

## ZUKUNFTSPROJEKTIONEN DER WINDGESCHWINDIGKEIT AN DER STATION ZUGSPITZE

JUCUNDUS JACOBEIT<sup>1</sup>, SEVERIN KASPAR<sup>1</sup>, CHRISTOPH BECK<sup>1</sup>, ANDREAS PHILIPP<sup>1</sup>

<sup>1</sup> UNIVERSITÄT AUGSBURG, INSTITUT FÜR GEOGRAPHIE, ALTER POSTWEG 118, 86159 AUGSBURG

E-MAIL: JUCUNDUS.JACOBEIT@GEO.UNI-AUGSBURG.DE

**Zusammenfassung:** Künftige Änderungen der mittleren täglichen Windgeschwindigkeit an der Station Zugspitze werden mit verschiedenen statistischen Downscaling-Modellen abgeschätzt. Während bei jährlicher Betrachtung kein langfristiger Trend identifiziert werden kann, ergibt die saisonale Differenzierung eine klare Unterscheidung in die beiden Jahreszeiten Winter und Frühjahr mit zunehmender mittlerer täglicher Windgeschwindigkeit sowie Sommer und Herbst mit abnehmenden Werten, jeweils für zwei Szenarien (RCP4.5, RCP8.5) und zwei Projektionszeiträume (2021-2050, 2071-2100).

**Abstract:** Future changes in mean daily wind speed at the high-alpine station Zugspitze are assessed by various statistical downscaling techniques. On an annual basis, no long-term trend can be identified, whereas the seasonal distinction leads to a clear contrast between winter/spring with increasing mean daily wind speed and summer/autumn with decreasing values, both for two scenarios (RCP4.5, RCP8.5) and two projection periods (2021-2050, 2071-2100).

### Hintergrund

In den vorangegangenen Wissenschaftlichen Resultaten ist bereits über künftige jährliche bzw. saisonale Niederschlagsänderungen u. a. an der Zugspitze berichtet worden (Kaspar et al., 2017; Jacobeit et al., 2019). Da dies immer

auch im Kontext wasserhaushaltlicher Betrachtungen im Zuge des fortschreitenden Klimawandels steht, sind auch weitere Größen mit Einfluss auf die sich ändernde Wasserbilanz von grundsätzlichem Interesse. Dazu gehört auch die Windgeschwindigkeit mit ihrer dynamischen Beeinflussung der Verdunstung. Auch stellt die Intensität von Austauschprozessen generell eine relevante Größe im Klimawandel dar. Mithilfe der Windgeschwindigkeitsmessungen an der Station Zugspitze als Prädiktand lassen sich statistische Downscaling-Modelle erstellen, die bei hinreichender Performanz auch für Zukunftsprojektionen genutzt werden.

### Methodik

Die den Abschätzungen zugrundeliegende Methodik ist ausführlich in Kaspar (2020) beschrieben, wesentliche Züge sind auch in den vorangegangenen Wissenschaftlichen Resultaten der UFS bereits dargelegt worden (Kaspar et al. 2017; Jacobeit et al., 2019). Zusammengefasst basieren die Untersuchungen auf verschiedenen statistischen Downscaling-Ansätzen: künstliche neuronale Netze (McCulloch et al., 1947), klassifikationsbasierte Verfahren (Philipp et al., 2016), eine Kombination aus beiden Techniken sowie eine Synthese aus allen diesen Ansätzen.

Kalibriert werden die Downscaling-Modelle mit großskaligen atmosphärischen Prädiktoren aus Reanalyse-Datensätzen (Compo et al., 2011) zuzüglich einer 15-fachen Kreuzvalidierung (Kaspar, 2000). Es werden

zwei Projektionszeiträume (2021-2050, 2071-2100) sowie zwei Szenarien zugrunde gelegt (RCP4.5, RCP8.5, vgl. van Vuuren et al., 2011). Zur Zukunftsabschätzung der Windgeschwindigkeit werden die großskaligen Prädiktorenwerte aus fünf verschiedenen globalen Klimamodellen des CMIP5-Ensembles verwendet (Taylor et al., 2012), im Fall des Hamburger Erdsystemmodells MPI-ESM-LR zusätzlich mit drei Realisationen. Damit ergeben sich unter Berücksichtigung der 15 alternativen Downscaling-Modellkalibrierungen insgesamt 105 Abschätzungen ( $7 \times 15$ ) für jeden betrachteten Einzelfall. Den Boxplots von Abbildung 2 liegt die Gesamtheit dieser Abschätzungen zugrunde, signifikant positive bzw. negative prozentuale Windgeschwindigkeitsänderungen im Vergleich zur historischen Referenzperiode 1971-2000 (Test nach Mann und Whitney (1947), Irrtumswahrscheinlichkeit 5 %) werden eigens in grünen bzw. roten Zahlen spezifiziert.

### Zukunftsprojektionen der Windgeschwindigkeit

Blickt man zunächst auf die jährlich gemittelten Windgeschwindigkeiten (Abb. 1), so ist für die Zugspitze kein langfristiger Trend bis Ende des 21. Jahrhunderts zu erkennen, selbst im stärkeren RCP8.5 Szenario zeigen sich keine deutlichen Signale. Erst bei saisonal differenzierter Betrachtung treten systematische Änderungen in Erscheinung (Abb. 2): so ergeben sich im Winter und im Frühjahr mit nur einer einzigen Ausnahme über alle verschiedenen Downscaling-Ansätze hinweg sowie für beide Szenarien und beide Projektionszeiträume signifikante Zunahmen (bei 5 % Irrtumswahrscheinlichkeit) in den mittleren täglichen Windgeschwindigkeiten, während im Sommer und Herbst bei vereinzelt insignifikanten Fällen und einer gegenläufigen Ausnahme eine Abnahme der Windgeschwindigkeiten dominiert. Es existiert also eine

markante halbjährliche Gegensätzlichkeit, wobei jeweils die nachfolgende Übergangsjahreszeit noch mit der vorangehenden Solstitial-Jahreszeit korrespondiert. Im Frühjahr nehmen die mittleren täglichen Windgeschwindigkeiten an der Zugspitze sogar stärker zu als im Winter. Bei Kaspar (2020) werden zusätzlich Indizes erhöhter Windstärken herangezogen: danach deuten alle signifikanten Änderungen auf eine Zunahme im jährlichen Maximum der mittleren täglichen Windgeschwindigkeit hin, und bei der Anzahl der Tage über 12 m/s lässt sich ebenfalls (mit Ausnahme Herbst) ein Anstieg konstatieren.

### Resümee

Die klimawandelbedingte Zunahme der mittleren täglichen Windgeschwindigkeiten im Winter sowie ihre Abnahme im Sommer stehen in Übereinstimmung mit der generellen großräumigen Zirkulationsentwicklung: so zeigen die meisten Klimamodelle im Zuge der künftigen globalen Erwärmung eine winterliche Verschiebung der Nordatlantischen Oszillation (NAO) zu ihrer positiven Phase, womit in Mitteleuropa tendenziell höhere Windgeschwindigkeiten einhergehen. Im Sommer dagegen macht sich im Verlauf des 21. Jahrhunderts wachsender antizyklonaler Einfluss bemerkbar (Riediger & Gratzki, 2014), der tendenziell mit niedrigeren Windgeschwindigkeiten verbunden ist. Beides lässt sich also mit statistischen Downscaling-Techniken für die Station Zugspitze bestätigen. Bemerkenswert ist allerdings, dass sich in diesem Hochgebirgsraum die gegensätzlichen Änderungen auch noch in die jeweilige Folgejahreszeit fortsetzen. Dabei manifestiert sich mutmaßlich ein Fortwirken des antizyklonalen Sommerregimes bis in den Herbst hinein, während die frühjährliche Windstärkezunahme mit einer weiter gesteigerten Begünstigung orographisch bedingter Turbulenzen im Übergang vom Winter- zum Sommerregime zusammenhängen könnte.

## Literatur

Compo, G.P. et al.: The Twentieth Century Reanalysis Project. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 137, 1-28, 2011.

Jacobeit, J., Kaspar, S., und Philipp, A.: Zukunftsprojektionen saisonaler Niederschläge an den Hochgebirgsstationen Zugspitze und Sonnblick. UFS – Wissenschaftliche Resultate, 2017/2018, 34-38, 2019.

Kaspar, S., Philipp, A., und Jacobeit, J.: Statistisches Downscaling meteorologischer Variablen mit hydrologischer Relevanz an der Station Zugspitze und der Station Hoher Sonnblick. UFS – Wissenschaftliche Resultate, 2015/2016, 57-59, 2017.

Kaspar, S.: Statistical Downscaling of Variables with Hydrological Importance in the Alpine Region via Machine Learning Techniques. Dissertation Universität Augsburg, 258 pp., 2020.

Mann, H.B., und Whitney, R.: On a test of whether one of two random variables is stochastically larger than the other. The Annals of mathematical statistics, 50-60, 1947.  
Europe. Meteorologische Zeitschrift, 23, 231-252, 2014.

Taylor, K.E., Stouffer, R.J., und Meehl, G.A.: An Overview of CMIP5 and the Experiment Design. Bulletin of the American Meteorological Society, 93, 485-489, 2012.

McCulloch, W.S. und Pitts, W.: A logical calculus of the ideas immanent in nervous activity. The Bulletin of mathematical biophysics, 5, 115-133, 1943.

Philipp, A., Beck, C., Huth, R., und Jacobeit, J.: Development and comparison of circulation type classifications using the COST 733 dataset and software. International Journal of Climatology, 36, 2673-2691, 2016.

Riediger, U., und Gratzki, A.: Future weather types and their influence on mean and extreme climate indices for precipitation and temperature in Central

Van Vuuren et al.: The representative concentration pathways: an overview. Climatic Change, 109, 5-31, 2011.

## Danksagung

Die Dissertationsstudien von *Severin Kaspar* sind im Rahmen des Teilprojekts „Klimawandel und Wasserbilanz in Hochgebirgsregionen“ durchgeführt worden, das als Bestandteil des Verbundprojekts „Virtuelles Alpenobservatorium“ durch das Bayerische Staatsministerium für Umwelt und Verbraucherschutz gefördert worden ist.

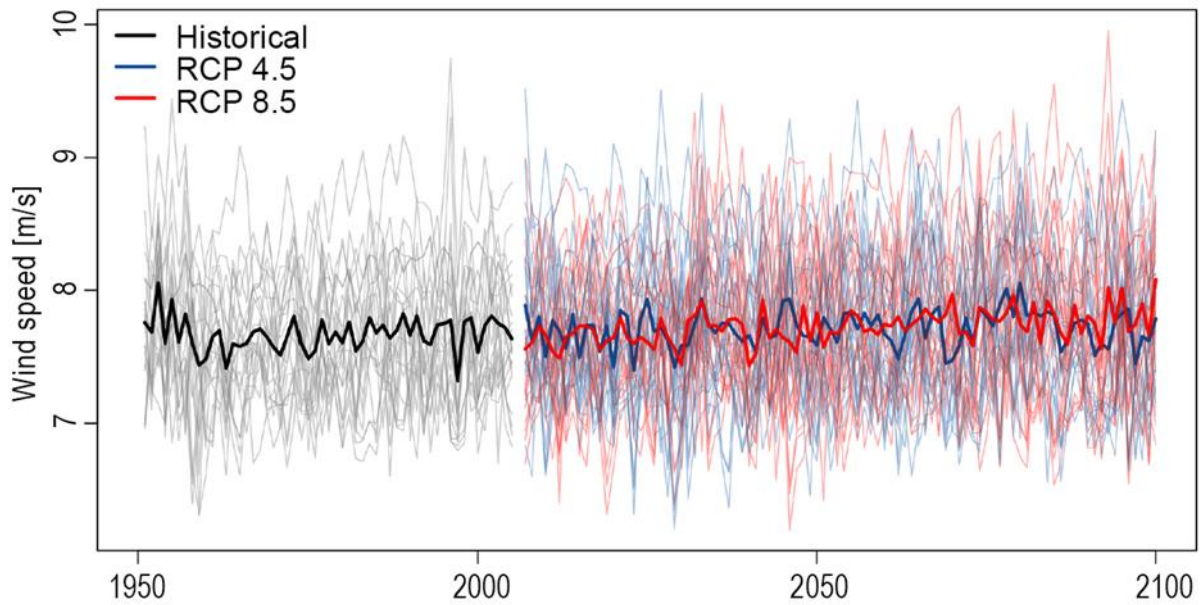


Abb. 1: Jährlich gemittelte tägliche Windgeschwindigkeitsmittel für die Station Zugspitze resultierend aus statistischem Downscaling großskaliger Prädiktoren aus globalen Erdsystemmodellen für den Zeitraum 1950-2100 (historische Simulation sowie projiziert gemäß der Szenarien RCP 4.5 bzw. RCP 8.5). Dicke Linien repräsentieren das übergreifende Mittel der entsprechenden Downscaling Ergebnisse. Dünne Linien zeigen das Mittel der Kreuzvalidierung für eine Kombination eines bestimmten Downscaling-Modells und eines bestimmten Erdsystemmodells (nach Kaspar 2020).

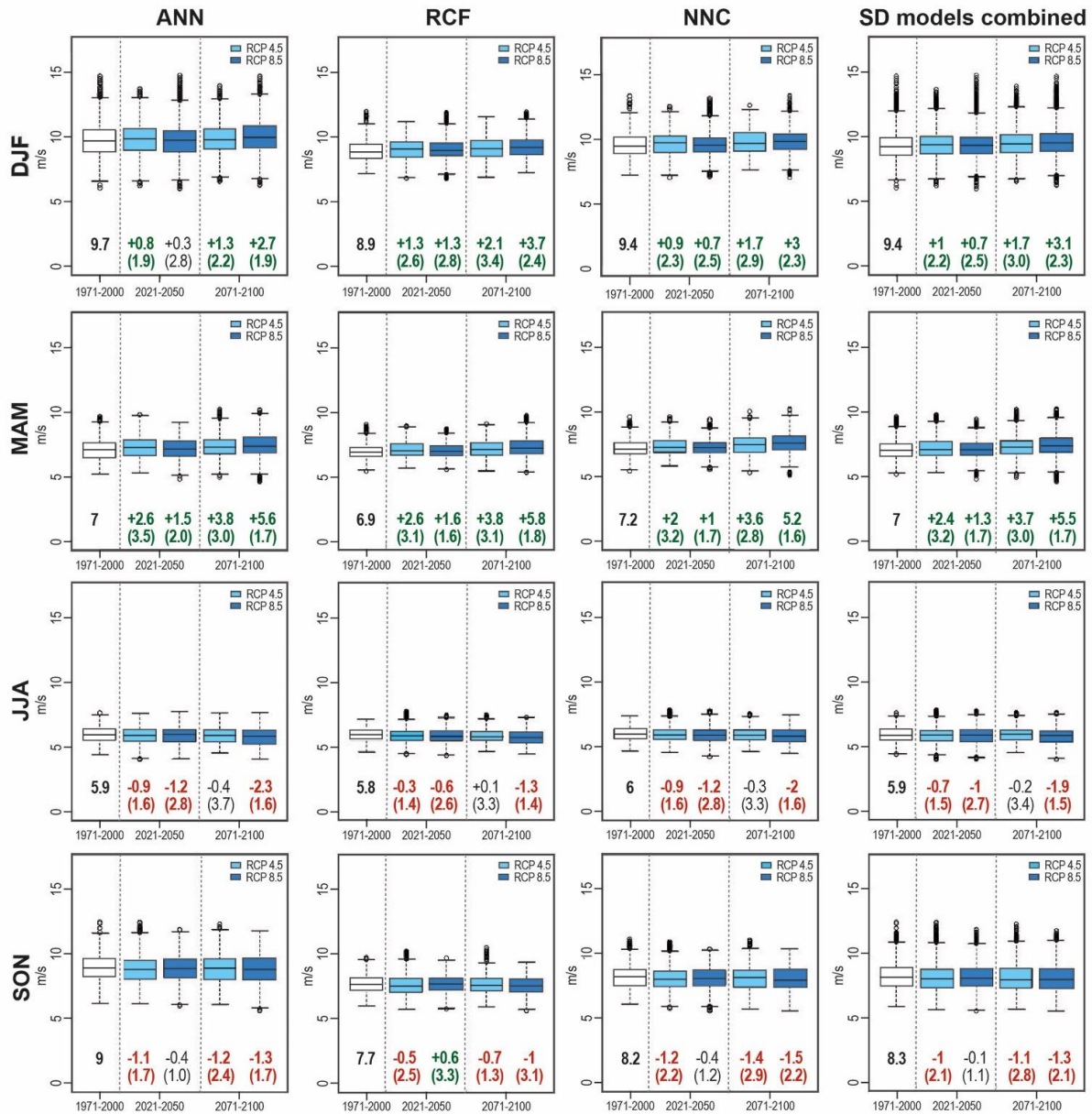


Abb. 2: Boxplots der modellierten saisonalen (DJF: Dez, Jan, Feb) mittleren täglichen Windgeschwindigkeiten (m/s) für die Station Zugspitze nach verschiedenen statistischen Downscaling-Ansätzen (ANN: Artificial neural networks; RCF: Reference class forecast, basierend auf Zirkulationstypklassifizierungen; NNC: Neural networks and classification; SD: Statistical downscaling models combined). Die Boxplots zeigen die Verteilungen aus jeweils 105 Modellläufen (siehe Text). Die fetten schwarzen Zahlen geben den jeweiligen Mittelwert für den historischen Referenzzeitraum 1971-2000 wieder. Die Zukunftsprojektionen werden für zwei Zeiträume (2021-2050, 2071-2100) und zwei Szenarien (RCP4.5, RCP8.5) gezeigt. Grüne/rote Zahlen geben die positiven/negativen Windgeschwindigkeitsänderungen wieder (in Prozent des historischen Mittelwerts), schwarze Zahlen insignifikante Änderungen (0.05 Niveau). Die Werte in Klammern bezeichnen die Standardabweichung aus den Ergebnissen der jeweils 105 Modellläufe (nach Kaspar 2020).