



Gesellschaft für Umweltmeteorologie mbH

Vorläufige Dokumentation
über den
anemos Windatlas
für Skandinavien 10 km

anemos
Gesellschaft für Umweltmeteorologie mbH
Böhmsholzer Weg 3, D-21391 Reppenstedt
Tel.: 04131-8308-100
www.anemos.de | kontakt@anemos.de



Deutsche
Akreditierungsstelle
D-PL-17580-01-00

Inhaltsverzeichnis	Seite
1. Einleitung.....	3
2. Das WRF-Modell.....	4
3. Eingangsdaten	5
4. Optimierung der Modelleinstellungen	5
5. Statistische Verifikation mit Windmessungen als Vorbereitung für das Remodelling.....	5
6. Literatur	7

1. Einleitung

Der neue **anemos Windatlas** für Skandinavien 10 km (**SK-10km.E5**) stellt eine langjährige Zeitreihen-Datenbasis der atmosphärischen Parameter Windgeschwindigkeit, Windrichtung, Lufttemperatur, Luftdruck, relative Feuchte, Luftdichte, Niederschlag, lang- und kurzwelliger Einstrahlung dar. Die zeitliche Auflösung des Windatlas beträgt 10 Minuten und deckt mit einer räumlichen Auflösung von 10 x 10 km² vollständig Nordeuropa (Skandinavien, Ostsee und Baltikum) ab. Die Entwicklung des anemos Windatlas ist in Abbildung 1 als Prozesskette dargestellt. Dabei gibt es drei wesentliche Punkte:

- Optimierung der Modelleinstellungen mit anschließender WRF Hauptsimulation (Downscaling)
- *Windatlas Remodelling in Entwicklung!* (Optimierung der WRF Hauptsimulation)
- Verifikation der WRF Hauptsimulation mit Windmessungen

Genauere Erläuterungen der Punkte aus Abb. 1 befinden sich in den folgenden Abschnitten.

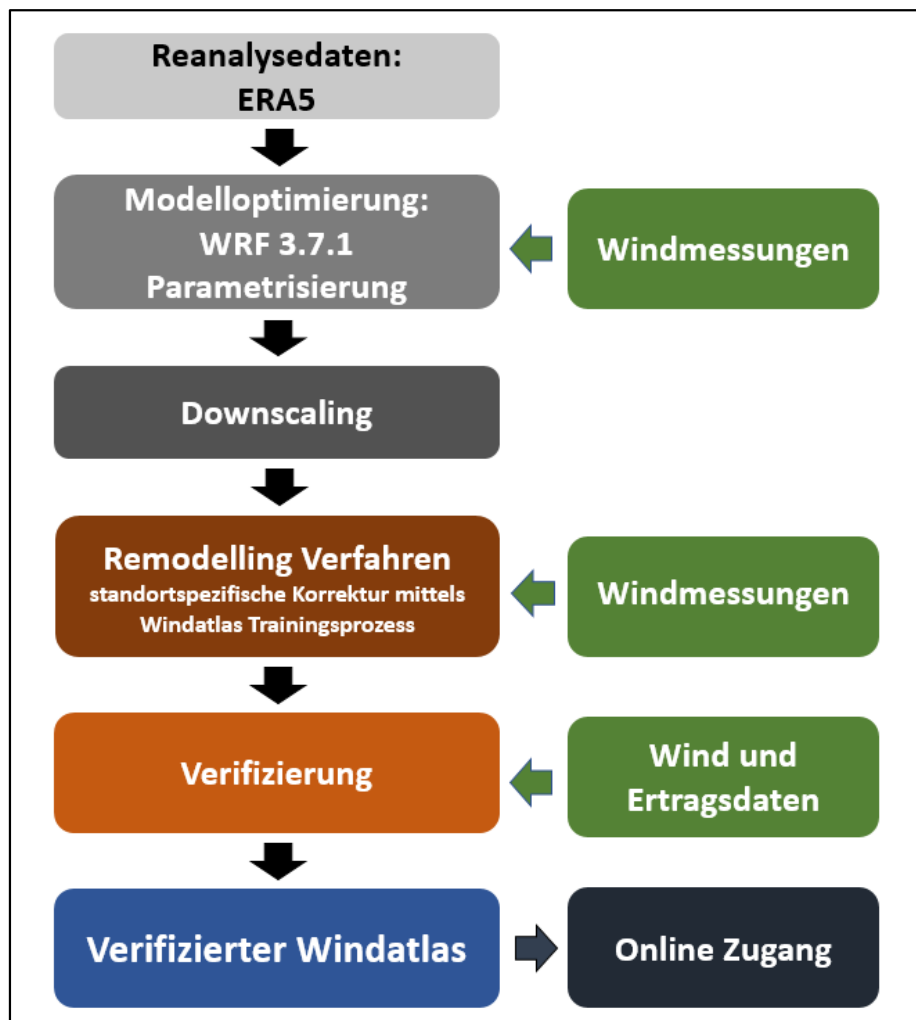


Abb. 1: Entwicklungsschritte des neuen anemos Windatlas Skandinavien 10 km.

2. Das WRF-Modell

Der **SK-10km.E5** wurde mit dem mesoskaligen numerischen Wettervorhersagemodell **WRF** (**Weather Research & Forecasting Model** mit der Version 3.7.1) simuliert. Das WRF-Modell ist ein „state of the art“ Wettervorhersagesystem (gekoppeltes Atmosphären-Landoberflächen Modell) der nächsten Generation und wurde in den 1990 er Jahren am **NCAR** (**National Center for Atmospheric Research**) mitentwickelt.

WRF kalkuliert nicht-hydrostatisch (explizite Berechnung der Vertikalwindgeschwindigkeit) und berechnet für jeden Zeitschritt die Navier-Stokes Gleichungen, welche die atmosphärische Strömung beschreiben. Mesoskalige Prozesse, wie zum Beispiel Land-See Windsysteme, können durch die hohe zeitliche und räumliche Auflösung (10 min, 10 km) vom Modell hinreichend gut aufgelöst werden. Für mikrophysikalische Prozesse sowie Konvektion, Strahlung, oder Grenzschichtprozesse werden Parametrisierungen verwendet.



Abb. 2: Domain des anemos Windatlas Skandinavien 10 km. Domain mit 10 x 10 km².

Für die Simulation des **SK-10km.E5** Windatlas wird eine Domain verwendet (siehe Abb. 2). Die Domain deckt weite Teile Nordeuropas ab und besitzt eine räumliche Auflösung von 10 x 10 km².

Während der Simulation werden jede Stunde neue Input-Daten in das WRF-Modell assimiliert, welche das Modell in die richtige Richtung forcieren (Nudging-Verfahren). Die atmosphärischen Zustandsvariablen werden im Modell in 10-Minuten Schritten für jeden Gitterpunkt ausgegeben. Die Simulation umfasst den Zeitraum von 2007 bis heute und wird kontinuierlich erweitert. Die vertikale Modellstruktur der Atmosphäre ist mit 25 Höhen-Schichten sehr hoch aufgelöst. Allein in den besonders für Windenergieanlagen relevanten unteren 300 m liegen neun der 25 Vertikallevel.

3. Eingangsdaten

Als Antriebsdaten des WRF-Modells werden sowohl Bodendaten (Bodentemperatur, Bodenfeuchte, Schnee, etc.) als auch alle wichtigen atmosphärischen Parameter (Wind, Temperatur, Druck, relative Feuchte, etc.) benötigt. Für den **SK-10km.E5** werden die neuen, weltweit verbreiteten ERA5 Reanalysedaten als atmosphärische Antriebs- und Eingangsdaten verwendet. Die ERA5 Reanalysedaten sind im Vergleich zu den vorherigen ERA-Interim Reanalysedaten qualitativ hochwertiger hinsichtlich Konsistenz und Korrelation. Somit können die Vorteile der ERA5 Reanalysedaten wie Konsistenz, Homogenität, Länge der Zeitreihe, ständige Aktualisierung, Verfügbarkeit über Land und Meer durch die Simulation mit dem WRF-Modell erhalten bzw. verstärkt werden. Auf der anderen Seite werden mit dem **SK-10km.E5** die Nachteile der ERA5 Reanalysedaten wie die relativ geringe räumliche (ca. 30 x 30 km²) und zeitliche Auflösung (1 h) überwunden.

Die ERA5 Reanalysedaten werden ebenfalls für die Bodendaten verwendet. Dadurch ist eine Konsistenz der Strahlungs- und Wärmeflüsse zwischen Boden und Atmosphäre gegeben. Die Bodendaten besitzen durchgehend vier Bodenlevel und beinhalten u.a. Bodenfeuchte, Bodentemperatur und Schnee.

Die Geländehöhen sind dem **SRTM** Datensatz (**S**huttle **R**adar **T**opography **M**ission, USGS EROS Data Center) entnommen und dem Modellgitter entsprechend interpoliert. Die Daten wurden im Jahre 2000 erhoben und stehen in einer horizontalen Auflösung von ca. 90 m zur Verfügung. Die vertikale Auflösung beträgt 1 m. Alle Informationen über die Vegetation und Rauigkeiten innerhalb des Simulationsgebietes liefert der USGS Datensatz (United States Geological Survey). Die Daten stehen auf einem Modellgitter mit einer räumlichen Auflösung von 1 km zur Verfügung.

4. Optimierung der Modelleinstellungen

Vor der eigentlichen Hauptsimulation wurden die Modelleinstellungen und Parametrisierungen (wie zum Beispiel Grenzschichtschema, Bodenschema, Strahlungsschema, etc.) getestet und für die relevanten atmosphärischen Parameter (Windgeschwindigkeit und Windrichtung) optimiert. Die Modelleinstellungen wurden mit dem Windatlas für Deutschland (D-3km.M2) und Frankreich (F-3km.M2) verglichen und mit Windmessungen (Messmasten und LiDAR) verifiziert (siehe Abb. 1). Durch diese Testphase zeigt sich, wie das bodennahe Windfeld auf unterschiedliche Parametrisierungen und Schemata reagiert (Sensitivitätstests). Die den Beobachtungen am nächsten kommende Einstellung wird anschließend für die Hauptsimulation (> 10 Jahre) verwendet.

5. Statistische Verifikation mit Windmessungen als Vorbereitung für das Remodelling

Die wichtigste Aufgabe nach der Durchführung der Hauptsimulation ist die intensive Verifikation anhand zahlreicher Windmessungen. Für die Verifikation des **SK-10km.E5** wurden insgesamt 18 Messungen verwendet.

Man erhält aus der Verifikation die Prognosegüte und Qualität der Hauptsimulation. Verifiziert werden statistische Kenngrößen wie Mittelwert, Bestimmtheitsmaß (R^2) bzw. Korrelation (R), Bias, RMSE und Extremwerte (QQ-Verteilung). Außerdem werden Vertikalprofile, Tagesgänge,

Windrosen, Häufigkeitsverteilungen mit Weibull-Parametern überprüft. Die grobe Verteilung der Standorte ist in Abb. 3 durch rote Kreise dargestellt. Die Ergebnisse der Verifikation werden in Abb. 4 exemplarisch für die Messhöhen zwischen 40 m und 100 m gezeigt. Hierfür wird der Bias der Windgeschwindigkeit an den vier Offshore- und 14 Onshore-Stationen gebildet und graphisch dargestellt. Abb. 4 zeigt die Abweichung in Prozent zwischen der Windgeschwindigkeit jeder Messung und dem Windatlas (Rohdaten). Auf Tagesbasis ergibt sich für die mittlere Korrelation (R) ein Wert von 94.3% und der Bias liegt bei +2.5%. Die Standardabweichung liegt mit 5.92% unter der 6%-Marke.

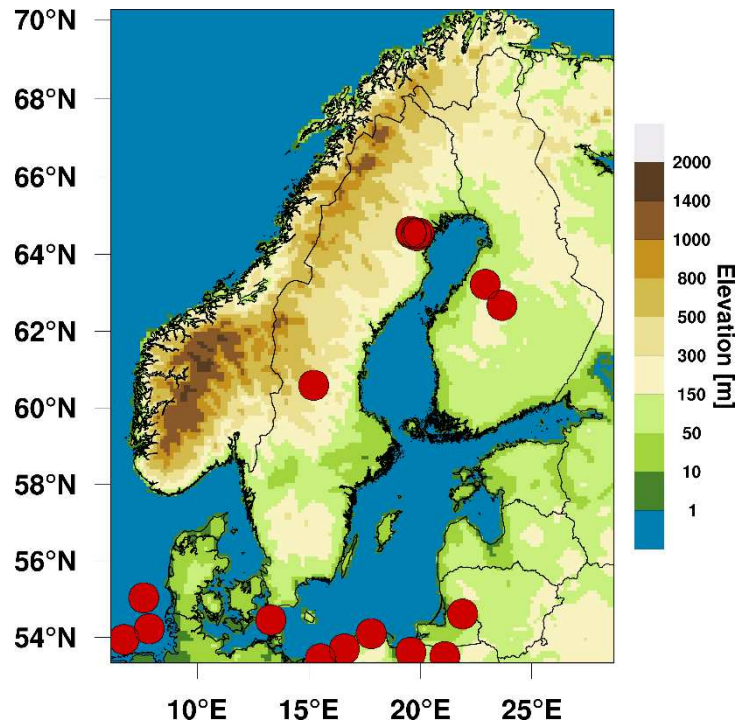


Abb. 3: Schematische Darstellung der für die Verifikation verwendeten Messungen.

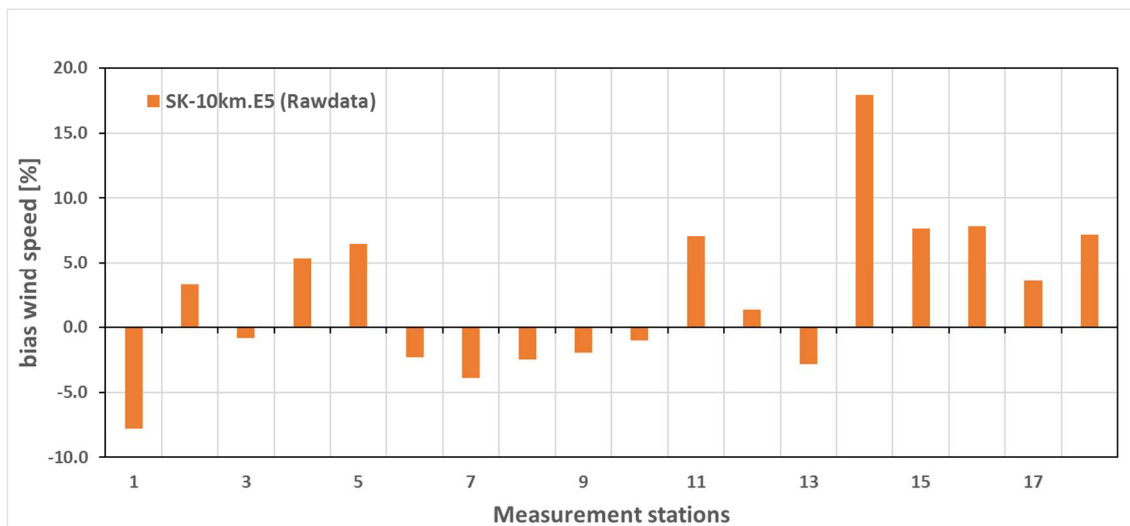


Abb. 4: Bias der mittleren Windgeschwindigkeit zwischen den 18 internen Messungen und WRF Output (orange). Die Messhöhen liegen zwischen 40 m und 120 m über Grund.

6. Literatur

Christoffer, J. und M. Ulbricht-Eissing, 1989: Die bodennahen Windverhältnisse in der Bundesrepublik Deutschland, Bericht des DWD, Nr. 147

Farr, T. G., et al., 2007: The Shuttle Radar Topography Mission, Rev. Geophys., 45, RG2004, doi:10.1029/2005RG000183; <http://www2.jpl.nasa.gov/srtm/srtmBibliography.html>

Gelaro, R. et al., 2017: The Modern-Era Retrospective Analysis for Research and Applications, Version 2 (MERRA-2), AMS, doi: 10.1175/JCLI-D-16-0758.1

Howard, Tom and Clark Peter, 2007: Correction and downscaling of NWP wind speed forecasts, Meteorol. Appl. 14: 105-116

Kalnay E, Kanamitsu M, Kistler R, Collins W, Deaven D, Gandin L, Iredell M, Saha S, White G, Woollen J, Zhu Y, Chelliah MW, Ebisuzaki W, Higgins J, Janowiak KC, Mo C, Ropelewski A, Leetmaa R, Reynolds, Jenne R (1996) The NCEP/NCAR reanalysis project. Bull. Am. Meteorol. Soc., 77:437–471

Keil, M., M. Bock, T. Esch, A. Metz, S. Nieland, A. Pfitzner, 2010: CORINE Land Cover Aktualisierung 2006 für Deutschland. Abschlussbericht zu den F+E Vorhaben UBA FKZ 3707 12 200 und FKZ 3708 12 200, Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V., Deutsches Fernerkundungsdatenzentrum Oberpfaffenhofen, Januar 2010

Mengelkamp, H.-T., 2015: Wind-, Ertrags- und Erlösgutachten für Windenergieanlagen, promet – meteorologische Fortbildung, Hrsg. Deutscher Wetterdienst, Jahrg. 39, Nr. 3/4, 193-202

Mengelkamp, H.-T., 1988: On the energy output estimation of wind turbines, Int. Journal of Energy Research, 12, 113-123

Mengelkamp, H.-T., 1999: Wind Climate Simulation over Complex Terrain and Wind Turbine Energy Output Estimation, Theor. Appl. Climatol, 63, 129-139

Mengelkamp, H.-T., H. Kapitza und U. Pflüger, 1997: Statistical-dynamical downscaling of wind climatologies, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 67&68, 449-457

Mengelkamp, H.-T., T. Sperling, 2005: Windindizes werden von Produktionsdaten unabhängig, Erneuerbare Energien, 2, 25-27

Rienecker, M.M., M.J. Suarez, R. Gelaro, R. Todling, J. Bacmeister, E. Liu, M.G. Bosilovich, S.D. Schubert, L. Takacs, G.-K. Kim, S. Bloom, J. Chen, D. Collins, A. Conaty, A. da Silva, et al., 2011: MERRA: NASA's Modern-Era Retrospective Analysis for Research and Applications. J. Climate, 24, 3624-3648, doi:10.1175/JCLI-D-11-00015.1

Schneider, M., J. Bethke, A. Glücksmann, H.-T. Mengelkamp, 2016: Der neue anemos Windatlas für Deutschland – Korrektur und Verifikation mit Windmessungen und Ertragsdaten, 25. Spreewindtage, 09. November, Potsdam

Staffell, Iain and Pfenninger Stefan, 2016: Using bias-corrected reanalysis to simulate current and future wind power output, Energy 114, 1224-1239

Thogersen, M.L. et. al., Measure-Correlate-Predict Methods: Case Studies and Software Implementation, EMD International A/S

Traup, S. und B. Kruse, 1996: Winddaten für Windenergienutzer, Selbstverlag des Deutschen Wetterdienstes

Troen, I. und E.L. Petersen, 1989: European Wind Atlas. Risø National Laboratory, Roskilde. 656 pp. ISBN 87-550-1482-8

WRF, 2017, User's Guides for the Advanced Research WRF (ARW) Modeling System, Version 3, WRF users page, http://www2.mmm.ucar.edu/wrf/users/docs/user_guide_V3/contents.html