

Erstellung von Windrosen im Rahmen von KLAPS



Erstellung von Windrosen im polnisch-sächsischen Grenzraum im Rahmen des Projekts KLAPS

Michaela Surke, Majana Heidenreich, Valeri Goldberg

Inhalt

| | | |
|---|--|----|
| 1 | Veranlassung und Zielstellung | 7 |
| 2 | Aufgabenstellung | 7 |
| 3 | Klimatische Charakterisierung des KLAPS-Zielgebietes..... | 8 |
| 4 | Datengrundlage | 10 |
| 5 | Methodik | 12 |
| 6 | Ergebnisse | 13 |
| 7 | Zusammenfassung | 25 |
| 8 | Abstract..... | 28 |
| 9 | Literaturstudie zu bisher durchgeführten Studien in Mitteleuropa | 29 |

Abbildungsverzeichnis

| | | |
|---------------|--|----|
| Abbildung 1: | Zielgebiet für die Erstellung der Windrosen im Rahmen des Projekts KLAPS (Quelle: GoogleEarth) | 9 |
| Abbildung 2: | Räumliche Datenabdeckung des CLM-Datensatzes für die Erstellung der Windrosen im Rahmen des Projekts KLAPS | 12 |
| Abbildung 3: | Aus Radiosondenaufstiegen ermittelte mittlere Windrosen für das KLAPS-Zielgebiet für die Jahre 2000, 2005 und 2010 für den Druckbereich zwischen 950 hPa und 850 hPa | 14 |
| Abbildung 4: | Aus der Klimasimulation mit CLM (C20) ermittelte mittlere Windrosen für das KLAPS-Zielgebiet für die Jahre 2000, 2005 und 2010 für den Druckbereich zwischen 925 hPa und 850 hPa | 15 |
| Abbildung 5: | Aus der Klimasimulation mit CLM (C20) ermittelte mittlere Windrosen für das KLAPS-Zielgebiet für die Dekade 1971-1980 für den Druckbereich zwischen 925 hPa und 850 hPa | 16 |
| Abbildung 6: | Aus der Klimasimulation mit CLM (C20) ermittelte mittlere Windrosen für das KLAPS-Zielgebiet für die Dekaden 1981-1990 und 1991-2000 für den Druckbereich zwischen 925 hPa und 850 hPa | 17 |
| Abbildung 7: | Aus der Klimasimulation mit CLM (A1B) ermittelte mittlere Windrosen für das KLAPS-Zielgebiet für die Dekaden 2001-2010, 2011-2020 und 2021-2030 für den Druckbereich zwischen 925 hPa und 850 hPa | 18 |
| Abbildung 8: | Aus der Klimasimulation mit CLM (A1B) ermittelte mittlere Windrosen für das KLAPS-Zielgebiet für die Dekaden 2031-2040, 2041-2050 und 2051-2060 für den Druckbereich zwischen 925 hPa und 850 hPa | 19 |
| Abbildung 9: | Aus der Klimasimulation mit CLM (A1B) ermittelte mittlere Windrosen für das KLAPS-Zielgebiet für die Dekaden 2061-2070, 2071-2080 und 2081-2090 für den Druckbereich zwischen 925 hPa und 850 hPa | 20 |
| Abbildung 10: | Aus der Klimasimulation mit CLM (A1B) ermittelte mittlere Windrosen für das KLAPS-Zielgebiet für die Dekade 2091-2100 für den Druckbereich zwischen 925 hPa und 850 hPa | 21 |
| Abbildung 11: | Aus der Klimasimulation mit CLM (A1B) ermittelte mittlere Windrosen für das KLAPS-Zielgebiet für die Zeitscheiben 2021-2050 und 2071-2100 für den Druckbereich zwischen 925 hPa und 850 hPa | 22 |
| Abbildung 12: | Aus der Klimasimulation mit CLM ermittelte mittlere Windrosen für das KLAPS-Zielgebiet für die Zeitscheiben 1971-2000 (C20) und 1971-2100 (C20 u. A1B) für den Druckbereich zwischen 925 hPa und 850 hPa | 23 |
| Abbildung 13: | Aus der Klimasimulation mit CLM ermittelte mittlere Windrosen für das KLAPS-Zielgebiet für die Zeitscheibe 2001-2100 (A1B) für den Druckbereich zwischen 925 hPa und 850 hPa | 24 |
| Abbildung 14: | Aus u- und v-Komponente berechnete Windgeschwindigkeit (m/s) für ein 3-Stundenmittel im CLM_C20_1-Datensatz für das Drucklevel 850 hPa | 27 |
| Abbildung 15: | Projizierte Änderungen der Windgeschwindigkeit für die Modelle REMO und CLM aus einer Studie des CSC Hamburg für KLIFF und KLIMZUG-Nord | 30 |
| Abbildung 16: | Änderungssignal für die mittlere Windgeschwindigkeit in 10 m ü. NN für Europa32 | 31 |

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Höchste Erhebungen im Zielgebiet.....8

Abkürzungsverzeichnis

| | |
|--------------|--|
| % | Prozent |
| ‰ | Promille |
| A1B | IPCC-Szenario A1 (<u>b</u> alanced) ausgewogene Nutzung fossiler und nichtfossiler Energiequellen |
| C20 | Kontrollperiode 1971-2000 (20. Jahrhundert) |
| CERA | Climate and Environmental Retrieval and Archive |
| CDO | Climate Data Operator |
| CLM | Regionales Klimamodell (Climate Limited Area Model) |
| DKRZ | Deutsches Klimarechenzentrum |
| CSC | Climate Service Center Hamburg |
| h | Stunde |
| hPa | Hektopascal |
| IPCC | Intergovernmental Panel on Climate Change |
| KLIFF | Forschungsverbund zur Klimafolgenforschung in Niedersachsen |
| KLIMZUG-NORD | Forschungsprojekt zum Klimawandel in der Metropolregion Hamburg |
| km | Kilometer |
| m/s | Meter pro Sekunde |
| m ü. NN | Meter über Normalnull |
| NetCDF | Network Common Data Format |
| REGKLAM | Regionales Klimaanpassungsprogramm Modellregion Dresden |
| REMO | Regionales Klimamodell (Regionalmodell für Klimamodellierung und Wettervorhersage) |
| u | u (Ost-West)-Komponente der Windgeschwindigkeit |
| v | v (Nord-Süd)-Komponente der Windgeschwindigkeit |
| WETTREG | Regionales Klimamodell (WETT ^{er} lagenbasierte REG ^{ionalisierungs} methode) |
| WiRi | Windrichtung |
| WiTraK | Windfeld-Transport- und Klimatologiesystem |
| WiV | Windgeschwindigkeit |

1 Veranlassung und Zielstellung

Im Rahmen des im Zeitraum von August 2012 bis Juni 2014 geförderten Projektes der grenzübergreifenden Zusammenarbeit Sachsen-Polen: „KLAPS – Klimawandel, Luftverschmutzung und Belastung von Ökosystemen im polnisch-sächsischen Grenzraum“ werden unter Leitung des Sächsischen Landesamtes für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie in Dresden (Lead Partner) und dem IMGW (Instytut Meteorologii i Gospodarki Wodnej) und der Universität Breslau) die Auswirkungen des rezenten und projizierten Klimawandels sowie der Einfluss von Luftschadstoffen auf die vorhandenen Ökosysteme untersucht. Für den gemeinsamen Grenzraum Deutschland-Polen fehlt bisher sowohl eine länderübergreifende und koordinierte Klimadiagnose und -projektion, als auch eine Analyse der Luftschadstoffe in Kombination mit sich ändernden Windverhältnissen.

Das wesentliche Ziel des Projektes besteht darin, die zu erwartenden Auswirkungen des Klimawandels auf die Bevölkerung und den Tourismus sowie die Ausbreitung und Konzentrationsverteilung von Luftschadstoffen als Risikopotential für vorhandene Ökosysteme im Grenzgebiet mit einem gemeinsamen methodischen Ansatz für die gesamte Projektregion vorherzusagen. Dafür werden Klima- und Luftschadstoffdiagnosen für die Gegenwart und Simulationen für die Zukunft im polnisch-sächsischen Grenzraum durchgeführt.

2 Aufgabenstellung

Für die Projektion von Transport und Deposition der Luftschadstoffe im gemeinsamen Grenzraum muss die Veränderung der Windverhältnisse (Windrichtung, Windstärke) untersucht werden. Dazu werden Windrosenprojektionen (Häufigkeitsverteilungen von Windrichtung- und Geschwindigkeit) für den Zeitraum 1971–2100 in die Luftschadstoffprojektion eingebettet, was in dieser Kombination einen neuartigen Ansatz darstellt.

Gegenstand der Leistung ist die Erstellung von Windrosen im polnisch-sächsischen Grenzraum im Rahmen des Projekts KLAPS. Die Entwicklung von Windrosen für das KLAPS Projektgebiet soll für die freie Atmosphäre unter Verwendung eines dynamischen Klimamodells erfolgen. Seitens des Nutzers der Winddaten für das Ausbreitungsmodell FRAME¹ werden Windstatistiken aus dem Höhengiveau zwischen 950 hPa und 850 hPa Druckfläche verlangt. Nicht von allen dynamischen Klimamodellen liegen Daten für diese, aus den Radiosondendaten abgeleiteten, Druckflächen vor. Vom Anbieter wird die Verwendung des Outputs eines regionalen dynamischen Klimamodells empfohlen. Diese Modelle verfügen über die gleichen modellphysikalischen Voraussetzungen wie die Globalmodelle, berücksichtigen jedoch aufgrund ihrer feineren Auflösung (7-20 km) besser den Einfluss der Orographie im Zielgebiet (Rechteck 13,7 E/50,67 N - 17,31 E/52,28 N). So haben die dort vorhandenen Mittelgebirge (Erzgebirge, Zittauer Gebirge, Isergebirge, Riesengebirge und Altwatergebirge) mit Maximalhöhen bis 1600 m bereits einen deutlichen Einfluss auf die Strömungsverhältnisse im Zielgebiet. Es sind

- mittlere jährliche Häufigkeitsverteilungen der Windrosen sowie
- Windrosen der mittleren jährlichen Windgeschwindigkeit

¹ Das Ausbreitungsmodell FRAME (Fine Resolution Atmospheric Multi-pollutant Exchange) wurde durch das Centre for Ecology and Hydrology, Edinburgh Research Station, UK entwickelt. (<http://pollutantdeposition.defra.gov.uk/frame>)

für folgende Zeiträume zwischen 1971-2100 zu erstellen:

- für die Referenzjahre 2000, 2005, 2010
- Dekaden von 1971-2100
- 30-jährige Zeiträume 2021-2050, 2071-2100
- Mittel über gesamten Zeitraum 1971-2100, 2001-2100

Die Windrosenverteilung ist in 24 Klassen nach folgendem Schema darzustellen:

| from [deg] | to [deg] | freq [-] | windspeed [m/s] |
|------------|----------|------------|-----------------|
| 0 | 14 | 0.024 | 4.9 |
| 15 | 29 | 0.018 | 5.2 |
| ... | | | |
| 345 | 359 | 0.030 | 5.6 |

Für die Validierung der Ergebnisse sind mittlere Windrosen basierend auf Radiosondenmessungen der Stationen Lindenberg (Deutschland), Wroclaw (Polen) sowie Prag (Tschechien) mit den Ergebnissen des dynamischen Klimamodells im Beobachtungszeitraum zu vergleichen. Zusätzlich soll eine fachliche Einordnung der Ergebnisse gegenüber bereits durchgeführten Studien in Mitteleuropa erfolgen.

Die Windrosen sind so zu erstellen und aufzubereiten, dass sie zur direkten weiteren Analyse und Einbettung im Ausbreitungsmodell FRAME durch den polnischen Projektpartner verwendet werden können. Die Windrosen sind dem Auftraggeber in einem geeigneten Format zu übergeben.

3 Klimatische Charakterisierung des KLAPS-Zielgebietes

Das Untersuchungsgebiet betrifft eine Fläche von ca. 250 km x 180 km Ausdehnung im Südwesten Polens und Osten Sachsens (Abbildung 1). Die Orographie ist neben Flachland stark durch verschiedene Mittelgebirge geprägt (Erzgebirge, Zittauer Gebirge, Isergebirge, Riesengebirge und Altvatergebirge), deren höchste Erhebungen 1600 m erreichen (Tabelle 1).

Tabelle 1: Höchste Erhebungen im Zielgebiet

| Gebirge | Höchste Erhebung | Höhe (m ü. NN) |
|------------------|------------------|----------------|
| Osterzgebirge | Kahleberg | 905 |
| Zittauer Gebirge | Lausche | 793 |
| Isergebirge | Hinterberg | 1127 |
| Riesengebirge | Schneekoppe | 1602 |
| Altvatergebirge | Altvater | 1491 |

Diese Erhebungen haben bereits einen deutlichen Einfluss auf die Strömungsverhältnisse in den Druckflächen 950 hPa (ca. 550 m ü. NN) und 850 hPa (ca. 1500 m ü. NN), für deren Bereich die Windrosen erstellt werden sollen. Im Riesengebirge erreichen 25 Gipfel Höhen über 1000 m ü. NN, im Altvatergebirge 56 Gipfel und im

Isergebirge sieben Gipfel. Die Mittelgebirge wirken als Barriere und führen je nach Anströmrichtung zu unterschiedlichen Stau- und Abschirmungseffekten.

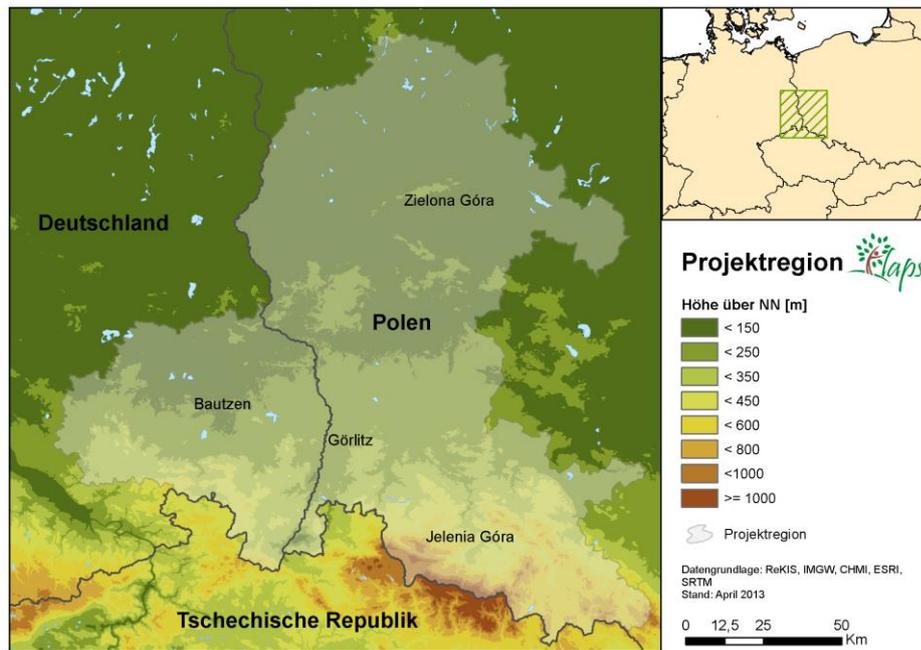


Abbildung 1: Zielgebiet für die Erstellung der Windrosen im Rahmen des Projekts KLAPS

Die Regionen Ostsachsen und Niederschlesien, die hauptsächlich das Zielgebiet im Projekt KLAPS ausmachen, werden makroklimatisch in das Übergangsklima zwischen maritimen westeuropäischen und kontinentalen osteuropäischen Klima eingeordnet. Charakteristisch ist ein steter Wechsel von maritim und kontinental geprägten Witterungsabschnitten. Verbunden mit der Zufuhr der damit verbundenen Luftmassen wird die für Mitteleuropa typische Vielfalt der meteorologischen Erscheinungen hervorgerufen. Dominierend ist jedoch der maritime Einfluss. Die in den Regionen vorherrschende Windrichtung ist West bis Südwest, es treten jedoch auch häufig Südwest-Winde auf. In Ostsachsen beträgt die Niederschlagssumme zwischen 700 und 850 mm, in Gebirgslagen bis 1000 mm. Die mittlere Temperatur im Sommer beträgt 14 – 18°C, im Winter um 0°C. In Niederschlesien regnet es vor allem im Frühjahr und Herbst, in der Sudetenregion zwischen 800 – 1400 mm. Die Sommer sind allgemein warm bis heiß mit Mitteltemperaturen zwischen 16 °C und 21 °C und die Winter kalt, mit Mitteltemperaturen um -5°C (Wroclaw).²

Das Klima der einzelnen Mittelgebirgsregionen, die alle zum Sudetenbogen gehören, zeichnet sich durch kühle Sommer (Julimittel im Riesengebirge 12-14°C) und für die Höhenlage relativ niedrige Jahresniederschlagsmengen (Maxima Juni-September) bis zu 1.160 mm (Schneekoppe) aus. Die Mittelgebirge sind waldreich (über 650 m ü. NN dominieren Fichten), oberhalb der Waldgrenze (bei 1.200 m ü. NN) liegen almwirtschaftlich genutzte Matten.³ Das *Isergebirge* zeichnet sich durch ein sehr raues Klima aus. Die Temperatur ist oft sehr von der Art und Zusammensetzung des Geländes abhängig, im Isergebirge befinden sich deshalb viele sog. Kältepole, in denen wegen einer Beschränkung der Luftzirkulation eine stabilere niedrige Temperatur herrscht als in der Umgebung. Typisch für das Gebirge ist die Temperaturinversion in den Wintermonaten mit einer

² Sachsen im Klimawandel. Eine Analyse. SMUL 2008; Polska, Offizielles Förderportal der Republik Polen. Praktische Infos: Klima (<http://de.poland.gov.pl/Klima,574.html>)

³ Academic dictionaries and encyclopedias: Sudeten (http://universal_lexikon.deacademic.com/190892/Sudeten)

verringerten Luftzirkulation. Die vorherrschende Windrichtung im Isergebirge ist Nordwest.⁴ Das Klima im *Riesengebirge* ist in den Lagen ab 1200 m subalpin bis alpin geprägt zeichnet sich durch häufige Wetterumschwünge aus. Die Kammlagen gehören zu den windexponiertesten Gegenden Europas. Vorherrschende Windrichtung ist West, weniger häufig treten Winde aus Süd und Südost auf, die trockene und warme Luftmassen transportieren. Auf der polnischen Seite ist der Föhn eine häufige Wettererscheinung (hauptsächlich in Frühjahr und Herbst), der bei Zufluss von feuchter Luft aus dem Südwesten auftritt. Wie im Isergebirge kommt es im Winter häufig zu Temperaturinversionen.⁵ Im *Altwatergebirge* ist das Klima ebenfalls sehr rau und vergleichbar mit dem der Alpen auf 2000 m Höhe.⁶ Eine bemerkenswerte Erscheinung stellen die Windmesssysteme dar, die bereits eine wesentliche Rolle bei der Klärung der Entstehung von Gletscherkaren und ihrem Pflanzenreichtum spielten.⁷

Das Klima der *Erzgebirgs*-Kammlagen ist als deutlich rau zu charakterisieren. Die Temperaturen liegen das ganze Jahr über erheblich niedriger als im Tiefland und der Sommer ist merklich kürzer und bietet häufig kühle Tage. Die Jahresmitteltemperaturen erreichen nur Werte von 3 bis 5°C (Zinnwald: 4,5°C). Die Windgeschwindigkeit nimmt im Mittel mit der Höhe zu, wird jedoch vielfach modifiziert durch zur Verstärkung führende Düsenwirkung von Taleinengungen und Überströmung von Kuppen sowie durch Abschwächung in Tälern und Senken. Bei Südanströmung im Winterhalbjahr kommt es am Nordrand des Erzgebirges zu föhnartigen Effekten (hauptsächlich bei Hochdruckeinfluss mit Inversionswetterlagen). Ein weiteres Phänomen ist der „Böhmische Wind“ – ein regionaler Wind im Winterhalbjahr. Er wird durch das Ausströmen von Kaltluft aus dem Böhmischem Becken in das Elbtal und das Neißeetal, verbunden mit dem Überströmen der Kämme des Osterzgebirges und Zittauer Gebirges verursacht. Der „Böhmische Wind“ ist durch hohe Windgeschwindigkeiten in Verbindung mit Böen aus Süd-Südost charakterisiert.⁸ Als Teil des Lausitzer Gebirges weist das *Zittauer Gebirge* ein bereits kontinental geprägtes Klima auf. An den höheren Gipfeln (z.B. Lausche und Hochwald) kommt es bei Nord- und Nordwestlagen zu Stauerscheinungen. Diese haben starke Sommerniederschläge und ausgiebige Schneefälle im Winter zur Folge. Wie bereits angeführt, tritt im Zittauer Gebirge bei entsprechenden atmosphärischen Bedingungen der „Böhmische Wind“ auf.⁹

4 Datengrundlage

Als Datengrundlage für die Erstellung der Windstatistik im KLAPS-Zielgebiet wurde der Datensatz aus dem 1. Lauf der CLM_C20-Simulation¹⁰ sowie der Datensatz aus dem 1. Lauf der CLM_A1B-Simulation, jeweils Datenstrom 3 (Daten auf geographischem Gitter) gewählt.

Die Daten wurden von der CERA-Datenbank des Deutschen Klimarechenzentrums (DKRZ) bezogen. CERA ist ein Akronym für *Climate and Environmental Retrieval and Archive*. In der Datenbank liegen die Winddaten für das regionale Klimamodell CLM für C20 und das IPCC-Szenario A1B in 3-stündiger Auflösung im netCDF-

4 Die Iser-Magistrale für Wanderungen. Teil des Projekts „Neuer Kammweg“, im Rahmen der Gemeinschaftsinitiative INTERREG III A durch die EU kofinanziertes Projekt (<http://www.jizerskamagistrala.cz/de/isergebirge-/die-natur-des-isergebirges/>)

5 Polnischer Nationalpark Riesengebirge, Klima (<http://kpnmab.pl/pl/karkonoskie-klimaty,97>)

6 Tschechien. Illustrierter Reiseführer mit landeskundlicher Einführung. Baedeker, 2006

7 Tourismuseite der Tschechischen Republik: Jeseníky (Altwatergebirge) (<http://www.czech.cz/de/Touristen/Was-unternehmen,-Sehenswertes/Interessante-Platze/Jeseniky-Altwatergebirge>)

8 SMUL (2008): Sachsen im Klimawandel. Eine Analyse. Eigenverlag des Sächs. Staatsministeriums für Umwelt & Landwirtschaft

9 naturparkblicke.de – Unterwegs im Naturpark Zittauer Gebirge. Publikation des Landschaftspflegeverbandes „Zittauer Gebirge und Vorland“ e.V. und der Projektgruppe naturparkblicke.de (gefördert durch EPLR Sachsen)

(http://www.naturparkblicke.de/index.php?option=com_content&view=article&id=155&Itemid=68)

10 C20 bedeutet hier die Klimasimulation des 20. Jahrhunderts.

Datenformat vor. Die Datensätze für die Zeiträume 1960-2000 (C20) sowie 2001-2100 können mit der vom DKRZ bereitgestellten Software *Jblob*¹¹ aus der Datenbank heruntergeladen werden.

Die netCDF-Dateien sind folgendermaßen aufgebaut:

| | |
|-----------------------|-----------------|
| gridsize (Zielgebiet) | = 152 |
| xname | = lon |
| yname | = lat |
| xunits | = degrees_east |
| yunits | = degrees_north |
| xsize (Zielgebiet) | = 19 |
| ysize (Zielgebiet) | = 8 |
| xfirst (Zielgebiet) | = 13,8 |
| xinc | = 0,2 |
| yfirst (Zielgebiet) | = 50,8 |
| yinc | = 0,2 |
| timestep | = 3h |

Die Windstatistik wird auf der Grundlage des Modelloutputs des Klimamodells CLM (Climate Limited Area Model) erstellt. Das Modell ist ein dynamisch hoch auflösendes Regionalmodell (0,2 Grad = ca. 20 km). Das Modell liefert Zeitreihen meteorologischer bodennaher und atmosphärischer Elemente, unter anderem die u- und v-Komponente der Windgeschwindigkeit in verschiedenen Druckleveln.¹² Hierbei steht die u-Komponente für die Ost-West-Komponente der Windgeschwindigkeit, und die v-Komponente repräsentiert die Nord-Süd-Komponente.

In der Leistungsbeschreibung wird die Erstellung der Windstatistik für den Bereich zwischen 950 hPa und 850 hPa gefordert. Das geforderte Drucklevel 950 hPa liegt im CLM-Datensatz nicht vor. Die Berechnung des 950 hPa-Levels über die Ermittlung der Höhe über Normalnull (m ü. NN) und den Potenzwindansatz¹³ würde zu Unsicherheiten führen, die sich nachfolgend auf die Erstellung der mittleren Windrosen auswirken würde. Daher wurde für die Erstellung der Windstatistik auf die CLM-Modelldaten für das 925 hPa-Level zurückgegriffen. Über den Ansatz der Standardatmosphäre wurden dennoch die mittleren Höhen über Normalnull ermittelt, die den verwendeten Druckleveln entsprechen¹⁴:

■ 925 hPa = 760 m ü. NN (950 hPa = 540 m ü. NN)

■ 850 hPa = 1460 m ü. NN

Die aus den Druckleveln abgeleiteten Höhen über Normalnull machen deutlich, dass beide Drucklevel nicht in der freien Atmosphäre, wie in der Leistungsbeschreibung angegeben, sondern in der vom Untergrund beeinflussten Grenzschicht liegen. Dies bedeutet, dass Topographie und Landnutzung in die Erstellung der Windstatistik eingehen.

Die *Internationale Standardatmosphäre* (ISA) stellt eine Atmosphäre dar, bei der die Größen Luftdruck, Lufttemperatur, Luftfeuchtigkeit sowie Temperaturabnahme je 100 m Höhenstufe Werte haben, die ungefähr

¹¹ Jblob ist ein command-line basiertes Programm zum download von Daten von der CERA-Datenbank. (<http://cera-www.dkrz.de/CERA/jblob/>)

¹² Modell CLM (<http://www.cec-potsdam.de/Produkte/Klima/CLM/clm.html>)

¹³ Häckel, H. (1993): Meteorologie. UTB, Stuttgart; 6. korrigierte Auflage (2008)

¹⁴ Internationale Standardatmosphäre (ISA), Tabelle - Berechnung mit <http://www.digitaldutch.com/atmoscalc/tableatmosphere.htm>

gleich den auf der Erde herrschenden Mittelwerten sind. Damit entspricht die ISA etwa den in mittleren Breiten von 40° nördlicher Breite herrschenden Druck- und Temperaturverhältnissen.

5 Methodik

Die Drucklevel 925 hPa und 850 hPa sind als direkter Output nur im regionalen Klimamodell CLM3 verfügbar.

Bei Verwendung eines regionalen dynamischen Klimamodells mit einer Auflösung von ca. 20 km (CLM) ergeben sich 152 Gitterpunkte, die mittels linearer Interpolation zu einem mittleren Strömungsfeld für das Zielgebiet von KLAPS zusammengefasst werden. Neben dem Mittelwert aus den Einzelpunkten bzw. Einzelflächen kann durch Angabe der Standardabweichung eine zusätzliche Aussage zur Unsicherheit des mittleren Windfelds getroffen werden (siehe Kapitel 7).

Die Bearbeitung der netCDF-Dateien erfolgte mittels der Software CDO¹⁵ wie nachfolgend beschrieben:

■ Ausschneiden des Zielgebietes (Abbildung 2)

Rechteck 13,7 E / 50,67 N (13°41'60" E / 50°40'12" N)
 17,31 E / 52,28 N (17°18'36" E / 52°16'48" N)

```
cdo sellonlatbox,lon1,lon2,lat1,lat2 ifile ofile
```



Abbildung 2: Räumliche Datenabdeckung des CLM-Datensatzes für die Erstellung der Windrosen im Rahmen des Projekts KLAPS und geographische Lage der Radiosondenstationen

■ Berechnung der Gebietsmittel (gewichtetes Flächenmittel) für u- und v-Komponente der Windgeschwindigkeit (m/s) (Drucklevel 925 hPa und 850 hPa), die in den Rohdaten für die einzelnen Modellzeitschritte als u- und v-Windkomponenten vorliegen¹⁶

```
cdo fldmean u/v-ifile.nc u/v_mean-ofile.nc
```

¹⁵ CDO (Climate data operators) ist eine Sammlung von Kommandozeilen-Operatoren zur Verarbeitung und Analyse von Klimadaten und Daten der numerischen Wettervorhersage. (<https://code.zmaw.de/projects/cdo>)

¹⁶ Output Parameterliste für CLM Daten im Datenstrom 2 (DS2) mit rotiertem Grid und Datenstrom 3 (DS3) mit regulärem Grid (http://mud.dkrz.de/fileadmin/extern/SGA-Files/clm_parameter_weblis.pdf)

- Berechnung des Mittelwerts der beiden Druckflächen 925 hPa und 850 hPa aus den Gebietsmitteln für die u- und v-Komponente (m/s)

```
cdo divc,2 -add u/v925_mean -ifile.nc u/v850_mean -ifile.nc U/V_mean -ofile.nc
```

- Berechnung des Gebietsmittels der Windgeschwindigkeit (m/s) für den Bereich zwischen 925 hPa und 850 hPa aus den Gebietsmitteln für die u- und v-Komponente (Bereich zwischen 925 hPa und 850 hPa)¹⁷

$$windspeed = \sqrt{u^2 + v^2}$$

```
sqrt -add -sqr U_mean-ifile.nc -sqr V_mean-ifile.nc WiV-ofile.nc
```

- Berechnung des Gebietsmittels der Windrichtungen (deg) in 925 hPa und 850 hPa Druckhöhe¹⁷

$$winddir = \left(\frac{180}{\pi} \cdot \arctan 2(-u, -v) \right) \quad \text{mit } \frac{180}{\pi} = 57,3$$

```
cdo mulc,57.3 -atan2 - mulc,-1 U_mean-ifile.nc -mulc,-1 V_mean-ifile.nc UV-ofile.nc  
(Windrichtung liegt zwischen -180° und 180°)
```

```
cdo ltc,0 UV-ofile.nc mask
```

(Erstellung einer Maske mit Wert = 1 für alle Werte < 0 und ansonsten Wert = 0)

```
cdo ifthen mask -addc,360 UV-ofile.nc unter0.nc
```

(für Werte < 0 Nutzen der Werte aus ifile, Addition von 360, sonst Wert = Fehlwert)

```
cdo ifnotthen mask UV-ofile.nc ueber0.nc
```

(für Werte > 0 Nutzen der Werte aus ifile, sonst Wert = Fehlwert)

```
cdo ifthenelse mask unter0.nc ueber0.nc WiRi.nc
```

(Dateien zusammenführen in Ergebnisdatei mit Windrichtung)

- Zusammenführen der Dateien für Windgeschwindigkeit und Windrichtung in einer geordneten Zeitreihe

```
cdo mergetime ifile1.nc ifile2.nc ifile3.nc ifile4.nc ... ofile.nc
```

Die Berechnung der Statistiken zur Häufigkeit der Windrichtungen und der mittleren Windgeschwindigkeiten wurde mit OriginLab, einem Programmpaket zur Analyse und Darstellung von Daten durchgeführt.

6 Ergebnisse

Durch die Universität Wroclaw wurden für die Validierung der Modellergebnisse aus dem regionalen Klimamodell CLM Windrosen für den Druckbereich zwischen 950 hPa und 850 hPa erstellt. Sie beruhen auf Messungen von Radiosondenaufstiegen an den Wetterstationen Lindenberg (D), Prag (CZ) und Wroclaw (PL) und stellen die mittleren Verhältnisse in den Jahren 2000, 2005 und 2010 dar. Die graphische Darstellung der Windstatistik aus den Radiosondenaufstiegen für diese Jahre zeigt Abbildung 3.

¹⁷ Dataprocessing – Manipulation & Visualisation of NetCDF-files. Jörg Wegner, 24.02. 2012, DKRZ (http://mms.dkrz.de/pdf/klimaforschung/cmip5/Processing_Joerg_Wegner.pdf)

Die Häufigkeiten des Auftretens bestimmter Windrichtungen zeigen die Dominanz von westlichen Winden. Für das Jahr 2000 wurde außerdem ein gegenüber anderen Sektoren häufigeres Auftreten südlicher Winde ermittelt. Die Windrosen der Jahre 2005 und 2010 zeigen demgegenüber neben den vorherrschenden Westwinden eine häufigere Südostanströmung. Die Windgeschwindigkeiten erreichen bei den durch Radiosondenaufstieg ermittelten Daten maximal 8 m/s.

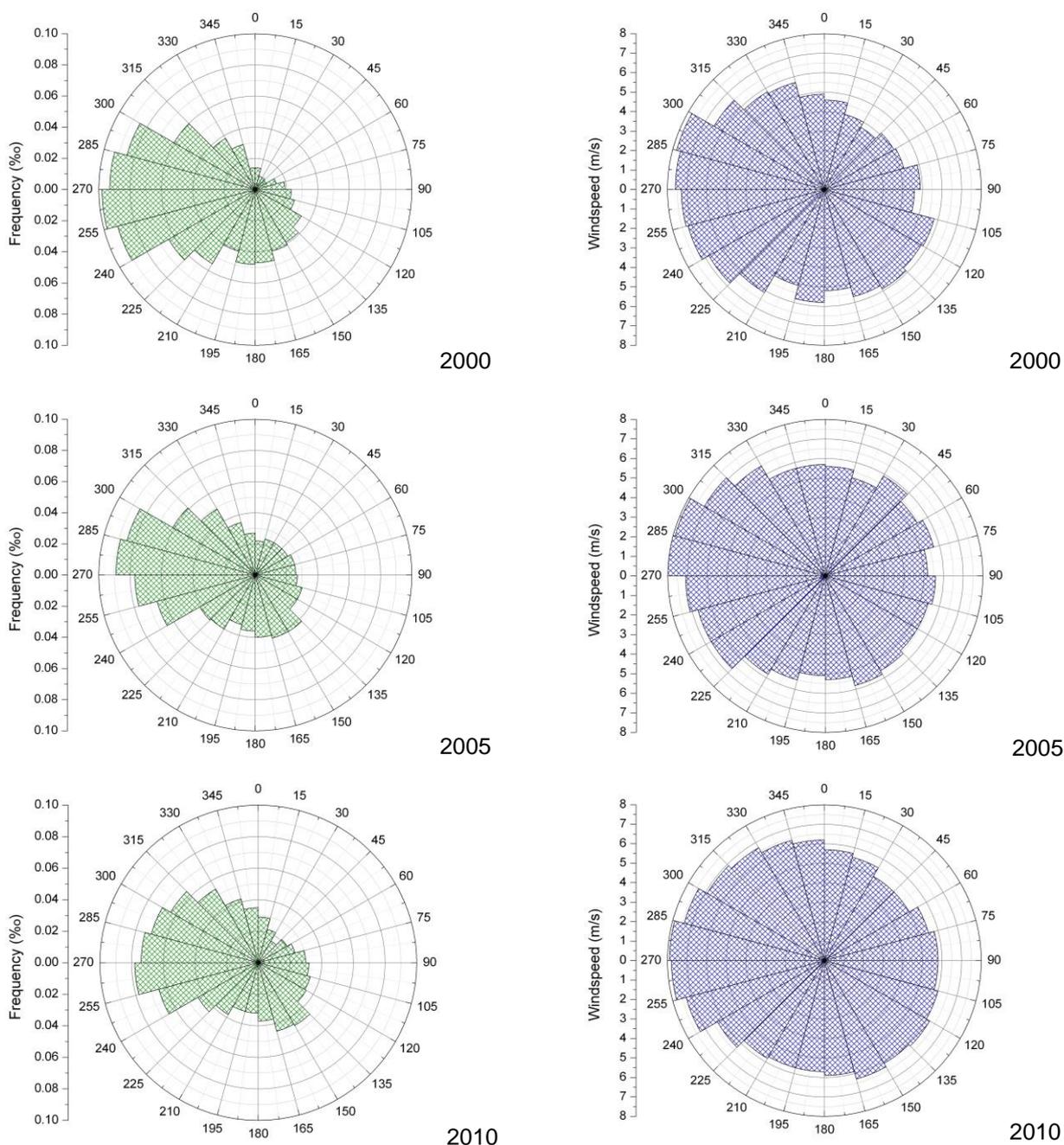


Abbildung 3: Aus Radiosondenaufstiegen ermittelte mittlere Windrosen für das KLAPS-Zielgebiet für die Jahre 2000, 2005 und 2010 für den Druckbereich zwischen 950 hPa und 850 hPa
links: relative Häufigkeit (‰) des Auftretens von Windrichtungen
rechts: mittlere Windgeschwindigkeit (m/s) in den Sektoren

Die niedrigsten Windgeschwindigkeiten treten 2005 im Nordostsektor auf. In diesem Sektor wurden auch die geringsten Häufigkeiten ermittelt. In den Jahren 2005 und 2010 betragen die mittleren Windgeschwindigkeiten außerhalb des Westsektors zwischen 5 und 6 m/s.

Die aus den Modelldaten des regionalen Klimamodells CLM abgeleitete Statistik zu Häufigkeit und Windgeschwindigkeit für die Jahre 2000, 2005 und 2010 zeigt Abbildung 4. Gegenüber den mittels Radiosondenaufstiegen ermittelten Werten für Häufigkeit und Windgeschwindigkeit wird eine andere Verteilung der Häufigkeiten der Windrichtungen festgestellt. Des Weiteren zeigen die Windgeschwindigkeiten in den Sektoren ein differenzierteres Bild als die Statistik aus den Radiosondenaufstiegen. Die Modelldaten zeigen ein häufigeres Auftreten der Windrichtung West (bis 13,5 %) im Jahr 2000, auch in den Jahren 2005 und 2010 liegen die aus den Modelldaten abgeleiteten Häufigkeiten über denen aus den Radiosondenaufstiegen ermittelten.

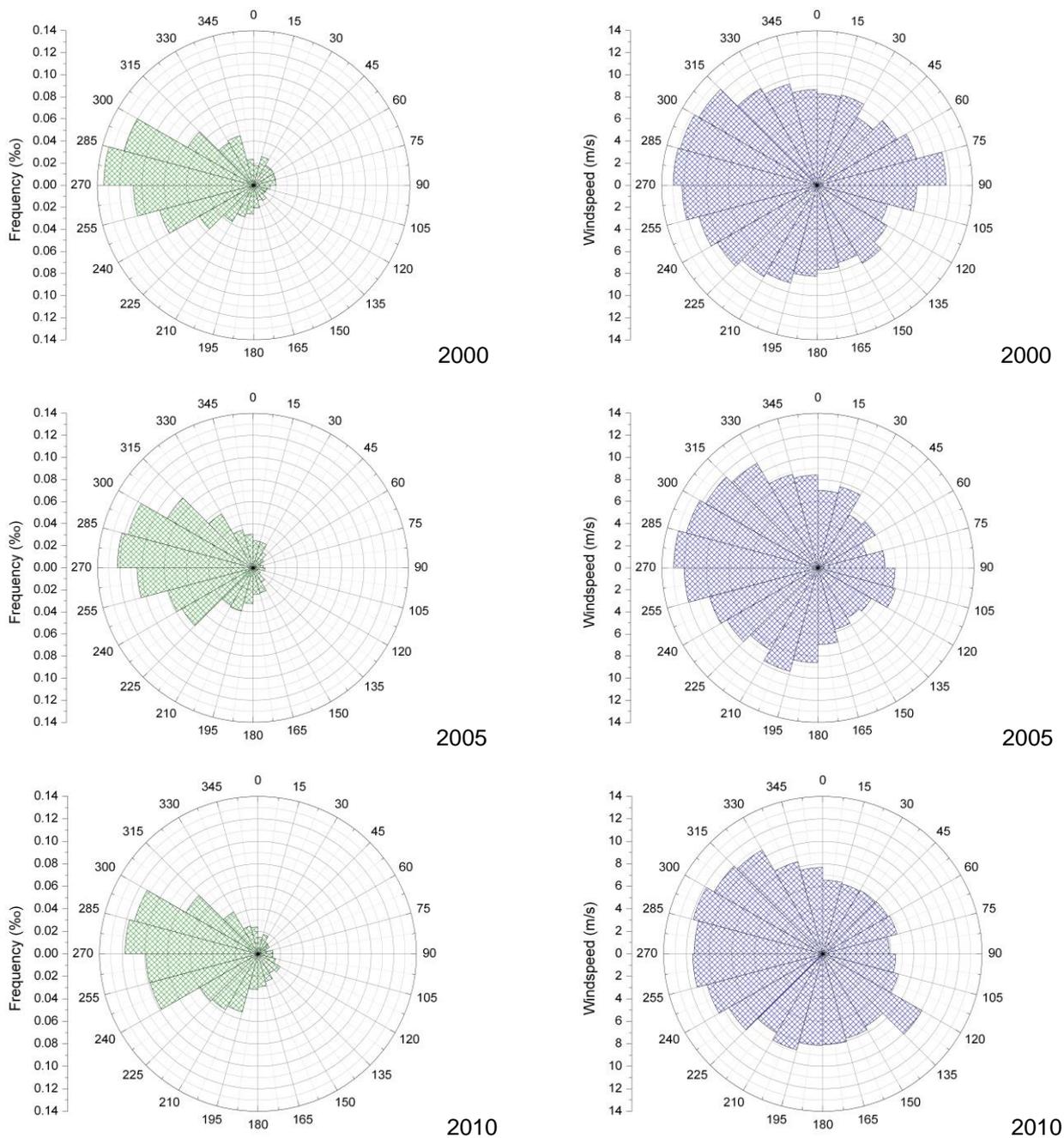


Abbildung 4: Aus der Klimasimulation mit CLM (C20) ermittelte mittlere Windrosen für das KLAPS-Zielgebiet für die Jahre 2000, 2005 und 2010 für den Druckbereich zwischen 925 hPa und 850 hPa links: relative Häufigkeit (‰) des Auftretens von Windrichtungen rechts: mittlere Windgeschwindigkeit (m/s) in den Sektoren

Die aus den Modelldaten berechneten mittleren Windgeschwindigkeiten sind gegenüber den gemessenen aus den Radiosondenaufstiegen um bis zu 5 m/s höher. Abweichend von den durch Radiosondenaufstiege ermittelten Windgeschwindigkeiten zeigt die Statistik aus den Modelldaten für das Jahr 2000 und 2010 höhere Windgeschwindigkeiten in den östlichen bzw. südöstlichen Sektoren. Diese „Windspitzen“ in einzelnen Sektoren fehlen in den Beobachtungsdaten. Des Weiteren ist für das Jahr 2005 festzustellen, dass die aus CLM-Modelldaten berechneten mittleren Windgeschwindigkeiten eine höhere Variabilität zeigen als die durch Radiosondenaufstiege ermittelten. Die Windgeschwindigkeiten sind in den Ostsektoren wesentlich geringer als in den Westsektoren, was in dieser Ausprägung bei den Beobachtungsdaten nicht festzustellen ist.

Die generelle Aussage zur Windstatistik in Häufigkeitsverteilung und mittlerer Windgeschwindigkeit (aus welcher Richtung treten die höchsten Windgeschwindigkeiten auf) wird durch die aus dem CLM-Output ermittelten Werte abgebildet. Die Abweichungen in der Größenordnung lassen sich durch die flächenhafte Abbildung des Zielgebietes durch das Klimamodell auf der Basis von 18 x 9 Gitterpunkten sowie die abweichende Verwendung der 925 hPa Druckfläche gegenüber dem punktuellen Erfassen von Messdaten für den Wind aus den Radiosondenaufstiegen (auf Basis von nur drei Stationen) erklären. Es wäre zu prüfen, ob für Lauf 2 und 3 des CLM-Modells die Unterschiede in der Windstatistik (Häufigkeiten und Windgeschwindigkeit) ebenfalls auftreten und in welcher Größenordnung. Abweichungen der Modelldaten von Beobachtungsdaten (Bias) wurden für das Modell CLM vor allem bei den Niederschlagsdaten festgestellt und eine Bias-Korrektur durchgeführt. Ob dies für die Winddaten erforderlich wäre, muss Gegenstand einer weiteren Untersuchung sein.

Abbildung 5 und Abbildung 6 zeigen die mittleren Windrosen für die Dekaden 1971-1980 bis 1991-2000. Der aus den CLM-Modelldaten abgeleiteten Statistik zu Häufigkeit und Windgeschwindigkeit liegen die Daten aus dem C20-Datensatz zugrunde.

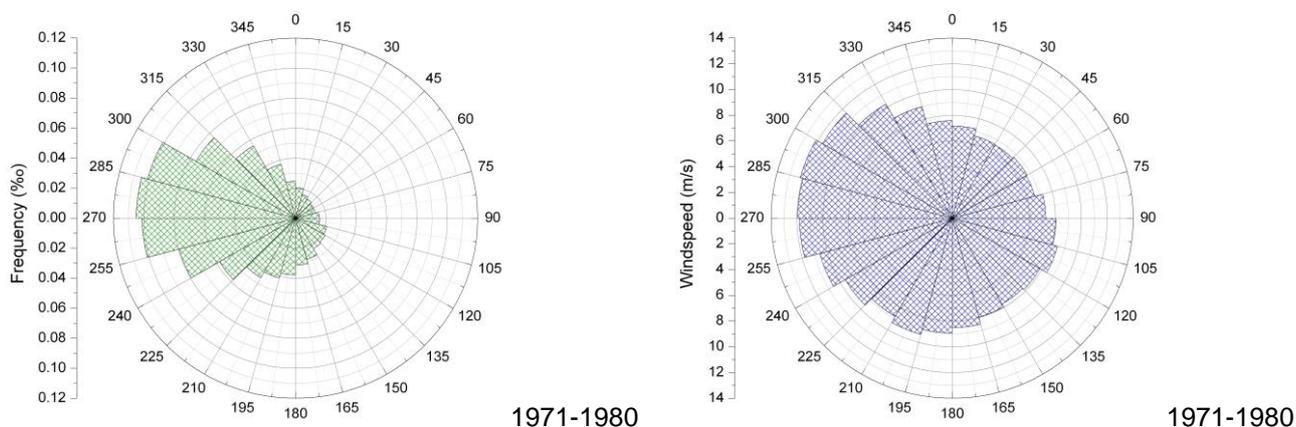


Abbildung 5: Aus der Klimasimulation mit CLM (C20) ermittelte mittlere Windrosen für das KLAPS-Zielgebiet für die Dekade 1971-1980 für den Druckbereich zwischen 925 hPa und 850 hPa
links: relative Häufigkeit (‰) des Auftretens von Windrichtungen
rechts: mittlere Windgeschwindigkeit (m/s) in den Sektoren

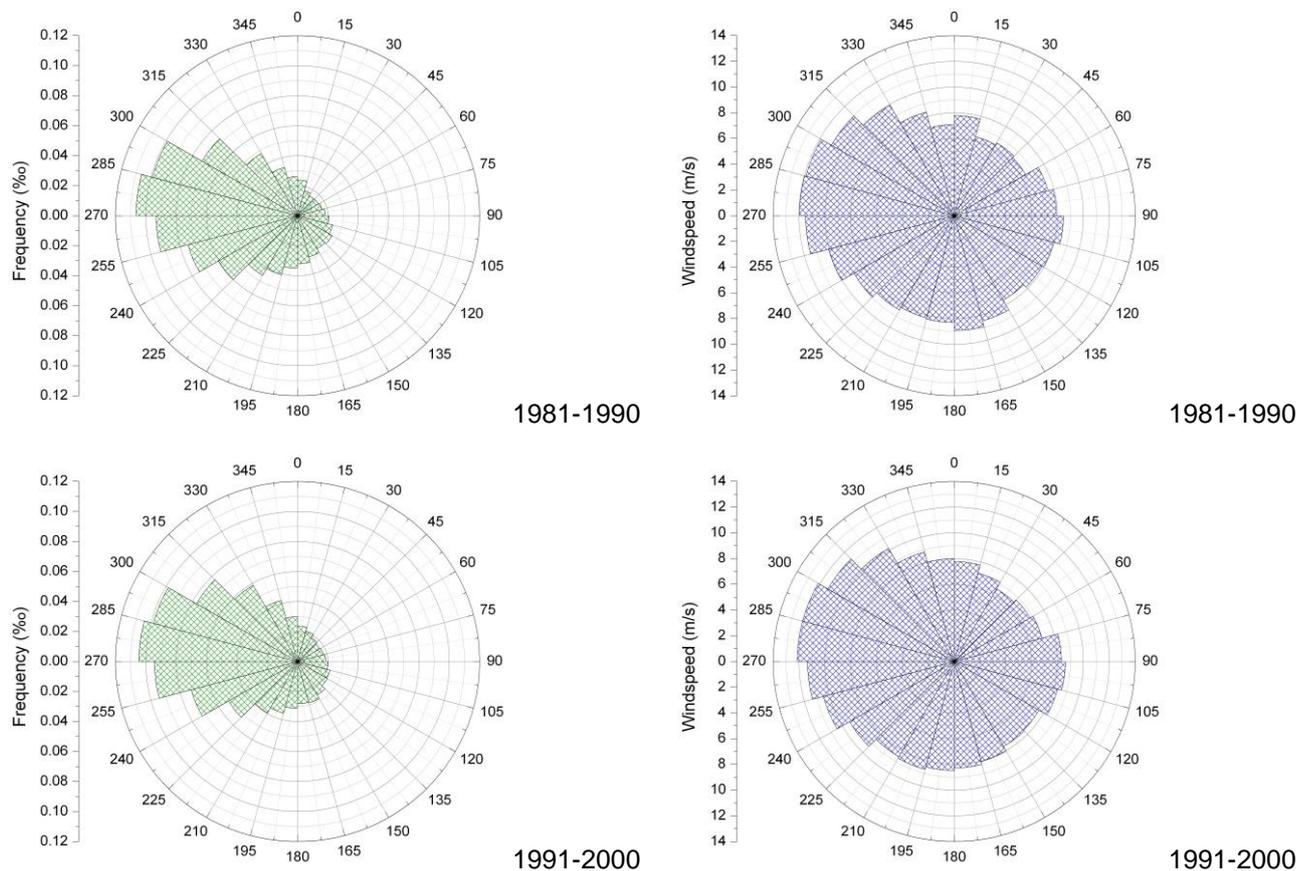


Abbildung 6: Aus der Klimasimulation mit CLM (C20) ermittelte mittlere Windrosen für das KLAPS-Zielgebiet für die Dekaden 1981-1990 und 1991-2000 für den Druckbereich zwischen 925 hPa und 850 hPa

links: relative Häufigkeit (‰) des Auftretens von Windrichtungen

rechts: mittlere Windgeschwindigkeit (m/s) in den Sektoren

Die Häufigkeiten in den Dekaden sind sehr ähnlich verteilt mit einem Maximum in den westlichen Sektoren und dem Minimum in den nordöstlichen. Am häufigsten ermittelt werden mit 10,5 - 10,6 % Winde aus dem Sektor von 270-285°. Die Modelldaten zeigen darüber hinaus geringe Häufigkeiten in den südöstlichen und südlichen Sektoren. Die Häufigkeiten übersteigen hier nicht 4 %. Gegenüber den Einzeljahren 2000, 2005 und 2010 aus dem CLM_C20-Datensatz sind die Sektoren zwischen 0° und 180° gleichmäßiger in der Häufigkeit auftretender Winde repräsentiert, was auf eine gute Abbildungsfähigkeit der realen Verhältnisse durch das Modell hindeutet.

Die Windrosen für die mittlere Windgeschwindigkeit zeigen ebenfalls ein Maximum in den westlichen Sektoren. In der Dekade 1971-1980 beträgt das Maximum im Sektor 285°-300° 12,2 m/s. Die geringsten Windgeschwindigkeiten werden in allen drei Dekaden in den Sektoren Nord bis Nordost festgestellt. Ebenfalls in allen drei Dekaden wird für die östlichen Sektoren zwischen 75° und 120° eine geringfügig höhere Windgeschwindigkeit als in den angrenzenden Sektoren verzeichnet. Einzelne Sektoren mit höherer Windgeschwindigkeit wie in den Einzeljahren 2000 und 2010 treten in den über die Dekaden gemittelten Windgeschwindigkeiten nicht auf.

Die Statistiken für die Dekaden 2001-2010 bis 2091-2100 zeigen Abbildung 7 bis Abbildung 10. Die Dekaden zeichnen sich durch eine sehr geringe Häufigkeit von Wind aus den Sektoren zwischen 0° und 150° aus. Hierbei sind die Dekaden 2001-2010, 2041-2050, 2051-2060 und 2081-2090 noch hervorzuheben – in einzelnen

Sektoren der oben angegebenen Spanne fallen die Häufigkeiten noch einmal geringer aus (z. B. 2001-2010 im Sektor 60°-75°: 1,1 % und 2081-2090 im Sektor 60°-75°: 1,0 %). In allen Dekaden tritt Wind aus den Sektoren 255° bis 300° am häufigsten auf. Mit Ausnahme der Dekaden 2001-2020, 2071-2080 und 2081-2090 wurden jeweils in den Sektoren 270°-300° die größten Häufigkeiten ermittelt. Die maximale Häufigkeit von 12,7 % tritt in diesem Bereich in der Dekade 2081-2090 im Sektor 270°-285° auf, die geringste Häufigkeit von 9,7 % im Sektor 285°-300° in der Dekade 2011-2020.

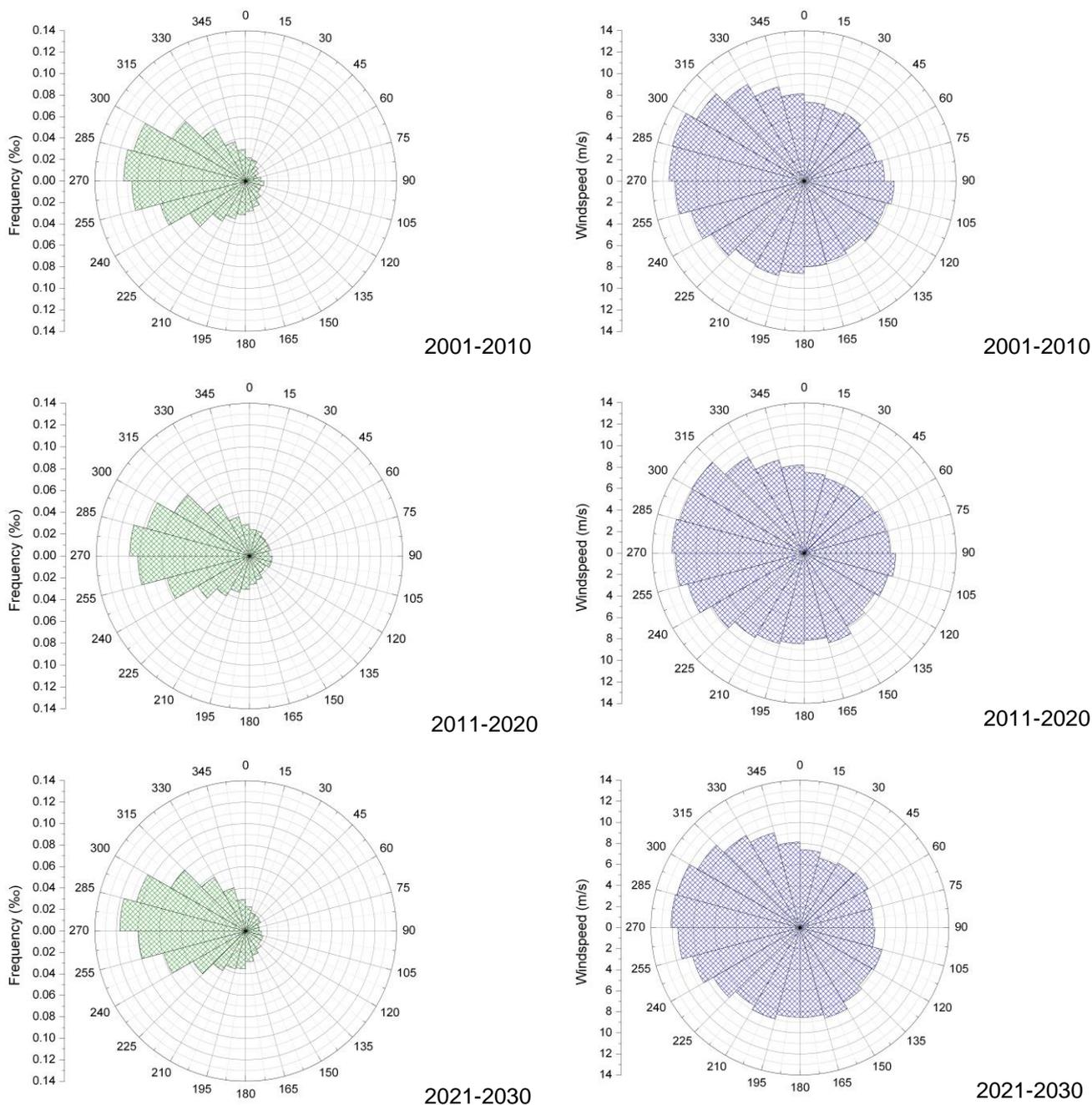
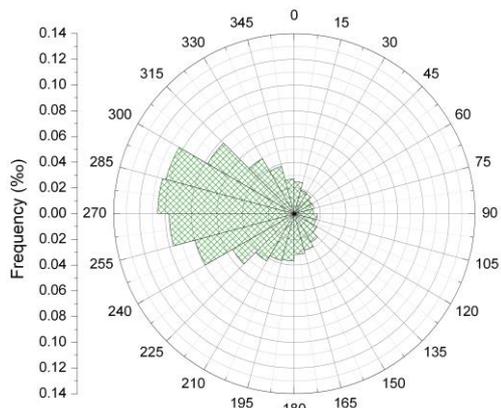


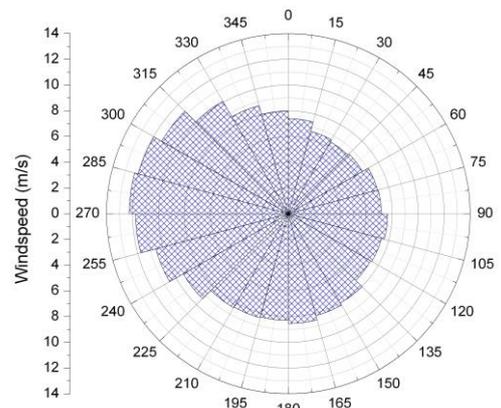
Abbildung 7: Aus der Klimasimulation mit CLM (A1B) ermittelte mittlere Windrosen für das KLAPS-Zielgebiet für die Dekaden 2001-2010, 2011-2020 und 2021-2030 für den Druckbereich zwischen 925 hPa und 850 hPa

links: relative Häufigkeit (‰) des Auftretens von Windrichtungen

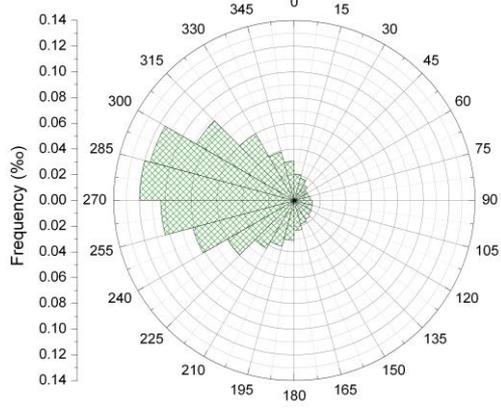
rechts: mittlere Windgeschwindigkeit (m/s) in den Sektoren



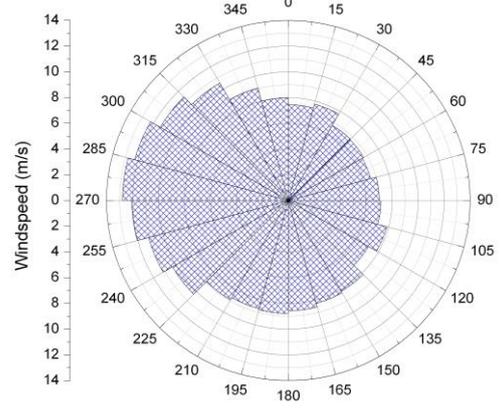
2031-2040



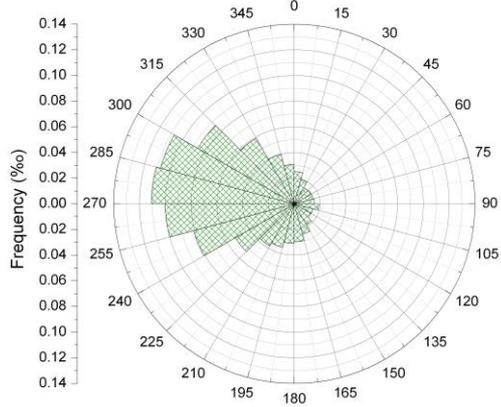
2031-2040



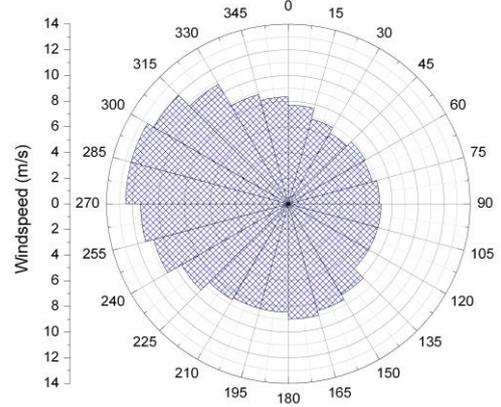
2041-2050



2041-2050



2051-2060

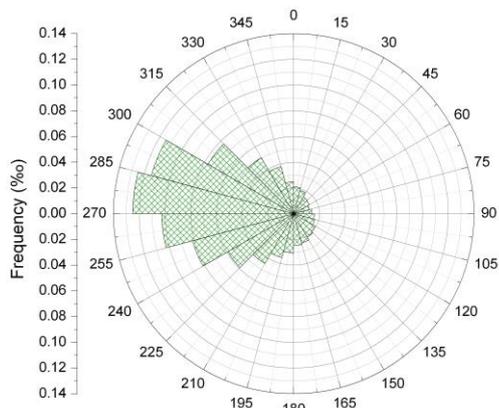


2051-2060

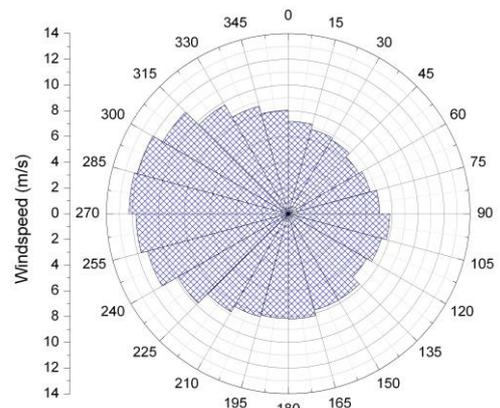
Abbildung 8: Aus der Klimasimulation mit CLM (A1B) ermittelte mittlere Windrosen für das KLAPS-Zielgebiet für die Dekaden 2031-2040, 2041-2050 und 2051-2060 für den Druckbereich zwischen 925 hPa und 850 hPa

links: relative Häufigkeit (‰) des Auftretens von Windrichtungen

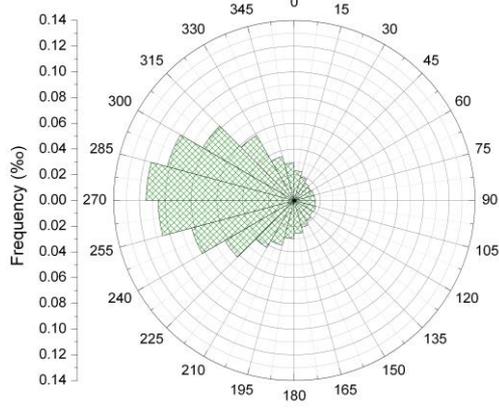
rechts: mittlere Windgeschwindigkeit (m/s) in den Sektoren



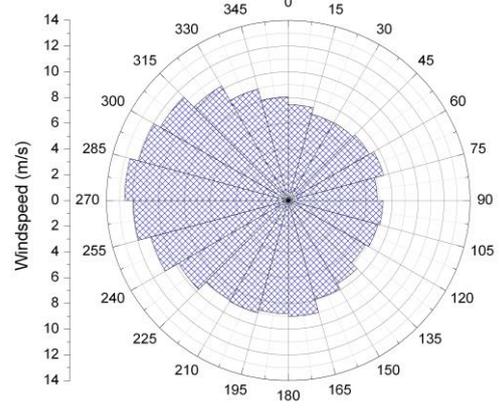
2061-2070



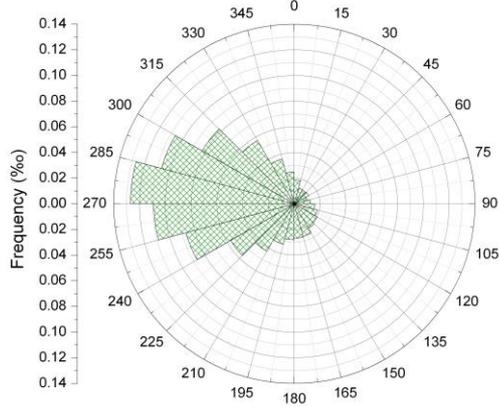
2061-2070



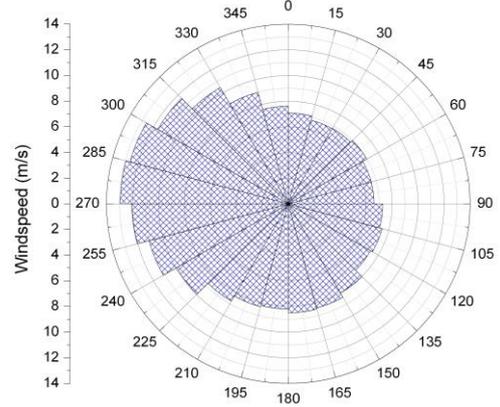
2071-2080



2071-2080



2081-2090

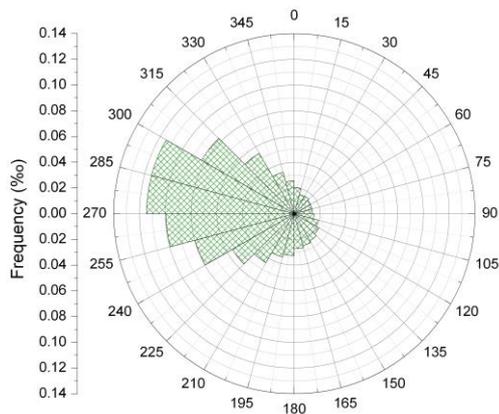


2081-2090

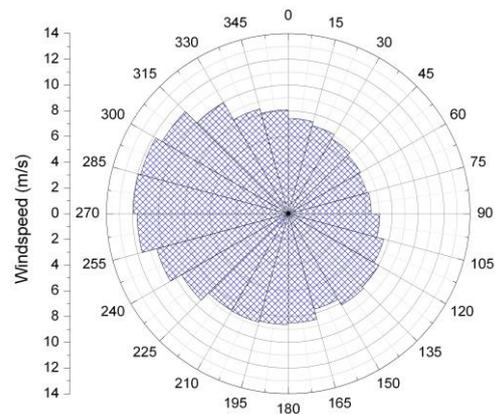
Abbildung 9: Aus der Klimasimulation mit CLM (A1B) ermittelte mittlere Windrosen für das KLAPS-Zielgebiet für die Dekaden 2061-2070, 2071-2080 und 2081-2090 für den Druckbereich zwischen 925 hPa und 850 hPa

links: relative Häufigkeit (‰) des Auftretens von Windrichtungen

rechts: mittlere Windgeschwindigkeit (m/s) in den Sektoren



2091-2100



2091-2100

Abbildung 10: Aus der Klimasimulation mit CLM (A1B) ermittelte mittlere Windrosen für das KLAPS-Zielgebiet für die Dekade 2091-2100 für den Druckbereich zwischen 925 hPa und 850 hPa
links: relative Häufigkeit (‰) des Auftretens von Windrichtungen
rechts: mittlere Windgeschwindigkeit (m/s) in den Sektoren

Die mittleren Windgeschwindigkeiten sind in den Sektoren ähnlich den Häufigkeiten verteilt. In den Sektoren von 255° bis 300° (z. T. bis 315°) treten die höchsten mittleren Windgeschwindigkeiten auf. Die höchste, aus den CLM-Modelldaten ermittelte mittlere Windgeschwindigkeit beträgt 12,9 m/s aus dem Sektor 270°-285° in der Dekade 2091-2100. Die geringsten mittleren Windgeschwindigkeiten lassen sich in den Sektoren finden, in denen auch die geringsten Häufigkeiten verzeichnet werden. Bemerkenswert ist, dass in den Sektoren zwischen 90° und 120° in fast allen Dekaden mittleren Windgeschwindigkeiten ermittelt wurden, die etwas über denen in den angrenzenden Sektoren liegen. In diesen Sektoren ist also ein zweites Maximum der mittleren Windgeschwindigkeiten zu finden.

Die Zu- und Abnahmen der maximalen Häufigkeiten zwischen den Dekaden folgen keinem erkennbaren Muster. Es scheint sich jedoch abzuzeichnen, dass sie gegen Ende des 21. Jahrhunderts in den Westsektoren von 255° bis 300° leicht zunehmen. Dies passiert offenbar zu Lasten der Häufigkeiten in den Nordostsektoren von 15° bis 75°.

Ein Muster zu zunehmenden mittleren Windgeschwindigkeiten ist nicht zu erkennen. Die maximale Windgeschwindigkeit von 12,6 m/s in der Dekade 2001-2010 wird in den Dekaden 2041-2050 und 2081-2090 zwar übertroffen, in den weiteren Dekaden liegen die Maxima der mittleren Windgeschwindigkeit jedoch unter diesem Wert. Die mittleren Windgeschwindigkeiten in den einzelnen Sektoren zeigen zwar zwischen den Dekaden geringe Zu- oder Abnahmen, eine signifikante Änderung ist jedoch nicht festzustellen.

Allerdings werden in dieser Arbeit ausschließlich Mittelwerte über Jahre, Dekaden, 30-Jahres-Zeitscheiben oder gar 100 Jahre betrachtet. Es ist daher nicht auszuschließen, dass es im Zeitraum bis 2100 zu einer Zunahme von Windereignissen mit höheren Windgeschwindigkeiten kommt. Aussagen hierzu können jedoch nicht als signifikant bewertet werden, da neben der Datengrundlage mit einer zeitlichen Auflösung von 3 h von Unsicherheiten in der Modellrechnung auszugehen ist. Einflüsse aus Topographie und Landnutzung spielen für die Höhe von Windgeschwindigkeiten eine große Rolle, sie werden jedoch auch durch ein Regionalmodell

mit einer räumlichen Auflösung von ca. 20 km (wie im Modell CLM) nicht ausreichend genau repräsentiert. Zu dieser Aussage kommt auch das Projekt REGKLAM¹⁸.

Die Windstatistik für die 30-jährigen Zeitscheiben 2021-2050 und 2071-2100 zeigt Abbildung 11. Die Häufigkeiten zeigen ein Maximum im westlichen Sektor (Sektoren 255° bis 300°), auch in den angrenzenden Sektoren treten mit ca. 8 % noch häufig Winde auf. In den westlichen Sektoren zwischen 225° und 330° ist in der Zeitscheibe 2071-2100 gegenüber der Zeitscheibe 2021-2050 eine geringe Zunahme der Häufigkeiten zu verzeichnen. Diese geht zu Lasten der Sektoren zwischen 330° und 30° sowie 65° bis 210°, wo im selben Zeitraum eine geringe Abnahme festgestellt werden kann. Die maximale Häufigkeit steigt von 11,4 % in der Zeitscheibe 2021-2050 auf 11,9 % in der Zeitscheibe 2071-2100.

Die mittlere Windgeschwindigkeit nimmt in den Sektoren 65° bis 315° in der Zeitscheibe 2071-2100 gegenüber der Zeitscheibe 2021-2050 geringfügig zu, in den weiteren Sektoren dagegen ab. Die höchste mittlere Windgeschwindigkeit wurde mit 12,5 m/s im Sektor 270°-285° in der Zeitscheibe 2071-2100 ermittelt, gegenüber 12,4 m/s im selben Sektor für die Zeitscheibe 2021-2050.

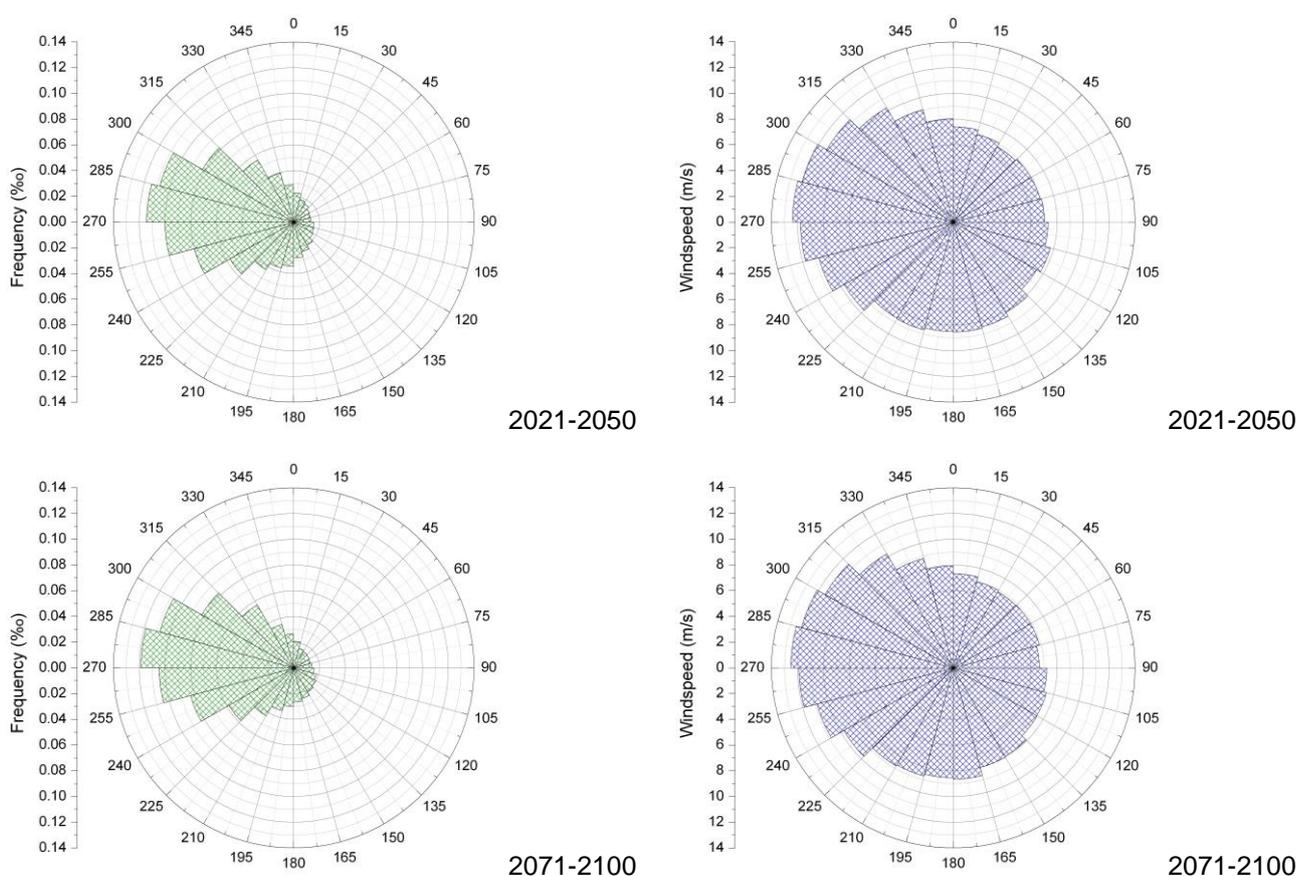


Abbildung 11: Aus der Klimasimulation mit CLM (A1B) ermittelte mittlere Windrosen für das KLAPS-Zielgebiet für die Zeitscheiben 2021-2050 und 2071-2100 für den Druckbereich zwischen 925 hPa und 850 hPa

links: relative Häufigkeit (‰) des Auftretens von Windrichtungen

rechts: mittlere Windgeschwindigkeit (m/s) in den Sektoren

18 Bernhofer, C., Matschullat, J., Bobeth, A. (Hrsg.) (2011): Klimaprojektionen für die REGKLAM-Modellregion Dresden. Publikationsreihe des BMBF-geförderten Projektes REGKLAM – Regionales Klimaanpassungsprogramm für die Modellregion Dresden, Heft 2. Rhombos-Verlag Dresden.

Gegenüber der Zeitscheibe 1971-2000 (siehe Abbildung 13 oben) nehmen die Häufigkeiten in den Zeitscheiben 2021-2050 und 2071-2100 in den westlichen Sektoren zu, im südwestlichen dagegen ab. Die Verteilung der mittleren Windgeschwindigkeiten zeigt für die Zeitscheiben 2021-2050 und 2071-2100 gegenüber 1971-2000 ein differenzierteres Bild hinsichtlich der östlichen Sektoren. Ein in der letztgenannten Zeitscheibe vorhandenes lokales Maximum ist in der Mitte und am Ende des 21. Jahrhunderts nahezu nicht mehr festzustellen. Die Windgeschwindigkeiten sind außer in den Sektoren von 75° bis 135° in den Zeitscheiben 2021-2050 und 2071-2100 höher als 1971-2000.

Abbildung 13 und Abbildung 13 zeigen die Windklimatologie für die Zeiträume 1971-2000, 1971-2100 und 2001-2100.

Die Häufigkeiten der auftretenden Windrichtungen in den Zeiträumen 1971-2000, 1971-2100 und 2001-2100 zeigt eine sehr ähnliche Verteilung. Wind aus den Sektoren zwischen 15° und 135° tritt mit geringster Wahrscheinlichkeit auf. Die Häufigkeit liegt in diesem Bereich größtenteils unter 2 %. In den Sektoren zwischen 255° und 300° werden die größten Häufigkeiten ermittelt, wobei hier die Reihenfolge der Sektoren folgende ist (zunehmende Häufigkeit): 255°- 270°, 285°-300°, 270°-285°.

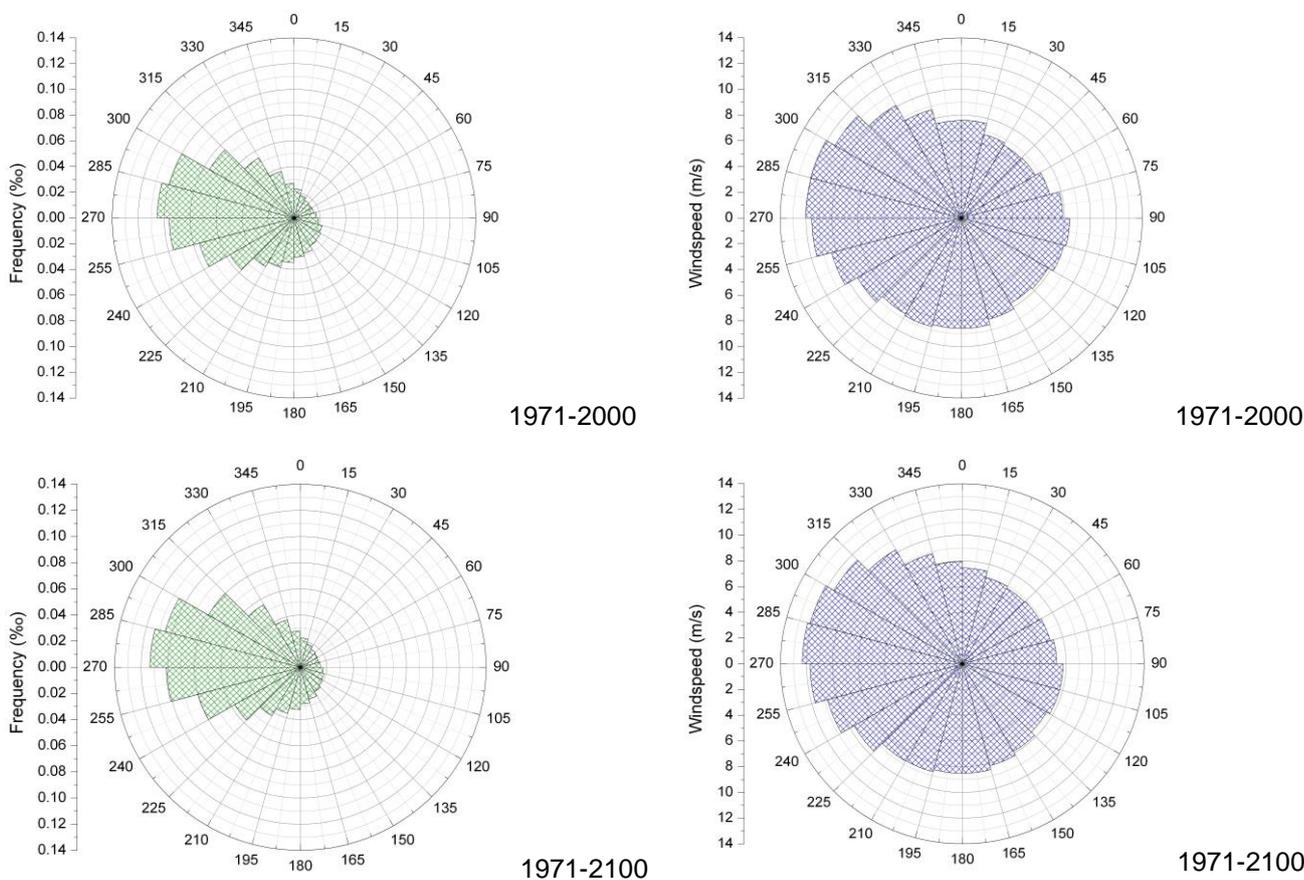


Abbildung 12: Aus der Klimasimulation mit CLM ermittelte mittlere Windrosen für das KLAPS-Zielgebiet für die Zeitscheiben 1971-2000 (C20) und 1971-2100 (C20 u. A1B) für den Druckbereich zwischen 925 hPa und 850 hPa

links: relative Häufigkeit (‰) des Auftretens von Windrichtungen

rechts: mittlere Windgeschwindigkeit (m/s) in den Sektoren

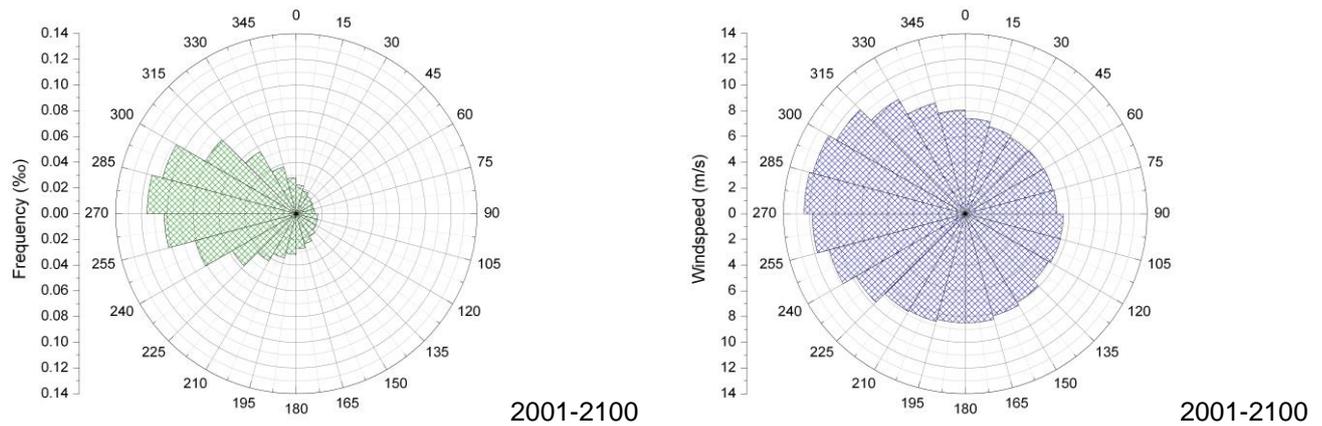


Abbildung 13: Aus der Klimasimulation mit CLM ermittelte mittlere Windrosen für das KLAPS-Zielgebiet für die Zeitscheibe 2001-2100 (A1B) für den Druckbereich zwischen 925 hPa und 850 hPa links: relative Häufigkeit (‰) des Auftretens von Windrichtungen rechts: mittlere Windgeschwindigkeit (m/s) in den Sektoren

Eine Zunahme der Häufigkeiten erfolgt im Zeitraum 2001-2100 gegenüber dem Zeitraum 1971-2000 in den Sektoren 225° bis 360°, in den weiteren Sektoren gehen die Häufigkeiten zurück. Die stärkste Zunahme wird in den Sektoren 255° bis 300° festgestellt, sie beträgt zwischen 0,6 % und 1,0 %. Demgegenüber steht der Rückgang um 0,4 % bis 0,6 % in den Sektoren von 105° bis 165°. Der Vergleich mit dem Zeitraum 1971-2100 zeigt die gleiche Charakteristik, die Änderungen fallen jedoch in den genannten Sektoren wesentlich geringer aus (Zunahme zwischen 0,1 % und 0,2 %, Abnahme 0,1 % bis 0,15 %).

Die mittleren Windgeschwindigkeiten haben in allen drei Zeiträumen in den westlichen Sektoren ihr Maximum. In den Sektoren von 240° bis 330° wurden jeweils mittlere Windgeschwindigkeiten > 10,0 m/s ermittelt. Die größten Werte treten hierbei im Zeitraum 2001-2100 auf. Das bedeutet eine Zunahme zwischen 0,1 m/s und 0,5 m/s gegenüber dem Zeitraum 1971-2000. Mit dem Zeitraum 1971-2100 vergleichen, erhöht sich die mittlere Windgeschwindigkeit um maximal 0,1 m/s. Eine Abnahme der mittleren Windgeschwindigkeit wurde mit wenigen Ausnahmen ausschließlich in den Sektoren von 0° bis 210° festgestellt. Die im Vergleich zu den Nachbarsektoren geringfügig höhere Windgeschwindigkeit in den Sektoren 75° bis 120° im Zeitraum 1971-2000 ist in den weiteren Zeiträumen weitaus schwächer ausgeprägt.

Die Verteilung der mittleren Windgeschwindigkeiten zeigt in den Zeiträumen 1971-2000, 1971-2100 und 2001-2100 ein nahezu identisches Bild. Ein in der Zeitscheibe 1971-2000 auffälliges Maximum der Windgeschwindigkeit in den östlichen Sektoren ist jedoch in den späteren Zeitscheiben deutlich schwächer ausgeprägt.

Alle den Abbildungen zugrunde liegenden Daten liegen dem Bericht als *.txt-File bei.

7 Zusammenfassung

Für das Zielgebiet des Projektes KLAPS wurde aus Projektionsdaten eines Klimamodells eine Windklimatologie erstellt. Als Datengrundlage wurde der Modelloutput der regionalen Klimamodells CLM gewählt, der eine räumliche Auflösung von ca. 20 km hat. Die zeitliche Auflösung des Datensatzes ist 3 Stunden. Die Daten liegen als netCDF-Dateien beim DKRZ vor und können nach Registrierung auf der Homepage der CERA-Datenbank von dort bezogen werden.

Es wurden mittlere jährliche Häufigkeitsverteilungen der Windrichtung sowie die mittlere jährliche Windgeschwindigkeit für folgende Zeiträume zwischen 1971-2100 ermittelt:

- für die Referenzjahre 2000, 2005, 2010
- Dekaden von 1971-2100
- 30-jährige Zeiträume 2021-2050, 2071-2100
- Mittel über gesamten Zeitraum 1971-2000, 1971-2100, 2001-2100.

Die Datenverarbeitung erfolgte mit der Software CDO (Climate Data Operators), einer Sammlung von Kommandozeilenoperatoren zur Bearbeitung und Analyse von Klimadaten. CDO wird vom Max-Planck-Institut für Meteorologie in Hamburg bereitgestellt. Desweiteren wurde OriginLab für die Visualisierung der Daten genutzt.

Die Auswertung der Modelldaten erfolgt für den Druckbereich von 925 hPa bis 850 hPa. Das Drucklevel 950 hPa wird durch die Daten des CLM-Modells nicht zur Verfügung gestellt. Eine Umrechnung vom 925 hPa-Level auf das 950 hPa-Level würde die Genauigkeit der Ergebnisse wahrscheinlich nicht verbessern, da durch die Annahme einer Standardatmosphäre bei der Umrechnung Unsicherheiten eingebracht werden.

Die Gegenüberstellung von Beobachtungsdaten aus Radiosondenaufstiegen für den Druckbereich 950 hPa bis 850 hPa zeigt Unterschiede sowohl bei der Verteilung der Häufigkeiten als auch bei den Windgeschwindigkeiten. Die Modelldaten zeigen ein häufigeres Auftreten der Windrichtung West. Die aus den Modelldaten berechneten Windgeschwindigkeiten sind gegenüber den gemessenen aus den Radiosondenaufstiegen um bis zu 5 m/s höher. Die generelle Aussage zur Windstatistik in Häufigkeitsverteilung und Windgeschwindigkeit wird durch die aus dem CLM-Output ermittelten Werte abgebildet. Die Unterschiede können aus dem Vergleich von flächenhaften Daten aus dem Modell mit punktuell erfassten Daten aus den Radiosondenaufstiegen herrühren. Des Weiteren werden im Regionalmodell Topographie und Oberflächenrauigkeit, die das Windfeld zwischen 850 und 925 hPa beeinflussen, nur abgeschwächt berücksichtigt.

Die Zu- und Abnahmen der maximalen Häufigkeiten zwischen den Dekaden von 1971-2100 folgen keinem erkennbaren Muster. Gegen Ende des 21. Jahrhunderts scheinen sie in den Westsektoren von 255° bis 300° leicht zuzunehmen. Die mittleren Windgeschwindigkeiten in den einzelnen Sektoren zeigen zwischen den Dekaden geringe Zu- oder Abnahmen, eine signifikante Änderung ist jedoch nicht festzustellen.

Gegenüber der Zeitscheibe 1971-2000 können für die Zeitscheiben 2021-2050 und 2071-2100 als auch 1971-2100 und 2001-2100 Zunahmen sowohl in Häufigkeit als auch Windgeschwindigkeit festgestellt werden. Die Änderungen sind nicht auf Signifikanz hin untersucht worden. Ein in der Zeitscheibe 1971-2000 auffälliges Maximum der Windgeschwindigkeit in den östlichen Sektoren ist in den späteren Zeitscheiben deutlich schwächer ausgeprägt.

Insgesamt kann ein Änderungssignal in eine bestimmte Richtung für die Häufigkeiten sowie die Windgeschwindigkeit nicht ermittelt werden. Dies wird auch in anderen Studien festgestellt (siehe Kapitel 9).

Die durch das Klimamodell CLM berechneten Zeitreihen für Windgeschwindigkeiten (u-, v-Komponente) und daraus abgeleitete Zeitreihen für Windgeschwindigkeiten und Windrichtung sind als robust einzustufen, da der Antrieb des regionalen Klimamodells CLM aus einem Globalmodell generiert wird und damit typische Strömungsmuster der Atmosphäre abbildet.

Allerdings sind die ermittelten Windrosen für das Zielgebiet des Projektes KLAPS nur eingeschränkt belastbar, da eine mittlere Windrose für das Zielgebiet die Strömungsverhältnisse nur unzureichend genau abbilden kann.

Die Drucklevel 950 hPa, 925 hPa und 850 hPa entsprechen etwa einer Höhe zwischen 550 m und 1450 m über Normalnull. Der Wind (Windrichtung und -geschwindigkeit) im Zielgebiet wird demnach durch die Topographie beeinflusst. Die höchsten Erhebungen erreichen hier 1600 m (Riesengebirge, siehe Kap. 3). In einer walddreichen Region wie dem Zielgebiet des Projektes KLAPS spielt auch die Landnutzung (Rauigkeit) eine wichtige Rolle für eine belastbare Aussage zu den vorherrschenden Windverhältnissen. Ein massenkonsistentes Windmodell wie z. B. WiTraK¹⁹ würde die Eigenschaften der Landoberfläche in die Berechnung der Windklimatologie einbeziehen und damit den Einfluss von Landnutzung und Geländetopographie abbilden.

Interessant wäre auch der Vergleich des CLM-Outputs mit dem einer gröber aufgelösten Modellversion sowie daraus abgeleiteten mittleren Windrosen für Häufigkeit und Windgeschwindigkeit.

Abbildung 14 zeigt die durch Landnutzung und Topographie im Zielgebiet hervorgerufene Inhomogenität der u- und v-Komponenten sowie der daraus berechneten Windgeschwindigkeit aus dem CLM-Datensatz für einen Zeitschritt von 3 Stunden.

Die Standardabweichung ist ein Maß für die Streuung der Werte einer Zufallsvariablen um ihren Erwartungswert (Mittelwert) und zeigt nachfolgend die Werte für die oben gezeigten Abbildungen.

- CLM_A1B_1_3h_U850_1-11688.cn = 1.0821
- CLM_A1B_1_3h_V850_1-11688.cn = 0.56080
- CLM_A1B_1_3h_WiV850_1-11688.cn = 1.1134

Für die Datei CLM_A1B_1_3h_U850_1-11688.nc, die jedoch nur die Jahre 2001-2004 abdeckt, wird eine maximale Standardabweichung von 11,0 ermittelt. An diesem Beispiel soll gezeigt werden, dass die Unsicherheiten beim Arbeiten mit über Gebiet und Drucklevel gemittelten Windgeschwindigkeiten steigen im Vergleich zum Arbeiten mit den Ausgangsdaten.

19 WiTraK (**W**indfeld-**T**ransport- und **K**limatologiesystem): Kerschgens M. et al. (1995): Ann. Meteorol. 31: 135-136

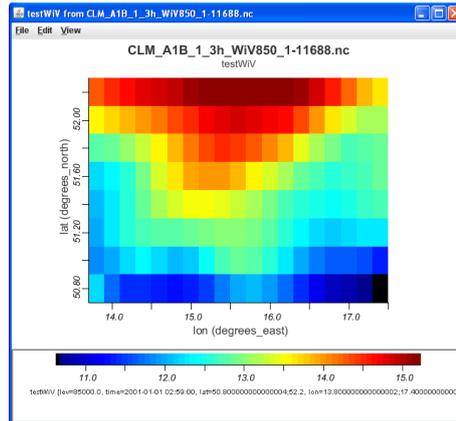
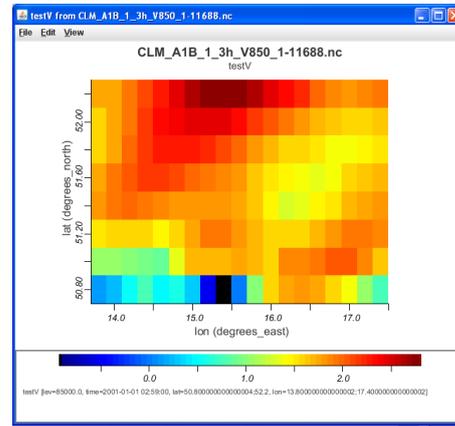
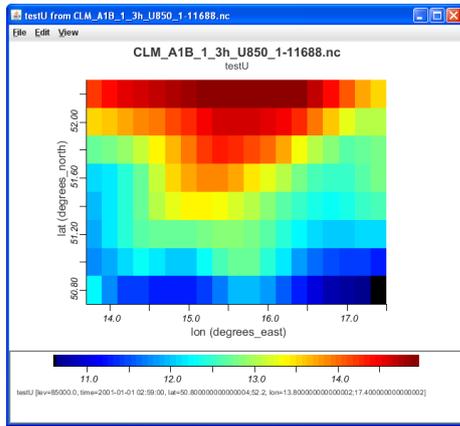


Abbildung 14: Aus u- und v-Komponente berechnete Windgeschwindigkeit (m/s) für ein 3-Stundenmittel im CLM_C20_1-Datensatz für das Drucklevel 850 hPa

8 Abstract

For the target area of the project KLAPS a wind climatology was created from projection data of the regional climate model CLM, which has a spatial resolution of 18 km. The temporal resolution of the data set is 3 hours. The data are available as netCDF files at DKRZ and can be obtained from the website of the CERA database.

The mean annual frequency distributions of wind direction and the mean annual wind speed were calculated for the following periods between 1971-2100:

- for the reference years 2000, 2005, 2010
- decades from 1971-2100
- 30-year periods 2021-2050, 2071-2100
- average over the entire period 1971-2000, 1971-2100, 2001-2100.

The data was processed with software CDO (Climate Data Operators), a collection of command line operators for processing and analysis of climate data. CDO is provided by the Max Planck Institute for Meteorology in Hamburg. Furthermore OriginLab was used for visualising the data.

The final result of data analysis was an average of wind speed and wind direction frequency between the 925 and 850 hPa pressure levels. The pressure level 950 hPa is not provided by the CLM model output. A conversion from the 925 hPa level to the 950 hPa level does not likely improve the accuracy of the results, since additional uncertainties are included using a standard atmosphere for the data conversion.

The comparison between model results and observations from radiosonde for the pressure range from 950 hPa to 850 hPa shows differences in both the distribution of the frequencies and the absolute wind speed. The model data show a higher frequency of wind directions from the west and wind speeds which are 5 m/s higher in the maximum in comparison with measurements. The data from the regional model CLM represent the typical wind statistics adequately well. Differences to the measurements are caused by the comparison of areal data from the model with selectively collected data from the radiosondes as well as by the different low pressure level used from calculation (925 vs. 950 hPa).

The increase and decrease of the maximum frequencies between the decades of 1971-2100 do not follow a recognisable pattern. Towards the end of the 21st Century the frequencies seem to be increasing slightly in the western sectors from 255 to 300 degrees. The mean wind speed in the various sectors shows small increases or decreases between the decades. A significant change, however, is not observed.

Compared to the time slice 1971-2000 increases can be found both in frequency and wind speed for the time slices 2021-2050 and 2071-2100 as well as for 1971-2100 and 2001-2100. The changes have not been examined for significance. A noticeable maximum in wind speed in the eastern sectors in the time slice 1971-2000 is pronounced clearly weaker in the later time slices.

Overall, a change signal for a certain direction in the frequency as well as the wind speed cannot be determined. This is also observed in other studies (see chapter 8).

The time series of wind speeds (u -, v -components) calculated by the climate model CLM and derived time series of wind speed and wind direction are considered to be robust, because the drive of the regional climate model CLM is based on a Global Circulation model which depicts the typical flow patterns in the atmosphere well.

However, the calculated wind roses for the target area of the project KLAPS remain uncertain due to the inadequate inclusion of real influences of topography and land use on the wind field in the atmospheric boundary layer.

9 Literaturstudie zu bisher durchgeführten Studien in Mitteleuropa

Um die ermittelten Ergebnisse einordnen zu können, erfolgte eine Literaturstudie zu bereits durchgeführten Studien in Mitteleuropa. Studien zur Änderung der Windgeschwindigkeit infolge des Klimawandels existieren hauptsächlich in Bezug auf Extremereignisse (Windwurf in Wäldern und Sturmfluten an den Küsten). Daher liegt der Fokus hier auf Extremwertstatistik.

Ein mit KLAPS vergleichbares Projekt existiert für die Stadt Trier.²⁰ Hier wurden aus Radiosondenaufstiegen für die Druckflächen 500 hPa, 850 hPa und 925 hPa unter anderem die Windvektoren ermittelt und analysiert. Die Studie umfasst die Zeitspanne von 1961-2000. Es wurden jedoch keine Projektionsdaten in die Untersuchung einbezogen. Im Bericht wird auch auf weitere Untersuchungen des Regionalklimas und im engeren Bereich des Klimas urbaner Ballungsräume verwiesen.

Zwei Studien aus der Windenergieindustrie, die sich auf die mittleren Windgeschwindigkeiten konzentrieren, untersuchen Langzeittrends in Nordwest- bzw. Nordeuropa. Sowohl die Studie, die die Änderungssignale auf Basis von Windindizes²¹ als auch die, die auf Modelldaten von AOGCMs (Atmosphere-Ocean General Circulation Models)²² analysiert, kommen zu dem Ergebnis, dass die mittleren Windgeschwindigkeiten abnehmen. Die erstgenannte Studie basiert auf rezenten Daten bis 2005, die zweite auf Projektionsdaten bis 2100. Aus der auf Modelldaten basierenden Studie geht jedoch auch hervor, dass die mittleren Windgeschwindigkeiten zum Ende des 21. Jahrhundert geringer werden, jedoch in anderen Zeiträumen, verglichen mit 1961-1990, keine signifikante Änderung ermittelt werden konnte.

Demgegenüber werden von Studien, die Extremwertanalysen zu Windereignissen zum Fokus haben, durchgängig höhere maximale Windgeschwindigkeiten bei Extremereignissen ermittelt.^{23,24,25} Es wird aber auch festgestellt, dass in Süddeutschland kein eindeutiger Trend bzw. ein leichter Rückgang der Böenmaxima zu erwarten ist.^{25,26}

Eine wesentliche Aussage aktueller Studien ist, dass signifikante Entwicklungen in den Windverhältnissen in der unteren Troposphäre über die letzten Jahrzehnte derzeit nicht ermittelt werden können. Dies liegt am Mangel an zuverlässigen Messungen des Windes. Nur auf indirektem Weg lässt sich aus Druckdaten ableiten,

20 Helbig, A. et al. (2006): Regionalklima, Strömungsfeld und Ausbreitungsbedingungen im Raum Trier

21 Atkinson, N. et al. (2006): Long-term wind speed trends in northwestern Europe. Technical report, Garrad Hassan

22 Pryor, S. C. et al. (2005): Climate change impacts on wind speeds and wind energy density in northern Europe: empirical downscaling of multiple AOGCMs. *Clim Res* Vol. 29: 183–198, 2005

23 Rockel, B. & Woth, K. (2007): Extremes of near-surface wind speed over Europe and their future changes as estimated from an ensemble of RCM simulations. *Climatic Change* (2007) 81:267–280

24 Panferov O. et al. (2009): Feedbacks of windthrow for Norway spruce and Scots pine stands under changing climate. *Environ. Res. Lett.* 4 (2009) 045019 (10pp). IOP Publishing

25 Mayer H. et al (2010): Strategien zur Reduzierung des Sturmschadensrisikos für Wälder (Verbundprojekt RESTER)

26 Albrecht, A.: Klimawandel und Stürme über Europa – eine Literaturübersicht (http://www.waldwissen.net/wald/klima/wandel_co2/fva_sturm/fva_klima_sturm_artikel)

dass die Windaktivität von Jahr zu Jahr stark variiert. Über längere Zeiträume betrachtet, machen sich einige ausgeprägt ruhigere und aktivere Jahrzehnte bemerkbar. Über die letzten 100 Jahre ist jedoch kein Windgeschwindigkeitstrend feststellbar.²⁷

So kann man in Norddeutschland laut Klimamodellvorhersagen nur eine sehr geringe Windzunahme von 14 % bis Ende des Jahrhunderts erwarten.^{27,28} Der 3. Werkstattbericht des KLIMZUG-Projektes nordwest2050 geht von einer leichten Zunahme der mittleren Windgeschwindigkeit für die Zukunft aus, wobei die Änderung nur für die dynamischen Klimamodelle REMO und CLM gilt. WETTREG als statistisch-dynamisches Modell projiziert abnehmende mittlere Windgeschwindigkeiten.²⁹ Änderungssignale für Windgeschwindigkeiten wurden auch als Teil von Klimawandelprognosen für Niedersachsen und Auswirkungen des Klimawandels auf die kommunale Ebene durch das Climate Service Center & Max-Planck-Institut für Meteorologie in Hamburg berechnet. Innerhalb der Abschätzung der Bandbreiten der Klimaentwicklung in Niedersachsen wurden die projizierten Änderungen der Windgeschwindigkeit für die regionalen Klimamodelle REMO und CLM ermittelt. Abbildung 15 zeigt die projizierten Änderungssignale aus dieser Studie für die Zeitscheiben 2021-2050 vs. 1971-2000 und 2071-2100 vs. 1971-2000 im Jahresmittel, des Weiteren sind die Änderungssignale nach Jahreszeiten aufgedgliedert. Die Autoren weisen auf die mit sehr großen Unsicherheiten behaftete Aussage zu den Änderungssignalen hin.³⁰ Eine windrichtungsabhängige Statistik zu diesen Ergebnissen konnte nicht gefunden werden, ein direkter Vergleich ist demnach nicht möglich. Auch ist nicht bekannt, für welches Druckniveau die Untersuchung durchgeführt wurde.

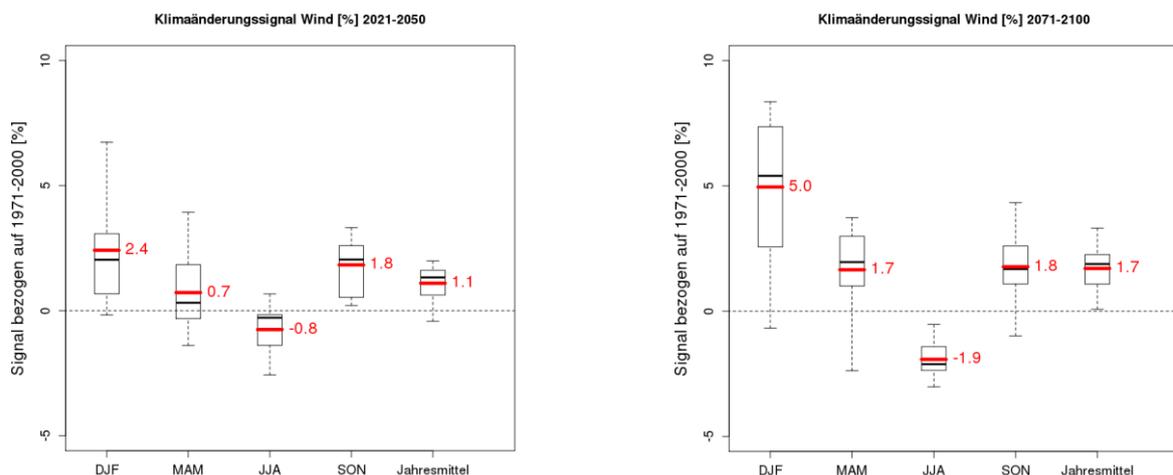


Abbildung 15: Projizierte Änderungen der Windgeschwindigkeit für die Modelle REMO und CLM aus einer Studie des CSC Hamburg für KLIFF und KLIMZUG-Nord

27 Klimabericht für die Metropolregion Hamburg, 2010. Storch v. H., Claussen, M. (Hrsg.)

28 Norddeutscher Klimaatlas, Norddeutsches Klimabüro

(<http://www.norddeutscher-klimaatlas.de/klimaatlas/2071-2100/jahr/mittlere-windgeschwindigkeit/norddeutschland/uebereinstimmung.html>)

29 nordwest2050: Perspektiven für klimaangepasste Innovationsprozesse in der Metropolregion Bremen-Oldenburg im Nordwesten: 3. Werkstattbericht Juni 2010. Klimaszenarien für ‚nordwest2050‘ Teil 2: Randbedingungen und Beschreibung

30 Moseley, C. et al. (2013): Klimawandelprognosen für Niedersachsen und Auswirkungen des Klimawandels auf die kommunale Ebene. Präsentation Neustadt am Rügenberge 11.03.2013

Weitere Untersuchungen der mittleren Windgeschwindigkeiten in 10 m Höhe ü. NN für Europa^{31,32} zeigen ebenfalls nur eine sehr geringe Erhöhung der Windgeschwindigkeit (z. B. Abbildung 16). Die Änderungsrate liegt bei 0-0,1 m/s³² bzw. -0,1-0,1 m/s³¹.

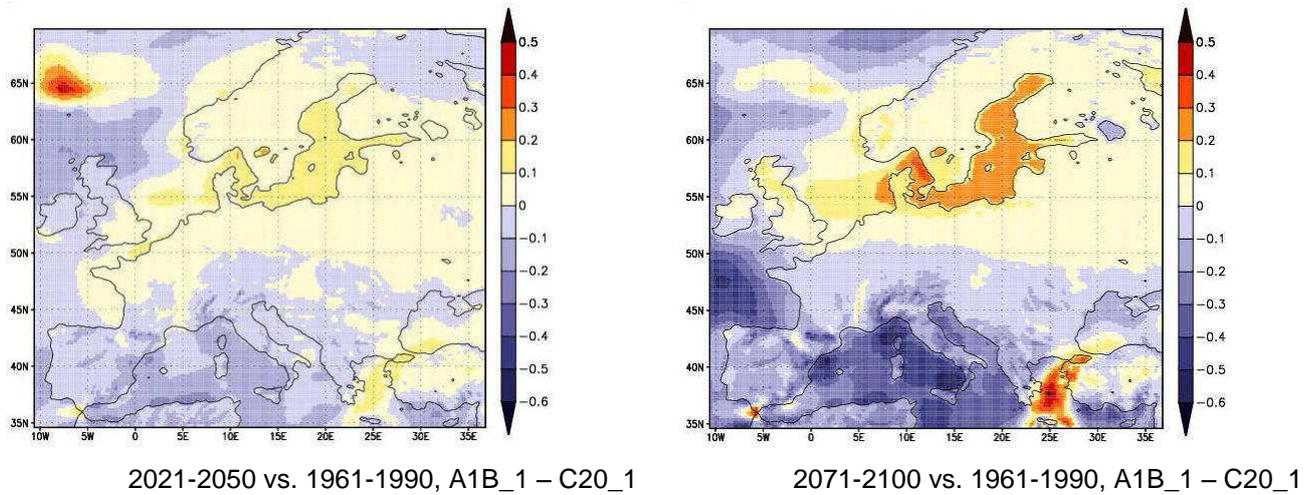


Abbildung 16: Änderungssignal für die mittlere Windgeschwindigkeit in 10 m ü. NN für Europa³²

Untersuchungen im engeren Umfeld des Zielgebietes des Projektes KLAPS existieren nicht. Für eine Abschätzung der Änderung bis zum Ende des 21. Jahrhunderts kann der Regionale Klimaatlas Deutschland³³ herangezogen werden. Er gibt für Sachsen keine bestimmten Trends an, da in der Region Sachsen die Gebiete überwiegen, in denen nicht alle Klimarechnungen bezüglich der Änderung der mittleren Windgeschwindigkeit übereinstimmen. Zur möglichen Änderung der mittleren Windgeschwindigkeit im Jahresmittel bis Ende des 21. Jahrhunderts (2071-2100) im Vergleich zu heute (1961-1990) wird angegeben: unklar: -1 % bis +2 % für 2071-2100 vs. 1961-1990; 0 % bis +1 % für 2021-2050 vs. 1961-1990. Die Ergebnisse sind für eine Höhe von 10 m ü. NN gültig.

31 Walther A. et al. (2006): A high resolution reference data set of German wind velocity 1951–2001 and comparison with regional climate model results. Meteorologische Zeitschrift, Vol. 15 , No. 6, 585-596 (December 2006)

32 Hennemuth B. et al. (2008): Change of Wind Speed in Europe in Regional Climate Model Scenario Projections. Vortrag im Rahmen der DEWEK 2008, Bremen 26.11.2008

33 Regionaler Klimaatlas Deutschland, Regionale Klimabüros, Helmholtz-Gesellschaft.
(<http://www.regionaler-klimaatlas.de/klimaatlas/2071-2100/jahr/mittlere-windgeschwindigkeit/sachsen/uebereinstimmung.html>)

Quellenverzeichnis

Academic dictionaries and encyclopedias: Sudeten

[http://universal_lexikon.deacademic.com/190892/Sudeten; download 02.07.2013]

ALBRECHT, A.: Klimawandel und Stürme über Europa – eine Literaturübersicht

[http://www.waldwissen.net/wald/klima/wandel_co2/fva_sturm/fva_klima_sturm_artikel; download 09.07.2013]

ATKINSON, N. et al. (2006): Long-term wind speed trends in northwestern Europe. Technical report, Garrad Hassan

BERNHOFER, C., MATSCHULLAT, J., BOBETH, A. (Hrsg.) (2011): Klimaprojektionen für die REGKLAM-Modellregion Dresden. Publikationsreihe des BMBF-geförderten Projektes REGKLAM – Regionales Klimaanpassungsprogramm für die Modellregion Dresden, Heft 2. Rhombos-Verlag Berlin.

Die Iser-Magistrale für Wanderungen. Teil des Projekts „Neuer Kammweg“, im Rahmen der Gemeinschaftsinitiative INTERREG III A durch die EU kofinanziertes Projekt

[<http://www.jizerskamagistrala.cz/de/isergebirge-/die-natur-des-isergebirges/>; download 02.07.2013]

HÄCKEL, H. (1993): Meteorologie. UTB, Stuttgart; 6. korrigierte Auflage (2008)

HELBIG, A. et al. (2006): Regionalklima, Strömungsfeld und Ausbreitungsbedingungen im Raum Trier

HENNEMUTH, B. et al. (2008): Change of Wind Speed in Europe in Regional Climate Model Scenario Projections. Vortrag im Rahmen der DEWEK 2008, Bremen 26.11.2008

KERSCHGENS, M. et al. (1995): WiTraK (Windfeld-Transport- und Klimatologiesystem). Ann. Meteorol. 31: 135-136

Klimabericht für die Metropolregion Hamburg, 2010. Storch v. H., Claussen, M. (Hrsg.)

MAYER, H. et al. (2010): Strategien zur Reduzierung des Sturmschadensrisikos für Wälder (Verbundprojekt RESTER)

MOSELEY, C. et al (2013): Klimawandelprognosen für Niedersachsen und Auswirkungen des Klimawandels auf die kommunale Ebene. Präsentation Neustadt am Rübenberge 11.03.2013

naturparkblicke.de – Unterwegs im Naturpark Zittauer Gebirge. Publikation des Landschaftspflegeverbandes „Zittauer Gebirge und Vorland“ e.V. und der Projektgruppe naturparkblicke.de (gefördert durch EPLR Sachsen)

[http://www.naturparkblicke.de/index.php?option=com_content&view=article&id=155&Itemid=68; download 02.07.2013]

Norddeutscher Klimaatlas, Norddeutsches Klimabüro [[http://www.norddeutscher-](http://www.norddeutscher-klimaatlas.de/klimaatlas/2071-2100/jahr/mittlere-windgeschwindigkeit/norddeutschland/uebereinstimmung.html)

[klimaatlas.de/klimaatlas/2071-2100/jahr/mittlere-windgeschwindigkeit/norddeutschland/uebereinstimmung.html](http://www.norddeutscher-klimaatlas.de/klimaatlas/2071-2100/jahr/mittlere-windgeschwindigkeit/norddeutschland/uebereinstimmung.html); download 09.07.2013]

nordwest2050: Perspektiven für klimaangepasste Innovationsprozesse in der Metropolregion Bremen-Oldenburg im Nordwesten: 3. Werkstattbericht Juni 2010. Klimaszenarien für ‚nordwest2050‘ Teil 2: Randbedingungen und Beschreibung

PANFEROV, O. et al. (2009): Feedbacks of windthrow for Norway spruce and Scots pine stands under changing climate. Environ. Res. Lett. 4 (2009) 045019 (10pp). IOP Publishing

Polnischer Nationalpark Riesengebirge, Klima [<http://kpnmab.pl/pl/karkonoskie-klimaty,97>; download 02.07.2013]

Polska, Offizielles Förderportal der Republik Polen. Praktische Infos: Klima

[<http://de.poland.gov.pl/Klima,574.html>; download 02.07.2013]

PRYOR, S. C. et al. (2005): Climate change impacts on wind speeds and wind energy density in northern Europe: empirical downscaling of multiple AOGCMs. Clim Res Vol. 29: 183–198, 2005

- Regionaler Klimaatlas Deutschland, Regionale Klimabüros, Helmholtz-Gesellschaft. [<http://www.regionaler-klimaatlas.de/klimaatlas/2071-2100/jahr/mittlere-windgeschwindigkeit/sachsen/uebereinstimmung.html>; download 09.07.2013]
- ROCKEL, B. & WOTH, K. (2007): Extremes of near-surface wind speed over Europe and their future changes as estimated from an ensemble of RCM simulations. *Climatic Change* (2007) 81:267–280
- SMUL (2008): Sachsen im Klimawandel. Eine Analyse. Eigenverlag des Sächs. Staatsministeriums für Umwelt & Landwirtschaft
- Tourismuseite der Tschechischen Republik: Jeseníky (Altwatergebirge)
[<http://www.czech.cz/de/Touristen/Was-unternehmen,-Sehenswertes/Interessante-Platze/Jeseniky-Altwatergebirge>; download 02.07.2013]
- Tschechien. Illustrierter Reiseführer mit landeskundlicher Einführung. Baedeker, 2006
- WALTHER, A. et al. (2006): A high resolution reference data set of German wind velocity 1951–2001 and comparison with regional climate model results. *Meteorologische Zeitschrift*, Vol. 15 , No. 6, 585-596 (December 2006)

Herausgeber:

Sächsisches Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie (LfULG)
Pillnitzer Platz 3, 01326 Dresden
Telefon: +49 351 2612-0
Telefax: +49 351 2612-1099
E-Mail: lfulg@smul.sachsen.de
www.smul.sachsen.de/lfulg

Autoren:

Michaela Surke, Majana Heidenreich, Valeri Goldberg
Technische Universität Dresden
Fakultät Umweltwissenschaften/Professur für Meteorologie
01062 Dresden
Telefon: +49 351 463-31340
Telefax: +49 351 463-31302
E-Mail: meteorologie@tu-dresden.de
www.tu-dresden.de/meteorologie

Redaktion:

Susann Schwarzak
Abteilung Klima, Luft, Lärm, Strahlen/Referat Klima, Luftqualität
Söbrigener Str. 3a, 01326 Dresden
Telefon: +49 351 2612-5511
Telefon: +49 351 2612-5099
E-Mail: Susann.Schwarzak@smul.sachsen.de

Titelfoto:

Kraftwerk Turów, wikimedia.org/Vondraussen, CC BY 3.0

Redaktionsschluss:

11.07.2013

Hinweis:

Die Broschüre steht nicht als Printmedium zur Verfügung, kann aber als PDF-Datei unter <https://publikationen.sachsen.de/bdb/> heruntergeladen werden.

Verteilerhinweis:

Diese Informationsschrift wird von der Sächsischen Staatsregierung im Rahmen ihrer verfassungsmäßigen Verpflichtung zur Information der Öffentlichkeit herausgegeben.

Sie darf weder von Parteien noch von deren Kandidaten oder Helfern im Zeitraum von sechs Monaten vor einer Wahl zum Zwecke der Wahlwerbung verwendet werden. Dies gilt für alle Wahlen.

Missbräuchlich ist insbesondere die Verteilung auf Wahlveranstaltungen, an Informationsständen der Parteien sowie das Einlegen, Aufdrucken oder Aufkleben parteipolitischer Informationen oder Werbemittel. Untersagt ist auch die Weitergabe an Dritte zur Verwendung bei der Wahlwerbung. Auch ohne zeitlichen Bezug zu einer bevorstehenden Wahl darf die vorliegende Druckschrift nicht so verwendet werden, dass dies als Parteinnahme des Herausgebers zu Gunsten einzelner politischer Gruppen verstanden werden könnte.

Diese Beschränkungen gelten unabhängig vom Vertriebsweg, also unabhängig davon, auf welchem Wege und in welcher Anzahl diese Informationsschrift dem Empfänger zugegangen ist. Erlaubt ist jedoch den Parteien, diese Informationsschrift zur Unterrichtung ihrer Mitglieder zu verwenden.