



# Klima-Report Bayern 2015

Klimawandel, Auswirkungen,  
Anpassungs- und  
Forschungsaktivitäten

# Klima-Report Bayern 2015

Vorwort	3
Zusammenfassung	4
Zusammenfassung englisch	7
1 Klimapolitik	10
2 Grundlagen	
2.1 Ursachen des Klimawandels	15
2.2 Grundbegriffe der Klimamodellierung	17
3 Das Klima in Bayern	
3.1 Was charakterisiert das „weiß-blaue Klima“	33
3.2 Wetterlagen	35
3.3 Temperatur und Kenntage	38
3.4 Niederschlag	44
3.5 Schneebedeckung	48
3.6 Globalstrahlung	50
3.7 Wind	52
3.8 Phänologie	53
4 Klimafolgen und Anpassung	
4.1 Einführung	56
4.2 Wasserhaushalt und Wasserwirtschaft	57
4.3 Boden	70
4.4 Landwirtschaft	79
4.5 Garten- und Weinbau	90
4.6 Wald- und Forstwirtschaft	97
4.7 Naturschutz	110
4.8 Gesundheit	116
4.9 Tourismus	131
4.10 Raumplanung und Städtebau	136
4.11 Industrie und Gewerbe	142
4.12 Verkehr	147
4.13 Energieversorgung	150
4.14 Alpen und alpine Naturgefahren	155
Glossar	181
Beteiligte Institutionen	198

## Vorwort

Sommer 2015 in Bayern. Die Stadt Kitzingen in Unterfranken erreicht zweimal nacheinander einen neuen deutschen Temperaturrekord: 40,3 Grad Celsius. Nach Wochen ohne Regen muss die Wasserüberleitung aus dem Donaauraum nach Franken eingestellt werden. Die Hopfenernte droht noch schwächer auszufallen als im extrem schlechten Erntejahr 2003. Viele Wälder bieten schon Mitte August ein Bild wie im Herbst. Der bekannte Klimaforscher Mojib Latif warnt: „Wir sehen bereits frühe Auswirkungen des Klimawandels.“

Und wir erkennen: Das Klima ist entscheidend für unsere Lebensqualität, auch in Bayern. Für unsere Ernten, für unsere Gesundheit, für eine gute Zukunft. Es spielt eine Schlüsselrolle im Naturhaushalt, für unsere Wälder, unser Wasser und für die biologische Vielfalt Bayerns. Das Klima aber verändert sich mit beunruhigender Geschwindigkeit. Nach Daten der amerikanischen Umweltbehörde NOAA hat sich die Erde im ersten Halbjahr 2015 so stark aufgeheizt wie noch nie in den 136-jährigen Aufzeichnungen. Wesentliche Ursache ist der Mensch. Seit Beginn der Industrialisierung ist die Konzentration von CO<sub>2</sub> in der Atmosphäre auf über 400 ppm gestiegen. Sie liegt damit so hoch wie in den letzten 750 000 Jahren nicht mehr.

Das zwingt uns zum Handeln. Der Weltklimagipfel in Paris muss ein Erfolg werden. Bayern setzt dafür als Vorsitzland 2015 der Umweltministerkonferenz und Teil der deutschen Delegation ein starkes Signal: 2015 und 2016 investieren wir insgesamt 170 Millionen Euro für das Klimaschutzprogramm Bayern 2050. Bis 2050 wollen wir unsere Treibhausgasemissionen auf weniger als 2 Tonnen pro Kopf und Jahr drücken. Und wir machen Bayern klimasicher. Zum Beispiel mit insgesamt 3,4 Milliarden Euro für den Hochwasserschutz bis 2020.

Der Schlüssel zu einer erfolgreichen Klimapolitik heißt Wissen. Der neue Klima-Report Bayern 2015 liefert uns dieses Wissen. Er fasst die Erkenntnisse zum Klimawandel in Bayern zusammen, zeigt seine Auswirkungen in den verschiedenen Umwelt- und Lebensbereichen und stellt ausgewählte Aktivitäten des Freistaates auf den Feldern Anpassung und Forschung vor. Damit wollen wir im Jahr des Klimas 2015 auch die Öffentlichkeit für die Zukunftsaufgabe Klimaschutz sensibilisieren.

Ein herzliches Dankeschön an alle Institutionen, die an diesem wichtigen Report mitgewirkt haben! Sie sind im Anhang genannt. Besonders danken möchte ich dem Deutschen Wetterdienst, dem LfU und der Umweltforschungsstation Schneefernerhaus. Sie haben diesen Bericht federführend erarbeitet und damit maßgeblich zum Gelingen beigetragen.



---



Ulrike Scharf MdL  
Bayerische Staatsministerin für  
Umwelt und Verbraucherschutz

# Zusammenfassung

Der Klimawandel ist eine der größten Herausforderungen für die Menschheit – ein globales Problem mit Auswirkungen auch auf Bayern. Allein die Menge der bisher durch den Menschen bereits ausgestoßenen Treibhausgase sorgt für eine weitere Erwärmung des globalen Klimas, so dass der Klimawandel nicht mehr rückgängig gemacht werden kann. Daher muss sich jeder gesellschaftliche und wirtschaftliche Sektor darauf einstellen, dass ihn direkte und indirekte Folgen des Klimawandels – und damit auch Klimaschutz- und Anpassungsmaßnahmen – betreffen können.

Der Bayerische Klima-Report stellt überblickartig die wesentlichen klimatischen Veränderungen in Bayern in der Vergangenheit und die zukünftig zu erwartenden Veränderungen dar und beleuchtet die wichtigsten daraus resultierenden Folgen für die Handlungsfelder der Bayerischen Klima-Anpassungsstrategie BayKLAS. Die Schwerpunkte der dort zusammengetragenen Anpassungsmaßnahmen sind Nachhaltigkeit, Umweltverträglichkeit, Wechselwirkungen zwischen Klimaschutz und Anpassung, integrative Ansätze und der Umgang mit Unsicherheiten. Gleichzeitig zeigt der Klima-Report Bayern anschauliche Beispiele zu konkreten Klimaanpassungsmaßnahmen und gibt einen Einblick in die aktuelle Klima- und Klimafolgenforschung an bayerischen Instituten.

Der Klimawandel äußerte sich in Bayern in der Vergangenheit durch einen allgemeinen Temperaturanstieg, eine Umverteilung der innerjährlichen Niederschläge, eine Tendenz zur Zunahme von Starkniederschlägen und zur Abnahme der Schneebedeckung sowie durch eine Verschiebung der phänologischen Phasen. In der Zukunft wird sich der Temperaturtrend in Bayern sehr wahrscheinlich fortsetzen. So wird für die Jahresmitteltemperatur in der nahen Zukunft ein Anstieg zwischen +1 und +2 °C projiziert, der sich in der fernen Zukunft auf +2 bis +4,5 °C verstärken könnte. Dabei verzeichnen die einzelnen Jahreszeiten ähnliche Änderungen. Die zukünftige Entwicklung weiterer

Klimagrößen, wie des Niederschlags, ist hingegen mit größeren Unsicherheiten behaftet.

In der Vergangenheit wurden im Wasserhaushalt von Oberflächen- und Grundwasser bereits Veränderungen festgestellt. Diese werden sich in Zukunft weiter verstärken. In der **Wasserwirtschaft** sind daher unterschiedliche Nutzungen betroffen. Effekte können auch über die Wasserwirtschaft hinausreichen. Maßnahmen zur Minderung bestehender oder potentieller Auswirkungen reichen dabei von einer angepassten Speicherbewirtschaftung, dem Hochwasserschutz, Gewässerqualitäts- und Niedrigwasserwarndiensten bis zur Forschung sowie Bewirtschaftungsplanung in der Trinkwasserversorgung.

Klimawandelbedingte Auswirkungen auf den **Boden** sind vor allem in Form von Bodenerosion und dem langfristigen Verlust von im Boden gebundenem organischen Kohlenstoff zu verzeichnen, aber auch in Form des Verlustes von Moorböden. Die allgemeinen Maßnahmen zum Bodenschutz wie Erosionsminderung und eine nachhaltige Bodenbewirtschaftung sowie eine verantwortungsbewusste Landnutzung und aktiver Moorschutz sind somit gleichzeitig Maßnahmen der Klimaanpassung.

Für die **Landwirtschaft** sowie den **Garten- und Weinbau** bietet der Klimawandel Chancen durch einen CO<sub>2</sub>-Düngeeffekt, eine verlängerte Vegetationsperiode, damit verlängerte Anbauphasen und folglich im Mittel höhere Erträge. Gleichzeitig steigen aber auch die Risiken wie Ernteauffälle durch Dürre, Hagel- und Starkregen, vermehrten Befall durch Schädlinge und Krankheiten, unzureichenden winterlichen Kältereiz für Frühblüher und Obstgehölze, verminderte Bodenfruchtbarkeit oder Bodenerosion sowie durch Hitzestress in der Tierhaltung. Möglichkeiten zur Anpassung an veränderte Klimabedingungen liegen in einer angepassten Produktionstechnik, effizienter Wassernutzung, Maßnahmen des Bodenschutzes und in der

Züchtung von hitze- und trockenstressresistenten Pflanzen- und Tierarten.

Auswirkungen im **Wald** und der **Forstwirtschaft** durch Temperaturzunahme und Wasserstress werden vor allem für Regionen erwartet, in denen eher Kühle und Feuchtigkeit bevorzugende Baumarten wachsen. Das betrifft einerseits den alpinen Raum, aber auch weite Teile des übrigen Bayerns, in denen vorrangig die schlecht an den Klimawandel angepasste Fichte kultiviert ist. Gleichzeitig stellen neuartige Schädlinge ein Problem dar. Bäume wachsen nur langsam, was in der Forstwirtschaft langfristige Planungshorizonte bedingt. Daher können Anpassungsmaßnahmen wie der gezielte Waldumbau in artenreiche Mischwälder mit wärme- und trockenheitsresistenteren Baumarten nur dann wirksam werden, wenn sich die klimatischen Bedingungen nicht zu schnell ändern.

Die Ökosysteme in Bayern sind größtenteils menschlich beeinflusst. Der Klimawandel stellt für den **Naturschutz** einen zusätzlichen Stressor dar, der sich in Form von Art-Areal-Verschiebungen, geänderter Phänologie oder invasiven Tier- und Pflanzenarten äußert. Eine erfolgversprechende Klimaanpassung besteht in diesem Handlungsfeld am ehesten in der Fortführung und Intensivierung bereits bestehender Naturschutzmaßnahmen.

Der Klimawandel, resultierend zum Beispiel in vermehrten sommerlichen Hitzeextremen, erhöhter UV-Bestrahlung durch häufigere Hochdruckphasen oder einer verlängerten Pollenflugphase, ist einer von vielen Faktoren, der sich auf die menschliche **Gesundheit** auswirkt und empfindliche Personengruppen zusätzlich belasten kann. Ebenso ist die Begünstigung von wärmeliebenden Überträgern tropischer Infektionskrankheiten möglich. Zusätzlich zu allgemeinen Maßnahmen der Gesundheitsvorsorge sind beispielsweise Maßnahmen zur Reduzierung der innerstädtischen Hitzebelastung oder Pollenmonitoring und -warndienste zu nennen.

Je nach naturräumlicher und infrastruktureller Ausstattung, Jahreszeit und Angebotsprofil einer Region können die Klimafolgen auf die **Tourismusbranche** sowohl positiv als auch negativ ausfallen. Generell sind Regionen mit naturverbundenem Tourismus und/oder einem Schwerpunkt auf Outdoor-Aktivitäten anfälliger. Während der Wintersporttourismus in Bayern wahrscheinlich rückläufig sein wird, bestehen für den bayerischen Sommertourismus eher Chancen, wenn auch zunehmende Extreme vermehrte Risiken darstellen. Ein Profilwechsel und das Schaffen neuer zusätzlicher Angebote sind mögliche Anpassungsmaßnahmen.

Das hauptsächliche Problem im städtischen Raum ist eine zunehmende Hitzebelastung. Klimaanpassung geschieht im Sektor **Raumplanung und Städtebau** daher über eine gezielte Bauleitplanung, welche eine durch Freiflächen aufgelockerte Bebauungsstruktur mit ausreichenden Frischluftschneisen vorsieht. Im Zuge dessen werden auch die Belange des Klimaschutzes einbezogen.

Für **Industrie und Gewerbe** halten sich die Einschätzungen zu den positiven und negativen Klimawandelauswirkungen die Waage – mit Unterschieden je nach Gewerbebranche und Betriebsgröße. Insgesamt jedoch stellen zunehmende Extremereignisse mit daraus folgenden betrieblichen oder logistischen Einschränkungen oder eine Hitzebelastung der Beschäftigten und Infrastruktur negative Auswirkungen dar, während die Erschließung neuer Märkte als Chance gesehen wird. Als Anpassungsmaßnahmen gelten hier beispielsweise infrastrukturelle Änderungen zum Schutz der Mitarbeiter und der Produkte oder eine witterungsangepasste Planung von Betriebsabläufen.

Im Sektor **Verkehr** kann die Zunahme frostfreier Tage die allgemeine Transportsituation auf Straße und Schiene sowie den Fahrradverkehr begünstigen. Gleichzeitig erschweren häufigere Extremereignisse die Planungssicherheit im Transportwesen, vermindern die Verkehrssicherheit und führen zu

einer höheren Beanspruchung der Verkehrsinfrastruktur. Für die Binnenschifffahrt stellen vor allem Hoch- und Niedrigwasserereignisse ein Problem dar. Die Klimaanpassung gliedert sich hier in die generellen Maßnahmen der Verkehrsinfrastrukturplanung und -pflege, bzw. die Maßnahmen von Hochwasserschutz und Niedrigwasservorsorge ein.

Der Klimawandel bedingt zusätzliche Anforderungen im Sektor **Energieversorgung**. Einerseits führt Hitze zu einem erhöhten sommerlichen Strombedarf für z. B. Klimaanlagen bei gleichzeitig vermindertem Lauf- und Kühlwasserdargebot für die Kraftwerke. Andererseits werden erhöhte Belastungen der Energieinfrastruktur durch Extremereignisse erwartet. Ein flexibles Management der Energieproduktion und -verteilung sowie infrastrukturelle Ertüchtigung sind wesentliche Klimaanpassungsmaßnahmen.

Der in der Vergangenheit in ganz Bayern beobachtete Temperaturanstieg war in den **Alpen** besonders stark ausgeprägt und wird sich basierend auf Klimaprojektionen weiterhin fortsetzen. Daraus resultieren Folgen für den Wasserhaushalt sowie für Ökosysteme. Die Instrumente des Landschafts- und Naturschutzes gelten gleichzeitig als Klimaanpassungsmaßnahmen. Im Bereich der **alpinen Naturgefahren** bedingen häufigere extreme Niederschlagsereignisse und eine Verringerung des Permafrostes die Zunahme von Hochwässern in Wildbächen und Hangbewegungen. Eine winterliche Temperaturzunahme führt zu einem erhöhten Lawinenrisiko. Als wesentliche Anpassungsmaßnahmen betreibt Bayern hierzu ein integrales Risikomanagement mit den Bausteinen Vorsorge, Vermeidung, Schutz und Nachsorge sowie einen Lawinenwarndienst.

Klimaschutz steht heute im Mittelpunkt einer vorsorgenden, auf nachhaltige Entwicklung ausgerichteten Umweltpolitik, die alle gesellschaftlichen Akteure mit einbezieht. Da sich der Klimawandel auch bei intensivem Klimaschutz nicht vollständig aufhalten lassen wird, ist in Bayern die Anpassung an die zu erwartenden Folgen ein Schwerpunkt der Klimapolitik. Herausforderungen für Bayern wurden dabei frühzeitig erkannt und es wird intensiv daran gearbeitet, Bayern fit für den Klimawandel zu machen.

# Summary

Climate change is one of the greatest challenges for mankind – a global problem with implications for Bavaria. The amount of already emitted anthropogenic greenhouse gases leads to further intensification of climate warming, thus climate change is irreversible. Therefore every social and economic sector could be affected by potential direct and indirect effects of climate change – and hence also by climate protection and adaptation measures.

The Bavarian Climate Report provides an overview of the most pronounced climatic changes in Bavaria in the past and future. It highlights the most important implications for the fields of action of the Bavarian Climate Adaptation Strategy (BayKLAS). Key aspects of adaptation measures as compiled by BayKLAS are sustainability, environmental compatibility, interactions between climate protection and adaptation, integrative approaches, as well as the handling of computational uncertainties. At the same time, the Bavarian Climate Report gives representative examples for measures of climate adaptation and provides insights into present climate and climate impact research in Bavaria.

Observed climate change in Bavaria is associated with a temperature increase, a shift of the intra-annual precipitation amount, an increase in the frequency of extreme storm events, decreasing snow coverage, as well as a shift in phenological phases. In the next decades temperatures in Bavaria are expected to continue to increase further. Therefore the rise of the average annual temperature for the near future is projected to be between +1 and +2 °C, which will further increase in the remote future between +2 and +4.5 °C. Thereby the individual seasons show similar changes. Projected future changes in precipitation and other climate variables on the other hand, are associated with larger uncertainties.

Changes in the water balance of surface- and groundwater have been observed in the past decades and are expected to continue in the future. The broad field of **water management** is thus affected in different aspects and effects will also concern related sectors. Measures to reduce existing and potential implications range from adapted reservoir management, flood protection, water quality- and low water warning services to research and management planning in drinking water supply.

Effects of climate change on **soil** predominantly are associated with soil erosion, as well as the loss of soil-bound organic carbon and loss of peatlands. General measures of soil protection such as reduction of erosion, sustainable soil management, responsible land use, and protection of peatlands at the same time are measures for climate adaptation.

Regarding **agriculture** as well as **horticulture and viticulture**, climate change is associated with a longer growing season (and thereby longer cultivation periods). This, together with the CO<sub>2</sub> fertilization effect, could lead to increased average yield. However at the same time, risks like crop failure through drought, hail- and heavy rainfall, pest infestation, diseases, insufficient hibernal cold stimulus for early blossoming plants and fruit trees, reduced soil fertility or soil erosion as well as heat stress in livestock farming increase further. Possible adaptation measures to changing climate conditions include adapted cultivation techniques, efficient water use, measures of soil protection and breeding of heat and drought resistant plant and animal species.

Impacts on **forestry** are mainly given by increasing temperatures and water stress. They are predominantly expected for regions with rather cool and moisture-preferring species. Regions affected are the Alps, respectively swaths of Bavaria, where mainly spruce is cultivated – a species being worse adapted to climate change. New pests pose additional problems. Trees grow relatively slow, which requires long-term planning horizons in forestry.

Therefore, adaptation measures such as systematic forest conversion into species-rich mixed forests using heat- and drought resistant tree species can only be effective if the climatic conditions are not changing too fast.

Ecosystems in Bavaria are mainly influenced by human activities. Climate change represents an additional stressor for **nature conservation**, which is expressed in terms of species-area displacement, altered phenology or advantages for invasive animal and plant species. Promising climate adaptation measures in this field of action are most likely the continuation and intensification of already existing conservation measures.

An increase in the frequency of heatwaves, increased UV radiation through more frequent high-pressure weather conditions or a longer pollen dispersal period are only some of many components which affect human **health** and provide additional stress to already sensitive groups of people. Likewise, the expansion of tropical infectious diseases is possible. Reduction of inner-city heat stress, pollen monitoring and warning services are examples for additional measures of health care.

Effects of climate change on **tourism** maybe positive or negative depending on the natural and infrastructural opportunities, season and the touristic activities a region offers. In general regions with nature-based tourism and/or a focus on outdoor-activities are more vulnerable. While the winter tourism in Bavaria will likely decline, Bavarian summer tourism will probably benefit – although accreting extreme events may also retrieve higher risks. A profile change and providing new, additional touristic possibilities are potential adaptation measures.

One major problem in urban areas is the increasing heat stress. Climate adaptation in **spatial planning and urban development** can be controlled by a targeted urban land-use planning, which provides a loosened building structure through open spaces which provides sufficient ventilation corridors. As a result the concerns of climate protection are already included.

Impacts of climate change on **industry and trade** could be positive or negative depending on the branch of trade and company size. On the one hand, the increasing number of extreme weather events and all resulting operational and logistic limitations as well as the thermal load of the employees and infrastructure, represent negative effects. On the other hand, the development of potential new markets represents a positive effect. Adaptation measures for instance are infrastructural modifications regarding the protection of employees and goods or weather adapted planning of operations.

In the **transport** sector, the increase of frost-free days may improve the general transport situation on road and rail as well as bicycle traffic. At the same time more frequent extreme weather events may complicate planning in transportation, may pose new challenges in road safety and lead to an increased infrastructure load. For the inland waterway transport especially flood and low water events constitute a problem. In this sector climate adaptation is integrated in general measures of infrastructure planning and maintenance, measures of flood protection and low water precautions.



Climate change generates new challenges for **energy supply**. Increasing temperatures will lead to increased use of electricity for air conditioning. At the same time the supply of cooling water for power plants will be reduced due to decreased run-off. Beyond that, extreme events will put additional pressure on energy infrastructure. Flexible management of energy production and its distribution as well as infrastructural strengthening are substantial climate adaptation measures.

The observed general Bavarian temperature increase in the past decades was even more pronounced in the **Alps** and is projected to continue in the future. Resulting consequences are in particular transformations and displacement of highly specialized ecosystems. In this regard, instruments of landscape- and nature conservation are suitable climate adaptation measures. With respect to **alpine natural hazards** more frequent extreme storm events and a reduction of permafrost could lead to an increase of floods and landslides. A temperature increase in winter could lead to a higher avalanche risk. As an important adaptation measure, the state of Bavaria runs an integral risk management consisting of precaution, prevention, protection and postoperative care as well as an avalanche warning system.

The central part of an environmental policy which is directed to sustainable development is climate protection, which involves all societal stakeholders. As even an intensive climate protection can not completely prevent global climate warming, another priority of environmental policy is given to climate change adaptation. In Bavaria, specific challenges were recognized at an early stage and hard work is carried out on different levels to prepare the country for a changing climate.

A scenic mountain landscape with a semi-transparent text box. The background shows a vast mountain range under a blue sky with scattered white clouds. The foreground features a grassy hillside and a line of dark evergreen trees. The text box is centered and contains the number '1' and the word 'Klimapolitik' in a bold, teal font.

1

# Klimapolitik

Die Sicherung der natürlichen Lebensgrundlagen gehört genauso zu den großen Aufgaben der Weltgemeinschaft wie die Sicherung des Friedens. Wir sind von natürlichen Ressourcen abhängig – materiell, energetisch und räumlich. Der heutige Wohlstand fußt dabei nicht nur auf natürlichen Ressourcen wie Mineralien, fossilen Energieträgern und Biomasse. Auch die Artenvielfalt und Ökosystemdienstleistungen, wie etwa das Bestäuben von Blüten durch Bienen, das Wasser, der Boden, die Luft und die Fläche bilden die Basis unseres Lebens. Die natürlichen Ressourcen der Erde müssen für die heutigen und zukünftigen Generationen geschützt werden, durch sorgfältige und angemessene Planung und Steuerung. Das globale Bevölkerungs- und Wirtschaftswachstum erhöht jedoch weiterhin den Druck auf die natürlichen Ressourcen. Das Ziel, die natürlichen Lebensgrundlagen zu schützen und zu pflegen, hat Bayern mit der Gründung des deutschland- und europaweit ersten Umweltministeriums bereits vor über 40 Jahren unterstrichen. Hierzu gehört in besonderer Weise der Klimaschutz.

Der Klimawandel kann nicht rückgängig gemacht werden. Allein die Menge der bereits ausgestoßenen Treibhausgase sorgt für eine weitere Erwärmung des globalen Klimas. Es ist jedoch noch möglich, den Klimawandel zu verlangsamen und damit seine Auswirkungen für Menschen und Umwelt in Schranken zu halten. Dies ist Aufgabe der gesamten Staatengemeinschaft.

Mit dem Kyoto-Protokoll haben sich die beteiligten Industriestaaten erstmals völkerrechtlich verbindlich dazu verpflichtet, ihre Emissionen um insgesamt 5 Prozent im Zeitraum 2008 bis 2012 gegenüber 1990 zu senken. Deutschland hat sich im Rahmen dieser ersten Verpflichtungsperiode zum Ziel gesetzt, seine Emissionen im Durchschnitt der Jahre 2008 bis 2012 um 21 Prozent gegenüber 1990 zu senken. Dieses Ziel hat Deutschland mit einer Minderung von 23,6 Prozent sogar übererfüllt. Eine zweite Verpflichtungsperiode, die bis zum Jahr 2020 gelten

soll, wurde auf der Klimakonferenz in Doha beschlossen. Deutschland setzt sich darüber hinaus international für ein ambitioniertes Klimaschutzabkommen mit Beteiligung aller Staaten ein.

Auf nationaler Ebene hat die Bundesregierung 2010 mit dem Energiekonzept ehrgeizige Ziele für den Klimaschutz festgelegt. In der Koalitionsvereinbarung vom Dezember 2013 wird insbesondere das langfristige Ziel, die Emissionen bis 2050 um 80 bis 90 Prozent zu senken, bekräftigt, wie auch das nächste Etappenziel: Bis zum Jahr 2020 sollen die Emissionen um mindestens 40 Prozent gegenüber 1990 gemindert werden. Die Bayerische Staatsregierung unterstützt die Klimaschutzziele der Bundesregierung.

Die bayerische Klimapolitik ist seit langem mit konkreten Zielen hinterlegt. Die Bayerischen Klimaschutzziele sind dabei im Kontext der internationalen, EU- und Bundesziele zu Treibhausgasminderung, Anpassung und Forschung zu sehen. Übergeordnetes Ziel ist es, den Klimaschutz in alle Lebens- und Wirtschaftsbereiche zu integrieren.

### Internationale Klimaschutzziele

- Bayern bekennt sich klar zum internationalen Klimaschutzziel, der Begrenzung des Anstiegs der globalen Durchschnittstemperatur auf weniger als 2 °C gegenüber dem vorindustriellen Niveau.
- Bayern fordert die Verabschiedung eines verbindlichen, wirksamen internationalen Klimaschutzabkommens in Nachfolge des Kyoto-Protokolls bei der Weltklimakonferenz 2015 in Paris.
- Bayern fordert einen wirksamen Emissionshandel als wichtigstes Instrument des europäischen Klimaschutzes.

### Minderung von Treibhausgas-Emissionen in Bayern

- In Anlehnung an das Europäische Minderungsziel, die Treibhausgas-Emissionen bis 2050 um 80 bis 95 Prozent zu reduzieren, strebt die Staatsregierung an, die Treibhausgas-Emissionen pro Kopf und Jahr auf weniger als 2 Tonnen zu senken.
- Mittelfristig bis 2020 wird am Ziel festgehalten, die energiebedingten CO<sub>2</sub>-Emissionen pro Kopf und Jahr auf deutlich unter 6 Tonnen zu senken.
- Bis 2030 sollen die jährlichen Treibhausgas-Emissionen auf unter 5 Tonnen pro Kopf sinken.

### Regionale Anpassung an die Folgen des Klimawandels

- Auf der Grundlage der Fortschreibung der Bayerischen Klima-Anpassungsstrategie soll Bayern in allen wesentlichen, betroffenen Handlungsfeldern (unter anderem Wasserwirtschaft, Naturschutz, Land- und Forstwirtschaft, Tourismus und Wirtschaft) bis 2050 klimasicher gemacht werden.

### Forschung und Entwicklung

- Um grundlegende Erkenntnisse über das Ausmaß und die Auswirkungen des Klimawandels auf Bayern zu erlangen, bleibt die Forschung auch weiterhin zentraler Bestandteil der bayerischen Klimapolitik. Mit dem Zentrum für Höhen- und Klimaforschung, der Umweltforschungsstation Schneefernerhaus I Zugspitze, steht besonders die sensible Alpenregion im Mittelpunkt der Forschung.

Die Maßnahmen der bayerischen Klimapolitik zeigen Wirkung: Seit dem Ende der 1990er Jahre sind die energiebedingten CO<sub>2</sub>-Emissionen um über 10 Mio. Tonnen auf heute (2012) rund 78 Mio. Tonnen gesunken. Das bereits im Jahr 2000 für das Jahr 2010 angestrebte bayerische Ziel von 80 Mio. Tonnen (entspricht 6,4 Tonnen pro Einwohner) wurde erreicht. Der energiebedingte CO<sub>2</sub>-Ausstoß im Freistaat ist heute (2012) mit 6,2 Tonnen CO<sub>2</sub> pro Kopf und Jahr ein Drittel niedriger als der Bundesdurchschnitt (9,5 Tonnen CO<sub>2</sub> pro Kopf und Jahr). Bayern zählt weltweit mit zu den im Klimaschutz fortschrittlichsten Industrieländern (USA rund 17 Tonnen CO<sub>2</sub> pro Kopf und Jahr). Die Bilanz macht aber auch deutlich, dass es weiterer Anstrengungen bedarf, um den Treibhausgasausstoß wirksam zu senken.

Ein aktiver, anspruchsvoller Klimaschutz fördert eine nachhaltige Gesellschaft, bringt Innovationen voran, schafft Arbeitsplätze und stärkt Wachstum. Konsequenter Klimaschutz senkt die Einfuhr von und damit die Kosten für fossile Energieträger. Dadurch werden Investitionen für Alternativen möglich. Da ca. 80 % der klimaschädlichen Emissionen energiebedingt sind, ist die Neuausrichtung der Energieversorgung mit den zentralen Forderungen nach Energieeinsparung, Energieeffizienz und erneuerbaren Energien für den Klimaschutz enorm wichtig.

Klimaschutz ist ein vorrangiges Handlungsfeld der Bayerischen Staatsregierung. Die wesentlichen drei Säulen – Emissionsminderung, Anpassung und Forschung – bleiben auch im neuen Klimaschutzprogramm Bayern 2050, das im Juli 2014 vom Kabinett beschlossen wurde, bestehen. Darin sind 11 Schwerpunkt-Maßnahmen enthalten:

#### **Milderung des Klimawandels durch Emissionsminderung als internationale Vorbildfunktion mit den Schwerpunkten**

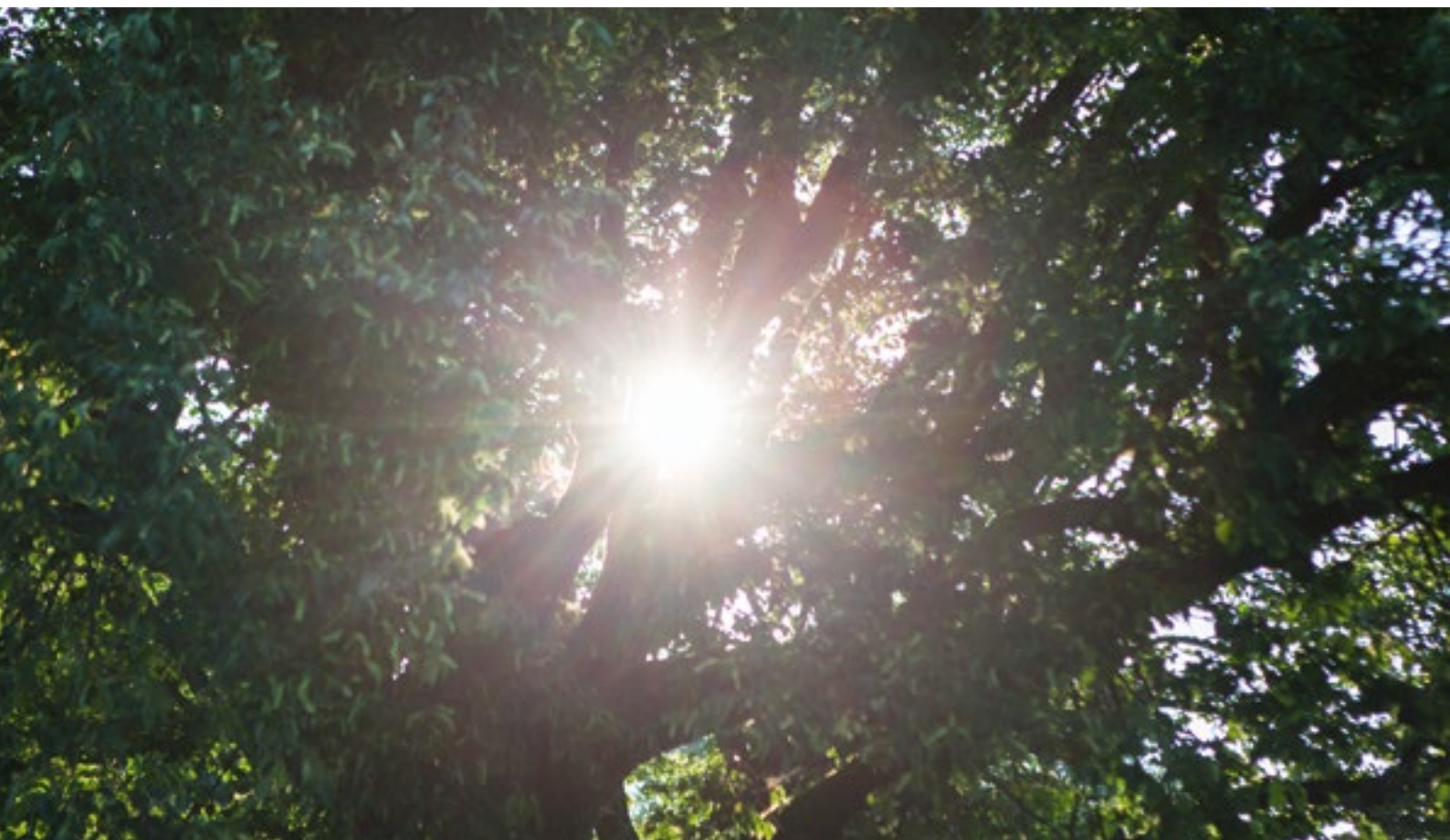
- Energieeinsparung und Energieeffizienz
- Ausbau erneuerbarer Energien
- Förderschwerpunkt „Kommunaler Klimaschutz“
- Moorschutz in Bayern
- Bayerische Klima-Allianz

#### **Regionale Anpassung an die Folgen des Klimawandels**

- Programm „Bayern klimasicher machen“
- GEORISK-Kataster

#### **Forschung und Entwicklung**

- Bayerisches Klimaforschungsnetzwerk
- Umweltforschungsstation Schneefernerhaus
- Klima-Report Bayern
- Ressortspezifische Forschung und Entwicklung



A scenic landscape featuring a large body of water in the middle ground, with a wooden pier extending into it. In the foreground, there are tall, thin reeds with light-colored seed heads. The background shows a range of mountains under a blue sky with scattered white clouds. The overall scene is bright and clear.

# 2 Grundlagen

## 2.1 Ursachen des Klimawandels

Der anthropogen verursachte Klimawandel ist eine der größten Herausforderungen des 21. Jahrhunderts.

Seit Beginn der flächendeckenden Wetteraufzeichnungen, in Deutschland ungefähr im Jahr 1880, lassen sich bei vielen atmosphärischen Variablen Veränderungen beobachten. In weiten Teilen Deutschlands hat in diesem Zeitraum beispielsweise die mittlere Temperatur zugenommen, ist die Anzahl der Tage mit Schneebedeckung zurückgegangen oder sind Veränderungen in Niederschlagsmustern zu beobachten.

Mit den Begriffen Wetter, Witterung und Klima beschreibt die Meteorologie und Klimatologie Vorgänge, die sich in der Atmosphäre auf verschiedenen Zeitskalen abspielen. Das Wetter umfasst wenige Tage, die Witterung den Zeitraum von Wochen bis zu mehreren Monaten. Vom Klima hingegen spricht man bei Zeitskalen von Jahren bis hin zu geologischen Zeitaltern. Die Weltorganisation für Meteorologie (WMO) definiert „Klima“ wissenschaftlich präzise als „Synthese des Wetters über einen Zeitraum, der lange genug ist, um dessen statistische Eigenschaften bestimmen zu können“<sup>1</sup>. Klima ist auch immer auf einen Ort bezogen: Das Klima von Berchtesgaden ist ein anderes als das von Würzburg. Um das Klima einer Region zu beschreiben, werden entsprechend den Vorgaben der WMO, Zeiträume von mindestens 30 Jahren analysiert.

Klimaänderungen hat es im Verlauf der Erdgeschichte immer wieder gegeben, jedoch sind diese Änderungen auf natürliche Vorgänge, wie etwa die zyklischen Schwankungen der Umlaufbahnparameter der Erde um die Sonne oder auch eine sich ändernde solare Aktivität, zurückzuführen.

Seit Beginn der Industrialisierung greift jedoch der Mensch durch die Nutzung fossiler Energie und den damit verbundenen Emissionen von Treibhausgasen (vor allem Kohlendioxid  $\text{CO}_2$ , Methan  $\text{CH}_4$ , Lachgas  $\text{N}_2\text{O}$ ) massiv in die Zusammensetzung – und damit auch den Energiehaushalt – der Atmosphäre ein. Bereits 1896 hat der schwedische Physiker und Chemiker Svante Arrhenius auf die Auswirkungen einer erhöhten Konzentration von Kohlendioxid in der Atmosphäre hingewiesen [1]. Seit dieser Zeit ist der Effekt einer steigenden Konzentration von Treibhausgasen in der Atmosphäre bekannt.

Bei dem Übergang von der letzten Eiszeit zur gegenwärtigen Warmzeit konnte durch sogenannte Proxydaten, die zum Beispiel aus Eisbohrkernen gewonnen werden, eine globale Erwärmung von ungefähr  $5\text{ °C}$  in einem Zeitintervall von 5000 Jahren rekonstruiert werden. Dies entspricht einer Erwärmung von  $1\text{ °C}$  pro tausend Jahren. Im 20. Jahrhundert hingegen lag die beobachtete globale Erwärmungsrate bei etwa  $1\text{ °C}$  in hundert Jahren. Der Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) – bereits 1988 vom Umweltprogramm der Vereinten Nationen (UNEP) und der Weltorganisation für Meteorologie als zwischenstaatliche Institution ins Leben gerufen – befand auf Grund dieser Tatsache schon in seinem vierten Sachstandsbericht 2007, dass „die Menschheit das globale Klima mindestens zehnmal schneller erwärmt, als es die Natur je vermochte“ [2].

Abbildung 2.1\_1 zeigt die auf der Zuspitze, auf dem Schauinsland und am Mauna Loa Observatorium auf Hawaii gemessenen Reihen der atmosphärischen  $\text{CO}_2$ -Konzentration. Im April 2015 wurde auf dem Mauna Loa mit 403 ppm [parts per million] die bisherige höchste Konzentration an  $\text{CO}_2$  gemessen.

<sup>1</sup> <http://www.wmo.int>

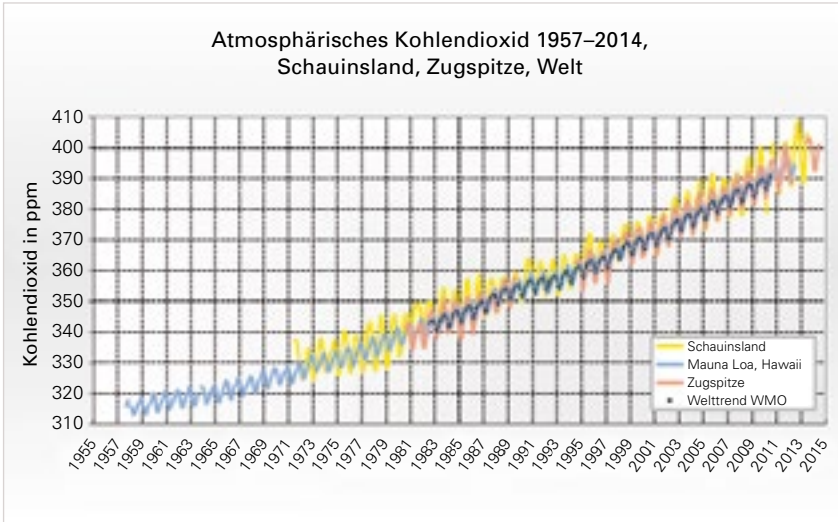


Abbildung 2.1\_1: Auf der Zugspitze, dem Schausinsland und dem Mauna Loa Observatorium gemessener Anstieg des CO<sub>2</sub>-Gehaltes in der Atmosphäre seit 1957.

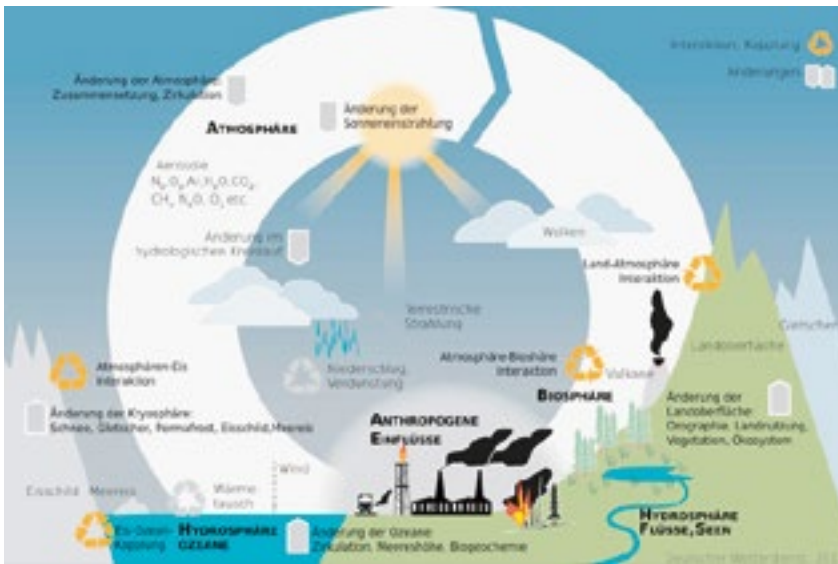


Abbildung 2.1\_2: Schematische Darstellung des Klimasystems.

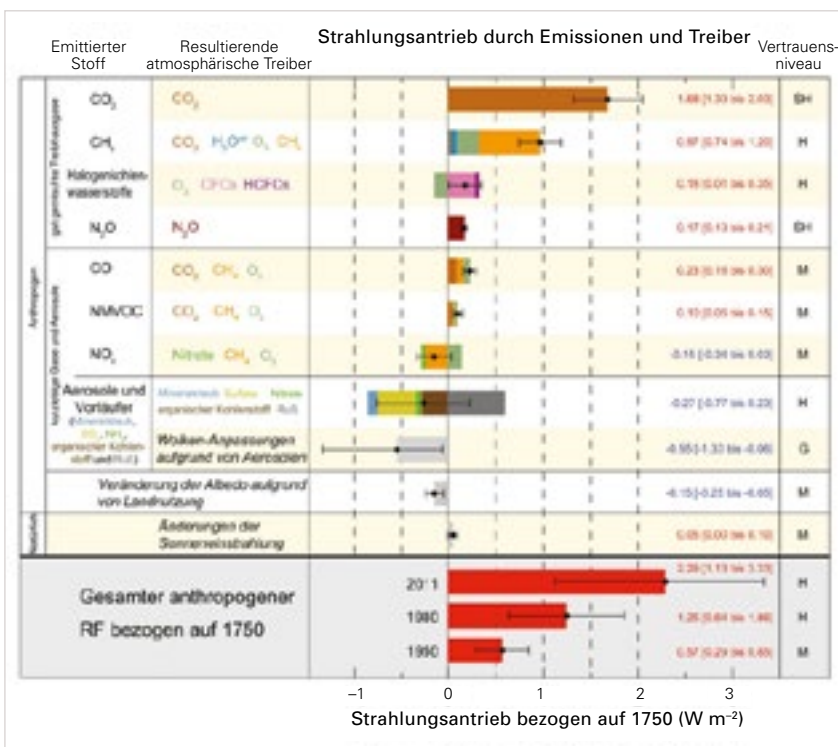


Abbildung 2.1\_3: Komponenten des Strahlungsantriebs der globalen Erwärmung seit 1750 und ihr Nettoeffekt auf den Wärmehaushalt der Erde.



## 2.2 Grundbegriffe der Klimamodellierung

Diese anthropogenen („menschgemachten“) Emissionen und die daraus resultierenden Veränderungen der Zusammensetzung der Atmosphäre müssen aus physikalischen Gründen des Strahlungs- und Wärmehaushalts der Atmosphäre und der damit einhergehenden Zirkulationsänderungen im Klimasystem (Abbildung 2.1\_2) zwangsläufig zu Änderungen führen. Fraglich hierbei ist alleine das quantitative Ausmaß und die regionale Ausprägung dieser Änderungen, sowie deren Überlagerung mit natürlichen Klimaschwankungen wie etwa dem El-Niño-Phänomen oder Variationen der solaren Intensität.

Abbildung 2.1\_3 zeigt die sogenannten Strahlungsantriebe verschiedener externer (anthropogener und natürlicher) Faktoren, die das Klima seit Beginn der Industrialisierung beeinflussen. Diese Strahlungsantriebe entstehen durch Änderungen der atmosphärischen Zusammensetzung, Veränderung der Oberflächenreflexion der Erde durch Landnutzung sowie durch Einstrahlungsschwankungen der Sonne. Strahlungsantriebe durch nur kurzfristig wirkende explosive Vulkanausbrüche bleiben unberücksichtigt.

Durch diese Veränderungen in der atmosphärischen Zusammensetzung seit dem Beginn der Industrialisierung wird der natürliche Treibhauseffekt zusätzlich verstärkt und führt unter anderem zu der global beobachteten Erwärmung der bodennahen Lufttemperatur.

Um Aussagen zur zukünftigen Entwicklung der bodennahen Lufttemperatur und anderer klimatisch relevanter Größen zu treffen, werden Klimamodelle genutzt.

Bei diesen realitätsnahen Klimamodellen wird danach gestrebt, möglichst viele Klima-Prozesse einzubeziehen. Ziel ist es, die Wirklichkeit möglichst genau darzustellen, um so Prognosen erstellen zu können.

Klimamodelle sind in der Lage alle wesentlichen Prozesse der Atmosphäre, Hydrosphäre, Kryosphäre und Biosphäre unseres Planeten zu beschreiben. Eine Übersicht über einige der in einem Klimamodell berücksichtigten Prozesse in der Natur liefert Abbildung 2.1\_2.

Es ist jedoch nicht möglich, alle in der Natur ablaufenden Prozesse eins zu eins mit Klimamodellen zu beschreiben. Dies würde einen extrem hohen Aufwand an Computerrechenzeit erfordern. Für die Beschreibung dieser Prozesse müssen eine Vielzahl an Gleichungen gelöst werden. Dafür werden die Atmosphäre und die Ozeane unseres Planeten in Form von Gitterboxen beschrieben. Eine beispielhafte Darstellung dieser Gitterboxen wird in Abbildung 2.2\_1 gezeigt.

Die Auflösung (Gitterpunktabstand) globaler Klimamodelle ist sehr grob. Dadurch hält sich der Rechenaufwand für langjährige Prognosen in Grenzen. Obwohl diese Modelle die grundlegende großräumige Variabilität des Klimas ausreichend beschreiben, reicht ihre räumliche Auflösung nicht aus, um Unterschiede in den Ausprägungen des Klimawandels einer bestimmten Region (z. B. Bayern) detailliert zu beschreiben. Hierfür werden regionale Klimamodelle in die globalen Klimamodelle eingesetzt, deren Gitterpunkte ein erheblich engmaschigeres Netz bilden.

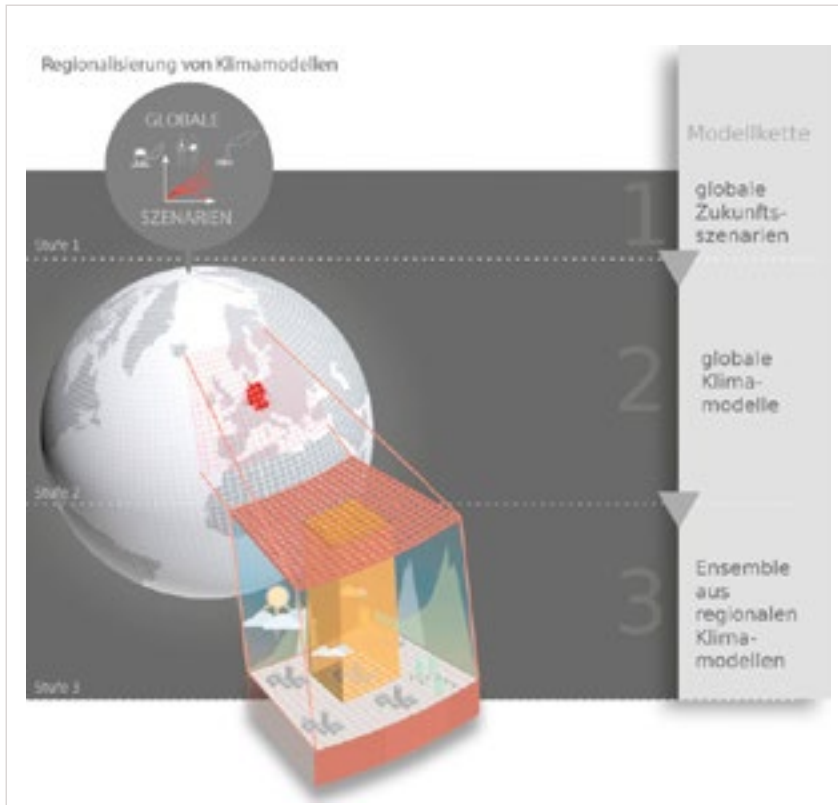


Abbildung 2.2\_1: Schematische Darstellung der vertikal und horizontal feineren Auflösung von Klimamodellen in der Modellkette.  
Quelle: Deutscher Wetterdienst.

Weltweit werden von einer Vielzahl an Forschungsgruppen Klimamodelle entwickelt, wobei die Modellkomponenten durch die verschiedenen Gruppen unterschiedlich beschrieben werden können. Dies kann zu unterschiedlichen Ergebnissen führen. Ursache hierfür sind die notwendigen Vereinfachungen die für die Definition eines Modelles gegenüber den in der Natur ablaufenden Prozessen notwendig sind. Die vorhandene Bandbreite der Ergebnisse ist ein wichtiger Hinweis auf die Güte des Verständnisses der in der Natur ablaufenden Prozesse. Je höher die Bandbreite, umso vorsichtiger sollten Aussagen über abgeleitete Änderungssignale formuliert werden.

Ebenso wie im globalen Maßstab gibt es auch für die regionale Skala eine Reihe von verschiedenen Klimamodellen. Sie basieren auf den Resultaten der globalen Klimamodelle und werden von diesen angetrieben. Für Deutschland liegen aktuell Simulationen mit einer räumlichen Auflösung von 25 und

12,5 km vor. Dies bedeutet, dass zum Beispiel die bodennahe Lufttemperatur nur alle 12,5 km einen anderen Wert annehmen kann. Eine belastbare Aussage ist für einen einzelnen Gitterpunkt auf Basis nur eines Klimamodells nicht möglich. Es müssen immer mehrere Gitterpunkte zusammengefasst werden. Üblicherweise wird dafür eine Matrix von drei mal drei Gitterpunkten genutzt.

Es ist nicht möglich, den Einfluss des Menschen für die nächsten Jahre und Jahrzehnte genau zu beschreiben. Möglich sind aber Annahmen über den wahrscheinlichen Verlauf. Diese Annahmen werden „Szenarien“ genannt. Um das Klima der Zukunft zu erforschen, wurden von Ökonomen mehrere mögliche Szenarien der künftigen ökonomischen und gesellschaftlichen Entwicklung der Welt entworfen. Diese Szenarien beschreiben unter anderem die globale Bevölkerungsentwicklung, Energieverbrauch und -erzeugung, Mobilität, Ernährung und

weitere Faktoren, die den Treibhausgehalt der Atmosphäre beeinflussen.

Bisher wurden die vom IPCC im „Special Report Emissions Scenarios (SRES)“ [4] entwickelten Szenarien A1, A2, B1 und B2 verwendet.

In den Szenarien A1 und A2 wird von einer hauptsächlich wirtschaftlichen Orientierung ausgegangen, in den Szenarien B1 und B2 hingegen von einer eher ökologischen Orientierung. Der Gedanke einer weiter fortschreitenden Globalisierung liegt den Szenarien A1 und B1 zu Grunde, wohingegen die Szenarien A2 und B2 von unterschiedlichen Entwicklungen in unterschiedlichen Teilen der Erde ausgehen. Das Szenario A1B basiert auf der Vorstellung, dass zukünftig Energie zu jeweils gleichen Teilen aus fossilen und erneuerbaren Quellen gewonnen wird.

Im Jahr 2012 wurden neue Szenarien veröffentlicht und bereits im jüngsten 5. Sachstandsbericht des IPCC [5] verwendet. Diese sogenannten RCP-Szenarien (engl.: Representative Concentration Pathways) werden nach dem angenommenen zusätzlichen Strahlungsantrieb der Treibhausgase (vgl. Abbildung 2.1\_3) im Jahr 2100 verglichen mit vorindustriellen Werten der atmosphärischen Treibhausgaskonzentration bezeichnet. Das Szenario RCP 6.0 ist dem früheren SRES Szenario A1B ähnlich.

Verschiedene Modellkombinationen aus globalen und regionalen Klimamodellen führen zu verschiedenen Klimaänderungssignalen. Idealerweise werden daher mehrere Kombinationen von globalen und regionalen Klimamodellen ausgewertet, um so aus diesem Ensemble von Modellkombinationen statistische Spannbreiten möglicher Klimaänderungen abschätzen zu können. Es bietet sich an, verschiedene Modelle miteinander zu kombinieren und die aus den verschiedenen Kopplungen entstehenden Bandbreiten zu bestimmen. Dabei ist darauf zu achten, dass ein möglichst breites Spektrum an Kombinationsmöglichkeiten zwischen den einzelnen

Modellen abgedeckt wird, um die aus den verschiedenen Kombinationen resultierende Variabilität vollständig abbilden zu können und zu verhindern, dass mit einer Übergewichtung einzelner Modelle falsche Trends bestimmt werden.

Die Ergebnisse der Klimamodelle sind – anders als bei der Wettervorhersage – nicht als konkrete Vorhersagen zu verstehen, sondern als mögliche Entwicklung, falls sich die tatsächlichen Treibhausgaskonzentrationen in der Atmosphäre so entwickeln, wie es in den zugrunde liegenden Szenarien angenommen wurde.

Da das Klimasystem sehr träge reagiert, werden sich Änderungen, die durch den gegenwärtigen Gehalt an Treibhausgasen in der Atmosphäre verursacht werden, nicht mehr vermeiden lassen. Sollte sich jedoch eine klimafreundlichere Wirtschaftsstruktur durchsetzen, können einige Änderungen in ihren Auswirkungen noch begrenzt werden.

Nach Berechnungen des Max-Planck-Instituts für Meteorologie führt die Emission von 500 Gt<sup>1</sup> CO<sub>2</sub> zu einer weltweiten Erwärmung von etwa 1 °C. Ende des 20. Jahrhunderts war es global ungefähr 1 °C wärmer als vorindustriell. Daraus folgt unter anderem, dass die Menschheit noch 500 Gt CO<sub>2</sub> emittieren dürfte, ohne das Ziel die globale Erwärmung auf 2 °C im Vergleich zu vor Beginn der Industrialisierung zu begrenzen, zu verfehlen. Bei gegenwärtigen Emissionsraten von knapp 10 Gt C (≈ 36,67 Gt CO<sub>2</sub>) pro Jahr – und Steigerung um 2,5 Prozent pro Jahr – blieben demnach noch 50 Jahre Zeit die Treibhausgasemissionen einzustellen, soll das 2 °C Ziel tatsächlich erreicht werden. Jede weitere Steigerung der Emissionen heute erfordert umso drastischere Minderungen in der Zukunft.

1 Gt: Gigatonne = 10<sup>9</sup> Tonnen = 1 000 000 000 Tonnen

---

## EXKURS FORSCHUNG

---

Dr. Thomas Trickl, Dr. Hannes Vogelmann;  
Karlsruher Institut für Technologie, Institut für  
Meteorologie und Klimaforschung (IMK-IFU),  
Garmisch-Partenkirchen

---

# Wasserdampf in der freien Troposphäre und in der unteren Stratosphäre

Wasserdampf ist das wichtigste Treibhausgas und zugleich dasjenige mit der größten Variabilität. Für die genaue Messung der Vertikalverteilung von Wasserdampf in der besonders klimasensitiven oberen Troposphäre und der unteren Stratosphäre werden international große Anstrengungen unternommen. Besondere Herausforderungen sind hierbei die in diesem Höhenbereich niedrige Konzentration und die außerordentlich hohe Variabilität von Wasserdampf. Konzentrationsänderungen um mehr als einen Faktor 50 innerhalb kürzester Zeit sind in der freien Troposphäre keine Seltenheit. Ursache sind atmosphärische Transportvorgänge. Vor allem sind hier aus der maritimen Grenzschicht niedrigerer geographischer Breiten aufsteigende feuchte Luftströmungen zu erwähnen (Warm Conveyor Belts), sowie extrem trockene Luft aus der Stratosphäre, die in Schichten häufig bis auf alpine Gipfelhöhen herabsinkt. Darüber hinaus sind die Luftmassen häufig spezifisch für ihr Herkunftsgebiet verunreinigt (Aerosole, Ozon). Die für die Feuchteverteilung verantwortlichen Prozesse zu verstehen und ihre Beiträge hinsichtlich ihrer langfristigen Entwicklung zu quantifizieren bedarf eines entsprechend langfristig angelegten Forschungsprogramms.

Um die kurzzeitige räumliche und zeitliche Variabilität zu erfassen, werden an der Umweltforschungsstation Schneefernerhaus (UFS) in 2.675 m Höhe zwei Wasserdampf-Lidar-Systeme betrieben. Um die extrem niedrigen Feuchten in großen Höhen nachzuweisen, werden an der UFS besonders leistungsstarke Laser, große Empfangsteleskope für das Rückstreulicht und eine erhebliche verbesserte Detektionselektronik eingesetzt.

Mit dem differentiellen Absorptions-Lidar (DIAL) an der UFS werden seit 2007 Routinemessungen durchgeführt. Mit dem DIAL können unabhängig von der Tageszeit innerhalb von einer Viertelstunde Vertikalprofile der Wasserdampfverteilung zwischen drei und zwölf km Höhe aufgezeichnet werden. Die Höhenauflösung liegt zwischen 50 und 300 m. Um die Lidar-Messungen bis in die Stratosphäre auszudehnen, wurde direkt neben dem DIAL zusätzlich ein Hochleistungs-Raman-Lidar aufgebaut. Hierfür wurde ein 350 Watt starker Industrie-Laser mit einer Wellenlänge von 308 Nanometer (Ultraviolett) umgebaut. Zwei große Empfangsteleskope mit 1,5 m und 0,4 m Durchmesser erlauben dann Messungen bis in Höhen von ca. 25 Kilometer. Das Raman-Lidar kann mit dem hochgenauen DIAL kalibriert werden, eine weltweit einmalige Konfiguration. Das System befindet sich derzeit noch in der Testphase. Abbildung 1 zeigt eine Messung vom 11.02.2015, die bereits Wasserdampf bis etwa zwei Kilometer oberhalb der Tropopause nachweist. Die maximale Reichweite soll nach dem Ende der Funktionstests durch die Unterdrückung von Hintergrundlicht nachgewiesen werden.

Die seit 2007 kontinuierlich fortgeführten Messungen der vertikalen Wasserdampfverteilung über der Zugspitze mit dem DIAL liefern bereits wichtige Erkenntnisse über die Variabilität des Wasserdampfs und ihre Ursachen. In Verbindung mit dem solaren Fourier-Transform-Spektrometer auf dem Zugspitzgipfel konnte die räumliche Variabilität der integrierten Wasserdampfsäule in der freien Troposphäre auf

der Kilometer-Skala und die zeitliche Variabilität bis zur Minuten-Skala herunter untersucht werden (Vogelmann et. al. 2011, 2015). Die Feuchteänderungen in der freien Troposphäre werden meist durch die horizontale Anströmung sehr heterogener Luftmassen verursacht. Dies führt auch im Winterhalbjahr, also zu Zeiten geringer Konvektion, auch im Höhenbereich des Zugspitzgipfels zu einer außerordentlich hohen Variabilität. Im Höhenbereich zwischen drei und fünf km können die durch die Anströmung von Luftmassen aus unterschiedlichen Herkunftsregionen verursachten Variationen der Feuchteverteilung den Beitrag der Konvektion auch innerhalb kurzer Zeiträume von nur wenigen Stunden um mehr als eine Größenordnung (Faktor 10) übersteigen. Derartige Ereignisse werden im Winterhalbjahr häufig (vier- bis zehnmal pro Monat), aber auch im Sommerhalbjahr gelegentlich (ein- bis dreimal pro Monat) beobachtet.

Als Ursache ist insbesondere im Winter das Vordringen von Stratosphärenluft bis in die untere Troposphäre zu erwähnen. Die Lidar-Messungen sind in der Lage, die extrem trockene Luft stratosphärischen Ursprungs quantitativ nachzuweisen. Diese Luft ist in Wahrheit etwa zehnmal trockener als es die In-Situ-Sensoren auf der Zugspitze und der UFS in direkter Messung anzeigen, was die Grenzen der am Boden eingesetzten Feuchtesensoren verdeutlicht. Trotz Transportdauern von bis zu 15 Tagen und Transportwegen über tausende von Kilometern enthalten diese stratosphärischen Schichten häufig keine Beimengung troposphärischen Wasserdampfs (Trickl et al. 2014, Abbildung 3). Diese überraschend geringe Durchmischung steht im deutlichen Widerspruch zum bisherigen Stand der Wissenschaft. Die neuen Erkenntnisse stellen eine extreme Herausforderung an die Atmosphärenmodellierung dar, die eine viel zu starke Durchmischung der Luftmassen beinhaltet. Dementsprechend ergeben

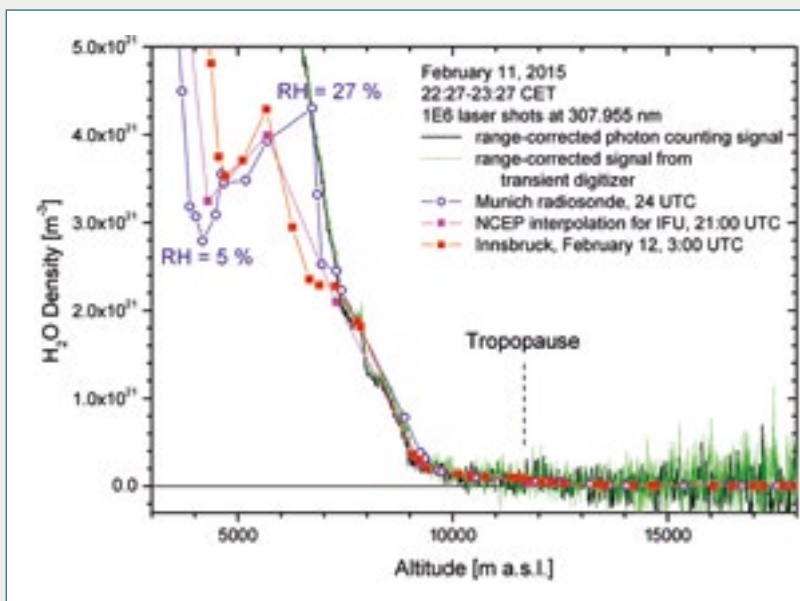


Abbildung 1: Wasserdampfmessung mit dem Raman-Lidar (UFS) vom 11.02.2015, die Wasserdampf bereits bis in etwa 13,5 km Höhe nachweist. Das Signalrauschen zu großen Höhen hin limitiert derzeit noch die Reichweite und wird nach Ende Testphase durch bessere Lichtabschirmung um etwa zwei Größenordnungen reduziert werden.

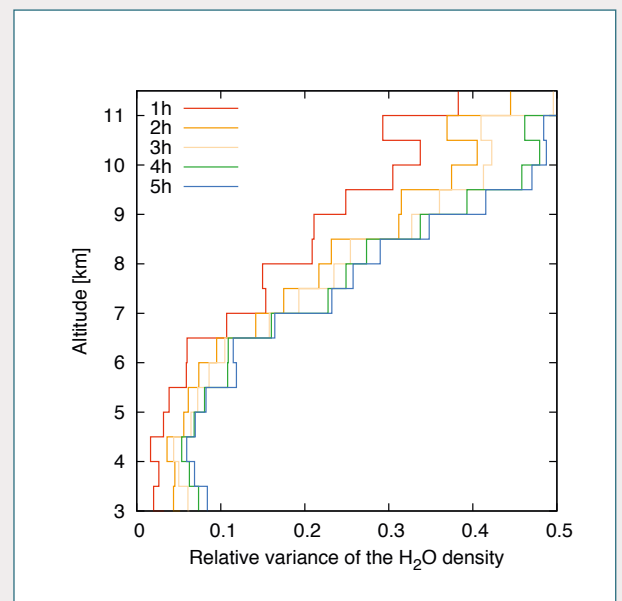


Abbildung 2: Variabilität der Vertikalverteilung des Wasserdampfs in der freien Troposphäre (Varianz); der Anstieg oberhalb von fünf km ist wird dem schnellen Antransport sehr heterogener Luftmassen zugeordnet.

sich erhebliche Schwierigkeiten, atmosphärischen Ferntransport quantitativ zu bestimmen. Insbesondere konnte bislang der positive Ozontrend auf der Zugspitze durch den seit Mitte der Siebzigerjahre zunehmenden Eintrag aus der Stratosphäre durch Modelle nicht reproduziert werden. Wenn es nicht möglich ist, den atmosphärischen Vertikalaustausch zu berechnen, stellt sich weiterhin die Frage, wie quantitativ erst die grob aufgelösten Klimamodelle sind. Auch Luft aus sehr unterschiedlichen und teilweise sehr weit entfernten Herkunftsgebieten (z. B. Nordamerika, Asien, Sahara), die teilweise zusätzlich mit spezifischen Luftverunreinigungen kontaminiert ist, erreicht die Zugspitze häufig in klar abgegrenzten Luftschichten und werden vor Ort mit Lidar- und In-Situ-Verfahren nachgewiesen. Hierbei werden neben Ozon auch die darin enthaltenen Aerosole beobachtet, die von Vulkanasche, über Rauch von Waldbränden, mineralischem Wüstensand bis zum Smog aus Ballungsgebieten reichen. Dies ist ein weiterer Beleg für die globale Auswirkung von Luftverschmutzung.

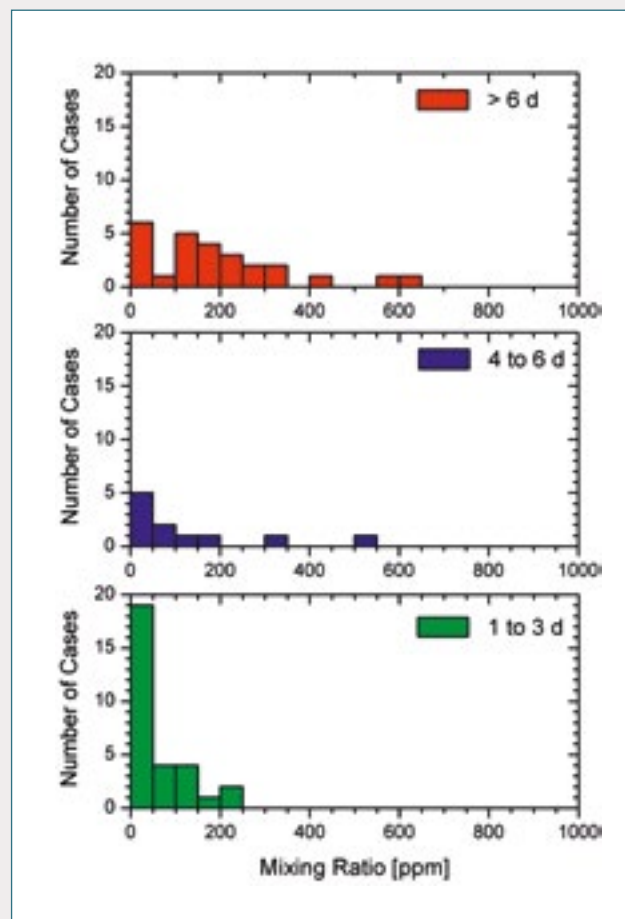


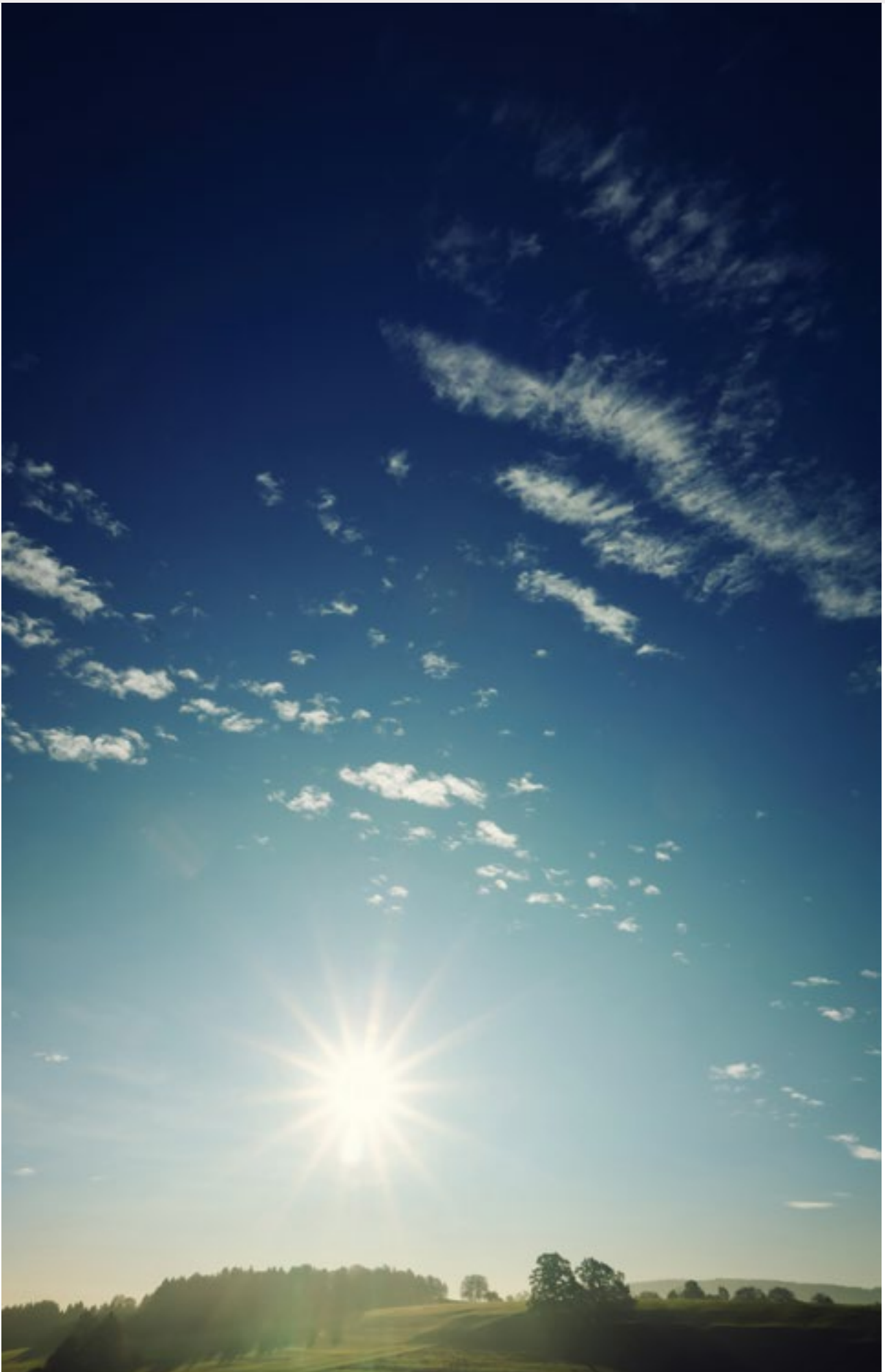
Abbildung 3: Das Wasserdampf-Mischungsverhältnis in Stratosphärenluftschichten als Funktion der Transportdauer zeigt eine überraschend lange Erhaltung des stratosphärischen Charakters dieser häufig sehr filigranen Strukturen.

#### Literatur:

H. Vogelmann, R. Sussmann, T. Trickl, T. Borsdorff, Intercomparison of atmospheric water vapor soundings from the differential absorption lidar (DIAL) and the solar FTIR system on Mt. Zugspitze, *Atmos. Meas. Technol.* **4** (2011), 835-841

T. Trickl, H. Vogelmann, H. Giehl, H. E. Scheel, M. Sprenger, A. Stohl, How stratospheric are deep stratospheric intrusions? *Atmos. Chem. Phys.* **14** (2014), 9941-9961

H. Vogelmann, R. Sussmann, T. Trickl, A. Reichardt, Spatiotemporal variability of water vapor investigated using lidar and FTIR vertical soundings above the Zugspitze, *Atmos. Chem. Phys.* **14** (2015), 3135-3148



## EXKURS FORSCHUNG

PD Dr. Ralf Sussmann; Karlsruher Institut für Technologie, Institut für Meteorologie und Klimaforschung, Garmisch-Partenkirchen

## Neuerlicher Methananstieg und Wasserdampftrends

Wasserdampf als natürliches Treibhausgas ist lebensnotwendig, die bodennahe Temperatur würde sonst weltweit im Mittel um ca. 20 Grad geringer ausfallen. Die Wasserdampfkonzentration „überhöht“ sich jedoch, sobald die bodennahe Temperatur etwa als Folge anthropogener  $\text{CO}_2$ -Emissionen ansteigt. Derzeit ist etwa von einer Verdopplung des  $\text{CO}_2$ -Treibhauseffekts auszugehen. Ähnliche Rückkopplungen gibt es auch beim Methan. Es ist zwar nur das zweitwichtigste anthropogene Treibhausgas, hat aber eine 25 mal höhere Klimawirkung als  $\text{CO}_2$  (pro Kilogramm emittierter Spurengasmenge, gerechnet über hundert Jahre). Die stärksten Methanquellen beruhen auf Fäulnisprozessen in Feuchtgebieten, die in einem wärmeren Klima (bedingt durch den  $\text{CO}_2$ -Anstieg) verstärkt ablaufen. Eine aktuelle Fragestellung ist, in welchem Maß die weltweit verstärkte Erdöl- und Erdgasförderung der letzten Dekade ein sichtbares atmosphärisches Signal hinterlässt.

Abbildung 1 zeigt das Langzeit-Trendverhalten des atmosphärischen Methangehalts aus Infrarot-Fernsondierungsmessungen an den Messstandorten Garmisch und Zugspitze: Nach einer Periode der Stagnation ist ab 2006 ein starker neuerlicher Anstieg von 4 – 5 ppb pro Jahr festzustellen (Sussmann et al., 2012 zitiert in IPCC, 2013). Um die Ursachen zu verstehen und um Maßnahmen zur Emissionsreduktion festzulegen, ist die genaue

Kenntnis über Stärke, zeitlichen Verlauf und geographische Lage der Methanquellen notwendig. Hinreichende Informationen waren bisher jedoch nicht vorhanden, denn die Stärke der global verteilten Quellen kann unmöglich flächendeckend direkt am Boden vermessen werden. Man ist daher auf indirekte Verfahren angewiesen: Mit Infrarot-Sensoren misst man den atmosphärischen Gesamtgehalt an Methan, die sogenannten vertikalen Säulendichten. Diese sind in der Nähe von starken Boden-Quellen erhöht. Wenn man die Daten von den Standorten Garmisch bzw. Zugspitze mit weiteren Daten aus dem globalen Messnetz verbindet, kann man somit auf Stärke und Ort der Quellen auf der regionalen Skala rückschließen. Es zeichnet sich hierbei ab, dass der neuerliche Methananstieg seit 2006 wahrscheinlich mit der verstärkten Erdöl- und Erdgasförderung in den USA (unter anderem durch „Fracking“) in der letzten Dekade zusammenhängt (Turner et al., 2015).

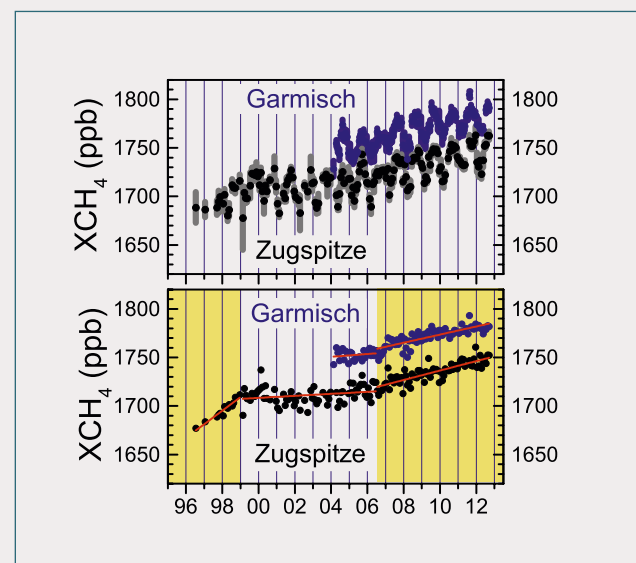


Abbildung 1: Langzeitmessungen von Methan-Säulengehalten an den Atmosphären-Messstandorten Zugspitze und Garmisch. Die Trends sind repräsentativ für die nördliche Hemisphäre.

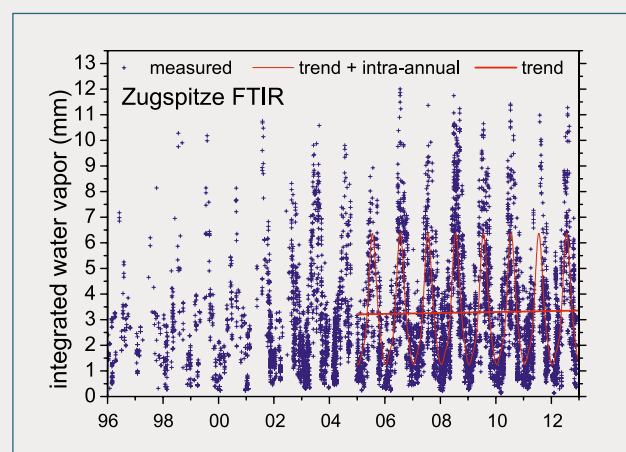
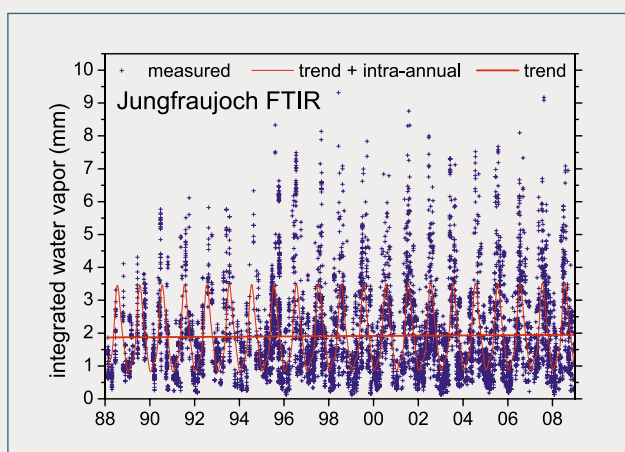


Beim Wasserdampf ist eine aktuelle Frage, ob der gesamte atmosphärische Feuchtegehalt tatsächlich mit der Klimaerwärmung zunimmt, und somit zur Verstärkung des CO<sub>2</sub>-Treibhauseffekts beiträgt oder nicht. Bisherige Studien verwendeten Feuchtedaten der Wetterballone, deren Sensortypen aber über die Jahre mehrmals verändert wurden – dadurch entstanden Sprünge in den Messreihen und die Frage nach einem Wasserdampftrend konnte nicht beantwortet werden. Der Garmischer Gruppe ist es nun gelungen, aus ihren 20 Jahre zurückreichenden Infrarot-Messreihen, die ursprünglich für die Ozonforschung durchgeführt worden waren, erstmals auch genaue Information über den atmosphärischen Wasserdampfgehalt abzuleiten (Sussmann et al., 2009). Die Infrarot-Messreihen bieten dabei den Vorteil, dass sie nicht von Änderungen des Sensortyps betroffen sind.

Gleichzeitig konnte das Garmischer Auswerteverfahren auf die Daten anderer Infrarot-Messstandorte übertragen werden. In Folge wird nun eine globale Analyse des Wasserdampf-Trendverhaltens möglich.

Beispielsweise für die Standorte Jungfraujoch und Zugspitze zeigen sich positive Wasserdampftrends von »4 % bzw. »3,75 % pro Dekade (Abbildung 2). Dies ist in guter Übereinstimmung mit zu erwartenden Trends von ca. 3 % pro Dekade, wenn man von den Trends der bodennahen Temperatur von jeweils »+0,5 °C pro Dekade an beiden Standorten ausgeht und konstante relative Luftfeuchte annimmt. Der atmosphärische Feuchtegehalt nimmt also wie erwartet mit der Klimaerwärmung zu und dies führt zu einer Verstärkung des CO<sub>2</sub>-Treibhauseffekts.

Abbildung 2: Atmosphärische Wasserdampf-Säulengehalte über dem Jungfraujoch (46,5 °N, 8,0 °O, 3580 m ü. NN) und der Zugspitze (47,4 °N, 11,0 °O, 2964 m ü. NN) aus Infrarot-Fernsondierungsmessungen.



#### Literatur:

IPCC, Fifth Assessment Report, Chap. 6, 2013.

Sussmann, R. et al.: Renewed methane increase for five years (2007-2011) observed by solar FTIR spectrometry, *Atmos. Chem. Phys.*, 12, 4885-4891, 2012.

Sussmann, R. et al.: Harmonized retrieval of column-integrated atmospheric water vapor from the FTIR network – first examples for long-term records and station trends, *Atmos. Chem. Phys.*, 9, 8987-8999, 2009.

Turner, A. J. et al.: Estimating global and North American methane emissions with high spatial resolution using GOSAT satellite data, *Atmos. Chem. Phys. Discuss.*, 15, C868–C870, 2015.

---

## EXKURS FORSCHUNG

---

Severin Kaspar, Andreas Philipp, Jucundus Jacobeit;  
Institut für Geographie, Universität Augsburg

---

# Entwicklung Statistischer Downscaling-Modelle für die meteorologische Messstation Zugspitze

Das Institut für Geographie der Universität Augsburg beschäftigt sich im Rahmen des Verbundprojekts „Virtuelles Alpenobservatorium (VAO)“ mit den Auswirkungen des Klimawandels auf die Hydrologie alpiner Hochgebirgsregionen. Der Alpenraum weist seit Anfang des 20. Jahrhunderts stellenweise eine mehr als doppelt so starke Erwärmung wie der globale Mittelwert auf (EEA 2009). Dies verdeutlicht die hohe Sensitivität der Alpen gegenüber klimatischen Veränderungen. Ziel des Projekts ist es, anhand geeigneter Modelle die weitere Entwicklung von Temperatur, Niederschlag, Schneeanteil und Gletschervolumen in alpinen Hochgebirgsregionen abzuschätzen. Hierzu werden verschiedene statistische Modellierungsansätze entwickelt. Der folgende Beitrag konzentriert sich auf das Zugspitzgebiet, analoge Analysen werden aber auch zur Sonnblick-Region in Österreich durchgeführt.

Als Datengrundlage dienen zum einen Messdaten der Wetterstation Zugspitze, welche seit dem Jahr 1900 Temperatur und Niederschlag aufzeichnet. Zum anderen werden großskalige atmosphärische Variablen aus dem 20th Century Reanalyse-Datensatz verwendet, die als Einflussgrößen in die Modellierung eingehen. Dafür eignen sich zum Beispiel der Luftdruck sowie die geopotentiellen

Höhen, Windrichtung und Windgeschwindigkeit verschiedener Druckniveaus.

Die Ableitung lokaler Klimadaten aus großskaligen Einflussgrößen (Downscaling) erfolgt hier auf der Grundlage zweier verschiedener statistischer Verfahren. Zum einen werden Wetterlagenklassifikationen erstellt, zum anderen künstliche neuronale Netze trainiert. Bei einer Wetterlagenklassifikation wird davon ausgegangen, dass ähnliche großräumige Zustände der Atmosphäre, sogenannte Zirkulationstypen, zu ähnlichen lokalen Wetterbedingungen führen. Tritt nun ein bekannter Zirkulationstyp auf, so kann als Schätzwert für die lokalen Wetterverhältnisse an der betreffenden Messstation der charakteristische Kennwert (z. B. Temperatur, Niederschlag) des Zirkulationstyps aus der Beobachtungsperiode herangezogen werden.

Abbildung 1 zeigt das Resultat eines auf Wetterlagenklassifikation basierenden Modells für die Temperatur und den Niederschlag der Station Zugspitze (die ursprünglich täglich aufgelösten Werte sind hier jährlich aggregiert worden). Während die Temperatur mit einem Erklärungsanteil (Quadrat des Korrelationskoeffizienten zwischen beobachteten und modellierten Werten) von 87 % durch das Modell gut dargestellt wird, zeigen sich beim Niederschlag mit einem Erklärungsanteil von nur 13 % deutliche Defizite in der Modellierung. Weiterhin war hier auch eine Bias-Korrektur nötig, um den systematischen Fehler in den Jahresniederschlagssummen zu reduzieren.

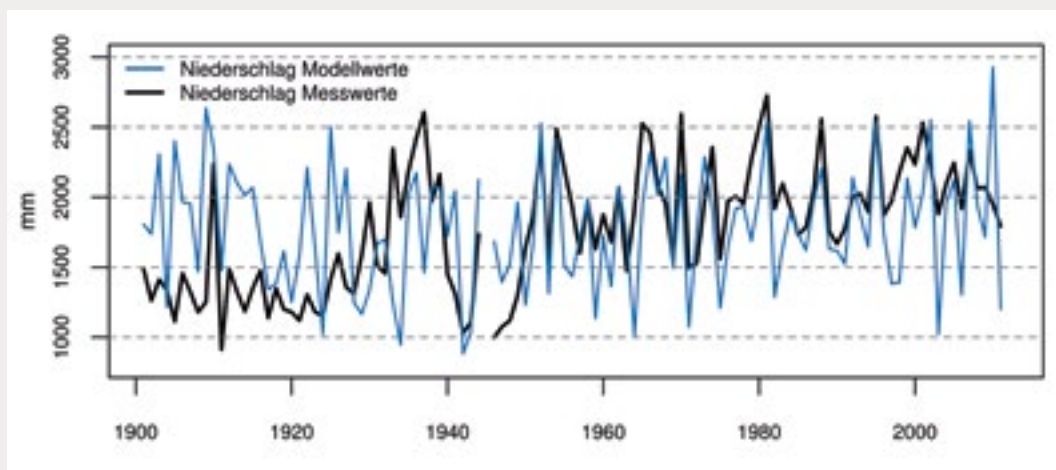
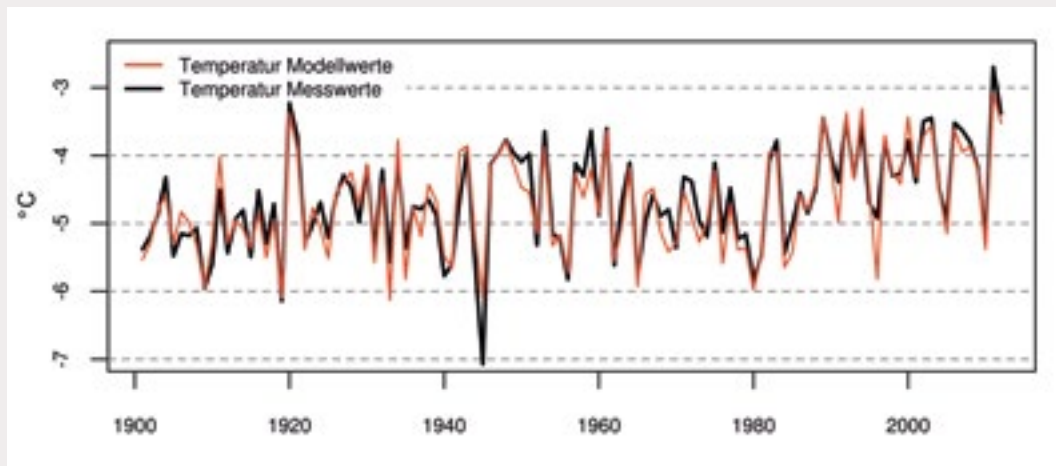
Zur Verbesserung der Modellierung werden nun auch künstliche neuronale Netze herangezogen. Erste Testläufe zeigen, dass der Erklärungsanteil bei der Temperatur auf über 90 % und beim Niederschlag auf über 50 % erhöht werden kann. Es besteht weiterhin die Möglichkeit, beide Verfahren miteinander zu koppeln, um weitere Verbesserungen zu erreichen. Validierte Modelle können schließlich zur lokalen Abschätzung künftiger Klima-

änderungen verwendet werden, indem projizierte Werte der großskaligen Einflussgrößen aus globalen Klimamodellsimulationen herangezogen werden. Erste diesbezügliche Ergebnisse sind in der nächsten Projektphase zu erwarten.

**Literatur:**

EEA 2009: Regional climate change and adaptation, The Alps facing the challenge of changing water resources. European Environment Agency Report No 8.

Abbildung 1: Entwicklung der mittleren Jahrestemperaturen (oben) und der jährlichen Niederschlagssummen (unten) an der Messstation Zugspitze im Vergleich zwischen Beobachtung und statistischer Modellierung. Die Jahressummen des simulierten Niederschlags sind durch eine Bias-Korrektur angepasst worden.



---

## EXKURS FORSCHUNG

---

Prof. Dr. Harald Kunstmann<sup>1,2</sup> und Dr. Gerhard Smitatek<sup>1</sup>; <sup>1</sup>Karlsruher Institut für Technologie, Campus Alpin, Institut für Meteorologie und Klimaforschung, Garmisch-Partenkirchen; <sup>2</sup>Universität Augsburg, Institut für Geographie, Augsburg

---

# Wie gut sind regionale Klimamodelle für den Alpenraum und welches zukünftige Klima erwarten wir?

Die Abschätzung der erwarteten Klimaänderung für den orographisch komplexen Alpenraum ist eine wissenschaftliche Herausforderung. Aufgrund der großen Höhenunterschiede ist auf kurzen räumlichen Distanzen bereits eine hohe natürliche Klimavariabilität vorzufinden. Über 100 m Höhenunterschied ändert sich zum Beispiel die mittlere Jahrestemperatur bereits um ca. 0,6 °C. Für die korrekte Reproduktion nicht nur der Temperatur, sondern auch der Niederschläge, müssen gerade Bergkämme und Täler räumlich ausreichend aufgelöst sein.

Mit den EURO-CORDEX Klimasimulationen stehen nun hochaufgelöste regionale Klimasimulationen in ca. zwölf Kilometer räumlicher Auflösung für Europa zur Verfügung. Am KIT/IMK-IFU wurden fünf dieser Simulationen für das AR5-Szenario RCP 4.5 (Representative Concentration Pathway) analysiert, wobei insbesondere Ergebnisse für den Gesamtalpenraum und für Südbayern näher betrachtet wurden. Im Vergleich zu Beobachtungen überschätzen die untersuchten RCMs (Regional Climate Model) den Niederschlag um teilweise mehr als 60 %.

Zusätzlich weisen die RCMs im Alpenraum einen sogenannten Cold Bias auf, das heißt, sie unterschätzen die Temperatur.

Die Analyse der Temperaturentwicklung bis zum Jahr 2100 zeigt, dass zum Beispiel für Südbayern und den bayerischen Alpenraum für das Szenario RCP 4.5 im Vergleich zum Referenzzeitraum 1970 bis 2000 mit einer Zunahme der mittleren Jahrestemperatur um ca. 2,5 °C gerechnet werden muss (Ensemblemittel der 5 RCMs). Auch die interannuelle Variabilität, also der Temperaturunterschied zwischen den einzelnen Jahren, zeigt einen leichten Trend. Hinsichtlich des Niederschlags wird für Südbayern bis 2100 eine Zunahme von rund 100 mm simuliert, begleitet von einer zunehmenden interannuellen Variabilität (siehe Abbildung 1).

Für die Wintermonate lassen alle Modelle eine Zunahme bis zu 15 % für Südbayern erwarten. Für die Sommermonate ist das Bild nicht einheitlich. Während ein Modell eine deutliche Abnahme der Niederschläge projiziert (wie es auch aus den AR4-Ergebnissen geschlussfolgert wurde), gehen die übrigen vier RCMs nur von einer geringfügigen Änderung oder sogar von einer Zunahme aus, für Bayern zum Beispiel von +20 %. Weiter zeigen die Modellergebnisse, dass für die Anzahl der Tage mit Niederschlagsmengen von mehr als 15 mm/Tag mit einer Zunahme von bis zu +40 % gerechnet werden muss.

Die Ergebnisse zeigen, dass im gesamten Alpenraum und insbesondere in Südbayern mit einer deutlichen Temperaturzunahme gerechnet werden muss und dass weiterhin substantielle Änderungen in der raumzeitlichen Niederschlagsverteilung zu erwarten sind. Die immer noch vorhandenen Defizite der neuen GCM/RCMs (General Circulation Model) in der Reproduktion des Jetztzeitklimas machen jedoch weitere Modellverbesserungen sowie die Entwicklung und Anwendung von Bias-Korrekturverfahren unerlässlich und erfordern regional besser angepasste Klimasimulationen.

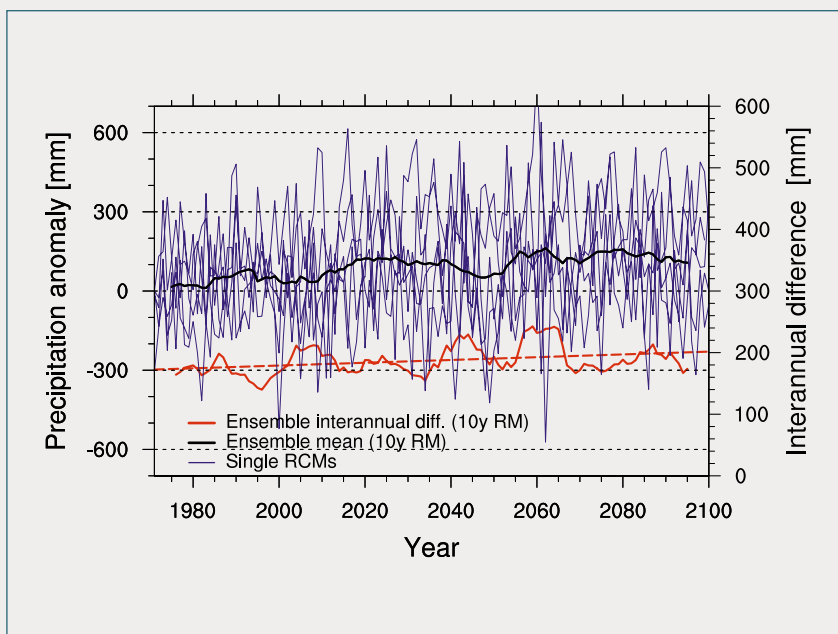


Abbildung 1:  
Erwartete Niederschlagsentwicklung für Südbayern und den bayerischen Alpenraum

---

 EXKURS FORSCHUNG
 

---

Prof. Dr. Michael Bittner<sup>1,2</sup>, Carsten Schmidt<sup>1</sup>  
und Dr. Sabine Wüst<sup>1</sup>;

<sup>1</sup>Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt,

<sup>2</sup>Universität Augsburg, Institut für Physik

---

## Wie die Grenze zum All hilft, Klimaveränderungen früh zu erkennen

Die Mesosphäre ist der Höhenbereich von etwa 50 bis 100 Kilometern über der Erdoberfläche – eine Region, die für Messungen mit Flugzeugen oder Ballonen nicht mehr zugänglich ist. Dieses Stockwerk der Erdatmosphäre zählt zu den am wenigsten erforschten Regionen unseres Planeten – vergleichbar mit den tiefsten Schichten der Ozeane.

Zentrale Fragestellungen der Mesosphärenforschung betreffen das Thema der Klimavariabilität: Anders als an der Erdoberfläche führt eine Erhöhung der Kohlenstoffdioxid-Konzentration in der Mesosphäre zu einer Abkühlung, wobei diese Abkühlung deutlich stärker ausfällt, als die Erwärmung

an der Erdoberfläche. Dadurch kann die Temperaturentwicklung in der Mesosphäre gewissermaßen als Frühindikator für Klimaveränderungen genutzt werden. Trends können ‚da oben‘ wegen der stärkeren Veränderungen schneller verlässlich erkannt werden, als es Messungen an der Erdoberfläche zulassen.

Die sogenannte Mesopause ist der Höhenbereich zwischen etwa 80 und 100 Kilometern, in dem die Atmosphäre allmählich in den Weltraum übergeht. Verschiedene chemische und photochemische Reaktionen führen dort zu einer die Erde umspannenden leuchtenden Luftschicht, zum „Airglow“ (Abbildung 1). Ursache für den Airglow sind unter anderem Hydroxyl-Moleküle (OH), welche die bei ihrer Bildung zugeführte Energie in Form von Licht im sichtbaren und infraroten Spektralbereich wieder abgeben. Mit dem bodengebundenen Infrarot-Spektrometer GRIPS kann dieses Licht erfasst und auf die Temperatur in dieser großen Höhe geschlossen werden, um so Temperaturtrends möglichst früh erkennen und verfolgen zu können. In Kooperation mit dem Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR) und der Universität Augsburg werden diese Messungen routinemäßig von der Umweltforschungsstation Schneefernhaus (UFS) auf der Zugspitze durchgeführt.

Von der UFS aus werden ähnliche Messungen weltweit im Kontext des „Network for the Detection of Mesospheric Change, NDMC“<sup>1</sup>, koordiniert.

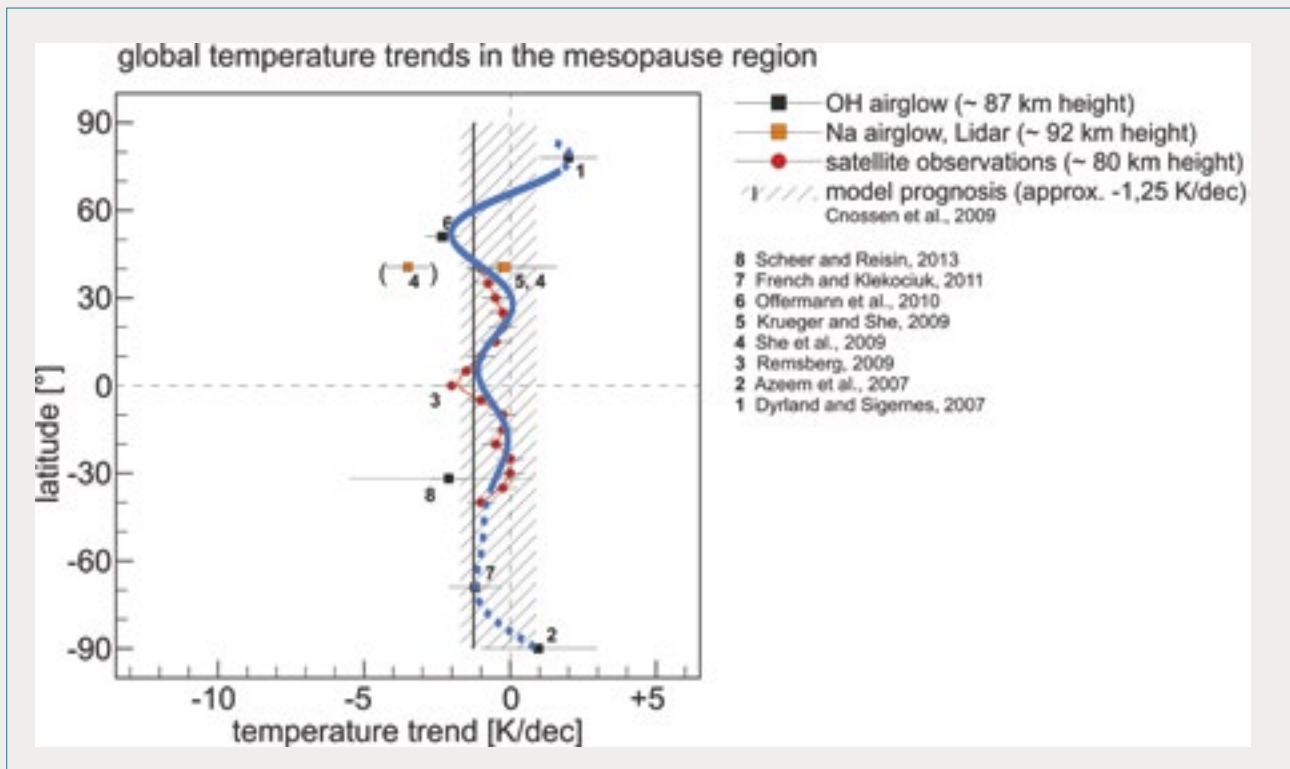



---

Abbildung 1: Eine luftleuchtende Schicht (Airglow) umgibt die Erde in etwa 85 km Höhe

---

<sup>1</sup> <http://wdc.dlr.de/ndmc>



Erste Ergebnisse von Temperaturtrends zeigen ein erstaunliches Bild (Abbildung 2). So variiert der Temperaturtrend deutlich mit der geographischen Breite. Dieses Verhalten wird gegenwärtig als ein Hinweis darauf gewertet, dass der Temperaturtrend zumindest teilweise auch durch eine Änderung der großräumigen Zirkulationsmuster verursacht ist. Es wird daher angenommen, dass sogenannte planetare Wellen langfristig ihre Aktivität ändern.

Abbildung 2: Trends der Temperatur in etwa 85 km Höhe zeigen eine Breitenabhängigkeit

#### Literatur

- [1] Arrhenius, S., 1896: On the Influence of Carbonic Acid in the Air upon the Temperature of the Ground. *Philosophical Magazine and Journal of Science*, Series 5, Volume 41, April 1896, pages 237-276.
- [2] IPCC, 2007: *Climate Change 2007: The Physical Science Basis*. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Solomon, S., D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M. Tignor and H.L. Miller (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- [3] IPCC 2013. *Klimaänderung 2013: Wissenschaftliche Grundlagen*. Zusammenfassung für politische Entscheidungsträger
- [4] IPCC, 2000: *Special Report Emissions Scenarios*. N. Nakicenovic und R. Swart (Eds.)
- [5] IPCC, 2013: *Climate Change 2013: The Physical Science Basis*. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. T. F. Stocker, D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex und P.M. Midgley (Eds.)



**3**

# **Das Klima in Bayern**



## 3.1 Was charakterisiert das „weiß-blaue Klima“

Bayern liegt in der warm-gemäßigten Klimazone im Übergangsbereich des maritimen Klimas Westeuropas zu einem kontinentalen Klima in Osteuropa. Das Wettergeschehen ist bestimmt durch die Wetterlagen der Westwindzone. Während das gemäßigte maritime Klima eher von milden Wintern, kühlen Sommern und einer hohen Luftfeuchte geprägt ist, überwiegen im gemäßigten kontinentalen Klima eher kalte, längere und schneereichere Winter, warme Sommer und eine geringe Luftfeuchte.

Neben seiner geografischen Lage wird das Klima in Bayern auch durch die unterschiedlichen Höhenlagen und die Gliederung der Mittelgebirge, des Voralpenraums und der Bayerischen Alpen bestimmt. Luv- und Leeeffekte der Berge haben Auswirkungen auf Temperatur, Bewölkung und Niederschlag. Die Geländehöhe hat einen Einfluss auf die räumliche Verteilung der Lufttemperatur, die im Allgemeinen mit der Höhe abnimmt, während der Niederschlag in gebirgigen Regionen durch Staueffekte auf der windzugewandten Seite im Allgemeinen mit der Höhe zunimmt. Ein besonders ausgeprägtes Beispiel für diesen Effekt in Bayern ist der Föhn, der im Alpenvorland auftritt und durch eine von Süden kommende, gegen die Südalpen gerichtete Strömung hervorgerufen wird. Der Alpenföhn kann zu starken Stürmen mit Spitzengeschwindigkeiten von 150 km/h führen und macht sich bis etwa zur Donau bemerkbar. Im Winter und Frühjahr kann er zu erheblichen Temperaturerhöhungen führen und damit die Schneeschmelze beeinflussen. Das Wettergeschehen Bayerns ist auch durch die eher selten auftretenden, aber durchaus sehr wetterwirksamen sogenannten Vb-Zugbahnen von Tiefdruckgebieten beeinflusst. Dabei ziehen häufig mit viel Feuchtigkeit angereicherte Tiefdruckgebiete aus dem warmen Mittelmeerraum östlich der Alpen in Richtung Norden und können zu länger anhaltenden starken Niederschlägen in Bayern führen.

Das Klima ist die Zusammenfassung der Wettererscheinungen, die den mittleren Zustand der Atmosphäre und seine Schwankungen an einem bestimmten Ort oder in einem mehr oder weniger großen Gebiet charakterisieren.

Es wird repräsentiert durch die statistischen Gesamteigenschaften (unter anderem Mittelwerte, Extremwerte, Häufigkeiten, Andauerwerte) über einen genügend langen Zeitraum. Im Allgemeinen wird ein Zeitraum von 30 Jahren zugrunde gelegt, es sind aber durchaus auch kürzere Zeitabschnitte gebräuchlich. Die folgenden Zahlen zum mittleren Klima in Bayern beziehen sich auf den Bezugszeitraum 1971–2000.

Die Jahresmitteltemperatur in Bayern im Zeitraum 1971–2000 beträgt 7,8 °C. Die Jahreszeiten zeigen deutliche, aber nicht extreme Unterschiede in den Jahreszeiten. So beträgt die mittlere Temperatur im Sommer in Bayern 16,2 °C, die mittlere Temperatur im Winter 0,5 °C. Der wärmste Monat im Mittel über den Bezugszeitraum 1971–2000 ist der Monat Juli, der kälteste Monat der Januar. An 109 Tagen im Jahr sinkt die Lufttemperatur unter Null Grad Celsius.

Die durchschnittlichen jährlichen Niederschlagssummen liegen bei 945 mm. Die regionalen Unterschiede sind dabei sehr groß. So steigen die Jahressummen in der Alpenregion auf über 1800 mm pro Jahr. Im Mittel ist der Juli der Monat mit den höchsten Monatsniederschlägen (111,2 mm), der Februar der Monat mit dem geringsten Monatsniederschlag (56,1 mm). Die mittlere Sonnenscheindauer beträgt 1586 Stunden.



**In Kapitel 4** können im Folgenden Angaben zu Klimaänderungen (v. a. Niederschlag oder Temperatur) für Vergangenheit und Zukunft genannt sein, die von den hier genannten abweichen. Dies liegt darin begründet, dass in den unterschiedlichen Projekten, in denen diese Aussagen ermittelt wurden, unterschiedliche Grundlagen zu Messdaten oder Projektionsgrundlagen bzw. unterschiedliche Zeiträume und räumliche Abgrenzungen verwendet wurden.

## 3.2 Wetterlagen

Das Wettergeschehen in Bayern wird, neben lokalen Effekten, durch die Wetterlagen der Westwindzone bestimmt. Untersuchungen der Großwetterlagen im 20. Jahrhundert [3] zeigen, dass einige Großwetterlagenhäufigkeiten sehr stark von Jahrzehnt zu Jahrzehnt variieren, andere nur wenig. So zeigen die zyklonalen Westlagen im Winter Phasen höherer und niedrigerer Werte, mit hohen Werten im Zeitraum 1991–2000. Untersuchungen von KLIWA [4][5] haben gezeigt, dass die Wahrscheinlichkeit eines trockenen, heißen Sommers oder einer extrem trockenen Vegetationsperiode in Süddeutschland im Vergleich zum Zeitraum vor den siebziger Jahren des letzten Jahrhunderts bereits um mehr als das Zweifache zugenommen hat. Aus den Ergebnissen dreier regionaler Klimaprojektionen wurde der Schluss gezogen, dass insbesondere in der zweiten Hälfte des 21. Jahrhunderts mit einem deutlichen zusätzlichen Anstieg der Trocken- und Niedrigwasserperioden im Sommer gerechnet werden muss.

Die Häufigkeit des Auftretens von Tiefdruckgebieten, die aus dem Mittelmeerraum in Richtung Norden ziehen und zu länger anhaltenden Niederschlägen in Bayern führen können („Vb-Zugbahnen“) wurde für die Vergangenheit analysiert [6]. Die Ergebnisse für den Zeitraum 1961–2002 zeigen, dass die seltenen, aber durchaus auch sehr wetterwirksamen Ereignisse am häufigsten im April und Herbst auftreten. Im Mittel traten drei bis vier Ereignisse im Jahr auf. Ein Trend wurde in dem betrachteten Zeitraum nicht gefunden. Weiterführende Untersuchungen zum Zusammenhang zwischen Großwetterlagen und großflächigen Starkniederschlägen auch im Hinblick auf mögliche zukünftige Entwicklungen werden in dem bayerisch-österreichischen Forschungsprojekt WETRAX durchgeführt (WETRAX: Auswirkungen des Klimawandels auf großflächige Starkniederschläge in Süddeutschland und Österreich: Analyse der Veränderungen von hydrologisch relevanten Zugbahnen und Wetterlagen).

Die wetterlagenbezogenen Auswertungen des DWD zeigen im Winter für den Zeitraum 2071–2100 für Deutschland ein vermehrtes Auftreten von Wetterlagen, die zu nasserem Verhältnissen beitragen [2]. Ursache ist ein erhöhter Feuchtigkeitstransport maritim geprägter Luftmassen aus dem atlantischen Raum infolge einer Zunahme von Westwetterlagen. Gleichzeitig nehmen die trockeneren Ostwetterlagen (Hochdrucklagen) leicht ab. Auch Südwestwetterlagen, die ebenfalls mit sehr hohen Gebietsniederschlägen verbunden sind, werden häufiger auftreten. Die Südwestwetterlagen werden gleichzeitig zu meist sehr milden Temperaturen führen. Ferner wird eine erhöhte Zufuhr von Warmluft aus südlichen Teilen Europas erwartet, die ebenfalls mildere Wintertemperaturen bewirken wird.

Auch im Sommer werden sich die Wetterlagen und damit die klimatischen Parameter verändern: Erwartet wird eine Zunahme von antizyklonalen Westwetterlagen (Hochdruckeinfluss), die häufig niederschlagsarm oder niederschlagsfrei sein werden. Gleichzeitig nehmen die mit höheren Niederschlägen verbundenen zyklonalen (Tiefdruckeinfluss) Wetterlagen insgesamt ab.

## EXKURS FORSCHUNG

Prof. Dr. Michael Bittner<sup>1,2</sup>, Lisa Küchelbacher<sup>2</sup>,  
Carsten Schmidt<sup>1</sup> und Dr. Sabine Wüst<sup>1</sup>;

<sup>1</sup>Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt,

<sup>2</sup>Universität Augsburg, Institut für Physik

## Änderung der Aktivität planetarer Wellen in der oberen Mesosphäre

Von besonderem Interesse im Kontext des Klimawandels ist unter anderem die Frage, ob und ggf. wie sich die großräumigen Strömungssysteme in der Atmosphäre verändern. In mittleren Breiten werden diese Strömungssysteme durch sogenannte planetare Wellen dominiert: Windströmungen entlang eines Breitenkreises (wie z. B. der Jet Stream in der oberen Troposphäre oder der Polar Night Jet in der mittleren Atmosphäre) werden durch diese großräumigen und den Planeten umspannenden Wellen „ausgebeult“. Es entstehen sogenannte „Keile und Tröge“ in der Strömung, die letztlich die Zugbahn von Hoch- und Tiefdruckgebieten – und damit unser Wettergeschehen

maßgeblich steuern. Ändert sich die Wellenaktivität langfristig, so hat das unmittelbar Einfluss auch auf unser Klima, und dort zum Beispiel auf Extremwetterereignisse wie Starkniederschläge oder Trockenperioden. Ein Verständnis der Variabilität planetarer Wellen ist also auch für die Prognose solcher Extremwittersituationen von Interesse.

In den oberen Stockwerken der Atmosphäre können planetare Wellen – vergleichbar etwa der Wirkung eines Vergrößerungsglases – besser studiert werden als in den unteren Atmosphären-Etagen, da dort der Luftdruck viel kleiner ist. In 100 km Höhe beträgt er nur noch etwa ein Millionstel des Luftdrucks an der Erdoberfläche. Tägliche Messungen der Temperatur in etwa 85 km Höhe, wie sie mit dem GRIPS-Instrument von der Umweltforschungsstation Schneefernerhaus (UFS), von Oberpfaffenhofen und von Wuppertal aus routinemäßig durchgeführt werden, lassen auf die Aktivität planetarer Wellen schließen. So zeigt die Abbildung 1, dass diese Aktivität vergleichsweise starken Schwankungen unterliegt, auf Skalen sowohl im Bereich von zwei bis drei Jahren als auch im dekadischen Bereich. Es wird vermutet, dass die langfristigen Änderungen mit der magnetischen Aktivität der Sonne in Verbindung stehen könnten. Dieses Thema ist Gegenstand der aktuellen Forschung.

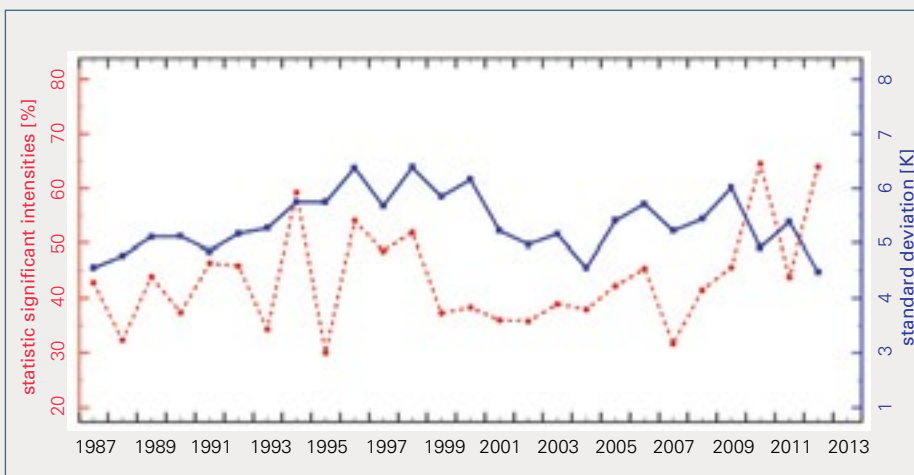


Abbildung 1: Mittlere jährliche Aktivität planetarer Wellen über Deutschland. Blaue Kurve: Standardabweichung der Temperaturfluktuationen nach Bereinigung saisonaler Komponenten. Rote Kurve: Aktivität planetarer Wellen im Periodendauerbereich von 3 – 20 Tagen (aktualisiert nach [1], empfangen und prozessiert durch DLR e. V.).

[1] Höppner & Bittner (2007): J. Atmos. Sol. Terr. Phys., 2007, doi:10.1016/j.jastp.2006.10.007 und Bittner et al., 2000, JGR 105, 2045-2058)

## EXKURS FORSCHUNG

Dr. Sabine Wüst<sup>1</sup>, Ricarda Kramer<sup>1</sup> und Prof. Dr. Michael Bittner<sup>1,2</sup>;

<sup>1</sup> Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt,

<sup>2</sup> Universität Augsburg; Projekt: „CESAR“

## Beitrag zur Verbesserung der Prognosegüte von Vb-Wetterlagen

Stürme gehören zu den weltweit schwerwiegendsten Naturgefahren. Für den Alpenraum und die nordöstlich angrenzenden Gebiete zählt besonders die so genannte „Vb-Lage“ zu den Sturmsystemen mit erheblichem Schadenspotential, da diese Wetterlagen häufig mit Starkniederschlägen verbunden sind und zu Hochwassern führen, wie beispielweise 2013 in weiten Teilen Deutschlands. Da die mittelfristige Vorhersage der Zugbahn und der Intensität von Vb-Zyklonen als unsicher gilt, ist eine Verbesserung dieser Prognose insbesondere durch engmaschige Informationen über die Änderung des Energieinhaltes eines solchen Tiefdruckgebietes (Zyklon) erforderlich.

Zyklone strahlen aufgrund von Konvektionsströmungen und Rotation sowohl Schwere- als auch Infraschallwellen in die Atmosphäre ab. Diese Wellen transportieren dabei über weite Strecken Energie und Impuls. Physikalisch gesehen, muss die Änderung des Energieinhaltes der von einem Zyklon abgestrahlten atmosphärischen Wellenfelder im Zusammenhang mit der Änderung des Energieinhaltes des Zyklons selbst stehen.

Im Projekt CESAR, gefördert vom Bayerischen Staatsministerium für Umwelt und Verbraucherschutz, wurde untersucht, ob die Änderung des Energieinhaltes (der sogenannte „differentielle

Energieinhalt“) eines Zyklons durch die Beobachtung der von ihm ständig abgestrahlten atmosphärischen Wellen erfasst werden kann.

Für die Untersuchung dieses Mechanismus wurde eine Vielzahl von Daten (meteorologische Daten, auch von Radiosonden, Spektrometern und Satelliten) verwendet. Betrachtet wurden ausgeprägte Tiefdrucksysteme in Europa.

Zur Identifikation von Infraschallsignaturen in Spektrometer basierten Zeitreihen und deren Zuordnung zu ihren wahrscheinlichen Quellen wurde ein Mustererkennungsverfahren entwickelt.

Es konnte gezeigt werden, dass Tiefdruckgebiete Schwerewellen und Infraschall abstrahlen. Die Wellenfelder können sich von der Strato- bis in die Mesosphäre ausbreiten. Der mit Schwerewellen verbundene Impulsfluss wurde quantifiziert. Er erreicht bei einem starken Tiefdruckgebiet, wie dem 2011 im Mittelmeer beobachteten Medicane (siehe Abbildung 1) etwa den fünffachen Wert verglichen mit ruhigen Wettersituationen.

Die Integration dieser Ergebnisse in Wettermodelle und die Analyse der Auswirkungen auf ihre Prognosegüte ist Gegenstand aktueller Forschungsarbeiten.

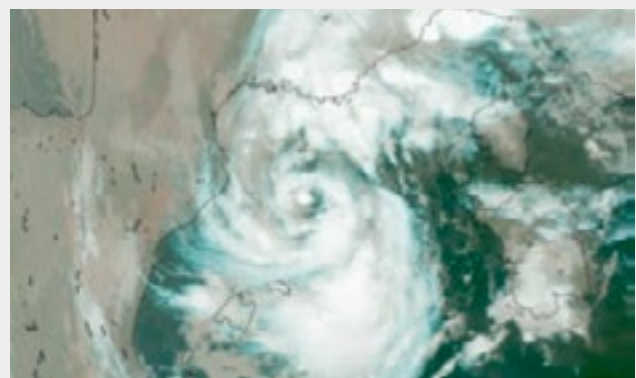


Abbildung 1: Medicane nordöstlich der Balearen, 08.11.2011, (Quelle: [http://wdc.dlr.de/data\\_products/CLOUDS/apollo/](http://wdc.dlr.de/data_products/CLOUDS/apollo/), empfangen und prozessiert durch DLR e. V.)

## 3.3 Temperatur und Kenntage

### 3.3.1 Entwicklung der Lufttemperatur in der Vergangenheit

Die Lufttemperatur beschreibt die Temperatur in Bodennähe, die in einer Höhe von 2 m über Grund gemessen wird.

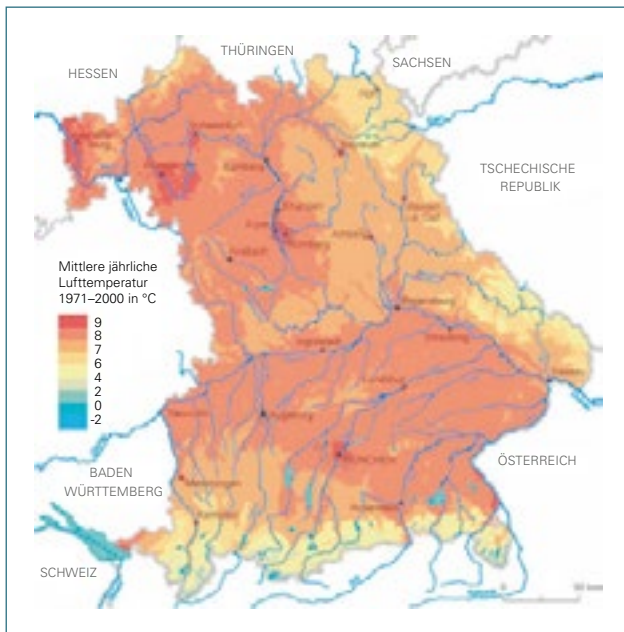


Abbildung 3.3\_1: Regionale Verteilung der Lufttemperatur in Bayern, 1971–2000.

Im Zeitraum 1971–2000 betrug das Flächenmittel der Lufttemperatur im Jahresmittel in Bayern 7,8 °C. Infolge ihrer Höhenabhängigkeit variieren die Jahresmitteltemperaturen über der Landesfläche von Bayern sehr stark, von knapp 10 °C in Unterfranken (200 m ü. NN) über 6 °C im Allgäu bis ca. –5 °C auf der Zugspitze in knapp 3000 m Höhe (Vergleich Abbildung 3.3\_1). In den meisten Regionen ist der wärmste Monat der Juli, während der kälteste Monat überwiegend der Januar ist. Regional wirken sich noch verschiedene weitere Faktoren auf die Temperatur aus. So sind Becken- oder Tallagen sowie die Wärmeinseln von Großstädten wärmebegünstigend, große Waldgebiete hingegen haben einen kühlenden Effekt.

Die mittlere Jahrestemperatur in Bayern ist im Zeitraum 1881 bis 2014 um 1,4 °C angestiegen (siehe Abbildung 3.3\_2). Deutlich ist auch der Temperaturanstieg etwa seit dem Ende der 1980er Jahre. So liegen neun der zehn wärmsten Jahre Bayerns im Zeitraum ab 1990. Betrachtet man die einzelnen Jahreszeiten sehen die Trends ähnlich aus mit einem leicht höheren Wert im Frühling und einem um 0,2 °C niedrigeren Wert im Winter. Untersuchungen im Rahmen von KLIWA 2011 [5] zeigen für den Zeitraum 1931 bis 2010 deutlichere Unterschiede zwischen den hydrologischen Jahreszeiten. So ist der Gesamttrend im hydrologischen Winterhalbjahr mit 1,1 bis +1,4 °C/80 Jahre stärker ausgeprägt als im Sommerhalbjahr (+0,6 bis +1,0 °C/80 Jahre). Eine Aktualisierung der Trendauswertungen im Rahmen des KLIWA-Monitorings bis zum Jahr 2015 ist im Vorhaben KLIWA vorgesehen.

In Bayern ist der Trend des Jahresmittels der Lufttemperatur etwas höher gegenüber dem Trend für Deutschland, der bei 1,3 °C liegt. Im Vergleich ist dazu in Abbildung 3.3\_3 der Temperaturanstieg im globalen Mittel im Zeitraum 1881 bis 2014 und in Deutschland dargestellt, relativ zur Periode 1961 bis 1990. Der Temperaturanstieg in Deutschland seit 1881 ist etwas stärker als im globalen Mittel.

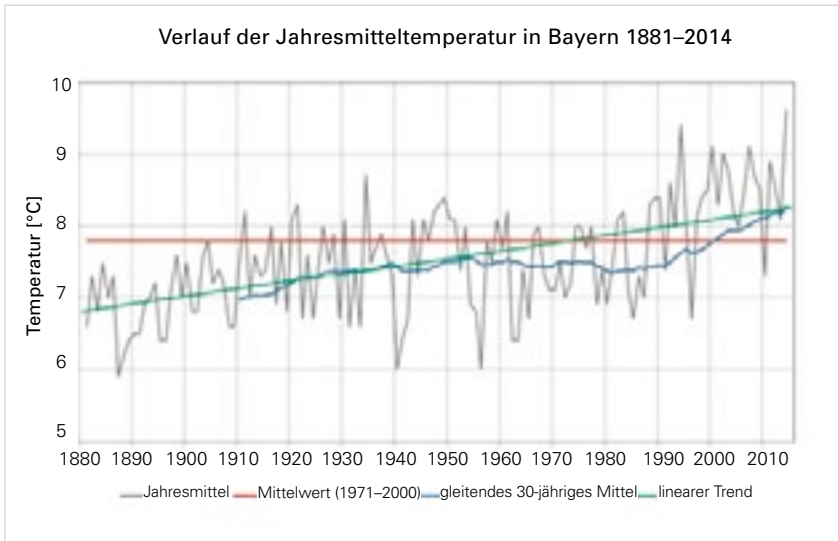


Abbildung 3.3\_2: Verlauf der Jahresmitteltemperatur in Bayern 1881 bis 2014.

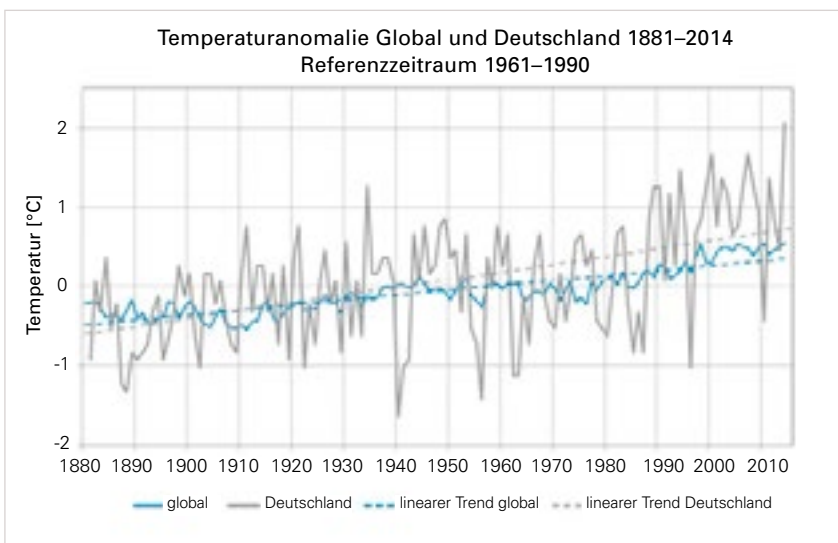


Abbildung 3.3\_3: Abweichungen der globalen Jahresmitteltemperatur zur internationalen Referenzperiode 1961–1990 gemäß der Analysen der Climatic Research Unit (CRUT4-Datensatz) der University of East Anglia (blaue Kurven) im Vergleich zum Flächenmittel von Deutschland (graue Kurven). Die durchgezogenen Kurven zeigen dabei jeweils die Werte der Einzeljahre, die gestrichelten Kurven den linearen Trend im Gesamtzeitraum.

### 3.3.2 Entwicklung der Lufttemperatur in der nahen (2021–2050) und fernen Zukunft (2071–2100)

Für die Projektion des zukünftigen Klimas für Deutschland auf regionaler Skala wurden Simulationsläufe des im 6. europäischen Forschungsrahmenprogramm geförderten Projekts „ENSEMBLES“ verwendet. Für die Ensemblebildung wurden regionale Klimaprojektionen herangezogen, die auf der Grundlage des Emissionsszenarios A1B (vgl. Kapitel 2.2) und bis zum Ende des 21. Jahrhunderts gerechnet wurden. Es liegt somit ein Ensemble von 19 regionalen Klimaprojektionen vor, das ausgewertet wurde, um die gesamte Bandbreite der Modellergebnisse für die Zukunft zu berücksichtigen. Regional aufbereitete Aussagen für 9 Regionen in Bayern auf Basis von 10 Klimaprojektionen sind in regionalen Klimaberichten des Landesamts für Umwelt verfügbar [1a], [1b].

Zur Ableitung interpretierbarer Spannbreiten wurden die 15 %- und 85 %-Quantile des Klimaprojektionsensembles flächenhaft bestimmt. Diese können grundsätzlich wie folgt interpretiert werden:

- 15 %-Quantil: Mit einer 85 %igen Wahrscheinlichkeit werden die dargestellten Änderungssignale im Ensemble überschritten; das heißt 85 % der Projektionen prognostizieren höhere und 15 % die dargestellten oder niedrigere Änderungsraten.
- 85 %-Quantil: Mit einer 85 %igen Wahrscheinlichkeit werden die dargestellten Änderungssignale im Ensemble nicht überschritten, das heißt 85 % des Ensembles prognostizieren die dargestellten oder niedrigere Änderungsraten und 15 % prognostizieren höhere Änderungsraten.

Der Bereich zwischen den gewählten unteren und oberen Schranken umfasst somit 70 % des betrachteten Ensembles ohne Berücksichtigung statistischer Ausreißer.

Die Entwicklung der mittleren Lufttemperatur im Jahresmittel zeigt einen ansteigenden Trend in Bayern. So wird im Mittel für Bayern in der nahen Zukunft ein Temperaturanstieg zwischen +1 und +2 °C projiziert, der sich in der fernen Zukunft auf +2 bis +4,5 °C verstärkt. Dabei zeigen die einzelnen Jahreszeiten ähnliche Änderungen.

### 3.3.3 Entwicklung der Kenntage in der Vergangenheit

Besonders warme oder kalte Perioden eines Jahres werden durch die Temperaturkenntage charakterisiert. Die hier aufgeführten Kenntage stellen die Summe aller Tage pro Jahr dar, an denen eine definierte maximale Temperatur überschritten oder eine vorgegebene minimale Temperatur unterschritten wird. Die Temperaturkenntage sind wie folgt definiert:

- Eistag: Ein Tag, an dem das Maximum der Lufttemperatur unterhalb des Gefrierpunktes (unter 0,0 °C) liegt, das heißt es herrscht Dauerfrost.
- Frosttag: Ein Tag, an dem das Minimum der Lufttemperatur unterhalb des Gefrierpunktes (unter 0,0 °C) liegt.
- Sommertag: Ein Tag, an dem das Maximum der Lufttemperatur mindestens 25,0 °C beträgt.
- Heißer Tag: Ein Tag, an dem das Maximum der Lufttemperatur mindestens 30,0 °C beträgt.

Die Kenntage der Temperatur zeigen wie die Lufttemperatur eine starke Abhängigkeit von der Höhe.

Im Mittel gibt es in Bayern 30 Tage mit Dauerfrost (Eistage), die in den Höhenlagen der Mittelgebirge und im Alpenbereich auf Werte über 60 Tage ansteigen (Tabelle 3.3\_1 und Abbildung 3.3\_4).



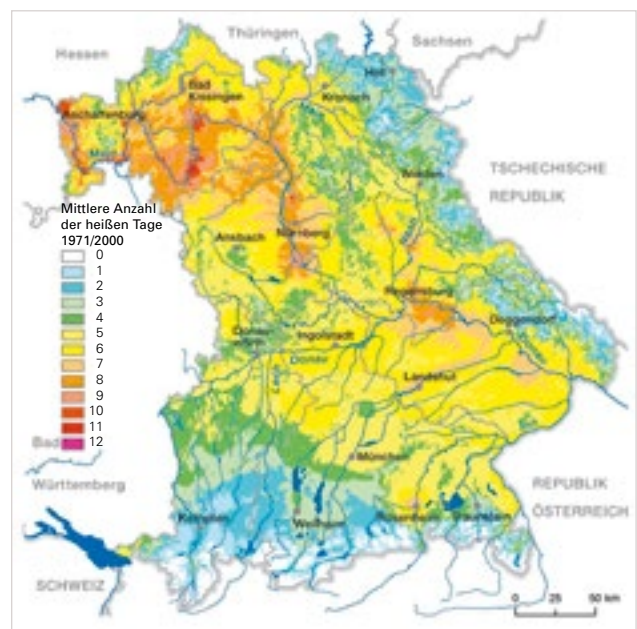
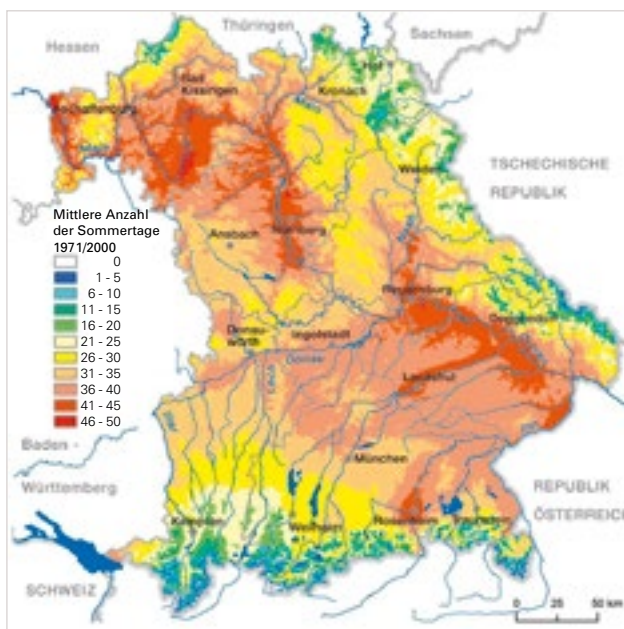
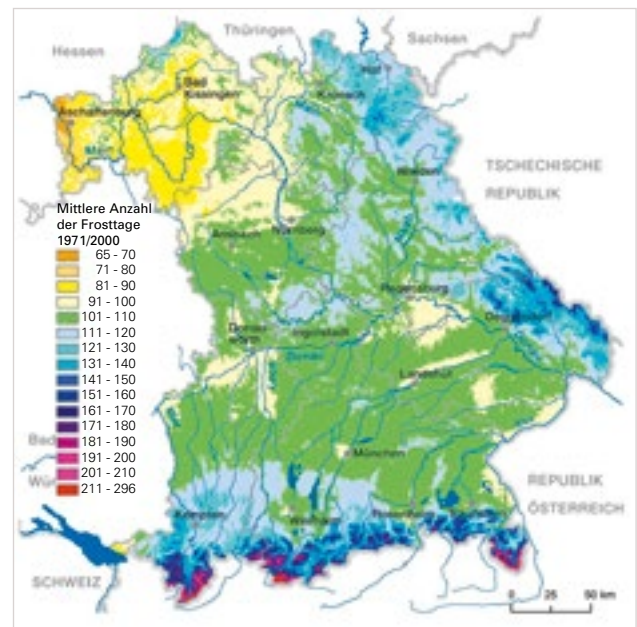
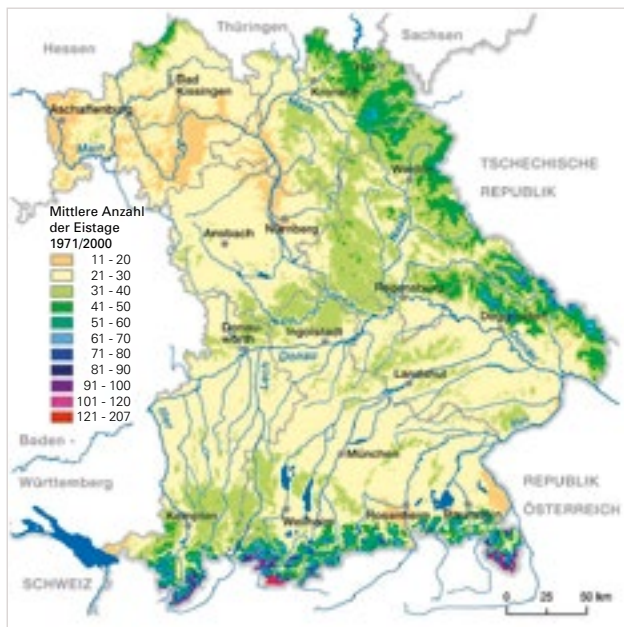


Abbildung 3.3\_4: Regionale Verteilung der Kenntage in Bayern, 1971–2000, links oben: Eistage, rechts oben: Frosttage, links unten: Sommertage, rechts unten: Heiße Tage.

Bayern weist im Mittel 109 Frosttage im Zeitraum 1971–2000 auf. Regional zeigen sich dabei große Unterschiede. So hat der Nordwesten Bayerns mit Werten unter 90 Tagen die geringste Anzahl an Frosttagen, während große Teile Südbayerns und die höheren Regionen Nordbayerns mehr als 100 bis 120 Tage Frost pro Jahr im Mittel aufweisen (siehe Abbildung 3.3\_4). Noch höhere Werte finden sich dann in den Hochlagen der Mittelgebirge und in der Alpenregion.

Umgekehrt verhält es sich mit den Sommertagen. Mit mehr als 45 Sommertagen regional im westlichen Maingebiet (siehe Abbildung 3.3\_4), treten dort sowie im Bodenseebereich die höchsten

Werte auf. Im Mittel sind dies etwa 32 Tage mit Sommertemperaturen (Tabelle 3.3\_1). Im Vergleich zum Zeitraum 1971–2000 haben die Frosttage abgenommen und die Sommertage zugenommen. Den Trend zu zunehmenden Sommertagen zeigt auch die Zeitreihe in Abbildung 3.3\_5.

Der Kennwert „Heiße Tage“ stellt mit einer Auszählung der jährlichen Tage mit einer Maximumtemperatur von mindestens 30 °C eine Maßzahl für ein „extremes Wetter“ dar. Die mittlere Anzahl der Heißen Tage in Bayern liegt bei etwa 5 Tagen pro Jahr.

	<b>Bayern 1971–2000</b>	<b>Minimum 1951–2014</b>	<b>Maximum 1951–2014</b>
Heiße Tage	5	0 (1956)	24 (2003)
Sommertage	32	17 (1978)	76 (2003)
Frosttage	109	76 (1994)	138 (1973)
Eistage	30	9 (2014)	68 (1963)

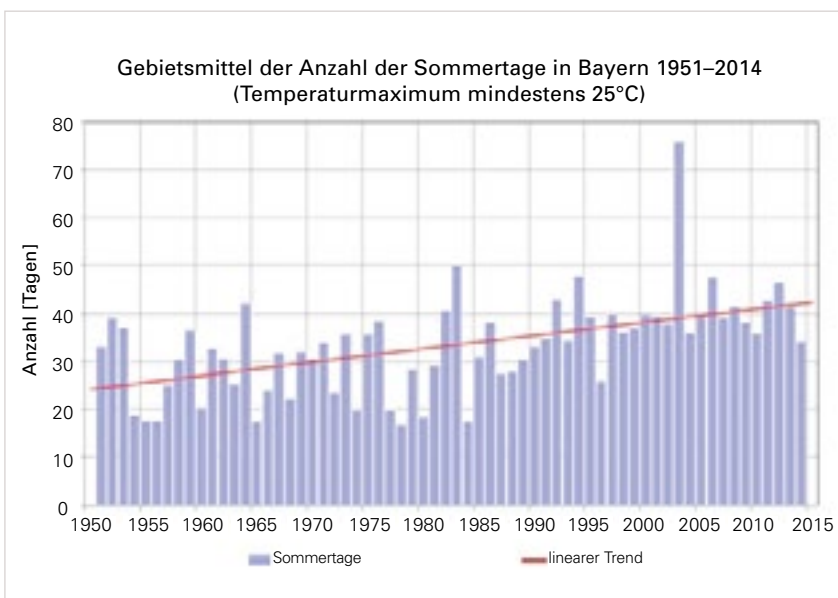


Tabelle 3.3\_1: Mittlere, minimale und maximale Anzahl Kenntage in Bayern, 1951–2014.

Abbildung 3.3\_5: Zeitlicher Verlauf der Sommertage im Zeitraum 1951 bis 2014.

### 3.3.4 Entwicklung der Kenntage in der nahen (2021–2050) und fernen Zukunft (2071–2100)

Mit der projizierten Zunahme der Lufttemperatur bis zum Ende des 21. Jahrhunderts nehmen generell die kalten Tage im Mittel über die beiden betrachteten 30-jährigen Zeiträume ab und die warmen Tage zu.

Das Modellensemble zeigt für die Heißen Tage in der nahen Zukunft eine Spannweite von keiner Veränderung bis zu einer jährlichen Zunahme von 14 Tagen (10 Tagen in höheren Lagen) und einer Änderung von 2 bis über 30 Tagen in der fernen Zukunft.

Die Sommertage zeigen in der nahen Zukunft in Südbayern eine Zunahme zwischen 3 und 21 Tagen, in Nordbayern von indifferenten Werten bis 15 Tagen. In der fernen Zukunft liegt die Spannweite der Werte zwischen 9 und 51 Tagen, in Nordbayern und im Alpenraum bis 45 Tagen.

Entsprechend nehmen die Frosttage in der nahen Zukunft zwischen 12 und 36 Tagen ab und in der fernen Zukunft zwischen 36 bis 60 Tagen, in den Höhenlagen der Mittelgebirge und im Alpenraum auch bis 68 Tage.

Tage mit Dauerfrost (Eistage) nehmen in der nahen Zukunft zwischen 9 und 21 Tage ab und 9 bis 33 Tage in der fernen Zukunft.



## 3.4 Niederschlag

### 3.4.1 Entwicklung des Niederschlags in der Vergangenheit

Die durchschnittlichen jährlichen Niederschlags-summen liegen in Bayern bei 945 mm (Bezugszeitraum 1971–2000). Die regionalen Unterschiede sind dabei sehr groß. Die niedrigsten Werte finden sich in Mittel- und Nordwestbayern mit verbreitet Werten zwischen 600 und 700 mm, im Raum Würzburg-Schweinfurt auch unter 600 mm (Abbildung 3.4\_1). Niederschlagsreiche Gebiete sind die Mittelgebirge (Spessart, Jura, Fichtelgebirge, Bayerischer Wald) und das Alpenvorland mit den Alpen. So steigen die Jahressummen in der Alpenregion auf über 1800 mm pro Jahr, also auf die mehr als dreifache Menge gegenüber den trockensten Regionen Bayerns. Im Mittel ist der Juli der Monat mit den höchsten Monatsniederschlägen (111,2 mm), der Februar der Monat mit dem geringsten Monatsniederschlag (56,1 mm).

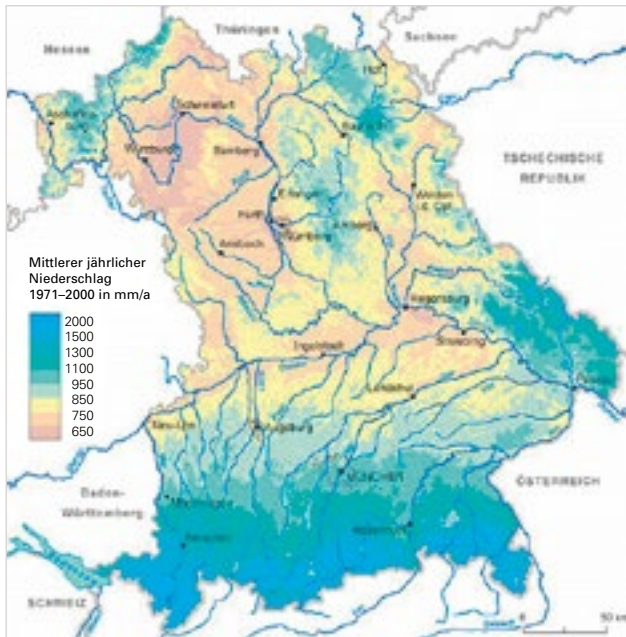


Abbildung 3.4\_1: Regionale Verteilung des mittleren Jahresniederschlags in Bayern, 1971–2000.

Der Jahresniederschlag in Bayern hat im Zeitraum 1881–2014 um gut 10 % zugenommen (Abbildung 3.4\_2). Dabei ist die Veränderung im Jahr nicht gleichmäßig. Die stärksten Zunahmen zeigen sich im Winter mit 28 % (Abbildung 3.4\_3), während im Sommer die mittleren Niederschläge keinen Trend aufweisen (Frühling: 12,6 %; Herbst: 8,7 %). In den Monaten November bis März haben die Niederschläge um Werte zwischen 23 % und 34 % zugenommen, das heißt auch das hydrologische Winterhalbjahr weist eine Zunahme der Niederschläge auf.

Im Rahmen des KLIWA Monitorings [5] wurden die Starkniederschläge (halbjährliche Maximalwerte der ein- bzw. fünftägigen Gebietsniederschlagshöhe) untersucht. Im hydrologischen Winterhalbjahr findet man im Zeitraum 1932–2010 in fast ganz Bayern überwiegend zunehmende maximale eintägige Gebietsniederschlagshöhen (Dauerstufe D=1). Die höchsten Zunahmen (hoch signifikant) finden sich im nordöstlichen Bayern, dabei liegen im oberen Maingebiet und den östlich angrenzenden Gebieten von Saale und Naab die Zunahmen zwischen 34 % und 44 %. Im Sommerhalbjahr haben im gesamten südwestlichen Bereich von Bayern die maximalen eintägigen Gebietsniederschlagshöhen zugenommen, besonders stark zum Beispiel in dem Gebiet Iller/Lech mit bis zu +19 %. Stärkere Abnahmen findet man dagegen im Unteren Maingebiet (bis maximal –25 %) und in der Mitte von Bayern. Alle diese Trends sind aber, mit Ausnahme von wenigen Gebieten, nicht signifikant.

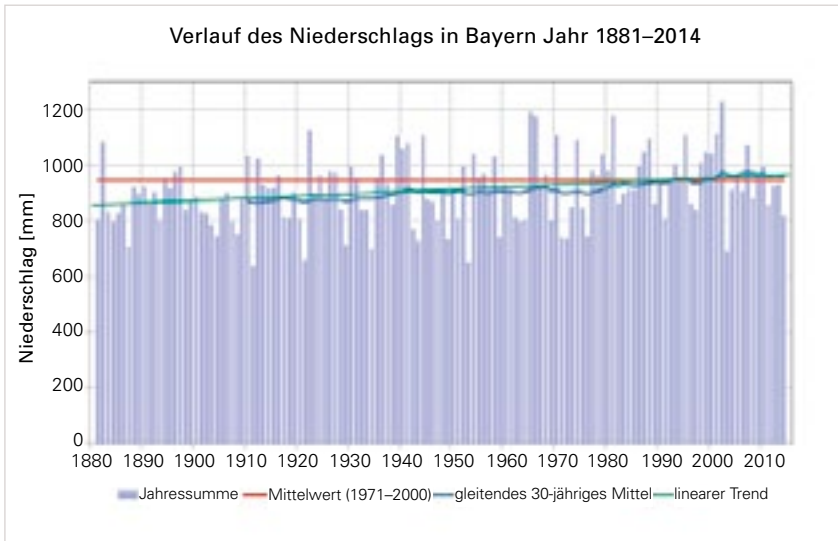


Abbildung 3.4\_2: Zeitreihe der Jahressummen des Niederschlags im Zeitraum 1881–2014

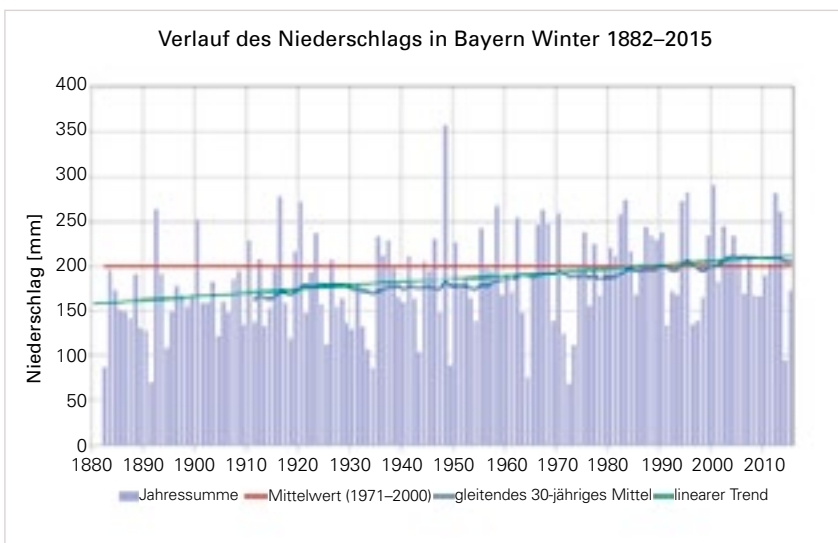


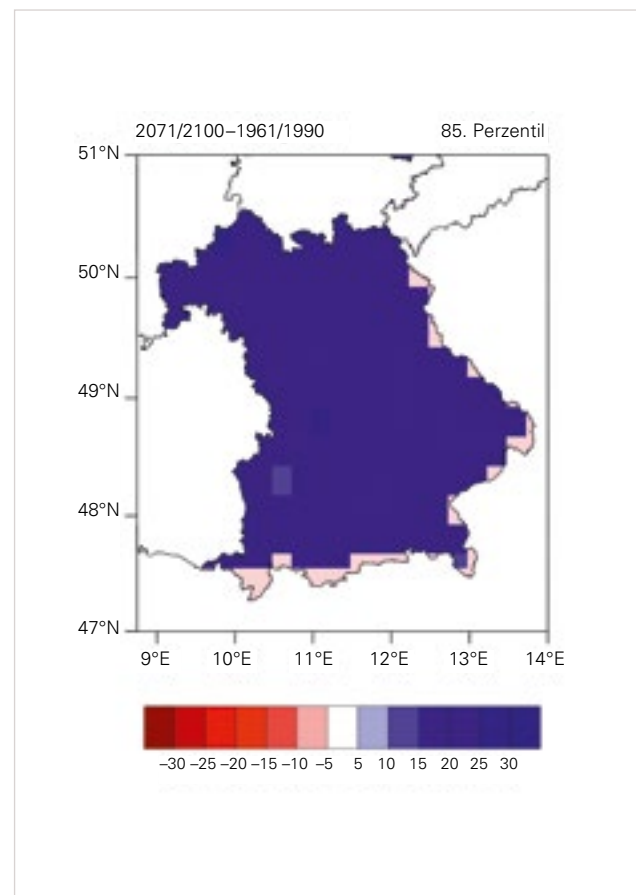
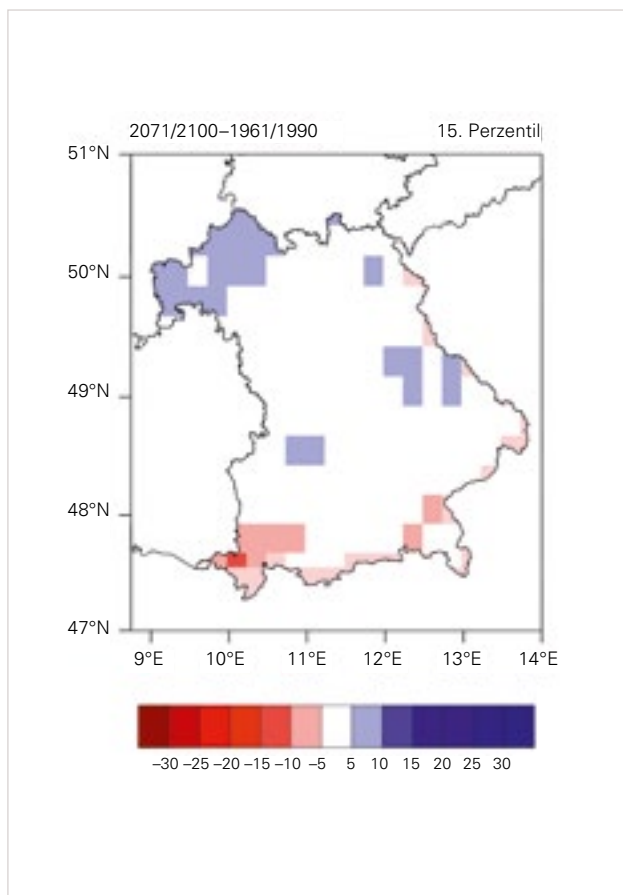
Abbildung 3.4\_3: Zeitreihe der Niederschlagssummen im Winter (Dezember, Januar, Februar) 1882–2015

### 3.4.2 Entwicklung des Niederschlags in der nahen (2021–2050) und fernen Zukunft (2071–2100)

Für den Jahresniederschlag ergibt sich eine Tendenz zur Zunahme für Nordbayern und die nördlichen Regionen Südbayerns in der fernen Zukunft (Abbildung 3.4\_4). Dabei setzen die Ensembleauswertungen der Klimamodelle auch die bereits beobachteten Unterschiede in den Änderungen zwischen Winter und Sommer fort, mit einer Tendenz zur Zunahme der Winterniederschläge und einer Abnahme der Sommerniederschläge.

In der nahen Zukunft bewegen sich die Winterniederschläge in einem Bereich von  $-5\%$  (bezogen auf den Zeitraum 1961–1990) bis  $+15\%$ . In der fernen Zukunft liegen die Werte zwischen  $-10\%$  und  $+25\%$ .

In der nahen Zukunft zeigen die Sommerniederschläge sowohl Zu- als auch Abnahmen, die in der Größenordnung von  $-10\%$  bis  $+10\%$  liegen, regional auch bis  $-15\%$  und  $+15\%$ . Für die ferne Zukunft reicht die Spanne von indifferenten Werten bis zu einer Niederschlagsabnahme bis  $-30\%$ . In den Übergangsjahreszeiten zeigen sich keine signifikanten Änderungen.



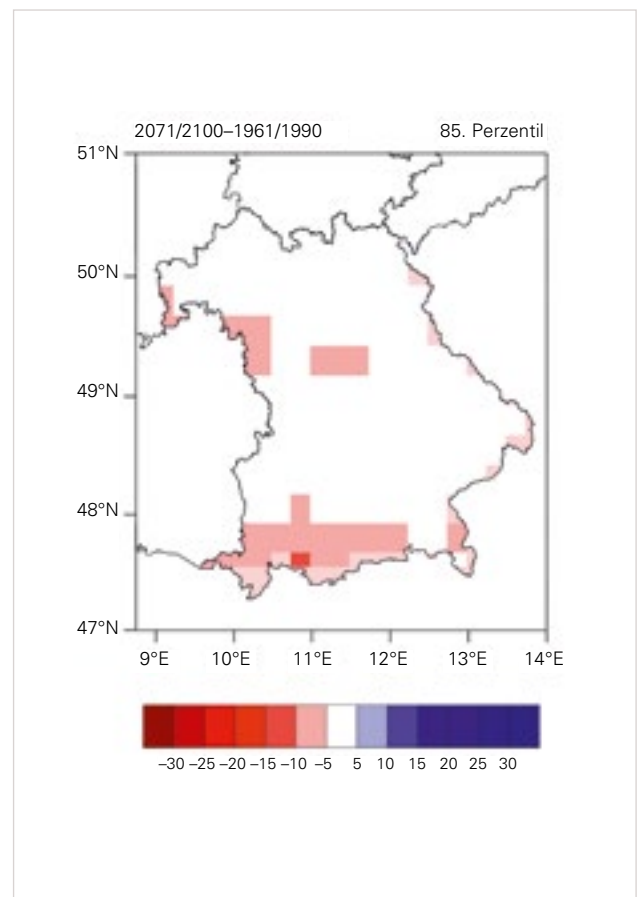
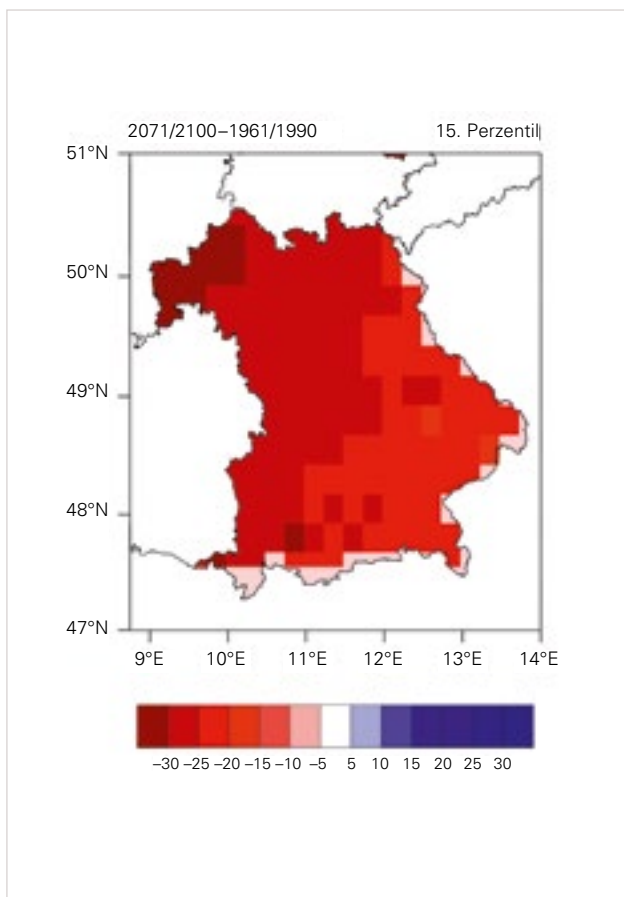


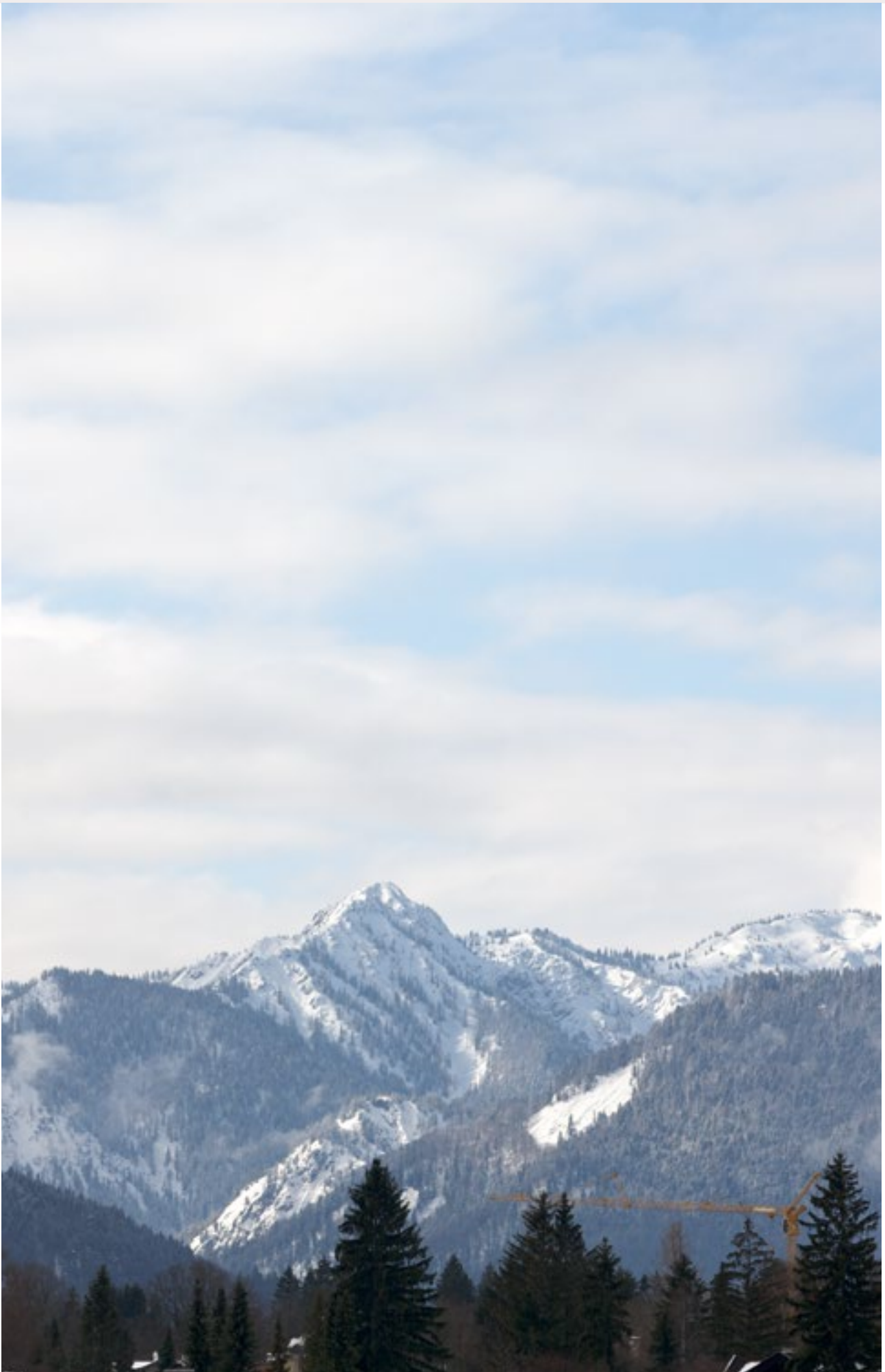
Abbildung 3.4\_4: Projizierte relative prozentuale Änderung (Bezugszeitraum 1961–1990) des mittleren Winterniederschlages (links) und des Sommer-  
niederschlages (rechts), Mittel über den Projektionszeitraum 2071–2100.  
Die horizontale Auflösung der Rasterwerte beträgt 25 km x 25 km.

## 3.5 Schneebedeckung

Vom Deutschen Wetterdienst (DWD) wurde die Schneedeckenentwicklung für den Zeitraum 1951/52 bis 2010/11 auf der Basis der naturräumlichen Gliederung Deutschlands analysiert. Es zeigt sich, dass die untersuchten Schneedeckenparameter durch eine hohe raumzeitliche Variabilität gekennzeichnet sind. Bayern erstreckt sich ganz oder teilweise über die Naturräume östliches Mittelgebirge, südwestdeutsches Mittelgebirge/Stufenland, Alpenvorland und die Alpen. Für alle untersuchten Naturräume wurden Abnahmen der Schneedeckendauer (Anzahl der Schneedeckentage im Zeitraum 01.09. bis 31.08.) zwischen 7 und 9 Tagen diagnostiziert. In den östlichen Mittelgebirgen und im Alpenvorland wurden dabei an fast 40 % der verfügbaren Stationen signifikant negative Trends identifiziert, in den Alpen sogar an mehr als 55 % der Stationen. Die Trends im Südwestdeutschen Mittelgebirge/Stufenland lassen sich nicht sichern. Die Schneedeckenzeit (Zeitspanne vom ersten bis zum letzten Schneedeckentag) zeigt ebenfalls in der Mehrheit der Naturräume in Bayern signifikant negative Trends. Der stärkste Trend ist mit –11 Tagen in den Alpen ausgeprägt und dort an mehr als 90 % der Stationen gesichert. Für den maximalen Wert der Schneedeckenhöhe als Extremwert-Indikator begrenzt sich der Nachweis einer signifikanten Abnahme auf diesen Naturraum und beträgt dort –19 cm. Keine signifikanten Trends waren für die Winterdecke (längste, ununterbrochene Schneedeckenperiode im Jahr), die Beständigkeit der Schneedecke, die Erhaltung der Winterdecke sowie für die mittlere Schneedeckenhöhe als Indikator für die mittleren Verhältnisse der Schneehöhe nachweisbar.

Als Indikator der Schneesicherheit in alpinen Skigebieten wurde die Anzahl der Tage mit mindestens 30 cm Schneehöhe in der Periode November bis April des Folgejahres für den Zeitraum 1970 bis 2012 analysiert. In zwei der neun alpinen Skigebiete in Bayern, für die eine ausreichende Basis an Beobachtungsdaten für diesen Untersuchungszeitraum verfügbar war, wurde ein Rückgang dieses Indikators diagnostiziert. Im Berchtesgadener Land war mit ca. 31 Tagen der deutlichste Rückgang um mehr als 20 % zu erkennen, in der Zugspitz-Region mit ca. 7 Tagen bei weiter hoher Schneesicherheit eine Abnahme um ca. 5 %.





## 3.6 Globalstrahlung

Die Globalstrahlung ist die gesamte am Erdboden ankommende Sonnenstrahlung, also die Summe aus direkter Strahlung und (diffuser) Himmelsstrahlung. Die Stärke der den Boden erreichenden Strahlung ist abhängig von den lokalen Gegebenheiten (geographischer Breite, Tageszeit, Jahreszeit und der Geländeform, das heißt dem Winkel, unter dem die Strahlen auftreffen), sowie meteorologischen Einflussfaktoren wie Bewölkung und atmosphärische Trübung.

Da die Stationsdichte der Globalstrahlungsmessungen im Vergleich zu anderen Klimaparametern relativ klein ist, wird häufig auf die Sonnenscheindauer

zurückgegriffen, aus der auch die Globalstrahlung abgeschätzt werden kann. Für den Zeitraum ab 1981 erzeugt der Deutsche Wetterdienst die Rasterdaten für die Flächenkarten der Globalstrahlung durch die Verknüpfung von Bodenmessungen und Satellitendaten (Abbildung 3.6\_2).

Als Sonnenscheindauer bezeichnet man die tatsächliche Dauer der direkten Sonnenstrahlung an einem bestimmten Ort innerhalb eines definierten Zeitraumes (Tag, Woche, Monat, Jahreszeit, Jahr). Die Sonnenscheindauer wird allgemein täglich gemessen und dann für größere Zeiträume aufsummiert.

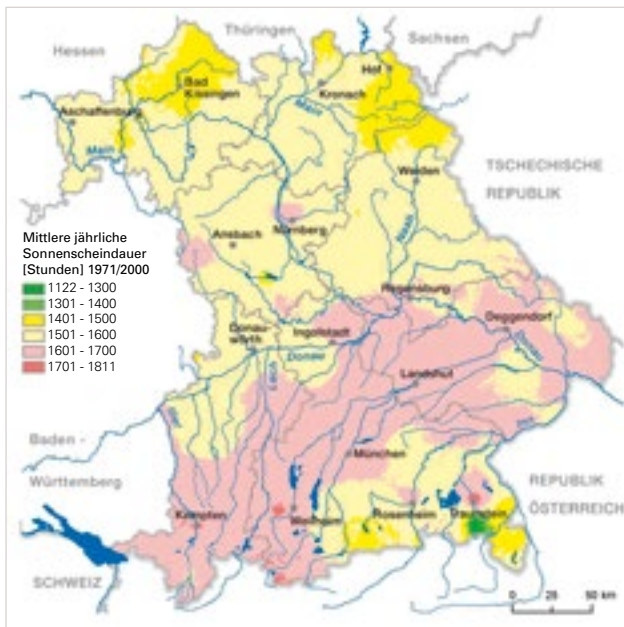


Abbildung 3.6\_1: Regionale Verteilung der mittleren jährlichen Sonnenscheindauer in Bayern, 1971–2000.

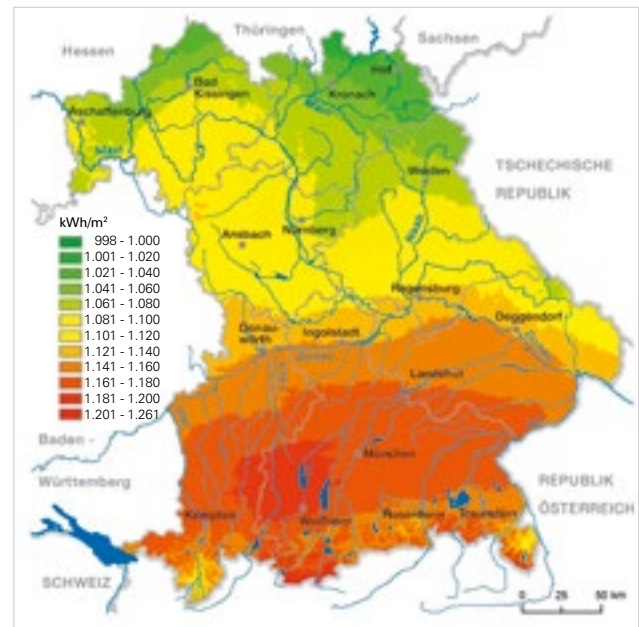


Abbildung 3.6\_2: Regionale Verteilung der mittleren Jahressummen der Globalstrahlung in Bayern, 1981–2010.

In Bayern wurden im Zeitraum von 1971 bis 2000 rund 1586 Sonnenstunden im Jahresmittel gemessen. Dabei zeigen sich regionale Unterschiede (Abbildung 3.6\_1), die sich auch in der regionalen Verteilung der Globalstrahlung widerspiegeln (Abbildung 3.6\_2). Im Föhn beeinflussten Raum südlich der Donau und im Bayerischen Wald sind im Mittel 1600 bis 1700 Stunden Sonnenschein pro Jahr zu verzeichnen, lokal werden diese Werte noch übertroffen. Der Norden Bayerns weist großräumig geringere Werte der Sonnenscheindauer von 1500 bis 1600 Stunden im Jahr auf.

Abbildung 3.6\_3 zeigt die Variabilität der Sonnenscheindauer im Zeitraum 1951–2014, die in dem betrachteten Zeitraum nur einen geringen Trend aufweist. Der niedrigste Wert von 1.380 Sonnenstunden pro Jahr trat im Jahr 1987 auf, der höchste Wert von 2068 Sonnenstunden im Jahr 2003. Die mittlere jährliche Globalstrahlung in Bayern im Zeitraum 1981–2010 beträgt 1122 kWh/m<sup>2</sup> (Deutschland: 1055 kWh/m<sup>2</sup>).

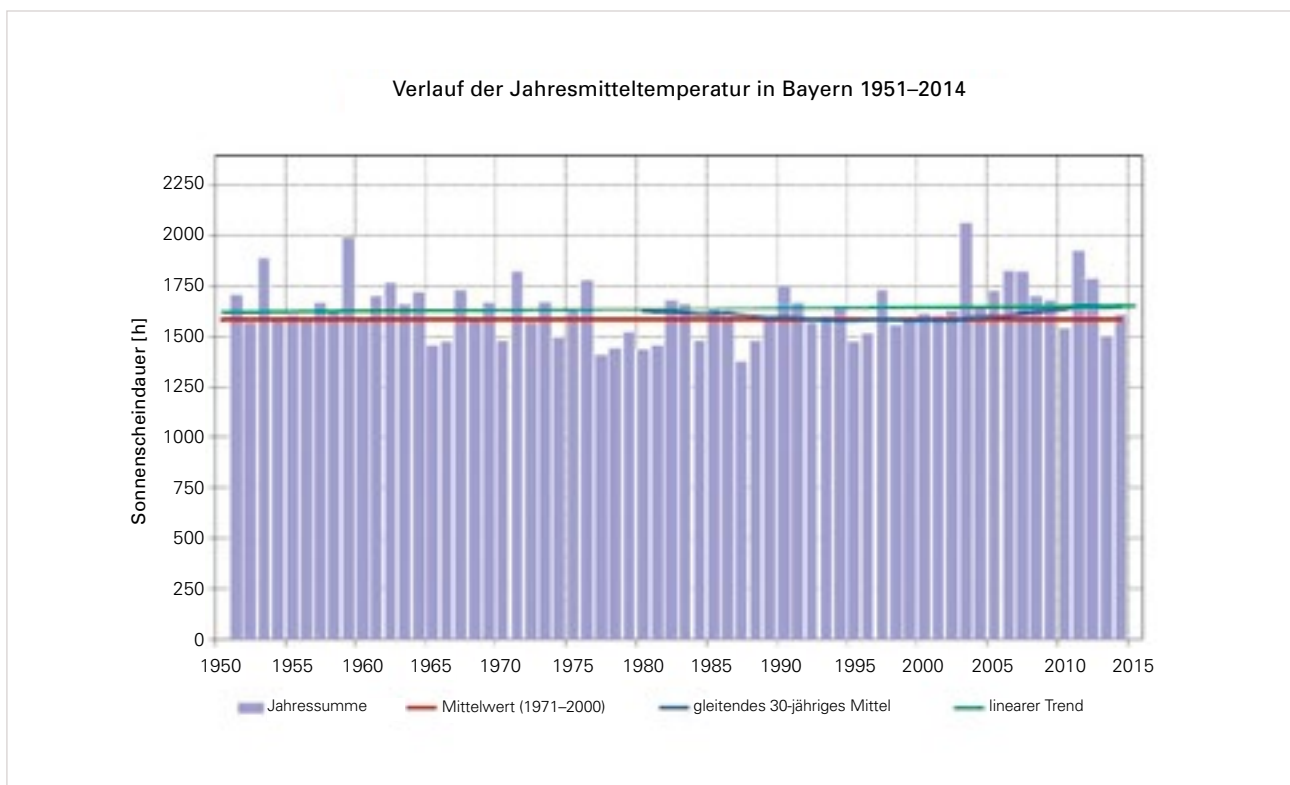


Abbildung 3.6\_3: Zeitreihe der jährlichen Sonnenscheindauer, 1951–2014.

## 3.7 Wind

Basis für die klimatologische Analyse des Windes ist ein hochaufgelöster Datensatz (1 km x 1 km) monatlicher Windgeschwindigkeiten für Deutschland im Zeitraum 1951 bis 2001 [7]. Der lineare Trend der mittleren Windgeschwindigkeiten für Deutschland liegt im Zeitraum 1951 bis 2001 bei  $-0,05$  m/s. Auf kürzeren Zeitskalen kehrt sich dieser Trend um, zum Beispiel  $+0,3$  m/s im Zeitraum 1981 bis 2001. Jedoch sind diese Trends nicht signifikant.



## 3.8 Phänologie

Der Begriff Phänologie kommt aus dem altgriechischen und bezeichnet regelmäßig im Jahresverlauf wiederkehrende Wachstums- und Entwicklungsstadien von Pflanzen. Die Phänologie beschreibt die Jahreszeiten dabei nicht nach dem Kalender, sondern nach den Wachstumsphasen bestimmter Pflanzen. So beginnt der Frühling nach der Phänologie mit der Blüte der Haselnuss, der Sommer mit der Blüte des schwarzen Holunders, der Herbst mit der Fruchtreife des schwarzen Holunders und der Winter mit dem Blattfall der Stieleiche. Die Phänologie macht auch die Bestimmung weiterer Zwischenjahreszeiten möglich (Apfelblüte = Vollfrühling; Spätsommer = Fruchtreife frühblühender Äpfel).

Das Bayerische Landesamt für Umwelt hat Daten des Deutschen Wetterdienstes für die Jahre 1961 bis 2010 ausgewertet. Die Auswertung der Daten zeigt in den letzten 50 Jahren Verschiebungen in der jahreszeitlichen Entwicklung von Pflanzen. Besonders deutlich tritt dies seit den 1990er-Jahren auf. Dabei entwickeln sich nicht alle phänologischen Jahreszeiten gleich. Die deutlichste Veränderung ist ein früherer Beginn des Frühlings. Auch der Sommer und Herbst beginnen früher, wenn auch etwas weniger stark ausgeprägt. Nur der Eintritt des Winters (Vegetationsruhe), zeigt keine eindeutige Veränderung.

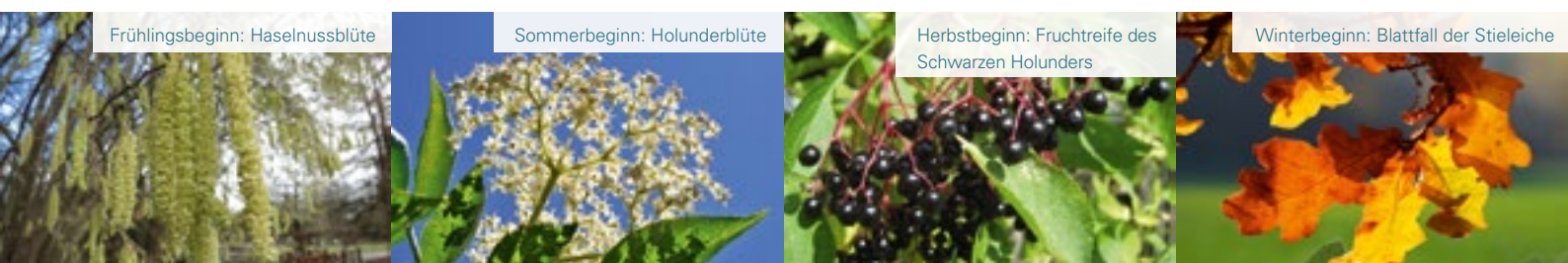
In der Klimatologie wird als Ausgangsbasis für die Analyse von Klimaänderungen der Zeitraum 1961 bis 1990 als sogenannte „klimatologische Referenzperiode“ herangezogen. Zur Analyse der jüngeren Entwicklung und zur Untersuchung etwaiger Veränderungen wurden auch der Zeitraum 1981 bis 2010 sowie der Gesamtzeitraum 1961 bis 2010 ausgewertet.

- Im Zeitraum von 1981 bis 2010 beginnen im Vergleich zur klimatologischen Referenzperiode von 1961 bis 1990 die phänologischen Phasen für den Frühlings-, Sommer- und Herbstbeginn durchschnittlich neun, sieben beziehungsweise acht Tage früher.
- Die signifikanten Trendverläufe über den 50-Jahres-Zeitraum 1961 bis 2010 zeigen bei starken jährlichen Schwankungen Verfrühungen des Frühlings um circa drei Wochen und je zweieinhalb Wochen bei Sommer- und Herbstbeginn. Die jährlichen Schwankungen zeigen, dass auch künftig, trotz Trends zur Verfrühung, Jahreszeiten vereinzelt später eintreten können.
- Der Eintritt des Spätherbstes beziehungsweise der Vegetationsruhe, gekennzeichnet durch die Blattverfärbung der Stieleiche, zeigt im Zeitraum 1961 bis 2010 keine signifikanten Veränderungen.

Verschiedene Höhenlagen weisen unterschiedliche Tendenzen der phänologischen Phasen auf:

- So zeigt der Trend für den Frühlingsbeginn im Zeitraum 1981 bis 2010 in Tieflagen unter 300 Meter durchschnittlich eine Verfrühung von rund sechs Tagen pro Dekade, also insgesamt 19 Tagen, während in Lagen zwischen 700 und 900 Meter keine Veränderung nachzuweisen ist.
- Das Ende der Vegetationsperiode (Spätherbstbeginn, Blattverfärbung der Stieleiche) verschob sich von 1961 bis 1990 nur in Tieflagen unter 300 Meter um knapp drei Tage pro Dekade, also insgesamt knapp neun Tage, nach hinten, 1981 bis 2010 dagegen nur in den Hochlagen von 700 bis 900 Meter um knapp vier Tage pro Dekade, also insgesamt knapp zwölf Tage.

Abbildung 3.8\_1: Phänologische Definitionen für den Beginn der Jahreszeiten.



Frühlingsbeginn: Haselnussblüte

Sommerbeginn: Holunderblüte

Herbstbeginn: Fruchtreife des Schwarzen Holunders

Winterbeginn: Blattfall der Stieleiche

Die Vegetationsperiode von Frühlingsbeginn bis Herbstende dehnt sich aus:

- Der höchst signifikante Trend für den 50-Jahres-Zeitraum 1961 bis 2010 weist eine Verlängerung um insgesamt 26 Tage aus.
- Die mittlere Dauer der Vegetationsperiode im aktuellen Vergleichszeitraum 1981 bis 2010 betrug 225 Tage gegenüber 215 Tagen in der klimatologischen Referenzperiode von 1961 bis 1990.

Die sogenannte phänologische Uhr veranschaulicht den Vergleich der phänologischen Jahreszeiten in der klimatologischen Referenzperiode 1961 bis 1990 und dem Zeitraum 1981 bis 2010. In ihr werden die jeweiligen Mittelwerte für Anfang, Ende und Dauer der vier Jahreszeiten im Kalenderjahr dargestellt (Abbildung 3.8\_2).

Der Klimawandel lässt sich in Bayern eindeutig anhand von Veränderungen der Pflanzenentwicklung beobachten.

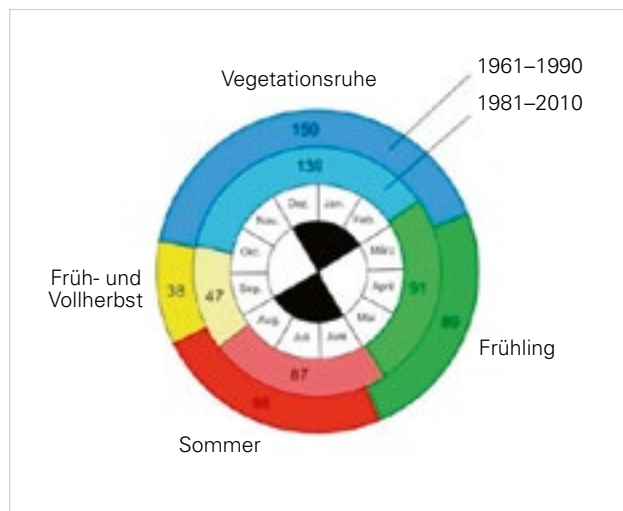


Abbildung 3.8\_2: Phänologische Uhr für die vier Jahreszeiten in den Zeiträumen 1961 bis 1990 und 1981 bis 2010

#### Literaturverzeichnis

- [1a] Bayerisches Landesamt für Umwelt, 2012: Der Klimawandel in Bayern – Auswertung regionaler Klimaprojektionen, Klimabericht Bayern, [www.bestellen.bayern.de/shoplink/lfu\\_klima\\_00082.htm](http://www.bestellen.bayern.de/shoplink/lfu_klima_00082.htm)
- [1b] Bayerisches Landesamt für Umwelt, 2014: Beeinflusst der Klimawandel die Jahreszeiten in Bayern? [http://www.lfu.bayern.de/klima/klimabeobachtung/beobachtung\\_bayern/phaenologie/index.htm](http://www.lfu.bayern.de/klima/klimabeobachtung/beobachtung_bayern/phaenologie/index.htm)
- [2] BfG Bundesanstalt für Gewässerkunde, DWD Deutscher Wetterdienst, BSH Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie, BAW Bundesanstalt für Wasserbau (Hrsg.) (2015): KLIWAS Auswirkungen des Klimawandels auf Wasserstraßen und Schifffahrt – Entwicklung von Anpassungsoptionen. Synthesebericht für Entscheidungsträger. In: KLIWAS – Abschlußbericht des BMVI, Fachliche Schlussfolgerungen aus den Ergebnissen des Forschungsprogramms KLIWAS, [www.kliwas.de](http://www.kliwas.de).
- [3] Bissolli, P., 2001: Wetterlagen und Großwetterlagen im 20. Jahrhundert. Klimastatusbericht 2001, 32-40, Deutscher Wetterdienst.
- [4] KLIWA, 2012: Die Entwicklung von trockenen Großwetterlagen mit Auswirkungen auf den süddeutschen Raum. KLIWA Berichte Heft 18, 155 S., [www.kliwa.de](http://www.kliwa.de).
- [5] KLIWA, 2011: Klimawandel in Süddeutschland, Monitoringbericht 2011, [www.kliwa.de](http://www.kliwa.de).
- [6] Hofstätter, M. und B. Chimani, 2012: Van Bebber's cyclone tracks at 700 hPa in the Eastern Alps for 1961–2002 and their comparison to Circulation Type Classifications. Meteorol. Zeitschr., Vol. 21, No. 5, 459-473, DOI: 10.1127/0941-2948/2012/0473
- [7] Walter, A. et al., 2006: A high resolution reference data set of German wind velocity 1951–2001 and comparison with regional climate model results. Meteorol. Zeitschr., Vol. 15, No. 6, 685-696, DOI: 10.1127/0941-2948/2006/0162.

The background of the slide is a photograph of a body of water, likely a lake or a wide river. The water is a deep blue color with gentle ripples. Several buoys are visible: one orange buoy on the left, one yellow buoy in the center-right, and another orange buoy on the far right. In the foreground, there are numerous thin, brown, leafless reeds or branches that are out of focus, creating a textured, natural frame for the water. The overall scene is calm and serene.

# **4 Klimafolgen und Anpassung**

## 4.1 Einführung

Der Klimawandel ist ein globales Problem mit räumlichen Auswirkungen auch für Bayern. Wir müssen uns darauf einstellen, dass direkte und indirekte Folgen des Klimawandels – und damit auch Klimaschutz- und Anpassungsmaßnahmen – jeden gesellschaftlichen und wirtschaftlichen Sektor betreffen können (ggf. auch Wirkungskaskaden). Das gilt unter anderem für Wasserwirtschaft, Land- und Forstwirtschaft, Naturschutz, Bodenschutz/Georisiken, Gesundheit und Katastrophenschutz. Ebenso betroffen sind Energiewirtschaft, Industrie und Gewerbe, Tourismus und Finanzwirtschaft sowie Verkehr und Infrastruktur.

Diesen Herausforderungen muss mit geeigneten Anpassungsmaßnahmen begegnet werden. Im Klimaschutzprogramm Bayern 2050 und in der Bayerischen Klima-Anpassungsstrategie (BayKLAS) sind – neben Klimaschutzmaßnahmen – die wesentlichen Handlungsfelder für die Anpassung benannt. Auch die Landesentwicklung verfolgt die Doppelstrategie von Klimaschutz und Anpassung. Bedeutung haben diese Aspekte daher sowohl im Bayerischen Landesplanungsgesetz (BayLplG) als auch im Landesentwicklungsprogramm Bayern (LEP). Das LEP enthält zur Anpassung an den Klimawandel die Festlegung, dass die räumlichen Auswirkungen von klimabedingten Naturgefahren bei allen raumbedeutsamen Planungen und Maßnahmen berücksichtigt werden sollen. In allen Teilräumen, insbesondere in verdichteten Räumen, sollen klimarelevante Freiflächen von Bebauung freigehalten werden.

Gemäß BayKLAS sind bei der Auswahl bestehender und weiterführender Maßnahmen zur Anpassung an die unvermeidbaren Folgen des Klimawandels verschiedene Grundsätze zu beachten.

### Nachhaltigkeit

Die Maßnahmen sollten eine dauerhaft umweltgerechte Entwicklung von Gesellschaft und Wirtschaft ermöglichen. Dabei besitzen eine nachhaltige, umweltverträgliche Landnutzung und erneuerbare Ressourcen künftig mehr denn je eine entscheidende

Bedeutung für die nachhaltige Entwicklung unserer Gesellschaft und Wirtschaft. Auch der Erhalt der biologischen Vielfalt bzw. deren Stärkung muss beachtet werden.

### Umweltverträglichkeit

Die Maßnahmen sollten nicht zu signifikant negativen Auswirkungen auf die Umwelt führen. Die Prüfung der verschiedenen Aspekte erfolgt durch Umweltfolgenprüfungen, die für bestimmte Projekte rechtlich verankert sind. Schon bei Projektplanungen und -genehmigungen sollten künftig verstärkt auch die möglichen Auswirkungen des Klimawandels berücksichtigt werden.

### Wechselwirkungen zwischen Klimaschutz und Anpassung

Auswirkungen des Klimawandels und Anpassungsmaßnahmen können verschiedene Wechselwirkungen mit Klimaschutzmaßnahmen entfalten. Mögliche Synergien, aber auch Zielkonflikte müssen bei der Planung und Durchführung von Anpassungsmaßnahmen berücksichtigt werden.

### Integrative Ansätze

Die bayerische Klimapolitik setzt auf das Prinzip der Kooperation und Solidarität, wodurch Zielkonflikte rechtzeitig erkannt und wenn möglich vermieden werden können. Effektive Managementansätze mit Synergieeffekten für mehrere Handlungsfelder sollen vorrangig unterstützt werden.

### Unsicherheiten

Unsicherheiten bestehen noch sowohl hinsichtlich der zukünftigen Klimakenngrößen als auch hinsichtlich der Auswirkungen des Klimawandels in allen Handlungsbereichen. Politik und Gesellschaft müssen diese Unsicherheiten bei der Auswahl der Anpassungsmaßnahmen berücksichtigen. Dabei kommt es besonders auf die Nutzung von Synergien sowie auf Maßnahmen an, die auch bei einem unterschiedlich stark ausgeprägtem Klimawandel sinnvoll sind (No-Regret-Strategie).



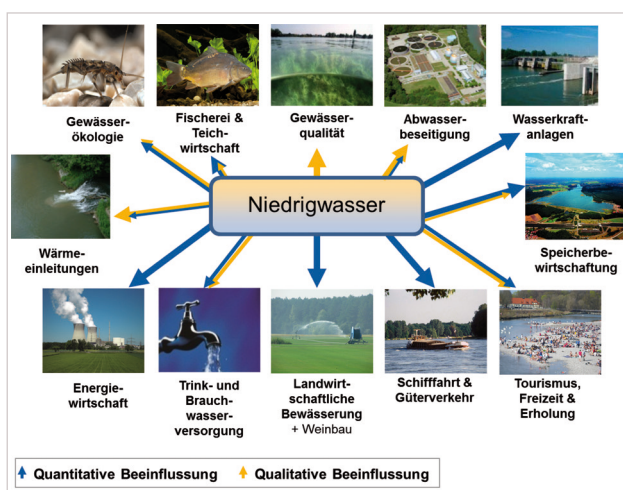
## 4.2 Wasserhaushalt und Wasserwirtschaft

### 4.2.1 Klimafolgen und Anpassung

Durch die Auswirkungen des globalen Klimawandels ergeben sich für Bayern unter anderem Veränderungen im Wasserhaushalt, die nicht nur die Wasserwirtschaft selbst, sondern auch viele andere Bereiche wie etwa die Land- und Forstwirtschaft oder den Naturschutz (siehe Kapitel 4.4 und 4.6) betreffen. Um diese Veränderungen zu erkennen, werden in Bayern im Rahmen des Kooperationsvorhabens KLIWA zum einen langjährig gemessene Zeitreihen an Pegeln und Grundwassermessstellen ausgewertet. Zum anderen werden Simulationen von Wasserhaushaltsgrößen wie zukünftige Abflüsse und die Grundwasserneubildung mit Hilfe von Wasserhaushaltsmodellen durchgeführt, die wiederum auf Projektionsdaten von regionalen Klimamodellen aufbauen.

Die Veränderungen im Klima und das dadurch bedingte häufigere Auftreten von Extremen haben zahlreiche wasserbezogene Auswirkungen auf den Menschen und sein Umfeld (Abbildung 4.2\_1).

Abbildung 4.2\_1: Quervernetzung zwischen den verschiedenen wasserwirtschaftlichen Bereichen am Beispiel von Niedrigwasser (auch auf andere Bereiche übertragbar).



Besonders betroffen sind:

- Die Wasserwirtschaft durch Veränderungen im Wasserkreislauf, der Abflussverhältnisse, der Wasserverfügbarkeit, der Betroffenheit hochwasser- und niedrigwassergefährdeter Gebiete, die Wasserqualität und die wassergebundenen Ökosysteme mit ihrer Flora und Fauna
- Die Land- und Forstwirtschaft durch Veränderung der Standort- und Wachstumsbedingungen sowie der Bewässerungsbedürftigkeit in der Landwirtschaft
- Die Verkehrsinfrastruktur, insbesondere Binnenschifffahrt durch die Veränderung der Hoch- und Niedrigwasserverhältnisse
- Die Energieerzeugung und -verteilung durch höhere Wassertemperaturen und veränderte Abflussverhältnisse
- Der Tourismus durch eine Änderung der Freizeitmöglichkeiten im Sommer und Winter

Mit den Anpassungsmaßnahmen aus der Bayerischen Klima-Anpassungsstrategie (BayKLAS) unterstreicht die bayerische Staatsregierung die Bedeutung des Wassers als Lebensgrundlage sowie des Hochwasserschutzes und formuliert folgende Handlungsziele:

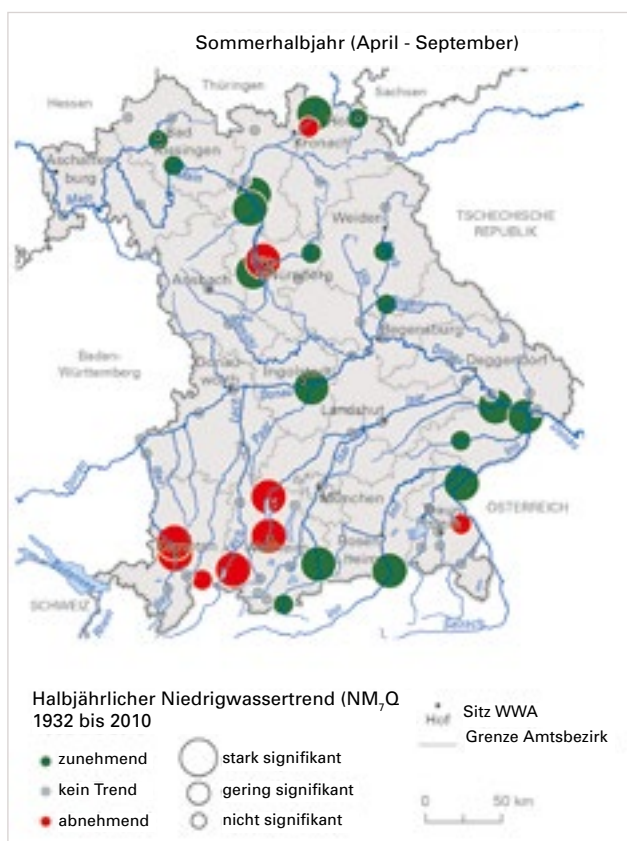
- Sichern der Wasserressourcen nach Menge und Qualität und Erhalt der Versorgungssicherheit für Trink- und Brauchwasser
- Erhalt und weitere Verbesserung des Hochwasserschutzes in den drei Handlungsfeldern natürlicher Rückhalt, technischer Hochwasserschutz und Hochwasservorsorge
- Erhalt der Entsorgungssicherheit bei der Abwasserentsorgung (Niederschlagswasser, Abwasser)
- Berücksichtigen des Einflusses des Klimawandels auf Wasserqualität und -menge bei der Umsetzung der Wasserrahmenrichtlinie und im Gewässergütemanagement

- Frühzeitiges Aufdecken nachteiliger Entwicklungen von Wasserqualität und -menge insbesondere bei verstärktem Anbau nachwachsender Rohstoffe und intensiver Nutzung der Geothermie

#### 4.2.2 Niedrigwasser Klimafolgen

Als Niedrigwasser wird ein Wasserstand von Gewässern bezeichnet, der deutlich unter einem als normal definierten Zustand liegt. Niedrigwasser ist ein Teil des natürlichen Abflussregimes und entsteht zum einen durch Niederschlagsmangel oder, insbesondere im Sommer, durch die Kombination von Niederschlagsmangel und hoher Verdunstung. Die Auswirkungen auf die Wasserwirtschaft

Abbildung 4.2\_2: Trends des NM7Q (niedrigsten 7-tägigen Abflussmittels) im Sommerhalbjahr im Zeitraum zwischen frühestens 1900 bis einheitlich 2006.



sind vielfältig. Beispielsweise kann Niedrigwasser sowohl die Entnahmemenge für industrielles Brauch- und Kühlwasser aus größeren Flüssen einschränken, als auch die Wiedereinleitung erwärmten Kühlwassers begrenzen. Produktionseinschränkungen wären die Folge. In kleineren Flüssen mit umfangreichen Einleitungen aus Kläranlagen können im Verlauf extremer Niedrigwasserperioden verstärkt Qualitätsprobleme entstehen.

In den vergangenen 80 Jahren scheinen die Niedrigwasserabflüsse in bayerischen Fließgewässern zu stagnieren oder gar zu steigen, ein Rückgang wird kaum beobachtet (Abbildung 4.2\_2). Allerdings sind die in diesem Zeitraum beobachteten Trends an der überwiegenden Zahl der Pegel wegen der wasserwirtschaftlichen Überprägung vor allem durch Niedrigwasseraufhöhungen nicht eindeutig. Teilweise sind seit Beginn der 1980er Jahre Tendenzen zur Abflussverringering erkennbar. Die Niedrigwassersituation in Bayern im Jahr 2015 passt in dieses Bild. Für die nahe Zukunft (2021–2050) lassen sich noch keine eindeutigen Aussagen über die Entwicklungen von Niedrigwasserabflüssen machen. Eine Niedrigwasserverschärfung wird aus heutiger Sicht eher für die fernere Zukunft (2071–2100) prognostiziert.

#### Beispiele für konkrete Anpassungsmaßnahmen

##### Niedrigwasserinformationsdienst (NID)

Wichtige Schritte in Richtung eines effektiven Niedrigwassermanagements sind das frühzeitige Erkennen von trockenheitsbedingten Niedrigwassersituationen durch die Analyse der vorhandenen Messwerte in Kombination mit mittelfristigen Vorhersagen des Deutschen Wetterdienstes (DWD) zum Niederschlagsgeschehen. Mit der Einführung des bayerischen Niedrigwasser-Informationsdienstes im Jahre 2008 wurden hierfür die entscheidenden Grundlagen geschaffen<sup>1</sup>. Mit seinen Messdaten und Lageberichten bietet

<sup>1</sup> [www.nid.bayern.de](http://www.nid.bayern.de)

er bei Niedrigwasser die Grundlage für frühzeitige Reaktionen der relevanten Entscheidungsträger, insbesondere der Wasserwirtschaft (Abbildung 4.2\_3). Auch die Öffentlichkeit kann sich jederzeit über die aktuelle Situation und die weitere Entwicklung informieren.

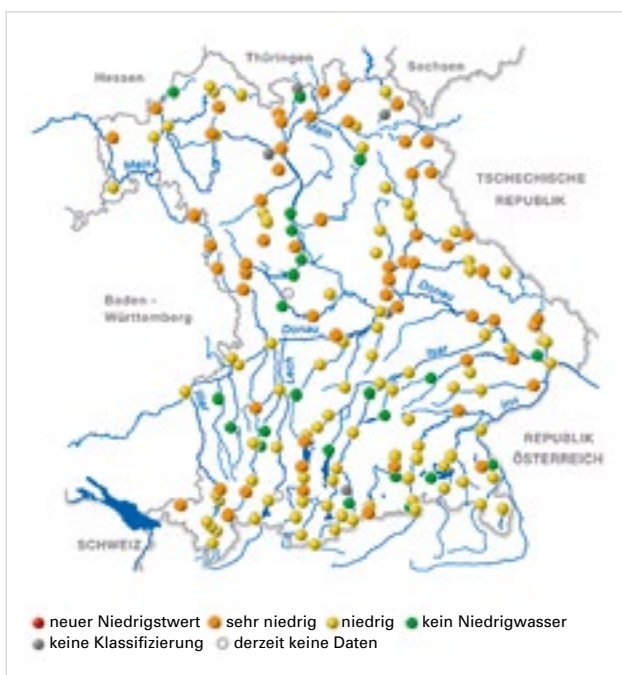


Abbildung 4.2\_3: NID-Darstellung der Niedrigwassersituation am 05.08.2015.

#### Staatliche Wasserspeicher zur Niedrigwasseraufhöhung

Bei Niedrigwasser können bestehende Gewässernutzungen wie beispielsweise Abwassereinleitungen oder Kühlwasserentnahmen die Gewässer stark belasten und Schäden im Gewässerökosystem verursachen. Aus diesem Grund wurden Wasserspeicher zur Niedrigwasseraufhöhung für eine Reihe von bayerischen Gewässern errichtet. Die Niedrigwasseraufhöhung kann durch eine geregelte Wasserabgabe aus künstlichen Speichern (Talsperren) oder durch die Überleitung von Wasser aus benachbarten Flussgebieten erfolgen. Insgesamt dienen 15 der 25 staatlichen Wasserspeicher mindestens teilweise der Aufhöhung und Stabilisierung des Niedrigwasserabflusses von Bächen und

Flüssen in Trockenperioden (z. B. Förmitztalsperre/ Sächsische Saale, Seen des Fränkischen Seenlandes/ Regnitz).

#### 4.2.3 Hochwasser Klimafolgen

Hochwasserereignisse sind ein Teil des natürlichen Abflussverhaltens eines Fließgewässers. Sie entstehen einerseits durch langanhaltende, ergiebige Niederschläge und sind im Winter und Frühjahr oft an Schneeschmelzereignisse gekoppelt. Diese Hochwasser treten zumeist großräumig auf. Andererseits können vor allem im Sommer auch kurze und räumlich eng begrenzte, aber heftige Starkregenereignisse ebenfalls Hochwasser hervorrufen. Von diesen Ereignissen sind meist nur kleinere Einzugsgebiete betroffen.

In der Vergangenheit (Zeitraum 1932–2010) nahmen die Hochwasserabflüsse an der Mehrheit der Pegel im Gesamtjahr und im Winterhalbjahr zu (rote Kreise, Abbildung 4.2\_4). Im Sommerhalbjahr wurde an etwa einem Drittel der Pegel eine Abnahme festgestellt. Allerdings sind diese sommerlichen Abnahmetrends statistisch meist nur begrenzt belastbar.

Für die Zukunft weisen Klimaprojektionen teilweise auf eine Zunahme von Hochwasser in den Wintermonaten hin. Im Sommer gehen sie dagegen tendenziell von einer Abnahme aus. Allerdings sind diese Aussagen derzeit noch mit großen Unsicherheiten behaftet. In den Klimaprojektionen können zum Beispiel kleinräumige Hochwasser infolge sommerlicher Starkregenereignisse nicht adäquat abgebildet werden. Die Ergebnisse fallen zudem regional sehr unterschiedlich aus.

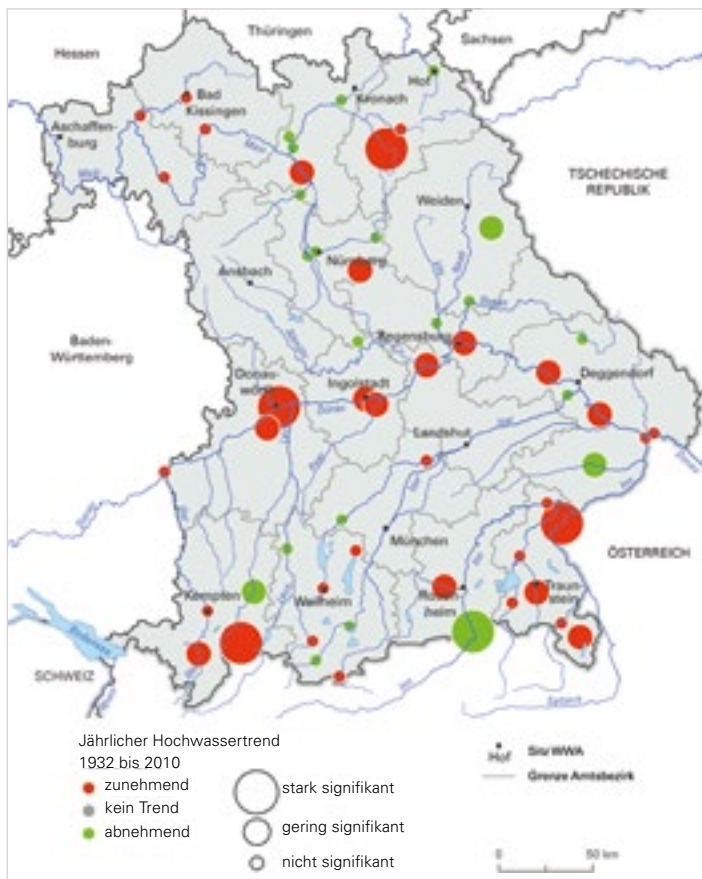


Abbildung 4.2\_4: Karte der Jährlichen Hochwassertrends (HQ-Trends) an 60 Pegeln in Bayern im hydrologischen Jahr (November-Oktober).

## Beispiele für konkrete Anpassungsmaßnahmen

### Hochwasserschutzaktionsprogramm 2020plus

Im Nachgang zum Junihochwasser 2013 beschloss die Bayerische Staatsregierung, das bereits bestehende Aktionsprogramm für einen nachhaltigen Hochwasserschutz (AP 2020) aus dem Jahr 2001 zu erweitern und neu auszurichten. Wie bereits sein Vorgänger ermöglicht das „Hochwasserschutz Aktionsprogramm 2020plus“ bis zum Jahr 2020 in ganz Bayern Maßnahmen zum Hochwasserschutz zu realisieren. Diese Maßnahmen werden in die Bereiche Vorsorge, Vermeidung, Schutz – mit der Unterteilung natürlicher Rückhalt und technischer Hochwasserschutz – sowie Nachsorge untergliedert. Diese

Bereiche stehen gleichberechtigt nebeneinander und tragen unter anderem dazu bei, Hochwasserschäden zu begrenzen, einen ausreichenden Hochwasserschutz für die vorhandenen Bebauungen und hochwertige Infrastruktureinrichtungen zu gewährleisten und Schadenspotentiale zu verringern oder zu vermeiden. Beispielhafte Maßnahmen sind die Renaturierung von Gewässern, der Erhalt sowie die Entwicklung von Auwäldern, der Bau von Deichen oder Hochwasserrückhaltebecken sowie die Berücksichtigung von Überschwemmungsgebieten in der Bauleitplanung.

Wichtige Inhalte der Fortschreibung zum AP 2020plus stehen zudem im Zusammenhang mit möglichen Klimaveränderungen, die Bemessungsereignisse von Hochwasserschutzanlagen können jedoch auch überschritten werden. Daher müssen künftig verstärkt Betrachtungen solcher Überlastfälle angestellt werden, damit sich keine unabsehbaren und katastrophalen Folgen ergeben. Daneben soll die Widerstandsfähigkeit von Schutzanlagen verstärkt werden und die dauerhafte Unterhaltung und regelmäßige Überprüfung der vorhandenen Anlagen gewährleistet werden.

### Klimaänderungszuschlag

Bei der Bemessung von Hochwasserschutzanlagen, wie Deichen und Hochwasserschutzwänden, wird stets ein statistisch bestimmter Hochwasserabfluss („Bemessungsabfluss“) zugrunde gelegt. Gängige Bemessungsgröße für den Schutz von Siedlungen ist das  $HQ_{100}$ , ein Hochwasserabfluss, der statistisch gesehen einmal in 100 Jahren auftritt. Hochwasserschutzanlagen haben in der Regel eine Lebensdauer von 50 bis 100 Jahren. Da es ungleich aufwändiger ist, zum Beispiel Hochwasserschutzwände oder einen Deich nach einigen Jahren oder Jahrzehnten zu erhöhen als sie gleich höher zu bauen, hat Bayern im Jahr 2004 vorsorglich den sogenannten Klimazuschlag für Schutzmaßnahmen eingeführt. Neue Hochwasserschutzanlagen werden seit 2004 auf ein um 15 Prozent erhöhtes Bemessungshochwasser ausgelegt (Klimazuschlag). Die Ausweisung von

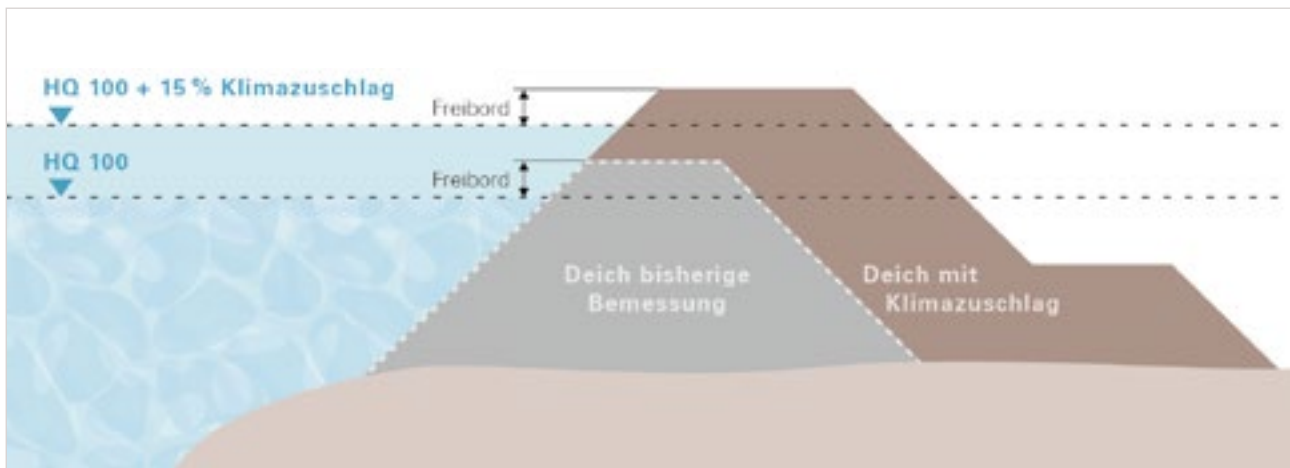


Abbildung 4.2\_5: Beispiel für Anwendung des Klimaänderungszuschlages. Das graue Schutzbauwerk ist ausgelegt auf ein  $HQ_{100}$ , der braune Deich zeigt die Variante unter Berücksichtigung des Klimaänderungszuschlages.

Überschwemmungsgebieten muss darüber hinaus in regelmäßigen Abständen an neue Erkenntnisse angepasst werden, daher kommt der Klimazuschlag hier nicht zum Tragen. Exemplarisch zeigt die nebenstehende schematische Darstellung eines Deiches die Auslegung auf das gegenwärtige  $HQ_{100}$  (grauer Deich, Abbildung 4.2\_5). In Braun ist die notwendige Erhöhung der Anlage unter Berücksichtigung des um 15 Prozent (Klimaänderungszuschlag) erhöhten Bemessungsabflusses ergänzt.

#### Gesteuerte Flutpolder

In einer bayernweiten Untersuchung werden in allen bayerischen Flussgebieten mögliche Retentionspotentiale (natürlicher und technischer Rückhalt) erhoben und ihre Wirkungen analysiert. Geeignete Projekte werden umgesetzt. Gesteuerte Flutpolder sind dabei hocheffektive Rückhaltmaßnahmen beim Umgang mit extremen Hochwasserereignissen. Sie haben eine vielfach höhere Wirkung bei gleichem Retentionsvolumen im Vergleich zu Deichrückverlegungen und ungesteuerter Retention. Sie ergänzen die bewährten Schutzsysteme, bieten zusätzliche Sicherheit und reduzieren das Restrisiko. Durch gesteuerte Flutpolder lassen sich durch den Klimawandel zu erwartende höhere und häufigere

Hochwasserabflüsse besser beherrschen. Sie werden nur im extremen Hochwasserfall zur Kappung der Spitze aktiviert, um ein Überströmen und Versagen der Hochwassereinrichtungen wie in Deggen-dorf 2013, in Neustadt 1999 oder in Niederachdorf 1988 an der Donau zu verhindern. Das für die Donau von der Technischen Universität München entwickelte Flutpolderkonzept wird umgesetzt. Die Graphik auf der nächsten Seite zeigt die 12 Flutpolderstandorte an der Donau (Abbildung 4.2\_6). Dadurch können insgesamt 136 Mio.  $m^3$  Rückhaltvolumen an der Donau aktiviert werden.

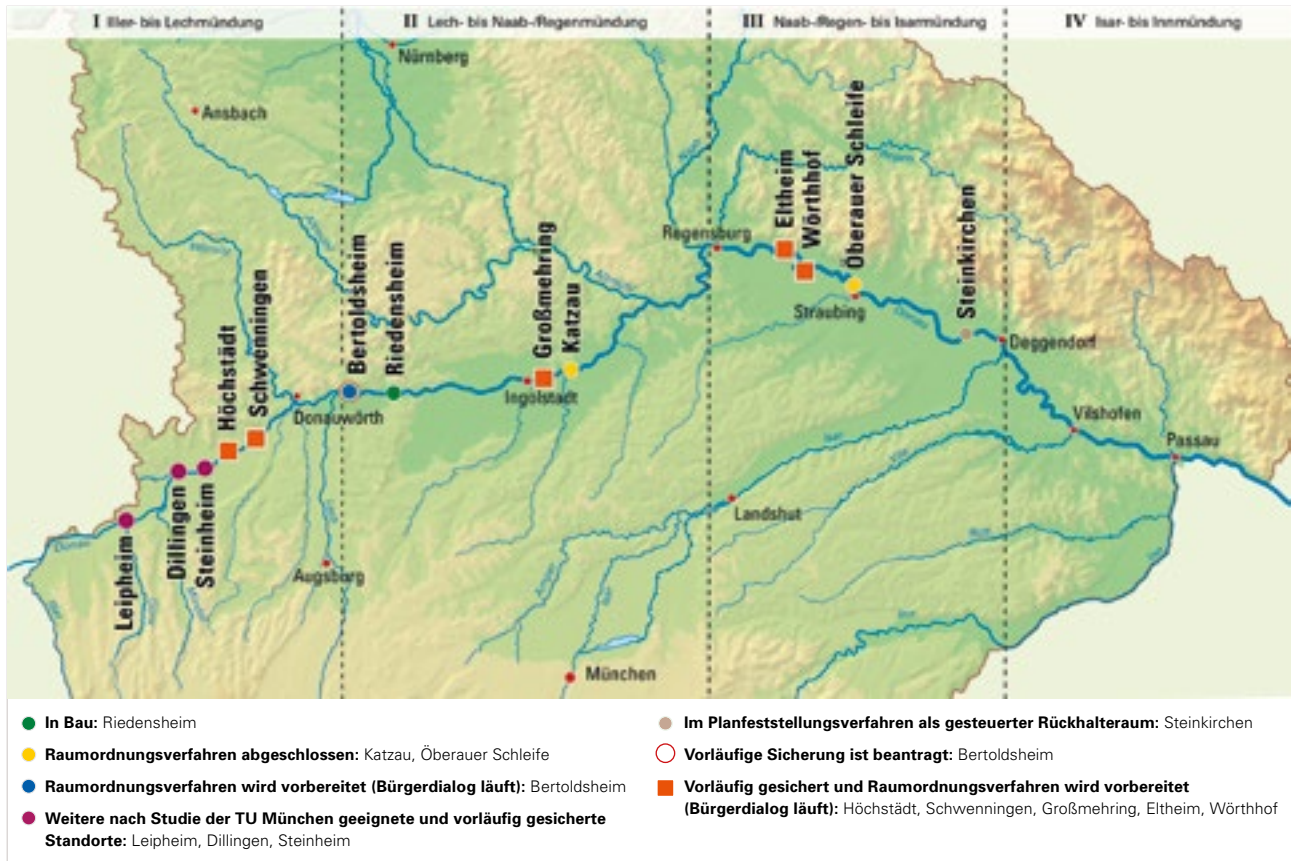


Abbildung 4.2\_6: Standorte des Bayerischen Flutpolderprogramms an der Donau.

#### 4.2.4 Grundwasser Klimafolgen

Die Trinkwasserversorgung in Bayern basiert zu einem sehr hohen Grad (ca. 95%) auf der Nutzung natürlicher Grundwasservorkommen. Einer nachhaltigen Bewirtschaftung der Grundwasserressourcen kommt daher eine besondere Bedeutung zu. Die Grundwasserneubildung stellt folglich ein wichtiges Maß für die „natürliche Regenerationsfähigkeit“ des Grundwassers dar. Sie wird beschrieben als Bilanzgröße aus Niederschlag abzüglich Verdunstung und Gesamtabfluss (Summe aus Oberflächenabfluss, Zwischenabfluss und Sickerwasser) und unterliegt natürlichen Schwankungen im Jahresverlauf mit generell hohen Raten in den Winter- und geringen Raten in den Sommermonaten. Als verhältnismäßig kleine Bilanzgröße reagiert sie besonders empfindlich auf Änderungen aller weiteren Wasserhaushaltsgrößen, weshalb Klimaänderungen sich immer auch in der Änderung der Grundwasserregeneration bemerkbar machen.

In der Vergangenheit war die mittlere jährliche Grundwasserneubildung regelmäßig Schwankungen unterworfen, welche sich regional deutlich unterscheiden konnten. Die Grundwasserneubildung in der nahen Zukunft (2021–2050) wird durch den zu erwartenden Anstieg der Lufttemperatur und somit der Verdunstung (die Lufttemperatur beeinflusst

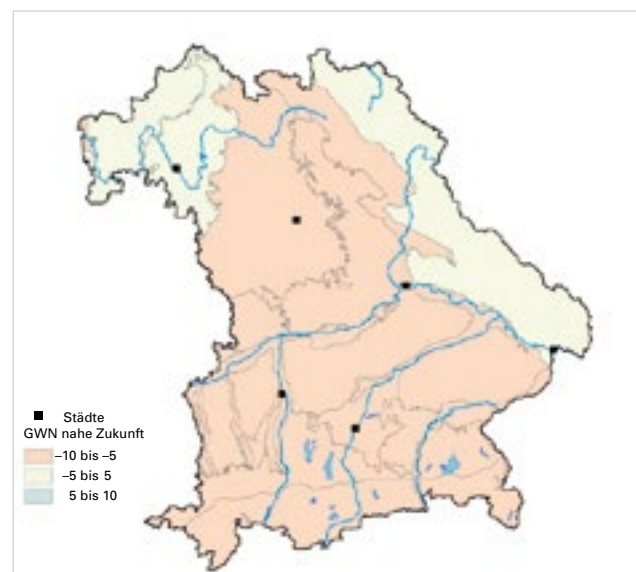


Abbildung 4.2\_7: Projizierte relative Änderung [%] der Grundwasserneubildung in der nahen Zukunft (2021–2050) innerhalb der Naturräume Bayerns anhand der Projektion WETTREG2006.

die Verdunstung unmittelbar über das Sättigungsdefizit der Luft), geringfügig sinkenden Jahresniederschlägen sowie vor allem der generellen Änderung des Niederschlagregimes (Tendenz zu mehr Niederschlag im Winter und weniger im Sommer) bestimmt. Modellrechnungen zeigen daher, dass für nahezu ganz Bayern im Mittel eine Verringerung der Grundwasserneubildung zwischen 5 und 10 % zu erwarten ist (Abbildung 4.2\_7). Es ist anzunehmen, dass diese Änderungen nur in Bereichen mit gering ergiebigen Grundwasserleitern Auswirkungen auf das Wasserdargebot haben. Um diese Bereiche genauer zu untersuchen werden im Projekt KLIWA-Grundwasser Fallstudien zur Quantifizierung des regionalen Änderungssignals auf Quellschüttungen durchgeführt. Für die ferne Zukunft (2071–2100) deuten sich deutliche Abnahmen der Grundwasserneubildung an. Aufgrund des geringeren Verdünnungseffektes kann sich eine verringerte Grundwasserneubildung bei flächenhaften Stoffeinträgen auch qualitativ negativ auf die Grundwasserbeschaffenheit auswirken.

### Beispiele für konkrete Anpassungsmaßnahmen

#### Projekt „Erhebung und Bewertung der öffentlichen Wasserversorgung“

Ein wichtiger Baustein im Maßnahmenpaket „Vorsorge gegen Trockenheit und Dürre“ der bayerischen Klima-Anpassungsstrategie ist das Projekt „Erhebung und Bewertung der öffentlichen Wasserversorgung“. In dem seit dem Jahr 2008 laufenden Projekt wird die Versorgungssicherheit aller bayerischen Wasserversorgungsanlagen der öffentlichen Trinkwasserversorgung bis zum Jahr 2025 auf Grundlage ausgewählter Kriterien bewertet.

Wesentliche Fragestellungen des Projektes sind:

- Welche Grundwasservorkommen sind langfristig schützbar?
- Reichen die Grundwasservorräte auch in Trockenzeiten aus und welchen Einfluss nimmt hier der Klimawandel?

- Wo stehen Wasserschutzgebiete in Konkurrenz mit anderen Nutzungen?
- Wie entwickelt sich der Wasserbedarf in Zukunft vor dem Hintergrund des Klimawandels und der Bevölkerungsentwicklung?
- Gibt es das so genannte „zweite Standbein“ einer Wasserversorgung – beispielsweise einen Anschluss an ein leistungsfähiges benachbartes Wasserversorgungsunternehmen mit Reserven oder weitere Wassergewinnungsanlagen?

Für die Regionen Bayerns, in denen aufgrund ihrer Geologie oder der örtlichen Niederschlagsverteilung eine besondere Versorgungs- oder Grundwassersituation vorliegt, werden zur Ermittlung der Auswirkungen des Klimawandels auf das künftige Dargebot Fallstudien durchgeführt. Dies betrifft Gebiete in denen:

- Ein zusammenhängendes Grundwasservorkommen fehlt und sich die lokale Wasserversorgung auf die Nutzung von Quellwasser stützt. Die Entwicklung der Quellschüttung ist daher im Zusammenhang mit dem Klimawandel von Interesse.
- Sich die Grundwasserqualität vor dem Hintergrund des Klimawandels negativ entwickeln kann.

Die Datenerhebung und -bewertung durch die Wasserwirtschaftsämter wurde mittlerweile abgeschlossen. Im Nachgang werden die Ergebnisse in Form einer „Wasserversorgungsbilanz“ je Regierungsbezirk zusammengefasst. Für Unterfranken, Oberfranken, Schwaben und Niederbayern liegen die Wasserversorgungsbilanzen bereits vor, für die restlichen Regierungsbezirke erfolgt die Veröffentlichung in Kürze. Auf Grundlage der Wasserversorgungsbilanzen sind regionale Verbesserungen der Versorgungssicherheit erforderlich. Dies betrifft vor allem Wasserversorgungsanlagen, die sich auf nur einen Brunnen oder eine Quelle stützen oder deren Wasserdargebot bei längerer Trockenheit nicht ausreichend ist. Die Wasserwirtschaftsverwaltung berät die Unternehmen strategisch und evaluiert die erforderlichen Prozesse. Eine Anpassung an neue

Entwicklungen ist damit ebenfalls gewährleistet. Die Wasserversorgungsbilanz soll mit einer Datenbank basierten Anwendung zum festen Bestandteil der Wasserversorgung in Bayern werden. Damit wird die Grundlage für eine regelmäßige und rationelle Aktualisierung der Wasserversorgungsbilanzen geschaffen.

#### Projekt „Klimaanpassung und Wasserversorgung – Risikobewältigung bei Hochwasser, Starkniederschlägen und Uferfiltrateinfluss“

Viele Wassergewinnungsanlagen liegen in Talauen und fördern oberflächennahes Grundwasser oder Uferfiltrat. Die Gewinnungsgebiete und zum Teil auch die Brunnenfassungen selbst werden bei Hochwasser überflutet. Um eine gesicherte Wasserversorgung auch unter ungünstigen Klimabedingungen zu gewährleisten, soll in einem bayernweit angelegten Projekt eine Detailerhebung derart gefährdeter Wassergewinnungsanlagen erfolgen. Die Risikobewertung soll auch oberflächennahe Wasserfassungen einschließen, welche durch erhöhte Stoffeinträge (unter anderem hygienische Aspekte) zum Beispiel bei Starkniederschlägen und hohen Grundwasserständen beeinflusst werden können. Es werden dabei die Vulnerabilitäten aufgezeigt, geeignete Untersuchungsmethoden herausgearbeitet und Kriterien zur Risikobewertung festgelegt. Sie dienen den Wasserversorgungsunternehmen als Entscheidungsgrundlage für notwendige Anpassungsmaßnahmen für eine sichere Trinkwasserversorgung.

#### Datenaktualisierung erkundeter Grundwasservorkommen

Im Rahmen der Daseinsvorsorge untersucht die Wasserwirtschaft seit 1971 systematisch hoffigige Grundwasservorkommen mit dem Ziel, eine landesweit gesicherte Trinkwasserversorgung auch für die Zukunft zu gewährleisten (Abbildung 4.2\_8). Vor dem Hintergrund des Klimawandels mit erhöhtem Wasserbedarf in prognostizierten trockenen und heißen Sommermonaten werden Engpässe in der Trink- und Brauchwasserversorgung wahrscheinlich.

Insbesondere sind Versorgungsprobleme bei dezentralen Wasserversorgern mit kleinen oberflächennahen Gewinnungsanlagen zu erwarten. Um mittelfristig erschließbare Ersatz- oder Ergänzungsstandorte anbieten zu können, erfolgt am Landesamt für Umwelt (LfU) derzeit sowohl eine Validierung als auch eine Überprüfung der verfügbaren Grundwasserreserven. Diese Maßnahmen beinhalten die Überprüfung

- des nutzbaren Dargebots,
- der Schutzwürdigkeit und -fähigkeit der Erkundungsgebiete unter sich mittlerweile verändernden Nutzungssituationen, und
- der bisher in Nutzung übergegangenen Teilmenngen in den Erkundungsgebieten.



#### Ausgangslage

- 127 Erkundungen
- Zeitraum 1971 bis 2003
- 209 Mio. m<sup>3</sup>/a in 97 Gebieten
- 205 Mio. m<sup>3</sup>/a als überörtlich bedeutsam eingestuft
- Für 69 Erkundungen WSG ausgewiesen
- In 52 Gebieten VR-/VB-WV

Abbildung 4.2\_8: Grundwassererkundungsgebiete in Bayern und Angaben zur Ausgangsdatenlage (Quelle: LfU/Landesvermessung Bayern).



### 4.2.5 Gewässertemperatur und -ökologie Klimafolgen

Die mittlere Jahrestemperatur der bayerischen Fließgewässer hat sich in den vergangenen Jahrzehnten messbar verändert. In einer Studie des Vorhabens KLIWA zum Langzeitverhalten von Niedrigwasserabflüssen und Wassertemperaturen in Bayern wurde eine statistische Analyse von 50 bayerischen Temperaturmessstellen durchgeführt. Dabei konnten belastbar an etwa 75% der langjährigen Messstellen Temperaturzunahmen belegt werden (Abbildung 4.2\_9). Im Mittel betrug die Zunahme über alle Messstellen seit 1980 etwa +0,5 °C pro 10 Jahren, mit Schwerpunkt in den Monaten Mai bis August. Auch waren Verschiebungen im Jahrgang festzustellen. Zu klären ist allerdings noch, wie stark die beobachteten Änderungen lokal von bestehenden Wärmeeinleitungen bzw. von Änderungen im Abflussregime (z. B. Aufstau,

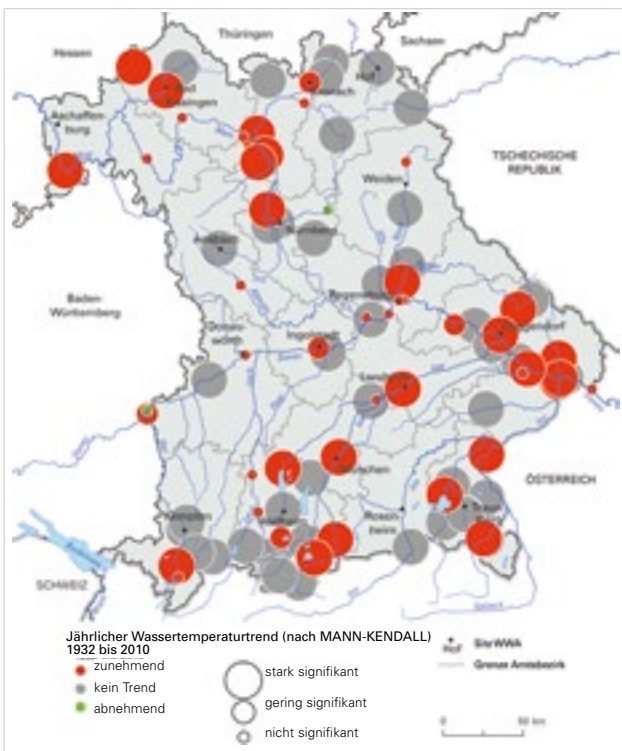


Abbildung 4.2\_9: Trends der mittleren jährlichen Wassertemperatur zwischen 1980 und 2010.

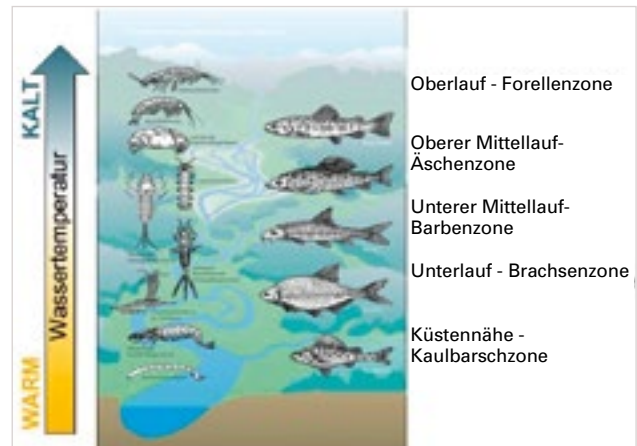


Abbildung 4.2\_10: Unterteilung von Fließgewässern entsprechend der typischen Fischregionen.

Wasserentnahmen) beeinflusst sind. Jedoch muss auch zukünftig von einer Erwärmung der Gewässer ausgegangen werden, da die Wassertemperatur eng an die Entwicklung der bodennahen Lufttemperatur gekoppelt ist.

Die Wassertemperatur beeinflusst maßgeblich eine Vielzahl von biologischen und physikalisch-chemischen Prozessen im Gewässer. Kurzfristige Extremereignisse mit sehr hohen Temperaturen, gefolgt von Sauerstoffmangel können unmittelbar zum Absterben von Organismen führen. Langfristig sind Veränderungen von Lebensgemeinschaften nicht auszuschließen, die sich auch auf deren Funktionen im Naturhaushalt auswirken können.

Die verschiedenen Gesellschaften von Tier- und Pflanzenarten innerhalb eines Fließgewässers sind an bestimmte Wassertemperaturzonen vom eher kalten Oberlauf hin zum vergleichsweise warmen Unterlauf angepasst (Abbildung 4.2\_10). Mit einem Anstieg der Gewässertemperatur wird erwartet, dass besonders temperatursensible Arten (z. B. Bachforelle, Insektenarten wie etwa Steinfliegenarten) sich in Zukunft weiter in die Oberläufe zurückziehen und ihr Lebensraum dadurch immer stärker eingeschränkt wird. Dagegen können sich wärme-liebende Arten der Unterläufe verstärkt ausbreiten.

Weiterhin können einige Neobiota (gebietsfremde Arten) wie beispielsweise die Kanadische Wasserpest, die Donauassel oder der Signalkrebs von wärmeren Wassertemperaturen profitieren und einheimische Arten verdrängen.

Grundsätzlich gelten die getroffenen Aussagen über die Auswirkungen erhöhter Lufttemperaturen auf die Fließgewässer auch für Seen. Die Seewassertemperaturen reagieren messbar auf die Erwärmung der bodennahen Lufttemperatur. Erwärmungen um mehrere Zehntel Grad Celsius im Tiefenwasser europäischer Seen wurden bereits registriert und sind durch viele Beispiele belegt. Ein wesentlicher physikalischer Effekt hierbei ist die Erhöhung der Schichtungsstabilität der Wassersäule und die Verlängerung der Schichtungsphasen im Jahr. Dadurch können sich insbesondere in belasteten Seen die Phasen von Sauerstoffmangel im Tiefenwasser verlängern und zu ernststen Problemen bei den betroffenen Organismen bzw. Lebensgemeinschaften (Biozöosen) führen. Zudem sind negative Veränderungen für den Stoffhaushalt und die Gewässerbiozönose zu erwarten. Insgesamt führt der Klimawandel zu einer Erhöhung der Trophie mit weitreichenden ökologischen Veränderungen in den Seen (z. B. Auftreten von Meromixie, Zunahme von Sauerstoffmangelsituationen, Verschwinden von Arten, die große Schwankungen der Umweltbedingungen nicht tolerieren (stenöke Arten), vermehrtes Auftreten von Neobiota, Nutzungsprobleme in Tourismus und Fischerei).

### Beispiele für konkrete Anpassungsmaßnahmen

#### Wärmelastpläne

Wärmelastpläne zeigen die aktuelle und mögliche zukünftige Wärmebelastung bei niedrigen Abflüssen im Gewässerlängsschnitt eines Fließgewässers auf, das heißt inwieweit sich die Wassertemperaturen bei verschiedenen Lastfällen, zum Beispiel bei extremen Niedrigwassersituationen, verändern und berechnen, welchen Auswirkungen maßgebliche Wärmeeinträge (z. B. Kühlwasser aus der Industrie)

haben. Der Vergleich der Temperaturentwicklung mit und ohne Wärmeeinleiter dient als Arbeitsgrundlage für weitergehende Betrachtungen wie zum Beispiel der gewässerökologischen Bewertung von vorhandenen und geplanten Wärmegroßeinleitungen sowie der Ermittlung von Handlungsbedarf im Vollzug der Wasserrahmenrichtlinie (WRRL).

Wärmelastrechnungen sind somit eine wichtige Planungs- und Genehmigungsgrundlage für bestehende und mögliche weitere Wärmeeinleiter und können bei neu zu genehmigenden Anlagen Aussagen darüber liefern, wie der Wärmehaushalt eines Gewässers durch zusätzliche Wärmeeinleitungen beeinflusst wird. Den Betreibern kann so schon im Vorfeld signalisiert werden, inwieweit zum Beispiel zusätzliche Rückkühlmaßnahmen einzuplanen sind, um Betriebseinschränkungen zu vermeiden. Für die Donau liegt bereits ein Wärmelastplan vor, für den Main sowie die Isar und die Alz befinden sich weitere in Bearbeitung.

#### Alarmplan staugeregelter Main-Gewässerökologie

Der Alarmplan für den bayerischen staugeregelten Main ist ein Melde- und Warnkonzept, das bei kritischen Wasserqualitäten im unterfränkischen Main zwischen Trunstadt und Kahl am Main zum Einsatz kommt. Dieser Alarmplan ist nötig, da die dortigen Staustufen die Fließgeschwindigkeit stark reduzieren und in extremen sommerlichen Hitzeperioden mit überdies geringen Abflüssen ein starkes Aufheizen des Wassers bedingen, was zu einer erheblichen Beeinträchtigung der Gewässerqualität und -ökologie führen kann. Durch entsprechende Meldestufen sensibilisiert der Alarmplan die Anlieger, die Kommunen, die einleitenden Industrien und kommunalen Kläranlagen in ihrem Verhalten, um den in dieser Zeit empfindlichen Main nicht zusätzlich zu belasten. Zudem ist mit den Warnstufen auch eine erhöhte Intensität von Beobachtungen und Messungen verbunden. Die Erstellung eines Alarmplans für die Donau ist ebenfalls in Arbeit.

## EXKURS FORSCHUNG

Projektleitung: Prof. Dr. Ralf Ludwig, Ludwig-Maximilians-Universität München (LMU), Department für Geographie; Projektpartner: Institut für Informatik & Leibniz Rechenzentrum, LMU sowie aus Quebec das Consortium Ouranos, das Centre d'Expertise hydrique du Québec und die École de Technologie Supérieure in Montreal

# Klimawandel und hydrologische Extremereignisse – Risiken und Perspektiven für die Wasserwirtschaft in Bayern (KlimEx)

Das Projekt KlimEx wird durch ein bayerisch-kanadisches Forschungskonsortium unter fachlicher Begleitung des Landesamts für Umwelt von 2015 bis Anfang 2019 durchgeführt. Es widmet sich der



Abbildung 1: Wie werden sich künftige Hoch- und Niedrigwassersituationen entwickeln?

Fragestellung extrem hoher und niedriger Abflussereignisse (hydrologische Extremereignisse) im Zusammenhang mit dem Klimawandel: Nicht zuletzt durch die zum Teil dramatischen Folgen der Hochwasserereignisse 2013, 2005, 2002 und 1999 und der ausgedehnten Trockenperioden (Herbst 2011, Frühjahr 2007, Sommer 2003 sowie Sommer 2015) der jüngeren Vergangenheit in Bayern ist die Betrachtung hydrologischer Extremereignisse in den Fokus des Interesses gerückt.

Ziel des Projekts KlimEx ist es, derartige extreme Ereignisse als Folge des Klimawandels verbessert analysieren und beziffern zu können sowie aus diesen Ergebnissen Empfehlungen für eine vorausschauende Bewirtschaftung der bayerischen Wasserressourcen abzuleiten. Das Projekt bezieht sich im Schwerpunkt auf die Bewertung der zukünftigen Hochwassersituation in Bayern, wird aber auch die Entwicklung von Niedrigwassersituationen untersuchen und dazu räumlich differenzierte, qualitative Aussagen treffen.

Zu diesem Zweck bündeln die Projektpartner der Ludwig-Maximilians-Universität München (LMU) und aus Kanada ihre Kompetenzen in den Bereichen der Klimamodellierung, der Abflussmodellierung sowie der Hochleistungsrechentechnik und Datenmanagements, um anhand der derzeit verfügbaren Klimaprojektionen die Bandbreite zukünftiger Abflussentwicklungen für Gesamt-Bayern abzuleiten. Die dazugehörigen Rechnungen werden am Leibniz-Rechenzentrum in Garching durchgeführt. Die im Projekt geplanten Untersuchungen bauen auf den Erkenntnissen der bisher gemeinsam mit den kanadischen Projektpartnern durchgeführten Arbeiten auf.

Die Ergebnisse sollen auch weiteren Fachdisziplinen über die Wasserwirtschaft hinaus zur Verfügung stehen. Die Finanzierung erfolgt durch das Bayerische Staatsministerium für Umwelt und Verbraucherschutz und durch Projektpartner in Kanada.

## EXKURS FORSCHUNG

Dr. Uta Raeder, Dr. Markus Hoffmann, Prof. Dr. Arnulf Melzer ;Technische Universität München (Limnologie); Projekt: „Auswirkungen des Klimas auf Ökosysteme und klimatische Anpassungsstrategien“

## Klimawandel begünstigt invasive Wasserpflanzen

Das oben genannte Forschungsprojekt der TU München beschäftigt sich mit der Frage des Einflusses

Abbildung 1: Nixkraut (*Najas marina*, Quelle: Limnologische Forschungsstation Iffeldorf)



des Klimawandels auf die Etablierung invasiver Wasserpflanzen in bayerischen Seen. In Gewässern beeinflussen die durch den Klimawandel bedingten erhöhten durchschnittlichen Wassertemperaturen die aquatischen Lebensgemeinschaften nachhaltig. Schmalblättrige Wasserpest (*Elodea nuttallii*), Nixkraut (*Najas marina*) und Wasserpflanzen aus wärmeren Regionen, die in unterschiedlicher Weise durch den Klimawandel gefördert werden, breiten sich derzeit rasant in bayerischen Gewässern aus.

Untersuchungen in Laborexperimenten und im Freiland durch Forschungstaucher haben gezeigt, dass die Samen des Nixkrauts erst ab einer Wassertemperatur von 15 °C auskeimen und sich zu Pflanzen entwickeln. Nur wenn die Wassertemperatur mindesten sechs Wochen über 20 °C liegt, können Blüten und schließlich neue Samen gebildet werden. Die Regenerationsfähigkeit der Schmalblättrigen Wasserpest ist extrem groß. Selbst aus kleinsten Sprossstücken entstehen wieder neue Pflanzen, die auch bei niedrigen Temperaturen und vergleichsweise schlechten Lichtverhältnissen wachsen können.

Abbildung 2: Schmalblättrige Wasserpest (*Elodea nuttallii*, Quelle: Limnologische Forschungsstation Iffeldorf)

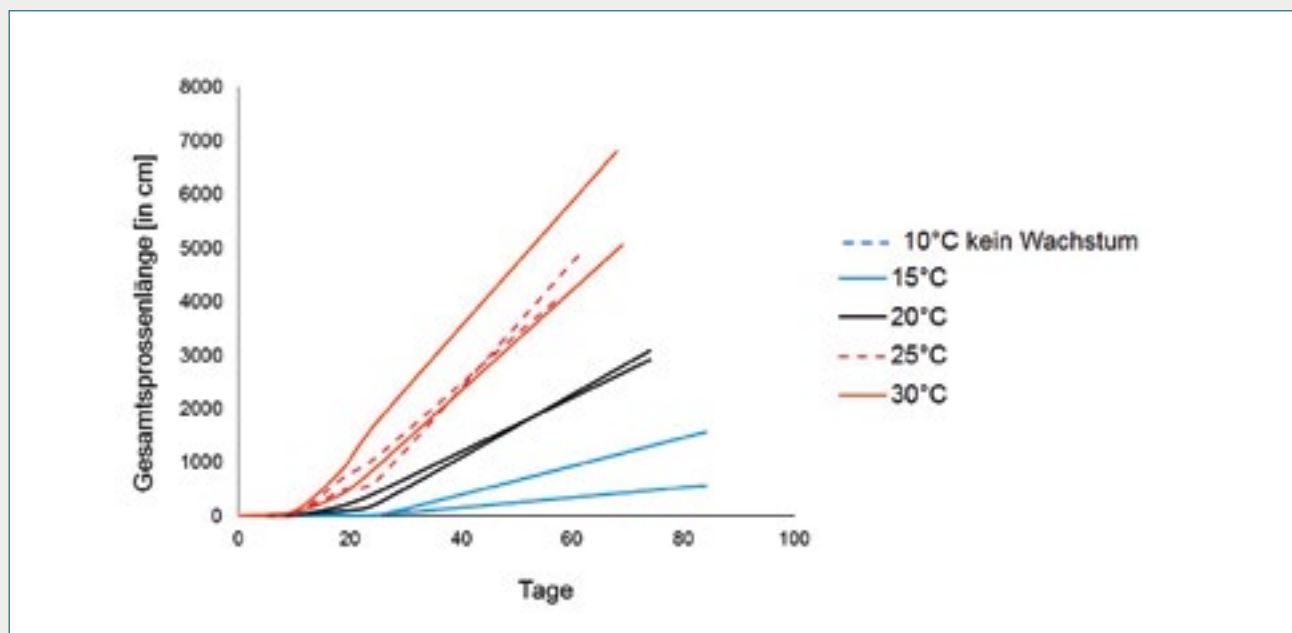


Das Nixkraut (*Najas marina*) wird durch wärmere Gewässer im Sommer gefördert. Früher erwärmten sich nur wenige bayerische Seen über einen längeren Zeitraum auf entsprechende sommerliche Wassertemperaturen, so dass das Nixkraut zu den seltenen und geschützten Arten zählte. Infolge des Klimawandels verlängern sich die Vegetationsperioden in Seen und zunehmend mehr Gewässer erreichen Temperaturen, die ein Gedeihen des wärmeliebenden Nixkrauts ermöglichen. Die Schmalblättrige Wasserpest (*Elodea nuttallii*) profitiert von höheren Wassertemperaturen im Winter. Viele Seen frieren nur noch kurz oder gar nicht mehr zu. Auch wenn die Schmalblättrige Wasserpest ihr Wachstum und ihre vegetative Vermehrung bei niedrigeren Temperaturen verlangsamt, gedeiht sie weiterhin. Auf diese Weise kann sich diese Art in der Konkurrenz durchsetzen, da die Schmalblättrige Wasserpest bereits große Bestände ausbilden kann, bevor im Frühsommer das Wachstum anderer Wasserpflanzen einsetzt.

Beide Arten, die Schmalblättrige Wasserpest und das Nixkraut, gelten als sogenannte invasive Arten, die bei optimalen Bedingungen zu Massenvorkommen neigen. Häufig bilden sie Reinbestände aus und verdrängen zu Ungunsten der Artenvielfalt viele andere Wasserpflanzen.

Die Massenvorkommen dieser Wasserpflanzen führen bereits heute und erwartungsgemäß zunehmend in der Zukunft zu wirtschaftlichen Problemen für die Schifffahrt und die Fischerei. Zusätzlich schränkt das Vorkommen des Nixkrauts den Erholungswert von Seen drastisch ein, da diese Wasserpflanze mit kräftigen Stacheln ausgestattet ist und daher eine Nutzung als Badegewässer unmöglich macht. Es laufen bereits Untersuchungen zur Anpassungsmaßnahmen wie zum Beispiel Mahd- und Ernterversuche sowie Abdeckungen mit Jutegewebe.

Abbildung 3: Wachstum des Nixkrauts in Aquarien bei verschiedenen Temperaturen (Quelle: Limnologische Forschungsstation Iffeldorf).



## 4.3 Boden

### 4.3.1 Klimafolgen und Anpassung

Der Boden erfüllt vielfältige und wichtige Funktionen in unserer Umwelt. Auf ihm wird nicht nur der weitaus größte Teil unserer Nahrungsmittel produziert, er filtert auch das Niederschlagswasser zu sauberem Grundwasser und er ist das größte terrestrische Recyclingsystem, das abgestorbene Tier- und Pflanzenreste Jahr für Jahr neuem Leben und Wachsen zuführt. Sind die natürlichen Bodenfunktionen beeinträchtigt oder beseitigt, hat dies hohe Belastungen für das gesamte Ökosystem zur Folge, wie zum Beispiel:

- Verlust der Biodiversität (Tiere, Pflanzen, insbes. Bodenorganismen)
- Beeinträchtigung von Wasser- und Nährstoffkreisläufen
- Schädigung der Filter-, Puffer- und Stoffumwandlungseigenschaften, insbesondere auch zum Schutz des Grundwassers und des Klimas
- Verminderung der Bodenfruchtbarkeit
- Gefährdung der landwirtschaftlichen und forstlichen Nutzung

Um die Auswirkungen des Klimawandels auf den Boden zu minimieren, formuliert die bayerische Staatsregierung in der Bayerischen Klima-Anpassungsstrategie (BayKLAS) folgendes Ziel:

- Sicherung der natürlichen Bodenfunktionen und deren ökologischer Serviceleistungen.

Um zukünftige erforderliche Handlungen zu identifizieren bzw. über Handlungsoptionen entscheiden zu können erfolgt eine Forcierung der flächendeckenden Bestimmung der Bodeneigenschaften und die Anpassung bzw. Optimierung von bestehenden Bodenbeobachtungssystemen an die neuen Fragestellungen. Nachfolgend werden an 3 Beispielen auf Basis von potentiellen Klimafolgen die Ergebnisse von Datenerhebungen zu Bodeneigenschaften, die im Rahmen von Projekten des Landesamtes für Umwelt (LfU) mit der Technischen Universität

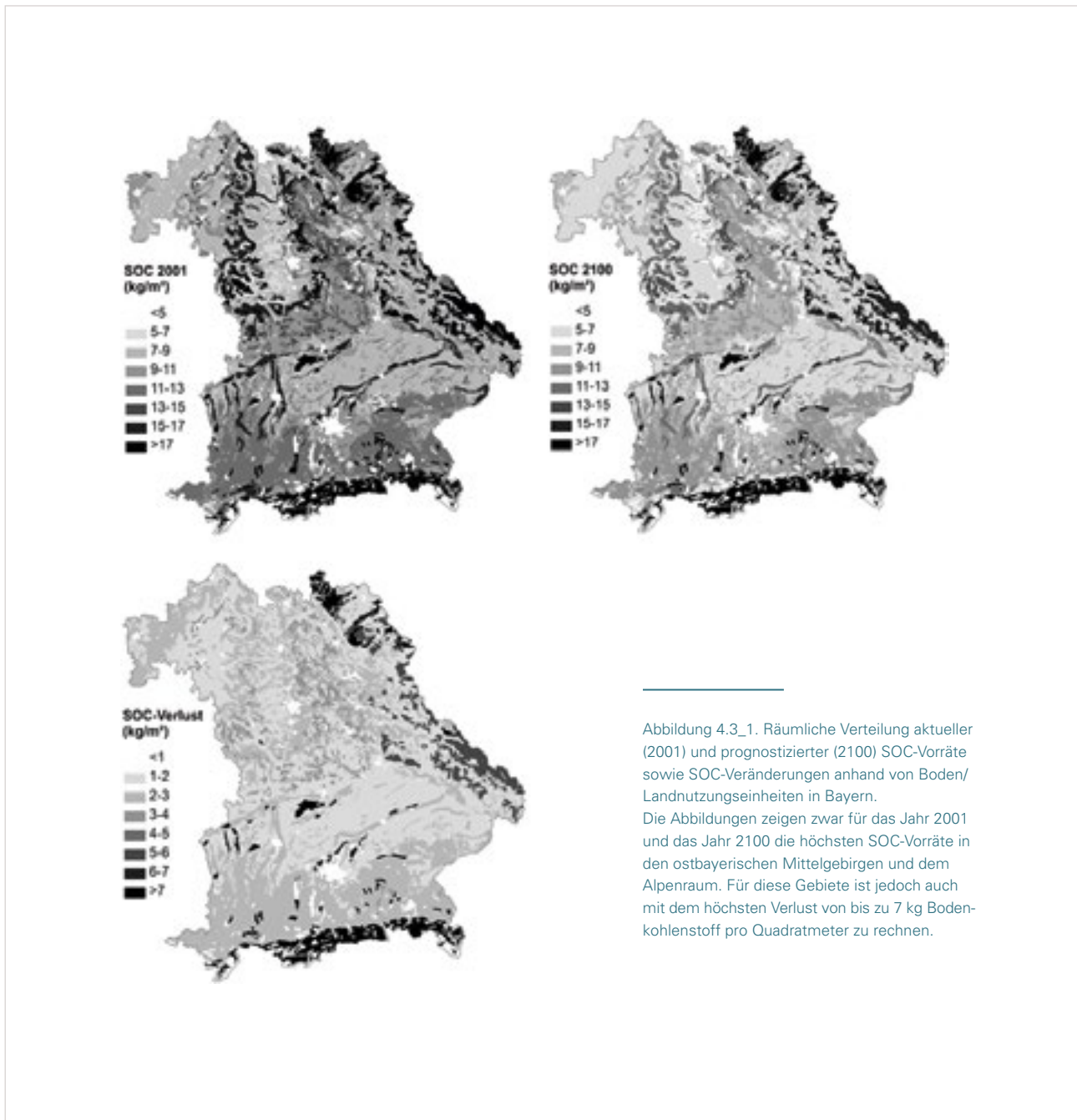
München bzw. den zentralen Umweltbehörden Baden-Württembergs und von Rheinland-Pfalz erhoben wurden, vorgestellt und resultierende Anpassungsmaßnahmen erörtert.

### 4.3.2 Kohlenstoffspeicher Boden Klimafolgen

Einerseits droht mit zunehmender Erwärmung und verstärkt durch unangepasste Nutzung eine Beschleunigung der Kohlenstofffreisetzung, andererseits besitzt der Boden auch das Potenzial, zusätzlich Kohlenstoff auf Dauer festzulegen und damit dem Kreislauf zu entziehen.

Unter Verwendung eines Simulationsmodells [1] wurde der Gehalt an organischem Kohlenstoff (SOC-Vorräte) für Bayern bis in das Jahr 2100 unter Annahme des Emissionsszenarios A1B („ausgewogene Nutzung aller Energiequellen“) und eines gleichbleibenden Kohlenstoffeintrags für ausgewählte Landnutzungsvarianten exemplarisch prognostiziert (Abbildung 4.3\_1). Demnach ist mit Kohlenstoffverlusten von 1 bis 3 kg m<sup>-2</sup> im Großteil Bayerns bis 2100 zu rechnen. In Mooren, den Mittelgebirgen und Alpen steigen die Verluste aufgrund hoher labiler SOC-Vorräte auf bis zu 7 kg m<sup>-2</sup> an. Allerdings sind diese vorläufigen Prognosen mit Unsicherheiten behaftet, da sich auch der Kohlenstoffeintrag durch den Anstieg der atmosphärischen CO<sub>2</sub>-Konzentration und die Änderung von Temperatur und Niederschlag im Vergleich zur gegenwärtigen Situation verändern kann.

Zur bayernweiten Berechnung der Kohlenstoffvorräte in Böden wurden Bodendaten ausgewertet, die nach 1990 erhoben wurden, um zeitverursachte Kohlenstoffvariationen auszuschließen. Die ausgewählten Standorte umfassen 1460 Bodenprofile. Der Datensatz repräsentiert dabei die wichtigsten Landnutzungen in Bayern mit 384 Standorten unter Acker (26% des Datensatzes), 333 Standorten unter Grünland (23%) und 596 Standorten unter Wald (41%). Die verbleibenden Standorte teilten sich auf



in 68 Standorte in Mooren und 79 Standorte unter anderen Landnutzungen.

Es hat sich gezeigt, dass die Landnutzung nicht zwangsweise der kontrollierende Faktor für die Kohlenstoffspeicherung ist, sondern auch Prozesse bei der Entstehung der jeweiligen Böden bzw. Bodentypen hier von Bedeutung sind. So weisen grundwasserbeeinflusste Böden unter Grünland höhere Kohlenstoffvorräte als Ackerböden auf, während Kohlenstoffvorräte in Waldböden häufig überschätzt werden. Acker- und Grünlandböden speichern insgesamt 45% der Gesamtmenge an Kohlenstoff der Böden Bayerns, Waldböden 33%

der Gesamtvorräte. Dabei sind keine Unterschiede zwischen Laub-, Misch- und Nadelwald erkennbar. Temperatur und Niederschlag sind die wichtigsten Steuergrößen der Kohlenstoffspeicherung in Waldböden.

Kohlenstoffvorräte werden nach [2] in eine labile Fraktion, eine intermediäre Fraktion und eine stabile Restfraktion unterteilt. 90% der gesamten Kohlenstoffvorräte landwirtschaftlicher Böden befinden sich in intermediären und stabilen Kohlenstoffreservoirs [3]. In Waldböden liegen dagegen 40% der gesamten löslichen organischen Kohlenstoffvorräte im labilen Kohlenstoffreservoir vor, nur 60% befinden

sich in intermediären und stabilen Kohlenstoffreservoirs. Acker- und Grünlandböden sind vorteilhaft im Hinblick auf eine langfristige Kohlenstoffspeicherung. Im Gegensatz dazu sind in Waldböden hohe potentielle Kohlenstoffverluste in Folge eines Temperaturanstiegs, Waldbränden und anthropogenen Störungen zu erwarten. Hohe labile Kohlenstoffvorräte wurden in den Alpen und Mittelgebirgen sowie in Flussauen und Mooren festgestellt: In diesen Naturräumen sollen demzufolge Störungen wie Landnutzungswechsel etc. vermieden werden.<sup>1</sup>

#### Anpassungsmaßnahmen, mit denen der Kohlenstoffspeicher Boden maximiert werden kann:

- Vermeidung von Bodenstörungen (Landnutzungswechsel, Bodenbewegungen, Entwässerung, etc.) vor allem in den Alpen, Mittelgebirgen, Flussauen und Mooren, damit der hohe Vorrat labil gebundenen Bodenkohlenstoffs erhalten werden kann.
- Schrittweiser Umbau von Nadelwäldern mit hohen Bodenkohlenstoffvorräten in der Auflage, die bei einer Temperaturzunahme freigesetzt werden können, in naturnahe, klimatolerante Laub- und Mischwälder mit einem deutlich höheren Anteil von langfristig gebundenen SOC-Vorräten im Mineralboden.
- Optimierung der Bodenbewirtschaftung im Hinblick auf die Nutzung des noch nicht ausgeschöpften Speicherungspotentials von landwirtschaftlichen Böden.

#### 4.3.3 Bodenerosion Klimafolgen

Bodenerosion mindert die Ertragsfähigkeit der Böden, trägt wesentlich zur Belastung der Gewässer mit Sedimenten und Nährstoffen bei und kann direkt oder indirekt zu erheblichen Schäden und Störungen im besiedelten Raum führen [5] (Abbildung 4.3\_2). Erosion kann durch Wasser oder Wind verursacht werden:

- Winderosion entsteht, wenn starker Wind über trockene, unbewachsene, leichte Böden, wie reine Sand- und Schluffböden, oder ackerbaulich genutzte Moore weht. In Bayern ist die Winderosion meist von untergeordneter Bedeutung.
- Wassererosion entsteht, wenn starke Niederschläge nicht mehr versickern sondern an der Bodenoberfläche abfließen. Fehlende oder lückenhafte Bedeckung durch Pflanzen verstärkt die Bodenerosion. Begünstigt wird die Erosion durch stark geneigte oder lange, ungegliederte Hänge. Besonders in den hügeligen, intensiv landwirtschaftlich genutzten Gebieten tritt Wassererosion auf; besonders gefährdet sind die fruchtbaren Lößböden Bayerns (Abbildung 4.3\_3).



Abbildung 4.3\_2: Bodenerosion durch Wasser auf einer mit Mais bestellten Fläche in Schwaben.

<sup>1</sup> [www.lfu.bayern.de/boden/klimawandel\\_und\\_boden/humuskoeper/index.htm](http://www.lfu.bayern.de/boden/klimawandel_und_boden/humuskoeper/index.htm)



Jährlich gehen in Bayern durchschnittlich ca. 3 t/ha, regional zum Teil bis zu 10 t/ha, Oberboden durch Wassererosion verloren und gelangen zum allergrößten Teil in die Oberflächengewässer. Ein Verlust der Bodenfruchtbarkeit sowie zunehmende Verschlammung und Versandung von Fließgewässern mit negativer Auswirkung auf Abflussregime und Aquafauna sind die Folge.

Bedeutendster Auslöser von Bodenerosion durch Wasser sind Starkregenereignisse auf von Pflanzen gering bis unbedeckten Böden. Durch den Klimawandel kann sich die Vegetationsdauer verlängern, gleichzeitig sind – den gegenwärtigen Klimasimulationen zu Folge – vermehrt intensive Starkregenereignisse zu erwarten. Die Zunahme von Häufigkeit und Intensität von Starkregenereignissen kann damit zu einer deutlich verstärkten Erosion führen. Als Folgen dieser Entwicklung könnten sich ergeben:

Direkte Schäden auf der Fläche:

- Verringerung der Bodenfruchtbarkeit
- Ernteausfall in Folge eines Verlusts an Kulturpflanzen
- Erhebliche Bewirtschaftungsprobleme durch Erosionsrinnen und -gräben

Schäden auf angrenzenden Flächen / Infrastruktur:



Abbildung 4.3\_3: Bodenerosion durch Wasser auf einer Ackerfläche in Oberfranken.

- Ernteausfall durch Überdeckung benachbarter Flächen
- Verfrachten von an den Boden gebundenen Stoffen in Bäche, Flüsse und Seen sowie benachbarte Ökosysteme (Eutrophierung)
- Steigerung der lokalen Überschwemmungsgefahr durch oberflächlichen Wasserabfluss
- Verunreinigung von Wegen und Straßen
- Verunreinigung von Gräben und Kanalisation
- Verunreinigung in Wohngebieten und von Privateigentum

Die Weiterentwicklung und konsequente Umsetzung von Maßnahmen zum Erosionsschutz dient nicht nur dem Erhalt der Produktivität landwirtschaftlicher Flächen, sondern sollte in Anbetracht der Kosten für die Sanierung von Folgeschäden, wie zum Beispiel Gewässerunterhaltungs- oder Hochwasserschutzmaßnahmen, vermehrt in das öffentliche Bewusstsein rücken.

Die Bestimmungen der Gemeinsamen Agrarpolitik (GAP) der Europäischen Union erfordern von den Mitgliedsstaaten, Regelungen zum Schutz des Bodens vor Erosion zu erlassen. In Deutschland wurden die im Rahmen der GAP verbindlichen Standards umgesetzt. Dadurch sind die Landesregierungen verpflichtet, die landwirtschaftlichen Flächen nach dem Grad ihrer Erosionsgefährdung durch Wasser und Wind einzustufen (siehe Kapitel 4.4 Landwirtschaft).

### Konkrete Anpassungsmaßnahmen

Standortangepasste Nutzung, insbesondere Berücksichtigung der Hangneigung, der Wasser- und Windverhältnisse:

- Ganzjährige Bodenbedeckung
- Umsetzung weiterer erosionsmindernder landwirtschaftlicher Bodenbearbeitungs- und Bewirtschaftungsmaßnahmen
- Förderung und Erhaltung von Gewässerrandstreifen zum Vermeiden von Gewässerbelastungen
- Schutz und Neuanlage von Rückhalteeinrichtungen und Retentionsflächen

#### 4.3.4 Moorböden Klimafolgen

Moorböden binden in erheblichem Maße Kohlenstoff. Durch Moorentwässerung und Grünlandumbruch werden die Voraussetzungen für einen aeroben Abbau der organischen Substanz geschaffen und der im Torf gespeicherte Kohlenstoff freigesetzt. Durch die im Rahmen einer Klimaveränderung zu erwartende Erwärmung der bodennahen Lufttemperatur wird dieser Prozess voraussichtlich noch beschleunigt. Hinzu kommt, dass Torf im trockenen Zustand hydrophob reagiert, sich also nur schlecht mit Wasser verbindet. Sollte die prognostizierte verstärkte Neigung zu mehr Wetterextremen, wie Trockenheit und Starkregen eintreten, ist zu erwarten, dass sich Moore dann nur noch mangelhaft durchfeuchten und somit die Torfumsetzung und CO<sub>2</sub>-Ausgasung beschleunigt wird.

#### Verbreitung der Moorböden

In Bayern liegt mit der Übersichtsbodenkarte im Maßstab 1:25000 (ÜBK25) eine flächendeckende Karte in digitaler Form vor. Über 700 Legendeneinheiten beschreiben die Vielfalt der Böden in Bayern, die sich aus Geologie, dem Relief und den klimatischen und hydrologischen Verhältnissen ergibt. Die

Kenntnis der Verbreitung dieser Böden – zumindest auf mittelmaßstäblicher Ebene – erleichtert es für Landnutzer und Planer, Anpassungsstrategien für den Boden hinsichtlich des Klimawandels gezielt vorzunehmen.

In einer thematischen Auswertung der ÜBK25 wurden in Anlehnung an die IPCC Guidelines [6] Legendeneinheiten ausgewählt, die Hochmoor- und Niedermoorböden entsprechen, aber auch Anmoore und humusreiche Feuchtböden umfassen. Als Ergebnis liegt für Bayern eine Moorbodenübersichtskarte im Maßstab 1:500 000 (MBÜK500) vor (Abbildung 4.3\_4), die diese nicht nur für den Wasserhaushalt sondern auch für die Kohlenstoffspeicherung schutzwürdigen Böden aufzeigt. Zudem sind etliche Flächen aus Gesichtspunkten des Naturschutzes von Interesse. Mit der digitalen Ausgabe dieser Karte kann ein aktiver Moorbodenschutz durchgeführt werden, der allen Akteuren im Klimaschutz empfohlen wird.

#### Anpassungsmaßnahmen

- Berücksichtigung der Moorbodenübersichtskarte, besser der ÜBK25 (Übersichtsbodenkarte), bei Beratung und Planung zur Landnutzung, insbesondere in der Landwirtschaft.
- Berücksichtigung der Moorbodenübersichtskarte, besser der ÜBK25, bei sonstigen Bauleit- und Straßenplanungen hinsichtlich der Vermeidung von Bodenaushub.
- Berücksichtigung der Moorbodenübersichtskarte, besser der ÜBK25, bei der Renaturierung und CO<sub>2</sub>-Bilanzierung (Emissionskontingente).

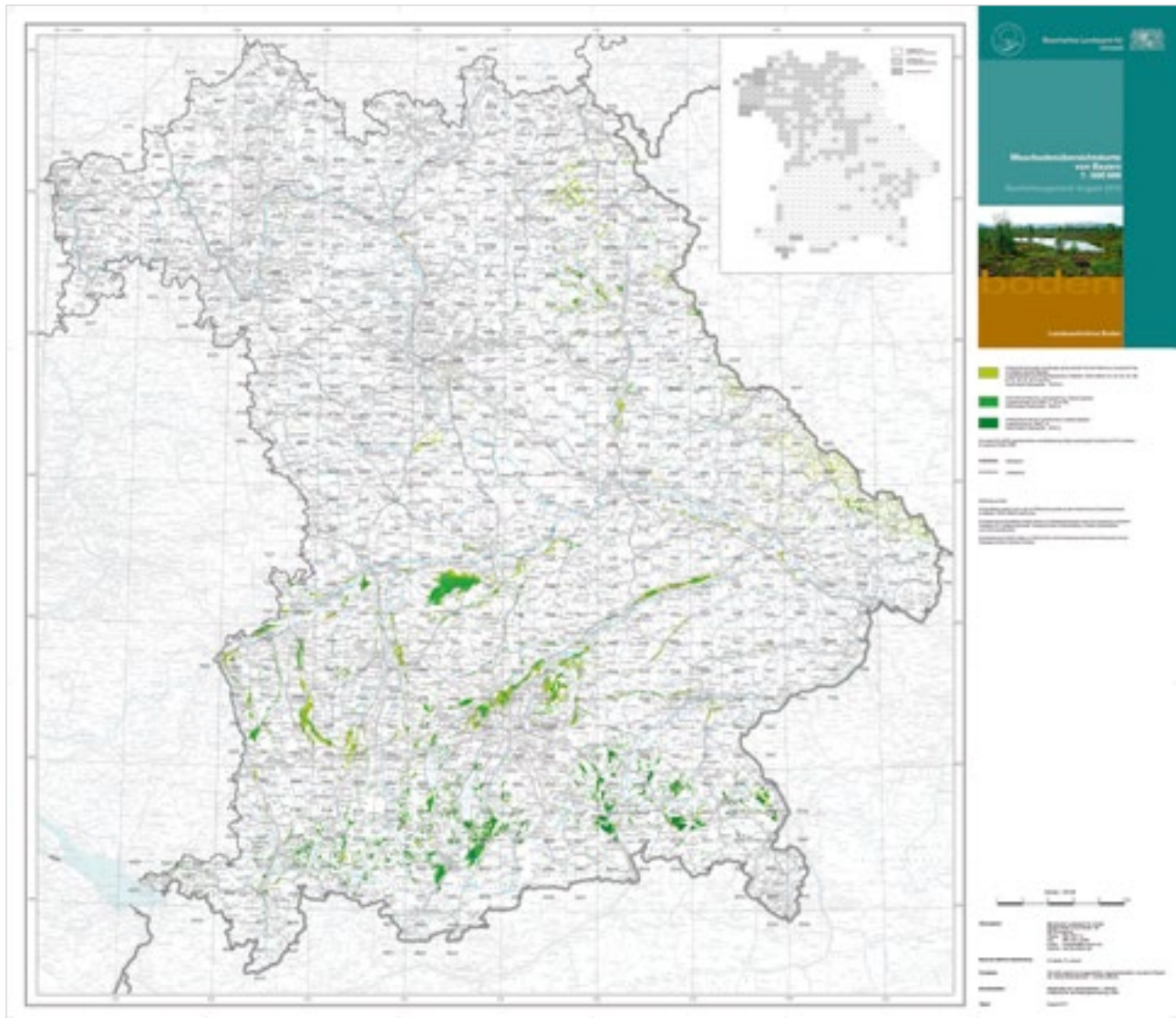


Abbildung 4.3\_4: Moorbodenübersichtskarte von Bayern im Maßstab 1:500000

#### Literatur

- [1] Coleman, K. (1999): RothC-26.3: A model for the turnover of carbon in soil (Model description and windows users guide). IACR Rothamsted, Harpenden
- [2] Zimmermann, M., Leifeld, J., Schmidt, M.W.I., Smith, P., und Fuhrer, J. (2007): Measured soil organic matter fractions can be related to pools in the RothC model. *European Journal of Soil Science*, 58(3)
- [3] Wiesmeier, M. (2014): Der Humuskörper bayerischer Böden im Klimawandel Auswirkungen und Potenziale. *Umwelt Spezial*, Bayerisches Landesamt für Umwelt, Augsburg
- [4] Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft (2013): Wirksamkeit von Erosionsschutzmaßnahmen Ergebnisse einer Feldstudie. Freising
- [5] Umweltbundesamt (2013): Themen: Boden | Landwirtschaft | Bodenbelastungen | Erosion. <http://www.umweltbundesamt.de/themen/boden-landwirtschaft/bodenbelastungen/erosion> (Abgerufen am 17. März 2015)
- [6] Intergovernmental Panel on Climate Change (2006): 2006 Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories

---

## EXKURS FORSCHUNG

---

Ralf Kiese, Michael Dannenmann, Klaus Butterbach-Bahl; Karlsruhe Institut für Technologie (KIT), Institut für Meteorologie und Klimaforschung, Atmosphärische Umweltforschung (IMK-IFU), Garmisch-Partenkirchen

---

# Auswirkung des Klimawandels auf die Treibhausgasflüsse von Grünlandböden im Alpen- und Voralpenraum

Etwa ein Drittel der landwirtschaftlich genutzten Fläche in Bayern ist Grünland mit einem Verbreitungsschwerpunkt in der hoch klimasensitiven Alpenvorlandregion. Da Grünlandböden erhebliche Kohlenstoff- und Stickstoffspeicher darstellen, kommt ihnen eine große Bedeutung beim Klimaschutz zu. Welche Auswirkungen die Klimaänderung auf die Kohlenstoff- und Stickstoffspeicher von alpinem Grünland hat, ist bisher wenig bekannt, insbesondere unter dem Hintergrund dass die gegenwärtige Klimaerwärmung im Alpenraum etwa doppelt so stark ist wie im globalen Durchschnitt. Deshalb wurde seitens des KIT/IMK-IFU ein in-situ Klimafeedback-Experiment im Ammer-Einzugsgebiets initialisiert, in dem Änderungen der Wasser-, Kohlenstoff- und Stickstoffbilanz von Grünlandböden und damit verbundene Änderungen der Quell- und Senkenstärke von Treibhausgasen ( $\text{CO}_2$ ,  $\text{CH}_4$ ,  $\text{N}_2\text{O}$ ) sowie Austräge von Nährstoffen mit dem Sickerwasser erfasst werden.

In den Jahren 2010 und 2011 wurden hierzu im Rahmen der BMBF/ Helmholtz Initiative „TERENO“ (Terrestrial Environmental Observatories) mehrere Klima-Feedback-Stationen im Ammer-Einzugsgebiet entlang eines Höhen- und Klimagradienten eingerichtet. An diesen Stationen werden insgesamt 36 Groß-Lysimeter mit intakten Grünland-Bodenkernen und Vegetation (2,5-3,5 t; 1 m<sup>2</sup> x 1,4 m) untersucht. Diese werden teils an ihrem Ursprungsort und teils entlang des natürlich gegebenen Höhengradienten von höher gelegenen zu niedriger gelegenen wärmeren Standorten (850 m Graswang; 750 m Rottenbuch; 600 m Fendt/ Peißenberg) versetzt betrieben. Sie sind damit den für die kommenden Jahrzehnte erwarteten Klimabedingungen ausgesetzt. Um Rückkopplungseffekte des landwirtschaftlichen Managements mit zu berücksichtigen, wird jeweils die Hälfte der Lysimeter extensiv bzw. intensiv bewirtschaftet. Die Messungen des Treibhausgas-austausches erfolgt mittels statischer Kammern sowie mit modernster Robotermetesstechnik, die in Verbindung mit Infrarot-Laser-Absorptions-Spektroskopie zeitlich hoch aufgelöste Datensätze von  $\text{CO}_2$ ,  $\text{N}_2\text{O}$  und  $\text{CH}_4$  Emissionen liefert (Abbildung 1).

Die bisher vorliegenden Ergebnisse aus diesem Experiment zeigen, dass der Klimawandel sowohl das Pflanzenwachstum als auch die Kohlenstoff- und Stickstoffumsetzung im Boden stimuliert. Dies führt zu einer generellen Erhöhung von  $\text{CO}_2$ -Emissionen, jedoch nur zu einer vergleichsweise geringeren Zunahme der  $\text{N}_2\text{O}$ -Emissionen, maßgeblich im Frühjahr und im Sommer. Weiterhin hängt die jährliche Freisetzung von  $\text{N}_2\text{O}$  überwiegend vom Auftreten und der Intensität von Frost-Tau-Ereignissen ab. Trotz der niedrigen Temperaturen im Winter und des biologischen Ursprungs von  $\text{N}_2\text{O}$  zeigt sich, dass die speziellen Bedingungen während Frost-Tau-Ereignissen zu vergleichsweise hohen Emissionen führen, die sogar das jährliche  $\text{N}_2\text{O}$ -Budget eines Standortes dominieren können. Da der Klimawandel in der Alpen- und Voralpenregion die Schneehöhe und die Dauer der Schneebedeckung

von Böden reduzieren wird, ist zukünftig wegen des Fehlens der isolierenden Wirkung des Schnees insbesondere in höheren Lagen mit einer Zunahme der Häufigkeit, aber auch der Intensität von Frost-Tau-Ereignissen und damit höheren  $N_2O$ -Emissionen im Winter von Grünlandböden zu rechnen. Die generelle Steigerung der Aufnahme von  $CH_4$  aus der Atmosphäre unter Klimawandelbedingungen ist unter dem Gesichtspunkt der Verminderung des Klimawandels positiv zu bewerten. Insgesamt wird der potentielle Anstieg der Treibhausgasbilanz von Grünlandböden durch den Klimawandel trotz der deutlich höheren Treibhausgaspotentiale von  $N_2O$  (298) und  $CH_4$  (34) maßgeblich von der Zunahme der  $CO_2$ -Emissionen abhängen. Derzeitige Untersuchungen zum gesamten Kohlenstoffkreislauf der Grünlandböden zeigen jedoch, dass ein Teil des

verstärkt über die Respiration freigesetzten  $CO_2$  aus der Erhöhung der Brutto-Primärproduktion (gesteigertes Pflanzenwachstum) unter Klimawandelbedingungen resultiert und somit als klimaneutral zu betrachten ist. Da die Zunahme des Pflanzenwachstums unter extensiver Bewirtschaftung geringer ist als unter intensivem Grünlandmanagement, zeichnet sich ab, dass extensives Grünland stärker von einer Erhöhung des Treibhausgasausstausches durch Klimawandel betroffen ist als intensives Grünland.

---

Abbildung 1: Vollautomatische Messanlage zur Erfassung des Treibhausgasausstauschs ( $CO_2$ ,  $N_2O$ ,  $CH_4$ ) von Grünlandböden am TERENO Standort Fendt/ Peissenberg (Quelle: Dr. Ralf Kiese, Karlsruher Institut für Technologie (KIT/IMK-IFU)).



## EXKURS FORSCHUNG

Dr. Andreas von Poschinger; Bayerisches Landesamt für Umwelt (LfU)

## Permafrost in Bayern

Permafrost tritt in Bayern nur in wenigen Hochlagen auf. Man findet ihn im Watzmanngebiet, im Karwendel, an der Zugspitze und im Allgäuer Hauptkamm (Abbildung 1). Taut das bisher dauerhaft gefrorene Gestein durch den Klimawandel auf, der gerade in den Alpen die Temperaturen steigen lässt, kann dies weitreichende Folgen haben: Locker gewordener Fels kann leicht in Bewegung geraten, es drohen Steinschlag und Felsstürze. Zudem weiß man nicht, wie sich die Wasserwegsamkeiten durch den Wegfall des abdichtenden Eises ändern. Dies kann auch zu größeren Hangbewegungen führen.

Um Veränderungen des Permafrosts dokumentieren zu können, hat das LfU im Jahr 2007 im Auftrag des Bayerischen Umweltministeriums im Inneren des Zugspitzgipfels eine Messanlage errichtet. In zwei Bohrlöchern, die quer durch den Gipfelkamm verlaufen, wurde je eine Messkette mit Temperatursensoren eingebaut. Dort wird automatisiert stündlich die Temperatur gemessen und vor Ort gespeichert. Die bisherigen Ergebnisse zeigen, dass der Fels an der sonnenexponierten Südseite im Sommer rund 14 Meter auftaut, an der Nordwand nur etwa 2,5 Meter. Im Kern des Permafrostbereichs schwankt die Temperatur im Laufe eines Jahres nur um etwa ein halbes Grad. Mit  $-1,3\text{ °C}$  am „wärmsten“ ist es im Felsinneren im Februar, mit  $-1,8\text{ °C}$  am kältesten im August. Da Gestein die Wärme nur sehr langsam leitet, verschiebt sich die Temperaturkurve im Felsinneren also um ein halbes Jahr. Die Messungen in den Bohrungen werden durch Messungen im Gipfelbereich und im Kammstollen durch die TU-München ergänzt.



Abbildung 1: Ausschnitt aus der Karte der modellierten Permafrost-Wahrscheinlichkeit für den Bereich der Zugspitze. Mit zunehmender Farbiintensität steigt die Wahrscheinlichkeit

Eine signifikante Veränderung der Temperaturen konnte bisher nicht festgestellt werden; hierfür ist der vorliegende Messzeitraum noch zu kurz. Für Aussagen, ob der Permafrost tendenziell taut, ist daher eine langjährige Fortsetzung der Messreihen geplant. Bei einer weiteren Klimaerwärmung ist langfristig mit einem vollständigen Verschwinden der wenigen Permafrostbereiche in Bayern zu rechnen. Es ist dann verstärkt mit Steinschlag und Felsstürzen aus Felswänden oberhalb von 2500 m zu rechnen. Vorwiegend sind davon Wanderwege und Kletterrouten betroffen. Nur der Zugspitzgipfel weist eine Bebauung im Permafrostbereich auf. Hier wird umfassende Vorsorge betrieben, indem mögliche Deformationen im Berg durch Messeinrichtungen beobachtet werden und bei der Auslegung von Neubauten die Problematik mit berücksichtigt wird.

## 4.4 Landwirtschaft

### 4.4.1 Zusammenfassung

Eine Veränderung des Witterungsgeschehens im Zuge des prognostizierten Klimawandels wirkt sich direkt auf die Wachstumsbedingungen und damit auf die Erträge landwirtschaftlicher Kulturpflanzen aus. Dabei gestalten sich die Reaktionsmuster der Kulturen auf veränderte Klimaparameter vielschichtig. Beispielsweise sind steigende Temperaturen dem Pflanzenwachstum förderlich, solange eine ausreichende Wasserversorgung gewährleistet ist und bestimmte Temperaturoptima nicht überschritten werden. Eine erhöhte  $\text{CO}_2$ -Konzentration in der Atmosphäre führt zu einer besseren Kohlenstoffversorgung der Pflanzen (direkter  $\text{CO}_2$ -Düngungseffekt) und zu einer effizienteren Wassernutzung (indirekter  $\text{CO}_2$ -Düngungseffekt). Die daraus resultierende Stimulation der Biomasseproduktion schlägt sich im Naturalertrag positiv nieder. In ihrer Reaktion auf den Klimawandel unterscheiden sich die Pflanzen auch in der Photosynthese, je nachdem, ob sie zur Gruppe der  $\text{C}_3$ -Pflanzen (z. B. Weizen) oder der  $\text{C}_4$ -Pflanzen (z. B. Mais) gehören.  $\text{C}_3$ -Pflanzen profitieren von steigenden  $\text{CO}_2$ -Konzentrationen,  $\text{C}_4$ -Pflanzen dagegen eher von wärmeren Temperaturen.

Biophysikalische Modellierungen mit Pflanzenwachstumsmodellen nutzen Klimaprojektionen, um die komplexen Wirkungen von Temperatur, Niederschlag, Strahlung und  $\text{CO}_2$ -Gehalt der Atmosphäre unter veränderten Klimabedingungen auf das Pflanzenwachstum abzuschätzen. Dabei zeigt sich für ausgewählte Standorte in Bayern in der Mehrzahl der untersuchten Fälle, dass bei Sommerungen (Sommergerste, Mais, Kartoffeln) die Erträge eher zurückgehen, wohingegen sie bei Winterungen (Wintergerste, Winterweizen, Winterraps) tendenziell steigen. Insgesamt scheint die Schwankungsbreite der Erträge zuzunehmen, das heißt das Ertragsrisiko steigt.

Auch wenn die Tierhaltung weitgehend unter Dach stattfindet, sind insbesondere für die hitzeempfindlichen Rinder nachteilige Auswirkungen zu erwarten.

Die bereits eingetretenen und noch zu erwartenden Klimaänderungen wirken sich auch indirekt auf das Gedeihen von Pflanzen und das Wohlbefinden von Tieren in der Landwirtschaft aus. Der veränderte Temperatur- und Niederschlagsverlauf nimmt Einfluss auf die Nährstoffaufnahme der Pflanzen, die Verlagerung von Nährstoffen im Boden (vgl. Kapitel 4.3), das Risiko der Bodenerosion (vgl. Kapitel 4.3.3), das Auftreten neuer Unkräuter sowie auf Krankheiten und Schädlinge bei Pflanzen und Tieren.

Möglichkeiten zur Anpassung an veränderte Klimabedingungen liegen in einer angepassten Produktionstechnik und in der Züchtung von hitze- und trockenstressresistenten Arten.

### 4.4.2 Hitze-/Trockenstress für Pflanzen

**Hitzestress:** Hitzestress durch hohe Temperaturen wird aufgrund des Klimawandels zukünftig auch in Bayern häufiger auftreten. Bereits in den letzten Jahrzehnten konnten dahingehend eindeutige Trends beobachtet werden. Kulturpflanzenarten sind an Hitzestress unterschiedlich gut angepasst.  $\text{C}_3$ -Pflanzen sind dabei durchwegs empfindlicher als  $\text{C}_4$ -Pflanzen. Grundsätzlich finden sich bei den für Bayern bedeutenden Arten – Weizen, Mais, Gerste, Raps – angepasste Sorten, die auch extreme Hitze deutlich jenseits von 30 °C gut überstehen. Allerdings sind Sorten, die das hohe Ertragspotential des gemäßigten Klimas ausnutzen können, oft wesentlich empfindlicher als entsprechende Sorten aus wärmeren Klimazonen. Besonders deutlich wird dies bei deutschen Winterweizensorten, die bei Temperaturen jenseits der 30 °C während der Kornfüllungsphase vorzeitig reif werden und dann deutliche Ertrags- und Qualitätseinbußen aufweisen können. Sorten aus mediterranen Klimazonen sind keine Alternative, weil ihre Ertragsleistungen das Potential unserer Klimazone nicht ausnutzen können.

Deshalb muss die Pflanzenzüchtung weniger hitzeempfindliche, aber dennoch ertragsstarke Sorten entwickeln. Dies gilt vor allem für Weizen. Wenn die Verwertung nicht durch traditionelle Verarbeitungsprozesse eingeschränkt ist, kann die Artenwahl einen Lösungsansatz bieten. Bei energetischer Verwertung wird dies bereits auf einigen Flächen praktiziert. Hier werden Arten aus anderen Klimazonen wie Hirse, Steppengräser oder die Becherpflanze (durchwachsene Silphie) auf ihre Eignung großflächig getestet. Im Grünland wird es mittel- und langfristig zu standortspezifischen Umschichtungen in den Artenmustern der Bestände kommen, was je nach Standort unterschiedliche Folgen für Erträge und erzielbare Qualitäten hat.

**Trockenstress:** Die aufgrund des Klimawandels erwarteten Veränderungen in den Niederschlagsmustern – mehr Winterniederschläge bei insgesamt eher konstanter Niederschlagsmenge im Jahr – lassen das Risiko für Trockenstress bei fast allen Kulturpflanzen in Bayern deutlich ansteigen. Trocken- und Hitzestress können zudem gleichzeitig auftreten. Technisch lässt sich im Ackerbau Trockenstress zuverlässig durch Bewässerungsmaßnahmen und Beregnung vermeiden. Die hohen Kosten für die dafür benötigte Technik und die begrenzten Möglichkeiten einer Wasserbereitstellung lassen aber vielfach diese Option nicht zu.

Bei mehr flächenintensiven Kulturen wie Mähdruschfrüchten (Getreide, Ölsaaten, Eiweißpflanzen, Feldfutter) sowie Grünland sind Anpassungen der Kulturpflanzen daher die effektivere Methode. Bei vielen Kulturpflanzen sind die Gene, die für eine effektive Wassernutzung oder eine bessere Wasseraufnahme verantwortlich sind, bekannt. Durch Feldexperimente mit künstlich hervorgerufenem Wasserstress lassen sich die genetischen Hypothesen überprüfen und mögliche Selektionsmarker entwickeln. Auch generelle Züchtungsansätze sind erfolgversprechend. Bei der Hybridzüchtung verfügen die Kulturpflanzen im Vergleich zu klassischen Linien- oder Populationsorten über eine breitere

genetische Ausstattung. Dies ist nicht selten mit einer grundsätzlich verbesserten Wuchsleistung, aber oft auch mit einer höheren Wurzeleistung verbunden. Auch im System Boden-Düngung-Pflanze finden sich Optimierungsmöglichkeiten, die der zunehmenden Trockenstressgefahr entgegenwirken können. Wassersparende Verfahren der Bodenbearbeitung, geringere Bodenbelastung, geringere Pflanzenzahlen durch präzisere Saatverfahren und eine optimierte Nährstoffablage sind Ansätze, die mit Hilfe exakter Ortungsverfahren effektiv eingesetzt werden können.

#### 4.4.3 Bodenfruchtbarkeit

Fruchtbare Böden sind tief durchwurzelbar, sie können Wasser gut speichern, sind biologisch aktiv und besitzen einen dem Standort angemessenen Humusgehalt. Bodenschonende Bewirtschaftung fördert und erhält die Bodenfruchtbarkeit.

Von den prognostizierten Klimaveränderungen erfordert vor allem die Zunahme heftiger Starkregenereignisse Anpassungen im Ackerbau. Eine jüngst abgeschlossene, umfassende Feldstudie in erosionsgefährdeten Gebieten Bayerns belegt, dass konvektive Starkregen im Frühjahr zu erheblichen Bodenabschwemmungen führen, wenn die Böden nicht mit deckenden Kulturen (Getreide, Raps) oder beim Anbau von spät gesäten Reihenkulturen (Mais, Zuckerrüben, Kartoffeln) mit Zwischenfrucht-Mulch geschützt sind (Abbildung 4.4\_1). Starke Abschwemmungen verringern den durchwurzelbaren Bodenraum unwiederbringlich, Humus und Nährstoffe werden hangabwärts in Senken und Täler, teils auch in Gewässer verlagert. Die Landwirtschaft ist gefordert, Fruchtfolgen, Bestellverfahren, Schlägeinteilung und Flurgestaltung so anzupassen, dass auch heftige Starkregen ohne gravierende Bodenverlagerungen überstanden werden.



Die Landwirte werden dazu staatlicherseits mit einem Bündel von Maßnahmen unterstützt. Das neue Kulturlandschaftsprogramm setzt einen Schwerpunkt auf den Boden- und Gewässerschutz, zum Beispiel mit der Förderung von Mulch- Bestellverfahren bei Reihenkulturen. „Wasserberater“ an den Ämtern für Ernährung, Landwirtschaft und Forsten unterstützen die Landwirte bei der Umsetzung von Erosions- und Gewässerschutzmaßnahmen. Ein neuer integrierender Ansatz ist die von der Verwaltung für Ländliche Entwicklung koordinierten „boden:ständig“-Projekte mit starker Einbindung der Akteure in den Gemeinden. Im Dialog mit Landwirten und Gemeinden werden konkrete Umsetzungsprojekte auf den Weg gebracht. Der Weiterentwicklung von erosionsmindernden Bodenbearbeitungs- und Bestellverfahren dienen Projekte in Forschung und Entwicklung, die von der Ressortforschung in

Kooperation mit Universitäten und Hochschulen durchgeführt werden.

Viele Studien bestätigen die positive Wirkung einer bodenschonenden Bewirtschaftung auf Regenwürmer. Ihre Grabtätigkeit begünstigt die Wasseraufnahmefähigkeit und das Dränvermögen der Böden. Generell wirken sich langanhaltende Trockenperioden im Sommer ungünstig auf Regenwurmpopulationen aus, während milde Winter mit wenigen Frosttagen ihre Aktivitätszeit verlängern. Die notwendigen vorsorgenden Maßnahmen zum Erosionsschutz dienen auch dem Humuserhalt und fördern die Regenwurmpopulationen.

---

Abbildung 4.4\_1: In Mulchsaat bestellter Mais, geschützt vor Starkregen



#### 4.4.4 Nährstoffversorgung der Kulturpflanzen

Nach aktuellen Klimaprognosen sind in Bayern, hauptsächlich in Franken, häufiger sommerliche Trockenperioden, wärmere und feuchtere Winter sowie häufigere Starkregenereignisse zu erwarten. Dadurch verändern sich die Anforderungen an unsere Ackerbausysteme. Die Verbindung von hoher Wirtschaftlichkeit, Umwelt- und Klimaverträglichkeit sowie Energieeffizienz sind zentrale Anforderungen an zukünftige Bewirtschaftungssysteme.

Aus Sicht der Pflanzenernährung und Düngung ist zukünftig mit den nachstehenden, zum Teil schon eingetretenen Folgen zu rechnen:

- Sinkende Erträge aufgrund unsicherer Wasserversorgung oder Extremereignisse und daraus resultierender hoher Reststickstoffmengen nach der Ernte im Boden
- Verstärkte Grundwasserneubildung im Winter und damit höheres Risiko der Nitratverlagerung bzw. Auswaschung
- Verschiebung des Entwicklungsverlaufs mit veränderten Zeiten des Nährstoffbedarfs (kürzere Winterruhe)
- Höhere Stickstofffreisetzung aus der organischen Substanz
- Unsicherheit der Düngerwirkung bei längeren Trockenphasen und damit verminderte Nährstoffverfügbarkeit

Diese Folgen können erhebliche Auswirkungen auf die Wirtschaftlichkeit des Pflanzenbaus, auf die Versorgungssicherheit der Bevölkerung sowie auf die tierische Produktion haben. Es müssen Anpassungsstrategien entwickelt werden, um die bedarfsgerechte, qualitätsbezogene Ernährung der Pflanzen zu optimieren und negative Folgen für die Umwelt (Grundwasser) auszuschließen.

Als mögliche Anpassungsstrategien kommen in Frage:

- Anpassung der Stickstoffdüngung an den witterungsabhängigen Bedarf der Pflanzen
- Anpassung der Düngungszeitpunkte sowie der Aufteilung der Düngemengen
- Anpassung der verwendeten Düngerarten
- Veränderte Düngerapplikation in Trockenphasen durch Injektionsdüngung
- Einsatz stabilerer Stickstoffdünger in Zeiten mit ausreichenden Niederschlägen
- Stickstoff-Blattdüngung
- Weiterentwicklung neuer Düngesysteme (Cultantverfahren)
- Anpassung der Bedarfsermittlung über das Sollwertverfahren (DSN)
- Anbau geeigneter Zwischenfrüchte mit hohem N-Aufnahmevermögen zur Konservierung des Stickstoffes nach der Ernte über den Winter (Arten und Aussaatzeiten)

#### 4.4.5 Unkräuter, Schädlinge und Krankheiten in landwirtschaftlichen Kulturen

Der Witterungsverlauf beeinflusst ganz wesentlich das jährliche Auftreten von Schadorganismen und damit mögliche Ertrags- und Qualitätseinbußen. Unkräuter, Schädlinge und Krankheiten reagieren in vielfältiger Weise auf die vorherrschenden Temperatur-, Feuchte- oder Strahlungsverhältnisse. Im Zuge des prognostizierten Klimawandels sind daher entsprechende Änderungen zu erwarten. Trotz Wechselwirkungen von Schadorganismen mit Kulturpflanzen oder natürlichen Gegenspielern, die genaue Prognosen erschweren, lassen sich zwei grundsätzliche Auswirkungen ableiten und in den zurückliegenden Jahren auch schon beobachten:

- Verschiebung in der Zusammensetzung und der Individuendichte bereits vorhandener Arten
- Auftreten und Ausbreitung neuer Pflanzenarten, sogenannter Neophyten und Neozoen, bei tierischen Schaderregern



Abbildung 4.4\_2: Kartoffelkäfer und ihre Larven erreichen in warmen Jahren ein besonders hohes Schadpotenzial (Quelle: Wagner, S./LFL).

Unter den **Unkräutern und Ungräsern** werden besonders wärmeliebende und trockenstresstolerante Arten, wie zum Beispiel Kreuzkraut-, Rauke-, Storchschnabel-, Gänsefuß-, Hirse- oder Trespens-Arten zu den Gewinnern des Klimawandels zählen. Längere Trockenperioden begünstigen schwer bekämpfbare Wurzelunkräuter und -ungräser wie zum Beispiel Ackerdistel, Quecke, Ampfer und Winden. Über ihre unterirdische Speicher- und Überdauerungsorgane besitzen diese einen entscheidenden Konkurrenzvorteil. Wärmeliebende Neophyten der letzten Jahre sind unter anderem die Samtpappel, die Giftbeere oder auch die Beifuß-Ambrosie. Letztere stellt, wegen des hohen Allergiepoteziels ihrer Pollen, bei stärkerer Ausbreitung sogar eine ernsthafte Gesundheitsgefahr für die Bevölkerung dar.

Unter den **tierischen Schaderregern** werden besonders wärmeliebende Insekten vom Klimawandel profitieren, deren Fraßaktivität und Vermehrungsrate sich im Sommer erhöht und deren Sterblichkeit sich in milden Wintern verringern wird. So hat sich zum Beispiel der Maiszünsler, ausgehend von seinen früheren Befallsgebieten in Mittel- und Unterfranken, in den letzten Jahren stetig ausgebreitet. In warmen Jahren mit frühem Zuflug sind seine Schäden am stärksten. Auch der Kartoffelkäfer reagiert auf höhere Temperaturen (Abbildung 4.4\_2). Bringt er in unseren Breiten normalerweise nur eine Generation pro Jahr hervor, so sind es in sehr warmen Jahren bis zu drei Generationen. Damit werden auch zukünftig entsprechende Bekämpfungsmaßnahmen häufiger nötig werden. Als Neozoen sind in Bayern vor allem der westliche Maiswurzelbohrer zu nennen, der weltweit gefährlichste Schädling im Maisanbau, sowie die Kirschessigfliege, die

im Jahr 2014 teils enorme Schäden im bayerischen Obst- und Weinbau verursachte.

Unter den **Pilzkrankheiten** werden vor allem solche, die auf Niederschläge und längere Feuchtphasen angewiesen sind, tendenziell abnehmen, andere mit höheren Temperaturansprüchen, denen schon kurze Feucht- oder Tauphasen zur Ausbreitung ausreichen, dagegen an Bedeutung gewinnen. So könnten zukünftig zum Beispiel die Septoria-Blattdürre bei Weizen, die Rhynchosporium-Blattflecken bei Gerste oder die Kraut- und Knollenfäule der Kartoffel seltener auftreten. Die Getreideroste, die Alternaria-Dürrfleckenkrankheit der Kartoffel oder die Cercospora-Blattfleckenkrankheit der Zuckerrübe dagegen entsprechend häufiger.

Neben möglichen Änderungen bei Fruchtfolgen und Anbauverfahren, der Verwendung züchterisch verbesserter Sorten (vgl. Kapitel 4.4.2), erfordert die Klimaänderung auch eine Anpassung der direkten Pflanzenschutzmaßnahmen. An der Bayerischen Landesanstalt für Landwirtschaft werden dazu, gemäß dem „Integrierten Pflanzenschutz“ Strategien zur gezielten Bekämpfung von Schaderregern entwickelt, die den Einsatz von Pflanzenschutzmitteln auf das notwendige Maß beschränken. Bestehende Schadens- und Bekämpfungsschwellen werden durch Versuche angepasst oder für erstmals auftretende Schaderreger neu entwickelt. Sie sind auch eine wichtige Basis für den amtlichen Pflanzenschutzwarndienst in Bayern. Dessen Mitarbeiter erfassen in der Saison in zahlreichen Monitoring-Programmen die wichtigsten Krankheiten

und Schädlinge in Bayern<sup>1</sup>, bieten über Prognosemodelle tägliche, feldgenaue Berechnungen des witterungsbedingten Infektions- oder Ausbreitungsrisikos an<sup>2</sup> und fassen diese Informationen in Beratungsprodukten zusammen, die im Rahmen der Verbundberatung in Bayern zur Verfügung gestellt werden. In Verbindung mit der regelmäßigen Beobachtung der eigenen Bestände liefert der amtliche Pflanzenschutzwarndienst den Landwirten so die wesentlichen Grundlagen für die eigene Bekämpfungsentscheidung. Bei unerwartet frühem Auftreten von bekannten Schaderregern oder bei erstmaligem Befall durch bislang unbekannte Krankheiten oder Schädlinge kann so rechtzeitig und gezielt reagiert werden.

#### 4.4.6 Belastung der Nutztiere durch Hitzestress

Milchkühe produzieren besonders bei hoher Milchleistung viel körpereigene Wärme. Bei steigenden Umgebungstemperaturen kann diese immer schwieriger an die Umgebung abgegeben werden. Die Tiere leiden dann zunehmend unter Hitzestress. Dies führt zum Teil zu erheblichen Einbußen im Wohlbefinden der Tiere aber auch zu ökonomischen Schäden, zum Beispiel durch Rückgang der Milch- und Reproduktionsleistung oder einer erhöhten Krankheitsanfälligkeit. Ab welchen Temperaturen einzelne Tiere unter Hitzestress leiden, hängt von zahlreichen Faktoren ab, die zum Teil quantitativ nur schwer zu bewerten sind. Abhängig von diesen Faktoren liegt der thermoneutrale Bereich einer Milchkuh etwa zwischen 4 °C bis 16 °C. In diesem Bereich benötigt die Kuh keine erhöhte Energieaufnahme zum Ausgleich der niedrigen Temperaturen und kann ihre selbstproduzierte Wärme im ausreichenden Maße abführen. Während niedrige Temperaturen durch eine höhere Futteraufnahme gut kompensiert werden können, kann der Körper auf Temperaturen über ca. 22 °C nur begrenzt reagieren. Die Folgen sind erhöhte Atemfrequenz

und Körpertemperatur, Rückgang der Futteraufnahme und schließlich der Milchleistung.

Als wohl wichtigste Maßnahme der Tierhalter, den Hitzestress auf die Tiere so gering wie möglich zu halten, wird die Bereitstellung eines geeigneten Sonnenschutzes angesehen. Durch die Verringerung des Wärmeeintrags auf die Tiere kann die Gesamtwärmebelastung bereits deutlich reduziert werden. Dies kann in Stallanlagen durch ein gut gegen Wärmestrahlung gedämmtes Dach gewährleistet werden oder durch natürliche Beschattung, zum Beispiel Bäume auf der Weide. Weitere Möglichkeiten, die Tiere zu kühlen, bestehen durch die Verwendung von Ventilatoren und Wasserverdunstungsanlagen. Durch diese Maßnahmen kann der Hitzestress zwar nicht völlig von den Tieren genommen werden, eine deutliche Reduktion ist jedoch möglich.

Der zweite Faktor neben der Temperatur ist die relative Luftfeuchtigkeit. Eine hohe Luftfeuchtigkeit in Kombination mit hohen Temperaturen bewirkt ein schwüles Raumklima, das den Tieren die Wärmeabgabe erheblich erschwert. In der Stallhaltung von Milchkühen sollte deshalb großer Wert auf eine geeignete Lüftung gelegt werden, um feuchte Luft aus den Stallungen abzuführen. In modernen Aussenklimaställen kann bereits sehr gut mit dieser Thematik umgegangen werden.

In der Kälber- und Jungviehhaltung sind die Auswirkungen hoher Umgebungstemperaturen ebenfalls nicht unerheblich, allerdings treten die Folgen weniger ausgeprägt auf. Die Ursache dafür liegt darin begründet, dass diese Tiere ein geringeres Leistungsniveau aufweisen und damit weniger Wärme produzieren.

Hitzestress bei seinen Tieren zu vermeiden oder weitest möglich zu reduzieren, liegt im Interesse des Tierhalters, da dadurch das Wohlbefinden seiner Tiere gesteigert wird und wirtschaftliche Einbußen minimiert werden.

1 [www.lfl.bayern.de/ips/warndienst](http://www.lfl.bayern.de/ips/warndienst)

2 [www.isip.de](http://www.isip.de)

## EXKURS FORSCHUNG

Carl Beierkuhnlein, Biogeographie; Anke Jentsch, Störungsökologie, BayCEER, Universität Bayreuth; Jürgen Kreyling, Universität Greifswald; Projekt: „EVENT“

## Überraschende Resilienz extensiv genutzter Mähwiesen gegenüber klimatischen Extremereignissen: Neue Erkenntnisse durch große Feldexperimente

Aufgrund der globalen Erwärmung wird mit einer Zunahme extremer Klimabedingungen gerechnet. Vor allem bei lang anhaltender extremer Dürre wird

Abbildung. 1: Artenreiches Grünland erfüllt eine Vielfalt von Leistungen und ist die Grundlage landschaftlicher Biodiversität in Bayern.



befürchtet, dass die Produktivität des Grünlandes beeinträchtigt wird. Wiesen und Weiden nehmen gerade in Bayern große Flächen ein und sind auch ökonomisch von großer Bedeutung. Sie beinhalten aber auch eine außerordentliche Artenvielfalt. Ihre Funktionalität zu erhalten ist für viele weitere Bereiche der Gesellschaft, von der Wasserversorgung bis zum Tourismus, wichtig.

In den Bayreuther EVENT Experimenten wurden extreme Dürren simuliert. Einmal in tausend Jahren zu erwartende Ereignisse wurden sogar jährlich wiederholt. In einem anderen Versuch wurde eine Dürre über den gesamten Sommer von April bis September ausgedehnt. Selbst unter diesen Bedingungen wurde eine völlig überraschende Resilienz des Graslandes gefunden. Das bedeutet, dass zwar temporär ein Einbruch der Produktivität und sogar ein Absterben einzelner Pflanzen gefunden wurde, aber alle Bestände waren dazu in der Lage, sich zu erholen. Auch bei wiederholter Dürre wurde kein nachhaltiger Produktivitätsverlust gefunden. Alle abgestorbenen Arten konnten sich regenerieren. Für die Landwirtschaft bedeutet dies, dass mit dem Erhalt des Grünlandes auch die damit verbundenen Ökosystemdienstleistungen erhalten bleiben. Allerdings müssen Mahdzeitpunkte an die Entwicklung der Vegetation künftig flexibler angepasst werden.

Abbildung. 2: Im EVENT 6 Experiment wurde in Bayreuth eine unwahrscheinlich lange Dürreperiode über den gesamten Sommer hinweg simuliert. Obwohl im Hochsommer ein großer Teil der überirdischen Biomasse abgestorben war, konnten sich alle Populationen regenerieren.



[1] Backhaus S. et al. (2014): Recurrent mild drought events increase resistance toward extreme drought stress. *Ecosystems* 17

[2] Jentsch A. et al. (2011): Climate extremes initiate ecosystem regulating functions while maintaining productivity. *Journal of Ecology* 99

[3] Walter J. et al. (2011): Do plants remember drought? Hints towards a drought-memory in grasses. *Environmental and Experimental Botany* 71

---

 EXKURS FORSCHUNG
 

---

Maendy Fritz; Technologie- und Förderzentrum im Kompetenzzentrum für Nachwachsende Rohstoffe (TFZ); Projekt: „Auflockerung von Fruchtfolgen durch Kulturen mit kurzer Vegetationszeit“

---

## Klimawandel begünstigt Vielfalt in Fruchtfolgen durch alternative Energie- und Rohstoffpflanzen

Nach der Ernte von überwinternden Erstkulturen, wie Ganzpflanzenge treide oder Ackergrasmischungen öffnet sich im Sommer eine Vegetationslücke bis zur nachfolgenden Winterkultur bzw. bis zum Vegetationsende. Meist ist diese Zeitspanne mit drei bis maximal vier Monaten sehr eng bemessen, so dass ein sicheres Erreichen der Siloreife für massenwüchsige Kulturpflanzen wie zum Beispiel Mais und Sorghum nicht gewährleistet ist. Daher wurden in dieser Zeit bisher nur Pflanzen zur Gründüngung angebaut oder solche abwechslungsreiche Zweitfruchtfolgesysteme generell kaum genutzt.

Das oben genannte TFZ-Projekt beschäftigt sich mit dem Versuchs anbau von Kulturen mit sehr kurzem Vegetationszeitbedarf, die die beschriebene Lücke produktiv ausfüllen können. Da sie als Zweitfrüchte nach Ganzpflanzenge treide angebaut werden, das bereits am Bodenwasser gezehrt hat, ist eine ausgeprägte Trockentoleranz wichtig. Diese Eigenschaft wird im Zuge des Klimawandels für das gesamte Kulturartenspektrum und die Fruchtfolgesysteme an Bedeutung gewinnen, da Phasen ausgeprägter Sommertrockenheit wahrscheinlicher werden. Positiv könnte sich der Klimawandel auf

die verfügbare Vegetationszeit auswirken, wenn das zuerst stehende Getreide schneller abreift und/oder sich das Vegetationsende nach hinten verschiebt.

Neben der Flächenproduktivität kann durch vielfältig zusammengesetzte Zweitfruchtssysteme auch die Biodiversität in der Kulturlandschaft gesteigert werden, da gerade neue oder wiederentdeckte Kulturpflanzen dafür geeignet erscheinen. Quinoa (*Chenopodium quinoa*), Buchweizen (*Fagopyrum esculentum*) und Leindotter (*Camelina sativa*) bringen Farbtupfer in die Feldflur, liefern noch spät im Jahr Nektar und Pollen, unterdrücken schädliche Nematoden auf natürliche Weise und tragen nebenbei auch zum Bodenschutz durch nahezu ganzjährige Bedeckung bei. Gerade Quinoa, eine Pseudocereale aus der Andenregion, zeigt ein

---

Abbildung 1: Quinoa wird zur Reife bunt (Quelle: TFZ (Fritz)).



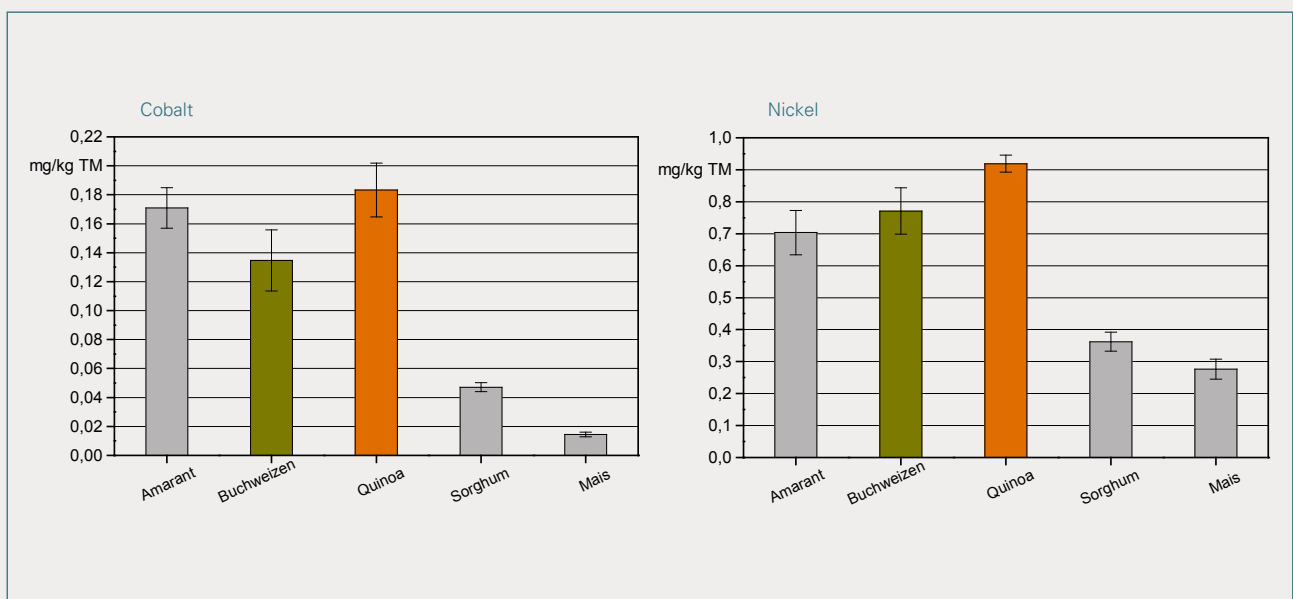


Abbildung 2: Buchweizen liefert Blütenbesuchern ein üppiges Nahrungsangebot (Quelle: TFZ (Fritz)).

außergewöhnlich hohes Aufnahmevermögen für Stickstoff, ihr Anbau könnte in sensiblen Regionen eine Nitratverlagerung im Boden verhindern und so zum Grundwasserschutz beitragen.

Als Biogassubstrate können Quinoa und Buchweizen genutzt werden. Sie weisen interessante Gehalte an Spurenelementen auf, die für die methanproduzierenden Mikroorganismen im Biogasfermenter essentiell sind. Dies könnte ihre deutlich geringe Ertragsleistung im Vergleich zu Silomais ausgleichen, vor allem, wenn der Ertrag des vorausgehenden Ganzpflanzengetreides und ihre ökologischen Vorteile gebührend berücksichtigt werden. Leindotter wird dahingehend geprüft, ob er in der kurzen Zeit die Druschreife erreicht, so dass Pflanzenöl für die Biokraftstoff- bzw. Biokerosinproduktion oder für eine stoffliche Verwendung erzeugt werden kann.

Abbildung 3: Gehalte der Spurenelemente Cobalt und Nickel in Buchweizen (grün), Quinoa (orange) und Vergleichskulturen (grau) (Quelle: TFZ (Fritz)).



---

 EXKURS FORSCHUNG
 

---

Maendy Fritz; Technologie- und Förderzentrum im Kompetenzzentrum für Nachwachsende Rohstoffe (TFZ); Projekt: „Sorghumhirsen als Energie- und Rohstoffpflanzen – Sortenscreening und Anbauszenarien“

---

## Anbaueignung von Sorghum in Deutschland früher und heute unter veränderten Klimabedingungen

Die Landwirtschaft in Deutschland muss sich frühzeitig auf die erwartete Klimaänderung einstellen. Die angewandte Forschung und Beratung des TFZ zielt darauf ab, schon frühzeitig die Produktionstechniken und Nutzungspfade für neue Energie- und Rohstoffpflanzen bereitzustellen, die unter den veränderten Bedingungen eine erfolgreiche und nachhaltige Landbewirtschaftung ermöglichen. Eine dieser neuen Kulturen ist Sorghum, eine Hirseart (*Sorghum bicolor*) mit Ursprung in der Sahelzone, die weltweit als Nahrungs- und Futtermittel und in Deutschland als Biogassubstrat genutzt wird. In einem Forschungsprojekt am TFZ wurden zusammen mit GeoKlim Consulting Anbaueignungskarten für jetzige und zukünftige Klimabedingungen erstellt, um die ackerbauliche Bedeutung der Kultur auszuloten.

Zur Verfügung standen Klimadaten des Deutschen Wetterdienstes von 1961 bis 1990, das digitale Geländemodell DGM1000 für die Flächenneigung, Daten des Corine Land Cover-Projekts für den Bewuchs und die Bodenübersichtskarte BÜK500. Auf dieser Grundlage wurden klimatisch relevante



Abbildung 1: Sorghum im Feld (Quelle: TFZ (Fritz)).

Parameter für den Sorghumanbau, die in mehrjährigen Feldversuchen ermittelt wurden, berechnet und als graphische Darstellung in die vorliegende Karte umgesetzt. Als Basis für den Zeitraum 2011 bis 2040 wurden Daten der WETTREG-Simulationen benutzt, dabei wurden alle Parameter für die SRES-Klimaszenarien A1B und B1 neu berechnet und die entsprechenden Karten erstellt.

Die Unterschiede der Anbaueignung zwischen den erstellten Karten bzw. Klimaszenarien sind leicht durch die Zunahme hellgrüner, gelber und roter Bereiche sowie die Reduktion blauer Regionen (kaum geeignet) zu erkennen. Werden die drei Kategorien geeignet (hellgrün), gut geeignet (orange) und

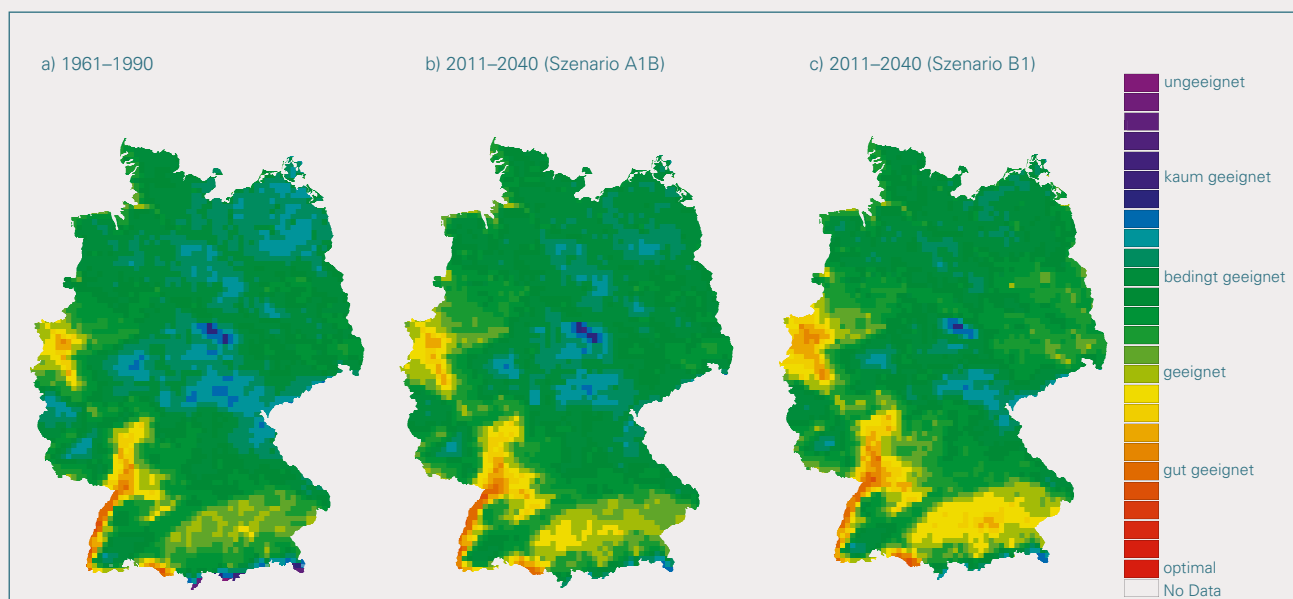


optimal geeignet (rot) addiert, ergibt sich für den Zeitraum 1961 bis 1990 eine potenziell für den Sorghumanbau nutzbare Fläche von 8,4 Mio. Hektar.

Für den Zeitraum 2011 bis 2040 zeigt sich unter den Szenarien A1B und B1 eine deutliche Ausweitung der gut geeigneten Gebiete. Da das Emissionsszenario B1 in dieser Zeitspanne extremere Auswirkungen simuliert, beträgt die potenziell geeignete Anbaufläche in dieser Karte schon über 14 Mio. Hektar.

Das sich wandelnde Klima begünstigt also die wärmeliebende und trockentolerante Kulturpflanze Sorghum. Es ist davon auszugehen, dass damit die Attraktivität von Sorghum als Alternativkultur im Bereich der nachwachsenden Rohstoffe steigen könnte, daher muss rechtzeitig das nötige Beratungswissen erarbeitet werden. Im gleichen Maße ist eine Veränderung bzw. sogar Verschlechterung der Bedingungen für die heimische Flora und etablierte Kulturarten, sofern sie nicht züchterisch angepasst werden können, absehbar.

Abbildung 2: Gunstgebiete für Sorghum-Anbau in der gemessenen Vergangenheit a) und in modellierten Zukunft( b und c) (Quelle TFZ (Fritz))



## 4.5 Garten- und Weinbau

### 4.5.1 Klimawandel allgemein

Der Klimawandel und die damit einhergehenden Veränderungen und neuen Herausforderungen sind in Fachkreisen unbestritten und können durch zwei Beispiele anschaulich gemacht werden: Der Beginn der Blütezeit der Kastanien hat sich in unseren Breiten innerhalb der letzten 30 Jahre um ca. 20 Tage verfrüht. Als zweites Beispiel sei die Walnuss genannt, die in früheren Jahren häufig zur Blütezeit oder durch strenge Winter mit enormen Frostschäden zu kämpfen hatte. Eine gute Walnussernte gab es selbst im Weinbauklima nur alle paar Jahre. Mittlerweile stellen Frostschäden an der Walnuss den Ausnahmefall dar. Es muss weiterhin mit Spätfrösten gerechnet werden, deren Gefahr durch den früheren Vegetationsbeginn in Zukunft vermutlich noch enorm zunehmen wird.

In einem veränderten Klima ist mit insgesamt steigenden Temperaturen zu rechnen, wobei die Winter tendenziell wärmer werden und im Sommer mit höheren Extremtemperaturen gerechnet werden kann. In den letzten Jahren waren die Frühjahre häufig sehr trocken. Dies kann bei Freilandkulturen ohne Zusatzbewässerung zu erheblichen Wachstumsschwierigkeiten führen. Es gilt als sicher, dass die Extreme, sowohl bei Wasser und Temperatur aber auch bei sonstigen Wetterelementen, zunehmen und dass somit deutlich problematischere

Abbildung 4.5\_1: Wasserstress bei Birken ist auf dem Vormarsch



Bedingungen für die Landwirtschaft sowie den Garten- und Weinbau häufiger eintreten werden (Abbildung 4.5\_1).

### 4.5.2 Auswirkungen auf den Gartenbau Geschützter Anbau: Unter Glas oder im Foliengewächshaus

Auf den ersten Blick wirkt sich der Klimawandel positiv für die Kultur von gärtnerischen Produkten unter Glas aus. Mildere Winter helfen Heizkosten zu senken, in Kombination mit energieeinsparenden Gewächshäusern können Pflanzen mit deutlich weniger Aufwand produziert werden. Eine um bis zu drei Wochen längere Vegetationsperiode verstärkt diesen Effekt noch. Eine Reihe traditioneller Frühjahrsblüher benötigt für eine sichere Blütenbildung jedoch eine ausreichende Kühlperiode, die normalerweise durch die Wintermonate gewährleistet ist. Aufgrund der zu erwartenden milden Temperaturen im Winterhalbjahr reicht die hierfür erforderliche Kälteperiode oft nicht aus.

Ein weiterer Aspekt ist, dass extreme Temperaturen im Sommer den Anbau unter Glas vor neue Herausforderungen stellen, da es schwierig ist bei diesen Bedingungen die Temperaturen auf einem für gutes Pflanzenwachstum optimalem Maß zu halten. Die mögliche Zunahme von Unwetterschäden durch Starkregen, Sturm und Hagel, kann in Einzelfällen zu enormen Schäden an Gewächshäusern und Überdachungen führen. Die Konsequenz wären steigende Preise für Schadensversicherungen und generell ein höheres Risiko in der Unterglas-Produktion.

### Freilandkultur: Auf dem Acker oder im Container

Milde Winter haben bei vielen gärtnerischen Kulturen einen verfrühten Austrieb zur Folge. Auftretende Spätfröste haben in den letzten Jahren zu erheblichen Kulturausfällen sowohl im Profi- als auch im Freizeitgartenbau geführt. Dies reichte bis



Abbildung 4.5\_2: Spätfrostschäden werden vermutlich zunehmen

zur Gefährdung des betriebswirtschaftlichen Ergebnisses von Gartenbaubetrieben.

Gärtnerische Kulturen, vor allen Dingen wenn es nicht um Dauerkulturen wie Obstanlagen oder Spargel geht, brauchen eine zuverlässige und ausreichende Wasserversorgung zur Produktion von hochwertiger Qualität. Die tendenzielle Zunahme von Trockenperioden zwingt zum verstärkten Einsatz von wassersparenden Bewässerungssystemen, bei denen im Optimalfall Überschusswasser aus Starkregen oder aus dem Rücklauf der Bewässerung in Wasserspeicherbecken gesammelt und wiederverwendet werden kann. Dabei müssen alle technischen Möglichkeiten ausgeschöpft werden, die wirtschaftlich vertretbar sind. Dem Schutz des Wassers wird in Zukunft gesellschaftlich ein noch höherer Stellenwert zugeschrieben werden, so dass die Entnahme von Grundwasser zur Bewässerung im Freiland mit größeren Auflagen verbunden sein wird. Aus diesem Grund wurde das Projekt „Mobile Bewässerungssteuerung durch Funknetze“ ins Leben gerufen. Ein zweites Vorhaben hat den Titel „Umsetzung von radargestützten Wetterprognosen zur effizienten und wassersparenden Bewässerung.“

### Freilandkultur: Im halbgeschützten Anbau

Das Verfrühen von zum Beispiel Spargel oder Erdbeeren ist seit vielen Jahren gärtnerische Praxis, um bestimmte Produkte über einen möglichst langen Zeitraum anbieten zu können. Zu diesem Zweck werden die entsprechenden Kulturen mit Folien oder ähnlichen Materialien abgedeckt. Die Sorge vor einer Zunahme von Unwettern hat aber dazu geführt, dass zunehmend Apfelanlagen mit Hagelschutznetzen oder Kirschen unter einem Foliendach vor Hagel bzw. Regen geschützt werden müssen, um eine Ertragssicherheit auf qualitativ hohem Niveau zu gewährleisten. Dies ist zum einen mit einem hohen Investitionsaufwand verbunden und zum anderen hat es in bestimmten Regionen das Landschaftsbild verändert. Diese Entwicklung verstärkt sich derzeit weiter. Zunehmend werden Kulturen wie Süßkirschen, Tafeltrauben, Himbeeren oder Heidelbeeren, unter Folien und Schutznetzen analog der Kultur in einem Gewächshaus produziert, um sowohl Regen, Hagel, Sonnenbrand an Früchten und Blättern aber auch den Befall von Schaderregern oder Pilzkrankheiten zu minimieren. Das Auftreten von neuen, bisher bei uns unbekannt Krankheiten und Schädlingen verstärkt diese Entwicklung zusätzlich. Im biologischen Anbau sind derartige Schutzvorkehrungen oft die einzige und zugleich vorbeugende Möglichkeit Schad-erreger abzuwehren.

Abbildung 4.5\_3: Geschützter Anbau bei Süßkirschen wird zunehmen

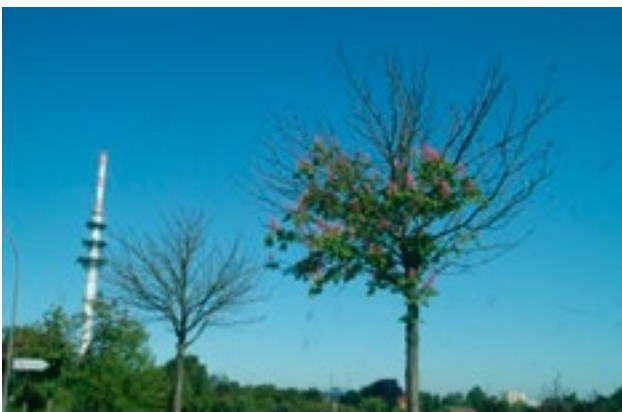


### 4.5.3 Schädlinge und Krankheiten des Gartenbaus

Die sich verändernden klimatischen Bedingungen sorgen dafür, dass unter Hitze- und Trockenstress leidende Pflanzen anfälliger gegenüber bestimmten Krankheiten und Schädlingen werden. Als Beispiel hierfür kann die Situation in Fichten- oder Buchenwäldern dienen, in denen nach heißen und trockenen Jahren die Borkenkäfer- oder auch die Prachtkäferproblematik stark zunimmt. Ebenso bilden tierische Schädlinge (z. B. Blattläuse, Thripse, Spinnmilben) deutlich mehr Generationen pro Jahr aus als bisher beobachtet und erhöhen damit den Befallsdruck auf die Kulturen erheblich. Dramatisch wird die Situation bei den Schädlingen und Krankheiten aber auch, weil in den letzten Jahren eine Vielfalt an neuen Schaderregern in Bayern aufgetreten ist. Einige dieser neuen Schadenerreger sind:

- **Kastanienminiermotte und Pseudomonas**  
Seit über 20 Jahren verändert die Kastanienminiermotte durch intensive Blattschäden das äußere Erscheinungsbild eines unserer beliebtesten Bäume. Seit ein paar Jahren kommt eine aus Indien eingeschleppte Pseudomonas-Bakterienkrankheit dazu, die im ungünstigsten Fall zum kompletten Absterben von ganzen Kastanienalleen führen kann.

Abbildung 4.5\_4 Pseudomonas-Bakterienkrankheit der Kastanie



- **Buchskrankheit und Zünsler**

Erst gab es mit *Cylindrocodium buxicola* eine eingeschleppte Pilzkrankheit, die bei den meisten Sorten – vor allen in feuchteren Jahren – heftige Schäden verursacht. Als vor wenigen Jahren mit dem Buchszünsler ein hochgefährlicher Schädling seinen Weg nach Deutschland fand, kam eine weitere Gefahrenebene dazu. Wo beide Erreger zur gleichen Zeit auftreten, kann eine Buchsanpflanzung nur noch eingeschränkt empfohlen werden.

- **Kirschessigfliege**

Die Kirschessigfliege stellt eine große Bedrohung für ein sehr breites Spektrum an weichfleischigen Obstarten dar und ist sowohl für den Erwerbsobstbauer als auch für den gesamten Bereich des Haus- und Kleingartenbaus eine große Herausforderung. Sie kann zu massiven Schäden mit enormen Ernteverlusten führen.

- **Asiatischer Laubholzbockkäfer (ALB) und Citrusbockkäfer (CLB)**

Am Beispiel des Asiatischen Laubholzbockkäfers oder seines nahen Verwandten, dem Zitrusbockkäfer, kann ein weiteres Problem veranschaulicht werden. Diese aus Asien stammenden Käfer wurden vermutlich zuerst mit Verpackungsmaterial aus China eingeschleppt, später mit befallenen Pflanzen in den Pflanzenhandel gebracht. Mittlerweile sind drei Befallsherde im Großraum München bekannt, bei denen sofort Quarantänemaßnahmen eingeleitet wurden.

### 4.5.4. Konsequenzen für den produzierenden Gärtner

Es sind große technische Investitionen in allen Sparten des Gartenbaues erforderlich um die Sicherheit in der Produktion zu gewährleisten. Neue Krankheiten und Schädlinge erhöhen das Risiko und stellen eine große Herausforderung für den Gärtner aber auch für seine Kunden, die Hobbygärtner, dar. Die Nachfrage nach bestimmten Produkten wird einbrechen, Alternativen müssen aufgezeigt und beworben werden. Der Aufwand für Bewässerung, Pflanzenschutz, Bodenbearbeitung

und Pflanzenhygiene wird steigen, ohne dass sich hierfür höhere Erzeugerpreise durchsetzen lassen. Gleichzeitig wird auf gesellschaftlichen Druck hin die Auswahl der zur Verfügung stehenden Pflanzenschutzmittel deutlich reduziert werden.

Gesunde Ernährung, privates und öffentliches Grün werden in Zukunft einen hohen Stellenwert besitzen. Der Trend zur Regionalität und zum ökologischen Anbau ist ein dauerhafter Trend, der – gerade auch aus Klimaschutzgründen – konsequent verfolgt und ausgebaut werden sollte. Wenn zukünftig verstärkt Hitze- und Dürreereignisse auftreten, wird einem optimierten Wassermanagement eine gesteigerte Bedeutung zukommen. Es gilt Pflanzen in den Vordergrund zu stellen, die mit weniger Wasser zu Recht kommen. Im Obstbau könnte diesem Problem mit der Verwendung von Obstunterlagen, welche stärker und tiefer wurzeln, zumindest teilweise begegnet werden. Auch das Thema Stadtbergrünung wird in Zukunft hochaktuell sein (vgl. hier Kapitel 4.10). Aus der Vielzahl, der zur Verfügung stehenden Straßenbäume müssen diejenigen herausgefiltert werden, die schon jetzt an ihrem Naturstandort sommerlichen Extremsituationen ausgesetzt sind. Um diesen Problemen begegnen zu können, sind umfangreiche Versuche zwingend notwendig.

Die mit dem Klimawandel zusammenhängenden Veränderungen sind für den Gartenbau gleichzeitig Chance und Herausforderung.

#### 4.5.5 Weinbau

Winzer können sich über Jahrzehnte hinweg an die Witterungsbedingungen einzelner Jahrgänge erinnern und sich ein genaues Bild von Entwicklungen über längere Zeiträume machen. Daher sind für den Weinbau der Klimawandel und die damit einhergehenden Veränderungen und neuen Herausforderungen offensichtlich. Gestützt auf Beobachtungen und Messwerte ergeben sich derzeit für die



Abbildung 4.5\_5 Sonnenbrandschäden an Reben

Fränkische Weinregion zusammenfassend folgende beobachtete klimatischen Veränderungen:

Der Anstieg der Jahresdurchschnittstemperatur von 0,9 °C im Zeitraum von 1947–2006 geht einher mit milden Wintern und zunehmend mit längeren Trockenphasen verbundenen Hitzeperioden im Frühjahr und Sommer. Gleichzeitig nehmen Starkregenereignisse zu. Diese Entwicklung hat sich in der letzten Dekade noch einmal verstärkt. Diese klimatischen Veränderungen, die sich in Zukunft noch verstärken werden [1]:

- Erhöhung der Jahresdurchschnittstemperatur bis 2030 um 1,1 °C
- Zunahme der Jahresniederschläge um 5 bis 10 %
- Zunahme der Winterniederschläge um 20 %
- Abnahme der Sommerniederschläge um 15 %

haben für den Weinbau zum gegenwärtigen Zeitpunkt die im Folgenden beschriebenen Auswirkungen.

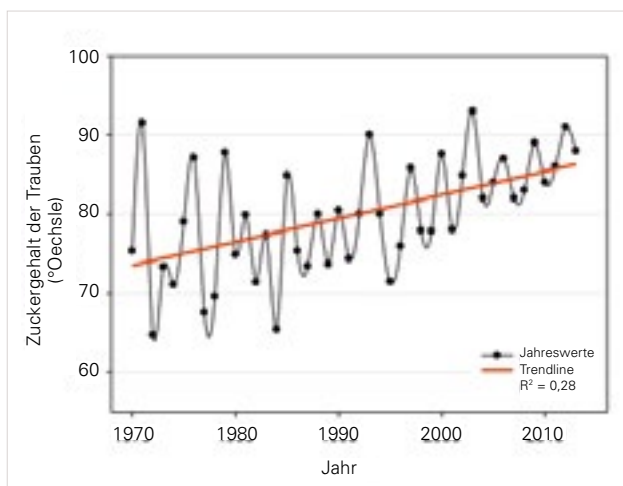
Abbildung 4.5\_6: Spätfrostschäden an Reben



## Wachstumsbedingungen

Qualitativ und quantitativ wirkt sich der Klimawandel zunächst positiv für die Weinwirtschaft aus. Eine durch den bis zu drei Wochen früheren Austrieb der Reben bedingte Verschiebung der Vegetationsperiode, sorgt zunächst dafür, dass im eher kontinental geprägten Klima Weinfrankens die Trauben besser ausreifen können. Zudem führt das weniger häufige Auftreten strenger Winterfröste von unter minus 20 °C dazu, dass eine Totalschädigung der Reben weniger häufig auftreten wird. So stieg die Qualität der Trauben, gemessen am Zuckergehalt, seit 1970 bis 2014 um mehr als 10 Grad Öchsle, was einer Steigerung von über 15 % entspricht (Abbildung 4.5\_7). Gerade spätreifende Rebsorten wie Silvaner und Riesling, Rotweinsorten oder Sorten wie zum Beispiel Sauvignon Blanc und Chardonnay haben bereits und werden weiterhin stark von diesen Veränderungen profitieren. Sichere und qualitativ gute Erträge sorgen so für eine stabile wirtschaftliche Situation der erzeugenden Betriebe.

Abbildung 4.5\_7: Entwicklung des durchschnittlichen Zuckergehaltes im Taubenmost zum Zeitpunkt der Ernte (gemessen als Grad Öchsle) im Vergleichszeitraum von 1970–2014. (Quelle: Bayerische Landesanstalt für Weinbau und Gartenbau)



Andererseits sorgt der frühere Austrieb der Reben dafür, dass die noch jungen Triebe einem wesentlich höheren Spätfrostisiko ausgesetzt sind (Abbildung 4.5\_8). Dies war bereits 2011 großflächig und 2014 kleinräumig zu beobachten.

Die Weinwirtschaft reagiert darauf mit verschiedenen Maßnahmen, die an der Landesanstalt für Wein- und Gartenbau (LWG) innerhalb eines Forschungsvorhabens auf ihre Praxistauglichkeit hin getestet werden. Diese sind unter anderem:

- Verzögerung des Rebenaustriebs durch den Einsatz pflanzlicher Öle
- Minimalschnitt in frostgefährdeten Anlagen
- Einsatz von Paraffinkerzen (Heizöfen)
- Verwirbelung der Kaltluft durch Windmaschinen oder dem großflächigen Einsatz von Helikoptern

Abbildung 4.5\_8: Jährliche Abweichung des Rebenaustriebs vom errechneten langjährigen Mittel (28. April) des Beobachtungszeitraums 1968–2014 bei der Rebsorte Müller-Thurgau in der Weinlage Veitshöchheimer Wölflein. (Quelle: Bayerische Landesanstalt für Weinbau und Gartenbau)

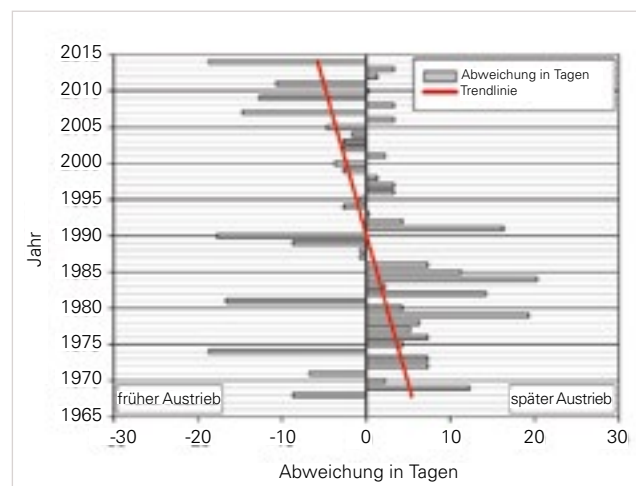




Abbildung 4.5\_9: Spätfrostbekämpfung durch Windmaschinen in der Weinlage Himmelstadter Kelter

## Wasserversorgung

Aktuell und auch mittelfristig betrachtet ist die Wasserversorgung der Reben, insbesondere in Steillagen mit geringerer Wasserspeicherfähigkeit der Böden, sicherlich die größte klimawandelbedingte Herausforderung im Weinbau. Das Kerngebiet des Fränkischen Weinbaus ist mit durchschnittlich 550 mm/m<sup>2</sup> Jahresniederschlag die trockenste Region Bayerns. Neben einem enormen Investitionsbedarf für die Installation von Tröpfchenbewässerungsanlagen in den Rebflächen, sind im Bereich des Keupers, in den nicht unmittelbar am Main gelegenen Weinbaulagen, hohe Investitionen für die Bereitstellung des Zusatzwassers durch geeignete Speicher erforderlich. Darüber hinaus ist und wird unter den stark variablen klimatischen Bedingungen (Regenperioden, intensive Trockenphasen) die Steuerung der Bewässerung zu einer komplexen Aufgabe. Im Rahmen eines interdisziplinären Arbeitskreises setzt sich die LWG mit der Fränkischen Weinwirtschaft mit dieser Thematik in Form von Pilotprojekten, Studien und der angewandten Forschung intensiv auseinander. Einige dieser Projekte und Forschungsstudien sind:

- Pilotprojekt Bewässerung Sommerach, ca. 200 ha
- Machbarkeitsstudie Bewässerung im Fränkischen Keuper/Schwanberg, ca. 600 ha

- Angewandte Forschung an der LWG: Trockenheitstoleranz von Rebunterlagen, Bewässerungssteuerung, Musteranlage dezentraler Wasserspeicher

## Schädlinge und Krankheiten

Veränderte klimatische Bedingungen sorgen dafür, dass sich die Lebensbedingungen für Schädlinge und Krankheiten der Rebe ändern. So nehmen Schädigungen an Reben zu, die bisher nur aus den südeuropäischen Anbauregionen bekannt waren. Eingeschleppte Schädlinge, die aufgrund der milden Winter nun bessere Überlebensbedingungen vorfinden, nehmen ebenfalls zu. In diesem Zusammenhang sind anzuführen:

- Holzerstörende Pilze
- Durch Zikaden übertragene Viruserkrankungen
- Kirschessigfliege

Massive Schäden traten 2014 beispielsweise durch eine explosionsartige und nicht vorhersehbare Vermehrung der Kirschessigfliege auf. Die Kirschessigfliege stellt eine der größten Herausforderungen im Bereich der neuen Schädlinge und Krankheiten der Rebe dar, da sie reife Trauben direkt befällt und eine Bekämpfung kurz vor der Ernte sich als äußerst schwierig erweist.

## Qualitätsmanagement

In der öffentlichen Diskussion wenig wahrgenommen, für die Weinwirtschaft aber nicht weniger bedrohlich, ist die Zunahme von Starkregenereignissen, aber auch von längeren Regenperioden zum Zeitpunkt der Traubenreife oder während der Ernte. Zum einen droht durch die hohe Wasseraufnahme und die dadurch bedingte Volumenvergrößerung ein Aufplatzen der Beeren mit der Folge einer starken Zunahme der Fäulnis. Dies wiederum macht eine aufwändige Lese durch intensive Selektion des Traubengutes im Weinberg – oder in der späteren Traubenverarbeitung auf dem Betriebsgelände – erforderlich. Zudem erfordert es für die Betriebe erhebliche Investitionen in die Qualität der Lese, in Form von mehr Lesehelfern wie auch in die technischen Möglichkeiten und Kapazitäten der Traubenverarbeitung (Selektionstechnologie, Keltern). Andererseits müssen große wirtschaftliche Verluste durch die Aussonderung faulen Lesegutes und den damit verbundenen geringeren Erträgen hingenommen werden. Es stellt langfristig die Ertragsproduktivität der gesamten Weinwirtschaft in Frage.

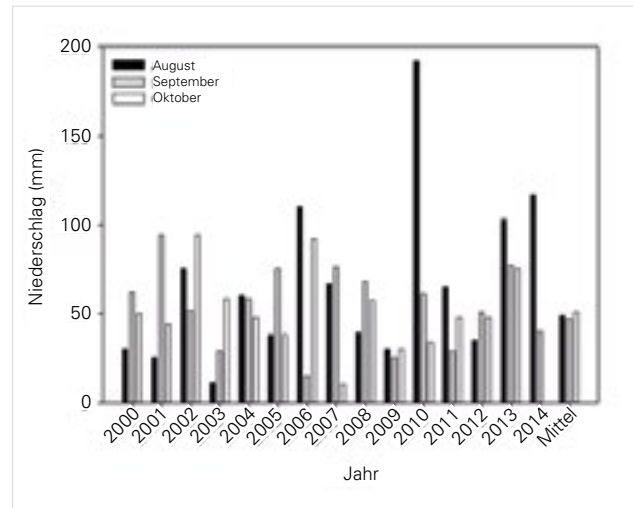


Abbildung 4.5\_10: Niederschlagsverteilung im Zeitraum Reifeperiode bis Ernte der Trauben der Jahre 2000–2014 am Weinbaustandort Kitzingen. (Quelle: Bayerische Landesanstalt für Weinbau und Gartenbau)

### Literatur

[1] PAETH, H. (2013): Wetterextreme in Bayern. Vortrag Veitshöchheimer Weinbautage 2012, Universität Würzburg.



## 4.6 Wald- und Forstwirtschaft

### 4.6.1 Klimafolgen und Anpassung

Wälder und Waldbesitzer sind vom Klimawandel insbesondere aufgrund der sehr langen Produktionszeiträume direkt betroffen und haben daher ein hohes Interesse an einer raschen und wirksamen Reduktion der Treibhausgas-Emissionen sowie an der Entwicklung geeigneter Anpassungsstrategien an die Klimaveränderungen. Umgekehrt trägt die Forstwirtschaft selbst kaum zu den Ursachen des Klimawandels bei, sondern leistet bereits heute durch Kohlenstoffspeicherung in den Wäldern sowie durch die Erzeugung des nachwachsenden Rohstoffs Holz sehr hohe Beiträge zum Klimaschutz.

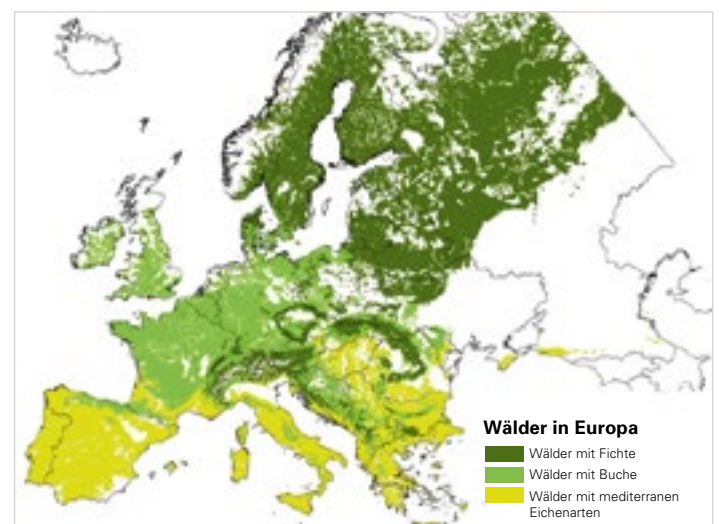
Die Anfälligkeit von Wäldern für den Klimawandel hängt von der relativen Position der Baumarten in ihren jeweiligen ökologischen Nischen ab. Die stärksten Auswirkungen werden dort erwartet, wo sich Wälder bzw. Bäume bereits an ihrer Wärme- oder Trockenheitsgrenze befinden. In Mitteleuropa sind die dort weit verbreiteten Baumarten nordischer oder alpiner Herkunft besonders anfällig für erhöhte Temperaturen und veränderte Niederschläge. Die Forstwirtschaft stellt sich im Zuge des Waldumbaus der Herausforderung, gefährdete Baumarten durch besser angepasste Arten zu ersetzen. Ein Übergang zu angepassteren Wäldern im Zuge des klimagerechten Waldumbaus kann nur dann erfolgreich sein, wenn Ausmaß und Tempo des Klimawandels die Anpassungsfähigkeit der Wälder nicht überfordern. Bis zu einem Temperaturanstieg von 2 °C in den nächsten 100 Jahren sind Anpassungsmaßnahmen möglich und Erfolg versprechend.

Kaum ein anderer Wirtschaftszweig ist so natur- und umweltgebunden wie die Forstwirtschaft. Klima und Boden sind hier die wesentlichen Produktionsfaktoren und bestimmen Möglichkeiten und Grenzen der forstwirtschaftlichen Nutzung. Diese Produktionsfaktoren werden in der traditionellen bayerischen Forstwirtschaft nicht aktiv beeinflusst. Eine Plantagenwirtschaft mit Bodenbearbeitung, Düngung und intensivem Pflanzenschutz ist nicht

üblich. Die Anpassung an das „Eiserne Gesetz des Örtlichen“ hat deshalb in der bayerischen Forstwirtschaft eine lange Tradition. Wälder werden an die standörtlichen Bedingungen, an Klima und Boden, angepasst, und nicht die Umweltfaktoren zugunsten der Bäume verbessert. Die Forstwirtschaft orientiert sich an natürlichen Wäldern, denn diese sind Ergebnis der Anpassung der Baumarten an vorhandene Umweltbedingungen.

Das natürliche Waldkleid Europas ist das Produkt einer Jahrtausende währenden Anpassung an die herrschenden Klimabedingungen. So entspricht die Abfolge der Vegetationsgürtel von den borealen Fichtenwäldern im Norden über die Buchenwälder der gemäßigten Breiten hin zu den Eichenwäldern des Mittelmeerklimas genau dem Gradienten der von Norden nach Süden im Mittel zunehmenden Temperatur. Ohne das Wirken des Menschen würde sich in jedem Klima eine charakteristische Waldzusammensetzung mit den entsprechenden Baumarten als Gleichgewichtszustand etablieren. Wandeln sich die Klimabedingungen, wie dies am Ende des letzten glazialen Maximums und in der Zeit danach der Fall war, ändert sich auch die Baumartenzusammensetzung der Wälder.

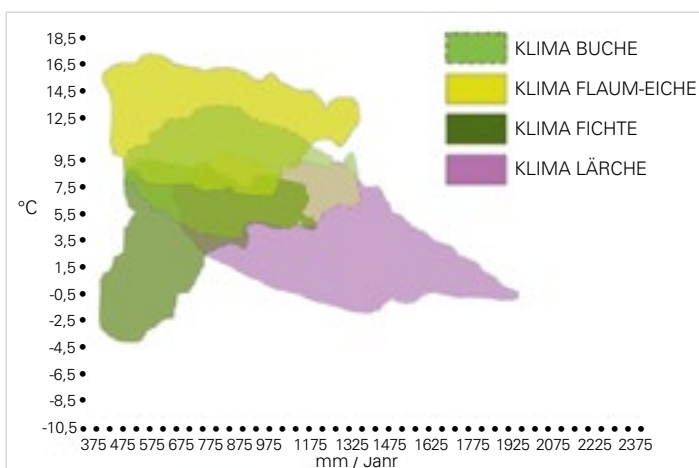
Abbildung 4.6\_1: Das natürliche Waldkleid Europas.



#### 4.6.1.1. Anpassung durch Baumartenwahl

Die einzelnen Baumarten zeigen charakteristische Anpassungen an die in einem bestimmten Klima vorherrschenden Standortgegebenheiten. So kommt die Fichte in ihrer natürlichen Verbreitung im kühl-trockenen Klima des Nordens und im kühl-feuchten Klima der Hochgebirge vor. Die Europäische Lärche siedelt hingegen nur im kühl-feuchten Hochgebirgsklima, die Flaumeiche bevorzugt das warm-trockene Mittelmeerklima und die Rotbuche ein gemäßigtes mitteleuropäisches Klima. In Abbildung 4.6\_2 sind in einem Diagramm, dessen Achsen aus der mittleren Jahrestemperatur und der mittleren Jahresniederschlagssumme gebildet werden, die Bereiche dargestellt, in denen sich 95 % der natürlichen Vorkommen der jeweiligen Baumarten befinden. Diese Klimahüllen (engl.: Bioclimate Envelopes) genannten modellierten „Wohlfühlbereiche“ der Baumarten sind ein wichtiger Bestandteil ihrer ökologischen Nischen. Darüber hinaus gibt es noch weitere Einflussgrößen auf das Gedeihen der Baumarten, z. B. sehr strenge lang anhaltende Frostperioden im Winter, Dürreperioden oder spezifische Bodeneigenschaften, insbesondere die Fähigkeit, Wasser zu speichern. Mittlerweile gibt es

Abbildung 4.6\_2: 95 %-Klimahüllen einer boreal-alpinistischen Baumart (Fichte), einer alpinistischen Baumart (Europäische Lärche), einer submediterranen Baumart (Flaum-Eiche) und einer mitteleuropäischen Baumart (Rot-Buche).



eine Vielzahl von Anwendungen komplexer Artverbreitungsmodelle in Bezug auf die Klimawandelproblematik. Allen gemeinsam ist die Verknüpfung von Baumartenvorkommen mit den am jeweiligen Standort herrschenden Klimabedingungen.

Aus der zwischen- und nacheiszeitlichen Waldentwicklung wissen wir, dass sich Baumarten den jeweiligen Standortgegebenheiten anpassen, beispielsweise bei einer Klimaerwärmung polwärts und die Berge hinauf wandern. Sie folgen damit vollständig der Verlagerung ihrer ökologischen Nische. Umgekehrt haben sie sich bei Abkühlung stets in südlichere oder tiefergelegene, wärmebegünstigte Zufluchtsorte zurückgezogen.

Der gegenwärtig stattfindende Klimawandel stellt gegenüber solchen natürlichen Klimaschwankungen jedoch einen völlig neuen Zustand dar: Zum einen findet er in einem Tempo statt, das um mehrere Größenordnungen schneller ist, als die Erwärmung nach der letzten Kaltzeit. Zum anderen trifft er auf fragmentierte Landschaften, in denen die Wanderung der Baumarten zunehmend durch waldfreie, anderweitig genutzte Landstriche behindert wird. Zudem hat der Mensch die natürliche Baumartenzusammensetzung der mitteleuropäischen Wälder seit Jahrhunderten stark verändert und sowohl Herkünfte als auch Baumarten z. T. weit außerhalb ihrer angestammten Areale und Klimabedingungen angebaut.

Es existieren jedoch Möglichkeiten, die Entwicklung unserer Wälder durch forstwirtschaftliche Maßnahmen in eine gewünschte Richtung zu steuern. Etwa 95 % der Wälder Deutschlands sind Wirtschaftswälder, nur ein kleiner Teil, z. B. in Reservaten, bleibt sich selbst überlassen. So können in bewirtschafteten Wäldern die Ausbreitungsbarrieren zwischen den Waldgebieten durch Pflanzung oder Saat überwunden werden. Auf die gleiche Weise kann die Forstwirtschaft auch mit dem hohen Tempo des Klimawandels Schritt halten, in dem die nicht mehr möglichen Wanderbewegungen durch Maßnahmen

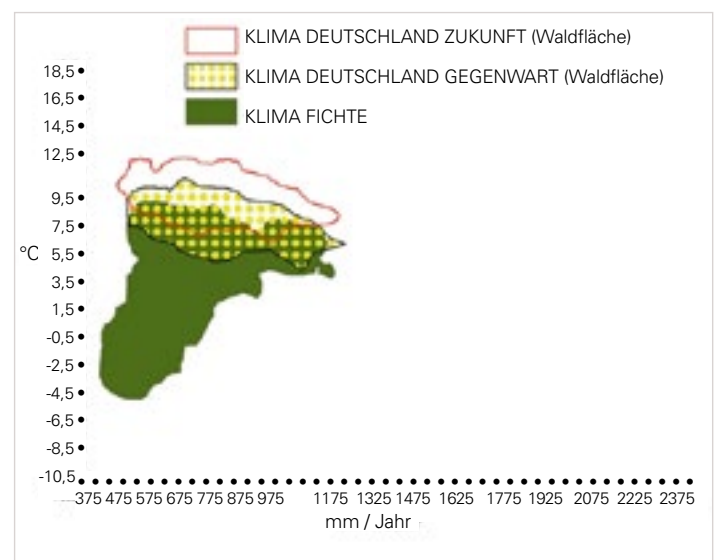
der künstlichen Verjüngung (Pflanzung oder Saat) ersetzt werden. Ebenso gibt es Möglichkeiten, in den Konkurrenzkampf der Baumarten untereinander einzugreifen und schwächere, aber künftig angepasste Baumarten, zu ungunsten derzeit stärkerer, aber künftig weniger gut angepasster Spezies zu begünstigen. Es sind also gute Voraussetzungen für eine erfolgreiche aktive forstwirtschaftliche Anpassung der Baumartenzusammensetzung an veränderte Klimabedingungen gegeben.

Weil Bäume langlebige Organismen sind, die selbst in unseren intensiv bewirtschafteten Wäldern mindestens 80 Jahre, zum Teil aber wesentlich älter werden, existiert jedoch ein nicht zu unterschätzendes Anpassungsproblem. Manches Baumindividuum erfährt unmittelbar den Wandel von jetzt noch kühlen Temperaturen bis zu den prognostizierten wärmeren Verhältnissen am Ende des Jahrhunderts. Daher müssen die Baumarten – anders als bei konstanten Klimabedingungen – an mehrere aufeinander folgende Klimatypen in gleichem Maße angepasst sein. Die Anforderungen an die Klimateignung der Arten sind demnach gewaltig, die Wahl der richtigen Baumart wird zur zentralen Planungsentscheidung für die Wälder der Zukunft.

Nicht alle Baumarten sind gleich anfällig gegenüber den Auswirkungen des Klimawandels. In Abbildung 4.6\_2 wird offenkundig, dass unter den mitteleuropäischen Klimabedingungen vor allem die boreal und im Gebirgsraum beheimateten Baumarten unter dem Klimawandel zu leiden haben werden, falls sich – wie mehrheitlich angenommen – in Zukunft wärmere und niederschlagsarme Klimabedingungen einstellen sollten. Die Baumarten, die schon jetzt im oberen und linken Teil des Diagramms zu sehen sind, werden die Gewinner des Wandels in Mitteleuropa sein, die Baumarten im unteren und rechten Teil des Diagramms werden sich unter geänderten Klimabedingungen in Mitteleuropa bald nicht mehr wohlfühlen.

In Abbildung 4.6\_3 ist dieser Sachverhalt für die Fichte und die Waldfläche Deutschlands detailliert dargestellt. Gemäß ihrer Herkunft aus borealen und Gebirgsregionen, ist es in einigen Regionen Deutschlands schon jetzt für den Fichtenanbau zu warm, während die kühlen und feuchten Regionen gegenwärtig noch gut für den Fichtenanbau geeignet sind. Tatsächlich sind weite Bereiche der deutschen Mittelgebirge mit Fichtenforsten bestanden. Zukünftig wird aber die Übereinstimmung der Klimahülle der Fichte, mit dem dann wärmeren und trockeneren Klima Deutschlands im Klimawandel, immer kleiner. Das prognostizierte zukünftig herrschende Klima wird in großen Teilen den Fichtenanbau in der bisherigen Form nicht mehr zulassen. Tatsächlich wurde bereits in den vergangenen Jahrzehnten eine Zunahme des Borkenkäferfraßes an Fichten beobachtet. Das empfindliche Gleichgewicht zwischen Parasiten- und Wirtspopulation ist stark klimaabhängig und verschiebt sich bei der Fichte derzeit zugunsten des bestandsbedrohenden Schädling Borkenkäfer. In einigen Regionen ist die Anbaufläche der Fichte aufgrund des Borkenkäferbefalls bereits deutlich zurückgegangen.

Abbildung 4.6\_3: 95 %-Klimahüllen der Fichte, des gegenwärtigen [1] und eines zukünftigen Klimas



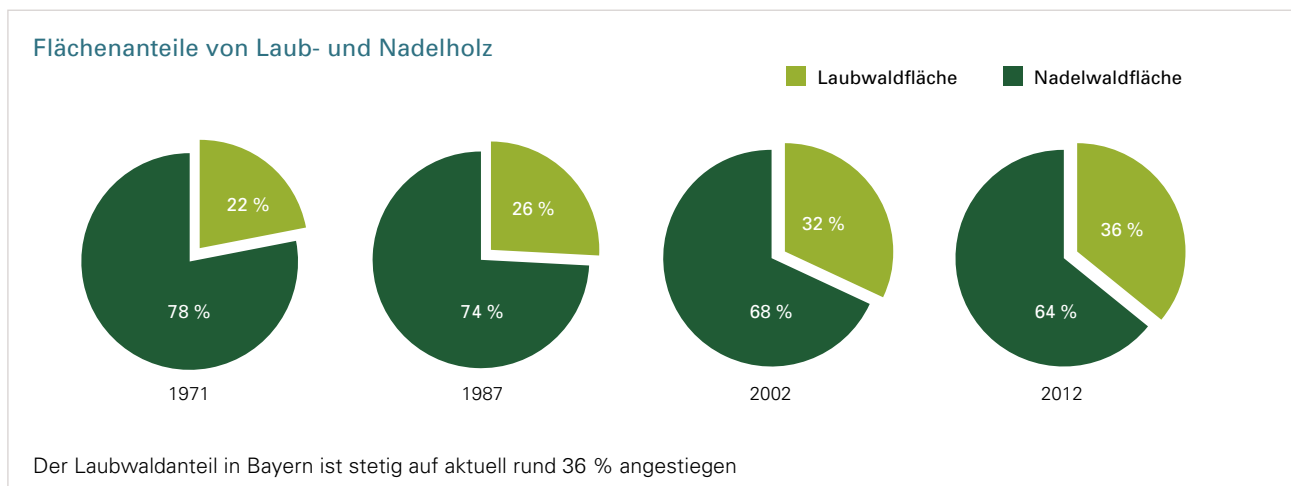
Für zahlreiche Regionen in Deutschland und in Bayern wird unter sich ändernden klimatischen Bedingungen die Baumartenwahl kritisch überdacht und findet ein aktiver Wechsel hin zu klimatoleranteren Herkunftsorten und Baumarten statt (vgl. Abbildung 4.6\_4). Derzeit wird über die Hälfte der Waldfläche Deutschlands von den anfälligeren Baumarten Fichte, Kiefer und Lärche eingenommen. Als Baumarten des hohen Nordens oder der Hochgebirge sind diese Arten aus ökonomischen Motiven auch in wärmeren Regionen, jenseits ihrer natürlichen Verbreitungsgrenzen, angebaut worden. Mit jedem Grad Erwärmung verschieben sich nun die Anbaugrenzen dieser Baumarten deutlich, was große Auswirkungen auf die Forstwirtschaft hat.

Viele einheimische Baumarten erweisen sich hingegen als deutlich weniger anfällig. So zeigt die Klimahülle der Buche sowohl mit dem gegenwärtigen als auch mit dem zukünftigen Klima Deutschlands eine große Schnittmenge. Zahlreiche andere mitteleuropäische Baumarten verhalten sich ähnlich. Mit hohen Risiken behaftet ist hingegen zurzeit noch in vielen Regionen der Anbau südeuropäischer Baumarten wie Flaumeiche oder Esskastanie. Diese leiden unter den hier vorkommenden Winterfrösten und scheiden in Bayern in den meisten Gebieten für den forstlichen Anbau aus.

Nichtheimische wärmeangepasste Baumarten werden bisweilen als Alternativen diskutiert, sollten aber nur auf Basis längerer Anbauenerfahrungen für den Einsatz empfohlen werden, um Risiken sicher beurteilen zu können.

Im klimagerechten Waldumbau werden anfällige Baumarten durch weniger anfällige Arten ersetzt. Ist ein Bestand erntereif, so steht die Entscheidung über die Baumartenzusammensetzung des Folgebstands an. Ein Umbau hin zu klimatoleranten Beständen ist dann vergleichsweise leicht möglich. Bei mittelalten und jungen Beständen liegt der Schwerpunkt darauf, durch eine gezielte Pflege die Mischbaumarten zu fördern und durch große Kronen die Stabilität und Vitalität der Bäume zu erhöhen. Gleichzeitig schafft man damit die Voraussetzung, beizeiten im Schutz des Altbestandes die nächste Waldgeneration zu begründen. Ferner wird zum Teil in diesen Beständen vorzeitig der Baumartenwechsel eingeleitet, indem die neuen Baumarten, im Schutz des Vorbestands, nach und nach unterpflanzt werden. Im Falle eintretender Schäden sind dann die neuen Baumarten zumindest in Keimzellen schon vorhanden und können später eine tragende Rolle im Wald der Zukunft übernehmen.

Abbildung 4.6\_4. Die Flächenanteile von Laubholz in unseren Wäldern nehmen kontinuierlich zu (Quelle: Dritte Bundeswaldinventur, LWF).



Bei der Langlebigkeit der Baumindividuen und der Rasanz der einsetzenden Klimaänderungen ist rasches, aber besonnenes Handeln geboten.

Um Schwerpunktregionen für den Waldumbau zu identifizieren, hilft die Betrachtung des gegenwärtig herrschenden Klimas. In den schon jetzt warmen und trockenen Regionen Deutschlands (Abbildung 4.6\_5) sollten die dort vorhandenen Nadelholzbestände besonders sorgfältig auf ihre Anpassungsfähigkeit an künftige schwierige Klimabedingungen überprüft werden.

Hierzu werden insbesondere bessere Informationen über die Klimaansprüche der Baumarten benötigt. Die oben erwähnten Klimahüllen sind ein erster, aber bei weitem noch nicht ausreichender Ansatz, die Baumartenansprüche adäquat zu beschreiben. Der „Wohlfühlbereich“ einer Baumart muss sehr genau bekannt sein, bevor man eine Spezies veränderten Klimabedingungen aussetzt. Die oben bereits genannten Nischen- und Artverbreitungsmodelle werden weiter entwickelt und derzeit um eine Ertrags- und Überlebenskomponente erweitert.

Das zweite Werkzeug für den Waldumbau sind Planungskarten, auf denen für das Gedeihen der Baumarten relevante Umwelt- und Klimafaktoren für Gegenwart und Zukunft verzeichnet sind. Nur dann ist es möglich, die Baumartenansprüche mit dem vorhandenen und zukünftig möglichen Angebot an Umweltressourcen abzugleichen. So kann eine für die Zukunft tragfähige Planungsentscheidung gefunden werden. Hierfür wurde an der Bayerischen Landesanstalt für Wald und Forstwirtschaft im Rahmen von mehreren Forschungsprojekten des Klimaprogramms 2020 das Standortinformationssystem BaSIS (Bayerisches Standortinformationssystem) entwickelt. Es bietet für die wichtigsten Baumarten detaillierte Informationen zum Klimarisiko. Zusammen mit den forstlichen Standortskarten ist BaSIS ein zentrales Werkzeug für die Beratung der Waldbesitzer.

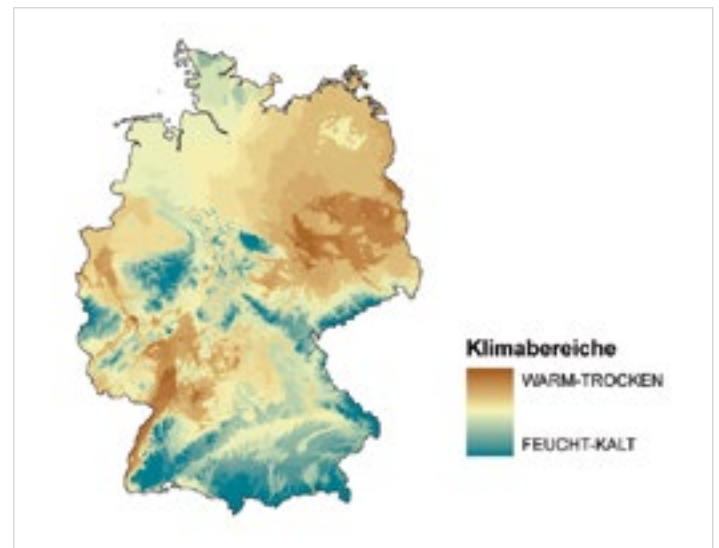


Abbildung 4.6\_5: Klimabereiche in Deutschland (1. Hauptkomponente der Verteilung von Jahresdurchschnittstemperatur und Jahresniederschlagssumme)

Schon eine moderate Temperaturerhöhung von 2 °C, wie im Beispiel aus Abbildung 4.6\_3 angenommen, stellt die Forstwirtschaft vor eine große Herausforderung und erfordert selbst unter günstigen Rahmenbedingungen enorme Anstrengungen. Die Forstwirtschaft hat daher ein hohes Interesse, dass der Klimawandel auf ein erträgliches Maß beschränkt bleibt.

#### 4.6.1.2. Waldbauliche Maßnahmen

Die Herausforderungen des Klimawandels und die damit verbundenen Folgen für die Waldbehandlung stellen neue Aufgabenfelder für die Forstwirtschaft dar. Entsprechend finden sich forstliche Maßnahmen im „Klimaprogramm Bayern 2020“ der Bayerischen Staatsregierung vom November 2007 sowie im „Klimaschutzprogramm 2050“ vom Juli 2014 wieder. Als konkrete Maßnahmen wurden das Waldumbauprogramm sowie Schutzmaßnahmen für den Bergwald geplant.

Im Waldumbauprogramm ist vorgesehen, von insgesamt 260 000 Hektar akut gefährdeter Nadelholzreinbestände im Privat- und Körperschaftswald ca. 100.000 Hektar bis zum Jahr 2020 in klimatolerante Mischwälder umzubauen. Bis Ende 2014 wurde

dieses Ziel mit Hilfe staatlicher Fördermittel bereits auf über 42 000 Hektar erreicht. Zu den vielfältigen Maßnahmen gehören neben einer Anpassung des Förderprogramms insbesondere die Konzentration auf Projektgebiete, um den Waldumbau flächenhaft voranzubringen.

Die Maßnahmen im bayerischen Alpenraum sehen vor, mit Hilfe intensiver Schutzwaldpflege und -sanierung in Verbindung mit einer effektiven Schalenwildregulierung den Bergwald und seine Schutzfunktionen nachhaltig für die zu erwartenden Klimaveränderungen zu stabilisieren. Hierzu wurde im Jahr 2008 die Bergwaldoffensive ins Leben gerufen und 2013 um die Waldinitiative Ostbayern (WIO) erweitert (siehe Nr. 4.6.1.5).

### Waldbautraining

Das im Jahr 2009 neu eingeführte Waldbautraining für die forstlichen Berater der Bayerischen Forstverwaltung hat das Ziel, die Kompetenzen der Mitarbeiter hinsichtlich waldbaulicher Maßnahmen zur Anpassung der Wälder an den Klimawandel kontinuierlich zu verbessern. Diese Fortbildungsreihe wird jedes Jahr durch die beiden Waldbautrainer der Bayerischen Landesanstalt für Wald und Forstwirtschaft durchgeführt.

Die Inhalte werden nach den Bedürfnissen der waldbaulichen Praxis und unter Berücksichtigung neuester Erkenntnisse aus der Forschung sowie forst- und förderpolitischer Rahmenbedingungen ausgewählt. Bisher wurden die Themenbereiche Voranbau, Jungwuchspflege, Kulturbegründung, Naturverjüngung und das bayerische Standortinformationssystem BaSIS geschult. Die wichtigsten Inhalte sind auch in der Reihe LWFaktuell veröffentlicht.

Unterstützt durch vielfältige Materialien werden die waldbaulichen Lerninhalte in den Fortbildungsveranstaltungen auf speziellen Trainingsflächen theoretisch vermittelt und praktisch eingeübt. Daneben werden auch didaktische Methoden der

Wissensvermittlung für die tägliche Beratungsarbeit weitergegeben. Seit 2014 ist das Waldbautraining als Regelfortbildung im Fortbildungsangebot der Bayerischen Forstverwaltung integriert.

### 4.6.1.3. Waldschutz gegen Pilze und Insekten

Angesichts der sich abzeichnenden Folgen des Klimawandels und der Gefahr der Einschleppung neuer Schädlingsarten über den globalisierten Handel muss für die Zukunft von einer deutlich komplexeren Waldschutzsituation ausgegangen werden. Die Waldbewirtschafter müssen ihr gewohntes Vorgehen an neue Gegebenheiten anpassen, auch wenn die konkreten Veränderungen kaum prognostizierbar sind.

Schadinsekten und -pilze benötigen in den Schlüsselphasen ihrer Entwicklung bestimmte für sie günstige Witterungsbedingungen. Auch der Entwicklungszustand ihrer Wirtspflanzen hängt von der Witterung ab. Durch die Veränderung unseres Klimas kann es hier zu Verschiebungen kommen, die gewisse Schädlinge gegenüber ihren Wirtspflanzen oder ihrer Konkurrenzarten deutlich begünstigen und das gesamte Ökosystem beeinflussen.

Ein Beispiel für die Komplexität dieser Wirkmechanismen ist die Konkurrenzbeziehung zwischen der Kleinen Fichtenblattwespe (*Pristiphora abietina* Christ) und der Gebirgsfichtenblattwespe (*Pachynematus montanus* Zadd.). Bereits seit mehreren Jahrhunderten ist die Kleine Fichtenblattwespe in Bayern und Österreich bekannt. In den 1980er und 1990er Jahren verursachte sie merkliche Schäden an Fichtenbeständen. Ein kaltes Frühjahr reichte jedoch in der Regel aus, um die Population wieder zu reduzieren. Denn die Kleine Fichtenblattwespe nutzt zum Schwärmen ein enges Zeit- und Temperaturfenster von nur etwa einem halben Grad und frisst ausschließlich an Fichtenknospen, die sich in einem bestimmten Öffnungszustand befinden. Stimmt die zeitliche Koinzidenz von Blattwespenflug und Austrieb der Fichte aufgrund der Klima-

erwärmung nicht mehr überein, kann die eigentlich konkurrenzschwächere Gebirgsfichtenblattwespe die Nische der Kleinen Fichtenblattwespe mit belegen und eine Massenvermehrung durchlaufen. Die Gebirgsfichtenblattwespe kam bisher in Höhenlagen zwischen 800 und 1200 Metern vor, breitet sich jedoch inzwischen auch in tiefere Lagen aus.

Bisher sind die Schlüsselphasen der Entwicklung und die sie beeinflussenden abiotischen und biotischen Faktoren noch bei vielen Arten unbekannt. Das Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung (PIK) hat 2009 zu dieser Problematik folgende Einschätzung abgegeben: „Derzeit sind die Populationsmodelle, die für Insekten bestehen, nicht in der Lage, eine komplette Analyse aller durch den Klimawandel verursachten Einflüsse und ihrer Auswirkungen auf Schadinsekten zu ermöglichen. Für die Forstpraxis empfiehlt es sich deshalb, am bisherigen Waldschutzwesen festzuhalten und weiterhin ein intensives Monitoring zu betreiben.“

Auch neuartige Schädlinge (Neozoen oder vormals unauffällige oder kommensale Organismen) spielen mittlerweile eine nicht unwesentliche Rolle im Waldschutz. Das PIK empfiehlt als Anpassungsstrategie für den Waldschutz „[...] eine intensive Beobachtung des Güter- und Warenverkehrs, inklusive Auf- und Ausbau eines Informationsnetzes zu möglichen Arten, ihrer Erkennbarkeit, Ökologie, Schadpotentiale und Bekämpfungsmaßnahmen“. Für Arten, die sich in der Vergangenheit nach ihrer Einschleppung nicht etablieren konnten, wird das Überleben in fremden Ökosystemen durch die Insekten begünstigenden Klimaveränderungen sowie die Schwächung potentieller Wirtspflanzen durch Trockenstress zukünftig erleichtert. Diese Entwicklung kann in der Land- und Forstwirtschaft bereits jetzt beobachtet werden. Die Bekämpfung eines etablierten Schädlings verursacht hohe Kosten, sodass ein Schwerpunkt auf der Verhinderung der Einschleppung liegt.

Für den angewandten Waldschutz hat das PIK eine Empfehlung formuliert, an deren Umsetzung alle Landesbehörden seit vielen Jahren intensiv arbeiten. Dabei werden zwei Wege beschritten. Im Zuge des Waldumbaus werden klimatolerante Mischbestände gefördert, die gegenüber Schädlingen weniger anfällig sind. Klimasensible Baumarten werden durch Klimastabilere ersetzt, die Mischung der verschiedenen Baumarten steigert die Widerstandskraft der Bestände zusätzlich. In Bayern liegt der Schwerpunkt auf dem Umbau reiner Nadelholzbestände hin zu standortgerechten Laub- und Mischbeständen. Die Waldbesitzer zeigen bereits seit vielen Jahren großes Engagement bei der Bewältigung dieser wichtigen Aufgaben. Unterstützung finden sie bei der Bayerischen Forstverwaltung sowie den forstlichen Zusammenschlüssen.

Als weiteres Risiko ist eine erhöhte Waldbrandgefahr zu nennen, die infolge steigender Temperaturen und zunehmender Trockenphasen auftreten kann.

Aufgrund der langen Entwicklungszeiten ist der Waldumbau ein Projekt, das mehrere Jahrzehnte beansprucht. Ziel des angewandten Waldschutzes ist es daher, die Wälder kurz- und mittelfristig vor bestandsgefährdendem Schädlingsbefall zu schützen. Dazu werden die Monitoring-, Prognose- und Diagnoseverfahren, sowie Therapiemaßnahmen laufend evaluiert, adaptiert bzw. bei Auftreten bisher kommensaler Arten oder invasiver Neobiota neu entwickelt. Von besonderer Bedeutung sind dabei biotechnische Verfahren und Neuentwicklungen im Bereich der Fernerkundung zur Verbesserung des Monitorings von Schadorganismen. Dieser Themenkomplex ist Gegenstand mehrerer Forschungsvorhaben. Gelingt es, Waldschäden frühzeitig zu prognostizieren, bestehen gute Chancen, Bestandsschäden effektiv abzuwehren. Der angewandte Waldschutz ist ein wichtiges Hilfsmittel zur Bewältigung der klimatischen Herausforderungen, die unsere Wälder in Zukunft erwartet.

#### 4.6.1.4. Genetische Anpassung und Herkunftswahl

Unter den Bedingungen des prognostizierten Klimawandels spielt neben der Wahl der Baumart auch die Herkunftswahl eine wichtige Rolle. Innerhalb der Baumarten haben sich durch langjährige natürliche Auslese lokale Provenienzen ausgebildet, die an die spezifischen Standortbedingungen wie Böden und Klima im Verbreitungsgebiet, angepasst sind. Sie werden in der Forstpraxis auch als Herkünfte bezeichnet. Die genetische Vielfalt innerhalb einer Herkunft ist die Grundlage für weitere Anpassungsprozesse. Dem Verhältnis von Angepasstheit an die derzeit herrschenden Bedingungen und der Fähigkeit, sich auf neue Bedingungen einzustellen (Anpassungsfähigkeit), gilt es in einer sich ändernden Umwelt besonders Rechnung zu tragen. Dieser Aspekt steht im Mittelpunkt der Klimaforschung am Bayerischen Amt für forstliche Saat- und Pflanzenzucht (ASP), einer Sonderbehörde der Forstverwaltung in Bayern.

Waldbäume und Bestände können sich über genetische Prozesse wie Mutation, Migration, Genfluss und natürliche Auslese an neue Bedingungen anpassen, allerdings benötigen sie dazu lange Zeit. Die natürliche Anpassungsfähigkeit kann keinesfalls mit einem innerhalb von wenigen Jahrzehnten durchgreifenden Klimawandel Schritt halten. In diesem Fall muss der Mensch unterstützend eingreifen, beispielsweise über den künstlichen Transfer von forstlichem Vermehrungsgut. Wenn der Klimawandel zu Bedingungen führt, die außerhalb des Wohlfühlbereichs der lokalen Herkunft liegen, wird ein Wechsel in der Herkunft notwendig. Solche Entscheidungen müssen, genau wie die Entscheidungen zur Baumartenwahl, auf wissenschaftlichen Erkenntnissen beruhen. Sie werden in langjährigen Anbau- und Herkunftsversuchen und genetischen Laboruntersuchungen gewonnen.

Herkunftsversuche sind das wichtigste Instrument, um die phänotypische Reaktion von Herkünften auf unterschiedliche Umweltbedingungen zu prüfen.

Bisher lag der Schwerpunkt bei diesen Versuchen auf der höchsten Wuchsleistung und auf Herkünften, die aus Regionen mit ähnlichen klimatischen Verhältnissen wie sie derzeit in Bayern herrschen, kommen. Im Zuge des Klimawandels werden zunehmend auch Herkünfte aus wärmeren und südlicheren Regionen geprüft, um zu sehen wie sie mit den hiesigen Standortbedingungen zurechtkommen, auch wenn diese Arten derzeit noch keine optimalen Wuchsleistungen bringen. Wichtig ist dabei aber immer, auf die genetische Diversität im Ausgangsmaterial zu achten, so dass möglichst viele Anpassungsoptionen vorgehalten werden, auch wenn diese nicht rasch und unmittelbar umgesetzt werden können. Die genetische Diversität von Waldbeständen kann heute in molekulargenetischen Laboren bestimmt werden. Herkunftversuche in Bayern zeigen beispielsweise, dass bei einer weiteren Erwärmung Tannenherkünfte aus den rumänischen Karpaten eine Alternative für Bayern sein könnten. Ihre genetische Diversität ist höher als die der meisten mitteleuropäischen Tannenherkünfte. Daher ist ihr Anpassungspotenzial positiv zu beurteilen.

Seit 2008 wird das Verhalten bayerischer Buchen- und Tannenherkünfte unter wärmeren und trockeneren Bedingungen, wie sie in den nächsten Jahrzehnten auch in Bayern erwartet werden, in einem Anbauversuch in Bulgarien geprüft.

Die Nichtberücksichtigung von Herkunftsunterschieden kann auch beim Anbau von nichtheimischen Baumarten negative Folgen haben. Dies zeigt unter anderem das Beispiel der aus Nordamerika stammenden Douglasie eindrucksvoll. Die Auswertung zahlreicher Anbau- und Herkunftsversuche, darunter 24 Flächen in Bayern, belegen, dass sich in Bayern unter den derzeitigen und zukünftigen Klimabedingungen die Küstendouglasie zum Anbau gut eignet. Demgegenüber wächst die Inlandsdouglasie weit weniger gut und ist anfälliger für Pilzkrankungen. Der wirtschaftliche Verlust bei Verwendung falscher Herkünfte ist sehr groß. Daher untersucht das



Bayerische Amt für forstliche Saat- und Pflanzenzucht (ASP) zur Zeit, ob Kenntnisse für ausgesuchte, nichtheimische, dem Klimawandel jedoch angepasste Baumarten (z. B. Zeder, Hemlocktanne, Riesen-Lebensbaum, Japanbirke, Baumhasel) zu Herkunftsunterschieden vorliegen oder ob Herkunftsversuche als erster Schritt zum Anbau dieser Arten in Bayern angelegt werden müssen.

Aufgrund der Ergebnisse solcher Versuche werden für den Waldbesitzer Herkunftsempfehlungen durch die Forstverwaltung ausgesprochen. Bei neuen Erkenntnissen werden die Empfehlungen durch das ASP angepasst. Der bislang bestehende absolute Vorrang der lokalen Herkunft muss im Klimawandel hinterfragt und notfalls abgelegt werden.

## Beispiele für konkrete Anpassungsmaßnahmen

### Bergwaldoffensive

Die Bergwaldoffensive ist ein Maßnahmenpaket der Bayerischen Forstverwaltung im Rahmen des Klimaschutzprogramms Bayern 2050. Ziel ist es, die Anpassung der Bergwälder an den Klimawandel zu verbessern. Vor allem die Schutzwaldpflege und die Schutzwaldsanierung im Privat- und Körperschaftswald sollen intensiviert werden.

Im Rahmen der Bergwaldoffensive (BWO) werden durch die im Alpenraum liegenden Ämter für Ernährung, Landwirtschaft und Forsten derzeit 45 Projektgebiete im Privat- und Körperschaftswald

Abbildung 4.6\_6: Schema eines BWO-Projektgebietes



bearbeitet. Die BWO-Projektgebiete sind als Pilotprojekte angelegt, die sich auf Gebiete konzentrieren, in denen ein großer Handlungsbedarf besteht. Die BWO-Projektgebiete dienen gleichsam als »Leuchttürme«, die auf größere Fläche ausstrahlen und die Waldbesitzer für die aktive Pflege der Bergwälder motivieren sollen.

Die einzelnen Maßnahmen in den Projektgebieten reichen von der Pflanzung von Mischbaumarten und der Förderung der Naturverjüngung über eine Intensivierung der Waldpflege bis hin zu Begleitmaßnahmen wie Trennung von Wald und Weide, freiwilligem Landtausch und notwendiger Erschließung. Regelmäßig werden begleitende Jagdkonzepte erstellt (Abbildung 4.6\_6). Für die Intensivierung der Beratung der Waldbesitzer in den Projektgebieten wurden Projektmanager angestellt.

Gemeinsam mit den Waldbesitzern und in Abstimmung mit weiteren Interessenträgern rund um den Bergwald werden die Maßnahmen der BWO geplant und umgesetzt. Dieser partizipative Ansatz erhöht die Akzeptanz und hilft, Lösungen für Interessenkonflikte zu finden. Als besonders hilfreich haben sich hierbei die BWO-Beiräte erwiesen. Sie sind je nach örtlicher Situation mit Vertretern der Waldbesitzer, Verbände und Fachbehörden sowie der Politik besetzt und begleiten die Vorbereitung und Umsetzung der Maßnahmen.

Um die wichtige Arbeit, die die Waldbesitzer für die Erhaltung und Verbesserung der Schutzwälder leisten, gebührend herauszustellen, wird bei der BWO besonderes Gewicht auf Öffentlichkeitsarbeit gelegt.

Weitere Bestandteile der Bergwaldoffensive sind beispielsweise ein Projekt des Bayerischen Amtes für forstliche Saat- und Pflanzenzucht zur Gewinnung von forstlichem Saat- und Pflanzgut für das Hochgebirge, das INTERREG-Projekt WINALP zur flächendeckenden Standorterfassung im Alpenraum, ein Pilotprojekt zum Einsatz einer wildbiologischen Fachkraft am Landratsamt Oberallgäu sowie weitere Forschungs- und Entwicklungsprojekte. Einige dieser Projekte sind mittlerweile beendet.

Das Pendant zur BWO stellt in den Nord-Ostbayerischen Mittelgebirgen die Waldinitiative Ostbayern (WIO) dar. Nadelholzbestände, fehlende Mischbaumarten, teilweise nicht geeignete Fichtenherkünfte und hohe Luftschadstoffeinträge in der Vergangenheit machen diese Bestände besonders anfällig für die Folgen des Klimawandels. Die Unterstützung der Waldbesitzer analog zur BWO zeigt in den Projektgebieten bereits waldbauliche Erfolge.

#### Literatur

[1] HUMANS, R.J.; CAMERON, S.E.; PARRA, J. L.; JONES, P.G.; JARVIS, A. (2005): Very high resolution interpolated climate surfaces for global land areas. *Int. J. Climatol.* 25: 1965–1978

## EXKURS FORSCHUNG

Prof. Dr. Annette Menzel, Dr. Clemens Wastl, Christian Schunk; Technische Universität München (Ökoklimatologie); Projekt: „Alpines Waldbrandgefahren-Warnsystem (ALP FFIRS)“

## Ändert sich die Waldbrandgefahr im Alpenraum mit dem Klimawandel?



Im Projekt ALP FFIRS (Alpine Forest Fire Warning System) haben neben der Technischen Universität München 14 weitere Einrichtungen

aus den Alpenländern Frankreich, Schweiz, Italien, Österreich, Deutschland und Slowenien die historische und zukünftige Waldbrandgefahr analysiert, ein gemeinsames Warnsystem installiert und die länderübergreifende Zusammenarbeit in der Brandbekämpfung vorangetrieben.

Eine Vielzahl von Untersuchungen basierte auf sogenannten Waldbrandindizes, die auf Grundlage von meteorologischen Parametern wie Temperatur, Luftfeuchte und Niederschlag eine Gefahrenstufe für den jeweiligen Tag berechnen. Anhand dieser Indizes wurde beispielsweise für 25 Stationen mit langen Datenreihen (1951–2010) der Einfluss des rezenten Klimawandels auf die witterungsbedingte Waldbrandgefahr untersucht. Ein signifikanter Anstieg der Waldbrandgefahr wurde in den West- und vor allem den Südalpen nachgewiesen, wohingegen der Anstieg in den Nordalpen deutlich schwächer und in den inneralpinen Tälern nicht nachweisbar war. Die Anzahl der Tage mit besonders hoher Waldbrandgefahr stieg in dieser Periode in den Westalpen und den inneralpinen Tälern um je 4 Tage, in den Nordalpen um 8 und in den Südalpen sogar um 22 Tage.

Um auch Aussagen zur zukünftigen Waldbrandgefahr treffen zu können, wurden sowohl ein regionales Klimamodell (COSMO-CLM, Szenario A1B) als auch ein Multimodel-Ansatz verwendet, bei dem die Ergebnisse vieler Modelle kombiniert und so mögliche Fehleinschätzungen reduziert werden. Ein Vergleich dieser Ansätze brachte große Unsicherheiten zu Tage, die vor allem durch die unzureichende Modellierung des Niederschlags in Bergregionen bedingt sind. Während nördlich der Alpen kein eindeutiger Trend identifiziert werden konnte, ist mit einem weiteren Anstieg der Waldbrandgefahr südlich des Alpenhauptkamms zu rechnen.

Zusätzlich zu diesen klimatologischen Untersuchungen wurden auch die Bedingungen rund um den außergewöhnlichen Waldbrand am Sylvensteinspeicher im Herbst 2011 analysiert. Hierfür wurden Messdaten des Deutschen Wetterdienstes und einer Station des Projekts KLIMAGRAD herangezogen. Hierbei zeigte sich, dass zur korrekten Erfassung der Waldbrandgefahr während der häufigen Inversionswetterlagen Messwerte aus den Tallagen und die üblicherweise verwendeten Waldbrandindizes mit täglicher Berechnung nicht ausreichen. Der Deutsche Wetterdienst setzt mittlerweile jedoch einen neuen Index (WBI) ein, der die besonderen Tagesgänge während dieser Wetterlagen korrekt abbilden kann.

Das tatsächliche Auftreten von Waldbränden hängt aber nicht nur von meteorologischen Parametern, sondern vor allem auch von der Waldbewirtschaftung und möglichen Zündquellen – somit von technischen und gesellschaftlichen Entwicklungen – ab.

Abbildung 1: Extreme kleinräumige Unterschiede in der Waldbrandgefahr bei Inversionswetterlagen: Nachlöscharbeiten nach dem Waldbrand am Sylvensteinspeicher (Bildmitte, am Rücken) bei gleichzeitigem Reifbelag auf der Vegetation im Tal.



## EXKURS FORSCHUNG

Carl Beierkuhnlein, Biogeographie; Anke Jentsch, Störungsökologie, BayCEER, Universität Bayreuth; Monika Konnert, Bayerisches Amt für forstliche Saat- und Pflanzenzucht, Teisendorf; Jürgen Kreyling, Universität Greifswald; Projekte: „FORCAST“, „EVENT“

## Innerartliche Vielfalt bei wichtigen Waldbaumarten als möglicher Beitrag zur Anpassung der Forstwirtschaft an extreme Klimabedingungen

Aufgrund der globalen Erwärmung wird mit einer Zunahme extremer Klimabedingungen gerechnet. Sowohl vermehrte Dürre- und Hitzeperioden, sowie auch verstärkte Starkregenereignisse werden erwartet. Dabei bleiben aber sehr wahrscheinlich bisher gelegentlich auftretende Wetterextreme, wie Spätfröste, erhalten. Dies stellt insbesondere langlebige Pflanzenarten, wie Bäume, vor große Herausforderungen. Eine Strategie zur Anpassung der Wälder an den Klimawandel ist die Wahl der passenden Herkunft. Dazu muss im natürlichen Verbreitungsgebiet einer Art nach Populationen (Herkünften) gesucht werden, die eventuell besser mit den zukünftig erwarteten Bedingungen zurechtkommen werden, weil sie bereits jetzt in Regionen wachsen, die diesen Bedingungen ähnlich sind.

Abbildung 1: Blattschädigung durch die extreme sommerliche Dürre und Hitzeperiode 2003 bei Bergahorn im Frankenwald. In diesem Jahr zeigten viele Waldbäume sichtbare Schäden.



In Experimenten konnten wir innerhalb einer Baumart bei Jungpflanzen eine sehr große Unterschiedlichkeit bezüglich ihres Verhaltens unter extremen Klimabedingungen finden. Teils spiegelten die einzelnen Pflanzen dabei genetisch angeeignete Anpassungen an das Klima ihres Herkunftsgebietes wider. So zeigten südliche Herkünfte von Buchen beispielsweise eine positive Reaktion auf Erwärmung oder Pflanzen aus kontinentalen Räumen eine höhere Frosttoleranz. Allerdings ist noch weitere Forschung vonnöten, da sich bei der Kombination verschiedener Extreme überraschendes und nicht erwartetes Verhalten zeigte.

[1] Kreyling J et al. (2012a): Late frost sensitivity of juvenile *Fagus sylvatica* L. differs between southern Germany and Bulgaria and depends on preceding air temperature. *European Journal of Forest Research* 131

[2] Kreyling J et al. (2012b): Cold hardiness of *Pinus nigra* Arnold as influenced by geographic origin, warming, and extreme summer drought. *Environmental and Experimental Botany* 78

[3] Thiel D et al. (2014): Different reactions of central and marginal provenances of *Fagus sylvatica* to experimental drought. *European Journal of Forest Research* 133

Abbildung 2: In den Bayreuther Experimenten zu Klimaextremen und innerartlicher Vielfalt bei wichtigen Waldbaumarten wurden im EVENT 3 und im FORKAST Experiment erhebliche Unterschiede zwischen einzelnen Herkünften gefunden.



## 4.7 Naturschutz

### 4.7.1 Allgemeines

Der anthropogen bedingte Klimawandel trifft weltweit auf eine bereits durch zahlreiche Einflüsse geprägte Biodiversität. Auch in Bayern werden Natur und Landschaft vor allem durch die Landnutzung beeinflusst, die klimatische Effekte überlagert. Insofern stellen Einflüsse der Landnutzung in Modellrechnungen und Prognosen zu den Auswirkungen des Klimawandels auf Arten, Lebensgemeinschaften und Ökosysteme vielfach Unwägbarkeiten dar, insbesondere vor dem Hintergrund, dass auch in der Landnutzung Anpassungen an den Klimawandel erfolgen werden, die sich heute erst in Ansätzen abzeichnen. Aus diesem Grund sind Aussagen über die Folgen des Klimawandels auf die Natur oft noch mit erheblichen Unsicherheiten behaftet.

Dennoch lassen sich Auswirkungen des Klimawandels bereits heute beobachten und eingeschränkt auch prognostizieren: Der Klimawandel wird sich auf Arten, deren Lebensgemeinschaften sowie auf Ökosysteme, also im Wesentlichen auf ökologische Funktionen auswirken.

Je intakter ein Ökosystem ist, desto besser kann es für gewöhnlich auf Störungen – auch durch den Klimawandel – reagieren. Entsprechende Naturschutzmaßnahmen streben daher die Verbesserung des Gesamtsystems an und können meist keinen konkreten Themenfeldern zugeordnet werden. Hierzu sind bestehende Naturschutzstrategien voranzubringen, die unter anderem in das Biodiversitätsprogramm Bayern 2030 [1] übernommen wurden und die folgenden Punkte beinhalten:

- Erhalt noch vorhandener Vorkommen gefährdeter Arten und Lebensgemeinschaften, u.a. durch Artenhilfsprogramme
- Einlagerung der Samen sehr seltener Pflanzen in einer Genbank „Arche Bayern“
- Sicherung möglichst großer und zusammenhängender Biotope

- Pflege, Optimierung und Vervollständigung des Schutzgebietssystems in Bayern
- Renaturierung von Mooren als Lebensräume sowie als Senken für Treibhausgase (siehe Abschnitt 4.3.2 und 4.3.4)
- Stärkung des Vertragsnaturschutzprogramms, stärkere Ausrichtung des Kulturlandschaftsprogramms auf die Stabilisierung der Biodiversität
- Biotopverbund: Vernetzung der wertvollen Schutzgebiete und Lebensräume durch weitere BayernNetz Natur-Projekte, Grünbrücken und Amphibiendurchlässe sowie durch Wiederherstellung der Durchgängigkeit der Fließgewässer

Diese Auflistung zeigt, dass es weniger um die Erarbeitung neuer und zusätzlicher Konzepte geht, als um die Stärkung und weitere Realisierung klassischer Naturschutzinstrumente und -maßnahmen. Nicht zuletzt auch deshalb, weil intakte Naturbereiche dazu beitragen, Effekte des Klimawandels abzumildern. Sei es durch die ausgleichende Wirkung von Stauräumen auf den Abfluss in Fließgewässern (Retention) und Wasserrückhalt in der Fläche, Stabilisierung des Wasserhaushalts durch intakte Feuchtgebiete, Minderung von Erosion und der Gefahr von Erdbeben durch eine artenreiche Vegetation sowie durch die Verringerung von Treibhausgas-Emissionen durch renaturierte Moore (vgl. Kapitel 4.3.4).

### 4.7.2 Phänologische Veränderungen

Dass Arten bereits auf den Klimawandel reagieren, lässt sich durch zahlreiche Naturbeobachtungen bestätigen. Ein frühzeitigerer Beginn der Haselnuss- oder der Apfelblüte und späterer Beginn der Herbstverfärbung von Laubbäumen wie zum Beispiel der Stieleiche, werden bereits vielen Bürgern Bayerns aufgefallen sei. Sie werden durch phänologische Daten des Deutschen Wetterdienstes belegt, die durch das Landesamt für Umwelt für Bayern gesondert ausgewertet werden ([2](vgl. Kapitel 3.8)).



Je nach ihren physiologischen Amplituden reagieren Arten sehr unterschiedlich auf Klimaänderungen. Dabei spielt jedoch nicht nur die Temperatur eine Rolle, sondern vor allem auch andere Phänomene des Klimawandels, zum Beispiel hydrologische Veränderungen und Wetterextreme. Amphibien mögen vielleicht höhere Temperaturen verkraften, nicht jedoch einen Spätfrost während der Wanderung zu den Laichgewässern oder das Austrocknen der Laichgewässer während einer Dürre im Frühsommer.

Nicht zuletzt wird der Klimawandel Auswirkungen auf ökologische Funktionen und Interaktionen haben. So wurde am Beispiel des Lärchenwicklers nachgewiesen, dass der Schlupf der Larven nicht mehr mit der Blatentwicklung synchron läuft. Die Junglarven schlüpfen aufgrund der milden Winter bereits sehr früh, während die Nadelblätter als Nahrung noch gar nicht zur Verfügung stehen. Diese Desynchronisation von Wirtspflanze und Pflanzenfresser führt zu hohen Mortalitäten der Insektenart [3]. Ein weiteres Beispiel ist die Desynchronisation im Zugeschehen zwischen dem Kuckuck und seinen Wirtsvögeln, wie zum Beispiel dem Teichrohrsänger. Der Teichrohrsänger hat kürzere Zugwege als der Kuckuck, erreicht daher infolge des wärmeren Klimas früher sein Brutareal und kann früher mit dem Brutgeschäft beginnen. Als Langstreckenzieher kommt der Kuckuck dann zu spät, um noch erfolgreich seine Eier in den Nestern seiner Wirtsvögel ablegen zu können [4].

Abbildung 4. 7\_1 Die Ausbreitung der früher nur mediterran verbreiteten Feuerlibelle (*Crocotthemis erythraea*, siehe oberes Bild) nach Bayern wird auf den Klimawandel zurückgeführt (Foto: C. Martin, piclease)

### 4.7.3 Auswirkungen des Klimawandels auf die Verbreitung von Arten

Leicht nachvollziehbar sind Arealausdehnungen wärmeliebender Arten aus Südeuropa, die immer öfter in Bayern beobachtet werden. Insbesondere das zunehmende Auftreten auffälliger Arten wie Bienenfresser, Seidenreier, Wespenspinne (*Argiope bruennichii*) oder Feuerlibelle (*Crocotthemis erythraea*) sind bereits gut dokumentiert [5].

Als sicher gilt, dass es sowohl Gewinner als auch Verlierer des Klimawandels geben wird. Welche Arten besonders sensitiv auf den Klimawandel reagieren, das heißt aufgrund ihrer Physiologie nur geringe Anpassungskapazitäten haben, um mit den veränderten Bedingungen zurecht zu kommen, oder



von künftig konkurrenzkräftigeren anderen Arten verdrängt werden, ist Gegenstand zahlreicher wissenschaftlicher Studien. So genannte Hochrisiko-Arten weisen meist nur noch kleine Populationen in begrenzten Arealen auf; oftmals sind diese Arten wenig mobil. Hierzu gehören Kaltzeitrelikte wie die Rhön-Quellschnecke, der Hochmoor-Laufkäfer, die Zwerglibelle und das Schneehuhn, unter den Pflanzen zum Beispiel die Zwergbirke, das Karlszepter oder der Gletscher-Hahnenfuß.



Abbildung 4.7\_2 Das Karlszepter (*Pedicularis sceptrum-carolinum*) ist ein Kaltzeitrelikt, das in Bayern nur noch in wenigen Mooren vorkommt (Foto: Dr. Walter Joswig, LfU)

Es ist also zu erwarten, dass viele Arten aufgrund des Klimawandels nach Mitteleuropa einwandern, gleichzeitig andere Arten den für sie dann ungünstigen Klimabedingungen ausweichen, soweit sie dies können. Dieser Artenturnover wird Prognosen zufolge, eher zu einer negativen Bilanz führen. Auf Grundlage von Modellrechnungen und angesichts des hohen Fragmentierungsgrads der Landschaft sowie des hohen Anteils bereits gefährdeter Arten kann ein durch den Klimawandel verursachter Verlust von 5 bis 30 % aller Pflanzen- und Tierarten in den nächsten Jahrzehnten für das Gebiet der Bundesrepublik als wahrscheinlich angesehen werden [6].

Mit dem Klimawandel ist eine Verschiebung der Klimazonen und, damit einhergehend, auch der Vegetationszonen verbunden. Bei einer Temperaturerhöhung von 1 °C ist mit einer Verschiebung der Vegetationszonen nach Norden um 200 bis 300 km, bzw. in den Bergen um ca. 200 Höhenmeter in Richtung Gipfel zu rechnen [7]. Dabei werden sich die derzeitigen Lebensgemeinschaften jedoch nicht im Komplex verlagern. Vielmehr ist davon auszugehen, dass sie sich, ggf. gemeinsam mit zugewanderten Arten, infolge des Klimawandels auch neu kombinieren. Im Alpenraum, unter anderem im Nationalpark Berchtesgaden, wurde festgestellt, dass Pflanzenarten tieferer Lagen zunehmend in alpine Rasengesellschaften der Hochlagen einwandern, während Arten höchster Lagen im unteren Höhenbereich ihres Vorkommens zurückgehen [8]. Weiterhin profitieren in Gebirgslebensräumen Gehölze vom Klimawandel stärker als Gräser und Kräuter. Diese werden in der Folge in bisher offene Lebensräume einwandern und hier das Artenspektrum verändern [9].



#### 4.7.4 Handlungsfeld Moorrenaturierung

Bayern ist geprägt durch eine Vielfalt an Bodenformen. Der Freistaat weist etwa 220.000 ha so genannte organische Böden auf, die je nach Kohlenstoffgehalt in drei Kategorien, in Hochmoorböden, Niedermoorböden und Anmoorgley / Moorgley unterteilt werden [10]. In Bayern sind über 90 % der organischen Böden durch Nutzung und Entwässerung beeinträchtigt, wodurch ein enormes Handlungspotential für den Klimaschutz sichtbar geworden ist. Dies berührt insbesondere Form und Intensität der land- und forstwirtschaftlichen Landnutzung bzw. die darauf abzielende Förderpraxis.

Die entwässerten und bewirtschafteten Böden setzen je nach Zustand der organischen Substanz (z. B. Torf), des Nutzungs- und Entwässerungsgrads erhebliche Mengen an Treibhausgasen frei. Es handelt sich um die Klimagas Kohlendioxid ( $\text{CO}_2$ ), Lachgas ( $\text{N}_2\text{O}$ ) und Methan ( $\text{CH}_4$ ) [11]. Die Klimagas-Freisetzungen und -Bindungen finden als biochemische Prozesse in den durch Entwässerung bzw. Wasserüberschuss und Bodenbearbeitung befindlichen Bodenschichten statt.

Umfangreiche Grundlagenforschungen und gezielte Begleituntersuchungen der Hochschule Weihenstephan-Triesdorf in unterschiedlichen Lagen und Naturräumen Bayerns belegen einerseits diese Situation, geben mit den Leitfäden des Bayerischen Landesamtes für Umwelt außerdem gezielte Hinweise, wie die Freisetzung von Treibhausgasen minimiert werden kann. Dieses Handlungsfeld, das 2008 im Klimaprogramm Bayern (KLIP 2020) verankert wurde, mündete in umfangreiche konkrete Moorrenaturierungsprojekte in Bayern [12]. In diesen Mooren wurden, nach vorausgehender Flächensicherung, bestehende Nutzungen umgestellt und nach Möglichkeit die Grund- und Moorwasserstände schrittweise bis nahe an die Bodenoberfläche angehoben. Außerdem wurde ein konkreter Praxis-Leitfaden für Moor-Renaturierungen aufgelegt [13].

Durch die bereits durchgeführten Renaturierungsmaßnahmen wurden in Bayern aus Mitteln des Sonderprogramms KLIP 2020 bisher auf 1.375 ha Moorböden 17 700 t  $\text{CO}_2$ -Äquivalente pro Jahr (umgerechnet auf eine Wirkungsdauer von 50 Jahren – Stand Ende 2013) weniger freigesetzt.

Die im Jahr 2014 beschlossene Fortsetzung des Klimaprogramms Bayern zum KLIP 2050 zeigt die aktive Wahrnehmung dieser Handlungsmöglichkeiten in der Bereitstellung der erforderlichen Finanzmittel, durch die Extensivierung von Moorböden mit einhergehender Wiedervernässung sichtbare Erfolge zur Minimierung der Treibhausgasfreisetzung zu erreichen.



Abbildung 4.7\_3: Wiedervernässung im Leipheimer Moos, Landkreis Günzburg (Foto: Ulrich M. Sorg)

Erstmals besteht nun auch die Möglichkeit, Maßnahmen zur Moorrenaturierung für den Klimaschutz durch EU-Programme zu fördern. Zudem wurde auf Anregung des Obersten Bayerischen Rechnungshofs geprüft, aus Kostengründen primär die in staatlicher Verantwortung befindlichen Moore und Moorböden zu extensivieren und eine Wiedervernässung in die Wege zu leiten.

Im Geschäftsbereich des StMELF sollen im Staatswald möglichst viele Hochmoore auf Dauer in einem günstigen Erhaltungszustand bleiben oder entsprechend renaturiert werden. Priorität haben dabei Projekte mit einem besonders guten Verhältnis zwischen Nutzen, Machbarkeit und Aufwand. Hierbei sind auch Belange Dritter sowie evtl. Zielkonflikte zu berücksichtigen. In allen bedeutenden Moorkomplexen im Staatswald wurden schon Renaturierungsmaßnahmen in unterschiedlicher Intensität durchgeführt. Die ersten Maßnahmen begannen bereits Anfang der 1990er Jahre. Nach vorsichtiger Schätzung gehen wir von mehr als 100 Maßnahmen in über 50 Moorbereichen aus. Da vor 2005 keine vollständigen Daten vorliegen, dürfte die tatsächliche Zahl höher liegen. Nach erfolgreichem Abschluss entsprechender Forschungsaktivitäten soll die Renaturierung von Hochmooren vorbehaltlich verfügbarer Haushaltsmittel beschleunigt

vorangetrieben werden, da dort den Belangen des Naturschutzes, des Klimaschutzes, des Wasserschutzes und des Bodenschutzes besonderes Gewicht zukommt und vergleichsweise wenige Zielkonflikte auftreten. Bei Niedermooren und Anmooren dagegen ist eine flächendeckende Veräussung und Einstellung der Nutzung nicht vorgesehen, im Einzelfall (z. B. in Moorkomplexen aus Hoch-, Übergangs- und Niedermooren) aber auch nicht ausgeschlossen. Für die Moorflächen mit mittlerer bis hoher Priorität sollen die Maßnahmen bis 2020 auf mind. 30 % der Fläche und bis 2030 auf der gesamten Fläche weitgehend umgesetzt sein, soweit Belange Dritter oder Zielkonflikte dies zulassen. Dazu wird unter anderem bei den sogenannten „besonderen Gemeinwohlleistungen im Staatswald“ ein entsprechender Schwerpunkt gesetzt.

#### Links

- > Bayerisches Landesamt für Umwelt (2011): MOORBODENÜBERSICHTSKARTE 1:500.000
- > Bayerisches Landesamt für Umwelt (2013): KLIP 2020 – EIN SONDERPROGRAMM ZUR MOORRENATURIERUNG
- > Bayerisches Landesamt für Umwelt (2010): MOORRENATURIERUNG KOMPAKT -HANDLUNGSSCHLÜSSEL FÜR DIE PRAXISLITERATUR

#### Literatur

- [1] BAYERISCHE STAATSRREGIERUNG, BAYER. STAATSMINISTERIUM FÜR UMWELT UND VERBRAUCHERSCHUTZ (2014): NaturVielfalt Bayern – Biodiversitätsprogramm Bayern 2013. Eigenverlag
- [2] Bayerisches Landesamt für Umwelt (2014): Beeinflusst der Klimawandel die Jahreszeiten in Bayern? Antworten der Phänologie. Bayerisches Landesamt für Umwelt, Eigenverlag
- [3] ESPER, J.; BUNTGEN, U.; FRANK, D.C.; NIEVERGELT, D.; LIEBHOLD, A. (2007): 1200 years of regular outbreak in alpine insects. *Proceedings of the Royal Society B-Biological Sciences*, 274(1610)
- [4] SAINO, N.; RUBOLINI, D.; LEHIKAINEN, E.; SOKOLOV, L.V.; BONISOLI-AQUATI, A.; AMBROSINI, R.; BONCORAGLIO, G.; MÖLLER, A.P. (2009): Climate change effects on migration phenology may mismatch brood parasitic cuckoos and their hosts. *Biol. Letters* 5
- [5] BAYERISCHES STAATSMINISTERIUM FÜR UMWELT UND GESUNDHEIT (2010): Bayern Arche – Artenschutzbericht Bayern
- [6] BUNDESAMT FÜR NATURSCHUTZ (2004): Biologische Vielfalt und Klimawandel – Gefahren, Chancen, Handlungsoptionen –; BfN-Sript 148
- [7] RAMMERT, U. (2004): Monitoring von Klimaveränderungen mit Hilfe von Bioindikatoren (Klima-Biomonitoring). Jahresbericht Landesamt für Natur und Umwelt des Landes Schleswig-Holstein
- [8] PAULI, H. et al. (2012): Recent plant diversity changes on Europe's mountain summits. *Science* 336
- [9] BEIERKUHNLIN, C.; FOKEN, T. (2008): Klimawandel in Bayern – Auswirkungen und Anpassungsmöglichkeiten. Bayreuther Forum Ökologie Vol. 113
- [10] BAYERISCHES LANDESAMT FÜR UMWELT (2014): Moorbodenübersichtskarte 1:500 000. Bayerisches Landesamt für Umwelt, Eigenverlag
- [11] DRÖSLER, M.; SCHALLER, L.; KANDELHARDT, J.; SCHWEIGER, M.; FUCHS, D.; TIEMEYER, B.; AUGUSTIN, J.; WEHRHAN, M.; FÖRSTER, C.; BERGMANN, L.; KAPFER, A.; KRÜGER, G.M. (2012): Beitrag von Moorschutz- und revitalisierungsmaßnahmen zum Klimaschutz am Beispiel von Großprojekten; *Natur und Landschaft* 87. Jahrgang Heft 2
- [12] BAYERISCHES LANDESAMT FÜR UMWELT (2013): KLIP 2020 – Ein Sonderprogramm zur Moorrenaturierung. Bayerisches Landesamt für Umwelt, Eigenverlag
- [13] BAYERISCHES LANDESAMT FÜR UMWELT (2010): Moorrenaturierung kompakt - Handlungsschlüssel für die Praxis. Bayerisches Landesamt für Umwelt, Eigenverlag



## 4.8. Gesundheit

### 4.8.1 Klimafolgen und Anpassung

Viele Erkrankungen sind abhängig von verschiedenen Klimafaktoren (wie z. B. Temperatur), der konkrete Zusammenhang mit messbarem Klimawandel ist momentan jedoch meist noch unklar. Es zeigt sich jedoch, dass extreme Wetterereignisse, im Zuge des Klimawandels vermehrt auftreten können.

Beispielsweise können Hitzeperioden den menschlichen Organismus belasten und klinisch relevante Symptome hervorrufen. Mögliche Folgen von Hochwasserereignissen und Stürmen, die sich unter dem Einfluss des Klimawandels künftig noch verschärfen könnten, sind die Gefährdung der Trinkwasserqualität, Verletzungen sowie Traumatisierungen. Diese Folgen, wie andere Naturkatastrophen, fallen primär in den Bereich des Katastrophenschutzes und werden hier nicht weiter betrachtet.

Auch klimatisch bedingte langfristige Veränderungen der Umwelt scheinen Auswirkungen auf die Gesundheit des Menschen zu haben. Der Mensch ist zwar grundsätzlich in der Lage, mit physiologischen Anpassungsreaktionen auf die unterschiedlichen Reize zu reagieren [1], in Extremsituationen können diese jedoch die Gesundheit beeinträchtigen [2].

Zur Beurteilung einer entsprechenden Belastung ist es grundsätzlich notwendig, dass regionale und individuelle Aspekte wie zum Beispiel Akklimatisierungsgrad, Alter und Vorerkrankungen berücksichtigt werden [3]. Gesundheitliche Beeinträchtigungen können sich beispielsweise bei sommerlichen Hochdruckwetterlagen regional als gemeinsame Folge einer erhöhten Wärmebelastung, einer hohen UV-Strahlungsintensität und erhöhter bodennaher Ozonkonzentration ergeben. Zudem spielen individuelle Aspekte bei sommerlichen Hitzewellen mit einem Anstieg an Todesfällen eine große Rolle, da hiervon häufig ältere Menschen mit vorbestehenden Herz-Kreislauf-Erkrankungen besonders betroffen sind.

Als mögliche Folge des Klimawandels werden momentan neben der deutlichen Verschlechterung des Krankheitsbildes bei chronisch verlaufenden Herz-Kreislaufkrankungen (Exazerbation) auch das vermehrte und veränderte Auftreten von Sensibilisierungen und Allergien, Haut- und Augenerkrankungen sowie Infektionskrankheiten diskutiert.

- Durch veränderte Klimaparameter können vermehrt Allergene durch pollenproduzierende Pflanzen freigesetzt werden. Dies kann zu einem Anstieg bzw. zu einer Verschlimmerung Pollenassoziierter allergischer Erkrankungen führen.
- Die erwarteten steigenden Jahresdurchschnittstemperaturen könnten dazu führen, dass sich Menschen häufiger und länger leichtbekleidet im Freien aufhalten und bei zunehmender UV-Strahlungsstärke ihr UV-Lebenszeitkonto „füllen“. Hinzukommen vermehrte Urlaubsreisen in sonnenreiche Regionen und die Nutzung von Solarien [4, 5]. Die Folge könnte eine steigende Hautkrebsinzidenzrate sein [6].
- Bisher ist kein ursächlicher Zusammenhang zwischen Klimawandel und dem Auftreten klimasensitiver Infektionskrankheiten und -erregern bekannt. Es sind jedoch bereits Veränderungen dahingehend zu beobachten, dass sich künftig auch in Bayern potenzielle Lebensräume für Überträger von Krankheitserregern (Vektoren) von Infektionskrankheiten entwickeln könnten.

Bei einigen der oben genannten genannten Erkrankungen (z. B. Hautkrebs) besteht eine lange Verzögerung (Latenzzeit) zwischen der Exposition und dem Auftreten der Erkrankung, wodurch die Untersuchung eines kausalen Zusammenhangs zwischen Klimawandel und dem Auftreten einer Erkrankung zusätzlich erschwert wird.

#### 4.8.1.1 Herz-Kreislaferkrankungen

##### Expositionsveränderung

Es ist bekannt, dass extreme Wetterereignisse (wie z. B. Hitzeperioden oder schnelle Temperaturänderungen), die im Zuge des Klimawandels vermehrt auftreten können, den menschlichen Organismus belasten und klinisch relevante Symptome hervorrufen.

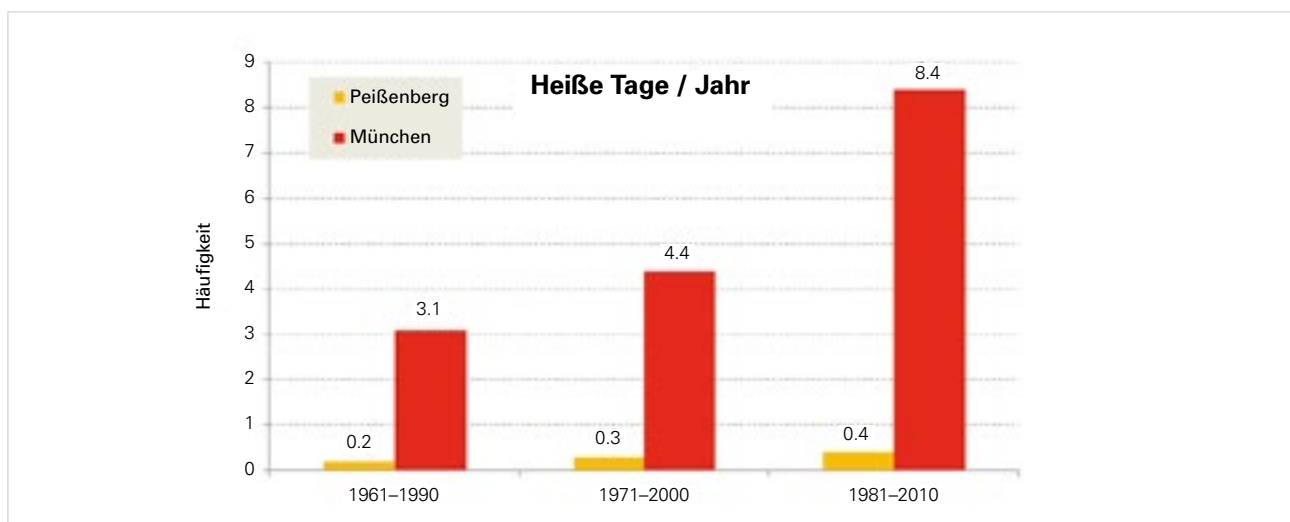
Verschiedene Studien zeigen, dass die Wahrscheinlichkeit für das Eintreten einer Hitzeperiode, wie im Sommer 2003 in Europa, bereits heute zugenommen hat [7, 8, 9]. Modellsimulationen haben ergeben, dass sommerliche Hitzewellen in Deutschland signifikant häufiger auftreten, länger andauern und intensiver werden. In den südlichen Regionen Deutschlands werden diese Effekte stärker auftreten als im gesamtdeutschen Durchschnitt [10]. In Bayern hat nach Aufzeichnungen des Deutschen Wetterdienstes (DWD) im Zeitraum von 1961 bis 2010 die Zahl der heißen Tage (Tage mit einer Maximaltemperatur von mindestens 30 °C), deutlich zugenommen (Abbildung 4.8\_1, exemplarisch für München und Hohen Peißenberg).

Abbildung 4.8\_1: Zahl der heißen Tage in München und am Hohen Peißenberg

##### Gesundheitliche Relevanz

Die häufigste Auswirkung von Hitzewellen auf den menschlichen Organismus ist die sogenannte Hitzeerschöpfung, die mit starkem Schwitzen und Durstgefühl sowie Erschöpfungszuständen einhergeht. Die Hitzeerschöpfung kann sich bis zum Hitzschlag steigern. Bei beständig hohen Temperaturen sinkt der Blutdruck, da sich die Blutgefäße erweitern. Nehmen Patienten blutdrucksenkende Medikamente, kann dieser Effekt noch verstärkt werden und zu Schwindel, Schwächeanfällen und im schlimmsten Fall einem Kreislaufkollaps führen [11]. Es ist ferner bekannt, dass sich bei hohen Lufttemperaturen unter anderem die Blutgerinnung (Hämostase) verändern kann und damit das Thromboserisiko ansteigt [12]. Steigen die Außentemperaturen von einem auf den nächsten Tag um mehr als fünf Grad, wächst die Herzinfarktgefahr für Menschen mit Bluthochdruck und Herz-Kreislauf-Erkrankungen um rund 60 %. Für diese Menschen besteht auch ein erhöhtes Herzinfarktrisiko, wenn die Temperatur wieder stark abfällt oder der Luftdruck stark schwankt [5]. Auch für niedrige Temperaturen wurde ein Zusammenhang mit der Häufung von kardiovaskulären Ereignissen und Schlaganfällen berichtet [12].

In Bayern wurde untersucht, inwieweit sich Änderungen der Lufttemperatur auf die Zahl der Todes



fälle durch Herz-Kreislaufkrankungen auswirken. Dazu wurde untersucht, ob es in den Städten München, Nürnberg und Augsburg im Zeitraum von 1990 bis 2006 einen Zusammenhang zwischen den rund 188 000 Todesfällen durch Herz-Kreislaufkrankungen und Lufttemperaturänderungen gab. In diesem Zeitraum ist die Zahl der Todesfälle aufgrund von Herz-Kreislaufkrankungen sowohl bei einem Temperaturanstieg als auch bei einem Temperaturabfall signifikant gestiegen (Zunahme um 9,5 % bei einem Temperaturanstieg von 20 °C auf 25 °C und Zunahme um 7,9 % bei einem Temperaturabfall von –1 °C auf –8 °C). Herz-Kreislaufbedingte Todesfälle konnten auch noch bis zu zwei Tage nach Temperaturanstiegen bzw. bis zu zwei Wochen nach Kälteperioden beobachtet werden. Betroffen waren in dieser Studie vor allem ältere Personen [12], die häufiger auch an anderen Krankheiten, die ihre Sensitivität auf thermische Belastungen erhöhen, leiden. Problematisch ist in diesem Zusammenhang ferner, dass sich Menschen über 75 Jahren überwiegend in innerstädtischen Gebieten mit erhöhter Lufttemperatur (städtische Wärmeinsel) aufhalten [13, 14]. Als besonders gefährdete Personenkreise gelten auch Kleinkinder, die pro Körpergewicht mehr Wärme produzieren und sich schlechter an Temperaturveränderungen anpassen können, sowie Menschen mit bestimmten Vorerkrankungen wie Herz-Kreislaufkrankungen oder Diabetes.

Modellsimulationen deuten darauf hin, dass bis zum Ende des 21. Jahrhunderts die Zahl der Todesfälle durch ischämische bzw. koronare Herzerkrankungen, die auf Hitzewellen in Deutschland zurückzuführen sind, um den Faktor 2,4 (bei akklimatisierten Personen) bzw. 5,1 (bei nicht akklimatisierten Personen) zunehmen werden [10].

#### Anpassungsmaßnahmen

Um den negativen gesundheitlichen Auswirkungen von Hitzewellen entgegen zu wirken, ist im Jahr 2006 vom Deutschen Wetterdienst ein Hitzewarnsystem entwickelt worden. Dieses beinhaltet

Hitzewarmmeldungen an die Bundesländer. 2008 wurde das Informationsangebot, das sich zunächst ausschließlich an den kommunalen Öffentlichen Gesundheitsdienst und seine Pflegeaufsichten richtete, auf alle interessierten Pflegeeinrichtungen erweitert. Einrichtungen, die sich im DWD Hitzewarnsystem anmelden, erhalten bei Überschreitung einer vom DWD definierten Schwellentemperatur („starke Wärmebelastung“: Gefühlte Temperatur liegt über 32 °C) eine elektronische Benachrichtigung. Die Benachrichtigung wird so lange fortgesetzt, wie die Schwellentemperatur überschritten wird [13, 14].

Im Projekt „Planerische Strategien und städtebauliche Konzepte zur Reduzierung der Auswirkungen von klimatischen Extremen auf Wohlbefinden und Gesundheit von Menschen in Städten“ (KLIMES) wurden anhand experimenteller Untersuchungen, Befragungen und Simulationsberechnungen zum thermischen Komfort von Menschen praxistaugliche Entwurfsbausteine für einen klimawandelgerechten Städtebau abgeleitet und in einem Leitfaden zusammengefasst. Ziel ist die klimawandelbedingt erhöhten thermischen Belastungen in städtischen Frei- und Innenräumen auf ein gesundheitlich weniger bedenkliches Maß zu reduzieren.

Um gesundheitliche Belastungen durch städtische Wärmeinseln zu begrenzen, sind auch Strategien der Stadtplanung gefordert. Sinnvoll sind Wärmeinseleffekt-minimierende urbane Räume [15]. Siehe hierzu auch Kapitel 4.10 „Raumplanung und Städtebau“.

Zunehmende Bedeutung bei großer Hitze erlangen auch stadtnahe, große zusammenhängende Waldflächen, da diese sich sowohl auf das Lokalklima innerhalb der Stadt kühlend auswirken als auch einen alternativen Aufenthaltsbereich für die Stadtbevölkerung darstellen können, insbesondere für die Bewohner von stark hitzebelasteten unsanierten Gebäuden.

#### 4.8.1.2 Haut- und Augenerkrankungen

##### Expositionsveränderung

Die bodennahe UV-Bestrahlungsstärke und ihre spektrale Verteilung sind unter anderem abhängig von der Ozonkonzentration in der Stratosphäre und in der Troposphäre, sowie von in der Luft schwebenden flüssigen und festen Partikeln (Aerosole), das heißt die UV-Strahlung wird durch Ozon, Wolken und Aerosole absorbiert und gestreut [11]. Die Auswirkungen der Veränderung einzelner dieser Komponenten, lassen sich nur sehr schwer bestimmen. Der Deutsche Wetterdienst hat dokumentiert, dass die UV-Strahlung zwischen 1970 und 2000 zugenommen hat. Das gilt in der Konsequenz insbesondere für UV-induzierte Hautkrebskrankungen, die zudem erst nach einer langen Latenzzeit auftreten.

Seit mehr als 17 Jahren wird die bodennahe solare UV-Strahlung durch ein bundesweites Messnetz erfasst, zu dem auch Neuherberg gehört. In Süddeutschland ist die UV-Exposition geografisch bedingt ca. 17 % höher als im Norden. Insgesamt wurde kein Trend zu höheren oder niedrigeren Expositionen festgestellt.

##### Gesundheitliche Relevanz

Natürliche wie künstliche UV-Strahlung kann akute und chronische gesundheitliche Folgen haben.

Akute Schädigungen zeigen sich unter anderem an den Augen in Form von Bindehaut- und Hornhautentzündungen. Bei der Haut sind dies Sonnenbrand, sogenannte „Sonnenallergien“ (Polymorphe Lichtdermatose), phototoxische und photosensibilisierende Reaktionen.

Hinsichtlich chronischer Schädigungen des Auges ist übermäßige UV-Bestrahlung einer der auslösenden Faktoren für den „Grauen Star“ (Katarakt). UV-Strahlung wird auch mit Netzhautveränderungen und der Makuladegeneration (Erkrankung der Netzhaut) in Zusammenhang gebracht. Übermäßig der

UV-Strahlung ausgesetzte Haut kann langfristig zu vorzeitiger Hautalterung und Hautkrebs (weißer und schwarzer) führen. Hautkrebskrankungen können, besonders wenn sie metastasieren (wie das maligne Melanom und sehr selten auch der weiße Hautkrebs), zum Tode führen. Als Risikofaktor für den weißen Hautkrebs gilt die Höhe der im Leben kumulierten Sonnenexposition eines Menschen (UV-Lebenszeitkonto), der Hauttyp sowie für den schwarzen Hautkrebs wiederholte Sonnenbrände in jedem Alter [16]. In Bayern nahm in den letzten Jahrzehnten die Anzahl der Neuerkrankungen an Hautkrebs stetig zu. Neben einem veränderten Meldeverhalten (kostenloses Hautkrebscreening) wird als Hauptursache der seit den 1970er-Jahren steigenden Hautkrebsneuerkrankungen auch das veränderte Freizeitverhalten mit erhöhter UV Exposition großer Teile der Bevölkerung diskutiert.

##### Anpassungsmaßnahmen

- Durchführung von Hautkrebspräventionsmaßnahmen gemäß S3 Leitlinie Prävention Hautkrebs [5]
- Zielgruppenspezifische thematische Aufklärung über die möglichen Folgen des Sonnenbadens und der Nutzung von Solarien (z. B. Initiative „Sonne mit Verstand“<sup>1)</sup>)
- Aufklärung über Funktion und Nutzen des UV-Index (z. B. Sonnen-Konto App<sup>2)</sup>)
- Abgleich der Daten des UV-Monitorings mit Registern UV-bedingter Krankheitsbilder
- Verbesserung von Gesundheitsförderung in Kindergärten und Schulen

1 <http://www.sonne-mit-verstand.de/>

2 <http://www.lass-dich-nicht-rösten.de/was-koennen-sie-tun/sonnenkonto-app.html>

### 4.8.1.3 Allergien

#### Expositionsveränderung

Daten des Deutschen Wetterdienstes führen Änderungen der Pollenbelastung unter anderem auf den Klimawandel zurück. So zeigten experimentelle und in-situ-Studien [4, 15, 16] einen Einfluss von Lufttemperatur und atmosphärischer CO<sub>2</sub>-Konzentration auf die Pollen, beziehungsweise auf die Biomasseproduktion von Pflanzen mit hohem allergenen Potential.

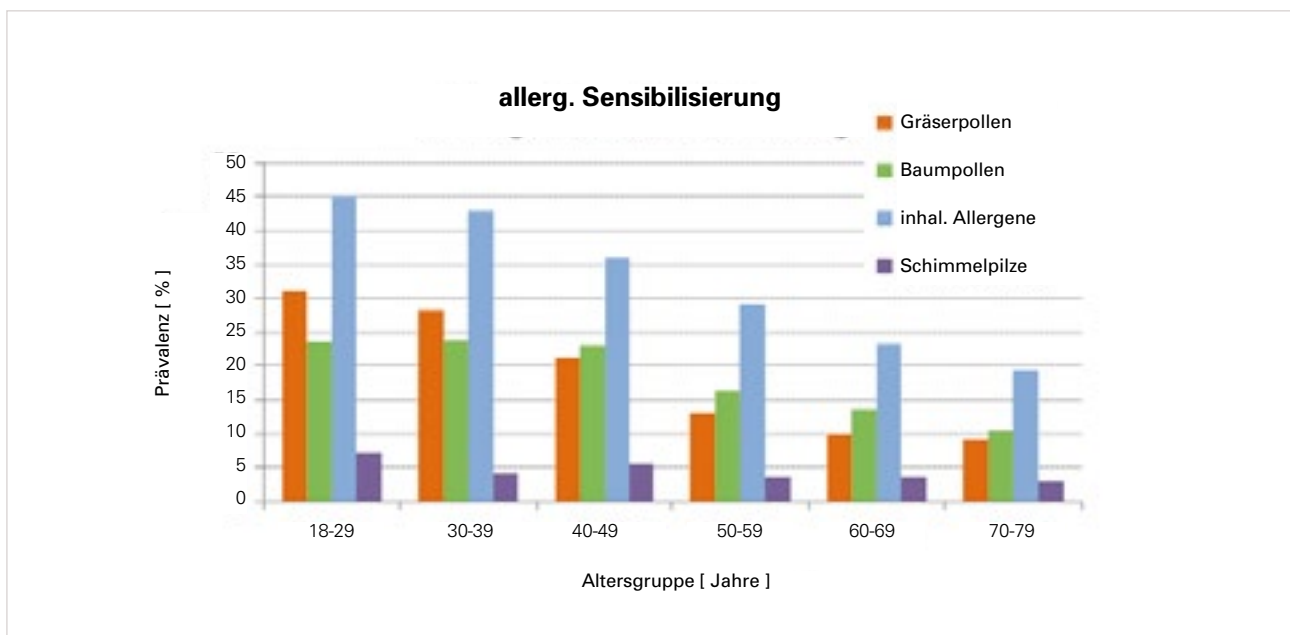
Im Zuge der bereits einsetzenden Klimaveränderung hat sich die Flugzeit von Gräser- und Baumpollen in den letzten Jahrzehnten verlängert [17, 18]. Es zeigt sich bereits, dass der Blühbeginn von Hasel und Erle im Mittel beispielsweise um etwa 10 Tage früher einsetzt. In Süddeutschland setzt der Pollenflug von Gräsern gegenüber 1988 um 20 Tage früher ein und dauert 24 Tage länger an, gleichzeitig hat sich die jährliche Pollenmenge mehr als verdoppelt. Der Birkenpollenflug setzt verglichen mit 1988 heute zwar 10 Tage später ein, die Gesamt-Pollenmenge ist jedoch – genau wie bei Hasel- und Erlenpollen – angestiegen [19].

#### Gesundheitliche Relevanz

Die wahrscheinlich durch den Klimawandel bedingte längere Expositionsdauer könnte für Personen mit allergischem Asthma und Heuschnupfen zu einer längeren Beschwerdezeit führen. Die Studie zur Gesundheit Erwachsener in Deutschland (DEGS1) konnte bereits neben diesen oben beschriebenen veränderten Expositionsbedingungen zeigen, dass im Vergleich zum Bundes-Gesundheitssurvey 1998 (BGS98) die Krankheitshäufigkeit (Prävalenz) einer Sensibilisierung gegen Inhalationsallergene signifikant um fast 4 Prozentpunkte zunahm, von 29,8 % (95 %-Konfidenzintervall: 28,2-31,5 %) auf 33,6 % (32,1-35,0 %) [6]. Gegen Gräser- und Baumpollen sind in Deutschland jeweils fast ein Fünftel der Frauen und Männer sensibilisiert, gegen Kräuterpollen 11,2 % [20].

Abbildung 4.8\_2 zeigt, nach Altersgruppen, die Sensibilisierungsprävalenzen für Gräserpollen, Baumpollen, Inhalationsallergene und Schimmelpilze [20].

Abbildung 4.8\_2: Altersgruppenbezogene Sensibilisierungsprävalenzen für Gräserpollen, Baumpollen, Inhalationsallergene und Schimmelpilze [20]





Die Asthmaprävalenz bei Erwachsenen in Deutschland ist in den vergangenen 10 Jahren von 5,7 % auf 8,6 % signifikant gestiegen [21]. Als möglicher Kofaktor für die Entstehung vor allem von pollenassoziierten allergischen Atemwegserkrankungen (z. B. Asthma bronchiale) und Heuschnupfen wird neben zahlreichen Umweltfaktoren in diesem Zusammenhang auch der Klimawandel diskutiert [22, 23, 24].

Auch bei Kindern und Jugendlichen ist bundesweit mit zunehmendem Alter ein kontinuierlicher Anstieg der 12-Monats-Prävalenzen von Heuschnupfen und Asthma zu beobachten. Während der Basiserhebung des Kinder- und Jugendgesundheits surveys (KiGGS 2003–2006) litten 4,1 % der Kinder im Alter von 3–6 Jahren unter Heuschnupfen und 2,3 % unter Asthma. Sechs Jahre danach belief sich der Prozentsatz auf 5,7 % bei Heuschnupfen und 5,1 % bei Asthma. Die Lebenszeitprävalenz von Heuschnupfen bei Kindern und Jugendlichen wurden mit 12,6 % angegeben [21].

Bisher ist noch nicht geklärt, ob tatsächlich eine Verbindung zwischen der veränderten Pollenbelastung und der gestiegenen Prävalenz an Sensibilisierungen und Allergien besteht. Des Weiteren gibt es aktuell nur unzureichende Erkenntnisse, ob es eher zu einer Zunahme der Sensibilisierungen bei herkömmlichen Allergenen kommt oder ob eher neuere Allergene eine Rolle spielen [24].

### Anpassungsmaßnahmen

Umsetzbare oder bereits ergriffene praktische Maßnahmen zur Prävention beziehungsweise Anpassung speziell an klimawandelbedingte Veränderungen der Exposition gegenüber pollenassoziierte Allergenen sind beispielsweise:

- Überwachung und Bekämpfung der Einschleppung oder Ausbreitung von allergieauslösenden Pflanzen; für Bayern sei hier das Aktionsprogramm „Ambrosiabekämpfung in Bayern“ des

Staatsministeriums für Gesundheit und Pflege<sup>1</sup> genannt.

- Berücksichtigung des Wissens um Pflanzen mit allergischem Potential bei der Bepflanzung öffentlicher Räume [23].
- Monitoring der atmosphärischen Pollenkonzentrationen und Aufbau eines regionalen Informationsportals zu Prognosen der zu erwartenden Pollenbelastung [22]. In Deutschland übernimmt dies die Stiftung Deutscher Polleninformationsdienst (PID) in Zusammenarbeit mit dem Deutschen Wetterdienst.
- Zugang zu qualifizierter medizinischer Versorgung.

#### 4.8.1.4 Infektionskrankheiten

##### Expositionsveränderung

Zwar sind die ursächlichen Zusammenhänge zwischen der regionalen Verbreitung von übertragbaren Krankheiten und dem Klimawandel noch nicht völlig geklärt, doch mit ansteigender Temperatur könnten sich für einige dieser Überträgersysteme die Ausbreitungs- und Übertragungsbedingungen verbessern, so dass von einer ansteigenden Infektionsgefährdung ausgegangen werden kann [25]. In Bayern vorkommende Krankheitsüberträger sind unter anderem Stechmücken, Zecken, Flöhe und Wanzen. Über diese kann die Übertragung von verschiedenen Krankheitserregern wie Viren und anderen Mikroorganismen (z. B. Borrelien, Leishmanien) von Mensch zu Mensch oder von Tier zu Mensch erfolgen. Dieses komplexe System aus Krankheitserregern, tierischen Überträgern und Wirten kann auf vielfältige Weise durch Klimaänderungen beeinflusst werden [2, 25]. Auch nicht-einheimische Arten können sich daher durch höhere Temperaturen verstärkt ausbreiten oder neu zuwandern, so dass der Klimawandel eine Ausweitung betroffener Gebiete in bisher nicht betroffene Regionen mit sich bringen kann [1, 26].

<sup>1</sup> [http://www.stmgp.bayern.de/aufklaerung\\_vorbeugung/ambrosia/index.htm](http://www.stmgp.bayern.de/aufklaerung_vorbeugung/ambrosia/index.htm)

Mögliche Effekte der Klimaänderung sind dem Umweltbundesamt zum Beispiel zu Folge [2]:

- Zunehmende Vermehrung von Krankheitsüberträgern durch kürzere Generationsdauer
- Verlängerung der jährlichen Aktivitätsperiode
- Höhere Überlebensraten durch mildere Winter
- Zunehmende Verbreitung einheimischer Überträger und Krankheitserreger
- Etablierung und Verbreitung eingeschleppter neuer Überträgerarten und Krankheitserreger durch veränderte Klimabedingungen [27]

Regional können allerdings auch Dezimierungen von Krankheitserregern oder Überträgern auftreten, zum Beispiel bei Stechmücken durch Austrocknung ihrer Brutbiotope. Überschwemmungen oder Starkregenfälle können jedoch – wenn sie nicht im Winter oder zeitigen Frühjahr auftreten – ideale Bedingungen für Massenvermehrungen von Stechmücken bieten [2].

Für Tigermücken werden sich bis Mitte des Jahrhunderts auch größere Bereiche Deutschlands zu potenziellen Lebensräumen entwickeln [28]. Für Sandmücken (Überträger von Leishmanien) mit Verbreitungsschwerpunkt Südwestdeutschland könnten die klimatischen Anforderungen innerhalb der nächsten Dekade im Westen Bayerns und im Alpenvorland erfüllt sein. Die Temperaturansprüche für eine Etablierung und dauerhaften Ansiedlung der Sandmücken werden voraussichtlich erst in der zweiten Jahrhunderthälfte in Unterfranken und im Alpenvorland erfüllt sein [29].

#### Gesundheitliche Relevanz

In Deutschland werden seit geraumer Zeit von Insekten übertragene Infektionskrankheiten beobachtet, beispielsweise zwischen 600 und 1000 importierte Malariafälle pro Jahr. Zunehmend sind auch importierte Infektionen durch Dengueviren aufgetreten. Diese Viruserkrankung ruft grippeähnliche Symptome hervor, die teilweise mit Blutungen einhergehen.

Ein weiterer importierter Infektionserreger ist das Chikungunya-Virus, eine mit Fieber und Gelenksbeschwerden einhergehende tropische Infektionskrankheit. Sie ist zumeist im östlichen und südlichen Afrika sowie auf dem indischen Subkontinent, in Südostasien wie auch seit einigen Jahren auf den Inseln im Indischen Ozean relativ weit verbreitet. In Europa wurden im Jahr 2014 475 Infektionen in Frankreich registriert; in 4 Fällen wurde der Erreger lokal in Montpellier, Südfrankreich, übertragen. 2007 wurde in Italien ein lokaler Ausbruch mit 200 Fällen registriert [30].

Da in den Nachbarländern Frankreich, Österreich und Tschechien bereits auch das West-Nil-Virus zirkuliert, muss in absehbarer Zeit auch in Deutschland mit dem Auftreten dieses Erregers gerechnet werden [31].

#### Anpassungsmaßnahmen

Das Wissen über die gesundheitlichen Folgen veränderter Umweltbedingungen und Veränderungen im Ökosystem im Zuge des Klimawandels ist trotz aktueller Forschungsanstrengungen derzeit noch sehr lückenhaft und beruht weitestgehend auf Expertenannahmen. Für übertragbare Krankheiten stehen Anpassungs- und Vorsorgemöglichkeiten nur sehr eingeschränkt zur Verfügung. Zum einen existieren nur in wenigen Fällen Impfmöglichkeiten. Auch Therapien sind meist langwierig und nicht immer erfolgversprechend, wie bei der Leishmaniose [2, 25]. Zudem stehen Bekämpfungsmaßnahmen gegen die tierischen Vektoren oder Reservoirtiere oft in Widerspruch zu Umwelt- und Naturschutzinteressen. Darüber hinaus fehlen für Aufklärungs- und Vorsorgemaßnahmen präzise regionale Daten und Risikobewertungen sowie Informationen und wissenschaftliche Studien über den Zusammenhang mit dem Klimawandel.

Zwar gibt es gemäß Infektionsschutzgesetz seitens des Robert-Koch-Institutes nationale Überwachungsprogramme für übertragbare Krankheiten, Überwachungsprogramme für Überträger wie

Mücken oder Zecken fehlen jedoch in Deutschland bislang. Nur durch systematische Beobachtung des Vorkommens und der Verbreitung von etablierten und potenziellen Krankheitsüberträgern können Risikoanalysen erstellt sowie Gegenmaßnahmen frühzeitig konzipiert und im Einklang von Infektionsschutz und nachhaltigem Umweltschutz umgesetzt werden. Der bayerische Forschungsverbund VICCI analysierte erstmals die komplexe Wechselwirkung zwischen der Verbreitung von Zoonoseerregern,

deren Überträgern und aktuellen Klimadaten, um so das Risiko für ein mögliches Auftreten der entsprechenden Erkrankungen in verschiedenen Gebieten Bayerns abschätzen zu können [29]. Expertenbefragungen [32] haben ergeben, dass die Auswirkungen des Klimawandels kaum in die bisherige Maßnahmenplanung des Gesundheitswesens zur Reduzierung der Gefahren durch vektorübertragene Krankheiten einbezogen worden sind.



## Literatur

- [1] E. E. A. (2008): Impacts of Europe's changing climate - 2008 indicator-based assessment. EEA - JRC - WHO, Copenhagen
- [2] UBA – Umweltbundesamt [Hrsg.] (2009): Gesundheitliche Anpassung an den Klimawandel. Hintergrundpapier des UBA, Pressestelle
- [3] Kropp, J.; Holsten, A.; Lissner, T.; Roithmeier, O.; Hattermann, F.; Huang, S.; Rock, J.; Wechsung, F.; Lüttger, A.; Pompe, S.; Kühn, I.; Costa, L.; Steinhäuser, M.; Walther, C.; Klaus, M.; Ritchie, S.; Metzger, M. (2009): Klimawandel in Nordrhein-Westfalen - Regionale Abschätzung der Anfälligkeit ausgewählter Sektoren. Abschlussbericht des Potsdam-Instituts für Klimafolgenforschung (PIK) für das Ministerium für Umwelt und Naturschutz, Landwirtschaft und Verbraucherschutz Nordrhein-Westfalen (MUNLV)
- [4] Wayne, P. F. S.; Connolly, J. et al. (2002): Production of allergenic pollen by ragweed (*Ambrosia artemisiifolia* L.) is increased in CO<sub>2</sub>-enriched atmosphere. *Ann Allergy Asthma Immunol* 88 (3)
- [5] Leitlinienprogramm Onkologie (Deutsche Krebsgesellschaft, D. K., AWMF) (2014): S3-Leitlinie Prävention von Hautkrebs. Langversion 1.0, 2014, AWMF Registernummer: 032/052OL
- [6] Haftenberger, M.; Laussmann, D. et al. (2013): Prevalence of sensitisation to aeroallergens and food allergens: results of the German Health Interview and Examination Survey for Adults (DEGS1). *Bundesgesundheitsblatt Gesundheitsforschung Gesundheitsschutz* 56(5-6)
- [7] Schönwiese, C.-D. (2003): Statistisch-klimatologische Analyse des Hitzesommers 2003 in Deutschland. DWD Klimastatusbericht 2003
- [8] Schaer, C.; Vidale, P.; Luthi, D.; Frei, C.; Haberli, C.; Liniger, M.; Appenzeller, C. (2004): The role of increasing temperature variability in European summer heatwaves. *Nature* 427
- [9] Schönwiese, C.-D. (2008): Klima-Trendatlas Europa 1901–2000. Berichte des Instituts für Atmosphäre und Umwelt der Universität Frankfurt/Main 7(82)
- [10] Zacharias, S. K., C.; Mücke, H.-G. (2015): Climate Change Effects on Heat Waves and Future Heat Wave-Associated IHD Mortality in Germany. *Climate* 3(1)
- [11] Feister, U. (2008): Klimawandel und strahlungsbedingte (aktinische) Wirkungen. In: Lozán, J.L.; Graßl, H.; et. al.: Warnsignal Klima: Gesundheitsrisiken. Gefahren für Pflanzen, Tiere und Menschen. Hamburg
- [12] Breitner, S. W.; Peters, K.; Schneider, A. (2014): Short-term effects of air temperature on cause-specific cardiovascular mortality in Bavaria. *Heart* 0
- [13] Becker, P. (2005): Das Hitzewarnsystem des Deutschen Wetterdienstes: Notfallvorsorge. *Zeitschrift für Katastrophenmanagement und Humanitäre Hilfe*: 22-23
- [14] Niedersächsisches Ministerium für Umwelt und Klimaschutz (2009): Der Klimawandel als Herausforderung für Staat und Gesellschaft - Struktur für eine Anpassungsstrategie
- [15] Singer BD, Z. L.; Frenz, D.A. et al. (2005): Increasing Amb a 1 content in common ragweed (*Ambrosia artemisiifolia*) pollen as a function of rising atmospheric CO<sub>2</sub> concentration. *Functional Plant Biology* 32 (7)
- [16] Ziska LH, E. P.; Schlesinger, W.H. (2009): Rising CO<sub>2</sub>, climate change, and public health: Exploring the links to plant biology. *Environmental Health Perspectives* 117(2)
- [17] D'Amato, G. C. L.; Bonini, S. et al (2007): Allergenic pollen and pollen allergy in Europe. *Allergy* 0 62
- [18] Eis, D.; Laußmann, D.; Stark, K. (2010): Klimawandel und Gesundheit Berlin. Sachstandsbericht, Robert Koch-Institut
- [19] Kaminski, U. (Zugriff: 05.03.2015): Klimawandel und Gesundheit - Einfluss und Auswirkungen des Klimawandels auf die Pollenbelastung
- [20] Haftenberger, M, L. m. D.; Ellert, U.; Kalcklösch, M.; Langen, U.; Schlaud, M.; Schmitz, R.; Thamm, M. (2013): Prävalenz von Sensibilisierungen gegen Inhalations- und Nahrungsmittelallergene – Ergebnisse der Studie zur Gesundheit Erwachsener in Deutschland (DEGS1). *Bundesgesundheitsblatt* 56(5/6)
- [21] Lange, M.; Jentsch, F. et al. (2014): Die erste KiGGS-Folgebefragung (KiGGS Welle 1). Studiendurchführung, Stichprobendesign und Response. 2014. Bundesgesundheitsbl – Gesundheitsforsch – Gesundheitsschutz 57(7)
- [22] Beggs, P. J. (2010): Adaptation to impacts of climate change on aeroallergens and allergic respiratory diseases. *Int J Environ Res Public Health* 7(8)
- [23] Bergmann, K.C.; Augustin, J. et al. (2011): Klimawandel und Pollenallergie: Städte und Kommunen sollten bei der Bepflanzung des öffentlichen Raums Rücksicht auf Pollenallergiker nehmen. *Allergo Journal* 21(2)
- [24] Gassner, M.; Schmid-Grendelmeier, P. (2013): Hay fever as a Christmas gift. *N Engl J Med*. 368
- [25] Umweltbundesamt, U. (2003): Mögliche Auswirkungen von Klimaänderungen auf die Ausbreitung von primär humanmedizinisch relevanten Krankheitserregern über tierische Vektoren sowie auf die wichtigsten Humanparasiten in Deutschland UBA Bericht FKZ 200 61 218/11, Berlin
- [26] Rammert, U. (2004): Monitoring von Klimaveränderungen mit Hilfe von Bioindikatoren (Klima-Biomonitoring). Jahresbericht Landesamt für Natur und Umwelt des Landes Schleswig-Holstein 7-22
- [27] Knobloch, J. (2008): Globale Zunahme von Tropenkrankheiten. In: Lozán et al. (Hrsg.): Warnsignale Klima: Gesundheitsrisiken - Gefahren für Pflanzen, Tiere und Menschen. Hamburg, GEO Wissenschaftliche Auswertungen
- [28] Fischer, D. T., M. S.; Niemitz, F.; Reineking, B.; Beierkuhnlein, C. (2011). Projection of climatic suitability for *Aedes albopictus* Skuse (Culicidae) in Europe under climate change conditions. *Global and Planetary Change*
- [29] von Silaghi, C. B. C.; Baum, U.; Beierkuhnlein, C.; Bleichert, P.; Bogdan, C.; Bozem, P.; Brenauer, J.; Fingerle, V.; Fischer, D.; Häberlein, S.; Hautmann, W.; Klier, C.; Klinc, C.; Liebl, B.; Lüpke, M.; Müller, J.; Osterberg, A.; Pfister, K.; Poljak, S.; Praßler, T.; Rinder, H.; Schex, S.; Sing, A.; Teußer, L.; Thoma, B.; Thomas, S.; Wildner, M.; Essbauer, S. (2012): Durch Vektoren übertragene Zoonoseerreger in Zeiten des Klimawandels. *Deutsches Tierärzteblatt* 3/2012 3
- [30] SANITAIRE, I. D. V. (2009): Dengue - Chikungunya Océan Indien. Département International et Tropical
- [31] Becker, N. K., A.; Kuhn, C.; Plenge-Bönig, A.; Thomas, S. M.; Schmidt-Chanasit, J.; Tannich, E. (2014): Stechmücken als Überträger exotischer Krankheitserreger in Deutschland. *Bundesgesundheitsbl* 2014 57
- [32] Zebisch, M.; Grothmann, T.; Schröter, D.; Haße, C.; Fritsch, U.; Cramer, W. (2005): Klimawandel in Deutschland - Vulnerabilität und Anpassungsstrategien klimasensitiver Systeme. Umweltbundesamt Climate Change - Reihe 08/05 (UFOPLAN 201 41 253). Dessau 2005.

## EXKURS FORSCHUNG

Carl Beierkuhnlein, Anja Jaeschke, Nils Tjaden & Stephanie Thomas; Lehrstuhl für Biogeographie, BayCEER, Universität Bayreuth

## Neue Risiken durch die Kombination von globaler Vernetzung und Klimawandel: Invasive Insektenarten als Überträger bislang exotischer Krankheiten

Der wachsende Handel von Gütern und der Reiseverkehr über kontinentale Barrieren hinweg erzeugt neuartige Risiken durch die Einschleppung problematischer invasiver Arten die als Überträger von Krankheiten wirken können. Der Klimawandel bewirkt, dass, zumindest phasenweise im Jahr und zunächst auf bestimmte Regionen Bayerns begrenzt, auch Personen in Bayern infiziert werden könnten, da sich räumliche und zeitliche Fenster für die Übertragung der Krankheiten dort öffnen, wo die zur Übertragung befähigten Insekten auftreten können.

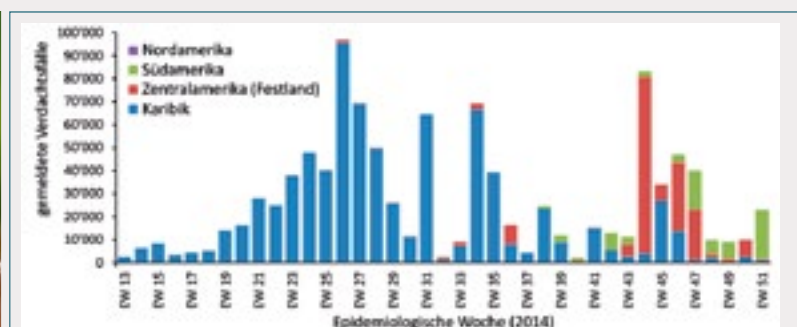
Verschiedene Stechmücken der Gattung *Aedes* sind in der Lage virale Krankheiten wie Dengue, Chikungunya oder West-Nil-Fieber zu übertragen. Zwei Vertreter dieser Gattung haben sich in der jüngsten Vergangenheit in Deutschland mit einem Schwerpunkt in Süddeutschland etabliert. Es besteht das Risiko, dass diese Arten auch bald in Bayern auftreten werden. In den Projekten am Lehrstuhl für Biogeographie der Universität Bayreuth wird durch Computersimulationen und mit Hilfe von Laborversuchen ermittelt, welche klimatischen Bedingungen erfüllt sein müssen um eine Gefährdungssituation auszulösen. Aber auch, unter welchen Bedingungen noch keine Risiken auftreten. Ziel ist es die Öffentlichkeit und die Vertreter des Gesundheitswesens frühzeitig zu sensibilisieren, um präventive Maßnahmen ergreifen zu können und mögliche negative Entwicklungen einzugrenzen.

[1] Fischer, D. et al. (2013): Climate change effects on Chikungunya transmission in Europe: Geospatial analysis of vector's climatic suitability and virus' temperature requirements. *International Journal Health Geography* 12

[2] Thomas, S. M. et al. (2011): Tigermücke und Dengue-Fieber – eine zukünftige Gefährdung für Europa? Klimawandel, Parasiten und Infektionskrankheiten eine globale Herausforderung, nefo Workshop: Klimawandel, Parasiten und Infektionskrankheiten eine globale Herausforderung

Abbildung links: Die Tigermücke überträgt verschiedene Krankheiten, die als künftige Gesundheitsrisiken anzusehen sind (Foto James Gathany, CDC).

Abbildung rechts: Chikungunya war bis 2013 in Mittelamerika und der Karibik unbekannt. Hier sieht man wöchentliche Meldungen. Innerhalb eines Jahres wurden mehr als eine Million Verdachtsfälle diagnostiziert. In Europa ist die Übertragung bereits möglich.



## EXKURS FORSCHUNG

Prof. Dr. Bernadette Eberlein et al.; Technische Universität München (Dermatologie und Allergologie); Projekt: „Einflüsse des Hochgebirgsklimas auf Allergien und Umweltkrankheiten an der Umweltforschungsstation Schneefernerhaus“

## Einfluss des Hochgebirgsklimas auf allergische Atemwegserkrankungen und Neurodermitis

Allergien stellen eine der großen gesundheitlichen Herausforderungen der meisten modernen Gesellschaften dar. Durch den drohenden Klimawandel sind weitere Verstärkungen der Allergieproblematik zu befürchten. Im oben genannten Forschungsprojekt wurden an ausgewählten Patienten und freiwilligen Versuchspersonen die Einflüsse des Hochgebirgsklimas in einer Höhe von 2650 m auf gezielte Parameter der allergischen Reaktivität und sowie phänotypische Merkmale atopischer Erkrankungen unter standardisierten Bedingungen untersucht. Diese Untersuchungen erfassten in vivo und in vitro Parameter. Hier waren insbesondere Untersuchungen zur Hautfunktion und Hautbeschaffenheit im Hinblick auf Neurodermitis sowie auf allergische Atemwegserkrankungen zu nennen.

Die Untersuchungen an 18 Patienten und 11 gesunden Kontrollpersonen wurden im identischen Ansatz sowohl im Flachland (München) als auch im Hochgebirgsklima (Zugspitze - Schneefernerhaus) im Frühjahr und im Sommer während der Pollensaison durchgeführt. Dabei verbrachten Gruppen bis zu maximal 10 Probanden mit 3 bis 4

Betreuern 5 Tage auf der Umweltforschungsstation. Es wurden verschiedene Verfahren von Hauttestungen eingesetzt. Ferner wurde die Reaktion von Schleimhäuten auf Allergene in Provokationstests evaluiert. Eine wesentliche Bedeutung kam der Untersuchung von hautphysiologischen Parametern zu (Abbildung 1). Darüber hinaus wurden Lungenfunktionsparameter und Entzündungsparameter in der Ausatemungsluft gemessen. Als Hauptsymptom dermatologischer Erkrankungen wurde die Juckreizintensität unter verschiedenen Bedingungen erfasst. Parallel dazu wurden im Serum allergie-relevante Marker der Immunreaktion bestimmt. Zudem wurden den Probanden verschiedene Fragebögen (allgemeiner Gesundheitszustand, nasale Symptomatik, Juckreizfragebogen, Lebensqualität bei Hauterkrankungen) vorgelegt.

Abbildung 1: Messung verschiedener hautphysiologischer Parameter (Hautfeuchtigkeit, Sebum, pH, TEWL, Hautrauheit)

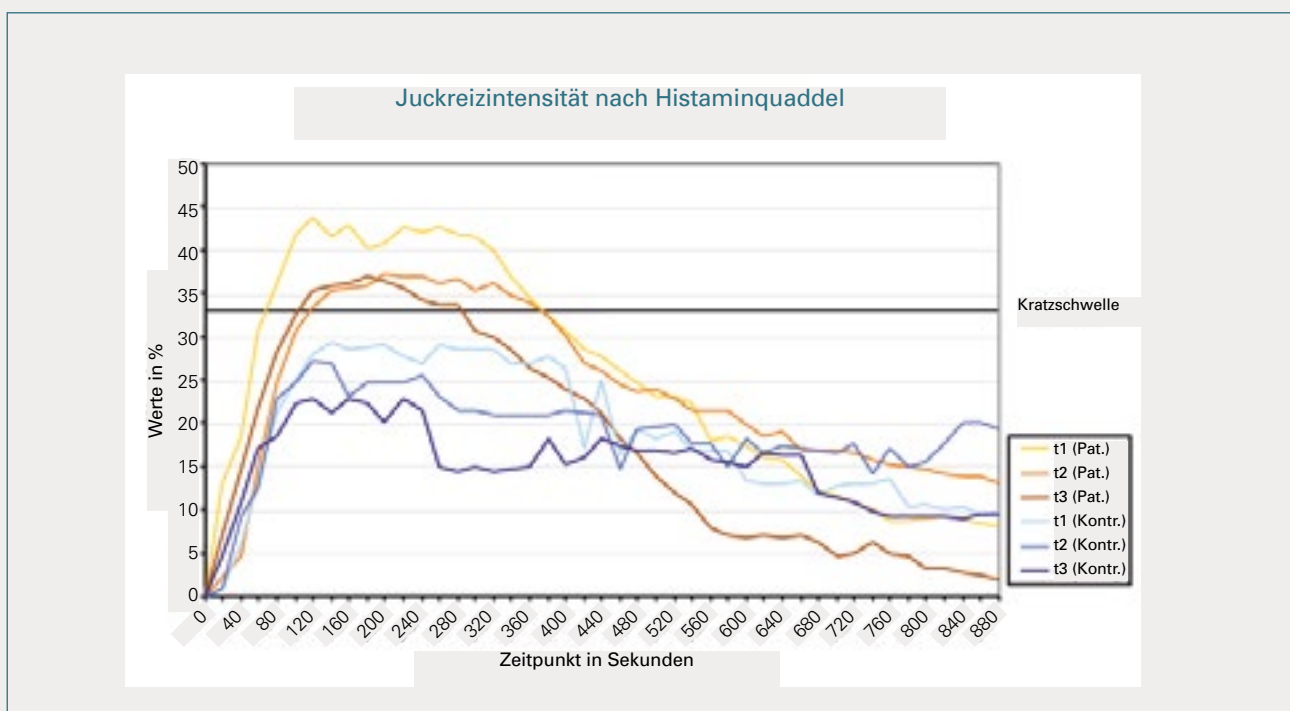


Folgende Veränderungen bei den Hautfunktionsparametern traten auf: Abnahme der Hautfeuchtigkeit, Anstieg des pH-Wertes, Anstieg der Schuppigkeit und Anstieg der Hautrauheit. Der Fettgehalt der Haut, der transepidermale Wasserverlust als Marker der Hautbarrierefunktion, der dermale Blutfluss als Marker für Entzündung, die Quaddel- und Erythemgröße bei der Prick-Testung sowie der Schweregrad des atopischen Ekzems änderten sich nicht signifikant. Bei der Untersuchung der Lungenfunktionsparameter zeigte sich eine Verbesserung in der Höhe. Die exhalativen Stickoxid (NO) - Werte als Parameter für eine Entzündung in den Atemwegen, die Peak-Flow-Messwerte, die Widerstandsmesswerte des nasalen Flusses (Rhinomanometrie) sowie die Reaktion der Augenbindehaut änderten sich nicht signifikant. In der Juckreizintensitätsmessung nach Stimulation mit Histamin zeigte sich eine signifikante Abnahme des Juckreizempfindens in der Höhe bei Patienten (Abbildung 2). Bei der Auswertung der Fragebögen fanden sich außer einer Besserung des Scores für nasale Symptome in der

Höhe keine signifikanten Unterschiede. Bei den Serumparametern zeigte sich eine signifikante Verringerung des eosinophilen kationischen Proteins sowie von Interleukin-33 in der Höhe, welche beide Marker für Entzündungen bei atopischen Erkrankungen sind.

Die Ergebnisse deuten darauf hin, dass ein 5-tägiger Aufenthalt im Hochgebirgsklima auf einer Höhe von 2650 m unterschiedliche Effekte auf atopische Erkrankung hat. Es besserten sich vor allem Asthmaparameter und der Hautjuckreiz. Weiterhin fielen allergologisch relevante Entzündungsparameter im Blut ab. Mehrwöchige Aufenthalte in der Höhe wären sinnvoll, um herauszufinden, ob sich auch die hautphysiologischen, konjunktivalen, und nasalen Parameter verbessern würden.

Abbildung 2: Juckreizintensität nach Histaminquaddel von Patienten und Kontrollen zu verschiedenen Zeitpunkten (t1 München, t2 und t3 UFS)



---

## EXKURS FORSCHUNG

---

Dipl. Phys. V. Mares, Prof. Dr. Werner Rühm et al.; Helmholtz Zentrum München (Institut für Strahlenschutz)

---

# Auswirkungen des Klimawandels auf die kosmische Strahlung

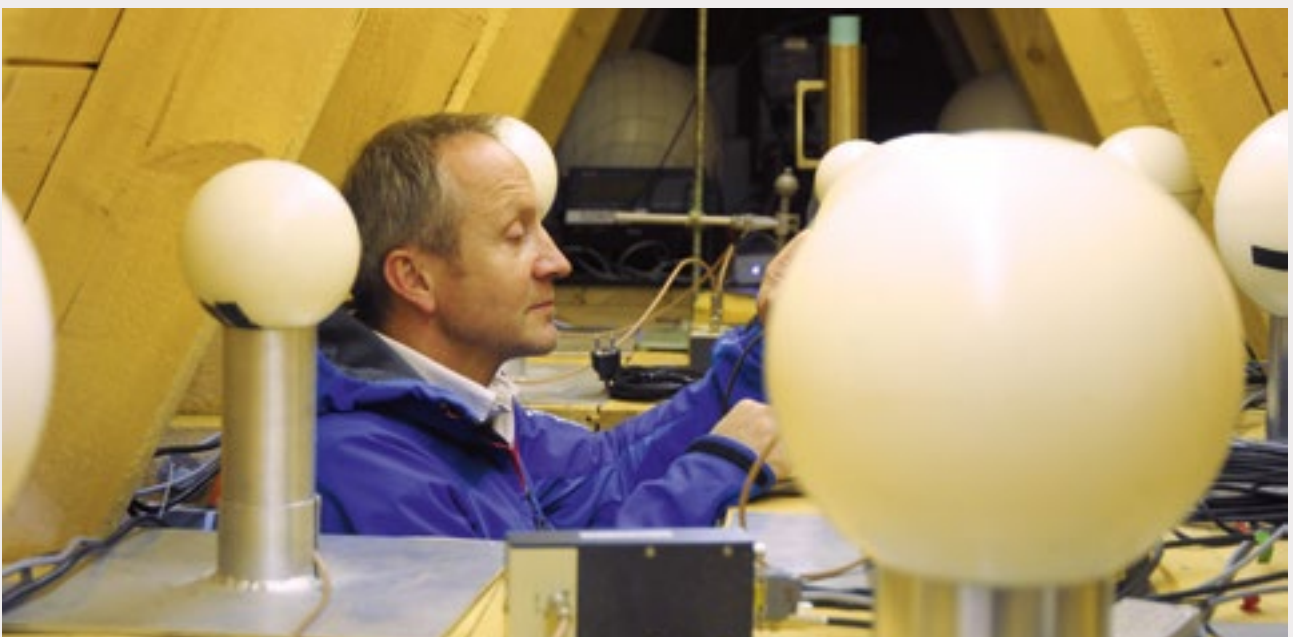
Kosmische Strahlung aus dem Weltall erzeugt in der Erdatmosphäre ein komplexes Feld an Sekundärteilchen, wie zum Beispiel Neutronen, das zur Strahlenexposition des Menschen beiträgt. In alpinen Höhen, wie etwa auf der Zugspitze, ist die Dosis durch kosmische Strahlung dabei etwa Faktor 10 höher als auf Meeresebene. Da die Neutronen zur Exposition des Menschen durch kosmische Strahlung den größten Anteil beitragen, betreibt das Institut für Strahlenschutz des Helmholtz Zentrums München auf der Umweltforschungsstation Schneefernerhaus (UFS) ein Bonner Vielkugelspektrometer,

mit dem die Energieverteilung dieser Neutronen kontinuierlich gemessen wird (Abbildung 1).

Die in den letzten Jahren durchgeführten Messungen haben gezeigt, dass Umweltparameter, wie zum Beispiel Luftdruck und Feuchtigkeit in der Umgebung (im Boden oder in der Luft) sowie die Schneebedeckung, die Energieverteilung der am Boden gemessenen sekundären Neutronen der kosmischen Strahlung zum Teil beträchtlich verändern können. Daher ist zu erwarten, dass der Klimawandel, der unter anderem zu einer Veränderung von Umgebungsfeuchtigkeit und Schneemenge, insbesondere im alpinen Umfeld führen wird, ebenfalls die Energieverteilung der sekundären Neutronen der kosmischen Strahlung und damit auch die Strahlenexposition des Menschen beeinflussen wird. Die auf der UFS mit dem Vielkugelspektrometer durchgeführten Langzeitmessungen bieten eine einzigartige Möglichkeit, derartige Effekte zu untersuchen.

---

Abbildung 1: Der UFS-Geschäftsführer besichtigt das Bonner Vielkugelspektrometer des Helmholtz Zentrums München (Quelle: M. Gebhardt, UFS GmbH).





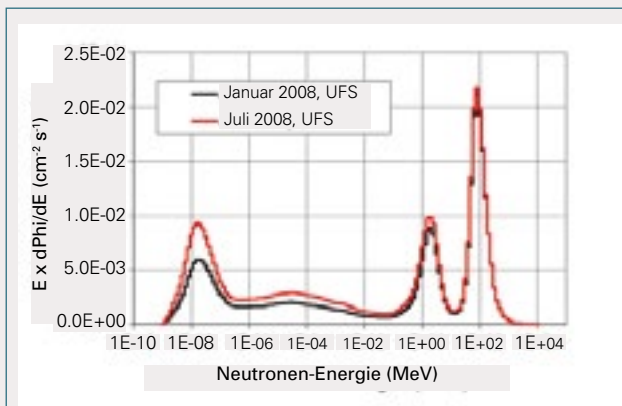


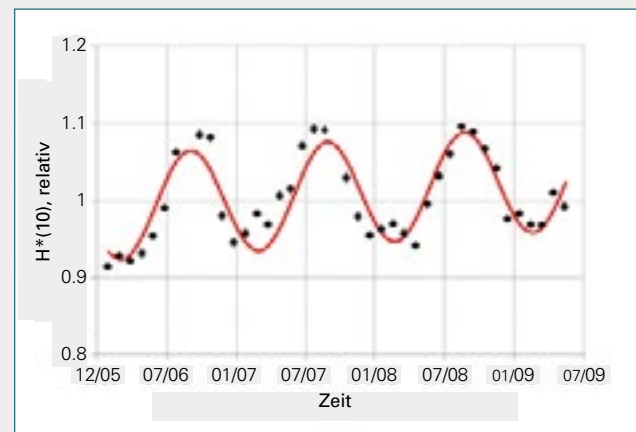
Abbildung 2: Energieverteilung der Neutronen der sekundären kosmischen Strahlung auf der UFS. Niederenergetische Neutronen sind im Sommer deutlich häufiger als im Winter [1].

Kürzlich konnte auf der UFS erstmals gezeigt werden, dass Umwelteinflüsse in der Tat die Energieverteilung der sekundären Neutronen der kosmischen Strahlung verändern. Abbildung 2 zeigt die auf der UFS gemessene Neutronenenergieverteilung, die sowohl sehr langsame (niederenergetische) Neutronen mit einer Energie von einigen MeV aufweist, als auch sehr schnelle (hochenergetische) Neutronen mit einer Energie von mehreren 100 MeV (Abbildung 2). In dieser Abbildung wird zudem deutlich, dass beispielsweise die im Januar 2008 (Winter) und im Juli 2008 (Sommer) gemessenen Neutronenenergieverteilungen signifikante Unterschiede aufweisen. Insbesondere bei Energien kleiner als 1 MeV sind deutlich mehr Neutronen im Sommer (rote Kurve) als im Winter (schwarze Kurve) vorhanden. Hochenergetische Neutronen mit Energien größer als 20 MeV sind jedoch kaum von Änderungen betroffen. Zeitreihen über mehrere Jahre bestätigten diesen Trend.

Diese Beobachtung lässt erwarten, dass auch die Dosis für den Menschen durch die sekundären Neutronen der kosmischen Strahlung eine Abhängigkeit von der Jahreszeit zeigen sollte. Dies wird in Abbildung 3 verdeutlicht. Diese Abbildung zeigt

den zeitlichen Verlauf der Neutronendosis auf der UFS von Mai 2005 bis Juni 2009, der auf der Basis der mit dem Vielkugelspektrometer gemessenen monatlichen Neutronenenergieverteilungen berechnet wurde.

Abbildung 3: Langzeittrend der relativen monatlichen Dosis  $H^*(10)$  durch Neutronen der sekundären kosmischen Strahlung auf der UFS [1].



Deutlich zu erkennen ist, dass in den Sommermonaten, in denen die Feuchtigkeit der Umgebung gering ist, die mittlere monatliche Dosis durch sekundäre Neutronen der kosmischen Strahlung tatsächlich um bis zu etwa 20 % höher ist, als in den Wintermonaten. Dieser Effekt wurde in der Literatur davor noch nicht beschrieben und erstmals auf der UFS beobachtet.

In Zukunft soll der Einfluss des Klimawandels auf die in Abbildung 3 gezeigten Oszillationen und insbesondere auf deren Amplitude (Höhe) und Form (Breite der beobachteten Maxima und Minima) untersucht werden.

#### Literatur:

[1] RÜHM, W.; ACKERMANN, U.; PIOCH, C.; MARES, V. (2012): Spectral neutron flux oscillations of cosmic radiation on the Earth's surface. *J Geophys Res* 117

---

## EXKURS FORSCHUNG

---

Prof. Dr. Caroline Herr, Dr. Stefanie Kolb,  
Bayerisches Landesamt für Gesundheit und  
Lebensmittelsicherheit

---

# GME: SEAL Klima- Sensibilisierungen und Allergien bei Einschülern in Zeiten des Klimawandels

Seit 2004 werden in Bayern zusätzlich zu den Schuleingangsuntersuchungen Elternbefragungen zur Gesundheit von Einschulungskindern durchgeführt (Gesundheits-Monitoring-Einheiten, GME). In drei dieser Querschnittsbefragungen (2004/2005, 2006/2007 und 2012/2013) wurden Fragen bezüglich Asthma und Allergien gestellt. Von 2004 bis 2013 nahm die Prävalenz von Heuschnupfen (4,7 % vs. 4,0 %) geringfügig (nicht signifikant) ab. Die Ergebnisse dieser drei Querschnittstudien deuten somit darauf hin, dass die Allergieprävalenzen bei Einschulungskindern in Bayern möglicherweise ein Plateau erreicht haben. Die im Rahmen der GME erhobenen Daten beruhen auf der Lebenszeitprävalenz, die von den Eltern berichtet wird. Objektive Daten zur Verifizierung einer Sensibilisierung bzw. einer Allergie liegen dabei nicht vor. Besonders vor dem Hintergrund, dass neben zahlreichen Umweltfaktoren auch der Klimawandel als möglicher Kofaktor für die Entstehung von pollenassoziierten Allergien diskutiert wird [1], wären objektive Daten zur Prävalenz von Sensibilisierungen und Allergien hier zu begrüßen. Ziel dieses Pilotprojektes ist es daher, zu prüfen, ob im Rahmen der seit 10 Jahren bestehenden GME eine objektive Erfassung der Prävalenz von Sensibilisierungen und Allergien bei bayerischen Einschülern möglich ist

(GME-Klima-SEAL). Die Untersuchung der Kinder soll im Schuljahr 2015/2016 am Gesundheitsamt Günzburg erfolgen. Es ist geplant 600 Kinder in die Studie einzubeziehen. Der Vorteil der GME Nutzung besteht in der möglichst kleinflächigen, regionalen und prospektiven Betrachtung einer stabilen Population, da im Alter von 0 bis 6 Jahren normalerweise wenig räumliche Mobilität gegeben ist. Dies ist wichtig, da in einem weiteren Schritt geplant ist, die Sensibilisierungsdaten der Kinder in Kontext zu Klimadaten, die von einer lokalen Pollenmessstation erhoben werden, zu stellen. Im weiteren Verlauf soll das Projekt auf alle GME Regionen in Bayern ausgeweitet werden.

[1] ZEBISCH, M., T. GROTHMANN, D. SCHRÖTER, C. HASSE, U. FRITSCH, W. CRAMER (2005): Klimawandel in Deutschland – Vulnerabilität und Anpassungsstrategien klimasensitiver Systeme. Umweltbundesamt Climate Change - Reihe 08/05 (UFOPLAN 201 41 253). Dessau 2005. 203

---

## 4.9 Tourismus

### 4.9.1 Klimafolgen und Anpassung

Im 21. Jahrhundert stellt der Klimawandel für den Tourismus eine erhebliche Herausforderung dar. Zum einen ist der Tourismus ein großer Treiber des Klimawandels und weltweit direkt für 5 % bis 12 % der energiebedingten CO<sub>2</sub> Emissionen verantwortlich [1], zum anderen können klimatische Veränderungen die Attraktivität von Tourismusdestinationen zum Positiven, aber auch zum Negativen verändern. Das Klima sowie das weitere ursprüngliche Angebot sind in vielen Regionen wesentlich für den Erfolg und tragen oftmals entscheidend zur regionalen Wertschöpfung bei. Für die Tourismusdestination Bayern liegt somit eine besondere Herausforderung darin, ihren Spitzenplatz unter veränderten Rahmenbedingungen weiterhin zu behaupten.

Jede Veränderung in Bezug auf das Klima und damit auf die Umwelt geht mit Chancen und Risiken für den Tourismus einher. Besonders betroffen sind dabei in erster Linie Destinationen mit naturbasierendem Tourismus und/oder einem Schwerpunkt auf Outdoor-Aktivitäten. Um die Auswirkungen des Klimawandels auf den Tourismus und damit die Vulnerabilität von touristischen Destinationen beurteilen zu können, werden möglichst genaue Angaben zu den erwarteten klimatischen Veränderungen benötigt. Einen wichtigen Ansatzpunkt stellen

dabei regionale Klimamodelle dar, denn klimatische Veränderungen können kleinräumig völlig anders ausfallen als in einem globalen Kontext. Ein solches regionalisiertes Simulationsmodell wurde innerhalb des Projektverbundes GLOWA (GLObaler WANdel des Wasserkreislaufs)<sup>1</sup> für das Einzugsgebiet der oberen Donau entwickelt. Im Mittelpunkt des vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) ins Leben gerufenen Projekts stand die Untersuchung der regionalen Folgen des Klimawandels auf die Verfügbarkeit von Wasser im Untersuchungsgebiet von der Donauquelle bis zum Pegel Achtleiten bei Passau. Rund 40 Wissenschaftler aus den Natur-, Sozial- und Wirtschaftswissenschaften entwickelten dazu ein Modell, das in der Lage ist, mögliche Entwicklungslinien der Auswirkungen des Klimawandels bis zum Jahr 2060 zu simulieren. Dabei fließen unterschiedliche Klima- und Gesellschaftsszenarien ein, die mögliche Veränderungen in diesen Bereichen aufzeigen. Durch diese Herangehensweise ergibt sich ein sogenannter Wahrscheinlichkeitstrichter (vgl. Abbildung 4.9\_1), der die Gesamtheit aller möglichen Szenarien widerspiegelt und somit höchstwahrscheinlich auch die tatsächliche Zukunft enthält.

<sup>1</sup> [www.glowa.org](http://www.glowa.org) und [www.glowa-danube.de](http://www.glowa-danube.de)

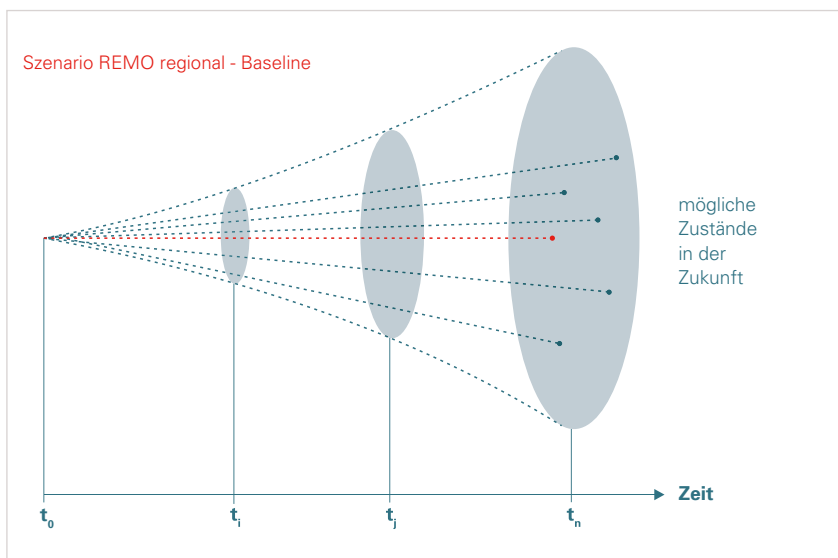


Abbildung 4.9\_1: Szenariotrichter

Um die Auswirkungen des Klimawandels und damit mögliche Anpassungsmaßnahmen ermitteln zu können, wurde aus der Vielzahl möglicher GLOWA Danube Szenarien das Szenario REMO regional – Baseline ausgewählt. Es liegt in der Mitte des oben erwähnten Trichters und stellt ein moderates Klimaszenario dar. REMO regional – Baseline beruht auf der Annahme eines Temperaturanstiegs um  $+5,2\text{ }^{\circ}\text{C}$  und einer Niederschlagsänderung um  $-4,9\%$  im Winter und  $-31,4\%$  im Sommer sowie einem "business as usual"-Szenario, das den Status Quo hinsichtlich wirtschaftlicher und gesellschaftlicher Entwicklungen weiterführt. Die nachfolgenden Angaben zu den klimatischen Veränderungen stammen aus dem Global Change Atlas (GLOWA-Danube-Projekt 2001-2011, [2]), der im Rahmen des Projektes GLOWA Danube entstanden ist.

Laut dem ausgewählten Szenario wird sich die mittlere Jahrestemperatur im Vergleich zu dem Referenzzeitraum 1971 bis 2000 im Untersuchungsgebiet

Abbildung 4.9\_2: Mittlere Sommertemperatur in  $^{\circ}\text{C}$  von Mai bis Oktober von 1971–2000 (links) und von 2031 bis 2060 (rechts), Szenario REMO regional - Baseline

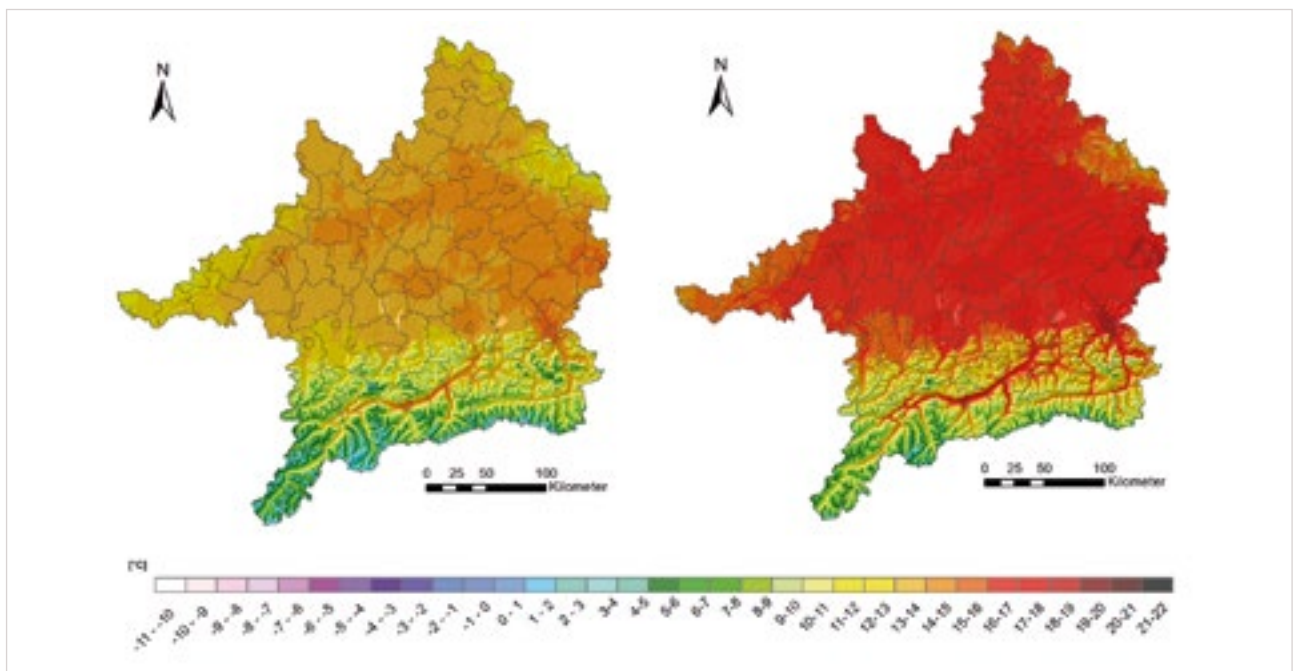
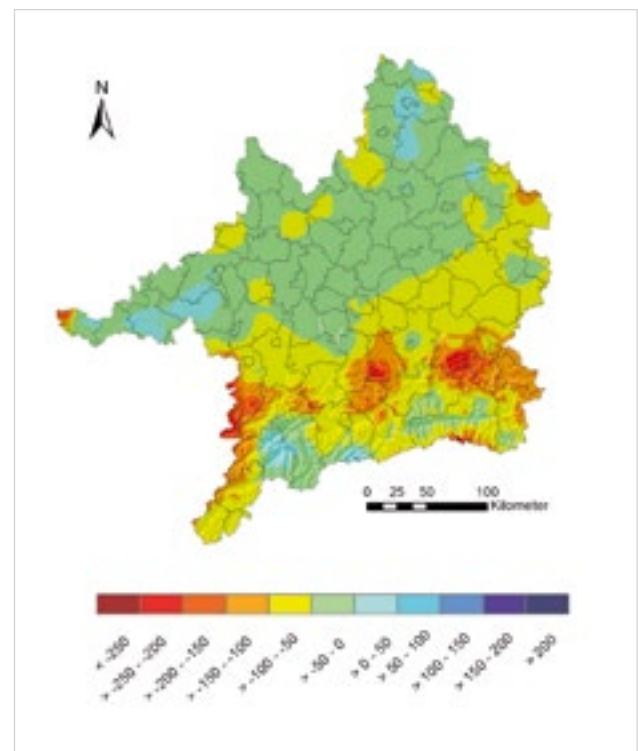


Abbildung 4.9\_3: Mittlere Änderung der Niederschlagssumme in mm bis Mitte des Jahrhunderts nach dem Szenario REMO regional - Baseline

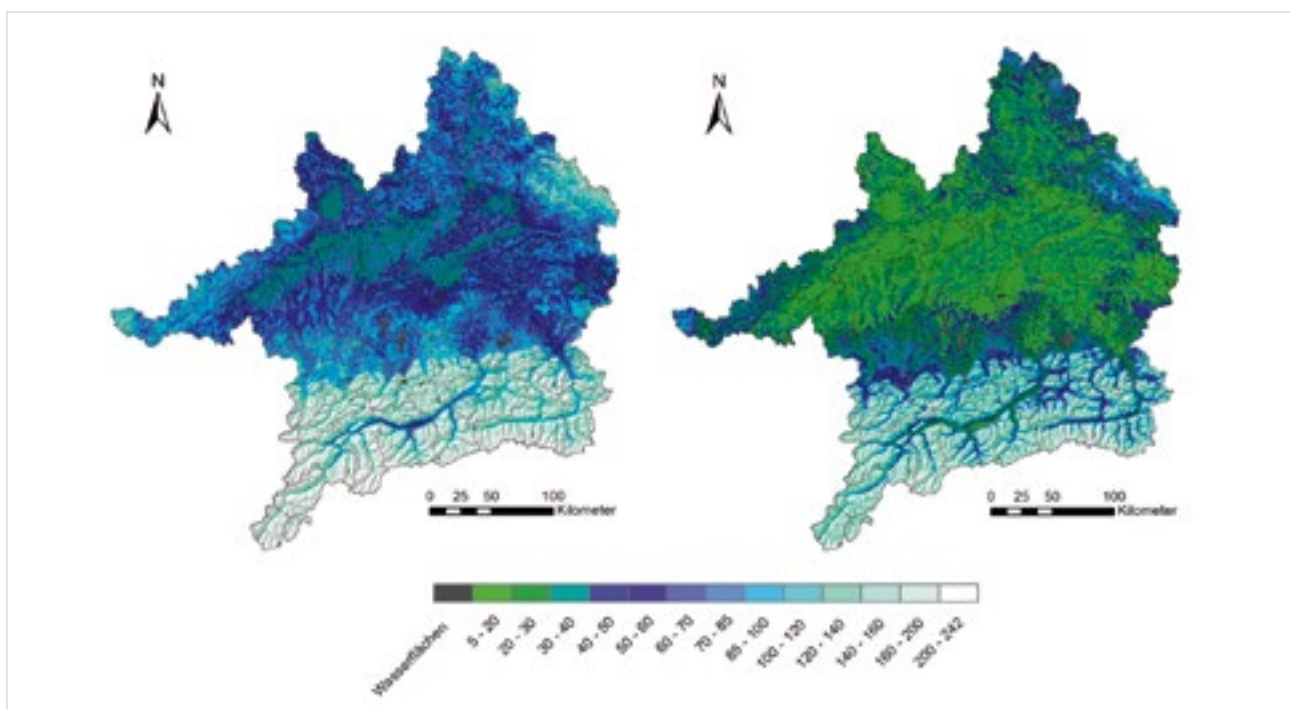


bis zum Jahr 2060 um 2,2 bis 3,1 °C erhöhen (vgl. Abbildung 4.9\_2). Die durchschnittliche Sommertemperatur, die heute bei 14 °C liegt, wird im Donauraum auf 17 °C steigen. So wird München in Zukunft hinsichtlich Jahresmitteltemperatur und Niederschlagssummen mit Verona vergleichbar sein und Nürnberg mit Turin.

Was die Niederschläge betrifft, setzt sich der Trend von einem leichten Rückgang der Niederschlagssumme im Sommer und einer geringfügigen Erhöhung im Winter bis zum Jahr 2060 fort. Insgesamt ist – wiederum verglichen zum Zeitraum 1971 bis 2000 – von einer winterlichen Niederschlagszunahme zwischen 4 und 17 % auszugehen, für den Sommer wird eine Abnahme von 5 bis 27 % errechnet. Für die mittlere Jahressumme bedeutet dies eine Zunahme von bis zu 10 %. Vor allem der nördliche Alpenrand wird von einem Rückgang der Niederschlagsmengen betroffen sein, wohingegen für den Donauraum nur geringfügige Änderungen prognostiziert werden (vgl. Abbildung 4.9\_3).

Insbesondere für den Wintersporttourismus spielt die Art des Niederschlags eine entscheidende Rolle. In der Vergangenheit konnte bereits eine Abnahme des Anteils an Schneeniederschlag am Jahresniederschlag verzeichnet werden. Dieser Trend wird sich in der Zukunft weiter fortsetzen. Zieht man des Weiteren den Temperaturanstieg hinzu, ist mit einem Rückgang der mittleren Schneedeckendauer um 30 bis 60 Tage in allen Höhenlagen zu rechnen (vgl. Abbildung 4.9\_4). Das bedeutet, dass die Schneesverhältnisse, die heute auf ca. 1000 m NN herrschen in Zukunft erst auf ca. 2000 m NN vorzufinden sein werden. Insbesondere in mittleren Höhenlagen werden diese Veränderungen deutlich spür- und sichtbar sein.

Abbildung 4.9\_4: Mittlere Schneedeckendauer in Tagen von November bis Juni von 1971–2000 (links) und von 2031–2060 (rechts), Szenario REMO regional – Baseline (Quelle: GLOWA-Danube-Projekt 2001–2011).



Einen weiteren bedeutenden Faktor in Zeiten des Klimawandels stellen Extremwetterereignisse dar. Diese können von Klimamodellen in der Regel nicht mit ausreichender Qualität vorausberechnet werden. Extremereignisse wie Niedrig- und Hochwasser wurden im Rahmen des Verbundprojekts GLOWA Danube jedoch ausführlich untersucht. So wird sich die Niedrigwassersituation im Flachland deutlich verschärfen. In Bezug auf das 100-jährige Hochwasser errechnet das Simulationsmodell geringfügige Änderungen im Einzugsgebiet der oberen Donau, was sich in erster Linie auf das touristische Marktsegment der Flusskreuzfahrten, die gesamte Ausflugsschiffahrt und den Bade- und Wassersporttourismus auswirkt.

#### 4.9.1.1 Schneebasierter Wintersporttourismus

Der Wintersporttourismus gilt in der Klimafolgenforschung als der berühmte Kanarienvogel in der Kohlemine [3]. Gerade in tiefer liegenden Wintersportgebieten, etwa in den bayerischen Voralpen oder Mittelgebirgsregionen, sind die Auswirkungen des Klimawandels bereits jetzt spürbar. So werden für das Winterhalbjahr mehr Risiken als Chancen gesehen, wenn die Skigebiete und vom Wintersport abhängige Regionen auf Grund ihrer Höhenlage mit einem Rückgang des Skitourismus rechnen müssen. Etablierte Markenbegriffe wie „Schneebayern“, aber auch die großen Wintersportevents, die oftmals einen entscheidenden Imagefaktor darstellen und hohe ökonomische Bedeutung für Tourismusregionen aufweisen, sind durch die klimatischen Entwicklungen bedroht. So werden Umsatzeinbußen und steigende Energie- und Versicherungskosten als größte Risiken gesehen. Problematisch ist auch, dass erst sehr langsam ein Umdenken hin zu einem schneeunabhängigen Tourismus stattfindet und Skifahren zudem durch den Einsatz technischer Hilfsmittel für die Beschneigung teurer wird.

Auf der anderen Seite bringt der Klimawandel allerdings nicht nur negative Veränderungen mit sich.

Hohes Entwicklungspotenzial bieten vor allem der Erholungs-, Gesundheits- und Wellness-Sektor, der verstärkt von sich verändernden Kundenwünschen profitiert. So wird eine steigende Nachfrage nach umweltfreundlichen Angeboten erwartet, die dem Trend hin zu einem bewussteren und nachhaltigen Lebensstil gerecht wird. Für den Tourismus eröffnet sich dadurch eine neue Kundengruppe und somit Entwicklungschancen. Es wird zudem mit geringeren Kosten für Winterdienst sowie insgesamt sichereren Straßenbedingungen gerechnet.

Mögliche Anpassungsmaßnahmen beziehen sich auf die Bereiche technische Ausstattung und bauliche Maßnahmen, Ausbau von Angeboten, Marketing und Forschung. So kann in ausreichend hoch gelegenen Skigebieten eine künstliche Beschneigung der Pisten erfolgen. Der Strombedarf für die Beschneigungsanlagen stammt optimalerweise aus lokal erzeugten erneuerbaren Energien. Darüber hinaus bietet sich der Ausbau der Bereiche Gesundheit, Wellness und Kulinarik zu einem ganzheitlichen Angebot an. Eine wichtige Rolle kann dabei auch das Thema Erlebnisinszenierung am Berg spielen. Denkbar wären Projekte wie spezielle Themenhütten, Aussichtsplattformen, Erlebnispfade und ein umfassend ausgebautes Wanderwegenetz, das ganzjährig genutzt werden kann. Als Ergänzung könnten außerdem wetterunabhängige Indoor-Angebote wie Schwimmbäder oder Kletterhallen weiter ausgebaut werden, um potentiellen Gästen weitere Alternativen zur Urlaubsgestaltung zu bieten.

#### 4.9.1.2 Sommertourismus

Auch in den Sommermonaten bietet der Klimawandel sowohl Chancen als auch Risiken für den Tourismus. Wärmere Temperaturen insbesondere in den Sommermonaten machen das Urlaubsland Bayern für Gäste noch attraktiver und sollten zu einem Gästezuwachs führen. Ein zusätzlicher Besucherplus erwartet man durch die Umlenkung von Reiseströmen aus dem Mittelmeerraum, der zu trocken und

zu heiß für einen Urlaub werden könnte. Auch die Bewohner dieser Regionen stellen für das Reiseziel Bayern ein hohes Potenzial dar. Insgesamt ist von einer Verlängerung der Sommersaison ins Frühjahr und bis weit in den Herbst auszugehen (Vor- bzw. Nachsaison). Die Saisonalität wird hierdurch insgesamt abnehmen. Profitieren wird davon besonders der Wander-, Fahrrad- und Wellness-tourismus. Eine weitere Chance ist mit einer höheren Planungssicherheit für Outdoor-Events aufgrund stabilerer Wetterlagen verbunden. Höhere Wassertemperaturen führen zu einer steigenden Bedeutung von Badetourismus und Wassersport an den bayerischen Seen. Vor allem Bergseen, die jetzt noch zu kalt zum Baden sind, könnten in Zukunft warm genug dafür sein und eröffnen so ein zusätzliches Potenzial für den Sommertourismus im Alpen- und Mittelgebirgsraum.

Die Risiken des Klimawandels für den Sommertourismus in Bayern liegen in erster Linie in einer deutlichen Erhöhung der Anzahl von Hitzetagen, die eine erhebliche gesundheitliche Gefährdung für Kleinkinder und ältere Personen darstellen (vgl. Kapitel 4.8.).

Durch den Rückgang der durchschnittlichen sommerlichen Niederschlagsmengen, verbunden mit den steigenden Temperaturen, kommt es zum Absinken des Grundwasserspiegels und einer Verschärfung der Niedrigwassersituation an Flüssen und Seen, was zu einer Verschlechterung der Wasserqualität sowie Algenwachstum führen kann. Weitere Folgen können Nutzungskonflikte um die Ressource Wasser sein, die besonders in landwirtschaftlich und touristisch intensiv genutzten Regionen entstehen könnten. Auch der steigende Bedarf nach Klimatisierung stellt ein Risiko für die Tourismusbranche dar. Neben hohen Kosten für Einbau und Wartung sind damit vor allem höhere Energiekosten verbunden, die zu Preissteigerungen für die touristischen Gesamtprodukte führen können. Als weitere Risiken sind eine erhöhte Waldbrandgefahr und vermehrter Schädlingsbefall zu nennen, die

infolge steigender Temperaturen und zunehmender Trockenphasen auftreten und neben einem regionalen Imageverlust zu hohen finanziellen Schäden führen können (vgl. Kapitel 4.6.).

Mögliche Anpassungsstrategien liegen im Einsatz energieeffizienter Technik, um Energiekosten möglichst gering zu halten. Im Idealfall entwickeln die touristischen Leistungsträger ein eigenes Energiemanagement. Weitere Anpassungsmöglichkeiten liegen in einer energieoptimierten Bauplanung sowie dem Einbau von Regenwassertanks.

Auch im Bereich der Angebotsgestaltung sind Anpassungsmaßnahmen möglich. So ist – wie im Wintertourismus – darauf zu achten, dass ganzheitliche Angebote entstehen und ausreichend Angebotsalternativen für Tage mit hohen Temperaturen zur Verfügung stehen. Auch im Tourismusmarketing kann Anpassung erfolgen. Hier liegt der Schwerpunkt auf einem integrierten Destinationsmanagement, das durch Vernetzung und Kooperationen Synergien erzeugt. Auch die Konzentration auf regionale Waren und Erzeugnisse stellt eine sinnvolle Anpassungsmaßnahme dar. So wird einerseits die regionale Produktion gestärkt und andererseits das Klima durch den Wegfall langer Lieferwege geschont. Darüber hinaus sind die Entwicklung und Stärkung regionaler Marken durch eine einheitliche "Corporate Identity", einem gemeinsamen Wertesystem in Bezug auf die Themen Nachhaltigkeit, Klimafreundlichkeit und Gesundheit sowie Qualität weitere Beispiele für gelungene Anpassungsmaßnahmen an den Klimawandel.

#### Literatur

- [1] BMWi (2013): Wirtschaftsfaktor Tourismus Deutschland. München
- [2] GLOWA-Danube-Projekt (Hrsg.) (2001–2011): Global Change Atlas. Einzugsgebiet Obere Donau
- [3] March, H.; Saurí, D.; Llordés, J. C. (2014): Perception of the effects of climate change in winter and summer tourist areas: the Pyrenees and the Catalan and Balearic coasts, Spain. In: Reg Environ Change, 14

## 4.10 Raumplanung und Städtebau

### 4.10.1 Planungsgrundsätze im Städtebau

Energieeffizientes und nachhaltiges Planen und Bauen beginnt nicht erst am Gebäude. Energetische Strategien in der kommunalen Planung haben vor dem Hintergrund des Klimawandels große Bedeutung. Bereits auf der Ebene der Ortsplanung werden die Rahmenbedingungen für die Energieeffizienz der städtebaulichen Struktur und der Energieversorgung geschaffen. Lage und Zuordnung von neuen Stadtquartieren zu bestehenden Siedlungsstrukturen und die Schaffung von Angebots- und Nutzungsvielfalt bestimmen Ver- und Entsorgungsnetze und reduzieren Verkehrswegelängen. Schlagwort ist die „Stadt der kurzen Wege“. Eine verkehrsreduzierende Siedlungsstruktur und die Vermeidung zusätzlicher Bodenversiegelung leisten einen wesentlichen Beitrag zur Reduzierung des CO<sub>2</sub>-Ausstoßes und damit zum Klimaschutz.

Bayerisches Staatsministerium des Innern, für Bau und Verkehr herausgegebene Arbeitsblatt für die Bauleitplanung Nummer 17 – Energie und Ortsplanung – gibt anhand von Beispielen Anregungen zu einer auf die jeweilige Situation vor Ort abgestimmten Umsetzung.

#### Kompakte Siedlungseinheiten und Freiflächen

Ziele einer nachhaltigen Siedlungsentwicklung sind die Konzentration der Siedlungstätigkeit auf die Innenstädte und Ortszentren, eine bedarfsgerechte Neuausweisung von Bauflächen und die Schaffung kompakter Siedlungseinheiten.

Eine flächensparende Bauweise bewahrt Freiflächen, die zur Energieeffizienz der Siedlung beitragen. Auf versiegelten Flächen steigt die mittlere Lufttemperatur im Vergleich zur unbebauten Umgebung deutlich an. Durch die Beschränkung der Bodenversiegelung und innerörtliche Freiflächen werden die ökologischen Ausgleichsfunktionen erhalten und das örtliche Kleinklima verbessert.

#### Frischluftschneisen

Um ein gesundes Klima im Siedlungsbereich zu erhalten, die Aufheizung der Luft zu vermindern und Luftverunreinigungen abzubauen, muss ein möglichst ungehinderter Luftaustausch mit der unbelasteten Umgebung gewährleistet sein. In Siedlungsbereichen sollen zusammenhängende, in die freie Umgebung übergreifende und gliedernde Grünzüge geschaffen oder gesichert werden.

Besondere Bedeutung für die Frischluftzufuhr in den Siedlungsbereichen kommt hierbei der Kaltluft zu. Kaltluft entsteht über Wiesen (bei Nacht) und Wäldern (bei Tag) und fließt zu den tieferen Stellen des Geländes. Hindernisse wie zum Beispiel ungünstig angeordnete Gebäude führen zum Kaltluftstau und mindern den Luftaustausch. Täler und Hangeinschnitte, die den Kaltluftstrom in den Siedlungsbereich lenken, sollten daher von Hindernissen wie beispielsweise größeren Baukörpern quer zur Strömungsrichtung freigehalten werden. An den bewaldeten Hängen ist ein ausreichend großer Abstand zwischen Bebauung und Waldrand vorzusehen, um den Kaltluftabfluss zu erleichtern. Die Bebauung sollte in diesen Fällen die Baumhöhe nicht überschreiten und durch Lüftungsschneisen in der Falllinie aufgelockert werden.

#### Nutzung der Solarenergie

Vor dem Hintergrund des Ziels, die Nutzung fossiler Energiequellen zu reduzieren, gewinnt unter anderem die Versorgung von Gebäuden durch Solarenergie an Bedeutung. Orientierung und bauliche Dichte bestimmen dabei das Potenzial an passiver und aktiver Solarenergienutzung. Eine gezielte stadträumliche Planung, in der die beiden Ziele, einerseits die Wärmeverluste durch kompakte Baukörper zu minimieren und andererseits die Energiegewinne durch solare Einstrahlung zu maximieren, verknüpft werden, trägt zur Energieeffizienz bei. Der solaren Optimierung sind jedoch Grenzen gesetzt, da abhängig von der Gebäudenutzung die Gefahr einer



Überhitzung bestehen kann. Diese Gefahr kann jedoch durch bautechnische Maßnahmen weitestgehend umgangen werden.

#### 4.10.2 Bauleitplanung

Die Städte und Gemeinden haben als Träger der Planungshoheit die Möglichkeit, mit Hilfe von formalen und informellen Planungsinstrumenten frühzeitig Einfluss auf eine energieeffiziente Planung zu nehmen und wichtige Rahmenbedingungen für den Klimaschutz und die Umsetzung von Energieeffizienzmaßnahmen vorzugeben. Wesentliche formale Planungsinstrumente der Ortsplanung sind die Bauleitpläne (Flächennutzungs- und Bebauungspläne), die von den Gemeinden in eigener Verantwortung aufzustellen sind.

Aufgabe der Bauleitplanung ist es, die bauliche und sonstige Nutzung der Grundstücke in der Gemeinde vorzubereiten und zu leiten. Rechtsgrundlage für die Bauleitplanung ist das Baugesetzbuch (BauGB). Neben Form und Aufstellungsverfahren regelt es auch mögliche Inhalte der Bauleitpläne. Mit den letzten Novellierungen des BauGB wurden die Belange von Klimaschutz und Klimaanpassung in die städtebauliche Planung integriert (§1 Absatz 5 BauGB). Bei der Aufstellung von Bauleitplänen sind die öffentlichen und privaten Belange gegen- und untereinander gerecht abzuwägen. Im Rahmen dieser Abwägung sind auch die Erfordernisse des Klimaschutzes sowohl durch Maßnahmen, die dem Klimawandel entgegenwirken, als auch durch solche, die der Anpassung an den Klimawandel dienen, als Belange zu berücksichtigen.

Die Bauleitplanung trägt dazu bei, eine menschenwürdige Umwelt zu sichern, die natürlichen Lebensgrundlagen zu schützen und zu entwickeln sowie den Klimaschutz und die Klimaanpassung, insbesondere auch in der Stadtentwicklung zu fördern. Hierzu soll die städtebauliche Entwicklung vorrangig durch Maßnahmen der Innenentwicklung erfolgen, das heißt die bestehenden Potenziale in den vorhandenen Siedlungsgebieten, wie beispielsweise

innerörtliche Brachflächen und leerstehende Bausubstanz, sollen für die Ortsentwicklung genutzt werden.

#### Flächennutzungsplan

Im Flächennutzungsplan ist für das gesamte Gemeindegebiet die Art der Bodennutzung nach den voraussehbaren Bedürfnissen der Gemeinde in den Grundzügen dargestellt. Gemäß § 5 Absatz 2 Nr. 2b und c BauGB kann die Ausstattung des Gemeindegebiets mit Anlagen, Einrichtungen und sonstigen Maßnahmen, die dem Klimawandel entgegenwirken und der Anpassung an den Klimawandel dienen, dargestellt werden. Es können beispielsweise auch im Rahmen der Darstellung von Grünflächen Maßnahmen zur Anpassung an den Klimawandel enthalten sein.

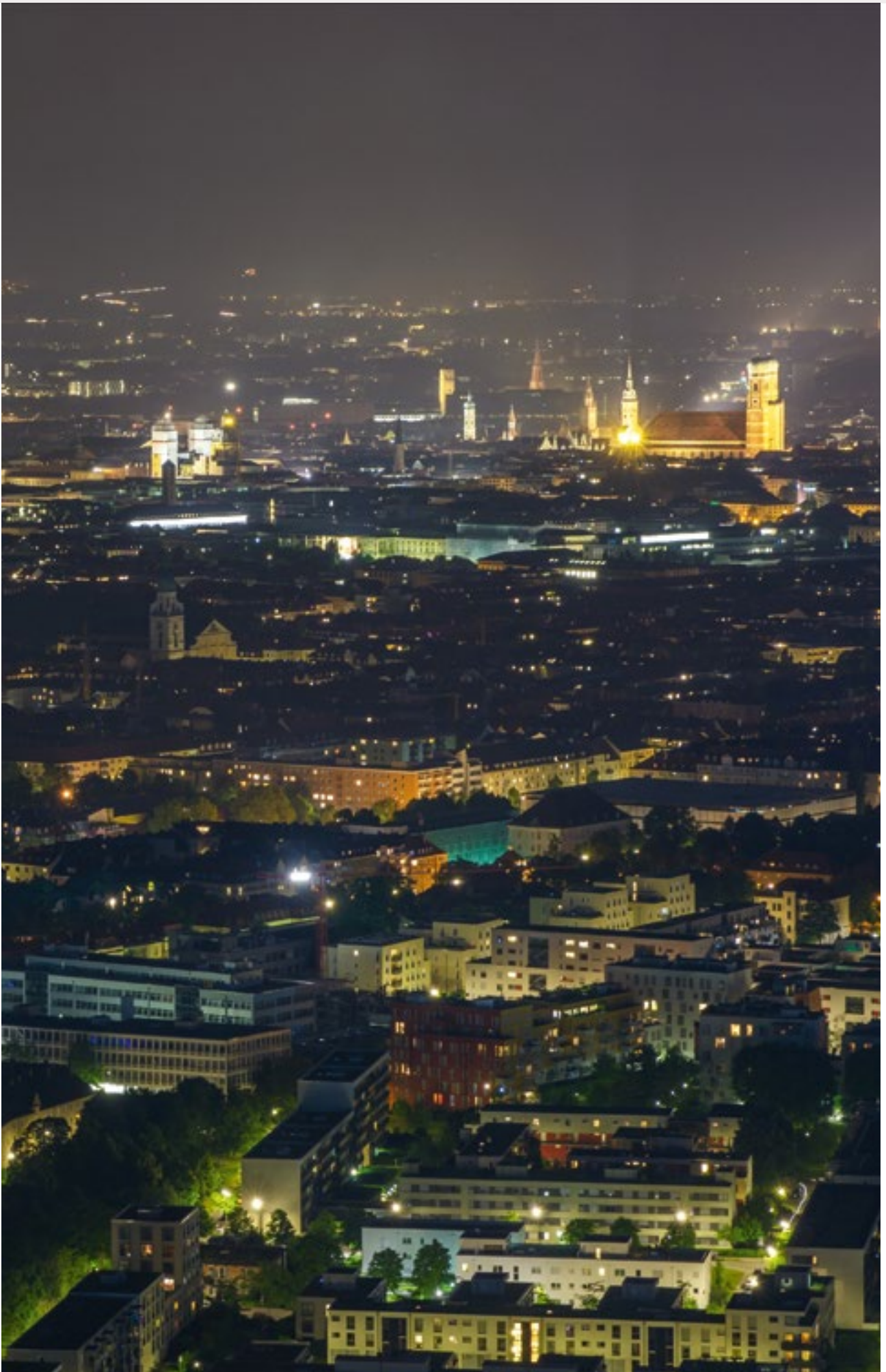
#### Bebauungsplan

Der Bebauungsplan enthält rechtsverbindliche Festsetzungen für die städtebauliche Ordnung. Die möglichen Festsetzungen des Bebauungsplans sind in § 9 BauGB abschließend geregelt. Die Schaffung flächensparender Siedlungsstrukturen und einer dichten Bauweise sowie die Berücksichtigung der Gebäudeausrichtung und Vermeidung von Verschattungen tragen zur Optimierung des Energieverbrauchs bei. Es können auch Flächen festgesetzt werden, die von Bebauung freizuhalten sind, um beispielsweise Frischluftschneisen zu sichern. Auch im Rahmen anderer Festsetzungen können Klimaschutz- und Anpassungsziele verfolgt werden. So kann beispielsweise die Festsetzung einer Fläche für die Landwirtschaft (z. B. Streuobstwiese) auch zum Ziel haben, eine Kaltluftschneise zu sichern.

Es ist oft zweckmäßig, die Planungsvorstellungen in informellen Plänen vorzubereiten. Diese stellen eine Orientierungshilfe für die weitere Planung dar, eine direkte eigene Rechtswirkung besitzen sie nicht. Sie sind, wenn sie durch die Gemeinde beschlossen wurden, nach § 1 Absatz 6 Nr. 11 BauGB bei der

Aufstellung formeller Bauleitpläne zu berücksichtigen. Zu den informellen Plänen gehören beispielsweise städtebauliche Rahmenpläne oder auch sektorale Konzepte wie Energienutzungspläne. Kommunale Energiekonzepte dienen als wichtige Entscheidungshilfen für die gemeindliche Planung und sollen die energetische Entwicklung in den Gemeinden bzw. in einer Region steuern. Gerade bei der komplexen Aufgabe, die gemeindliche Energieversorgung auf erneuerbare Energien umzustellen, ist es sinnvoll, ein Energiekonzept (z. B. Energienutzungsplan, Windkraftkonzept) aufzustellen. Eine interkommunale Zusammenarbeit mit benachbarten Gemeinden ist dabei anzustreben, da Eignungsflächen, Standorte und Gebiete für Versorgungsnetze aneinander grenzen bzw. sich überlappen.

In einem Energienutzungsplan werden Konzepte für eine nachhaltige, energieeffiziente und wirtschaftliche Energieversorgung dargestellt, die den örtlichen Energiebedarf mit dem Potenzial erneuerbarer Energien koordinieren. Die Ergebnisse sind mit den Zielen der Ortsplanung und der städtebaulichen Erneuerung in Einklang zu bringen und fließen gegebenenfalls in die Bauleitplanung ein. Der von den Bayerischen Staatsministerien für Umwelt und Verbraucherschutz, für Wirtschaft und Medien, Energie und Technologie sowie des Innern, für Bau und Verkehr im Jahr 2011 herausgegebene „Leitfaden Energienutzungsplan“ gibt Hinweise und Informationen, wie ein Konzept für die zukünftige energetische Entwicklung in der Gemeinde erstellt werden kann.



---

 EXKURS FORSCHUNG
 

---

Prof. Dr. Werner Lang (Lehrstuhl für energieeffizientes und nachhaltiges Planen und Bauen),  
 Prof. Dr. Stephan Pauleit (Lehrstuhl für Strategie und Management der Landschaftsentwicklung),  
 Technische Universität München<sup>1</sup>

---

## Klimaforschungsvorhaben „Zentrum Stadtnatur und Klimaanpassung (ZSK)“

**Synergien von Klimaschutz und Klimaanpassung für die integrierte Stadtplanung bayerischer Kommunen**

Weltweit sind Städte von den Folgen des Klimawandels, vor allem durch die Zunahme von Extremwetterereignissen, wie Hitzetagen und Starkregenereignissen betroffen. Um bayerische Kommunen zur erfolgreichen Anpassung an die unausweichlichen Folgen des Klimawandels zu befähigen, mangelt es vielfach an wissenschaftlichen Grundlagen und Anleitungen zur Umsetzung des Wissens in die Praxis. Das Zentrum Stadtnatur und Klimaanpassung (ZSK) wurde 2013 an der Technischen Universität München gegründet, um diese Fragestellung zu untersuchen. Das Zentrum wird durch das Bayerische Staatsministerium für Umwelt und Verbraucherschutz gefördert.

Ziel des ZSK ist es, integrierte stadtplanerische und übertragbare Strategien für Bayerns Städte zu entwickeln, in denen Synergien von Klimaschutz bei Planung, Bau und Klimaanpassung durch Einplanung von Stadtnatur berücksichtigt werden.

Diese Strategien werden in enger Zusammenarbeit mit den Partnerstädten München und Würzburg erarbeitet.

Das ZSK wertet Daten regionaler Klimamodelle aus, um zu erwartende Klimaveränderungen auf städtischer Ebene zu ermitteln. Bereits bis Mitte des Jahrhunderts ist beispielsweise in der Stadt München mit einer Verdopplung heißer Tage, sowie einem deutlichen Rückgang kalter Tage zu rechnen. Die Planung der städtischen Außenräume ist bei steigenden Durchschnittstemperaturen und Hitzetagen im Rahmen der Klimaanpassung zunehmend wichtig. Die regulierenden Ökosystemdienstleistungen grüner Infrastruktur, zum Beispiel Verschattung und Verdunstung, tragen in Städten maßgeblich dazu bei, Überhitzung zu reduzieren. Das ZSK prüft anhand einer Mikroklimasimulation die Wirkung verschiedener Formen grüner Infrastruktur, wie Baumpflanzungen, Dach- und Fassadenbegrünungen, auf das Klima in innerstädtischen Außenräumen. Es wird berechnet, was ein sukzessiv erhöhter Anteil an grüner Infrastruktur unter sich zukünftig verändernden Klimabedingungen leisten würde.

Das ZSK erarbeitet mit diesen Simulationsergebnissen eine quantitative Grundlage für den Einsatz grüner Infrastruktur, unter anderem zur Regulation von Hitze und Starkregen für Kommunen. In einem weiteren Schritt wird untersucht, wie durch die Entwicklung grüner Infrastrukturen die städtische Biodiversität und Freiraumqualität gefördert werden können. Zuletzt werden die vom ZSK erarbeiteten integrierten stadtplanerischen Strategien auf ihre Umsetzbarkeit unter den heutigen gesetzlichen Rahmenbedingungen sowie auf ihre Übertragbarkeit auf weitere bayerische Städte geprüft. Die Forschungsergebnisse des ZSK werden in einem Leitfaden zu integrierter Stadtplanung für bayerische Kommunen zur Verfügung gestellt werden.

---

<sup>1</sup> Link: [www.zsk.tum.de](http://www.zsk.tum.de)

---



Abbildung 1: Klimawandelauswirkungen und Vulnerabilität, und Wirkung grüner Infrastrukturen (Quelle: ZSK).

## 4.11 Industrie und Gewerbe

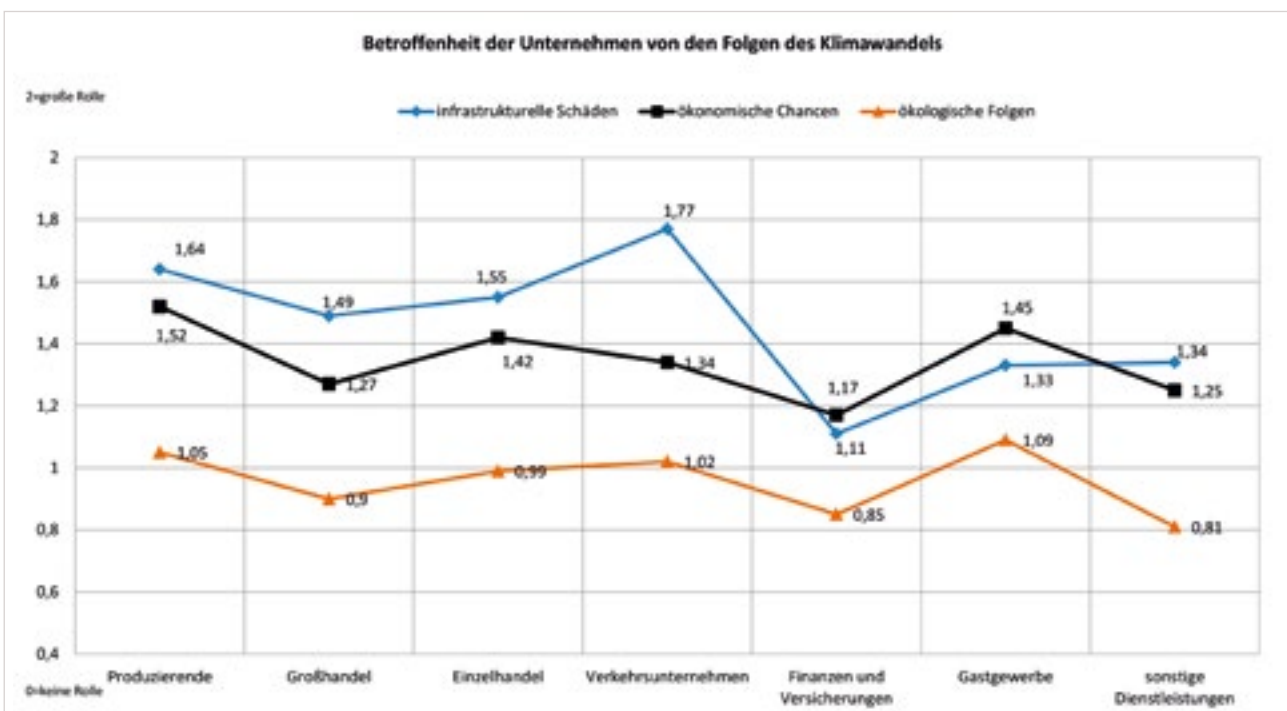
### 4.11.1 Klimafolgen und Anpassung

Die Bundesregierung und die bayerische Staatsregierung thematisieren im Handlungsfeld „Industrie und Gewerbe“ Risiken, aber auch Chancen des Klimawandels für Unternehmen sowie Ansatzpunkte für notwendige Klimaanpassungen. Risiken sind neben den aller Voraussicht nach zunehmenden Extremwetterereignissen vor allem die betrieblichen Einschränkungen, die sich durch wetterbedingte Verzögerungen oder Ausfälle auf vor- oder nachgelagerten Beschaffungs- oder Absatzwegen, einschließlich der Infrastrukturen (z. B. bei der Wasser- und Energieversorgung), ergeben können. Um diese Risiken zu minimieren, aber auch um umgekehrt die Chancen etwa durch technische Neuerungen, Infrastrukturmaßnahmen und weitere Innovationen und Investitionen zu nutzen, müssen Informationen zum Klimawandel frühzeitig in betrieblichen Prozessen, zum Beispiel in der Forschung und Entwicklung, berücksichtigt werden [1, 2].

Eine Vielzahl von unternehmerischen Risiken und Chancen, die sich allerdings für verschiedene Branchen, Unternehmensgrößen und Regionen

durchaus unterschiedlich darstellen, wurden auch von der Klimafolgenforschung identifiziert. So hat eine Repräsentativbefragung von 1.167 oberbayerischen Unternehmen gezeigt [3], dass „infrastrukturelle Schäden“ (das heißt gravierende Beeinträchtigungen in den Bereichen Gebäude, Verkehr und Versorgung mit Energie und Material) als potenzielle Folgen des Klimawandels für die befragten Unternehmen eine insgesamt größere Bedeutung haben als ökologische Schäden, wie etwa der Anstieg der Meeresspiegel oder die globale Erwärmung (Abbildung 4.11\_1). Allerdings scheinen von infrastrukturellen Schäden das Gastgewerbe und die sonstigen Dienstleistungen sowie die Finanz- und Versicherungsdienstleistungen deutlich weniger betroffen als das produzierende Gewerbe und Verkehrsunternehmen (Personen-, Güterbeförderung und Lagerlogistik).

Abbildung 4.11\_1: Betroffenheit der Unternehmen differenziert nach Risiken (infrastrukturelle Schäden und ökologische Folgen) sowie Chancen (ökonomische Chancen)(Quelle: bifa Umweltinstitut GmbH).



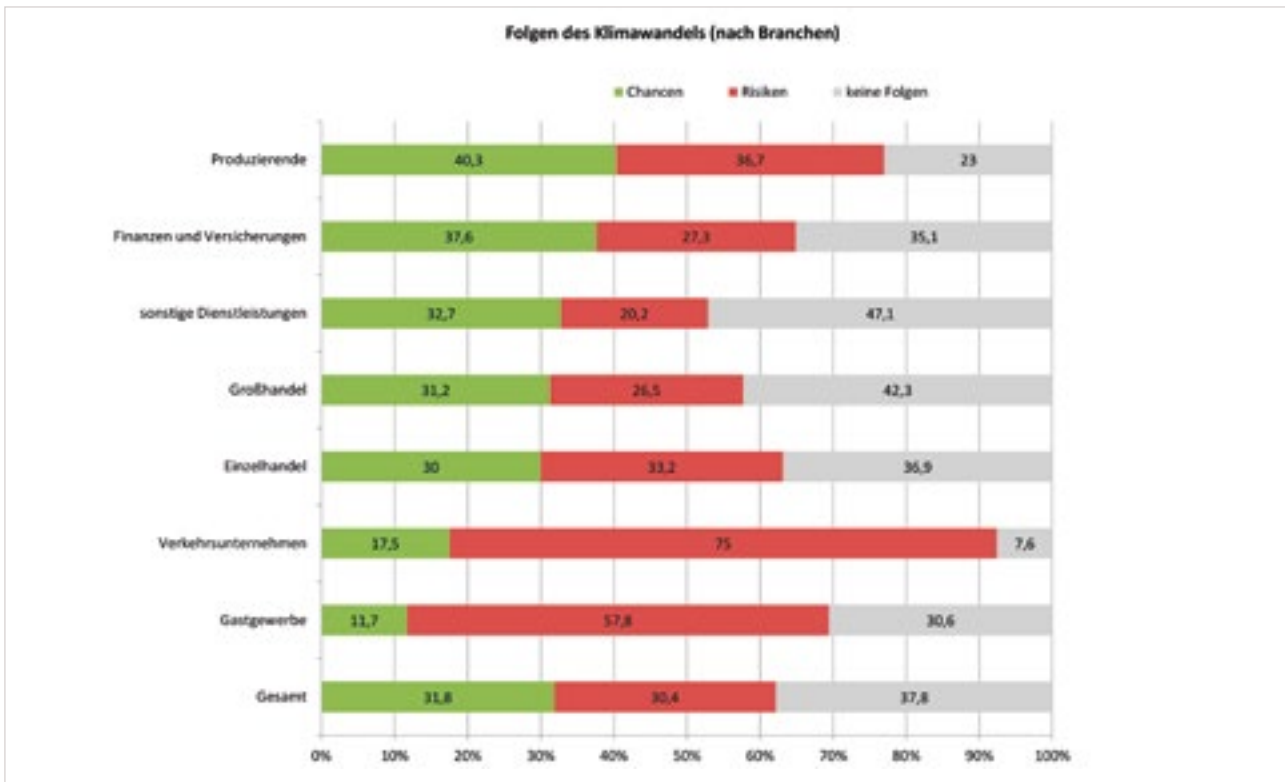


Abbildung 4.11\_2: Einschätzung der Folgen des Klimawandels durch die Befragten (nach Branchen).

Ökonomische Chancen wie neue Märkte, Produkte, Dienstleistungen oder Technologien wurden fast ebenso häufig mit den Folgen des Klimawandels in Verbindung gebracht. Am häufigsten sahen wiederum Befragte aus produzierenden Unternehmen diese Chancen; auch Befragte aus dem Gastgewerbe erwarten für ihre Betriebe durchaus neue Perspektiven. Auch wenn „ökologische Folgen“ für die Befragten insgesamt eine eher untergeordnete Rolle zu spielen schienen, so waren es wiederum die Produzierenden, die Verkehrsunternehmen und das Gastgewerbe, die in diesen Facetten des Klimawandels nicht zu unterschätzende Gefahren für ihre Unternehmen sehen.

Doch beinhaltet der Klimawandel für die Unternehmen nun insgesamt „eher Risiken“, „eher Chancen“, oder wird er „überhaupt keine Folgen“ haben? Abbildung 4.11\_2 zeigt das Ergebnis der Einschätzung: Mehr als ein Drittel (37,8 %) aller Befragten rechnet mit „keinen Folgen“ des Klimawandels für das eigene Unternehmen, und jeweils ca. 30 % sehen „eher Chancen“ bzw. „eher Risiken“. Bezieht man in diese Betrachtung wiederum die Wirtschaftszweige mit ein, dann überwiegen bei Verkehrsunternehmen und dem Gastgewerbe die Risiken. Die Sonstigen sowie

die Finanz- und Versicherungsdienstleistungen rechnen tendenziell stärker mit Chancen bzw. mit keinerlei Folgen und bei den Produzierenden und dem Groß- wie dem Einzelhandel liegen Chancen und Risiken etwa gleichauf.

Während also Verkehrsunternehmen von den Folgen des Klimawandels insgesamt am stärksten betroffen sind und dabei überwiegend mit Risiken rechnen, scheint die Lage der produzierenden Unternehmen weit weniger eindeutig: Nur etwa jeder Fünfte aus dieser Befragtengruppe erwartet „keine Folgen“, alle anderen gehen entweder von „Chancen“ (40,3 %) oder von „Risiken“ (36,7 %) aus, wobei neben infrastrukturellen Schäden und ökologischen Folgen auch ökonomische Chancen gesehen werden.

Wir wissen aber auch aus anderen Untersuchungen [4, 5, 6], dass es in dem Handlungsfeld „Industrie und Gewerbe“ Gewinner- und Verliererbranchen sowie Branchen gibt, die beides sein können – typischerweise gilt die Bauwirtschaft als Gewinner des Klimawandels, während als Verlierer regelmäßig Verkehrsunternehmen angeführt werden. Produzierende sind in diesem Sinne „beides“, da sie in vielerlei und sich überlagernder Weise von den „riskanten Chancen“ des Klimawandels betroffen sein können.

Mit Blick auf Risiken wird erwartet, dass es mit künftig steigenden Temperaturen auch zu einer Erwärmung der Büros und Produktionshallen in den Unternehmen kommen wird – und zwar mit negativen Folgen für Mensch und Maschine. So kann die Gesundheit und Leistungsfähigkeit der Arbeitskräfte beeinträchtigt werden, aber auch die Funktionsfähigkeit von Maschinen und die Qualität der Produkte können Schaden nehmen. Zudem müssen Lösungen für die Kühlung von Rohstoffen und Produkten gefunden werden, sowohl beim Transport als auch bei der Lagerung. Schäden an Straßen und Schienen infolge von Temperaturschwankungen, sehr hohen Temperaturen in Hitzeperioden oder auch Extremwetterereignissen werden vermehrt zu Lieferverzögerungen führen. Die Beeinträchtigung von Sicherheit, Wirtschaftlichkeit und Pünktlichkeit der gesamten Logistikkette und Probleme bei Just-in-Time-Lieferungen sind die Folge. Desweiteren werden Unternehmen zunehmend von Schäden an Gebäuden und der Gefährdung von Menschen durch häufigere und stärkere Extremwetterereignisse (z. B. Hangrutsche in bergigen Regionen) betroffen sein. Produktionsausfälle und Kosten für Reparaturen wie auch Vorsorgemaßnahmen stellen zusätzliche finanzielle Belastungen dar.

Umgekehrt ist mit Blick auf die Chancen aber auch von neuen Absatzmöglichkeiten auszugehen, zum Beispiel aufgrund der steigenden Nachfrage nach klimaverträglichen Produkten und Anpassungsgütern sowie der Entwicklung und Vermarktung von Klimaschutz- und anpassungsorientierten Technologien, Produkten oder Dienstleistungen. Die Entwicklung hin zu milderem Wintern wird von den Unternehmen zumeist als Chance verstanden. Infolge der Abnahme von Eis- und Frosttagen werden weniger winterliche Einschränkungen im Verkehrsbereich erwartet und damit eine Verbesserung der Unfallbilanz sowie ein Rückgang von Lieferverzögerungen.

Mit Blick auf die zu entwickelnden Anpassungsstrategien liegen wichtige Ansatzpunkte vor allem im Schutz der Beschäftigten, aber auch der Maschinen

und Materialien vor Hitze und Sonneneinstrahlung. Dazu gehören Klimatisierungen sowie Maßnahmen des vorbeugenden Arbeitsschutzes und neue Arbeitszeitmodelle. Möglichkeiten neben dem Einbau innovativer und klimaschonender Kühlung sind die Verbesserung der Gebäudeisolierung (Dach, Fassaden, Fenster etc.) und das Minimieren der inneren Wärmelasten, um den Kühlbedarf zu verringern. Ebenfalls bedeutsame Maßnahmen betreffen die Logistik sowie Strategien zur nachhaltigen Sicherung von Rohstoffen, beispielsweise durch strategische Allianzen mit Zulieferern oder den Aufbau eigener Ressourcenmärkte. Neben neuen oder geänderten Geschäftsmodellen sind auch der Schutz der Gebäude und die Sicherung der Produktionsprozesse wichtige Themen. Verbesserte bzw. angepasste Warenwirtschaftssysteme zur Absicherung der Rohstoffe und der Produktion spielen hier ebenfalls eine wesentliche Rolle.

In den beiden folgenden Abschnitten soll auf die Baubranche und produzierende Unternehmen näher eingegangen werden, um die Folgen des Klimawandels für Unternehmen im Handlungsfeld Industrie und Gewerbe, aber auch Ansatzpunkte für Anpassungsmaßnahmen weiter zu konkretisieren.

#### 4.11.1.1 Baubranche

Die Baubranche sieht sich besonders vom allgemeinen Temperaturanstieg, zunehmender Hochwassergefahr sowie weiteren Extremwetterereignissen betroffen. Extremwetterereignisse wie Starkregen können zu Überlastungen der Kanalisation und dadurch zu Überschwemmungen führen. Folge sind Bauablaufverzögerungen und eine Beeinträchtigung der Baustellenerreichbarkeit in den betroffenen Gebieten. Klimaveränderungen beeinflussen außerdem die Baugrundverhältnisse sowie die Beschaffenheit des Bodens oder die Menge des Oberflächenwassers. Zunehmende Hitze im Sommer kann vermehrt Straßenschäden wie zum Beispiel Blow-ups hervorrufen und somit den Lieferverkehr verzögern. Auch eine Beeinträchtigung der Gesundheit



der Mitarbeiter und steigende Kosten für Klimatisierung sind Risiken, mit denen gerechnet werden muss. Schließlich können sich der Rückgang der Tage mit Schneedecke und die Abnahme der Zahl der Frosttage problematisch auf die Terminierung von Bauvorhaben bzw. die Terminalsicherheit niederschlagen.

Aber die Baubranche gilt auch als großer Gewinner hinsichtlich der Folgen des Klimawandels. Neben der steigenden Nachfrage nach energetischer Sanierung, thermischer Gebäudeisolierung und der zunehmenden Bedeutung von diesbezüglichen Beratungsleistungen, sind mit der Zunahme von Extremwetterereignissen Aufträge für Vorsorge- und Schutzmaßnahmen, aber auch zur Beseitigung von Schäden verbunden. Der Bau von zusätzlichen Regenrückhaltebecken und unterirdischen Stauraumkanälen sowie die Modernisierung und der Ausbau der Kanalisation werden künftig immer wichtigere Auftragsfelder. Des Weiteren ist zu erwarten, dass das vermehrte Auftreten von Straßenschäden und Spurrillen durch höhere Temperaturen und deutlich mehr Hitzetagen zu einer Zunahme von Aufträgen zur Straßenausbesserung führen wird.

Auch die reduzierte Saisonalität (mildere Winter) ist vorteilhaft für die Branche, nicht zuletzt da ihre Attraktivität für Arbeitskräfte zunehmen dürfte. Höhere Temperaturen beeinträchtigen zwar die Verarbeitung einiger Materialien, können sich aber auch positiv auf Materialeigenschaften auswirken: So muss zum Beispiel Bitumen (Einsatz unter anderem im Straßenbau) zur Verarbeitung erhitzt werden; bei höherer Außentemperatur ist der energetische Aufwand hierfür geringer. Die Weiter- und Neuentwicklung von Baumaterialien bietet so einen wesentlichen Raum für Innovation. Zudem ist vor dem Hintergrund steigender Temperaturen im Sommer auch eine wachsende Nachfrage nach innovativen Belüftungssystemen zu erwarten.

Somit liegen die wichtigsten Anpassungsmaßnahmen für das Baugewerbe zum einen in der

Gesundheitsprävention, etwa durch Mitarbeiterschulungen, der Umsetzung flexibler Arbeitszeitkonzepte bei sehr hohen Temperaturen und der Intensivierung des Arbeitsschutzes, beispielsweise durch klimasensible Funktionskleidung. Zum anderen sind sie in Produktinnovationen zu finden, wie zum Beispiel durch die (Weiter-) Entwicklung von Baumaterialien könnte starken Temperaturschwankungen und/oder höheren UV-Strahlungen und Belastungen wirksam begegnet werden. Dies setzt auch eine Anpassung des Baudesigns an veränderte klimatische Bedingungen, vor allem Fassaden- und Dachisolierung, sowie die Berücksichtigung zukünftiger Extremereignisse und damit verbundener erhöhter bauphysikalischer Belastungen bei Neubauten voraus.

#### 4.11.1.2 Produzierende Wirtschaft

Zentrales Thema in der produzierenden Wirtschaft sind die Risiken, die sich infolge der steigenden Lufttemperaturen, zukünftig vor allem im Sommer ergeben können. Höhere Temperaturen in Büros und Produktionshallen beeinträchtigen Mensch und Maschine und führen zu sinkender Produktivität. Gleichzeitig steigen die Energie- und Investitionskosten für die erforderliche Kühlung der Produktionsmaschinen. Die erwartete Abnahme der Niederschlagssumme in den Sommermonaten kann dieses Problem noch verschärfen, wenn Kühlwassermangel kompensiert werden muss. Zudem wird die Zunahme an Hitzetagen sowohl beim Transport als auch bei der Materiallagerung – in Hallen wie auch im Freien – ein höheres Aufkommen von Materialschäden hervorrufen.

Infolge von Extremwetterereignissen wie Hitze- und Trockenperioden, können Schäden an Straßen und Schienen die Sicherheit, Wirtschaftlichkeit und Pünktlichkeit der gesamten Logistikkette beeinträchtigen. Außerdem können Gebäudeschäden beispielsweise durch Sturm, Hagel oder Blitz eintreten, was mit hohen Reparaturkosten verbunden sein kann.

Neben solchen direkten Klimafolgen wird der fortschreitende Klimawandel für die produzierende Wirtschaft auch zu einer Reihe indirekter Folgen wie etwa Gesetzes- und Nachfrageänderungen führen. Viele Unternehmen gehen davon aus, dass eine Verschärfung der direkten physischen Einwirkungen auch mit strikteren regulativen Klimaschutz-Vorgaben (Energieeinsparverordnung, Emissionsminderung, Gewässerschutz etc.) einhergeht. Auch letztere könnten für die Unternehmen einen zusätzlichen Aufwand zur Umsetzung dieser Vorgaben sowie Investitionskosten bedeuten.

Neben sinkenden Heizkosten bietet sich aber der produzierenden Wirtschaft im Winter vor allem die Chance, mit weniger logistischen Problemen konfrontiert zu sein und zudem mit Kosteneinsparungen rechnen zu können, etwa durch den geringeren Bedarf an Winterdienstleistungen und dem Rückgang von Frostschäden an der Infrastruktur. Im Zuge des erwarteten Anstiegs der Lufttemperaturen im Sommer sowie einer Zunahme der Hitzetage kann sich die Eigenstromproduktion durch Fotovoltaik erhöhen, wodurch eine stärkere Eigennutzung ermöglicht wird. Auch die Entwicklung und Vermarktung von

Anpassungs- und Klimaschutzprodukten ist ein Feld, in welchem Unternehmen von den klimatischen Veränderungen profitieren können.

Schwerpunkte der Anpassungsmaßnahmen für die produzierende Wirtschaft liegen in den Bereichen Energie, Rohstoffe und Produkte, Arbeitnehmerschutz sowie Monitoring der unternehmensspezifischen Auswirkungen des Klimawandels. Die unten aufgeführte Tabelle zeigt einige Beispiele:

**Literatur**

[1] Die Bundesregierung (2011): Aktionsplan Anpassung der Deutschen Anpassungsstrategie an den Klimawandel  
 [2] Bayerisches Staatsministerium für Umwelt und Gesundheit (2009): Bayerische Klima-Anpassungsstrategie (BayKLAS). München  
 [3] bifa (2009): Anpassung an den Klimawandel: eine Befragung oberbayerischer Unternehmen (= bifa-Text 45). Augsburg  
 [4] Bayerisches Staatsministerium für Umwelt und Verbraucherschutz (2014): Folgen des Klimawandels – Perspektiven für das Baugewerbe, den Handel und die produzierende Wirtschaft. Ein Leitfaden. München  
 [5] bifa (2013): Klimawandel – müssen sich Verkehr, Tourismus und Energieversorgung anpassen? (= bifa-Text 59). Augsburg  
 [6] Stechemesser & Günther (2011): Herausforderung Klimawandel. Auswertung einer deutschlandweiten Befragung im verarbeitenden Gewerbe. In: Karczmarzyk, A.; Pfriem, R. (Hrsg.): Klimaanpassungsstrategien von Unternehmen. Marburg

Tabelle 4.11\_1: Anpassungsmaßnahmen für die produzierende Wirtschaft

	<b>Maßnahmen</b>
<b>Energie</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Speicherung und energetische Nutzung anfallender Abwärme zur Reduzierung der energetischen Verluste; gleichzeitig wird verhindert, dass in den Sommermonaten die Hitzebelastung der Mitarbeiter zusätzlich erhöht.</li> <li>• Prüfung von Kraftwärmekopplung beispielsweise zur Kühlung der Fertigungshallen</li> </ul>
<b>Rohstoffe und Produkte</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Anpassung der Logistik- und Lagerkonzepte zum Schutz der Rohstoffe</li> <li>• Innovative klimasensitive Produktanpassungen</li> </ul>
<b>Mitarbeiterschutz</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Prüfung von Funktionskleidung, um die Belastung der Mitarbeiter in Hitzeperioden zu verringern.</li> <li>• Sensibilisierung der Mitarbeiter für die Themen Hitze- und Sonnenschutz</li> </ul>
<b>Monitoring</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Monitoring der unternehmensspezifischen Auswirkungen des Klimawandels: Strukturierte Erfassung von wetterbedingten Produktionsausfällen, Materialschäden oder anderen klimabedingten Störungen der Betriebsabläufe.</li> <li>• Monitoring der politischen Rahmenbedingungen</li> </ul>

## 4.12 Verkehr

### 4.12.1 Klimafolgen und Anpassung

Der Klimawandel wird sowohl den Personen- wie auch den Güterverkehr vor Herausforderungen stellen. Schon jetzt muss auf besondere Wetterereignisse reagiert werden, wenn auch nur in Einzelfällen.

Die wirtschaftlichen Folgen von Extremwetterereignissen betreffen vor allem den Güterverkehr: Die gesamte Logistikkette kann ins Stocken geraten. Da die Produktion heutzutage meist "just-in-time" ausgerichtet ist, müssen die Zuliefer- und Produktionstermine genau aufeinander abgestimmt sein und auf einem getakteten Güterverkehr aufbauen. Wenn Rohstoffe zu spät angeliefert werden, fertige Produkte zu spät abgeholt werden und Abnehmer auf ihre Ware warten müssen, kommt es zu Produktionsausfällen und erheblichen Einbußen.

### 4.12.2 Auswirkungen des Klimawandels auf die Straßeninfrastruktur

Durch den Klimawandel sind folgende erhöhte Gefährdungen der Straßenverkehrsinfrastruktur absehbar, die auch zu Gefährdungen und Behinderungen der Verkehrsteilnehmer führen können:

- Stärkere Beanspruchung des Straßenkörpers durch häufigere Frost-Tau-Salz-Wechsel im Winter sowie Starkniederschläge, Gewitter, Hitze- und Trockenperioden im Sommer (u. a. Blow-Ups, Aquaplaning, Hangrutschungen, Felssturz, Schäden an Bäumen und Vegetation)
- Größere Temperaturschwankungen an Straßenbrücken
- Kapazitätsprobleme bei den Straßenentwässerungseinrichtungen durch höhere Niederschlagspitzen (Rückstau, Überflutungen)

Für den Straßenbetriebsdienst (Winterdienst, Grünpflege) sind keine erheblichen Auswirkungen durch den Klimawandel bis zum Jahr 2030 zu erwarten.

### 4.12.3 Auswirkungen des Klimawandels auf den Radverkehr

Die Nutzungsintensität des umweltfreundlichen Verkehrsmittels Fahrrad ist bis heute sehr wetterabhängig. Im Zuge der Klimaveränderungen treten vermehrt und heftigere ungünstige Wetterereignisse auf, die den Radverkehr negativ beeinflussen. Gewässernahe Radverkehrsinfrastrukturen wie zum Beispiel flussbegleitende touristische Freizeitwege sind durch stärkere Hochwasserereignisse häufiger und länger unbenutzbar und werden nachhaltiger zerstört.

Demgegenüber können infolge steigender Durchschnittstemperaturen länger anhaltende und wärmere Perioden, wie zum Beispiel im Herbst, die Radverkehrsaison verlängern.

Über eine stärkere Berücksichtigung wichtiger Radverkehrsrouten im Winterdienst wird darüber hinaus versucht, die Fahrradsaison auch in der Winterzeit aufrechtzuerhalten. Bauliche Anpassungen (Beleuchtung, Überdachung, Fahrbahnheizung etc.), um die Radverkehrsinfrastruktur wetterunabhängiger zu gestalten, sind allerdings sehr kostenintensiv und nur in sehr begrenztem Rahmen realisierbar.

### 4.12.4 Behinderungen des Schienenverkehrs durch Starkwindereignisse

In den vergangenen Jahren kam es durch Starkwindereignisse vermehrt zu Behinderungen des Bahnverkehrs in Bayern. Nachdem es in verschiedenen Fällen zu Kollisionen von Zügen mit abgebrochenen Ästen oder umgestürzten Bäumen gekommen war, wollen die Eisenbahnverkehrsunternehmen das Risiko für solche Unfälle nicht mehr übernehmen und wandten sich an den Infrastrukturbetreiber DB Netz AG. In der Folge wurde ein zweistufiges Verfahren vereinbart, um die Unfallgefahr zu reduzieren.

## Beispiele für konkrete Anpassungsmaßnahmen

### Anpassungsmaßnahmen seit April 2013

- Zum 1. April 2013 trat eine Richtlinie in Kraft, welche die DB Netz AG gemeinsam mit dem Eisenbahnbundesamt als zuständige Aufsichtsbehörde erarbeitet hat. Sie legt fest, dass bei Sturmwarnungen des Deutschen Wetterdienstes für den jeweiligen Landkreis auf besonders windbruchgefährdeten Streckenabschnitten eine Geschwindigkeitsbegrenzung auf 80 km/h angeordnet wird.
- Die DB Netz AG sagt zu, den Grünschnitt zu intensivieren und Rückstände in diesem Bereich aufzuarbeiten, um die uneingeschränkte Sicherheit auf den hiervon betroffenen Streckenabschnitten wieder herzustellen.

Durch die genannten Maßnahmen konnte die Unfallgefahr zwar deutlich reduziert werden, gleichzeitig verschlechterte sich jedoch die Pünktlichkeit auf den betroffenen Strecken deutlich. Hier wirkt sich nachteilig aus, dass die ausgegebenen Unwetterwarnungen häufig zeitlich und räumlich zu unspezifisch sind. In der Praxis ergeben sich hierdurch unnötige Verzögerungen und dadurch bedingte Verspätungen und Anschlussverluste. Dies stößt in der Öffentlichkeit zunehmend auf Kritik und sorgt für entsprechende Anfragen im Bayerischen Landtag.

### Überarbeitete Anpassungsmaßnahmen

- Als Reaktion darauf greift die DB Netz AG inzwischen auf Wetterdienste mit räumlich hoch aufgelösten Daten zurück und hat sogenannte Wetterlotsen eingerichtet. Dies sind Fahrdienstleiter an den jeweiligen Strecken, welche die Wetterdaten auswerten und auf dieser Basis die Warnzeiten eingrenzen können. Hierdurch reduzieren sich die Verspätungen durch Sturmwarnungen um etwa 50 %.
- Gleichzeitig arbeitet die DB Netz AG kontinuierlich daran, durch intensiven Grünschnitt die Zahl der mit sturmbedingten Geschwindigkeitsbegrenzungen belegten Streckenabschnitte zu reduzieren.

Die DB Netz AG hat sich zum Ziel gesetzt, baldmöglichst sämtliche Strecken auf einen einheitlichen Stand gebracht zu haben. Sofern dies gelingt, könnten ab diesem Zeitpunkt Geschwindigkeitsbegrenzungen vollständig entfallen.

### 4.12.5 Auswirkungen des Klimawandels auf die Binnenschifffahrt

Auch die potentiellen Auswirkungen des Klimawandels auf die Binnenschifffahrt sind vielfältig. Die Binnenschifffahrt ist bereits gegenwärtig durch wechselnde Pegelstände sowohl von Niedrig- als auch von Hochwasser betroffen. Hinzu kommen mögliche Beeinträchtigungen durch Eisbildung im Winter. Es ist zunächst, bis 2050, jedoch nicht mit unmittelbaren, ausschließlich durch Klimaveränderungen bedingten Investitionsentscheidungen zu rechnen. Hierfür sind die kurzfristigen klimabedingten Auswirkungen auf diese Ereignisse nicht stark genug bzw. sie werden durch andere, wirtschaftliche Faktoren überlagert. Langfristig bis in das Jahr 2100 jedoch sind durch den Klimawandel verursachte Veränderungen der Transportbedingungen in der Binnenschifffahrt wahrscheinlich.

### Niedrigwasser

Die möglichen Abladetiefen eines Schiffes variieren in Abhängigkeit vom Wasserspiegel. Bei Niedrigwasser muss je nach Schiffstyp und Fahrrinntiefe die Beladung des Schiffes entsprechend angepasst und das Schiff gegebenenfalls geleichtert und das Transportgut zwischengelagert oder umgeladen werden. Dies führt zu höheren Transportkosten. Im Extremfall kann es zu einer Einstellung der Schifffahrt aufgrund einer zu geringen Wassertiefe der Fahrrinne kommen. Für den hydrologischen Winter sind die prognostizierten Abflussveränderungen uneinheitlich, für den hydrologischen Sommer scheint eine Abnahme der Abflussmenge wahrscheinlich, so dass Niedrigwassersituationen verstärkt werden können. Von gravierenden Veränderungen ist kurzfristig bis 2050 jedoch nicht auszugehen. Für die Nutzbarkeit der Schifffahrt ist zunächst also keine



grundsätzliche Veränderung zu erwarten (vgl. Kapitel 4.2.2). Bereits in der Vergangenheit ist es zu Anpassungsmaßnahmen in Bezug auf Niedrigwasser gekommen. Zum einen kann Niedrigwasser durch eine vorausschauende Regulierung des Wasserstandes (z. B. Stauwehre, die die Abflussverhältnisse puffern) insbesondere an Main und Main-Donau-Kanal begegnet werden, zum anderen kann je nach Lage und Beschaffenheit der Wasserstraße mithilfe des Niedrigwasserinformationsdienstes durch die Binnenschifffahrt bereits frühzeitig auf zu erwartende Pegelveränderungen reagiert werden (vgl. Kapitel 4.2.2). Deutlich geringer ist die Wirksamkeit vorausschauender Maßnahmen hingegen an den unregulierten Abschnitten der Donau. Außerdem kann dem Niedrigwasser eingeschränkt auch mit schiffsseitigen Maßnahmen bzw. Innovationen im Schiffbau begegnet werden, wie etwa einer Gewichtsreduzierung.

### Hochwasser

Durch Hochwasser kann ebenfalls eine Einschränkung der Schifffahrt erfolgen. Die Durchfahrtshöhe von Brücken limitiert beispielsweise die Beladung. Hochwasser kann dann zum Beispiel dazu führen, dass weniger oder keine Container übereinander gestapelt werden können. Die weiteren konkreten Begrenzungen der Schifffahrt variieren in Abhängigkeit von der Stärke des Hochwassers. Sie sind zudem je nach Gewässer unterschiedlich und unter anderem von der Höhe des Ufers sowie den Abmessungen und der Technologie der Schiffe abhängig. Die zunehmende Strömungsgeschwindigkeit bei Hochwasser erschwert ein sicheres Manövrieren. Hinzu kommen Gefahren durch Treibgut, so dass die Schifffahrt unter Umständen teilweise oder gar ganz einzustellen ist. Die Ursachen (z. B. Schneeschmelze, Starkregenereignisse, Staulagen) und Stärke eines Hochwassers sind sehr unterschiedlich. Projektionen lassen für die Zukunft keine einheitliche Aussage zu. Je nach Ort und Jahreszeit sind sowohl eine Zu- als auch Abnahme der Hochwasserereignisse in Qualität und Quantität möglich (vgl. Kapitel 4.2.3). Die Maßnahmen im Rahmen des

Hochwasserschutzprogramms können teilweise auch der Binnenschifffahrt zu Gute kommen. Mit Vermeidungsmaßnahmen etwa in höher gelegenen Gewässerabschnitten und Rückhalteeinrichtungen können die schadhafte Auswirkungen eines Hochwassers ggf. begrenzt werden, so dass weniger Einschränkungen der Schifffahrt auftreten oder diese schneller wieder aufgehoben werden können (vgl. Kapitel 4.2.3).

### Eisgang

Eisgang auf Flüssen und Kanälen sowie Eisbildung an Schleusen bzw. staugeregelten Abschnitten ist auf den bayerischen Wasserstraßen weniger häufig zu beobachten, kann die Schifffahrt aber ebenfalls behindern oder gar zu deren Einstellung führen. Die Erhöhung der globalen Lufttemperatur spiegelt sich grundsätzlich auch in den Gewässertemperaturen wider. Daher besteht die Aussicht, dass eisbedingte Ausfalltage abnehmen. Ob steigenden Gewässertemperaturen atmosphärische Einflüsse wie die Wirkungsweise des Golfstroms entgegenstehen, muss offenbleiben und wird beobachtet. Zudem kann im Zuge der Energiewende das Fehlen von erwärmtem Kühlwasser aufgrund der Stilllegung von Atomkraftwerken eine Wärmeentlastung in den Wasserstraßen bewirken. Hierdurch könnten die klimabedingten Auswirkungen teilweise überlagert werden, was ebenfalls einer weiteren Beobachtung bedarf.

## 4.13 Energieversorgung

### 4.13.1 Klimafolgen und Anpassung

Der Energiesektor, selbst ein komplexes und international dicht vernetztes System, wird in allen Stufen seiner Wertschöpfungskette – von der Erzeugung und Übertragung über die Verteilung bis zur Nutzung – durch Wetter- und Klimaverhältnisse auf vielfältige Weise beeinflusst. Allein die Temperatur wirkt sich sowohl auf die Stromnachfrage als auch auf den Nutzungsgrad von Kraftwerken und das Leistungspotenzial Erneuerbarer Energien aus. So haben im Juli 2003 und Juli 2010 einige Kraftwerke an Flüssen ihre Leistung drosseln müssen, da nicht mehr genügend bzw. entsprechend temperiertes Kühlwasser zur Verfügung stand. Ebenfalls im Juli 2010 waren Klimaanlage und Kühlgeräte in nahezu allen Geschäften ausverkauft – nicht nur ein Hinweis auf eine neue Dimension von Hitze in ganz Deutschland, sondern auch auf die steigende Stromnachfrage durch den massenhaften Einsatz solcher Geräte. Weiteres Anschauungsmaterial für die Wetter- und Klimaabhängigkeit der Energieversorgung liefern Meldungen über den Zusammenbruch der Stromversorgung aufgrund ungewöhnlich hoher Windstärken, im Fall von Frühjahrsstürmen oftmals verbunden mit Neuschnee, die Strommasten zusammenbrechen lassen. Allein wegen des Orkans „Niklas“ sind im Frühjahr 2015 mehrere zehntausend Haushalte in Oberbayern und der Oberpfalz sogar über Nacht ohne Strom geblieben, da Bäume in Mittelspannungsleitungen, zum Teil auch in Hochspannungsleitungen gestürzt sind.

In Bayern haben sich seit 1960 die durchschnittlichen Jahrestemperaturen infolge des Klimawandels um 1,6 °C erhöht (vgl. GLOWA Danube). Die Szenarien der Klimaforschung erwarten, dass sich dieser Trend weiter fortsetzt, und zu einer Erwärmung zwischen 1 und 2,5 °C für den Zeitraum 2021 bis 2050 gegenüber dem Zeitraum von 1961 bis 1990 führt. Dabei wird es regional und jahreszeitlich große Unterschiede geben. Insgesamt wird es weniger Frosttage und mehr Hitzetage, also Tage mit Höchsttemperaturen über 30 °C, geben.

Mit steigenden Temperaturen gehen mehr und längere Trockenperioden einher.

Auch wenn sich die jährliche Niederschlagsmenge aller Voraussicht nach nur geringfügig ändern wird, ist hinsichtlich der regionalen und saisonalen Verteilung mit deutlichen Veränderungen zu rechnen. Der erwartete Rückgang der Sommerniederschläge und die hieraus resultierende Zunahme von Trockenperioden bedeuten für die Energieversorgung vornehmlich Risiken: Die geringere Verfügbarkeit von Wasser hat zu Auswirkungen auf die Betreiber von Wasserkraftwerken, als auch von thermischen Kraftwerken. Erstere produzieren Strom aus fließendem Wasser, letztere nutzen Fließgewässer oder Grundwasser zur Kühlwassergewinnung. Zum anderen wird auch weniger Biomasse erzeugt werden, was die Biogaserzeugung beeinträchtigt. Die Betreiber von Fotovoltaikanlagen werden vom Rückgang der Sommerniederschläge wiederum profitieren, da sich die Erträge ihrer Anlagen erhöhen.

Steigende Temperaturen werden jedoch zu einem sinkenden Wärmeverbrauch und damit zu Umsatzeinbußen in der Energiebranche führen. Besonders im Haushaltskundenbereich wird ein Rückgang des Verbrauchs erwartet. Andererseits führen aber die höheren Temperaturen und die zunehmende Anzahl von Hitzetagen zu einem Anstieg des Kühlbedarfs. So werden besonders im gewerblichen Bereich zunehmend Klimaanlage eingesetzt werden müssen (vgl. Kapitel 4.11), wodurch der Stromabsatz vor allem in den Sommermonaten ansteigen wird und hier möglicherweise ein Ausgleich der winterlichen Einbußen im Wärmebereich erfolgen könnte.

Neben steigenden Temperaturen und dem Rückgang der Sommerniederschläge stellen vor allem Extremwetterereignisse für die Energieerzeugung und -verteilung ein enormes Risiko dar. Auch wenn die Szenarien zur künftigen Entwicklung von Stürmen, Dürren oder Trockenperioden im Vergleich zu Temperatur- und Niederschlagsentwicklungen

weniger belastbar sind, werden für Extremwetterereignisse bereits in den nächsten Jahrzehnten mit einer hohen bis sehr hohen Wahrscheinlichkeit zunehmen. Die Unternehmen des Energiesektors stehen hier vor großen Herausforderungen: Das vermehrte Auftreten von Extremwetterereignissen stellt nicht nur wegen der zu erwartenden Schäden an Gebäuden und Anlagen (z. B. durch Überspannung an Steuerungseinheiten) sowie an Strom- und Fernwärmeleitungen ein hohes finanzielles Risiko dar, sondern es geht dabei auch um die Frage, wie die Energieversorgungssicherheit unter klimawandelbedingten Veränderungen gewährleistet werden kann.

Auch die erneuerbaren Energien sind vom Klimawandel betroffen: So haben Veränderungen der Windgeschwindigkeit unmittelbar Einfluss auf die Stromerzeugung aus Windenergie, was sowohl zu höheren Erträgen, als auch zu häufigeren Abschaltungen der Anlagen führen kann – letzteres vor allem im Fall vermehrter Stürme. Insgesamt dürften durch zunehmende Extremwetterereignisse die Anforderungen an die Betriebssicherheit nicht nur von Wind-, sondern auch von Solaranlagen steigen. Aber auch für Wasserkraftwerke sind Betriebs Einschränkungen bei Überschwemmungen oder Trockenperioden potenzielle Klimafolgen. Auch konventionelle Energieerzeugungsunternehmen müssen ihre Sicherheitskonzepte an die sich ändernden Klimabedingungen anpassen.

Trotz dieser Risiken und großen Herausforderungen ist in vielen Bereichen der Energiewirtschaft eine positive Grundstimmung hinsichtlich möglicher Auswirkungen des Klimawandels zu erkennen. So werden die erneuerbaren Energien durchaus als „Gewinner“ des Klimawandels wahrgenommen. Gleichzeitig besteht aber großer Handlungsbedarf im Ausbau der Netze und der Entwicklung von Speichersystemen, um die Überschüsse aus erneuerbaren Energien speichern und die Versorgungssicherheit gewährleisten zu können. Intelligente Netze, „Smart Grids“, sollen die Energieversorgung über kommunikative

Vernetzung und Steuerung von Erzeugern, Verbrauchern, Energiespeichern und Netzbetriebsmitteln sicherstellen und optimieren. Und auch virtuelle Kraftwerke, welche den Zusammenschluss von kleinen, dezentralen Kraftwerken beinhalten, sind hier ein wichtiges Thema.

Neben den direkten klimatischen Veränderungen haben auch indirekte Folgen des Klimawandels, wie der Wandel wirtschaftlicher und politischer Rahmenbedingungen, Einfluss auf den Energiesektor. Änderungen in der nationalen Gesetzgebung und den EU-Richtlinien zwingen nicht nur zu Anpassungen, sondern können auch die Planungssicherheit der Unternehmen beeinträchtigen und zudem gesteigerten bürokratischen Aufwand und erhebliche Zusatzkosten erzeugen. Vor diesem Hintergrund konzentrieren sich die Anpassungsmaßnahmen an die Folgen des Klimawandels vor allem auf den Ausbau und die Anpassung der Netze, der technischen Ausstattung (z. B. „Repowering“), der baulichen Gegebenheiten sowie auf Forschung und Entwicklung (vgl. Tabelle 4.13\_1). Insbesondere der erste und dritte Maßnahmenkomplex dienen vorrangig dem Klimaschutz und der Energiewende (besonders auch Beispiel 4.13.1.1), haben aber Synergieeffekte in der Klimaanpassung, etwa um witterungsbedingte Bedarfsspitzen und eine allgemeine innerjährliche Umverteilung des Energiebedarfs auszugleichen.

	<b>Maßnahmen</b>
<b>Ausbau und Entwicklung der Strukturen</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Energie- und Wärmenetze ausbauen, z. B. um Abwärme von Stromerzeugung oder industriellen Anlagen zu nutzen</li> <li>• Trend zu dezentraler Energieerzeugung berücksichtigen</li> <li>• Vernetzung: Bereits ein hohes Potenzial an energieproduzierenden Systemen vorhanden, die miteinander vernetzt werden könnten (z. B. Kopplung von Kleinstkraftwerken in Wohnhäusern)</li> <li>• Intelligente Systeme entwickeln mit bedarfsgerechter Regelung: Entwicklung von Smart-Grids und virtuellen Kraftwerken</li> <li>• Ausbau von Kälte-Wärmeverbänden</li> </ul>
<b>Technische Ausstattung und bauliche Maßnahmen</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Anpassung der Anlagentechnik an veränderte Bedingungen</li> <li>• Schutz der Anlagen z. B. durch eine hochwassersichere Ausrüstung und Verstärkung des Abwassernetzes</li> <li>• Notwasseranschlüsse für Kraftwerke falls Flusswasserkühlung in Trockenperioden nicht möglich</li> <li>• Bau von Kühltürmen, Anpassung der Kühlsysteme</li> <li>• Bau von Wasserspeichern zum Ausgleich von Hoch- und Niedrigwasser und als Energiespeicher</li> </ul>
<b>Forschung und Entwicklung</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Entwicklung von Speichersystemen, um Energieüberschuss zu speichern (z. B. Pumpspeicherkraftwerke, Druckluftspeicher, Wärme- und Kältespeichersysteme, Stromspeicher)</li> <li>• Materialforschung: bessere Stromleiter mit geringerem Energieverlust</li> <li>• Alternative Technik zur Weiterleitung</li> <li>• Zusätzliche Energiequellen erschließen</li> </ul>

Tabelle 4.13\_1: Anpassungsmaßnahmen für die produzierende Wirtschaft



In den folgenden Abschnitten wird auf drei der in Tabelle 4.13\_1 genannten Maßnahmen näher eingegangen.

#### 4.13.1.1 Smart Grids

Während die Erzeugung von Strom aus erneuerbaren Energien unter anderem von Sonne und Wind abhängig ist, folgt der Verbrauch des Stroms meist eingefahrenen Nutzergewohnheiten und Tagesabläufen. Angebot und Nachfrage stehen somit oftmals nicht im Einklang. Um dies zu ändern, müssen für Erzeuger und Verbraucher neue Marktformen (SMART market) entwickelt werden, die als Anreiz dienen, bisherige Gewohnheiten zu ändern. Aus technischer Sicht sind hier neben dem Aufbau von Kommunikationswegen zudem intelligente Mess-, Steuer- und Regelgeräte bei Verbrauchern und Erzeugern notwendig (SMART metering).

In letzter Konsequenz ist ein intelligentes Stromnetz (SMART grid) erforderlich, das Energieerzeugungs- und Energieverbrauchsmuster erfassen und abgleichen kann, um so einen Ausgleich zwischen Stromerzeugung und -nachfrage „herzustellen“. Es geht darum, gezielt in diese Muster einzugreifen, um Angebot und Nachfrage zu synchronisieren.

Der einfachste Fall ist ein intelligentes Stromnetz in einem Einfamilienhaus, welches eine Fotovoltaik-Dachanlage zur Eigenstromversorgung installiert hat. Waschmaschine, Gefriertruhe, Spülmaschine und andere elektrische Verbraucher werden so gesteuert, dass ein möglichst großer Anteil an Eigenstrom genutzt werden kann. Unter anderem kann Überschussstrom mittels Wärmepumpe noch zur anteiligen Deckung des Wärmebedarfs und zum Laden eines Elektromobils genutzt werden. Der Anreiz liegt in der Einsparung von Netzstrom, der durch günstigeren Eigenstrom ersetzt wird.

#### 4.13.1.2 Energieerzeugung aus Wasserkraft

Vor allem für die Wasserkraft werden negative Auswirkungen befürchtet. Durch die frühere Schneeschmelze und die Zunahme von Niedrigwasserphasen bzw. die allgemein geringere Wasserverfügbarkeit kommt es zu Problemen bei der Kapazitätsauslastung: je unregelmäßiger der Abfluss, desto schlechter ist die Kapazitätsausnutzung.

Ergebnisse des Verbundprojekts GLOWA Danube (Globaler Wandel des Wasserkreislaufs<sup>1</sup> [1]) zeigen, dass beispielsweise die zu erwartenden Änderungen an der Oberen Donau zu einer Verringerung des verfügbaren Wasserdargebotes führen, so dass Wasser künftig knapper, jedoch nicht knapp werden wird. So wird es – neben zahlreichen weiteren Folgen – zu einer Reduzierung der Wasserkraftproduktion der vorhandenen Wasserkraftanlagen kommen. Für den derzeitigen Hauptträger der erneuerbaren Energie im Einzugsgebiet ist mit einem Rückgang um bis zu 16 % der Leistung zu rechnen (Abbildung 4.13\_1). Besonders während der Sommermonate sind starke Einbußen anzunehmen, die zusätzlich von einer hohen jährlichen Variabilität gekennzeichnet sind. In den Wintermonaten dagegen kommt es durch die Änderung der Niederschlagsart von Schnee zu Regen zu leichten Leistungssteigerungen mit einer geringen jährlichen Variabilität. Besonders in nicht alpin geprägten Gebieten, die überwiegend durch die Abflusskomponente Regen geprägt sind, werden die sommerliche Variabilität und der Produktionsrückgang spürbar sein [2].

Ein wesentliches Feld für Anpassungsmaßnahmen liegt im Ausbau von Wasserspeichern in Form von Speicherteichen, Speicherseen oder unterirdischen Wasserspeichern zum Ausgleich von Hoch- und Niedrigwasser. Zusätzlich bieten Wasserspeicher aber auch die Möglichkeit als Energiespeicherung zu fungieren.

<sup>1</sup> [www.glowa.org](http://www.glowa.org) und [www.glowa-danube.de](http://www.glowa-danube.de)

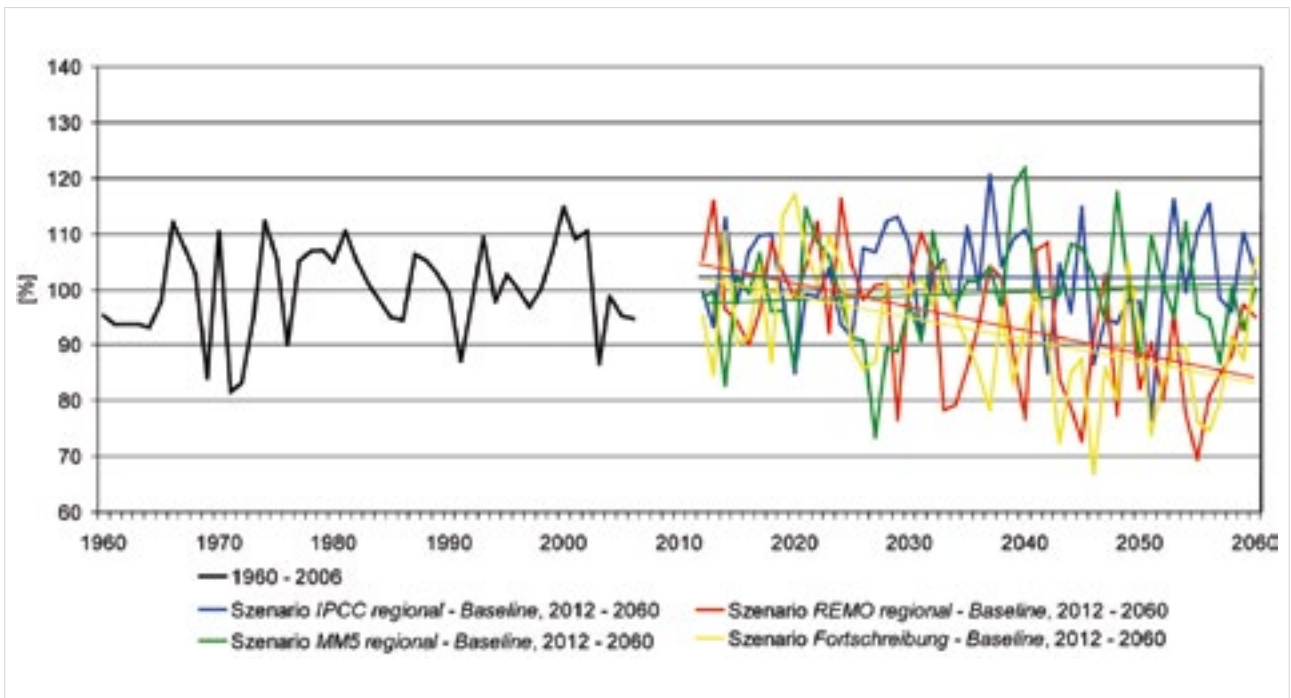


Abbildung 4.13\_1: Simulierte Hydraulizität (Verhältnis von aktueller Jahresleistung zur langjährigen mittleren Leistung) von 1960 bis 2060 im Einzugsgebiet der Oberen Donau (Quelle: GLOWA-Danube-Projekt 2001–2011).

#### 4.13.1.3 Klimatisieren und Kühlen

Einschränkungen des Kühlwasserangebots für Wärmekraftwerke stellen die Energiebranche, aber auch andere Industriezweige, die Wasser zur Kühlung ihrer Anlagen benötigen, vor große Probleme. Die Verknappung des Kühlwasserangebots entsteht infolge zurückgehender Sommerniederschläge, steigender Wassertemperaturen und einer höheren Verdunstung. Dadurch werden Kraftwerke ihre Leistung häufiger drosseln müssen, wenn zum Abtransport der Abwärme nicht ausreichend Wasser in Flüssen zur Verfügung steht. Hier muss nach alternativen Kühlmöglichkeiten gesucht werden.

Eine positive Entwicklung für die Energiewirtschaft ist, dass das gesamte Marktsegment „Klimatisieren und Kühlen“ wachsen wird. Neben dem Energieabsatz ist vor allem das Angebot neuer Dienstleistungen und die Entwicklung von Kühlungsalternativen für Wärmekraftwerke ein wichtiger Bereich. Wichtige Anpassungsmaßnahmen, um die Kühlwasserverfügbarkeit zu sichern, sind der Bau von

Notwasseranschlüssen für Kraftwerke sowie der Bau von zusätzlichen Kühltürmen. Neben den abnehmenden Kühlkapazitäten des Flusswassers infolge steigender Wassertemperaturen werden für die Wiedereinleitung des entnommenen Flusswassers verschärfte Vorgaben für Temperaturgrenzen erwartet. Kühltürme bieten den Vorteil, dass die Prozesskühlung unabhängig von Fließgewässern erfolgen kann und somit diese Problematik umgangen werden können. Da sich das Kühlwasser in Kühltürmen in einem geschlossenen Kreislauf befindet, in welchem dem Wasser die Wärme durch den Kontakt mit Luft entzogen wird, kann so die Abhängigkeit von externen Faktoren verringert werden.

Ebenso wichtig erscheinen die Anpassung der Anlagentechnik an ein verändertes Temperaturniveau, um Schäden durch Hitze vorzubeugen, sowie der Schutz von Anlagen vor den Auswirkungen von Extremwetterereignissen zum Beispiel durch hochwassersichere Ausrüstung und die Verstärkung des Abwassernetzes.

#### Literatur

- [1] GLOWA-Danube Projekt (2010): Global Change Atlas. URL: [www.glowa-danube.de/atlas/atlas.php](http://www.glowa-danube.de/atlas/atlas.php) (Stand: 03. Juli 2013).  
 [2] Koch et al. (2011): How will hydroelectric power generation develop under climate change scenarios? A case study in the Upper Danube basin. *Energies*, 4, doi 10.3390/en4101508.

## 4.14 Alpen und alpine Naturgefahren

### 4.14.1 Alpen als besonders sensibler Naturraum für Klimaänderungen

Die bayerischen Hochgebirge liegen am Nordrand der Ostalpen und beheimaten vielfältige Landschaftsformen in unterschiedlichen alpinen Höhenstufen. Die Ökosysteme werden geprägt durch komplexe Wechselwirkungen zwischen Klima, Boden und Vegetation. Im alpinen Bereich werden sie zusätzlich durch ein kleinräumiges Mosaik von Lebensräumen in verschiedenen Höhenstufen differenziert. Die reichhaltigste Naturlandschaft Bayerns ist aus diesem Grund vor allem im bayerischen Hochgebirge zu finden, sowohl was die Artenvielfalt als auch die Landschaftsformen betrifft.

Allgemein sind die Alpen durch besonders starke räumliche Klimaschwankungen auf engem Raum gekennzeichnet. Diese lokalklimatischen Unterschiede hängen insbesondere von folgenden wichtigen Faktoren ab:

- Der Seehöhe (m NN); Der Lage in Luv oder Lee gegenüber der vorherrschenden Windrichtung und der dadurch bedingten Ablagerung oder Verwehung von Schneemassen;
- Der Lage im Relief der Berglandschaft
- Der mittäglichen Sonneneinstrahlung auf Hang- oder Steiflächen.

Aufgrund dieser Vielfalt von Einflüssen sind die klimatischen Verhältnisse – nicht nur in den bayerischen Alpen – auf engem Raum einem starken Wechsel unterworfen [1]. In der alpinen Stufe gibt es daher kein einheitliches Klima. Die Temperaturen nehmen in der Regel um 0,5 bis 0,6 °C pro 100 m Höhendifferenz ab. Temperaturinversionen – also eine Temperaturzunahme mit der Höhe – sind im Herbst, Winter und Frühjahr bis zu einer Höhe von mindestens 1000 m NN üblich. Mit jährlichen Niederschlagssummen von im Mittel 1200 mm in Tallagen bis über 2500 mm in Gipfellagen sind die nördlichen Kalkalpen die niederschlagsreichsten Gebiete in Deutschland. Diese hohen Werte sind das Ergebnis von konvektiven Niederschlägen, die

vor allem bei Tiefdruckwetter im Sommer fallen und aus advektiven Stauniederschlägen, die bevorzugt im Winterhalbjahr fallen, wenn atlantische Luftmassen aus nordwestlicher bis westlicher Richtung auf die Gebirgswelt aufprallen [2]. Zusammen mit weiteren orographischen Faktoren, wie Steilheit des Geländes und den kleinräumigen Substrattypen, Bodenaufgaben und Bodentypen führen diese klimatischen Faktoren zu einem Vegetationsmosaik, das in Wechselwirkung zu Klima und Bodenbildung steht.

Die Tier- und Pflanzenarten an und über der Waldgrenze sind an das Leben in Kälte und Schnee angepasst. Die heutige Artenverteilung ist stark durch die letzte Kaltzeit geprägt. Die Alpen waren damals bis auf wenige Refugien am Alpenrand, in Kleinsträumen und den Berggipfeln vergletschert. Nach dem Ende der letzten (Würm-)Kaltzeit vor mehr als 18000 Jahren wanderten Arten aus diesen Flächen und aus den Randbereichen der Gletscher wieder ein. Ebenso dürften die temperaturempfindlichen Tierarten der Fließgewässer aus den eiszeitlichen Rückzugsgebieten (Refugialräume) mit zunehmender Temperatur fluss- und bachaufwärts bis zu den Quellen gewandert sein.

Die heutige hohe Biodiversität der Gebirgsregion ist demnach auch auf die Temperaturzunahme in den letzten ca. 18000 Jahren zurückzuführen. Die in verschiedenen Szenarien prognostizierten Temperaturerhöhungen von bis zu 4 °C in den nächsten 100 Jahren werden die Tier- und Pflanzen-Lebensgemeinschaften der Alpen signifikant ändern.

Die europäischen Alpen gehören damit zu den gegenüber einem Klimawandel empfindlichsten natürlichen und naturnahen Lebensräumen.

Die globale durchschnittliche Lufttemperatur hat sich in den Jahren von 1906 bis 2005 um ca. 0,7 °C erhöht. Diese Erwärmung wird auf die anthropogenen Emissionen von Treibhausgasen zurückgeführt. Demgegenüber ist die durchschnittliche mittlere Jahrestemperatur in den Alpen vom späten 19.

Jahrhundert bis heute um ca. 2 °C gestiegen. Das ist doppelt so hoch, wie die Erhöhung der entsprechenden Lufttemperatur in der nördlichen Hemisphäre in dieser Zeit [3] (vgl. auch Abbildung 1).

Dieser Temperaturanstieg von ca. 2 °C seit dem Ende des 19. Jahrhunderts wurde sowohl am Sonnblick in 3100 m Seehöhe als auch in Wien, am Jungfraujoch oder in Marseille gemessen [5, 6].

Dies zeigen auch zwei Messreihen der Klimastationen Zugspitze und Hohenpeißenberg, deren

Klimawerte im Rahmen des HISTALP-Projekts der österreichischen Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik (ZAMG) homogenisiert wurden [7].



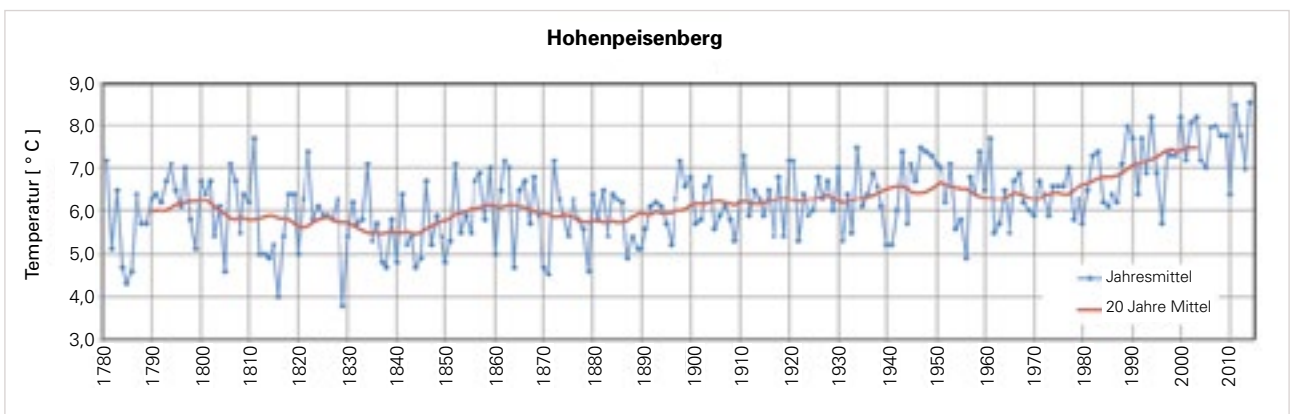
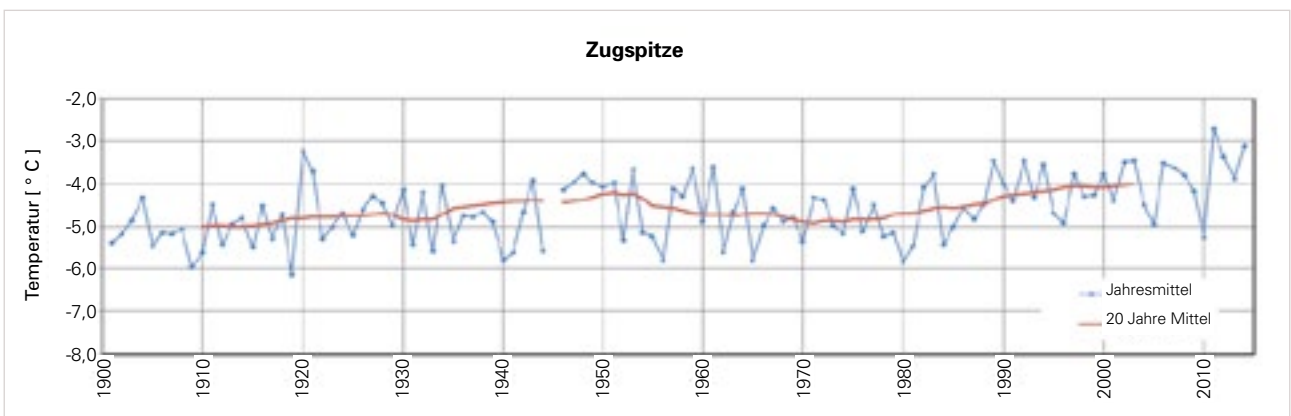
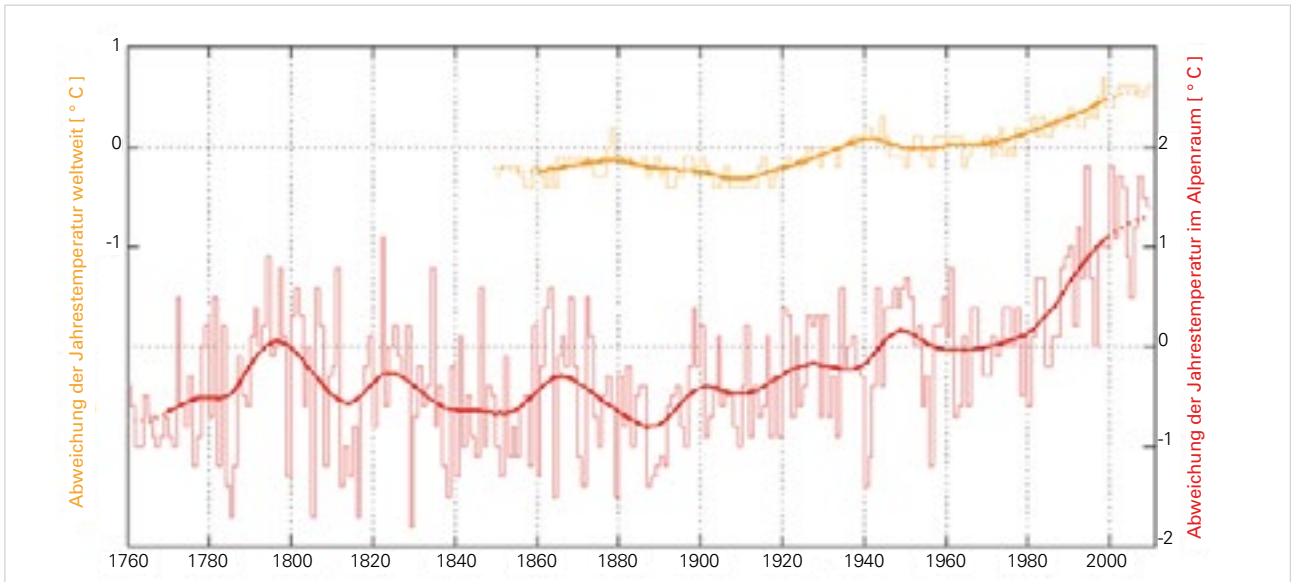


Abbildung 4.14\_1: Entwicklung der mittleren Jahrestemperatur weltweit 1850–2009 (orange, linke y-Achse) und im Großraum Alpen 1760–2009 (rot, rechte y-Achse). Dargestellt sind jährliche Abweichungen vom Mittel der Jahre 1901–2000 (Balken) und deren geglätteter Trend (Linie, 31-jähriger Gauß'scher Tiefpassfilter) [4].

Abbildung 4.14\_2 und 4.14\_3: Jahresdurchschnittstemperaturen der Stationen Zugspitze und Hohenpeisenberg

Nach Interpretation der ZAMG verlagerte sich der subtropische Hochdruckgürtel im 20. Jahrhundert beständig nordwärts [7]. Dies führte zur Steigerung des Luftdrucks und zu länger andauernden Schönwetterperioden, die in der Folge auch die Temperaturdurchschnittswerte steigen ließen.

Das Klima wird mit verschiedenen Methoden erfasst. Rückgrat für eine wissenschaftlich fundierte Analyse der Klimaentwicklung sind Messdaten von solarer Strahlung, Temperatur, Feuchte, Niederschlag und anderen Parametern, die an Messstationen erfasst werden (vgl. Kapitel 2.2).

Die Auswirkungen des Klimawandels auf den Wasserhaushalt sind nicht regional und zeitlich eindeutig. Das Projekt „Klimaveränderungen und Konsequenzen für die Wasserwirtschaft (KLIWA)“ der Bundesländer Bayern, Baden-Württemberg und Rheinland-Pfalz in Kooperation mit dem Deutschen Wetterdienst soll die Auswirkungen des regionalen Klimawandels auf den Wasserhaushalt beschreiben. Es ist hierbei eine zeitliche Auflösung von Tagesschritten und eine räumliche Auflösung von 1 km<sup>2</sup> vorgesehen, die in Abhängigkeit von den Fragestellungen weiter verfeinert werden können. Zudem sind Betrachtungen von einzelnen Teileinzugsgebieten möglich [8].

Um letzteres zu erreichen, wurde zum Beispiel für das Wasserhaushaltsmodell des Nationalparks Berchtesgaden das deterministische, flächendifferenziert arbeitende hydrologische Modell WaSiM-ETH eingesetzt, das auch im KLIWA-Projekt des Freistaats Bayern genutzt wird. Die hier verwendete räumliche Auflösung beträgt 50 m. Diese hohe räumliche Auflösung wurde gewählt, weil es sich um ein relativ kleines, äußerst heterogenes Modellgebiet handelt, und mit dieser hohen Auflösung auch kleinskalige Prozesse gut dargestellt werden können. Bei der Modellierung ist stets ein Kompromiss zwischen zeitlich geringstmöglicher Auflösung und dafür realistisch aufzuwendender Rechenzeit zu suchen.

Nachdem das Wasserhaushaltsmodell Berchtesgaden an die Untersuchungsregion angepasst, kalibriert und validiert wurde, wurde eine Klimasimulation auf folgender Basis berechnet:

Die nachfolgend aufgeführten Klimaprojektionen für die Klima Impact-Analyse werden von dem globalen Klimamodell ECHAM 5 [9] (ECHAM5 MPI / OM T63/L32, Szenario SRES A1B) zur Verfügung gestellt. Die Klimäläufe in diesem Kapitel werden mit Daten des mesoskaligen Regional Modells WRF (Weather Research and Forecasting Model) [10] berechnet [11]. Für den Nationalpark Berchtesgaden und sein Vorfeld waren unter zu Hilfenahme der beschriebenen Modellkonfiguration folgende Ergebnisse für die Zeit 2021 bis 2050 im Vergleich mit dem Kontrollzeitraum 1971 bis 2000 erzielt worden [13] (Tabelle 4.14\_1):

Zwischenzeitlich wurden diese Modellierungen weiterentwickelt. So wurden für den fünften Sachstandsbericht des IPCC [14] mit den neuesten Modellgenerationen globale Simulationsläufe – basierend auf alternativen Emissionsabschätzungen (RCPs, Representative Concentration Pathways) – durchgeführt. Diese Simulationen sind noch mittels Regionalisierungsverfahren räumlich zu verfeinern und mit statistischen Methoden zu behandeln. Auf dieser Basis können dann Verbreitungsmodelle und zugehörige Szenarien für Tier- und Pflanzenarten gerechnet werden, die in diesem Gebiet vorkommen.

Die so erzielten Ergebnisse stellen dann eine wissenschaftlich fundierte Basis für die Entscheidungen und Planungen dar, die für ein Naturschutzgebiet höchster Kategorie zu treffen sind.

Durch den Klimawandel werden die Schutzgebiete der Alpen in den kommenden Jahrzehnten erheblichen Veränderungen unterworfen sein. Diese Veränderungen stellen die nationale Naturschutzstrategie, die bayerische Naturschutzstrategie einschließlich der Einhaltung internationaler Abkommen, vor neue Herausforderungen. Es wird

Jährlicher Durchschnitt	Kontroll-Periode 1971–2000			Szenario 2021–2050			Differenz Durchschnitt	Differenz in %
	Min.	Max.	Durchschnitt	Min.	Max.	Durchschnitt		
Lufttemperatur °C	-4,57	10,26	<b>4,74</b>	-3,56	11,07	<b>5,68</b>	+ 0,94 °C	
Niederschlag (mm)	1281	3059	<b>2007</b>	1307	3086	<b>2032</b>	+ 25 mm	+ 1,3 %
Regen (mm)	492	1772	<b>1229</b>	608	1867	<b>1304</b>	+ 75 mm	+ 6,1 %
Schneefall (mm)	125	2530	<b>778</b>	94	2441	<b>727</b>	- 51 mm	- 6,6 %
Schneesmelze (mm)	126	8698	<b>1000</b>	107	8805	<b>938</b>	-62 mm	- 8,3 %
Schneedeckendauer (Tage)	36	365	<b>148</b>	23	365	<b>129</b>	-19 Tage	- 12,8 %
Evapotranspiration (mm)	51	2022	<b>617</b>	67	1915	<b>625</b>	+ 7,9 mm	+ 2,4 %
Abfluss (mm)	75	8629	<b>1415</b>	55	8740	<b>1443</b>	+ 17,5 mm	+ 2,8 %

Tabelle 4.14\_1: Unterschiede in der räumlichen Verteilung von Klimawerten und Wasserhaushalt zwischen der Kontrollperiode 1971-2000 und der Simulationsperiode 2021–2050 [13].

abzuschätzen sein, mit welcher Wahrscheinlichkeit der jeweilige Schutzzweck in der näheren Zukunft erreicht werden kann. Aus einer derartigen ökologischen Risikoabschätzung sollen und müssen darauf folgend Optionen für eine dynamisierte Naturschutzpolitik abgeleitet werden.

Bei einem statischen Naturschutz gelten die gesetzten Ziele und Schutzobjekte grundsätzlich unbefristet. Der aktuelle Zustand der Schutzobjekte und der Grad der Zielerreichung werden jedoch periodisch mit einem historischen (oder theoretischen) Referenzzustand verglichen und Schutzmaßnahmen bei Bedarf angepasst.

Im Prozessschutz bilden ökologische Prozesse die Schutzobjekte, wobei die Zielsetzung deren ungelente Dynamik und damit ergebnisoffen, ist. Der aktuelle Zustand der Prozessdynamik wird regelmäßig

beobachtet und mit früheren Zuständen verglichen, auch, um Hinweise für Handlungsoptionen in der freien Landschaft (z. B. Kulturlandschaft) zu erhalten. Adaptiver Naturschutz definiert Zielzustände von Schutzobjekten, die in definierten Zeiträumen erreicht werden sollen. Nach Ablauf eines Zeitraumes wird der Grad der Zielerreichung überprüft. Bei Bedarf können sowohl die Maßnahmen als auch die Schutzobjekte und die Ziele neu definiert werden [15, 16, 17, 18, 19].

#### 4.14.2 Alpine Naturgefahren – Wildbachgefahren, Georisiken, Lawinen Klimafolgen und Anpassung

Die prognostizierten Veränderungen des Klimas führen zur Veränderung der Hochwasserbildung. Der Einfluss des Klimawandels auf Hochwasser und die daraus folgenden Anpassungsstrategien werden in Kapitel 4.2.3 Hochwasser beschrieben und sind Teil des *Hochwasserschutz Aktionsprogramms 2020plus*. Die Veränderungen der Klimaparameter können aber ebenso Auswirkungen auf das Auftreten von Muren, Hangbewegungen und Lawinen haben, da sie wesentliche Faktoren darstellen, die diese Naturgefahren auslösen oder die Anfälligkeit zu deren Bildung erhöhen.

Wildbachgefahren, Georisiken und Lawinen treten vor allem im Bergland auf. Dies ist in erster Linie der ausgeprägten Morphologie aber auch den dort häufiger auftretenden extremeren Witterungsbedingungen geschuldet. Aus diesem Grund müssen die Auswirkungen des Klimawandels auf alpine Naturgefahren separat betrachtet werden.

Die möglichen Auswirkungen der Klimaveränderungen bezogen auf Wildbachgefahren sind – ähnlich wie bei Hochwasser – nicht nur in einer erhöhten Auftrittswahrscheinlichkeit zu finden, sondern auch in einer höheren Intensität der einzelnen Ereignisse. So können zukünftig häufiger Extremereignisse auftreten oder bei 100-jährlichen Ereignissen größere Oberflächenabflüsse zustande kommen. Damit wären auch größere Flächen von Wildbachereignissen betroffen als bisher. Ähnlich und bezogen vor allem auf die Auftrittswahrscheinlichkeit, gilt dies auch für Hangbewegungen. Es kann vermehrt zu Rutschungen und Steinschlag oder Felsstürzen kommen. Im Hochgebirge ist zusätzlich mit einem Auftauen des Permafrostes infolge der globalen Erwärmung zu rechnen (siehe Exkurs Forschung "Permafrost in Bayern" Kapitel 4.3 Boden). Lawinen können aufgrund der erhöhten Temperaturen in zunehmendem Maße auch als Waldlawinen abgehen, was zu

Gefährdungen von Bereichen führt, die bisher nicht oder nur selten von Lawinen betroffen waren.

In Folge des hohen Siedlungsdrucks im bayerischen Alpenraum, aber auch außerhalb der Alpen, werden vermehrt Bereiche bebaut, die immer näher an gefährdeten Gebieten liegen. Gerade bei extremen Ereignissen können dann Wohnbebauung oder wichtige Infrastruktur von Naturgefahren betroffen sein, weil sich die klimatischen Verhältnisse und damit auch die Gefahrenbereiche verändert haben.

Ein sehr wichtiges Werkzeug im Umgang mit Naturgefahren ist das integrale Risikomanagement. Es bietet mit seinem integralen Ansatz auf zahlreichen Ebenen unter Einbeziehung aller Beteiligten die besten „Reserven“ und die flexibelsten Schutzsysteme, auch für die Auswirkungen des zukünftig zu erwartenden Klimawandels. Die generelle Betrachtung von Extremereignissen innerhalb des Risikomanagements stellt sicher, dass auch die Auswirkungen langsam stattfindender Klimaveränderungen abgedeckt werden. Aufgabe des

Abbildung 4.14\_4: Das integrale Risikomanagement als zentrales Werkzeug im Umgang mit Naturgefahren und Anpassung an den Klimawandel.





Risikomanagements ist es, das Risiko unter Beteiligung der Betroffenen auf ein akzeptables Maß zu reduzieren. Das Risikomanagement ist gemeinsame Aufgabe aller Beteiligten, das heißt vor allem der Öffentlichen Hand und jedes einzelnen Bürgers. Es setzt sich aus den Handlungsbereichen *Nachsorge*, *Vermeidung*, *Schutz* sowie *Vorsorge* zusammen und beinhaltet auch den Umgang mit unvermeidlichen *Restrisiken*.

Im Handlungsbereich der *Vermeidung* sollen neue Risiken vermieden und bestehende Risiken vermindert werden. Dies stellt die beste Anpassungsstrategie zum Schutz vor Naturgefahren infolge des Klimawandels dar. Wesentlich hierfür ist die Gefahrenanalyse und damit die Kenntnis der von Naturgefahren betroffenen Flächen. Neue Siedlungen sollten in diesen gefährdeten Flächen nicht errichtet werden. Die vom Bayerischen Landesamt für Umwelt erstellten Gefahrenhinweiskarten, Gefahrenkarten, Risikokarten und Warndienste geben Hinweise darauf, wo Naturgefahren auftreten können oder welche Bereiche davon betroffen sind.

Im Handlungsbereich *Schutz* muss vor allem bei der Erstellung von technischen Schutzeinrichtungen wie Wildbach-, Steinschlag- und Lawinenverbauungen das Verbauungskonzept auf einen integralen Ansatz ausgerichtet sein. Synergien sollen dabei bewusst und aktiv genutzt werden. So schützt ein intakter Bergwald nicht nur vor Steinschlag und Lawinen, sondern verlangsamt und verringert auch den Oberflächenabfluss in Wildbacheinzugsgebieten und wirkt damit der Mur- und Hochwasserbildung entgegen. Der integrale Ansatz erleichtert Anpassungen des Gesamtkonzeptes auf Einflüsse durch den Klimawandel, da er mehrere Möglichkeiten eröffnet. Bezogen auf das oben genannte Beispiel sind im Wildbachbereich zum Beispiel nicht nur bauliche Anpassungen des technischen Schutzes und eine weiterhin intensive Schutzwaldpflege und Schutzwaldsanierung möglich, sondern auch der Umbau von Waldgesellschaften hin zu an

veränderte Klimaverhältnisse angepasste Waldgesellschaften (vgl. hierzu auch Kapitel 4.6.).

Das Handlungsfeld *Vorsorge* schließt nicht nur die Vorsorge der Öffentlichen Hand ein, sondern fordert auch die Stärkung der Eigenvorsorge des Bürgers, der sich zum Beispiel über Warndienste wie den Lawinenwarndienst informieren kann oder entsprechende Vorkehrungen treffen kann, um ein Risiko zu minimieren. Dabei ist es wichtig, den Bürger über die möglichen durch den Klimawandel hervorgerufenen erhöhten Risiken, aufzuklären und in der Bevölkerung ein Bewusstsein für diese Problematik zu schaffen. Darüber hinaus können vom Bürger selbst auch bauliche Maßnahmen im Sinne eines naturgefahrenangepassten Bauens bereits in der Planungsphase umgesetzt werden. Gleiches gilt für eine an die Risiken angepasste Nutzung in der Betriebsphase. Gerade im Hinblick auf Extremereignisse ist die Eigenvorsorge ein wichtiges und effektives Mittel um Risiken zu minimieren.

Vor allem bei der Betrachtung des *Restrisikos* innerhalb des Risikomanagements wird deutlich, dass durchaus Unsicherheiten in Vorhersage und Gefahrenanalyse vorhanden sind. Eine 100 %-ige Sicherheit kann es nicht geben. Auch können Schutzsysteme nur auf ein bestimmtes Bemessungsereignis ausgelegt werden. Im Wildbachbereich ist dies nach dem Bayerischen Wassergesetz in der Regel das 100-jährige Hochwasserereignis unter Berücksichtigung der wildbachtypischen Eigenschaften. Es können aber extreme Ereignisse eintreten, die größer sind als dieses Bemessungsereignis und somit die Schutzanlagen überlasten. Die klimatischen Veränderungen und ihre Auswirkungen auf die beschriebenen Naturgefahren stellen in diesem Kontext eine weitere Unsicherheit dar, derer sich jeder bewusst sein muss. Sollten die Prognosen zutreffen, werden sich aufgrund des Klimawandels Extremereignisse häufen.

Dies verdeutlicht die Wichtigkeit eines konsequent durchgeführten integralen Risikomanagements auch als Anpassungsstrategie auf den stattfindenden Klimawandel und seine potentiellen zukünftig verstärkten Auswirkungen.

### Wildbachgefahren

#### Klimafolgen

Die durch die ohnehin häufig auftretenden Stauwetterlagen im Hochgebirge hervorgerufenen Starkniederschlagsereignisse können durch den Klimawandel noch häufiger auftreten. Für bisher nicht oder nur selten betroffene Gebiete könnte sich dadurch das Wildbachrisiko erhöhen. Mögliche Folgen sind größere gefährdete Flächen sowie intensivere und häufigere Ereignisse. Zudem wird auch die Verwundbarkeit bzw. die Verletzbarkeit (Vulnerabilität) dadurch erhöht, dass in Folge des Siedlungsdrucks mehr und dichter an oder in gefährdeten Gebieten gebaut wird und die Objekte auch eine höhere

Vulnerabilität aufweisen (z. B. Krankenhaus oder Schule statt landwirtschaftlicher Scheunen). Auch wenn die bisherige Zunahme der aufgetretenen Schäden vor allem diesem Sachverhalt geschuldet ist, muss dem Klimawandel in der Gesamtstrategie des integralen Risikomanagements verstärkt Rechnung getragen werden.

#### Beispiel für konkrete Anpassungsmaßnahme

Derzeit entwickelt das Bayerische Landesamt für Umwelt ein Gesamtkonzept, zur Ermittlung der von Wildbächen gefährdeten Bereiche. Gesetzliche Grundlage stellt Artikel 46 Absatz 3 des Bayerischen Wassergesetzes dar, in dem die Ermittlung dieser Gebiete festgeschrieben ist. Als Bestandteil des Risikomanagements stellen die Wildbachgefährdungsbereiche und die Ermittlung betroffener Flächen einen wesentlichen Baustein der Vorsorge

Abbildung 4.14\_5: Wildbäche können schnell zu reißenden Strömen anschwellen und enorme Schäden verursachen



dar. Im Gegensatz zu den Überschwemmungsgebieten werden hier die wildbachtypischen Eigenschaften, wie zum Beispiel Geschiebe- und Wildholzführung, in unterschiedlichen Szenarien bei der Gefahrenanalyse mit berücksichtigt. Vom Landesamt wird eine einheitliche Vorgehensweise zur Ermittlung festgelegt. Dadurch wird eine Vergleichbarkeit der jeweiligen Gefahrenbereiche für häufige, 100-jährige und seltene Ereignisse (Extremereignisse) gewährleistet. Die regelmäßige Aktualisierung dieser Karten, die Möglichkeit der Anpassung der Analysemethoden sowie der Grundlagen und Eingangsdaten für die Analysen gewährleisten die Aktualität der Karten. Zu den Grundlagen sind insbesondere auch die klimatischen Einflussfaktoren zu rechnen. Änderungen in den Niederschlagsverhältnissen führen zu Veränderungen des Oberflächenabflusses. Bei einer Aktualisierung der Karten kann deshalb auf stattfindende Klimaänderungen eingegangen und diese berücksichtigt werden.

Im Bereich des technischen Schutzes vor Wildbachgefahren wird bei neu zu errichtenden Schutzbauwerken analog zum technischen Hochwasserschutz der sogenannte Klimazuschlag angewandt. Das heißt, dass neue „Wildbachschutzanlagen“ auf ein

Abbildung 4.14\_6: Exemplarische Darstellung eines modellierten Wildbachgefährdungsbereiches bei dem Verklausungsszenarien mit berücksichtigt wurden



um 15 % erhöhtes Bemessungshochwasser ausgelegt werden (vgl. Kapitel 4.2.3).

Weiterer zentraler neuer Bestandteil des Gesamtkonzeptes ist die Ausarbeitung sogenannter integraler Wildbachentwicklungskonzepte. Diese sollen einen Rahmen für die künftige Entwicklung des Schutzsystems vorgeben und damit die Basis für alle folgenden Ausbau- und Unterhaltungsmaßnahmen im Einzugsgebiet bilden.

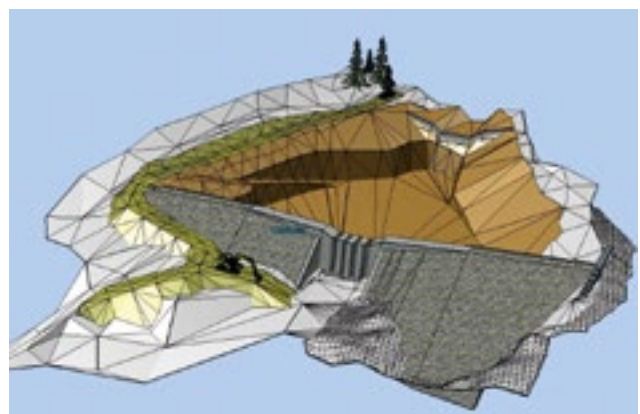
Zusammengefasst stellt im Bereich der Wildbachgefahren die Erstellung von Karten, die Wildbachgefährdungsbereiche insbesondere für Extremereignisse kennzeichnen, die wesentliche Anpassungsstrategie an den Klimawandel dar. Da diese Karten in regelmäßigen Abständen an neue Erkenntnisse angepasst werden, wird der Klimazuschlag hier nicht angewandt.

## Georisiken

### Klimafolgen

Klimaveränderungen wirken sich auch auf die Hangstabilität aus. Es kann vermehrt zu Rutschungen und Steinschlag oder Felsstürzen kommen. Im Hochgebirge ist mit einem Auftauen des Permafrostes infolge der globalen Erwärmung zu rechnen (siehe Exkurs Forschung am Ende dieses Kapitels).

Abbildung 4.14\_7: Bei Neuplanung einer Wildbachsperre wird der sogenannte Klimaaufschlag (15%) mit berücksichtigt



Die Auswirkungen beschränken sich nicht nur auf den Alpenbereich. In fast ganz Bayern, also auch im Alpenvor-, im Hügel- oder im Schichtstufenland ist mit Schäden an Gebäuden oder an Infrastruktur zu rechnen und es können Personenschäden auftreten. Das immer dichter werdende Netz an Infrastruktur bedingt allein schon ein steigendes Schadenspotential, selbst bei gleichbleibender Hangbewegungsaktivität. Eine konkrete Zunahme von Hangbewegungsereignissen ist bisher nicht festzustellen. Dies liegt allerdings vorwiegend an fehlenden langjährigen Datenreihen, ohne die eine verlässliche statistische Aussage nicht möglich ist.

Technische Maßnahmen zur Sicherungen sind nur in Einzelfällen durchführbar. Sie sind aufwändig, kostenintensiv, alterungsanfällig und meist nur auf ein bestimmtes Bemessungsereignis ausgelegt. Damit täuschen sie eine Sicherheit vor, die tatsächlich nicht gewährleistet werden kann. Der beste Schutz ist deshalb die Meidung von Gefahrenbereichen. Neue Siedlungen sollten dort nicht errichtet

werden. Hierzu sind in erster Linie Maßnahmen im Zuge der Raum- und Bauleitplanung erforderlich. Um die hierfür notwendigen Informationen über Gefahrenbereiche bereitzustellen, sammelt das LfU Daten zu Naturgefahren und stellt sie der Öffentlichkeit über das Internet zur Verfügung.

### Beispiele für konkrete Anpassungsmaßnahmen

#### Hanganbruch bei Aich

Ende Mai bis Anfang Juni 2013 haben in Bayern intensive Starkregenereignisse stattgefunden, wie sie nach den Prognosen der Klimaforscher zukünftig häufiger zu erwarten sein sollen. Diese Starkregenereignisse haben zahlreiche Hangbewegungen ausgelöst, dies auch an Stellen, die bisher als nicht sehr gefährdet eingeschätzt wurden. Typischerweise sind spontan vorwiegend

Abbildung 4.14\_8: Ausschnitt aus der Gefahrenhinweiskarte zu Geofahren aus dem Bereich Schliersee. Dargestellt sind die Gefahrenarten Steinschlag, Felssturz, Rutschung und Hanganbruch.

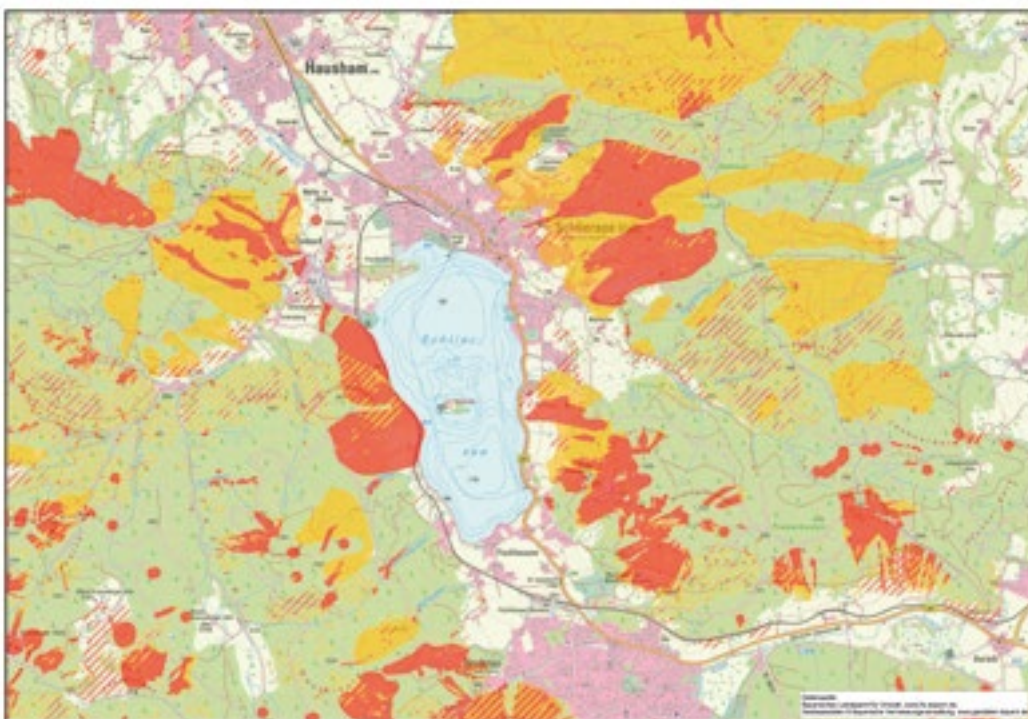




Abbildung 4.14\_9: Hanganbruch bei Aich (Brannenburg) infolge Starkregenereignissen im Juni 2013

kleinere, eher flachgründige Rutschungen, sogenannte Hanganbrüche, aufgetreten. Deren Auslöser ist immer ein Porenwasserüberdruck in der Lockermaterialüberdeckung.

Die Anfälligkeit für solche Hanganbrüche wird in der Gefahrenhinweiskarte für Geogefahren des LfU dargestellt. Die Kartendarstellung beruht auf Modellierungen, also theoretischen Annahmen. Eine Überprüfung im Gelände hat allerdings gezeigt, dass die Modellierungsergebnisse als sehr realistisch einzustufen sind. Fast alle erfolgten Hanganbrüche haben sich in ausgewiesenen Gefahrenbereichen ereignet. In der Gefahrenhinweiskarte und in der digitalen Standortauskunft zu Geogefahren im Internet wird auf solche Gefährdungen hingewiesen. Die Hinweise helfen, gefährdete Gebiete von Neubebauung frei zu halten und bestehende Gebäude nach Bedarf zu schützen.

Ein verhältnismäßig großer Hanganbruch hat sich im Juni 2013 bei Aich in der Gemeinde Brannenburg ereignet. Auf eine Breite von ca. 40 m haben sich Lockermassen aus Moränenmaterial verflüssigt und sind hangabwärts geflossen. Sie sind in der Nähe eines Bauernhofes auf einer Wiese zum Stehen gekommen (Abbildung 4.14\_9), eine Gemeindestraße wurde überschüttet. Dank der Tatsache, dass keine Bebauung im Gefahrenhinweisbereich steht, blieben die Schäden gering.

#### Rutschung bei Gastätt

Als Spätfolge der Starkniederschläge im Mai bis Juni 2013 hat sich im Sommer 2013 bei Gastätt (Staudach-Egerndach) eine größere Rutschung gelöst. Tiefgreifende Rutschungen werden oft erst mit Verzögerung oder nach sehr langen Regenperioden aktiviert. Die Rutschung liegt in einem Waldstück oberhalb von Wohnhäusern. Der Bereich ist bereits seit Jahren als alter Rutschbereich bekannt und ist in der Gefahrenhinweiskarte verzeichnet. Die Häuser bei Gastätt wurden allerdings schon lange vor der Erstellung der Karte gebaut.

Modelle können tiefgreifende Rutschungen nicht erfassen. Hierzu sind Geländebegehungen notwendig, die durch moderne Techniken wie digitale Geländemodelle unterstützt wird.

In erster Linie ist im konkreten Fall nun eine Gefahrenabwehr zum Schutz der bestehenden Häuser erforderlich. Zudem sollte das Schadenspotential nicht durch weitere Bebauung am Hangfuß erhöht werden. Auch hier ist die Gefahrenvermeidung durch Verzicht auf zusätzliche Bebauung wohl die nachhaltigste und wirtschaftlichste Lösung. Die Gefahrenhinweiskarte des LfU und die darauf aufbauende digitale Standortauskunft zu Geogefahren im Internet liefern die hierfür notwendigen Informationen.

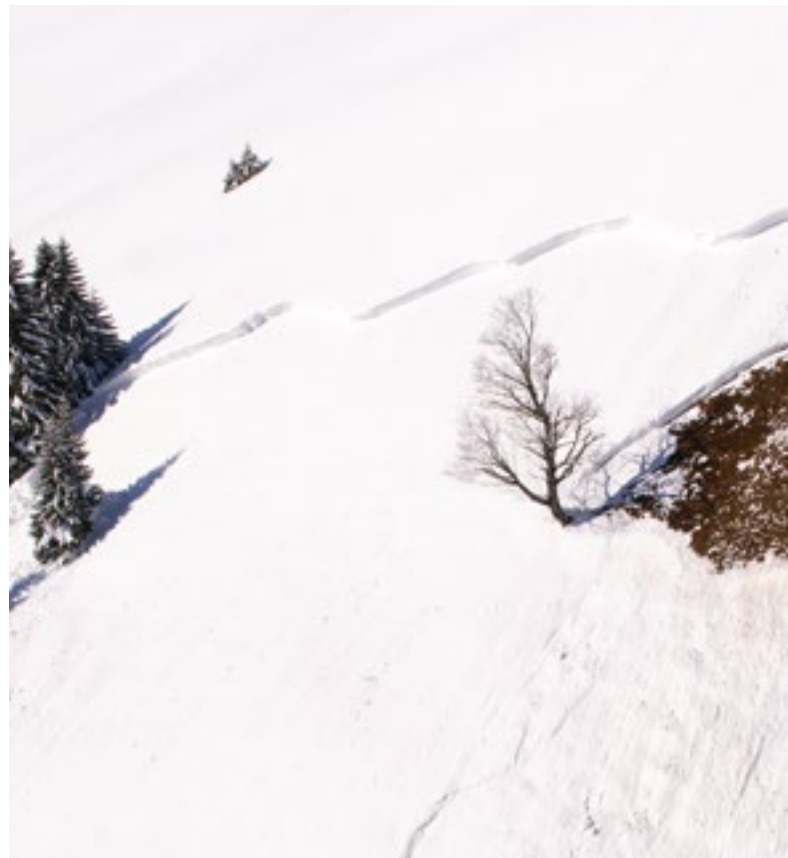
Abbildung 4.14\_10: Rutschung bei Gastätt (Staudach-Egerndach) 2013, die für Häuser am Hangfuß eine Bedrohung darstellt



## Lawinen

### Klimafolgen

Das Lawinengeschehen im bayerischen Alpenraum wird vom aktuellen Wettergeschehen und von der saisonalen Entwicklung des Schneedeckenaufbaus bestimmt. Vor allem mehrtägige Schneefallereignisse mit starkem Neuschneezuwachs, der durch Windverfrachtung verstärkt werden kann und schnelle, markante Erwärmungssituationen, die von Regen bis in die Hochlagen begleitet werden, führen zu markanten Lawinensituationen mit Schadenspotential. Die prognostizierten Klimaänderungen werden wenig daran ändern, dass diese kurzfristig auftretenden, das Lawinengeschehen initiierenden Wettersituationen auch künftig vorkommen werden. In Zukunft kann sogar von einer stärkeren Dynamik des Lawinengeschehens ausgegangen werden, weil die kurzfristigen Abfolgen



von Regen und Schnee bei höheren Temperaturen und intensiverem Niederschlagsgeschehen im Winter zunehmen.

Entscheidend für die Sicherheit der Bevölkerung ist deshalb eine funktionierende örtliche Lawinewarnung, wie sie in Bayern über ehrenamtliche Lawinenkommissionen als Expertengremien für die Sicherheitsbehörden etabliert ist. Hiermit wird in klar definierten Zuständigkeitsbereichen aktueller, kurzfristiger Lawinenschutz gewährleistet. Von großer Bedeutung für die Sicherung der von Infrastruktur und Besiedlung durchzogenen Talbereiche ist der großflächige Erhalt eines funktionsfähigen Bergwaldes. Um seine Schutzfunktion zu erfüllen, muss der Bergwald gestuft und gemischt aufgebaut sein. Zudem sollten Lücken, die von Gleit- und

Nassschneelawinenabgängen sukzessive vergrößert werden, durch Naturverjüngung geschlossen werden. Die Wirkung von Lawinenverbauungen zum punktuellen Schutz von Infrastruktur vor Lawinen bleibt bestehen, erfordert aber einen hohen Investitionsaufwand zum Bau und Unterhalt der Schutzanlagen.

Abbildung 4.14\_11: Gleitschneelawine am Mühltaleck-Südhang im Februar 2009



### Beispiele für konkrete Anpassungsmaßnahmen

Die Verantwortung für die Lawinenwarnung vor Ort liegt in den Händen der 33 Lawinenkommissionen, in denen an die 350 Ehrenamtliche mitarbeiten. Die örtliche Lawinengefahr vor dem Hintergrund des hohen Sicherheitsbedürfnisses der Bevölkerung und der zunehmenden Dynamik des Wettergeschehens richtig einzuschätzen, ist schwierig. Gerade Erwärmungssituationen mit Regen auch in großen Höhen, die das Gleiten der Schneedecke und Nassschneelawinenabgänge provozieren, stellen die Lawinenkommissionen vor fachlich schwierige Empfehlungen gegenüber den Sicherheitsbehörden. Da das Phänomen des Gleitens der Schneedecke und das Abbrechen von nassen Bodenlawinen

(Gleitschneelawinen) wissenschaftlich nicht zweifelsfrei erklärt ist, sind Strategien notwendig, den Lawinenkommissionen die Einschätzung dieser Lawinengefährdungssituationen zu ermöglichen. Im Rahmen von zweitägigen Fortbildungen, die die Lawinenwarnzentrale vor Ort und am Wochenende anbietet, werden die ehrenamtlichen Lawinenkommissionsmitglieder in Kleingruppen trainiert. Ziel hierbei ist es, diese komplexen Lawinensituationen mit Hilfe der zur Verfügung stehenden Informationen in zeitnahe, dokumentierte Empfehlungen an die Sicherheitsbehörde aufzuarbeiten.

Abbildung 4.14\_12: Ausbildung Lehrteam im Dezember 2014







## EXKURS FORSCHUNG

Karl-Friedrich Wetzel, Universität Augsburg;  
Matthias Bernhardt, BOKU Wien; Wilfried Hagg,  
LMU München; Projekt: „Gletscher und Klima“

## Gletscher, Klima und Wasserhaushalt

Gletscher entstehen durch die langsame Metamorphose von Schnee über Firn zu Gletschereis. Dieser Prozess dauert bei den Alpengletschern etliche Jahre, so dass sich der Massengewinn eines Gletschers aus derjenigen Schneemasse ergibt, die im Laufe von mehreren Jahren nicht abschmilzt. Somit hängt die Massenbilanz von Gletschern davon ab, wieviel Schnee zum einen auf dem Gletscher akkumuliert wird und welche Schneemenge zum anderen durch Wärmezufuhr während der Sommer verloren geht. Gletscher reagieren daher direkt auf veränderte klimatische Rahmenbedingungen, sei es auf feuchtere und kühlere Winter mit verstärkter Akkumulation von Schnee oder auf niederschlagsarme und warme Sommer mit verstärkten Schmelzprozessen. Aufgrund der großen Eismasse von Gletschern erfolgen Vorstoß- und Rückschmelzphasen als Reaktion auf klimatische Veränderungen mit einer zeitlichen Verzögerung auf einer dekadischen Zeitskala. Daher können Massenveränderungen von Gletschern als hervorragende Indikatoren für Veränderungen von klimatischen Verhältnissen angesehen werden.

Von den bayerischen Gletschern liegen bei der Kommission für Erdmessung und Glaziologie (KEG) der Bayerischen Akademie der Wissenschaften Vermessungsdaten seit Ende des 19. Jahrhunderts vor, die den teils dramatischen Gletscherschwund von zusammen über 3,3 km<sup>2</sup> dokumentieren. Im September 2014 wurde zum Ende des Massenbilanzjahres von der UFS Schneefernerhaus aus zusammen mit PD Dr. W. Hagg (LMU, KEG) am Nördlichen Schneeferner mit einer erneuten Vermessung der Gletscherreste auf dem Zugspitzplatt mittels terrestrischem LIDAR begonnen. Die abschließende Auswertung der Messungen erfolgt zurzeit an der Universität Augsburg. Es zeigt sich schon jetzt, dass der Gletscherrückgang gegenüber der letzten Vermessung von 2009 ungebrochen ist. So hat die Fläche des Nördlichen Schneeferners von 36,04 ha im Jahr 1999 über 30,68 ha (2006) und 27,72 ha (2009) auf 23,86 ha zum Ende des Massenbilanzjahres 2014 weiter deutlich abgenommen.

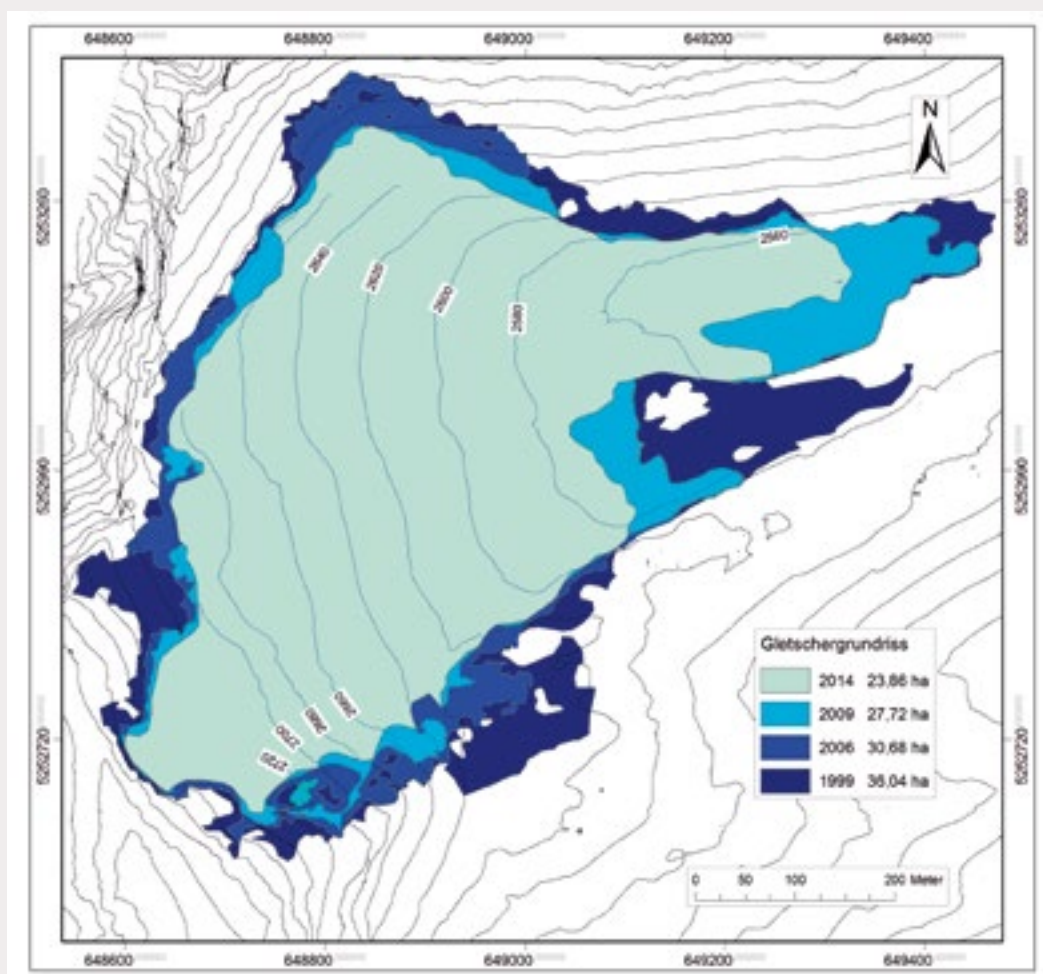
Abbildung 1: Die Vermessung des Nördlichen Schneeferners (links) im September 2014 mit terrestrischem LIDAR und erste Ergebnisse (rechts).



Die direkten hydrologischen Konsequenzen des Gletscherrückgangs in den bayerischen Alpen sind aufgrund der geringen Gletschermasse eher als unbedeutend einzustufen. Allenfalls in den hochgelegenen Kopfeinzugsgebieten kann es nach weiterem Abschmelzen der Gletscher während sommerlicher Trockenperioden zu verminderter Abflüssen mit entsprechenden ökologischen Folgewirkungen kommen. Anders sieht es bei der Betrachtung des gesamten alpinen Raumes aus. Untersuchungen von HUSS (2011) zeigen am Beispiel des Hitzesommers

von 2003, dass in den großen Flusseinzugsgebieten im trockenen und heißen August selbst in den Unterläufen bedeutende Abflussanteile aus der Gletscherschmelze stammen. So trugen die Abflüsse von Gletschern im Mündungsbereich des Rheins bis zu 15 % zum Abfluss bei, an der Rhone waren es nahezu 40%.

Huss, M. (2011): Present and future contribution of glacier storage change to runoff from macroscale drainage basins in Europe. - Water Resources Research, Vol. 47, W07511, doi:



---

## EXKURS FORSCHUNG

---

Prof. Dr. A. Menzel, Prof. Dr. M. Leuchner, Dr. C. Schuster, N. Kern; Technische Universität München (Ökoklimatologie); Prof. Dr. S. Renner; LMU München (Systematische Botanik); Dr. A. Gröger; Botanischer Garten München-Nymphenburg; Prof. Dr. A. Friedmann, Dr. O. Korch; Universität Augsburg (Biogeographie); Dr. M. Kirchner, Dr. G. Jakobi; Helmholtz Zentrum München; Projekt: „Auswirkungen des Klimawandels in den Alpen, Erfassung mittels Höhengradienten (**KLIMAGRAD**)“

---

# Bayerische Berge besonders betroffen vom Klimawandel

Der Alpenraum ist überproportional stark vom Klimawandel betroffen, da der Temperaturanstieg dort mit 1,5 °C etwa doppelt so hoch wie im globalen Durchschnitt ausfällt und seine kleinräumig angepassten Ökosysteme außerordentlich sensibel sind. Das interdisziplinäre Projekt KLIMAGRAD untersuchte Auswirkungen des Klimawandels und weiterer anthropogener Einflüsse auf die Vegetation im Werdenfelser Land von Garmisch-Partenkirchen bis zum Zugspitzplatt. Als Basis für die Untersuchungen wurde ein umfassendes Klimamessnetz mit vier neuen Klimastationen und 50 Lufttemperatur und -feuchtloggern in den Bergen um Garmisch-Partenkirchen installiert.

An vier Gradienten von Garmisch bis in 1800 m Höhe wurden im wöchentlichen Rhythmus phänologische Phasen von Blattaustrieb bis Laubverfärbung beobachtet sowie der intra-annuelle Zuwachs von typischen Baumarten des Bergwaldes untersucht. Insgesamt verlängert sich die Vegetationsperiode im Bergwald pro Grad Erwärmung um 16 Tage, sowohl durch einen früheren Austrieb als auch

durch eine spätere Laubverfärbung. Im Gegensatz zur immergrünen Fichte ist das Stammwachstum der Buche an die Phänologie gekoppelt und somit profitiert die Buche stärker vom Klimawandel mit einem erhöhten Zuwachs unter einer längeren Wachstumsperiode. Im Alpengarten am Schachen werden phänologische Dauerbeobachtungen an ausgewählten Pflanzenarten durchgeführt und ein internationales Phänologie-Netzwerk arktisch-alpiner Gärten wurde initiiert. An sechs teilnehmende Gärten wurde kloniertes Pflanzenmaterial von 16 Indikatorarten verteilt und einheitliche Beobachtungsschlüssel für 42 phänologische Marker entwickelt. Für das Zugspitzplatt wurde erstmals eine komplette Vegetationskarte auf Assoziationsebene erstellt, 162 Arten kommen dort vor. Durch die Anlage von Dauerbeobachtungsflächen soll langfristig

---

Abbildung 1: Eine von vier neu installierten Klimastationen

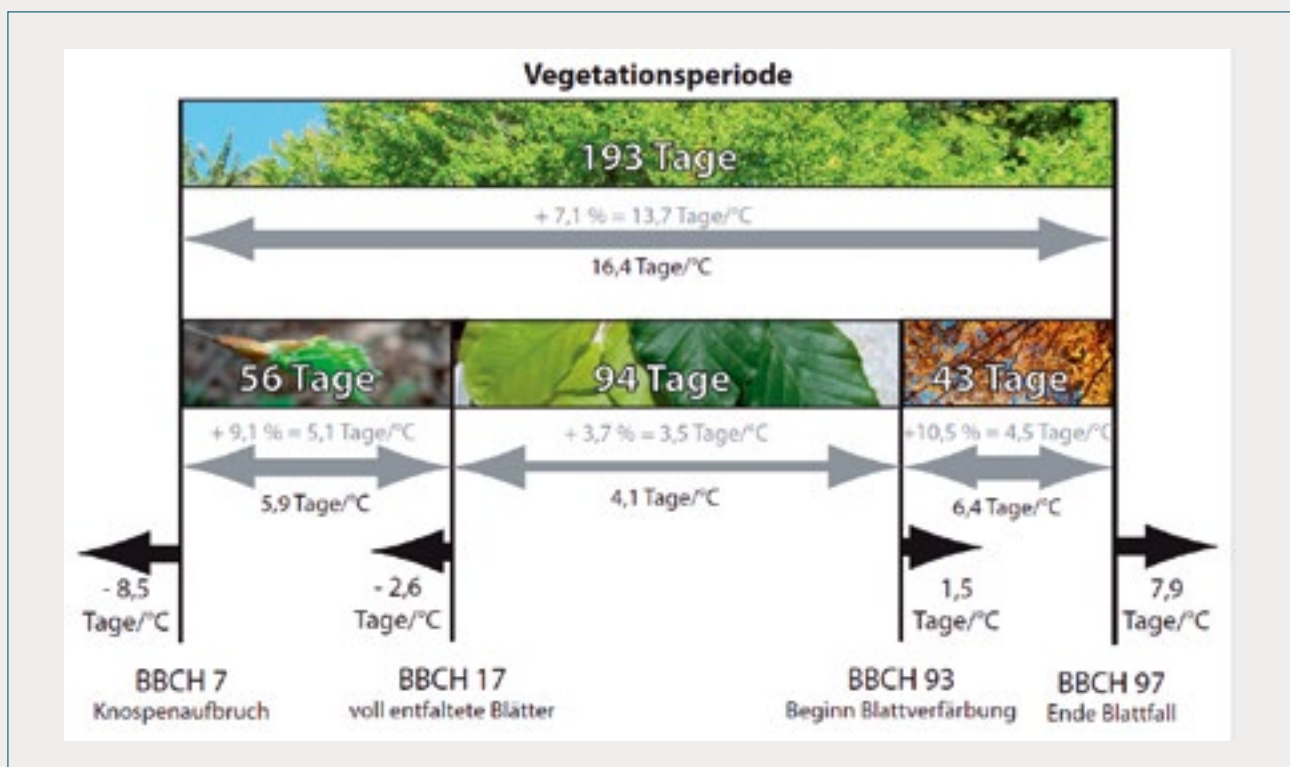


der Einfluss durch Klimawandel sowie Mensch und Schafbeweidung dokumentiert werden.

An drei Gradienten wurden außerdem Messungen zu Stickstoff-Deposition und flüchtigen organischen Verbindungen (VOC) durchgeführt. Stickstoffdioxid und Ammoniak zeigten im Jahresmittel geringe Konzentrationen, wohingegen aber der Gesamtstickstoffeintrag in den Bergwäldern zum Teil über 25 kg Stickstoff je Hektar und Jahr und damit über dem kritischen Wert für mögliche negative Einflüsse für Waldökosysteme liegt. Ursachen des überhöhten Stickstoffeintrags sind Verkehr, Hausbrand und Landwirtschaft. VOC-Konzentrationen zeigen eine deutliche Abhängigkeit mit der Höhe und von meteorologischen Tagesschwankungen.

Es ist zu erwarten, dass der Klimawandel zu schnell für die Anpassungsfähigkeit/-geschwindigkeit mancher Arten voranschreitet, was zu Veränderungen in Artgemeinschaften führen wird, möglicherweise bis zum (lokalen) Aussterben von Arten und einem Verlust an Biodiversität. Die Produktivität der Bergökosysteme wird sich verändern, was nicht nur für die Forstwirtschaft sondern auch für die globale CO<sub>2</sub>-Bilanz von Bedeutung ist. Insbesondere über eine angepasste Steuerung der Verjüngung und naturnahe Bewirtschaftung sollte die Stabilität der Gebirgswälder und deren vielfältigen Funktionen gefördert werden. Der anthropogene und zoogene Druck auf die alpinen Ökosysteme muss angepasst und Stickstoffeinträge gemindert werden.

Abbildung 2: Auswirkungen von 1 °C Erwärmung auf die Vegetationsperiode von Laubbäumen im Bergwald



## EXKURS FORSCHUNG

Prof. Dr. Annette Menzel, Dr. Susanne Jochner, Marvin Lüpke, Technische Universität München (Ökoklimatologie); Prof. Dr. Jeroen Buters, ZAUM-Zentrum für Allergie und Umwelt, Helmholtz Zentrum, Technische Universität München

## Eignen sich Bergregionen als Rückzugsgebiete für Allergiker?

Mit zunehmender Meereshöhe ändert sich auch das Vorkommen von Pflanzenarten. Die Birke zum Beispiel, welche durch ihren allergenen Pollen zum Leid der Allergiker beiträgt, wächst am Alpennordrand nur bis in 1700 Meter Höhe. Auch Gräser, eine weitere wichtige allergene Pflanzengruppe, sind in höheren Lagen weniger stark vertreten. Aber nicht nur das geringe Vorkommen, sondern auch eine allgemein geringere Pollenproduktion in höheren Lagen legen den Schluss nahe: Allergiker profitieren in der Pollensaison von besseren Bedingungen im Gebirge.

Messungen haben jedoch gezeigt, dass auch an höher gelegenen Standorten, wie der Umweltforschungsstation Schneefernerhaus UFS, medizinisch relevanten Pollenkonzentrationen vorkommen. Von einer hohen Belastung spricht man, wenn die Anzahl der Birkenpollen 50 Pollen pro Kubikmeter Luft überschreitet, bei den Gräsern reichen dafür bereits 30 Pollen aus; Grenzwerte, die auch an der UFS in den vergangenen Jahren mehrmals überschritten wurden. Grund dafür sind zwei Faktoren: Zum einen transportieren lokale Windsysteme, etwa der Berg-Tal-Wind, Pollen von niedriger zu höher gelegenen Regionen. Zum anderen können Pollen auch über

sehr viel weitere Distanzen im Rahmen des Ferntransports höhere Gebiete erreichen. Somit können hohe Pollenkonzentrationen auch dann gemessen werden, wenn selbst im Tal die Pollensaison bereits beendet ist. Dennoch ist die Belastung im Tal insgesamt größer: Während beispielsweise im Jahr 2010 in Garmisch insgesamt 1977 Birkenpollen pro Kubikmeter Luft registriert wurden, waren es an der UFS nur 583. Im Zuge des Klimawandels ist zu erwarten, dass die Pollensaison sich überall verlängern wird und die Pollenmenge durch höhere Kohlendioxidkonzentrationen ansteigt. Wie sich das „mengenmäßig“ auf alpine Standorte auswirkt, soll im Rahmen eines Langzeit-Monitorings erforscht werden.

Abbildung 1: Pollenfalle an der UFS (Foto: Susanne Jochner).



Die Pollenkonzentration allein ist nicht bestimmend für die Stärke der Symptome, denn jeder Pollen weist Unterschiede im Allergengehalt auf, er ist mal mehr, mal weniger „aggressiv“. An einigen Tagen können Pollen in der Luft präsent sein, der Allergengehalt jedoch zu vernachlässigen. Auch der umgekehrte Fall ist möglich: Allergene in der Luft können auch an Tagen ohne Pollenflug festgestellt werden. Die Analyse von Rückwärtstrajektorien legt nahe, dass die Herkunftsregion des Pollen seinen Allergengehalt bestimmt: Birkenpollen, die von südlichen Regionen ausgehend die UFS erreichen, waren dabei mit einer höheren „Aggressivität“ verbunden. Dass diese Pollen aus wärmeren Gebieten

stammen, ist jedoch anzuzweifeln. Erstens reicht das Verbreitungsgebiet der Birken typischerweise nur bis zur Poebene, zweitens wurden hohe Allergenwerte meist spät im Frühjahr erreicht. Ob höher gelegene Birken der südlichen Alpenregion letztendlich höhere Allergengehalte aufweisen und welchen Einfluss der Klimawandel hierbei ausübt, soll in weiteren Untersuchungen geklärt werden.

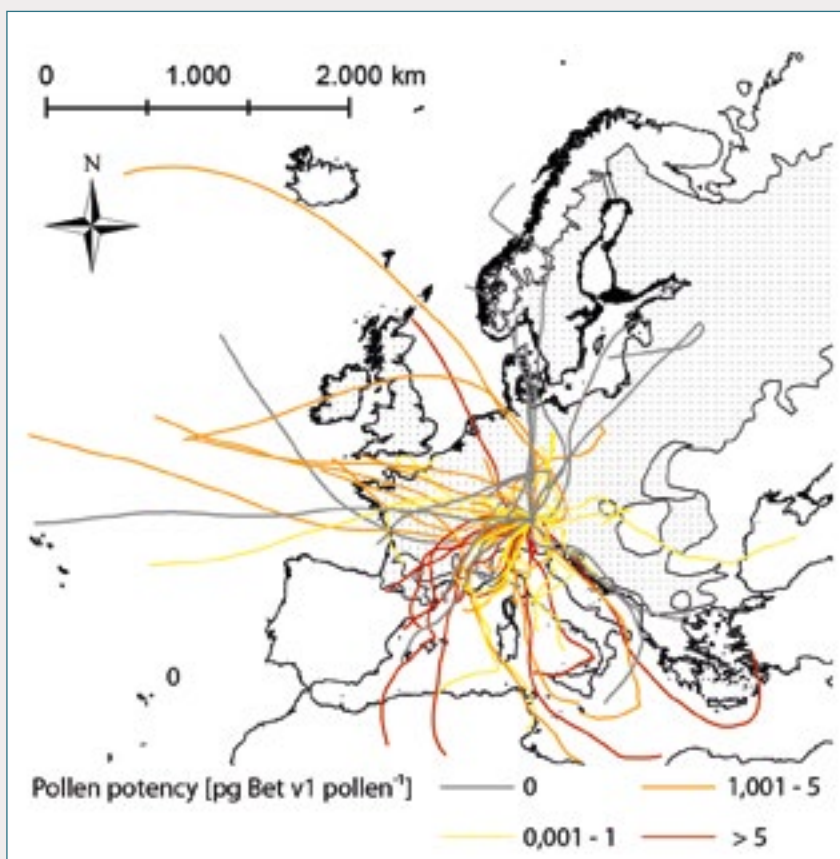


Abbildung 2: Rückwärtstrajektorien zeigen die Herkunftsregionen von Birkenpollen mit hohem Allergengehalt (rote Linien) auf (Quelle: Marvin Lüpke).

## EXKURS FORSCHUNG

---

Dr. Matthias Bernhardt, Karsten Schulz, Stefan Härer und Ralf Ludwig et al.; BOKU Wien / LMU München

---

## Beobachtung und Modellierung des alpinen Schneespeichers

Wichtige Kernaspekte:

- Das Schmelzwasser aus der alpinen Schneedecke stellt eine elementare Stütze des sommerlichen Abflusses dar und ist damit wichtig für die Wasser- und Energieversorgung der Gebirge und der Vorländern. Es kann aber auch zu Hochwasserereignissen führen, bzw. diese entscheidend verstärken.
- Die alpine Schneedecke reagiert unmittelbar und ohne Zeitverzögerung auf Klimaveränderungen.
- Veränderungen der mittleren Größe des Schneedeckenspeichers und des Zeitpunktes der jährlichen Schneeschmelze können zu großen Herausforderungen in der Speicherbewirtschaftung für den Hoch- und Niedrigwasserschutz sowie die Energieerzeugung führen.
- Ein umfassendes Monitoring und eine modellhafte Beschreibung der Schneedecke sind aufgrund ihrer sich verändernden Dynamik für ein nachhaltiges Management der Ressource Wasser in den Alpen und ihrem Vorland entscheidend.

### Signifikanz des alpinen Schneespeichers.

Weitgehende Einigkeit besteht in der Einschätzung, dass die Hochgebirge besonders stark vom globalen Klimawandel betroffen sind. In diesem Kontext gelten die europäischen Alpen als einer der sensitivsten Hochgebirgsräume. Gleichzeitig haben die Alpen eine herausragende Bedeutung als Wasserversorger für die Vorländer. Betroffen von den projizierten Veränderungen der Abflussregime, hervorgerufen vor allem durch eine sich verändernde Schneedeckendynamik und von häufiger auftretenden Extremereignissen, sind daher nicht nur die im Hochgebirge lebenden Menschen, sondern ebenfalls die Bewohner der anschließenden Vorländer (z. B. Bayern), sowie wichtige Wirtschaftsfaktoren wie die Wasser- und Energiewirtschaft und der Wintertourismus.

### Möglichkeiten zur Beobachtung der alpinen Schneedecke.

Die Ausdehnung der alpinen Schneedecke kann heute vor allem durch erdgebundene und satellitengestützte Fernerkundungsverfahren detailliert beschrieben werden. Die flächenverteilte Abschätzung des Volumens und des in der Schneedecke gespeicherten Wassers weisen noch große Unsicherheiten auf und sind damit aktuelles Forschungsthema. Erdgebundene "in-situ" Beobachtungen sind aufgrund der herausfordernden Bedingungen im Gebirgsraum schwierig und selten. Hier bestehen große Informationsdefizite die durch Forschungsnetzwerke wie „Global Cryosphere Watch (GCW)“ oder „Virtuelles Alpenobservatorium (VAO)“ ausgeglichen werden sollen. Neben der Vernetzung vorhandener Infrastrukturen besteht aber auch Bedarf an deren weiterem Ausbau, um Fernerkundungsdaten besser integrieren und Modelle damit optimieren zu können.



---

### **Stand der Schneedeckenmodellierung.**

Für die Beschreibung des in der Schneedecke gespeicherten Wasservolumens sind geeignete numerische Modelle notwendig, um aus punktuellen Eingabedaten (z. B. Messungen an meteorologischen Stationen) flächenverteilte Daten zu generieren und um Prognoseläufe zu ermöglichen. Die heute verfügbaren Modelle sind in der Lage, diese Aufgabe bei gegebener Güte der Eingangsdaten im Gebietsmittel weitgehend zu erfüllen. Aufgrund der bestehenden Unsicherheiten in der Beschreibung der Wind- und gravitativen Schneeverfrachtung sind die Ergebnisse auf lokaler Skala jedoch mit größeren Fehlern behaftet. Große Unsicherheiten bestehen aber bei der Beschreibung von anthropogen bewirtschafteten Arealen, wie zum Beispiel Skigebieten mit Beschneiungsanlagen. Hier sind bislang nur rudimentäre Modellansätze vorhanden, die infolge der zunehmenden Bedeutung dieses Einflusses unbedingt verbessert werden müssen, um die Prognosefähigkeit zu erhöhen.

### **Wichtige offene Schritte aus Sicht der Wissenschaft.**

Der Ausbau von gut instrumentierten, international vernetzten Testgebieten (wie im Rahmen von VAO) ist zur Erweiterung der momentan überschaubaren Datenbasis im Hochgebirge unumgänglich. Weiterhin muss die anthropogene Nutzung verbessert in vorhandene Modellansätze integriert werden, um zu einer umfassenderen Beschreibung der alpinen Schneespeicherdynamik zu gelangen und damit die Erstellung von Anpassungs- und Optimierungsstrategien erlauben.

---

## EXKURS FORSCHUNG

Dr. Kerstin Hürkamp, Dr. Jochen Tschiersch et al.;  
Helmholtz Zentrum München (Institut für Strahlenschutz); Projekt: „Strahlung und Umwelt II + TransAqua (beide BMBF) + VAO (StMUV)“

## Auswirkungen des Klimawandels auf die Umweltradioaktivität

Das Helmholtz Zentrum München untersucht auf der Umweltforschungsstation Schneefernerhaus (UFS), Zugspitze den Einfluss des Klimawandels auf den Transfer von Radionukliden von der Atmosphäre in den Schnee und über die Schneeschmelze in Oberflächengewässer und Trinkwasserreservoirs (Abbildung 1). Die Ergebnisse werden genutzt, um den Radionuklidhaushalt im Ökosystem Alpen unter sich wandelnden Klimabedingungen zu prognostizieren, die Exposition des Menschen

mit ionisierender Strahlung abzuschätzen und gegebenenfalls Maßnahmen zur Minderung zu planen.

Experimente haben gezeigt, dass verschiedene Niederschlagsarten unterschiedlich effizient sind, aerosolgebundene Stoffe (z. B. Radionuklide) aus der Luft auszuwaschen (Abbildung 2). Die Umwelt radionuklide Be-7, Pb-210 und Cs-137 zum Beispiel, die in den Untersuchungen des Helmholtz Zentrums als Tracer dienen, liegen bevorzugt im Aerosolpartikelgrößenbereich 350 bis 600 nm gebunden vor. Hohe Niederschlagsintensitäten mit komplexen Schneekristallen oder feuchten großen Schneeflocken tragen dabei am meisten zum Eintrag in die Schneedecke bei. In alpinen Höhenlagen werden deponierte Stoffe in der Schneedecke unter heutigen Klimabedingungen durch Sublimation und partielle Schmelzprozesse über den Winter kontinuierlich aufkonzentriert und erst Ende des Frühjahrs mit der beginnenden Schneeschmelze rasch ins Oberflächenwasser freigesetzt. Laborexperimente mit radioaktiven Tracern in Schneesäulen haben belegt, dass bereits die ersten 20 % des abgeflossenen Schmelzwassers über 80 % der radioaktiven

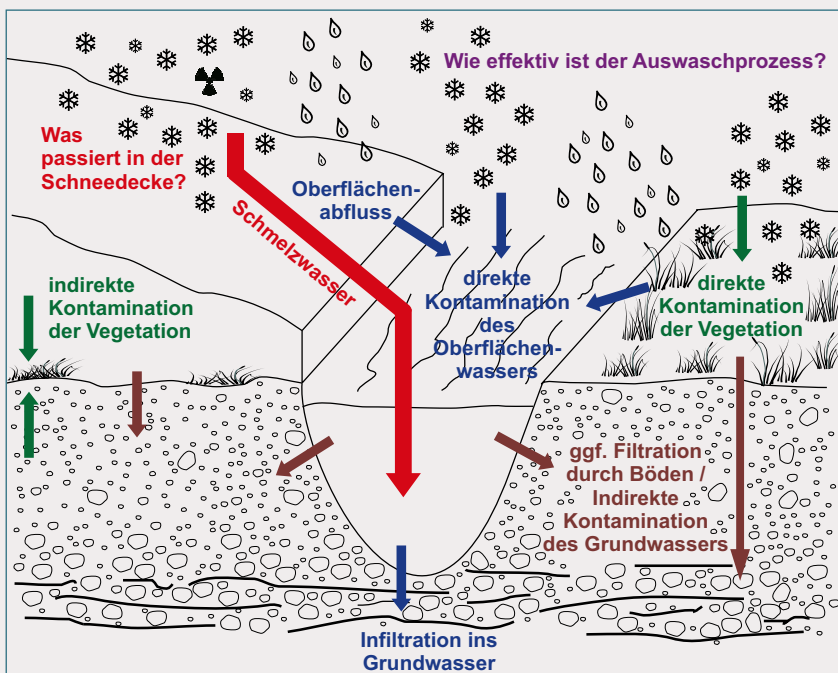


Abbildung 1: Prozesse des Eintrags von Radionukliden in alpine aquatische Ökosysteme (Quelle: Dr. Kerstin Hürkamp, Helmholtz Zentrum München).

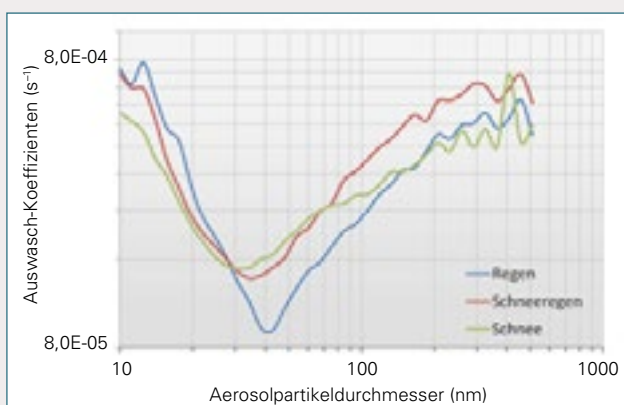
Fracht enthalten. Mit Beginn der Schmelzperiode kann so eine große Stoffmenge innerhalb kürzester Zeit in die alpinen Oberflächenwässer gelangen, da in den Höhenlagen auch Böden fehlen, die als Puffer und somit als Senke agieren könnten, zum Beispiel in Form von Radionuklidbindung an Tonminerale.

Vom Klimawandel ist der Alpenraum in besonderer Weise betroffen. Neben vielen anderen Konsequenzen wie zum Beispiel das Auftauen von Permafrost oder die Zunahme extremer Wetterbedingungen, wird sich mit zunehmender Erwärmung die Schneedecke im alpinen Umfeld verringern und Gletscher werden sich zurückziehen. Für hoch klimasensitive Regionen über 2.000 m NN werden hingegen für die Zukunft in Folge globaler Erwärmung mildere Winter und sogar ein Anstieg der Niederschlagsrate prognostiziert. Es wird vermutlich aber auch Tau-perioden mit Oberflächenabfluss während der Wintermonate geben, die den Wasserhaushalt und die Wasserqualität über die Veränderung möglicher Elementkonzentrationen im alpinen Trinkwasser stark beeinflussen.

Aus den oben genannten Prozessen ergeben sich vielerlei potentielle Einflüsse eines sich abzeichnenden Klimawandels auf den Eintrag und Verbleib von Radionukliden im Alpenraum. Entscheidende Größen sind Änderungen in der Niederschlagsart und -menge und der Niederschlagsverteilung über das Jahr. Eine Änderung der Bodenbedeckung hat Auswirkungen auf die abgelagerte Aktivität, aber auch auf den räumlichen und zeitlichen Transfer der Radionuklide in andere radioökologische Kompartimente und letztlich deren Verbleib im Alpenraum. Eine Änderung der Dauer der Bodenbedeckung und der Höhe der Bodenfeuchtigkeit verändert schließlich auch die Quellstärke geogener Komponenten der Luftradioaktivität.

In den laufenden Arbeiten wird der Ist-Zustand des Wasserhaushalts und der Umweltradioaktivität auf der Zugspitze aufgenommen und für das Zugspitzplatt bilanziert. Über weitere Messungen an anderen Lokalitäten gelingt eine grobe alpenweite Interpolation der Ergebnisse. Für die Erstellung von Prognosen zur Änderung des alpinen Radionuklidhaushalts werden Klimaszenarien der Zukunft generiert, für die dann auf Grundlage der heutigen Datenbasis die veränderte Exposition des Menschen mit ionisierender Strahlung im Alpenraum abgeschätzt werden kann.

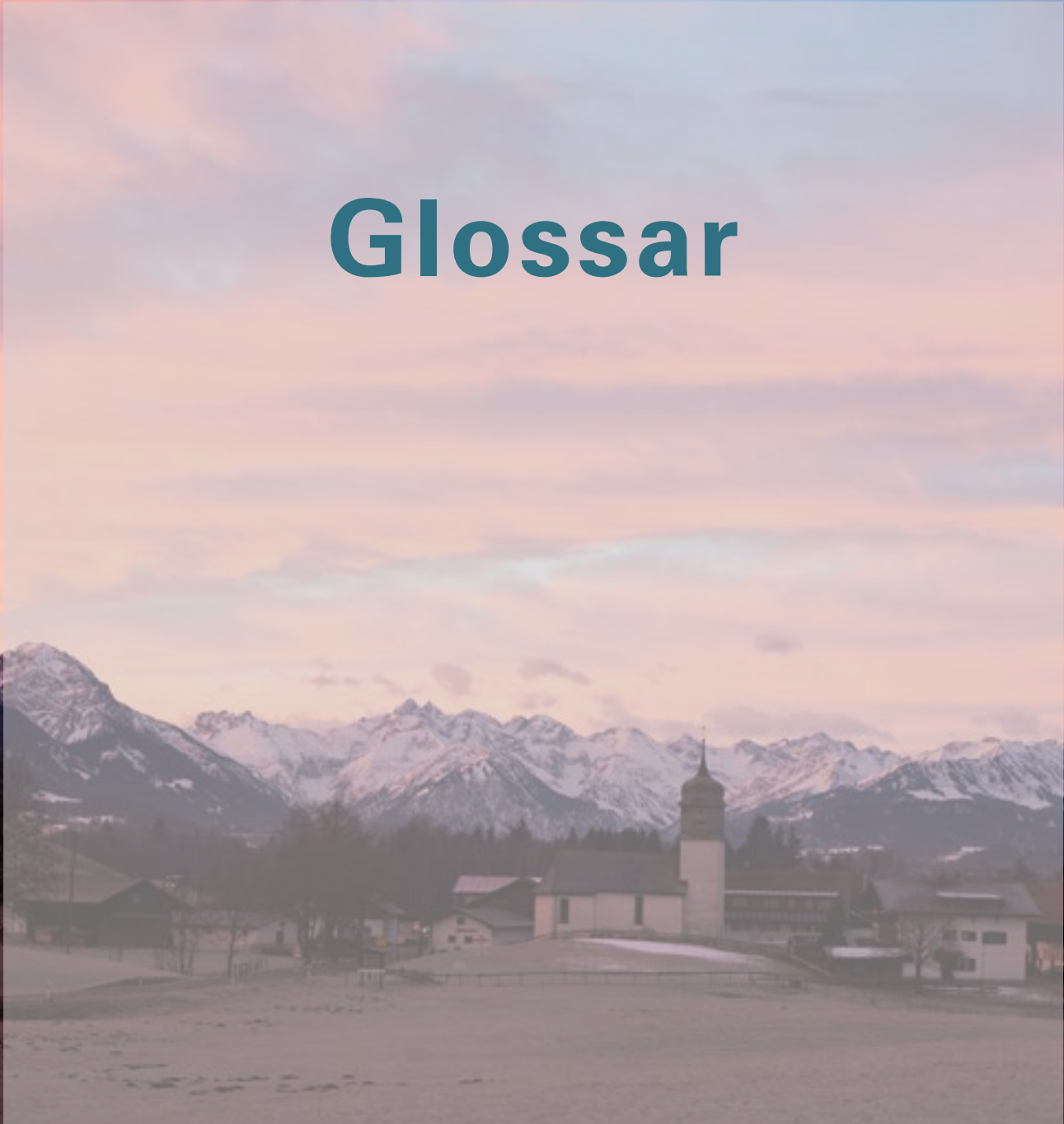
Abbildung 2: Effizienz des Auswaschprozesses aerosolgebundener Stoffe aus der Atmosphäre durch unterschiedliche Niederschlagsarten (Quelle: Dr. Kerstin Hürkamp, Helmholtz Zentrum München).



### Literatur

- [1] Franz, Herbert (1979): Ökologie der Hochgebirge. Verlag Eugen Ulmer Stuttgart.
- [2] Konner, V. (2004): Standortkarte Nationalpark Berchtesgaden. Forschungsbericht 49, 151 Seiten.
- [3] EEA (2009): Regional climate change and adaptation. The Alps facing the challenge of changing water resources. EEA (European Environment Agency) Report No 8/2009.
- [4] ZAMG (2015a): <http://www.zamg.ac.at/cms/de/klima/informationsportal-klimawandel/klimavergangenheit/neoklima/lufttemperatur>, (abgerufen am 13.4.2015).
- [5] Auer, I.; Böhm, R.; Jurkovic, A.; Lipa, W.; Orlik, A.; Potzmann, R.; Schörner, W.; Ungersböck, M.; Matulla, C.; Briffka, K.; Jones, P.D.; Efthymiadis, D.; Brunetti, M.; Nanni, T.; Maugeri, M.; Mercalli, L.; Mestre, O.; Moisselin, J.-M.; Begert, M.; Müller-Westermeier, G.; Kveton, V.; Bochnicek, O.; Stastny, P.; Lapin, M.; Szalai, S.; Szentimrey, T.; Cegnar, T.; Dolinar, M.; Gajic-Capka, M.; Zaninovic, K.; Majstorovic, Z. & E. Nieplova (2007): HISTALP – Historical instrumental climatological surface time series of the greater Alpine region 1760–2003. *International Journal of Climatology* 27.
- [6] BÖHM, R. (2009): Geändertes Umfeld durch Klimawandel? / Modified environment due to climate change? *Wildbach- und Lawinerverbau* 163.
- [7] ZAMG (2015b): <http://www.zamg.ac.at/histalp/dataset/station/csv.php>, (abgerufen am 13.4.2015)
- [8] KLIWA (2015): <http://www.kliwa.de/index.php?pos=wieweg/modelle/allgemein/>, (aufgerufen am 15.4.2015)
- [9] Roeckner, E., Bäuml, G., Bonaventura, L., Brokopf, R., Esch, M., Giorgetta, M., ... & Tompkins, A. (2003). The atmospheric general circulation model ECHAM 5. PART I: Model description.
- [10] Skamarock, W.; Klemp, J.; Dudhia, J.; Gill, D.; Barker, D.; Duda, M.; Huang, X.; Wang, W. & J. Powers (2008): A Description of the Advanced Research WRF Version 3. Technical report 459. Technical report, NCAR, Boulder, Colorado, USA.
- [11] Kraller, G. (2012): Zusammenfassung und Auswertung der karsthydrologischen Markierungen und Modellierung des Wasserhaushaltes im Nationalpark Berchtesgaden. Endbericht.
- [12] Schädler, G.; Berg, P.; Dütthmann, D.; Feldmann, D.; Ihringer, J.; Kunstmann, H.; Liebert, J.; Merz, B.; Ott, I. & S. Wagner (2012): Flood hazards in a changing climate. project report. Technical report, Karlsruhe Institute of Technology and Helmholtz Centre Potsdam.
- [13] Warscher, M. & H. Kunstmann (2013): Wasserhaushaltsmodellierung im Nationalpark Berchtesgaden – Abschlussbericht Projekt AZ MO 10/1. Garmisch-Partenkirchen. 23.1.2013.
- [14] IPCC (2014): Intergovernmental panel on climate change. Synthesis report.
- [15] Badeck, F.; Böhning-Gaese, K.; Cramer, W.; Ibisch, P.; Klotz, S.; Kreft, S.; Kühn, I.; Vohland, K. & U. Zander (2007): Schutzgebiete Deutschlands im Klimawandel - Risiken und Handlungsoptionen. *Naturschutz und Biologische Vielfalt* 46.
- [16] Cramer, W.; Vohland, K.; Badeck, F.; Klotz, S.; Kühn, I.; Hanspach, J.; Böhning-Gaese, K.; Trautmann, S.; Ibisch, P. & S. Kreft (2009): Schutzgebiete Deutschlands im Klimawandel - Risiken und Handlungsoptionen. F & E Projekt des Bundesamtes für Naturschutz. Laufzeit: 21.8.2006–20.8.2009
- [17] Ibisch, P.L. & S. Kreft (2008): Anpassung an den Klimawandel: eine systematische Analyse von Handlungsoptionen für den Naturschutz. *ANLiegen Natur* 32.
- [18] Ibisch, P.L. & S. Kreft (2009): Natura 2000 im Klimawandel. S. 51-64 in BBN (Hg.): *Stimmt das Klima? Naturschutz im Umbruch*. BBN, Bonn, 2009. (Jahrbuch für Naturschutz und Landschaftspflege 57.)
- [19] Kreft, S. & P. Ibisch (2009): Introduction into Module 3: the role of protected areas – management and networking in the Alps. International conference “Ecological networks in the Alps – a response to climate change that will conserve biodiversity?” Nationalpark Berchtesgaden and ALPARC, Berchtesgaden, 15. 10.2009. (URL: RÖCKNER, G.; BÄUML, G.; BONAVENTURA, R.; BROKOF, M.; ESCH, M.; GIORGETTA, S.; HAGEMENN, S.; KIRCHNER, I.; KORNBLUEH, L.; MANZIN, E.; RHODIN, A.; SCHLESE, U.; SCHULZWEIDA, U. & A. TOMPKINS (2003): The atmospheric general circulation model echam 5. part i: Model description. technical report., Technical report, MPImet/MAD Germany.

# Glossar



# Glossar

## A

### Abflussregime

Das Abflussregime bezeichnet den typischen, mittleren Jahresgang des Abflusses in einem Fließgewässer. Es wird durch das Klima, Relief, die Vegetation und die hydrogeologischen Eigenheiten des Gebietes bestimmt.

### advektiver Niederschlag

„Landregen“, eher langanhaltender, gleichmäßiger und weit ausgedehnter Niederschlag, der durch das Hereinziehen von Warmfronten entsteht.

### Akklimatisierung

Physiologische, umkehrbare Anpassung eines Lebewesens an Umweltbedingungen

### Anmoorboden

Nasser, sauerstoffarmer Bodentyp mit hohem Anteil an nur teilweise abgebauter → organischer Substanz

### Anpassungsmaßnahmen

Maßnahmen, die geeignet sind, um die schädlichen Auswirkungen einer Umweltveränderung, in dem Fall des → Klimawandels, auszugleichen bzw. zu mindern.

### Atmosphäre

Die Erdatmosphäre (v. griechisch atmos: Dunst, und sphaira: Kugel) ist die gasförmige Hülle der Erde. Sie kann entsprechend dem Temperaturverlauf in mehrere Schichten eingeteilt werden:

- die Troposphäre reicht an den Polen bis ca. 7 km Höhe und am Äquator bis ca. 17 km, sie wird durch die Tropopause begrenzt.
- die Stratosphäre beginnt an der Tropopause und reicht bis 50 km Höhe, begrenzt durch die Stratopause,

- die Mesosphäre zwischen 50 und rund 80 km wird durch die Mesopause begrenzt,
- die Thermosphäre zwischen 80 und etwa 800 km,
- die Exosphäre bis etwa 10.000 km bildet die äußerste Schicht.

Die Troposphäre wird auch als untere Atmosphäre, der Bereich Stratosphäre/Mesosphäre als mittlere Atmosphäre und die Schicht Thermosphäre/Exosphäre als obere Atmosphäre bezeichnet.

Die Luftschicht bis etwa 90 km Höhe hat eine recht gleichförmige (homogene) Zusammensetzung aus 78 % Stickstoff, 21 % Sauerstoff, 0,93 % Argon und anderen Edelgasen. Der Kohlendioxid-Gehalt beträgt nur 0,03 %, ist aber eine wichtige Komponente des natürlichen Treibhauseffektes, ohne den es auf der Erde bedeutend kälter wäre.

Die darüber befindliche Schicht (auch als Ionosphäre bezeichnet) besteht aus sehr dünnem Gas, das nicht mehr in Molekülen, sondern in Atomen und Ionen vorliegt (daher der Name). Dies liegt daran, dass die von der Sonne eingestrahelte hochenergetische Strahlung die Moleküle dissoziieren lässt, die so entstehenden Ionen (geladene Teilchen) aber erst nach längerer Zeit auf einen Partner treffen. Ferner kommt es auch zu einer Entmischung der Bestandteile nach ihrer unterschiedlichen molaren Masse. Dies führt zu einer Abnahme der mittleren molaren Masse mit zunehmender Höhe. Das Studium dieser Schichten nennt man Aerologie.

Für die Entstehung des Wetters in der Atmosphäre ist neben der Energiezufuhr durch die Sonneneinstrahlung hauptsächlich der Wasserdampf verantwortlich. Dieser kommt in wechselnder Konzentration von 0 % bis etwa 4 % des Luftvolumens vor.

### Atopische Erkrankungen

Überempfindlichkeitserkrankungen/ allergische Krankheiten

# B

## BayKLAS

Bayerische Klima-Anpassungsstrategie

## Bemessung/ Bemessungsabfluss

Berechnung der notwendigen Größe oder Beschaffenheit eines Bauwerks oder einer Anlage in Hinblick auf bestimmte Umweltbedingungen. Eine solche Umweltbedingung ist beispielsweise eine bestimmte Abflussmenge, die statistisch gesehen mit einer bestimmten Häufigkeit auftritt (siehe auch → HQ<sub>100</sub>). Welcher Bemessungsabfluss angesetzt wird, hängt von der Bedeutung des Bauwerks/ der Anlage ab.

## Biosphäre

Gesamtheit der Lebewesen auf der Erde (Pflanzenwelt, Tierwelt, einschließlich Bakterien und anderen einzelligen Organismen)

## Biotische/ abiotische Faktoren

Beeinflussende Größen, die entweder auf lebende Organismen zurückgehen (biotisch; z. B. Nahrungsbeziehungen, gegenseitige Beschattung von Pflanzen) oder von nicht lebenden Prozessen gesteuert sind (abiotisch; z. B. Klima, Wasserhaushalt, Höhenlage)

## Biozönose

Als Biozönose (Lebensgemeinschaft) bezeichnet man die Gesamtheit der Lebewesen eines bestimmten Lebensraums.

## Blow-up (Straßenbau)

Aufwölbung und ggf. Bruch des Straßenbelags (vor allem Asphalt + Bitumen) durch starke Sonneneinstrahlung und folglich starke Aufheizung.

## Bodenart

Beschreibt, aus welchen sogenannten Korngrößen des verwitterten Ausgangsgesteins sich der → Mineralboden zusammensetzt. Die Hauptbodenarten sind Sand, Schluff, Ton und Lehm.

## Bodenerosion

Abtrag von Boden durch Wind oder Wasser. Winderosion entsteht, wenn starker Wind über trockene, unbewachsene, lockere Böden weht. In Bayern hat die Winderosion hauptsächlich auf den ackerbaulich genutzten Niedermoorflächen Bedeutung, da dort der sehr leichte Boden besonders anfällig für Verwehung ist. Wassererosion entsteht, wenn starke Niederschläge auf einen Boden fallen, der nicht oder nur wenig von Pflanzen bedeckt wird. Begünstigt wird die Erosion durch stark geneigte oder lange, ungegliederte Hänge. Wassererosion tritt in Bayern besonders in den hügeligen und intensiv landwirtschaftlich genutzten Flächen auf. Insbesondere die fruchtbaren Lössböden können besonders leicht verschlämmt und vom Wasser abgetragen werden.

## Bodentyp

Definierte Abfolge von Ausgangsgestein, verwittertem Gestein, → Mineralboden, → Oberboden und nicht verrotteter pflanzlicher Auflage mit bestimmten Eigenschaften im → Wasserhaushalt, der Stabilität oder der Verfügbarkeit von Nährstoffen

## Business as usual-Szenario

→ Klimaszenario, welches von einer kontinuierlichen Fortsetzung der wirtschaftlichen Entwicklung ausgeht. Da es keine besonderen Klimaschutzanstrengungen gibt, ist dieses Szenario durch einen weiteren Anstieg der Treibhausgas-Emissionen gekennzeichnet [1].

## C

### **C<sub>3</sub>/C<sub>4</sub>-Pflanze**

Die Angabe C<sub>3</sub> bzw. C<sub>4</sub> kennzeichnet die Art, über welche Stoffwechselprozesse die Pflanze in der → Photosynthese ihre Energie gewinnt. C<sub>3</sub>-Nutzpflanzen wie Weizen, Roggen, Hafer oder Reis besitzen die höchste Photosyntheseleistung und damit den höchsten Ertrag unter gemäßigten Temperatur- und Lichtbedingungen, während C<sub>4</sub>-Pflanzen an hohe Temperaturen und starke Sonneneinstrahlungen angepasst sind. Solche sind beispielsweise Mais, Zuckerrohr oder Hirse.

## D

### **Deposition**

Deutsch: "Ablagerung". Ein Teil der Stoffeinträge, die zur Versauerung und Überdüngung von Böden und Vegetation beitragen, werden gasförmig, als feste Teilchen oder in Niederschlag und Luftfeuchtigkeit gelöst eingetragen, also abgelagert.

### **Destination**

In Tourismusbranche wird so ein geografischer Raum bezeichnet, der von einer bestimmten Personengruppe ein bevorzugtes Reiseziel darstellt, einschließlich der für diese Personengruppe notwendigen Infrastruktur.

### **Dürre**

Beschreibt die Auswirkung von Wassermangel und → Trockenheit auf die Vegetation, insbesondere auf die Landwirtschaft.

## E

### **Einzugsgebiet**

Für jede Stelle eines Gewässers lässt sich das Gebiet angeben, aus dem alles oberirdische Wasser dieser Stelle zufließt. Das Einzugsgebiet eines Pegels ist z. B. die Summe aller Gebiete, die dem Gewässer bis zu dieser Stelle Wasser zuführen. Für Untersuchungen des Wasserhaushaltes wird zusätzlich zwischen oberirdischem Einzugsgebiet und unterirdischem Einzugsgebiet unterschieden. Oft stimmen beide nicht überein. Extreme Unterschiede treten im Karst auf. Die Grenze des Einzugsgebietes wird durch die Wasserscheide markiert.

### **Eistage**

Ein Tag, an dem das Maximum der Lufttemperatur unterhalb des Gefrierpunktes (unter 0,0 °C) liegt, das heißt es herrscht Dauerfrost.

### **El Niño**

Bezeichnung für ein Zirkulations- und Klimaphänomen, das entlang der tropischen Westküste Südamerikas im Schnitt alle drei bis vier Jahre um die Weihnachtszeit auftritt. Daraus leitet sich der spanische Name für Knabe bzw. Christkind ab. El Niño ist charakterisiert durch ein Abflauen der tropischen Ost-Passatwinde, das Vermindern der kalten küstenparallelen Meeresströmung und vermehrte Sturmereignisse. Insgesamt hat El Niño Auswirkungen auf das gesamte globale Zirkulationsgeschehen.

### **Emissionsszenarien**

Die Emissionsszenarien sind Abschätzungen des zukünftigen Ausstoßes anthropogener Treibhausgase, wie sie für den 4. Sachstandsbericht des → IPCC gebildet wurden. Durch die Definition mehrerer Versionen wird es möglich, eine Bandbreite denkbarer Entwicklungen abzudecken. Diese Szenarien bilden die Grundlage für die Simulation des zukünftigen Klimas mit Hilfe von → globalen Klimamodellen. Das am häufigsten verwendete Szenario A1B repräsentiert



eine Welt mit schnellem Wirtschaftswachstum und schneller Einführung neuer Technologien.

### Ensemble

Eine klimatologische Ensembleprognose besteht aus mehreren Vorhersagen und dient der Bestimmung der Vorhersageunsicherheit. Aufgrund der chaotischen Natur der → Atmosphäre können kleine Unterschiede im Anfangszustand einer → Simulation zu großen Unterschieden in der Vorhersage führen.

### Erosion

→ Bodenerosion

### EURO-CORDEX

= World Climate Research Program Coordinated Regional Downscaling Experiment. Die internationale Forschergruppe untersucht wie sich der Klimawandel bis zum Ende des Jahrhunderts auf die verschiedenen Regionen in Europa auswirkt. Die EURO-CORDEX Simulationen sind hochaufgelöste regionale Klimasimulationen für Europa mit einer bisher nicht erreichten Detailgenauigkeit.

### Eutrophierung

Das Überangebot an Pflanzennährstoffen (insbesondere Stickstoff und Phosphor) in Gewässern oder im Boden. Dies hat in der Regel eine Förderung des pflanzlichen Wachstums (vor allem Algen und Makrophyten) mit entsprechender Verschlechterung des ökologischen Zustandes zur Folge. Meist werden dabei empfindliche Arten durch das üppige Wachstum nährstoff-liebender Arten verdrängt.

### Evapotranspiration

Zusammengesetzt aus der „Evaporation“, der Verdunstung von Oberflächen und „Transpiration“, der Ausatmung von Wasserdampf durch Pflanzen.

### Exposition

Deutsch: „Ausgesetztheit“. Im Themenfeld Gesundheit bezeichnet sie die Gesamtheit der Umwelteinflüsse, denen ein Lebewesen ausgesetzt ist.

### Extremereignis

Eine einheitliche Definition besteht nicht. Allgemein ist ein Extremereignis ein sehr selten auftretender kurzer Zeitraum im Geschehen von Wetter, Abfluss, Phänologie,..., das in seiner Ausprägung von bestimmten Durchschnittswerten abweicht. Solche Ereignisse können beispielsweise heftige Stürme oder Hochwässer sein, aber auch das massenhafte Auftreten einer Insektenart.

## F

### Flächennutzungsplan

Siehe Definition Kapitel 4.10.1

### Föhn (Stau)

Als Föhn wurde ursprünglich ein warmer, trockener, abwärts gerichteter Wind auf der Alpennordseite bezeichnet, der dort oftmals – insbesondere im Winterhalbjahr – für die Jahreszeit deutlich zu hohe Temperaturen bringt. Heutzutage wird die Bezeichnung „Föhn“ verallgemeinernd für die beim Überströmen von Gebirgen im → Lee auftretenden abwärts gerichteten Vertikalbewegungen verwendet, die mit deutlichem Lufttemperaturanstieg und zumeist mit Wolkenauflösung einhergehen. Auf der → Luvseite der Gebirge kommt es dabei zu aufwärts gerichteter Vertikalbewegung, die vorwiegend mit Wolken- und Niederschlagsbildung verbunden ist → Stau effekt im Luv der Gebirge. Nach moderneren Erkenntnissen ist der Föhn das Ergebnis eines dynamisch-thermodynamischen Prozesses, dessen Ursachen und Einflussgrößen sowie Erscheinungsformen sehr vielfältig sind.

Der Begriff „Föhn“ wird auch in anderen Gebieten als Bezeichnung für die dort im Lee der Gebirge auftretenden warmen Winde verwendet, wenn sie keine eigenen Namen aufweisen, wie z. B. in den deutschen Mittelgebirgen.

### **Fragmentierung der Landschaft, Fragmentierungsgrad**

Durch menschliche Nutzung werden natürliche oder naturnahe Lebensräume zunehmend unterbrochen und verkleinert. Je kleiner und mehr die Einzelgebiete, desto höher der Fragmentierungsgrad.

### **Frosttage**

Ein Tag, an dem das Minimum der Lufttemperatur unterhalb des Gefrierpunktes (unter 0,0 °C) liegt.

### **Fruchtfolge**

Reihenfolge, in der nacheinander (meist unterschiedliche) Ackerfrüchte auf einer Ackerfläche angebaut werden, um dem Boden nicht einseitig Nährstoffe zu entziehen

## **G**

### **Geothermie**

Geothermische Energie wird auch als Erdwärme bezeichnet. Erdwärme ist eine Form gespeicherter Energie unterhalb der Erdoberfläche. Landläufig versteht man unter Geothermie die technische Ausnutzung dieser natürlichen Wärmequelle zur Energiegewinnung.

### **Glazial**

Deutsch: „eiszeitlich“

### **Globale Klimamodelle**

Globale Klimamodelle (Global Climate Models, auch General Circulation Models - GCM) werden dazu verwendet, das globale Klimasystem abzubilden. Dabei werden für gewöhnlich lange Zeiträume von mehreren Jahrzehnten bis zu Jahrhunderten betrachtet. Mit globalen Klimamodellen sind sowohl Simulationen des vergangenen als auch Abschätzungen des zukünftigen Klimas der Erde möglich.

Abhängig vom Zeitpunkt ihrer Entwicklung und der verfolgten Zielstellung sind sie in ihrem Aufbau und ihren Grundannahmen unterschiedlich detailliert: Sie reichen von einfachen Modellen bis zu komplexen „Earth System Models“ (ESM). Die einfachen, oft historischen, Modelle betrachten zumeist nur die Prozesse in der → Atmosphäre und beziehen Vorgänge von Ozean und Landoberfläche als feststehende Größen ein (Parameter). ESM, die neueste Generation von Globalmodellen, versuchen hingegen die physikalischen und chemischen Vorgänge von Atmosphäre, Ozean, Polkappen, Landoberfläche, Biosphäre sowie die menschlichen Einflüsse in ihren vielfältigen Wechselwirkungen zu berechnen und zu koppeln. Ergebnis der globalen Klimamodelle sind die gängigen Klimagrößen wie Temperatur, Niederschlag, Luftfeuchte oder Sonneneinstrahlung.

Oft wird die Berechnung des Erdklimas durch ein Globalmodell mit nahezu identischen Eingangsgrößen mehrfach durchgeführt („Läufe“ oder „Realisationen“), um die Unterschiede zu berücksichtigen, die allein durch die mathematische und rechen-technische Verarbeitung hervorgerufen werden. Der Begriff „Läufe“ (engl. „runs“) wird auch verwendet, wenn ein GCM mit unterschiedlichen Eingangsgrößen, z. B. unterschiedlichen Emissionsszenarien, durchlaufen wird.

Für zukünftige → Klimaprojektionen bauen die globalen Klimamodelle zumeist auf → Emissionsszenarien auf.

### **GLOWA-Danube (Projekt)**

Abgeschlossenes Forschungsprojekt des Bundesministeriums für Bildung und Forschung BMBF mit dem Ziel, mit verschiedenen Szenarien den Einfluss des → Klimawandels, der Bevölkerungsentwicklung und der Landnutzung auf die Wasserressourcen der Oberen Donau zu erforschen sowie regionale Anpassungsstrategien zu entwickeln und diese zu bewerten. GLOWA steht für **GLO**baler **WA**ndel des Wasserkreislaufs.

### Grundwasser

Grundwasser bezeichnet die Gesamtheit des Wassers, das in lockeren Gesteinsschichten (z. B. Kiese, Sande) oder den Klüften und Spalten von Festgestein (z. B. Granit, Sandstein, Kalkstein) gespeichert wird. Nicht dazu zählt das im Boden gespeicherte Wasser (sog. „ungesättigte Bodenzone“), da es noch im beständigen Austausch mit der Atmosphäre steht.

### Grundwasserkörper

Ein an die Europäische Wasserrahmenrichtlinie angelehnter Begriff (dort: bodies of water, groundwater body) der ein zusammenhängendes, einheitlich reagierendes System aus einem oder mehreren → Grundwasserleitern beschreibt. Aufgrund der Unzugänglichkeit des Untergrundes und seinem komplexen Aufbau sind Grundwasserkörper praktisch nie eindeutig festlegbar.

### Grundwasserleiter

Wasserführende Gesteinsschicht mit einheitlichen Eigenschaften

### Grundwasserneubildung

Die Grundwasserneubildung bezeichnet verschiedene Vorgänge, bei denen Wasser (z. B. aus Niederschlag oder Oberflächengewässern) nach der Durchsickerung der ungesättigten Bodenzone den → Grundwasserkörper erreicht [1].

### Gt

Gigatonne =  $10^9$  Tonnen = 1.000.000.000 Tonnen

## H

### Herkünfte (Forstwirtschaft)

Innerhalb der Baumarten haben sich durch langjährige natürliche Auslese lokale Ausprägungen ausgebildet, die an die spezifischen Standortbedingungen wie Böden und Klima im Verbreitungsgebiet, angepasst sind. Sie werden in der Forstpraxis auch als Herkünfte bezeichnet.

### Hitzetag (= Heiße Tag)

Ein Tag, an dem das Maximum der Lufttemperatur mindestens 30,0 °C beträgt.

### Humus

Organischer Anteil des Bodens, bestehend aus zersetzten Bestandteilen von Tieren und Pflanzen. siehe auch → organische Substanz

### Hundertjähriger Abfluss ( $HQ_{100}$ )

Abfluss eines Gewässers, der an einem Standort im Mittel alle hundert Jahre überschritten wird. Da es sich um einen Mittelwert handelt, kann dieser Abfluss innerhalb von hundert Jahren auch mehrfach auftreten. Aufgrund der Seltenheit dieses Ereignisses wird dieser Abfluss statistisch berechnet. Er wird häufig zur → Bemessung von Hochwasserschutzanlagen verwendet.

### Hybridzüchtung

Kreuzung von nur weitläufig verwandten Pflanzensorten zur Erzeugung neuer Arten, z. B. ergibt die Kreuzung aus Weizen- und Roggensorten die neue, nicht selbst fortpflanzungsfähige, Artengruppe Triticale.

**Hydrosphäre**

Gesamtheit des flüssigen, festen oder gasförmigen Wassers auf der Erde. Die Hydrosphäre umfasst die Meere und Oberflächengewässer genauso wie das →Grundwasser, das Gletscher- und Meereis der →Kryosphäre oder den Wasserdampf der →Atmosphäre.

**IJ****Invasive Arten**

Siehe → Neobiota

**IPCC**

Das Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) ist der zwischenstaatliche Ausschuss für Klimaänderungen, der dem Sekretariat der Klimarahmenkonvention beigeordnet ist. Seine Aufgabe ist nicht eigene Forschung, sondern deren Beurteilung hinsichtlich der Risiken der globalen Erwärmung sowie das Zusammentragen von Vermeidungs- und Anpassungsstrategien. Gegründet wurde das IPCC bereits 1988 vom Umweltprogramm der Vereinten Nationen (UNEP) und der Weltorganisation für Meteorologie (WMO).

**K****Klimaanpassung**

Siehe Anpassung

**Klimahülle**

Dieser Begriff wird vorrangig in der Forstwirtschaft und Ökologie verwendet und bezeichnet den „Wohlfühlbereich“ einer Baum- bzw. allgemeiner Pflanzen oder Tierart hinsichtlich der klimatischen Lebensbedingungen wie Temperatur und Niederschlag, aber auch Lichtverhältnisse.

**Klimamodell**

→ Globale Klimamodelle

**Klimaschutzprogramm Bayern 2050 – KLIP 2050**

Das KLIP 2050 ist der Nachfolger des Klimaschutzprogramms 2020 und fasst das geplante Maßnahmenprogramm zum bayerischen Klimaschutz zusammen.

**Klimaszenario**

Dieser Begriff ist eine spezielle Bezeichnung aus dem Projekt → GLOWA Danube. Er kennzeichnet eine mögliche zukünftige Entwicklung des Klimas und ist damit in der Aussage ähnlich der → Klimaprojektion, unterscheidet sich allerdings in der Methodik der Erstellung.

**Klima- und Wasserhaushaltsprojektion**

Abbildung des zukünftigen Klimas bzw. Wasserhaushalts mit Hilfe von aufeinander aufbauenden Modellen („Modellkette“). Dabei wird jeweils nur eine von verschiedenen möglichen „Zukünften“ gebildet. Gängig ist die Kombination aus → Emissionsszenario, globalem → Klimamodell und regionalem Klimamodell. Je nach weiterer Anwendung wird noch ein weiteres Modell, z. B. ein → Wasserhaushaltsmodell, nachgeschaltet.

**Klimawandel**

„Klimawandel“ ist ein Synonym für Klimaveränderung, also allgemein jede Veränderung des Klimas unabhängig von der betrachteten Größenordnung in Raum und Zeit.

Neben Veränderungen der Mittelwerte können auch Änderungen anderer statistischer Kenngrößen (Streuung, Extreme, Form der Häufigkeitsverteilungen) einzelner Klimaparameter (Temperatur, Niederschlag, Wind, Feuchte, Bewölkung usw.) auftreten.

**Klimazone**

Klimazonen sind großräumige Gebiete der Erde, in denen die wesentlichen Züge des Klimas gleich sind. Zur Abgrenzung dienen verschiedene

Klimaklassifikationen, die die wichtigsten Klimaparameter, insbesondere jährliche und monatliche Mitteltemperaturen und Niederschlagssummen, zur Klassifizierung verwenden.

### **KLIWA**

Kooperationsvorhaben „**Klimaveränderung** und Konsequenzen für die **Wasserwirtschaft**“ der Bundesländer Bayern, Baden-Württemberg und Rheinland-Pfalz in Zusammenarbeit mit dem Deutschen Wetterdienst.

### **Kohlenstoff stabil, intermediär und labil**

In der Bodenkunde: stabiler Kohlenstoff ist sehr fest im Boden gebunden und wird nur schwer und gelöst und damit langsam aus dem Boden ausgetragen. Intermediärer Kohlenstoff lässt sich über bestimmte Prozesse im Boden besser lösen, während labiler Kohlenstoff gut löslich ist und damit schnell ausgetragen oder umgewandelt werden kann.

### **Kohlenstoffkreislauf**

Kreislauf zwischen der Bindung von Kohlenstoff aus der Luft durch Pflanzen in der → Photosynthese, Speicherung im Boden, Lösung und Transport im Wasser und Wiederfreisetzung in die → Atmosphäre

### **Konfidenzintervall**

„Vertrauensbereich“; statistisches Maß dafür, wie sicher die getroffene Annahme nicht falsch ist.

### **konvektiver Niederschlag**

„Schauer“, also ein kurzer, meist heftiger und örtlich eng begrenzter Niederschlag, der typisch für gewittrige Sommerniederschläge ist.

### **Kryosphäre**

Gesamtheit der Gebiete der Erde, die den größten Teil des Jahres eis- oder schneebedeckt sind.

## **L**

### **Luv und Lee**

Mit Luv wird die dem Wind zugewandte Seite eines Hindernisses bezeichnet (Berg, Gebäude, Schiff,...), Lee ist die windabgewandte Seite.

### **Lysimeter**

Ein Lysimeter ist ein Gerät zur Beprobung von Bodensickerwasser, um dessen Quantität und Qualität zu bestimmen. Lysimeter dienen der Erfassung von Wechselwirkungen, bzw. Stofftransporten zwischen der → Atmosphäre, den Pflanze, dem Boden und dem → Grundwasser.

## **M**

### **Meromixie**

Siehe → Schichtung von Seen

### **Mineralboden**

Die unteren Schichten des Bodens, die nur aus Gesteinsbestandteilen bestehen (grobe und feine Gesteinsstücke, Sand, Schluff, Ton). Diese liegen unterhalb der Schichten mit → organischer Substanz.

### **Mischbaumart**

Baumart, die nicht die häufigste Art eines Wald-/ oder Forstbestandes ist und nicht vorrangig der forstwirtschaftlichen Nutzung dient, sondern der Artenvielfalt des Bestandes.

### **Mittlere jährliche Abflüsse**

Mittelwert des Abflusses im Gesamtjahr über einen längeren Zeitraum (meist >30 Jahre) aus gemessenen täglichen Abflusswerten.

**Mittlere monatliche Abflüsse**

Mittelwert des Abflusses in einzelnen Monaten über einen längeren Zeitraum (meist >30 Jahre) aus gemessenen täglichen Abflusswerten.

**Mortalität**

Sterblichkeit

**Muren**

In der Fachsprache bezeichnet man ein von Berghängen niedergehendes Gemisch aus Wasser, groben und feinen Schutt/Schlamm sowie Holz als Mure. Für den Feststoffanteil wird in der Literatur häufig ein Wert von mindestens 30 % angegeben.

**Mutation, Migration und Genfluss**

Mutation ist die dauerhafte Veränderung des Erbgutes eines Lebewesens, Genfluss bezeichnet den Austausch von Erbgut innerhalb einer Art, Migration ist eine Wanderungs- und Ausbreitungsbewegung von Lebewesen, durch welche deren Eigenschaften verbreitet werden

**N****N**

Chemisches Formelzeichen für Stickstoff

**Neobiota (Neophyten, Neozoen)**

Arten, die nach 1492 unter direkter oder indirekter Mitwirkung des Menschen eingewandert sind. Neophyten sind dabei neue Pflanzenarten, Neozoen neue Tierarten.

**Nematoden**

Fadenwürmer

**Niedrigwasser**

Von Niedrigwasser spricht man, wenn a) der Wasserstand in einem See unter einen für dieses Gewässer typischen Schwellenwert fällt oder b)

der gemessene Abfluss in einem Fließgewässer einen bestimmten, für dieses Gewässer typischen, Schwellenwert unterschreitet. Wie auch Hochwasser ist Niedrigwasser ein Teil des natürlichen Abflussgeschehens.

**Niedrigwasserinformationsdienst**

Karten- und Informationsdienst des Bayerischen Landesamts für Umwelt, um über → Niedrigwasser und damit verbundene Ausprägungen in Flüssen, Seen und → Grundwasser bzw. die Gewässerqualität zu informieren und auf → Extremereignisse hinsichtlich → Trockenheit hinzuweisen.

**Nitratverlagerung**

Auswaschung von Nitrat aus dem (Acker-)Boden und Verlagerung in Grund- und Oberflächenwasser

**NM,Q**

Niedrigster Mittelwert von sieben aufeinanderfolgenden Tagesabflusswerten innerhalb eines Jahres oder Jahresabschnitts (z. B. Halbjahr).

**O****Oberboden**

Hier vermischen und verbinden sich organische Substanz (→ Humus) mit mineralischen Bestandteilen (→ Mineralboden).

**Ökologische Nische**

Kombination von Lebensbedingungen (Klima [→ Klimahülle], Wasserversorgung, Boden, Höhenlage, ...), wie sie für das Vorkommen einer bestimmten Tier- oder Pflanzenart typisch ist.

**Organische Substanz**

Bodenbestandteile, die aus abgestorbenen und zum Teil bereits umgewandelten Tier- und Pflanzenresten bestehen. Vergleichbar mit → Humus

**Orographie**

Physische Beschaffenheit der Geländeoberfläche (Höhe, Steilheit, „Rauhigkeit“).

**PQ****Pegel**

Messstelle für Abfluss (Fließgewässer) oder Wasserstand (See)

**Permafrost**

Ganzjährig gefrorener Boden

**Phänologie**

Phänologie (aus dem griechischen: erscheinen) ist die Lehre von biologischen Erscheinungen und befasst sich mit den im Jahresablauf periodisch wiederkehrenden Wachstums- und Entwicklungserscheinungen der Pflanzen und Tiere. Es werden z. B. die Eintrittszeiten charakteristischer Vegetationsstadien, wie Austrieb, Blüte, Fruchtansatz, Reifebeginn, Reife, Laubfärbung oder Laubfall und das Verhalten der Tiere, wie Zugverhalten oder Paarungszeit von Vögeln beobachtet und festgehalten.

**Photosynthese**

Prozess, in dem Pflanzen mithilfe von Licht aus dem Kohlenstoffdioxid (CO<sub>2</sub>) der Luft und Wasser Zucker und darauf aufbauende Stoffe bildet.

**Physiologische Amplitude**

Bereich an Umweltbedingungen (z. B. Temperatur), die ein Lebewesen normalerweise ertragen kann

**Prozesskühlung**

Kühlung von Maschinen im laufenden Betrieb von Produktionsprozessen oder der Energieerzeugung

**R****Referenzzeitraum**

In der Klimaforschung gelten 30 Jahre als geeignete Zeitspanne, um ein mittleres Verhalten darzustellen. Um den mittleren Zustand des Klimas und daraus abgeleiteter Auswirkungen in der Gegenwart zu charakterisieren, wurde für diesen Bericht der Zeitraum 1971–2000 festgelegt. Dieser dient zudem als Vergleichsperiode zu zukünftigen Verhältnissen.

**Retention**

Deutsch: „Rückhalt“ von Wasser in der Fläche

**Prävalenz**

Krankheitshäufigkeit

**Regionale Klimamodelle**

Verfeinerungen der globalen → Klimamodelle, um verbesserte Aussagen der Klimaentwicklung auf verhältnismäßig kleinräumiger Ebene zu erhalten.

**REMO**

Kurzbezeichnung für das „**RE**gionale Klima**MO**-dell“ des Max-Planck-Instituts für Meteorologie in Hamburg.

**Reservoirtier**

Zwischenwirt bei Übertragung von Krankheitserregern, ohne dass dieser Wirt selbst erkrankt

**Resilienz**

Maß für die Widerstandsfähigkeit eines Systems gegenüber Umweltveränderungen und Fähigkeit, sich nach Störungen wieder zu erholen. Dies können natürliche Systeme, also Ökosysteme oder der Wasserhaushalt sein, wie auch gesellschaftliche Systeme, wie die Gesellschaft im Allgemeinen, aber auch einzelne Wirtschaftszweige.

**Rutschung**

Rutschungen sind flächenhafte Hangbewegungen, die sich zwar meist langsam bewegen, ihre Geschwindigkeit kann aber auch bis zu 1 m pro Sekunde betragen.

**S****Schalenwild**

Gesamtheit der Paarhufer, die dem Jagdrecht unterliegen (z. B. Hirsche, Rehe, Wildschweine, Wildschafe)

**Schichtung (von Seen)**

Gewöhnlicherweise sind die tiefen Seen in Bayern geschichtet. Das heißt, im Sommer liegt eine sauerstoffreiche, warme Wasserschicht über einer kalten, verhältnismäßig sauerstoffarmen Wasserschicht. Im Winter befindet sich das kältere Wasser über dem verhältnismäßig wärmeren Tiefenwasser. Im Frühjahr und Herbst findet eine Umkehr der Schichtung und damit eine Durchmischung statt. Ist diese Durchmischung unvollständig, spricht man von Meromixie.

**Schneedeckendauer**

Zusammenhängende Anzahl von Tagen mit geschlossener oder zumindest durchbrochener Schneedecke (zwischen 50 und 100 % der Fläche schneebedeckt).

**Schuttströme**

Schuttströme, eine der häufigsten Arten von Massenbewegungen in den bayerischen Alpen, sind durch eine fließende Bewegung von Lockermassen gekennzeichnet. Die meist sehr feinkornreichen (tonig-schluffigen) Schuttmassen beginnen infolge einer Erhöhung des Wassergehaltes des Materials zu fließen. Eine andere Art der Massenbewegung ist die → Mure

**Schutzwald**

Der Schutzwald liefert auf großer Fläche Lawinenschutz. Rund 22 % der Bergwälder im bayerischen Alpenraum haben Lawinenschutzfunktion.

**Sensibilisierungsprävalenz**

Häufigkeit, mit der bestimmte Personengruppen auf eine bestimmte Umwelteinwirkung reagieren, z. B. auf Pollen oder Hitze und daran erkranken.

**Sickerwasser**

Menge des Wassers, das durch den Boden hindurch bis ins → Grundwasser versickert

**Simulation**

Überbegriff zur Erzeugung von Datenreihen mithilfe eines Modells.

**Smart Grids**

„Intelligente“ Energieversorgungsnetze mit zeitlich und räumlich aufeinander abgestimmten, bedarfsgerechten Einheiten zur Energieproduktion, -verteilung und -speicherung. Siehe auch Kapitel 4.13.1.1

**SOC**

„Soil organic carbon“, dt: gesamter organischer Kohlenstoff im Boden.

**Sommertag**

Ein Tag, an dem das Maximum der Lufttemperatur mindestens 25,0 °C beträgt.

**Stadtquartier**

Anderes Wort für Stadtviertel

**Starkregen (Starkniederschlag)**

Von Starkregen spricht man bei großen Niederschlagsmengen pro Zeiteinheit. Starkregen kann zu schnell ansteigenden Wasserständen und (bzw. oder) zu Überschwemmungen führen, häufig einhergehend mit → Erosion des Bodens. Der DWD warnt deswegen vor Starkregen in 2 Stufen (wenn voraussichtlich folgende Schwellenwerte überschritten werden):



- Regenmengen  $\geq 10$  mm / 1 Std. oder  $\geq 20$  mm / 6 Std. (Markante Wetterwarnung)
- Regenmengen  $\geq 25$  mm / 1 Std. oder  $\geq 35$  mm / 6 Std. (Unwetterwarnung)

### Stau(wetter)lage

→ Wetterlage, bei der feuchte Luftmassen an ein quer zur Luftströmungsrichtung stehendes Gebirge gedrängt werden. Die Luft wird zum Aufsteigen gezwungen, wodurch es häufig zu Wolkenbildung und Niederschlägen kommt.

### Strahlungshaushalt

Als Strahlungshaushalt wird die Bilanz der ein- und ausgehenden Strahlung der Atmosphäre oder des Erdbodens bezeichnet.

Für die Atmosphäre ist die Bilanz negativ, das heißt es wird weniger kurzwellige Sonnenstrahlung absorbiert als langwellige Strahlung abgegeben. Die Erdoberfläche dagegen hat eine positive Strahlungsbilanz. Von der ursprünglichen Sonnenstrahlung erreicht im Durchschnitt ein Drittel den Erdboden auf direktem Wege. Die insgesamt am Erdboden ankommende Sonnenstrahlung besteht aus dieser direkten Strahlung und der diffus gestreuten Himmelsstrahlung. Diese Globalstrahlung erwärmt den Erdboden, der seinerseits (entsprechend seiner Temperatur) langwellig ausstrahlt. Die regionalen Unterschiede im Strahlungshaushalt sind eine Folge der wechselnden Einstrahlungsverhältnisse und terrestrischer Parameter, die die Strahlungsumsätze beeinflussen.

### Stratosphäre

Siehe → Atmosphäre

### subtropischer Hochdruckgürtel

Erdumspannende Zone zwischen grob 25 und 40 ° nördlicher Breite, in der vorrangig Gebiete hohen Luftdrucks das Wetter bestimmen. Typischer Teil dieses Gürtels ist das Azorenhoch, welches das Wetter in Mitteleuropa durch seine aktuelle Lage mit beeinflusst.

## T

### Tiefdruckgebiet

Ein Tiefdruckgebiet beschreibt eine Region mit relativ niedrigem Luftdruck, dessen tiefster Wert das Zentrum (Tiefkern) darstellt. Der Tiefkern wird in den Wetterkarten im deutschsprachigen Raum mit dem Buchstaben T gekennzeichnet. In den gemäßigten Breiten, in denen Mitteleuropa liegt, wandern Tiefdruckgebiete von West nach Ost und sorgen so für häufig wechselnde Witterung.

### Trajektorien

Trajektorien sind die Bahnkurven von einzelnen Luftteilchen in horizontaler und vertikaler Richtung. Vorwärtstrajektorien geben an, wie sich ein Luftteilchen in der Zukunft verhält, also in welche Richtung es zieht. Dagegen geben Rückwärtstrajektorien an, wo ein Luftteilchen herkommt.

**Treibhauseffekt**

Durch partielle Rückstrahlung durch Treibhausgase verursachte Erwärmung der Erde zusätzlich zur direkten Einstrahlung der Sonnenenergie. Der natürliche Treibhauseffekt beruht zum größten Teil auf den Treibhausgasen Kohlendioxid (CO<sub>2</sub>) und Wasser (H<sub>2</sub>O) und macht die Erde für die hier existierenden Lebewesen bewohnbar. Ohne den natürlichen Treibhauseffekt wäre die durchschnittliche Oberflächentemperatur um ca. 33 °C geringer als heute (-18 °C statt derzeit etwa 15 °C). Der zusätzliche, durch den Menschen verursachte (anthropogene) Treibhauseffekt resultiert aus der Emission durch den Menschen auf Grund seiner Aktivitäten erzeugter natürlicher (z. B. CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, N<sub>2</sub>O) und nicht natürlicher (z. B. PFC, HFC, SF<sub>6</sub>) Treibhausgase [2].

**Trockenheit**

Zunächst rein meteorologische Definition eines zeitweiligen Niederschlagsmangels. Je nach betrachtetem Bereich (Landwirtschaft, Wasserwirtschaft, ...) zieht dies unterschiedliche Definitionen von Trockenphasen nach sich, welche die Dauer der Trockenheit und oft auch die Menge des Wassermangels einbeziehen.

**Trophie**

Nährstoffgehalt eines Gewässers.

**Troposphäre**

Siehe → Atmosphäre

**U****Überlastfall**

Der Begriff ist hier vor allem im Wasserbau gebräuchlich, kann aber prinzipiell auf jegliche Art von Bauwerken übertragen werden. Bauwerke wie Brücken, Hochwasserschutzanlagen, Wasserkraftanlagen, ... werden auf bestimmte mittlere

und extreme Abflussbedingungen einer bestimmten Häufigkeit „bemessen“, also in ausreichender Größe gebaut. Tritt nun ein noch größeres Ereignis (→ Extremereignis) ein, kann das Bauwerk seine Funktion wegen Überlastung nicht mehr erfüllen.

**UFS**

Umweltforschungsstation Schneesfernerhaus

**UV-Strahlung**

Sonnenstrahlung im für Menschen nicht mehr sichtbaren, kurzwelligen Bereich mit hohem Energiegehalt.

**V****Vb-Wetterlage**

Besondere → Wetterlage in der Klassifikation nach van Bebber (1891). Bei dieser lenkt ein starkes → Tiefdruckgebiet über Mitteleuropa aus dem Nordatlantik kommende Luftmassen zunächst südwärts über das Mittelmeer und anschließend wieder östlich der Alpen nordwärts. Die warme, feuchtigkeitsreiche Luft kühlt sich dabei wieder ab und führt zu äußerst ergiebigen, langanhaltenden Niederschlägen im östlichen Mitteleuropa.

Vb-Lagen entwickeln sich bevorzugt im Frühling und Herbst, wenn es zu einem intensiven Luftmassenaustausch zwischen den kalten nord- und warmen südlichen Breiten kommt. Sie können prinzipiell jedoch zu allen Jahreszeiten auftreten und gehören zu den eher seltenen Wetterlagen.

**Vegetationsperiode**

Zeitraum innerhalb des Jahres, in welcher die Pflanzen → Photosynthese betreiben und demnach wachsen

**Vektor (Gesundheit)**

Überträgermedium von Krankheitserregern. Dieser kann sowohl → abiotisch (Wind, Wasser), als auch → biotisch (z. B. Tiere) sein.

**VICCI**

Vector-borne Infectious Diseases in Climate Change Investigations

**VOC**

„Volatile organic carbon“ (flüchtiger organischer Kohlenstoff) ist hier ein Begriff aus der Bodenkunde und steht für gasförmige Kohlenstoffverbindungen, die von Pflanzen oder Mikroorganismen gebildet werden und dem Boden rasch entweichen.

**Vulnerabilität**

Verletzlichkeit von natürlichen oder gesellschaftlichen Systemen gegenüber äußeren Umwelteinflüssen. Die Vulnerabilität definiert sich aus der Kombination von Stärke des Einflusses, der Reaktionsschwelle des Systems und der Fähigkeit, sich anzupassen. Systeme mit niedrigen Reaktionsschwellen und geringerer Anpassungsfähigkeit sind verletzlicher als solche mit hohen Reaktionsschwellen und/ oder großer Anpassungsfähigkeit.

**W****Wasserhaushalt**

Bezeichnet die Menge des gespeicherten und bewegten Wassers innerhalb eines Gebietes getrennt in die Anteile der sogenannten Wasserhaushaltsgrößen. Solche Größen sind der eingetragene Niederschlag, der Abfluss auf der Bodenoberfläche und anschließend im Gewässer, das → Grundwasser, das im Boden zwischengespeicherte Wasser oder die Menge der Verdunstung.

**Wasserhaushaltsmodell**

Wasserhaushaltsmodelle berechnen aus meteorologischen Eingangsdaten wie Temperatur und Niederschlag unter Berücksichtigung verschiedenster

Einflussgrößen wie des Reliefs, des Bodens, der Landnutzung und Vegetation den Wasserabfluss an bestimmten → Pegeln im Gewässer.

**Wasserkreislauf**

Das Wasser wird innerhalb des → Wasserhaushalts beständig umverteilt. Diese Austauschvorgänge bezeichnet der Wasserkreislauf.

**Wasserrahmenrichtlinie WRRL**

Die WRRL ist ein EU-weites Planungsinstrument, über das in Oberflächen- und Grundwasser ein „guter ökologischer“, bzw. „guter mengenmäßiger“ Zustand erreicht werden soll. Um dieses Ziel zu erlangen, werden in den einzelnen EU-Staaten zahlreiche Maßnahmen vorgesehen und umgesetzt.

**Wetterlage**

Der Begriff Wetterlage ist die Bezeichnung für den Wetterzustand, wie er im Hinblick auf die wichtigsten meteorologischen Elemente (Luftdruck, Geopotential, Boden- und Höhenwind, Bewölkung, Niederschlag, Lufttemperatur und Luftfeuchte) über einem begrenzten Gebiet während eines kurzen, höchstens eintägigen Zeitintervalls vorherrscht.

Die Wetterlage kann auf analysierten Wetterkarten nachvollzogen werden. Bleibt eine Wetterlage über mehrere Tage mit nur geringen Variationen bestehen, so spricht man von einer Großwetterlage.

**Wildbäche**

Wildbäche sind Fließgewässer mit relativ kleinen → Einzugsgebieten, die eher gering verbaut sind. Vor allem im Bergland sind sie weiterhin charakterisiert durch zeitweise hohe Geschiebeführung, teilweise hohen Wildholzanfall, ein steiles Gefälle der Bachsohle sowie stark und rasch wechselnde Wasserführung.

# XYZ

## Zeitreihe

Reihe von Werten, die fortlaufend entsprechend einer bestimmten Zeiteinheit angeordnet werden, z. B. stündliche Temperaturmesswerte.

## Zoonoseerreger

Erreger, welche Krankheiten zwischen Menschen und Tieren (beide Richtungen möglich) übertragen können.

## Zwischenabfluss

Dieser Begriff steht im Zusammenhang mit  
 → Grundwasserneubildung und Bodenwasserhaushalt und beschreibt das Wasser, das nicht bis ins  
 → Grundwasser versickert, sondern innerhalb des Bodens waagrecht abfließt und als Quelle wieder austritt.

## Zweitfrucht

Bestandteil von → Fruchtfolgen, in dem nach der ersten Ernte noch eine weitere Ertrag bringende Ackerfrucht angebaut wird

## Zwischenfruchtanbau und Winterbegrünung

Sonderform der → Fruchtfolge, in der gezielt Pflanzen angebaut werden, die nicht der Produktion von Gütern dienen, sondern den Boden vor → Erosion schützen und ggf. Nährstoffe anreichern

## Zyklonal

Drehsinn der Luftströmung um ein Gebiet tiefen Luftdrucks (Nordhalbkugel: gegen den Uhrzeigersinn, Südhalbkugel: im Uhrzeigersinn). Außerdem Bezeichnung für eine → Wetterlage mit überwiegendem Tiefdruckeinfluss, welche zumeist durch wolken- und niederschlagsreiches Wettergeschehen gekennzeichnet ist.

## Verweise

[1] GLOWA-Danube-Glossar: <http://www.glowa-danube.de/atlas/glossar.php> (abgerufen am 06.08.2015)

[2] JHLUG-Glossar zur Klimaschutz: [http://www.hlug.de/fileadmin/dokumente/das\\_hlug/hessentag/2007/glossar\\_klimaschutz.pdf](http://www.hlug.de/fileadmin/dokumente/das_hlug/hessentag/2007/glossar_klimaschutz.pdf) (abgerufen am 06.08.2015)



# Beteiligte Institutionen und Hauptbearbeiter

## Deutscher Wetterdienst (DWD)

Redaktion, Kapitel 2, Kapitel 3, Glossar

- Dr. Andreas Walter
- Dr. Annegret Gratzki

## Bayerisches Landesamt für Umwelt (LfU)

Koordination Kapitel 4, Kapitel 4.2, Zusammenfassung, Glossar

- Alana Steinbauer
- Maria Foltyn
- Dr. Michael Joneck

Fachbeiträge durch weitere Bearbeiter für die Kapitel 3.8; 4.2; 4.3; 4.7 und 4.14

## Umweltforschungsstation Schneefernerhaus (UFS)

Koordination Forschungsbausteine

- Prof. Siegfried Specht
- Melanie Köber

## Bayerisches Staatsministerium für Umwelt und Verbraucherschutz (StMUV)

Koordination Gesamtbericht, Vorwort, Kapitel 1

- Dr. Martin Frede

## Weitere Institutionen

- Kapitel 4.1  
Bayerisches Staatsministerium für Finanzen, Landesentwicklung und Heimat (StMFLH)
- Kapitel 4.4  
Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft (LfL)
- Kapitel 4.5  
Bayerische Landesanstalt für Gartenbau und Weinbau (LWG)
- Kapitel 4.6  
Bayerische Landesanstalt für Wald und Forstwirtschaft (LWF)

- Kapitel 4.8  
Bayerisches Landesamt für Gesundheit und Lebensmittelsicherheit (LGL)
- Kapitel 4.9  
Ludwig-Maximilians-Universität München, Institut für Geografie
- Kapitel 4.10, Kapitel 4.12  
Oberste Baubehörde des Bayerischen Staatsministeriums des Innern, für Bau und Verkehr (StMI)
- Kapitel 4.11; Kapitel 4.13  
bifa Umweltinstitut

Herausgeber: Bayerisches Staatsministerium für Umwelt und Verbraucherschutz (StMUV) | Rosenkavalierplatz 2, 81925 München  
 Internet: [www.umweltministerium.bayern.de](http://www.umweltministerium.bayern.de)  
 E-Mail: [klimaschutz@stmuv.bayern.de](mailto:klimaschutz@stmuv.bayern.de)

Gestaltung: [www.studio-botschaft.de](http://www.studio-botschaft.de)

Fotos: © kab-vision/Fotolia.com, © junikaefer/Fotolia.com, © gudrun/Fotolia.com: S. 53 von links nach rechts; © Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft: Abb.4.4.\_1 (S. 81); © Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft (Wagner, S.): Abb.4.4.\_2 (S. 83); © Bayerische Landesanstalt für Wald und Forstwirtschaft: Abb.4.6 (S. 97 ff.); © Bayerische Landesanstalt für Weinbau und Gartenbau: Abb.4.5 (S. 90 ff.); © Bayerisches Landesamt für Gesundheit und Lebensmittelsicherheit: Abb.4.8 (S.117 ff.); © Bayerisches Landesamt für Umwelt: Abb. 3.8\_2 (S. 53), Abb.4.2\_1 (S. 57); Abb.4.2\_2 (S. 58); Abb.4.2\_3 (S. 59); Abb.4.2\_4 (S. 60); Abb.4.2\_5 (S. 61); Abb.4.2\_7 (S. 62); Abb.4.2\_8 (S. 64); Abb.4.2\_9 (S. 65); Abb.4.2\_10 (S. 65); Abb.4.3\_1 (S. 71); Abb.4.3\_2 (S. 72); Abb.4.3\_3 (S. 73); Abb.4.3\_4 (S. 75); Abb.4.14\_4 (S. 160); Abb.4.15\_6 (S. 163); Abb.4.14\_8 (S. 164); Abb.4.14\_9 (S. 165); Abb.4.14\_10 (S. 166); Abb.4.14\_11 (S. 166 f.); Abb.4.14\_12 (S. 168); © Bayerisches Landesamt für Umwelt (Dr. Walter Joswig): Abb.4.7\_2 (S. 112); © Bayerisches Landesamt für Umwelt (Ulrich M. Sorg): Abb.4.7\_3 (S. 113); © Bayerisches Staatsministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Forsten: Abb.4.6\_6 (S. 105); © Bayerisches Staatsministerium für Umwelt und Verbraucherschutz: S. 2, Abb.4.2\_6 (S. 62); Abb.4.7\_1 (S. 111); © Bayerische Zugspitzbahn (Lechner): Titelseite oben; © bifa Umweltinstitut GmbH: Abb.4.11\_1 (S.142); Abb.4.11\_2 (S.143); © C. Martin, piclease: Abb. (S.111 oben); © Deutscher Wetterdienst: Abb. 2.1\_2 (S. 16), Abb. 2.2\_1 (S. 18), Abb. 3.3 (S. 38 ff.), Abb. 3.4 (S. 44 ff.), Abb. 3.6 (S. 50 f.), Abb. 3.8\_1 (S. 53), Abb. 4.14 (S. 157); © IPCC Klimaänderungen 2013: Abb. 2.1\_3 (S. 16); © Projekt GLOWA-Danube: Abb. 4.9\_1 (S. 131), Abb. 4.9\_2 (S. 132), Abb. 4.9\_3 (S. 132), Abb. 4.9\_4 (S. 133), Abb. 4.13\_1 (S. 154); © Umweltbundesamt (L. Ries): Abb. 2.1\_3 (S. 16); © Walter Böhmer: Abb. 4.14\_5 (S. 162); © Wasserwirtschaftsamt Kempten: Abb. 4.14\_7 (S. 163); © Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik Österreich: Abb.4.14\_1 (S. 157); © WWA Deggendorf (Binder Luftbild): Abb. Fluss mit Hochwasser (S. 149); © Catalin Hiciu | Thinkstock: S. 139; © 1stphoto/fotolia: S. 23, © Julia Rotter: Titel unten links und rechts, S. 10, S. 13, S. 14, S. 32, S. 34, S. 43, S. 49, S. 52, S. 55, S. 115, S. 123, S. 156, S. 180, S. 197

Druck: deVega Medien GmbH

Stand: November 2015 | © StMUV, alle Rechte vorbehalten

Gedruckt auf Papier aus 100 % Altpapier

**ClimatePartner**<sup>®</sup>  
**klimateutral**

Druck | ID 11342-1509-1008

Diese Druckschrift wird kostenlos im Rahmen der Öffentlichkeitsarbeit der Bayerischen Staatsregierung herausgegeben. Sie darf weder von den Parteien noch von Wahlwerbenden oder Wahlhelfern im Zeitraum von fünf Monaten vor einer Wahl zum Zweck der Wahlwerbung verwendet werden. Dies gilt für Landtags-, Bundestags-, Kommunal- und Europawahlen. Missbräuchlich ist während dieser Zeit insbesondere die Verteilung auf Wahlveranstaltungen, an Informationsständen der Parteien sowie das Einlegen, Aufdrucken und Aufkleben parteipolitischer Informationen oder Werbemittel. Untersagt ist gleichfalls die Weitergabe an Dritte zum Zweck der Wahlwerbung. Auch ohne zeitlichen Bezug zu einer bevorstehenden Wahl darf die Druckschrift nicht in einer Weise verwendet werden, die als Parteinahme der Staatsregierung zugunsten einzelner politischer Gruppen verstanden werden könnte. Den Parteien ist es gestattet, die Druckschrift zur Unterrichtung ihrer eigenen Mitglieder zu verwenden. Bei publizistischer Verwertung – auch von Teilen – Angabe der Quelle und Übersendung eines Belegexemplars erbeten. Das Werk ist urheberrechtlich geschützt. Alle Rechte sind vorbehalten. Die Broschüre wird kostenlos abgegeben, jede entgeltliche Weitergabe ist untersagt. Diese Broschüre wurde mit großer Sorgfalt zusammengestellt. Eine Gewähr für die Richtigkeit und Vollständigkeit kann dennoch nicht übernommen werden. Für die Inhalte fremder Internetangebote sind wir nicht verantwortlich.



BAYERN | DIREKT ist Ihr direkter Draht zur Bayerischen Staatsregierung.

Unter Telefon 089 122220 oder per E-Mail unter [direkt@bayern.de](mailto:direkt@bayern.de) erhalten Sie Informationsmaterial und Broschüren, Auskunft zu aktuellen Themen und Internetquellen sowie Hinweise zu Behörden, zuständigen Stellen und Ansprechpartnern bei der Bayerischen Staatsregierung.

Bayern.  
Die Zukunft.