

Klimaentwicklung und Wald

**– ein Beitrag zum Waldprogramm
Baden-Württemberg 2003 –**

Holger Flaig, Astrid Aretz, Dorothea Elsner,
Wolfgang Weimer-Jehle

Nr. 247 / Dezember 2003

Arbeitsbericht

***Akademie für Technikfolgenabschätzung
in Baden-Württemberg***

Industriestr. 5, 70565 Stuttgart
Tel.: 0711 • 9063-0, Fax: 0711 • 9063-299
E-Mail: info@ta-akademie.de
Internet: <http://www.ta-akademie.de>

Ansprechpartner: Dr. Holger Flaig Tel. 0711 • 9063-131
E-Mail: holger.flaig@ta-akademie.de

Die *Akademie für Technikfolgenabschätzung in Baden-Württemberg* gibt in loser Folge Aufsätze und Vorträge von Mitarbeitern sowie ausgewählte Zwischen- und Abschlussberichte von durchgeführten Forschungsprojekten als *Arbeitsberichte der TA-Akademie* heraus. Diese Reihe hat das Ziel, der jeweils interessierten Fachöffentlichkeit und dem breiten Publikum Gelegenheit zu kritischer Würdigung und Begleitung der Arbeit der TA-Akademie zu geben. Anregungen und Kommentare zu den publizierten Arbeiten sind deshalb jederzeit willkommen.

Inhaltsverzeichnis

Vorwort

Teil I: Klimaentwicklung (A. Aretz und W. Weimer-Jehle)

1	Einleitung	2
2	Klimamodelle	4
3	Globale Klimaentwicklung	5
4	Regionale Klimaentwicklung	10
4.1	Forschungsarbeiten zu regionalen Auswirkungen der Klimaveränderung in Baden-Württemberg	10
4.2	Bisherige Auswirkungen der Klimaveränderungen in Baden-Württemberg.....	12
4.3	Klimaprognosen für Bayern	13
4.4	Klimaprognosen für Europa	15
5	Literaturverzeichnis Teil I	17

Teil II: Wald und Klima (D. Elsner und H. Flaig)

6	Einflussfaktoren auf den Wald	19
7	Forschungsprojekte zu „Wald und Klima“	20
8	Auswirkungen von Klimaveränderungen auf den Wald	21
8.1	Waldwachstum	22
8.2	Bestandesentwicklung	24
8.2.1	Verschiebung der Baumartenzusammensetzung	24
8.2.2	Erweiterung des Verbreitungsgebietes der Baumarten	26
8.3	Boden	27
8.4	Wasserhaushalt	28
8.5	Schädlinge und Krankheitserreger	28
8.5.1	Tierische Schädlinge	29
8.5.2	Pilzliche Schaderreger	31
8.5.3	Parasitische Pflanzen.....	32
8.6	Fauna.....	32
8.7	Auswirkungen von Extremereignissen.....	32
8.7.1	Sommerliche Dürren	32
8.7.2	Spätfröste	33
8.7.3	Stürme.....	33
8.7.4	Nassschnee und Eisbruch	34
8.7.5	Waldbrände	34
8.7.6	Insektenkalamitäten	34
9	Waldbauliche Konsequenzen	36
9.1	Ansätze für waldbauliche Strategien im Klimawandel	36
9.2	Diskussion waldbaulicher Konzepte im Arbeitskreis Wald und Klima 2003	41
10	Literaturverzeichnis Teil II	43

Anhang I	45
Anhang II	49
Anhang III	52
Anhang IV	53

Vorwort

Der vorliegende Arbeitsbericht ist aus der wissenschaftlichen Begleitung des Waldprogramms Baden-Württemberg 2003 entstanden. Beim Waldprogramm handelt es sich um einen auf internationalen Konzepten basierenden, gesellschaftlichen Dialogprozess, in dem Vertreter unterschiedlicher Interessensgruppen, Verbände und Sektoren wichtige forstpolitische Handlungsfelder diskutieren. Ziel ist es, Leitsätze zur Forstpolitik zu formulieren, um die Basis für einen gesellschaftlichen Konsens zur nachhaltigen Waldbewirtschaftung im Land zu schaffen und zu vertiefen. Dieser Dialog hat in Baden-Württemberg bereits 1999 begonnen, so dass der auf Bundesebene parallel verlaufende Prozess des nationalen Waldprogramms bei seiner Konzeption auf Erfahrungen und Konzepte aus Baden-Württemberg zurückgreifen konnte. Am Runden Tisch der zweiten Dialogphase 2001/2002 wurde vorgeschlagen, in der dritten Phase die Themen „Wald und Biodiversität“ und „Wald und Klima“ als Schwerpunkte zu behandeln. Bereits damals wurde an eine Kooperation mit der Akademie für Technikfolgenabschätzung gedacht.

Die TA-Akademie hat den Dialogprozess im Jahre 2003 moderiert und wissenschaftlich begleitet. Dazu wurden zunächst Sachstandspapiere zu den Themen „Wald und Klimaentwicklung“ und „Wald und Biodiversität“ erarbeitet. Auf dieser Basis hat ein Runder Tisch im Juli 2003 diese Themen diskutiert und Schwerpunkte zur Aufarbeitung in zwei Arbeitsgruppen festgelegt. In jeweils drei Arbeitsgruppen-Sitzungen wurden die neuesten Erkenntnisse integriert, die Ergebnisse bewertet und im Konsens Handlungsleitlinien formuliert, die im zweiten Runden Tisch am 29. Oktober 2003 diskutiert und verabschiedet wurden.

Die Recherchen, Fachgespräche und Diskussionen zum Thema „Klimaentwicklung und Wald“ mit Fokus Baden-Württemberg haben viele spannende Ergebnisse erbracht, die uns dazu bewogen haben, diesen Teil des Waldprogramms 2003 als Arbeitsbericht der Akademie für Technikfolgenabschätzung im Internet zu veröffentlichen. Dr. Dorothea Elsner (Stuttgart) hat im Auftrag der TA-Akademie mit ihrer fundierten und sorgfältigen Literaturanalyse wesentliche Grundlagen geliefert, dafür herzlichen Dank. Der Bericht wird gleichzeitig einer der letzten der TA-Akademie sein, die laut Beschluss der Landesregierung ihren Geschäftsbetrieb zum 31. 12. 2003 einstellen muss.

Wir bedanken uns beim Ministerium für Ernährung und Ländlichen Raum Baden-Württemberg für die finanzielle Förderung des Projektes. Besonders gedankt sei Ministerialrat Werner Erb, Anja Peck und Christoph Schirmer für die angenehme und stets konstruktive Zusammenarbeit.

Stuttgart, den 11. Dezember 2003

Dr. Holger Flaig

Teil I: Klimaentwicklung

1 Einleitung

Bis zum Beginn der Industrialisierung waren die Auswirkungen menschlicher Eingriffe in die Naturkreisläufe im Wesentlichen lokal oder regional begrenzt. Seit Beginn der Industrialisierung werden jedoch deutlich überregionale bzw. globale Änderungen im Stoffhaushalt der Atmosphäre als Folge menschlichen Agierens beobachtet. So stiegen weltweit die Konzentrationen von klimarelevanten Gasen wie Kohlendioxid oder Methan gegenüber den Werten vorindustrieller Zeiten.

Die Gründe hierfür sind vielfältig. Sie liegen im starken Anstieg der Verbrennung fossiler Energieträger wie Öl, Kohle oder Erdgas, in Änderungen bei der Landnutzung oder bei der Ausweitung der Viehwirtschaft.

Zum Teil gelangen aber auch völlig neue Stoffe wie Fluorchlorkohlenwasserstoffe (FCKW), Halone, perfluorierte und wasserstoffhaltige Fluorkohlenwasserstoffe (FKW und HFKW) und Schwefelhexafluorid (SF_6) in die Atmosphäre, die in der Natur praktisch nicht vorkommen und fast ausschließlich durch den Menschen erzeugt werden.

Die Zusammensetzung der Atmosphäre kann über vielseitige Wechselwirkungen zu weitreichenden und raschen Änderungen im gesamten Klimasystem führen. Welche Auswirkungen die Zunahme der Treibhausgase auf die Temperatur und das gesamte Klima hat, ist nicht einfach zu beantworten, da das Klimasystem ein hochkomplexes nichtlineares System ist. Variationen des Klimas werden bestimmt durch externe Faktoren (Sonnenaktivität, Vulkanausbrüche), die Zusammensetzung der Atmosphäre (Gehalt von Treibhausgasen und Aerosolteilchen), sowie durch die interne Wechselwirkung der verschiedenen Komponenten des Klimasystems (Ozeane, Eisschilde, Landoberflächen, Biosphäre, Atmosphäre).

Klimawissenschaftler vermuten, dass es durch die Konzentrationszunahme der Treibhausgase in der Atmosphäre zu einer Verstärkung des (natürlichen) Treibhauseffektes und damit zu einem Anstieg der bodennahen Temperatur kommt. Die folgenden Vorgänge beschreiben die Kausalkette, mit der der anthropogene Treibhauseffekt begründet wird:

- Emission anthropogener klimarelevanter Gase; grundsätzlich messbar.
- Zunahme der Spurenstoffkonzentrationen im Klimasystem unter Beachtung chemischer Umsetzungen; bedingt messbar – anthropogen bedingte Zunahme kann nicht in allen Fällen zweifelsfrei von natürlicher Fluktuation getrennt werden.
- Veränderung des Strahlungsfeldes im Klimasystem relativ zum natürlichen Strahlungsfeld; bisher nicht messbar.
- Veränderung der Temperatur im Klimasystem, bewirkt durch Absorption der Zusatzstrahlung; bedingt messbar – anthropogen bedingte Temperaturänderung kann bisher nicht von natürlicher Fluktuation getrennt werden.

Trotz des internationalen Problembewusstseins melden sich Skeptiker zu Wort, die die Möglichkeit einer durch den Menschen verursachten Klimaänderung entweder generell abstreiten oder die Stichhaltigkeit von Teilen der Argumentation in Frage stellt. Einige ihrer Argumente sollen im Folgenden vorgestellt werden: [UBA01, u.a.]

1. These

Kohlendioxid nimmt in der Atmosphäre überhaupt nicht zu bzw. die gemessene Veränderungen in den Kohlendioxid-Konzentrationen können nicht auf menschliche, sondern nur auf natürliche Einflüsse (wie z.B. Vulkantätigkeit) zurückgeführt werden.

2. These

Eine erhöhte Kohlendioxid-Konzentration hat düngende Wirkung, weshalb wiederum mehr Kohlendioxid über ein verstärktes Pflanzenwachstum (Bildung von Biomasse) aus der Atmosphäre entnommen wird.

3. These

Die Absorptionsbanden von Kohlendioxid sind bereits gesättigt, mehr Kohlendioxid in der Atmosphäre kann keinen weiteren Effekt bringen.

4. These

Der derzeitige Stand der Klimamodellierung erlaubt keine zuverlässigen Schlüsse auf die zukünftige Klimaentwicklung.

Im Rahmen des Waldprogramms Baden-Württemberg wird davon ausgegangen, dass durch die Emission klimarelevanter Gase Gefahren für das Ökosystem und die menschliche Zivilisation drohen können. Vor dem Hintergrund dieser möglichen Klimaveränderungen sollen Maßnahmen formuliert werden, die schon frühzeitig mögliche Veränderungen in den Rahmenbedingungen berücksichtigen.

2 Klimamodelle

Computergestützte Klimamodelle sind die einzigen Instrumente, die es im Moment erlauben, Auswirkungen menschlicher Eingriffe auf das Klimasystem auf einer physikalischen Basis abzuschätzen, die aber trotz zunehmender Verfeinerungen und Formulierungsstrenge immer mit dem Problem der Prognoseunsicherheit konfrontiert sind. Das Prozessverständnis, welches in solche Modelle einfließt, wird durch Fallstudien, Feldexperimente und theoretische Studien erarbeitet. Globale Modelle dieser Art werden angetrieben durch Szenarien der atmosphärischen Treibhausgas- und Aerosolkonzentration,

Je enger die Maschen eines derartigen Gitters sind, desto besser können die Gleichungen gelöst werden und desto genauer sind die Modellsimulationen. Mit der Größe der Auslösung steigt die Rechenzeit in der 3. Potenz an. Deshalb kann mit Klimamodellen bisher nur mit Auflösungen von 100 bis 300 km gerechnet werden. Feinere Auflösungen sind heutzutage in der Wettervorhersage gebräuchlich, können aber in der Klimaforschung für längere Simulationszeiträume noch nicht eingesetzt werden.

Für Vorgänge, die sich auf Skalen unterhalb des gelösten Gitters abspielen (z.B. Wolken, Niederschlag, Frost), verwendet man eine Parametrisierung. Hierbei wird aus den an den Gitterpunkten vorliegenden Größen das Geschehen innerhalb einer Gitterzelle mit Hilfe stark vereinfachter Modelle berechnet. In diesem Verfahren liegen einige der wichtigsten Unsicherheitsfaktoren der Klimamodellierung.

Für regionale Klimaaussagen sind wesentlich kleinräumigere Aussagen erforderlich, als sie die heute üblichen Rechengitter für globale Modelle bieten. Da der Weg, die Rechengitter insgesamt ausreichend fein (z.B. Auflösung 15 km) zu wählen, aus Gründen der Rechenzeit versperrt ist, müssen hierfür besondere Methoden zur Anwendung kommen [Bay99], [EuA-ka01]:

- Bei der *dynamischen Methode (auch explizit-dynamische Methode)* wird in ein global arbeitendes grobes Rechengitter ein feines „Gitternest“ eingebettet, das die interessierende Region überdeckt.
- bei den *statistischen Methoden* nützt man die aus der Beobachtung bekannten Korrelationen zwischen großräumigen Klimaparametern und den regionalen Klimaeigenschaften (z.B. Korrelation Mitteltemperatur Europa zu Mitteltemperatur Süddeutschland). Darauf gestützt zieht man regionale Schlüsse aus den von Globalmodellen geschätzten zukünftigen großräumigen Zuständen.
- Ebenfalls statistisch basiert ist der Ansatz, die beobachteten regionalen Korrelationen zwischen verschiedenen Klimaparametern untereinander zu nutzen (z.B. regionale Mitteltemperatur zu regionaler Sommerniederschlagsmenge). Auf diese Weise kann man z.B. aus szenariohaft angenommenen Temperaturänderungen regionale Klimaszenarien aufbauen, die weitere wichtige Klimaparameter enthalten.

Es gibt auch Mischformen zwischen diesen Ansätzen. Generell führt die dynamische Methode auf die konsistentesten Aussagen, sie ist allerdings am aufwendigsten. Die statistischen Methoden ermöglichen mit begrenztem Aufwand ein ungefähres Bild über mögliche Klimazustände, ihre Verlässlichkeit leidet aber grundsätzlich daran, dass die zu Grunde gelegten bisherigen Klimakorrelationen in veränderten Klimazuständen nicht mehr unbedingt Gültigkeit haben werden.

3 Globale Klimaentwicklung

Wegen der weltweiten Bedeutung möglicher Klimaveränderungen und der nur international zu lösenden Fragen wurde gemeinsam vom Umweltprogramm der Vereinten Nationen (UNEP) und die Weltmeteorologenorganisation (WMO) der zwischenstaatliche Ausschuss für Klimaänderungen (Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC) im Jahre 1988 gegründet, um den wissenschaftlichen Wissensstand zum Klimawandel festzustellen und regelmäßig über dessen Fortentwicklung zu berichten. Viele Regierungen, u. a. auch die Bundesregierung (Kabinett Kohl, Kabinett Schröder), stützen sich in klimapolitischen Entscheidungen auf die Berichte des IPCC, ebenso der internationale Klimaschutzprozess (Kyoto-Prozess). Personen, Verbände und Regierungen, die der These vom Menschen verursachten (anthropogenen) Klimawandel skeptisch gegenüberstehen, werfen dem IPCC eine Unterschätzung der wissenschaftlichen Unsicherheiten und der natürlichen Klimaeinflüsse vor, was von der überwiegenden Mehrzahl der aktiv auf diesem Forschungsgebiet tätigen Wissenschaftler zurückgewiesen wird. Unbestreitbar stellt der IPCC den umfangreichsten und aufwendigsten Versuch dar, das wissenschaftliche Wissen zum Klimawandel zu erfassen, zu bewerten und zu berichten. Er ist faktisch die Referenzquelle zum globalen Klimawandel für alle Interessenten, die der These vom anthropogenen Klimawandel nicht ablehnend gegenüberstehen.

Der IPCC hat 1990 den ersten und 1995 den zweiten Wissensstandsbericht vorgelegt. Der heute aktuellste Bericht ist der dritte Wissensstandsbericht (Third Assessment Report, TAR), der 2001 vorgelegt wurde ([IPCC01a], [IPCC01b], [IPCC01c], [IPCC01d]), ist die Grundlage für die nachstehende Zusammenfassung. Der vierte Wissensstandsbericht des IPCC ist für das Jahr 2007 geplant.

Die Kernaussage des IPCC ist, dass sich das Klimasystem der Erde seit der vorindustriellen Zeit sowohl auf globaler wie auch auf regionaler Ebene nachweislich verändert hat, und einige dieser Veränderungen auf menschliche Aktivitäten zurückzuführen sind.

Menschliche Aktivitäten haben die atmosphärische Konzentration von Treibhausgasen und Aerosolen seit der vorindustriellen Zeit erhöht. Messungen der atmosphärischen Konzentration der wichtigsten anthropogenen Treibhausgase (d.h. Kohlendioxid (CO₂), Methan (CH₄), Lachgas (N₂O) und troposphärisches Ozon (O₃)) haben in den 90er Jahren die höchsten je gemessenen Werte erreicht, vor allem wegen der Verbrennung fossiler Brennstoffe, der Landwirtschaft und Veränderungen in der Landnutzung. Die Zunahme der Konzentrationen dieser Gase können der Tabelle 2 im Anhang I entnommen werden. Der Strahlungsantrieb aus anthropogenen Treibhausgasen ist – bei einer kleinen Bandbreite von Unsicherheit – positiv; jener aus der direkten Wirkung der Aerosole ist negativ und kleiner, während der negative Antrieb aus der indirekten Wirkung der Aerosole auf Wolken groß sein könnte, aber nicht gut quantifiziert ist.

Eine wachsende Anzahl Beobachtungen ergibt ein kollektives Bild einer sich erwärmenden Erde und anderer Veränderungen im Klimasystem. Beobachtete Änderungen im atmosphärischen, klimatischen und biophysikalischen System im 20. Jahrhundert sind anhand einiger ausgewählter Indikatoren in Tabelle 2 im Anhang II aufgeführt.

Zukünftige Treibhausgasentwicklungen sind das Produkt von sehr komplexen dynamischen Systemen, die durch die Entwicklung bestimmter "driving forces" (Bevölkerungs- und Wirtschaftswachstum, Landnutzung, technologischer Fortschritt, Verfügbarkeit von Energie und Energieträgermix, sowie Landwirtschaft) bestimmt sind. Aussagen über das Ausmaß zukünftiger Treibhausgasemissionen sind daher mit großen Unsicherheiten behaftet. Mit Hilfe von Szenarien können mögliche Entwicklungspfade abgebildet werden. Szenarien sind jedoch keine genauen Vorhersagen, sondern stellen alternative Bilder dar, die über mögliche Zukunftsentwicklungen Aufschluss geben können.

Um den Unsicherheiten in Bezug auf den Klimawandel Rechnung zu tragen, wurden über 30 verschiedene Emissionsszenarien entwickelt, die man in mehrere "Szenarienfamilien" einteilen kann: [IPCC01f]

- A1: "Economic Globalisation": Die Szenarienfamilie ist geprägt durch starkes Wirtschaftswachstum und leichten Bevölkerungsrückgang ab 2050. Wichtige zu Grunde liegende Leitgedanken sind: Konvergenz zwischen Regionen, gesteigerte kulturelle und soziale Interaktionen, geringer werdende regionale Unterschiede des Pro-Kopf-Einkommens. Die A1 Szenarienfamilie verzweigt sich in drei Gruppen, die alternative Richtungen der technologischen Veränderungen im Energiesystem beschreiben: fossilintensiv (A1FI), nicht-fossile Energiequellen (A1T) und ein ausgewogenes Verhältnis aller Quellen (A1B).
- A2: "Regional Self-reliance": Zu Grunde liegende Leitideen sind die Entwicklung aus eigener Kraft und die Bewahrung lokaler Identitäten. Die Bevölkerung wächst kontinuierlich, die wirtschaftliche Entwicklung ist in erster Linie regional ausgerichtet, und das Pro-Kopf-Einkommen und der technologische Wandel wachsen langsamer.
- B1: "Sustainable Globalisation": Um die Mitte des Jahrhunderts wird der höchste Wert der Bevölkerung erreicht, danach nimmt sie wieder ab. Gekennzeichnet durch den schnellen Wandel der wirtschaftlichen Strukturen in Richtung Dienstleistungs- und Informationsökonomie, begleitet von abnehmender Materialintensität und der Einführung sauberer und ressourcenschonender Technologien. Im Mittelpunkt stehen globale Lösungen für wirtschaftliche, soziale und ökologische Nachhaltigkeit.
- B2: "Sustainable Governance": Beschreibt eine Welt, in der der Schwerpunkt auf lokalen Lösungen für wirtschaftliche, soziale und ökologische Nachhaltigkeit liegt. Die Weltbevölkerung wächst kontinuierlich mit einer Rate, die niedriger ist als jene in A2, es gibt mittlere Niveaus wirtschaftlicher Entwicklung, und die technologische Entwicklung ist weniger schnell und zugleich vielgestaltiger als in B1 und A1.

Die Szenarien berücksichtigen keine zusätzlichen Klimainitiativen, es wurden also keine Szenarien einbezogen, die explizit von einer Implementierung der Klimakonvention (UNFCCC) oder der Emissionsziele des Kyoto-Protokolls ausgehen. Die mit diesen Entwicklungen einhergehenden Emissionen sind in der Abbildung 1 dargestellt.

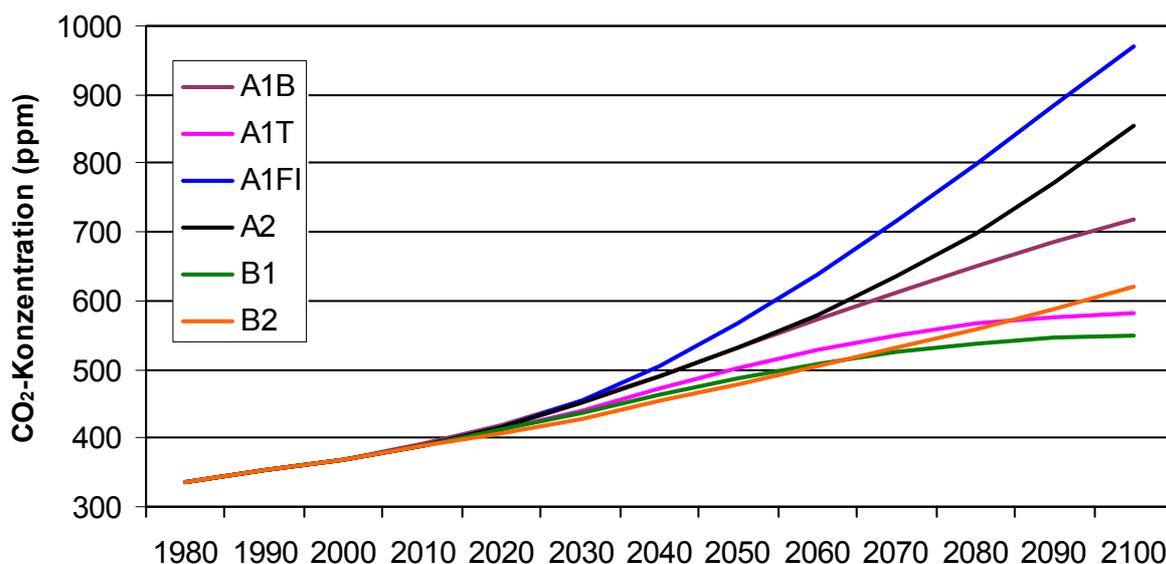


Abbildung 1: Prognostizierte Entwicklung der atmosphärischen Konzentration von CO₂ nach den verschiedenen Szenarien aus [IPCC01f].

Basierend auf diesen verschiedenen Emissionsszenarien werden Prognosen über die Klimaentwicklung bis zum Jahr 2100 gemacht (vgl. auch Anhang III). Der IPCC trifft folgende Kernaussagen [IPCC01d]:

- Es wird projiziert, dass die Konzentrationen des Kohlendioxids, die mittlere globale Erdoberflächentemperatur und der Meeresspiegel unter allen Emissionsszenarien des IPCC im 21. Jahrhundert steigen.
- In den sechs untersuchten Emissionsszenarien bewegt sich die projizierte CO₂-Konzentration für das Jahr 2100 zwischen 540 ppm und 970 ppm, verglichen mit ungefähr 280 ppm in der vorindustriellen Epoche und etwa 368 ppm im Jahr 2000.
- Unter Anwendung der Emissionsszenarien in einer Auswahl von Klimamodellen errechnete Projektionen ergeben für den Zeitraum von 1990 bis 2100 eine Erhöhung der mittleren globalen Erdoberflächentemperatur von 1,4°C bis 5,8°C. Dieser Wert ist etwa zwei bis zehn mal höher als der Zentralwert der beobachteten Erwärmung während des 20. Jahrhunderts, und die projizierte Erwärmungsrate ist laut Paläoklimadaten sehr wahrscheinlich beispiellos für mindestens die letzten 10.000 Jahre.
- Es wird projiziert, dass der weltweite durchschnittliche Jahresniederschlag während des 21. Jahrhunderts steigt, obwohl im regionalen Maßstab typische Zu- bzw. Abnahmen von 5 % bis 20 % projiziert werden.
- Die Fortsetzung des weit verbreiteten Gletscherrückzugs während des 21. Jahrhunderts wird projiziert.
- Laut Projektionen steigt der globale durchschnittliche Meeresspiegel zwischen den Jahren 1990 und 2100 für die ganze Spannweite der Emissionsszenarien um 0,09 bis 0,88 m an, allerdings mit bedeutenden regionalen Schwankungen.

Die projizierte Klimaänderung wird sowohl auf Umwelt- als auch auf sozioökonomische Systeme positive und negative Auswirkungen haben; je größer die Veränderungen und Veränderungsraten sind, desto mehr überwiegen jedoch die negativen Auswirkungen.

- Der Schweregrad negativer Auswirkungen wird bei größeren Gesamtmengen an Treibhausgasemissionen und den damit verbundenen Veränderungen des Klimas größer sein.
- Insgesamt wird projiziert, dass die Klimaänderung eine stärkere Gefährdung der menschlichen Gesundheit mit sich bringt, vor allem für Bevölkerungsgruppen mit niedrigem Einkommen und hauptsächlich innerhalb tropischer/subtropischer Länder.
- Die ökologische Produktivität und Biodiversität werden durch die Klimaänderung und den Meeresspiegelanstieg verändert. Dadurch erhöht sich die Gefahr des Aussterbens einiger gefährdeter Arten.
- Getreidemodelle zeigen an, dass in einigen gemäßigten Gebieten die potenziellen Erträge bei geringen Temperaturzunahmen zunehmen, bei größeren Temperaturveränderungen jedoch wieder abnehmen. Für die meisten tropischen und subtropischen Regionen wurde projiziert, dass die potenziellen Erträge mit den meisten projizierten Temperaturerhöhungen sinken.
- Die Klimaänderung wird die Wasserknappheit in vielen wasserarmen Gebieten der Erde verschlimmern.
- Laut Schätzungen sind die gesamten Auswirkungen auf das Bruttoinlandprodukt für viele Entwicklungsländer negativ; dies gilt für alle untersuchten globalen durchschnittlichen Temperaturzunahmen. Die Auswirkungen auf die entwickelten Länder sind laut Schätzungen bei wenigen °C Erwärmung uneinheitlich, und negativ bei einer Erwärmung über ein paar Grad hinaus.
- Bevölkerungsgruppen kleiner Inseln und/oder tief gelegener Küstengebiete sind speziell gefährdet, durch Meeresspiegelanstieg und Sturmfluten von ernsthaften sozialen und ökonomischen Auswirkungen betroffen zu werden.
- Die Auswirkungen der Klimaänderung werden die Entwicklungsländer und die arme Bevölkerung in allen Ländern unverhältnismäßig treffen; dadurch wird sich die Ungerechtigkeit beim Gesundheitszustand und beim Zugang zu angemessener Nahrung, sauberem Wasser und anderen Ressourcen verschärfen.

Die regionale Verteilung der Klimaveränderungen ist schwieriger zu bestimmen als die allgemeinen globalen Tendenzen, die Modellergebnisse hierzu müssen entsprechend vorsichtiger interpretiert werden. Abbildung 2 zeigt die globale Verteilung der Temperaturerhöhung im Zeitraum 2071-2100 gegenüber dem Zeitraum 1961-1990 nach dem Durchschnitt der Ergebnisse von 9 Klimamodellen.

Die wichtigsten Erkenntnisse aus Abb. 2 bestehen darin, dass die Meere sich geringer erwärmen als die Kontinente, die nördlichen Kontinente und die Arktis sich besonders stark erwärmen und Mitteleuropa sich eher im mittleren Bereich der Temperaturerhöhung befindet.

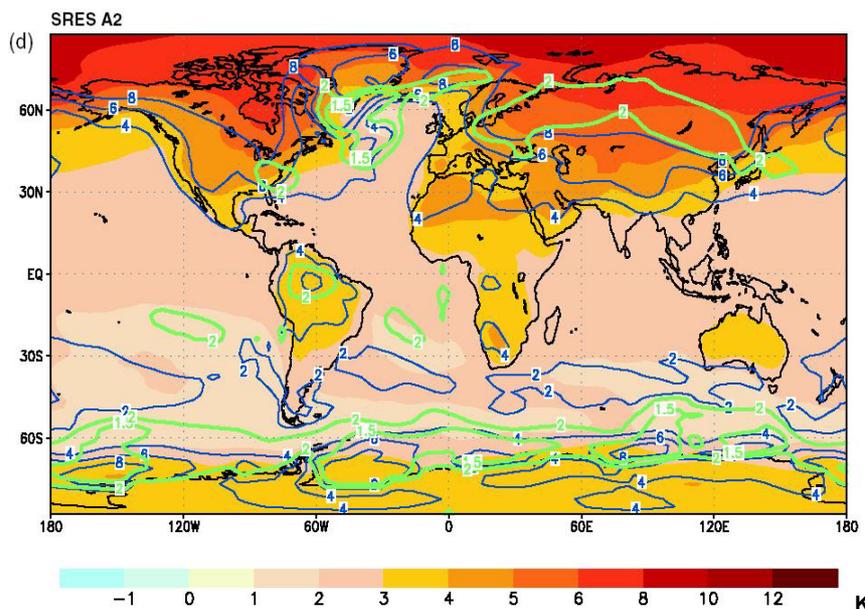


Abbildung 2: Die globale Verteilung der Temperaturerhöhung im Zeitraum 2071-2100 gegenüber dem Zeitraum 1961-1990 nach dem Durchschnitt der Ergebnisse von 9 Klimamodellen [IPCC01a]. Zugrundegelegt ist das Emissionsszenario A2.

Ähnliche Aufarbeitungen liegen auch für die Niederschlagsänderungen vor (Abb. 3). Demnach liegt Mitteleuropa aus globaler Sicht in einer eher indifferenten Zone zwischen höherer Trockenheit im Mittelmeerraum und höheren Niederschlägen in Nordeuropa.

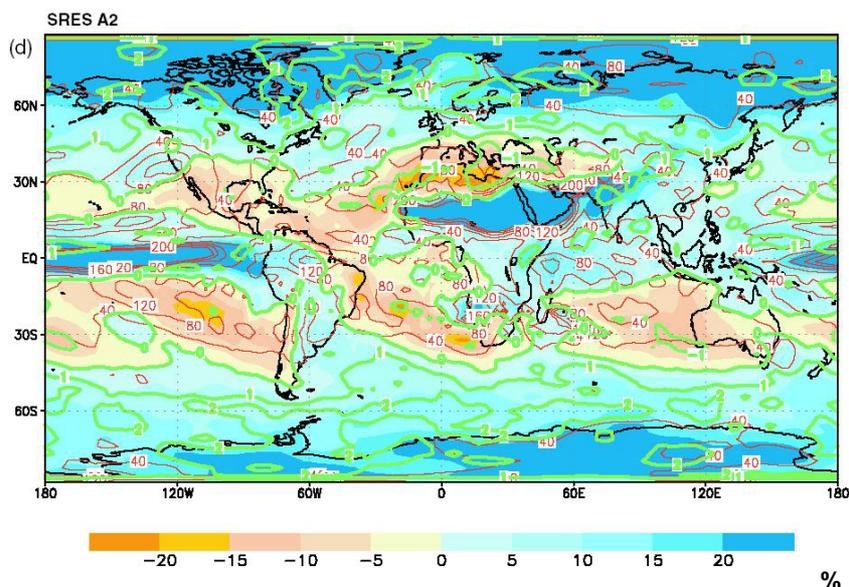


Abbildung 3: Die globale Verteilung der Niederschlagsmengenänderung im Zeitraum 2071-2100 gegenüber dem Zeitraum 1961-1990 nach dem Durchschnitt der Ergebnisse von 9 Klimamodellen [IPCC01a]. Emissionsszenario A2.

4 Regionale Klimaentwicklung

Die Veränderung der Strahlungsbilanz in Folge eines gesteigerten Absorptions-Emissions-Vermögens der Atmosphäre durch höhere Konzentrationen der Nicht-Wasserdampf-treibhausgase ist offensichtlich in ihrer regionalen Auswirkung ungleich schwieriger zu beurteilen als im globalen Mittel. So ist beispielsweise die Bedeutung der Wasserdampf-rückkopplung auf Grund der Temperaturabhängigkeit auch Breitengradabhängig. Die Wasserdampf-gehalte und ihre Effekte sind in den Tropen und Subtropen deutlich höher als in den mittleren und hohen Breiten. Andererseits ist der Eis-Albedo-Effekt im Wesentlichen auf die arktischen und antarktischen Breiten konzentriert. Zu ähnlichen Feststellungen kann man bezüglich der Einflüsse von Wolken kommen. Räumlich variabel ist zudem die Verteilung von Ozean und Land, so dass selbst bei vergleichbaren Änderungen in der Strahlungsbilanz höchst unterschiedliche Massen- und Wärmekapazitäten die Energieänderungen in Temperaturänderungen umsetzen. Zudem haben Atmosphäre und Ozean die Fähigkeit, lokale Energiedefizite auszugleichen, so dass im Allgemeinen auch mit einer Änderung der Strömungssysteme in den beiden Subsystemen gerechnet werden muss. Der im globalen Mittel zu erwartende Meeresspiegelanstieg wird regional sehr stark durch Meeresspiegelvariationen überlagert, die sich aus der Variation des Meeresspiegels ergeben.

4.1 Forschungsarbeiten zu regionalen Auswirkungen der Klimaveränderung in Baden-Württemberg

Die Landtagsfraktion GRÜNE hat am 8. Februar 2002 eine Große Anfrage in den Landtag eingebracht, die darauf abzielt, ein umfassendes Bild von den Auswirkungen einer drohenden globalen Klimaveränderung auf den Südwesten Deutschlands zu erhalten. [BW02]

Die Anfrage behandelt vier Themengebiete, von denen der erste Themenkomplex auf die Forschungsvorhaben zu regionalen Auswirkungen der Klimaveränderung abzielt. Die Fraktion erkundigt sich nach bislang durchgeführten Untersuchungen und den beabsichtigten Forschungsvorhaben zu diesen Fragestellungen.

Des Weiteren interessiert die Fraktion, in wieweit Aussagen über die Folgen globaler Klimaveränderungen für die letzten 50 bis 100 Jahre getroffen werden können.

Im dritten Punkt wird die Landesregierung nach den mittel- und langfristigen Auswirkungen einer Klimaveränderung auch bei der Umsetzung des Kyoto-Protokolls bzw. der damit in Zusammenhang stehenden Beschlüsse der Bonner Weltklimakonferenz gefragt.

Im vierten Punkt erkundigt sich die Fraktion nach Auswirkungen und Konsequenzen für die Bereiche Land- und Forstwirtschaft, Wasserwirtschaft, Flora und Fauna.

Mit Schreiben vom 14. Mai 2002 beantwortet das Ministerium für Umwelt und Verkehr im Namen der Landesregierung die Große Anfrage.

Tenor der Antwort ist, dass bislang noch keine verlässliche Aussagen über Auswirkungen der Klimaveränderungen im regionalen Maßstab in den unterschiedlich strukturierten Gebieten oder Mittelgebirgslandschaften Baden-Württembergs vorliegen.

Im Jahre 1999 wurde eine längerfristige gebiets- und fachübergreifende Zusammenarbeit zwischen den Ländern Baden-Württemberg und Bayern unter Einbeziehung des Deutschen Wetterdienstes auf dem Gebiet „Klimaveränderungen und Konsequenzen für die Wasserwirtschaft“ (KLIWA) vereinbart, da die Staatsgebiete der Länder Baden-Württemberg und Bayern auf Grund ähnlicher hydrologischer und meteorologischer Rahmenbedingungen und Datengrundlagen eine Region darstellen, die sich für viele Fragestellungen für eine gemeinsame Untersuchung anbieten. Wesentliche Ziele des Kooperationsvorhabens KLIWA sind die Ermittlung der Auswirkungen einer Klimaveränderung auf die Anforderungen an den Hochwasser- und Gewässerschutz, auf die Wasserversorgung und die Entwicklung der Gewässer sowie das Aufzeigen von Konsequenzen und Handlungsstrategien.

Im Rahmen von KLIWA wurde bisher das Langzeitverhalten wichtiger hydrologischer und hydrometeorologischer Größen, insbesondere Abfluss und Niederschlag, analysiert. Ferner wurden fast flächendeckend Wasserhaushaltsmodelle entwickelt, um in einem späteren Schritt den Wasserhaushalt in Baden-Württemberg auf der Basis verschiedener Klimaszenarien zu simulieren.

Vorangegangene Studien haben gezeigt, dass beim derzeitigen Stand der Entwicklungen vom Klimamodellen noch keine optimale Methode zur Verfügung steht. Aus diesem Grund wird im Projekt KLIWA durch die Anwendung von unterschiedlichen Methoden und Verfahren eine Bandbreite von Ergebnissen erarbeitet. Mit der Entwicklung von regionalen Klimaszenarien sind von den Ländern Baden-Württemberg und Bayern sowie unter fachlicher Betreuung des Deutschen Wetterdienstes das Max-Planck-Institut für Meteorologie in Hamburg, das Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung und das Institut für Meteorologie an der Freien Universität Berlin beauftragt worden. Die Modellrechnungen sind weitestgehend abgeschlossen und gehen zur Zeit bei den Auftraggebern ein. Die vorläufigen Ergebnisse wurden Anfang Juli im Rahmen eines Workshops intern präsentiert und zur Diskussion gestellt. Der Zeitpunkt der Veröffentlichung der Ergebnisse steht bislang noch nicht fest.

Die ausgewählten regionalen Klimamodelle und statistischen Verfahren mit den zukünftigen Zielpunkt 2030 unterscheiden sich durch ein minimales, mittleres und maximales Szenario in Bezug auf den Output des gemeinsam genutzten globalen Klimamodells ECHAM 4 mit dem Emissionsszenario SRES B2 (siehe Abbildung 1).

- Abgriff der vom globalen Klimamodell prognostizierten Temperaturverteilung und statistisch ermittelte Zuordnung zu den übrigen notwendigen hydrometeorologischen Größen mittels Zeitreihenanalyse.
- Abgriff der vom globalen Klimamodell prognostizierten Zirkulationsmuster, Verknüpfung mit einer objektiven Wetterlagenklassifikation und statistisch ermittelter Zuordnung zu den notwendigen hydrometeorologischen Größen mittels Zeitreihenanalyse.
- Einsatz des globalen Klimamodells als Randantrieb für die Prognosen regionaler Klimamodelle (Doppelnesting). Parallel dazu werden die prognostizierten Zirkulationsmuster des größeren regionalen Klimamodells abgegriffen und für die statistisch ermittelte Zuordnung zu den notwendigen hydrometeorologischen Größen mittels Zeitreihenanalysen verwendet.

Die Landesanstalt für Umweltschutz (LfU) bearbeitet ferner schwerpunktmäßig in Abstimmung mit dem Ministerium für Umwelt und Verkehr das Themenfeld „Klimafolgen für Baden-Württemberg“. Die Aufgabe beinhaltet einerseits die Aufarbeitung der Grundlagen einer Klimaänderung und deren Darstellung, andererseits die Ableitung von konkreten Handlungsempfehlungen für das Land. Dabei sollen die vorgenannten in Bearbeitung befindlichen Klimaszenarien zu Grunde gelegt werden.

Das Ministerium für Umwelt und Verkehr hat einen ressortübergreifenden Beirat berufen, bestehend aus den Ministerien für Umwelt und Verkehr, Wirtschaftsministerium und dem Ministerium für Ernährung und Ländlichen Raum. In der LfU wurde ein Kernteam aus Mitgliedern der Fachabteilungen der LfU sowie Mitarbeiter aus den genannten Ressorts gebildet. Das Projekt wird durch das Fraunhofer-Institut für Systemtechnik und Innovationsforschung wissenschaftlich begleitet.

Ferner hat das Ministerium für Umwelt und Verkehr des Landes Baden-Württemberg das Verbundvorhaben „Klimawandel - Auswirkungen, Risiken, Anpassung“ (KLARA) initiiert. Diesem Verbundvorhaben arbeiten neben der LfU auch Bereiche aus der Land- und Forstwirtschaft, dem Gesundheitswesen, dem Wirtschaftsministerium und dem Naturschutz zu. Das Ziel, das in diesem Projekt verfolgt wird, ist die Zusammenstellung des nationalen und internationalen Stands des Wissens im Zusammenhang mit Anpassungsmaßnahmen für die identifizierten Betroffenheitsbereiche, die Identifizierung bestehender Wissenslücken und die Konkretisierung entsprechender Handlungsbedarfe. Das Projekt befindet sich derzeit im Anfangsstadium. Auch in diesem Projekt werden die Ergebnisse der regionalen Szenarienrechnungen, die im Rahmen des Projekts KLIWA angefertigt werden, zu Grunde gelegt.

4.2 Bisherige Auswirkungen der Klimaveränderungen in Baden-Württemberg

Zu beachten ist bei der Wertung der Ergebnisse, dass die bisher zur Analyse verwendeten linearen Trends zwar Hinweise auf Veränderungen der bisherigen Messzeitreihen geben, aber nicht zur Extrapolation in die Zukunft benutzt werden können.

An den Stationen des Deutschen Wetterdienstes lassen sich in Baden-Württemberg Temperaturanstiege feststellen. Für die Station Karlsruhe liegt eine langjährige Zeitreihe seit 1876 vor. Ab etwa Mitte der 80er Jahre ist ein merklicher Anstieg der Jahresmitteltemperaturen erkennbar, der sich deutlich auf die gleitenden 30-Jahres-Mittel auswirkt. Das Jahr 2000 war für die Station Karlsruhe das wärmste seit Beginn der Aufzeichnungen. Ob die beobachteten Anstiege jedoch alleinige Folge einer globalen Klimaveränderung sind, kann nicht sicher entschieden werden. Vielmehr können auch stadtklimatische Effekte eine Rolle spielen. [BW02]

Die Untersuchungen der Gebietsniederschläge ergeben einen Bruch in der Häufigkeitsverteilung der Tageswerte in den 60er und 70er Jahren, der möglicherweise auf die Änderung der Häufigkeit der Wetterlagen (Zunahme der zonalen und gemischten Zirkulationsformen im Winter ab etwa Mitte der 70er Jahre) zurückzuführen ist. Ferner ist für weite Teile Baden-Württembergs eine Zunahme der Starkniederschläge im Winter festzustellen, während im Sommer kaum signifikante Änderungen auftreten. Es gibt aber auch Anzeichen dafür, dass ab etwa 1995 die Starkniederschläge nicht weiter zugenommen haben. Die extremen Nassperioden (Aufeinanderfolge von mindestens acht Tagen, an denen es regnet) nehmen regional im Winter zu, im Sommer dagegen ab. Auch die extremen Trockenperioden (Aufeinan-

derfolge von mindestens elf Tagen mit Niederschlägen weniger als 1 mm) nehmen im Winter geringfügig zu und im Sommer geringfügig ab. [KLIWA01]

Die Schneedeckendauer geht zurück, insbesondere für tiefer liegende Regionen (<300 m ü. NN). In Hochregionen des Schwarzwaldes hingegen ergeben sich bisher keine signifikanten Änderungen. Die Ergebnisse korrespondieren mit der Zunahme von winterlichen Niederschlagsereignissen und der Dauer von Nassperioden. Niederschläge fallen vermehrt in flüssiger Form als Regen und weniger in fester Form als Schnee. [KLIWA01]

Die Ergebnisse zum Langzeitverhalten der potenziellen Verdunstung zeigen bei den Jahreswerten für Baden-Württemberg flächendeckend einen negativen Trend. Mit zunehmender Geländehöhe verstärkt sich die Abnahme der potenziellen Verdunstung, in Höhenlagen größer 500 m ü. NN sind die Trends signifikant. Die Abnahme der potenziellen Verdunstung ist - bei Zunahme der Lufttemperatur - im Wesentlichen die Folge verminderter Sonneneinstrahlung bei zunehmender Wolkenbedeckung. In Baden-Württemberg ergibt sich im Sinne der klimatischen Wasserbilanz bei den zu verzeichnenden zunehmenden Niederschlagshöhen und gleichzeitig abnehmenden potenziellen Verdunstungshöhen die Voraussetzung für zunehmenden Abfluss und verstärkte Grundwasserneubildung. [KLIWA01]

Die bisher vorliegenden Analysen langer hydrologischer Zeitreihen (70 Jahre und länger) der Hochwasserabflüsse ergeben, dass die meisten Pegel in Baden-Württemberg und Bayern keine statistisch signifikanten Trends zu einer Erhöhung der jährlichen Höchstwerte aufweisen. Bei Beschränkung der Betrachtung auf die letzten 30 bis 50 Jahre ist jedoch eine Tendenz zu einem häufigeren Verhalten der monatlichen Höchstabflüsse verschoben. Ab den 70er Jahren treten im Winterhalbjahr höhere Monatswerte auf als in der Zeit davor. [KLIWA01]

Nach einer Bewertung des Deutschen Wetterdienstes ist der Orkan „Lothar“ mit den Stürmen „Wiebke“ und „Vivian“ im Jahr 1990 sowie mit davor liegenden Stürmen, z.B. dem Capella-Orkan im Jahre 1976 in Niedersachsen, vergleichbar. An zahlreichen Messstationen Süddeutschlands wurden neue Extremwerte der Windgeschwindigkeiten verzeichnet. Alle Messungen und Beobachtungen liegen aber im Rahmen der üblichen Variabilität der Witterung in Mitteleuropa. Ein Zusammenhang zwischen solchen Einzelereignissen und einer möglichen Klimaänderung kann derzeit nicht nachgewiesen werden. [KLIWA01]

4.3 Klimaprognosen für Bayern

1999 legte der Bayerische Klimaforschungsverbund BayFORKLIM einen Abschlussbericht zu seinen langjährigen Untersuchungen zu Klimaänderungen in Bayern und deren Auswirkungen vor [Bay99]. Darin enthalten waren auch regionalisierte Klimamodellrechnungen für Bayern. Technisch erforderten diese Modellrechnung ein regionales Feinrechengitter, das auch die an Bayern angrenzenden Regionen, u.a. auch Baden-Württemberg umfasste. Aus diesem Grund ist es möglich, auf Basis der BayFORKLIM-Ergebnisse auch Aussagen für Baden-Württemberg abzuleiten, die dem damaligen Stand der Modelltechnik entsprachen. Abb. 4 zeigt ein errechnetes Profil für die Temperaturänderungen Sommer/Winter für Süddeutschland bei einer Verdoppelung der atmosphärischen CO₂-Konzentrationen (ein Zustand, der je nach Emissionsszenario Mitte bis Ende des Jahrhunderts erreicht sein wird).

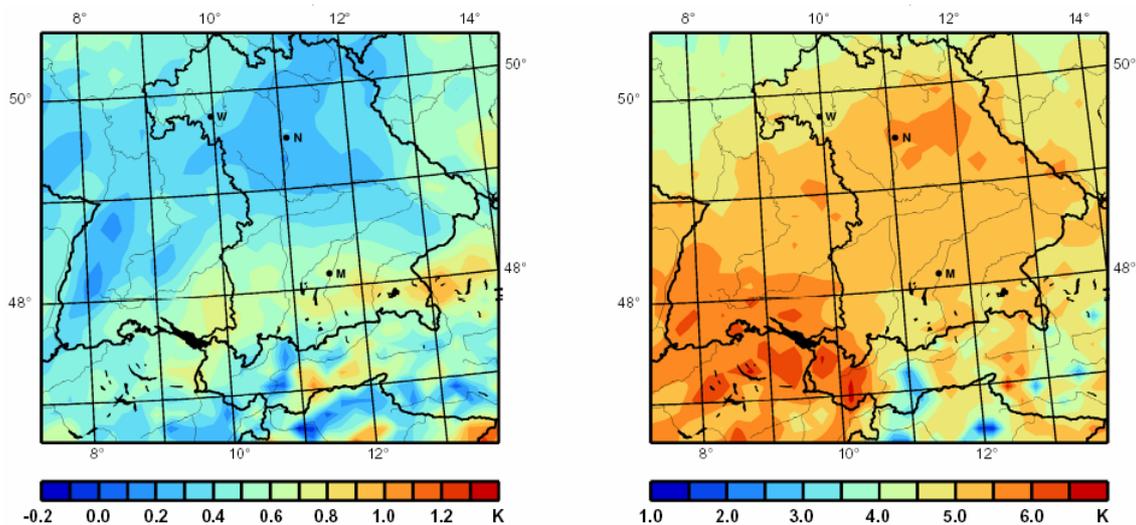


Abbildung 4: Temperaturerhöhung in Süddeutschland (links Winter, rechts Sommer) bei einer Verdoppelung der CO₂-Konzentration nach Ergebnissen von BayFORKLIM [Bay99].

Wichtige Eckpunkte der von BayFORKLIM identifizierten und auf Baden-Württemberg anwendbaren Klimaänderungen sind:

- Wintertemperaturen: nur geringfügige Zunahme,
- Winterniederschläge: deutliche Zunahme
- Sommertemperaturen: deutliche Zunahme (ca. 4-5°)
- Heiße Tage (T_{max}>30°): Zunahme je nach Region um 6 - 14 Tage pro Jahr
- Sommerniederschläge: Abnahme der Menge um etwa 50 %
- Zahl der Frosttage: sinkt, im Schwarzwald steigt Zahl der Eistage dennoch
- Starkniederschläge: Häufigkeit nimmt leicht ab

Bei der Interpretation dieser Ergebnisse ist zu bedenken, dass die zugrundeliegenden Modellberechnungen schon mehrere Jahre zurückliegen und die Modellierung regionaler Klimaänderungen noch in der methodischen Entwicklung begriffen ist. Diese Aussagen sind daher von einer höheren Instabilität als die Ergebnisse zu den globalen Klimaentwicklungen. Daher ist der Vergleich mit neueren Rechnungen, wie sie im Rahmen von KLIWA durchgeführt wurden, hier von großer Wichtigkeit. Diese Ergebnisse sind derzeit noch nicht publiziert, erste Mitteilungen der LfU hierzu deuten aber auf gewisse Abweichungen zu den BayFORKLIM-Ergebnissen hin [LfU03].

4.4 Klimaprognosen für Europa

In der aktuellen Studie SWECLIM [SWECLIM03] wurden regionale Modellrechnungen für den europäischen Kontinent vorgestellt. Die Regionalisierung ist dabei zu grob, um Detailaussagen für Baden-Württemberg zu gewinnen, andererseits aber doch von wesentlich höherer regionaler Aussagekraft als die globalen Analysen des IPCC, die in Kapitel 3 vorgestellt wurden. Gegenüber den in Kapitel 4.3 beschriebenen Ergebnissen des Projektes Bay-FORKLIM hat die Studie aber den Vorteil eines aktuelleren Standes der Modell- und Regionalisierungstechnik.

Die Prognosen wurden mit den Klimamodellen des britischen Hadley Centre (HadAM₃) und des MPI für Meteorologie (ECHAM₄/OPYC₃) erstellt. Sie untersuchen die Klimawirkungen in Europa zu Ende des Jahrhunderts für verschiedene Entwicklungen der zukünftigen anthropogenen Klimagasemissionen. (vgl. Abbildung 5)

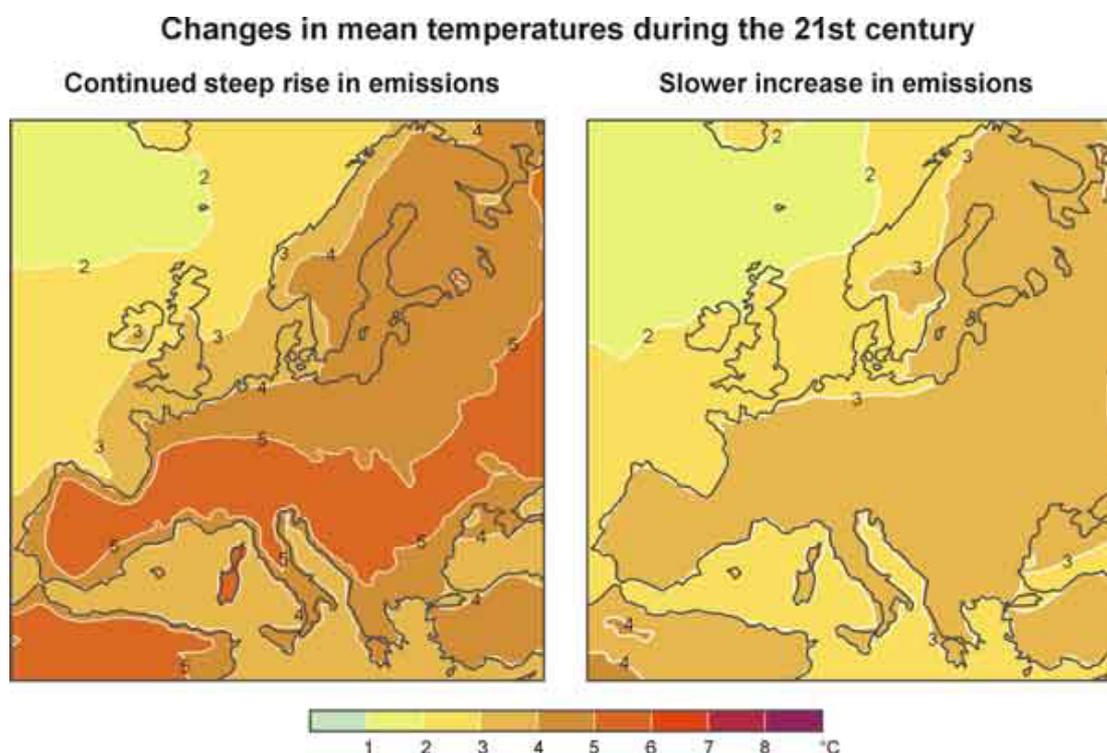


Abbildung 5: Erhöhung der Jahresdurchschnittstemperaturen in Europa im Mittel des Zeitraums 2071-2100 gegenüber dem Zeitraum 1961-1990. Links im Fall stark steigender Klimagasemissionen, rechts im Fall schwach steigender Klimagasemissionen [nach SWECLIM03].

Die zugehörigen globalen Temperaturerhöhungen liegen bei rund 2,5 °C im Fall der schwach steigenden Emissionen und bei etwa 3,3 °C bei stark steigenden Emissionen. Der Vergleich mit Abbildung 5 zeigt, dass Mitteleuropa leicht überproportional an der globalen Temperaturentwicklung partizipieren dürfte. Alle genannten Temperaturerhöhungen sollen auch im 22. Jahrhundert weitersteigen. Für Nordeuropa wird aufgrund des Verstärkungseffektes zurückgehender Eis- und Schneeflächen eine besonders ausgeprägte winterliche Erwärmung mit

Rückgang der Häufigkeit sehr kalter Tage erwartet. Im Sommer resultiert eine Zunahme der Häufigkeit sehr heißer Tage. In Skandinavien verschieben sich die Klimazonen mit einer Geschwindigkeit von 500 km pro 100 Jahre nach Norden, in Schweden steigt die Baumgrenze um 150 m pro Grad Temperaturzunahme.

Die Veränderungen in der Niederschlagshäufigkeit durch den Klimawandel im laufenden Jahrhundert zeigt Abbildung 6. Von der zunehmenden Sommertrockenheit sind vor allem die Mittelmeerregionen betroffen, aber auch für den Südwesten Deutschlands deuten sich in Abbildung 6 Niederschlagsrückgänge im Bereich von 30 % im Sommer an. Im Winter ist für den nördlichen Teil Europas dagegen mit zunehmenden Niederschlagsmengen zu rechnen, wobei die Mengen pro Niederschlagsereignis ebenfalls steigen dürften.

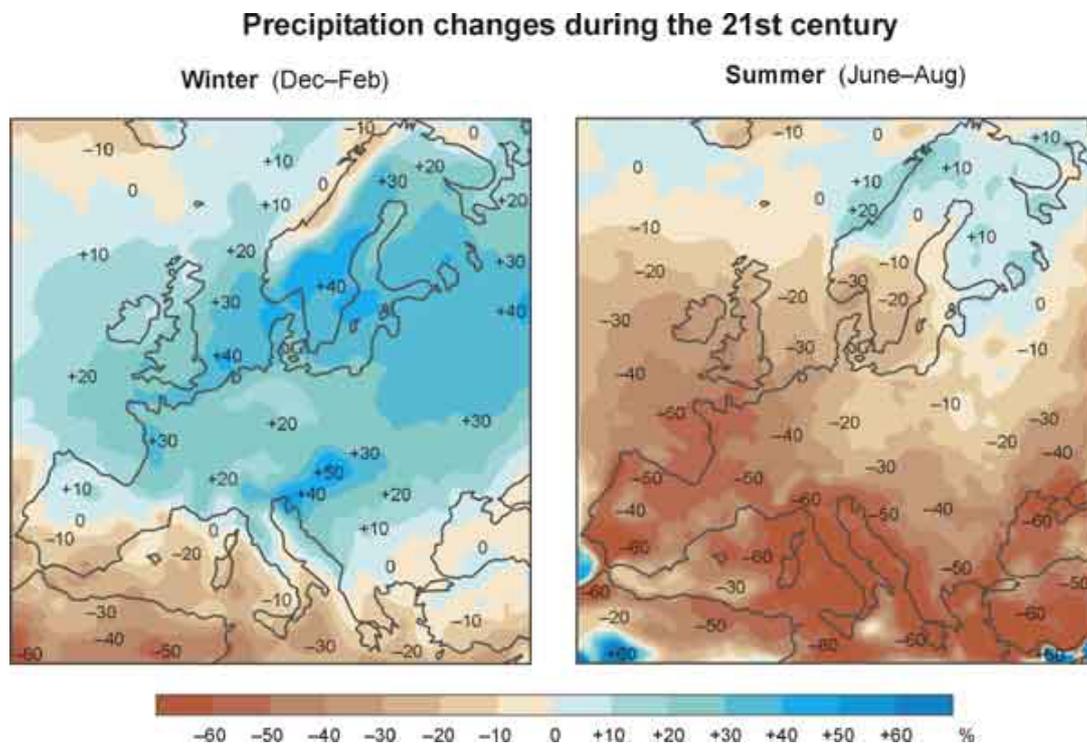


Abbildung 6: Prozentuale Änderung der sommerlichen und winterlichen Niederschlagsmenge in Europa im Verlauf des 21. Jahrhunderts.

Da sich der Klimawandel bei Fortsetzung der gegenwärtigen Emissionstrends auch nach Ende des 21. Jahrhunderts weiter verstärken würde, ist für diesen Fall auch von einer weiteren Verschärfung der beschriebenen klimatischen Auswirkungen für Europa im 22. Jahrhundert auszugehen.

5 Literaturverzeichnis Teil I

- Bay99 Bayerisches Klimaforschungsprogramm, bayerischer Klimaforschungsverbund: Klimaänderungen in Bayern und ihre Auswirkungen. Abschlußbericht des Bayerischen Klimaforschungsverbundes, November 1999. Internetpublikation: www.bayforklim.uni-muenchen.de
- BW02 Landtag von Baden-Württemberg: 10 Jahre nach der Umweltkonferenz von Rio – Auswirkungen der Klimaveränderungen für Mensch und Umwelt in Baden-Württemberg. Große Anfrage der Fraktion GRÜNE und Antwort der Landesregierung, Drucksache 13/734, 8.2.2002.
- EuAka01 Schröder, M. (Hrsg.): Klimavorhersage und Klimavorsorge. Reihe Wissenschaftsethik und Technikfolgenbeurteilung der Europäischen Akademie zur Erforschung von Folgen wissenschaftlich-technischer Entwicklungen, Bd. 16, Springer-Verlag Berlin, Heidelberg, New-York, 2001
- IPCC01a IPCC Third Assessment Report. Working Group I: The Scientific Basis. Cambridge University Press 2001. Internetpublikation: www.ipcc.ch
- IPCC01b IPCC Third Assessment Report. Working Group II: Impacts, Adaption and Vulnerability. Cambridge University Press 2001. Internetpublikation: www.ipcc.ch
- IPCC01c IPCC Third Assessment Report. Working Group III: Mitigation. Cambridge University Press 2001. Internetpublikation: www.ipcc.ch
- IPCC01d IPCC Third Assessment Report. Zusammenfassung für politische Entscheidungsträger: Klimaänderung 2001 - Synthesebericht
- IPCC01e IPCC Third Assessment Report. Working Group I: The Scientific Basis. - Summary for Policimakers, 2001. Internetpublikation: www.ipcc.ch
- IPCC01f IPCC Special Report on Emissions Scenarios. Internetpublikation: www.ipcc.ch
- KLIWA01 AK KLIWA: Statusbericht 2001 des Projektes „Klimaveränderung und Wasserwirtschaft“, 2002.
- LfU03 W. Franke, persönliche Mitteilung, 1. Runder Tisch des Waldprogrammprozesses 2003 des Ministeriums für Landwirtschaft und Ländlichen Raum Baden-Württemberg, 4. 7. 2003
- SWECLIM03 Elvingson, P: Europe 2100 - A warmer world, Acid News No. 3, Sept. 2003. Internetpublikation: http://www.acidrain.org/AN3-03.htm#Europe_2100
- UBA01 Umweltbundesamt: Klimaänderung: ein wissenschaftlicher Popanz? - 2001. Internetpublikation: www.umweltbundesamt.de

Teil II: Wald und Klima

6 Einflussfaktoren auf den Wald

Die Klimabeobachtungen der letzten Jahrzehnte belegen eine rasche globale Klimaveränderung. Die Wissenschaft ist sich einig, dass sie maßgeblich durch menschliche Aktivitäten verursacht wird. Derartige Veränderungen wirken sich unter anderem auf die Wälder aus und beeinflussen deren Zusammensetzung, Verbreitung, Stabilität und Dynamik. Problematisch ist insbesondere die Geschwindigkeit des Klimawandels. Forstwissenschaftler und Praktiker sind deshalb in zunehmendem Maße mit den Fragen konfrontiert, welche für den Wald relevanten Klimaveränderungen in welcher Region eintreten werden, wie die betreffenden Waldökosysteme auf die Veränderungen reagieren werden und welche Konsequenzen für die waldbauliche Praxis sich hierdurch ergeben. Die Ergebnisse der regionalen Prognosen aus den Forschungsprogrammen BayFORKLIM und KLIWA wurden in Kapitel 4 kurz dargestellt.

In Baden-Württemberg wurde vor allem ab Mitte der 1980er Jahre ein merklicher Anstieg der Jahresmittelwerte der Lufttemperatur verzeichnet. Retrospektiv nahmen seit den 1930er Jahren extreme Nässeperioden und Starkniederschläge im Winter eher zu. Für Trockenperioden lässt sich keine signifikante Änderung feststellen. Gerade die Niederschlagssituation ist allerdings regional deutlich unterschiedlich. Die Schneedeckendauer ging in den tieferen Lagen zurück. Die potenzielle Verdunstung sank tendenziell, vermutlich als Folge zunehmender Wolkenbedeckung.

Die Klimamodellprognosen von KLIWA sind zum jetzigen Zeitpunkt noch nicht abgeschlossen, erste Hinweise deuten jedoch auf die folgenden Klimaentwicklungen hin (W. Franke 2003, pers. Mitt. im Arbeitskreis Wald und Klima):

- Zunahme der Minima der Lufttemperatur im Winter,
- Zunahme der Tagesmittelwerte der Lufttemperatur im Sommer,
- Zunahme der Niederschläge im Winter,
- höhere Wahrscheinlichkeit von Trockenperioden im Sommer, und zwar sowohl aufgrund prognostizierter Tageswerte, als auch der Wahrscheinlichkeit des künftigen Auftretens bestimmter Großwetterlagen.

Prognosen zu Extremereignissen sind wegen großer Unsicherheiten noch nicht möglich, wären aber speziell für die zukünftige Entwicklung der Wälder von großer Bedeutung. Dazu gehören Spätfröste, Nassschnee, sommerliche Trockenperioden und insbesondere Sturmergebnisse (Kändler 1997). Sommerliche Hitzewellen mit Dürre und Starkregen vor allem im Winter gelten als wahrscheinlich. Eine Zunahme der Sturmhäufigkeit ist zwar nicht auszuschließen, aber auch nicht gesichert.

Neben klimatischen Veränderungen sind weitere Einflussgrößen für die zukünftige Entwicklung der Wälder von großer Bedeutung. Diese Einflussfaktoren stehen in Wechselwirkungen zum Klima und zueinander und müssen deshalb ebenfalls berücksichtigt werden:

- Luftverunreinigungen: Immissionen und Schadstoffdepositionen (Ozon, Säure- und Stickstoffeinträge). Die Belastung durch Ozon und Stickstoff dürfte in Zukunft etwa gleich bleiben oder nur geringfügig abnehmen, die Bodenversauerung weiter zunehmen.

- Kohlendioxid: Ein erhöhter CO₂-Gehalt der Atmosphäre ist nicht nur maßgeblich für die Klimaänderung, sondern hat auch direkte Auswirkungen auf das Pflanzenwachstum (vgl. Kap. 8.1).
- erhöhte UV-B-Strahlung als Folge der Ausdünnung bzw. Zerstörung der stratosphärischen Ozonschicht,
- menschliche Aktivität, v. a. Forstwirtschaft, aber auch Erholung, Siedlung, Straßenbau...

7 Forschungsprojekte zu „Wald und Klima“

Obwohl zu den Ursachen des Klimawandels mittlerweile viele Forschungsergebnisse vorliegen, sind die Auswirkungen des Klimawandels wesentlich weniger untersucht. Zum Themenbereich Wald und Klima werden diverse Forschungsprojekte durch die Europäische Kommission (z. B. EUROFLUX, ECOGRAFT...) gefördert, sind also folglich in ganz Europa lokalisiert. In Deutschland dürften die meisten Projekte zu diesem Themenkomplex vom Potsdam Institut für Klimafolgenforschung (PIK) durchgeführt werden bzw. worden sein. Im süddeutschen Raum ist das abgeschlossene Vorhaben BayFORKLIM des Bayerischen Klimaforschungsverbands zu erwähnen, in dem relativ umfassend die Auswirkungen der Klimaveränderungen u. a. auf Waldökosysteme untersucht wurden. Forschungsobjekt waren jedoch die Voralpen, deren thermische, hygische und standörtliche Bedingungen sich stark von den Regionen Baden-Württembergs unterscheiden, so dass die Ergebnisse nur bedingt übertragbar sind. Gleiches gilt für die Arbeiten aus der Schweiz, beispielsweise das TRE-WALP-Projekt des Bundesamtes für Umwelt, Wald und Landschaft (BUWAL). Für Baden-Württemberg liegen nur wenige kleinere Forschungsprojekte vor. Einen Überblick über einige wichtige Forschungsvorhaben gibt Anhang I.

8 Auswirkungen von Klimaveränderungen auf den Wald

Die Verbreitung der meisten Baumarten in Europa ist durch Wärme (Lufttemperatur) und verfügbare Bodenfeuchtigkeit (Niederschlag) limitiert, also genau die Klimavariablen, die sich wahrscheinlich ändern werden (McCarthy et al. 2001). Inwieweit der Wald von Klimaveränderungen betroffen sein wird, hängt von verschiedenen Faktoren ab (Spiecker et al. 2000, VWF 1994):

- Geschwindigkeit, mit der Klimaveränderungen stattfinden: Finden Klimaveränderungen im Vergleich zum Waldwachstum bzw. zur Ausbreitungsmöglichkeit und Wanderungsgeschwindigkeit der Baumarten rasch statt, sind Anpassungen schwieriger und die Auswirkungen folglich stärker (Kändler 1997, Spiecker et al. 2000).
- Ausmaß der Veränderungen, sowohl bei den Mittelwerten als auch bei den Witterungsextremen: Wichtig sind vor allem Veränderungen des Temperaturganges und der Niederschlagsverteilung. Prognosen zu Intensität, Häufigkeit und Dauer von Extremereignissen (Stürme, Dürren, Spätfröste etc.) sind jedoch noch sehr unsicher, bilden aber in Deutschland den wichtigsten Störfaktor.
- Sekundärfolgen der Klimaveränderung wie die mögliche Zunahme von Waldbränden und von Schädlings- und Krankheitsbefall.
- Regionale Besonderheiten bei Klimaveränderungen: Der regionale Bezug bei den Klimaprojektionen ist momentan noch sehr grob. Insbesondere bestehen im Bereich des Niederschlagsregimes noch große Unsicherheiten.
- Stabilität, Empfindlichkeit und Anpassungspotenzial des jeweiligen Waldökosystems: Ökosysteme mit standortfremden Baumarten (z. B. *Picea abies* in vielen Forstökosystemen in Deutschland) sind empfindlich und wenig anpassungsfähig, da die Arten oftmals am Rande vor allem ihrer Trockengrenze wachsen.
- Kombinationseffekte verschiedener veränderter Klimafaktoren auf das Waldwachstum: Verschiedene Klimafaktoren können z. T. gegensätzliche Auswirkungen haben: Höhere CO₂-Konzentrationen sind wahrscheinlich wachstumsfördernd, veränderte Temperatur- und Niederschlagsverhältnisse können dagegen positiv oder negativ wirken. Erwärmung führt zu höherer Transpiration, die jedoch durch CO₂-bedingte bessere Wasserausnutzung zum Teil kompensiert werden kann.
- Komplexwirkungen mit anderen Stressfaktoren (z. B. Schadstoffeinträge, menschliche Aktivitäten...)

8.1 Waldwachstum

In den letzten Jahrzehnten war in weiten Teilen Europas ein deutlich positiver Wachstumstrend zu verzeichnen. Die Gründe dafür sind sehr vielfältig und nicht ausschließlich in einer Klimaveränderung zu suchen. Als Ursachen diskutiert werden (Schuck & Bystrakova 2000):

- Anthropogener Stickstoffeintrag, wirksam insbesondere auf stickstoffarmen Standorten,
- Erhöhte atmosphärische CO₂-Konzentration, insbesondere wenn weder Nährstoff- noch Wasserversorgung limitierend sind,
- Veränderte Temperatur- und Niederschlagsverteilung und
- Veränderungen in der Bewirtschaftungspraxis (kleinräumig).

Die Bestandesproduktivität ist in einigen Teilen Europas sehr stark angestiegen. Wachstumssteigerungen bis zu 30 % wurden in den letzten Jahrzehnten beobachtet (Schuck & Bystrakova 2000, Spiecker 1999). Welcher Einfluss sich jedoch wie stark auswirkt, ist lokal sehr unterschiedlich zu beurteilen und darüber hinaus auch von der jeweiligen Baumart, der Artenzusammensetzung und den sonstigen Standortbedingungen abhängig. Witterungsextreme und Dürre dagegen wirken sich negativ auf den Zuwachs aus.

Eine **Erhöhung des CO₂-Gehaltes** der Luft hat mehrere Auswirkungen auf die Physiologie der Pflanzen: Die Photosyntheserate steigt, die Photorespiration und die Rate der Dunkelatmung werden verringert, insgesamt steigt damit die Netto-Assimilationsrate (Jarvis 1998). Die stomatäre Öffnungsweite wird verringert, damit sinken die Wasserverluste (Transpiration). Die Ausnutzung von Licht und Wasser wird besser. Vorausgesetzt, Nährstoffe und Wasser sind ausreichend vorhanden, führt dies z. B. bei Keimlingen und jungen Pflanzen von Laub- und Nadelbäumen zu Zuwachsraten von 40 % und mehr, wobei sowohl Spross- als auch Wurzelwachstum gefördert werden. Die Nährstoffversorgung nimmt dahingehend Einfluss, dass bei Nährstoffmangel eher das Wurzelwachstum, bei ausreichender Nährstoffversorgung eher das Blattwachstum begünstigt wird. Wird das Wachstum, z. B. durch Nährstoffmangel, begrenzt, wird die Photosynthese von ihrem erhöhten Niveau teilweise wieder herunterreguliert (Jarvis 1998).

Entscheidend für die langfristigen Auswirkungen einer erhöhten CO₂-Konzentration ist weniger die Frage „was limitiert die C-Fixierung“, sondern die Frage „was begrenzt die C-Speicherung“ (Ulrich & Puhe 1994). Für eine dauerhafte C-Festlegung in Biomasse wird längerfristig daher eine den Bedarf deckende Nährstoffversorgung vorausgesetzt, wobei Stickstoff meist limitierend ist. Hier wird dann die Höhe des anthropogenen Stickstoff-Eintrags und die vermehrte Stickstoff-Mineralisierung durch erhöhte Temperaturen wichtig (Ulrich & Puhe 1994).

Die Folgen der gesteigerten Assimilationsrate können wiederum sein: ein verstärktes Höhen- und Dickenwachstum, ein höherer Blattflächenindex, ein größeres Verhältnis von Blattgewicht zu Blattfläche, eine gesteigerte Seitenverzweigung und Blühhäufigkeit, ein verändertes Wurzel-/Sprossverhältnis, die Verminderung der stomatären Leitfähigkeit, damit der Transpi-

ration und der Schadwirkung von Ozon und SO₂, sowie ein erweitertes C/N-Verhältnis in der Blattstreu (Ulrich & Puhe 1994).

Die meisten dieser Ergebnisse wurden im kontrollierten Experiment mit Keimlingen oder jungen Bäumen erzielt. Je nach experimentellen Bedingungen oder je nach Baumart fielen die Ergebnisse durchaus verschieden aus. Eine Extrapolation der Ergebnisse auf das Wuchsverhalten im Freiland ist daher mit Vorsicht zu interpretieren (Jarvis 1998). So ist eine Quantifizierung des Zuwachses durch CO₂ momentan noch schwierig (Ulrich & Puhe 1994). Simulationen auf Grundlage des 2 × CO₂-Szenarios des IPCC für Bayern (BayFORKLIM 1999) ergaben große Unterschiede im jährlichen Holzvolumenzuwachs bei den verschiedenen Baumarten. Im Gegensatz zum 1 × CO₂-Szenario dominiert nach bereits 50 Jahren deutlich die Buche im Vergleich zu Fichte und Tanne. Dabei wurden jedoch nicht nur wärmere, sondern auch humidere Bedingungen für das Untersuchungsgebiet (Bergmischwälder) in der Vegetationszeit zugrunde gelegt, so dass die Ergebnisse nur bedingt auf Baden-Württemberg übertragbar sind.

Eine **Temperaturerhöhung** wirkt sich bei allen Organismen auf allen ökophysiologischen Ebenen aus. Bei Pflanzen werden sowohl Photosynthese, als auch Atmung gesteigert (Ulrich & Puhe 1994). Das Temperaturoptimum der Nettophotosynthese liegt bei sommergrünen Laubbäumen 15-25°C, bei immergrünen Nadelbäumen bei 10-25°C. Erst bei einer Temperaturzunahme darüber hinaus steigt die Atmung (insbesondere die Photorespiration) bei zunächst gleichbleibender Bruttophotosynthese stark an, führt also zu relativen Kohlenstoffverlusten für die Pflanze. Dies würde durch eine erhöhte CO₂-Konzentration allerdings konterkariert, weil sich dann das Temperaturoptimum der Photosynthese zu höheren Temperaturen hin verschiebt. Eine Temperaturzunahme um 2 K in unseren Breiten wäre folglich für die Pflanzen noch nutzbringend (Hirschberg et al. 2003). Bei erhöhtem CO₂-Gehalt und höherer Temperatur könnten durch die verschobene Balance zwischen Photosynthese und Atmung die Bestände insgesamt schneller aufwachsen, früher in das Baumholzstadium und auch früher in Zerfallsstadien übergehen (Ulrich & Puhe 1994). Diese „beschleunigte Ontogenie“ ist bei Jungpflanzen unter der Wirkung erhöhter CO₂-Konzentrationen beobachtbar (Jarvis 1998). Darüber hinaus führt eine Temperaturerhöhung im Spätwinter/Frühjahr und Herbst zur Verlängerung der Vegetations- und damit Wachstumsphase. Insgesamt ist durch eine Erhöhung der Temperatur zwar ein gesteigerter Zuwachs zu erwarten. Ob er am konkreten Standort realisiert wird, hängt aber nicht zuletzt von der Wasser- und Nährstoffversorgung ab.

Falls die Temperaturerhöhung mit einer geringeren Wasserversorgung in der Vegetationszeit gekoppelt sein sollte, könnte ein Hauptproblem des Temperaturanstieges die gesteigerte **Dürregefahr** im Sommer in Deutschland darstellen, vor allem in bereits jetzt trockenen Regionen und in Fichte-dominierten Beständen außerhalb des natürlichen Verbreitungsgebietes (Spiecker et al. 2000). Besonders von Dürre bedroht sind vor allem Gebiete, in denen bereits heute die Wasserversorgung der limitierende Faktor ist. Lokale Wachstumsdepressionen durch steigende Temperaturen und Sommerdürre sind in Zukunft nicht auszuschließen.

Erhöhte CO₂-Konzentrationen bewirken eine Verringerung der stomatären Leitfähigkeit und

der Transpiration; die Wasserausnutzung wird verbessert. Ob dieser Effekt die Dürrewirkungen kompensieren kann, ist fraglich. In experimentellen Mini-Ökosystemen vergrößert sich mit erhöhter CO₂-Konzentration auch die Blattfläche (Jarvis 1998) und damit die potenzielle Bestandstranspiration, andererseits spielt im geschlosseneren Freilandbestand die Vergrößerung der Blattfläche eine geringe Rolle. Die Reduktion der Transpiration hat allerdings den Nebeneffekt, dass damit auch die Blattkühlung vermindert wird. Die Konsequenzen auf Blatttemperatur, Photosyntheserate, bis hin zum Bestandesklima bedürfen weiterer Untersuchungen (Murray 1997).

Im BayFORKLIM-Projekt wurde zur Abschätzung dieser Effekte die C-Fixierung, die Transpiration und die Wasserbilanz von Beständen mit dem BIGLEAF-Modell simuliert. Die doppelte CO₂-Konzentration bewirkt danach sowohl auf gut wasserversorgten, als auch auf trockenen Standorten eine Erhöhung der Nettophotosynthese bei reduzierter Transpiration (BayFORKLIM 1999).

8.2 Bestandesentwicklung

8.2.1 Verschiebung der Baumartenzusammensetzung

Die Entwicklung des Waldes ist standort- und baumartenspezifisch. Reaktionen der einzelnen Baumarten sind zum einen von deren ökologischer Amplitude abhängig, zum anderen von ihrer Konkurrenzkraft. In diesem Zusammenhang wird nach Ellenberg (1996) zwischen dem physiologischen und dem ökologischen Verhalten einer Art unterschieden. Ersteres wird unter Ausschaltung der Konkurrenz ermittelt, letzteres unter natürlichen Standortbedingungen.

Die Baumartenzusammensetzung unter veränderten Klimabedingungen ist abhängig von der ökologischen Amplitude der Baumarten bzw. auch ganzer Waldgesellschaften bezüglich Temperatur und Niederschlag. Abbildung 7 zeigt die ökologischen Amplituden bezüglich Temperatur- und Wasserhaushalt der wichtigsten hiesigen Baumarten und kann eine grobe erste Vorstellung über die Verschiebungen der Baumartenanteile unter veränderten Klimabedingungen geben. Gefährdet sind Baumarten vor allem in ihren Grenzbereichen; zumindest muss hier mit Ertragsdepressionen gerechnet werden (Arbeitskreis Wald und Klima 2003). Arten mit großer ökologischer Amplitude, wie z.B. die Pionierbaumarten, sind in der Regel gegenüber Umweltveränderungen anpassungsfähiger als Klimaxbaumarten.

Die Experimente mit – zumeist jungen – Bäumen im Rahmen des ECOCRAFT-Projektes (Jarvis 1998) haben gezeigt, dass die Reaktionen der Bäume auf erhöhte CO₂-Konzentrationen, auf Temperaturerhöhungen oder auf die Wechselwirkungen dieser Parameter untereinander und mit Nährstoff- und Wasserverfügbarkeit sich stark zwischen Baumarten, Herkünften, aber auch Klonen derselben Baumart unterscheiden können. Verallgemeinernde Aussagen, wie sich die Konkurrenzbeziehungen der einzelnen Baumarten verschieben mögen, sind dementsprechend vorsichtig zu beurteilen.

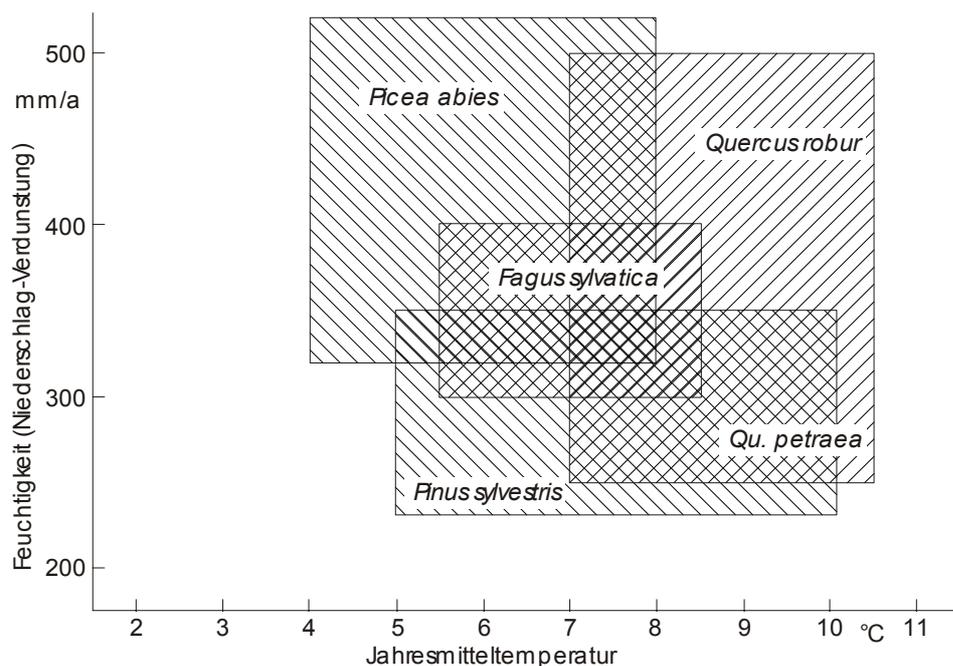


Abbildung 7: Ökogramme der wichtigsten mitteleuropäischen Baumarten (nach Thomasius 1991, in Kändler 1997)

Die Konkurrenzverhältnisse dürften sich gemäß Abbildung 7 durch veränderte Temperatur- und Feuchtigkeitsverhältnisse ändern. Eine Klimaerwärmung kann z. B. die Verjüngung der Fichte beeinträchtigen, während die Kiefer toleranter ist (Ulrich & Puhe 1994). Fichten aber können andererseits z. B. gegenüber Buchen mehr CO₂ aufnehmen, wachsen also schneller und sind damit konkurrenzstärker (Hirschberg et al. 2003).

Die Anpassung der Wälder an veränderte Umweltbedingungen wird jedoch durch die Veränderungsgeschwindigkeit erschwert: Das Tempo der Klimaveränderung wird mit einer erwarteten Nordverschiebung der Isothermen um 4 bis 6 km pro Jahr um eine Größenordnung schneller sein als die Geschwindigkeit beispielsweise bei der Rückwanderung der Baumarten nach dem Ende der Eiszeiten von etwa 300 m pro Jahr. Eine rasche natürliche Anpassung ist also unwahrscheinlich. Mit einer Phase erhöhter Labilität der Wälder ist zu rechnen (Kändler 1997). Inwieweit der Mensch in Wirtschaftswäldern regulierend eingreifen soll, wird in Fachkreisen intensiv diskutiert und war auch Thema des Waldprogramms 2003 (s. Kapitel 9).

Im Einzelnen könnten die wichtigsten Baumarten folgendermaßen auf eine Klimaerwärmung reagieren (VWF 1994):

Buche: Die Buche (*Fagus sylvatica*) ist eine eher atlantisch geprägte Baumart. Ihre Verbreitung ist durch Jahresmitteltemperaturen von >7,5-8 °C und Niederschlägen <600 mm begrenzt. Die westliche und südliche Verbreitungsgrenze ist bei über 600 mm Niederschlag die 20°C-Juli-Isotherme, die östliche wird durch verringerte Niederschläge bestimmt. Bei einer Erhöhung der Sommertemperaturen um 2 K scheint somit die Buche in Deutschland nicht generell gefährdet, sofern das Feuchtigkeitsregime unverändert bleibt (BayFORKLIM 1999).

Eiche: Das heutige Verbreitungsgebiet der Stiel- und Traubeneichen (*Quercus robur*, *Q. petraea*) reicht weiter in den submediterranen Raum als das der Buche. Die Stieleiche benötigt eine höhere Bodenfeuchtigkeit und wärmere Sommer als die Traubeneiche. Die östliche Verbreitungsgrenze der Traubeneiche wird durch ein Januarmittel von -5 °C bestimmt. Eine Klimaerwärmung bringt der Eiche auf trockeneren Standorten einen Konkurrenzvorteil gegenüber der Buche. Ihr Areal wird sich vermutlich gen Norden und in höhere Lagen ausbreiten (VWF 1994). Allerdings war auf der anderen Seite laut Waldzustandsbericht der Gesundheitszustand der Eichen in den letzten Jahren sehr bedenklich.

Fichte: Das Verbreitungsareal der Fichte (*Picea abies*) ist im Norden durch die 10 °C -Juli-Isotherme und im Osten und Süden durch die 600 mm-Niederschlagslinie begrenzt. Limitierend sind außerdem die Häufigkeit von Trockenjahren sowie Jahresmitteltemperaturen über 7 °C und Niederschläge unter 800 mm. Ihr natürliches Verbreitungsareal beschränkt sich bei uns auf subalpine und hochmontane Lagen der Hoch- und Mittelgebirge. Auf allen anderen Lagen dürfte die Fichte durch die Klimaerwärmung, insbesondere wenn Trockenperioden hinzukommen, Probleme bekommen (VWF 1994).

Kiefer: Die Kiefer (*Pinus sylvestris*) besitzt die größte physiologische Amplitude, ist jedoch anderen Baumarten gegenüber wenig konkurrenzstark. Trockenheit und Erwärmung stellen jedoch für sie kein Problem dar, so dass sie auch unter veränderten Klimabedingungen bestehen kann. Empfindlich ist sie jedoch gegenüber Extremereignissen wie Schneebruch, Feuer oder Schadinsekten-Kalamitäten (VWF 1994).

Bergahorn und Esche: Bei Ahorn (*Acer pseudoplatanus*), Esche (*Fraxinus excelsior*) und anderen Pionierbaumarten werden unter veränderten Klimabedingungen keine größeren Probleme erwartet (VWF 1994).

Untersucht bzw. simuliert werden kann die zukünftige Baumartenzusammensetzung auch über **Vegetationsszenarien**, die von den Szenarien der Klimamodelle ausgehen. Sie gelten bislang noch als recht unsicher, zumal bereits ihre Grundlage (Klimamodelle) fehlerbehaftet ist und regionalspezifische Aussagen noch kaum möglich sind. Außerdem wird nur der Endzustand unter veränderten Klimabedingungen simuliert, nicht die möglicherweise kritischere Übergangsphase. Die Modelle prognostizieren starke Verschiebungen der Vegetationszonen in Richtung Pole. Die Waldflächenentwicklung wird in den Modellen sehr unterschiedlich beurteilt: Von Verlusten um 90 % bis hin zu Flächenzunahmen von 25 % sind alle Möglichkeiten denkbar. Das Areal der Fichte in Mitteleuropa wird in den Modellen in der Regel deutlich kleiner. Trotz gewisser noch vorhandener Unsicherheiten verdeutlichen die Vegetationsmodelle ein großes Gefahrenpotenzial einer Klimaveränderung auf die Wälder (Kändler 1997).

8.2.2 Erweiterung des Verbreitungsgebietes der Baumarten

Trockenere Sommer legen die Vermutung nahe, dass sich entsprechend angepasste, mediterrane Arten nach Norden ausbreiten könnten (McCarthy et al. 2001). Dabei gilt es allerdings zu bedenken, dass mediterrane Arten hohe Ansprüche an Basensättigung und Kalk-

gehalt (pH-Wert) stellen, so dass eine umfangreiche Einwanderung dieser Arten in die gemäßigten Breiten unwahrscheinlich sein dürfte. Eine Ausweitung der Laubwaldzone nach Norden ist eher denkbar, da geringere Unterschiede in den Humusvorräten und im chemischen Bodenzustand bestehen (VWF 1994).

Vertikal wird sich die Kältengrenze der Baumarten in höhere Bereiche verschieben, so dass die Obergrenze charakteristischer Waldgesellschaften ca. 50-100 m höher liegen wird. Begünstigt wird dabei vor allem die Buche (BayFORKLIM 1999).

Für Baden-Württemberg in gemäßigten Breitengraden und mit seinen Mittelgebirgen sind diese eher global bedeutsamen Verschiebungen weniger relevant. Hier ist es durch die Verzahnung mit azonalen Waldgesellschaften aufgrund des Standortmosaiks wahrscheinlich, dass ab der submontanen Stufe die Veränderungen überwiegend noch im Rahmen der natürlichen ökologischen Anpassungsfähigkeit bleiben, wenn auch mit gewissen Konkurrenzverschiebungen. In der planaren und zum Teil auch collinen Stufe allerdings dürften Verhältnisse eintreten, wie sie heute für südliche, (sub)mediterrane Gegenden typisch sind. In den Tieflagen und im Hügelland stehen nur zum Teil optimal an die neuen standörtlich-klimatischen Verhältnisse angepasste Baumarten zur Verfügung. Es fehlen südlichenorts führende Baumarten (z. B. Zerreiche in Pannonien, Steineiche in Südfrankreich). Dafür wird die Bedeutung thermophiler, trockenresistenter gebietsheimischer Baumarten wachsen. Das muss auf diesen Standorten noch nicht das Aus für die Buche bedeuten, ihre Ertragskraft könnte allerdings sinken (Arbeitskreis Wald und Klima 2003).

8.3 Boden

Betrachtet man den Nährstoffhaushalt des Ökosystems Wald im Zusammenhang mit dem Klimawandel, ist vor allem der Stickstoffhaushalt von großer Bedeutung. Er dürfte nicht nur schneller als andere Bodenkomponenten bzw. -funktionen auf Klimaveränderungen reagieren, sondern Stickstoff ist oftmals der limitierende Nährstoff der Pflanzen und beeinflusst maßgeblich die Zusammensetzung der Bodenlösung, die Austauschbelegung und das Redoxpotenzial der Bodenmatrix (BayFORKLIM 1999).

Höhere Temperaturen, insbesondere im Winter ($> 5^{\circ}\text{C}$), regen die Mineralisierung organischer Substanz im Boden an. Dabei ist mit einer Steigerung der Netto-N-Mineralisierung um ca. 15 % pro Erhöhung der Jahresmitteltemperatur um 1°C zu rechnen (Ulrich & Puhe 1994). Diese Steigerung ist aber nur dann nachhaltig, wenn der Stickstoff von Mikroorganismen und Pflanzen aufgenommen und schließlich in Biomasse und Humus eingebaut wird (BayFORKLIM 1999). In diesem Fall erhält man einen nachhaltig erhöhten Stoffumsatz mit höherer Biomasseproduktion.

Die Alternative dazu wäre, dass die Vorräte an Stickstoff und Humus im Boden mit vorübergehender Zuwachssteigerung abgebaut werden. Dies hätte Folgen für die Kompartimente Wasser und Atmosphäre. Bei der verstärkten Mineralisierung von Stickstoff ist mit Auswaschungsverlusten von Nitrat über das Bodensickerwasser zu rechnen. Kalium, Magnesium und Calcium würden ebenfalls ausgewaschen, es käme zur Bodenversauerung (Flaig &

Mohr 1996). Überschüssiger Stickstoff kann auch als Stickoxid bzw. molekulares N_2 , Ammoniak oder gar treibhauswirksames N_2O in die Atmosphäre entweichen (BayFORKLIM 1999). Die Emission von N_2O hängt insbesondere von der Intensität der Denitrifikation ab, die wiederum u.a. durch nässebedingte anaerobe Verhältnisse gefördert wird. Der Anteil an N_2O steigt, je saurer der Boden ist. Außerdem gibt es Hinweise darauf, dass es zwischen der Oxidation von (treibhauswirksamem) Methan in Böden und der Oxidation von Stickstoffverbindungen Antagonismen gibt (Flaig & Mohr 1996). Durch den Humusabbau würden die Waldböden für eine mehrere Jahrzehnte dauernde Übergangszeit zu CO_2 -Quellen, die ca. 200-500 kg C/(ha*a) freisetzen könnten (Ulrich & Puhe 1994), bis sich die Humusvorräte auf niedrigerem Niveau eingependelt hätten. Auf der anderen Seite gibt es Hinweise, dass die Zersetzung alter organischer Substanz im Boden deutlich langsamer verläuft als die von frischer Streu bzw. jungem Humus (Liski et al. 1999).

Eine Vorhersage, in welche Richtung sich das Gleichgewicht unter veränderten Klimabedingungen verschieben könnte, ist zum gegenwärtigen Zeitpunkt noch sehr schwierig (Puhe & Ulrich 2001).

8.4 Wasserhaushalt

Der Wasserhaushalt von Waldbäumen ergibt sich aus dem Wechselspiel von Niederschlag, Bodenspeicherung und Verdunstung. Die Klimaveränderung kann hier über veränderte Niederschlagsmenge und -verteilung und über veränderte Evapotranspiration wirksam werden. Die Transpiration erhöht sich durch Temperaturerhöhung und höheres Wasserdampfdruckdefizit, erniedrigt sich aber durch bessere Wasserausnutzung der Bäume bei höherem CO_2 -Gehalt der Luft. Gesicherte Prognosen sind noch nicht möglich (Ulrich & Puhe 1994).

Darüber hinaus ist sowohl die genetische als auch die physiologische Anpassungsfähigkeit der Bäume groß. Es gibt Hinweise, dass einige Baumarten (z. B. Rotbuche auf bestimmten Standorten) Regelmechanismen zur Kompensation von Trockenstress ausbilden können (Schraml & Rennenberg 2002).

Vor allem in trockenen Jahren steigt die Transpiration stark an, so dass Gefahr von Dürren steigt (vgl. Kap. 8.7.1).

Sollte der potenzielle Nitrat- und Versauerungsschub (vgl. Kap. 8.3) vom Boden bis auf das Grundwasser durchschlagen, so sind Beeinträchtigungen der Grundwasserqualität durch Nitrat, niedrigen pH-Wert, Aluminium-Ionen oder DOC (gelöste organische Substanz) möglich.

8.5 Schädlinge und Krankheitserreger

Massenwechsel von Insekten wird von vielen verschiedenen Faktoren beeinflusst, die jedoch mit ihren Wechselwirkungen noch für keinen Forstschädling vollständig bekannt sind. Abiotische Einflussfaktoren sind z. B. Temperatur, Niederschlag, Luftfeuchtigkeit, Sonnenschein-

dauer oder Tageslänge. Biotische Einflussfaktoren sind etwa Parasitoide, Pathogene, Räuber, Konkurrenzverhalten, Nahrungsqualität oder die Fertilität (Feemers et al. 2003).

Von höheren Temperaturen profitieren viele Schaderreger. Die physiologische Leistung von Insekten als wechselwarme Tiere hängt sowohl direkt von der Temperatur ab als auch indirekt von einer veränderten Nahrungsmenge und -qualität. Darüber hinaus besteht ein direkter und indirekter Einfluss der Witterung auf Feindkomplexe und die interspezifische Konkurrenz (Ulrich & Puhe 1994). Bei Insektenarten, die im Boden überwintern, besteht bei höheren Bodentemperaturen und höherer Bodenfeuchtigkeit weniger die Gefahr der Massenvermehrung, da Infektionen durch insektenpathogene Pilze deutlich ansteigen (Feemers et al. 2003).

Folgen einer Klimaerwärmung können im Einzelnen sein (Ulrich & Puhe 1994):

- Höhere Anzahl und längere Schadfraßphasen der etablierten Schadinsekten. Die Überlebensbedingungen im Winter sind günstiger. Borkenkäfer z. B. bringen in warmen Jahren mit langer Vegetationsperiode 2-3 statt 1 Generation hervor. Der Buchdrucker kann auf gesunde Bäume übergehen und in höhere Lagen vordringen. Auch Wurzelparasiten werden durch frostärmere Winter gefördert.
- Die Verschiebung der Baumartenzusammensetzung führt zu einer Belastung der Konkurrenzkraft, die die Widerstandskraft gegen Erreger schwächt.
- Südliche Schadinsekten können sich nordwärts ausbreiten, bei instabilen Waldbeständen wird dies möglicherweise zu einem zusätzlichen Problem.
- Die Rangfolge des Gefahrengrades der Schadinsekten kann sich durch Verschiebungen der interspezifischen Konkurrenz verschieben, bei erhöhten Stickstoff-Einträgen z. B. zugunsten der Säftesauger unter Zurückdrängung der Blattfresser. Ein Pestizideinsatz im Forst könnte somit möglicherweise häufiger in Erwägung gezogen werden, da Säftesauger eher Dauerschädlinge sind.
- Zunahme von bakteriellen und Pilzinfektionen bei Erwärmung vor allem im Winter, wobei aber eine Abhängigkeit vom Feuchteregime besteht.

8.5.1 Tierische Schädlinge

Die Prognosen zu Insektenkalamitäten sind insgesamt noch unsicher. Man geht allgemein jedoch davon aus, dass gestresste Bestände anfälliger für Schädlingskalamitäten sind. Dies kann u. a. bei veränderten Witterungsverhältnissen der Fall sein, z. B. durch Hitzestress oder nach Extremereignissen (Beispiel: Borkenkäferkalamitäten in Fichtenbeständen nach Windwürfen) (Kändler 1997). Einzelne oder mehrere trockene und warme Sommer in Folge können besonders für blatt- und nadelfressende Arten förderlich sein. Dies muss jedoch nicht für eine dauerhafte Klimaerwärmung gelten (Feemers et al. 2003).

Bei Kiefern-schädlingen wie Kieferneule, Kiefernspanner oder Kiefernbuschhornblattwespe, beim Fichten- und Kiefern-schädling Nonne und beim Eichenwickler ist eine Begünstigung oder Benachteiligung von Massenvermehrungen durch den prognostizierten Klimawandel

derzeit nicht vorhersagbar. Anders ist die Lage bei den Rindenbrütern, die vor allem die Fichte befallen, oder wärmeliebenden Arten wie Schwammspinner, Eichenprozessionsspinner und Eichenprachtkäfer, die durch warme und trockene Sommer eher begünstigt werden könnten. Wenn sich die Baumartenzusammensetzung zugunsten der Eiche verändert, könnte sich das Verbreitungsareal der Eichenschädlinge ausdehnen und deren Populationsdichte auf höherem Niveau als heute einpendeln.

Borkenkäfer, besonders der Buchdrucker (*Ips typographus*), treten vor allem dort auf, wo die Fichte als geeignetste Baumart vorhanden ist. Das klimatische Spektrum, in dem der Buchdrucker auftritt, ist sehr weit. Warme, trockene Sommer fördern eine raschere Entwicklung und mehr Generationen pro Jahr, feuchte und milde Winter sind für im Boden überwinternde Käfer eher ungünstig, für Stammüberwinterer weniger negativ. Wichtig ist auch die Befallsdisposition der Bäume: Höhere Winterniederschläge sorgen für ausreichende Wasserversorgung im Frühjahr und damit zu geringer Disposition zu dieser Jahreszeit, trockene Sommer dagegen bedeuten erhöhte Disposition zum Zeitpunkt der Begründung der Geschwisterbruten und der zweiten Generation.

Voraussetzung zur Massenvermehrung ist jedoch zum einen das Vorhandensein bruttauglichen Materials, das im Falle von verstärkten Extremereignissen wie Stürme oder Schnebruch verstärkt anfallen könnte. Darüber hinaus müssen die Witterungsbedingungen zu den Schwärmzeiten optimal sein. Bei Massenvermehrungen steht dann außerdem zu befürchten, dass die Schädlinge auch auf andere Baumarten übergreifen.

Insgesamt dürften sich unter den prognostizierten Klimaänderungen die äußeren Bedingungen für die Schädlinge eher verbessern: Die Beendigung der Winterpause könnte durch früheren Vegetationsbeginn vorverlegt werden und höhere Sommertemperaturen könnten die Ausbildung von mehr als zwei Generationen begünstigen. Waldbauliche Konsequenzen wären somit im Fichten-Wirtschaftswald auch weiterhin das Prinzip der „sauberen Waldwirtschaft“ bzw. ein Umbau des Waldes weg von der Fichte (Feemers et al. 2003).

Das Jahr 2003 war bisher ein extrem trockenes und viel zu warmes Jahr. Die Temperaturen lagen besonders von Juni bis August deutlich über dem langjährigen Mittel. Bereits ab Februar war ein Niederschlagsdefizit zu erkennen, bis Mitte August betrug die Gesamtniederschläge im Land lediglich etwa die Hälfte des langjährigen Mittels. Aktuell von besonders großer Bedeutung sind deshalb Schäden durch Dürre, Buchdrucker- und Kupferstecherbefall (Forstdirektion Freiburg 2003). Sollten sich Jahre wie 2003 künftig häufen, so könnte dieses Jahr einen Vorgeschmack darauf geben, wie sich die Schädlingssituation noch entwickeln mag.

Trockenschäden entstanden vor allem in den sehr trockenen Monaten Juni bis August und werden jetzt oder auch erst im nächsten Jahr sichtbar. Vor allem bei Fichten ist auch in den nächsten Jahren noch mit Folgen des Trockenstresses zu rechnen. Die geschädigten Bäume bieten ideale Voraussetzungen für Massenvermehrungen von Schädlingen, zumal der lange und warme Sommer deren Wachstum stark gefördert hat. Bundesweit wurden in diesem Jahr Massenvermehrungen u. a. beim Buchdrucker, dem Kupferstecher in älteren Fichten, dem Großen Lärchenborkenkäfer in Lärchen und dem Tannen-Borkenkäfer beo-

bachtet (SDW 2003). In Baden-Württemberg traten sowohl Buchdrucker- als auch Kupferstecherherde auf, nachdem deren Bedeutung im Jahr 2002 vor allem durch die für die Käfer ungünstige Witterung stark abgemildert war. Beim Buchdrucker besteht in diesem Jahr die Gefahr, dass sich lokal sogar die Geschwisterbrut der zweiten Generation entwickeln und sogar noch in den Boden als Winterquartier ausfliegen kann, da der Buchdrucker bis weit in den Herbst hinein fliegen kann. Nach der Überwinterung im Frühjahr 2004 besteht somit die Gefahr erneuter Massenvermehrungen des Buchdruckers. Ungewöhnlich in diesem Jahr und auf die extreme Trockenheit zurückzuführen ist der starke Stehendbefall durch Kupferstecher (*Pityogenes chalcographus*) in den Kronen von Althölzern. Für das kommende Jahr ist nicht auszuschließen, dass der Kupferstecher auch auf Stangenhölzer übergreifen könnte. Bereits bis Mitte August wurden landesweit ca. 190 000 fm Borkenkäferholz eingeschlagen (Forstdirektion Freiburg 2003), die Gesamtmenge wird für dieses Jahr auf 1,2 Mio. Festmeter geschätzt.

Es wird befürchtet, dass auch die Zunahme des **Waldmaikäfers** (*Melolontha hippocastani*) vor allem in der Oberrheinebene bereits Folge einer klimabedingten höheren Reproduktionsrate ist (H. Schröter 2003, pers. Mitt. im Arbeitskreis Wald und Klima). Durch die Vermischung von Entwicklungszyklen verschiedener bisher geographisch getrennter Flugschmme ist künftig mit einem jährlichen Käferflug und Wurzelschäden durch die Engerlinge ohne Ruhejahre zu rechnen, so dass sich der Waldmaikäfer zu einem Dauerschädling entwickeln könnte (Schröter et al. 2003).

8.5.2 Pilzliche Schaderreger

Pilze können sich aufgrund ihrer kurzen Generationsfolge rasch an sich ändernde Klimaverhältnisse anpassen und durch luftverbreitete Sporen schnell neue Verbreitungsräume erschließen. Entscheidend für die Entwicklung am Standort ist für viele parasitische Pilze die Luftfeuchtigkeit zur Zeit der Sporenreife.

Höhere Sommertemperaturen könnten zum Beispiel dazu führen, dass *Sphaeropsis sapinea*, der Erreger des Diplodia-Triebsterbens, in Mitteleuropa in Zukunft nicht mehr nur die jüngsten Triebe, sondern auch die Rinde von Ästen und Stämmen infizieren kann, wie dies bereits in wärmeren Ländern heute schon der Fall ist. Auch der Kiefern­schädling der *Dothistroma*-Nadelbräune kann in wärmeren Regionen größere Schäden anrichten (Feemers et al. 2003). Durch milde Wintertemperaturen können einige Arten besser überdauern, wie zum Beispiel einige Phytophthora-Arten. Andere Pilze dagegen wie z. B. der Schwarze Schneeschimmel haben sich an die Verhältnisse unter der Schneedecke angepasst und können bei einer Klimaerwärmung an Bedeutung verlieren.

Allgemein ist für pilzliche Erkrankungen der Vitalitätszustand der Wirtsbäume von entscheidender Bedeutung. Stress, etwa durch Trockenheit, könnte eine gesteigerte Anfälligkeit gegenüber Pilzinfektionen zur Folge haben (Feemers et al. 2003).

8.5.3 Parasitische Pflanzen

Eine Vermehrung parasitischer Pflanzen wie der Mistel (*Viscum album*) ist prinzipiell denkbar. Eine Schwächung der Wirtsbäume wie Kiefer, Tanne oder Pappel zum Beispiel durch Wasserstress kann deren Disposition erhöhen. Auch die Reproduktionsrate der Mistel kann durch veränderte Klimabedingungen gesteigert werden. Bereits heute hat die Fläche mit Mistelbefall an Kiefer, aber auch an Tanne und Pappel stark zugenommen. Immer häufiger werden auch Linden oder Robinien befallen. In der nördlichen Oberrheinebene beeinträchtigt die Mistel bereits die Kiefernwirtschaft (Schröter et al. 2003).

8.6 Fauna

Der Klimawandel kann die Dynamik von Wildtierpopulationen verändern: Zugvögel ziehen zum Beispiel später weg und kommen früher wieder zurück. Südeuropäische Tierarten dehnen ihre Verbreitungsgebiete bis nach Mitteleuropa aus (Menzel 2003). Auch die Vermehrungsrate kann sich erhöhen. Milde Winter oder kurze Wärmeperioden im Winter können die Wintersterblichkeit des Wildes senken oder den jahreszeitlichen Zyklus stören, z. B. durch Erwachen aus dem Winterschlaf.

8.7 Auswirkungen von Extremereignissen

Obwohl alle bisherigen Beobachtungen bezüglich Extremereignissen noch im Rahmen der üblichen Variabilität der Witterung in Mitteleuropa liegen und Prognosen derzeit keine belastbaren Aussagen zulassen, sollte aus Vorsorgegründen dieser Aspekt Beachtung finden, zumal Extremereignisse in der Regel zu einer schlagartigen Änderung des Konkurrenzgefüges von Waldökosystemen führen.

8.7.1 Sommerliche Dürren

Sommerdürren sind eine Kombination von Hitzeperioden, Trockenperioden und Strahlungswetter. Trockenperioden haben eine Mindestdauer von 5 Tagen, in denen ein klimatologisches Wasserdefizit (potenzielle Verdunstung minus Niederschlag) von mindestens 10 mm auftritt. Waldschäden treten in der Regel erst dann auf, wenn das klimatologische Wasserdefizit > 40 mm beträgt. Allerdings muss selbst ein Wasserdefizit > 100 mm nicht zwangsläufig zu Schäden führen. Die bei Strahlungswetter erhöhte UV-B-Strahlung kann ebenfalls Schäden hervorrufen, zumal sie in Kombination mit erhöhtem troposphärischen Ozon auftritt (Ulrich & Puhe 1994).

In Deutschland sind die Gebiete am bedrohtesten, in denen bereits heute die Wasserversorgung im Sommer der limitierende Faktor ist. Dies ist geographisch vor allem in den warmen, trockenen Gebieten des Nordostens und des Südwestens Deutschlands der Fall. Topogra-

phisch dürregefährdet sind vor allem Gebiete mit hoher Einstrahlung und Wind und damit verbundener höherer Verdunstung, pedologisch ungünstig sind flache oder sandige Böden.

Genauere Vorhersagen sind auch hier noch sehr schwierig, da sowohl die Niederschläge im Sommer als auch der Einfluss des CO₂ noch schwer abzuschätzen sind. Mit lokalen Wachstumsdepressionen bei steigenden Temperaturen und Sommerdürre ist jedoch zu rechnen (Kändler 1997, McCarthy et al. 2001). Extrem trockene Sommer wie 1947 oder 1976 wirken sich noch Jahre später auf die Vitalität der Bäume aus. Besonders problematisch können sich mehrere Trockenjahre hintereinander auswirken, wenn die Bäume sich nicht mehr erholen können (Ulrich & Puhe 1994).

8.7.2 Spätfröste

Die Gefahr von Spätfrösten steigt erheblich, wenn Wärmeperioden außerhalb der Vegetationsperiode, z. B. im Spätwinter, auftreten und dadurch die Bäume zu früh enthärtet werden oder Austrieb und Blüte im Jahr sehr früh erfolgen. Dies kann im Falle einer Klimaveränderung in Zukunft regelmäßig erfolgen, wenn es zu einer Verlängerung der Vegetationsperiode insbesondere durch Vorverlegung des Frühjahres kommt. Eine Verlängerung der Vegetationsperiode ist für wichtige Laubbäume zwischen 1951 und 2000 um bis zu 2,3 Tage pro Dekade ermittelt worden. Das Frühjahr wird vorverlegt, der Herbsteintritt erfolgt später (Menzel 2003).

Chmielewski (2001) nutzte die Daten der Internationalen Phänologischen Gärten Europas (IPG), um phänologische Rasterkarten auf europäischer Ebene zu erstellen. Er wies nach, dass sich klimatische Veränderungen in Europa bereits seit einigen Jahren deutlich in der Vegetationsentwicklung widerspiegeln. Die Trendanalysen von Beginn, Ende und Länge der Vegetationsperiode ergaben eine signifikante Verlängerung der Vegetationsperiode. Sie basiert vor allem auf einem früheren Beginn der Vegetationsperiode, weniger auf einer Verspätung des Vegetationsendes. In den letzten 30 Jahren (1969-1998) konnte europaweit eine Erwärmung im zeitigen Frühjahr (Februar bis April) beobachtet werden. Dies führte zu einer Vorverlegung des Frühjahres und damit zu einer Verlängerung der Vegetationszeit um insgesamt 10,5 Tage. Spätfröste betrafen in der Vergangenheit vor allem die Tanne, die Buche und abgeschwächt auch Fichte und Kiefer.

8.7.3 Stürme

Waldschäden durch Stürme sind im vergangenen Jahrhundert in Mitteleuropa drastisch angestiegen. In Baden-Württemberg richteten „Lothar“ 1999 sowie „Vivian“ und „Wiebke“ im Jahr 1990 verheerende Schäden an. Sturmschäden können in Form von Windwurf oder Windbruch auftreten. Ihre Stärke hängt von der Ausprägung des Sturmes (Windstärke, Dauer und Böigkeit), von den Bodenbedingungen (Bodenfeuchte), der Exposition, den Bestandesbedingungen (Bestandeshöhe, -dichte, Baumartenzusammensetzung, Stammdurchmesser, Kronenlänge) und dem physikalischen Zustand bzw. der Vitalität des einzelnen Baumes ab. Insbesondere Bestände mit Kronenverlichtung gelten als besonders gefährdet, was mög-

licherweise mit den entsprechenden Veränderungen im Wurzelsystem in Zusammenhang steht (Ulrich & Puhe 1994, Puhe & Ulrich 2001).

Als besonders sturmanfällig gelten bei den Nadelbäumen vor allem die Fichte und die Douglasie, bei den Laubbäumen insbesondere Buche, Birke und Pappel. Laub- und Mischwaldbestände sind stabiler als Nadelwaldbestände. Durch Sturm „Lothar“ waren 1999 im Waldgebiet Rammert bei Rottenburg „nur“ 7 % der Bäume im Laub- und Mischwald, aber 36 % der Bäume in Nadelwäldern geworfen worden. Darüber hinaus waren die Schäden in Nadelwaldbeständen wesentlich großflächiger (Ebert 2002).

In Gebieten mit vielen Sturmwürfen besteht nachfolgend erhöhte Gefahr von Insektenkalamitäten, insbesondere des Borkenkäfers. Darüber hinaus ist auch mit erhöhter Dürreanfälligkeit zu rechnen, was vermutlich auf eine Schädigung der Feinwurzeln zurückzuführen ist (FVA 2002).

8.7.4 Nassschnee und Eisbruch

Eine durch mildere und feuchtere Winter mögliche Zunahme von Nassschnee-Niederschlägen oder Eisregen gefährdet die Bäume durch Ast- und Wipfelbruch. Im Jahr 2002 lag der Anteil von Schneebruchholz an der gesamten zufälligen Nutzung in Baden-Württemberg bei 8 % (Schröter et al. 2003).

8.7.5 Waldbrände

Waldbrände sind bislang ein für Baden-Württemberg kaum relevantes Problem. Dies dürfte in erster Linie darauf zurückzuführen sein, dass Laubmischwälder mit mullartigen Humusformen, also mit fehlender Humusaufgabe vorherrschen. Prinzipiell gefährdet sind vor allem Kiefernbestände, aber auch alle Wälder mit Auflagehumusdecken. Auf podsoligen und podsolierten Böden, auf denen die Tendenz zur Humusakkumulation besteht, könnte folglich in Kombination mit einer möglichen Zunahme der Trockenperioden in Zukunft ein leicht erhöhtes Waldbrandrisiko bestehen. Auch eine mögliche Verschiebung der Baumartenzusammensetzung hin zu Kiefer und Eiche, evtl. mit Douglasie, könnte die Gefahr von Waldbränden steigern (Ulrich & Puhe 1994).

8.7.6 Insektenkalamitäten

Durch die Wechselwirkung zwischen Temperaturerhöhung und sturmbedingtem Schadholzanfall könnten sich die Bedingungen für eine Schädlingsvermehrung, zumindest für die Rindenbrüter, drastisch verbessern, so dass mit erheblichem Schädlingsbefall gerechnet werden müsste (vgl. Kap. 8.5.1). Im schlimmsten Fall stellt eine solche Entwicklung die Eignung der Fichte auf vielen Standorten in Baden-Württemberg in Frage (Arbeitskreis Wald und Klima 2003), so dass die Befürchtung geäußert wurde, dass man sich von der Fichte als Brot-

baum an vielen Standorten wird verabschieden müssen. Es wurde in diesem Zusammenhang auch gefordert ("saubere Waldwirtschaft"), wirtschaftlich verwertbares Restholz einer Verwertung zuzuführen und nicht im Wald liegen zu lassen. Außerdem wurde die Forderung erhoben, Totholz im Wald differenzierter zu betrachten: Während mehr Totholz von Laubbäumen als relativ unproblematisch erachtet wird, sollte man bei Nadelbäumen zwischen Schutzgebieten und Wirtschaftswald unterscheiden und in letzterem nicht zuviel Totholz anhäufen (Arbeitskreis Wald und Klima 2003).

9 Waldbauliche Konsequenzen

Dadurch, dass Art und Ausmaß zukünftiger Klimaveränderungen nicht genau vorhersagbar sind, befindet sich die Forstwirtschaft in einem Dilemma: Bleiben Klimaveränderungen im Waldbau völlig unberücksichtigt, besteht die Gefahr, dass bald auf großer Fläche nicht angepasste Bestände stehen. Entwickelt sich das Klima jedoch nicht so drastisch wie im schlimmsten Fall angenommen, würden intensive Umbaubemühungen Fehlinvestitionen bedeuten (Borchert & Kölling 2003). Folglich muss die Wald- und Forstwirtschaft eine ganze Palette möglicher Veränderungen in Betracht ziehen und versuchen, das Risiko zu minimieren.

9.1 Ansätze für waldbauliche Strategien im Klimawandel

Folgende Maßnahmen werden in der Literatur als Möglichkeiten zur Milderung der Klimaefekte mit Blick auf Temperaturerhöhung und ggf. Sommertrockenheit diskutiert:

1. Mischbestände, Förderung der Artenvielfalt

Mischbestände vergrößern die Reaktionsbreite der Ökosysteme und damit deren Stabilität bzw. Resilienz, also deren Fähigkeit zum Abfedern von Umweltbedingungen. Durch Erhalt von Baumarten mit Pioniercharakter kann die natürliche Anpassungsfähigkeit gefördert werden, was vor allem in der Übergangsphase zwischen den Gleichgewichtszuständen eine große Rolle spielt (s. u.). Im Hinblick auf eine mögliche Klimaerwärmung sollten Refugien für wärmebedürftige Gehölzarten, aber auch Arten der Krautschicht erhalten bzw. vermehrt werden. Dafür kommen zum Beispiel Waldränder in Frage.

2. Naturverjüngung

Ob Naturverjüngung alleine ausreichend ist, ist zur Zeit noch umstritten. Da der Klimawandel wesentlich rascher vonstatten gehen dürfte als die dadurch bedingten Sukzessionen (vgl. Kap. 8.2.1), wird bisweilen eine, allerdings vorsichtige, Kunstverjüngung empfohlen. Reine Naturverjüngung sollte dieser Argumentation nach nur dann gewählt werden, wenn die Ausgangsbestände dies von Anpasstheit, Wuchsleistung, Qualität und zu erwartender Anpassungsfähigkeit rechtfertigen. Wenn diese Voraussetzungen nicht gegeben sind, also die den zu erwartenden veränderten Standortbedingungen angepassten Arten an dieser Stelle nicht vorhanden sind, ist u. U. mit erheblichen ökologischen und wirtschaftlichen Nachteilen zu rechnen (Kleinschmit 1999).

Demgegenüber steht die Argumentation, dass die überaus reiche genetische Vielfalt der Naturverjüngung für die Unwägbarkeiten der durch den Klimawandel verursachten Veränderungen am konkreten Standort die beste Versicherung bietet (vgl. Punkt 5 in diesem Kapitel). Die natürliche Auslese sei ein flexibler und zuverlässiger Regelmechanismus, der aus der Vielzahl an Informationen die jeweils besten ausliest. Ein stetiger natürlicher Verjüngungsprozess garantiere einen genetisch vielfältigen und standortbewährten Wald. „Die Naturver-

jüngung selektiert die besten aus Hunderttausend, die Pflanzung hingegen nur die besten aus Hundert“ (Heinrich 1997).

3. Baumartenwahl

Eine zentrale Maßnahme zur Milderung der Klimaauswirkungen ist die Baumartenwahl auf standörtlicher Grundlage. Sie ist die Voraussetzung für den Aufbau stabiler Bestände und kann sich im Prinzip an zwei Dingen orientieren: Der standortsbezogenen Anbaueignung der Baumarten und an der natürlichen Waldgesellschaft, wobei davon ausgegangen wird, dass naturnahe Ökosysteme stabiler sind (Borchert & Kölling 2003).

Zur Orientierung der Baumartenauswahl an der natürlichen Waldgesellschaft muss zunächst eben diese ermittelt werden. Zu diesem Zweck werden die durch den Klimawandel veränderten ökologischen Faktoren bzw. Annahmen darüber für ein Untersuchungsgebiet festgelegt und anschließend die diesen Rahmenbedingungen entsprechenden Pflanzengesellschaften ermittelt, also die voraussichtlich zukünftige potenzielle natürliche Vegetation. Die Methode vernachlässigt jedoch, dass sich die interspezifischen Konkurrenzverhältnisse ändern können, so dass bislang unbekannte Pflanzengesellschaften entstehen können. Zudem geht die Prognose über die zukünftige potenzielle natürliche Vegetation von stabilen klimatischen Verhältnissen aus, sagt also wenig über die Übergangszeit bis dahin aus. Nach den heutigen Erkenntnissen ist aber ein „Ende“ des Klimawandels, nach dem stabile Verhältnisse einkehren, nicht abzusehen (Borchert & Kölling 2003). Ähnlich unsicher ist die Ermittlung der zukünftigen natürlichen Waldgesellschaft über den Einsatz von Waldsukzessionsmodellen.

Inwieweit sich die forstliche Praxis an den natürlichen Waldgesellschaften orientieren sollte, ist eine Gratwanderung zwischen ökonomischen und ökologischen Überlegungen. Die Standortamplitude muss bei den anzubauenden Baumarten so breit sein, dass sie nicht nur zu Beginn, sondern auch an ihrem Lebensende noch standortgemäß sind, also auch bei veränderten Umweltbedingungen (Ulrich & Puhe 1994). Die Fichte gilt als Problembaumart im Hinblick auf die zu erwartende Klimaänderung, wenn die Jahresmitteltemperaturen heute schon über 7 °C und die Niederschläge unter 800 mm liegen. Bedeutsam ist auch ihre Sturmgefährdung, vor allem wenn tatsächlich die Sturmhäufigkeit und -stärke ansteigen sollte (Ulrich & Puhe 1994).

Die Buche ist insofern in besonderem Maße vom Klimawandel betroffen, da sie lange Umtriebszeiten hat und dadurch in erhebliche Klimaveränderungen hineinwächst. In Gegenden mit <600 mm Niederschlag und >8 °C Jahresmitteltemperatur stößt diese atlantische Baumart heute schon an ihre Grenzen. Es gibt Stimmen, die auf trockenen und nährstoffarmen Standorten bereits heute die Förderung der Eiche empfehlen, da die Konkurrenzbedingungen sich in Zukunft zu ihren Gunsten verändern werden. In höheren Lagen dagegen sollte die Buche gefördert werden, da sich ihr Verbreitungsareal durch die Klimaerwärmung in die Höhe verschieben wird (Ulrich & Puhe 1994, BayFORKLIM 1999).

Pionierbaumarten wie Birke, Aspe, Erle, Kiefer, Schwarzkiefer oder Lärche dürften auch in Zukunft kaum Probleme bereiten, da die Standortamplitude dieser Baumarten sowohl die heutigen als auch die voraussichtlich zukünftigen Umweltbedingungen beinhaltet. Auch beim Anbau wärmeliebender Arten wie Eiche, Hainbuche, Winterlinde, Robinie, Roteiche, Esskastanie, Juglans- oder Ahornarten sind in Zukunft keine Probleme zu erwarten (Ulrich & Puhe

1994).

Der Baumartenwechsel sollte dabei am besten schrittweise und über die Steuerung des natürlichen Mischbaumanteils erfolgen, damit an neue Klimaverhältnisse angepasste, risikoarme Bestockungen entstehen. Es sollten lange Verjüngungszeiträume eingeplant werden, damit möglichst viele Individuen fruktifizieren können und so eine hohe genetische Vielfalt entstehen kann. Diese Bestände wären auf jeden Fall standortgemäß und würden eine große Bandbreite an Standortveränderungen vertragen. Anders verhält es sich bei einer Beteiligung von gesellschaftsfremden Arten, wie z. B. Douglasie oder Fichte außerhalb ihres natürlichen Areals. Hier müssen Anbaueignung und Herkunft genau betrachtet werden (Borchert & Kölling 2003).

4. Stabilisierung der Bestände

Eine weitere Stabilisierung der Wälder wappnet die Bestände gegen die verschiedenen, in Zukunft klimabedingt zunehmenden biotischen und abiotischen Gefahren. Eine entscheidende Rolle auch zur physikalischen Stabilisierung der Bestände gegen Extremereignisse, vor allem Stürme, spielt eine an den jeweiligen Standort angepasste Baumartenzusammensetzung (s. o.). Tiefwurzelnde Baumarten zeigen auf vielen Standorten eine höhere Sturmfestigkeit als die flachwurzelnde Fichte (Rothe & Borchert 2003). Standortgerechte Mischbestände ungleichen Alters führen zu stufigen, vertikal strukturierten Beständen und damit zu einem deutlich verringerten Schadensrisiko. Begleitbaumarten sollten erhalten bleiben, da sie nicht nur die Artenvielfalt und damit die Bestandsstabilität erhöhen, sondern vor allem auch in der Jugendphase der Wirtschaftsbaumarten wichtig sind.

Auch die individuelle Stabilität des Einzelbaumes spielt neben der Baumartenzusammensetzung eine wichtige Rolle für die Anfälligkeit gegenüber Schneebruch- und Sturmwurfschäden, aber auch gegenüber Insektenkalamitäten. Durch gezielte Pflege und Durchforstung kann die Wuchsform und damit die Vitalität des Einzelbaumes beeinflusst werden. Erwünscht sind lange Kronen und ausreichende Bewurzelung.

5. Diversität auf allen ökosystemaren Ebenen

Je höher die Diversität auf allen Systemebenen, desto höher ist das Anpassungspotenzial an sich ändernde Umweltbedingungen. Eine standortgerechte Baumartenvielfalt ist mit entsprechendem Unterwuchs und begleitender Fauna die Voraussetzung zu Artenvielfalt. Mischung, Ungleichaltrigkeit und Stufigkeit führen zu Strukturvielfalt. Die Naturverjüngung schließlich garantiert die genetische Vielfalt.

Grundlegende Voraussetzung für die Anpassungsfähigkeit von Populationen an veränderte Umweltbedingungen und damit für ihre Überlebensfähigkeit ist vor allem die innerartliche genetische Variation. Man unterscheidet dabei die genetische Variation innerhalb von Individuen (Allelvariation, Heterozygotiegrad), innerhalb von Populationen (verschiedene Genotypen) sowie zwischen Populationen (unterschiedliche Genotypen, Unterschiede von Genotyp-Häufigkeiten) (Stephan 1997).

Waldbäume weisen im Vergleich zu anderen Pflanzenarten eine ungewöhnlich große genetische Variation auf. Der Anteil heterozygoter Individuen in Waldbeständen beträgt bei Nadel-

baumarten durchschnittlich 25,1% und bei Laubbaumarten 23,4%, während er im Mittel von über 300 dikotyledonen Arten lediglich bei 11,3% liegt (Müller-Starck 1997). Die in Populationen nachweisbare mittlere Anzahl von Genen pro Genort beträgt bei Nadelbäumen 2,2 und bei Laubbäumen 2,7; die entsprechenden Werte bei dikotylen Pflanzen liegen bei 1,4. Waldbestände haben also von Natur aus ein sehr großes Potenzial zur Erzeugung genetischer Vielfalt. Hohe genetische Variation ist eine entscheidende Voraussetzung dafür, dass bei Änderungen der Umweltverhältnisse immer ausreichend viele angepasste Individuen übrig bleiben, so dass der Fortbestand der Population gesichert ist (Müller-Starck 1997).

Die genetische Vielfalt der Baumarten in Deutschland ist allerdings – etwa im Vergleich zu Nordamerika – von Natur aus begrenzt: Unsere Baumarten sind erst seit etwa 10 000 Jahren aus ihren eiszeitlichen Überdauerungsarealen südlich der Alpen zurückgewandert. Angesichts der langen Lebenszyklen unserer Bäume ist dieser Zeitraum gering, um ihren genetischen Polymorphismus am heutigen Standort zu optimieren (Bode 1997). Darüber hinaus wird die eiszeitlich begrenzte genetische Variation durch das Wirken des Menschen weiter beeinträchtigt. Die Gründe dafür liegen in einer Reduktion der Wälder durch landwirtschaftliche Nutzung in den vergangenen Jahrhunderten auf heute etwa 30% der Fläche, in der Begründung umfangreicher Nadelholzbestände auf Laubbaumstandorten, in der einseitigen Förderung von einigen wenigen Hauptbaumarten auf Kosten von selteneren, wirtschaftlich unbedeutenderen Nebenbaumarten, in der Verinselung durch Zerschneidung der Landschaft (was sich durch die Barrierewirkung insbesondere auf die zoochoren Arten wie Buche und Eiche auswirken dürfte) sowie in der Verwendung von nicht standortangepasstem Pflanzenmaterial. In den letzten Jahrzehnten kommen außerdem Bedrohungen durch Schadstoffe hinzu.

Die genetische Variation kann mit Hilfe genetischer Parameter beschrieben werden. Dazu werden einzelne Genorte und ihre Variation mit Genmarkern untersucht und analysiert. Bei Waldbaumarten wird vielfach die Isoenzymanalyse verwendet, die mit verhältnismäßig geringem Aufwand in relativ kurzer Zeit Aussagen über genetische Strukturen von Waldbaumpopulationen zulässt. In Baden-Württemberg wurden mit dieser Methode Buchen- und Eichenbestände untersucht, um die Datengrundlage zur Auswahl von Generhaltungsbeständen zu schaffen (Franke & Löchelt 1995). Mehrere Buchenbestände, die sich durch einen hohen Anteil seltener Allele, einen hohen Heterozygotiegrad oder durchweg hohe Werte zur genetischen Vielfalt und Diversität auszeichnen, wurden als potenzielle Generhaltungsbestände vorgeschlagen. Auch die Stieleichen-Vorkommen in Baden-Württemberg weisen eine große Heterogenität auf.

Innerhalb der Waldbaumpopulationen in Baden-Württemberg bestehen teilweise erhebliche genetische Unterschiede, die in der Praxis bei der Verwendung von forstlichem Saat- und Pflanzgut sowie auch im Rahmen der Generhaltung zu beachten sind (Franke & Löchelt 1995). Letzteres ist aufgrund der langen Lebensdauer von Bäumen von besonderer Bedeutung. Deshalb sind Schutzmaßnahmen vonnöten, welche die genetische Variation über viele Baumgenerationen hinweg sichern und Verlust an genetischen Informationen vermeiden sollen.

Zu diesem Zweck wurde 1985 eine Bund-Länder-Arbeitsgruppe „Erhaltung forstlicher Genressourcen in der Bundesrepublik Deutschland“ gegründet, auf die die folgenden Maßnahmenkonzepte zur Generhaltung zurückzuführen sind (Stephan 1997, Rothe & Borchert 2003):

1. In-situ-Erhaltung: – Erhaltung von Beständen
 – Naturverjüngung
 – Saat und Pflanzung in situ

Durch natürliche Verjüngung wird die genetische Information im Erbgut des Elternbestandes vollständig an die nachfolgende Generation weitergegeben. Durch lange Verjüngungszeiträume können viele Individuen des Altbestandes fruktifizieren und damit ihre genetische Information weitergeben. Kleinflächige Verjüngungsverfahren sind vorteilhaft, weil die damit verbundene Förderung der natürlichen Heterogenität der Umweltbedingungen (Mosaikstrukturen) wirksam zur Erhaltung der genetischen Variabilität beiträgt. Hilfreich ist die Ausweitung von Generhaltungsbeständen mit natürlicher Verjüngung und entsprechender waldbaulicher Behandlung.

2. Ex-situ-Erhaltung unter Feldbedingungen: – Saat und Pflanzung ex situ
 – Sämlings-Samenplantagen
 – Klon-Samenplantagen
 – Klonsammlungen

Wenn der vorhandene Altbestand nicht der angestrebten Baumartenzusammensetzung entspricht, können zur Beschleunigung des Umbaus Mischbaumarten durch Pflanzung oder Saat eingebracht werden. Um eine hohe genetische Qualität des Pflanzgutes zu gewährleisten, darf nur Saatgut aus zugelassenen Erhaltungsbeständen verwendet werden. Diese müssen sich unter den jeweiligen klimatischen Verhältnissen bewährt haben, vital sein und eine gute Qualität aufweisen. Bei selten vorkommenden Arten oder Herkünften ist die In-situ-Erhaltung oft mit Schwierigkeiten verbunden. Deshalb werden Erhaltungs-Samenplantagen angelegt, die z. B. eine Bestäubung unter kontrollierten Bedingungen ermöglichen und somit zum Erhalt der genetischen Vielfalt der Populationen beitragen. Hierfür ist die Sammlung von Klonen sowie die vegetative Vermehrung durch Stecklinge oder Pfropflinge erforderlich. Der Herkunftsnachweis des forstlichen Vermehrungsgutes kann heutzutage über biochemisch-genetische Methoden eindeutig erfolgen.

3. Ex-situ-Erhaltung unter kontrollierten Bedingungen:

- Lagerung von Saatgut, Pollen und Pflanzenteilen
- Erhaltung durch kontinuierliche vegetative Vermehrung

Diese Sondermaßnahmen zum Erhalt der genetischen Vielfalt sind zur Überbrückung ungünstiger Umweltbedingungen notwendig. Saatgut von Arten, deren genetische Variabilität sich aufgrund von Umwelteinflüssen einengen könnte, kann in Genbanken eingelagert werden. Bei schwerfrüchtigen Baumarten wie Buche und Eiche ist jedoch eine Lagerung des Saatgutes problematisch. Lagerung oder auch die Erhaltung über eine Vermehrung mittels Gewebekulturen sind sehr kostenintensiv, stellen jedoch oft die einzige Möglichkeit zur Rettung bedrohter Einzelbäume oder Populationen dar.

6. Bodenschutz und Erhalt der Bodenfruchtbarkeit

Der Erhalt der Bodenfruchtbarkeit ist Voraussetzung für stabile und vitale Bestände. Ein wichtiger Weg dorthin ist der im Rahmen der naturnahen Waldbewirtschaftung angestrebte Umbau nadelholzdominierter Waldbestände in standortgerechte Mischbestände mit hohem

Laubbaumanteil. Der Waldumbau führt langfristig auch zur Bildung von Humusformen mit biogener Einarbeitung von Streurückständen durch Bodentiere und Humusanreicherung im Mineralboden. Sind die Waldböden durch Stoffeinträge bereits stark versauert und an Nährstoffen verarmt, so können Kalkungen sinnvoll sein, um langfristig die Schutz-, Puffer- und Ernährungsfunktion der Waldböden zu sichern.

Bodenschonende Holzernteverfahren gewinnen im Klimawandel an Bedeutung, wenn die Winter feuchter werden und die Anzahl der Frosttage abnimmt. Die Befahrbarkeit der Rückegassen kann nicht mehr gegeben sein und die Gefahr von Bodenverdichtungen steigt.

7. Anpassung der Durchforstungs- und Erntemethoden

Falls im Zuge des Klimawandels höhere Zuwachsraten realisiert werden, erfordert dies eine stärkere Durchforstung. Der Zeitpunkt muss der veränderten Wachstumsdynamik angepasst werden. Dies ist vor allem in Mischbeständen von Bedeutung, wo veränderte Klimaverhältnisse den Zuwachs bei den verschiedenen Arten unterschiedlich beeinflussen (Spiecker et al. 2000).

Rotationszeiten und Ernteverfahren müssen flexibel gehandhabt werden, um z. B. auf Insektenkalamitäten oder Dürreschäden zu reagieren. Rotationszeiten könnten bei erhöhten Wachstumsraten vermutlich verkürzt werden.

Durch Trockenheit muss u.U. eine niedrigere Bestandesdichte angestrebt werden. Eine Verringerung der Pflanzenzahlen bei der Bestandsbegründung bzw. stärkere Durchforstungseingriffe in jungen Beständen führen dann zu einer gesteigerten Bestandesstabilität.

Bezüglich der Erntemethoden ist zu bedenken, dass bisher Rückeschäden und Bodenverdichtung oftmals dadurch vermieden wurden, dass im Winter an Frosttagen befahren wurde. Die Befahrbarkeit könnte bei höheren Wintertemperaturen mit weniger Frosttagen zu einem Problem werden. Unter Umständen ist eine Verlagerung der Holzernte in die Sommermonate notwendig oder es müssen andere und teurere Methoden der Holzernte und -bringung eingesetzt werden. Auch Extremereignisse wie Sturmschäden, Starkniederschläge oder Hitzeperioden können die Waldarbeit in Zukunft stark beeinträchtigen. Dies kann sich beispielsweise auf die Arbeitssicherheit, die Arbeitskapazitätsplanung, die Holzqualität und den Holzmarkt auswirken (Arbeitskreis Wald und Klima 2003).

8. Schaffung angepasster Schalenwildpopulationen

Eine wichtige Voraussetzung für eine natürliche Verjüngung sind angepasste Schalenwildbestände, damit keine Beeinträchtigung durch überstarken Wildverbiss erfolgt. Eine zu hohe Wilddichte fördert darüber hinaus die Ausbreitung von Kahlschlagpflanzen und kann Kräuter vernichten, die für parasitierende oder räuberische Insekten notwendig sind.

9.2 Diskussion waldbaulicher Konzepte im Arbeitskreis Wald und Klima 2003

Im Rahmen des Arbeitskreises Wald und Klima 2003 wurden folgende Handlungskonzepte näher erörtert:

- Keine Änderungen der waldbaulichen Strategie

Eine Zustandsbewahrung, also „Weitermachen wie bisher“ ohne Antizipation etwaiger künftiger Verhältnisse scheidet aus, da die sich innerhalb der nächsten Waldgeneration ergebenden Umweltveränderungen zu bedeutend sind. Sie werden zu großflächig veränderten Konkurrenzverhältnissen führen, sogar bis hin zum standörtlichen Ausfall von Baumarten. Zukünftig dürfte die nachhaltige, langfristige Standortsgerechtigkeit wie auch die Einzelbaum- und Bestandesstabilität besonders im Hinblick auf Witterungsextreme noch weiter an Bedeutung gewinnen.

- Einbringung bisher gebietsfremder Wildpflanzen

Die Einbringung gebietsfremder Wildpflanzen bedeutet eine radikale Neubegründung oder Ergänzung von Beständen mit mediterranen bzw. exotischen Baumarten bzw. Herkünften. Dies ist nach geltender Rechtslage (z. B. Forstvermehrungsgutgesetz) nicht möglich. Teilweise existieren jedoch schon Erfahrungen im hiesigen Raum durch Versuchsanbauten, Arboreten und Herkunftsversuche. Die besonderen Risiken liegen, neben dem zumindest teilflächigen Verlust autochthoner Bestände und damit der Lebensstätten für heimische Flora und Fauna, in einer letztlich unsicheren Praxisbewährung, dem Fehlen waldbaulicher Erfahrungen, der Übertragungsgefahr von Pathogenen und einer beschränkten genetischen Variabilität.

- Einbringung gentechnisch veränderter Pflanzen

Der Einsatz züchterisch bzw. gentechnisch veränderten Pflanzgutes bedeutet angesichts unsicherer lokaler Klimaprognosen und der Langlebigkeit von Bäumen prinzipiell ein Risiko. Die erhebliche Verengung der genetischen Basis der Population, im Extrem auf wenige Klone, schafft eine heikle Anfälligkeit und ermöglicht eine nur geringe Plastizität. Dieser Weg wird durch Großkonzerne v. a. auf dem amerikanischen Kontinent bereits in großem Stil mit Plantagensystemen beschritten.

- Umbau im Rahmen der naturnahen Waldwirtschaft

Ein allmählicher Umbau der Baumartenzusammensetzung im Rahmen der „naturnahen Waldwirtschaft“ durch gezielte Förderung von besonders vitalen und konkurrenzkräftigen heimischen Baumarten im Wege der Bestandespflege erscheint als die erfolversprechendste Vorgehensweise. Die Naturverjüngung autochthoner, standortsangepasster Herkünfte mit besonderem Augenmerk auf Stabilität des Bestandes durch Mischung, Ungleichaltrigkeit und Stufigkeit sowie standörtliche Baumartenvielfalt, gewährleistet am zuverlässigsten die Ausnutzung der biologischen Automation.

Prinzipiell müssen alle Maßnahmen der Waldbewirtschaftung darauf ausgerichtet sein, sich möglichst viele waldbauliche Optionen zu bewahren. Erstens sind regionale oder gar lokalstandörtliche Aussagen über die eintretenden Effekte des Klimawandels unsicher, zweitens ist unser Wissen über Wechselwirkungen von Klimata und Ökosystemen unzureichend, und drittens verfügt die Natur über weitaus genauere und wirksamere Rückkopplungs- und Anpassungsmechanismen an Umweltveränderungen als sie planbar und künstlich leistbar erscheinen. Auch vor dem Hintergrund des Klimawandels spricht damit alles für die „naturnahe Waldwirtschaft“ (Arbeitskreis Wald und Klima 2003).

10 Literaturverzeichnis Teil II

- BayFORKLIM (1999): Klimaänderungen in Bayern und ihre Auswirkungen. - Abschlussbericht des Bayerischen Klimaforschungsverbundes, 27 S
- Bode W (1997): Ist der Altersklassenwald biologisch nachhaltig? In: Bode W (Hrsg.): Naturnahe Waldwirtschaft; S. 49-75. Deukalion, Holm
- Borchert H, Kölling C (2003): Welche waldbaulichen Konsequenzen werden derzeit diskutiert? – LWFaktuell 37, 23-29
- Chmielewski F-M (2001): Markante Veränderungen in der Vegetationsentwicklung seit dem Ende der achtziger Jahre. - Mitteilungen der DMG, Heft 1/2001, http://www.met.fu-berlin.de/dmg/dmg_home/mitteilungen1_2001.html#titel
- Ebert H-P (2002): Schäden durch „Lothar“ im Lehrrevier Rottenburg. - AFZ-Der Wald 24/2002, 1261-1262
- Ellenberg H (1996): Vegetation Mitteleuropas mit den Alpen. - 5. Aufl., UTB, 1096 S
- Feemers M, Blaschke M, Skatulla U, Gulder H-J (2003): Klimaveränderungen und biotische Schäden im Wald. – LWFaktuell 37, 19-22
- Flaig H, Mohr H (1996): Der überlastete Stickstoffkreislauf – Strategien einer Korrektur. Nova Acta Leopoldina N.F., Nr. 289, Bd. 70. JA Barth Verlag, Leipzig
- Forstdirektion Freiburg (2003): Borkenkäfer-Info. - Landesforstverwaltung, Ausgabe 1/2003, 21.8.2003, http://www.fva-fr.de/publikationen/waldschutz/borkenkaeferinfo03_01.pdf
- Franke A, Löchelt S (1995): Genetische Untersuchungen an Waldbäumen als Grundlage zur Ausweisung großräumiger forstlicher Generhaltungszonen in Baden-Württemberg. - Ministerium für Ernährung und Ländlichen Raum, Agrarforschung Baden-Württemberg, http://www.landwirtschaft-mlr.baden-wuerttemberg.de/mlr/Forschung/97_06/55_93_05.HTM
- FVA (2002): Waldzustandsbericht 2002 der Forstlichen Versuchs- und Forschungsanstalt Baden-Württemberg. - Freiburg, 29 S
- Heinrich Ch (1997): Dauerwald – Das NABU-Konzept einer naturnahen Waldwirtschaft. In: Bode W (Hrsg.): Naturnahe Waldwirtschaft; S. 129-157. Deukalion, Holm
- Hirschberg M-M, Kennel M, Menzel A, Raspe S (2003): Klimaänderungen unter forstlichem Aspekt. – LWFaktuell 37, 8-13
- Jarvis PG (Hrsg.) (1998): European Forests and Global Change. - Cambridge Univ. Press, Cambridge, 380 S.
- Kändler G (1997): Klima und Wald - Der drohende Klimawandel: Folgen für Wald- und Forstwirtschaft. - Forschungszentrum Karlsruhe
- Kleinschmit J (1999): Ist Naturverjüngung immer die beste Lösung für den naturnahen Waldbau? - Mitteilungen Bundesforschungsanstalt für Forst- und Holzwirtschaft, Nr. 194, 199-214
- Liski J, Ilvesniemi H, Mäkelä A, Westman CJ (1999): CO₂ emissions from soil in response to climatic warming are overestimated – the decomposition of old soil organic matter is tolerant of temperature. *Ambio* 28, 171-174
- McCarthy JJ, Canziani OF, Leary NA, Dokken DJ, White KS (eds., 2001): Climate Change 2001: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. - IPCC Third Assessment Report, Cambridge Univ. Press, Cambridge, pp 1032

- Menzel A (2003): Anzeichen des Klimawandels in der Pflanzen- und Tierwelt. – LWFaktuell 37, 14-18
- Müller-Starck G (1997): Genetische Kriterien für die Erhaltung forstlicher Genressourcen. NNA-Berichte 10/2, 21-25
- Murray DR (1997): Carbon Dioxide and Plant Responses. Research Studies Press Ltd., Taunton (GB) / John Wiley & Sons Ltd., Chichester (GB)
- Puhe J, Ulrich B (Hrsg.) (2001): Global Climate Change and Human Impacts on Forest Ecosystems. - Ecological Studies 143, Springer, Berlin / Heidelberg / New York, 592 S.
- Rothe A, Borchert H (2003): Der Wald für morgen. - LWF Bericht 39
- Schraml C, Rennenberg H (2002): The different reactions of beech tree (*Fagus sylvatica* L.) ecotypes to drought stress. Forstwissenschaftliches Centralblatt, 121, 59-72
- Schröter H, Delb H, Gehrke A, Metzler B (2003): Waldschutzsituation 2002/2003 in Baden-Württemberg.- http://www.fva-fr.de/publikationen/waldschutz/waldschutzsituation_2002_03.pdf
- Schuck A, Bystrakova N (2000): Forstwissenschaftliche Forschung in Europa. - AFZ-Der Wald 11, 573-574
- SDW = Schutzgemeinschaft Deutscher Wald (2003): Borkenkäfer & Co im Vormarsch. - Presseinformationen Nr. 21 - 03 vom 26.08.2003
- Spiecker H (1999): Overview of recent growth trends in European forests. - Water Air Soil Pollut. 116, 33-46
- Spiecker H, Lindber M, Kahle H-P (2000): Germany. - In: Kellomäki S, Karjalainen T, Mohren F, Lapveteläinen T (eds.): Expert Assessments on the Likely Impacts of Climate Change on Forests and Forestry in Europe. - EFI Proceedings 34, 65-71
- Stephan BR (1997): Sicherung der intraspezifischen Variation bei forstlichen Genressourcen. - Schriftenreihe des BML „Angewandte Wissenschaft“, Heft 465 „Biologische Vielfalt in Ökosystemen“, 281-291
- Ulrich B, Puhe J (1994): Auswirkungen der zukünftigen Klimaveränderung auf mitteleuropäische Waldökosysteme und deren Rückkopplungen auf den Treibhauseffekt. In: Enquete-Kommission „Schutz der Erdatmosphäre“ des deutschen Bundestages (Hrsg.): Studienprogramm Bd. 2: Wälder, Studie B (208 S.). Bonn, Economica Verlag
- VWF = Verband Weihenstephaner Forstingenieure (Hrsg.) (1994): Waldökosysteme im globalen Klimawandel. - Economica Verlag, Bonn, 115 S

Anhang I

Tabelle 1: Übersicht über Forschungsvorhaben zum Themenbereich „Wald und Klima“

Beteiligte Institutionen	Forschungsprogramm	Projektname	leitende Forscher	Laufzeit	regionaler Bezug
Potsdam Institut für Klimafolgenforschung (PIK)	SAFE - Sensitivity and Adaptation of Forests in Europe under Global Change		Cramer, Lindner u.a.	2001-2003	Europa / national / regional: Brandenburg
PIK (M. Lindner) LMU München (H. Pretzsch, P. Bartelheimer, M. Suda, E. Gundermann,) Bayerische LWF (G. Ohrner) Niedersächsische FVA (H. Spellmann) Forstliche Forschungsanstalt Eberswalde (Lockow) BFH Hamburg (Muhs)	CHIEF - Global CHange Impacts on European Forests (Vorläufer von SAFE)	BMBF-Projekt Wälder und Forstwirtschaft Deutschlands im Globalen Wandel: Strategie für eine integrierte Wirkungsanalyse und -bewertung	(siehe 1. Spalte)	1989 -1998	Deutschland

PIK	EVA - Environmental Vulnerability Assessment	ATEAM - Advanced Terrestrial Ecosystem Analysis and Modelling, Sector: Forestry	Sabaté (Spanien), Karjalainen (Finnland), Mohren (Niederlande)	2001-2003	Europa
PIK		SilviStrat - Silvicultural Response Strategies To Climatic Change In Management Of European Forests	Kellomäki, Deutschland: Lasch	12/2000-11/2003	Europa
PIK		Brandenburgstudie 2003 Studie zur klimatischen Entwicklung im Land Brandenburg bis 2055 und deren Auswirkungen auf den Wasserhaushalt, die Forst- und Landwirtschaft sowie die Ableitung erster Perspektiven			
bayerische Universitäten, Großforschungsinstitute und Fachbehörden		BayFORKLIM - Klimaänderungen in Bayern und ihre Auswirkungen auf Mikroorganismen, Pflanzen, Tiere und den Menschen Bereich Wirkungen auf Wälder	Rehfuess, Univ. München	1990-1998	Bayern
Uni Freiburg, Inst. für Waldwachstum		Zusammenhänge zwischen der Variation von Klima und Witterung und inter- und intraannuellen Wachstumsreaktionen von Fichten, Tannen, Buchen und Eichen auf ausgewählten Standorten des Schwarzwalds	Spiecker, Kahle, Park	01.01.1994 - 31.07.1996	Schwarzwald

Uni Freiburg	SFB 433: Buchendominierte Laubwälder unter dem Einfluss von Klima und Bewirtschaftung - Ökologische, waldbauliche und sozialwissenschaftliche Analysen (DFG-finanziert)		Rennenberg	01.01.1999 - 31.12.2000	
Uni Freiburg	(Finanzierung: Land Baden-Württemberg)	Regio-Klima-Projekt (REKLIP)	Goßmann	01.01.1989-31.12.1998	
Uni Freiburg	EU Spruce Growth	Auswirkungen von Klima und Witterung auf das Baumwachstum	Spiecker	01.06.1997 - 14.05.2001	
Deutschland: Uni München, Uni Freiburg	European Forest Institute EFI: Relationships Between Recent Changes of Growth and Nutrition of Norway Spruce, Scots Pine and European Beech Forests in Europe - RECOGNITION		Karjalainen (Koordinator), Deutschland: Rehfuess u.a. (München), Spiecker u.a. (Freiburg)		
	BMBF - Förderprogramm "Forschung für die Umwelt", Zukunftsorientierte Waldwirtschaft	BMBF- Projektverbund Südlicher Schwarzwald (nicht explizit zum Klima, sondern ökologischer Waldumbau)	v. Gilsa, Ministerium ländlicher Raum Baden-Württemberg		Südlicher Schwarzwald
BITÖK Bayreuther Institut für Terrestrische Ökosystemforschung (u. a.)	LTEEF-II: Der Einfluss von Klimaänderungen auf Waldökosysteme (Modellierung und Szenarien)		Hauhs	01/1998 bis 06/2000	

Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft (BUWAL) Eidg. Forstdirektion, Bern, Schweiz		TREWALP: Klimaszenarien für den Wald	Volz	01.08.2001- 31.12.2003	Schweiz
Deutschland: BITÖK; TU Dresden, Inst. für Hydrologie und Meteorologie		EUROFLUX - Long term carbon dioxide and water vapour fluxes of European forests and interactions with the climate system	Deutschland: Tenhunen, Schulze (BITÖK); Berhofer (Dresden)	1.2.1996- 31.1.1999	Europa
Deutschland: TU-Berlin u.a.		ECOCRAFT - European collaboration on CO2 responses applied to forests and trees	Jarvis (Initiator), Deutschland: Overdieck	1996-1999	Europa

Anhang II

Tabelle 2: Änderungen im atmosphärischen, klimatischen und biophysikalischen System der Erde im 20. Jahrhundert [IPCC01c].¹

Indikator	Beobachtete Veränderungen
Konzentrations-Indikatoren	
Atmosphärische CO ₂ -Konzentration:	von 280 ppm 1000-1750 auf 368 ppm im Jahr 2000 (Anstieg um 31±4%)
Terrestrischer CO ₂ -Austausch der Biosphäre	Kumulative Quelle von ca. 30 GtC zwischen 1800 und 2000; allerdings eine Netto-Senke von ca. 14±7 GtC in den 1990er Jahren
Atmosphärische CH ₄ -Konzentration	von 700 ppb 1000-1750 auf 1750 ppb im Jahr 2000 (Anstieg um 151±25%)
Atmosphärische N ₂ O-Konzentration	von 270 ppb 1000-1750 auf 316 ppb im Jahr 2000 (Anstieg um 17±5%)
Troposphärische O ₃ -Konzentration	Anstieg um 357±15% von 1750 bis 2000, unterschiedlich je nach Region
Stratosphärische O ₃ -Konzentration	Abnahme von 1970 bis 2000, unterschiedlich je nach Höhe und Breitengrad
Atmosphärische Konzentration von HFC, PFC und SF ₆	globaler Anstieg in den letzten 50 Jahren
Wetter-Indikatoren	
Mittlere globale Erdoberflächentemperatur	Anstieg um 0.6±0.2° im 20. Jahrhundert; Landmassen haben sich stärker erwärmt als die Ozeane (sehr wahrscheinlich)

¹ Diese Tabelle zeigt Beispiele von beobachteten Schlüsseländerungen und ist keine vollständige Liste. Sie beinhaltet sowohl Änderungen, die der vom Menschen verursachten Klimaänderung zugeschrieben werden, als auch solche, die durch natürliche Schwankungen oder die menschverursachte Klimaveränderung verursacht sein können. Vertrauensniveaus sind dort erwähnt, wo sie explizit von der zuständigen Arbeitsgruppe beurteilt worden sind. Wahrscheinlich: Aussagesicherheit > 66 %, sehr wahrscheinlich: Aussagesicherheit > 90 %.

Erdoberflächentemperatur der Nordspähre	größerer Anstieg im 20. Jahrhundert als in irgendeinem anderen Jahrhundert in den letzten 1.000 Jahren; 1990er Jahre wärmstes Jahrzehnt des Jahrtausends (wahrscheinlich)
Täglicher Temperaturschwankungsbereich	Abnahme von 1950 bis 2000 über dem Land; nächtliche Minimal-Temperaturen nahmen doppelt so schnell zu wie die täglichen Maximal-Temperaturen (wahrscheinlich)
Hitzetage / Hitzeindex	Zunahme (wahrscheinlich)
Kalt- / Frosttage	Abnahme für fast alle Landregionen im 20. Jahrhundert (sehr wahrscheinlich)
Kontinentale Niederschläge	Anstieg um 5-10 % im 20. Jahrhundert auf der Nordhemisphäre (sehr wahrscheinlich), trotz einer Abnahme in einigen Regionen (z.B. Nord- und Westafrika und Teile des Mittelmeerraumes)
Starkniederschläge	Zunahme in mittleren und höheren Breiten (wahrscheinlich)
Häufigkeit und Intensität von Dürren	Zunahme der Sommertrockenheit und den damit verbundenen Dürren in ein paar Gebieten (wahrscheinlich). In einigen Regionen, wie Teilen von Asien und Afrika wurde in den letzten Jahrzehnten eine wachsende Häufigkeit und Intensität von Dürren beobachtet.

Biologische und physikalische Indikatoren

Mittlerer globaler Meeresspiegel	Anstieg mit einer durchschnittlichen Rate von 1 bis 2 mm pro Jahr im 20. Jahrhundert
Dauer der Eisbedeckung von Flüssen und Seen	Abnahme um ca. 2 Wochen im 20. Jahrhundert in mittleren und höheren Breiten der Nordhemisphäre (sehr wahrscheinlich)
Ausdehnung und Dicke des arktischen Meereises	Ausdünnung um 40 % in den letzten Jahrzehnten im Spätsommer und Frühherbst (wahrscheinlich) und Abnahme der Ausdehnung um 10-15 % im Frühjahr und Sommer seit den 1950er Jahren
Nicht-polare Gletscher	Weitverbreiteter Rückzug im 20. Jahrhundert
Schneebedeckung	Abnahme der Fläche um 10 % seit Beginn der globalen Satellitenbeobachtungen in den 1960er Jahren (sehr wahrscheinlich)
Permafrost	Schmelzen, Erwärmung und Abbau in Teilen der polaren, subpolaren und Gebirgsregionen

El-Niño-Ereignisse	Sind in den letzten 20 bis 30 Jahren häufiger, anhaltender und intensiver geworden als in den vorangegangenen 100 Jahren
Wachstumsperiode	Verlängerung um etwa 1 bis 4 Tage pro Jahrzehnt in den letzten 40 Jahren auf der Nordhemisphäre, vor allem in höheren Breiten
Verbreitung von Pflanzen und Tieren	Hat sich für Pflanzen, Insekten, Vögel und Fische polwärts und in die Höhe verschoben
Brutzeit, Blütezeit und Wanderung	Frühere Blütezeit von Pflanzen, frühere Ankunft von Vögeln, frühere Daten der Brutzeit, früheres Auftauchen von Insekten in der Nordhemisphäre
Korallenausbleichung	Größere Häufigkeit, insbesondere während El Niño-Ereignissen

Ökonomische Indikatoren

Wetterbezogene ökonomische Verluste	Globale inflationsbereinigte Verluste sind in den letzten 40 Jahren um eine Größenordnung gestiegen. Ein Teil des beobachteten Aufwärtstrends ist mit sozioökonomischen Faktoren verbunden und ein Teil mit klimatischen Faktoren.
-------------------------------------	--

Anhang III

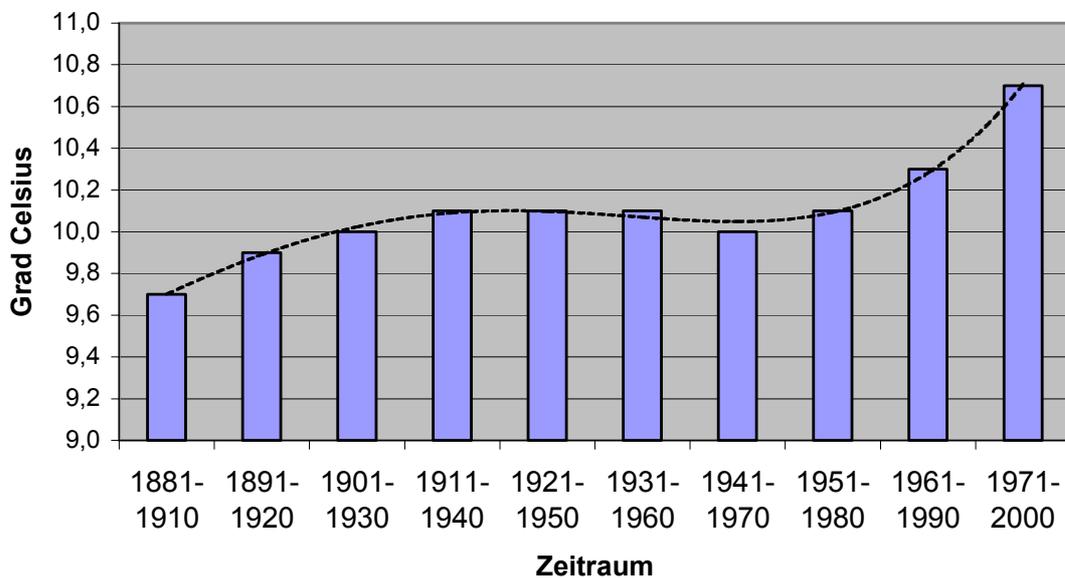


Abbildung 8: Jahresmitteltemperatur an der Wetterstation Karlsruhe – 30jähriges Mittel (Quelle: DWD, Aufbereitung: LfU)

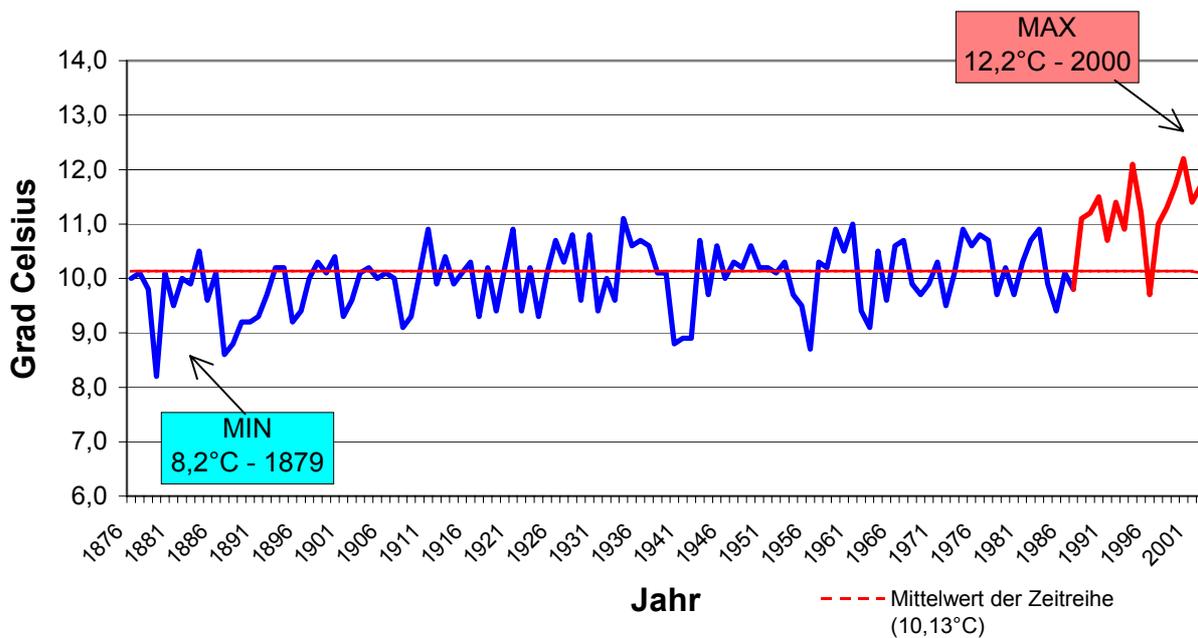
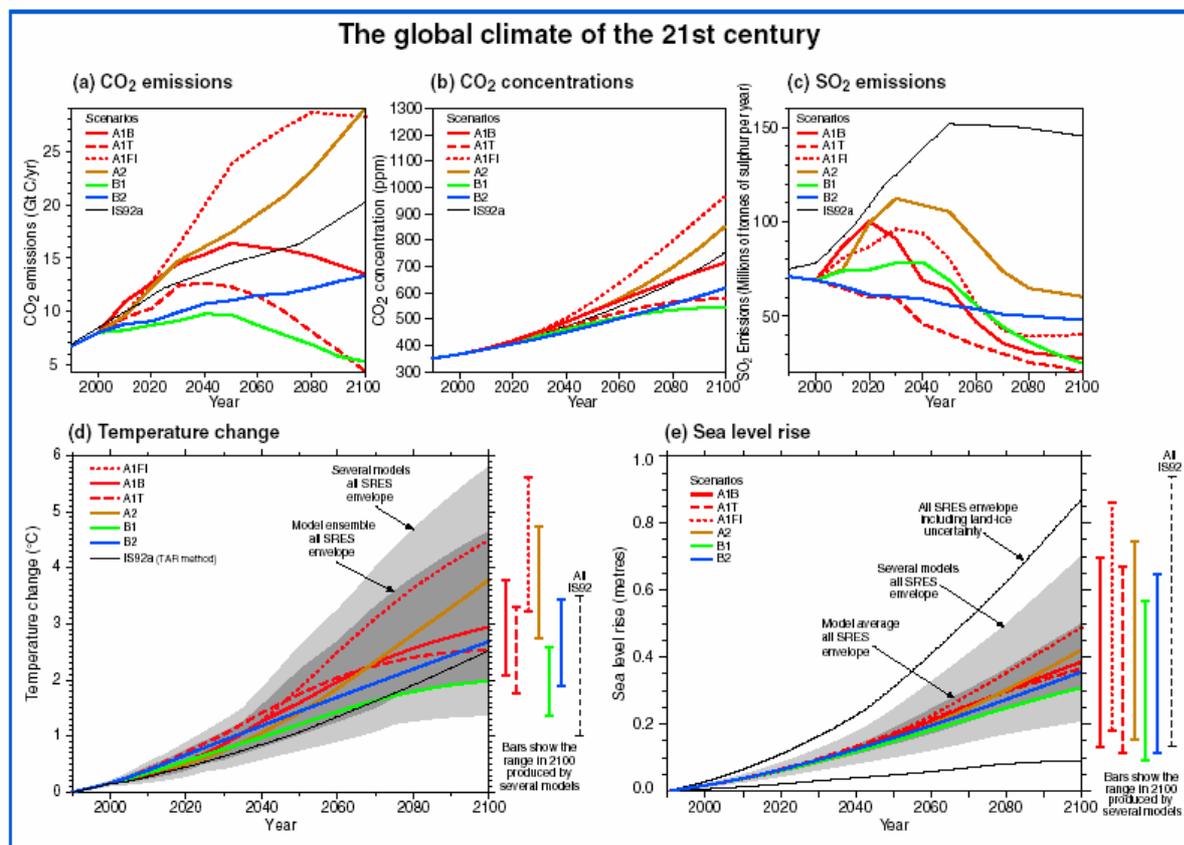


Abbildung 9: Jahresmitteltemperaturen von 1876-2002 mit langjährigem Mittel an der Wetterstation Karlsruhe (Quelle: DWD, Aufbereitung: LfU)



Anhang IV

Abbildung 10: Emissionsszenarien (a), Anstieg der atmosphärischen CO₂-Konzentrationen (b) und die aus diversen Modellrechnungen folgende Klimareaktion in Form der globalen Durchschnittstemperatur (d) und des Meeresspiegelanstiegs (e). Grafik aus [IPCC01a].