



# KLIMAFOLGEN FÜR DEUTSCHLAND



POTSDAM-INSTITUT FÜR  
KLIMAFOLGENFORSCHUNG



**Herausgeber**

Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung  
Postfach 601203 | 14412 Potsdam  
www.pik-potsdam.de

**Redaktion**

F. Suckow

**Gestaltung und Gesamtherstellung**  
webreform GmbH

**Danksagung**

Wir danken dem Deutschen Wetterdienst für die  
Bereitstellung der meteorologischen Daten.

**Bildnachweis**

Bildquellen – PIK  
Seite 5 – DBU

**Druck**

GS Druck und Medien GmbH  
www.gsdruck.net

gedruckt auf Inapa Infinity Silk,  
FSC®-zertifiziert

2. Auflage, August 2013

**Autorenliste**

M. Büchner (Energie)  
F.-W. Gerstengarbe (Klima)  
P. Gottschalk (Landwirtschaft)  
M. Gutsch (Wald)  
F. F. Hattermann (Wasser, Energie)  
S. Huang (Wasser, Energie)  
H. Koch (Wasser, Energie)  
P. Lasch (Wald)  
A. Lüttger (Landwirtschaft)  
H. J. Schellhuber (Einleitung)  
F. Suckow (Wald)  
D. Tiggemann (Internet-Portal)  
F. Wechsung (Landwirtschaft)  
P. C. Werner (Klima)

Weitere Informationen zu den  
vorgestellten Themen sind zu finden  
auf dem Internet-Portal

**www.KlimafolgenOnline.com \***

\*ab 01.12.2012 online

## DIE FÄHIGKEIT ZUR INNOVATION ..... 5

## DIE KLIMAENTWICKLUNG IN DEUTSCHLAND .... 8

*Wie war das Klima im 20. Jahrhundert?*

*Wie ist das Klima gegenwärtig?*

*Wie können wir in die Zukunft schauen?*

*Wie wird sich das Klima in Deutschland entwickeln?*

Die Daten

Das Modell

Das Szenarium

Die Ergebnisse

AUSWIRKUNGEN DES KLIMAWANDELS AUF DEN  
WASSERHAUSHALT IN DEUTSCHLAND ..... 12

*Welche Folgen hat der Klimawandel auf die hydrologischen Prozesse und Wasserressourcen in den verschiedenen Regionen Deutschlands bis zur Mitte dieses Jahrhunderts?*

Das Modellsystem

Aggregierte Ergebnisse

## KLIMAFOLGEN FÜR WÄLDER ..... 17

*Wie werden die Wälder in Deutschland wachsen? Welche Risiken sind mit dem zu erwartenden Klimawandel verbunden? Antworten auf diese Fragen sind für die Forstwirtschaft von Bedeutung, um die Wälder nachhaltig zu sichern, sie interessieren aber auch jeden Bürger, der die Leistungen des Waldes schätzt.*

Wachstum der Wälder

Risiken für die Wälder

AUSWIRKUNGEN DES KLIMAWANDELS AUF DIE  
LANDWIRTSCHAFT IN DEUTSCHLAND ..... 22

*Wie verändert der Klimawandel die natürlichen Voraussetzungen für die landwirtschaftliche Produktion in Deutschland? Ist ein klimabedingter Rückgang der landwirtschaftlichen Erzeugung zu erwarten?*

Ertragsmodellierung

Szenarium und Szenarienwirkungen:

Beispiel Elbeinzugsgebiet

Szenarienwirkungen jenseits der Simulationen

AUSWIRKUNGEN DES KLIMAWANDELS AUF DIE  
ENERGIEERZEUGUNG IN DEUTSCHLAND ..... 27

*Elektroenergie ist eine Voraussetzung für den hohen Lebensstandard beziehungsweise die Wirtschaft in Deutschland. Der Klimawandel kann die Elektroenergieerzeugung auf unterschiedliche Art und Weise beeinflussen. Somit stellt sich die Frage: Wie groß sind die Auswirkungen des Klimawandels auf verschiedene Erzeugungsarten?*

Thermische Kraftwerke

Wasserkraftanlagen

Windkraftanlagen

Aggregierte Ergebnisse

KLIMAWANDEL UND KLIMAFOLGEN VERSTÄNDLICH  
VERMITTELN ..... 31

*Die Folgen des Klimawandels sind noch nicht weithin bekannt. Wie kann man diese Folgen einem allgemeinen Publikum vermitteln? Wie kann man gleichzeitig Fachnutzern im privaten und öffentlichen Bereich wichtige Informationen zukommen lassen? Und wie stellt man weite Verbreitung sicher?*

Zwei starke Projektpartner

Ein starkes Portal

Klimafolgen als Inhalte

Orientierung vor Ort bis deutschlandweit

Im Laufe der Zeit

Vielzahl von Informationen, aber leicht zugreifbar

Austausch mit Anderen

Globale Zukunft

## LITERATUR ..... 36

## ABBILDUNGSVERZEICHNIS ..... 37



## DIE FÄHIGKEIT ZUR INNOVATION

Über die Aneignung hoch konzentrierter Sonnenenergie, über Jahrtausende gespeichert, ist der Mensch zu einer treibenden Kraft im Erdsystem geworden. Dieser Einfluss macht sich mit steigenden Emissionen und basierend auf fortschreitender wissenschaftlicher Erkenntnis zunehmend bemerkbar und wirkt bereits heute in einzelnen Sektoren auf die Gesellschaft zurück, was sich wissenschaftlich immer besser nachweisen lässt. Die hier zusammengefassten Beiträge der Konferenz „Klimafolgen für Deutschland“ liefern zahlreiche überzeugende Beispiele und zeigen, dass der in erdgeschichtlicher Zeitskala beispiellose globale Wandel auch vor unserer Haustür stattfindet.

Dabei war es vor allem der technische Fortschritt – die menschliche Fähigkeit zur Innovation –, die den Übergang von Wasserkraft und kurzfristig gespeicherter Sonnenenergie in Biomasse zu höher konzentrierten Energiequellen wie Kohle und später Erdöl ermöglichte. Die Kopplung der Dampfmaschine mit dem mechanischen Webstuhl in Manchester um das Jahr 1785 herum kann wohl als

der Moment bezeichnet werden, der die Kaskade aus steigender Produktion, Angebot und Nachfrage auslöste und als Industrielle Revolution in die Geschichte eingehen sollte. Mit dem Einsatz der Dampfmaschine stieg auch die Effizienz des Kohlebergbaus und befeuerte so den weiteren Fortschritt, der sich – ebenfalls kohlegetrieben – über ein stetig wachsendes Schienennetz der unermüdlich dampfenden Eisenbahn ausbreitete. Als schließlich Winston Churchill als erster Lord der britischen Admiralität kurz vor dem Ersten Weltkrieg beschloss, die britische Kriegsflotte von Kohlefeuerung auf Erdöl umzustellen, hielt auch dieser fossile Brennstoff endgültig Einzug in die Menschheits- und somit aktuelle Erdgeschichte. Infolge der Verbrennung fossiler Kraftstoffe stieg die Kohlendioxidkonzentration der Atmosphäre immer rapider an und liegt mittlerweile über 40 Prozent höher als noch zu Beginn der Industriellen Revolution.

Die heute beobachteten und projizierten Auswirkungen auf das globale Klima kamen keineswegs überraschend: Bereits 1896 hatte der schwedische



Wissenschaftler Svante Arrhenius zum ersten Mal den Treibhausgaseffekt beschrieben und damit gewissermaßen unsere Gegenwart skizziert. Arrhenius arbeitete noch mit Stift und Papier. Heutige Datenerhebungen und numerische Computermodellierungen bestätigen nicht nur seine Thesen, sondern erlauben weitere Einblicke in Ursachen und erwartete Folgen des Klimawandels. Zu den einschlägigen Messreihen zählt hier vor allem die sogenannte Keeling-Kurve. Unter der Leitung von Charles David Keeling wurde auf dem Mauna Loa, Hawaii, 1958 begonnen, die  $\text{CO}_2$ -Konzentration der Atmosphäre kontinuierlich zu messen. Die Messungen dauern fort und zeigen einen Anstieg von ca. 315 ppm (parts per million) zu Beginn der Messungen auf 396,78 ppm im Mai 2012. Computersimulationen, wie sie auch den in diesem Band zusammengefassten Forschungsergebnissen zu Grunde liegen, erlauben gleichzeitig eine Abschätzung künftiger Folgen des Klimawandels. Dabei lässt die virtuelle Vernetzung von Forschern und Forschungsergebnissen ein immer deutlicheres Bild entstehen, das es uns erlaubt, den Globus in der jetzigen Phase vor allem als Spielball des Menschen wahrzunehmen. So ist es nicht zuletzt auch hier der technische Fortschritt, der einen nächsten Schritt in der Geschichte der Menschheit markiert und ihr das Ausmaß der eigenen Wirkmacht vor Augen führt.

Wissensbasierter Fortschritt – Fluch oder Segen? Eine derart simple Klassifizierung wäre verfehlt. Dennoch lassen sich Innovationen hinsichtlich des Klimawandels und seiner Auswirkungen gleichsam als Motor und Erkenntnisvehikel bezeichnen: Die Innovationen des 18. Jahrhunderts brachten den fossilen Stein ins Rollen. Die Innovationen des 20. Jahrhunderts erlauben es die Furche, die er schlägt, zu vermessen.

Und es werden die Innovationen des 21. Jahrhunderts sein, die es uns ermöglichen werden, den nächsten großen Schritt zu tun, um gefährliche Rückwirkungen des Klimawandels auf menschliche Gesellschaften zu vermindern oder gar zu verhindern. Innovationen im Bereich der Erneuerbaren Energiegewinnung sind hier nur ein Beispiel – wenngleich sie eine Schlüsselrolle spielen. Aber auch im Bereich der Anpassung an unvermeidliche Klimafolgen muss die Technik in enger Zusammenarbeit mit der Wissenschaft das Gebiet zukünftiger Schäden kartieren und anschließend adäquate Antworten auf identifizierte Herausforderungen entwickeln.

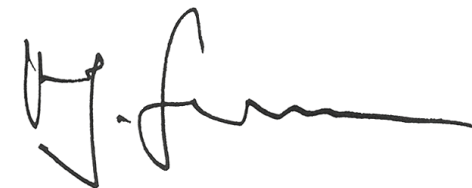
Das European Institute of Innovation and Technology (EIT) ist ein mutiger Ansatz, in seiner Vision und Struktur dieser gesellschaftlichen Verantwortung gerecht zu werden. Es ist dem Ziel verschrieben, gezielt Innovationen für ein nachhaltiges Wachstum zu entwickeln. Innerhalb von drei Knowledge

and Innovation Communities (KIC) arbeitet die Wissenschaft eng mit Vertretern aus der Wirtschaft und Bildung zusammen, um marktreife Produkte zu entwickeln, die den Standort Europa als Vorreiter für intelligente Neuerungen sichern und den Weg in eine nachhaltige Zukunft weisen. In immer mehr Netzwerken von Akteuren bilden sich unter dem gemeinsamen Ziel, gesellschaftliche Herausforderungen zu adressieren, Synergien hohen Potenzials. Das Climate-KIC wendet sich dabei explizit dem Klimawandel und seinen Folgen zu.

Unter Beteiligung des Climate-KIC wurde auch das in dieser Broschüre vorgestellte Deutschland-Projekt des PIK entwickelt. Benutzerfreundlich werden hier die Klimafolgen in den Sektoren Wasser, Landwirtschaft, Forstwirtschaft und Energie skizziert. Dabei wird eine Reihe von Klimawirkungsmodellen eingesetzt, um Szenarien für Deutschland zu konstruieren und die Wirkungen in verschiedener Form visualisiert darzustellen. Diese Informationen stehen für den Endnutzer zur Verfügung und liefern somit die Grundlage spezifischer Anpassungsmöglichkeiten in den einzelnen Sektoren. Der in dem Pilotprojekt gewählte Fokus auf Deutschland wird in Zukunft ausgeweitet werden. Ziel ist es, weltweit den Betroffenen und Entscheidungsträgern vor Ort wissenschaftlich fundierte Klimafolgenszenarien in unterschiedlichen Sektoren leichter zugänglich zu machen.

Eine intelligente Kombination aus Vermeidung und Anpassung kann es ermöglichen, die Folgen des anthropogenen Klimawandels zu beherrschen. Die Verringerung menschlicher Vulnerabilität gegenüber den Folgen des Klimawandels ist insbesondere in Entwicklungsländern von hoher Dringlichkeit. Historisch nicht Verursacher, verfügen sie über die geringsten Optionen der Anpassung und sind von den Schäden des Klimawandels oft überproportional stark betroffen. Hier kommt die Frage der Gerechtigkeit ins Spiel. Denn sowohl über die Entwicklung als auch die Bereitstellung technischer Innovationen können Deutschland und Europa dazu beitragen, globale Verantwortung zu übernehmen. Dennoch wäre es töricht, in einen reinen Technologieoptimismus zu verfallen. Technologie allein kann und wird nicht die Lösung sein. Zunächst muss sich die Weltgesellschaft, deren kollektive Handlungen Auswirkungen auch auf abgelegene Regionen oder gar zukünftige Generationen haben, willens sein, sich als solche wahrzunehmen. Wenngleich auch hier wieder Innovationen – wie beispielsweise das Internet und damit verbundene globale Netzwerke – neue Wege der Identifikation weisen können, wird es uns nicht erspart bleiben, die sich ergebende Frage der Verantwortung selbst zu beantworten. Wissenschaft, im Verbund mit dem technischen Fortschritt, kann lediglich die Grundlage und die Instrumente liefern, anhand derer die Menschheit sich zu handeln entscheidet.

Sollen gefährliche Folgen für die Menschheit vermieden werden, bedarf der Umgang mit dem Klimawandel einer facettenreichen Strategie aus Innovationen im Bereich der Vermeidung und Anpassung, aus ethischen Auseinandersetzungen und einem entschiedenen politischen Willen. Der technische Fortschritt der Vergangenheit hat sowohl zur Entstehung der heutigen Lage beigetragen als auch zu ihrer Erkenntnis geführt. Heute muss er dazu beitragen, die erkannte Problemlage aufzulösen. Innovationen können den Weg in eine nachhaltige Zukunft weisen. Beschreiten muss die Menschheit ihn dann allerdings selber.



**Prof. Dr. Dr. h. c. Hans Joachim Schellnhuber,  
Direktor des Potsdam-Instituts für Klimafolgenforschung**

## DIE KLIMAENTWICKLUNG IN DEUTSCHLAND

Wie war das Klima im 20. Jahrhundert?

Wie ist das Klima gegenwärtig?

Wie können wir in die Zukunft schauen?

Wie wird sich das zukünftige Klima in Deutschland entwickeln?

Dass sich das Klima ändert und zwar ständig, ist eine Binsenweisheit. Die interessante Frage, die dahinter steht, ist: An welchem Ort, in welcher Zeit und mit welcher Intensität finden solche Änderungen statt? Für die Vergangenheit lassen sich solche Aussagen recht gut treffen. Die Informationen dazu bekommen die Klimatologen unter anderem aus Eisbohrkernen, Sedimenten, Baumringen, Aufzeichnungen und Messungen. Für die Frage nach der aktuellen Klimaentwicklung ist natürlich nur die Auswertung von Beobachtungsdaten sinnvoll. Will man in die Zukunft blicken, braucht man zum einen ein Modell, das die Vergangenheit möglichst genau abbildet und gleichzeitig zukünftige Entwicklungen berechnen kann, zum anderen plausible Vorgaben für die zukünftige Entwicklung, die in das Modell eingehen (zum Beispiel die CO<sub>2</sub>-Entwicklung). Da ein Modell immer nur ein beschränktes Abbild der Wirklichkeit liefert, also

nicht alle Eigenschaften des Originals (hier die des physikalischen Zustands der Atmosphäre) erfasst, erzeugt man keine Vorhersage der Zukunft sondern ein Szenarium. Das heißt, dass ein Szenarium der unter bestimmten Vorgaben ausgedachte oder ausgerechnete Entwurf einer Situation oder einer zu erwartenden Entwicklung ist. Da man sich beliebig viele Szenarien „ausdenken“ kann, stellt sich automatisch die Frage danach, welches der Szenarien denn das „richtige“ ist? Diese Frage kann prinzipiell nicht beantwortet werden. Man wählt deshalb in der Regel das Szenarium aus, mit dem eine bestimmte Fragestellung beantwortet werden kann: Will man zum Beispiel wissen, was in der zukünftigen Klimaentwicklung im Extremfall auftreten kann, oder wie sich das Klima einstellt, wenn bestimmte Maßnahmen getroffen werden? Oder interessieren nur die mittleren Verhältnisse innerhalb der nächsten Dekaden?

Die erste Frage dazu lautet: Wie entwickelte sich das Klima in Deutschland zwischen 1901 und 2010 und wie wird es sich zwischen 2011 und 2100 weiterentwickeln, wenn man bestimmte Szenarienvorgaben macht. Die daraus resultierenden Ergebnisse sind wiederum Grundlage für die zweite Fragestellung: Welche Einflüsse hat der Klimawandel auf Land- und Forstwirtschaft, auf die hydrologische Situation sowie die Energiewirtschaft? Die zweite Fragestellung wird in den entsprechenden Kapiteln behandelt. Die Ergebnisse zur ersten Fragestellung werden im Folgenden in einer kurzen Übersicht dargestellt.

### DIE DATEN

Deutschland hat ein sehr dichtes Netz meteorologischer Stationen, wovon eine relativ große Anzahl schon seit Beginn des vorigen Jahrhunderts in



Betrieb ist. Darauf aufbauend wurde ein vollständiger und homogener Datensatz von täglichen Werten für den Zeitraum 1901-2010 für alle verfügbaren Klima- und Niederschlagsstationen erstellt. Erfasst wurden unter anderem die Lufttemperatur (Tagesmaximum, -mittel, -minimum), die Tagessumme des Niederschlags, die Sonnenscheindauer und der Bedeckungsgrad des Himmels mit Wolken. Auf dieser Basis wurden Monatswerte, Jahreswerte und Dekadenwerte berechnet, die dann jeweils auf ein Gitter von  $0,11^\circ \times 0,11^\circ$  interpoliert wurden. Zur statistischen Beschreibung der räumlichen Struktur wurden für die Bundesländer die zehnjährigen Mittel (beziehungsweise Summen) aus der Mittelung über alle in dem jeweiligen Bundesland vorhandenen Stationen berechnet (und in gleicher Weise das Deutschlandmittel). Für die einzelnen Kreise wurde von den umliegenden Stationen auf die Kreismittelpunkte interpoliert.

#### **DAS MODELL**

Als Modell wurde das statistische Regionalmodell STARS (STatistical Analogue Resampling Scheme) (Orlowsky et al. 2008) eingesetzt. Wie der Name vermuten lässt, werden mit diesem Modell aus Beobachtungen der Vergangenheit Witterungsfälle herausgesucht, die bei Vorgabe eines Temperaturtrends auch so in der Zukunft auftreten und ohne Verletzung der physikalischen Zusammenhänge sinnvoll zu einem Szenarium zusammengesetzt

werden können. Dieser Ansatz hat sich bei den bisherigen Untersuchungen als außerordentlich robust und effektiv erwiesen und liefert dem Anwender folgende Vorteile:

Der Simulationsfehler bezogen auf die Beobachtungen für alle meteorologischen Größen liegt unter 10 Prozent.

Ein Vergleich des Modells bezüglich der Niederschlagsänderung pro Grad Temperaturänderung mit 23 zurzeit im Einsatz befindlichen globalen Klimamodellen hat gezeigt, dass STARS diese Größe für Deutschland realistischer simuliert als die globalen Modelle.

Aufgrund der extrem geringen Rechenzeit ist das Modell in der Lage, ein Szenarium mit variierenden Anfangsbedingungen in großer Anzahl (Realisierungen) durchzurechnen (ein Tag Rechenzeit für 1000 Realisierungen). Dadurch ist es möglich, genaue Angaben zur Modellunsicherheit zu machen. Das Modell kann bei Vorhandensein einer entsprechenden Datengrundlage in fast allen Gebieten der Erde eingesetzt werden (Zurzeit laufen Modelluntersuchungen in Süd- und Ost-Afrika, China, Südamerika und Europa).

Damit ist das Modell STARS als Datenlieferant für eine Vielzahl regionaler Modelle zur Abschätzung der Klimafolgen geeignet. Nicht eingesetzt werden kann das Modell allerdings zur Lösung von Fragen

hinsichtlich der Beschreibung und Entwicklung physikalischer Vorgänge in der Atmosphäre. Hier muss auf die regionalen dynamischen Modelle zurückgegriffen werden.

#### **DAS SZENARIOUM**

Bei dem vorzugebenden mittleren Temperaturtrend wurde in der ersten Ausbaustufe des Internet-Portals das Szenarium mit dem stärksten Zuwachs an Treibhausgasemissionen RCP8.5 (Representative Concentration Pathway 8.5) aus den aktuellen Szenarienvorgaben des IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) ausgewählt (Meinshausen et al. 2011). Daraus ergibt sich ein räumlich differenzierter Temperaturanstieg für Deutschland zwischen  $3,6^\circ\text{C}$  und  $4,1^\circ\text{C}$  im Zeitabschnitt 2011-2100, wenn man die zurzeit zur Verfügung stehenden Szenarienläufe der globalen Modelle zu Grunde legt. Das Szenarium RCP8.5 wurde ausgewählt, weil seit 2006 die berechneten  $\text{CO}_2$ -Emissionen bereits über den Szenarienwerten liegen. Das bedeutet, dass das vom IPCC als extrem eingestufte Szenarium RCP8.5 bereits von der Realität eingeholt beziehungsweise überholt wurde, wenn der Trend der beobachteten  $\text{CO}_2$ -Emissionen weiter erhalten bleibt. Das Szenarium RCP8.5 kommt also der gegenwärtigen Emissionsentwicklung am nächsten.

An dieser Stelle sei nochmals ausdrücklich daran erinnert, dass die Ergebnisse der Szenarienrechnungen

für den Zeitraum 2011-2100 keine Vorhersage im üblichen Sinn sind, sondern unter den gegebenen Randbedingungen eine mögliche Zukunft darstellen.

### DIE ERGEBNISSE

Eine umfassende Darstellung aller Ergebnisse ist an dieser Stelle nicht möglich. Sämtliche Ergebnisse werden im Internet-Portal [www.KlimafolgenOnline.com](http://www.KlimafolgenOnline.com) präsentiert. Deshalb soll hier nur an zwei Beispielen gezeigt werden, was sich klimatisch bereits in Deutschland verändert hat, und was unter der Annahme des Szenariums RCP8.5 in der Zukunft zu erwarten ist.

Im ersten Beispiel wird die Temperaturentwicklung zwischen 1901-1910 und 2001-2010 dokumentiert. Abbildung 1 zeigt die räumliche Verteilung der Jahresmitteltemperatur für den Zeitraum 1901-1910. Sieht man von den Gebirgen ab, liegt die Jahresmitteltemperatur in diesem Zeitraum je nach Region zwischen etwa 7°C und 12°C. Dabei zeigt sich, dass der Oberrheingraben und das Kölner Becken die wärmsten Regionen Deutschlands sind. Abbildung 2 steht für die Temperaturentwicklung bis zum Jahrzehnt 2001-2010, und belegt für ganz Deutschland einen Temperaturanstieg, der zwischen 0,25°C und 2°C liegt. Damit folgt die Temperaturentwicklung in Deutschland der zurzeit ablaufenden globalen Erwärmung.

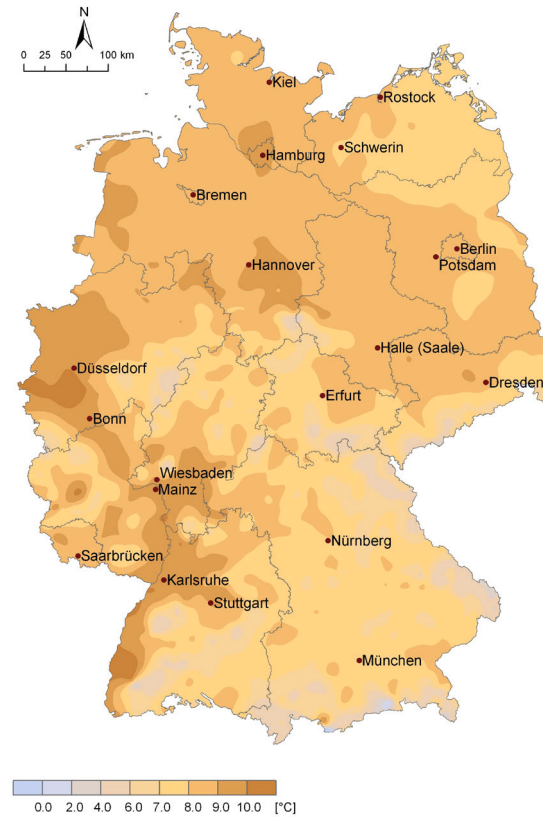


Abbildung 1:  
Jahresmittel der Lufttemperatur, Deutschland 1901-1910<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Sämtliche Zeiträume in den Abbildungen der Kapitel wurden unterschiedlich gewählt, um die zeitliche Spannweite der Gesamtuntersuchung zu verdeutlichen

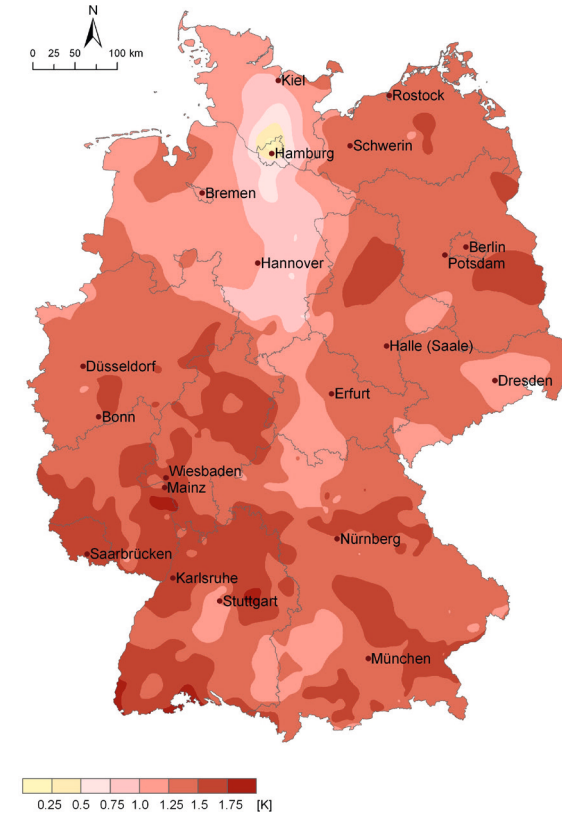


Abbildung 2:  
Differenzen der Jahresmittel der Lufttemperatur in Deutschland zwischen den Perioden 2001-2010 und 1901-1910

Im zweiten Beispiel wird gezeigt, wie sich die klimatische Wasserbilanz, das ist die Differenz aus gemessenem Niederschlag und berechneter Verdunstung, bis zum Zeitraum 2041-2050 entwickeln wird. In Abbildung 3 ist der aktuelle Mittelwert (Zeitraum 2001-2010) der klimatischen Wasserbilanz dargestellt. Negative Werte findet man in großen Gebieten Ostdeutschlands und einem Streifen entlang des Rheins, vom nördlichen Oberrheingraben bis zur Kölner Bucht. In Abbildung 4 ist die klimatische Wasserbilanz für den Zeitraum 2041-2050 dargestellt. Schon auf den ersten Blick ist zu erkennen, dass die Gebiete mit einer negativen klimatischen Wasserbilanz deutlich zugenommen haben. In manchen Regionen sind die Werte um bis zu 300 mm gesunken.

Diese beiden Beispiele zeigen, dass es seit Beginn des 20. Jahrhunderts zu deutlichen Klimaänderungen in Deutschland gekommen ist. Geht die Entwicklung so wie hier in dem Szenarium RCP8,5 angenommen weiter, werden sich die zu erwartenden klimatischen Änderungen noch deutlich vergrößern. Eine vollständige Übersicht liefert das bereits erwähnte Internet-Portal. Eine zusammenfassende Übersicht über die Leistungen dieses Portals findet sich im Kapitel „Klimawandel und Klimafolgen verständlich vermitteln“.

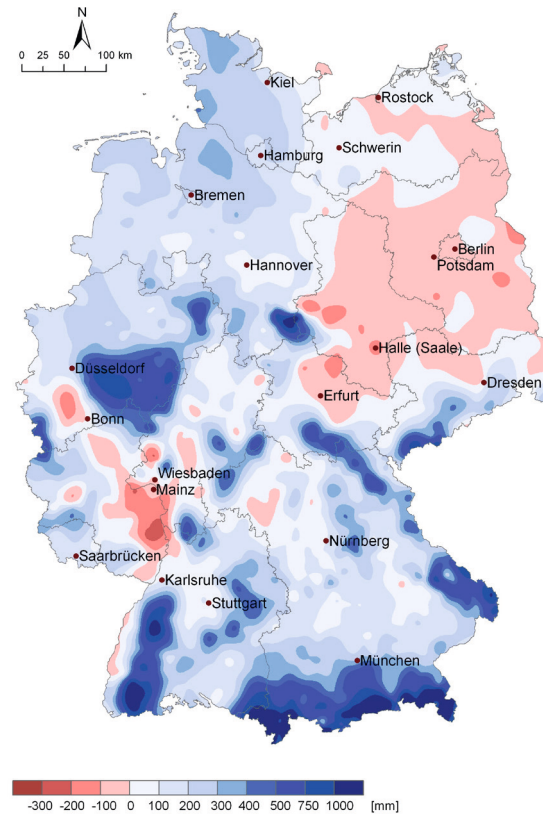


Abbildung 3:  
Mittlere Jahressumme der klimatischen Wasserbilanz,  
Deutschland 2001-2010

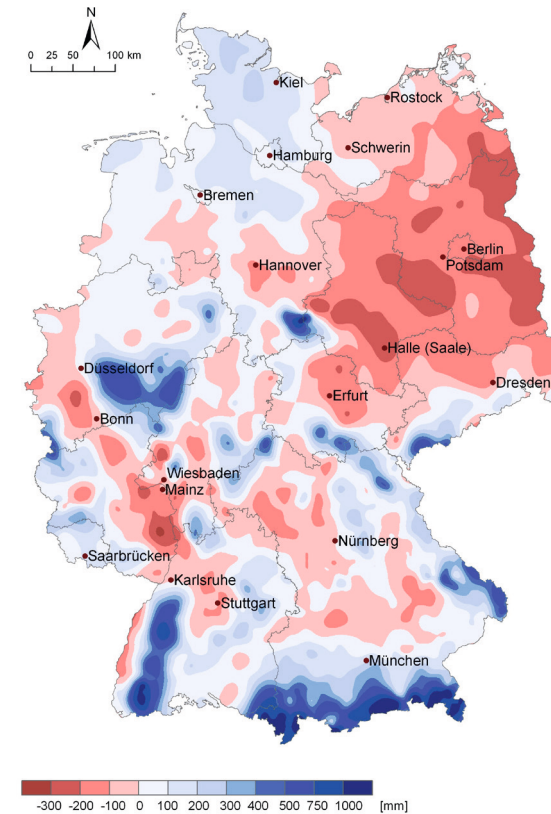


Abbildung 4:  
Mittlere Jahressumme der klimatischen Wasserbilanz,  
Deutschland 2041-2050

Ein flächendeckender Beobachtungsdatensatz von 110 Jahren ermöglicht eine umfassende Analyse des Klimas der Vergangenheit und der Gegenwart. Der Klimawandel läuft bereits ab und wird sich in Zukunft sehr wahrscheinlich noch verstärken.

Mit dem regionalen Klimamodell STARS ist es möglich, zukünftige Klimaentwicklungen zu berechnen. Dafür wurde das Szenarium RCP8.5 gewählt, das für Deutschland zu folgenden Projektionen kommt:

- In der Mitte des 21. Jahrhunderts ist es in Deutschland merklich wärmer.
- Die Hitzebelastung nimmt deutlich zu, die Kältebelastung ab.
- Die Sommer werden trockener.
- Der Klimawandel läuft regional unterschiedlich ab.



## AUSWIRKUNGEN DES KLIMAWANDELS AUF DEN WASSERHAUSHALT IN DEUTSCHLAND

Der Wasserhaushalt einer Landschaft ist unmittelbar an das regionale Klima gekoppelt und darum auch sehr sensibel gegenüber Änderungen in den klimatischen Bedingungen. Die wichtigste Einflussgröße ist naturgemäß der Niederschlag. Ähnlich bedeutend für die lokale Wasserbilanz ist gerade in den trockenen Regionen, also zum Beispiel in vielen Gebieten Ostdeutschlands, die Verdunstung.

Durch den Anstieg der Temperatur können sich zum einen die Niederschlagsmengen und -verteilungen ändern, zum anderen wird die Verdunstung stimuliert, und zwar einmal durch die zusätzliche Energie als auch durch eine Verlängerung der Vegetationsperiode und einen dadurch gesteigerten Wasserbedarf der Pflanzen. Beides wirkt dann auf den regionalen Wasserhaushalt (Hattermann et al. 2011).

## Welche Folgen hat der Klimawandel auf die hydrologischen Prozesse und Wasserressourcen in den verschiedenen Regionen Deutschlands bis zur Mitte dieses Jahrhunderts?



### DAS MODELLSYSTEM

Grundlage der Abschätzung der Auswirkungen von Klimaänderungen auf die hydrologischen Prozesse und die Wasserressourcen sind Klimaszenarien, welche mit dem statistischen regionalen Klimamodell STARS (s. Kapitel „Die Klimaentwicklung in Deutschland“) erzeugt wurden. Die Ergebnisse werden für die Regionen und Flusseinzugsgebiete (Abbildung 5) in Deutschland dargestellt und in ihren Auswirkungen mit anderen Szenarienergebnissen verglichen. Für die Transformation der Klimaszenarien in hydrologische Größen wurde das Modellsystem SWIM (Soil and Water Integrated Model) angewendet (Krysanova et al. 1998). Alle relevanten hydrologischen Prozesse, also Versickerung und Verdunstung, Grundwasserneubildung und Fließprozesse im Fluss, werden darin berücksichtigt. Das System bildet auch die Vegetations-

dynamik ab, welche unter Klimawandel von Bedeutung ist, da sich bei wärmeren Temperaturen die jahreszeitlichen Wachstumsprozesse und damit auch der Wasserbedarf der Pflanzen ändern.

### AGGREGIERTE ERGEBNISSE

Abbildung 6 stellt die Auswirkungen des Klimaszenariums auf die täglichen Abflüsse bei einer Temperaturzunahme um 2°C bis zum Jahre 2050 beispielhaft für die Ems und die Elbe vor. Gezeigt ist der langjährige mittlere tägliche Abfluss der Perioden 1991-2010 und 2031-2050. Da durch STARS insgesamt 100 Realisierungen des zukünftigen Klimas generiert und diese jeweils als Antrieb für SWIM genutzt wurden, liegen auch 100 Realisierungen der zukünftigen Abflussmengen vor, welche als graues Band dargestellt sind. Unter diesen Bedingungen des Klimawandels kann der Abfluss

im durch maritimes Klima geprägten Einzugsgebiet der Ems sogar noch etwas ansteigen, nur im Sommer kommt es zu einem Rückgang. Im durch kontinentales Klima geprägten Einzugsgebiet der Elbe sinkt auch unter Berücksichtigung der Unsicherheit insgesamt die Wasserverfügbarkeit durch die ansteigende Verdunstung und eine Niederschlagsumverteilung vom Sommer in den Winter (Huang et al. 2010). Nur im Winter kann es auch hier durch eine früher und eventuell intensiver einsetzende Schneeschmelze und durch die im Winter in einigen Regionen steigenden Niederschläge zu einem meist nur kurzfristigen Anstieg der Abflüsse kommen, welcher den Rückgang der Abflüsse im Sommer aber nicht ausgleichen kann. Die hier dargestellten Wassermengen in den Flüssen sind ein Indikator für eine Zu- oder Abnahme von Trockenperioden und eine Änderung der zur Verfügung



Abbildung 5: Die großen Flusseinzugsgebiete in Deutschland

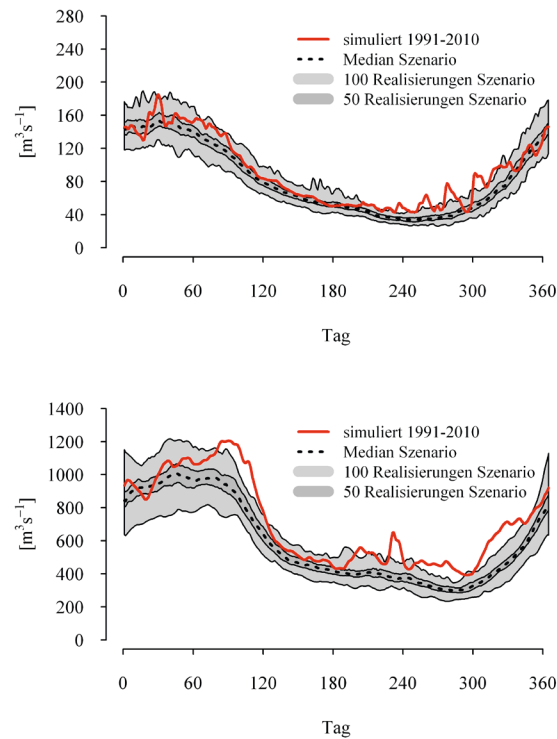
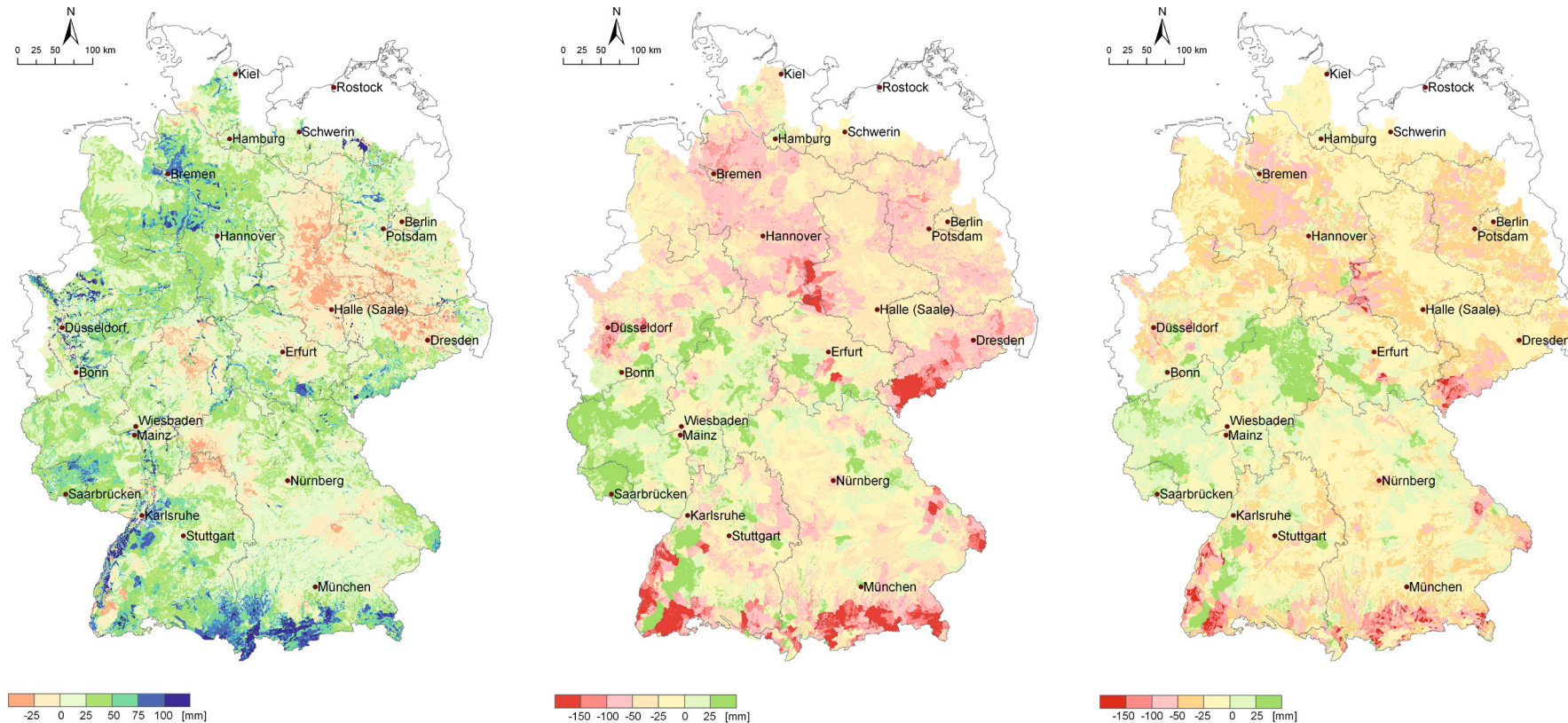


Abbildung 6: Simulierte Abflüsse für die Ems am Pegel Versen (oben) und die Elbe am Pegel Neu Darchau (unten) als langjährige tägliche Durchschnitte für die Perioden 1991-2010 und 2031-2050

stehenden Wasserressourcen. Die Veränderung ist im kontinentalen Osten Deutschlands (im Einzugsgebiet der Elbe) und im späten Sommer am stärksten. Diese Ergebnisse werden durch hydrologische Simulationen mit Klimaszenarien aus anderen regionalen Klimamodellen gestützt, auch wenn der Abfall der Wasserverfügbarkeit dort teilweise erst gegen Ende dieses Jahrhunderts eintritt.

Abbildung 7 zeigt die flächenhafte Änderung der Verdunstung, der insgesamt gebildeten Abflussmenge (Summe von Oberflächen- und Zwischenabfluss und Grundwasserneubildung) und der Grundwasserneubildung. Die Verdunstung nimmt überall dort zu, wo unter Szenarienbedingungen insgesamt genug Wasser dafür vorhanden ist, da unter wärmeren Bedingungen mehr Energie zur Verfügung steht. Auch beginnt das Wachstum der Pflanzen früher im Jahr und dauert länger bis in den späten Herbst hinein, wodurch der Wasserverbrauch der Vegetation deutlich ansteigen kann. Der Einfluss auf die lokale Abflussbildung ist besonders stark dort, wo sich Änderungen in der Verdunstung und im Niederschlag addieren. Auch die Grundwasserneubildung nimmt regional ab, da in das Grundwasser nur das Wasser gelangt, welches entweder nicht schon oberflächlich abgefließen oder durch die Pflanzen aufgenommen wurde. Unter diesen Bedingungen kann auch je nach Region und Entfernung zum nächsten Oberflächengewässer der Grundwasserspiegel deutlich fallen.



Hochwasserereignisse sind oft das Ergebnis einer komplexen Überlagerung von verschiedenen hydro-klimatischen Prozessen, zu denen extreme Niederschläge, starke Schneeschmelzen, Dammbrüche, Eisstau und Kombination von Hochwasserwellen gehören. Außerdem spielen die Landbe-

deckung und der Versiegelungsgrad der Oberfläche gerade für kleine und mittlere Hochwasser eine wichtige Rolle (Hattermann et al. 2012). Die hydrologische Modellierung erfolgte wieder durch das Modell SWIM, wobei die fünf großen Flussgebiete Deutschlands, welche ca. 88 Prozent der Fläche

**Abbildung 7:** Änderung der jährlichen Summen der Verdunstung (links), des Gesamtabflusses (mitte) und der Grundwasserneubildung (rechts), im Vergleich der Durchschnitte der Jahre 1991-2010 und 2031-2050 für die großen Flusseinzugsgebiete

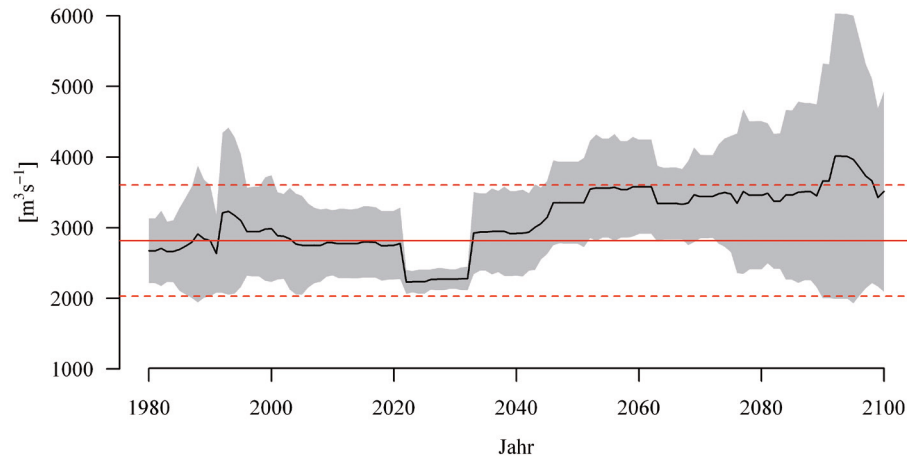


Abbildung 8: Entwicklung der Abflussmenge eines 30-jährlichen Hochwassers am Elbepegel Neu Darchau für ein REMO-Szenarium (A1B). Rot dargestellt ist der Konfidenzbereich des 30-jährlichen Hochwassers für die Referenzperiode 1961-1990, grau der Konfidenzbereich unter Szenarienbedingungen

Deutschlands abdecken, berücksichtigt wurden. Die Klimarealisierungen ähneln in ihrem Temperaturverlauf den im Kapitel „Die Klimaentwicklung in Deutschland“ beschriebenen, sind aber durch die dynamischen regionalen Klimamodelle REMO (Jacob und Tomassini 2009) und CCLM (Böhm et al. 2006) erstellt worden, welche insbesondere die für die Bildung von Hochwasserereignissen wichtige Entstehung von Starkniederschlägen besser abbilden. Insgesamt wurden drei Klimaszenarien des Modells REMO und zwei Szenarien des Modells CCLM mit jeweils zwei Realisierungen berücksichtigt. Abbildung 8 zeigt beispielhaft die

Entwicklung des Abflussvolumens eines 30-jährlichen Hochwassers im Einzugsgebiet der Elbe (Pegel Neu Darchau).

Bei einem in Mitteleuropa im Jahresverlauf eher gleich verteilten Niederschlag wird das Abflussregime in Deutschland hauptsächlich durch die Temperaturbedingungen beeinflusst. Die zu erwartenden Klimaänderungen haben daher auch einen besonders starken Effekt auf diese saisonalen Schwankungen. Dies gilt sowohl für Wassermangel im Raum (dies sind in Deutschland zum Beispiel die niederschlagsarmen Gebiete im Leipziger Becken, im Oderbruch, Sachsen-Anhalt, oder in der Oberrheinebene) als auch in der Zeit (also im Sommer und/oder während langer Trockenperioden). Besonders kritische Verhältnisse sind bei einer möglichen Überlagerung des Wassermangels in Raum und Zeit zu erwarten.

Gleichzeitig zeigen die Klimasimulationen aber auch, dass unter wärmeren Klimabedingungen der Wassergehalt in der Atmosphäre ansteigen und hochwasserrelevante Großwetterlagen häufiger vorkommen können. Als Folge können die durch Hochwasser verursachten Schäden in Deutschland ansteigen.



## KLIMAFOLGEN FÜR WÄLDER

Wie werden die Wälder in Deutschland wachsen? Welche Risiken sind mit dem zu erwartenden Klimawandel verbunden? Antworten auf diese Fragen sind für die Forstwirtschaft von Bedeutung, um die Wälder nachhaltig zu sichern, sie interessieren aber auch jeden Bürger, der die Leistungen des Waldes schätzt.

Die Wälder in Deutschland und damit verbunden die Forstwirtschaft leisten in der Gesellschaft und der Landschaft eine Reihe von wichtigen Funktionen. Holz- und Nischholzprodukte, ein vielfältiger Erholungsraum sowie ein Lebensraum für Tier- und Pflanzenarten werden bereitgestellt. Darüber hinaus tragen sie zum Erosions- und Lawinenschutz bei, zum Schutz des Global-, Lokal- und Regionalklimas; sie wirken als Lärmfilter, Staubfilter und Schadstoffsенke und nicht zuletzt werden Arbeitsplätze zur Verfügung gestellt.

Wälder sind sowohl Senke als auch Quelle von Kohlenstoff. Sie liefern den weitestgehend CO<sub>2</sub>-neutralen Bau- und Werkstoff sowie regenerativen Energieträger Holz. Unter dem zu erwartenden Klimawandel kommt den Wäldern eine besondere Rolle zu, da sie von den Klimaänderungen beein-

flusst werden und andererseits Möglichkeiten zur Anpassung und Vermeidung der Folgen des Klimawandels bieten.

Die Auswirkungen des Klimawandels auf die Wälder in Deutschland wurden anhand von Klimaszenarien des statistischen Regionalmodells STARS und mittels des am PIK entwickelten dynamischen prozess-basierten Waldwachstumsmodells 4C (FORESEE – FORESt Ecosystems in a Changing Environment) (Lasch et al. 2005) analysiert. Dieses Modell erlaubt es, das Wachstumsverhalten eines Waldbestandes unter sich ändernden Umweltbedingungen, aber auch die Stoffflüsse zwischen Boden, Wald und Atmosphäre abzubilden. Im Fokus der hier dargestellten Untersuchungen standen die Änderungen des Wachstums der Hauptbaumarten Fichte, Kiefer, Buche und Eiche, aber auch die Risi-

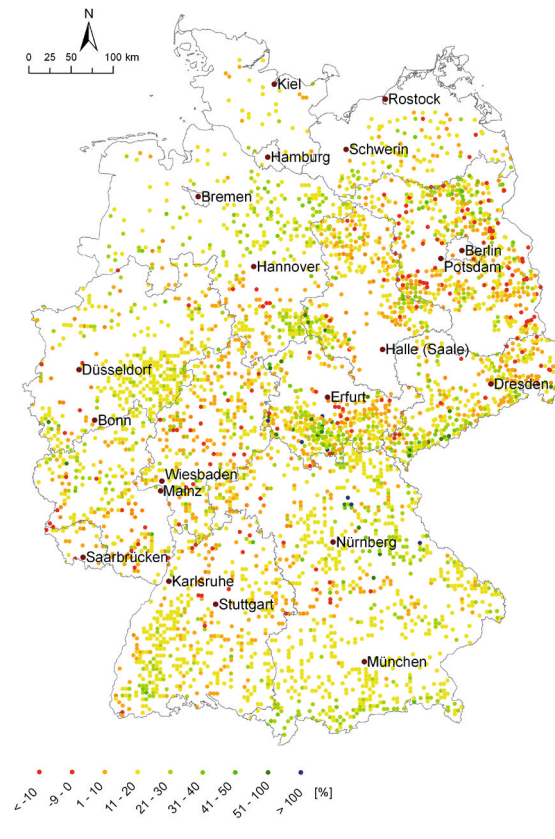
ken, die sich mit dem Klimawandel ergeben können. Die Analysen mit dem Modell 4C wurden für den Zeitraum 1991-2010 mit dem Gegenwartsklima und für den Zeitraum 2031-2050 mit dem Szenarium RCP8.5 durchgeführt. Dafür wurden 4583 repräsentative Waldbestände ausgewählt (Wolff 2002). Hier werden nun an ausgewählten Beispielen mögliche Effekte des Klimawandels auf die Wälder aufgezeigt. Umfangreichere Informationen über Klimawirkungen auf die Wälder für längere Zeiträume werden im Internet-Portal [www.KlimafolgenOnline.com](http://www.KlimafolgenOnline.com) dargestellt.

### WACHSTUM DER WÄLDER

Der Holzzuwachs der Wälder, der eng verbunden ist mit der Kohlenstoffbindung im Wald, ist ein entscheidender Indikator für die Bewertung der Situation der Wälder. Waldinventuren in Deutschland

haben festgestellt, dass die Kohlenstoffvorräte der Wälder aufgrund verschiedener Ursachen wie Umweltbedingungen und Altersstruktur der Wälder jährlich steigen. Andererseits nimmt die Holzentnahme stark zu, allerdings ohne die Nachhaltigkeit der gesamten Holzvorräte zu gefährden.

Um Aussagen über Änderungen des jährlichen Holzzuwachses unter dem Klimaszenarium zu erzielen, wurde das Modell für 4583 Waldbestände der vier Hauptbaumarten (Fichte, Kiefer, Eiche, Buche) jeweils 20 Jahre für die beiden Betrachtungsperioden gerechnet. Anschließend wurde die prozentuale Änderung des mittleren jährlichen Holzzuwachses der einzelnen Flächen im Zeitraum 2031-2050 gegenüber dem mittleren jährlichen Holzzuwachs für 1991-2010 berechnet (Abbildung 9). Die Simulationen wurden mit konstanter und steigender CO<sub>2</sub>-Konzentration, passend zu dem Szenarium RCP8.5, durchgeführt, um die Unsicherheit über das Wachstumsverhalten unter dem sogenannten CO<sub>2</sub>-Düngungseffekt nicht zu vernachlässigen. Die Ergebnisse für den Fall, dass der zusätzliche CO<sub>2</sub>-Düngungseffekt nicht betrachtet wird, zeigen Anstiege des Holzzuwachses für die betrachteten Kiefernbestände in fast allen Regionen, aber insbesondere im Nordostdeutschen Tiefland, wo sie am häufigsten vorkommen. Die Steigerung des Holzzuwachses für die Fichten fällt etwas geringer aus und ist vor allem in den Mittelgebirgslagen und im Süden Deutschlands am höchsten, aber



**Abbildung 9:**  
Prozentuale Änderung des Holzzuwachses der betrachteten Waldbestände für den Zeitraum 2031-2050 gegenüber 1991-2010 ohne Berücksichtigung des CO<sub>2</sub>-Düngungseffekts

am geringsten im Nordostdeutschen Tiefland. Die betrachteten Eichenbestände zeigen ähnliche Holzzuwachsstärkungen wie die Fichte, allerdings gibt es Standorte im Nordostdeutschen Tiefland, an denen der Holzzuwachs unter dem betrachteten Klimaszenarium zurückgeht. Für die Buchenbestände wird unter dem Klimaszenarium an den meisten Standorten, zum Beispiel in den tieferen Lagen der Mittelgebirgsregionen und vor allem im Nordostdeutschen Tiefland (rote Symbole in Abbildung 9), ein geringerer Holzzuwachs als gegenwärtig berechnet. Nur einige Buchenbestände in den Alpen, im Nordwestdeutschen Tiefland und die Bestände in den höheren Lagen der Mittelgebirge profitieren von der im Szenarium abgebildeten klimatischen Situation. Die Buchenbestände sind unter dem betrachteten Szenarium eher die Verlierer, während die Kiefernbestände auch aufgrund der klimatischen Ansprüche der Kiefer eher zu den Gewinnern gehören können. Wenn man diese Modellanalyse mit dem anhaltenden CO<sub>2</sub>-Düngungseffekt durchführt, sind die Anstiege im Holzzuwachs wesentlich stärker und für alle Baumarten zutreffend, was auch auf die dann steigende Wassernutzungseffizienz der Bäume zurückzuführen ist.

Eine weitere Ursache für steigende Holzträge ist neben der direkten Wirkung der höheren Temperaturen in der Szenariumpériode die dadurch bedingte Verlängerung der Vegetationsperiode. Die Phase der Blattentfaltung wurde für die Baumarten

Birke, Buche und Eiche untersucht. Die Ergebnisse zeigen, dass der schon beobachtete Trend der früheren Blühterminierung weiter anhalten kann und damit vermutlich die Länge der Vegetationsperiode für die Laubbaumarten zunimmt.

**RISIKEN FÜR DIE WÄLDER**

Höhere Wachstumsraten vor allem für die Baumarten Fichte und Kiefer können in Abhängigkeit von der Bewirtschaftung der Bestände zu höheren oberirdischen Kohlenstoffvorräten in den Beständen führen. Der gesamte Kohlenstoffvorrat der Wälder ist natürlich auch von den Kohlenstoffvorräten im Boden bestimmt. Die mögliche Änderung von Bodenkohlenstoffvorräten, die sogenannte Akkumulationsrate des Bodenkohlenstoffs, ist von der Bodenart, dem Waldtyp und den klimatischen Verhältnissen abhängig.

Diese Abschätzungen für das Waldwachstum anhand des Holzzuwachses zeigen nur ein Potenzial des Wachstums auf. Die Holz- und Kohlenstoffvorräte der Wälder in Deutschland sind durch eine Reihe biotischer und abiotischer Störungen gefährdet. Dazu gehören Störungen, die durch Extremereignisse hervorgerufen werden, wie zum Beispiel Stürme und Dürreperioden, aber auch das massenhafte Auftreten von Schaderregern. All diese Störungen sind ebenfalls von den sich ändernden klimatischen Bedingungen beeinflusst. Beispielhaft werden hier einige der damit verbundenen Risiken dargestellt.

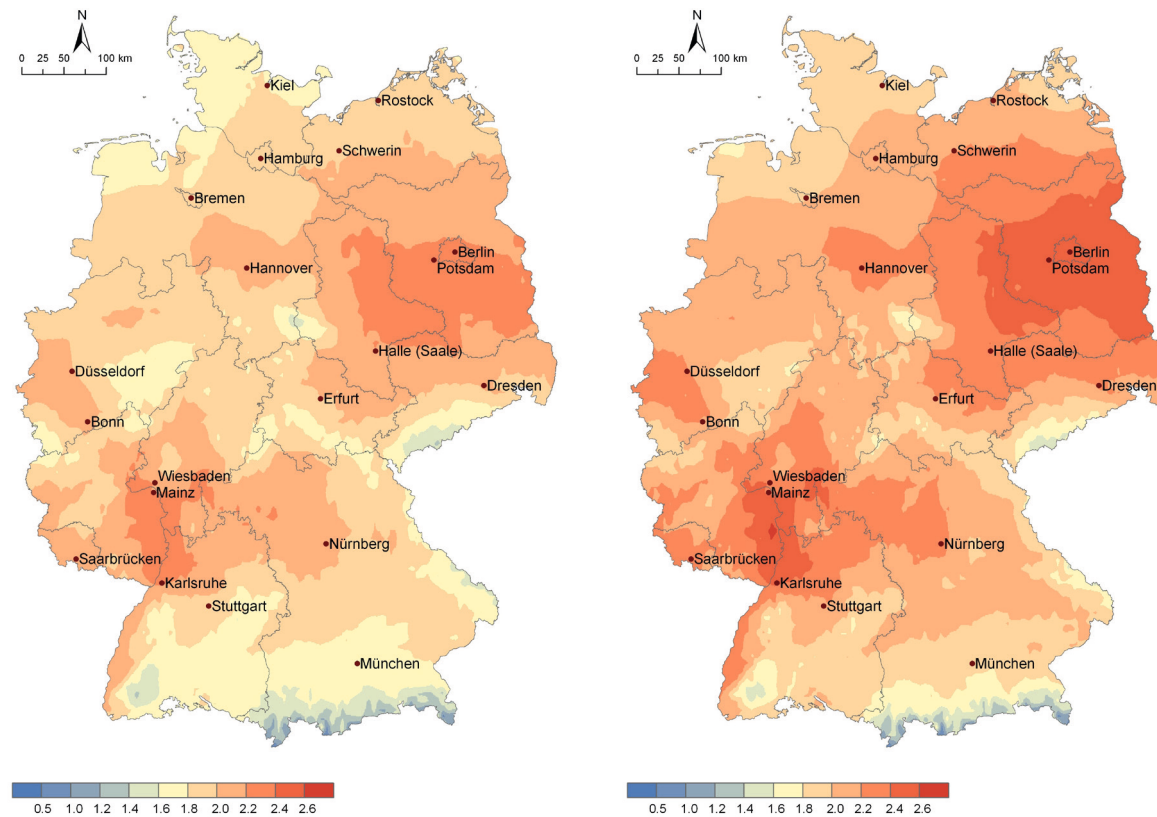


Abbildung 10: Klimatischer Waldbrandgefahrenindex, berechnet und gemittelt für 1991-2010 (links) und 2031-2050 (rechts)

Steigende Temperaturen, verbunden mit zurückgehenden Niederschlägen in den Frühjahrs- und Sommermonaten, können die klimatischen Bedingungen für die Waldbrandgefahr deutlich verändern. Um dies zu belegen, wurde für das Klimaszenarium ein von H. Käse (1969) entwickelter Index berechnet. Er drückt die klimatisch bedingte Waldbrandgefährdung aus und wurde in ähnlicher Form als Waldbrandgefahrenindex vom Deutschen Wetterdienst benutzt, um von März bis Oktober eine tägliche Waldbrandgefährdung zu prognostizieren. An allen Stationen, für die das Klimaszenarium RCP8.5 erzeugt wurde (siehe Kapitel „Die Klimaentwicklung in Deutschland“), wurde sowohl für das Gegenwartsklima als auch die Szenariensperiode dieser Index jährlich berechnet und über dem entsprechenden Zeitraum gemittelt (Abbildung 10). In dem Gebiet mit der heute schon höchsten klimatischen Waldbrandgefahr, dem Nordostdeutschen Tiefland, insbesondere Brandenburg, steigt die klimatische Waldbrandgefahr um bis zu 16 Prozent und damit besonders deutlich an. Am geringsten fällt die Änderung in den Gebieten mit gegenwärtig geringer Waldbrandgefahr wie der Alpenregion, teilweise dem Alpenvorland oder dem Nordwesten Deutschlands aus. Die Ausbreitung der Regionen mit einem mittleren Index größer als zwei nimmt im Nordosten und im Südwesten, hier vor allem im Gebiet des Oberrheingraben, deutlich zu.

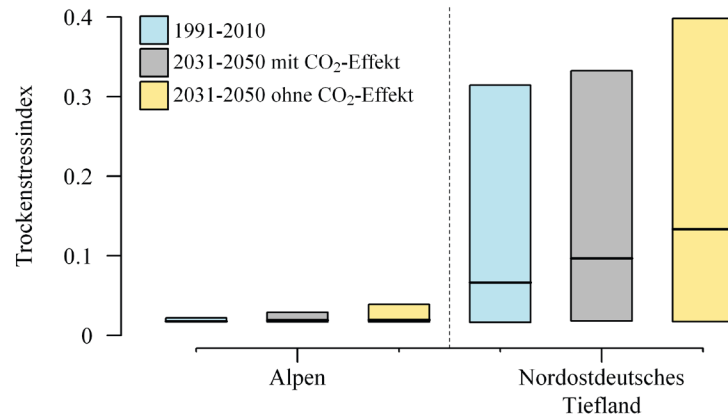


Abbildung 11:

Gemittelter jährlicher Trockenstressindex für die Baumart Buche in der Alpenregion und im Nordostdeutschen Tiefland; die Boxen stellen die Werte Median, Minimum und Maximum dar

Diese Projektion der klimatischen Waldbrandgefahr muss nicht zwangsläufig zu höheren Schäden durch Waldbrände führen. Sie können dort hoch sein, wo auch andere Bedingungen Waldbrand begünstigen, wie zum Beispiel Kiefernmonokulturen und sehr trockene Standortbedingungen. Andererseits werden immer mehr moderne Methoden zur Waldbranderkennung eingesetzt, wie zum Beispiel das Waldbrand-Früherkennungssystem „Fire Watch“ in Brandenburg.

Ein weiteres Risiko für Wälder ist das Auftreten von Trockenstress in Folge von Hitze- oder Dürreperioden. Für die Forstwirtschaft ist es eine wichtige

Information, in welchen Gebieten man mit einem Anstieg der Trockenheitsgefährdung bestimmter Baumarten beziehungsweise Waldbestände rechnen kann und muss. Trockenstress kann zu kurzfristigen Rückgängen in der Produktivität der Wälder führen, zum Beispiel durch vermindertes Dickenwachstum. Andererseits kann es die Bäume anfälliger für Schaderreger und Krankheiten machen.

Der hier dargestellte baumartenspezifische Trockenstressindex beschreibt pro Jahr, wie gut die Bäume eines Bestandes einer Baumart ihren Wasserbedarf decken können. Sein Wert liegt zwischen null (kein Trockenstress) und eins, dem maximalen

Trockenstress aufgrund von Wassermangel. Die Ergebnisse für das Klimaszenarium RCP8.5, hier dargestellt für zwei ausgewählte Regionen und die Baumart Buche (Abbildung 11), zeigen, dass der Trockenstress für Buchenbestände unter heutigem Klima in der Alpenregion relativ gering ist. Im Nordostdeutschen Tiefland ist er höher und auch die Variabilität des Trockenstress, vor allem aufgrund der Böden, die in dieser Region vorkommen, ist höher. Unter dem Klimaszenarium ändert sich der mittlere Trockenstressindex in der Alpenregion kaum und die Variabilität nimmt gering zu, das heißt es gibt einige wenige Standorte beziehungsweise Böden in dieser Region, an denen der Trockenstress für die Buche steigt. Für die simulierten Buchenbestände im Nordostdeutschen Tiefland sind die Auswirkungen des Klimaszenariums deutlicher als für die Alpenregion. Hier steigt der mittlere jährliche Wert des Trockenstressindex für die Szenarienperiode gegenüber dem Zeitraum 1991-2010 deutlich an, die Variabilität über den Standorten nimmt ebenfalls stark zu. Der Trockenstress nimmt weniger stark zu, wenn der CO<sub>2</sub>-Düngeeffekt berücksichtigt wird, da unter höherer CO<sub>2</sub>-Konzentration eine bessere Wassernutzungseffizienz erzielt wird. Die gezeigten Ergebnisse können so interpretiert werden, dass es unter dem Klimaszenarium zunehmend mehr Standorte im Nordostdeutschen Tiefland gibt, an denen Buchenbestände trockenstressgefährdet sind.

Durch die steigenden Temperaturen wird sich der schon beobachtete Trend zur Verschiebung der Blattform auf frühere Termine vermutlich fortsetzen und ermöglicht dadurch einen längeren Produktionszeitraum für die Bäume. Der potenziell wachstumssteigernde Effekt höherer atmosphärischer CO<sub>2</sub>-Konzentration bedingt zusätzlich eine höhere Produktivität. Je nach Bewirtschaftung und Nutzung kann so mehr Kohlenstoff im Wald gebunden werden.

Diese positive Auswirkung auf die Kohlenstoffspeicherfunktion und damit Klimaschutzfunktion des Waldes in Deutschland sowie die Substitutionsmöglichkeit fossiler Rohstoffe zur Vermeidung von CO<sub>2</sub>-Emissionen kann in Zukunft deutlich beeinträchtigt werden. Die steigenden, aber nur mit großer Unsicherheit zu projizierenden biotischen und abiotischen Risiken für die Wälder zum Beispiel durch Trockenheit können bis zur Mitte des Jahrhunderts die Stabilität der Wälder und ihre Biomasseproduktion negativ beeinflussen.

## AUSWIRKUNGEN DES KLIMAWANDELS AUF DIE LANDWIRTSCHAFT IN DEUTSCHLAND

Wie verändert der Klimawandel die natürlichen Voraussetzungen für die landwirtschaftliche Produktion in Deutschland?

Ist ein klimabedingter Rückgang der landwirtschaftlichen Erzeugung zu erwarten?

Die landwirtschaftliche Produktion in Deutschland hängt von Naturbedingungen ab und wirkt auf diese zurück. Ihre Produktivität wird von den Temperatur- und Wasserverhältnissen sowie dem Boden bestimmt. Die Intensität der Landwirtschaft, wie sie zum Beispiel im Einsatz von Düngemitteln zum Ausdruck kommt, beeinflusst andererseits den Boden, die Qualität der Gewässer, aber auch das Klima. Hier wird nur die Produktivität der landwirtschaftlichen Produktion betrachtet. Trotzdem soll der doppelten Rolle der Landwirtschaft als ökonomischer und landschaftlicher Akteur bei der Darstellung Rechnung getragen werden. Die landwirtschaftlichen Erträge und ihre klimaabhängigen Veränderungen werden deshalb hier nicht wie gewohnt länderweise sondern in Bezug auf Flusseinzugsgebiete diskutiert. Die beiden größten

Flusseinzugsgebiete Deutschlands sind der Rhein im Westen und die Elbe im Osten (siehe Abbildung 5). Zu den wichtigsten landwirtschaftlichen Kulturen des deutschen Ackerlandes, das 2007 ca. 11,8 Millionen Hektar und damit 70 Prozent der landwirtschaftlichen Nutzfläche umfasste (DESTATIS 2012), zählen Winterweizen und Mais (BMELV 2012). In den Einzugsgebieten der Elbe und des Rheins schwanken die Erträge dieser beiden Kulturen in einem Bereich von plus minus 20 Prozent mit einzelnen Ausreißerjahren, in denen die Abweichungen darüber hinausgehen (Abbildung 12). Generell fallen die Schwankungen bei der Sommerkultur Mais deutlicher als bei der Winterkultur Winterweizen aus und sie sind im Osten im Einzugsgebiet der Elbe ausgeprägter als im Westen im Einzugsgebiet des Rheins.

Analog zu den Schwankungsbreiten differieren die Ertragsniveaus zwischen Ost und West. Das höhere Ertragsniveau und die größere Ertragsstabilität im Westen gegenüber dem Osten lassen sich gut auf die generell bessere Wasserversorgung im Westen zurückführen. Hier fallen ca. 200 mm Niederschlag mehr und bei vergleichbarem Verdunstungsanspruch fällt damit die Wasserbilanz um ca. 200 mm höher aus. Die stärkere Variabilität der Maiserträge im Vergleich zu denen des Weizens spiegelt den Umstand wider, dass im Herbst und zeitigen Frühjahr das Wachstum von Winterweizen kaum wasserlimitiert ist und hierdurch spätere Trockenphasen nicht in dem Maße den Ertrag mindern können wie bei den Sommerkulturen.

Bei einer Erwärmung des Klimas kann tendenziell damit gerechnet werden, dass sich der Verdunstungsanspruch der Kulturpflanzen erhöht. Bei gleichbleibenden Niederschlägen verschlechtert sich damit die klimatische Wasserbilanz – die Differenz zwischen Verdunstungsanspruch und Niederschlägen. Für Deutschland wäre nach den obigen Darstellungen zu vermuten, dass die Ertragsaussichten für den Maisanbau im Elbegebiet von einer Erwärmung am stärksten negativ beeinträchtigt würden und jene für den Winterweizenanbau im Rheingebiet am wenigsten.

### ERTRAGSMODELLIERUNG

Eine quantitative Abschätzung von Ertragseffekten des Klimawandels für ein konkretes Szenarium kann mit Ertragsmodellen erfolgen. Hier bestehen unterschiedliche Möglichkeiten. In dieser Broschüre werden Ergebnisse eines dynamischen Ertragsmodells dargestellt, welches auch den Einfluss einer Erhöhung der atmosphärischen  $\text{CO}_2$ -Konzentration auf den Ertrag bei der Simulation mit berücksichtigt. Das Modell – es handelt sich um eine Version des Modells EPIC (Environmental Policy Integrated Climate Model, Rosenberg et al. 1992) – ist Bestandteil des ökohydrologischen Modells SWIM (Krysanova et. al 1999). Es wurde genutzt, um die möglichen Ertragswirkungen des eingangs beschriebenen STARS-Szenariums für eine Erwärmung um ca.  $2^\circ\text{C}$  bis zur Mitte des Jahrhunderts

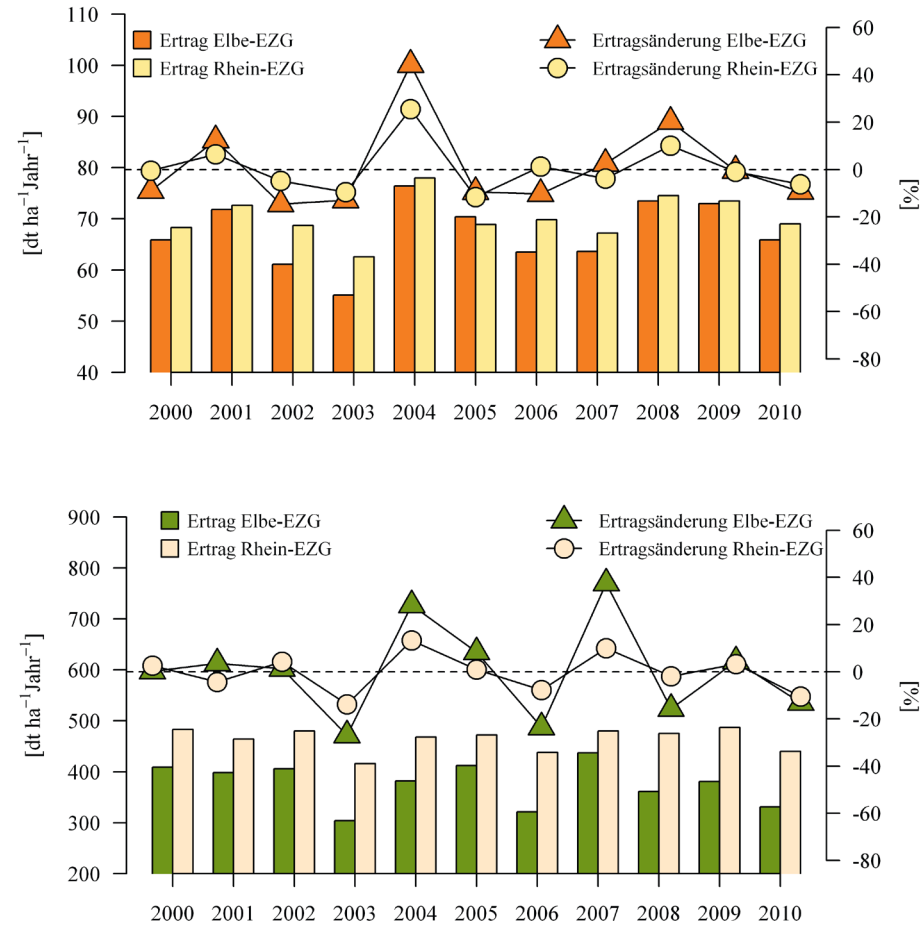


Abbildung 12:

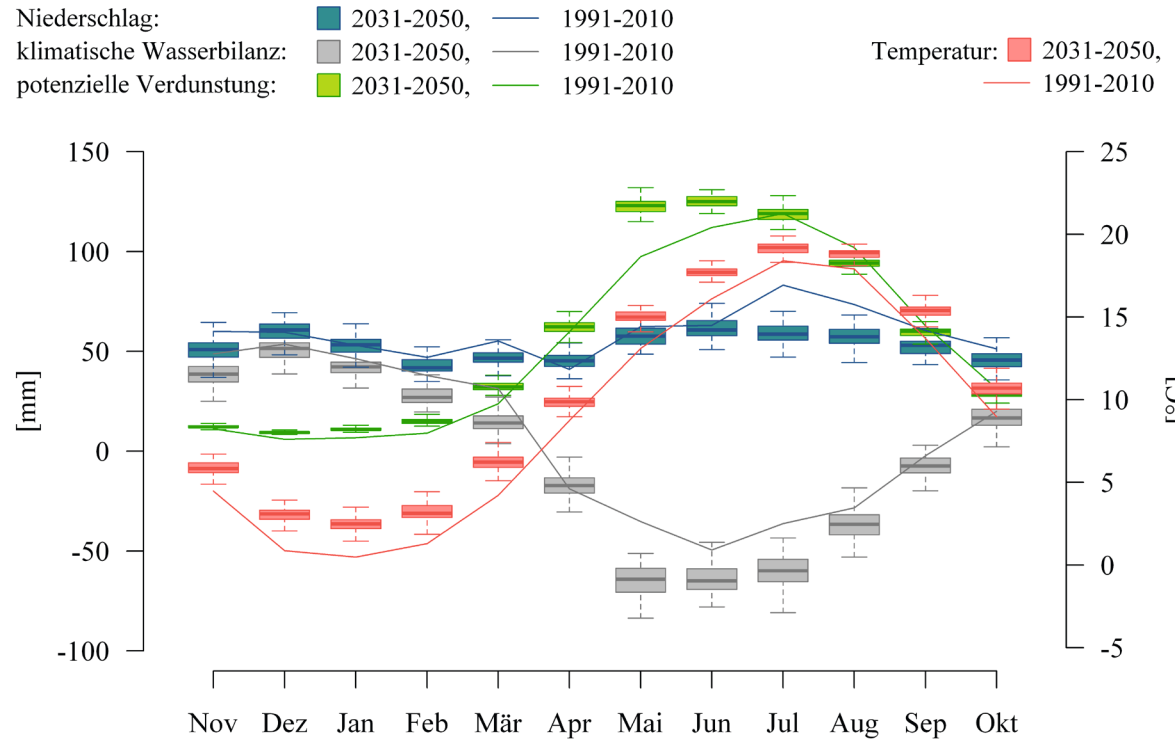
Jahreserträge und jährliche Ertragsänderungen im Vergleich zum Vorjahr von Winterweizen (oben) und Silomais (unten) in den deutschen Teilen der Flusseinzugsgebiete Elbe und Rhein berechnet auf der Basis von erhobenen Kreiserträgen

auf die Erträge von Winterweizen und Silomais im Elbeinzugsgebiet zu simulieren. Obwohl das Modell ein umfassendes Spektrum von Einflussgrößen auf den Ertrag berücksichtigt, kann es keine erschöpfende Charakterisierung der Klimafolgen auf den Ertrag der beiden Kulturen liefern. Zum einen liegt dies an der eingeschränkten Berücksichtigung wichtiger ertragsrelevanter Faktoren – die Effekte von Schaderregern und Krankheiten werden nicht erfasst – zum anderen beziehen sich die Modelle auf die Bewirtschaftung und Sorten der Gegenwart. Anpassungsmaßnahmen sind nicht berücksichtigt.

#### SZENARIUM UND SZENARIENWIRKUNGEN: BEISPIEL ELBEEINZUGSGEBIET

Die Szenarienbedingungen im Zeitraum 2031-2050 (Abbildung 13) führen in den Modellsimulationen zu einem leichten Anstieg der Erträge, im Vergleich zu den Jahren 1991-2010, wenn der CO<sub>2</sub>-Düngungseffekt Berücksichtigung findet (Abbildung 14).

Die Erträge der Winterkultur Winterweizen profitieren von den zunehmenden Niederschlägen im Winterhalbjahr und den höheren Temperaturen, auch wenn man den CO<sub>2</sub>-Düngungseffekt unberücksichtigt lässt (Abbildung 14). Die zunehmende Trockenheit im Frühjahr verhindert jedoch einen deutlicheren Ertragsanstieg. Bei den anderen im Elbeinzugsgebiet angebauten Wintergetreidearten (Roggen, Gerste) und dem Raps dürften die



**Abbildung 13:** Monatsabfolge von Temperatur, Niederschlag, klimatischer Wasserbilanz und potenzieller Verdunstung im Elbeinzugsgebiet. Die gemittelten Monatsverhältnisse für die Jahre 1991-2010 werden als Referenzlinien dargestellt. Das zeitlich und gebietlich gemittelte Monatsklima der 100 STARS-Realisierungen für die Periode 2031-50 wird durch Boxen veranschaulicht. Die waagerechten Linien über, in und unter den Boxen repräsentieren das 5-te, 25-te, 50-te, 75-te und 95-te Perzentil der Werte.



Ertragseffekte in einer ähnlichen Größenordnung liegen. In Abhängigkeit von der Wirksamkeit des CO<sub>2</sub>-Düngungseffekts kann im Elbeinzugsgebiet mit einem Ertragsanstieg beim Winterweizen um bis zu 13 Prozent gerechnet werden (Abbildung 14). Bei den oben schon erwähnten anderen Winterkulturen dürfte der voraussichtliche Effekt durch ähnliche Ansprüche an die Wachstumsbedingungen in einer jeweils vergleichbaren Größenordnung liegen.

Im Unterschied zum Winterweizen nehmen die simulierten Erträge von Silomais im Elbeinzugsgebiet im Mittel zur Mitte des Jahrhunderts ohne Berücksichtigung des CO<sub>2</sub>-Düngungseffekts leicht ab (Abbildung 14). Der Rückgang würde in einem Bereich von fünf bis acht Prozent liegen und wäre vor allem durch die sich verschlechternde Wasserversorgung im Frühjahr hervorgerufen. Mais wie auch andere Sommerkulturen würden früh in Entwicklung und Wachstum gehemmt. Selbst auf den besseren Böden wären die noch in den Böden verfügbaren Wasservorräte aus dem Winter nicht ausreichend durch die jungen Pflanzen erreichbar.

Durch eine erhöhte CO<sub>2</sub>-Konzentration kann der Ertragsrückgang kompensiert werden (Abbildung 14). Trotz der Unterschiede im Photosynthesetyp und der Wuchshöhe zwischen Mais und den anderen Sommerkulturen wie Sommergerste, Kartoffeln oder Zuckerrüben kann hier letztlich mit Effekten in einer ähnlichen Größenordnung gerechnet werden.

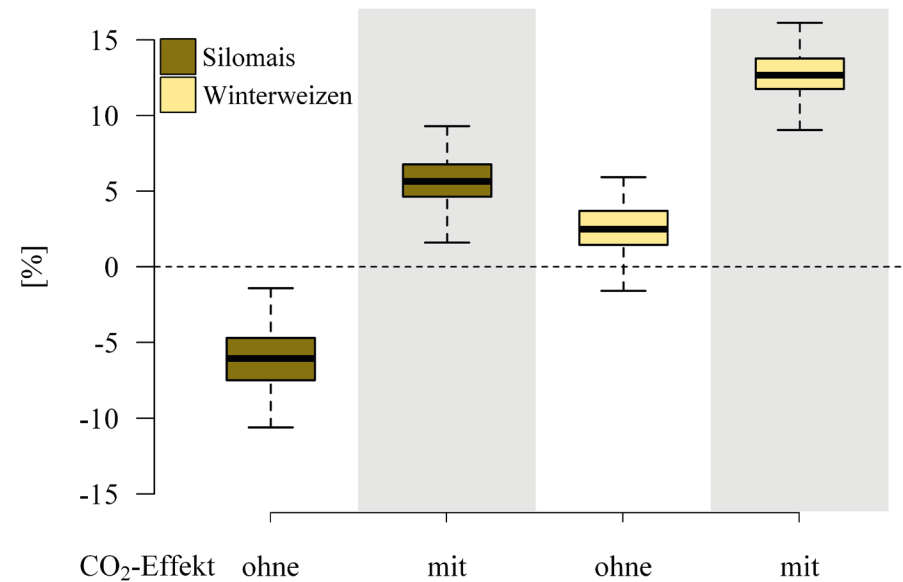


Abbildung 14: Simulierte Änderung der mittleren Erträge von Winterweizen und Silomais im Vergleich der Szenarienperiode 2031-2050 zum beobachteten Klima der Jahre 1991-2010 bei unveränderter Sortenwahl und Anbautechnik ohne und mit Berücksichtigung des CO<sub>2</sub>-Düngungseffektes. Dargestellt sind die Änderungsperzentile (5-te, 25-te, 50-te, 75-te und 95-te) der Gebiets- und Periodenmittel für 100 Realisierungen des genutzten STARS-Szenariums.

### **SZENARIENWIRKUNGEN JENSEITS DER SIMULATIONEN**

Unter Szenarienbedingungen sind die Erwartungen für das Elbeinzugsgebiet vergleichsweise ungünstig. In allen anderen Einzugsgebieten mit Ausnahme der Oder kann unter Szenarienbedingungen mit deutlicheren Ertragszuwächsen gerechnet werden. Die dargestellten Simulationsergebnisse stellen Idealisierungen dar. Die Ertragswirkungen können stärker ausfallen, wenn es den Landwirten gelingt, für die spezifischen Herausforderungen des Klimawandels adäquate Anpassungen zu finden. Die Anpassungsmaßnahmen betreffen klassische Arbeitsgänge wie Bodenbearbeitung, Aussaat und Ernte. Zu ihnen gehören aber auch Prozesse und Techniken der modernen Landwirtschaft wie angepasste Sortenwahl, Düngung, Beregnung und Pflanzenschutz. Neben den unberücksichtigten Potenzialen von Anpassungsmaßnahmen muss jedoch auch auf negative Wirkungen verwiesen werden, die in Ertragsmodellen kaum erfasst werden können. Hierzu zählen zum Beispiel neue Schaderreger und Krankheiten.

**Der Klimawandel verändert die natürlichen Voraussetzungen für die Landwirtschaft in Deutschland:**

- die verfügbare Vegetationszeit verlängert sich,
- während der Vegetationszeit kann Wasserstress häufiger und länger auftreten.

**Berücksichtigt man die kompensierende Wirkung des CO<sub>2</sub>-Düngungseffekts und die schon heute bestehenden Spielräume bei der Fruchtarten- und Sortenwahl, der Bodenbearbeitung, Düngung und Beregnung, erscheint ein klimatisch bedingter Rückgang der landwirtschaftlichen Produktion in Deutschland aber eher unwahrscheinlich.**

## AUSWIRKUNGEN DES KLIMAWANDELS AUF DIE ENERGIEERZEUGUNG IN DEUTSCHLAND

Elektroenergie ist eine Voraussetzung für den hohen Lebensstandard beziehungsweise die Wirtschaft in Deutschland. Der Klimawandel kann die Elektroenergieerzeugung auf unterschiedliche Art und Weise beeinflussen. Somit stellt sich die Frage: Wie groß sind die Auswirkungen des Klimawandels auf verschiedene Erzeugungsarten?

Ausgehend vom Stand des Energieerzeugungssystems im Jahr 2010 werden mit Hilfe von Klimaszenarien die Auswirkungen von Klimaänderungen auf die Energieerzeugung abgeschätzt. Für thermische Kraftwerke und Wasserkraftanlagen werden mit dem statistischen regionalen Klimamodell STARS erzeugte Klimadaten genutzt. Im Falle der Abschätzung des Windkraftpotenzials werden Ergebnisse des dynamischen regionalen Klimamodells CCLM (Böhm et al. 2006) verwendet.

### THERMISCHE KRAFTWERKE

Bei thermischen Kraftwerken mit Wasserkühlung wird zwischen folgenden Kühlverfahren unterschieden:

i) Durchlaufkühlung, bei der das entnommene Wasser zur Kühlung im Kondensator benutzt wird und danach wieder in vollem Umfang an das Ein-

leitgewässer abgeführt wird, der Wasserbedarf für diese Kühlsysteme ist sehr hoch;

ii) Ablaufkühlung, bei der die Kühlwassertemperatur in einen Kühlturm vor der Rückleitung abgesenkt wird, wodurch sich die potenzielle Wärmebelastung des entsprechenden Gewässers verringert;

iii) Kreislaufkühlung, bei der das im Kondensator erwärmte Wasser in einem Kühlturm rückgekühlt und wieder dem Kondensator zugeleitet wird, der Wasserbedarf für diese Kühlsysteme ist gering.

Insbesondere thermische Kraftwerke mit Durchlaufkühlung sind von einer Erhöhung der Luft- und Wassertemperatur betroffen. Unter dem gegebenen Klimaszenarium wird die Auslastung der thermischen Kraftwerke sinken (Abbildung 15). Die dargestellte Änderung der Auslastung bezieht sich auf

die an den jeweiligen Flussabschnitten gelegenen Kraftwerke; die Auslastung wird dabei als „aktuelle Produktion“ geteilt durch „maximale Produktion“ berechnet. Sinkt die aktuelle Produktion beispielsweise auf Grund hoher Wassertemperaturen, verringert sich die Auslastung. Für thermische Kraftwerke mit Kühlturm steigt die Betroffenheit in den Klimaszenarien ebenfalls an, bleibt aber im Vergleich zu den Kraftwerken mit Durchlaufkühlung auf einem geringen Niveau; die räumliche Verteilung der Betroffenheit entspricht jener der Kraftwerke mit Durchlaufkühlung. Bei der Betrachtung der thermischen Kraftwerke werden jedoch Anlagen ausgeschlossen, welche kein Oberflächenwasser entnehmen beziehungsweise hauptsächlich als Wärmekraftwerke, das heißt hauptsächlich Nutzung im Winter beziehungsweise Wärmeabgabe nicht an das Gewässer, genutzt werden.

### WASSERKRAFTANLAGEN

Die Erzeugung von Elektroenergie an Wasserkraftanlagen stellte in der Vergangenheit einen bedeutenden Anteil der Erneuerbaren Energien. Obwohl die in Deutschland installierte Kapazität in den letzten Jahren leicht zugenommen hat, ist ihr Beitrag an der Erneuerbaren Energieerzeugung vom Jahr 1990 über das Jahr 2000 bis zum Jahr 2010 von 91 Prozent über 67 Prozent auf 20 Prozent gesunken (BUNR 2011). Dies kann mit dem starken Ausbau anderer Erneuerbarer Energien (insbesondere Windkraft und Solar) erklärt werden. Da mit Wasserkraftanlagen im Vergleich zu anderen Erneuerbaren Energien sowohl Grund- als auch gesteuerte Spitzenlast erzeugt werden kann, ist sie auch zukünftig ein wichtiger Baustein für die Erneuerbaren Energien.

Die für die Abschätzung genutzten Abflüsse wurden mit dem Modell SWIM (s. Kapitel „Auswirkungen des Klimawandels auf den Wasserhaushalt in Deutschland“) erzeugt. Ein Vergleich der hier genutzten Abflüsse – unter Verwendung von Klimaeingangsdaten des Modells STARS – mit Abflüssen, die unter Nutzung anderer regionaler Klimamodelle erzeugt wurden, findet sich in Hattermann et al. (2010).

Die analysierten Klimaszenarien führen fast durchweg zu einer Reduktion der Erzeugung von Elektroenergie an Wasserkraftanlagen. Nur in einigen

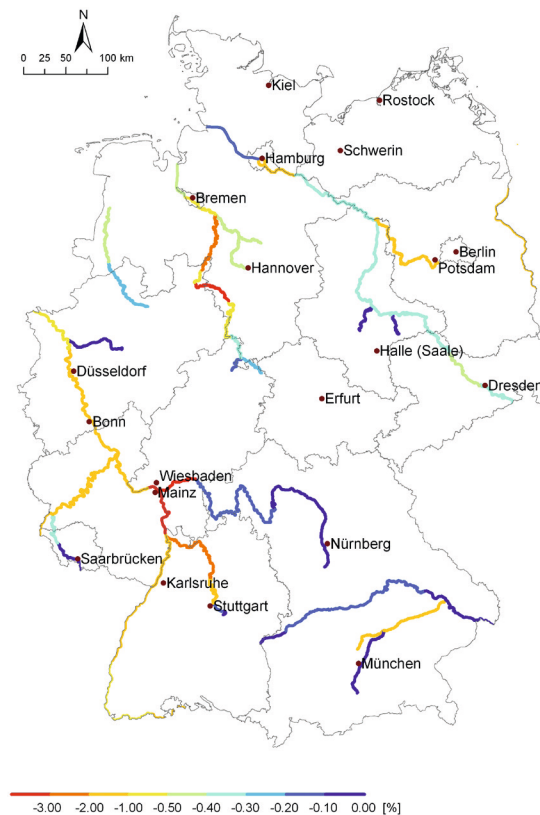


Abbildung 15: Auslastung thermischer Kraftwerke mit Durchlaufkühlung, Änderung 2051-2060 gegenüber 2008-2012; Jahresmittelwerte

Einzugsgebieten, zum Beispiel der Ems, kann es auch zu einer geringfügigen Erhöhung kommen (Abbildung 16). Insgesamt sinkt die mittlere jährliche Auslastung der Wasserkraftanlagen bis zum Jahr 2055 um 12 Prozent, was einer Reduktion der Jahresproduktion von ca. 2,5 TWh gegenüber dem aktuellen Zustand darstellt. Durch Modernisierung, zum Beispiel von Turbinen, beziehungsweise geringfügigen Ausbau der Wasserkraftanlagen ist jedoch eine teilweise oder sogar völlige Kompensation der negativen Klimaeffekte möglich.

### WINDKRAFTANLAGEN

Die Erzeugung von Elektroenergie an Windkraftanlagen liefert einen steigenden Anteil der Erneuerbaren Energien. Die in Deutschland installierte Kapazität ist in den letzten Jahren deutlich angestiegen (1990: 55 MW; 2000: 6097 MW; 2010: 27209 MW). Ihr Beitrag an der Erneuerbaren Energieerzeugung ist vom Jahr 1990 über das Jahr 2000 bis zum Jahr 2010 von 0,4 Prozent über 20 Prozent auf 37 Prozent gestiegen (BUNR 2011).

Da die mit dem Modell STARS zur Verfügung stehenden Witterungsdaten nur in täglicher Auflösung vorliegen, werden für die Abschätzung der Klimawirkungen auf die Windkraftenerzeugung Daten des dynamischen regionalen Klimamodells CCLM verwendet. Mit diesem liegen die Windgeschwindigkeiten für verschiedene Atmosphärenschichten als dreistündliche Terminwerte vor.

Tabelle 1: Summe der Änderung der Jahresproduktion der betrachteten Energieerzeugungsarten

Erzeugungsart	betrachtete installierte Leistung [GWh/a]	simulierte Produktion 2010 [GWh/a]	Änderung bis 2055 [GWh/a]	Änderung bis 2055 [%]
thermische Kraftwerke	399.639	398.885	-1.430	-0,4
Windkraftanlagen	230.515	38.736	+1.753	+4,5
Wasserkraftanlagen	37.234	20.479	-2.527	-12,3
Summe	667.388	458.100	-2.204	-0,3

Zur Abschätzung der Auslastung der Anlagen wird die Leistungskurve einer modernen Windkraftanlage (Nabenhöhe ca. 120-130 m, Rotorradius ca. 50 m) verwendet. Die Leistungskurve hat die Form einer Stufenfunktion: bei Windgeschwindigkeiten kleiner als 4 m/s steht die Anlage still; zwischen 4 m/s und 15 m/s steigt die Auslastung auf 100 Prozent an; zwischen 15 m/s und 30 m/s verbleibt die Anlage bei Vollaustattung; oberhalb von 30 m/s muss die Anlage abgeschaltet werden.

Die analysierten Wirkungen des Klimawandels weisen in der Summe einen positiven Effekt auf das Windkraftpotenzial aus (Abbildung 17). In einzelnen Monaten zeigen sich gewisse Trends, in anderen Monaten sind keine Änderungen beziehungsweise einheitliche Trends festzustellen. Für

die Jahresproduktion ergibt sich insgesamt eine Erhöhung. Räumlich profitieren eher Mittel- und Norddeutschland, während in Süddeutschland nur geringe Effekte zu erwarten sind.

#### AGGREGIERTE ERGEBNISSE

Die berechneten Änderungen der Jahresenergieproduktion nach Energieerzeugungsart sowie die Gesamtwirkungen sind in Tabelle 1 aufgeführt. Obwohl die aufgeführten Ergebnisse auf Jahresbasis sehr gering erscheinen, ist zu beachten, dass die Defizite an wenigen (Sommer-)Tagen auftreten, dann aber erheblich sein können.

Für thermische Kraftwerke mit Wasserkühlung muss insbesondere aufgrund erhöhter Wassertemperaturen, teilweise auch wegen unzureichender

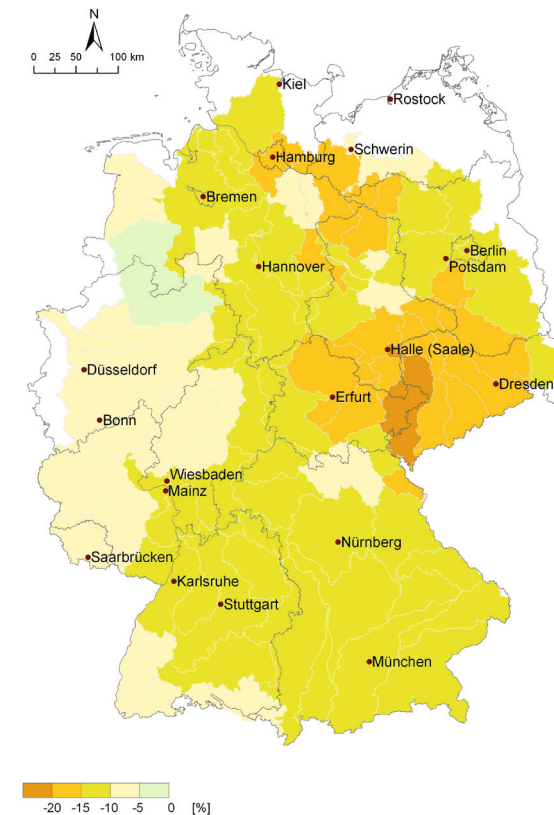


Abbildung 16: Wasserkraftpotenzial, Änderung 2051-2060 gegenüber 2008-2012; Jahresmittelwerte

Wasserverfügbarkeit, mit häufigeren Einschränkungen und damit einer Reduktion der Energieerzeugung gerechnet werden. Ebenso ist für die Wasserkrafterzeugung aufgrund von sinkenden Abflüssen im Allgemeinen eine Reduktion der Energieerzeugung absehbar. Dagegen kann in den meisten Regionen mit einer leichten Zunahme der Auslastung der Windkraftanlagen gerechnet werden. Diese Zunahme ist jedoch gering im Vergleich zum geplanten Ausbau von Windkraftanlagen an Land oder auf dem Meer. Da die Zunahme der Auslastung der Windkraftanlagen fast ausschließlich auf das Winterhalbjahr beschränkt ist, die Einschränkungen bei thermischen Kraftwerken beziehungsweise Wasserkraftanlagen insbesondere im Sommer auftreten, kann dieses Defizit nur durch eine Erhöhung der installierten Kapazität der Windkraftanlagen oder anderer erneuerbarer Energieträger ausgeglichen werden.

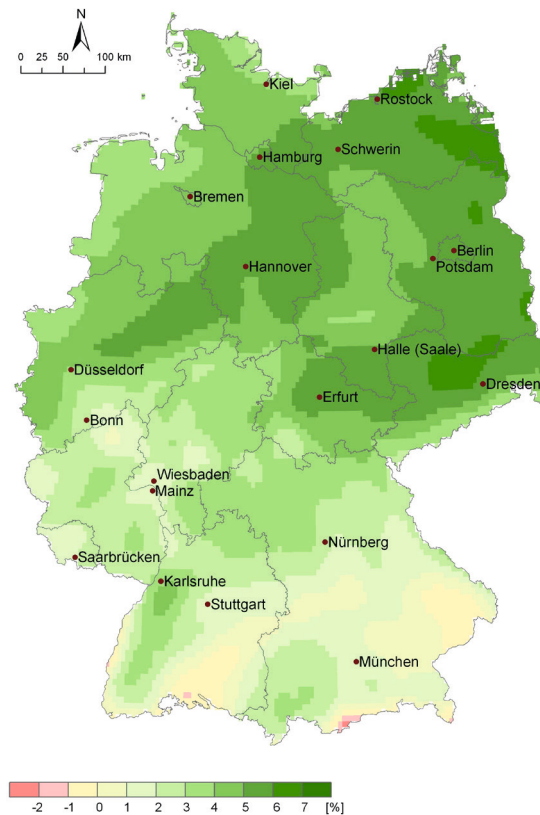


Abbildung 17: Potenzial von Windkraftanlagen, Änderung 2051-2060 gegenüber 2008-2012; Jahresmittelwerte

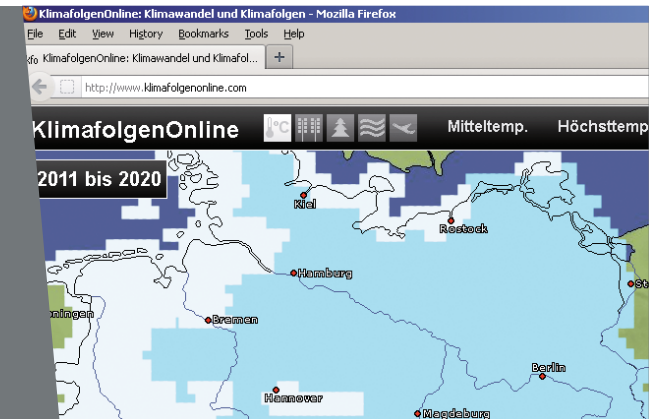
Thermische Kraftwerke mit Wasserkühlung sind aufgrund erhöhter Wassertemperaturen, teilweise auch unzureichender Wasserverfügbarkeit, von häufigeren Einschränkungen betroffen. Wegen sinkender Abflüsse ist für die Wasserkrafterzeugung im Allgemeinen mit einer Reduktion der Energieerzeugung zu rechnen. Bei der Windenergieerzeugung kann in vielen Regionen mit einer leichten Zunahme der Auslastung gerechnet werden.

Da die Zunahme der Auslastung der Windkraftanlagen hauptsächlich im Winterhalbjahr auftritt, die Einschränkungen bei thermischen Kraftwerken beziehungsweise Wasserkraftanlagen insbesondere im Sommer auftreten, kann dieses Defizit durch erstere nicht ausgeglichen werden.

## KLIMAWANDEL UND KLIMAFOLGEN VERSTÄNDLICH VERMITTELN



Die Folgen des Klimawandels sind noch nicht weithin bekannt. Wie kann man diese Folgen einem allgemeinen Publikum vermitteln? Wie kann man gleichzeitig Fachnutzern im privaten und öffentlichen Bereich wichtige Informationen zukommen lassen? Und wie stellt man eine weite Verbreitung sicher?



Der Klimawandel ist inzwischen weithin bekannt, doch über die konkreten Auswirkungen herrscht oft Unklarheit. Eine wichtige Aufgabe ist es deshalb, die Folgen des Klimawandels nicht nur in Fachkreisen zu diskutieren, sondern diese auch einem breiten Publikum nahezubringen. Insbesondere Entscheider im öffentlichen Dienst, aber auch direkt betroffene Berufsgruppen sollen dabei Informationen einfach beziehen können.

Bei dieser Zielgruppe handelt es sich nicht um Fachwissenschaftler. Daraus resultieren zwei Herausforderungen:

- die Informationen müssen allgemeinverständlich vermittelt werden,
- der Zugang zu den Informationen muss einfach möglich sein; die Interessenten haben keine Zeit,

sich lange einzuarbeiten, sondern wollen sofort mit den Informationen arbeiten können.

Insbesondere wollen die potenziellen Nutzer sich nicht erst langwierig Informationen aus verschiedenen Quellen zusammensuchen und diese womöglich sogar noch aufwändig verknüpfen müssen.

### ZWEI STARKE PROJEKTPARTNER

Um diesen Bedarf zu bedienen, haben das Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung (PIK) und WetterOnline gemeinsam ein Internet-Portal entwickelt, das einfach zu bedienen ist, die interessantesten Informationen zu Klimafolgen bündelt und diese in direkt nutzbarer Form anbietet. Die beiden Projektpartner ergänzen sich dabei hervorragend: das PIK bringt die Expertise im Bereich Klimawandel und Klimafolgen ein, während WetterOnline

langjährige Erfahrung in Vermittlung von Wetterdaten an die allgemeine Öffentlichkeit hat.

### EIN STARKES PORTAL

Das Portal KlimafolgenOnline wird ab dem 1. Dezember 2012 unter [www.KlimafolgenOnline.com](http://www.KlimafolgenOnline.com) erreichbar sein. Es gibt keine weiteren Voraussetzungen als einen aktuellen Internet-Browser. Jeder kann das Portal nutzen, auf administrative oder technische Hürden wurde verzichtet (es ist keine Benutzerregistrierung nötig, es sind keine Plugins im Browser erforderlich).

Das erklärte Ziel ist es, eine möglichst große Zahl von Nutzern zu gewinnen – die gesamte interessierte Öffentlichkeit soll damit angesprochen werden.

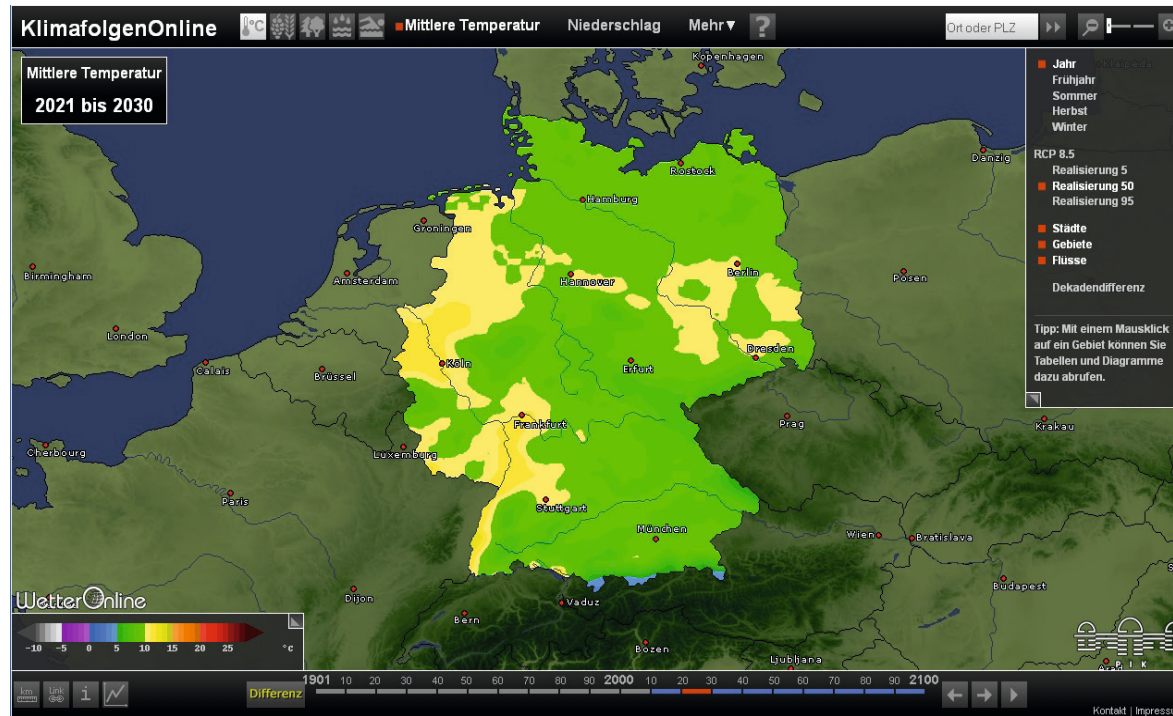


Abbildung 18 Farbkarten:

Die räumliche Verteilung verschiedener Parameter (im Beispiel hier für das Tagesmittel der Lufttemperatur) wird auf Übersichtskarten erfasst; verschiedene Vergrößerungen sind vorgesehen, um Deutschland, Bundesländer oder Landkreise gut überblicken zu können.

### KLIMAFOLGEN ALS INHALTE

KlimafolgenOnline.com bietet selbstverständlich auch Informationen zu klimatischen Änderungen, zum Beispiel Änderungen der Temperatur, des Niederschlags oder der Einstrahlung. Aber das wesentliche Element ist, dass auch Informationen zu den Folgen des Klimawandels angeboten werden, nur einen Mausklick entfernt.

Ein Landwirt kann lokale Informationen zu Temperatur- und Niederschlagsänderungen für sein Feld betrachten und direkt danach die Auswirkungen auf Erträge für verschiedene Feldfrüchte oder auf das Ernterisiko. Es ist nicht mehr nötig, Daten aus verschiedenen Quellen zusammenzusuchen und diese für das lokale Gebiet abzugleichen – ein Mausklick genügt.

Konkret werden Informationen zu den Sektoren Klima, Landwirtschaft, Forstwirtschaft, Hydrologie und Sonstiges (Tourismus, Energie) angeboten. Dabei können Detailinformationen in verschiedenen Formaten betrachtet werden, je nachdem, welche Darstellung für die konkrete Fragestellung am besten geeignet ist:

- Farbkarten (Abbildung 18), um die Entwicklung der mittleren Lufttemperatur in Deutschland zu betrachten,
- Tabellen, um verschiedene Parameter, die zum Beispiel für Tourismus relevant sind, für eine



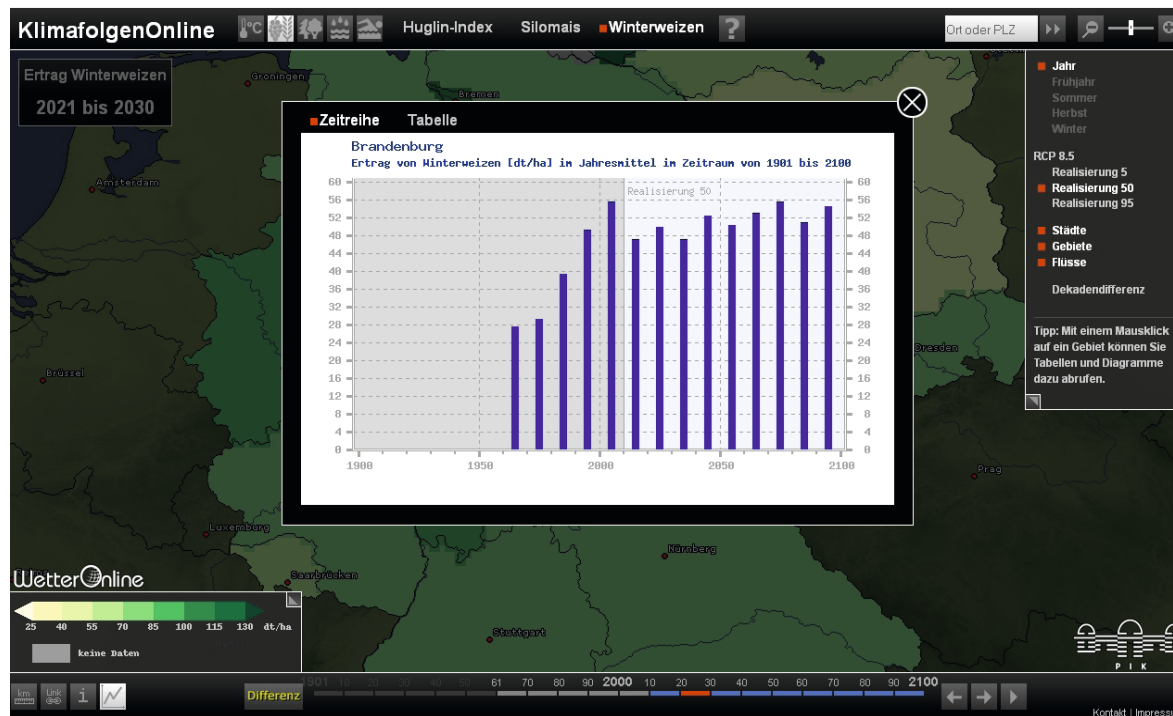


Abbildung 19 Zeitreihen:

Zeitliche Darstellung ausgewählter Parameter (bspw. für die Ertragserwartung von Winterweizen) der zeitlichen Entwicklung von Klimafolgen in Diagrammen für ganz Deutschland, für die einzelnen Bundesländer und für jeden Landkreis

bestimmte Dekade für ein Bundesland zu betrachten,

- Zeitreihendiagramme (Abbildung 19), um die zeitliche Entwicklung zum Beispiel der Erträge einer Feldfrucht auf Bundeslandebene zu betrachten.

### ORIENTIERUNG VOR ORT BIS DEUTSCHLANDWEIT

Verschiedene Nutzer haben unterschiedliche Sichtweisen auf die Klimafolgen. Während ein Förster sich für den Wald vor Ort interessiert, beschäftigt sich ein Mitarbeiter eines Bundesministeriums mit Wäldern in ganz Deutschland. Aber auch ein Wechsel zwischen solchen Perspektiven ist denkbar – wo soll zum Beispiel eine Photovoltaik-Anlage installiert werden?

Deshalb können im Portal Informationen abgerufen werden zu ganz Deutschland, zu den einzelnen Bundesländern oder zu Landkreisen. Für den Bereich der Hydrologie sind dabei Einzugsgebiete oder Teileinzugsgebiete der Flüsse vorgesehen.

Das Auffinden dieser Gebiete im Portal wird dabei durch eine leistungsfähige Suchfunktion erleichtert (Abbildung 20). Schon während der Nutzer zum Beispiel den Namen einer Stadt eingibt, schlägt die Suche verschiedene Kandidaten vor. Der Nutzer kann dann durch einen Mausklick die Stadt auswählen und wird zum umgebenen Landkreis oder Teileinzugsgebiet geleitet.



Abbildung 20:  
Komfortable Suche: Die Suchfunktion unterbreitet schon während der Eingabe automatisch Vorschläge.

Auf den Karten werden Orientierungsmerkmale eingeblendet wie zum Beispiel Flüsse, Städte oder Grenzen von Bundesländern oder Landkreisen. Dabei wird die Informationsdichte der aktuellen Auflösung der Karte angepasst, damit nicht zu viele Elemente den Blick auf das Wesentliche verdecken. Der Nutzer hat auch die Möglichkeit, Orientierungsmerkmale auszublenden, die ihn aktuell nicht interessieren.

### IM LAUFE DER ZEIT

Aber nicht nur die Orientierung im Raum, auch die in der Zeit ist wichtig. Die ständig sichtbare Zeitleiste erlaubt dabei, die angezeigte Dekade schnell zu ändern und auf einen Blick zu sehen, welche Dekade gerade angezeigt wird. Betrachtet der Nutzer die Differenz zwischen zwei Dekaden, so werden diese ebenfalls auf der Zeitleiste markiert und können leicht verschoben werden. Vervollständigt wird dies von der Möglichkeit, Animationen anzeigen zu lassen, um so die Entwicklung über die Jahrzehnte betrachten zu können.

### VIELZAHL VON INFORMATIONEN, ABER LEICHT ZUGREIFBAR

Die große Zahl an Informationen (für verschiedene Orte, Parameter, Dekaden, Szenarien, usw.) birgt die Gefahr, dass der Nutzer von der Auswahl überwältigt wird. Deshalb wurde großes Gewicht darauf gelegt, die vielen Auswahlmöglichkeiten möglichst übersichtlich zu halten.

Dekaden, Szenarien, dargestellte geographische Informationen, Mittelungsintervalle und Parameter können voneinander unabhängig und einfach verständlich ausgewählt werden. Da es eine sehr große Zahl von Parametern gibt, werden diese in thematisch verwandte Sektoren zu Klima, Landwirtschaft, Forstwirtschaft, Wasser und Sonstiges (u. a. Tourismus, Energie) gebündelt, um die Übersichtlichkeit zu erhöhen.

Damit es den Nutzern leichter fällt, Informationen einzuordnen, gibt es Hilfetexte, die kontext-sensitiv abgerufen werden können. So ist die Erläuterung einzelner Parameter leicht zu finden, aber auch allgemeine Informationen zum Portal sowie zu Methoden und Daten sind verfügbar.

### AUSTAUSCH MIT ANDEREN

Wenn ein Nutzer etwas Interessantes entdeckt hat, was er anderen mitteilen möchte, so ist dies kein Problem – durch einen Mausklick erhält er einen Link, den er anderen zum Beispiel per Email oder Social Media mitteilen kann. Der Empfänger kann dann das Portal in genau dem Zustand betrachten, in dem der Sender es gesehen hat – gleicher Kartenausschnitt, gleicher Parameter, gleiches Szenarium, ggf. gleiches Diagramm oder gleiche Tabelle. Dies hilft enorm beim Austausch, da man so nicht umständlich beschreiben muss, wie man zu einer Information gelangt, sondern einfach den Link verschickt.

Solche Links können auch auf anderen Webseiten angelegt werden und verweisen dann auf KlimafolgenOnline.com. Dadurch können einerseits den Besuchern anderer Webseiten bestimmte Inhalte nahegebracht werden, andererseits können diese dann die Inhalte von KlimafolgenOnline selbst erkunden, um sich weiter zu informieren. So wird das Verständnis für Zusammenhänge im Klimawandel und den Folgen daraus gefördert.

## GLOBALE ZUKUNFT

Der Klimawandel und seine Folgen sind global. Auch wenn KlimafolgenOnline.com sich speziell auf Deutschland konzentriert, so ist es doch bereits auf die Verwendung für andere Länder ausgelegt. Dies beginnt damit, dass das Portal in mehreren Sprachen angeboten wird, zu Beginn nur in Deutsch, später auch in Englisch. Aber auch weitere Sprachen können mit geringem Aufwand hinzugefügt werden.

Das Portal kann problemlos Daten für andere Länder als Deutschland darstellen, auch außerhalb Europas. Die zugrundeliegende Technik wurde mit Augenmerk auf internationale Verwendbarkeit entwickelt. WetterOnline bringt hier die Erfahrung mit ausländischen Wetter-Portalen ein, zum Beispiel für China.

Das Portal KlimafolgenOnline ermöglicht es, die große Menge an Informationen zu den Folgen des Klimawandels, die vom PIK erstellt wurde, in verständlicher und einfach zu nutzender Weise an ein breites Publikum zu vermitteln. Doch auch Fachnutzer können großen Nutzen aus dem Portal ziehen.

### Das Portal bietet:

- eine Vielzahl von Informationen zu Klimawandel und Klimafolgen
- Darstellungen in Form von Farbkarten, Tabellen und Diagrammen
- Bezug auf Deutschland, Bundesländer und Landkreise
- verschiedene, einfach wählbare Vergrößerungen für die Farbkarten, sowie die Möglichkeit, den dargestellten Ausschnitt einfach zu verschieben
- eine komfortable Suchfunktion
- Hilfetexte und Erläuterungen
- die Möglichkeit, konkrete Darstellungen von Webseiten aus zu verlinken oder als Email zu verschicken

## Literatur

- BMELV (2012).** Download <http://berichte.bmelv-statistik.de/SJT-1000200-0000.pdf>
- Böhm, U., Kücken, M., Ahrens, W., Block, A., Hauffe, D., Keuler, K., Rockel, B. and Will, A. (2006).** CLM – The climate version of LM: Brief description and long-term application. Proceedings from the COSMO General Meeting 2005. COSMO Newsletter, <http://www.cosmo-model.org>, 6, 225-235.
- BUNR (2011).** Entwicklung der erneuerbaren Energien in Deutschland im Jahr 2010 – unter Verwendung aktueller Daten der Arbeitsgruppe Erneuerbare Energien-Statistik (AGEE-Stat). Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (Stand: Dezember 2011).
- DESTATIS (2012).** Download <http://www.regionalstatistik.de/genesis/online>
- Hattermann, F.F., Huang, S., Koch, H. (2010).** Simulation der Wirkung von Klimaänderungen und Klimamodellunsicherheit auf den Wasserhaushalt für deutsche Flusseinzugsgebiete. In: Kaiser, K., Libra, J., Merz, B., Bens, O., Hüttl, R.F. (Hrsg.): Aktuelle Probleme im Wasserhaushalt von Nordostdeutschland: Trends, Ursachen, Lösungen. Scientific Technical Report 10/10. Deutsches GeoForschungszentrum, Potsdam. 49-59.
- Hattermann, F. F., Weiland, M., Huang, S., Krysanova, V., Kundzewicz, Z.W. (2011).** Model-supported Impact Assessment for the Water Sector in Central Germany under Climate Change – a Case Study. *Water Resource Management* 25, 3113-3134.
- Hattermann, F. F., Kundzewicz, Z. W., Huang Shaochun, Vetter, T., Kron, W., Burghoff, O., Hauf, Y., Krysanova, V., Gerstengarbe, F.-W., Werner, P., Merz, B., and Bronstert, A. (2012).** Flood risk in holistic perspective – observed changes in Germany. In: *Changes of flood risk in Europe* (ed. by Z. W. Kundzewicz), IAHS Press, Wallingford.
- Huang, S., Krysanova, V., Österle, H., Hattermann, F.F. (2010).** Simulation of spatio-temporal dynamics of water fluxes in Germany under climate change. *Hydrological Processes*, 24(23), 3289-3306. DOI: 10.1002/hyp.7753.
- Käse, H. (1969).** Ein Vorschlag für eine Methode zur Bestimmung und Vorhersage der Waldbrandgefährdung mit Hilfe komplexer Kennziffern Akademie Verlag. *Abhandlungen des Meteorologischen Dienstes der DDR*, Akademie Verlag, Berlin.
- Krysanova, V., Müller-Wohlfeil, D.-I., Becker, A., (1998).** Development and test of a spatially distributed hydrological/water quality model for mesoscale watersheds. *Ecological Modelling* 106(2-3), 261-289.
- Krysanova, V., Wechsung, F., Becker, A., Poschenrieder, W., Gräfe, J., (1999).** Mesoscale ecohydrological modelling to analyse regional effects of climate change. *Environmental Modeling and Assessment* 4, 259-271.
- Lasch, P., Badeck, F. W., Suckow, F., Lindner, M., Mohr, P. (2005).** Model-based analysis of management alternatives at stand and regional level in Brandenburg (Germany). *Forest Ecology and Management* 207(1-2), 59-74.
- Meinshausen, M., Smith, S. J., Calvin, K., Daniel, J. S., Kainuma, M. L. T., Lamarque, J. F., Matsumoto, K., Montzka, S. A., Raper, S. C. B., Riahi, K., Thomson, A., Velders, G. J. M., and van Vuuren, D. P. P. (2011).** The RCP greenhouse gas concentrations and their extensions from 1765 to 2300: *Climatic Change* 109(1-2), 213-241. DOI 10.1007/s10584-011-0156-z
- Orlowsky, B., Gerstengarbe, F. W., Werner, P. C., (2008).** A resampling scheme for regional climate simulations and its performance compared to a dynamical RCM: *Theoretical And Applied Climatology*, 92, 209-223.
- Rosenberg, N. J., McKenney, M. S., Easterling, W. E., Lemon, K. M. (1992).** Validation of EPIC model simulations of crop responses to current climate and CO<sub>2</sub> conditions: comparisons with census, expert judgement and experimental plot data. *Agric. Forest Meteor.* 59(1-2), 35-51.
- Statistisches Bundesamt, (2012).** Download <https://www.destatis.de/>
- Wolff, B. (2002).** Processing forest inventory data to establish a nationwide database for the estimation of the impacts of climate change on German forest and forestry. *Forstwissenschaftliches Centralblatt* 121, Supplement 1, 18-27.

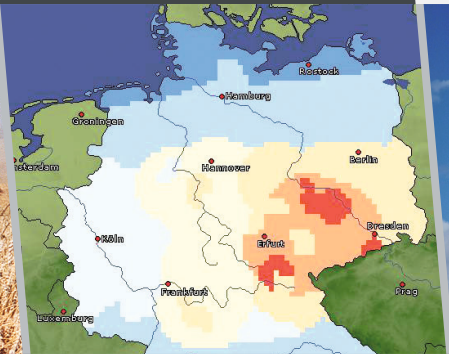
## Abbildungsverzeichnis

<b>Abbildung 1:</b> Jahresmittel der Lufttemperatur, Deutschland 1901-1910 .....	10	<b>Abbildung 9:</b> Prozentuale Änderung des Holzzuwachses der betrachteten Waldbestände für den Zeitraum 2031-2050 gegenüber 1991-2010 ohne Berücksichtigung des CO <sub>2</sub> -Düngungseffekts .....	18	<b>Abbildung 14:</b> Simulierte Änderung der mittleren Erträge von Winterweizen und Silomais im Vergleich der Szenarienperiode 2031-2050 zum beobachteten Klima der Jahre 1991-2010 bei unveränderter Sortenwahl und Anbautechnik ohne und mit Berücksichtigung des CO <sub>2</sub> -Düngungseffektes. Dargestellt sind die Änderungen der Gebiets- und Periodenmittel für 100 Realisierungen des genutzten STARS-Szenariums .....	25
<b>Abbildung 2:</b> Differenzen der Jahresmittel der Lufttemperatur in Deutschland zwischen den Perioden 2001-2010 und 1901-1910 .....	10	<b>Abbildung 10:</b> Klimatischer Waldbrandgefahrenindex, berechnet und gemittelt für 1991-2010 (links) und 2031-2050 (rechts) .....	19	<b>Abbildung 15:</b> Auslastung thermischer Kraftwerke mit Durchlaufkühlung, Änderung 2051-2060 gegenüber 2008-2012; Jahresmittelwerte .....	28
<b>Abbildung 3:</b> Mittlere Jahressumme der klimatischen Wasserbilanz, Deutschland 2001-2010 .....	11	<b>Abbildung 11:</b> Gemittelter jährlicher Trockenstressindex für die Baumart Buche in der Alpenregion und im Nordostdeutschen Tiefland; die Boxen stellen die Werte Median, Minimum und Maximum dar .....	20	<b>Abbildung 16:</b> Wasserkraftpotenzial, Änderung 2051-2060 gegenüber 2008-2012; Jahresmittelwerte .....	29
<b>Abbildung 4:</b> Mittlere Jahressumme der klimatischen Wasserbilanz, Deutschland 2041-2050 .....	11	<b>Abbildung 12:</b> Jahreserträge und jährliche Ertragsänderungen im Vergleich zum Vorjahr von Winterweizen und Silomais in den deutschen Teilen der Flusseinzugsgebiete Elbe und Rhein berechnet auf der Basis von erhobenen Kreiserträgen .....	23	<b>Abbildung 17:</b> Potenzial von Windkraftanlagen, Änderung 2051-2060 gegenüber 2008-2012; Jahresmittelwerte .....	30
<b>Abbildung 5:</b> Die großen Flusseinzugsgebiete in Deutschland .....	14	<b>Abbildung 13:</b> Monatsabfolge von Temperatur (°C), Niederschlag, klimatischer Wasserbilanz und potenzieller Verdunstung (mm) im Elbeeinzugsgebiet. Die gemittelten Monatsverhältnisse für die Jahre 1991-2010 werden als Referenzlinien dargestellt. Das zeitlich und gebietlich gemittelte Monatsklima der 100 STARS Realisierungen wird durch Boxen veranschaulicht mit waagerechten Linien für das 5-te, 25-te, 50-te, 75-te und 95-te Perzentil .....	24	<b>Abbildung 18 Farbkarten:</b> Die räumliche Verteilung von Klimafolgen wird auf Übersichtskarten erfasst; verschiedene Vergrößerungen sind vorgesehen, um Deutschland, Bundesländer oder Landkreise gut überblicken zu können .....	32
<b>Abbildung 6:</b> Simulierte Abflüsse für die Ems am Pegel Versen (oben) und die Elbe am Pegel Neu Darchau (unten) als langjährige tägliche Durchschnitte für die Perioden 1991-2010 und 2031-2050 .....	14			<b>Abbildung 19 Zeitreihen:</b> Darstellung der zeitlichen Entwicklung von Klimafolgen in Diagrammen für ganz Deutschland, für die einzelnen Bundesländer und für jeden Landkreis .....	33
<b>Abbildung 7:</b> Änderung der jährlichen Summen der Verdunstung (links), des Gesamtabflusses (mitte) und der Grundwasserneubildung (rechts), im Vergleich der Durchschnitte der Jahre 1991-2010 und 2031-2050 für die großen Flusseinzugsgebiete .....	15			<b>Abbildung 20 Komfortable Suche:</b> Die Suchfunktion unterbreitet schon während der Eingabe automatisch Vorschläge .....	34
<b>Abbildung 8:</b> Entwicklung der Abflussmenge eines 30-jährlichen Hochwassers am Elbepegel Neu Darchau für ein REMO-Szenarium (A1B). Rot dargestellt ist der Konfidenzbereich des 30-jährlichen Hochwassers für die Referenzperiode 1961-1990, grau der Konfidenzbereich unter Szenarienbedingungen ...	16				



## UNSERE PARTNER





Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung  
Postfach 601203 | 14412 Potsdam  
[www.pik-potsdam.de](http://www.pik-potsdam.de)