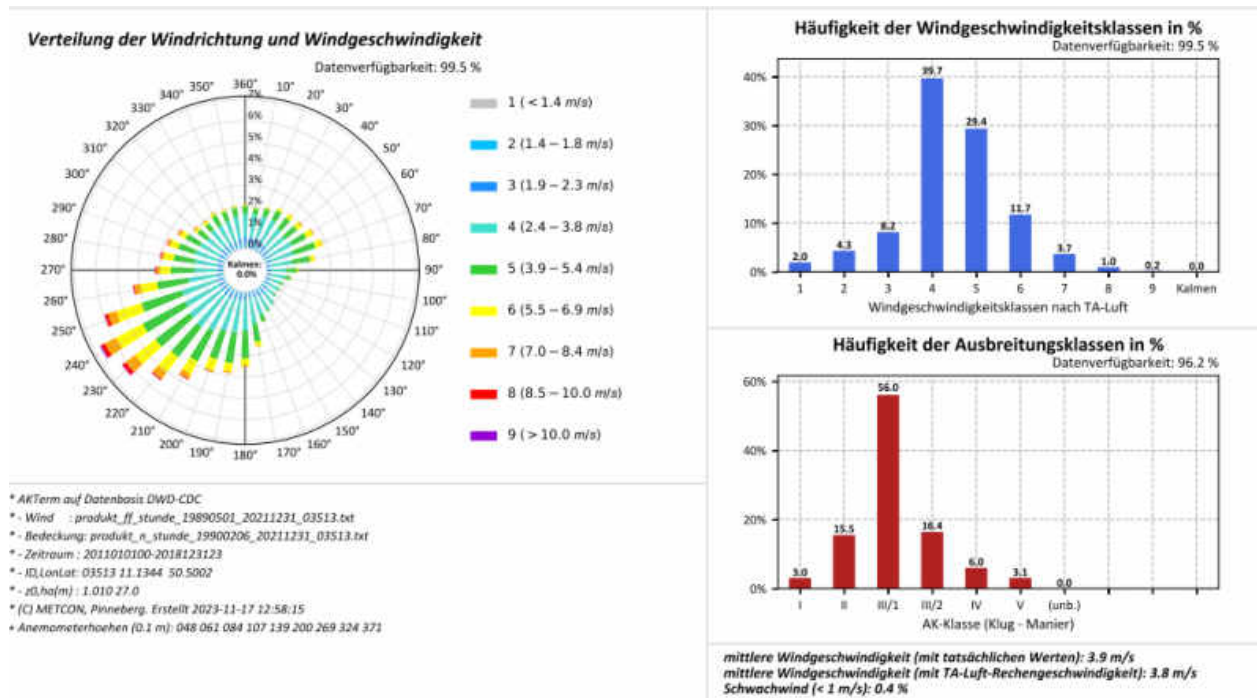


Abbildung A.85: Datenblätter der Messung (oben) und SynAKTerm 3.0 (unten) an der DWD-Station Neuburg-Donau (2018/2011-2020).



Für den Vergleich gemessener und synthetischer Daten sind die Hinweise im Abschnitt 5.1 zu beachten.

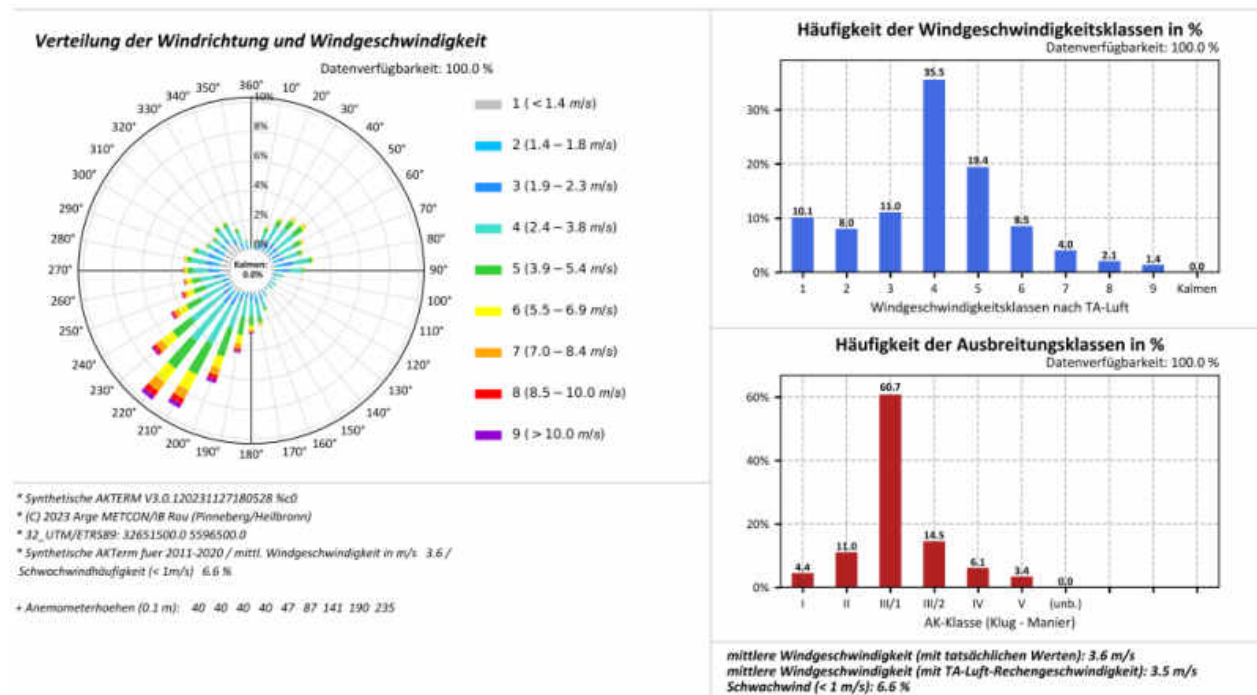
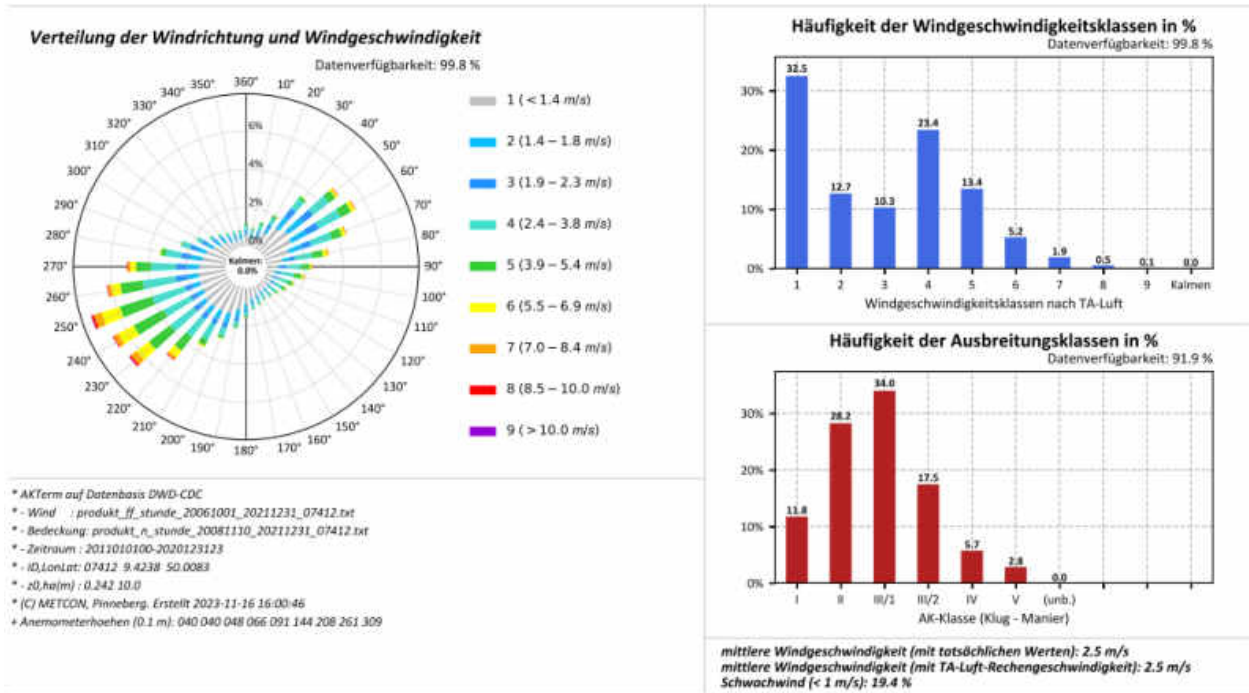


Abbildung A.86: Datenblätter der Messung (oben) und SynAKTerm 3.0 (unten) an der DWD-Station Neuhaus am Rennweg (2011-2018/2020).



Für den Vergleich gemessener und synthetischer Daten sind die Hinweise im Abschnitt 5.1 zu beachten.

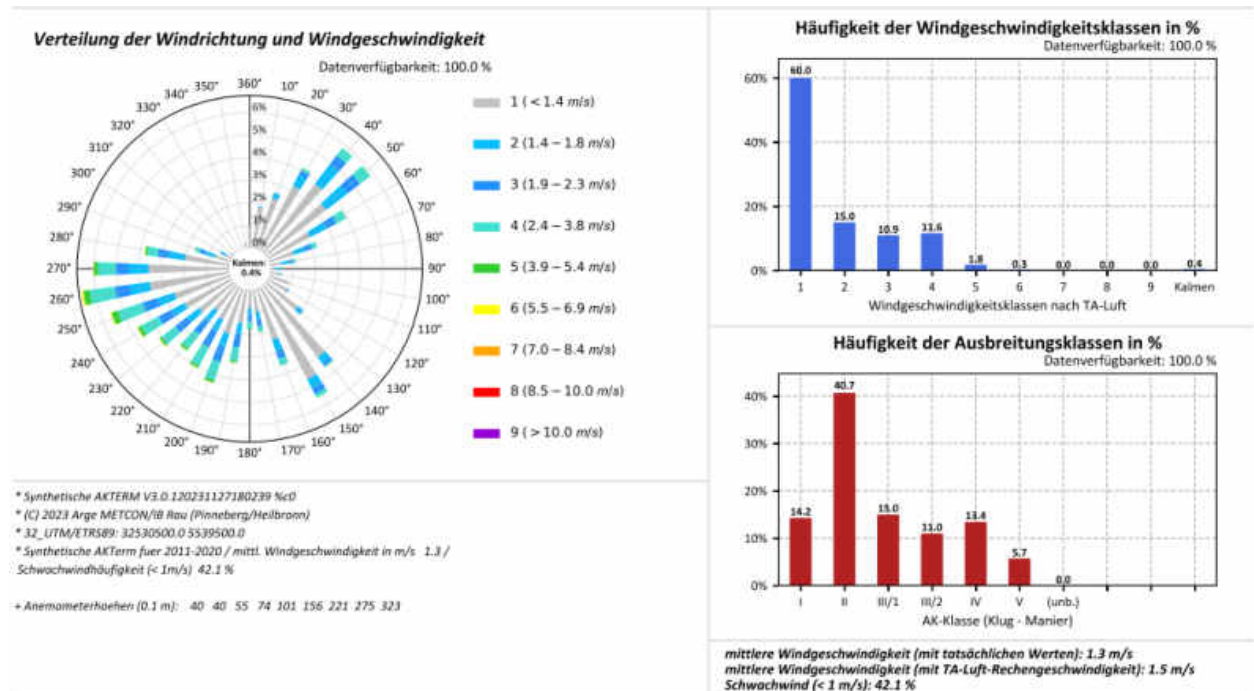
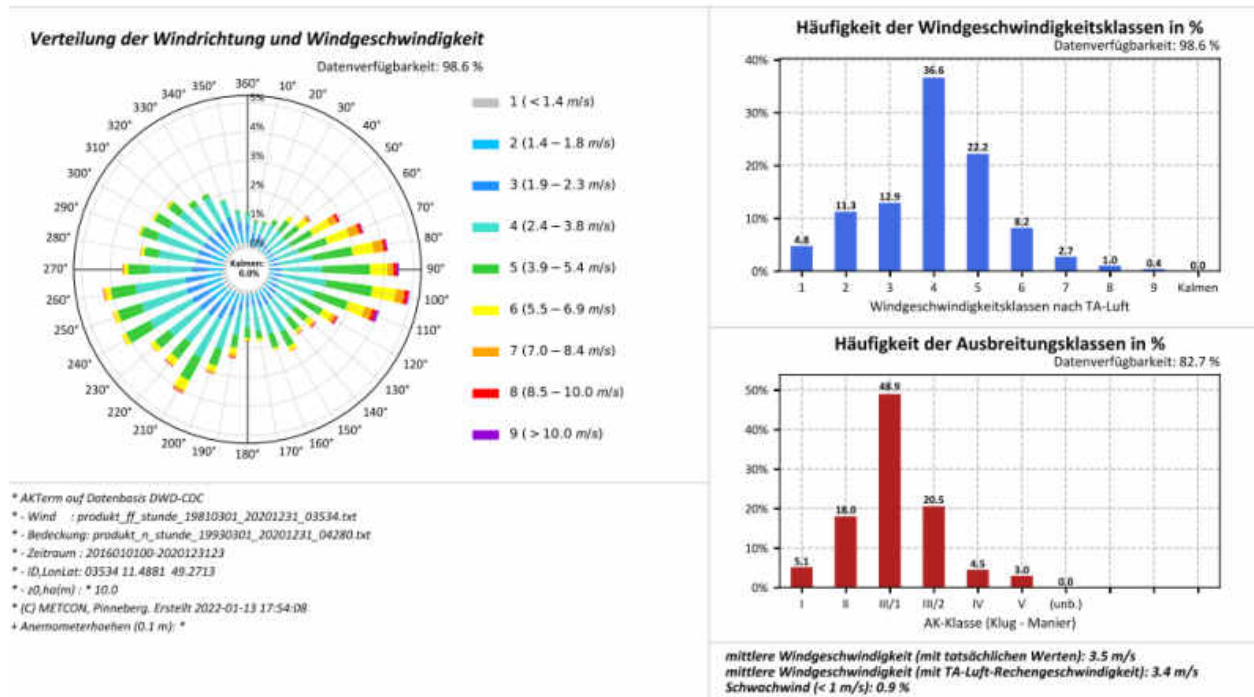


Abbildung A.87: Datenblätter der Messung (oben) und SynAKTerm 3.0 (unten) an der DWD-Station Neuhütten / Spessart (2011-2020).



Für den Vergleich gemessener und synthetischer Daten sind die Hinweise im Abschnitt 5.1 zu beachten.

Diese Station wird im Abschnitt 5.5 diskutiert.

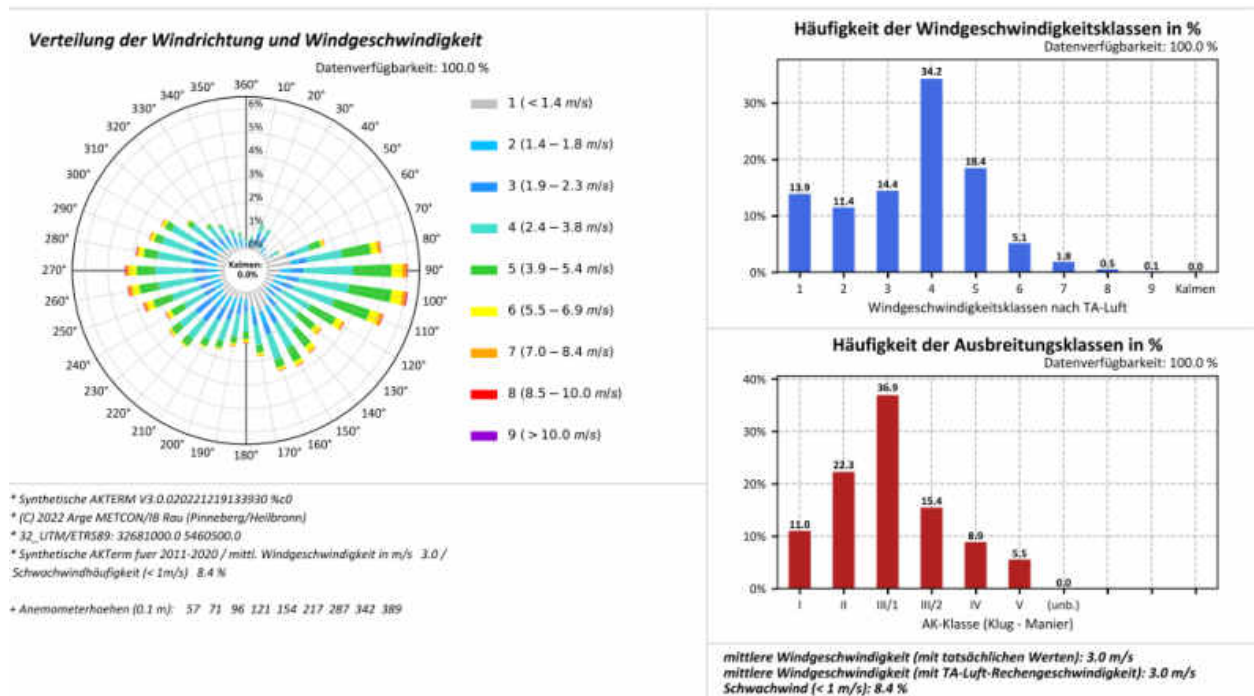
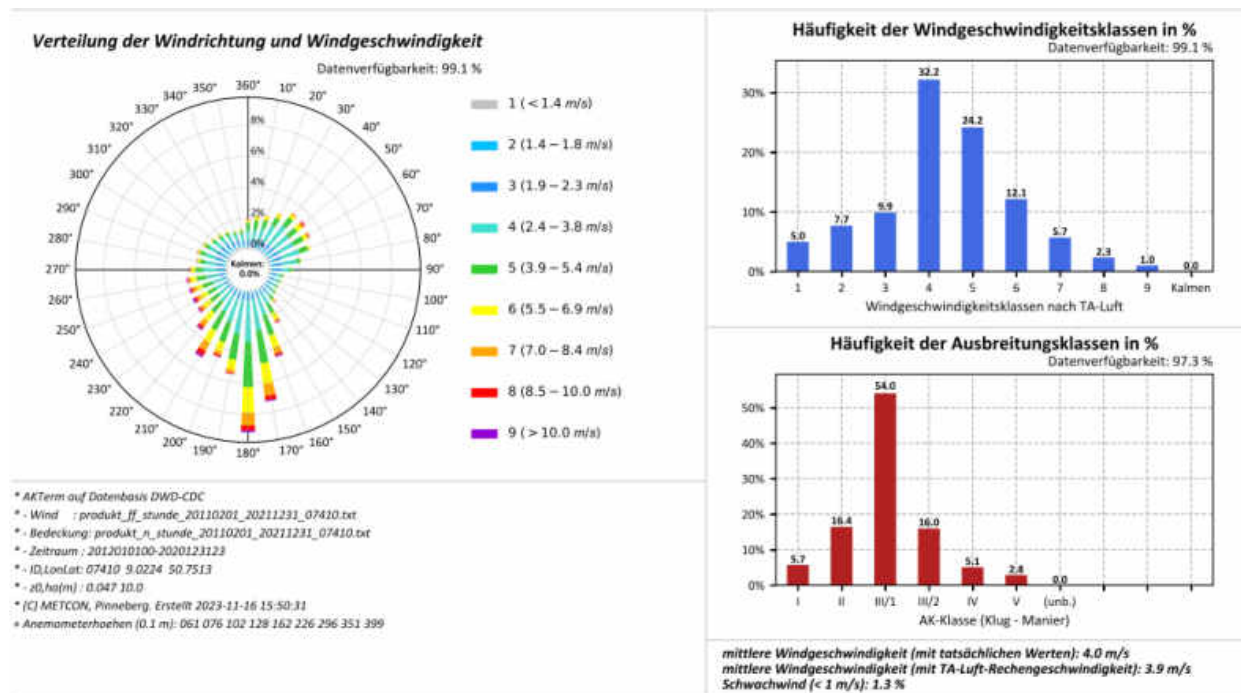


Abbildung A.88: Datenblätter der Messung (oben) und SynAKTerm 3.0 (unten) an der DWD-Station Neumarkt-Höhenberg (2016/2011-2020).



Für den Vergleich gemessener und synthetischer Daten sind die Hinweise im Abschnitt 5.1 zu beachten.

Diese Station wird im Abschnitt 5.5 diskutiert.

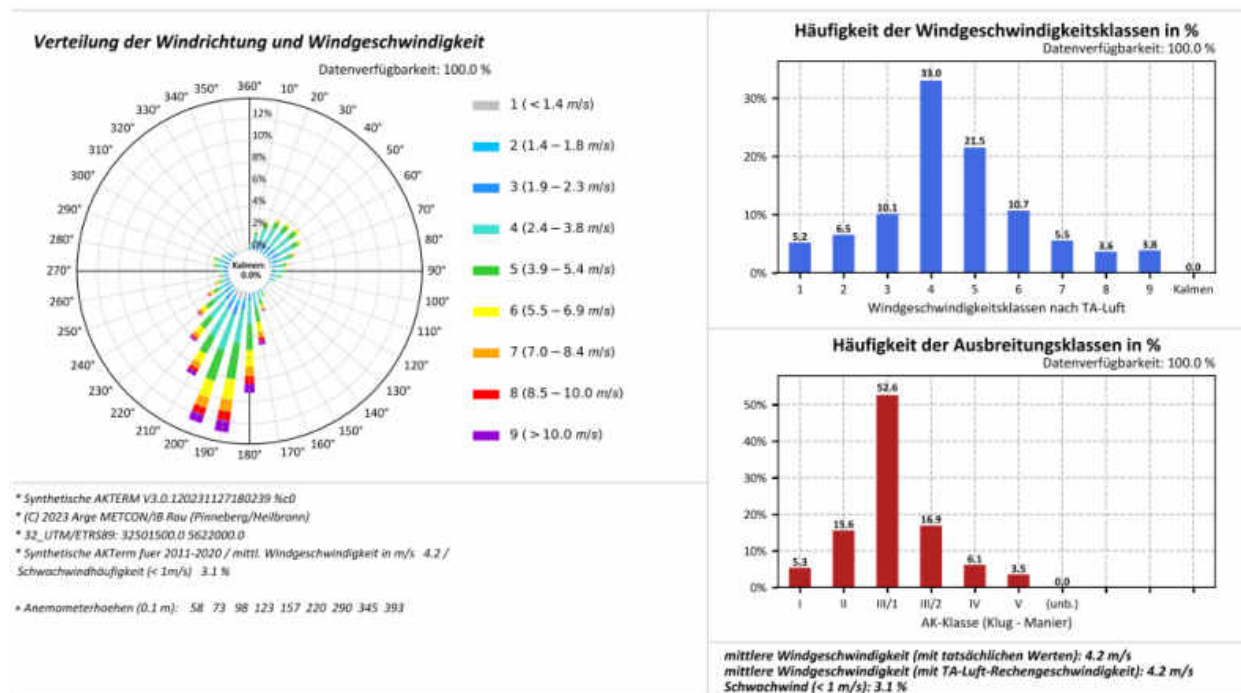
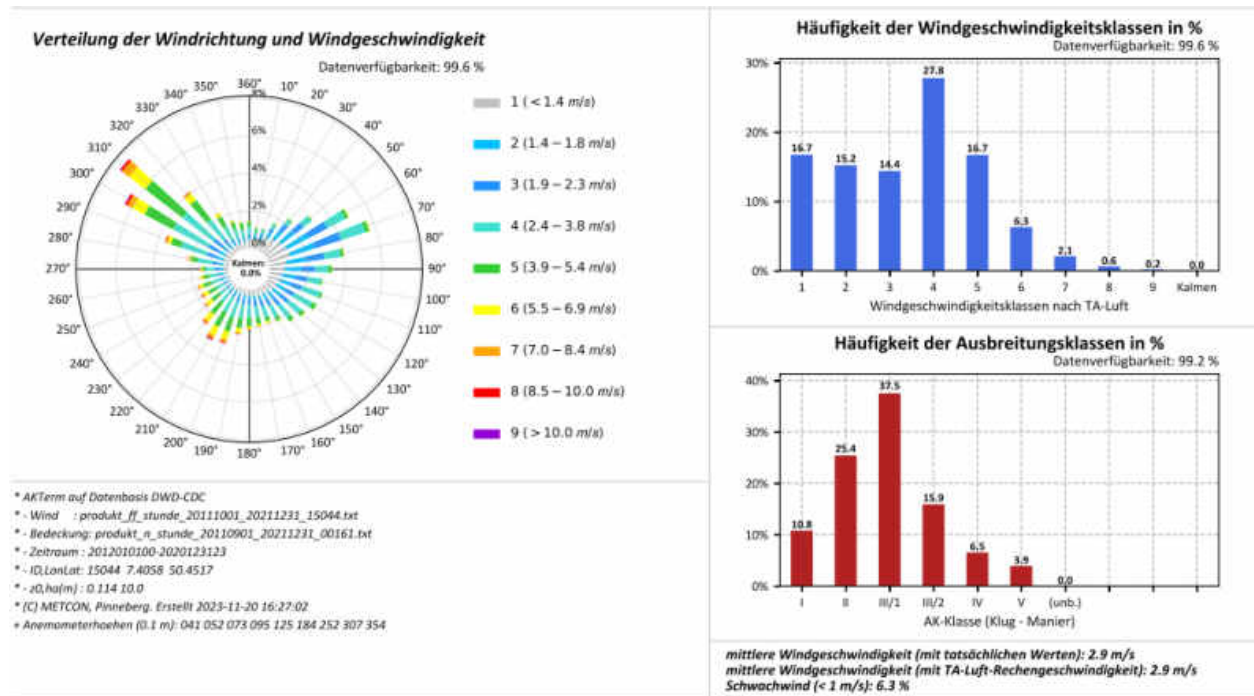


Abbildung A.89: Datenblätter der Messung (oben) und SynAKTerm 3.0 (unten) an der DWD-Station Neu-Ulrichstein (2012/2011-2020).





Für den Vergleich gemessener und synthetischer Daten sind die Hinweise im Abschnitt 5.1 zu beachten.

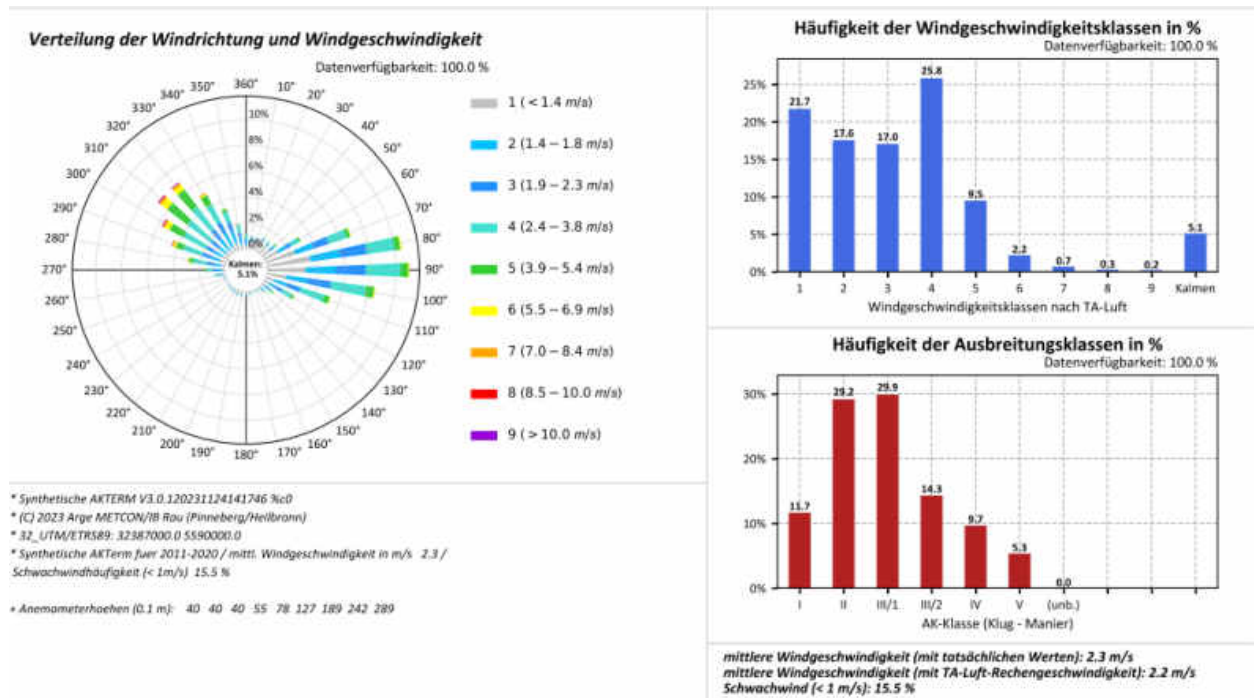
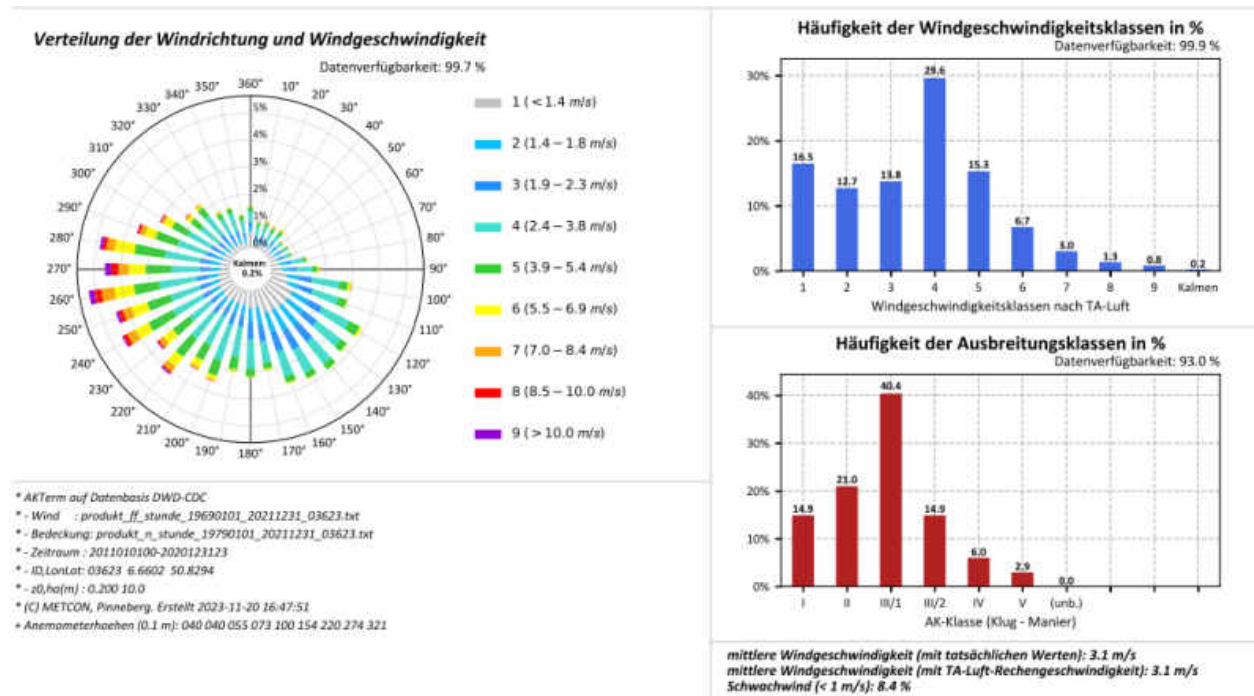


Abbildung A.90: Datenblätter der Messung (oben) und SynAKTerm 3.0 (unten) an der DWD-Station Neuwied-Feldkirchen-Hüllenberg (2012/2011-2020).



Für den Vergleich gemessener und synthetischer Daten sind die Hinweise im Abschnitt 5.1 zu beachten.

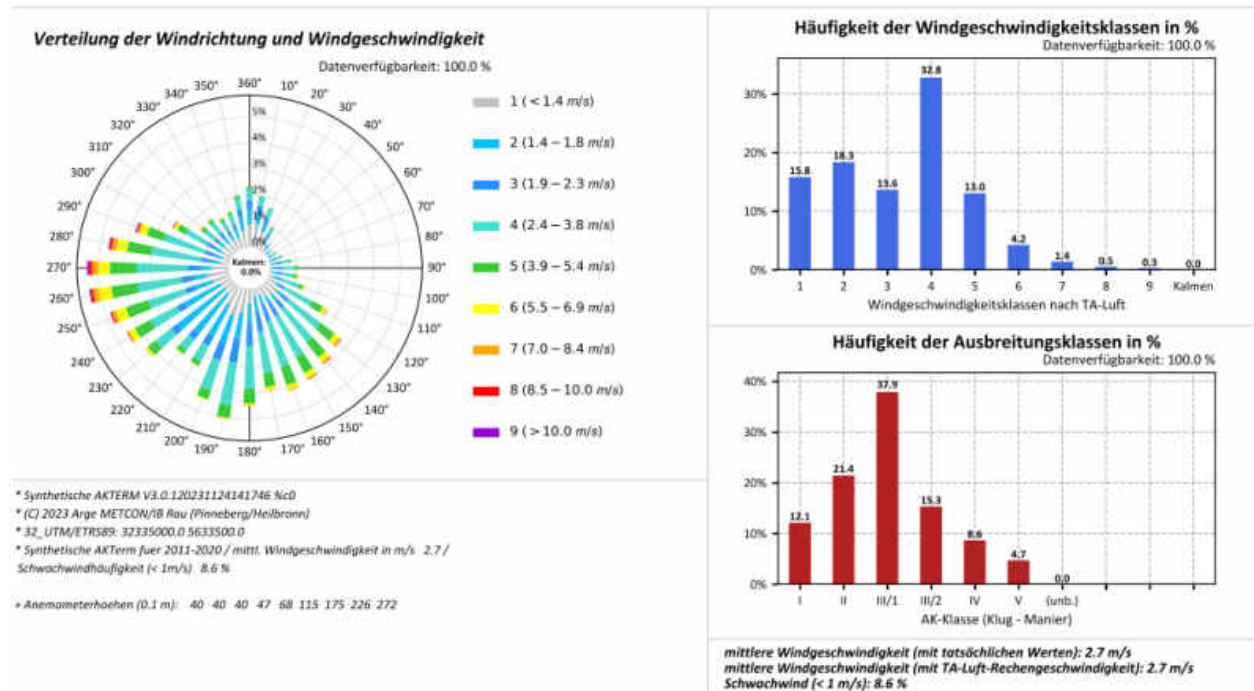
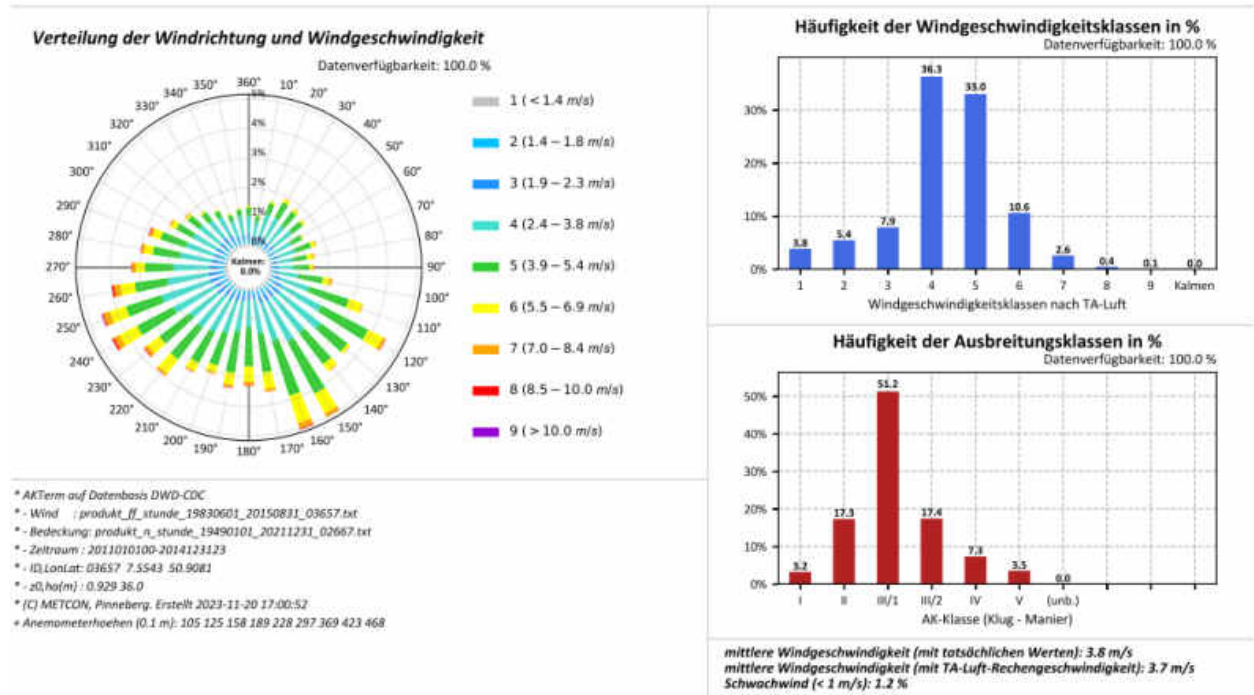


Abbildung A.91: Datenblätter der Messung (oben) und SynAKTerm 3.0 (unten) an der DWD-Station Nörvenich (2011-2020).



Für den Vergleich gemessener und synthetischer Daten sind die Hinweise im Abschnitt 5.1 zu beachten.

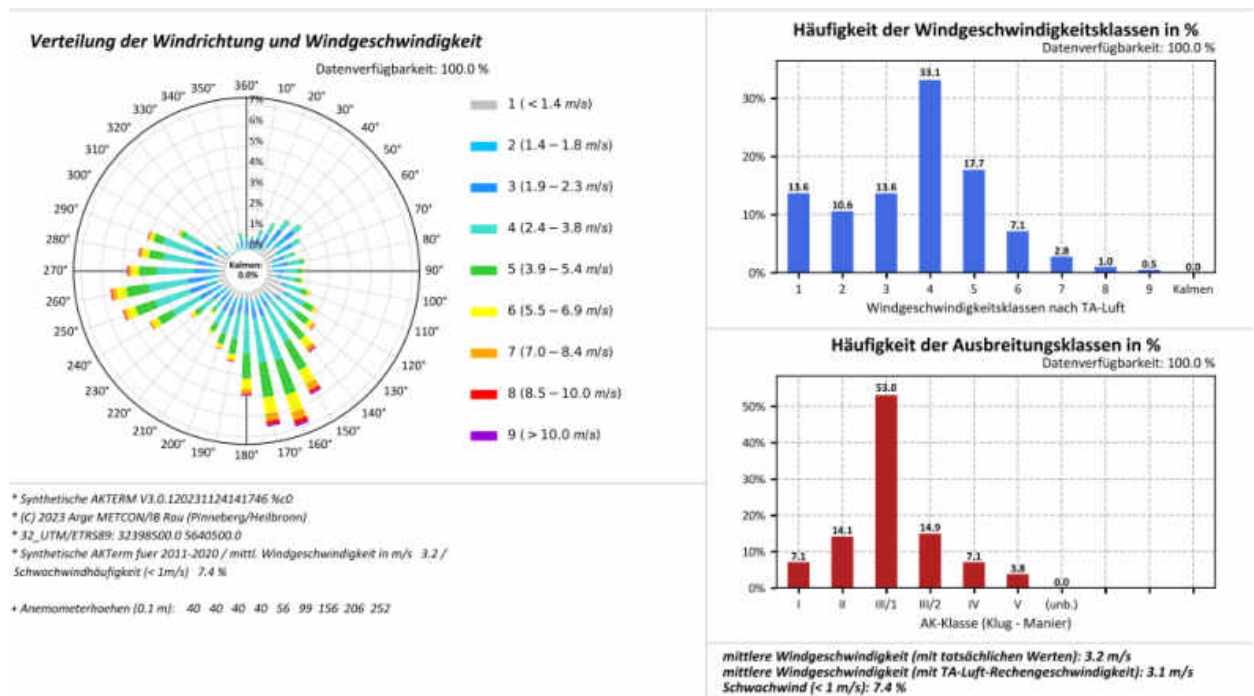
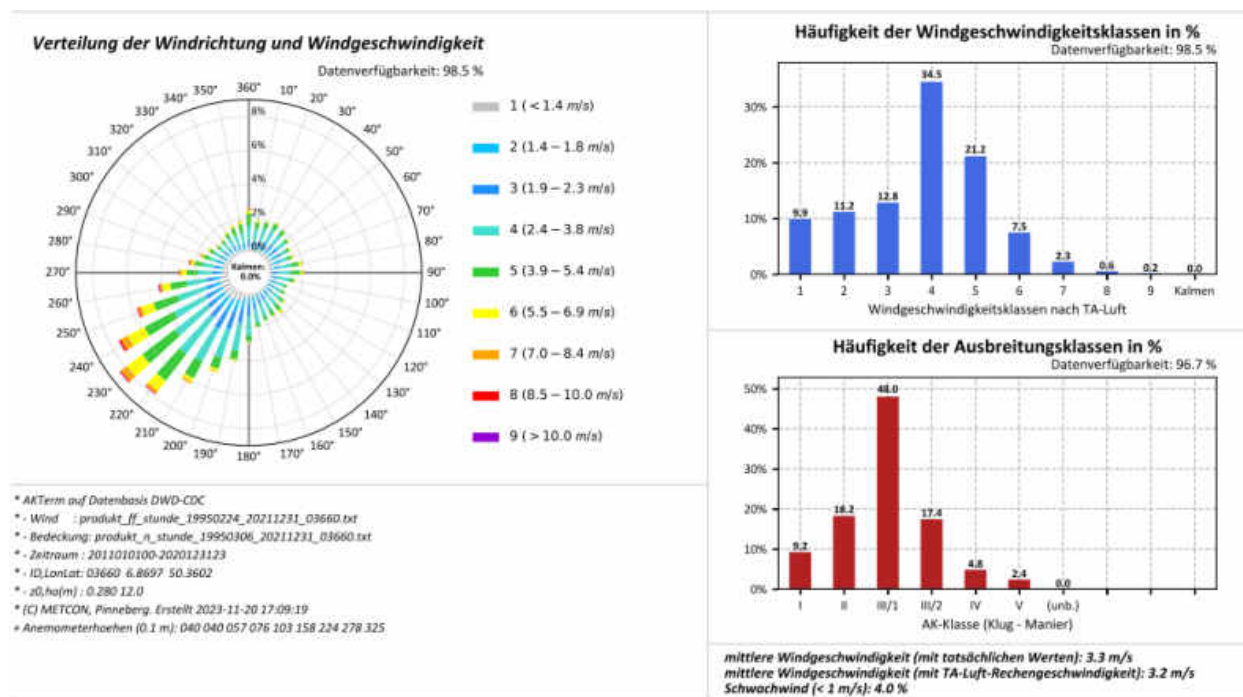


Abbildung A.92: Datenblätter der Messung (oben) und SynAKTerm 3.0 (unten) an der DWD-Station Nümbrecht auf dem Lindchen (2011-2014/2020).



Für den Vergleich gemessener und synthetischer Daten sind die Hinweise im Abschnitt 5.1 zu beachten.

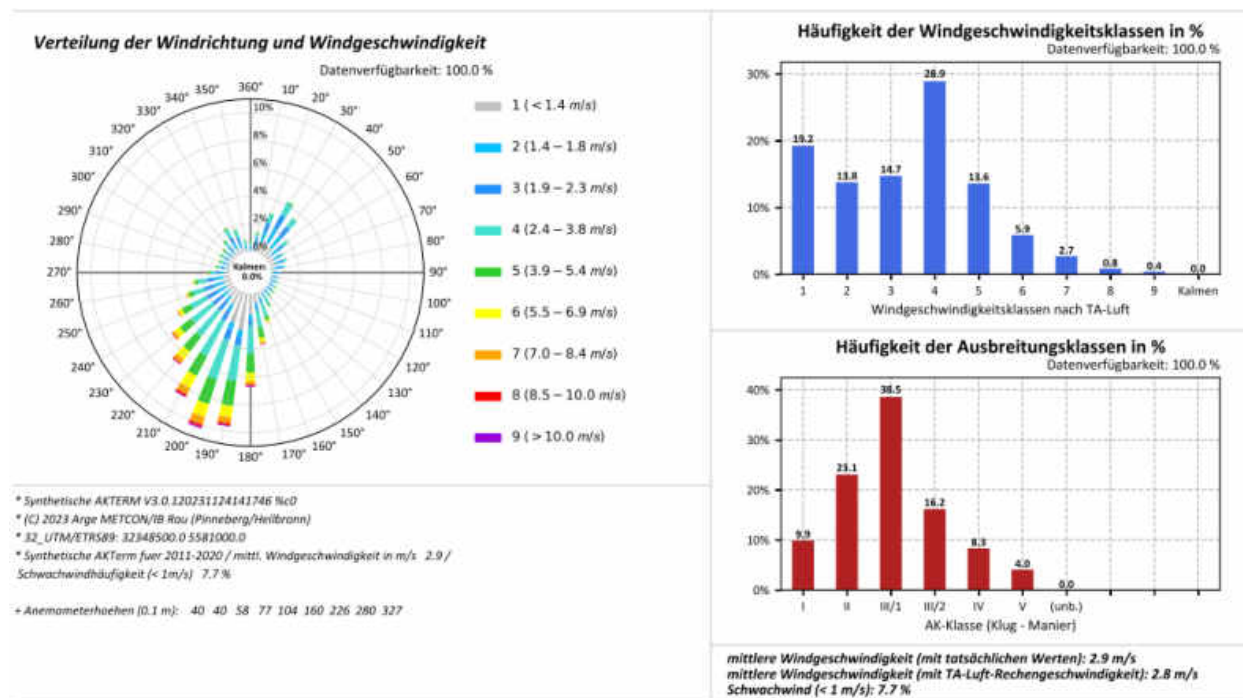
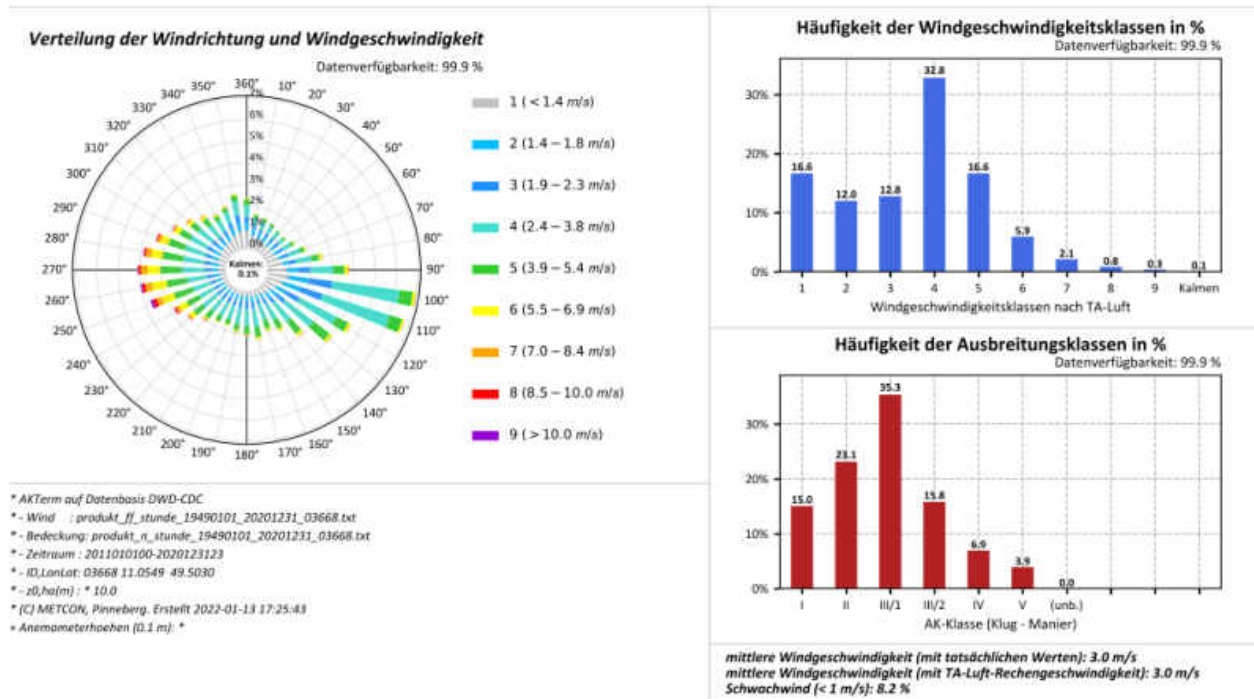


Abbildung A.93: Datenblätter der Messung (oben) und SynAKTerm 3.0 (unten) an der DWD-Station Nürnberg-Barweiler (2011-2020).



Für den Vergleich gemessener und synthetischer Daten sind die Hinweise im Abschnitt 5.1 zu beachten.

Diese Station wird im Abschnitt 5.5 diskutiert.

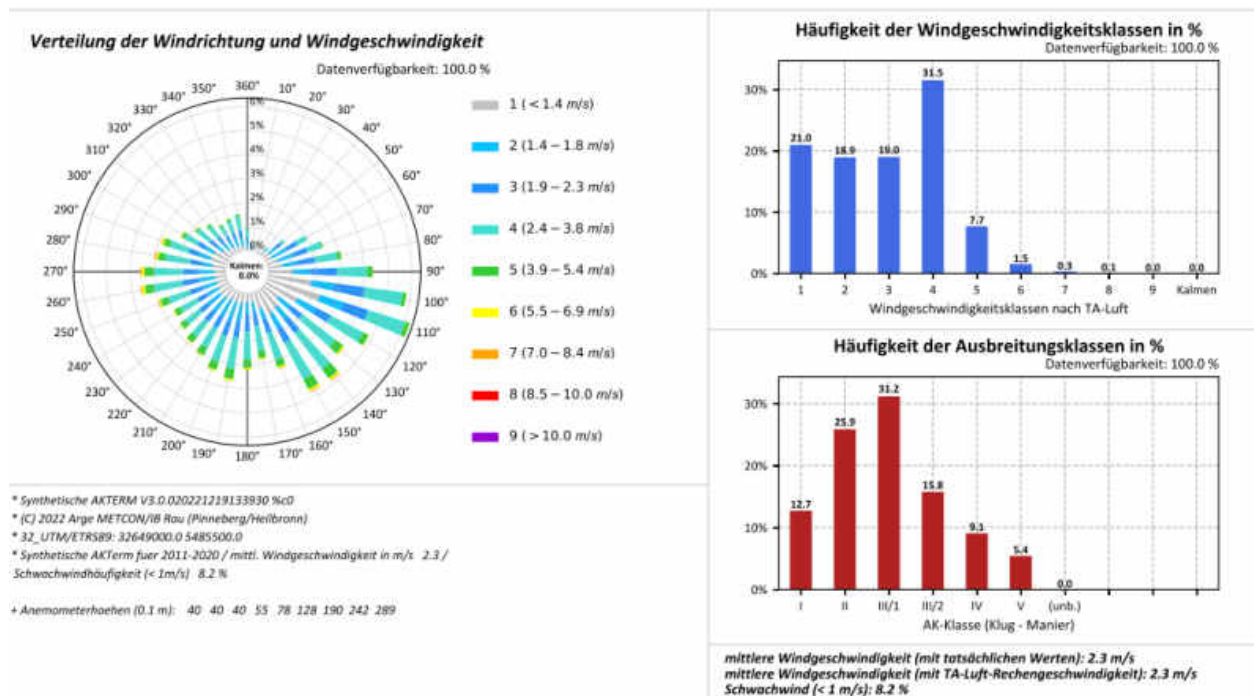
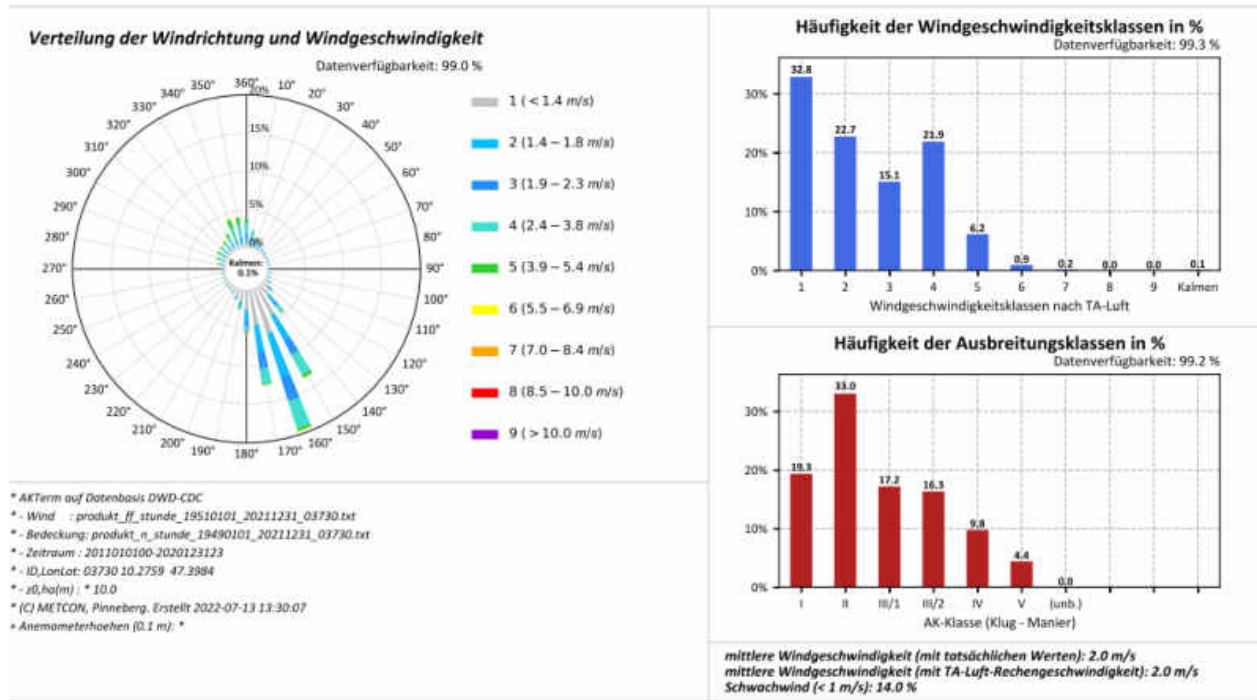


Abbildung A.94: Datenblätter der Messung (oben) und SynAKTerm 3.0 (unten) an der DWD-Station Nürnberg (2011-2020).



Für den Vergleich gemessener und synthetischer Daten sind die Hinweise im Abschnitt 5.1 zu beachten.

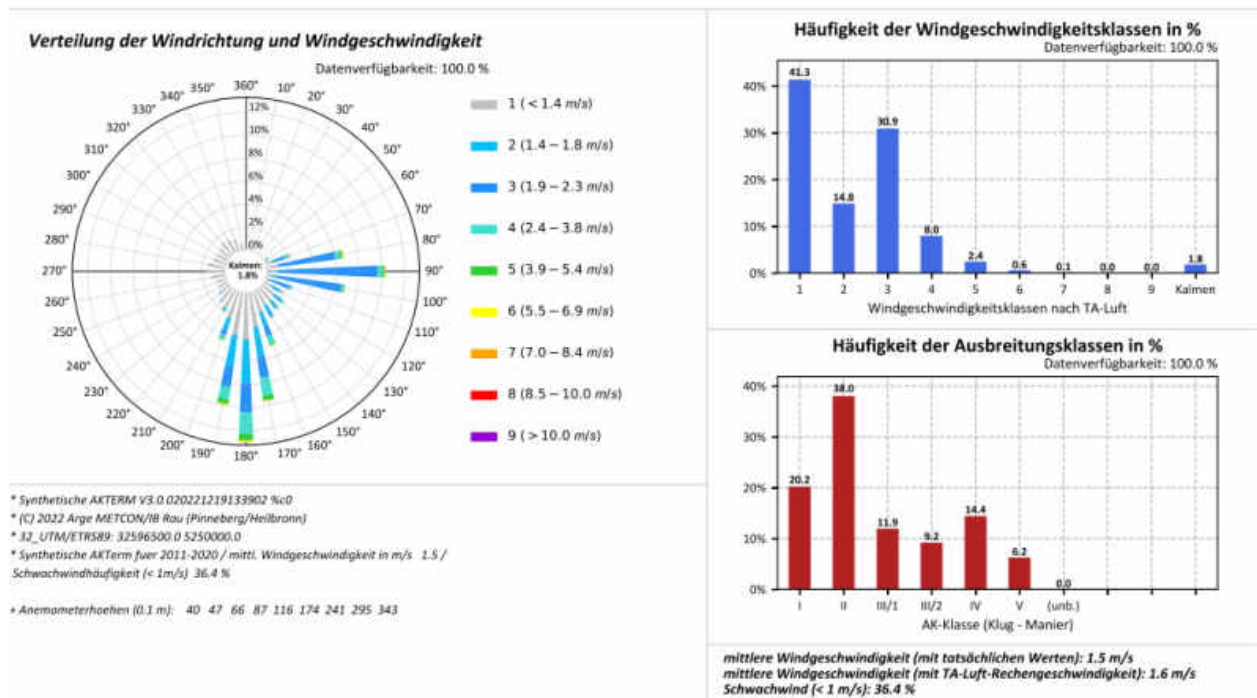
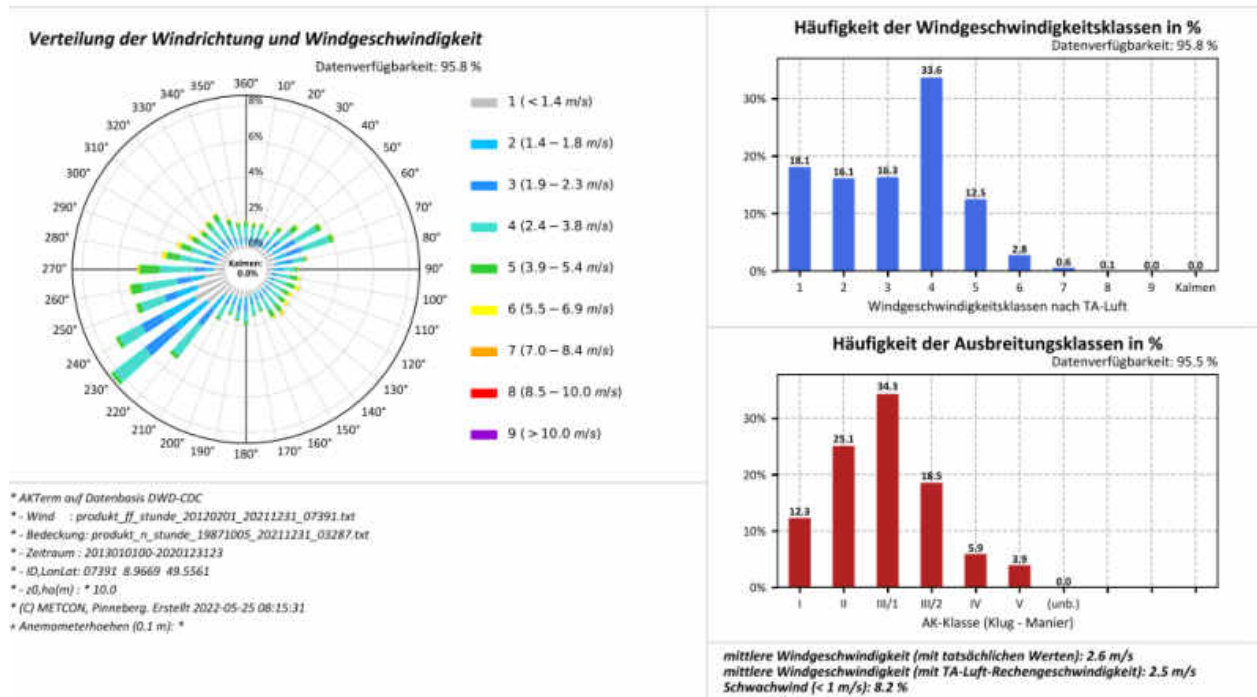


Abbildung A.95: Datenblätter der Messung (oben) und SynAKTerm 3.0 (unten) an der DWD-Station Oberstdorf (2011-2020).



Für den Vergleich gemessener und synthetischer Daten sind die Hinweise im Abschnitt 5.1 zu beachten.

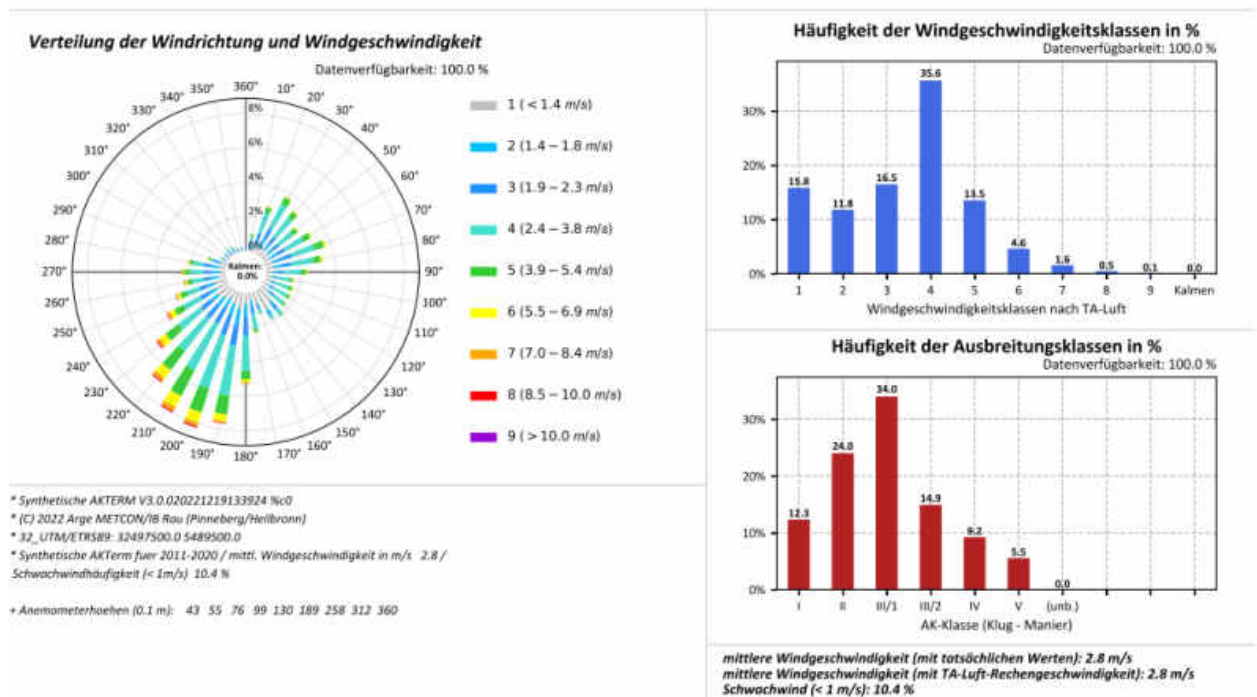
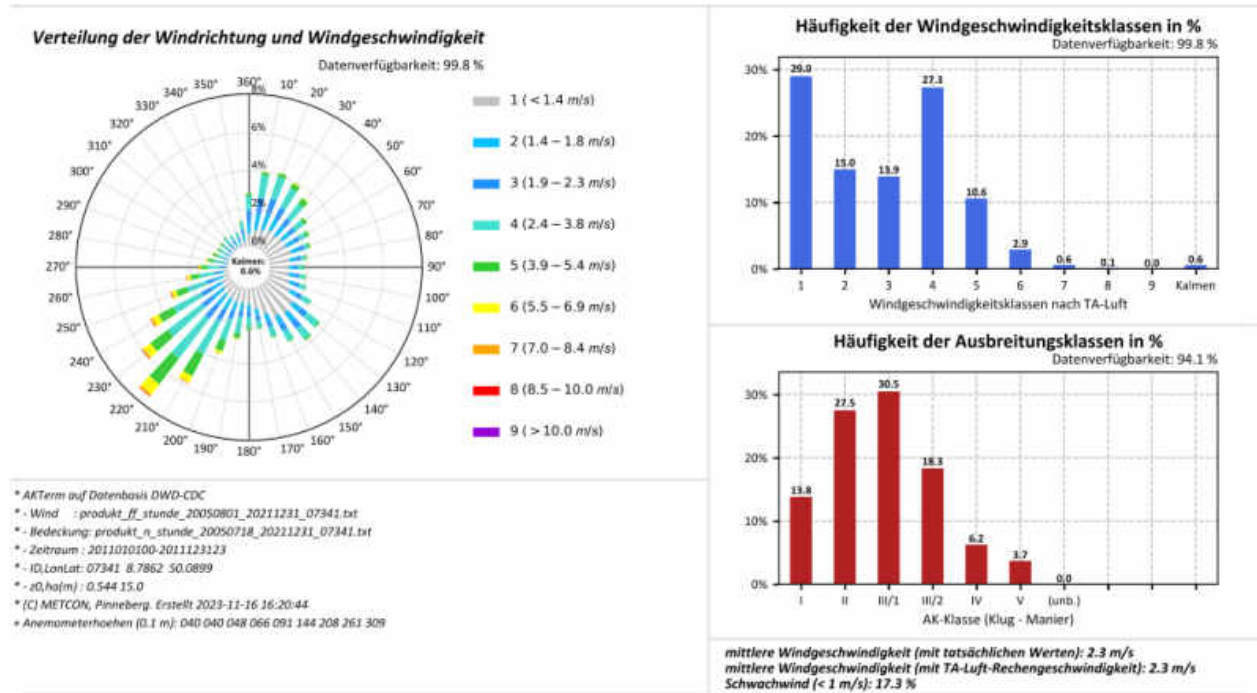


Abbildung A.96: Datenblätter der Messung (oben) und SynAKTerm 3.0 (unten) an der DWD-Station Oberzent-Beerfelden-Vogelherd (2013/2011-2020).



Für den Vergleich gemessener und synthetischer Daten sind die Hinweise im Abschnitt 5.1 zu beachten.

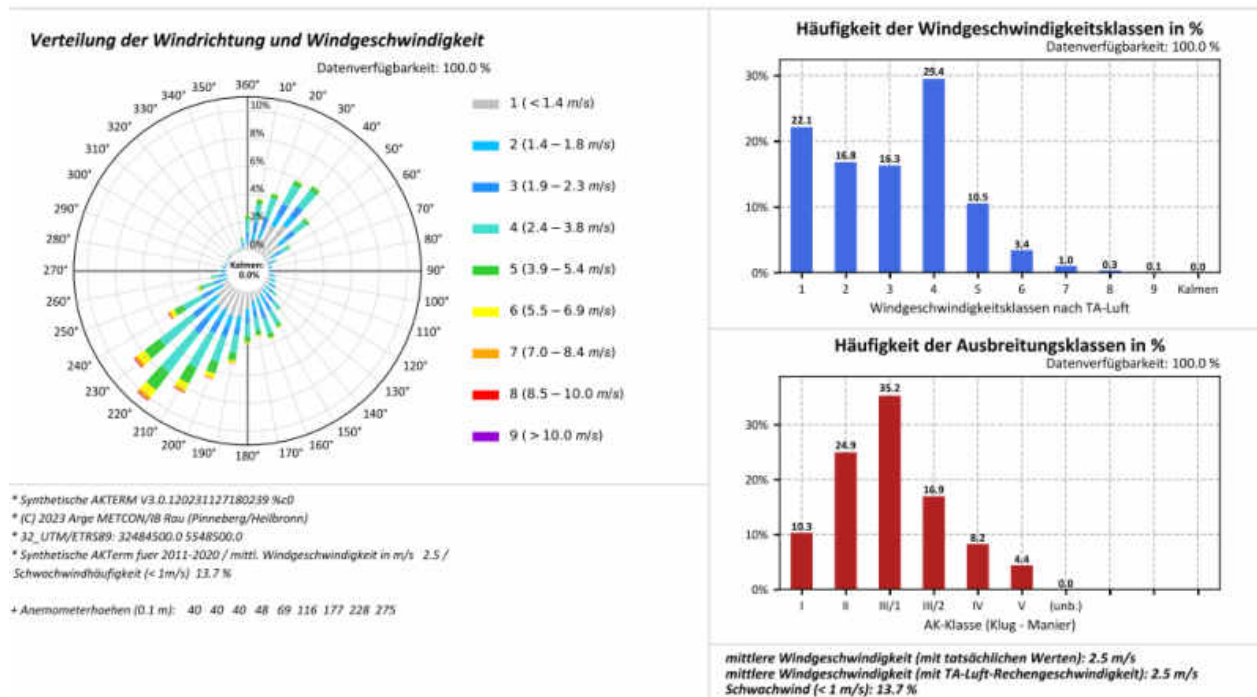
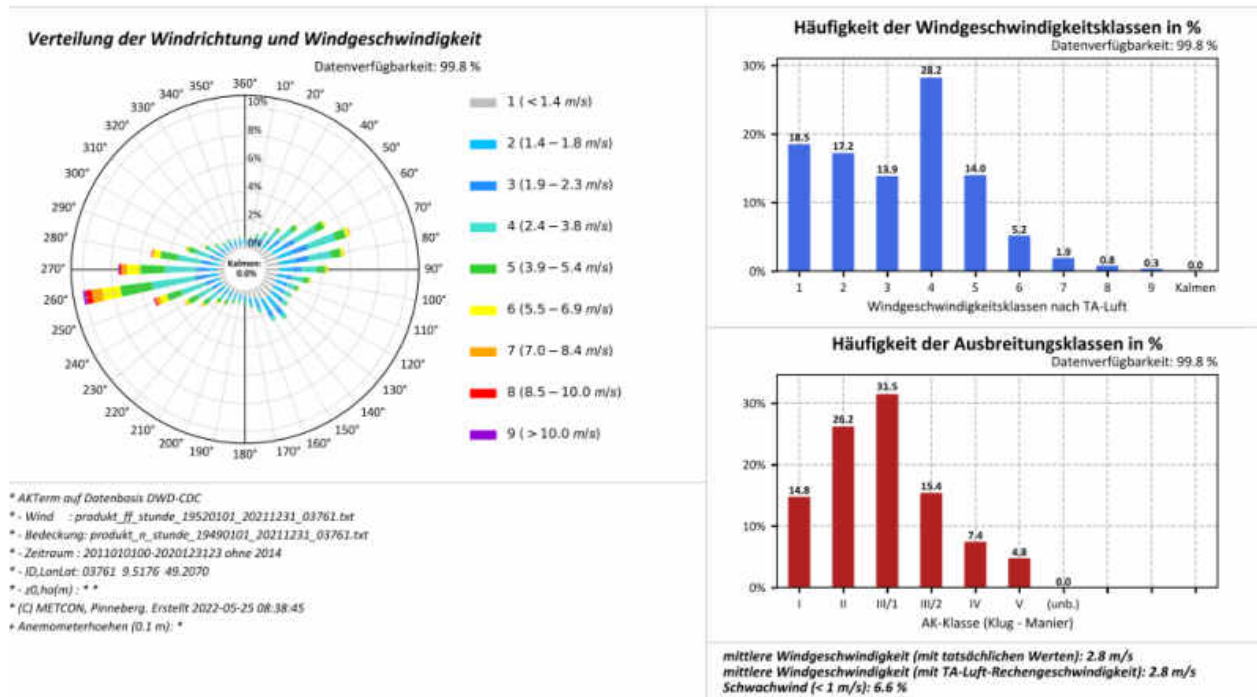


Abbildung A.97: Datenblätter der Messung (oben) und SynAKTerm 3.0 (unten) an der DWD-Station Offenbach-Wetterpark (2011-2020).





Für den Vergleich gemessener und synthetischer Daten sind die Hinweise im Abschnitt 5.1 zu beachten.

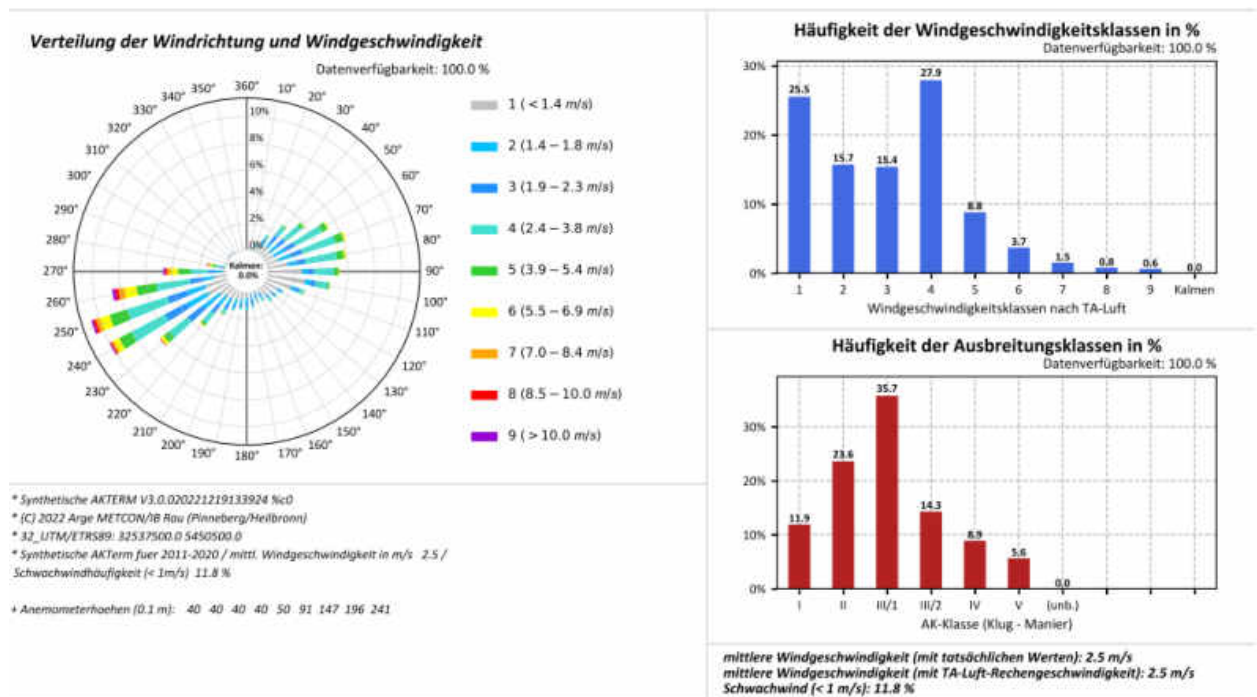
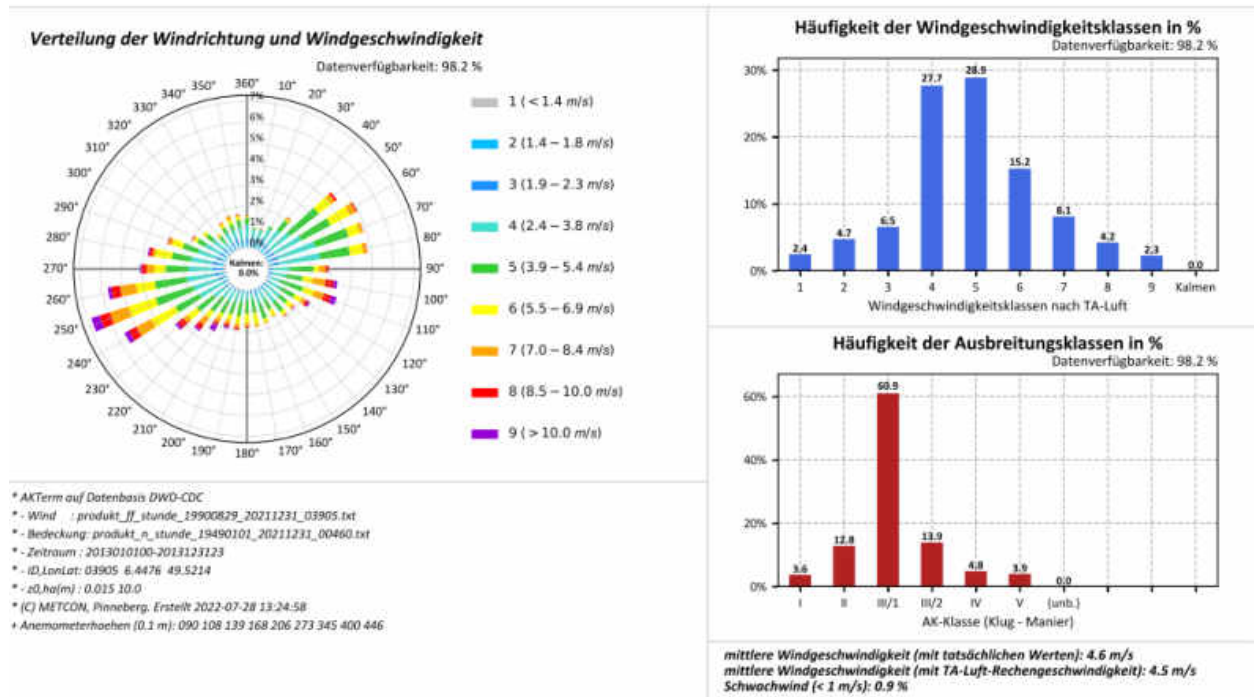


Abbildung A.98: Datenblätter der Messung (oben) und SynAKTerm 3.0 (unten) an der DWD-Station Öhringen (2015/2011-2020).



Für den Vergleich gemessener und synthetischer Daten sind die Hinweise im Abschnitt 5.1 zu beachten.

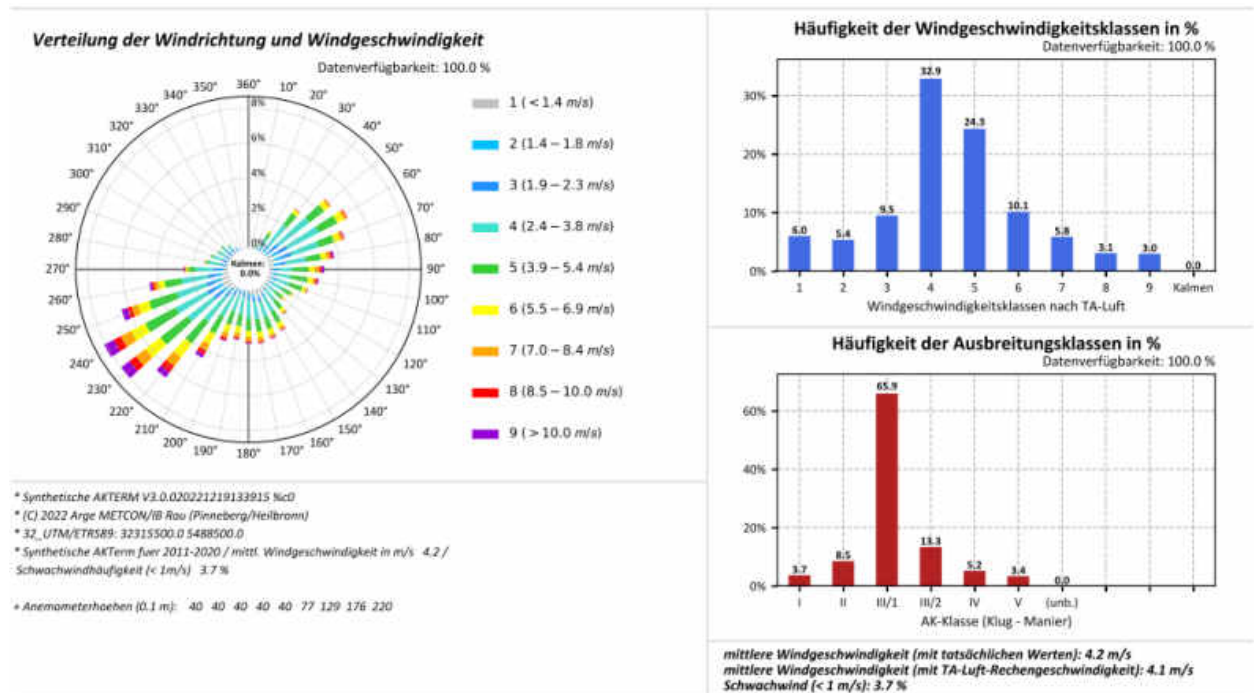
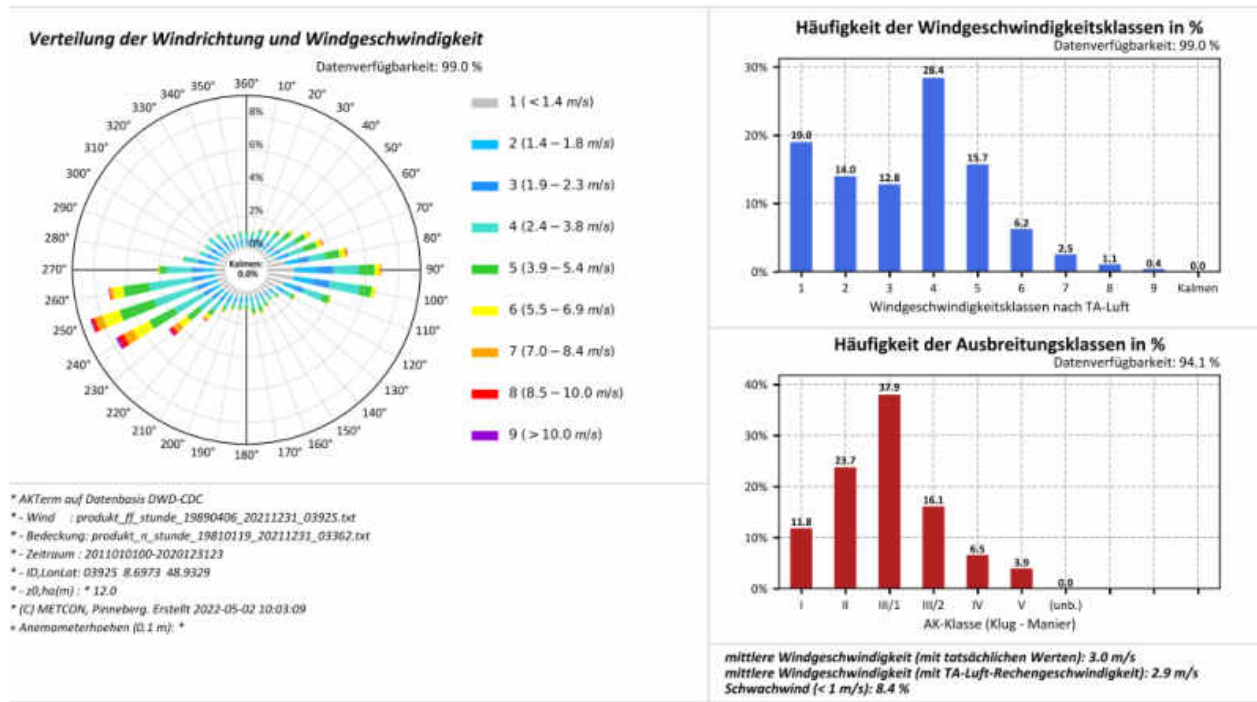


Abbildung A.99: Datenblätter der Messung (oben) und SynAKTerm 3.0 (unten) an der DWD-Station Perl-Sinz-Renglichberg (2013/2011-2020).



Für den Vergleich gemessener und synthetischer Daten sind die Hinweise im Abschnitt 5.1 zu beachten.

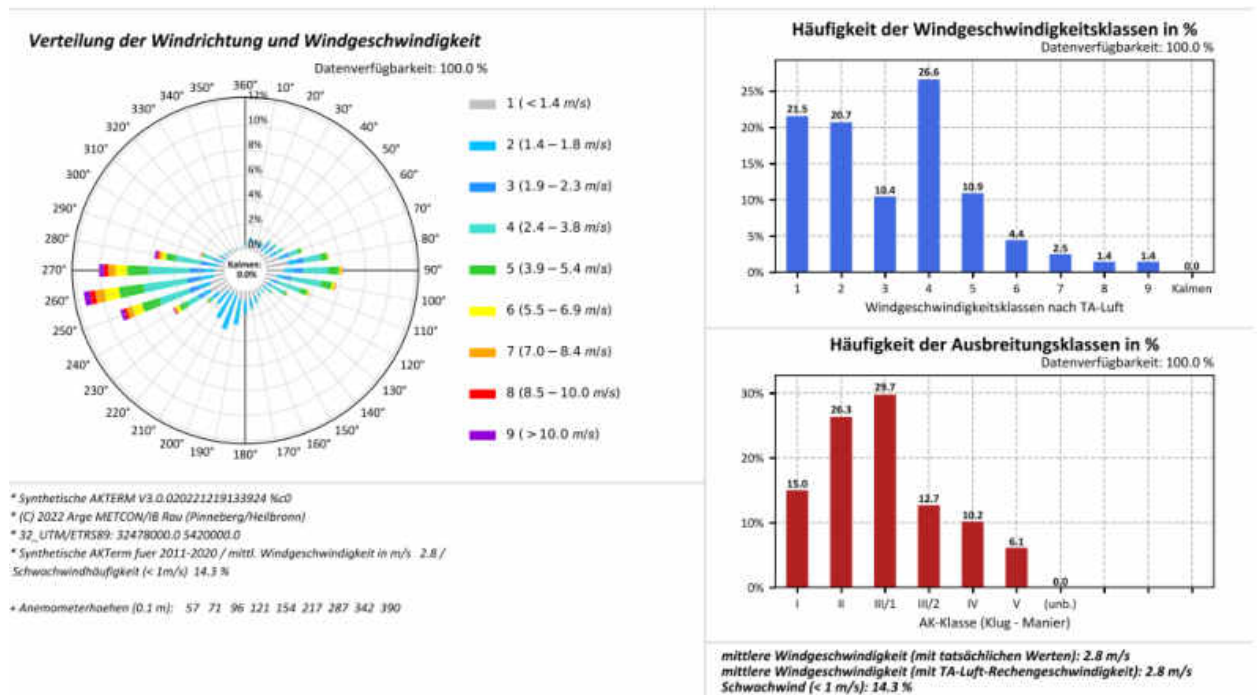
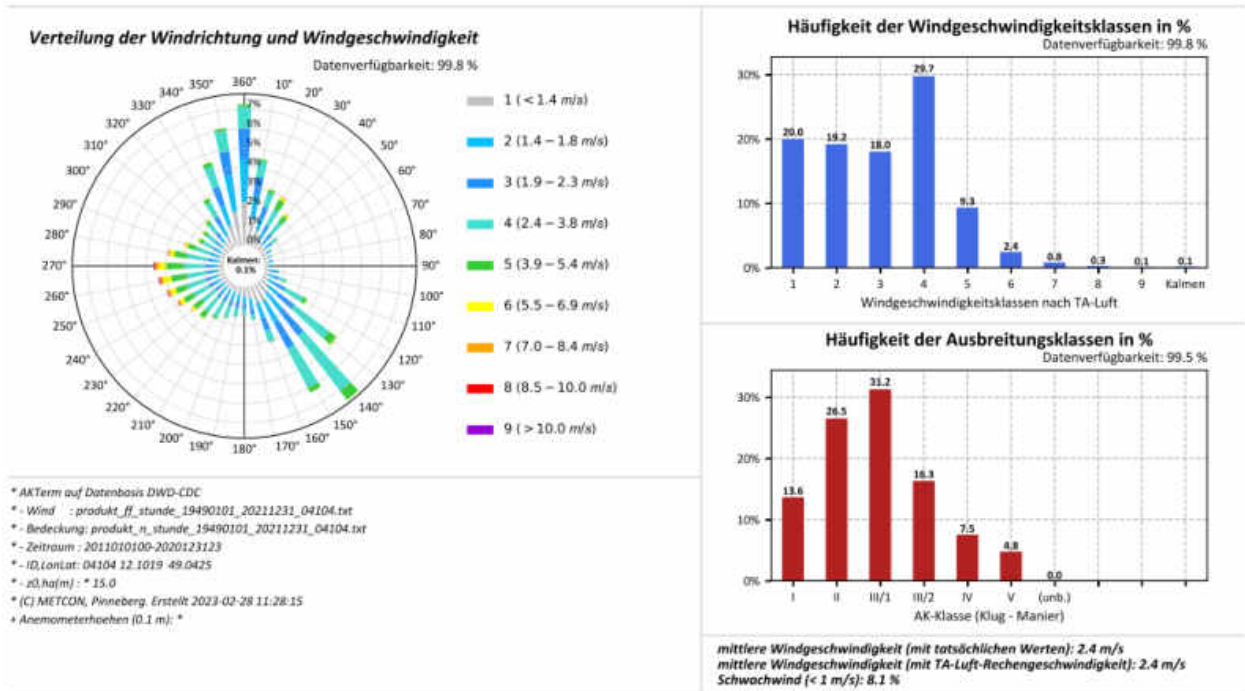


Abbildung A.100: Datenblätter der Messung (oben) und SynAKTerm 3.0 (unten) an der DWD-Station Pforzheim-Ipspringen (2011-2020).



Für den Vergleich gemessener und synthetischer Daten sind die Hinweise im Abschnitt 5.1 zu beachten.

Diese Station wird im Abschnitt 5.3 diskutiert.

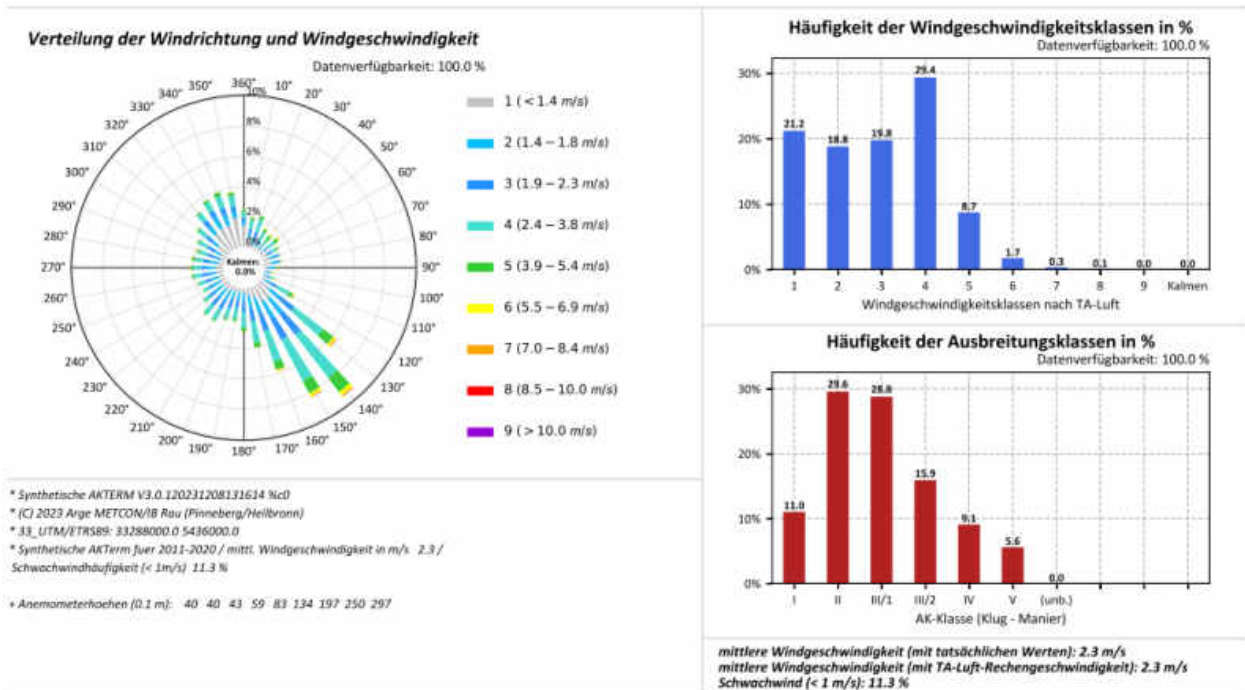
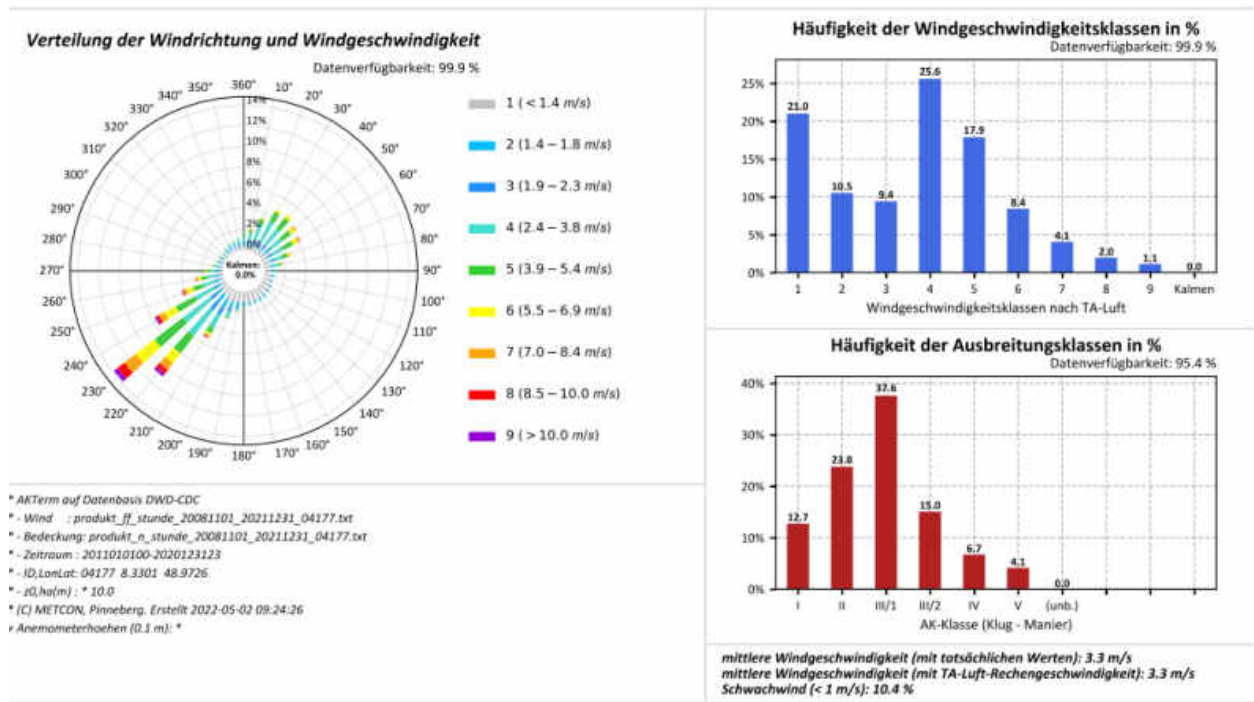


Abbildung A.101: Datenblätter der Messung (oben) und SynAKTerm 3.0 (unten) an der DWD-Station Regensburg (2011-2020).



Für den Vergleich gemessener und synthetischer Daten sind die Hinweise im Abschnitt 5.1 zu beachten.

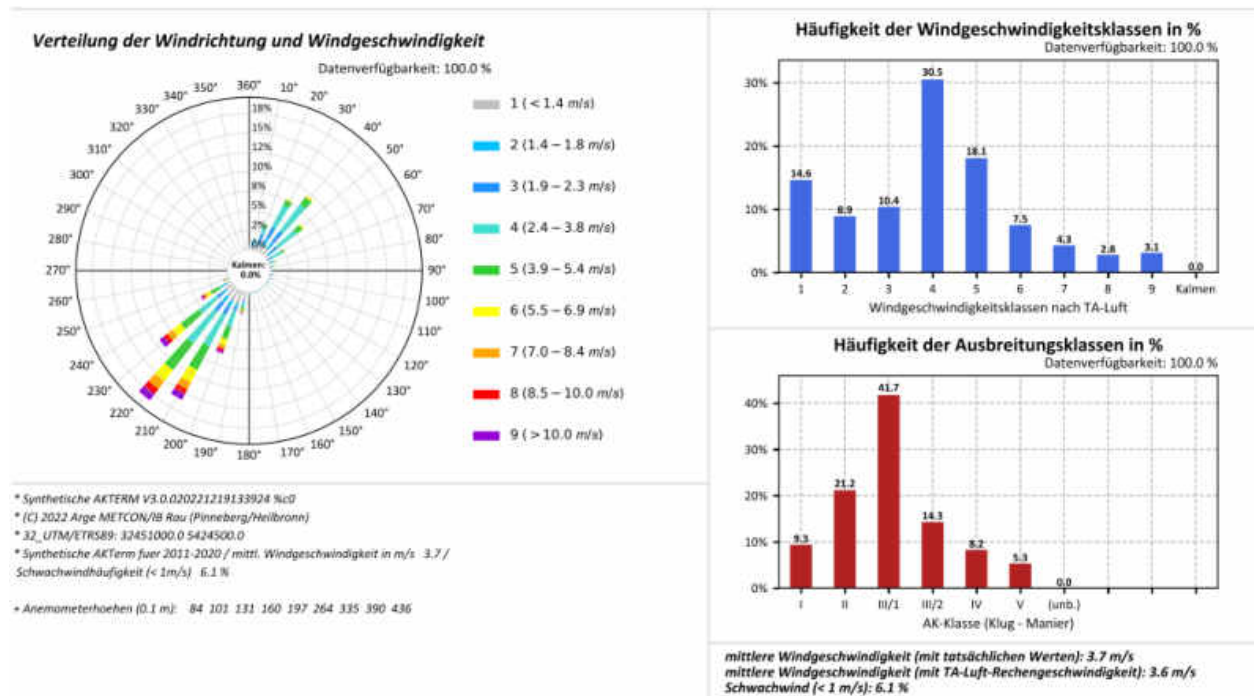
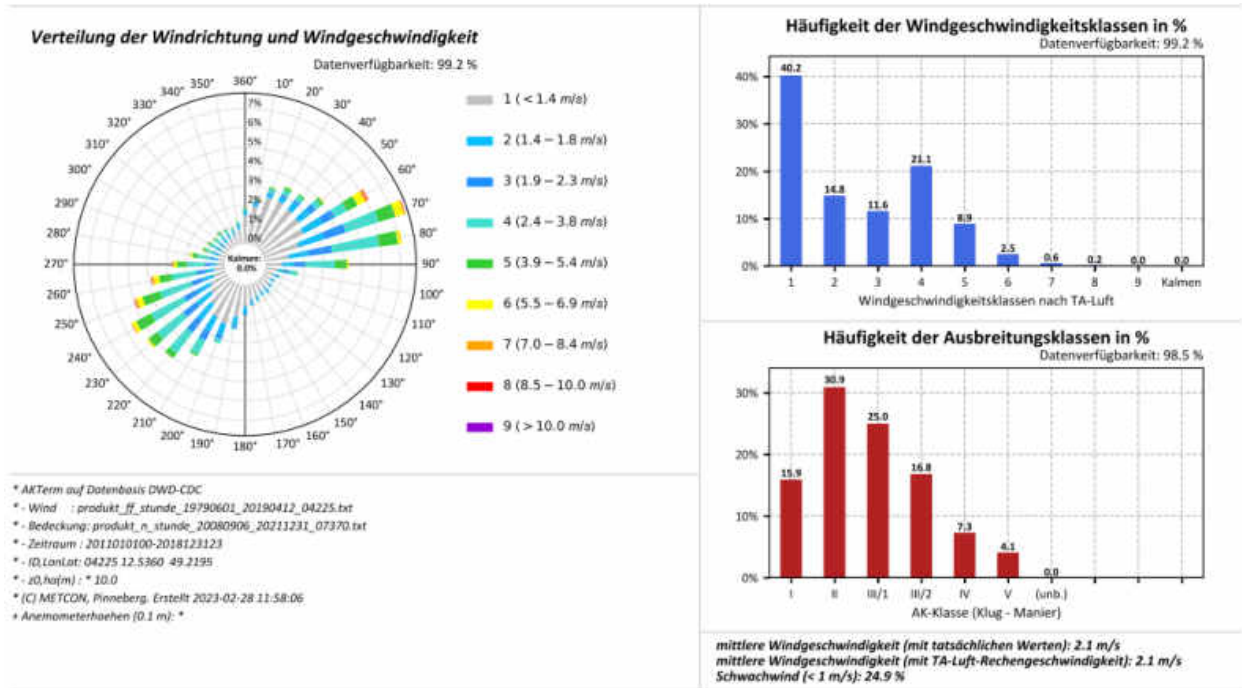


Abbildung A.102: Datenblätter der Messung (oben) und SynAKTerm 3.0 (unten) an der DWD-Station Rheinstetten (2011-2020).



Für den Vergleich gemessener und synthetischer Daten sind die Hinweise im Abschnitt 5.1 zu beachten.

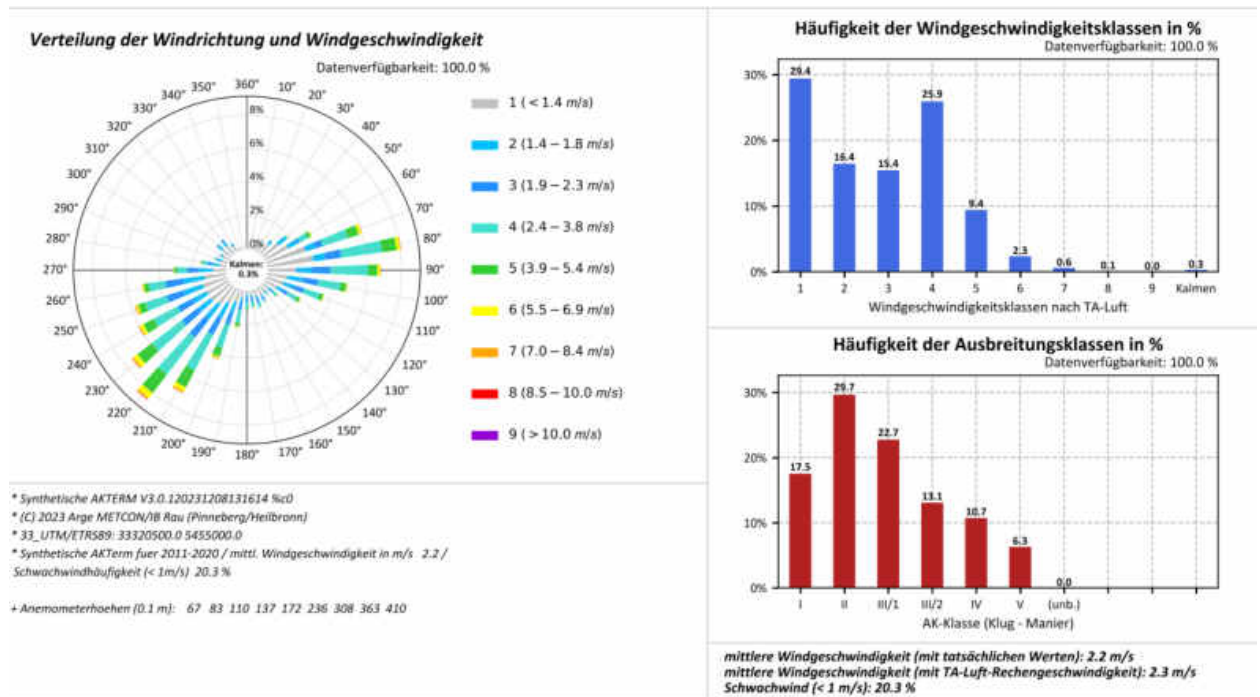
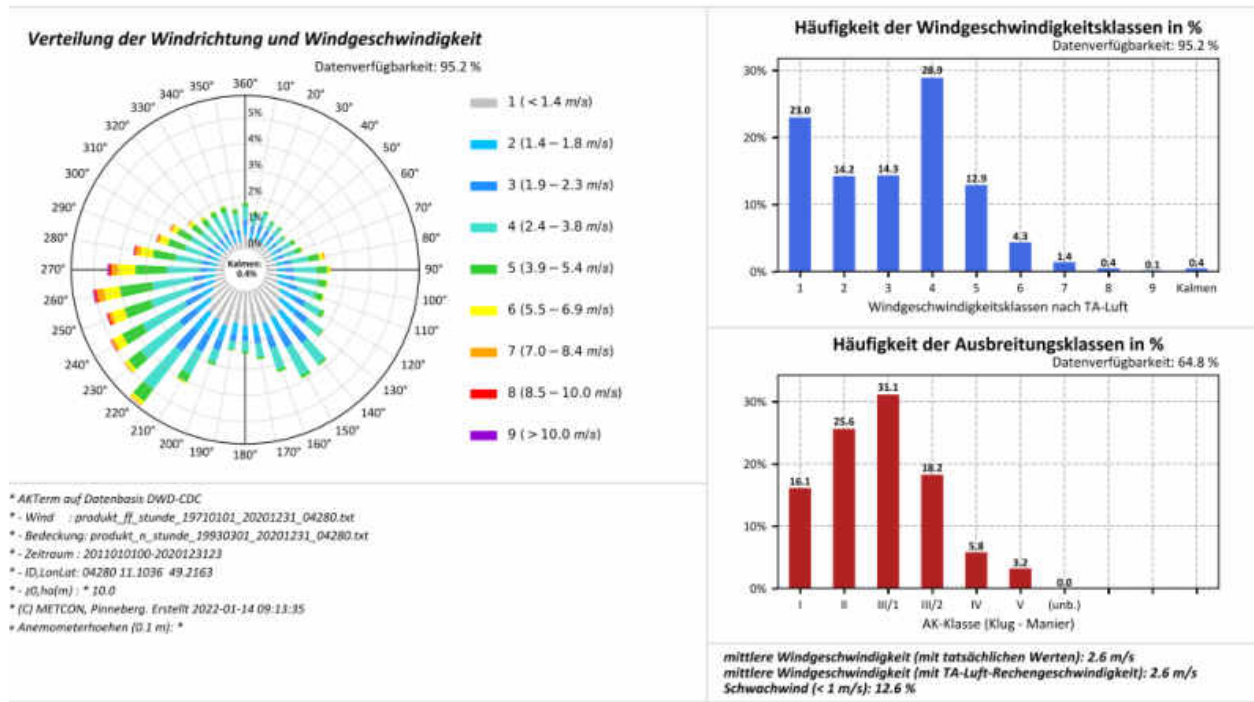


Abbildung A.103: Datenblätter der Messung (oben) und SynAKTerm 3.0 (unten) an der DWD-Station Roding-Wetterfeld (2011-2018/2020).



Für den Vergleich gemessener und synthetischer Daten sind die Hinweise im Abschnitt 5.1 zu beachten.

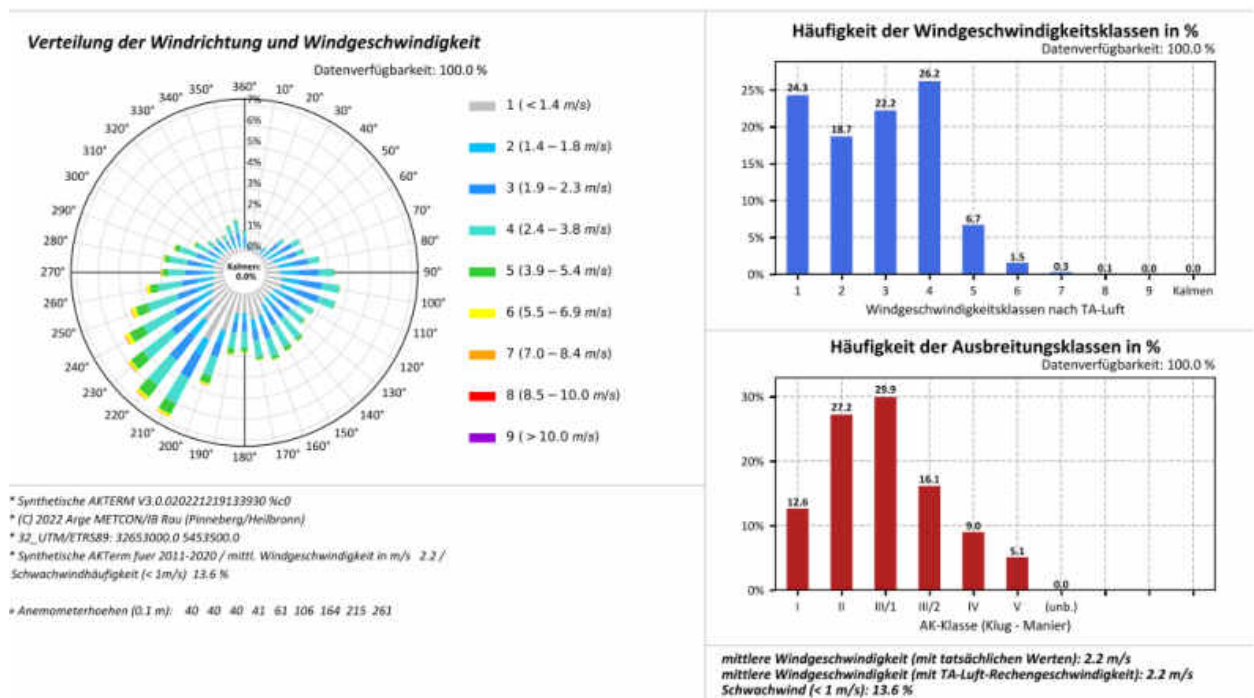
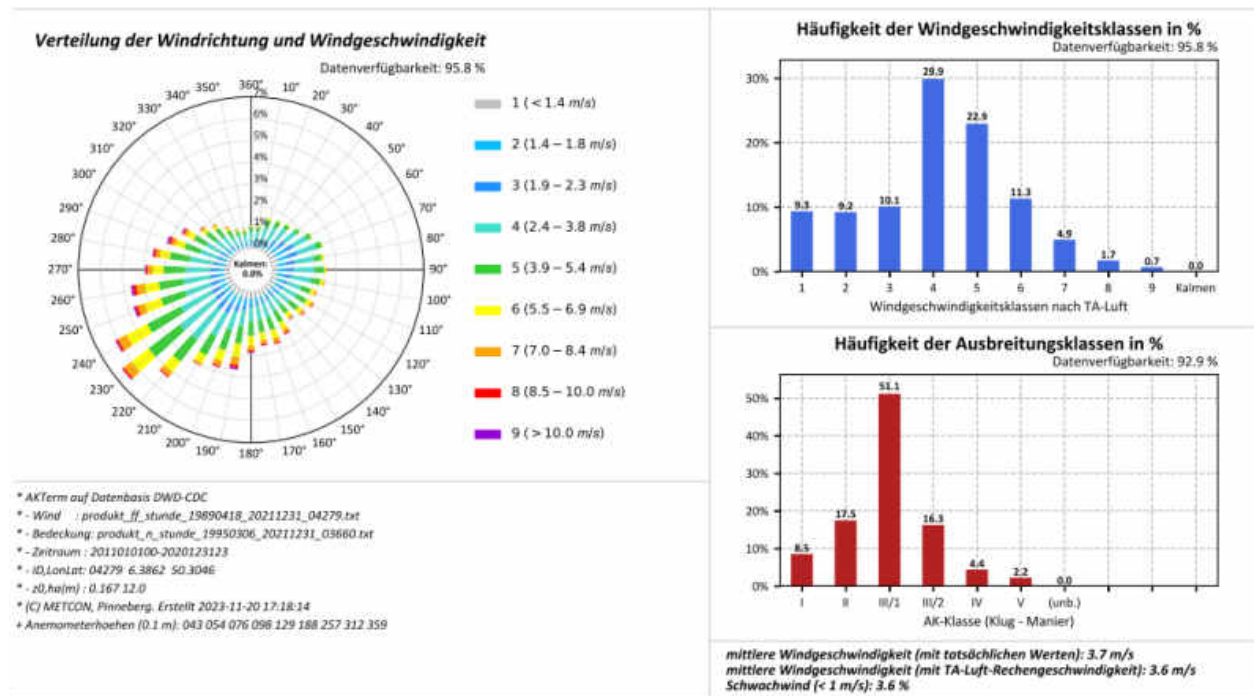


Abbildung A.104: Datenblätter der Messung (oben) und SynAKTerm 3.0 (unten) an der DWD-Station Roth (2011-2020).



Für den Vergleich gemessener und synthetischer Daten sind die Hinweise im Abschnitt 5.1 zu beachten.

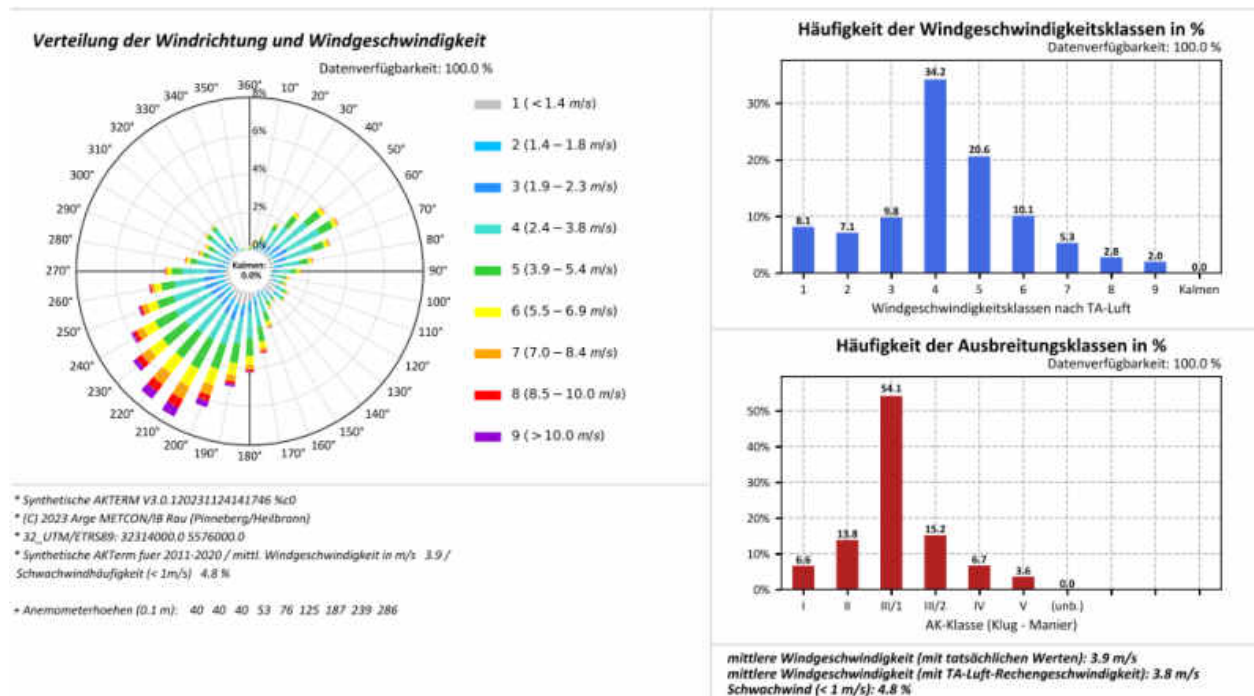
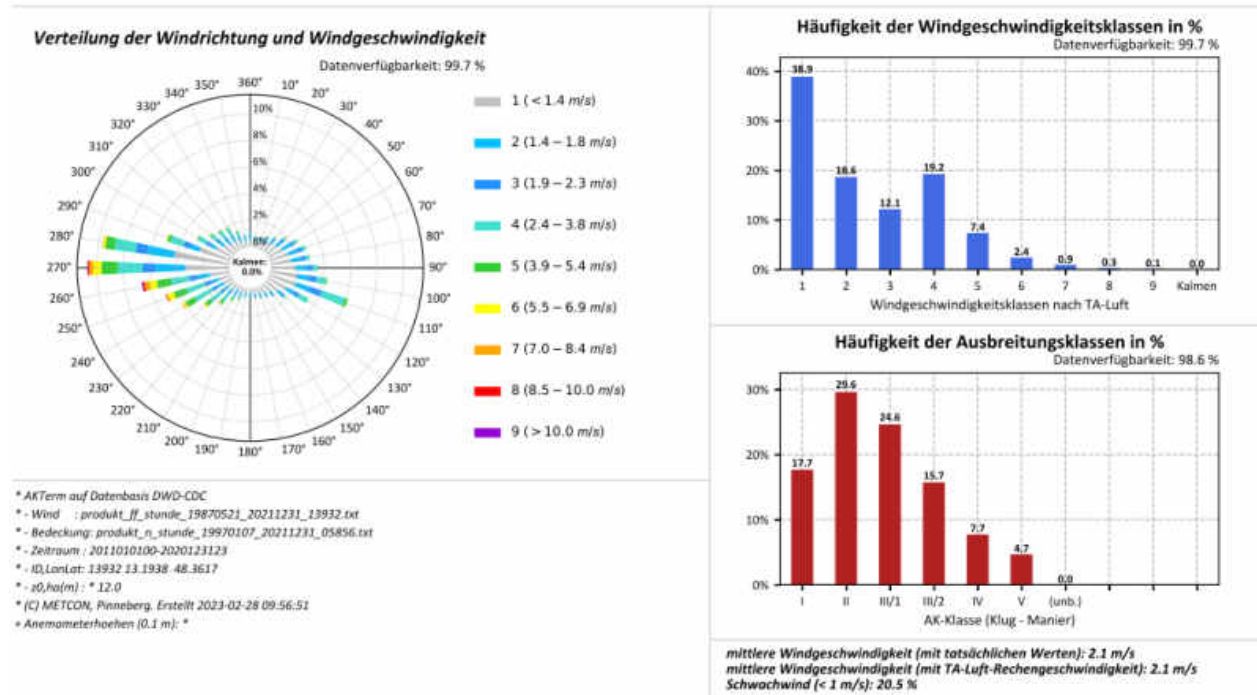


Abbildung A. 105: Datenblätter der Messung (oben) und SynAKTerm 3.0 (unten) an der DWD-Station Roth bei Prüm (2011-2020).





Für den Vergleich gemessener und synthetischer Daten sind die Hinweise im Abschnitt 5.1 zu beachten.

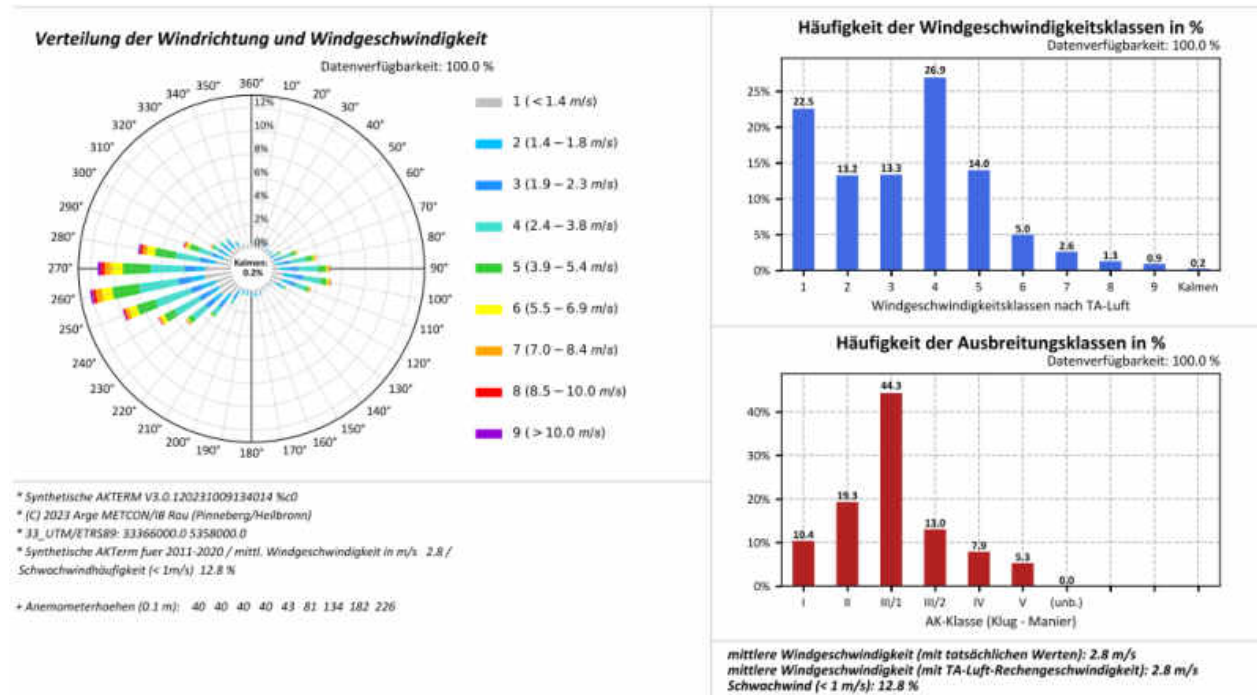
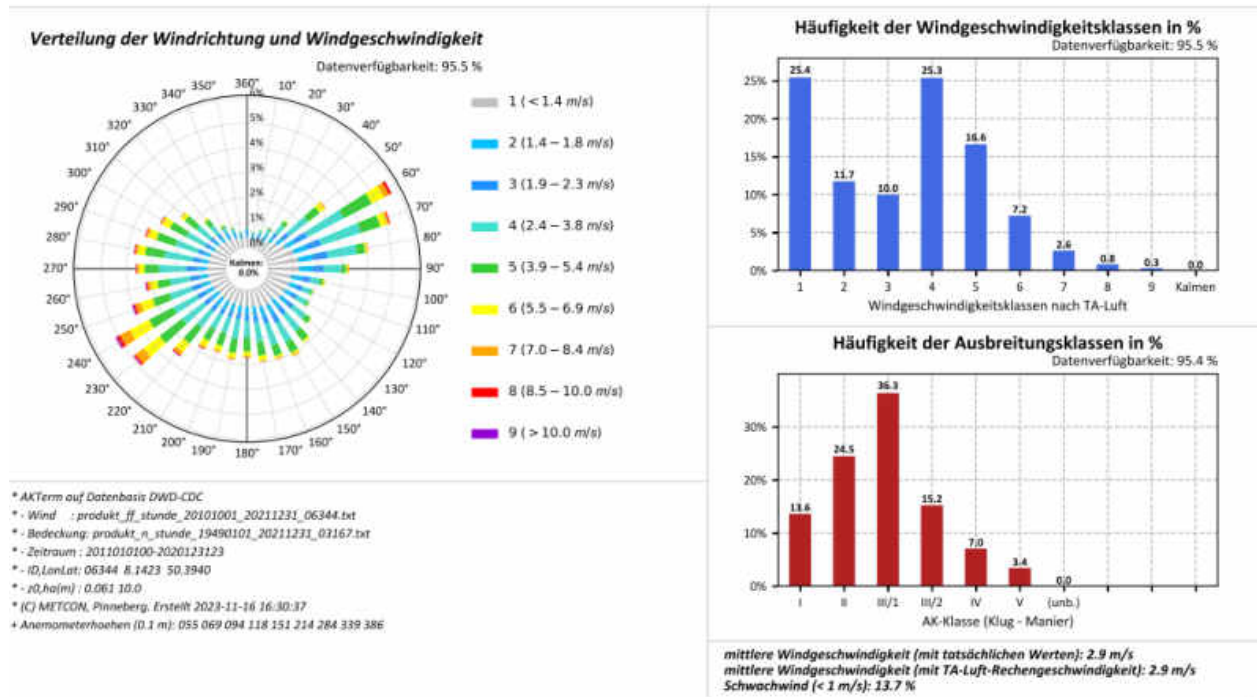


Abbildung A.106: Datenblätter der Messung (oben) und SynAKTerm 3.0 (unten) an der DWD-Station Rotthalmünster (2011-2020).



Für den Vergleich gemessener und synthetischer Daten sind die Hinweise im Abschnitt 5.1 zu beachten.

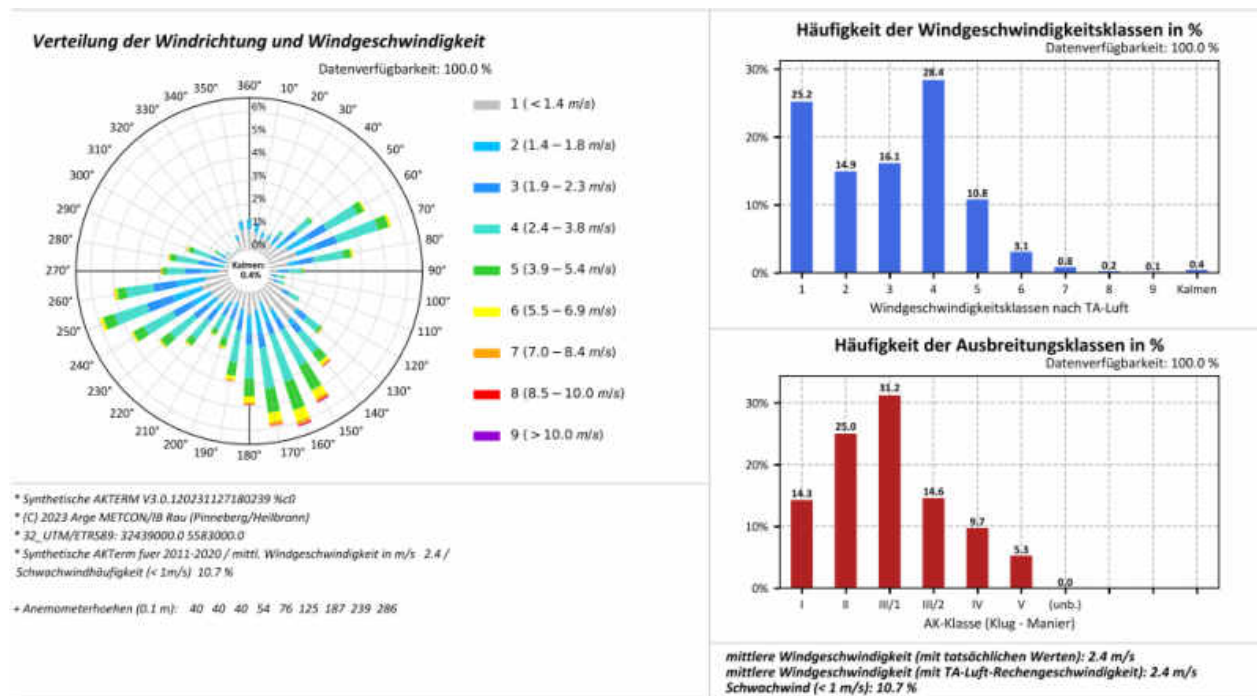
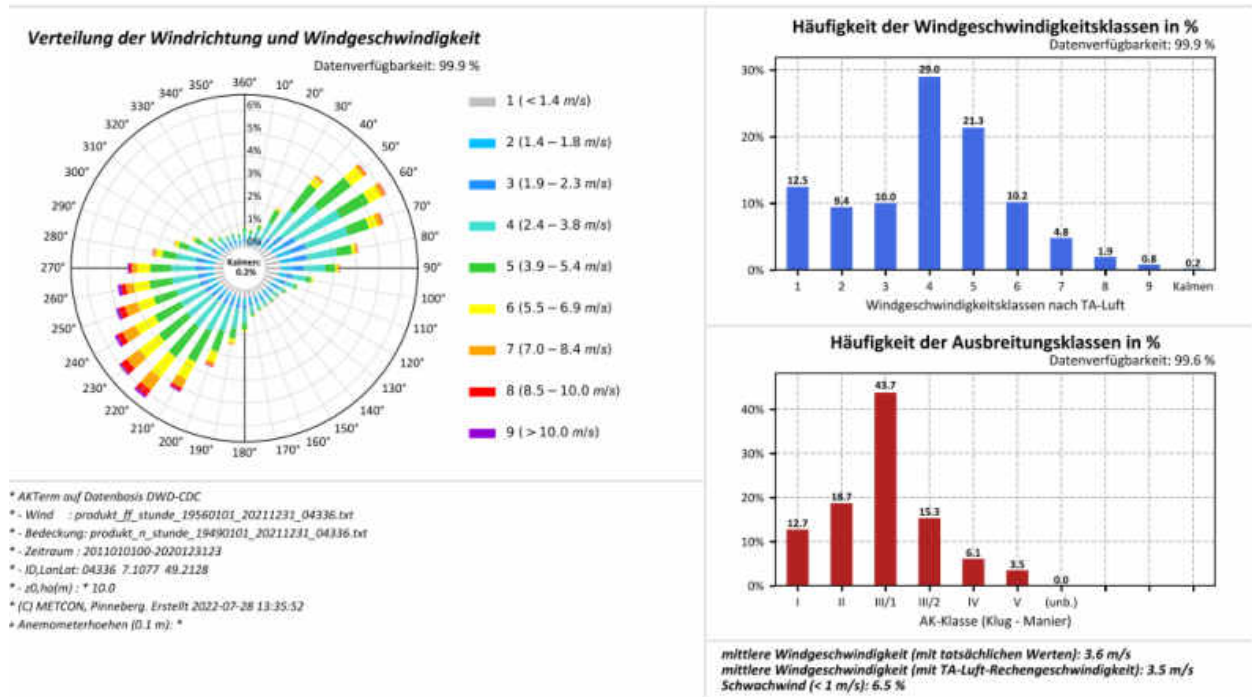


Abbildung A.107: Datenblätter der Messung (oben) und SynAKTerm 3.0 (unten) an der DWD-Station Runkel-Ennerich (2011-2020).



Für den Vergleich gemessener und synthetischer Daten sind die Hinweise im Abschnitt 5.1 zu beachten.

Diese Station wird in den Abschnitten 5.3 und 5.5 diskutiert.

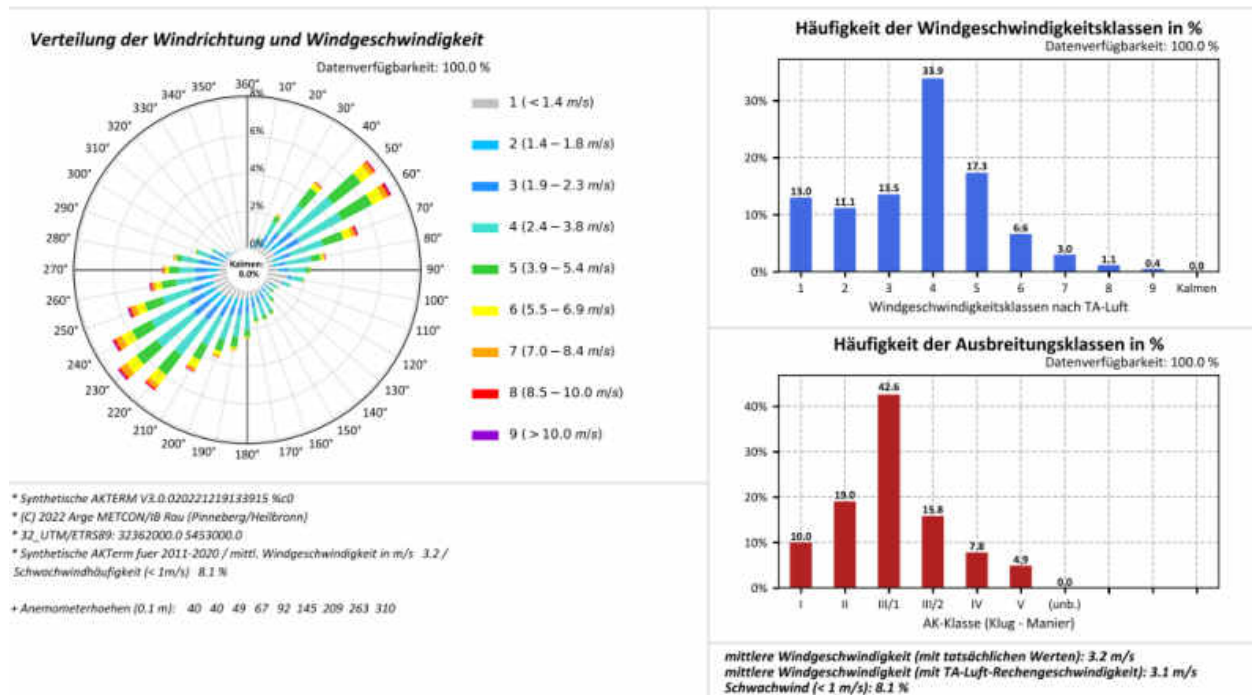
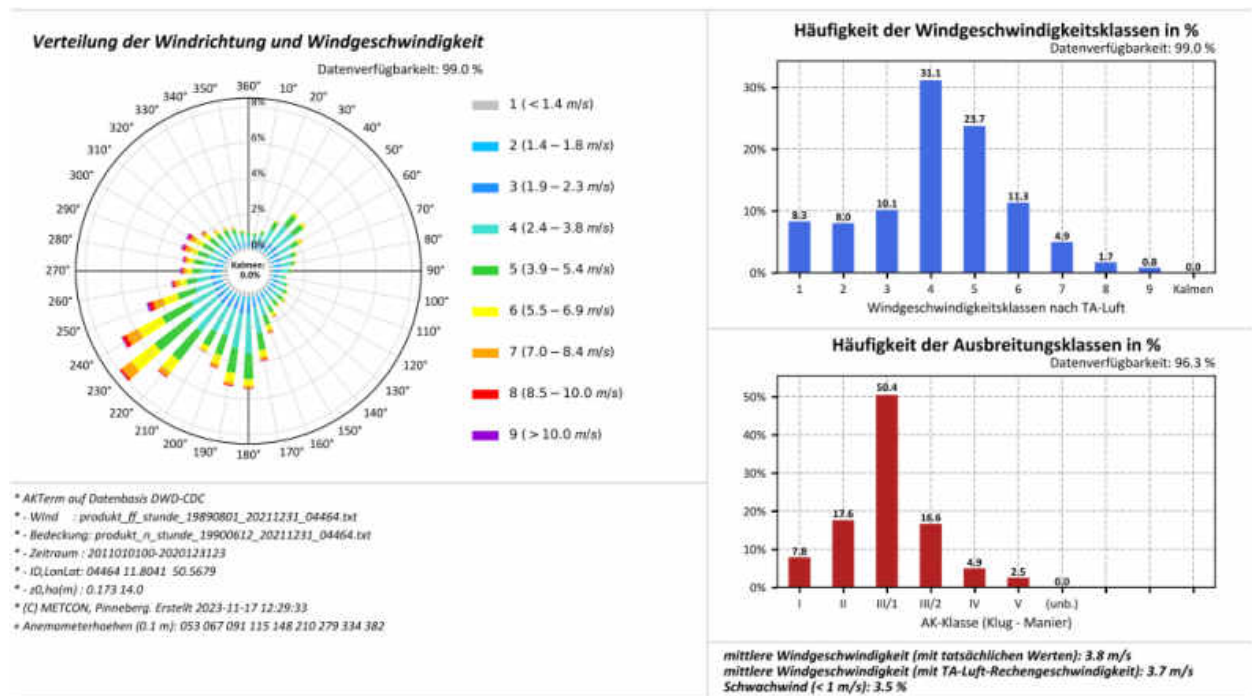
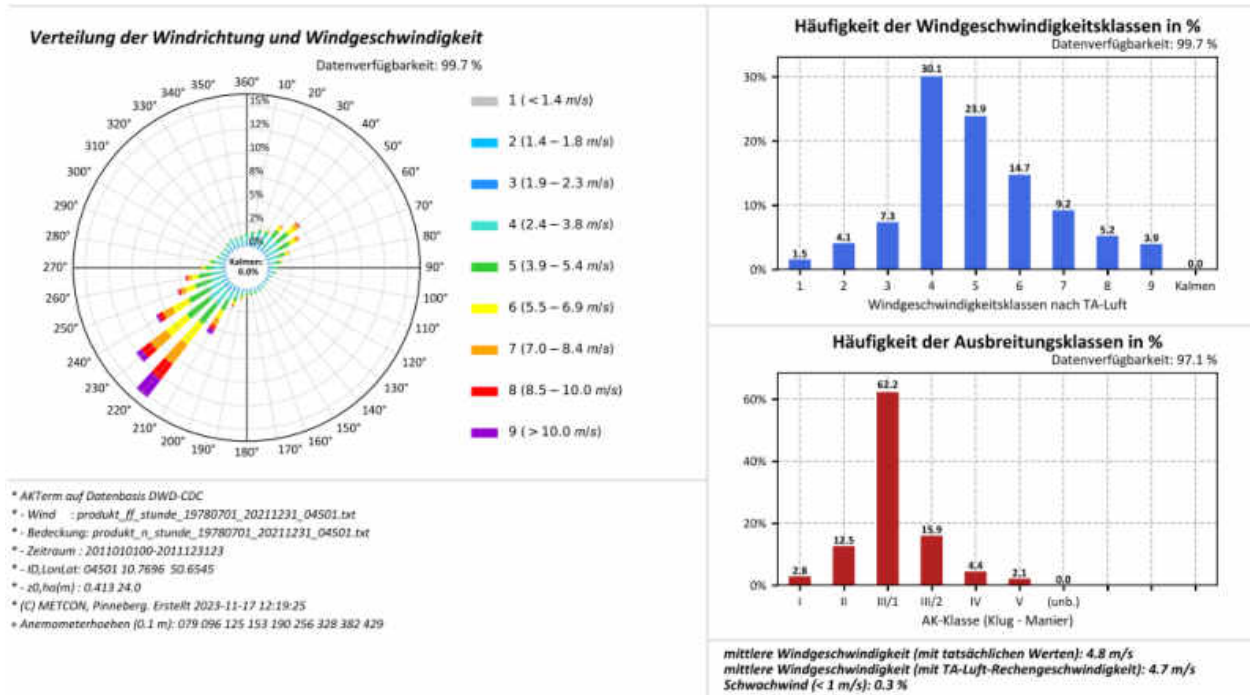


Abbildung A.108: Datenblätter der Messung (oben) und SynAKTerm 3.0 (unten) an der DWD-Station Saarbrücken-Enzheim (2011-2020).



Für den Vergleich gemessener und synthetischer Daten sind die Hinweise im Abschnitt 5.1 zu beachten.

Abbildung A.109: Datenblätter der Messung (oben) und SynAKTerm 3.0 (unten) an der DWD-Station Schleiz (2011-2020).



Für den Vergleich gemessener und synthetischer Daten sind die Hinweise im Abschnitt 5.1 zu beachten.

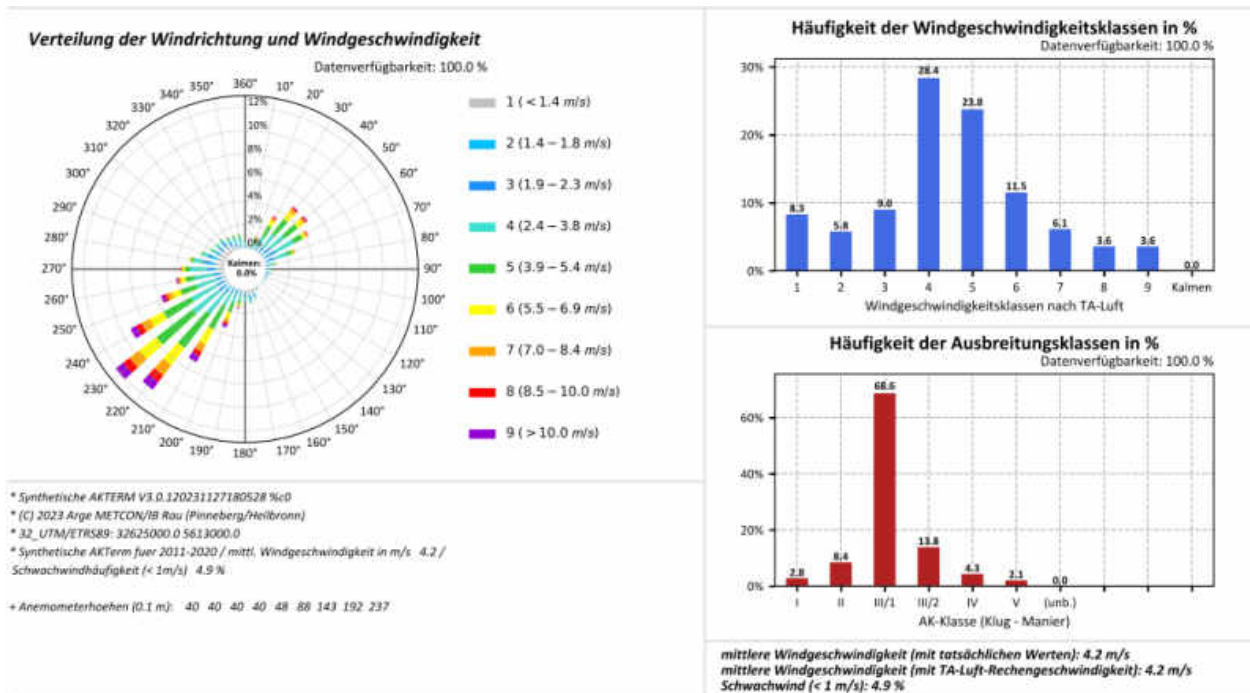
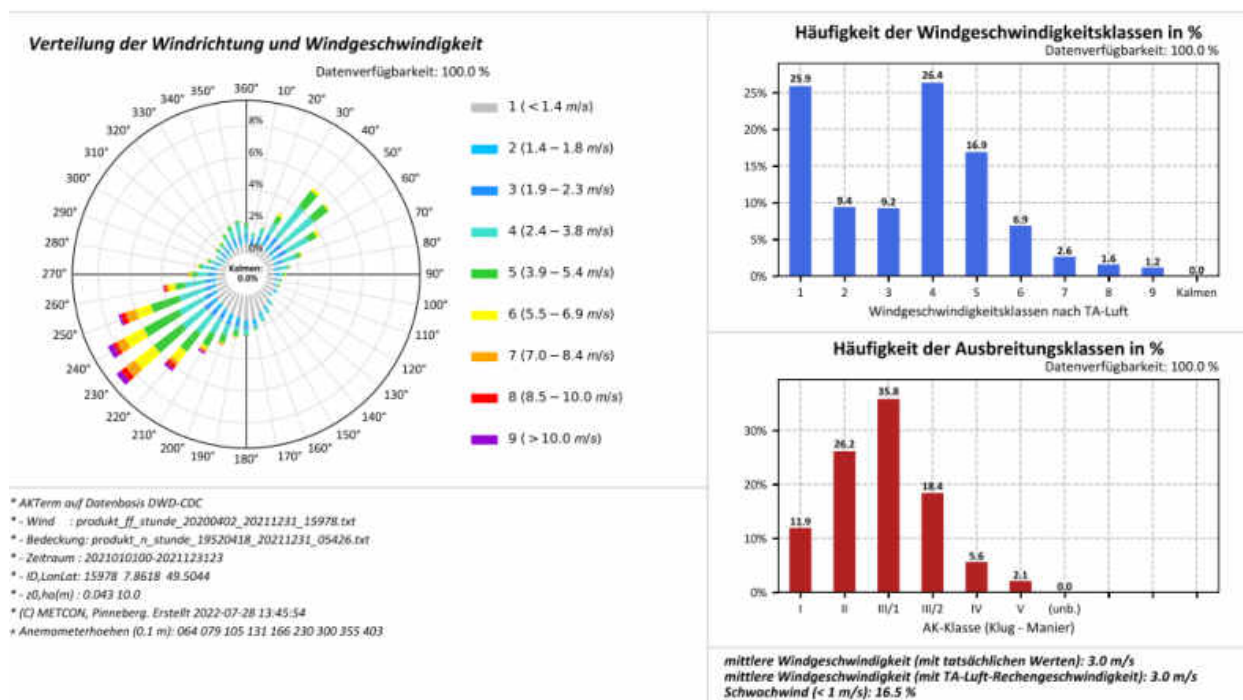


Abbildung A.110: Datenblätter der Messung (oben) und SynAKTerm 3.0 (unten) an der DWD-Station Schmücke (2011-2020).



Für den Vergleich gemessener und synthetischer Daten sind die Hinweise im Abschnitt 5.1 zu beachten.

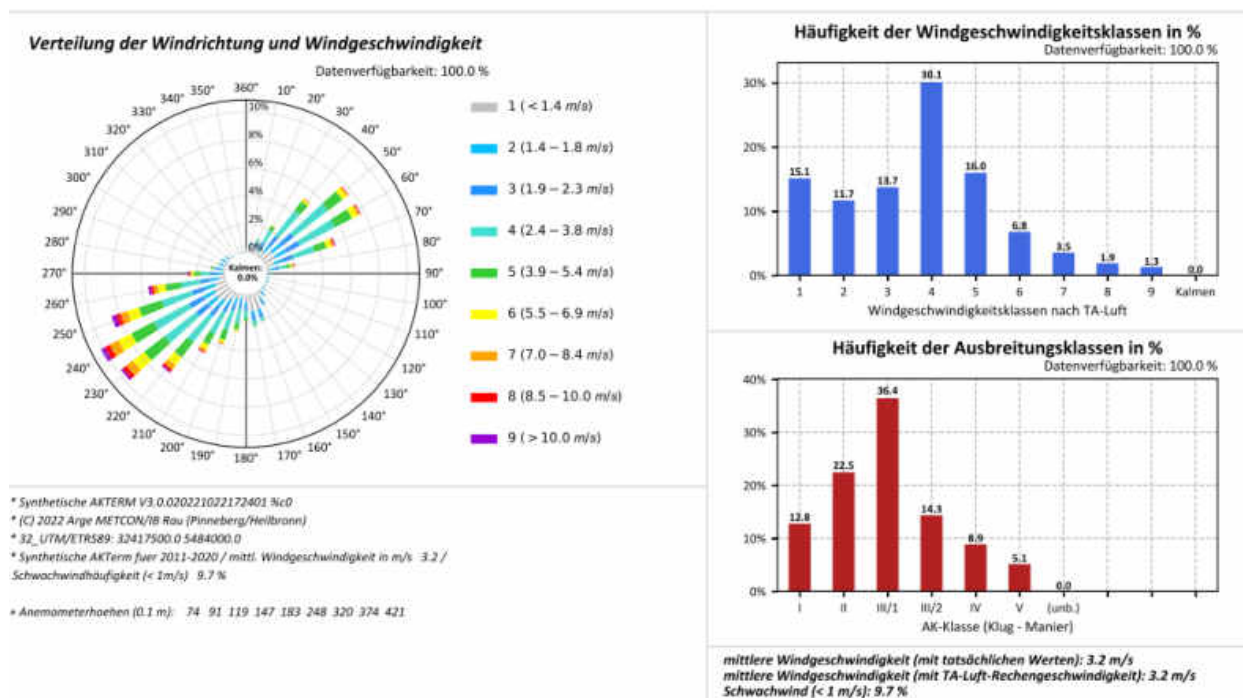
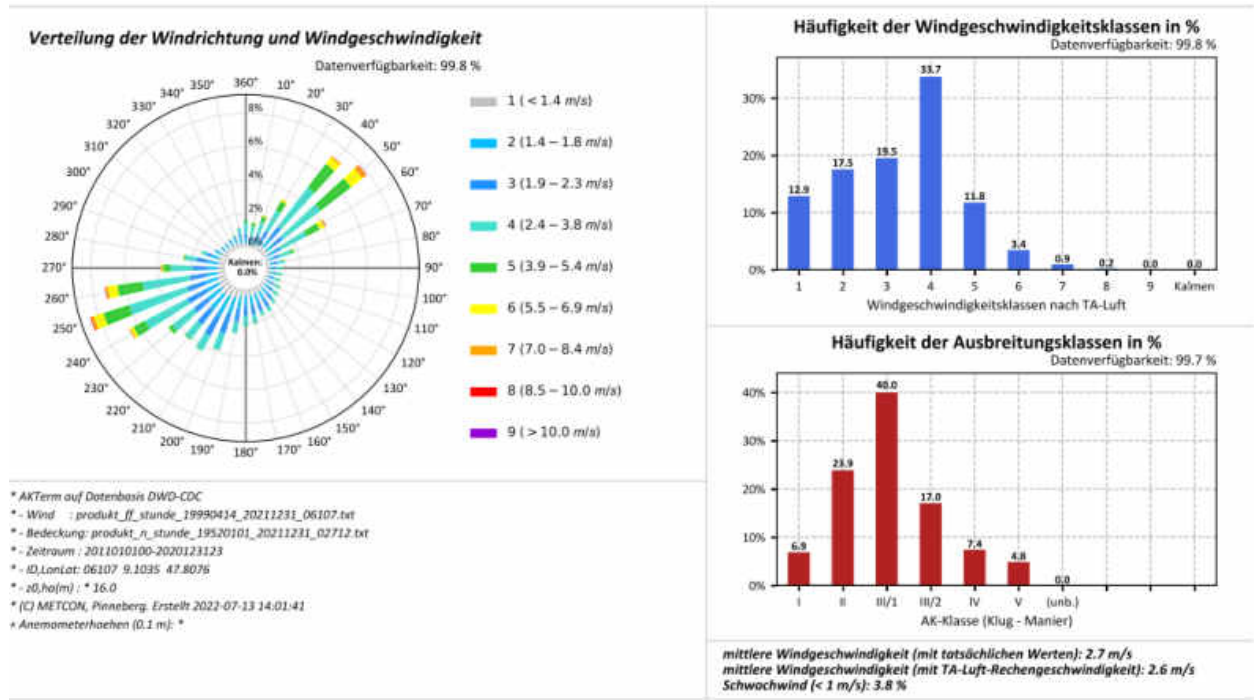


Abbildung A.111: Datenblätter der Messung (oben) und SynAKTerm 3.0 (unten) an der DWD-Station Sembach (2021-2021 / 2011-2020).



Für den Vergleich gemessener und synthetischer Daten sind die Hinweise im Abschnitt 5.1 zu beachten.

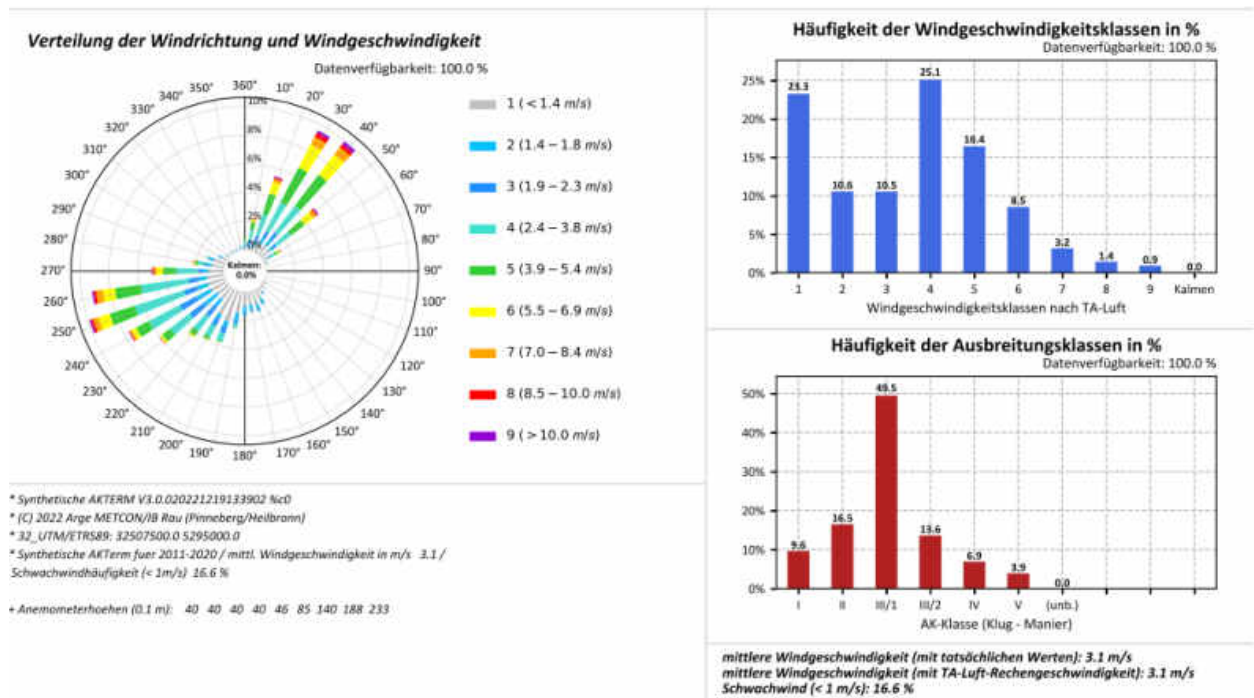
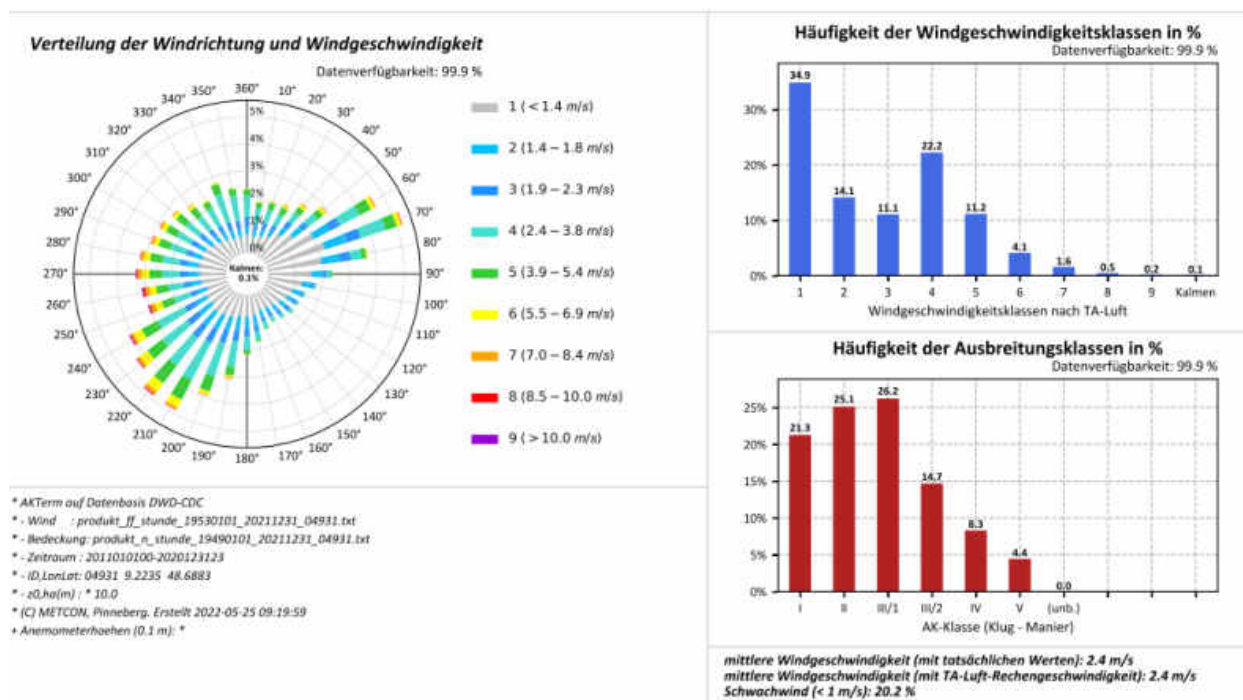


Abbildung A.112: Datenblätter der Messung (oben) und SynAKTerm 3.0 (unten) an der DWD-Station Sipplingen (2011-2020).



Für den Vergleich gemessener und synthetischer Daten sind die Hinweise im Abschnitt 5.1 zu beachten.

Diese Station wird im Abschnitt 5.1 diskutiert.

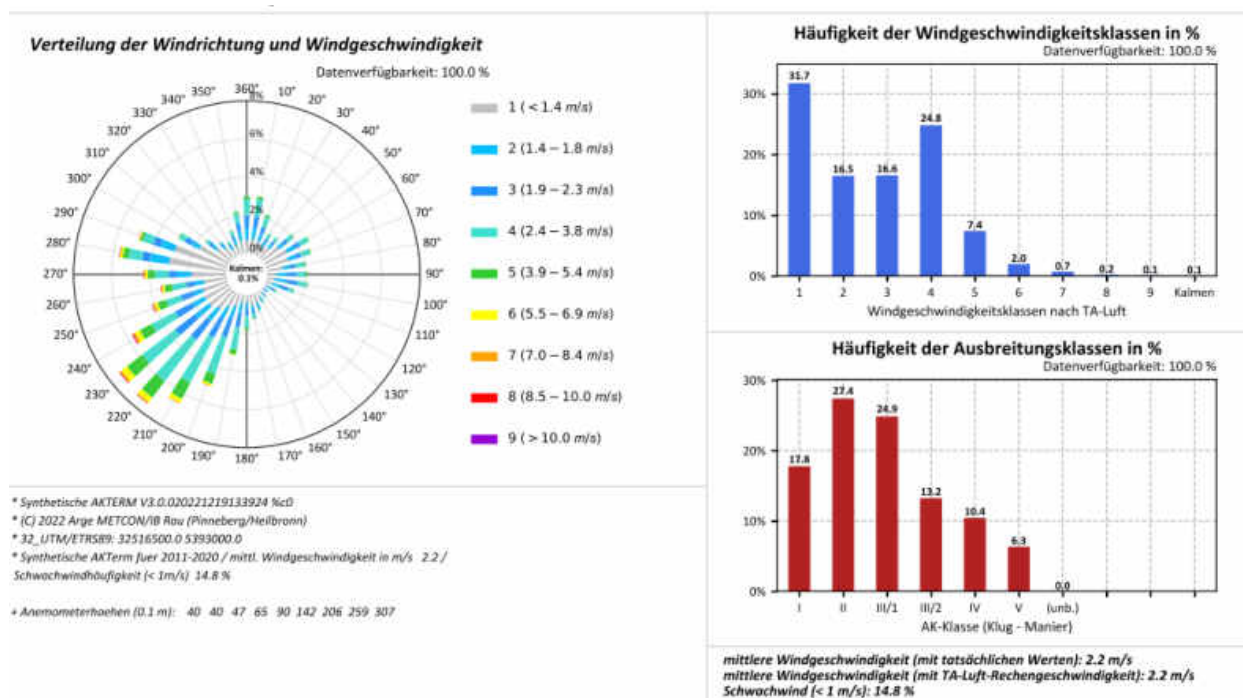
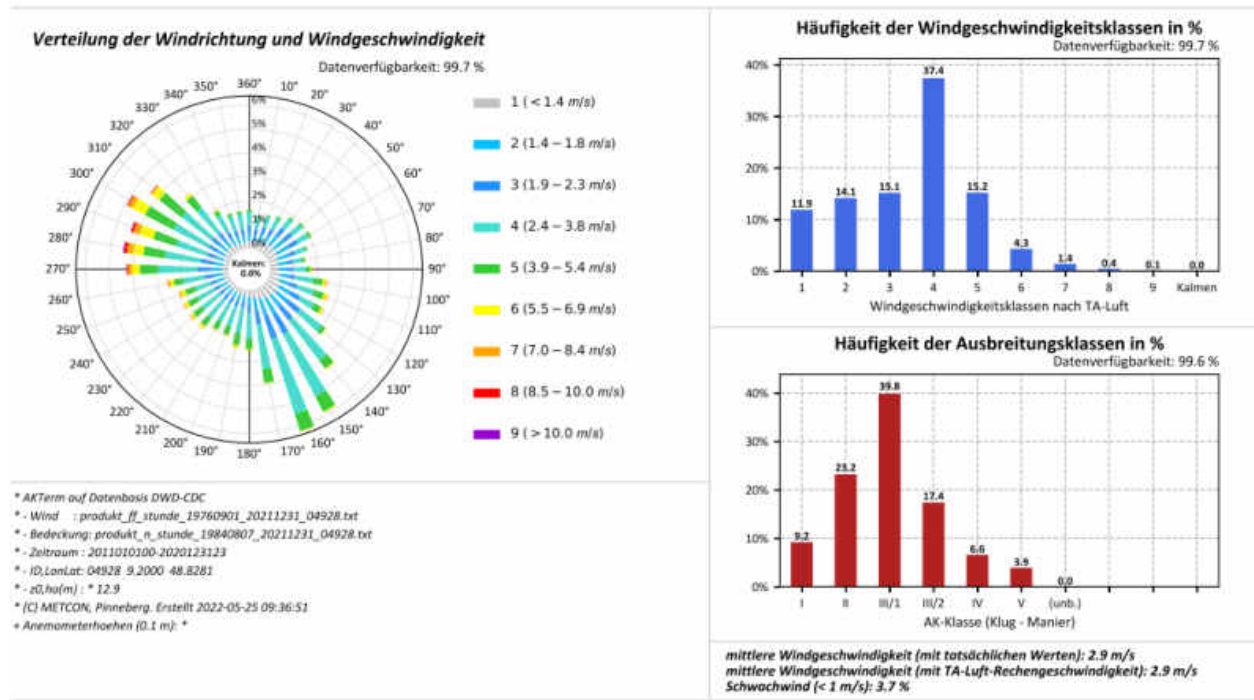


Abbildung A.113: Datenblätter der Messung (oben) und SynAKTerm 3.0 (unten) an der DWD-Station Stuttgart-Echterdingen (2011-2020).





Für den Vergleich gemessener und synthetischer Daten sind die Hinweise im Abschnitt 5.1 zu beachten.

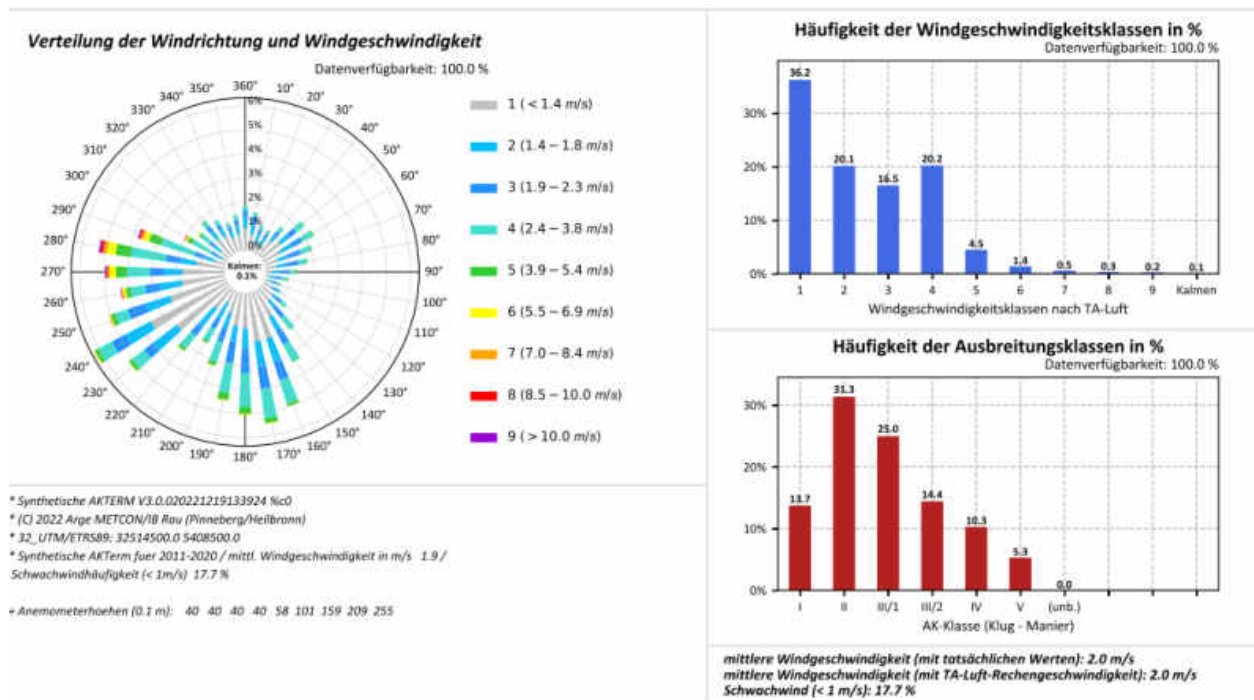
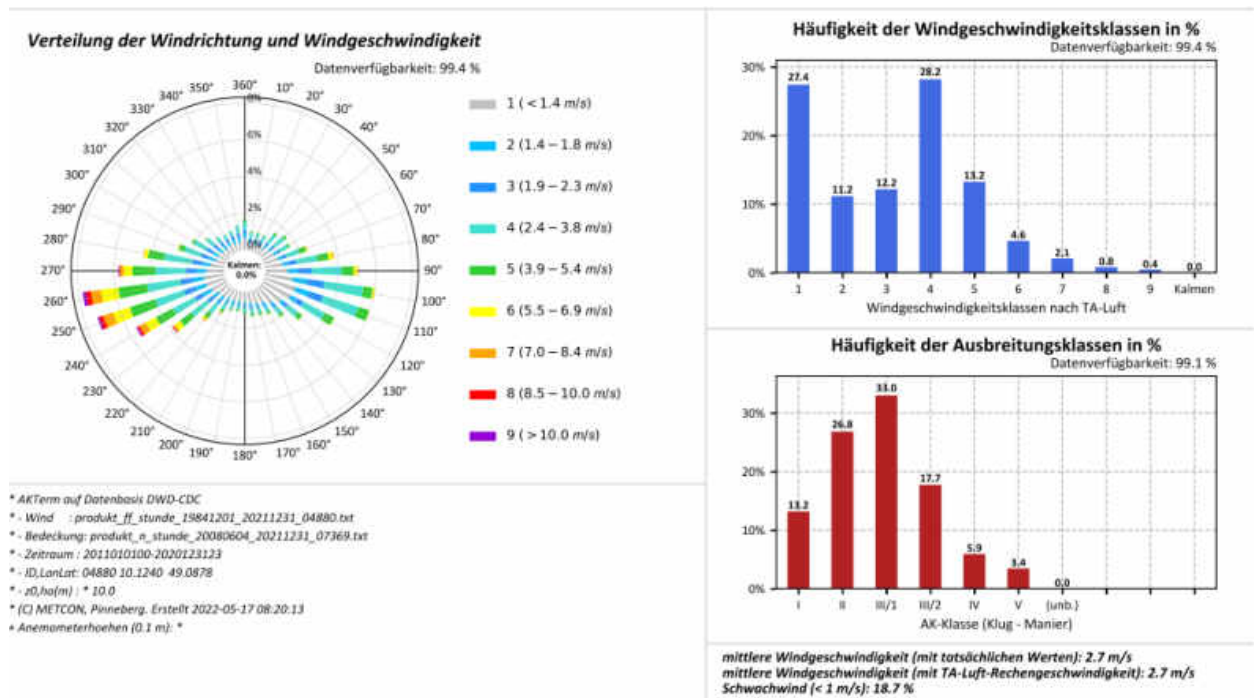


Abbildung A.114: Datenblätter der Messung (oben) und SynAKTerm 3.0 (unten) an der DWD-Station Stuttgart-Schnarrenberg (2011-2020).



Für den Vergleich gemessener und synthetischer Daten sind die Hinweise im Abschnitt 5.1 zu beachten.

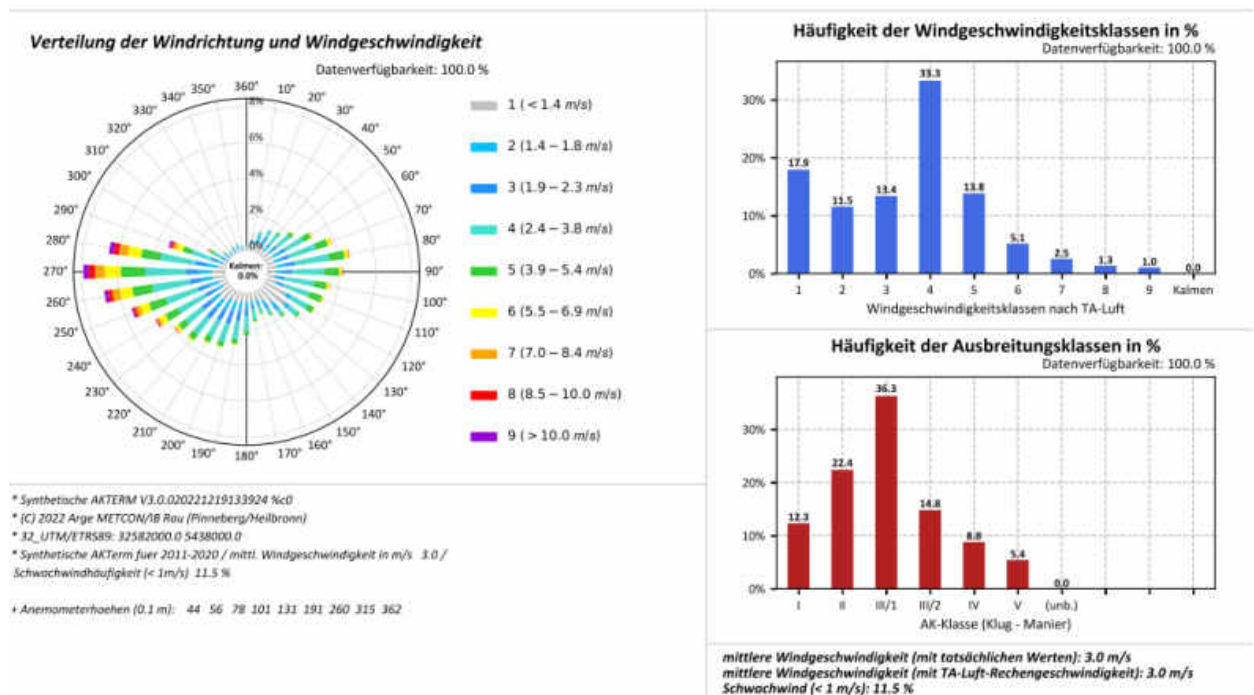
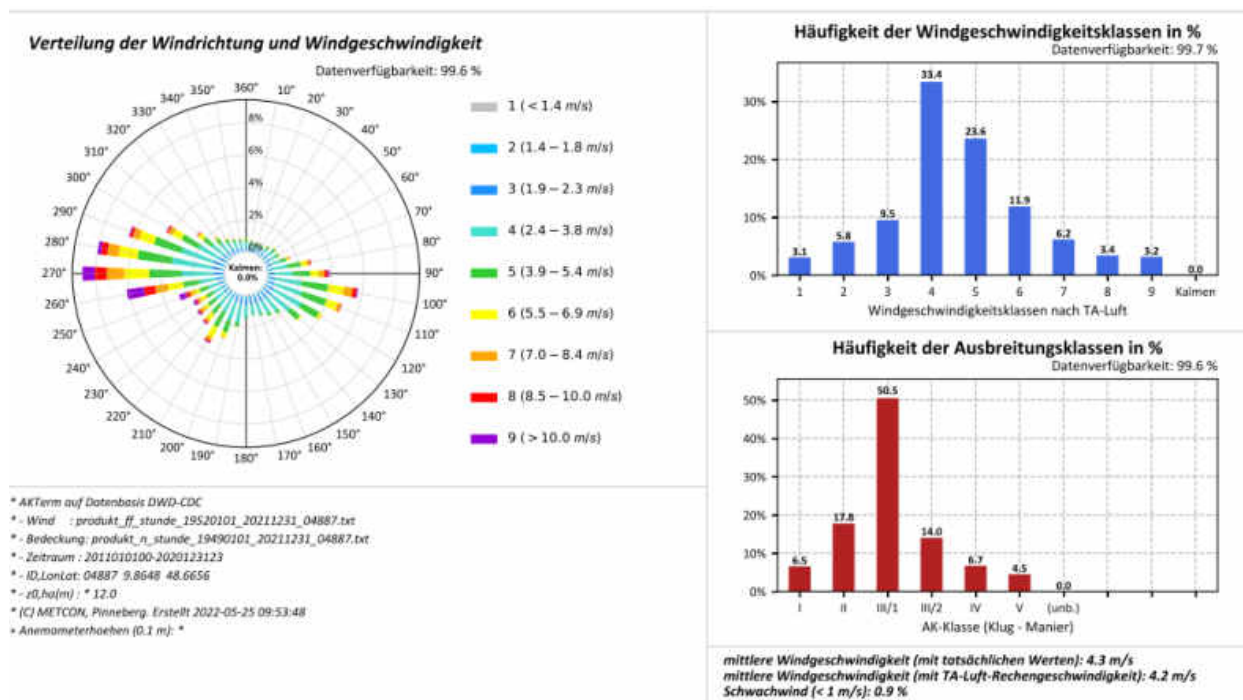


Abbildung A.115: Datenblätter der Messung (oben) und SynAKTerm 3.0 (unten) an der DWD-Station Stimpfach-Weipertshofen (2011-2020).



Für den Vergleich gemessener und synthetischer Daten sind die Hinweise im Abschnitt 5.1 zu beachten.

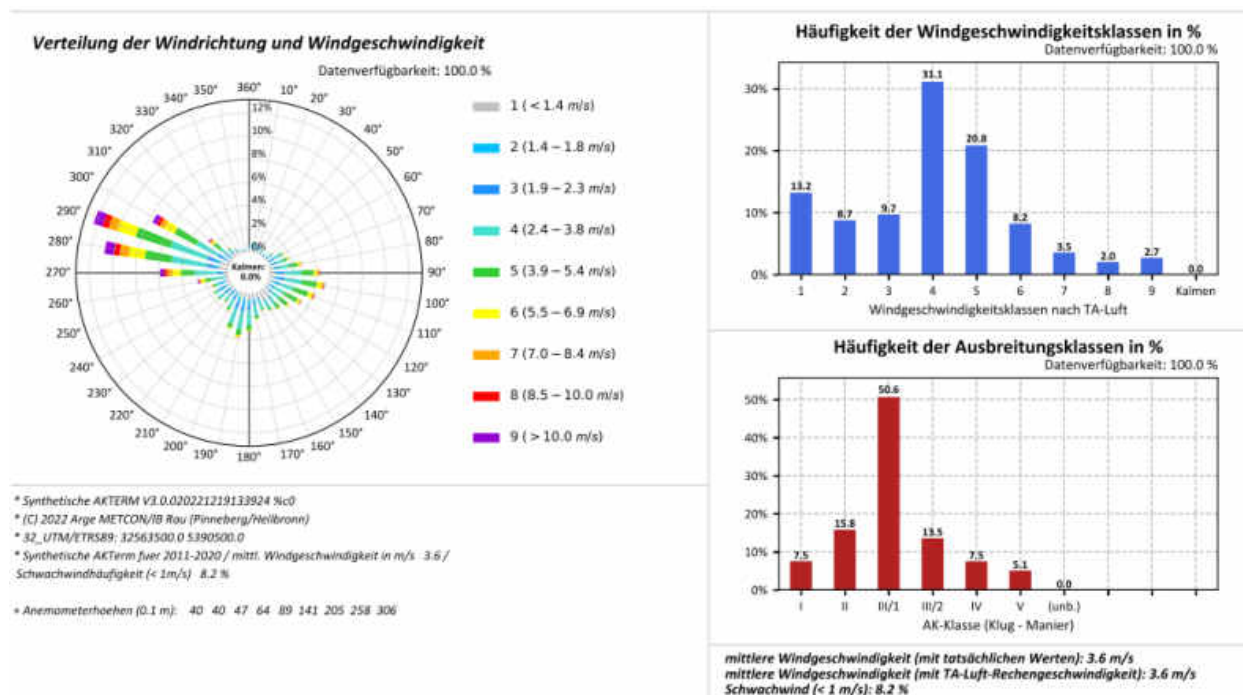
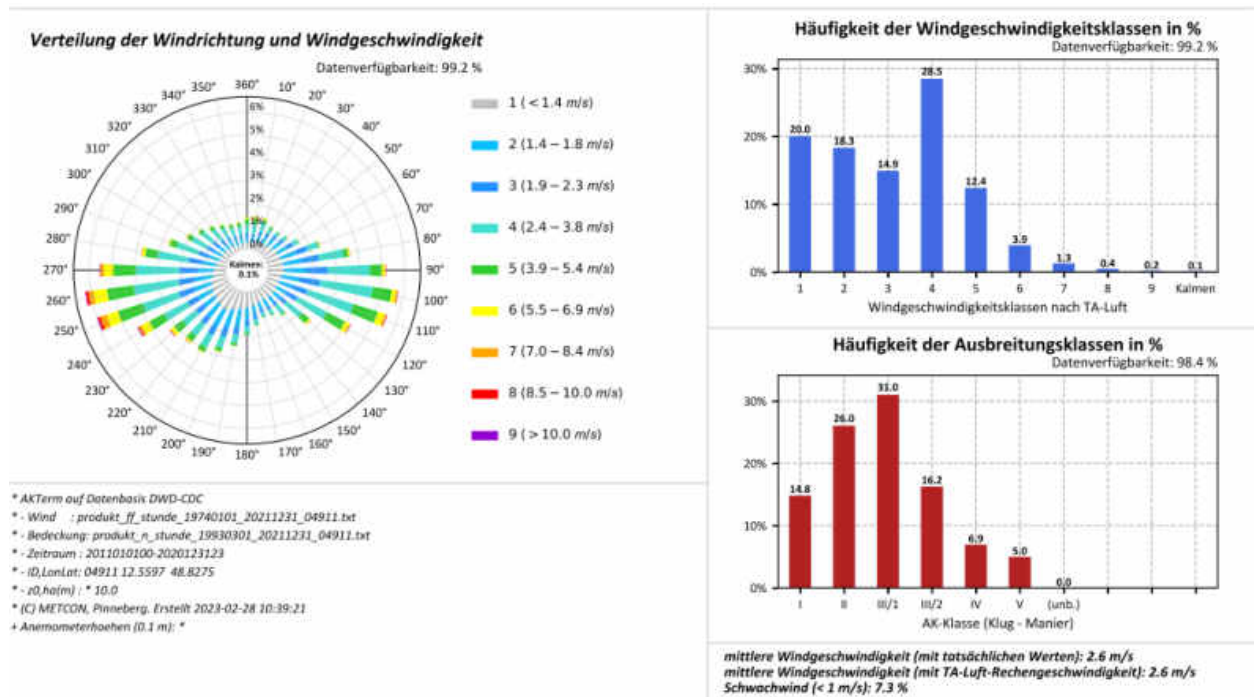
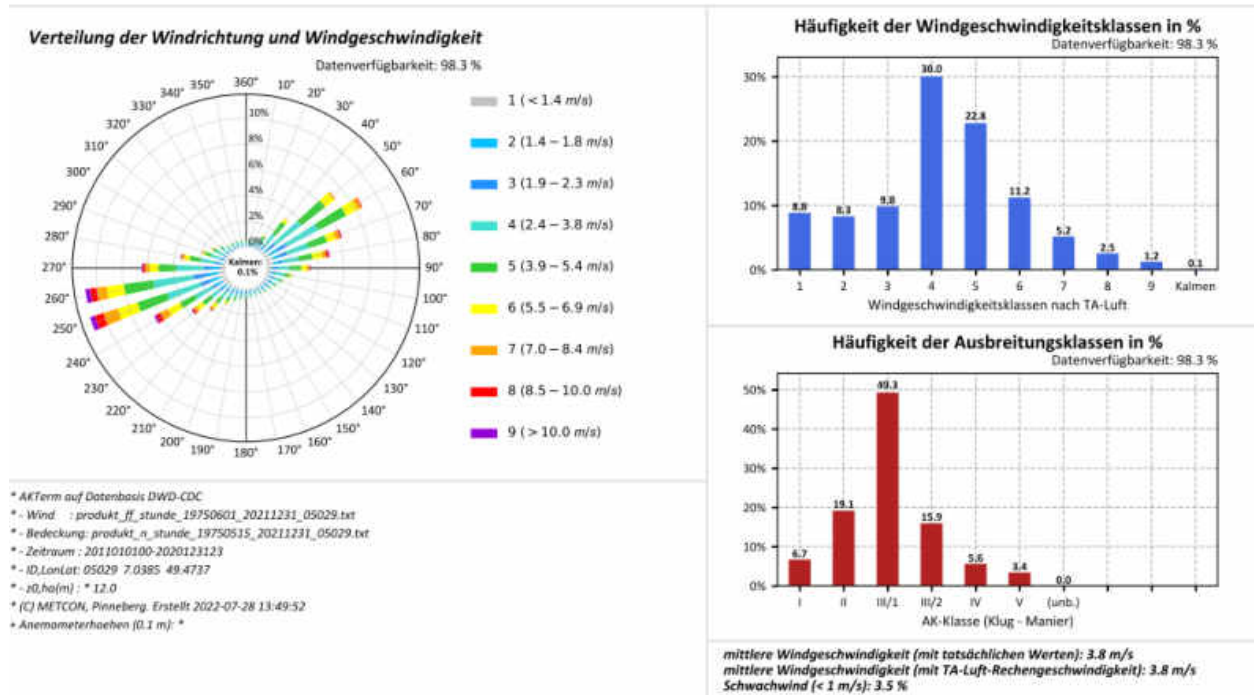


Abbildung A.116: Datenblätter der Messung (oben) und SynAKTerm 3.0 (unten) an der DWD-Station Stötten (2011-2020).



Für den Vergleich gemessener und synthetischer Daten sind die Hinweise im Abschnitt 5.1 zu beachten.

Abbildung A.117: Datenblätter der Messung (oben) und SynAKTerm 3.0 (unten) an der DWD-Station Straubing (2011-2020).



Für den Vergleich gemessener und synthetischer Daten sind die Hinweise im Abschnitt 5.1 zu beachten.

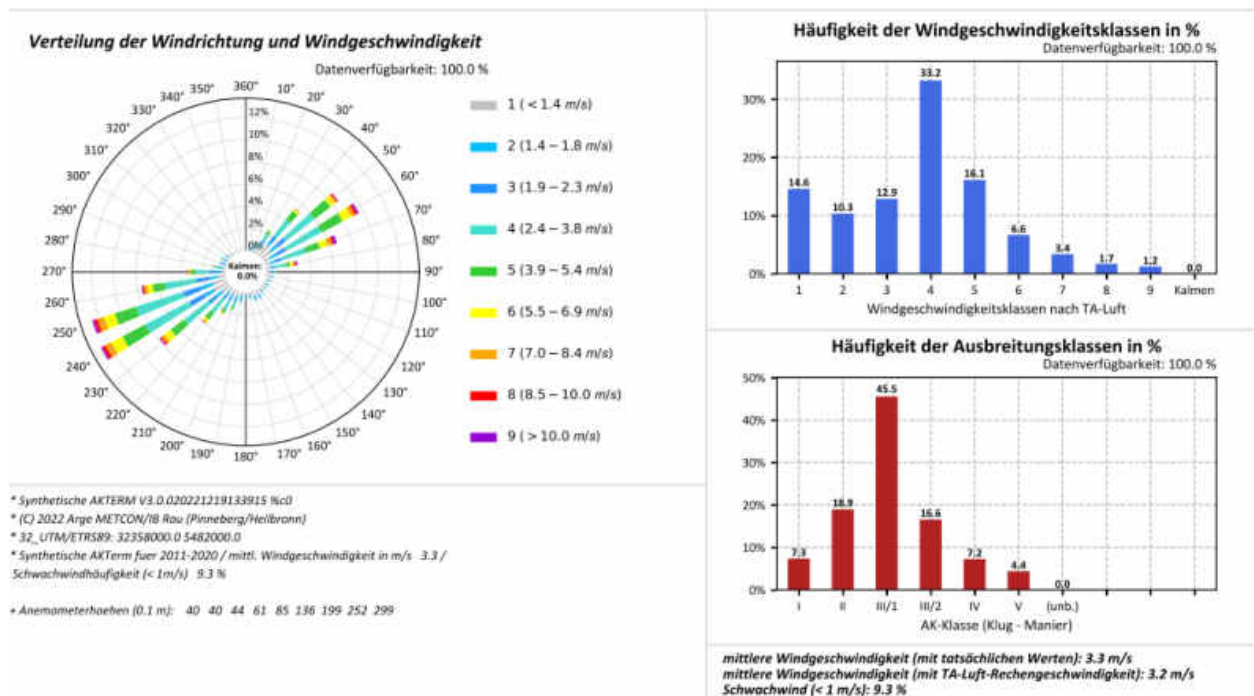
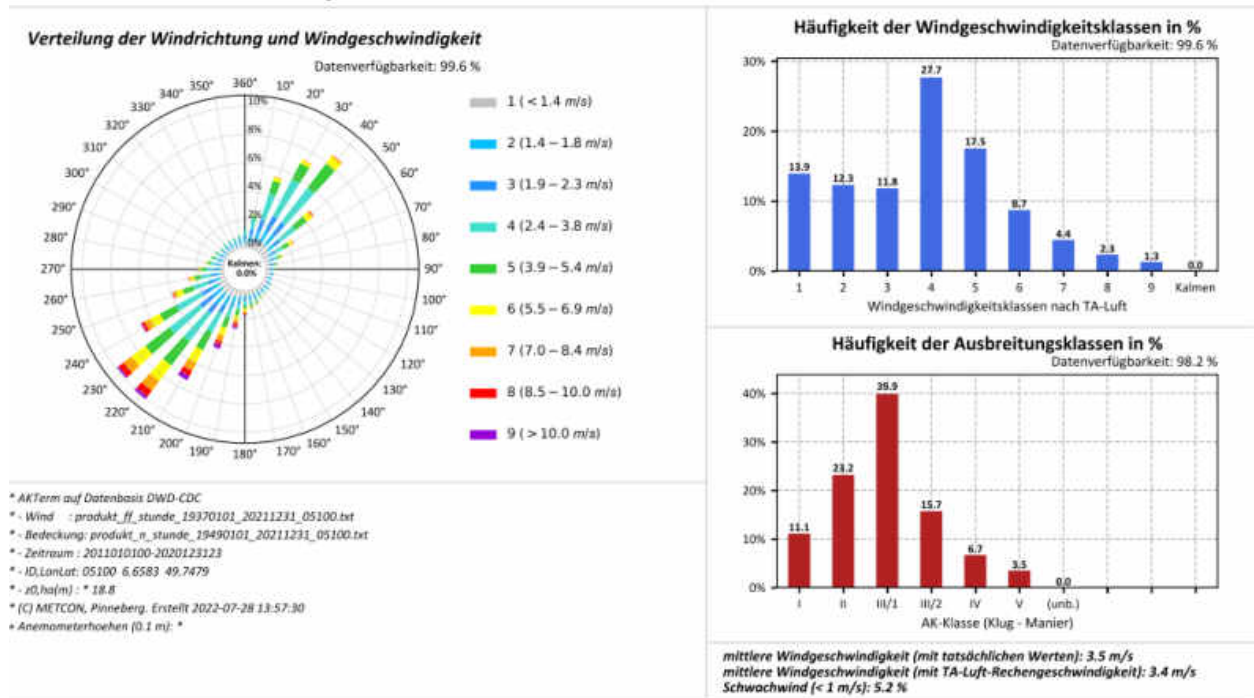


Abbildung A.118: Datenblätter der Messung (oben) und SynAKTerm 3.0 (unten) an der DWD-Station Tholey (2011-2020).



Für den Vergleich gemessener und synthetischer Daten sind die Hinweise im Abschnitt 5.1 zu beachten.

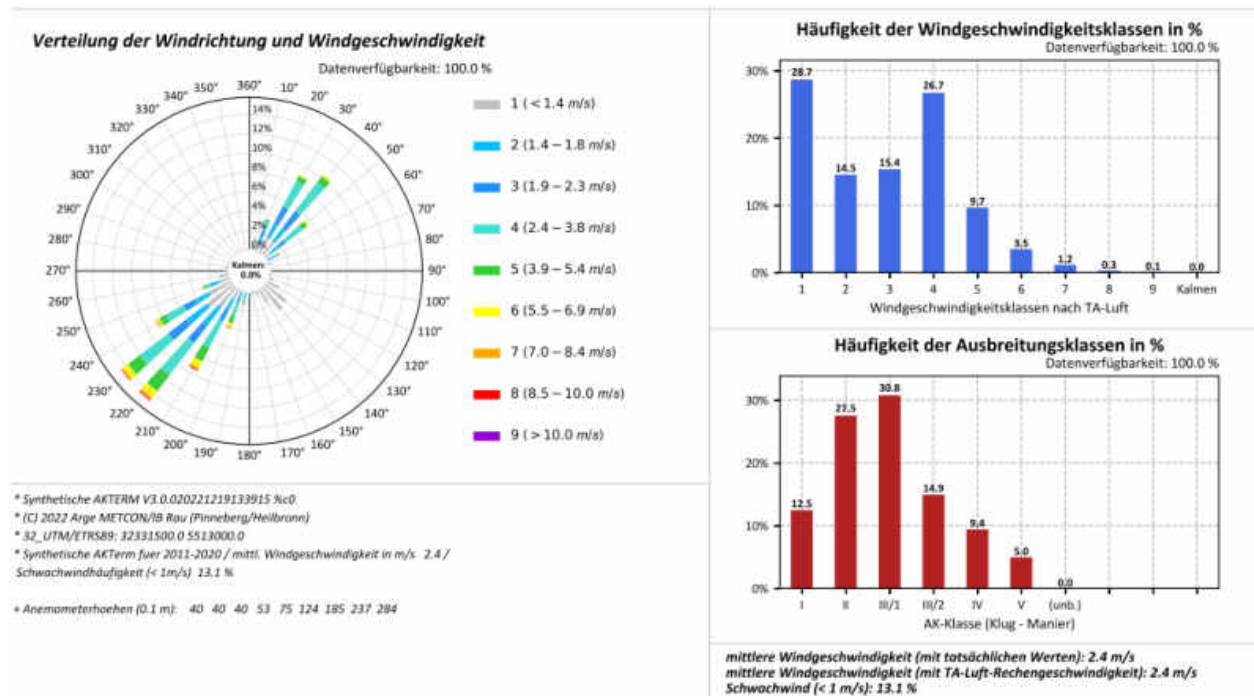
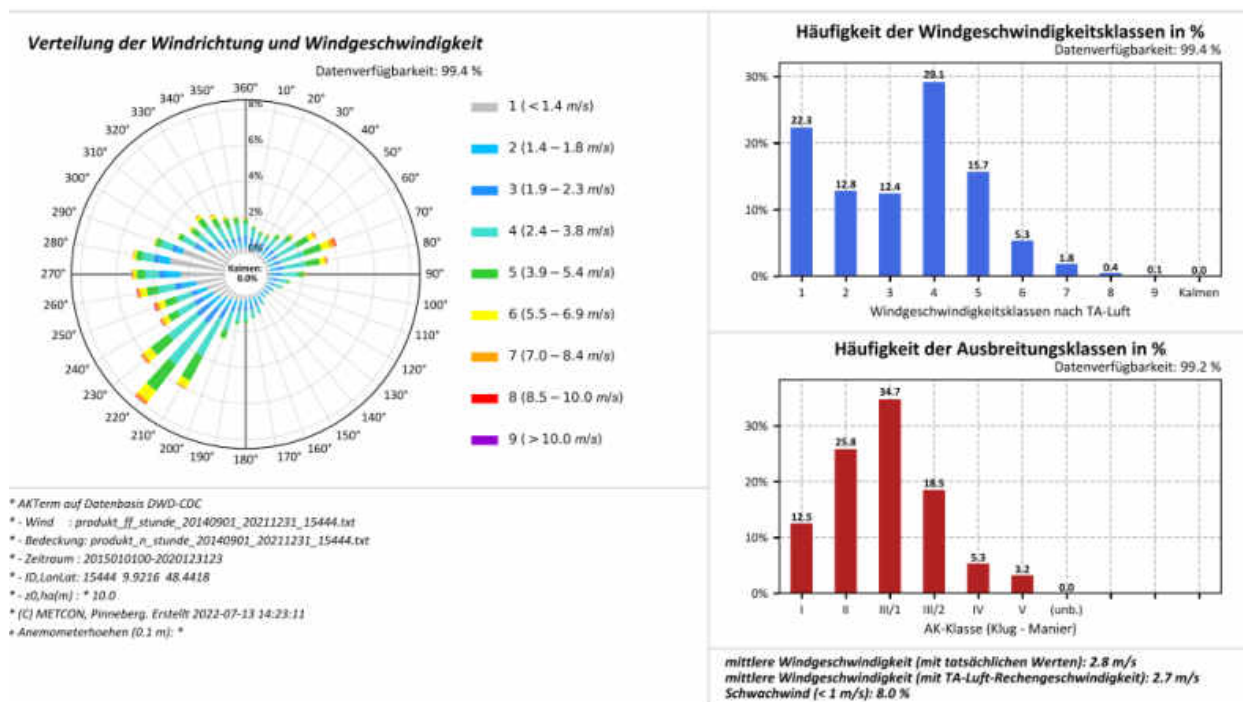


Abbildung A.119: Datenblätter der Messung (oben) und SynAKTerm 3.0 (unten) an der DWD-Station Trier-Petrisberg (2011-2020).



Für den Vergleich gemessener und synthetischer Daten sind die Hinweise im Abschnitt 5.1 zu beachten.

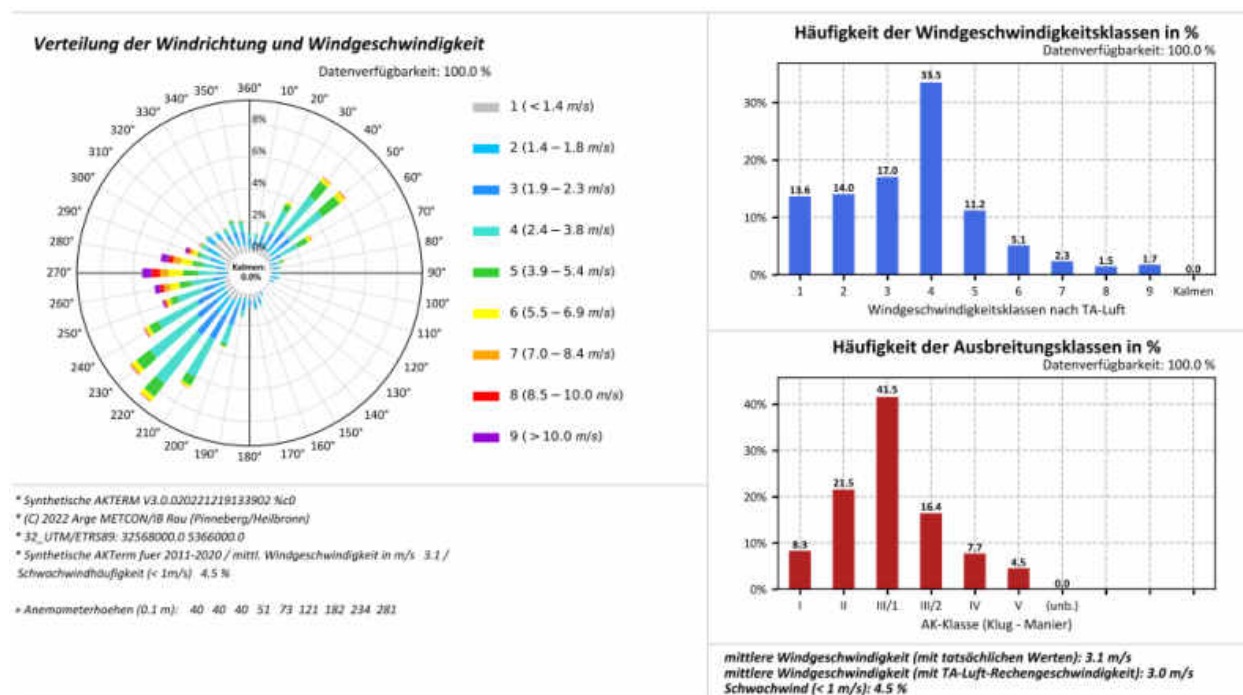
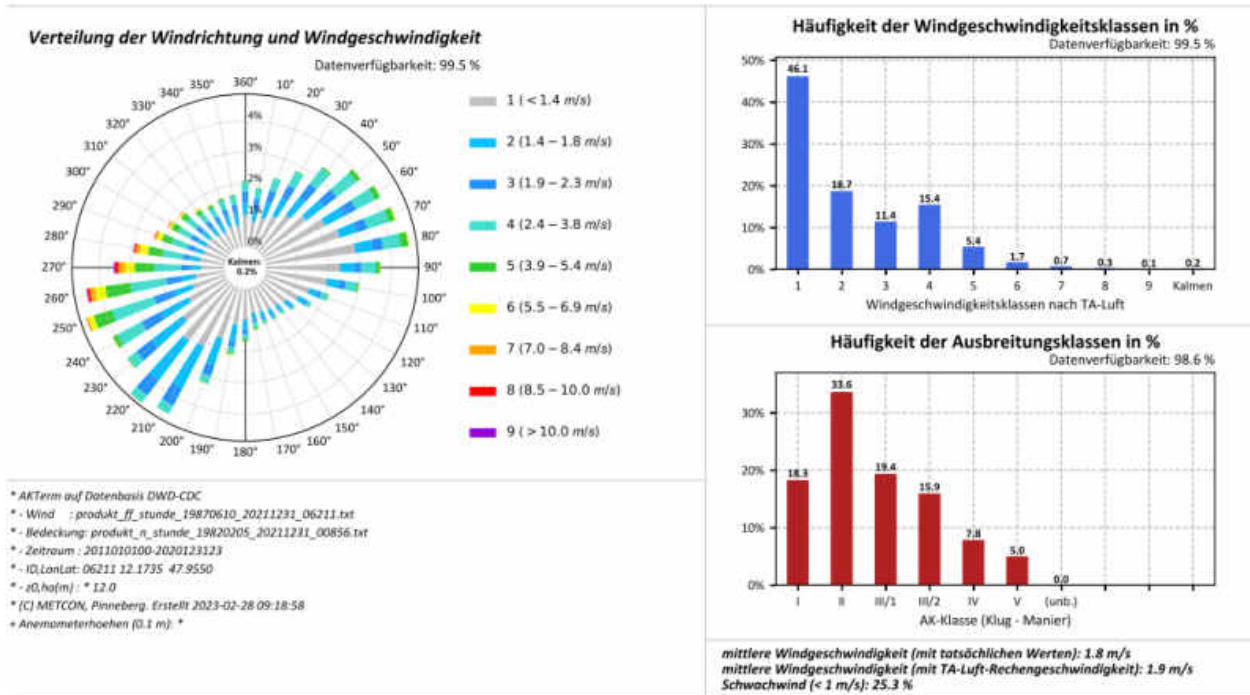


Abbildung A.120: Datenblätter der Messung (oben) und SynAKTerm 3.0 (unten) an der DWD-Station Ulm-Mähringen (2011-2020).



Für den Vergleich gemessener und synthetischer Daten sind die Hinweise im Abschnitt 5.1 zu beachten.

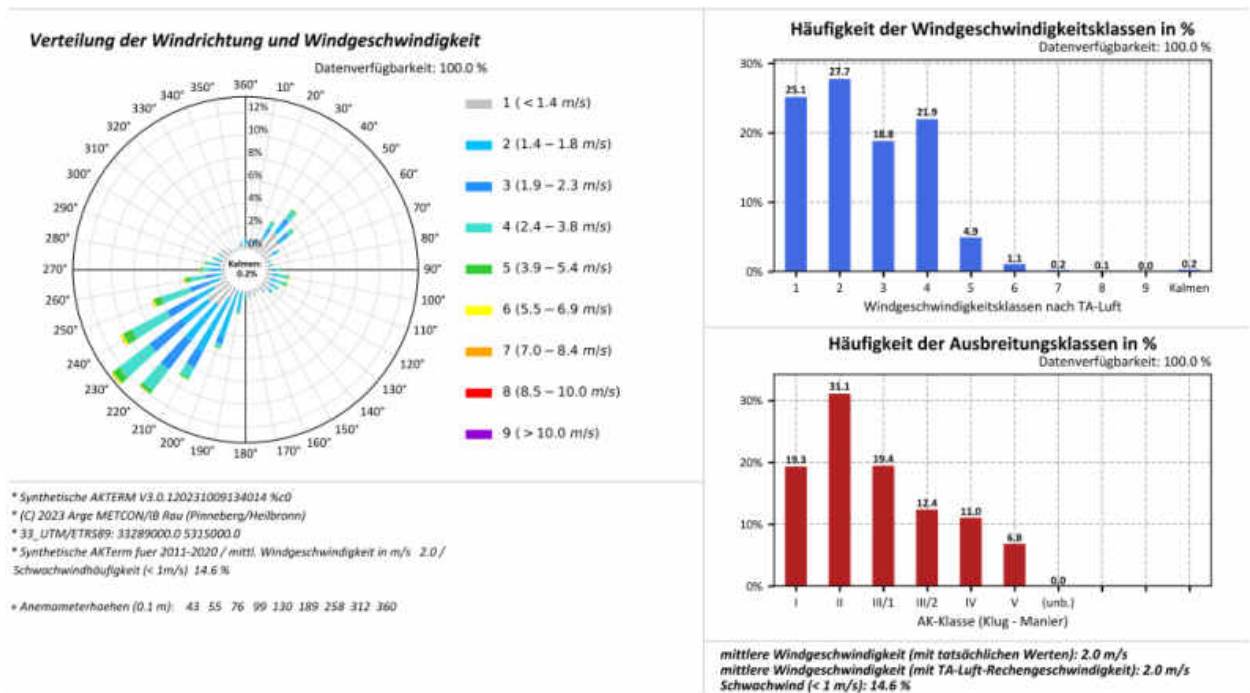
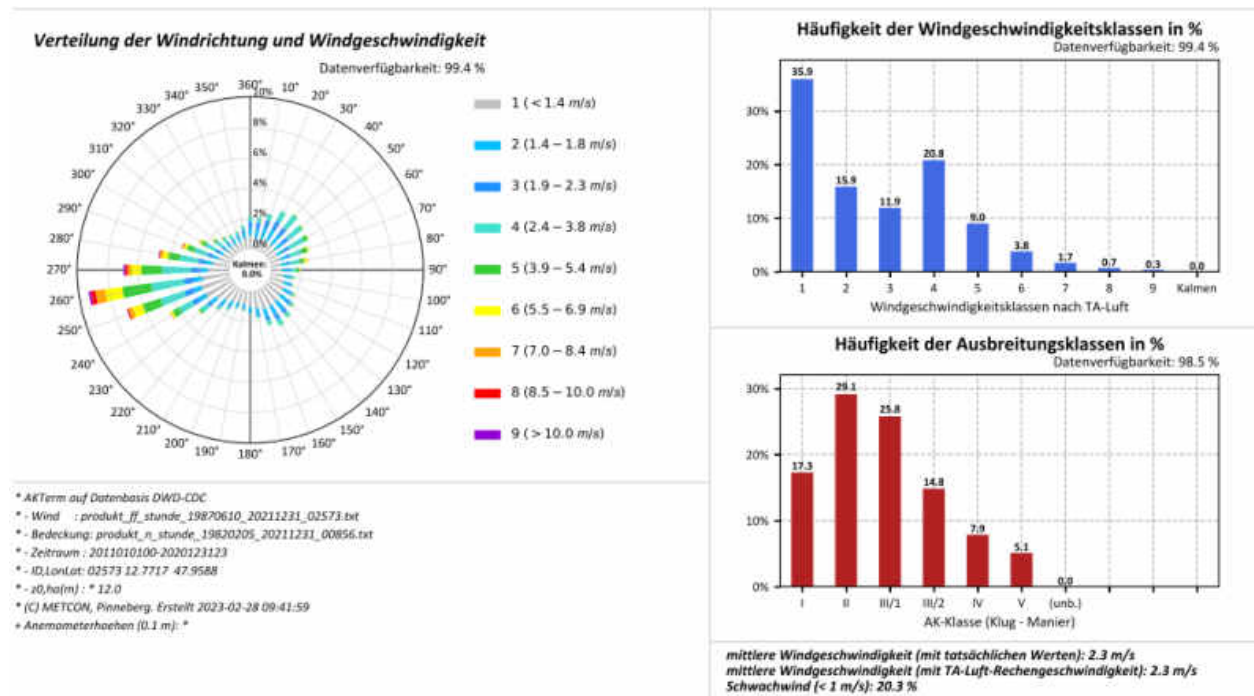


Abbildung A.121: Datenblätter der Messung (oben) und SynAKTerm 3.0 (unten) an der DWD-Station Vogtareuth (Kläranlage) (2011-2020).





Für den Vergleich gemessener und synthetischer Daten sind die Hinweise im Abschnitt 5.1 zu beachten.

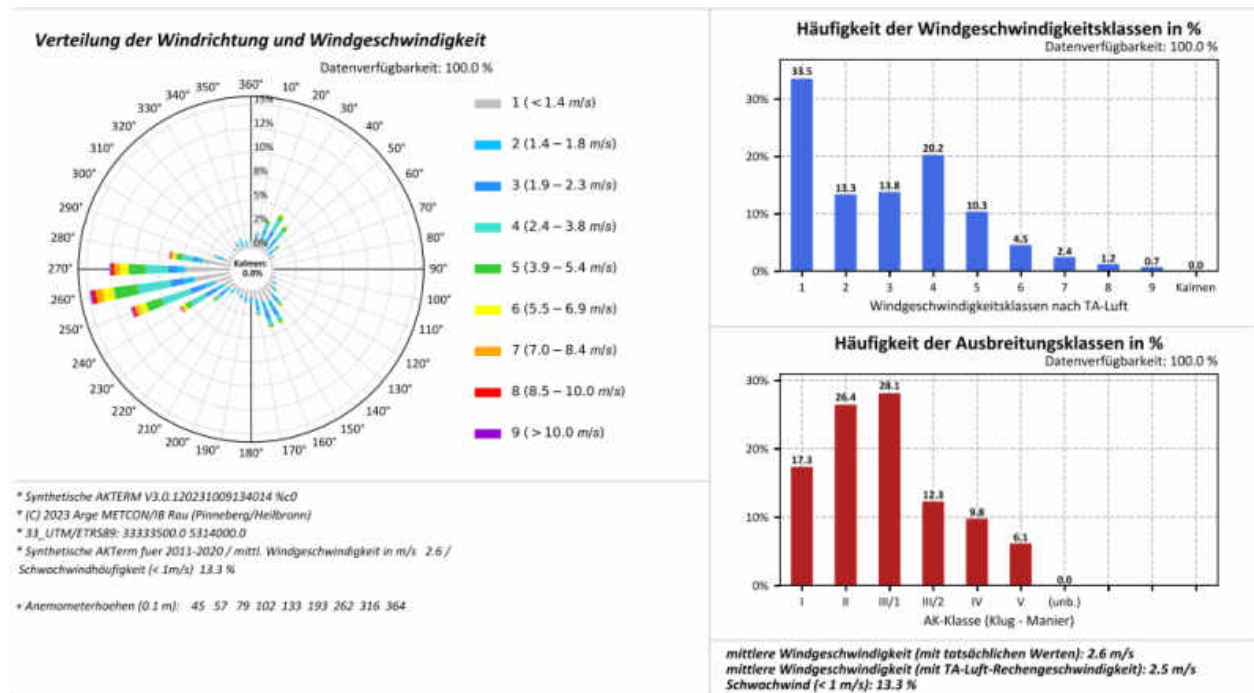
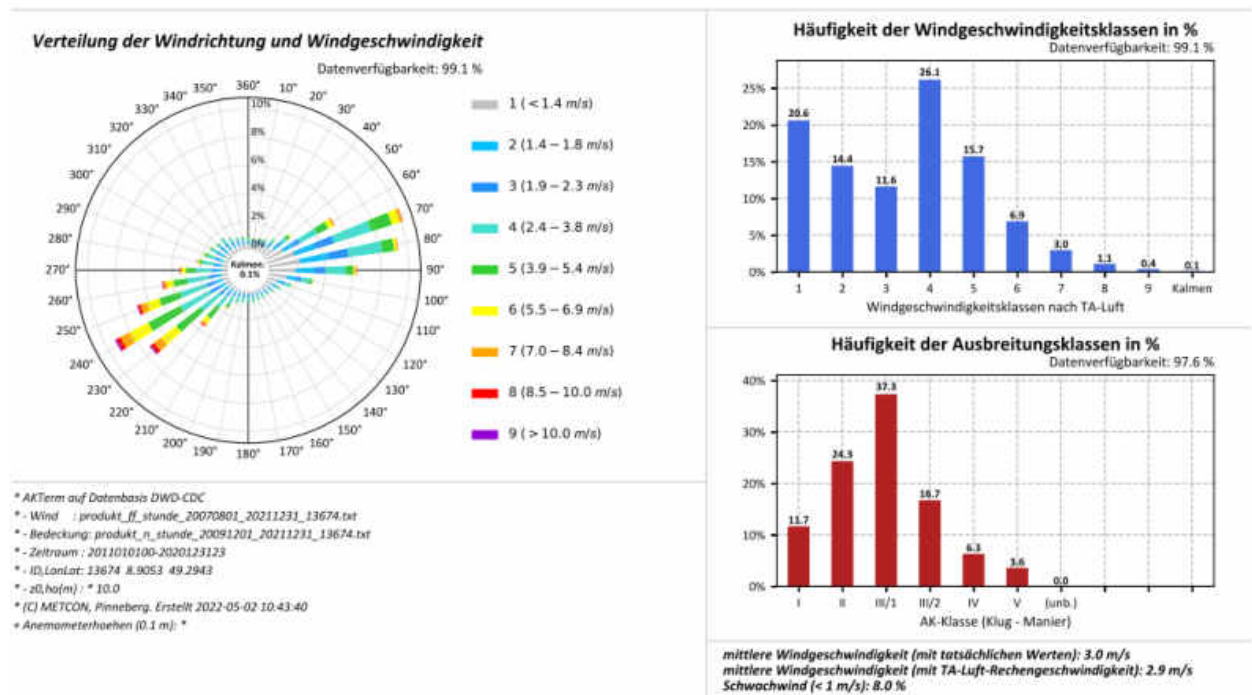


Abbildung A.122: Datenblätter der Messung (oben) und SynAKTerm 3.0 (unten) an der DWD-Station Waging am See (2011-2020).



Für den Vergleich gemessener und synthetischer Daten sind die Hinweise im Abschnitt 5.1 zu beachten.

Diese Station wird im Abschnitt 5.5 diskutiert.

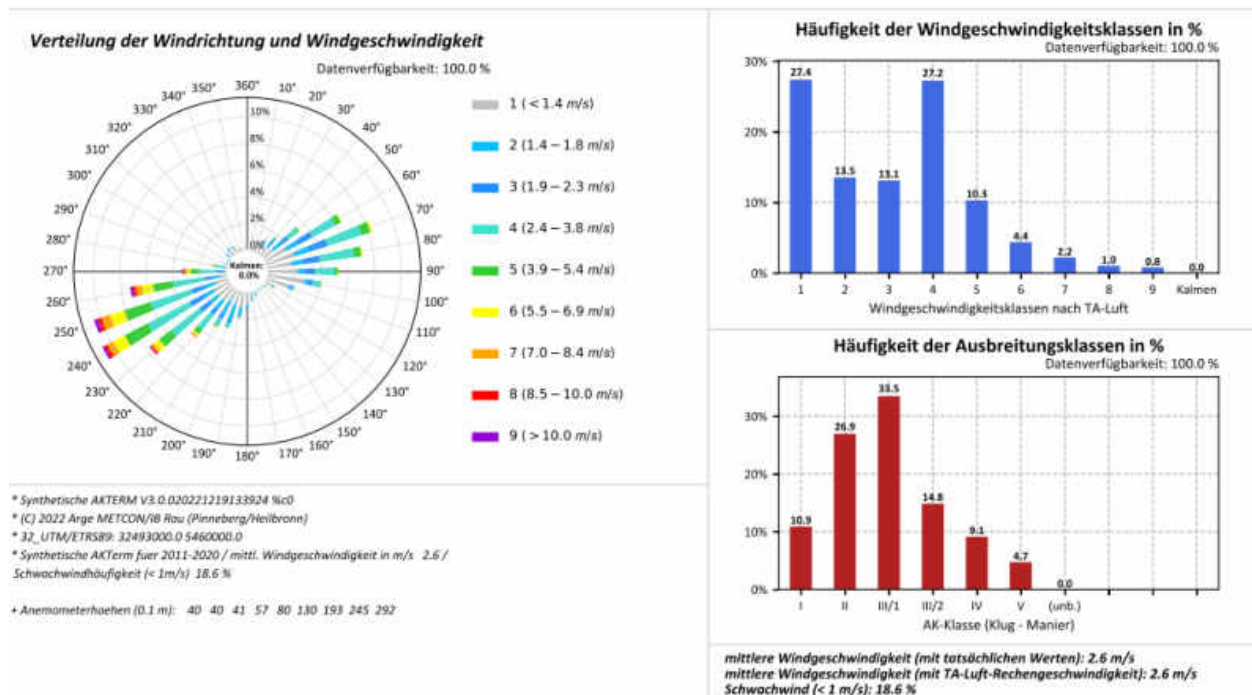
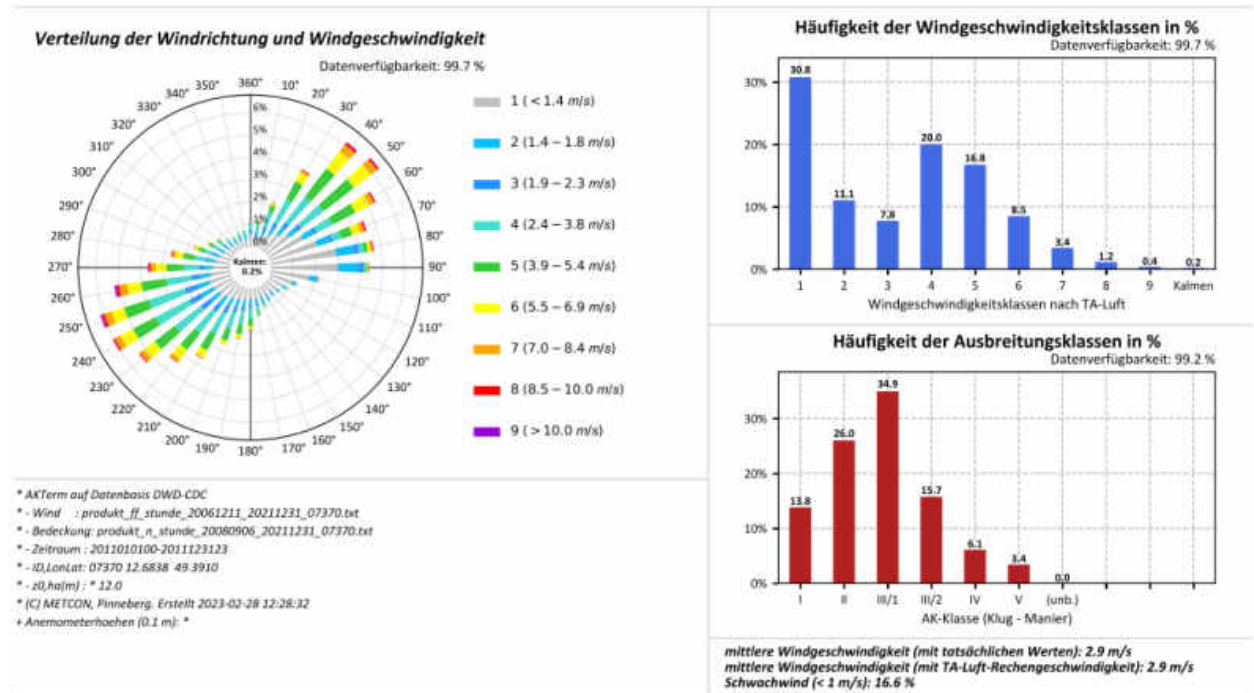


Abbildung A.123: Datenblätter der Messung (oben) und SynAKTerm 3.0 (unten) an der DWD-Station Waibstadt (2011-2020).



Für den Vergleich gemessener und synthetischer Daten sind die Hinweise im Abschnitt 5.1 zu beachten.

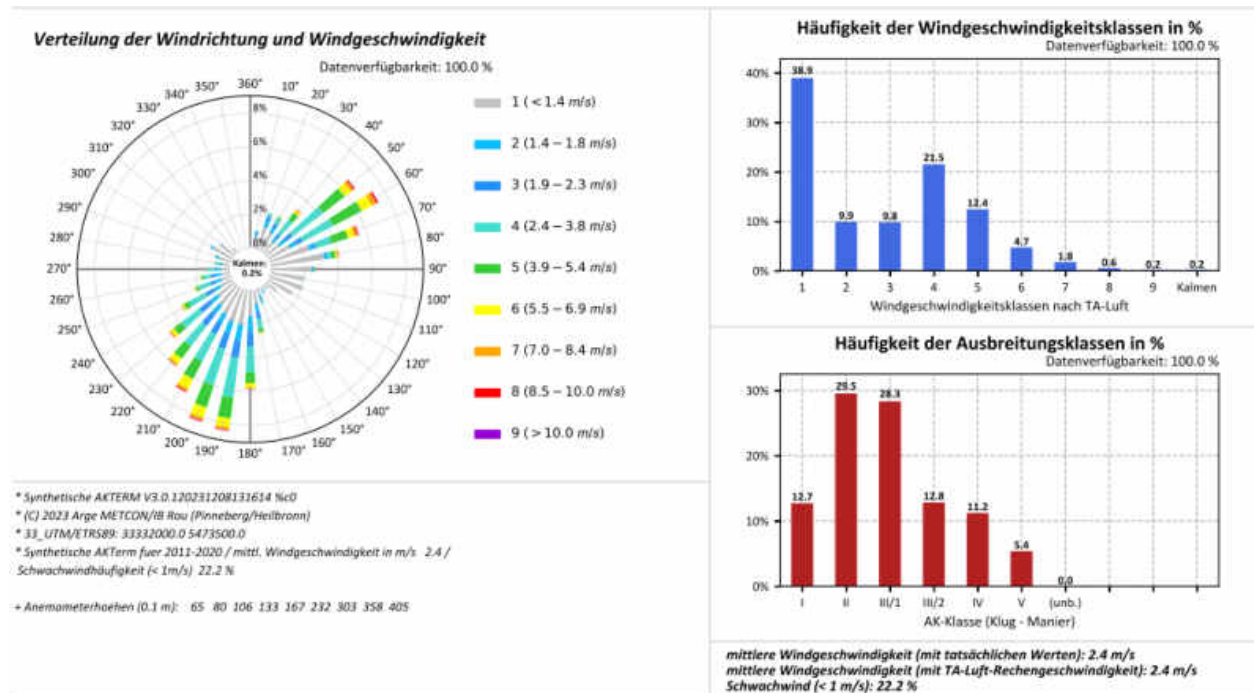
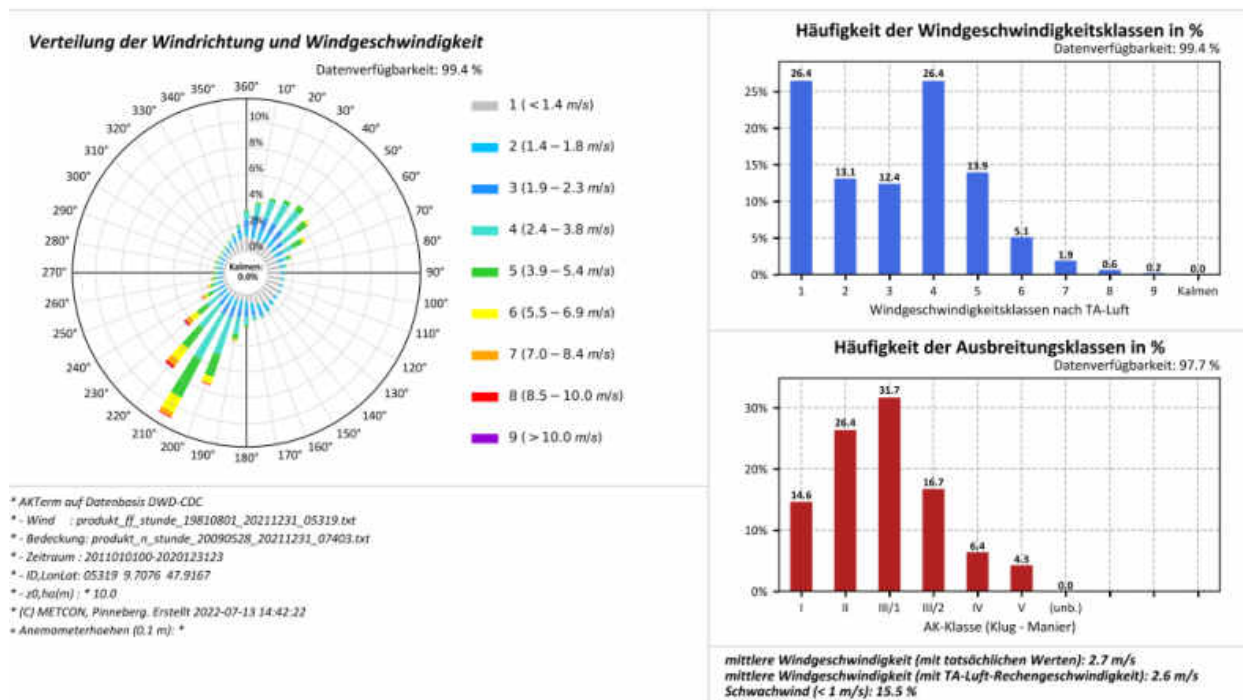
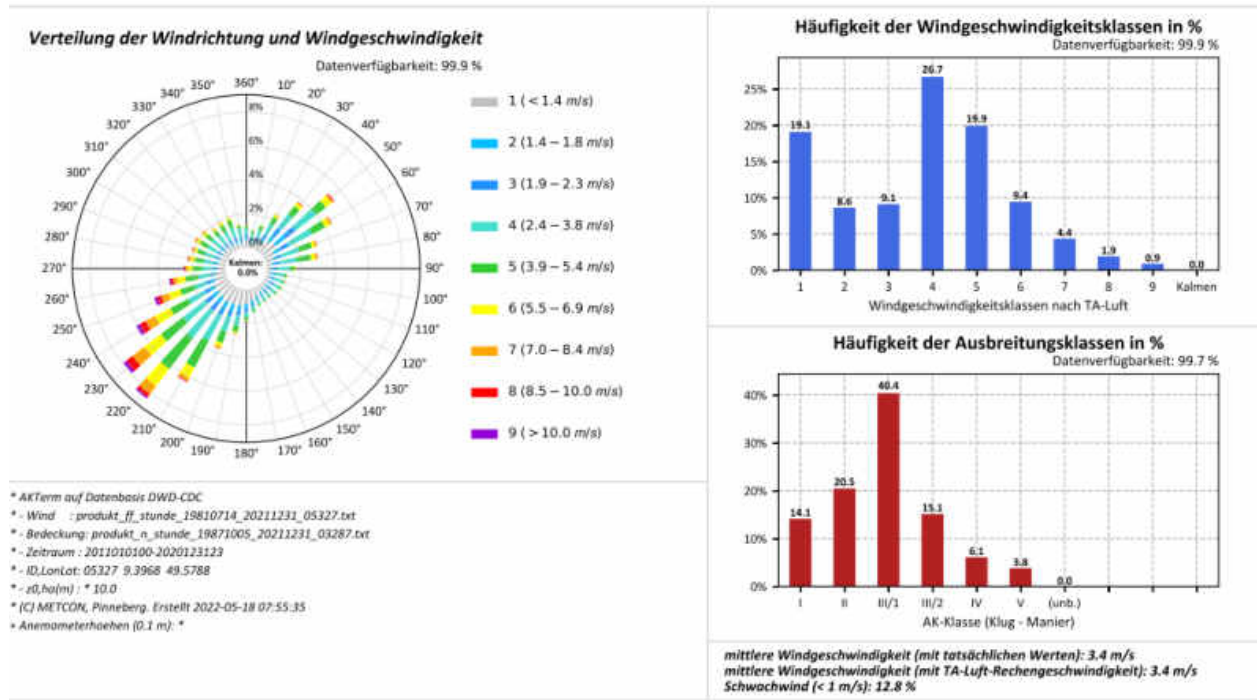


Abbildung A.124: Datenblätter der Messung (oben) und SynAKTerm 3.0 (unten) an der DWD-Station Waldmünchen (2011-2020).



Für den Vergleich gemessener und synthetischer Daten sind die Hinweise im Abschnitt 5.1 zu beachten.

Abbildung A.125: Datenblätter der Messung (oben) und SynAKTerm 3.0 (unten) an der DWD-Station Waldsee, Bad Reute (2011-2020).



Für den Vergleich gemessener und synthetischer Daten sind die Hinweise im Abschnitt 5.1 zu beachten.

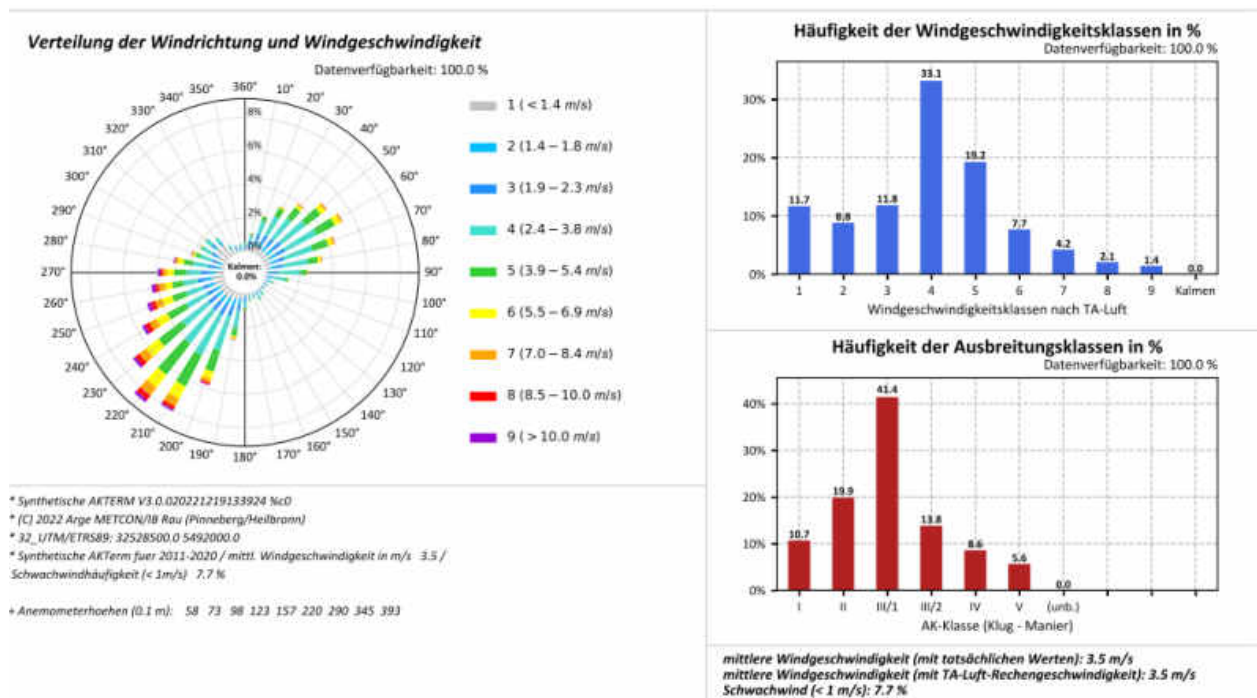
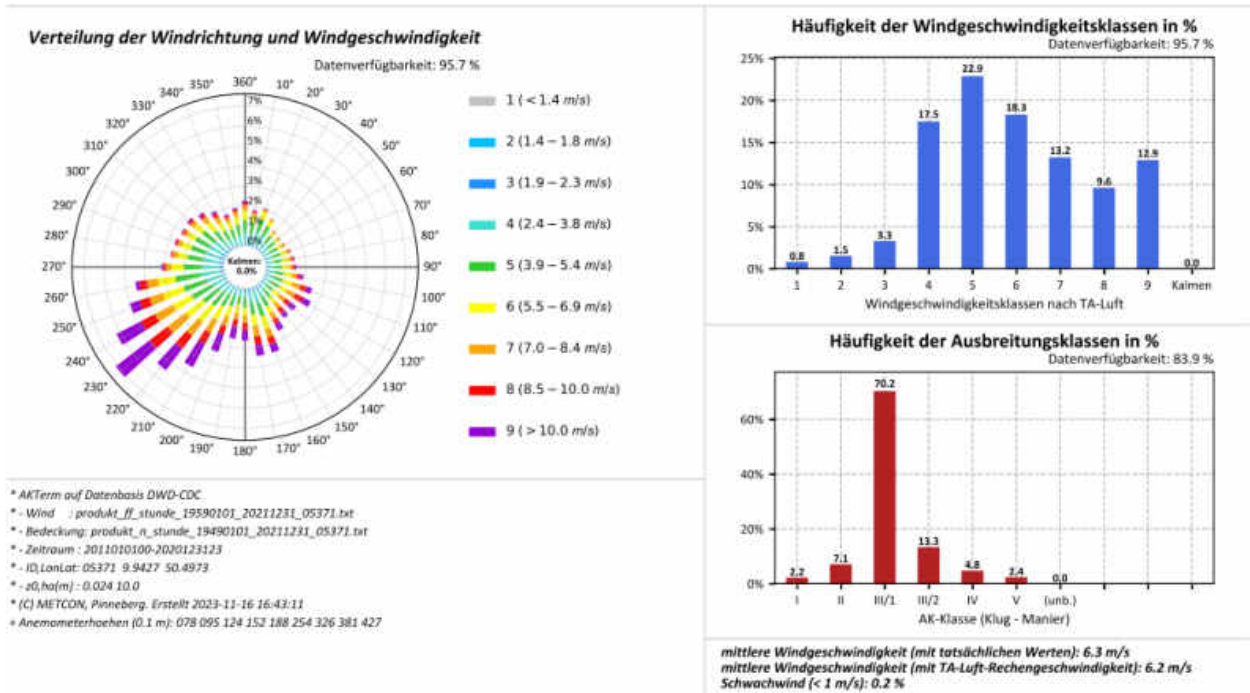
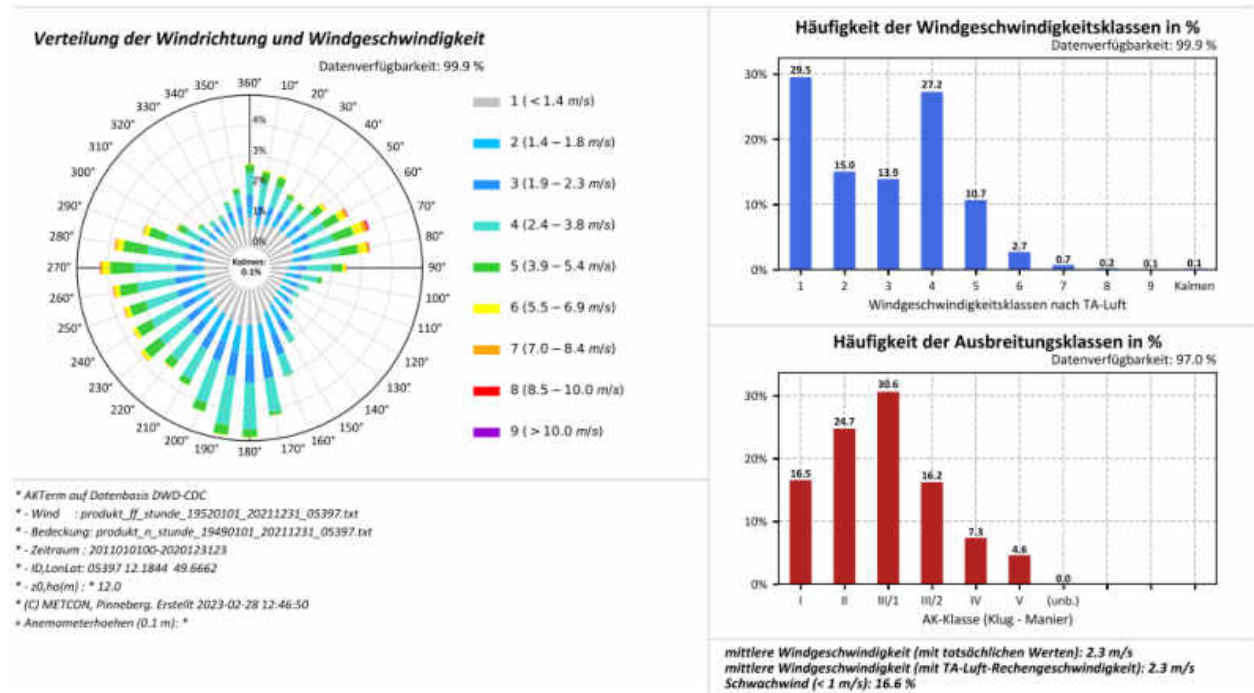


Abbildung A.126: Datenblätter der Messung (oben) und SynAKTerm 3.0 (unten) an der DWD-Station Walldürn (2011-2020).



Für den Vergleich gemessener und synthetischer Daten sind die Hinweise im Abschnitt 5.1 zu beachten.

Abbildung A. 127: Datenblätter der Messung (oben) und SynAKTerm 3.0 (unten) an der DWD-Station Wasserkuppe (2011-2020).



Für den Vergleich gemessener und synthetischer Daten sind die Hinweise im Abschnitt 5.1 zu beachten.

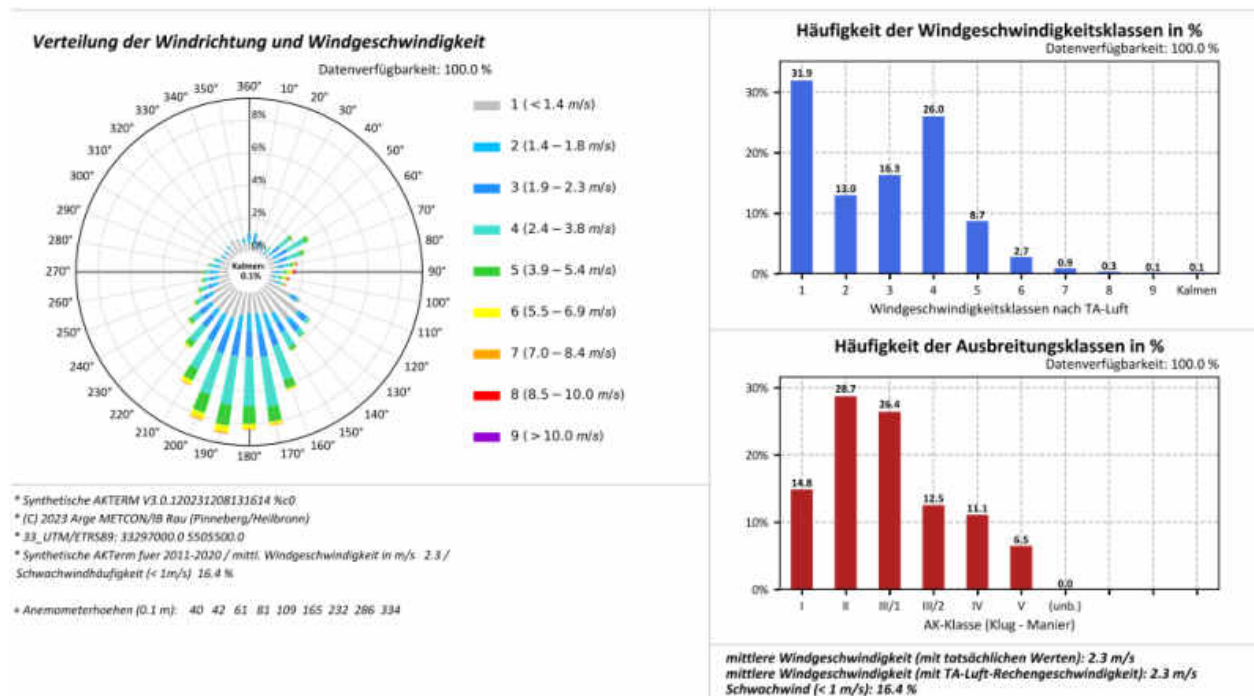
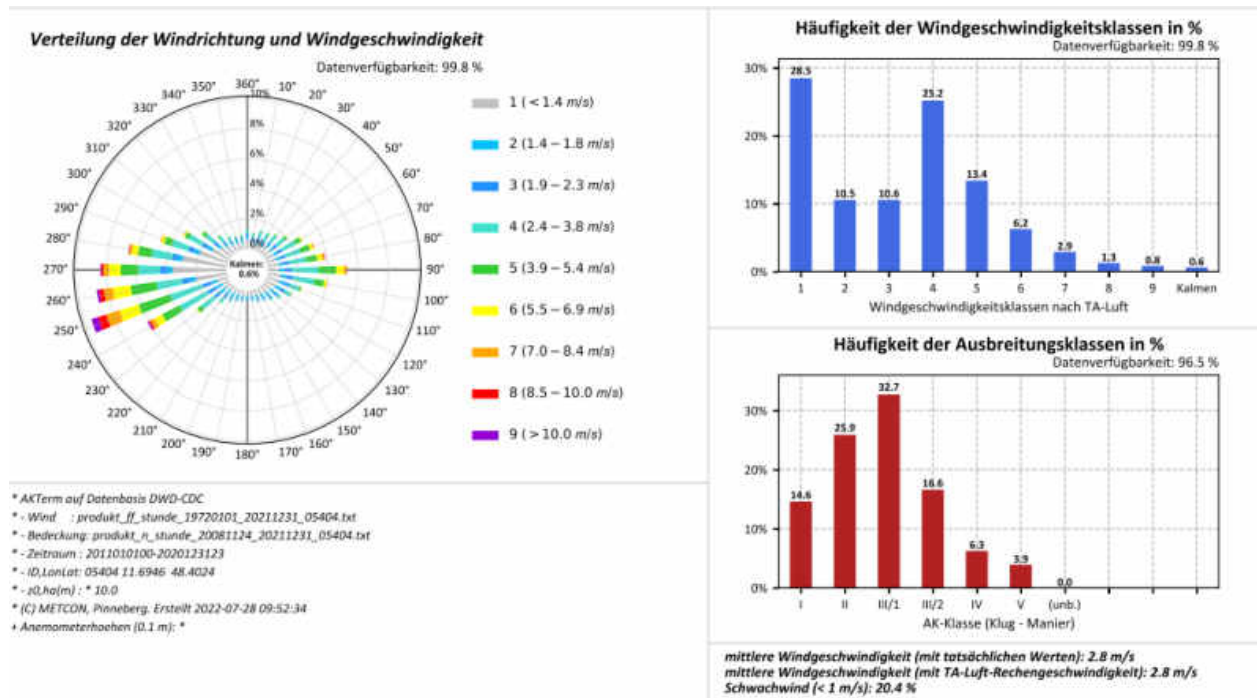


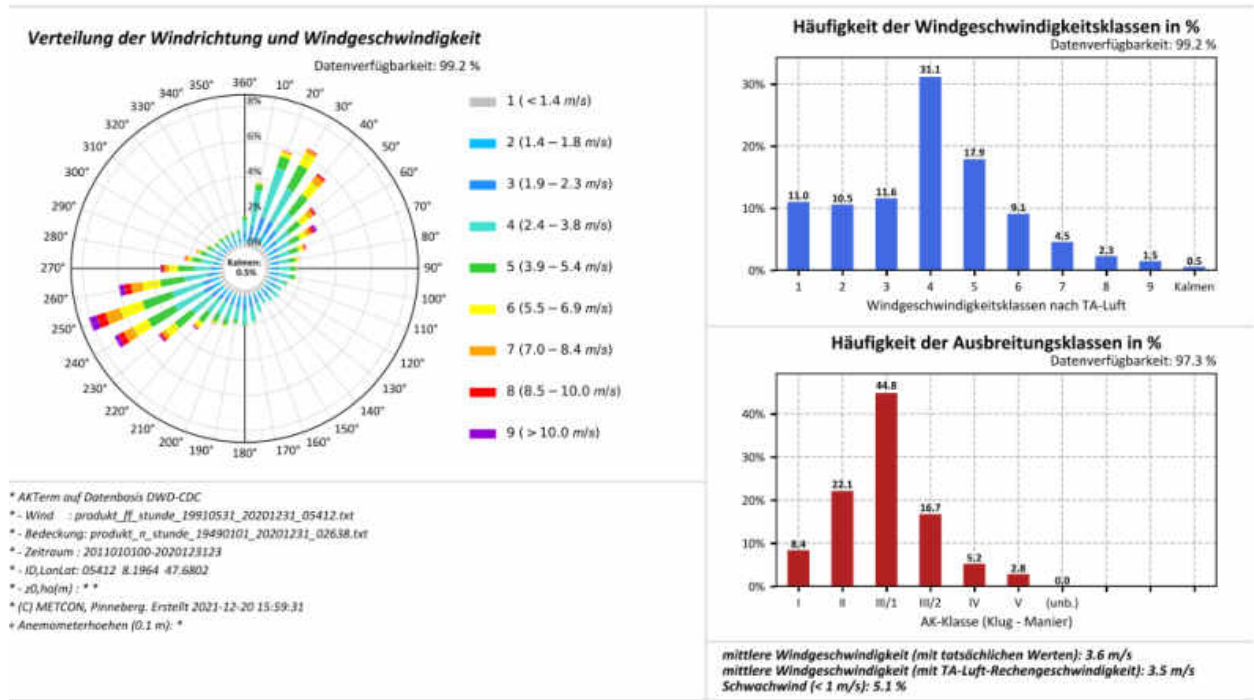
Abbildung A. 128: Datenblätter der Messung (oben) und SynAKTerm 3.0 (unten) an der DWD-Station Weiden (2011-2020).



Für den Vergleich gemessener und synthetischer Daten sind die Hinweise im Abschnitt 5.1 zu beachten.

Abbildung A. 129: Datenblätter der Messung (oben) und SynAKTerm 3.0 (unten) an der DWD-Station Weihenstephan-Dürnast (2011-2020).





Für den Vergleich gemessener und synthetischer Daten sind die Hinweise im Abschnitt 5.1 zu beachten.

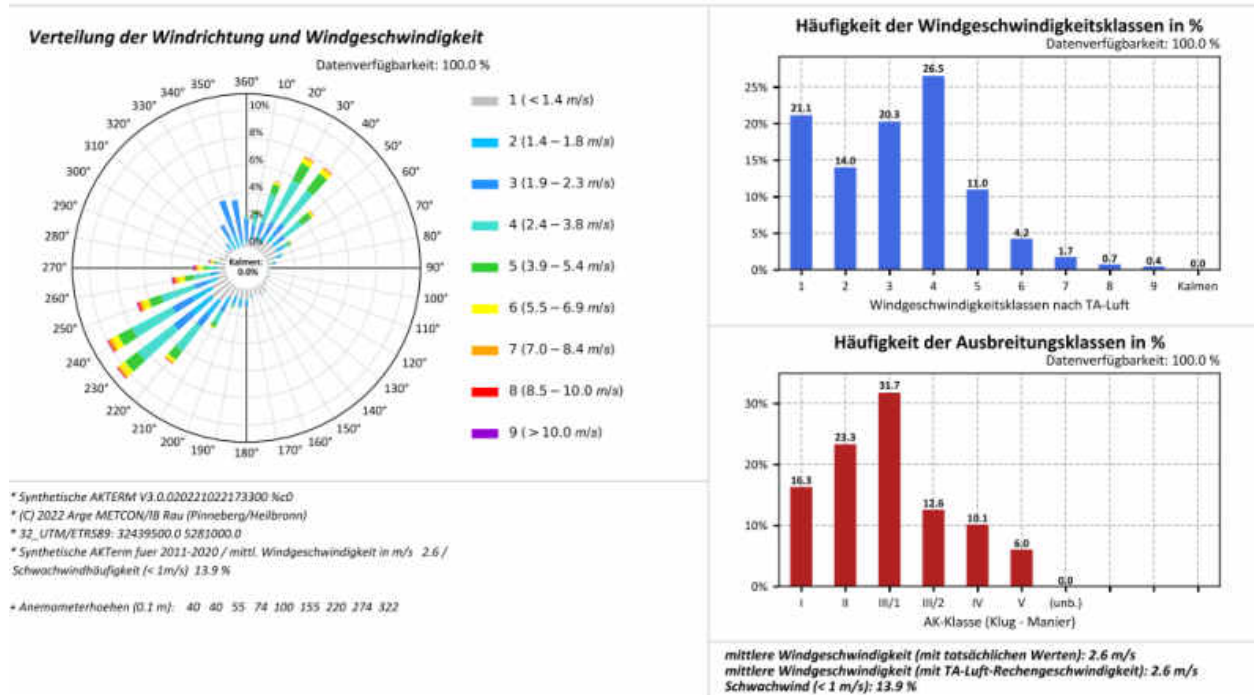
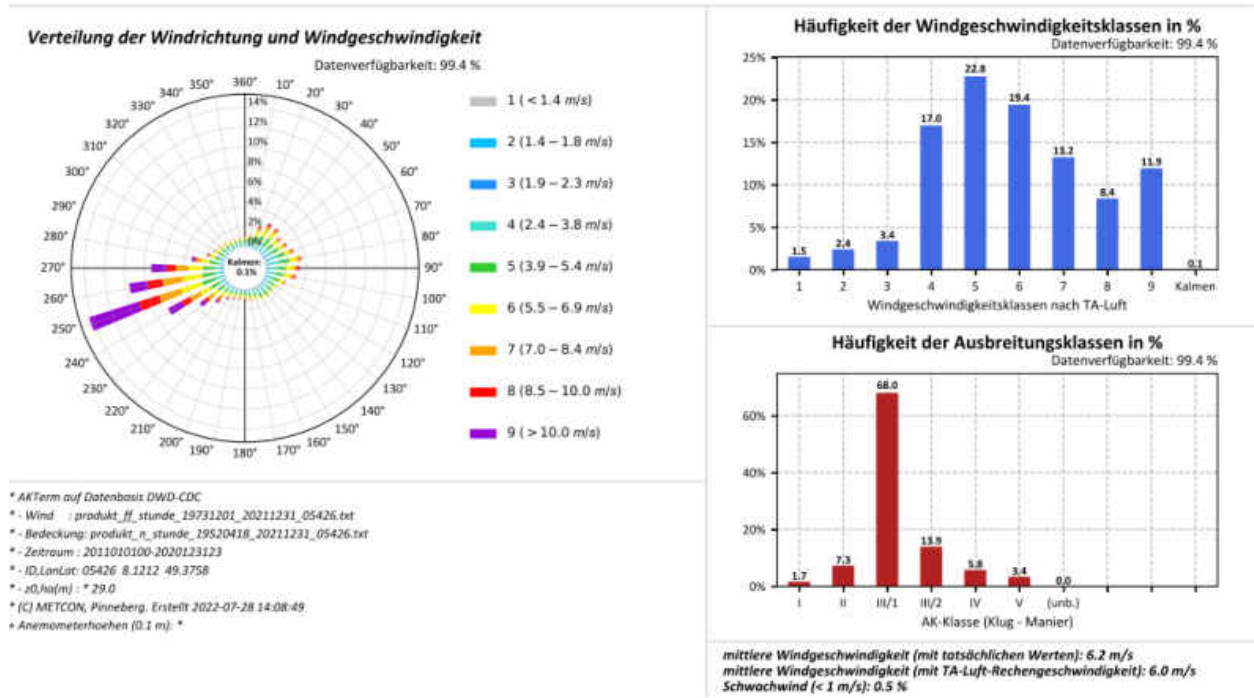


Abbildung A.130: Datenblätter der Messung (oben) und SynAKTerm 3.0 (unten) an der DWD-Station Weilheim-Bierbronnen (2011-2020).



Für den Vergleich gemessener und synthetischer Daten sind die Hinweise im Abschnitt 5.1 zu beachten.

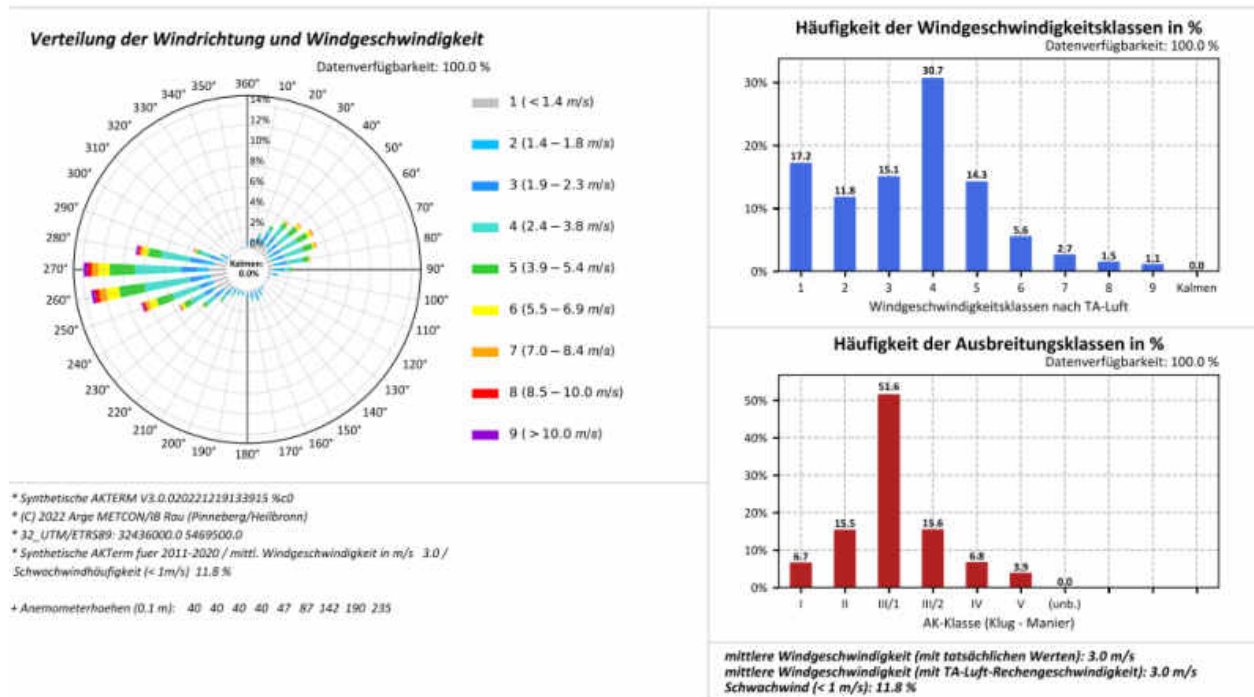
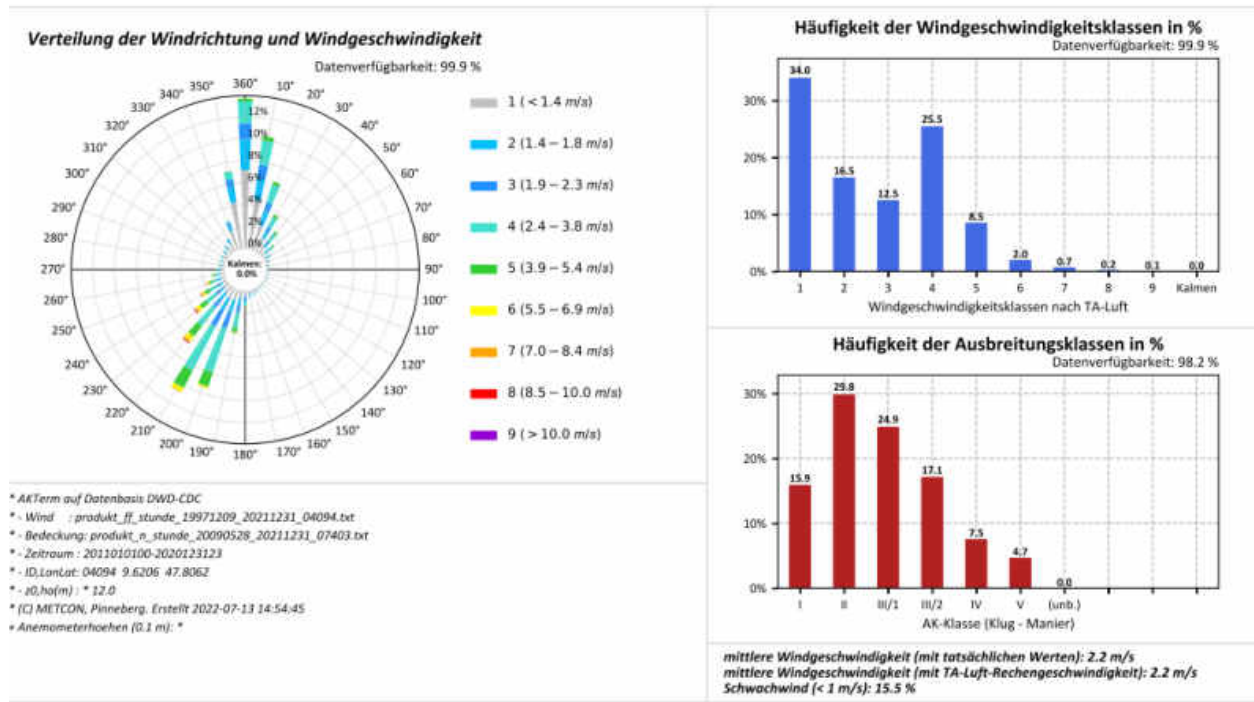
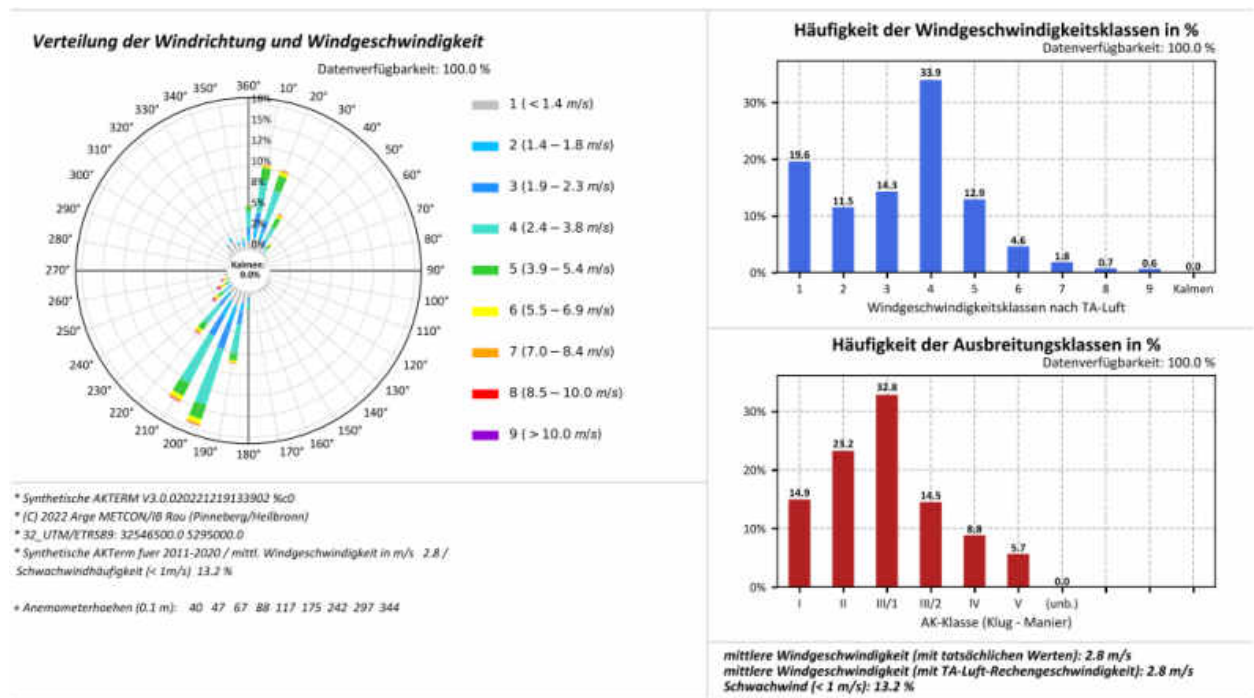
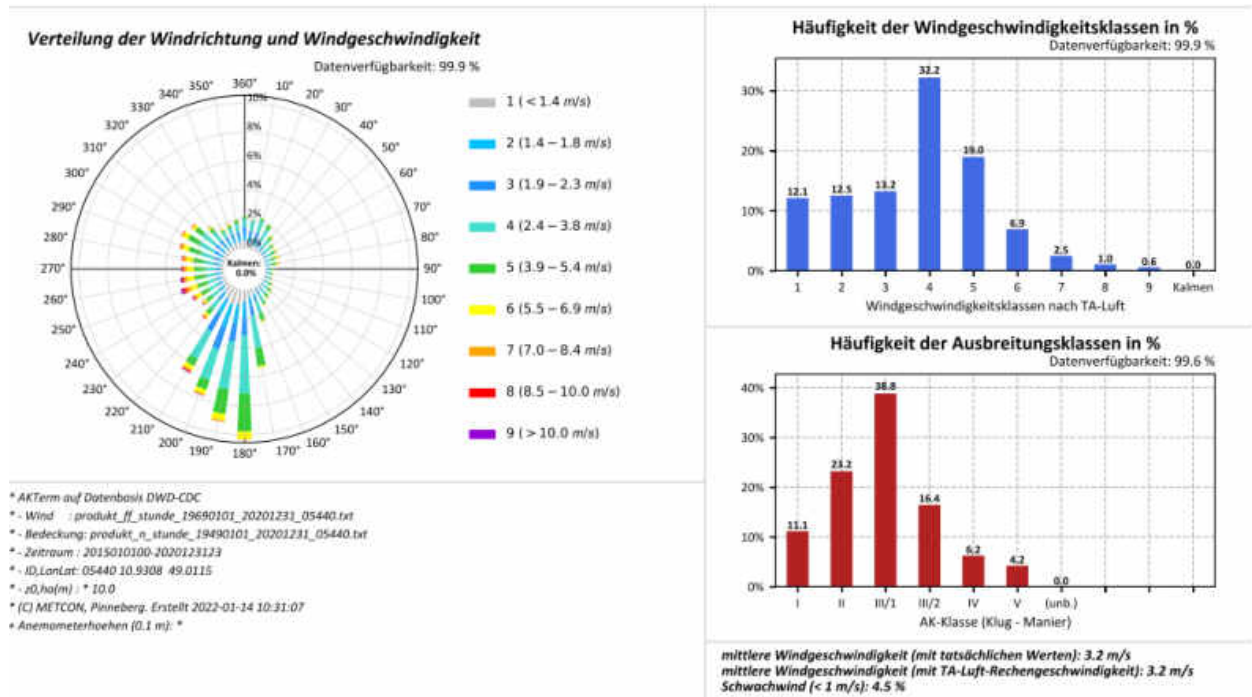


Abbildung A.131: Datenblätter der Messung (oben) und SynAKTerm 3.0 (unten) an der DWD-Station Weinbiet (2011-2020).



Für den Vergleich gemessener und synthetischer Daten sind die Hinweise im Abschnitt 5.1 zu beachten.





Für den Vergleich gemessener und synthetischer Daten sind die Hinweise im Abschnitt 5.1 zu beachten.

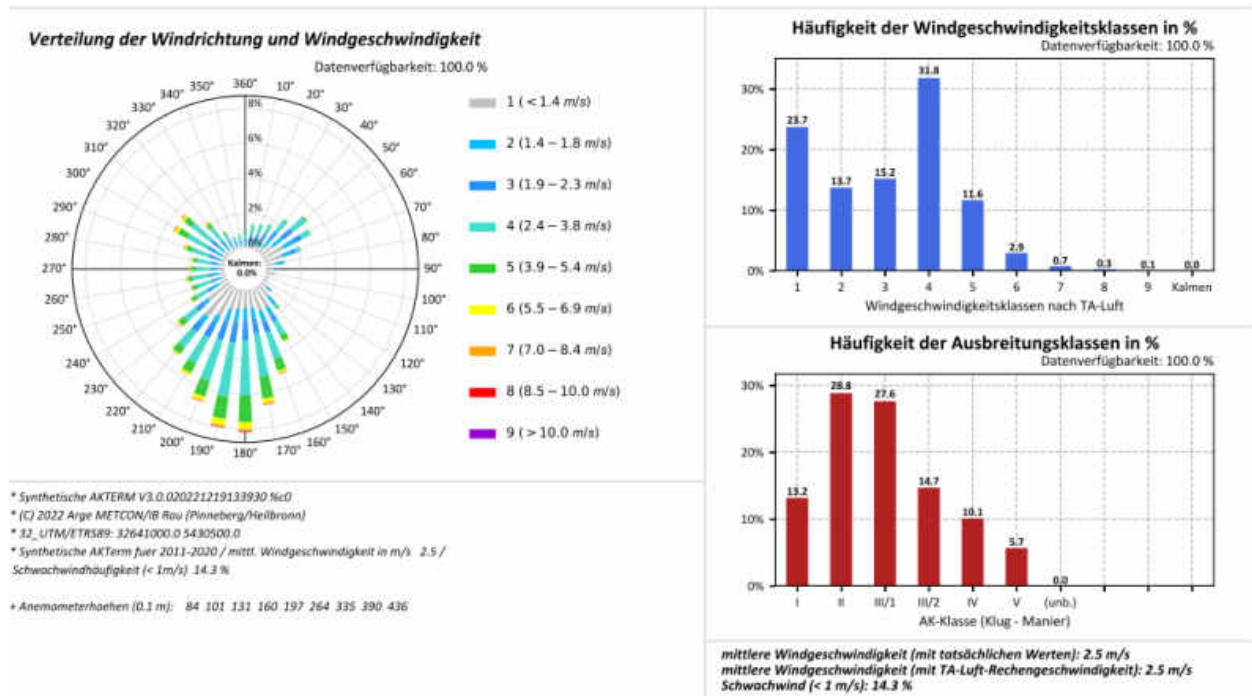
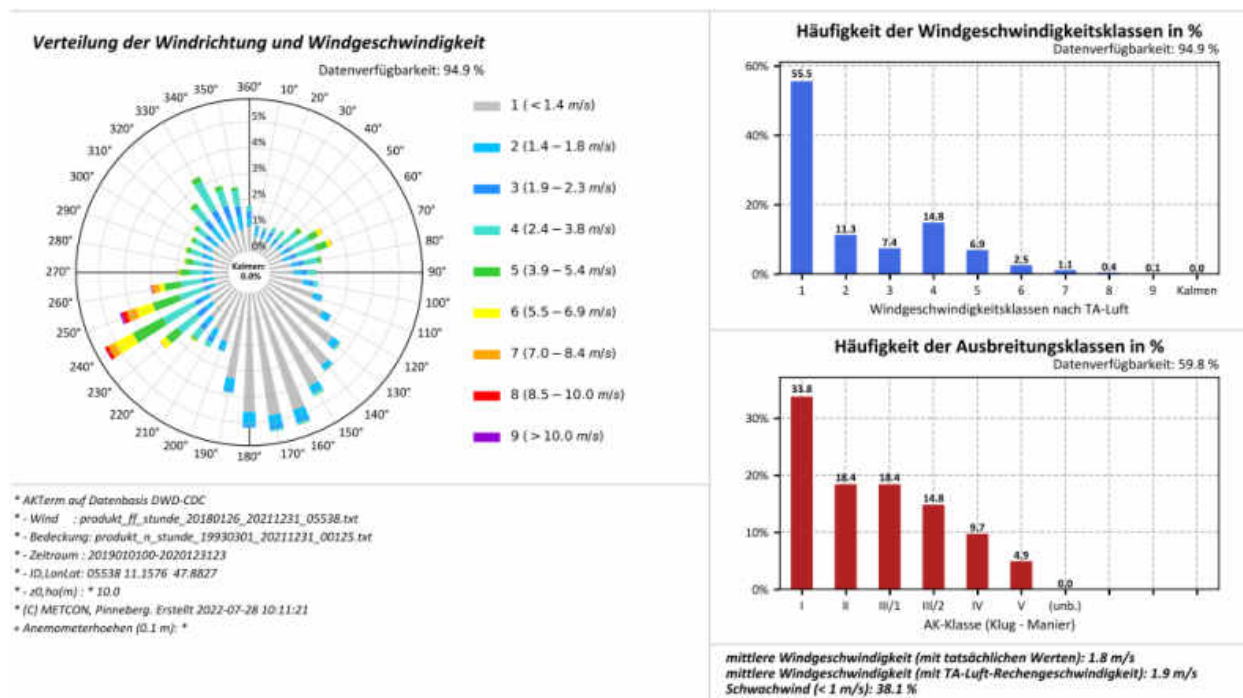


Abbildung A.133: Datenblätter der Messung (oben) und SynAKTerm 3.0 (unten) an der DWD-Station Weißenburg-Emetzheim (2015/2011-2020).



Für den Vergleich gemessener und synthetischer Daten sind die Hinweise im Abschnitt 5.1 zu beachten.

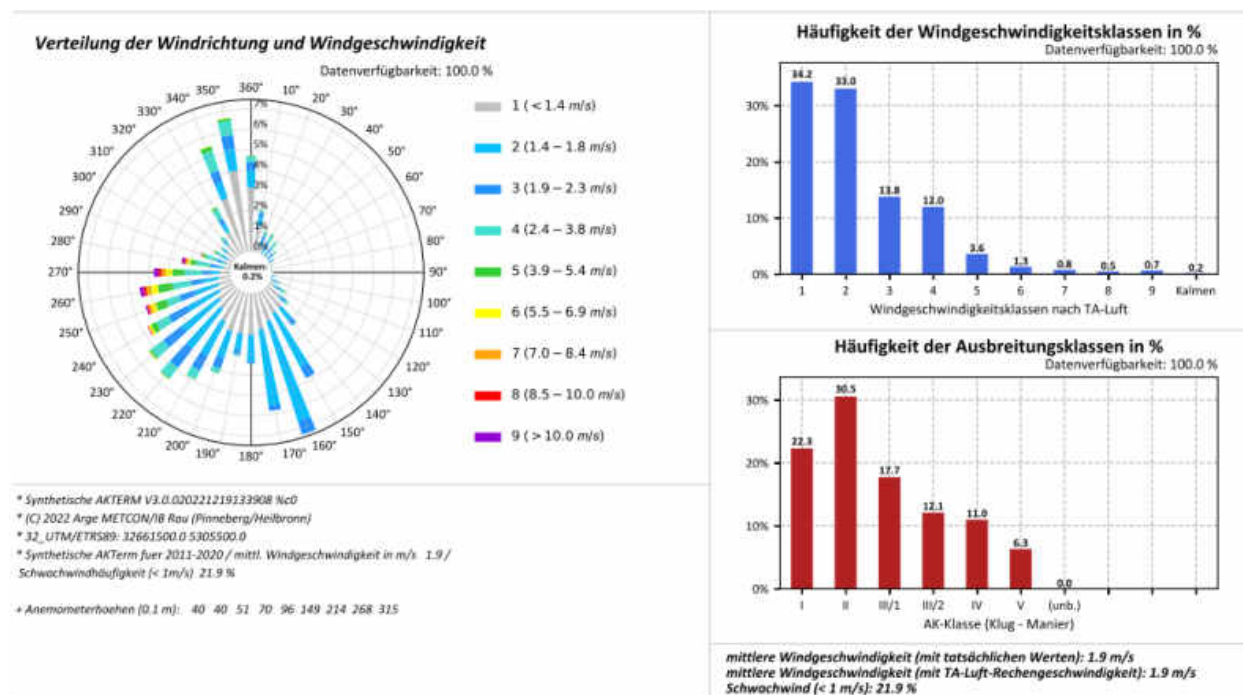
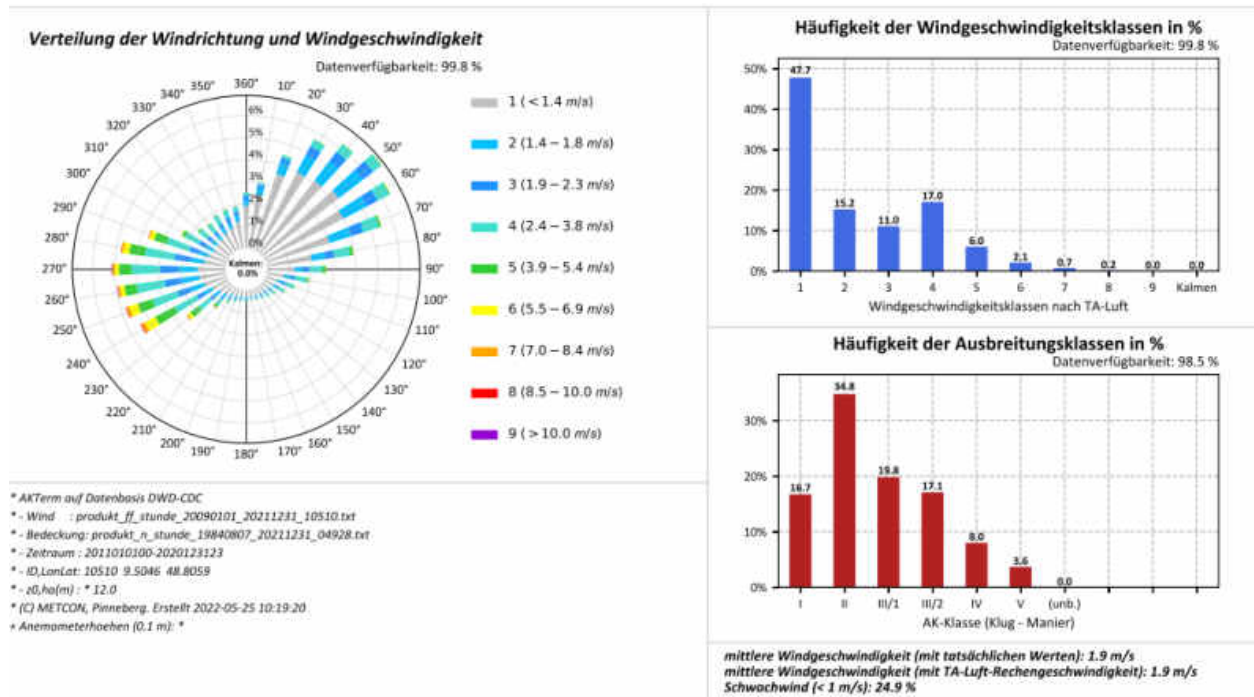


Abbildung A.134: Datenblätter der Messung (oben) und SynAKTerm 3.0 (unten) an der DWD-Station Wielenbach (Demollstraße) (2019/2011-2020).



Für den Vergleich gemessener und synthetischer Daten sind die Hinweise im Abschnitt 5.1 zu beachten.

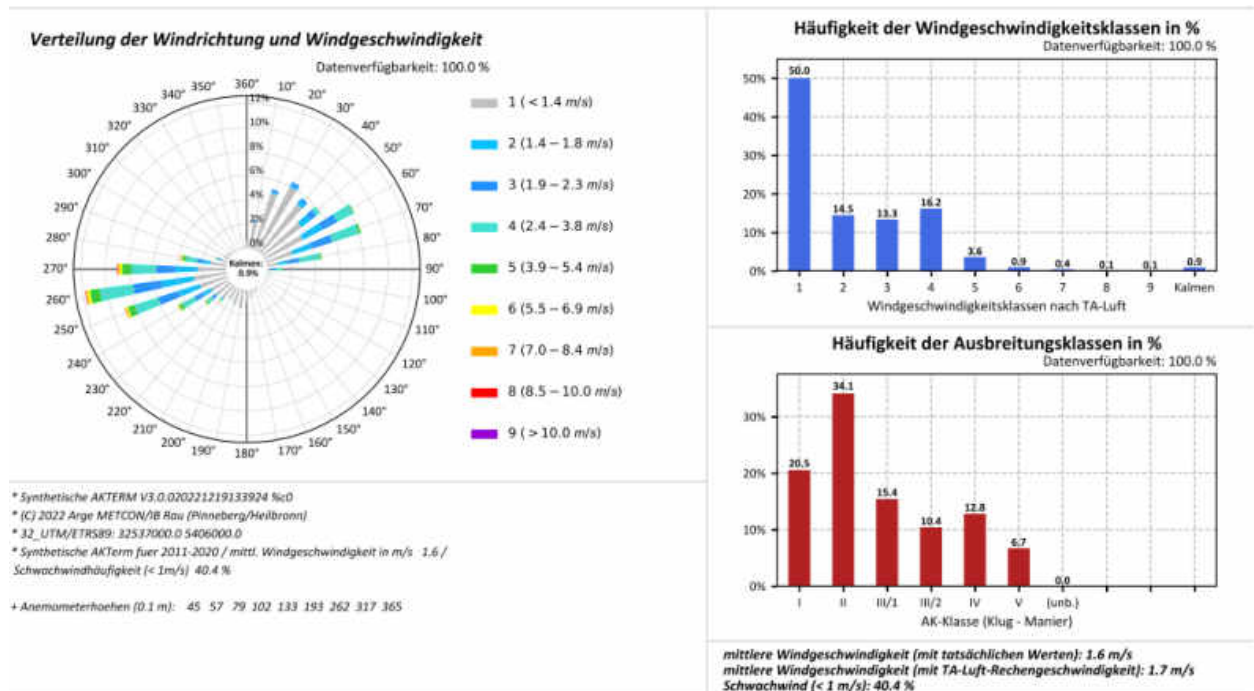
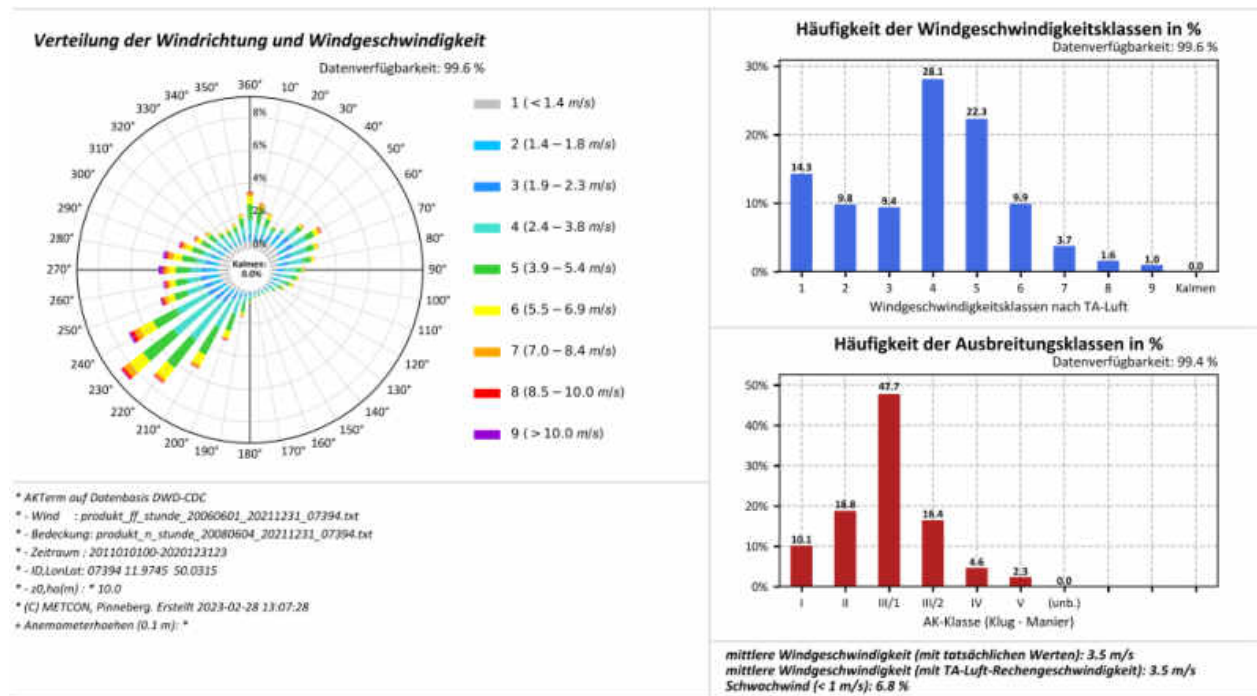
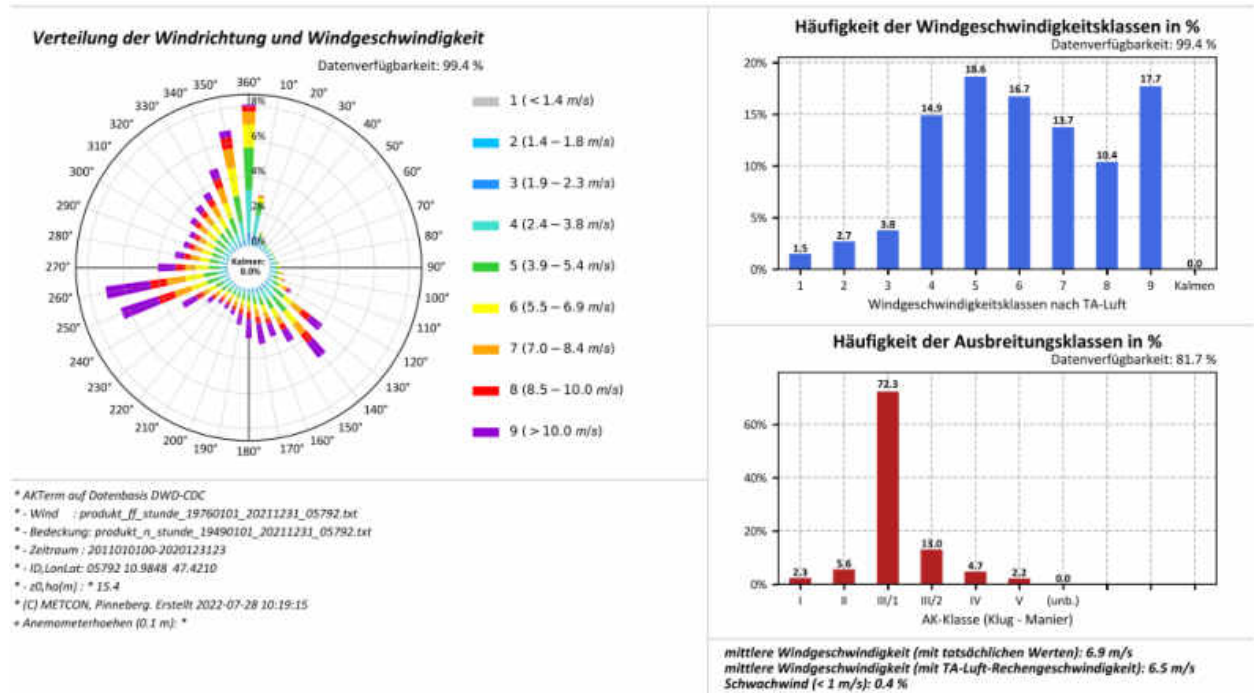


Abbildung A.135: Datenblätter der Messung (oben) und SynAKTerm 3.0 (unten) an der DWD-Station Winterbach-Remstal (2011-2020).



Für den Vergleich gemessener und synthetischer Daten sind die Hinweise im Abschnitt 5.1 zu beachten.

Abbildung A.136: Datenblätter der Messung (oben) und SynAKTerm 3.0 (unten) an der DWD-Station Wunsiedel-Schönbronn (2011-2020).

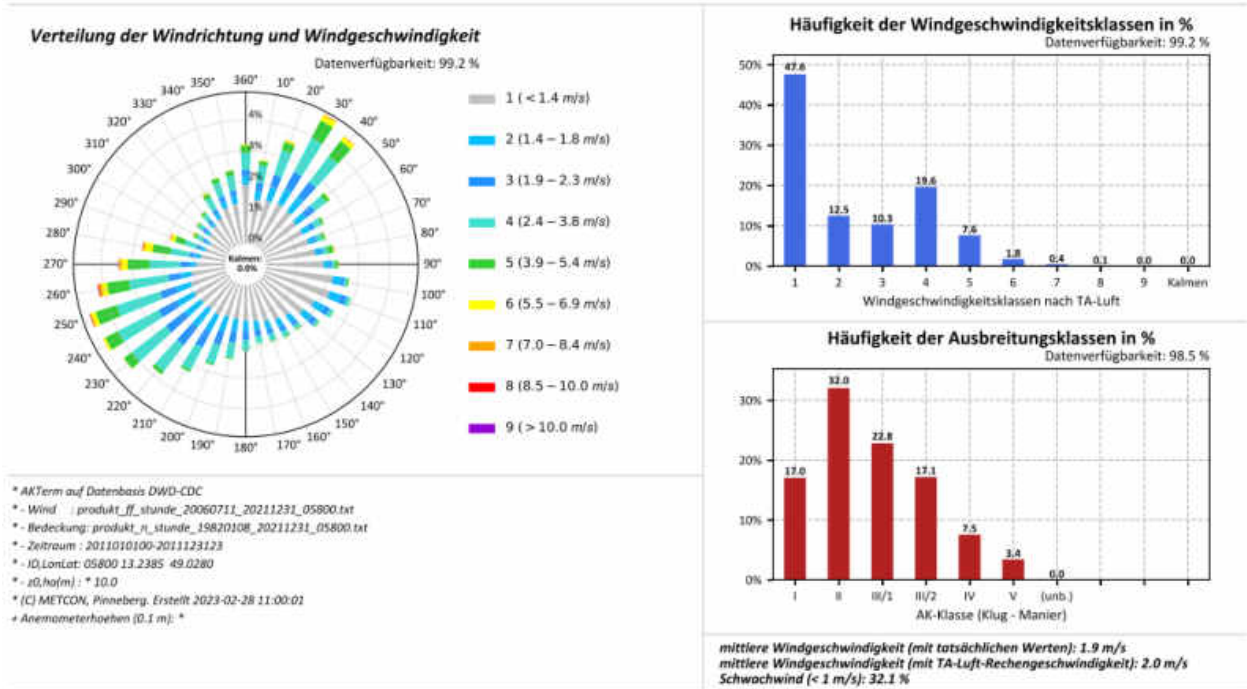


Für den Vergleich gemessener und synthetischer Daten sind die Hinweise im Abschnitt 5.1 zu beachten.

Diese Station wird im Abschnitt 5.3 diskutiert.

Abbildung A.137: Datenblätter der Messung (oben) und SynAKTerm 3.0 (unten) an der DWD-Station Zugspitze (2011-2020).





Für den Vergleich gemessener und synthetischer Daten sind die Hinweise im Abschnitt 5.1 zu beachten.

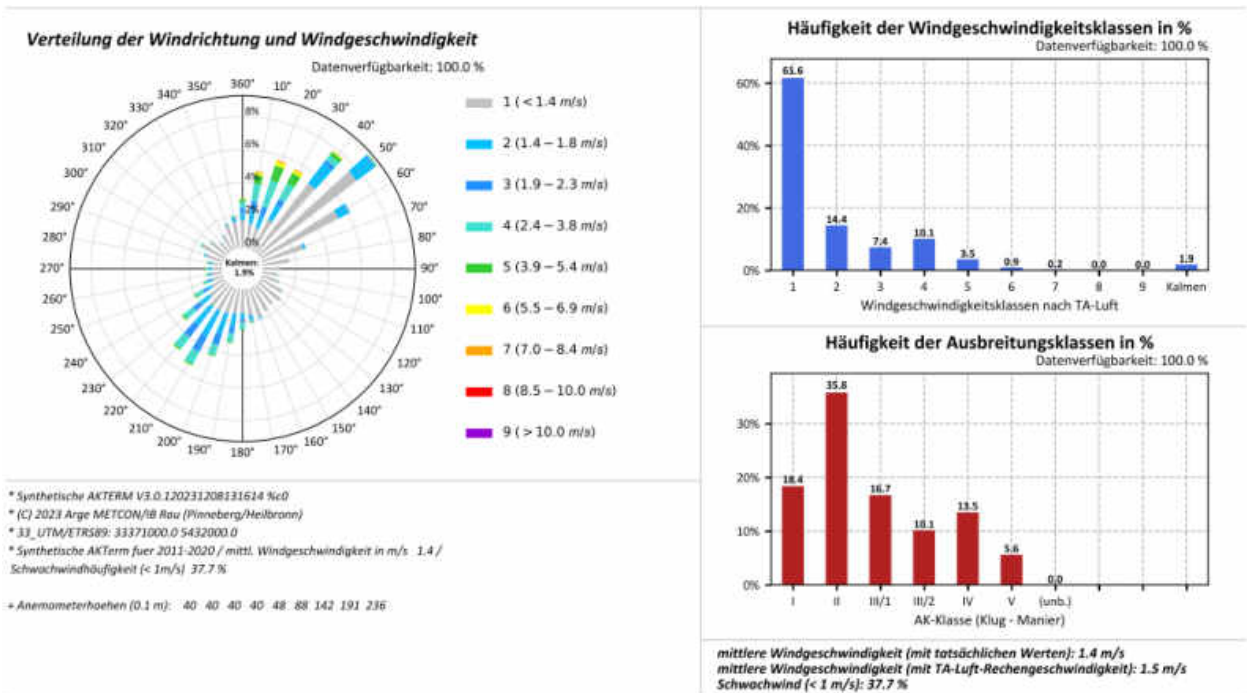


Abbildung A.138: Datenblätter der Messung (oben) und SynAKTerm 3.0 (unten) an der DWD-Station Zwiesel (2011-2020).