RAMBOLL

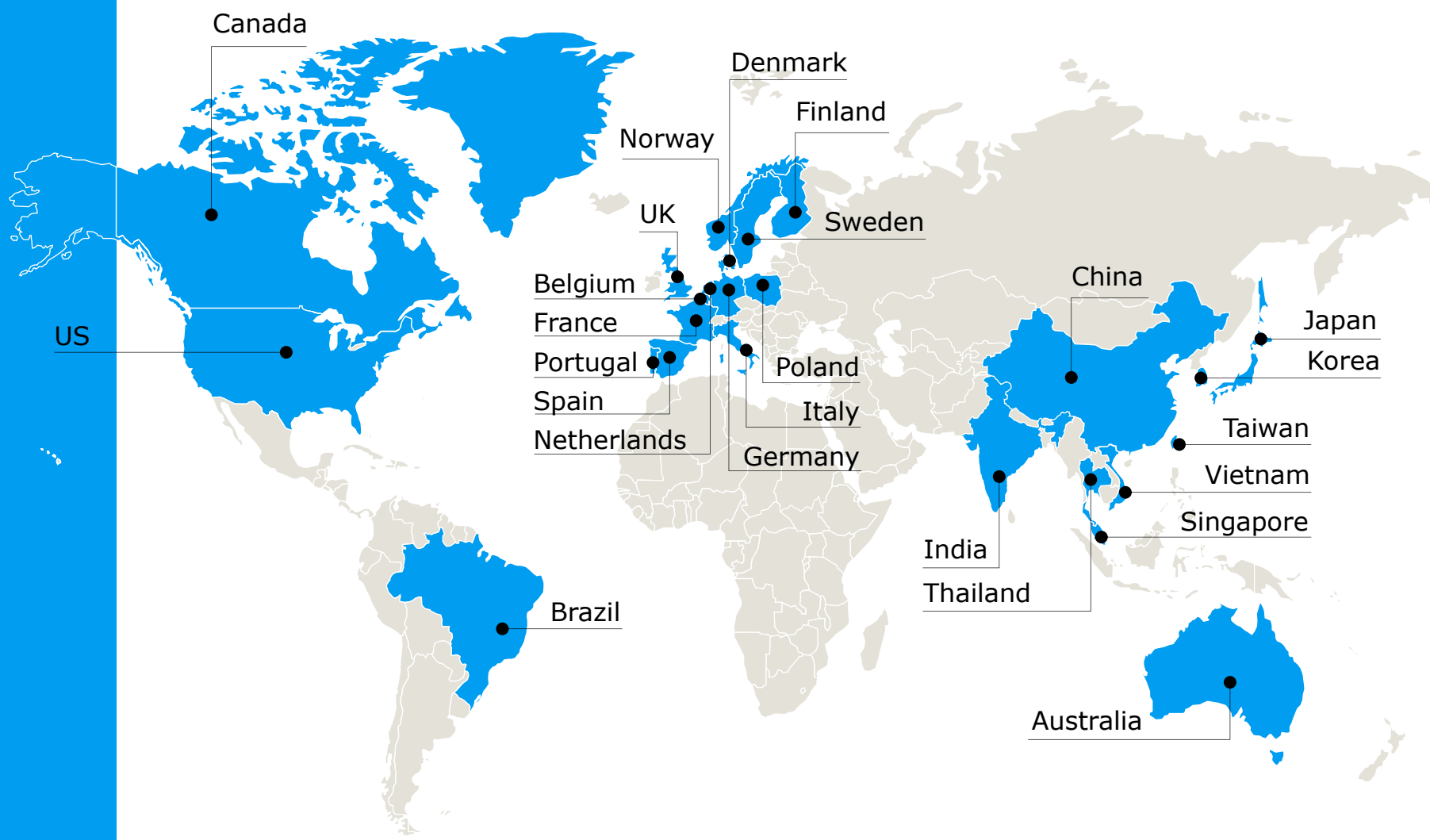
Bright ideas.
Sustainable change.

Ermittlung der möglichen Auswirkungen des Klimawandels auf die Ertragsbedingungen von Windenergie in Europa

Paul Hulsman

World-leading Wind Consultant

Nov 2024



900+
Wind experts

Offices in **26** countries

World-leading Wind Consultant

- Assisting clients from pre-feasibility to operation
- Proactive project management, consenting strategy and technical expertise
- Both strategic advice and hands-on expertise
- Trusted advisor with long-term client relationships

Asset Management
- O&M Strategy
- Lifecycle Planning & Support
- Structural Integrity Mgmt
- Lifetime extension

Strategic Advisory
- Strategic advisory for all aspects of wind farm development
- Technical, environmental & commercial due diligence
- Bid Support
- Market-entry & Go-to-market strategies
- Supply-chain assessment
- Sustainability assessments & evaluations

Foundation & Civil Design
- Bottom-fixed foundation design (monopile, jacket, gravity-based & novel concepts)
- Floating foundation design
- Substation foundation & topside design
- Port design
- Low-carbon design

Project Development
- Site identification & feasibility studies
- Technical concept development & selection
- Layout & micro-siting
- Cost estimation, LCOE analysis
- Procurement & Contracting
- Package & Project Management
- HSEQ Management
- Risk & Interface Management
- OFW-to-X

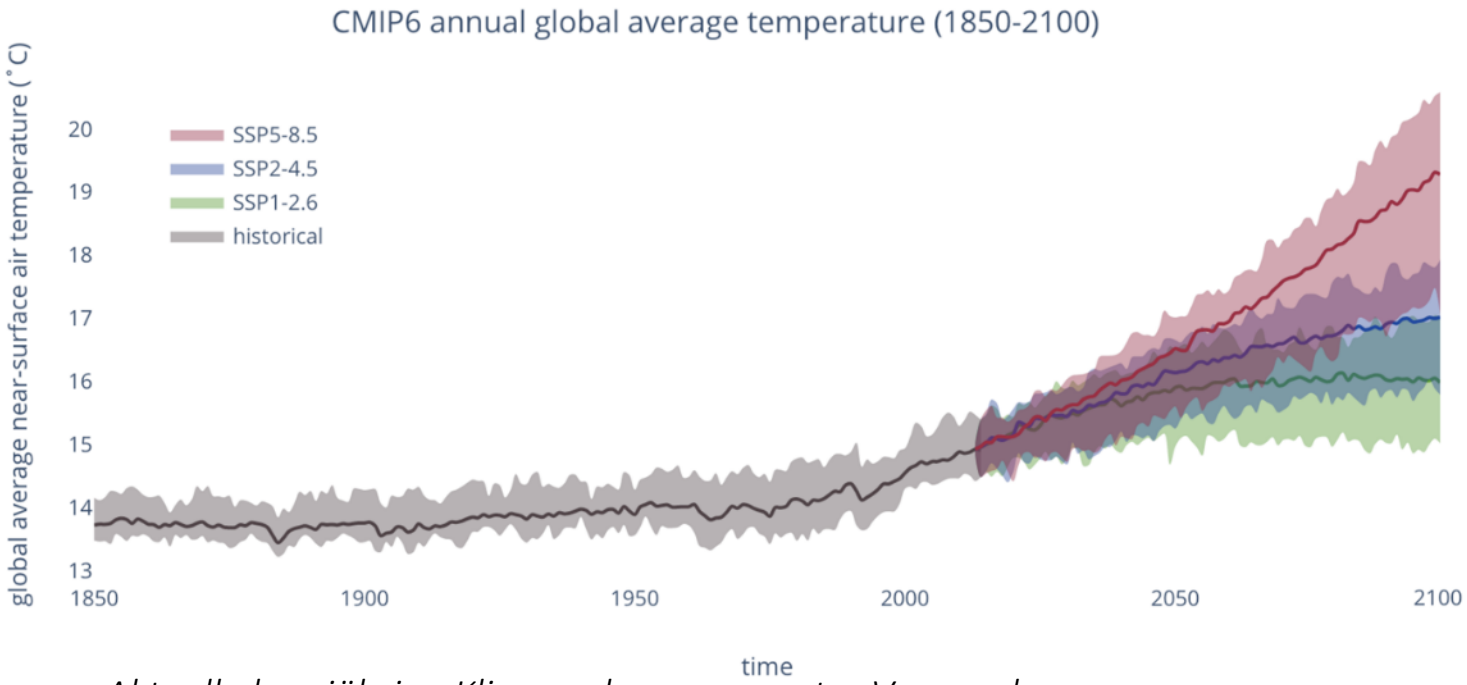
Transport & Installation Engineering
- Development of T&I concepts & equipment selection
- Development of construction schedules
- Port assessment

Wind & Site
- Planning & management of wind measurement campaigns
- Wind resource assessments
- Energy yield assessments
- Met-ocean studies
- Geophysical & geotechnical assessment and interpretation
- Digital ground modeling

Electrical Design
- System studies
- Grid connection concept
- LV, MV and HV grid design
- Substation design

Environmental & Social Advisory
- Environmental & Social Impact Assessments
- Constraint assessments
- Cultural heritage studies
- Co-existing strategies and nature-inclusive design

Klimawandel

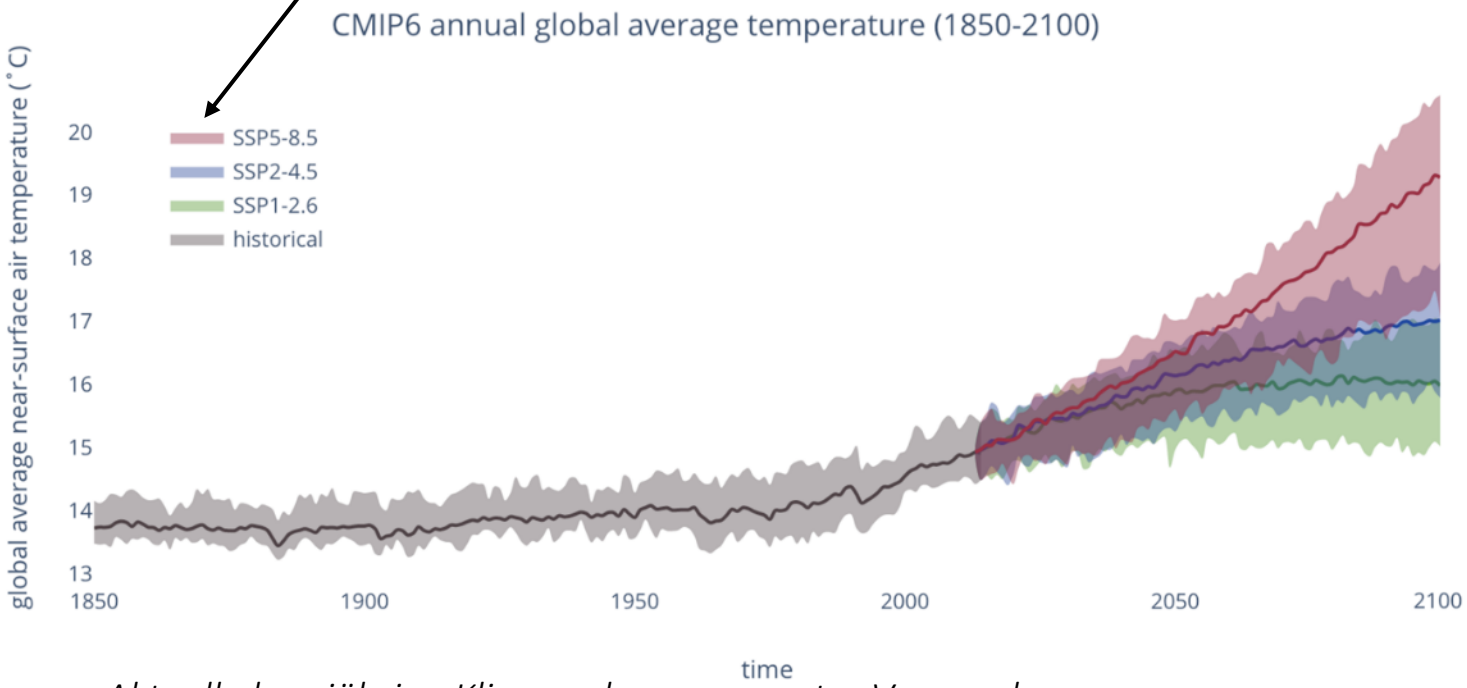


Aktuelle langjährige Klimavorhersagen unter Verwendung von globalen Klimamodellen (GKM) bereitgestellt durch das "Coupled Model Intercomparison Project Phase 6" (CMIP6). Quelle: Copernicus Climate Change Service, ECMWF.

Klimawandel

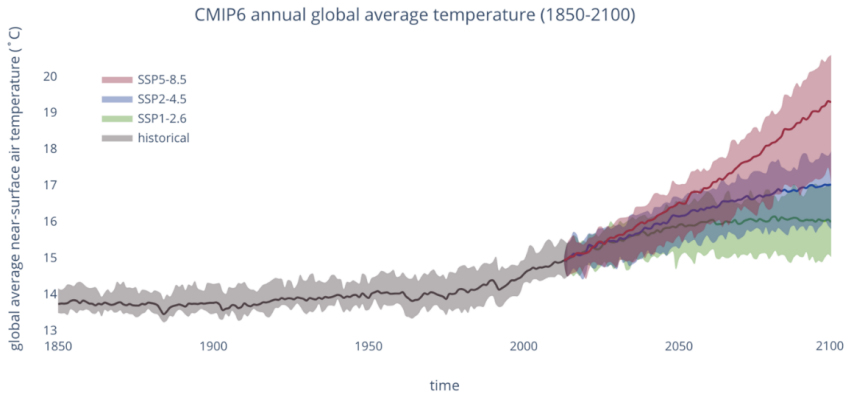
Shared Socioeconomic Pathways (SSP)

- Verschiedene Emissionsszenarien wurden simuliert, um globale sozioökonomische Entwicklungspfade zur Minderung und Anpassung an den Klimawandel zu bewerten.



Aktuelle langjährige Klimavorhersagen unter Verwendung von globalen Klimamodellen (GKM) bereitgestellt durch das "Coupled Model Intercomparison Project Phase 6" (CMIP6). Quelle: Copernicus Climate Change Service, ECMWF.

Klimawandel



Credit: Copernicus Climate Change Service, ECMWF.

Shared Socioeconomic Pathways (SSP)

SSP1-2.6

- **Niedriges Emissionsszenario** mit einer rasch zunehmenden Umstellung auf erneuerbare Energie und einem globalen Temperaturanstieg von unter 2°C („Best-Case-Szenario“).

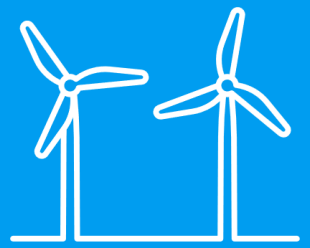
SSP2-4.5

- Prognosen folgen historischen Trends und zukünftigen **Emissionen variieren nicht wesentlich**, was zu einem globalen Temperaturanstieg über 2,5°C führt („realistisches Szenario“).

SSP5-8.5

- Eine energieintensive, auf fossilen Brennstoffen basierende Zukunft mit **hohen Emissionen**, die zu einem Temperaturanstieg von über 4,5°C führt („pessimistisches Szenario“).

Auswirkungen auf Wind-energie?



Bisherige Studien zeigen …

… bis zu 10 % Reduktion der Leistungsdichte in Hoch-Emissionsszenarien nahe Westirland

***Martinez, A. et. al., "Evolution of offshore wind resources in Northern Europe under climate change." 2023*

… leichte Reduzierung des Kapazitätsfaktors in der Nordsee

**Jung, C. et. al., "Future global offshore wind energy under climate change and advanced wind turbine technology", 2024

… Rückgang der Windenergiepotenziale, besonders in den mittleren Breiten der Nordhalbkugel

***Martinez, A. et. al. "Global wind energy resources decline under climate change", 2024*

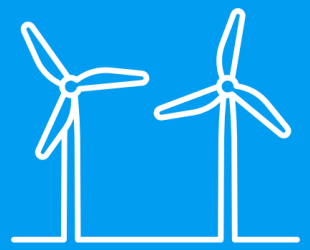
… Zunahme der Windenergiepotenziale in der Ostsee und angrenzenden Gebieten

***Carvalho, D. "Potential impacts of climate change on European wind energy resource under the CMIP5 future climate projections.", 2017*

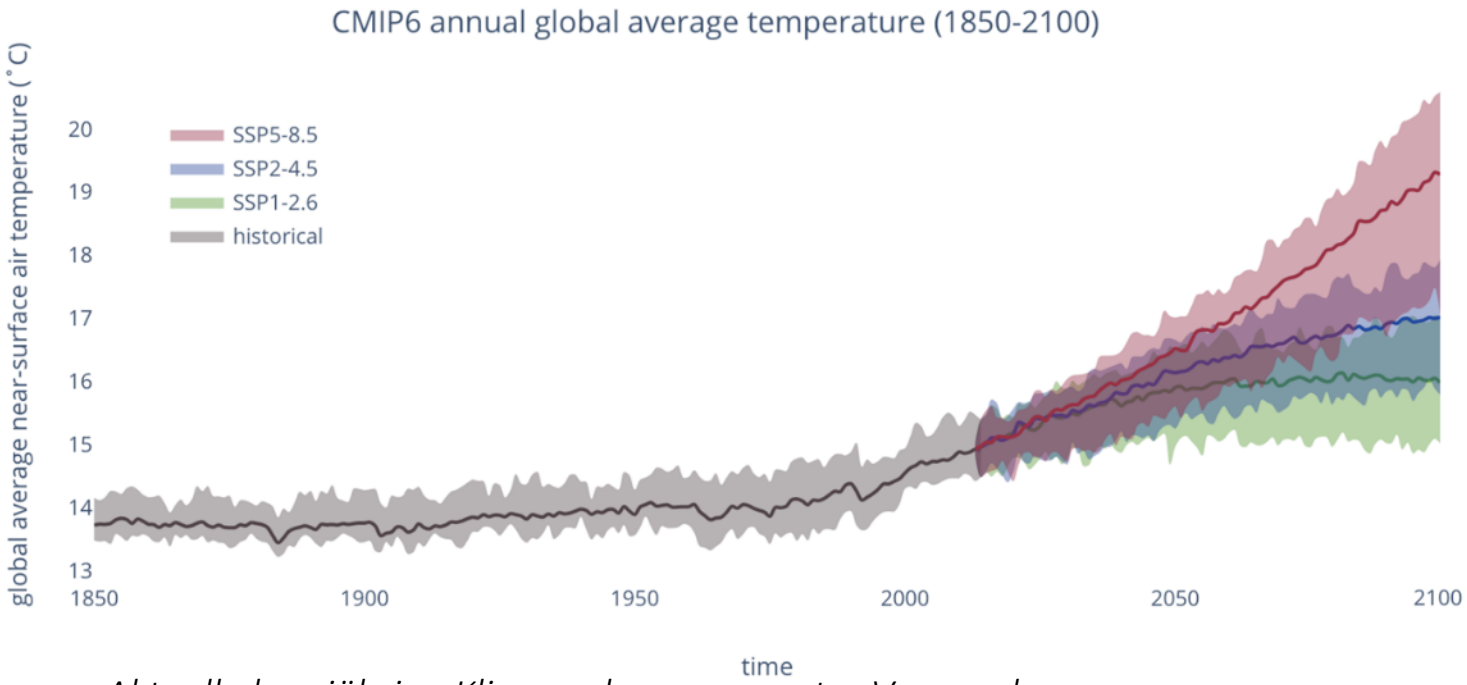
… eine geringfügige Verringerung der mittleren Windgeschwindigkeit in Norddeutschland wird prognostiziert, die unterhalb der interannuellen Variabilität liegt.

***Jung, C., & Schindler, D. "Introducing a new approach for wind energy potential assessment under climate change at the wind turbine scale." 2020*

Bestimmung des Einflusses des Klimawandels auf die Windenergie

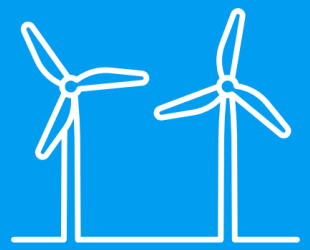


Globale Klimamodelle

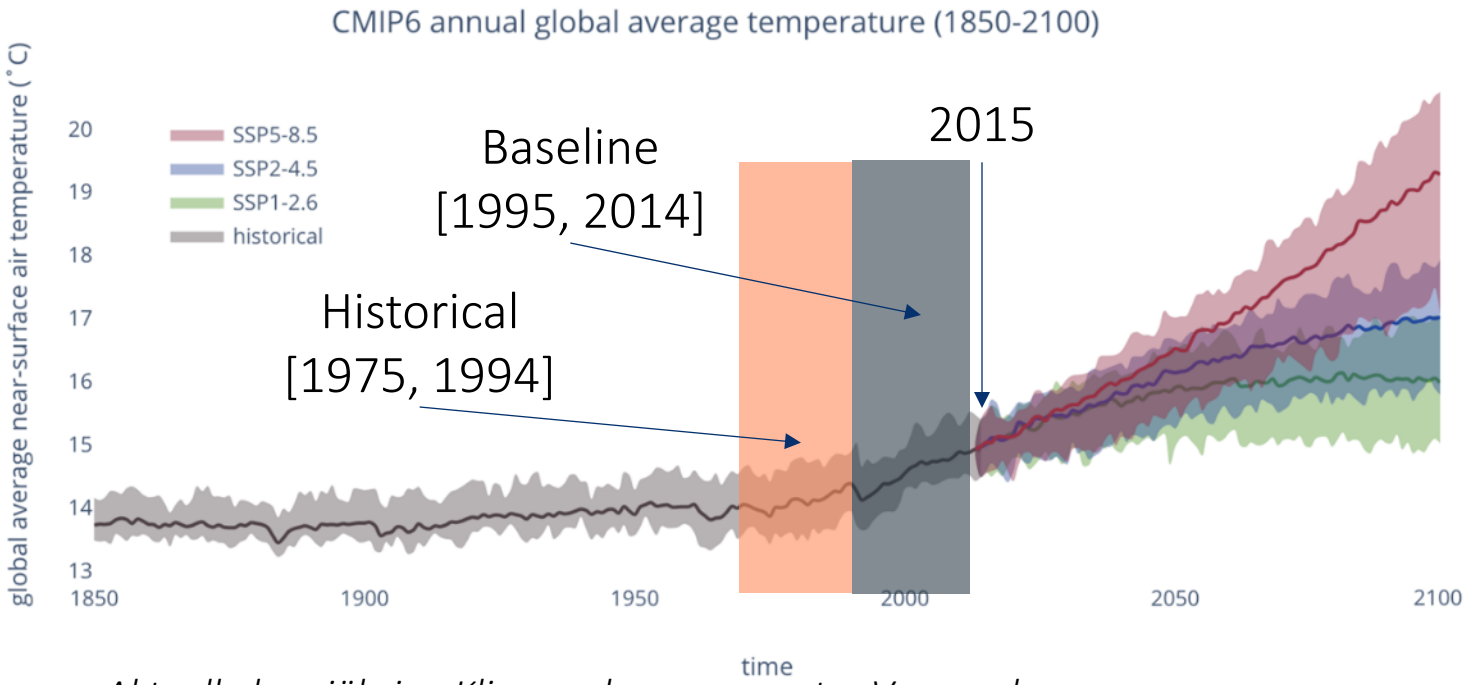


Aktuelle langjährige Klimavorhersagen unter Verwendung von globalen Klimamodellen (GKM) bereitgestellt durch das "Coupled Model Intercomparison Project Phase 6" (CMIP6). Quelle: Copernicus Climate Change Service, ECMWF.

Bestimmung des Einflusses des Klimawandels auf die Windenergie

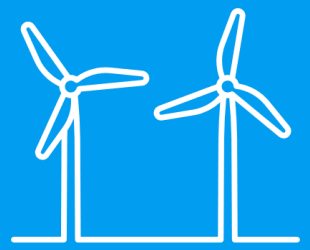


Globale Klimamodelle

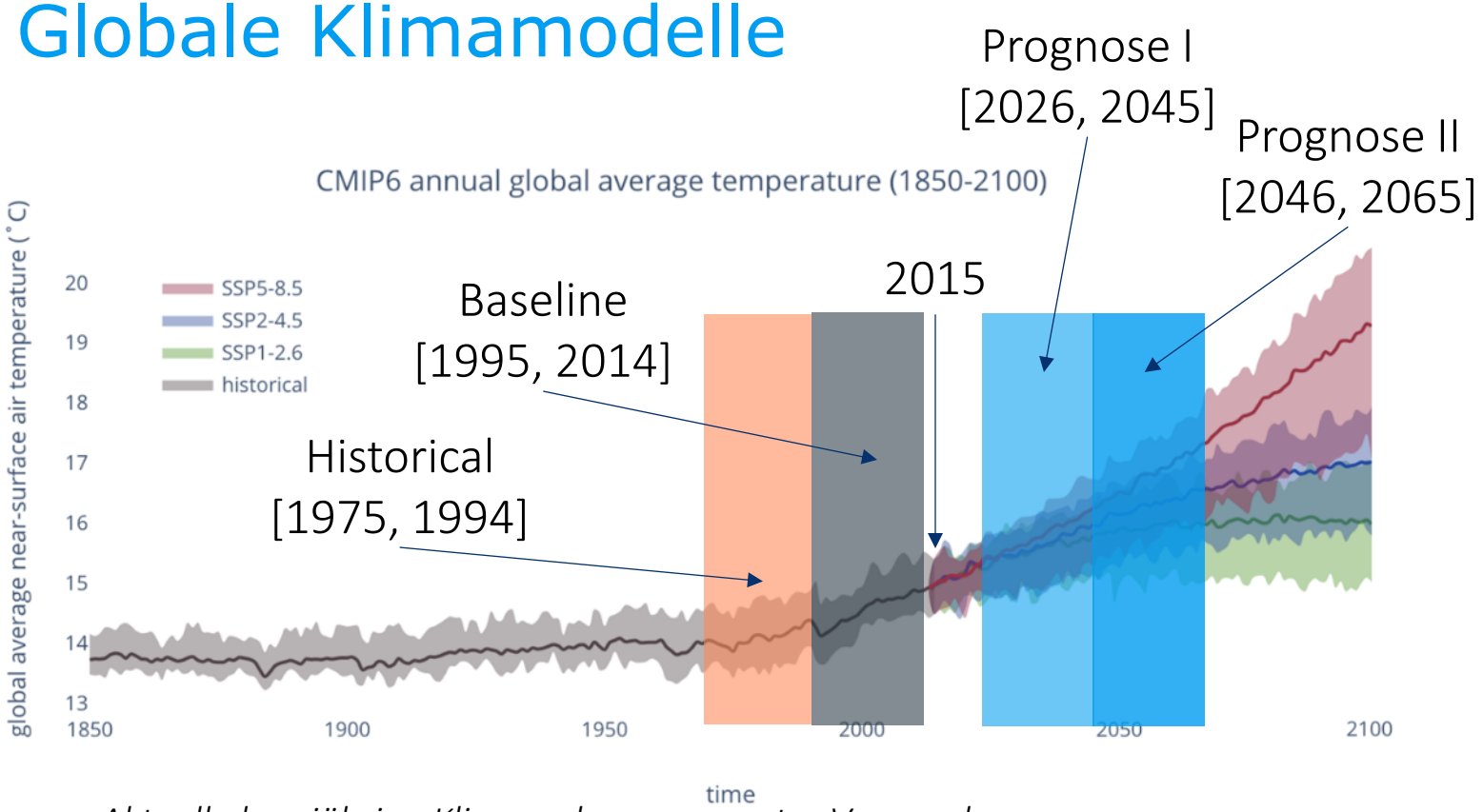


*Aktuelle langjährige Klimavorhersagen unter Verwendung von **g**lobalen **K**lima**m**odellen (GKM) bereitgestellt durch das "Coupled Model Intercomparison Project Phase 6" (CMIP6). Quelle: Copernicus Climate Change Service, ECMWF.*

Bestimmung des Einflusses des Klimawandels auf die Windenergie

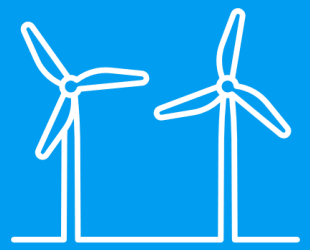


Globale Klimamodelle



Aktuelle langjährige Klimavorhersagen unter Verwendung von globalen Klimamodellen (GKM) bereitgestellt durch das "Coupled Model Intercomparison Project Phase 6" (CMIP6). Quelle: Copernicus Climate Change Service, ECMWF.

Bestimmung des Einflusses des Klimawandels auf die Windenergie



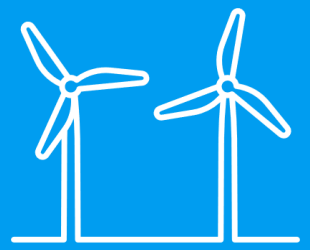
Globale Klimamodelle

Tägliche Windgeschwindigkeit, Temperatur und Luftdruck in Bodennähe werden aus jedem Klimamodell extrahiert.

- Interpolation auf ein regelmäßiges 1°×1°-Raster.
- Bildung von Ensemble-Mittelwerten innerhalb eines definierten Zeitraums für jeden Rasterpunkt

Acronym	Model Name	Resolution	Scenarios
ACCESS-CM2	Australian Community Climate and Earth System Simulator - Coupled Model v2, 2019	$Lat \in \lvert 34.375°, 71.875° \rvert, \Delta 1.25°$ $Lon \in \lvert -10.3125°, 40.3125° \rvert, \Delta 1.875°$	Hist., SSP126, SSP245, SSP585
AWI-CM-1-1-MR	Alfred Wegener Institute – Climate Model v1.1, 2018	$Lat \in \lvert 34.130°, 71.532° \rvert, \Delta 0.935°$ $Lon \in \lvert -10.3125°, 41.25° \rvert, \Delta 0.9375°$	Hist., SSP245, SSP585
BCC-CSM2-MR	Beijing Climate Center - Climate System Model v2, 2017(China)	$Lat \in \lvert 34.205°, 71.214° \rvert, \Delta 1.121°$ $Lon \in \lvert -10.125°, 41.625° \rvert, \Delta 1.125°$	Hist., SSP126, SSP245, SSP585
CMCC-ESM2	Centro Euro-Mediterraneo sui Cambiamenti Climatici - Earth System Model v2, 2017	$Lat \in \lvert 34.398°, 71.152° \rvert, \Delta 0.942°$ $Lon \in \lvert -10°, 41.25° \rvert, \Delta 1.25°$	Hist., SSP126, SSP245, SSP585
HadGEM3-GC31-LL	Hadley Centre Global Environment Model – Global Coupled v3.1, 2016	$Lat \in \lvert 34.375°, 71.875° \rvert, \Delta 1.25°$ $Lon \in \lvert -10.3125°, 40.3125° \rvert, \Delta 1.875°$	Hist., SSP126, SSP245, SSP585
IITM-ESM	Indian Institute of Tropical Meteorology - Earth System Model, 2015	$Lat \in \lvert 35.238°, 71.426° \rvert, \Delta 1.905°$ $Lon \in \lvert -9.375°, 41.25° \rvert, \Delta 1.875°$	Hist., SSP126, SSP245, SSP585
INM-CM5-0	Institute for Numerical Mathematics – Climate Model v5	$Lat \in \lvert 35.25°, 71.25° \rvert, \Delta 1.5°$ $Lon \in \lvert -10°, 42° \rvert, \Delta 2°$	Hist., SSP126, SSP245, SSP585
IPSL-CM6A-LR	Institute Pierre Simon Laplace - Climate Model v6A, 2018	$Lat \in \lvert 34.225°, 70.986° \rvert, \Delta 1.5°$ $Lon \in \lvert -10°, 40° \rvert, \Delta 2.5°$	Hist., SSP126, SSP245, SSP585
KIOST-ESM	Korea Institute of Ocean Science and Technology – Earth System Model v2, 2018	$Lat \in \lvert 35.053°, 71.053° \rvert, \Delta 1.895°$ $Lon \in \lvert -10.3125°, 42° \rvert, \Delta 1.875°$	Hist., SSP126, SSP245, SSP585
MIROC6	Model for Interdisciplinary Research on Climate v6, 2018	$Lat \in \lvert 34.319°, 70.738° \rvert, \Delta 1.401°$ $Lon \in \lvert -9.844°, 40.781° \rvert, \Delta 1.406°$	Hist., SSP126, SSP245, SSP585
MIROC-ES2L	Model for Interdisciplinary Research on Climate Earth System Model v2, 2018	$Lat \in \lvert 34.883°, 71.158° \rvert, \Delta 2.791°$ $Lon \in \lvert -8.438°, 39.375° \rvert, \Delta 2.813°$	Hist., SSP126, SSP245, SSP585
MRI-ESM2-0	Meteorological Research Institute - Earth System Model v2, 2017	$Lat \in \lvert 34.205°, 71.214° \rvert, \Delta 1.121°$ $Lon \in \lvert -10.125°, 40.625° \rvert, \Delta 1.125°$	Hist., SSP126, SSP245, SSP585
NorESM2-MM	Norwegian Earth System Model v2, 2020	$Lat \in \lvert 34.398°, 71.152° \rvert, \Delta 0.942°$ $Lon \in \lvert -10°, 41.250° \rvert, \Delta 1.25°$	Hist., SSP126, SSP245, SSP585
CESM2	Community Earth System Model v2, 2018	$Lat \in \lvert 34.398°, 71.152° \rvert, \Delta 0.942°$ $Lon \in \lvert 0°, 41.250° \rvert, \Delta 1.25°$	Hist., SSP126, SSP245, SSP585
GFDL-ESM4	Geophysical Fluid Dynamics Laboratory - Earth System Model v4, 2018	$Lat \in \lvert 34.5°, 71.5° \rvert, \Delta 1°$ $Lon \in \lvert -10.625°, 41.875° \rvert, \Delta 1.25°$	Hist., SSP126, SSP245, SSP585
INM-CM4-8	Institute for Numerical Mathematics - Climate Mode v4l, 2016	$Lat \in \lvert 35.25°, 71.25° \rvert, \Delta 1.5°$ $Lon \in \lvert -10°, 42° \rvert, \Delta 2°$	Hist., SSP126, SSP245, SSP585
MPI-ESM1 -2-LR	Max Planck Institute for Meteorology - Earth System Model v1.2, 2017	$Lat \in \lvert 34.507°, 71.811° \rvert, \Delta 1.865°$ $Lon \in \lvert -9.375°, 41.250° \rvert, \Delta 1.875°$	Hist., SSP126, SSP245, SSP585
NorESM2-LM	Norwegian Earth System Model v2, 2020	$Lat \in \lvert 35.053°, 71.053° \rvert, \Delta 1.895°$ $Lon \in \lvert -10°, 41.250° \rvert, \Delta 2.5°$	Hist., SSP126, SSP245, SSP585
UKESM1-0-LL	United Kingdom Earth System Model v1, 2017	$Lat \in \lvert 34.375°, 71.875° \rvert, \Delta 1.25°$ $Lon \in \lvert -10.313°, 41.313° \rvert, \Delta 1.875°$	Hist., SSP126, SSP245, SSP585

Bestimmung des Einflusses des Klimawandels auf die Windenergie



Ramboll

Globale Klimamodelle

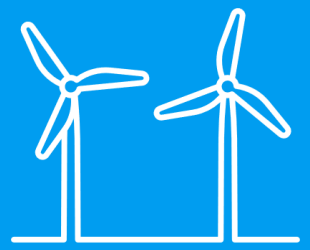
- Szenarien: SSP1-2.6 („Best-Case-Szenario“), SSP2-4.5 („realistisches Szenario“), SSP5-8.5 („pessimistisches Szenario“)

- **Tägliche** Windgeschwindigkeit, Temperatur und Luftdruck auf Bodenhöhe werden aus jedem Klimamodell extrahiert

- Untersuchungsgebiet: $Lat \in [34°, 71°]$ und $Lon \in [-11°, 42°]$ (europäisches Festland)

- **20 Jahre** Zeiträumen:
  - Historical [1975 - 1994]
  - Baseline [1995 - 2014]
  - Progn. I [2026 - 2045]
  - Progn. II [2046 - 2065]

Bestimmung des Einflusses des Klimawandels auf die Windenergie



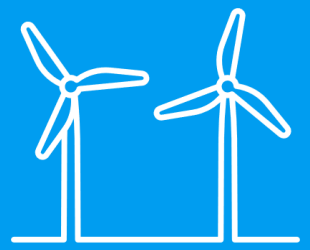
Ramboll

ERA-5

Die ERA-5 Reanalyse-Daten des Europäischen Zentrums für mittelfristige Wettervorhersage (EZMWF) werden verwendet

- Zum Vergleich und zur Validierung der historischen Zeitreihen aus den Klimamodellen
- **Stündliche** Zeitreihen von Windgeschwindigkeit, Luftdruck und Temperatur in Bodennähe von 1975–2024
- Bestimmung der statistischen Ähnlichkeit mit den historischen Zeitreihen der Klimamodelle
  - **Kolmogorow-Smirnow-Test**
  - Filterung der Klimamodelle an jedem Standort mit hoher statistischer Ähnlichkeit

Bestimmung des Einflusses des Klimawandels auf die Windenergie

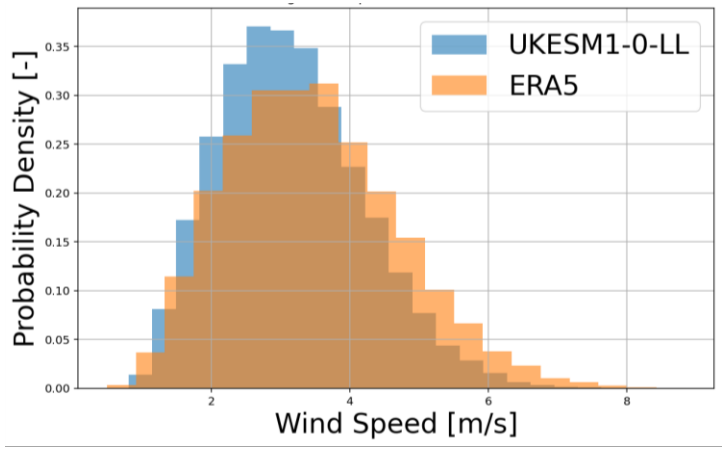


Filterung
*Beispiel

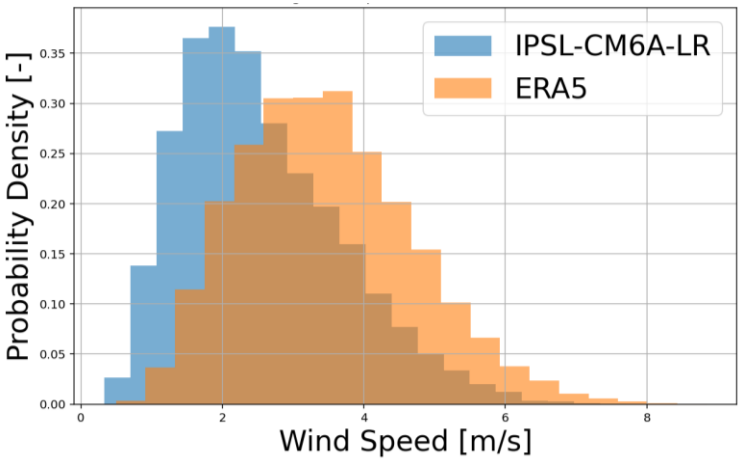
Kriterium: Statistischer Ähnlichkeit > 80%

- Windgeschwindigkeit auf 10m Höhe verwendet (ERA5 und Klimamodelle)

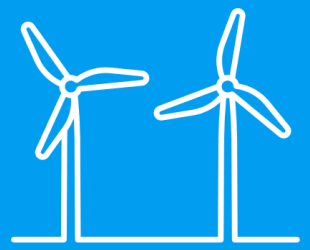
Erfüllt



Nicht erfüllt

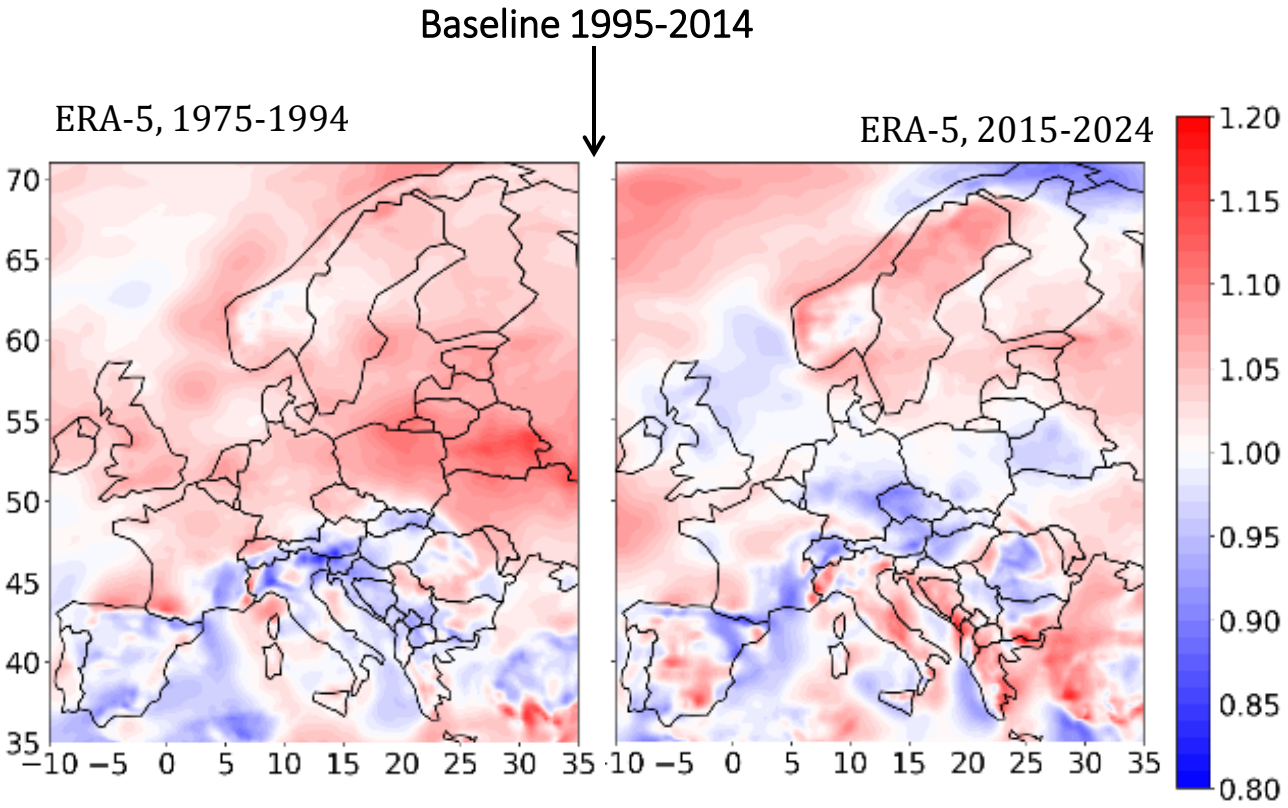


Beobachtete Veränderungen anhand Reanalyse-Daten



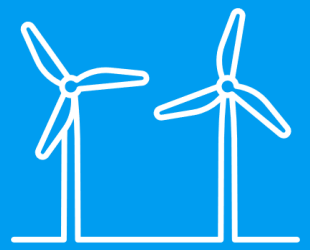
ERA-5

- Änderung der Energiedichte auf Basis der Windgeschwindigkeit in 100m



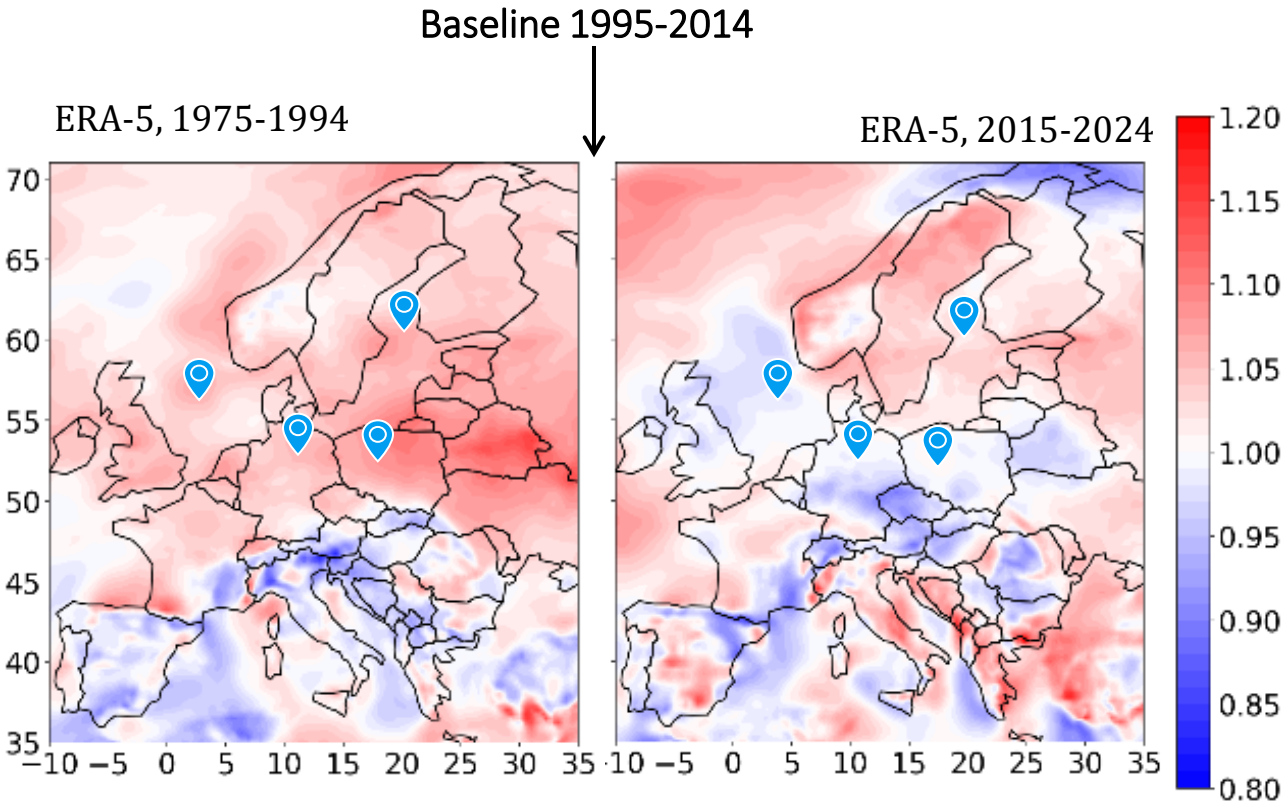
$$\langle \frac{P_{\mathrm{ERA5}}}{P_{\mathrm{ERA5,Baseline}}} \rangle \; [-]$$

Beobachtete Veränderungen anhand Reanalyse-Daten



ERA-5

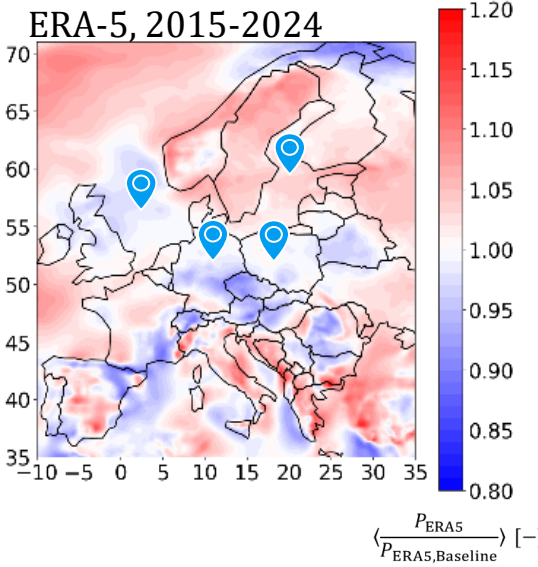
- Änderung der Energiedichte auf Basis der Windgeschwindigkeit in 100m

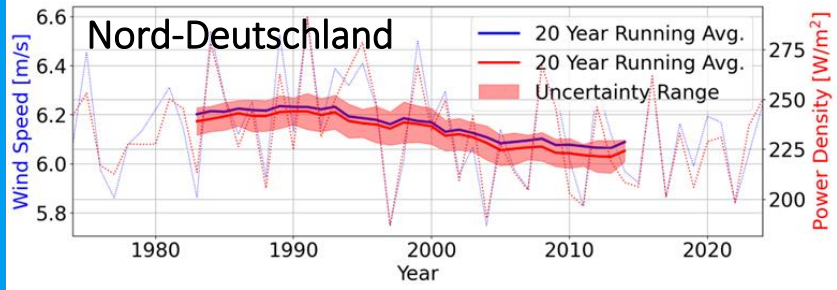


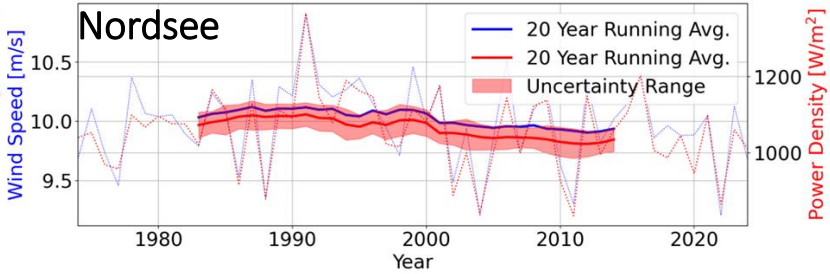
$$\langle \frac{P_{\mathrm{ERA5}}}{P_{\mathrm{ERA5,Baseline}}} \rangle \; [-]$$

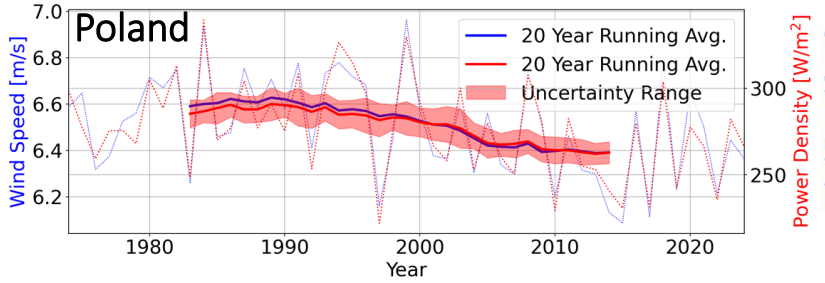
Beobachtete Veränderungen anhand Reanalyse-Daten

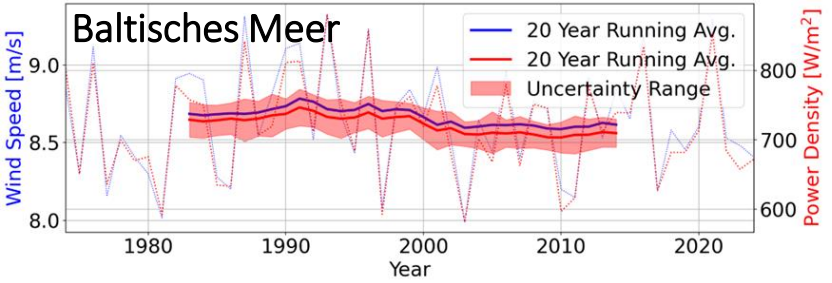
ERA-5



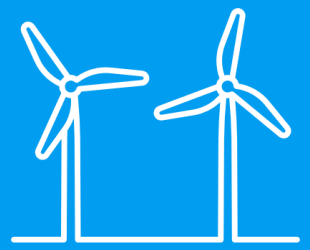




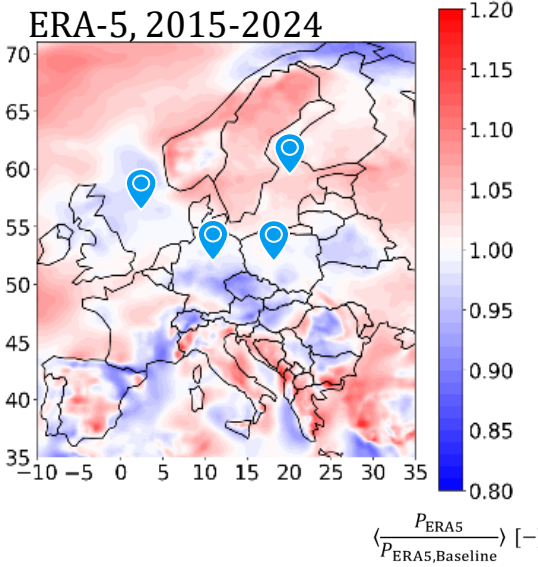




Beobachtete Veränderungen anhand Reanalyse-Daten

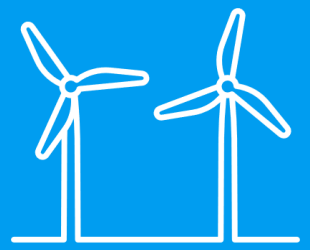


ERA-5



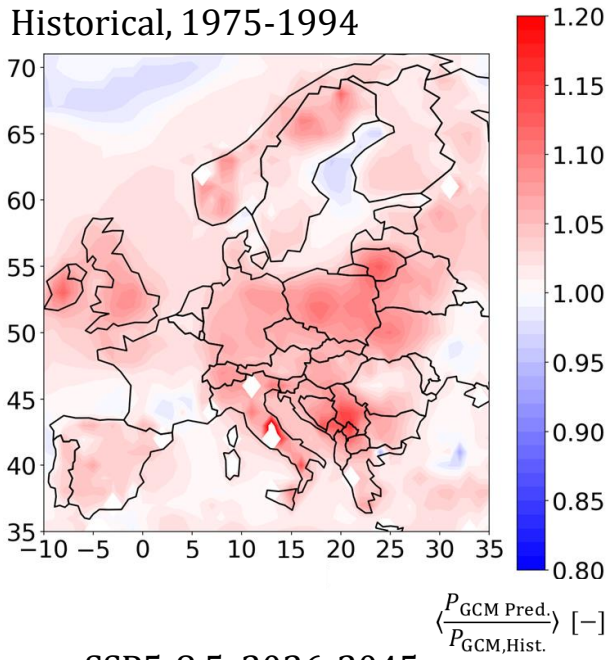
Bootstrapping
- 100 Iterationen jeweils 10 zufällig ausgewählte Werten
- **Varianz der Mittelwerte**

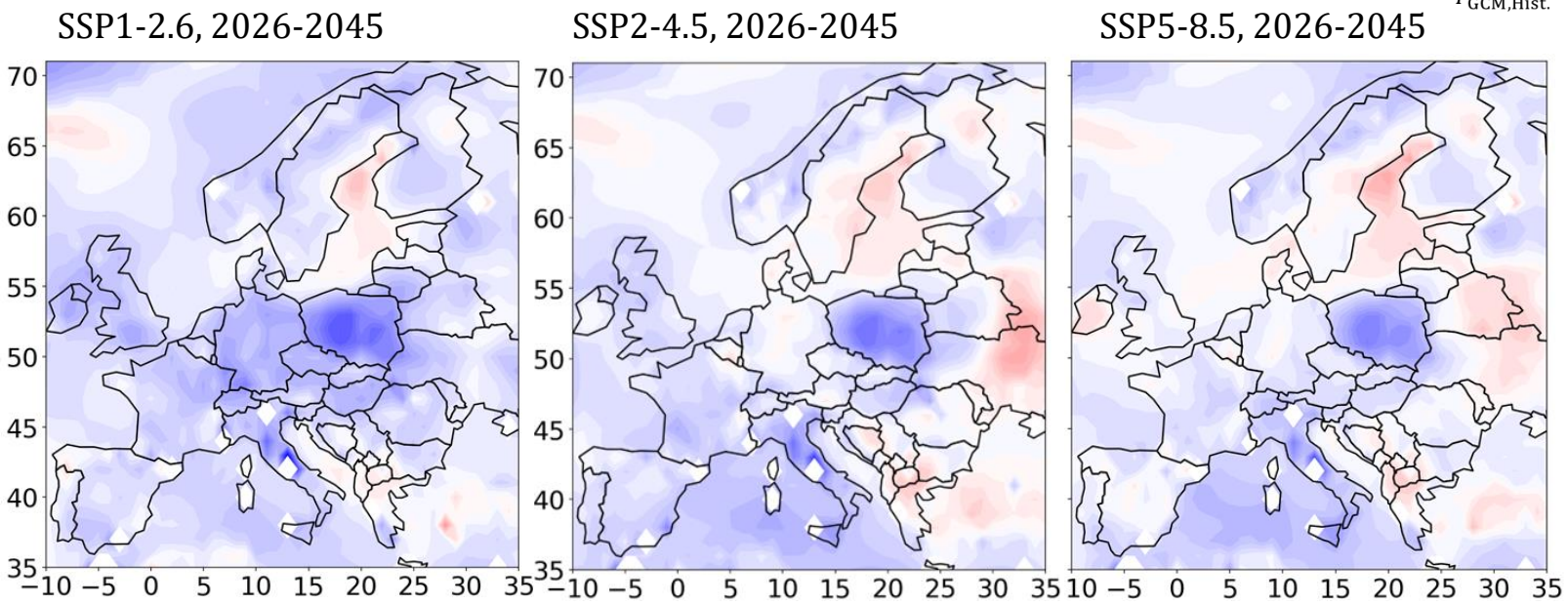
Prognose des Klimawandels auf Windenergie



Global Climate Models

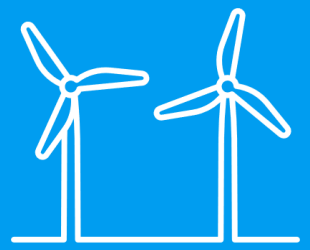
2026-2045



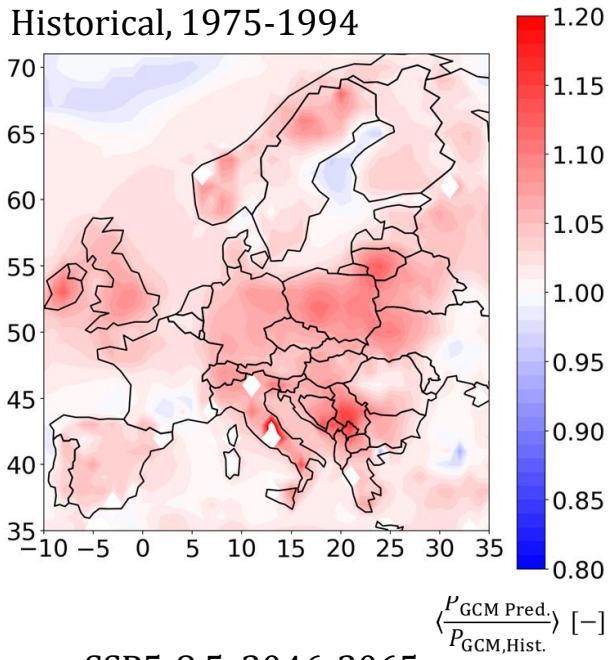


*Baseline 1995-2014

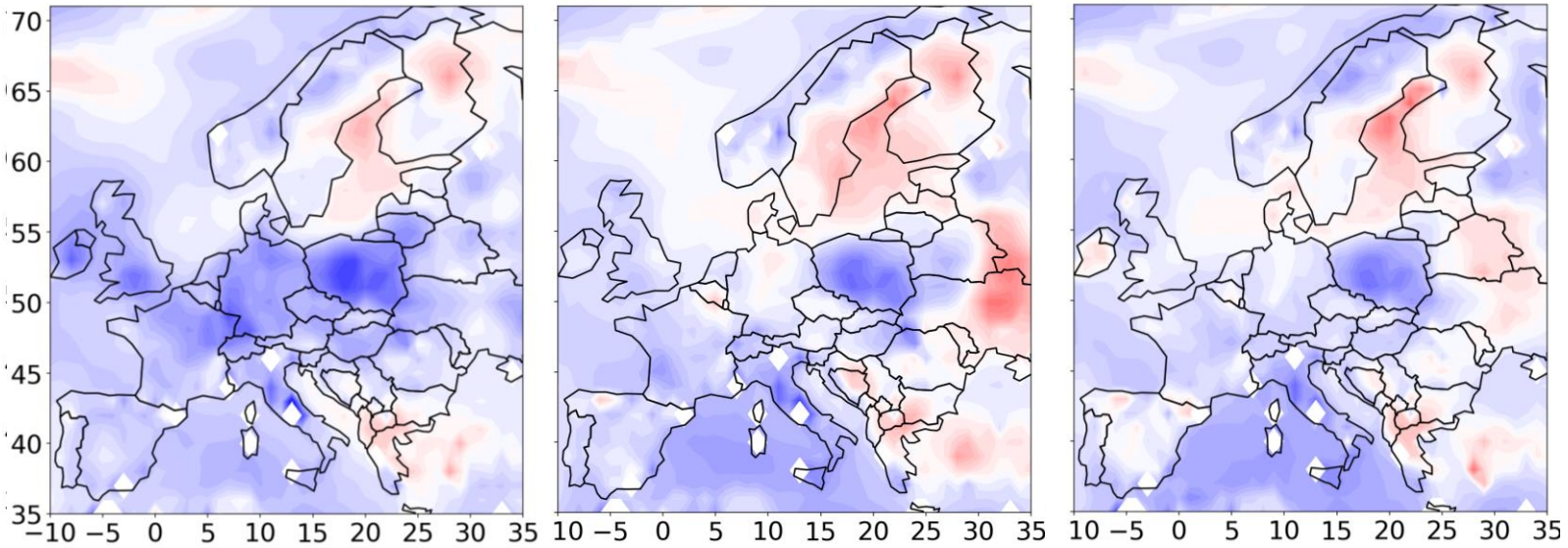
Prognose des Klimawandels auf Windenergie



Global Climate Models

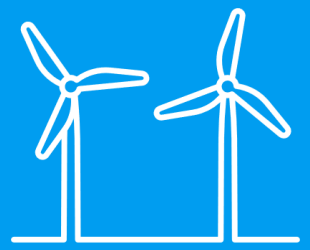


2046-2065

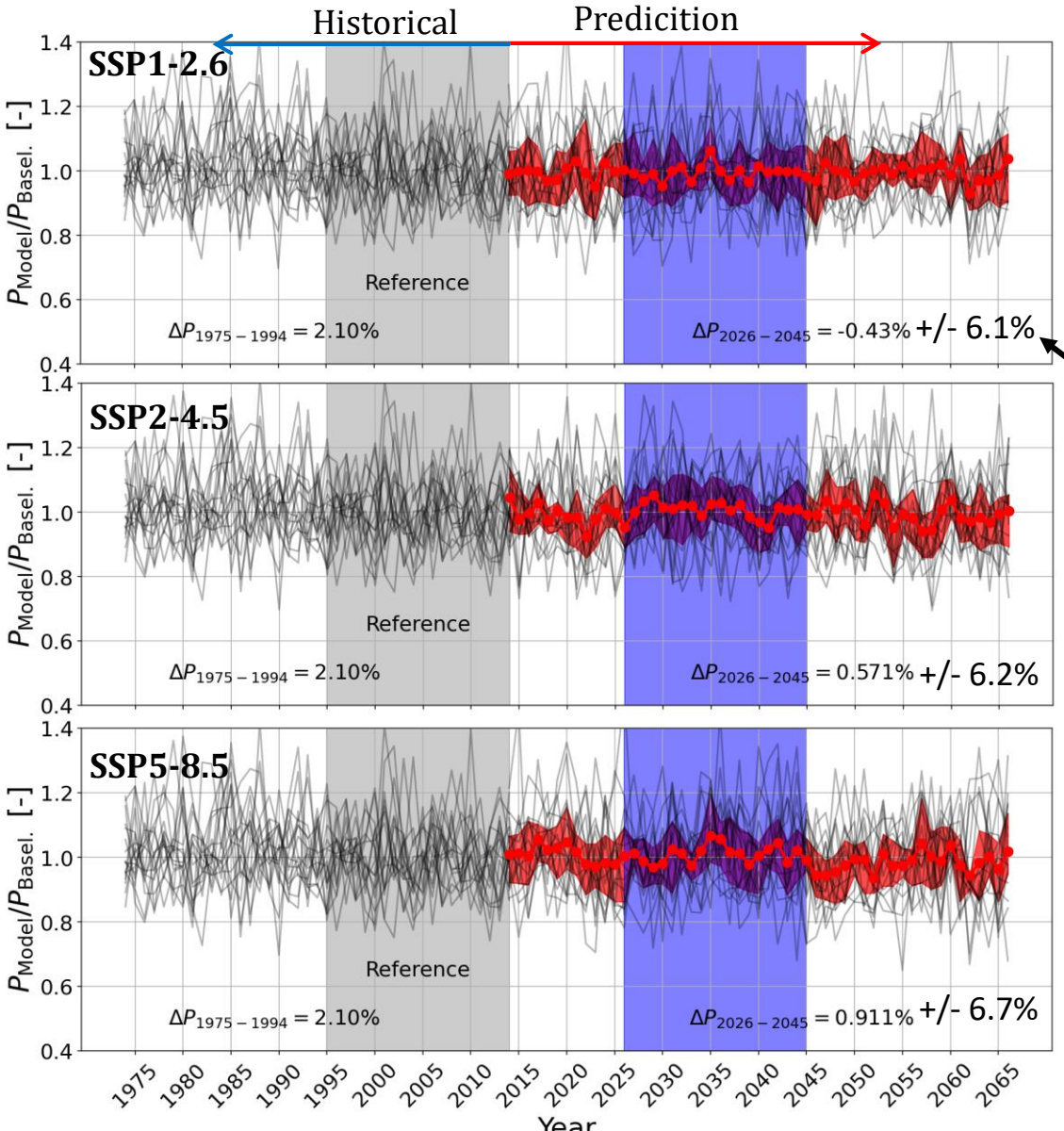


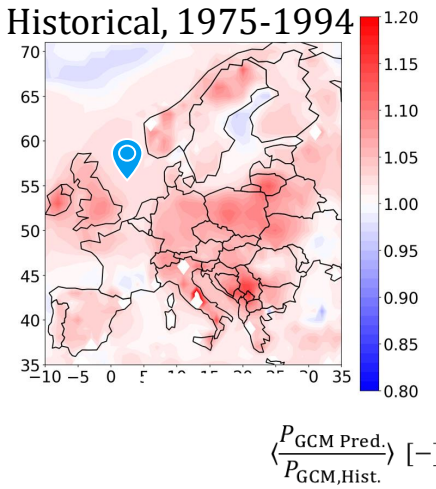
*Baseline 1995-2014

Prognose des Klimawandels auf Windenergie



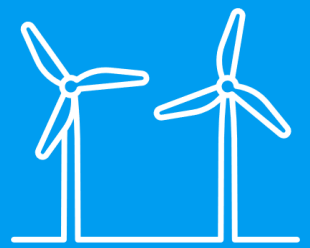
Prognose - Nordsee



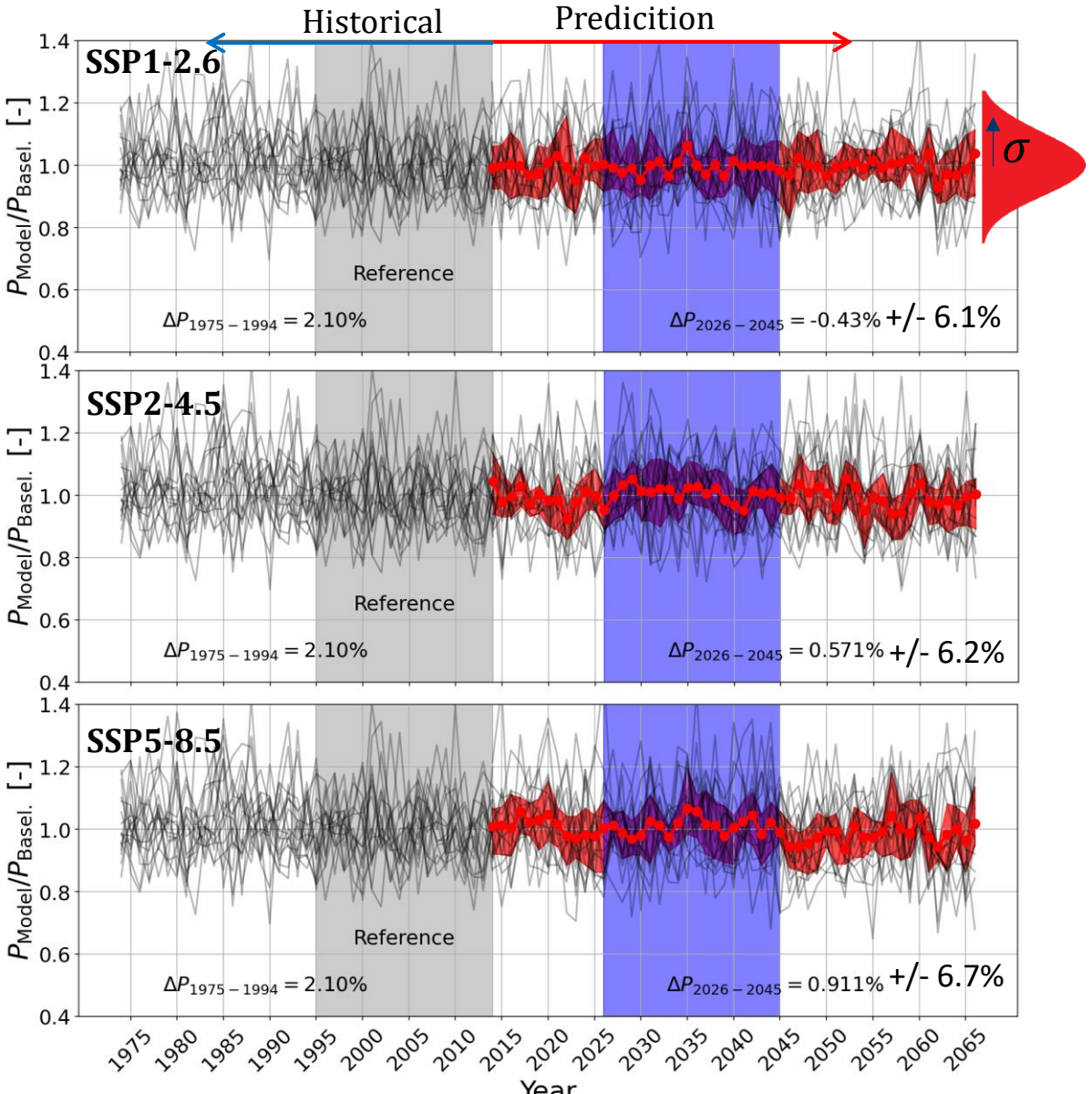


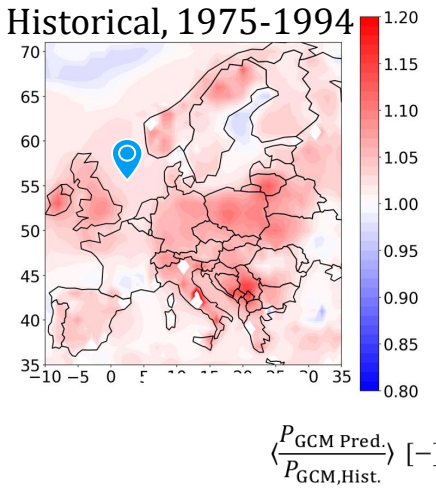
Bootstrapping: Varianz aus 100 Iterationen von jeweils 10 zufällig ausgewählte Werten von „Historical“ und Predicition“ Zeitreihen der Jahresmittelwerte

Prognose des Klimawandels auf Windenergie

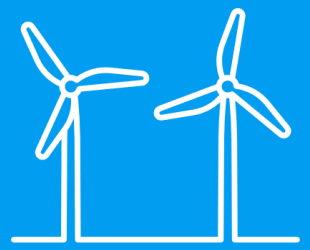


Prognose - Nordsee

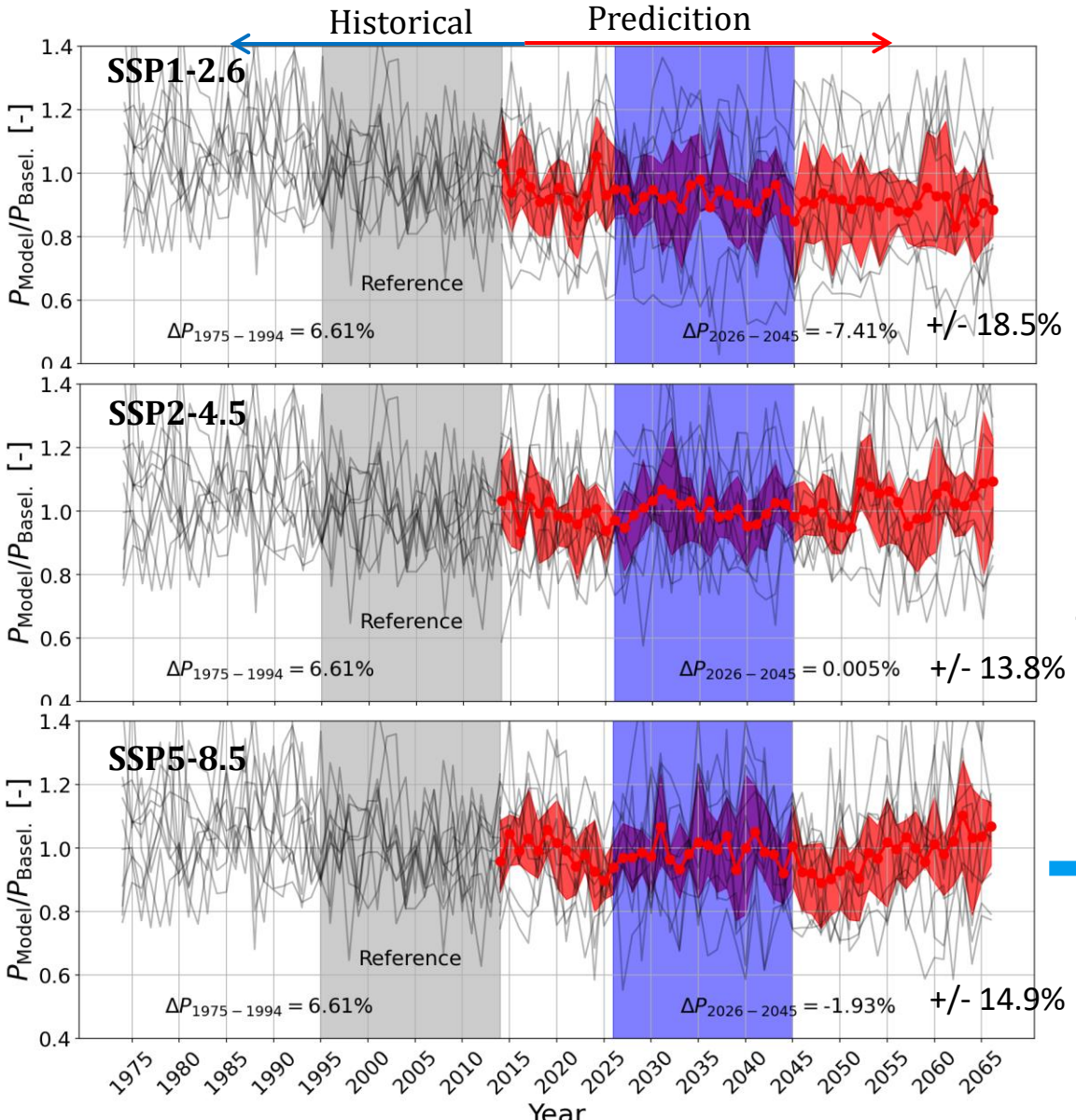


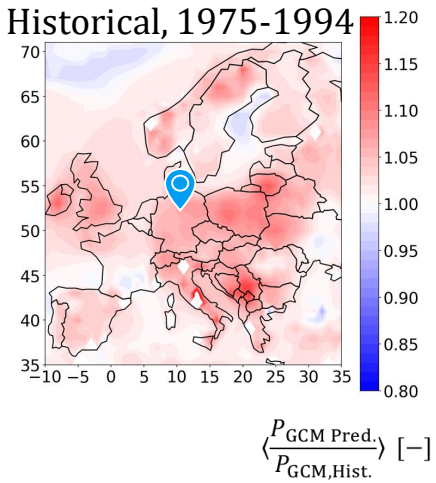


Prognose des Klimawandels auf Windenergie



Prognose – Nord-Deutschland

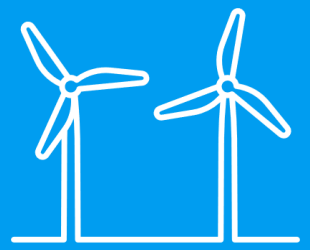




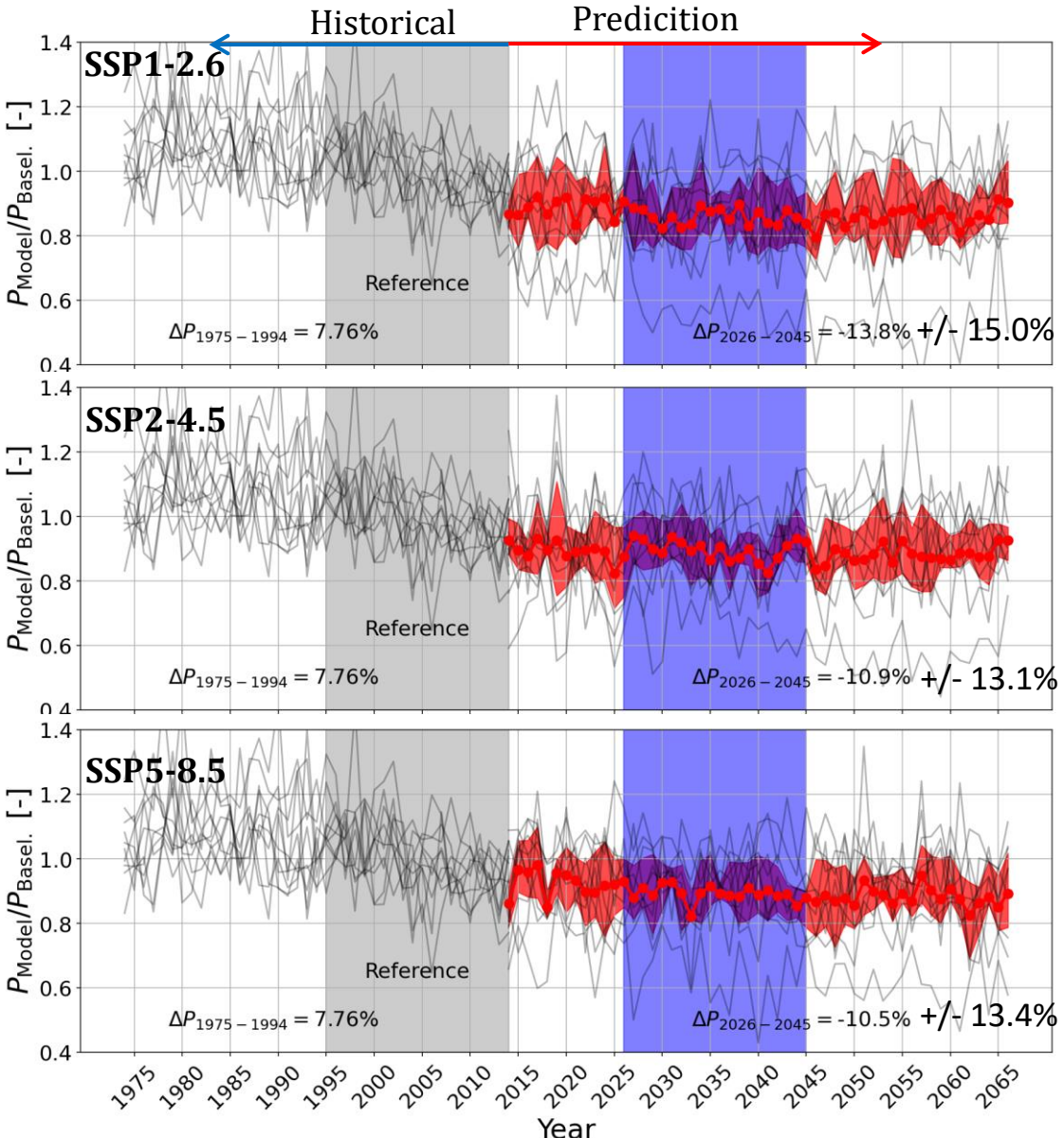
Eine signifikante hohe jährliche Schwankung und Streuung sind vorhanden

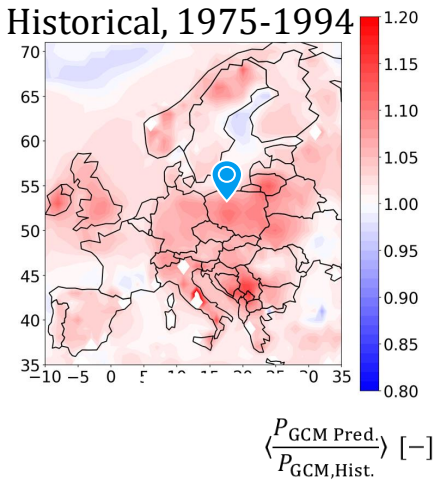
Modellierter Einfluss des Klimawandels ist geringfügig

Prognose des Klimawandels auf Windenergie

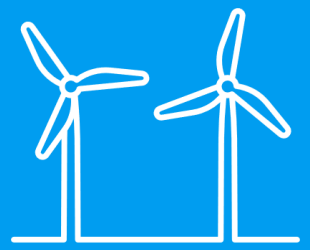


Prognose – Poland

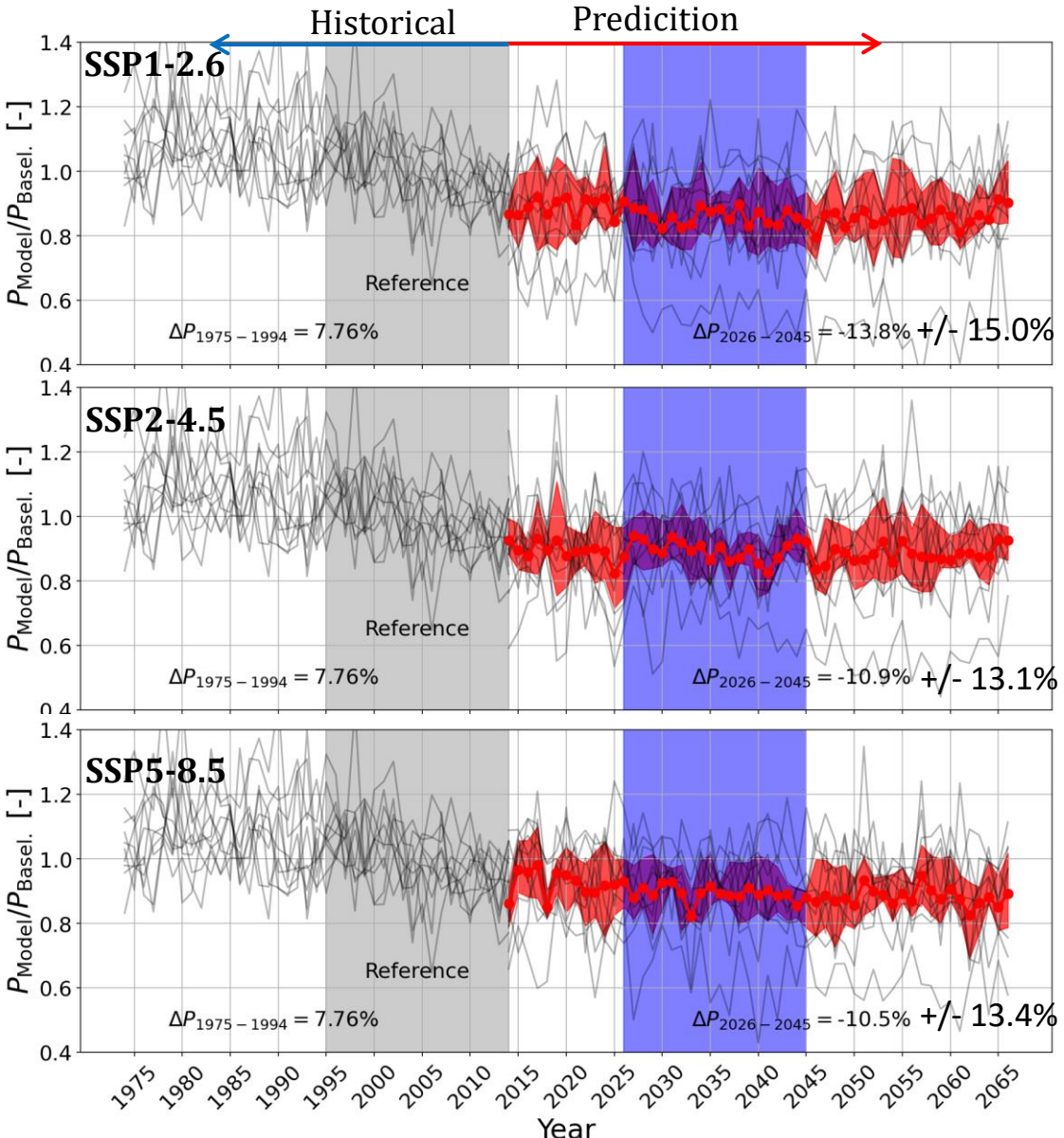


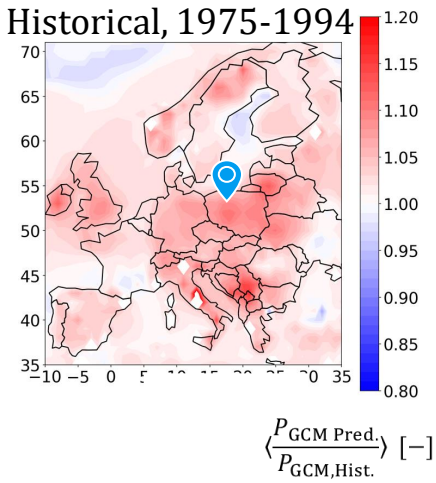


Prognose des Klimawandels auf Windenergie



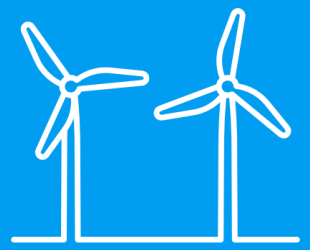
Prognose – Poland



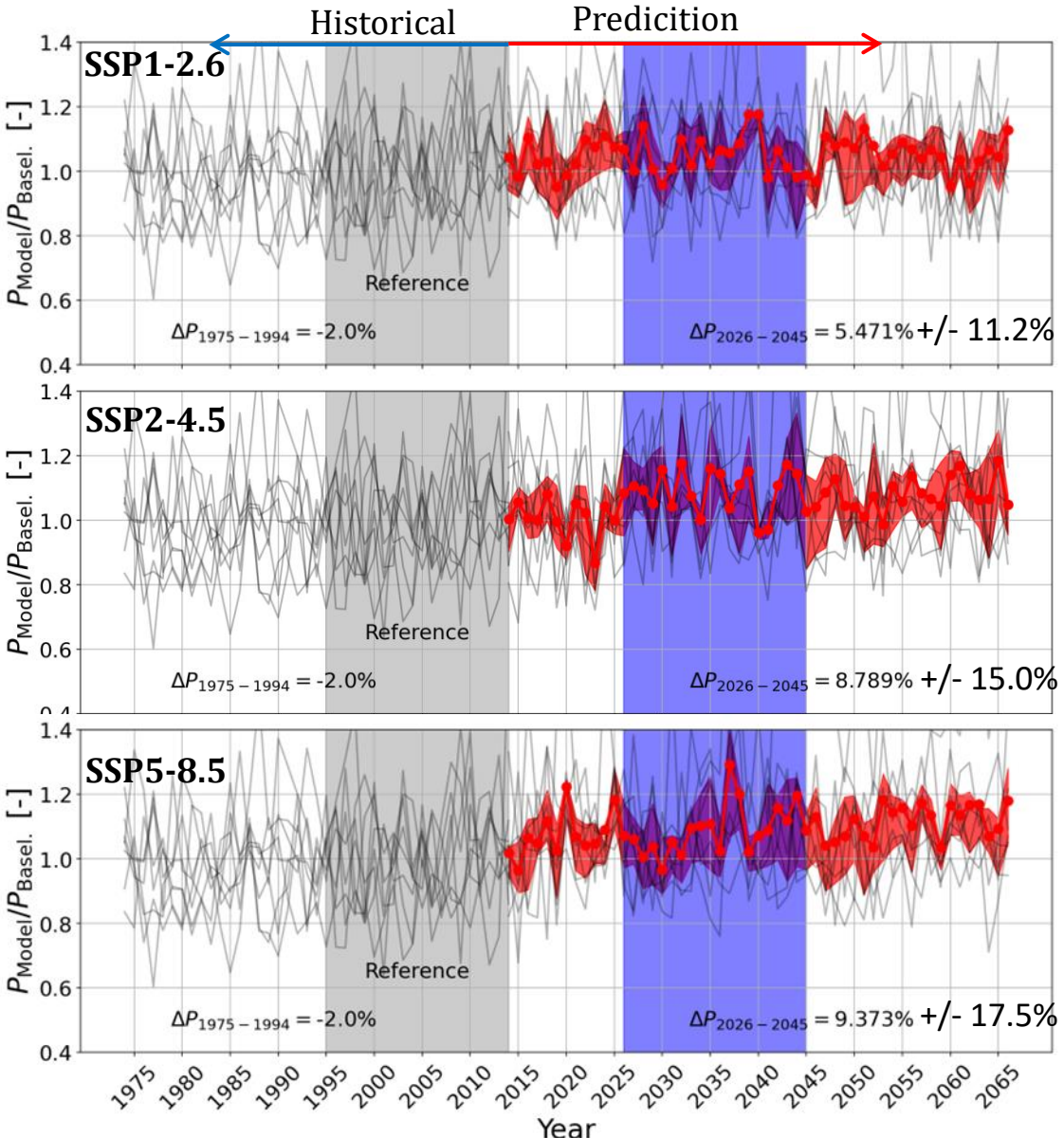


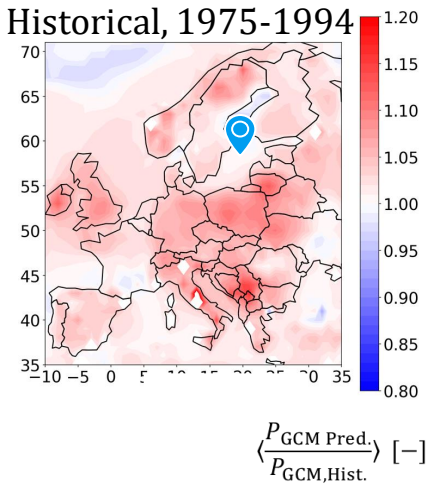
Was ist die Konsequenz **deutlich modellierten** Änderungen?

Prognose des Klimawandels auf Windenergie



Prognose – Baltisches Meer





?

Was ist die Konsequenz **deutlich modellierten** Änderungen?

Fazit

Der Einfluss des Klimawandels auf die Windenergie wird in verschiedenen globalen Klimamodellen für unterschiedliche sozioökonomische Szenarien modelliert

- Anhand ERA-5 gefiltert
- CMIP6-Daten wurden im Rahmen des IPCC-Berichtsprozesses verwendet.

- In **Deutschland** und in der **Nordsee** ist die jährliche Variabilität deutlich höher als die durch den Klimawandel verursachte Variation
  - **Einfluss des Klimawandels ist geringfügig**

- Rund um das Baltische Meer und in Polen werden deutliche klimabedingte Einflüsse modelliert.
  - Wie sollen wir mit solchen **modellierten Prognosen** umgehen?

Thank you!

Paul Hulsman
Senior Consultant, Wind & Site
paul.hulsman@ramboll.com

RAMBOLL

Bright ideas.
Sustainable change.