



Klimaanpassung Bayern 2020

Der Klimawandel und seine Auswirkungen
- Kenntnisstand und Forschungsbedarf
als Grundlage für Anpassungsmaßnahmen

Kurzfassung einer Studie
der Universität Bayreuth





Klimaanpassung Bayern 2020

**Der Klimawandel und seine Auswirkungen
- Kenntnisstand und Forschungsbedarf
als Grundlage für Anpassungsmaßnahmen**

**Kurzfassung einer Studie
der Universität Bayreuth**

Impressum

Klimaanpassung – Bayern 2020

Der Klimawandel und seine Auswirkungen – Kenntnisstand und Forschungsbedarf als Grundlage für Anpassungsmaßnahmen
Kurzfassung einer Studie der Universität Bayreuth

ISBN (Druck-Version): 978-3-940009-58-6

ISBN (Online-Version): 978-3-940009-59-3

Die Studie wurde vom Bayerischen Staatsministerium für Umwelt, Gesundheit und Verbraucherschutz finanziert.

Herausgeber:

Bayerisches Landesamt für Umwelt

Bürgermeister-Ulrich-Straße 160

86179 Augsburg

Tel.: (0821) 90 71 - 0

Fax: (0821) 90 71 - 55 56

E-Mail: poststelle@lfu.bayern.de

Internet: www.lfu.bayern.de

Bearbeitung/Text/Konzept:

Koordination:

Prof. Dr. Carl Beierkuhnlein, Prof. Dr. Thomas Foken

Universität Bayreuth

Bearbeitung:

Martin Alt, Andreas Gohlke, Nadine Schmid, Dr. Stephanie Thomas

Universität Bayreuth

Redaktion:

LfU, Referat 81, BD Hans Weber, Dr. Harald Morscheid

Bildnachweis:

Universität Bayreuth

Bayerisches Landesamt für Umwelt

Druck:

Beck Druck GmbH & Co. KG. Königstr. 66-68, 95028 Hof

Gedruckt auf Papier aus 100 % Altpapier.

Stand:

Dezember 2007

Diese Druckschrift wurde mit großer Sorgfalt zusammengestellt. Eine Gewähr für die Richtigkeit und Vollständigkeit kann dennoch nicht übernommen werden. Sofern in dieser Druckschrift auf Internetangebote Dritter hingewiesen wird, sind wir für deren Inhalte nicht verantwortlich.

Inhaltsverzeichnis


Vorwort	5
1 Klimawandel als gesellschaftliche Herausforderung	7
2 Dimension des globalen Klimawandels	8
3 Entwicklung des Klimawandels in Bayern	11
4 Auswirkungen des Klimawandels auf die Natur	15
5 Anpassungsoptionen für betroffene Bereiche	18
6 Wissensdefizite und Forschungsfragen	31
7 Strategien für die Forschung und den Wissenstransfer	39

Vorwort

Der Klimawandel findet bereits weltweit statt. Die Synthese zum vierten Sachstandsbericht des Weltklimarates, veröffentlicht im November 2007, die den weltweiten Kenntnisstand der Klimaforschung zusammenfasst, bestätigt dies nachdrücklich. Darin wird aufgezeigt, welches Ausmaß der Klimawandel in unserem Jahrhundert annehmen kann und welche Auswirkungen davon ausgehen werden. Die Weltgemeinschaft, aber auch jedes Land ist gefordert und gut beraten, in den Handlungsfeldern Klimaschutz, Anpassungsmaßnahmen und Klimaforschung tätig zu werden. Das Fortschreiten des Klimawandels ist trotz aller internationalen Klimaschutzanstrengungen nicht mehr aufzuhalten, sondern nur noch auf ein auch künftig beherrschbares Niveau zu begrenzen. Zur Reduzierung der unvermeidbaren nachteiligen Folgen ist es daher notwendig, mögliche Anpassungsmaßnahmen zu planen und beizeiten umzusetzen. Dies muss überwiegend auf regionaler und lokaler Ebene geschehen.

Der Klimawandel verschont auch Bayern nicht. Die Bayerische Staatsregierung hat frühzeitig die wissenschaftlichen, technischen und gesellschaftlichen Herausforderungen des Klimawandels erkannt. So wurde bereits 1990 der Forschungsverbund BayFORKLIM gestartet. Das Kooperationsvorhaben KLIWA befasst sich seit 1999 mit den Auswirkungen der Klimaveränderung auf den Wasserhaushalt in Süddeutschland und die Konsequenzen für die Wasserwirtschaft in Bayern. Das Bayerische Klimaschutzprogramm wurde 2000 beschlossen. Die bisherigen Aktivitäten sollen in den nächsten Jahren noch erheblich verstärkt werden. Dazu wurde im November 2007 das Aktionsprogramm „Klimaprogramm Bayern 2020“ verabschiedet.

Die Notwendigkeit, sich frühzeitig und präventiv an die zu erwartenden nachteiligen Folgen des Klimawandels in Bayern anzupassen, setzt eine Ermittlung der konkreten Betroffenheit für die Bereiche Natur, Wirtschaft und Gesellschaft voraus. Hier bestehen aber teilweise noch erhebliche Wissensdefizite. Hinzu kommt die Zunahme von Unsicherheiten im Zusammenhang mit der weiteren Entwicklung des Klimawandels. Dies war Anlass für die Umweltverwaltung, bei der Universität Bayreuth eine Studie über Auswirkungen des Klimawandels, Anpassungsmöglichkeiten in den betroffenen Bereichen sowie den weiteren Forschungsbedarf erstellen zu lassen. Die vorliegende Publikation enthält die wesentlichen Ergebnisse der umfangreichen wissenschaftlichen Stoffsammlung und Analyse. Damit ist eine gute Grundlage für die weiteren Arbeitsschritte in den Bereichen Anpassung und Forschung geschaffen. Den beteiligten Fachleuten und ihren Institutionen, allen voran dem Lehrstuhl für Biogeografie der Universität Bayreuth, sei an dieser Stelle für die verdienstvolle Arbeit gedankt.



Prof. Dr.-Ing. A. Göttle
Präsident

1 Klimawandel als gesellschaftliche Herausforderung

Der **Klimawandel** stellt global die wohl **größte umweltpolitische Herausforderung des 21. Jahrhunderts** dar. Dimension und Komplexität des Problems erfordern abgestimmtes Handeln. Durch eine **Kombination von Vermeidungs- und Anpassungsstrategien** und ihre konsequente Umsetzung muss baldmöglichst versucht werden, negative Folgewirkungen für die menschliche Gesellschaft global und regional weitestgehend einzugrenzen. Das Spektrum der Auswirkungen reicht von der menschlichen Gesundheit über die Nahrungsmittelproduktion, die Ökosysteme bis zur politischen Stabilität. Sollte es nicht gelingen, den Temperaturanstieg zu begrenzen, dann sind auch weitreichende ökonomische Folgen unvermeidbar.

Neben den wichtigen Bemühungen, die **Klimagasemissionen deutlich zu senken**, hat sich in der letzten Zeit immer mehr die Erkenntnis durchgesetzt, dass **zeitgleich** hierzu auch die Notwendigkeit besteht, **Anpassungsstrategien** an die kommenden Klimaauswirkungen zu entwickeln und umzusetzen, da eine weitere Klimaveränderung schon heute nicht mehr zu vermeiden ist. Lediglich ihr Ausmaß kann noch beeinflusst werden. Anpassung als **präventives Handeln** soll dazu beitragen, mit den nachteiligen Folgen des Klimawandels besser zurechtzukommen.

In einer umfassenden Studie „**Klimawandel in Bayern**“ wurden für den Freistaat Bayern die zu erwartenden Entwicklungen des Klimas und als Reaktion darauf der Ökosysteme, der betroffenen Wirtschaftssektoren und der Gesellschaft zusammengestellt und analysiert. Eine Vielzahl von Experten verschiedenster Einrichtungen, Universitäten, Forschungszentren und Behörden haben hierbei mitgewirkt und die Universität Bayreuth unterstützt. Ziel war es, die möglichen vielfältigen **Auswirkungen** des Klimawandels zu beleuchten, damit geeignete Maßnahmen zur Eingrenzung negativer Konsequenzen frühzeitig erkannt, präventiv eingeleitet und neue positive Entwicklungsmöglichkeiten in Gang gebracht werden können.

„Klimawandel in Bayern“ trägt **bestehende Kenntnisse** zusammen, gibt Hinweise auf sinnvolle **Anpassungsmaßnahmen** und analysiert **Wissensdefizite**. Es werden Strategien für Forschung und Praxis aufgezeigt und auf die notwendigen Förderungen eines intensiven Austauschs verwiesen (Abb. 1). Auf keinen Fall sollten Entscheidungen zu Anpassungsmaßnahmen hinausgezögert werden und die Aktivitäten müssen bereits heute trotz bestehender Unsicherheiten und Wissensdefizite, die künftig sicherlich stärker eingegrenzt werden können, erfolgen. Neben den direkt betroffenen wirtschaftlichen Bereichen (z. B. Wasserwirtschaft, Land- und Forstwirtschaft), sind aber auch Auswirkungen für die Finanz- und Versicherungswirtschaft zu erwarten, die jedoch nicht Gegenstand dieser Studie sind.



Abb. 1: Handeln erfordert Wissen. Im Zusammenhang mit dem Klimawandel sind Konsequenzen auf verschiedenen Ebenen und Feldern zu ziehen. Die Entwicklung von Handlungsstrategien muss daher das Wissen auf den verschiedenen Ebenen integrieren.

2 Dimension des globalen Klimawandels

Das **Klimasystem** unseres Planeten umfasst Prozesse auf sehr unterschiedlichen zeitlichen und räumlichen Skalen. Es ist trotz seiner erheblichen Komplexität bereits **gut erforscht**. Natürliche Ursachen der Klimaveränderungen im Verlauf der Erdgeschichte können nachvollzogen werden. Heute ist es möglich, mit Hilfe von Klimamodellen Entwicklungen für das zukünftige Klima abzuschätzen.

Durch den Weltklimarat, der durch die UN 1988 eingerichtet wurde, sind seit 1990 vier Sachstandsberichte vorgelegt worden, die den jeweiligen aktuellsten Kenntnisstand der globalen Klimaforschung aufzeigen. Die hauptsächliche Ungewissheit zum Ausmaß des Klimawandels liegt im zukünftigen Verlauf der globalen Treibhausgasemissionen. Zwangsläufig führen deshalb längerfristige Modellrechnungen je nach zugrunde liegendem Emissionsszenario zu unterschiedlichen Aussagen bezüglich der zu erwartenden Erwärmung (Tab. 1, Abb. 2). **Das Szenarium A2 bzw. A1FI entspricht am ehesten der gegenwärtigen Entwicklung.**

Tab. 1: Annahmen der globalen Emissionsszenarien (IPCC, 2001; IPCC, 2007) ^{1, 2} bezüglich des Temperaturanstieges in Grad im Verlauf des 21. Jahrhunderts (Vergleich 1980-1999 / 2090-2099).

Szenarium	Kernaussagen	Wahrscheinlichster Wert	Schwankungsbreite
A1	Starkes ökonomisches Wachstum und zunehmend ausgeglichene Verhältnisse zwischen Industriestaaten und Entwicklungsländern, Bevölkerungszunahme bis Mitte des 21. Jhdts., dann Abnahme; Einführung neuer und effizienterer Technologien		
A1FI	Intensive Nutzung fossiler Brennstoffe	4,0	2,4 – 6,4
A1T	Nutzung nicht-fossiler Energiequellen	2,4	1,4 – 3,8
A1B	Energiemix aus fossilen und nicht-fossilen Quellen	2,8	1,7 – 4,4
A2	Ähnlich A1, jedoch ungleiche Entwicklung auf der Erde, ständiges Bevölkerungswachstum	3,4	2,0 – 5,4
B1	Ähnlich A1, jedoch schnellerer ökonomischer Umbau mit mehr Materialeffizienz, sauberen und ressourceneffizienten Technologien	1,8	1,1 – 2,9
B2	Ökonomische Entwicklung wie A1/B1, jedoch regional unausgewogene Entwicklung wie A2	2,4	1,4 – 3,8

¹ IPCC, 2001. Climate Change 2001. Working Group III. Mitigation. Summary for Policymakers, 19 S.

² IPCC, 2007. Climate Change 2007: Working Group I. The Physical Science Basis. Summary for Policymakers, Intergovernmental Panel on Climate Change, 18 S.

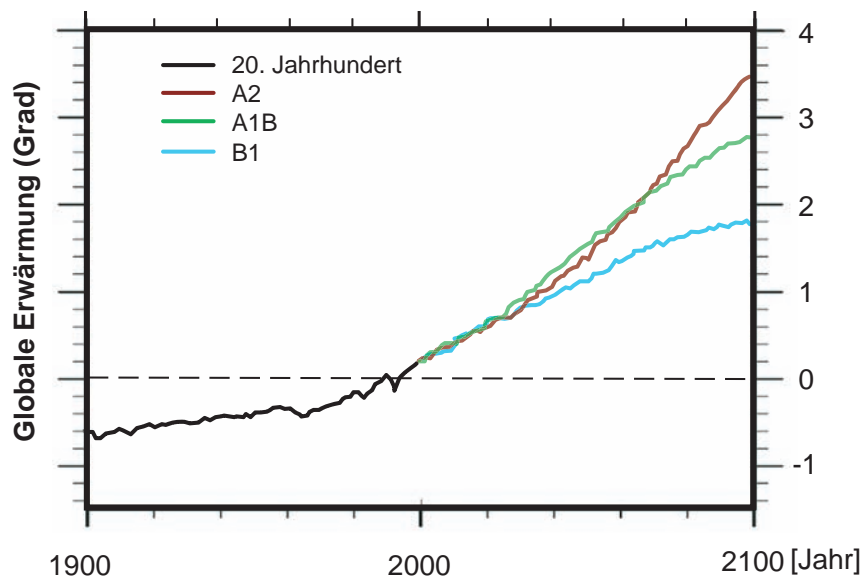


Abb. 2:
Mittlere globale Erwärmung der Erdoberfläche in Abhängigkeit von Emissionsszenarien (nach IPCC, 2007)³

Die szenarienabhängige Schwankungsbreite (Tab. 1) ergibt sich vorwiegend aus den ökonomischen und politischen Unsicherheiten. Dabei ist zu beachten, dass es selbst bei Konstanthalten der globalen Treibhausgaskonzentrationen des Jahres 2000 (der CO₂-Konzentrationsanstieg 2000-2004 entspricht etwa dem Anstieg 1990-2000!) in den nächsten 100 Jahren zu einer weiteren Erwärmung um ca. 0,6 Grad kommen würde, da Treibhausgase in der Atmosphäre langlebig sind.

Nach dem in den nachfolgenden Ausführungen häufig zugrunde gelegten Szenario A1B werden in der zweiten Hälfte des 21. Jahrhunderts die Temperaturen der Eem-Warmzeit (vor ca. 125.000 Jahren) übertroffen. Sehr wahrscheinlich werden im Jahr 2100 **Temperaturverhältnisse auf der Erde** herrschen, **die noch nie ein Mensch erlebt hat** (Abb. 3).

Nur wenn es gelingen sollte, nach **2015 das Maximum der globalen Treibhausgasemissionen** zu erreichen und bis 2050 dann die Emissionen **weltweit um 50 bis 80 % gegenüber 2000** zu senken, wird sich das Klima mit hoher Wahrscheinlichkeit auf einem gewissen, wenn auch im Vergleich zu heute merklich wärmeren Niveau stabilisieren lassen. **Ansonsten könnte die soziale und politische Stabilität national und international gefährdet werden.** Die deutliche weltweite Reduzierung der Treibhausgasemissionen bedeutet eine erhebliche Substitution der fossilen Primärenergieträger Kohle, Öl und Gas und damit einen Umbau in vielen Wirtschaftszweigen und für das gesellschaftliche Verhalten der Menschheit.

³ IPCC, 2007. Climate Change 2007: Working Group I. The Physical Science Basis. Summary for Policymakers, Intergovernmental Panel on Climate Change, 18 S.

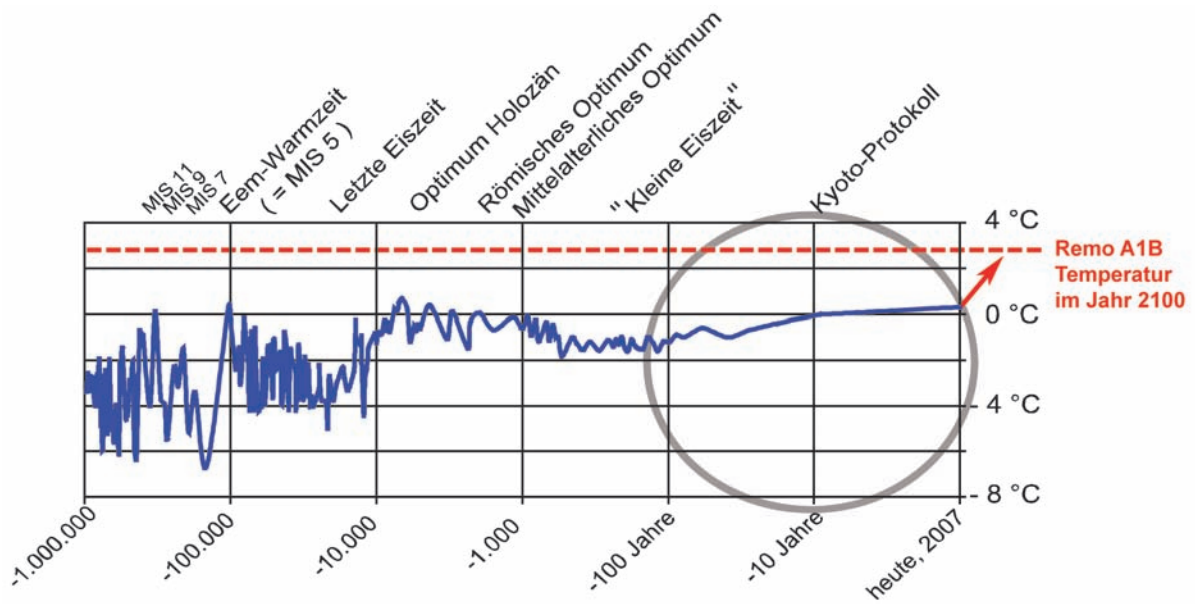


Abb. 3: Globaler Temperaturverlauf der letzten 1.000.000 Jahre (blau) im Vergleich zum Temperaturmittel im Jahr 2000 (= als 0°C definiert) mit logarithmischer Zeitachse (MIS = „Marine Isotope Stage“). Die rote Linie entspricht der prognostizierten Temperatur im Jahr 2100 nach dem Klimaszenario REMO A1B (nach verschiedenen Quellen).

3 Entwicklung des Klimawandels in Bayern

Bayern befasst sich seit 1990 mit der Abschätzung des Klimawandels. Zunächst wurde der Forschungsverbund BayFORKLIM eingerichtet. Seit 1999 wird das Kooperationsvorhaben KLIWA, Klima-Veränderung und Konsequenzen für die Wasserwirtschaft, zusammen mit Baden-Württemberg und dem Deutschen Wetterdienst, bearbeitet. Mit diesem Vorhaben sind regionale Klimaszenarien für Bayern entwickelt worden, die seit 2004 vorliegen. Seit 2006 gibt es neue regionale Klimaszenarien, die das Umweltbundesamt für Gesamtdeutschland hat erstellen lassen.

Die bisherige **Klimaentwicklung im 20. Jahrhundert** zeigt für **Bayern**, ähnlich wie für Deutschland, bereits einen Temperaturanstieg um etwa ein Grad. Während des Winters ist die Erwärmung stärker als im Sommer ausgefallen. Je nach Region und Höhenlage hat der Rückgang der Dauer der Schneedecke bereits touristische Auswirkungen. Der mittlere Jahresniederschlag ist insgesamt etwa gleich geblieben, jedoch hat eine messbare Verlagerung zwischen den Jahreszeiten stattgefunden, wobei das Frühjahr in östlichen Landesteilen trockener geworden ist. Die natürliche Variabilität der Witterung hat zugenommen, **extreme Wetterereignisse haben sich gehäuft**.

Aufgrund der **ausgeprägten landschaftlichen Vielfalt** ist **zu erwarten, dass sich der fortschreitende Klimawandel in Bayern regional sehr differenziert bemerkbar machen wird** (s. Abb. 4 und 5). Konkrete regionale Prognosen sind mit heutigem Wissen und Methoden aber nur sehr bedingt möglich. Auch die hier getroffenen Aussagen zur wahrscheinlichen Klimaentwicklung in Bayern sind deshalb in ihrer regionalen Differenzierung mehr als Hinweise denn als konkrete Vorhersagen zu verstehen. Als gegenüber klimatischen Extremereignissen besonders sensible Regionen sind der Alpenraum, die Mittelgebirge sowie die großen Flusstäler herauszustellen.

Zur Verdeutlichung der Unterschiede zwischen den gegenwärtigen Temperaturen und den zu erwartenden sind weiterhin die Analysen und Modelldaten der Rechnungen mit dem Modell REMO des Max-Planck-Instituts für Meteorologie (UBA, 2006)⁴ über verschiedene Zeiträume für das **Szenarium A1B** bis 2100 dargestellt (Abb. 6 und 7).

Es zeigt sich, dass für die Jahresmitteltemperaturen der Anstieg in der ersten Hälfte des 21. Jahrhunderts noch relativ langsam erfolgt, zum Ende des Jahrhunderts aber dramatisch zunimmt. Maßgeblich werden der Süden und Westen Bayerns davon betroffen sein, die sich auf eine Erhöhung der mittleren Temperaturen von über 4 Grad einstellen müssen. Insbesondere die Alpen werden eine merkliche Erwärmung erfahren. Übereinstimmend zu den KLIWA-Szenarien erkennt man den deutlichen Temperaturanstieg im Winter.

Die Ergebnisse verschiedener Klimamodellierungen prognostizieren also auch für Bayern einen deutlichen **Anstieg der Mitteltemperaturen**. Die erwarteten Klimaveränderungen werden sich aber neben Trends in Temperaturen und Niederschlägen auch im häufigeren Auftreten und in stärkerer Intensität von **klimatischen Extremereignissen** bemerkbar machen. Modellierungen im Rahmen von KLIWA zeigen, dass die Anzahl der **Sommertage** (> 25°C) und **heißen Tage** (> 30°C) voraussichtlich deutlich, z. T. um bis auf das Doppelte zunehmen werden (Vergleich 1971-2000 mit 2021-2050). Im Gegenzug werden sich die Zahl der **Frost-** ($T_{\min} < 0\text{ °C}$) und **Eistage** ($T_{\max} < 0\text{ °C}$) deutlich verringern. Entsprechend setzt sich auch der Trend zur Verkürzung der Dauer der **Schneebedeckung** fort.

⁴ UBA, 2006. Künftige Klimaänderungen in Deutschland – Regionale Projektionen für das 21. Jahrhundert, Umweltbundesamt, MPIfM Hamburg, Dessau.

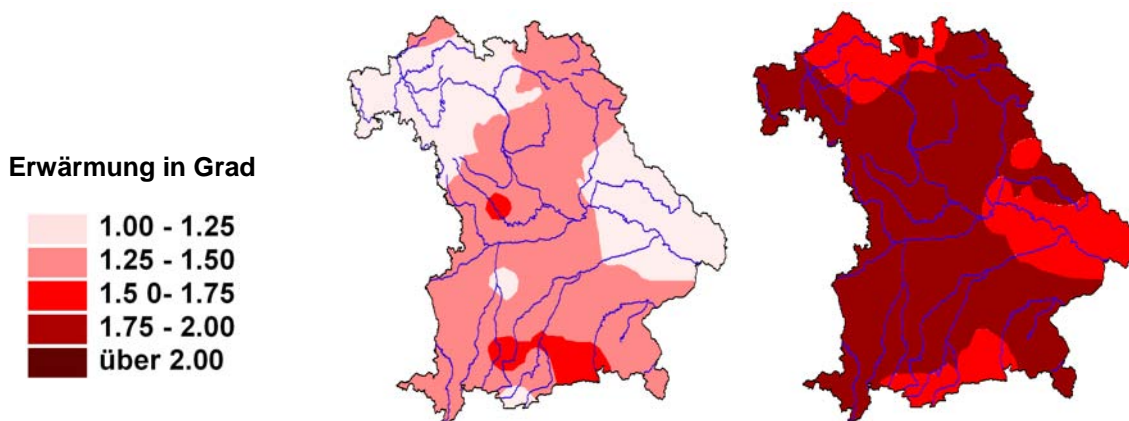


Abb. 4: Temperaturdifferenz zwischen Zukunftsszenario (2021–2050) und Referenzperiode (1971–2000) (nach KLIWA, 2006)⁵

4a) Differenz des Mittelwerts der Lufttemperatur im **Sommerhalbjahr** (Mai bis Oktober)

4b) Differenz des Mittelwerts der Lufttemperatur im **Winterhalbjahr** (November bis April)

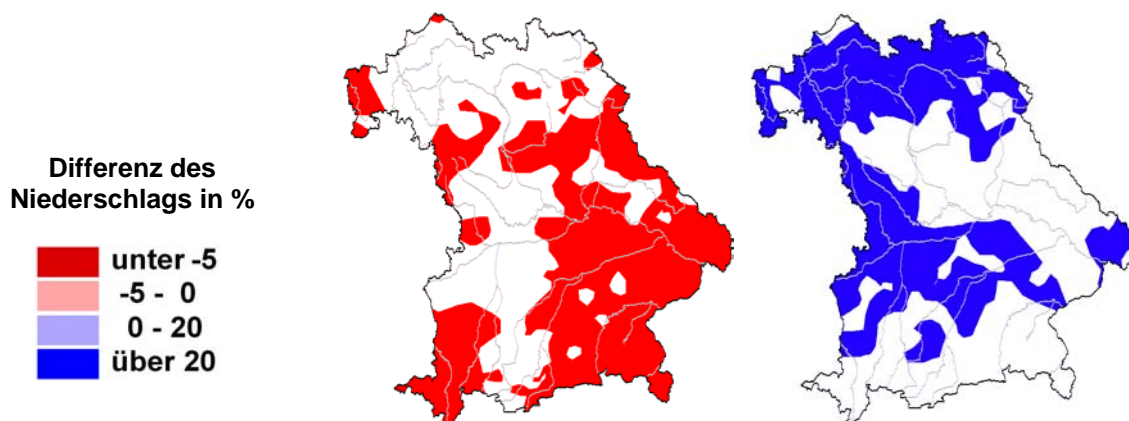


Abb. 5: Niederschlagsdifferenz zwischen Zukunftsszenario (2021–2050) und Referenzperiode (1971–2000) (nach KLIWA, 2006)

5a) Differenz der mittleren Niederschlagssumme in Prozent im **Sommerhalbjahr** (Mai bis Oktober)

5b) Differenz der mittleren Niederschlagssumme in Prozent im **Winterhalbjahr** (November bis April)

⁵ KLIWA, 2006. Regionale Klimaszenarien für Süddeutschland: Abschätzung der Auswirkungen auf den Wasserhaushalt. Heft 9, KLIWA Berichte, Bruchsal.

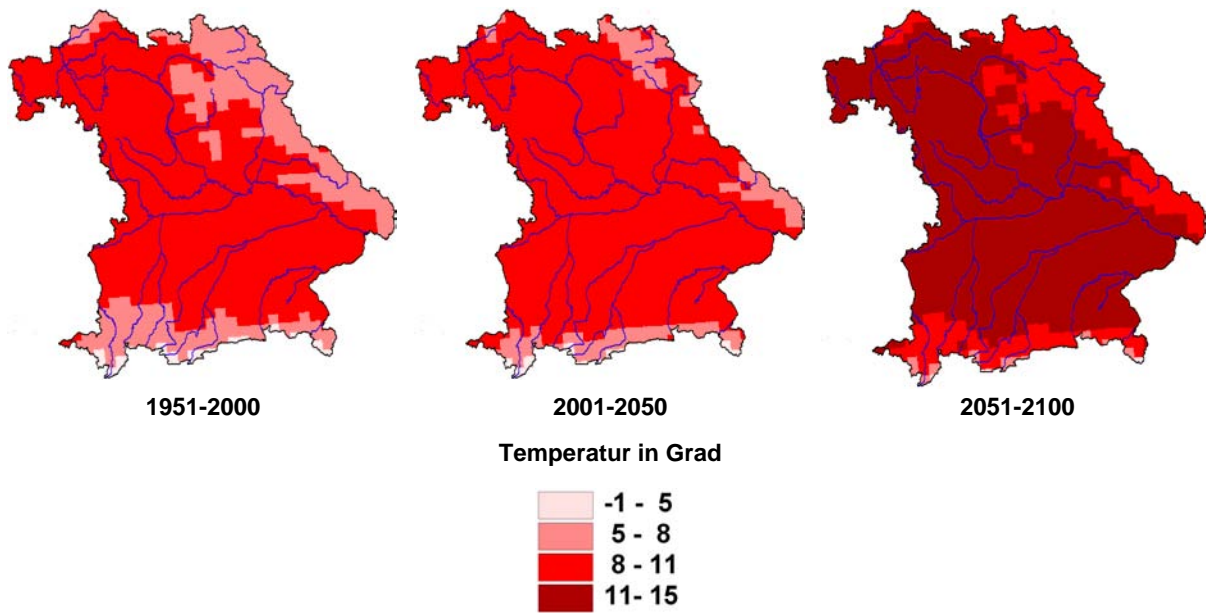


Abb. 6: Mittlere Jahrestemperatur in Bayern für den Zeitraum 1951–2000 aus der Datenanalyse und den Modellrechnungen für die Jahre 2001–2050 und 2051–2100 unter Nutzung des Szenariums A1B. Die 10x10 km² Rasterdaten wurden über fünfzig Jahre gemittelt.

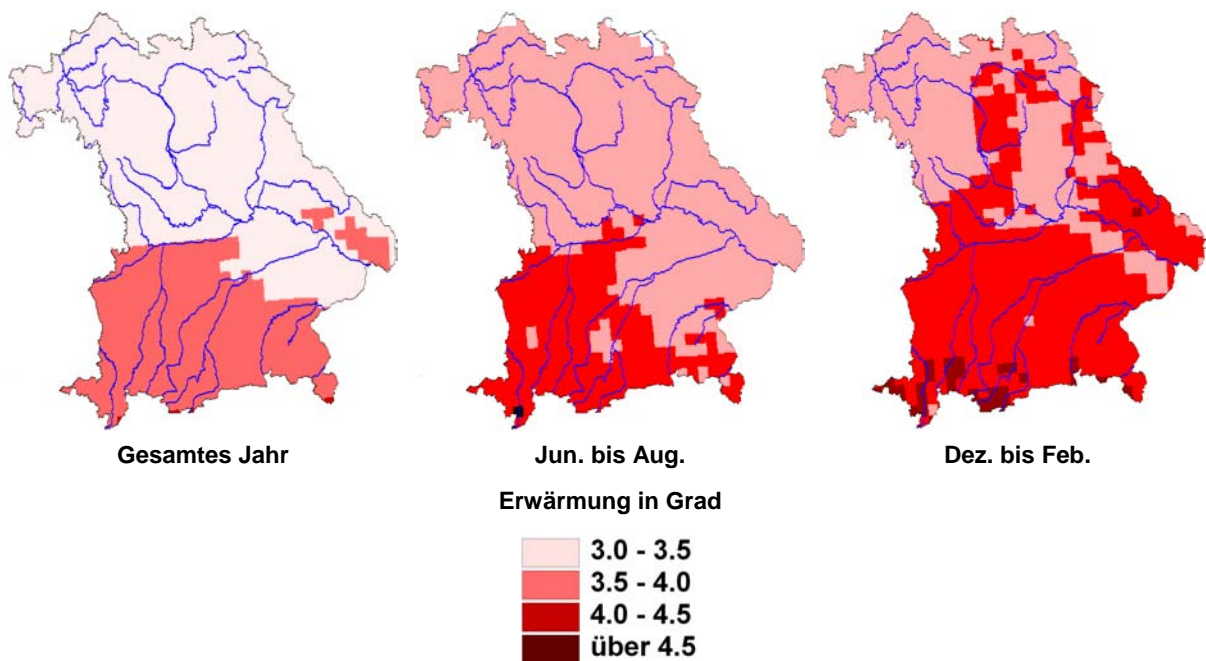


Abb. 7: Änderung der mittleren Temperatur in 2 m Höhe in Bayern im REMO-A1B Szenario zwischen den Perioden 1961-1990 und 2071-2100. Die 10x10 km² Rasterdaten wurden über 30 Jahre gemittelt. Dargestellt wird die Erwärmung im gesamten Jahr, im Sommer (Juni bis August) und im Winter (Dezember bis Februar), welcher sich unproportional stark erwärmt.

Extremereignisse wie Starkregen, Dürreperioden und Stürme könnten ein bislang **ungekanntes Ausmaß** erreichen. Der überproportionale Anstieg solcher Ereignisse bei einer nur geringen Verschiebung mittlerer Bedingungen ist in Abb. 8 veranschaulicht. Diese extremen Ereignisse werden den Wasserhaushalt, die Ökosysteme und menschliche Interessen besonders stark beeinflussen und zu erheblichen Einschränkungen führen.

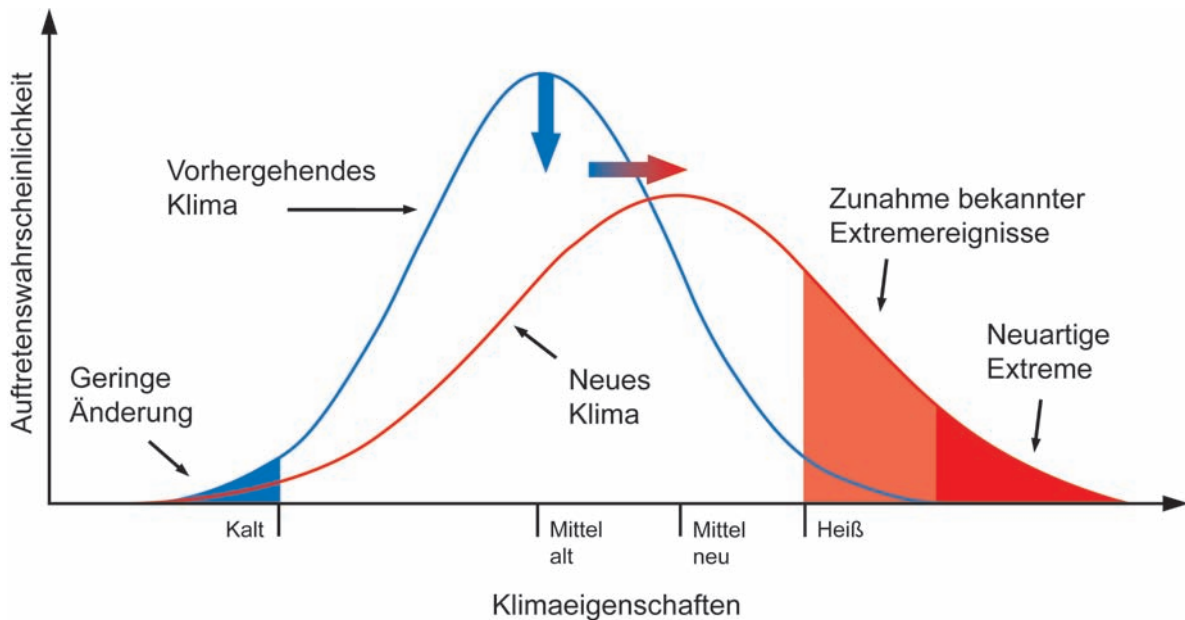


Abb. 8: Schematische Darstellung der Häufigkeitsverteilung klimatischer Kenngrößen des Ist-Zustandes (blaue Linie) und unter Einbeziehung des Klimawandels (rote Linie) – bereits mit geringfügigen Verschiebungen der Durchschnittswerte treten heutige extreme Verhältnisse zukünftig um ein vielfaches häufiger und stärker auf (Nach Meehl et al. 2000)⁶

⁶ Meehl et al. 2000. An introduction to trends in extreme weather and climate events: Observations, socioeconomic impacts, terrestrial ecological impacts, and model projections. Bulletin of the American Meteorological Society, 81(3): 413-416.

4 Auswirkungen des Klimawandels auf die Natur

Der gegenwärtige Klimawandel ist gekennzeichnet durch einen Anstieg der Mitteltemperaturen, eine Veränderung des Niederschlags und eine Zunahme von extremen Witterungen. Dies beeinflusst ganz erheblich die Natur und die Lebensbedingungen des Menschen.

Wasserhaushalt

Die Klimaänderung beeinflusst zunächst das sehr komplexe System des Wasserkreislaufes aus Niederschlag, Abfluss, Verdunstung und Speicherung in vielfältiger Weise. Der Jahresniederschlag wird im Mittel jedoch bis Mitte des Jahrhunderts eher etwas zunehmen. Bayern ist also durch den Klimawandel nicht allgemein von Wasserarmut bedroht, doch wird erwartet, dass die jahreszeitlichen Verschiebungen des Niederschlages und häufigere Trockenperioden eine nachhaltige Wirkung auf die Wasserverfügbarkeit in einzelnen Landesteilen haben könnten. Die **jahreszeitliche Verfügbarkeit** von Wasser als Lebensgrundlage aller Ökosysteme sowie als Grundlage für die Land- und Forstwirtschaft, Energiewirtschaft und Schifffahrt wird in Zukunft verändert sein. Häufen sich mit dem Klimawandel auch Extremereignisse wie extreme sommerliche Dürren oder Starkregen, dann muss mit gravierenden negativen Auswirkungen gerechnet werden.

Stoffhaushalt

Klimaänderungen werden zu **Veränderungen im Stoffhaushalt** von Ökosystemen führen, namentlich im Falle von Kohlenstoff, Stickstoff und Phosphor. Erhöhte Temperaturen bewirken eine **Stimulation biologischer Prozesse** und damit sowohl einen erhöhten pflanzlichen Verbrauch als auch eine erhöhte mikrobielle Freisetzung von Stoffen. Gravierende Konsequenzen der veränderten Häufigkeit und Intensität von **Extremereignissen** für die Zusammensetzung, Struktur und vor allem für das Funktionieren von Ökosystemen und damit auch für deren Stoffhaushalt sind sehr wahrscheinlich.

Mikroorganismen

Besonders direkte Reaktionen auf den Klimawandel sind aufgrund der kurzen Generationszeiten und effizienten Ausbreitungswege bei **Mikroorganismen** zu erwarten. Sie kontrollieren in allen terrestrischen und aquatischen Lebensräumen maßgeblich die **Stoffflüsse** und den **Stoffumsatz** von Böden (bzw. im Sediment). Am globalen **Kohlenstoff-, Stickstoff- und Phosphorumsatz** sind sie entscheidend beteiligt. Aufgrund der direkten Abhängigkeit der mikrobiellen Aktivität von Temperatur und Feuchtigkeit wirkt sich hier der Klimawandel besonders gravierend in allen Bereichen aus.

Vegetation

Seit dem Ende der 80er Jahre zeigen sich deutliche Veränderungen der **Phänologie** – beispielsweise bei der Blüte und dem Beginn der Blättentfaltung von Gehölzen – die in Zusammenhang mit Veränderungen der Lufttemperatur stehen. Pflanzenarten reagieren **individuell unterschiedlich** auf klimatische Veränderungen. Terrestrische Ökosysteme, wie Wälder und Wiesen, werden künftig eine veränderte **Artenzusammensetzung**, neue **Dominanzverhältnisse** und eine veränderte **Biodiversität** aufweisen und auch aquatische Ökosysteme, wie die Unterwasservegetation, werden nicht in ihrer heutigen Form erhalten bleiben. Auch die Ausbreitungsgeschwindigkeiten von sich neu etablierenden und **invasiven Arten** sind unklar. Für Arten der kühlen und höchstgelegenen Lebensräume gibt es keine Ausweichmöglichkeit (Abb. 9). Entscheidend für die ökologische Bewertung der Entwicklung ist deshalb nicht nur ihr Ausmaß sondern auch ihre **Geschwindigkeit**. Lebensgemeinschaften können sich

nicht in kurzer Zeit anpassen. Als Konsequenz kann das Funktionieren von Ökosystemen beeinträchtigt werden. Zwar sind wegen **milderer Winter** und damit **verlängerter Vegetationszeiten** kurz- bis mittelfristig erhöhte Biomassezuwächse zu erwarten, doch wird auch der Abbau pflanzlichen Gewebes durch Insekten, Pilze und Mikroorganismen beschleunigt. Ein denkbarer Düngungseffekt durch die Zunahme des atmosphärischen CO₂-Gehaltes wird sich kaum substantiell auswirken. Durch die mögliche Zunahme der Trockenheit im Sommerhalbjahr wird die **Gefahr von Trockenstress** erhöht.

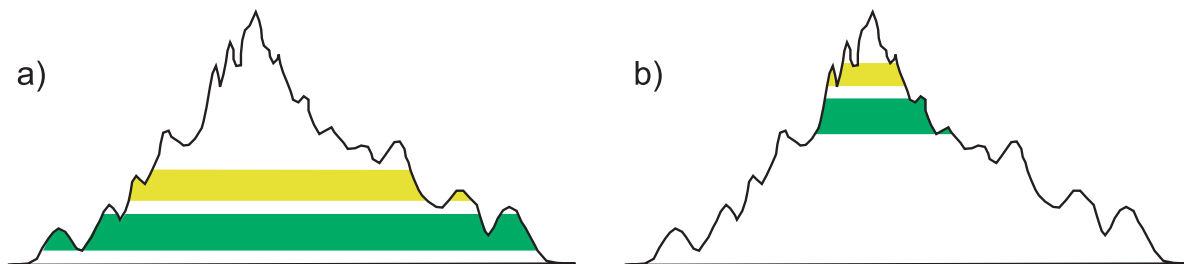


Abb. 9: Schematisiertes Modell der Aufwärtsbewegung von aktuellen Vegetationszonen im Gebirge (a) sowie als Folge einer Anpassung an eine Klimaerwärmung (b). Eine Erwärmung um 2 Grad würde im Gebirge eine Verschiebung um ca. 400 Höhenmeter nach oben bedeuten. Solche Vorgänge benötigen lange Zeiträume. Mit Artenverlusten ist zu rechnen. Zudem sind die Böden höherer Lagen oft als Standort für eine andere Vegetation nicht geeignet (nach Beierkuhnlein, 2007 und Jentsch & Beierkuhnlein, 2003)^{7, 8}

Tierwelt

In den letzten Jahren ist in Bayern die Einwanderung wärmeliebender **Tiere** zu beobachten. Darüber hinaus ist zu erwarten, dass sich in Zukunft **extreme Trockenperioden** stark auf die Tierwelt auswirken werden. Zum Beispiel zeichnet sich schon seit Jahren ab, dass sich das **Zugverhalten** vieler Vogelarten verändert hat. Während **mobile** Organismen potenziell dazu in der Lage sind schnell und flexibel auf Klimaveränderungen zu antworten, können **standorttreue Spezialisten** in isolierten Lebensräumen kaum auf die veränderten Umweltbedingungen reagieren. Sehr wahrscheinlich wird sich das Artenspektrum verschiedener Tiergruppen verändern. Deutliche Reaktionen auf klimatische Veränderungen sind bei den **Frühjahrsaktivitäten** von Tieren zu erwarten. Als Konsequenz können meist höhere Überlebensraten und größere Populationsdichten erwartet werden. Andererseits verhält sich ihre Nahrungsgrundlage (z. B. Insekten) nicht gleich „getaktet“, so dass neue Unsicherheiten entstehen. Ungleiche Verschiebungen in der Phänologie gefährden insbesondere die **Synchronisierung** zwischen **Pflanzen** und spezialisierten **Bestäubern** oder auch zwischen **Schadinsekten** und ihren **natürlichen Gegenspielern**.

Biotische Interaktionen

Ökologische Systeme bestehen aus einem engen Geflecht gegenseitiger Abhängigkeiten und Beeinflussungen – sog. **biotischen Interaktionen**, die auch ein gewisses Maß an Selbstregulation und Anpassung an sich ändernde Bedingungen ermöglichen. Es ist davon auszugehen, dass klimatische Veränderungen zu Veränderungen der Dominanzverhältnisse, Konkurrenzbedingungen und Populationsdichten in den verschiedenen Lebensräumen führen. Dabei kann es zu einem Verlust von funktionaler Vielfalt der Wechselwirkungen kommen, der in der Regel die Stabilität von Ökosystemen beeinträchtigt und daher zukünftig besonders kritisch zu betrachten ist.

⁷ Beierkuhnlein, C., 2007. Biogeographie. Ulmer Verlag, Stuttgart.

⁸ Jentsch, A. & Beierkuhnlein, C., 2003. Global climate change and local disturbance regimes as interacting drivers for shifting altitudinal vegetation patterns in high mountains. Erdkunde 57: 218-233.

Biodiversität

Weil der Klimawandel die Häufigkeit, genetische Vielfalt und Verbreitungsgebiete von Arten beeinflussen wird, sind Auswirkungen auf die Zusammensetzung und **Biodiversität** von Ökosystemen zu erwarten. Durch einen Rückgang der biologischen Vielfalt wird die ökologische Funktionalität sowie **Stabilität** von Ökosystemen gefährdet. Klimabedingte Biodiversitätsverluste stellen folglich eine zwar indirekte, doch latente **Gefährdung menschlicher Interessen** dar. **Biodiversitätsverluste** werden durch diverse Faktoren angetrieben (Abb. 10).

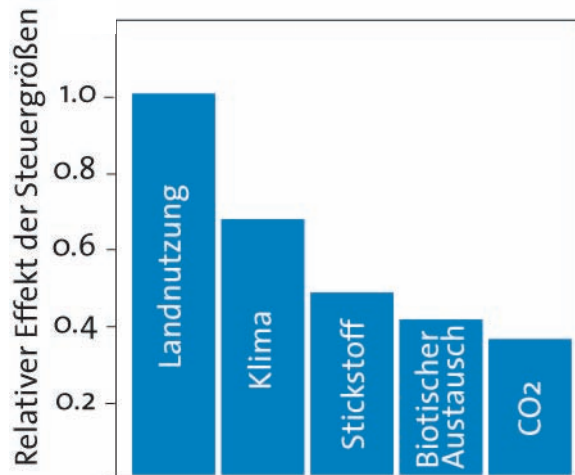


Abb. 10:
Einfluss verschiedener Steuergrößen auf die aktuellen globalen Biodiversitätsverluste (nach Sala et al., 2000)⁹, Landnutzung und Klima beeinflussen in hohem Maße die Biodiversität.

Die **funktionelle Vielfalt** ökologischer Systeme, ihre räumliche Heterogenität und zeitliche Variabilität tragen entscheidend zur Pufferung der Auswirkungen von klimatischen Veränderungen und Extremereignissen bei. Die Aufrechterhaltung der ökologischen Funktionalität sowie davon abhängender **ökologischer Serviceleistungen**, wie sauberes Grundwasser, Bestäubung von Obstbäumen oder Hangstabilität, muss daher als eine wichtige zukünftige Aufgabe verstanden werden. Die Bereitstellung **ökologischer Serviceleistungen**, wie sauberes Grundwasser, Bestäubung von Obstbäumen oder Hangstabilität, muss gewährleistet bleiben. Biodiversitätsverlust ist demnach weit mehr als nur ein ökologisches Problem, er hat soziale, kulturelle, rechtliche und ökonomische Konsequenzen und stellt folglich eine zwar indirekte, doch latente **Gefährdung menschlicher Interessen** dar.

⁹ Sala, O.E., Chapin, F.S., Armesto, J.J., Berlow, E., Bloomfield, J., Dirzo, R., Huber-Sanwald, E., Huenneke, L.F., Jackson, R.B., Kinzig, A., Leemans, R., Lodge, D.M., Mooney, H.A., Oesterheld, M., Poff, N.L., Sykes, M.T., Walker, B.H., Walker, M., Wall, D.H., 2000. Biodiversity - Global biodiversity scenarios for the year 2100. Science, 287(5459): 1770-1774.

5 Anpassungsoptionen für betroffene Bereiche

Der Klimawandel hat neben direkten Auswirkungen durch die Veränderung der natürlichen Verhältnisse vielfältige indirekte Einflüsse auf nahezu alle gesellschaftlichen Bereiche. Diese Auswirkungen und die derzeitig erkennbaren Anpassungsoptionen sind nachfolgend dargestellt.

Agrarwirtschaft

Die **Agrarwirtschaft** muss sich sowohl auf **erhöhte Risiken**, als auch auf eine **Verlängerung der Nutzungsperioden** und teilweise **verbesserte Wachstums- und Entwicklungsbedingungen** einstellen. Eine längere Vegetationszeit bietet der Agrarwirtschaft generell einen **größeren Spielraum hinsichtlich Sortenwahl, Fruchtfolge und Zwischenfruchtanbau**. Im Frühjahr werden Spätfröste zwar insgesamt eher seltener werden, aber dennoch eine hohe Bedeutung dadurch erlangen, dass sie auf eine weiter entwickelte Vegetation treffen.

Ganz entscheidend wird sich die **zunehmende Klimavariabilität** bemerkbar machen. Sowohl die Witterungsunterschiede zwischen den Jahren werden zunehmen, und damit die **Planungssicherheit der Landwirtschaft beeinträchtigen**, als auch die saisonale Variabilität. Extremereignisse wie Dürren oder Starkregen werden die Produktionsrisiken ganz maßgeblich erhöhen. Inwieweit sich negative (Unsicherheit, Missernten) und positive Klimawirkungen (Verlängerung der Vegetationsperiode, Ertragserhöhung) auszugleichen vermögen, ist unklar. Insbesondere die klimatische Beeinflussung von Schädlingen, Pilzen und Krankheiten ist ungewiss. Einschränkungen durch Einschleppung von Schädlingen und Krankheitserregern sind zu erwarten.

Anpassungsmöglichkeiten:

- Kulturarten und Sorten, die heute regional etabliert sind, werden mittel- bis langfristig teilweise durch besser **angepasste Fruchtarten** ersetzt werden. Dabei sind die Wassernutzungseffizienz sowie die Standortansprüche der Feldfrüchte züchterisch zu optimieren. Je nach Wirtschaftlichkeit fortschreitende **Erweiterung des Anbaus** bestimmter Feldfrüchte in Regionen, die bislang ungeeignet waren.
- **Diversifizierung des Fruchtartenspektrums**; dies vermindert die Auswirkungen von Ernteinbußen durch Klimaextreme und trägt gleichzeitig zur landschaftlichen Biodiversität und damit zur Erhöhung der ökologischen Funktionalität bei.
- Vorbereitung und schnelle Reaktion auf **Gefahren durch neue Schädlinge**. Stärkerer Biozideinsatz ist ökologisch nicht sinnvoll. Die **weitere Förderung und Nutzung der ökologischen Landwirtschaft** ist ein Weg den genannten Strategien und Zielen zu entsprechen.
- **Weitere Verbesserung der bodenschonenden und wassersparenden Arbeitsweisen** (wie Anpassung der Humuswirtschaft, Mulchverfahren, Zwischenfruchtanbau, pfluglose Bodenbearbeitung). Über angepasste Landnutzungstechniken kann die Bindung von Kohlenstoff und Stickstoff in Böden und Vegetation erhöht und somit ein Beitrag zur Entlastung der Atmosphäre durch CO₂ geleistet werden.
- Überprüfung und ggf. Anpassung von Fruchtfolgen, Techniken der Bodenbearbeitung und Bewässerung.
- Der **Anbau nachwachsender Rohstoffe** für die Energieerzeugung ist in erster Linie als eine Emissionsreduktionsstrategie anzusehen. Hier sind Flächenverbrauch, Düngung, Energieaufwand und Spurengasemissionen im Hinblick auf Nachhaltigkeit und Belastung von Gewässern zu prüfen. Problematisch erscheint der Einsatz genmanipulierter Pflanzen, da ihre Wirkungen auf Ökosysteme und damit verbundene biotische Interaktionen unklar sind.

- Der **Weinbau** kann sehr wahrscheinlich vom Klimawandel profitieren und sukzessive Anbauflächen und das Angebot an Rebsorten erweitern. Grundlage hierzu ist eine lagenspezifische Analyse der zukünftigen regionalen Bedingungen.
- Anpassung der **Tierhaltung** an die zu erwartenden (v. a. heißen) Witterungsbedingungen und Vorbereitung an verstärkt oder neu auftretende Krankheiten, Schaderreger und Parasiten.
- In der **Teichwirtschaft** müssen höhere Durchschnittstemperaturen, häufigere sommerliche Hitzeperioden, möglicher Wassermangel und schlechtere Gewässerqualität frühzeitig bei der Bewirtschaftung berücksichtigt werden.

Forstwirtschaft

Erhöhte Temperaturen, veränderte Niederschlagsverhältnisse und die Häufung extremer Witterungsereignisse wie Stürme oder Dürren oder Inversionswetterlagen werden zu einer Erhöhung des Risikopotentials führen und erhebliche direkte und indirekte Effekte auf Wald- und Forstwirtschaft haben: **Auswirkungen** auf das **Waldwachstum**, auf die **Baumartenzusammensetzung**, auf die **Boden- und Hangstabilität** und auf die **Stabilität von Waldökosystemen**. Im Sommer 2003 waren bereits großflächige **Dürreschäden** an einigen Baumarten zu beobachten (Abb. 11).



Abb. 11: Dürreschäden bei Buche, Eiche und Hainbuche im September 2003 bei Bad Berneck, Fichtelgebirge. Solche Schäden an Laubbäumen waren 2003 erstmals häufiger zu beobachten.

Darüber hinaus werden Sekundäreffekte wie eine erhöhte **Waldbrandgefährdung**, veränderte **Bodeneigenschaften** oder verbesserte Lebensbedingungen für wärmeliebende **Schädlinge** und **Pathogene** die Waldwirtschaft künftig beeinträchtigen.

Anpassungsmöglichkeiten:

- Ein Hauptziel der Waldwirtschaft sollte eine ökologische Stabilisierung der Waldökosysteme mit angepassten Baumarten sein. Waldbauliche Maßnahmen müssen auf **Risikominimierung** und **Risikoverteilung** ausgerichtet sein.

- Erhöhung der Diversität von Flora und Fauna, Akkumulation von (abgestorbener) Biomasse sowie eine Verringerung der Bewirtschaftungsintensität. Anzustreben ist hier die **Durchmischung der Bestände**, eine angepasste **Baumartenwahl** und angepasste **Bewirtschaftungsformen**. Die Entwicklung artenreicher Mischwald-Bestände leistet einen Beitrag zur Risikominimierung bei Klimaextremen und zur Abwendung großflächiger Insektenkalamitäten. Der Voranbau von angepassten Baumarten im Schutz des Vorbestands ist eine besonders Erfolg versprechende, präventive Strategie im Waldbau.
- Auswahl und Förderung von zukünftig **forstlich geeigneten Baumarten**. Die Gruppe der **Edellaubbäume** (Ahorn, Esche, Kirsche, Linde etc.) sollte in Zukunft einen stärkeren Beitrag zum Bestandaufbau von Wäldern leisten. Bisherige Hauptbaumarten (z. B. Fichte und Kiefer) werden im Bestand stark zurückgehen, da sie den zukünftigen Anforderungen (Stürme, Temperaturzunahme, Trockenstress) schlecht gewachsen sind. Hiervon ist vor allem auch der alpine Schutzwald betroffen.
- Suche nach weiteren **Herkünften** heimischer Baumarten zur **Ergänzung des heimischen Spektrums**. Sie sollen den zu erwartenden Stress von Temperaturerwärmung und zunehmender Klimavariabilität tolerieren können, aber auch genügend Widerstandskraft gegenüber den derzeit herrschenden kühleren Bedingungen aufweisen. Bei der Ergänzung mit standortfremden Baumarten ist aus ökologischer Sicht **Vorsicht** geboten.
- Monitoring von Forstschädlingen, um rechtzeitig auf Veränderungen im Auftreten reagieren zu können.
- **Ausweisung von potenziell besonders gefährdeten Gebieten** zur frühzeitigen forstlichen Einwirkung als kurz- bis mittelfristige Anpassungsmaßnahme, sowie die **Überarbeitung waldbaulicher Entscheidungshilfen** (z. B. Bestandeszieltypen und Verjüngungsziele).
- **Erhöhung des Schalenwild-Abschusses** um eine **rasche Durchmischung** der Wälder zu erzielen.
- Anpassung der **Waldbewirtschaftung**: In den Gebirgen sind der Erosionsschutz und der Beitrag der Wälder zum **Schutz vor Lawinen, Steinschlägen** und **alpinen Hochwässern** von zunehmender Bedeutung.
- Ausarbeitung von **Einsatzplänen** für großflächige Extremereignisse. Sinnvoll erscheint der Aufbau eines Informations- und Kommunikationssystems unter Beteiligung von Rücke- und Abfuhrunternehmen, Holzabnehmern und anderen. Zur Vorbereitung auf größere Schadholzmengen sollten Konzepte zur Werterhaltung des Holzes vor Schädlingsbefall erarbeitet werden sowie zu Lagerungs- und Abfuhrmöglichkeiten.

Naturschutz

Durch Flächenverluste, Landnutzungswandel und Entwässerung ist die Natur schon seit Jahrzehnten starken Beeinträchtigungen ausgesetzt. Mit dem Klimawandel kommt eine zusätzliche Kategorie der Belastung hinzu, von welcher besonders die Alpen, die höheren Lagen der Mittelgebirge sowie Feuchtgebiete und Talauen betroffen sein werden. Wichtige Ökosystemfunktionen, wie die Schutzfunktion der Bergwälder oder der Beitrag der Moore zum Wasserrückhalt und als CO₂-Senken, werden nachteilig beeinflusst. Durch die vielfältigen Auswirkungen des Klimawandels wächst die Gefahr von Artenverlusten. Arten von Sonderstandorten (z. B. Mooren, Quellen) werden darunter leiden. Die prognostizierten **Artenverluste** für Flora und Fauna in den nächsten Jahrzehnten werden in Deutschland auf 5 bis 30 % geschätzt. Andererseits können invasive neue Arten zu enormen Störungen im Ökosystem führen, deren Folgen nicht abschätzbar sind. Auch durch Klimaschutzmaßnahmen können

Beeinträchtigungen des Naturhaushaltes erfolgen. Ein **großflächiger agrarischer Anbau nachwachsender Rohstoffe** oder der Energieholzanbau mit Pappeln kann ebenfalls zu **Konflikten** mit den Interessen des Naturschutzes führen.

Anpassungsmöglichkeiten:

- **Leitbilder** des Naturschutzes sind unter dem Aspekt der Klimaveränderungen neu zu formulieren.
- Der **Erhalt ausreichend großer Populationen** der heimischen Arten ist anzustreben. Hierzu sind hinreichend große Habitate bereitzustellen. Arten, die in Bayern **endemisch** sind oder hier ihren Verbreitungsschwerpunkt haben, müssen besonders intensiv beobachtet werden. Neu eingebürgerte Arten sind auf Dynamik und Gefahrenpotenzial zu überwachen.
- Es muss verstärkt für Wandermöglichkeiten durch eine verstärkte **Vernetzung von Habitaten** gesorgt werden, da sich die Verbreitungsgebiete vieler Arten verlagern werden. **Biotopverbundkonzepte** tragen dazu bei, gefährdeten Arten die Migration zu ermöglichen. Die **Natura 2000**-Flächen sollten vergrößert, vernetzt und optimiert werden, da sie die Aufgaben eines Puffers übernehmen und darüber hinaus zu vielen weiteren Funktionen wie z. B. dem Grundwasserschutz beitragen. Noch herrschen Defizite in der Umsetzung und in der Zusammenführung in einen Biotopverbund. Es müssen Strukturen geschaffen werden, die das Potenzial dieser Gebiete für eine modellhafte Umsetzung der durch den Klimawandel geforderten Maßnahmen nutzen. Grundstein für Durchgängigkeit und Vernetzung von Biotopen ist dabei der konsequente Rückbau bzw. die Umgestaltung von **Ausbreitungsbarrieren**, wie Verkehrswege, Fließwässerverbauungen und intensiv genutzten Flächen.
- **Arten- und Biotopschutz-Konzepte** und ihre **landesweite Umsetzung** müssen an die neuen Herausforderungen angepasst werden. Dies betrifft z. B. Instrumente wie das Moorentwicklungskonzept, das Auenprogramm und BayernNetzNatur. Bayern sollte bei der Entwicklung einer eigenen **Biodiversitätsstrategie**, wie sie für Deutschland in Planung ist, explizit den Klimawandel berücksichtigen.
- **Funktionale Defizite** von Ökosystemen werden durch den Naturschutz zukünftig noch mehr beachtet und angegangen werden müssen als bisher. Beispielsweise ist im Gebirge der Erhalt und Ausbau von **Schutzwäldern** gefordert.
- Die Möglichkeit einer hervorragenden Verknüpfung von Naturschutzinteressen mit Maßnahmen zum Hochwasserschutz bieten **Retentionsflächen** in Talauen. Einer natürlichen Überflutungsdynamik überlassen, können sie zu Oasen der Biodiversität werden. Die funktionelle Vielfalt ökologischer Systeme, ihre Strukturvielfalt und ihre zeitliche Variabilität sind Schlüsselfaktoren zur Milderung der Auswirkungen von Klimaveränderungen.

Raumplanung / Bauleitplanung

Das Landesentwicklungsprogramm und die Regionalplanung legen die künftig zulässigen raumbearbeitenden Maßnahmen im Grundsatz fest. Die Bauleitplanung setzt die Vorgaben vor Ort um. Differenzierte **Entscheidungen zur Landnutzung**, also die Entscheidung über die Bebauung von Flächen, Erlaubnis der Nutzungsart und spezifische **Aussagen in Bebauungsplänen**, wie z. B. die Festsetzung bestimmter Gebäudeausstattungen werden im Hinblick auf Belastungen und Gefährdungen durch den Klimawandel erforderlich. Die Perspektive muss hierbei künftig über gewöhnliche Planungszeiträume hinaus reichen. Eine spätere Anpassung von Infrastruktureinrichtungen ist um ein vielfaches aufwändiger und teurer, als vorsorgend zu planen.

Anpassungsmöglichkeiten:

- Planungsgrundlagen und Normen sind zu überprüfen und an die Anforderungen des Klimawandels, der Landesentwicklung, der Regional-, Bauleit- und Stadtplanung anzupassen. Dies betrifft die Arbeit verschiedenster bayerischer Behörden.
- In der Stadtplanung sind Strategien und städtebauliche Konzepte zur Reduzierung der Auswirkungen von klimatischen Extremen auf Wohlbefinden und Gesundheit von Menschen vorzubereiten. **Kaltluftschneisen** müssen in den Städten erhalten bleiben oder geschaffen werden. Freihaltung von Flächen sowie flankierende Maßnahmen zur Gestaltung von Siedlungsflächen z. B. durch Grünanlagen können der Verschlechterung des Stadtklimas entgegenwirken.
- Der **Verschlechterung der Ressourcenqualität** und der Verknappung von Ressourcen (insb. Wasser, Boden und Luft) sowie der **Gefährdung durch Naturgefahren** ist mit geeigneten Maßnahmen zu begegnen.
- Auf weitere **Bodenversiegelungen** und den Bau von Entwässerungssystemen in der Landwirtschaft ist aus Gründen des Hochwasserschutzes und der Grundwasserneubildung möglichst zu verzichten.
- Die **Nutzung bestehender Bausubstanz** und die Verwendung **flächensparender Bauformen** sind zu fördern, soweit dies nicht zur Verschlechterung des Stadtklimas führt.
- Die Weiterentwicklung des **Informationsmanagements** von raumbezogenen Risiken ist zu unterstützen, um die Sammlung und Aufbereitung von Daten, Pflege der Datenbank, regelmäßige Information von Fachbehörden, Schaffung von Online-Angeboten und Öffentlichkeitsarbeit zu gewährleisten. Die **Vernetzung** und Einbindung der mit Raumordnung, Landes- und Regionalplanung betrauten Behörden und regionalen Planungsverbände sind weiter voranzutreiben.

Wasserwirtschaft

Der Klimawandel wird alle Bereiche der Wasserwirtschaft beeinflussen (s. Abb. 12 sowie KLIWA-Ergebnisse). Schlüsselfaktoren sind die Zunahme der Niederschläge im Winter, deren Abnahme im Sommer und vermehrt eintretende Extremereignisse sowie die Änderung der mittleren Wassertemperaturen, von der die Gewässerbeschaffenheit und auch wasserwirtschaftliche Nutzungen abhängen. Diese Umstände sind bei der wasserwirtschaftlichen Infrastrukturanlage zukünftig verstärkt zu berücksichtigen.

Generell wird die **Hochwassergefährdung** als Folge zunehmender Starkniederschläge besonders im Winterhalbjahr ansteigen. Zudem kann auch die Häufigkeit von lokalen **Starkregenereignissen** zunehmen, wodurch unter anderem vermehrt Überflutungen in Gebäuden auftreten. Außerdem wird es bei den für solche Extremereignisse in der Praxis nicht auslegbaren, kommunalen **Entwässerungssystemen** häufiger zu Rückstaus und Überschwemmungen von Straßen, Unterführungen, Kellerräumen und Tiefgaragen kommen. Durch Starkniederschläge und Hochwasserabflüsse in Gewässer eingetragene Schad- und Nährstoffe können die Gewässerqualität beeinträchtigen.

Die Abnahme des Niederschlags in den Sommermonaten wird zu häufigen und länger andauernden Niedrigabflussperioden in den Fließgewässern führen. Dies wird unter anderem die Wasserverfügbarkeit und somit auch die Wasserentnahme z. B. als Kühlwasser beeinflussen.

Ebenso werden sich auch Änderungen hinsichtlich des Wasserbedarfs und -dargebots ergeben. Häufigere Hitze- und Dürreperioden führen zu erhöhtem **Wasserbedarf** in Landwirtschaft und privaten

Haushalten. Der Bewässerungsbedarf wird steigen. Im Gegenzug verringern sich die sommerlichen Niederschläge, so dass in diesem Zeitraum mit einem Rückgang des **Wasserdargebots** und der **Grundwasserneubildung** zu rechnen ist. In wie weit dies mit höheren Neubildungsraten im Winter ausgeglichen wird ist noch unbekannt, hierzu besteht weiterer Untersuchungsbedarf.

Auch die **Gewässerökologie** wird erheblich betroffen sein. Steigende Wassertemperaturen führen zu höheren Umsätzen und damit Sauerstoffzehrung in den Gewässern, wechselnde Wasserstände und verstärkte Eutrophierung belasten die sensiblen Gewässerökosysteme. Dies kann vor allem zu Massenentwicklung von Algen und höheren Wasserpflanzen, Invasion nicht-einheimischer Arten, Beeinträchtigung der Laichgründe, zum weiteren Verlust der Schilfbestände und auch zu einer Beeinträchtigung des Erholungswertes führen. Darüber hinaus verschieben sich die Lebensräume vieler temperatursensibler Wassertiere. Probleme ergeben sich dann für die aquatische Fauna auch aus der bisher noch mangelnden Durchgängigkeit vieler Fließgewässer.

Anpassungsmöglichkeiten:

- Weiterführung des begonnenen Hochwasserschutz-Aktionsprogramms 2020) zum Schutz vor Hochwasserverschärfungen infolge des Klimawandels.
- Ausgleich des Wasserhaushalts durch verstärkte Nutzung der Möglichkeiten des Wasserrückhalts und der Wasserspeicherung. Dazu rechtliche Sicherung potenzieller Rückhalteräume und Speicherstandorte sowie teileinzugsgebietsbezogene Wirkungsanalysen weiterer potenzieller Einzelspeicher bzw. Verbundsysteme.
- Die Ermittlung von belastbaren regionalen Daten über die zukünftige Entwicklung der Hochwasserabflüsse und die Integration der Ergebnisse in die Hochwasserschutzplanungen ist fortzuführen und zu vertiefen.
- Die Ermittlung der Wasserverfügbarkeit als Niedrigabflüsse und als flächenhafte Grundwasserneubildung unter den Bedingungen des Klimawandels ist zu intensivieren; die Erkenntnisse sind bei künftigen Planungen zu berücksichtigen.
- Wasserrechtliche Festlegungen betroffener Nutzungen müssen an die Auswirkungen des Klimawandels angepasst werden (z.B. Wärmelastpläne).
- Sachgerechte Anpassung der kommunalen Entwässerungsanlagen an die neuen Anforderungen.
- Nachhaltiger Schutz nutzbarer Grundwasservorkommen für die künftige Wasserbedarfsdeckung
- Ermittlung und Bewertung von Wasserbilanzen bei voraussichtlich steigendem sommerlichen Wasserbedarf und gleichzeitig abnehmendem Wasserdargebot.
- Erhöhung der Versorgungssicherheit bei der Trinkwasserversorgung durch Verbund von Anlagen oder Gewinnungsalternativen („zweites Standbein“), insbesondere in den heutigen Wassermangelgebieten Frankens sowie des Oberpfälzer- und Bayerischen Waldes.
- Die Grundwasserneubildung ist im ländlichen Raum durch Wasserrückhalt und durch Maßnahmen in der Siedlungsentwässerung (Versickerung, Entsiegelung) zu fördern.
- Auf weitere **Bodenversiegelungen** und den Bau von Entwässerungssystemen in der Landwirtschaft ist aus Gründen des Hochwasserschutzes und der Grundwasserneubildung möglichst zu verzichten.

- Ermittlung des Einflusses des Klimawandels auf die Gewässerqualität und frühzeitige Berücksichtigung der Ergebnisse in der Wasserrahmenrichtlinie und im Gewässermanagement.
- Verbesserung der Durchgängigkeit von Gewässern. zur Ermöglichung ausgleichender Wanderungsbewegungen.
- Intensivierung des Dialoges mit der Bevölkerung, um auf die wasserrelevanten Risiken und Naturgefahren als Folge des Klimawandels aufmerksam zu machen, die Informationen in Form von Gefahrenkarten zugänglich zu machen und die Akzeptanz für Vorsorgemaßnahmen zu schaffen.
- Dialog und weitere Vernetzung mit den weiteren betroffenen Bereichen, insbesondere Landwirtschaft, Forst, Wasserversorgung und Industrie, um abgestimmte Maßnahmen zu erreichen.

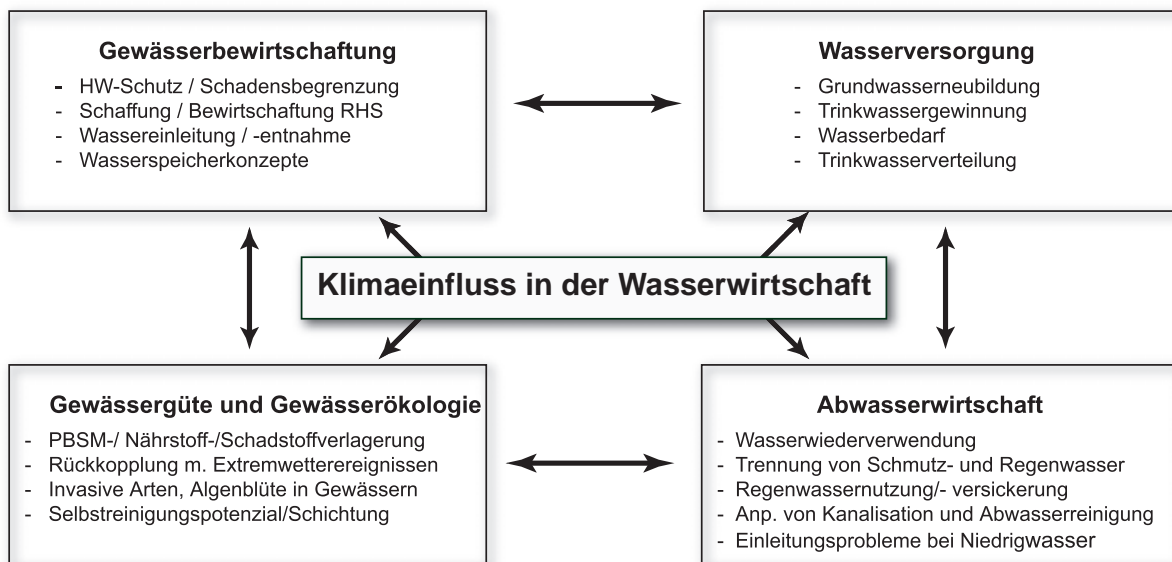


Abb. 12: Der Einfluss von Klimaveränderungen auf verschiedene Aspekte der Wasserwirtschaft (RHS = Rückhaltesysteme).

Energiewirtschaft

Durch den Klimawandel bedingte Probleme beziehen sich neben der Umgestaltung zu einer **emissionsarmen Energieversorgung** und einem durch den Einsatz von Kältetechnik zu erwartenden **höheren Energieverbrauch im Sommer** auch auf die ausreichend Versorgung mit **Kühlwasser**. Aufgrund einer höheren und häufigeren Schwankungsbreite der Wasserstände und erhöhten Wassertemperaturen ergeben sich vermehrt Schwierigkeiten bei der **Prozesswasserkühlung**. Kraftwerke können dann ihre Leistungskapazitäten nicht ausschöpfen. Beeinträchtigungen der **Energieinfrastruktur** werden, z. B. bei Stürmen erwartet. Strategien zur Emissionsminderung (Klimaschutz) werden in dieser Studie nur am Rande beleuchtet.

Anpassungsmöglichkeiten:

- Über alternative Kühlsysteme kann bei **thermischen Kraftwerken**, z. B. durch Kühltürme oder Zellenkühlanlagen, eine gewisse Unabhängigkeit vom Gewässer erreicht werden.
- **Simulationsmodelle** können zur frühzeitigen und zeitnahen Regulierung der „Kühlwasserfahrweise“ beitragen.
- **Regelmäßige Kontrollen** (von Kraftwerken sowie der dazugehörigen Infrastruktur) zur zeitgerechten Anpassung an geänderte Umweltbedingungen sowie die Erarbeitung von Normen zur Erhöhung der (Versorgungs-)Sicherheit sind durchzuführen. Die **Erhöhung der Energieausbeute** und die **Entwicklung und Nutzung alternativer Energien** sind auszubauen.
- **Energetische Gebäudesanierungen** müssen vorangetrieben werden. Eine einheitliche Verpflichtung der Gerätehersteller durch Montage vollwertiger Netzschalter ergäbe einen geringeren ständigen Strombedarf.
- Strategien zur **nachhaltigen, effizienten und verbrauchernahen** Erzeugung von Energie sollten weiterentwickelt werden. Planungen zur Anpassung an den Klimawandel sollten wo möglich mit **Maßnahmen zur Reduktion des Energieverbrauches** und der **Treibhausgasemissionen** sowie dem verstärkten Einsatz **regenerativer Energiequellen** verknüpft werden. Beim Anbau nachwachsender Rohstoffe, bei der Installation von Biogasanlagen, bei geothermischen Nutzungen, etc. ist auf deren Nachhaltigkeit zu achten.
- **Leitfäden** zur effizienten Stromnutzung für mittelständische Unternehmen aber auch für Privathaushalte sollten stärker genutzt werden.

Infrastruktur

Die **Infrastruktur** und mit ihr die **Sicherheit im Verkehr** werden ebenfalls durch Extremereignisse stärkere Beeinträchtigungen erfahren als das bisher der Fall war. Die Zunahme von sommerlichen Hitzetagen und Tagen mit extremer Hitze, wird **Schäden im Verkehrsnetz** zur Folge haben. **Verstärkte Risiken** für den **Straßen-, Bahn- und Flugverkehr** gehen von Stürmen, Starkwinden, Vereisung und starken Regenfällen aus. Einhergehend mit den direkten materiellen Schäden an Verkehrsnetzen wird zusätzlicher Schaden in den davon abhängigen Bereichen wie dem Transportsektor, dem Berufs- und Reiseverkehr entstehen. Die **Schifffahrt** wird im Sommer häufiger als bisher mit sehr geringen Pegelständen rechnen müssen. Hochwassersituationen mit hohen Strömungsgeschwindigkeiten beeinträchtigen zudem vermehrt im Winterhalbjahr die Sicherheit der Schiffe auf großen Flüssen und können zum Erliegen des Schiffsverkehrs führen. Im **Flugverkehr** werden zwar frostbedingte Behinderungen reduziert, aber durch Stürme und starke Regenfälle **neue Risiken** induziert.

Anpassungsmöglichkeiten:

- Die **Gefährdung** von Verkehrswegen und der Infrastruktur (v. a. Brücken, Tunnel und Gebirgsstraßen, Kommunikationseinrichtungen, Einrichtungen zur Energie- und Wasserversorgung) muss unter den neuartigen Rahmenbedingungen bewertet werden.
- Die wachsende Gefährdung von **Freileitungen** durch Stürme und extreme Niederschläge muss unter den neuen Randbedingungen genauso bedacht werden wie die Gewährleistung der **Hangstabilität** in steilem Gelände zur Sicherung von **Siedlungen** und **Trassen**.
- **Vulnerabilitätsanalysen** sollten verschiedene Fachdisziplinen einbeziehen, um möglichst effizientes Handeln vorzubereiten. Vorrangig muss, wo immer möglich, die **präventive Gefahrenabwehr**, z. B. über den Verzicht auf Bebauung oder die Gestaltung des ökologischen Um-

feldes betrieben werden (z.B. Retentionsräume, Schutzwald). Sinnvoll erscheint ferner auf stark befahrenen Straßen der verstärkte Einsatz intelligenter **Verkehrslenkungssysteme** zur Gefahrenabwehr.

- Extreme Witterungsbedingungen legen die Entwicklung und Erforschung neuer Materialien (z. B. neue Asphalt- und Gummimischungen) nahe.
- Bei Niedrigwasser sind frühzeitig Maßnahmen einzuleiten, um beim Erliegen des **Schiffsverkehrs** auf Alternativen im Transportsektor ausweichen zu können.
- An **Flughäfen** wird ein verstärktes Augenmerk auf „Biosecurity“ (Sicherung vor Einschleppung potenziell schädlicher Organismen) zu richten sein.
- Eine ständige Absicherung der **Kommunikationssysteme** ist sicherzustellen. Nach Extremereignissen muss ein schneller und reibungsloser Austausch von Informationen und Daten möglich sein. Die Effizienz und Effektivität der **zivilen Hilfsdienste** muss auch unter veränderten Klimabedingungen und dem Eintreten von extremen Naturereignissen gewährleistet sein.
- Grundsätzlich ist ein angepasstes **Risikomanagement**, das kurze Vorwarnzeiten und weitreichende Beeinträchtigungen der Infrastruktur berücksichtigt, aufzubauen.

Tourismus

In Bayern wird vor allem der **Wintertourismus** direkt vom Klimawandel betroffen sein. Der deutliche **Rückgang der Schneesicherheit** in den Mittelgebirgen und den tieferen Lagen der Alpen führt zu einer Abnahme der klassischen Wintersportmöglichkeiten (Abb. 13) und zu einer Konzentration des Schneetourismus auf die höheren Lagen der zentralen Alpen.

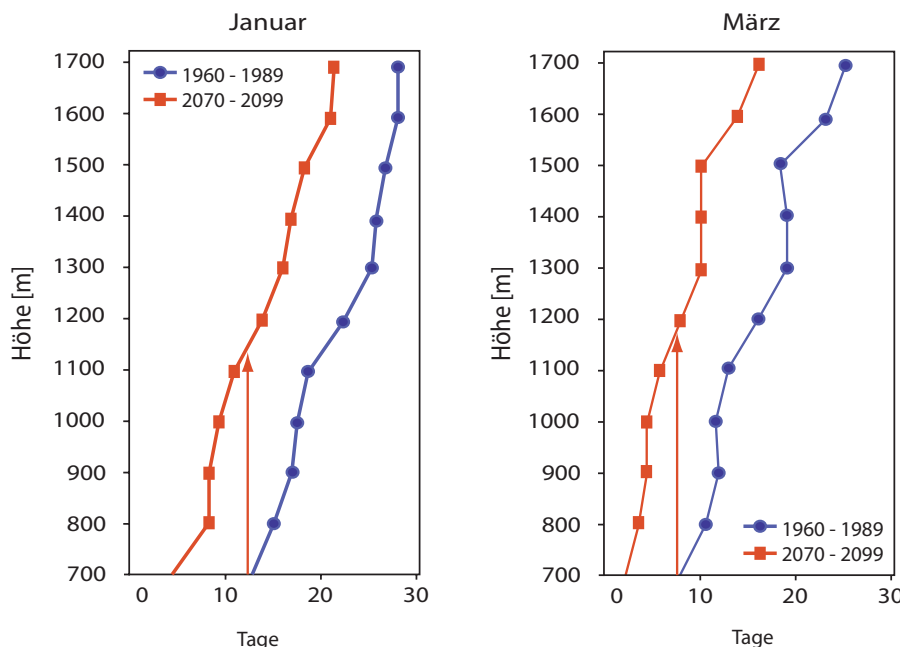


Abb. 13: Darstellung der Veränderung der Tage mit Schneebedeckung in den nördlichen Alpen; abgebildet für die Monate Januar und März (nach Seiler, 2006)¹⁰

¹⁰ Seiler, W., 2006. Der regionale Klimawandel in Bayern, (heute und zukünftig), Vortrag bei der Versicherungskammer Bayern, München.

Konflikte zwischen Naturschutz und touristischer Nutzung dieser verbleibenden Flächen werden sich weiter ausweiten. Steigende Temperaturen und geringere Niederschläge im Sommer können auf der anderen Seite den **Sommertourismus in Bayern begünstigen** und die Saison, bspw. für den Wandertourismus, durch Ausweitung ins Frühjahr und in den Herbst verlängern. Mit einer **Nordverschiebung der Touristenströme** aus den zunehmend heißeren Mittelmeerregionen ist zu rechnen. Bayern kann als (inter-) nationales Urlaubsziel an Attraktivität gewinnen. Es wird also sowohl eine Verschiebung der **räumlichen Präferenz**, als auch der **Reisezeit** erwartet.

Einschränkungen im Tourismussektor können sich aus verstärktem Pollenflug auch in Luftkurorten sowie durch hohe Ozonkonzentrationen in „Reinluftgebieten“ ergeben. Allgemein ist mit einer höheren Wärmebelastung zu rechnen. Weitere Probleme sind die Aufwärmung flacher Badeseen und damit die Abnahme der Qualität des Badegewässers.

Anpassungsmöglichkeiten:

- Die klimatischen Veränderungen v. a. in Wintersportgebieten der Alpen und der Mittelgebirge sind in **raumbezogenen Entwicklungskonzepten** zu berücksichtigen.
- Um den sozio-ökonomischen Folgen des Klimawandels entgegenzuwirken, ist eine **flexible und möglichst vielfältige Entwicklung** des Tourismus in Bayern durch vielschichtige Angebote zu fördern. So ist die Ausweitung wetter- und schneeunabhängiger **Ganzjahresangebote**, aber auch die Stärkung **regionaler Besonderheiten** und die **Verbesserung von Bildungs- und Kulturangeboten** weiter anzustreben.
- Der Einsatz von **technischen Beschneiungsanlagen** zur Begegnung der abnehmenden Schneesicherheit muss vor dem Hintergrund der zunehmenden Erwärmung kritisch hinterfragt werden.
- Es ist zu klären, wie **Monumente und historische Bauwerke** vor Extremereignissen zu schützen sind. Gefährdete Gebäude sind zu identifizieren.
- Vernetzung, Durchlässigkeit und stärkere Arbeitsteilung der bayerischen **Tourismusorganisationsebenen** sind weiter zu fördern um eine zeitnahe Anpassung zu ermöglichen (siehe Abb. 14). Die Förderung spezifischer Fremdenverkehrseinrichtungen und -angebote kann lenkend wirken.

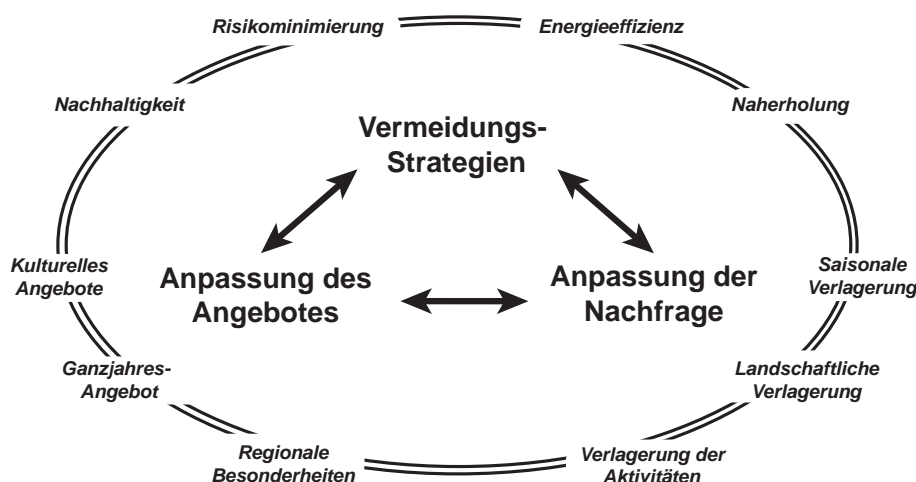


Abb. 14: Strategien und konkrete Beispiele zur Anpassung an den Klimawandel im Tourismus.

Architektur und Bauwesen

Die zu erwartende Zunahme sommerlicher Extremhitzetage geht mit einer Beeinträchtigung des **Raumklimas** einher. Besonderes Augenmerk wird bezüglich der Wärmebelastung auf Kliniken, Alten- und Pflegeeinrichtungen, Schulen und Kindergärten zu richten sein. Auch kommt es als Folge der zunehmenden Temperaturvariabilität zur **physikalischen Beanspruchung von Gebäuden** aufgrund der **hohen thermischen Belastung von Bauteilen**.

Anpassungsmöglichkeiten:

- Die steigende Gefahr **mechanischer Belastungen** von Bauwerken durch Stürme, Hagelereignisse und durch die zunehmende Frequenz und Intensität von Starkregen und Überflutungen erfordert bauliche Anpassungen. Um die Betriebssicherheit von Gebäuden zu gewährleisten, sind Materialien einzusetzen, bzw. zu entwickeln, welche Temperaturschwankungen und Belastungen tolerieren.
- Die Nutzung vorhandener technischer Möglichkeiten (wie Dämmung, Sonnenschutz, intelligente Lüftungssysteme) zur **energieeffizienten Verbesserung des Raumklimas** sollte flächendeckend forciert werden. Isolation und Klimatechnik sind zu verbessern, um gesundheitsschädlichen Hitzestress und energieaufwändige Kältetechnik zu begrenzen.
- Zur Wärmegewinnung im Winter sollten die **Transmissions- und Lüftungswärmeverluste vermindert**, sowie die **Wärmegewinne erhöht** und der Nutzungsgrad des Wärmeerzeugers verbessert werden. Auch der **Einsatz an Primärenergie** zur Materialherstellung (Holzmaterialien vs. Styropor) ist zu hinterfragen.
- Finanzielle Anreize zur Bausanierung sowie eine ansprechende Aufklärung erhöhen bereits jetzt die Attraktivität für eine **Wohnungs- bzw. Haussanierung**. Diese sollten im Hinblick auf die Stärkung energieeffizienter Klimatechniken im privaten und gewerblichen Bausektor ausgeweitet werden.
- Im Baubereich besteht ein erhebliches **Anpassungspotenzial**. Bereits während der Planungsphase sollte über **Bauvorsorgemaßnahmen** nachgedacht werden.
- Insgesamt ist für die Entwicklung von Anpassungsstrategien an Klimafolgewirkungen gerade im Bereich Architektur und Bauwesen die **Vernetzung** von Forschung und Praxis unerlässlich.

Gesundheit

Der Gesundheitszustand der Bevölkerung wird durch den Klimawandel auf verschiedenste Weise direkt und indirekt beeinflusst werden. **Alte Menschen, Kinder, Kranke** und **Behinderte** sind verstärkt direkten Beeinträchtigungen durch sommerliche Hitze ausgesetzt. Stürme, Überschwemmungen oder Blitzschlag führen zu einer erhöhten **Gefährdung der Bevölkerung**.

Die Veränderung der klimatischen Rahmenbedingungen (s. auch Abb. 15) verschärft künftig die Ausbreitung bekannter Krankheitserreger (z. B. FSME) und ermöglicht bislang nicht vorkommende **Infektionskrankheiten**. Die Einwanderung wärmeliebender Insekten, die als **Überträger** von Krankheiten in Frage kommen ist hierbei ein wichtiger Faktor. Bezüglich der Ausbreitung von **allergen wirkenden Organismen** sind insbesondere neue, bisher nicht in Bayern heimische Pflanzen (Neophyten) wie *Ambrosia* zu beachten.

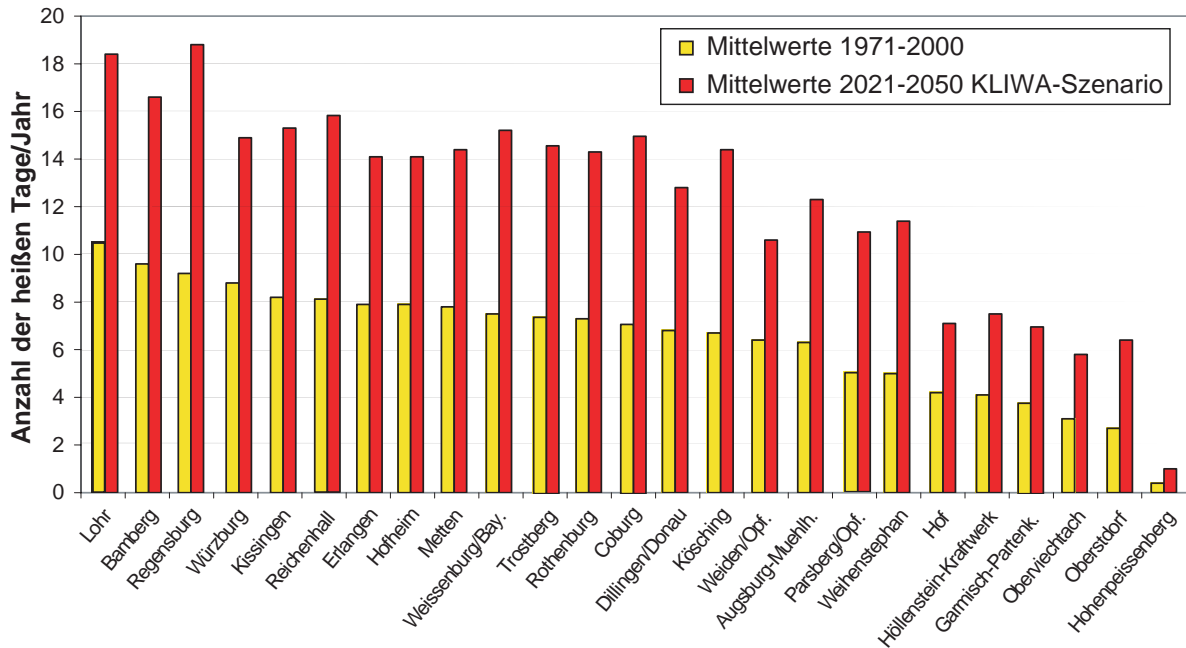


Abb.15: Anzahl der bisherigen und künftigen heißen Tage ($T_{\max} > 30^{\circ}\text{C}$) pro Jahr in Bayern (verändert nach KLIWA, 2006)¹¹

Ganz allgemein ist bezüglich der Ausbreitung von Pollen und anthropogenen Schadstoffen und den sich daraus ergebenden Auswirkungen auf Lunge, Herzkreislaufsystem und Allergien durch den Klimawandel eine verstärkende Wirkung zu erwarten. Erhöhte sommerliche Temperaturen können negative Auswirkungen auf die Hygiene der Lebensmittelproduktion und auf die Lebensmittelsicherheit mit sich bringen.

Anpassungsmöglichkeiten:

- Anpassungsbedarf besteht in den Bereichen der **Vorsorge** im Hinblick auf Extremereignissen wie Stürme, Hitzeperioden und Überflutungen sowie generell zur Wärmebelastung.
- Daneben sind die Einführung und der Ausbau von **Frühwarnsystemen** mit **lokal angepassten Interventionsmaßnahmen**, die konkrete Warnungen ausgeben und Verhaltensregeln empfehlen, notwendig. Informationen müssen zeitnah an betroffene Personengruppen weitergeleitet werden. Die Ermittlung von **Pollenflugphasen und -dauer** sowie insbesondere der **Allergenität verschiedener Pflanzenarten** ist als vorausschauende Maßnahme weiter zu unterstützen. Bezüglich allergen wirkender Tiere, wie dem Eichenspinner, sind ebenfalls Vorsorgemaßnahmen zu treffen.
- Vermehrte **Aufklärung** der Bevölkerung und des medizinischen Fach- und Pflegepersonals zu möglichen neuartigen **gesundheitlichen Gefahren**. Entsprechende **Vorsorgemaßnahmen** und Programme zur **öffentlichen Gesundheitspflege** sollten unterstützt werden.
- Die Ausbreitung von **Infektionskrankheiten** bedarf der langfristigen Beobachtung und einem entsprechenden Datenmanagement, um frühzeitig Epidemien oder die dauerhafte Ansiedlung von Erregern zu erkennen. In diesem Zusammenhang sind vor allem die Ausbreitung und die Häufigkeit **potenzieller Vektoren** zu beobachten.
- Die **fachübergreifende** Analyse von Umwelt- und Gesundheitsdaten stellt die Grundlage **optimierter Gefährdungsvorhersagen** und Risikomodellierung dar.

¹¹ KLIWA, 2006. Regionale Klimaszenarien für Süddeutschland: Abschätzung der Auswirkungen auf den Wasserhaushalt. Heft 9, KLIWA Berichte, Bruchsal.

Naturgefahren

Im Zusammenhang mit dem Klimawandel ist die zunehmende Bedeutung von **Naturgefahren** ein zentrales Thema. Für **Bayern** ist zu erwarten, dass die **Gebirgsräume** besonders sensibel reagieren werden. Allgemein kann es mit dem zu erwartenden Anstieg von **Starkregenereignissen** vermehrt zu stoßartigen und massiven Überflutungen kommen, die in Siedlungen und in der Agrarlandschaft erhebliche Schäden bewirken. Hänge können destabilisiert werden und damit **Massenbewegungen** auslösen. Aber auch extreme Temperaturschwankungen und die Folgen von Stürmen können Stein- und Felssturz auslösen. Siedlungen und Gebäude sind durch starke Schneefälle in Folge von Unwettern zunehmend gefährdet. Eine Zunahme der Winterniederschläge würde außerdem die **Lawinenaktivität** erhöhen.

Die künftig verstärkten energetischen Unterschiede der Atmosphäre werden von **Stürmen** und einem überproportionalen Anstieg der Blitzhäufigkeit begleitet. Sich verschärfende sommerliche **Trockenphasen und Dürren** werden sich künftig in der Land- und Forstwirtschaft bemerkbar machen. In Wäldern ist in Trockenphasen künftig mit einer für Mitteleuropa bislang ungekannten **Waldbrandgefahr** zu rechnen. Die graduelle Erwärmung und damit der **Anstieg winterlicher Minimaltemperaturen** bewirken den Wegfall effizienter Regulation von **Schadorganismen**.

Die **erheblichen Risiken** und das **massive Schadpotenzial** rechtfertigen eine frühzeitige Etablierung von Schutzmaßnahmen. Die elementaren Bereiche im Umgang mit Naturgefahren sind die **Früherkennung, Prävention, Reaktion, Risikomanagement** und **Risikostreuerung**.

Anpassungsmöglichkeiten:

- **Frühwarnsysteme** mit effizienten Kommunikationsstrukturen müssen weiter entwickelt bzw. installiert werden. Dies gilt insbesondere für meteorologische Extremereignisse, gesundheitliche Gefahren, den Pflanzenschutz und die wachsende Waldbrandgefahr. Die Kooperation mit (inter)nationalen Frühwarnorganisationen ist anzustreben. Bayernintern ist eine schnellstmögliche Reaktion der Hilfsdienste und eventuell von entsprechenden Bundesinstitutionen weiter zu fördern.
- **Integrative Gefahrenkarten** werden als Planungsgrundlage benötigt; genauso wichtig sind hierbei **Risikoanalysen** (sog. Vulnerabilitätsstudien). Ziel solcher Analysen muss neben der Vorsorge ein angepasstes Katastrophenmanagement sein. Vorrangig sollten hierbei potentiell gefährdete Gebirgs- und Talräume behandelt werden. Auch für bestehende Strukturen (Siedlungen, Verkehrswege etc.) sollten Planungen hinterfragt werden. **Latent wirksame Naturgefahren** müssten in die Analysen integriert werden, genauso wie sozio-ökonomische Komponenten.
- Der gezielten **Förderung der funktionellen Biodiversität**, und damit der Risikostreuerung, kommt eine besondere Bedeutung zu. Auch die **umweltökonomische Analyse** und Bewertung von Gefährdungen stellt eine weitere Entscheidungsgrundlage für Handlungen und Strategien dar.
- Daneben müssen Risiken an **Knotenpunkten** des internationalen Handels, Transports und Verkehrs identifiziert werden, da dort über **menschliche Vektoren** die Eintrittspforte von Schädlingen und Seuchen vermutet wird.
- Wichtig sind vor allem **flexible Konzepte** für die weitere Anpassung der Maßnahmen.

6 Wissensdefizite und Forschungsfragen

Es besteht eine Diskrepanz zwischen der Bedeutung des Klimawandels, die sich auch in der gesellschaftlichen Wahrnehmung widerspiegelt, und dem Kenntnisstand, vor allem zu den Auswirkungen des Klimawandels. Bei der Planung von heute bereits notwendigen Anpassungsmaßnahmen müssen deshalb auch **Unsicherheiten und Wissensdefizite** in Kauf genommen und mit berücksichtigt werden. Die größte Unsicherheit bei der Abschätzung des künftigen Klimas, und damit auch für die **Eingangdaten der Modellierung**, liegt auf Seite der **ökonomischen und politischen Entwicklung**. Daher wurden verschiedene Szenarien entwickelt, welche die Bandbreite der möglichen Entwicklungen und Prognosen abdecken sollen. Diese Szenarien sind weiterzuentwickeln und zu aktualisieren. Trotz Ungewissheit bezüglich der Geschwindigkeit und des Ausmaßes der weiteren Entwicklungen verlangt die akute Dringlichkeit des Problems **präventives Handeln**, das sich auf ein Spektrum von Möglichkeiten einstellt.

Es gibt Hinweise darauf, dass ab einer globalen Erwärmung um etwa 2,5 Grad das Klimasystem möglicherweise instabil und damit auch **unkalkulierbar** wird und dann **drastische** Folgen des Klimawandels **zu erwarten sind**. Unsere heutigen physikalischen, chemischen und biologischen Kenntnisse reichen jedoch nicht aus, um die Rückkopplungen einer solchen Erwärmung voll abschätzen zu können. Für einen solchen Fall ergibt sich die Gefahr der **Unkalkulierbarkeit** und einer noch **drastischeren Klimaänderung** („Kippelemente“).

Die konkrete Abschätzung des **Klimawandels auf regionaler Ebene**, also beispielsweise für Bayern, kann mit dem bisherigen Kenntnisstand aus den Globalmodellen über die kommenden Jahrzehnte nur sehr eingeschränkt erfolgen. Darüber hinaus sind die **regionalen Auswirkungen der klimatischen Entwicklungen auf Gesellschaft und Ökosysteme** noch weitgehend ungewiss. Ökologische Systeme reagieren oft mit einer nicht unerheblichen Verzögerung auf neuartige Bedingungen. Vor allem ist zu ermitteln, wie die Belastbarkeit von Ökosystemen erhöht werden kann. Auch die Forschung in **außerbayerischen bzw. außereuropäischen Räumen** muss weiter gepflegt und gefördert werden (Schwerpunkte in besonders betroffenen Gebieten Afrikas und Südostasiens).

Klimaprojektionen

Von besonderem Interesse für die Erarbeitung von Anpassungsstrategien sind **regionale Klimaveränderungen**. Diese sind nicht grundsätzlich von den globalen verschieden, doch ergeben sich in unserem topographisch stark gegliederten Bundesland spezifische und zum Teil deutliche **regionale Abweichungen**. Aus der Ungewissheit bezüglich der Entwicklung von Extremereignissen eröffnen sich zentrale Aufgabenstellungen für die atmosphärische Grundlagenforschung. Es erscheint daher notwendig, in Bayern eine **regionale Klimamodellierung** zu etablieren, die sich kontinuierlich am aktuellen Wissensstand orientiert. Der Aufwand der Klimamodellierung erfordert eine zwischen Großforschungseinrichtungen und Universitäten bestens abgestimmte und vernetzte Forschung. Im Bereich der **atmosphärischen Strahlung, atmosphärischer Gase und Aerosole** verfügt Bayern bereits über beachtliche **Forschungskapazitäten**. Diese sollten verstärkt auf die **Validierung von Klimamodellen** und auf die Entwicklung verbesserter Parametrisierungen ausgerichtet werden. Was die historische Klimaentwicklung betrifft, besitzen wir ein **sehr gutes Verständnis paläoklimatologischer Zustände**. Wissensbedarf besteht vor allem bei Perioden mit kurzfristigen und drastischen Klimaänderungen, um das Systemverständnis für die **Modellierung des zukünftigen Klimas** nutzen zu können.

Extremereignisse

Bei der Erstellung belastbarer Klimaprognosen sind veränderte Auftrittshäufigkeiten und Intensitäten von meteorologischen **Extremereignissen** von besonderer Bedeutung, da natürliche und sozioökonomische Systeme davon am stärksten betroffen sind. Gerade auf diesem Feld bestehen aber die größten Wissensdefizite und Modellunsicherheiten die durch die atmosphärische Grundlagenforschung schnellstmöglich eingeengt werden müssen. Extreme erfordern zur Analyse ihrer zeitlichen Veränderungen eine möglichst lange und qualitativ **hochwertige Datenbasis** mit zeitlich wie räumlich hoher Auflösung. Diese ist bislang nicht flächendeckend und nicht in einheitlich hoher Qualität verfügbar. Daneben brauchen wir auch ein besseres **Prozessverständnis**, wozu komplexe Analysen unter Einbezug sowohl von Beobachtungsdaten als auch von Modelldaten notwendig sind. Von besonderer Bedeutung wären hierbei erweiterte Kenntnisse über die Zusammenhänge zwischen großräumigen atmosphärischen Zirkulationsverhältnissen und dem Auftreten von regionalen oder lokalen Extremereignissen.

Vegetation

Aufgrund der **zentralen Stellung** der Pflanzen in den Ökosystemen ist die Beurteilung der Klimafolgen hier besonders wichtig. Wissensdefizite gibt es bei der Reaktion langlebiger Lebensgemeinschaften und bezüglich der Zuwanderung bzw. des Aussterbens von Populationen und Arten. Die Auswirkungen des Klimawandels auf die Konkurrenzverhältnisse zwischen Pflanzenarten sind unklar. Die Übertragung der Kenntnisse aus den Reaktionen von historischen Klimaveränderungen ist nur sehr bedingt möglich. Die nacheiszeitliche Erwärmung wurde beispielsweise mit einer Verzögerung von 5.000 Jahren beantwortet. Es muss deshalb dringend erforscht werden, welchen Beitrag der Mensch zu einer schnelleren Anpassung der Vegetation leisten kann. Die größte Ungewissheit besteht aber auch hier angesichts der zu erwartenden **extremen Witterungsereignisse**. Die Forschung zu Pflanzen und Vegetation muss zwingend die beobachtenden Methoden des **Monitoring** (z. B. Phänologie, Dauerflächenuntersuchungen, Fernerkundung) mit **Modellierungen** (z. B. der Invasibilität von Räumen oder des Stoffhaushaltes von Pflanzenbeständen) und nicht zuletzt mit **Experimenten** (z.B. künstliches Erzeugen von Extremereignissen) kombinieren. Die Forschung ist eng mit administrativen Strukturen und Datenbanken zu vernetzen.

Tierwelt

Zoologische Forschung mit Bezug auf klimatische Veränderungen ist bislang nur sehr begrenzt entwickelt. Anzustreben ist eine **integrative Betrachtung**. Wechselwirkungen zwischen dem Klimawandel und anderen die Biodiversität gefährdenden Faktoren (Habitatfragmentierung, Invasionen fremder Arten) sind zu beachten. Und schließlich sollte die **biologische Modellierung**, die sich bislang in der Zoologie stark auf Populations- und Metapopulationsmodelle konzentrierte, auch auf zoologische Invasionsprozesse erweitert werden. Die Kooperation von Universitäten und Großforschungszentren ist zu unterstützen. Eine enge Zusammenarbeit der Nationalparke, Naturschutz- und Umweltbehörden mit Zoologen sollte ebenfalls mit Fokus auf klimatische Entwicklungen erfolgen. Die vorliegenden Daten zur Verbreitung von Arten müssen gesammelt und über **Datenbanken zum Aufbau eines räumlichen Monitorings** herangezogen werden. Die Verknüpfung der Biodiversitäts- und Naturschutzforschung mit Fragen der Klimaveränderungen sollte ebenfalls unterstützt werden.

Mikroorganismen

Die Reaktionen der **Archäen, Bakterien, Protisten** und **Pilze** auf den Klimawandel sind weitgehend unklar. Es gibt Hinweise auf eine Beeinflussung durch Starkregenereignisse, Trockenheit und Frostwechsel, doch beziehen sich solche Befunde noch viel zu sehr auf **singuläre Untersuchungen**, die Verallgemeinerungen bislang verbieten. Defizite bestehen v. a. in der bakteriellen Ökologie bzw. der Rolle der Mikroorganismen im Ökosystem bei klimatischen Veränderungen. Insbesondere eine bessere Einschätzung der Festlegung (Sequestrierung) und Freisetzung von Treibhausgasen und der Stoffumsätze in verschiedenen Ökosystemen, vor allem des Bodens, stehen hierbei im Vordergrund. Forschungsbedarf besteht ferner bezüglich der klimatischen Wirkungen auf potenziell als **Krankheiten** bei Mensch, Pflanze und Tier auftretenden Mikroorganismen. Weitere Sequenzierungen werden benötigt und **genetische Datenbanken** sollten erweitert werden.

Biotische Interaktionen

Weitgehend unklar sind die Auswirkungen des Klimawandels auch auf die funktionellen Beziehungen zwischen Organismen - also den biotischen Interaktionen. Wechselwirkungen zwischen Arten sind nur **sehr schwer zu erfassen**, da sie extrem vielschichtig sind und meist nur wenige Grundlagen hierzu bekannt sind. Lebensgemeinschaften werden auf alle Änderungen der Umweltbedingungen reagieren. Ihre Reaktion kann aber nicht über Verhaltens- oder Häufigkeitsänderungen einzelner Arten vorhergesagt werden. Kenntnisse über biotische Interaktionen (z. B. Räuber-Beute/Nahrungs-Beziehungen, Konkurrenz, Parasitismus, Schädlingsbefall, Verdrängung und Ausbreitung von Arten) und deren Veränderungen durch den Klimawandel sind jedoch unabdingbar für die Beurteilung von möglichen Gefährdungen von Ökosystemen und betreffen damit unmittelbar auch den Menschen. Aufgrund der Fülle biotischer Interaktionen ist die gezielte Schwerpunktsetzung und Auswahl von Fragestellungen besonders wichtig. Die Ergebnisse sollten auch Eingang in Modellierungen finden können und mit Freilandbeobachtungen und intensivem Monitoring verknüpft werden, um ihre Bedeutung im Ökosystem bestätigen und einschätzen zu können.

Biodiversität

Der bisher nur theoretisch begründete **Verlust** der biologischen Vielfalt als Konsequenz des Klimawandels ist auf seine Relevanz zu prüfen. **Monitoring-Systeme** sind einzurichten (z. B. über Kombination Fernerkundung / Feldforschung), um die Entwicklung der funktionellen Vielfalt der Ökosysteme zu beobachten. Bestehende Schutzgebiete und Dauerbeobachtungsflächen, z. B. in den Kernzonen von Nationalparks, sollten unbedingt in ein solches Umweltbeobachtungssystem einbezogen werden. Zur Beurteilung der künftigen Entwicklungen sind **Modellierungen** zur Simulation und Prognose der Biodiversität zu entwickeln.

Die kausalen Zusammenhänge zwischen Klimawandel, Biodiversität und Ökosystemleistungen können aber nur im Rahmen **experimenteller Forschung** erkannt werden.

Stoffhaushalt

In Zusammenhang mit dem Klimawandel bestehen erhebliche Wissensdefizite über den **Stoffhaushalt** von Ökosystemen, insbesondere zu folgenden Themen: Böden, Pflanzen und Sedimente als Senken oder Quellen für Kohlenstoff; bodenbürtige Emission und Deposition klimawirksamer Gase

(CH₄, N₂O, NO) sowie Austausch zwischen Ökosystemen und der Atmosphäre, Effekte von Temperaturerhöhungen auf bodenlebende Mikroorganismen, auf den Stoffhaushalt von Gewässern einschließlich des Boden-, Sicker- und Grundwassers, Effekte des CO₂-Anstieges auf die pflanzliche Biomasse, Wirkung von Extremereignissen auf stoffliche Prozesse und Umsetzungen. Dies sind auch Grundlagen für eine Verbesserung der Modellierung des Kohlenstoff-Umsatzes unter den künftigen Verhältnissen.

Agrarwirtschaft

Die Forschung muss darauf hinarbeiten, künftig über eine optimierte Modellierung der zu erwartenden regionalen Niederschläge und Temperaturen und über eine Analyse der Wirkungen auf die Feldfrüchte **Nutzungsempfehlungen** zu geben. Vor dem Hintergrund sommerlicher Trockenheit und zunehmender Transpirationsverluste sollte der Beitrag der Landwirtschaft zu einer **effizienten Wassernutzung** quantifiziert werden. Es gibt bislang wenige Erkenntnisse darüber, inwiefern die Böden Bayerns, z. B. durch optimierte Nutzungsverfahren zu einer erhöhten **Kohlenstoff-Speicherung** beitragen können. Ebenso ist unklar, wie eine **umweltverträgliche Anpassung der Düngung** unter veränderten thermischen und hygrischen Bedingungen aussehen kann.

Da **nachwachsende Rohstoffe** zurzeit einen sich rasch entwickelnden Zweig der Agrarforschung darstellen, muss bald eine ökologische Bilanzierung ihres Anbaus erfolgen. In Zukunft werden in Agrarlandschaften auch **Experimente auf landschaftlicher Skala** erforderlich, um die Konsequenzen des Klima- und Landnutzungswandels auf den Stoffhaushalt und die Biodiversität abzuschätzen. Es sollte angestrebt werden, die bayerischen Studien zu Effekten der Klimaänderungen auf die Landwirtschaft und Böden in einer **Datenbank** zusammenzufassen. Dies würde politische Entscheidungen erleichtern, aber auch die Überlappung einzelner Studien vermeiden.

Forstwirtschaft

Die wichtigste Frage der Forstwissenschaft in Bezug auf veränderte Klimabedingungen ist die nach der Anfälligkeit der einzelnen Waldbaumarten und Herkünfte und damit auch nach deren klimatischen Ansprüchen und Toleranzen. Grundlegende Fragen stellen sich vor allem auch über die Reaktionen der **Waldfunktionen** (z. B. Schutzfunktion, Erholungsfunktion, Holzproduktion, Biodiversität). Methoden zur Abschätzung der Bestandessicherheit bzw. -gefährdung sind zur Produktionssicherung zu entwickeln. Um dem Klimawandel zu begegnen, sollten auf der Basis des erarbeiteten Wissens tragfähige Managementkonzepte entwickelt werden. Aufgrund der naturräumlichen Gliederung Bayerns in spezifische **Wuchsgebiete und -regionen** ist eine regionale Betrachtung erforderlich. Bestehende Untersuchungsflächen und Waldklimastationen sollten weitergeführt werden. Für die Begründung künftiger Forstbestände ist die Auswahl angepasster Baumarten und **Herkünfte** von großer Bedeutung. Hierzu wird experimentelle Forschung insbesondere zur Toleranz gegenüber bestimmten Witterungsbedingungen benötigt. Der Verwendung standortsheimischer Bäume ist vor der Einführung fremder Baumarten Vorrang zu gewähren. Die **Modellierung** dient als effizientes Werkzeug für die Untersuchung des Waldwachstums und seiner Wechselwirkungen auf die Umwelt und sollte daher weiterentwickelt werden.

Naturschutz

Vorhandene **Schutzgebiete** sollten dahingehend untersucht werden, ob sie auch zukünftig ihre Ziel-funktionen erfüllen können. Naturschutzmaßnahmen sollten durch ein Langzeitmonitoring begleitet werden. Damit kann der Erfolg von Maßnahmen eingeschätzt und **Konsequenzen für Eingriffspla-**

nungen und Naturschutzmaßnahmen abgeleitet werden. Anzustreben ist weiterhin eine Verbesserung der Informationsgrundlage über Auswirkungen des Klimawandels auf der Ebene einzelner Arten und im Hinblick auf Struktur und Funktion von Lebensgemeinschaften in Bayern (s. Biotische Interaktionen), um gezielt auf Veränderungen in **Gefährdungssituationen** und auf **Managementanforderungen** reagieren zu können.

Raumplanung / Bauleitplanung

In der Raumplanung sind Instrumente zu entwickeln, welche dazu geeignet sind möglichen Risiken in vulnerablen Gebieten durch entsprechende Maßnahmen, Nutzungsbeschränkungen oder Vorgaben noch besser zu begegnen. Hierzu werden explizite und quantitative Vulnerabilitätsanalysen benötigt. Forschungsansätze für die Verbesserung des Stadtklimas durch die Planung werden für bundesdeutsche Verhältnisse gerade bearbeitet und sollten auf Bayern angepasst werden. Die Förderung der Kommunikation zwischen Wissenschaft und Praxis, die Nutzung neuer Medien, die Etablierung von Foren für den Austausch und der daraus abzuleitende Weg der Entscheidungsfindung stellen ein weiteres Forschungsfeld dar, um flexible und neue Vorgehensweisen bei der Planung zu schaffen. Der direkte Austausch von naturwissenschaftlicher Forschung und angewandter Raumplanung wird benötigt, um vorsorgend Maßnahmen umzusetzen die geeignet sind negative Auswirkungen zu minimieren.

Wasserwirtschaft

Ein kontinuierliches, flächendeckendes und detailliertes **Monitoring** ist hier essentiell. Die bestehenden Messnetze sollten für die Abdeckung des Datenbedarfs, z. B. für Risikoabschätzungen und Vulnerabilitätsanalysen überprüft, und dem neuen Bedarf angepasst und entsprechend ausgebaut werden.

Für die Klimafolgenabschätzungen muss die flächendeckende Aufstellung von Wasserhaushaltsmodellen (im Rahmen von KLIWA) vervollständigt werden. Dies bildet die Grundlage, um die wasserwirtschaftlichen Infrastruktur vor allem auf Extremereignisse (beispielsweise Hochwasser- und Niedrigwasserereignisse) einstellen zu können. Eine optimierte **Kopplung meteorologischer und hydrologischer Modelle** und die Weiterentwicklung der vorhandenen Modellierungsinstrumente sind sowohl für regionale Fragen zu Klimaänderungen und zum Wasserhaushalt, insbesondere auch für die **Hochwasservorhersage** von ausschlaggebender Bedeutung und daher fortzuführen. Ein Problem im direkten Zusammenhang hiermit ist die noch zu geringe Auflösung der Niederschlagsmessung im operativen Bereich. Kombinierte boden- und satellitengestützte Messverfahren und weitere Entwicklungstätigkeit in der Niederschlagsvorhersage sind hier viel versprechende Ansätze.

Bisher sind Fragestellungen zu den Auswirkungen des Klimawandels auf die Neubildung und Qualität des **Grundwassers** und somit auf die **Wasserversorgung** auf nationaler wie auch auf bayerischer Ebene kaum untersucht. Die Entwicklung der Grundwasserstände ist relativ ungewiss. Ebenso sind die komplexen Zusammenhänge bezüglich der Abhängigkeit der Grundwasserqualität und Wasserversorgung von sich ändernder landwirtschaftlicher und forstlicher Nutzung schwer abzuschätzen.

Hinsichtlich der Auswirkungen des Klimawandels auf die Lebensgemeinschaften von Gewässern besteht dringender Forschungsbedarf. Die im Bereich der **Oberflächengewässer** zu erwartenden erhöhten Stoffeinträge und Umsätze müssen auf ihre Auswirkung und Beeinflussung der Ökosysteme erforscht werden. Dies umfasst nicht nur natürliche Stofffrachten, sondern auch ausgeschwemmte Düngemittel und Schadstoffe. In wie weit z. B. Veränderungen der Temperatur, von Großwetterlagen oder der Niederschlagsverhältnisse die Gewässerökosysteme, aber auch weitere Einflussfaktoren wie

den Schichtungsaufbau in Seen beeinflusst, ist noch weitgehend unbekannt. Damit lassen sich auch Veränderungen in der Gewässerqualität kaum voraussagen. Veränderungen im **Pflanzenbestand** (Algen, Cyanobakterien, höhere Wasserpflanzen) wirken sich insbesondere bei Massenvermehrungen oder Artenverlust auf das gesamte Gewässerökosystem aus und sind mit dem bisherigen Kenntnisstand nicht abzuschätzen. Auch für die **Fauna** ist unklar, wie sich zunehmende klimatische Belastungen in Kombination mit mangelnder Durchgängigkeit und der Zuwanderung fremder Arten auswirken werden. Vor allem hinsichtlich der Fischfauna hat dies nicht nur ökologische, sondern auch ökonomische Bedeutung.

Eine gekoppelte hydrologisch-meteorologische Modellierung, die auch Landnutzung und Wasserqualitätskomponenten mit einschließt, mit einer verlässlichen Datengrundlage ist daher zwingende Voraussetzung für eine künftige nachhaltige Wasserwirtschaft.

Energiewirtschaft

Im Bereich der Energieversorgung besteht in erster Linie Bedarf an **Risikoabschätzungen**, vor allem inwiefern Extremereignisse Schäden hervorrufen und die Energieproduktion beeinträchtigen können. Hauptaugenmerk muss dabei auf den von Vorflutern abhängigen Kraftwerken und der Ökologie des jeweiligen Gewässers liegen. **Energieeinsparungskonzepte** müssen erforscht und in der Öffentlichkeit kommuniziert werden. Die Erhöhung des Wirkungsgrades, z. B. bei der Energieerzeugung oder bei Automotoren entlastet die Umwelt. Oberstes Ziel muss langfristig aber die flächendeckende Ablösung der fossilen durch **erneuerbare Energien** sein. Technologien der Solarenergie-, Geothermie- und Windenergienutzung sind weiter zu entwickeln. Defizite liegen weniger in der Entwicklung als im Einsatz der Technologien. Zusätzlich müssen Machbarkeitsstudien mit Hinweisen auf die Effizienz und Klimawirksamkeit der Energieformen erstellt werden. Regionale Modelle der idealen Kombination von Energieformen, deren Vernetzung/Absicherung tragen auch zu Risikoabschätzungen bei.

Infrastruktur

Bisher gibt es noch Wissensdefizite, wie Beeinträchtigungen und Schäden an der Infrastruktur als direkte und indirekte Folgen des Klimawandels minimiert werden können. Insbesondere müssen die Belastungen von Straßen, Bahntrassen, Stromversorgung, Brücken etc. unter bislang noch nicht eingetretenen Extremsituationen beurteilt werden und die hier geltenden Normen und Bemessungsregeln daran angepasst werden. Der **Alpenraum** und die **großen Talräume** sind hierbei besonders zu beachten. Die Entwicklung von Konzepten zur **Lenkung** von Besucher- und Menschenmassen wird von zunehmender Bedeutung sein.

Tourismus

Die Einschätzung und Auswahl relevanter Klimaparameter und deren Bedeutung für die **Auslastung** sommer- und wintertouristischer Aktivitäten sollte weiter verbessert werden, um den Akteuren als Entscheidungsunterstützung zu dienen. Im Bereich des Sommertourismus ist zu untersuchen, wo **Konflikte oder Schäden** durch erhöhte Touristenströme in sensiblen Naturräumen zu erwarten sind. Die Ausarbeitung von Konzepten zum attraktiven und zugleich emissionsarmen Urlaub „zu Hause“ sollte gefördert werden.

Architektur und Bauwesen

Die **Entwicklung** von Elementen der **Energieeffizienzsteigerung**, die gleichzeitig einen Synergieeffekt bei der Verbesserung des Raumklimas während heißer und extrem heißer Tage besitzen wie **Dämmung, Sonnenschutz** oder **intelligente Lüftungssysteme**, sollten weiter gefördert werden. Außerdem ist ein Focus auf die Materialentwicklung zu legen, dabei sind neben der Gesamt-Emissionsbilanz v. a. die thermische und mechanische (Sturm, Hagel, Starkregen) **Belastbarkeit** und die Dämmeigenschaften der Materialien von Bedeutung. Wichtig erscheint auch, neue Möglichkeiten zu finden, geeignete Entwicklungen möglichst schnell und flächendeckend in die Anwendung zu bringen, da das Energie-Einsparpotential im Gebäudebereich sehr groß ist.

Gesundheit

Besonders für **Risikogruppen** (Alte Menschen, Kleinkinder, Kranke, Behinderte) sollte abgeschätzt werden, inwieweit verlängerte und häufigere Hitzeperioden zukünftig eine erhöhte Gefährdung darstellen und wie hier präventiv vorgegangen werden kann.

Ein erhöhter Wissensbedarf ist bei der Ermittlung der Gefährdungszunahme durch vorhandene sowie künftig wahrscheinlich eingeschleppte Krankheiten (Leishmaniose und West-Nil-Virus) und Vektoren festzustellen. Verbunden mit der Zuwanderung neuer Arten ist deren gesundheitsgefährdendes Potenzial zu ermitteln, deren Entwicklung kritisch zu beobachten und frühzeitig Abwehrstrategien zu entwickeln. Eine verbesserte Abschätzung der **Allergie-Risiken** bereits angesiedelter aber v. a. auch neu einwandernder Arten ist anzustreben. Diese neuartigen Gesundheitsgefahren machen eine Intensivierung der **Zusammenarbeit zwischen der medizinischen bzw. epidemiologischen Forschung und der naturwissenschaftlich ausgerichteten Ökosystemforschung** erforderlich. Die Forschung zur **Lebensmittel- und Trinkwasserhygiene** sollte im Hinblick auf veränderte Klimabedingungen weiter befördert werden. Erste Forschungsansätze zu den gesundheitlichen Auswirkungen des Klimawandels hat das Bayerische Landesamt für Gesundheit und Lebensmittelsicherheit formuliert.

Naturgefahren

Ursachen, Prozesse, Abläufe und Wirkungen von Naturgefahren sind vielfältig und erfordern daher im Umgang eine **vernetzte Vorgehensweise**. Beispielsweise müssen umfassende integrative Analysen durchgeführt werden, die unter dem Einfluss von Extremereignissen die Wechselwirkungen zwischen natürlichen und gesellschaftlichen Systemen ermitteln. Offene Fragen ergeben sich, da die **Ökosystemeigenschaften** unter den künftigen Rahmenbedingungen unklar sind. Mithin ist auch der künftige Beitrag von Ökosystemen zur Milderung von Naturgefahren, beziehungsweise in ihrem Verhalten gegenüber neuartigen oder in der Dimension in Mitteleuropa ungekannten Ereignissen (z. B. große Waldbrände) schwer abzuschätzen.

Wissenslücken bestehen in diesem Zusammenhang bezüglich der Wirkung von Kombinationen verschiedener Ereignisse und zu **selbstverstärkenden Prozessen**. Ferner sind die Störungstoleranz und die Resilienz der Lebensgemeinschaften ungewiss. In **Experimenten** und **Simulationen** sind daher sowohl neuartige, bislang ungekannte Intensitäten als auch eine erhöhte Häufigkeit von Ereignissen zu betrachten. **Belastbarkeitsgrenzen** natürlicher Ökosysteme müssen identifiziert werden. Auch muss erforscht werden, unter welchen Bedingungen messbare **Schäden** zu befürchten sind.

Die praxisorientierte Forschung zeigt, dass für verlässliche Gefahrenkarten die Verfügbarkeit und räumliche Auflösung von Daten erhöht werden muss. Hier sollte in Kombination mit **geostatistischen**

Verfahren verstärkt die **Fernerkundung** eingesetzt werden. Zur **Ermittlung von Gefährdungspotentialen** und gefährdeten Räumen ist die prozessorientierte Modellierung zu fördern.

Vor allem in **Entwicklungsländern** werden gehäuft **komplexe Notstandssituationen** („complex emergencies“) auftreten, welche durch Überlagerung verschiedener Problembereiche (Klimawandel, Bevölkerungswachstum, ethnische Unterdrückungen, ökonomische Instabilität) entstehen. Dies hat auch Auswirkungen für Europa und letztlich auch Bayern. Migrationsforschung, ethnologische Forschung und politische Geographie müssen hier mit ökologischen Risikoanalysen und Klimamodellen kombiniert werden und Hand in Hand Lösungsvorschläge zur Prävention erarbeiten.

Die globalen Entwicklungen des Klimas werden regional besonders stark in sensiblen und am **Rande ihrer Tragfähigkeit** befindlichen Ökosystemen wirksam. Dies ist in weiten Bereichen **Afrikas** und des **Nahen Ostens** gegeben. Dort ist zu erwarten, dass die ökologischen Entwicklungen zu weiteren Ressourcenverknappungen führen werden, was **Migration, soziale Konflikte** bis hin zu **kriegerischen Auseinandersetzungen** nach sich ziehen kann. Dies wird letztendlich auch Bayern in erheblichem Ausmaß und vielfältiger Weise betreffen. Präventive Entwicklungspolitik muss solchen Entwicklungen entgegensteuern.

7 Strategien für die Forschung und den Wissenstransfer

Bayern verfügt auf dem Gebiet der Untersuchung physikalischer, chemischer und biologischer Zustandsparameter des Klimasystems über eine **einzigartige Forschungslandschaft** mit einer hohen Vernetzung auf nationalem, europäischem und internationalem Niveau. Herausragende Einrichtungen dabei sind das Deutsche Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR), das Forschungszentrum für Umwelt und Gesundheit (GSF) und das Forschungszentrum Karlsruhe, Institut für Atmosphärische Umweltforschung Garmisch-Partenkirchen (alle aus der Helmholtz-Gemeinschaft Deutscher Forschungszentren). Außerdem liegen Forschungsleistungen von vielen Universitätsinstituten vor. Etablierte bzw. abgeschlossene Großprojekte in Bayern (z. B. BayForKlim, BayForUV, GLOWA-Danube, KLIWA) können als Grundlage weiterführender Projekte genutzt werden.

Diese **Forschungslandschaft gilt es zu stabilisieren und im Sinne des Klimaschutzes und der Folgenanpassung zielgerichtet weiter zu entwickeln** (s. auch Abb. 16). Ein wichtiger Ansatz hierzu ist die verstärkte Zusammenarbeit zwischen Großforschungszentren, bayerischen Universitäten, Fachbehörden und -institutionen und der Industrie. Die **Umsetzung** der wissenschaftlich gewonnenen Ergebnisse stellt ein bedeutendes Element dafür dar. Hierzu ist Wissenstransfer, Rückkoppelungen, Bedarfsermittlung, Bewertung und Weiterleitung, sowie direkte Mitarbeit dieser „Zwischenebene“ notwendig. Die **Landesämter** sind dazu prädestiniert die Brücke zwischen Forschung und Praxis herzustellen (z. B. Landesamt für Umwelt, Landesanstalt für Wald und Forstwirtschaft, Landesanstalt für Landwirtschaft, Landesamt für Gesundheit und Lebensmittelsicherheit). Eine gut funktionierende **Vernetzung** zwischen Praxis (Landnutzung, Industrie, Gesundheitswesen, Bauwesen, Naturschutz etc.), Administration (Landesämter, regionale Behörden) und Forschung (Forschungszentren, Universitäten) ist die unabdingbare Voraussetzung für eine effiziente Reaktion auf die sich durch den Klimawandel ergebenden Herausforderungen. Um diese innerbayerische Vernetzung zu stärken und weiterzuentwickeln, ist über die Anpassung von **Strukturen** zur Förderung der Kooperation zwischen Hochschulen, Forschungszentren, Administration und Praxis nachzudenken. Auch die Kommunikation innerhalb der jeweiligen Ebenen, also zwischen den Universitäten, den Landesbehörden und den gesellschaftlichen Interessensvertretungen muss bezüglich des Klimawandels gestärkt werden. **Fachbehörden** können wichtige Funktionen in der Bedarfsermittlung und beim Wissenstransfer zwischen Forschung und Anwendung übernehmen und sollten dementsprechend in ihrer Personalausstattung entwickelt und gestärkt werden. Vor allem aber sind die Forschungskapazitäten der bayerischen Hochschulen zu nutzen und zu fördern.

Die **finanziellen Aufwendungen** für die Forschung zum Klimawandel und seinen Auswirkungen sowie zur Reduktion und Anpassung werden sich in naher Zukunft deutlich erhöhen müssen. Für die Finanzierung zeitgerechter Maßnahmen zur Eingrenzung des Klimawandels und für die Anpassung werden nach verschiedenen Studien Mittel in Höhe von etwa 1 % des Bruttosozialproduktes veranschlagt. Andererseits zeichnet sich in diesem Bereich von wachsender Bedeutung auch ein enormes **Entwicklungspotenzial** ab, wodurch Bayern wirtschaftlich profitieren und seinen Vorsprung als „High-Tech-Land“ ausbauen kann.

Bayern sollte deshalb bei der Entwicklung von Forschungsstrukturen Initiativen ergreifen und die **Etablierung** und **Förderung neuartiger Forschungsrichtungen** anstreben. Die Ausschreibung spezifischer und abgestimmter **Forschungsprogramme zur Verbundforschung** sowie die Förderung von **Einzelprojekten mit Bezug zu den Auswirkungen des Klimawandels** sollten durchgeführt werden. Damit könnten die vorhandenen exzellenten Forschungskapazitäten auf diese gesellschaftlich wichtigen Fragen ausgerichtet werden. An den Universitäten sollte die Einrichtung bzw. Neuausrichtung bestehender **Professuren** im Hinblick auf den Klimawandel stimuliert werden. **Ausbildungsangebote** sollten den Klimawandel als künftiges Kompetenz- und Berufsfeld begreifen. Die **Klimaforschungsstation im Schneefernerhaus** auf der Zugspitze besitzt ein enormes Potenzial als zentrale Forschungseinrichtung für Fragestellungen der Hochgebirge. Bedarf wird darüber hinaus an einem

Forschungszentrum gesehen, welches sich mit den regionalen Auswirkungen des Klimawandels in Mitteleuropa befasst. Dort müssten insbesondere fachübergreifende Forschungsstrukturen mit längerer Perspektive entwickelt werden. Es besteht die Chance zum Aufbau einer international sichtbaren und führenden Forschungseinrichtung.

Um die bereits bestehenden Fördermittel und Strukturen in Bayern hinsichtlich der neuartigen Aufgaben des Klimawandels optimal auszuschöpfen, sollte ein eigenes **Koordinations-Management** bzw. eine effiziente **Forschungskoordination** eingerichtet werden. Dessen Aufgabe wäre in Zusammenarbeit mit der Bayerischen Forschungsallianz (BayFor) die Unterstützung von bayerischen Forschergruppen bei der nationalen und internationalen Vernetzung sowie bei der Einwerbung von Forschungsgeldern zur Thematik von Seiten des Bundes oder der Europäischen Union.

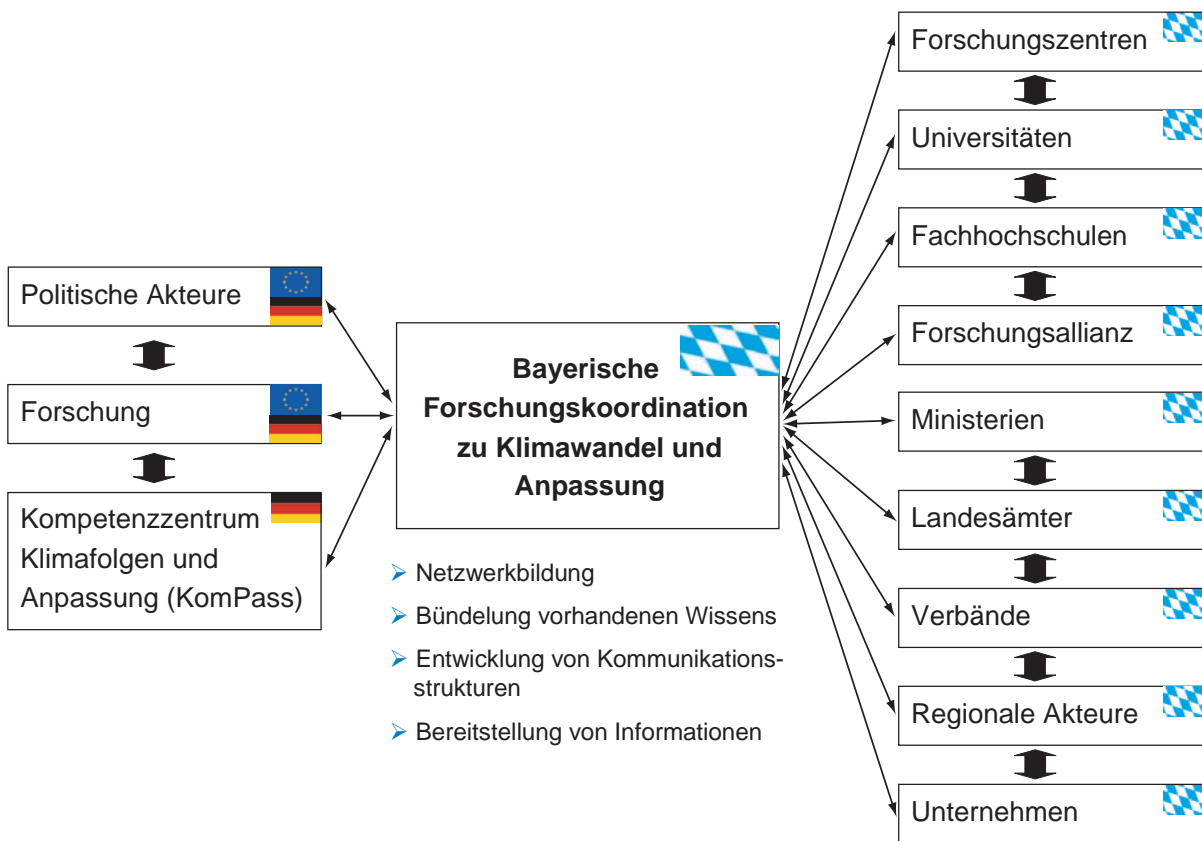


Abb. 16: Vorschlag zur künftigen Koordination von Akteuren und des Informationsflusses zum Themenbereich Klimaauswirkungen und Anpassung.

Essentiell für die Klimaforschung sind **umfangreiche Datensätze**, die eine Überwachung (**Monitoring**) des Klimas und Forschungen zum Erkennen des Prozessverhaltens und der Systemreaktionen ermöglichen. Ein Großteil der Daten wird von Bundes- und Landesbehörden erhoben (z. B. Abb. 17). Hier ist eine langfristige sowie auf die Belange der Klimaforschung abgestimmte Datenerhebung wichtig. Gegebenenfalls müssen auch dort neue Messprogramme initiiert werden. Da solche Aufgaben nicht aus nationalen und internationalen Forschungsmitteln finanziert werden können, ist dies eine Aufgabe des Freistaates Bayern, die an die künftigen Erfordernisse anzupassen ist.



Abb. 17:
Meteorologisches Observatorium Hohenpeißenberg; an diesem Ort werden seit 1781 Wetterbeobachtungen aufgezeichnet.

In der Vergangenheit teils unter anderen Gesichtspunkten etablierte Untersuchungsflächen (Naturwaldreservate, Kernzonen von Nationalparks, Schutzgebiete, Waldklimastationen etc.) sollten in ein internationales Netzwerk von **Langzeitbeobachtungsflächen** (Long-Term Ecological Research Sites) integriert werden. Ihre Beobachtung muss **koordiniert** und fortgeführt werden. Nur aus einer kontinuierlichen zeitlichen Analyse kann auf die Relevanz von Entwicklungen geschlossen werden. Zusätzlich sollten **systematisch verteilte Beobachtungsflächen** für eine stichprobenartige und flächendeckende Überwachung eingerichtet werden. Solche Beobachtungen und Erfassungen müssen künftig eng mit der **Fernerkundung** verknüpft werden. Noch wichtiger als diese beobachtenden Ansätze wird allerdings die **Modellierung** zu erwartender Entwicklungen werden. Vor allem die Forschung zum **Verständnis der Auswirkungen des Klimawandels auf die Biosphäre** steht noch sehr am Anfang. Regionale Prognosen können hier noch nicht gemacht werden. Diese werden aber von der Praxis dringend benötigt.

Insbesondere **experimentelle Forschung** in natürlichen und künstlichen Systemen wird dringend benötigt. Die bloße Beobachtung der Abläufe wird nicht genügen. Kausale Zusammenhänge können oftmals nur durch Experimente entdeckt werden. Die Grundlagenforschung sollte auf die in Bayern **flächenmäßig relevanten Ökosysteme und Landschaftstypen** fokussiert werden (Kulturlandschaften, großflächige Wälder, Talräume, Flussgebiete, Gebirge). Dabei ist die Einigung auf **Schlüssel-ökosysteme** (z. B. Wälder, Gewässer, Grünland) sinnvoll, um Forschungsaktivitäten effizient zu konzipieren.

Die Bedeutung der Thematik „Klimaveränderung und Anpassung“ gebietet es, möglichst bald die Anstrengungen zu verstärken, um die in Bayern vorhandenen Kompetenzen besser auf die Fragen des Klimawandels zu konzentrieren. Hierbei muss besonderes Augenmerk auf die möglichen Beeinträchtigungen gesellschaftlicher Interessen sowie auf die Bereitstellung von Hinweisen für konkrete Handlungs- und Anpassungsmaßnahmen gelegt werden. Abschließend soll die notwendige Verknüpfung der Anpassung an den Klimawandel mit dem Klimaschutz, also der Reduktion von Treibhausgasen, ausdrücklich erwähnt sein.

Editorial – Anmerkungen zur Studie

Die vorliegende Kurzfassung enthält die wesentlichen Aussagen der umfangreichen Studie „Klimaanpassung Bayern 2020“, welche die Universität Bayreuth im Auftrag des Bayerischen Landesamts für Umwelt erstellt hat.

Eine Langfassung wird eigenverantwortlich durch die Universität Bayreuth veröffentlicht. Kurz- und Langfassung sind das Ergebnis intensiver Zusammenarbeit der nachstehenden Universitäten und Experten; für den fachlichen Inhalt ist die Universität Bayreuth verantwortlich.

Projektleitung und Textverantwortung:

Prof. Dr. Carl Beierkuhnlein, BayCEER Universität Bayreuth, Biogeografie
Prof. Dr. Thomas Foken, BayCEER Universität Bayreuth, Mikrometeorologie

Projektbearbeitung:

Dipl. Geoökol. Martin Alt, Universität Bayreuth, Biogeografie
Dipl. Geoökol. Andreas Gohlke, Universität Bayreuth, Biogeografie
Dr. Thomas Gollan, BayCEER Universität Bayreuth
Dipl. Geogr. Nadine Schmid, Universität Bayreuth, Biogeografie
Dipl.-Ing. Ralf Schüpferling, Universität Bayreuth, Biogeografie
Dipl.-Ing. Reinhold Stahlmann, Universität Bayreuth, Biogeografie
Dipl. Geoökol. Stephanie Thomas, Universität Bayreuth, Biogeografie
Dipl. Geoökol. Benjamin Wolf, Universität Bayreuth, Mikrometeorologie

Beiträge:

Dr. Christoph Beck, Universität Augsburg, Physische Geographie und Quantitative Methoden
Prof. Dr. Carl Beierkuhnlein, BayCEER Universität Bayreuth, Biogeografie
Dr. Ing. Diana Burghardt, BayCEER Universität Bayreuth, Hydrologie
Prof. Dr. Stefan Dech, DLR und Universität Würzburg, Fernerkundung
Prof. Dr. Thomas Foken, BayCEER Universität Bayreuth, Mikrometeorologie
PD Dr. Bruno Glaser, Universität Bayreuth, Bodenphysik
Prof. Dr. Jucundus Jacobeit, Universität Augsburg, Physische Geographie und Quantitative Methoden
Prof. Dr. Anke Jentsch, UFZ / BayCEER Universität Bayreuth, Störungsökologie, Vegetationsdynamik
Prof. Dr. Yakov Kuzyakov, BayCEER Universität Bayreuth, Agrarökosystemforschung
Prof. Dr. Egbert Matzner, BayCEER Universität Bayreuth, Bodenökologie
Prof. Dr. Annette Menzel, TU München, Ökoklimatologie
Prof. Dr. Stefan Peiffer, BayCEER Universität Bayreuth, Hydrologie
Prof. Dr. Prof. h.c. Hans Pretzsch, TU München, Waldwachstumskunde
Dr. Thomas Rötzer, TU München, Waldwachstumskunde
Prof. Dr. Ingolf Steffan-Dewenter, BayCEER Universität Bayreuth, Populationsökologie der Tiere
Prof. Dr. John Tenhunen, BayCEER Universität Bayreuth, Pflanzenökologie
PD Dr. Gian-Reto Walther, BayCEER Universität Bayreuth, Pflanzenökologie
Dr. Guido Wiesenberg, Universität Bayreuth, Agrarökosystemforschung

