Das Lebensministerium

Klimawandel in Sachsen

Sachstand und Ausblick

2005

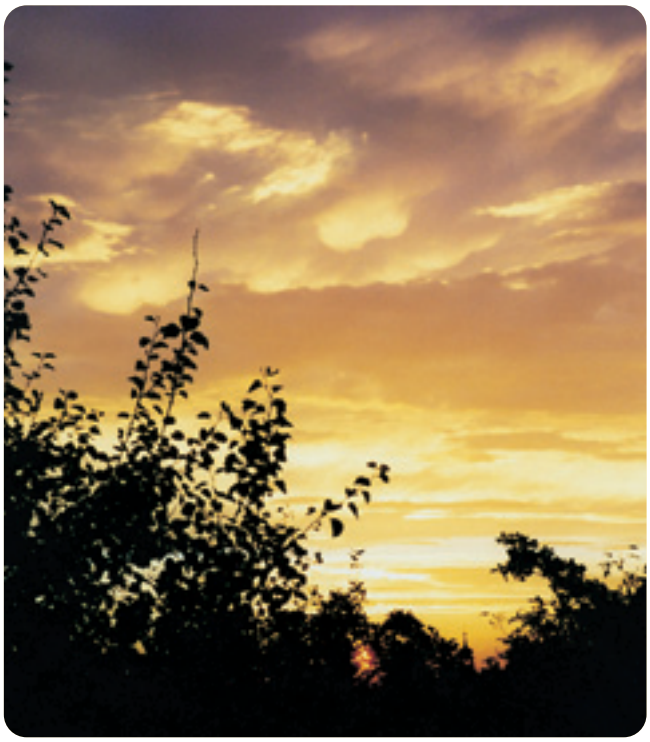
Freistaat Sachsen

Geschäftsbereich des Staatsministeriums für Umwelt und Landwirtschaft

Impressum

Klimawandel in Sachsen

Sachstand und Ausblick
2005



Titelbild:
Wilfried Küchler

Herausgeber:
Geschäftsbereich des Sächsischen Staatsministeriums
für Umwelt und Landwirtschaft
Sächsisches Landesamt für Umwelt und Geologie
Sächsische Landesanstalt für Landwirtschaft
Landesforstpräsidium
Landestalsperrenverwaltung des Freistaates Sachsen

Redaktion:
Wilfried Küchler
Sächsisches Landesamt für Umwelt und Geologie
Werner Sommer
Sächsisches Staatsministerium für Umwelt und Landwirtschaft

Redaktionsschluss:
Februar 2005

Gestaltung, Satz und Repro:
c-macs publishingservice
Tannenstraße 2, 01099 Dresden

Druck und Versand:
saxoprint GmbH
Enderstraße 94, 01277 Dresden
Fax 0351 2044366 (Versand)
E-Mail: versand@saxoprint.de

Auflage: 2.500

Bezugsbedingungen:
Diese Veröffentlichung kann kostenfrei von der saxoprint GmbH bezogen werden.

Hinweis:
Diese Veröffentlichung wird im Rahmen der Öffentlichkeitsarbeit des Geschäftsbereichs des Sächsischen Staatsministeriums für Umwelt und Landwirtschaft herausgegeben. Sie darf weder von Parteien noch von Wahlhelfern im Wahlkampf zum Zwecke der Wahlwerbung verwendet werden. Auch ohne zeitlichen Bezug zu einer bevorstehenden Wahl darf die Druckschrift nicht in einer Weise verwendet werden, die als Parteinahme des Geschäftsbereichs des Sächsischen Staatsministeriums für Umwelt und Landwirtschaft zugunsten einzelner Gruppen verstanden werden kann. Den Parteien ist es gestattet, die Druckschrift zur Unterrichtung ihrer Mitglieder zu verwenden.

Copyright:
Diese Veröffentlichung ist urheberrechtlich geschützt. Alle Rechte, auch die des Nachdrucks von Auszügen und der fotomechanischen Wiedergabe, sind dem Herausgeber vorbehalten.

Gedruckt auf 100 % Recyclingpapier

März 2005

Artikelnummer: L IV - 9/1

Der Geschäftsbereich des Sächsischen Staatsministeriums für Umwelt und Landwirtschaft im Internet: www.smul.sachsen.de

Vorwort

Jahrhundertflut 2002, Jahrhundertsommer und Jahrhundertdürre 2003 in Sachsen. Belegen derartige Extremereignisse oder auch der milde Januar 2005 den globalen Klimawandel?

So lautet eine der am meisten gestellten Fragen in letzter Zeit. Wissenschaftliche Auswertungen der umfangreichen sächsischen Klimadaten belegen: Auch in Sachsen haben sich in den vergangenen Jahrzehnten wichtige Klimaparameter bereits signifikant verändert. Wir befinden uns bereits mitten im Prozess einer Klimaänderung.

Wenn sich das Klima ändert, hat das Auswirkungen auf unsere Wälder oder die Trinkwasserversorgung? Blühen unsere Obstbäume früher oder können neue Schaderreger in der Land- und Forstwirtschaft auftreten?

Wir stehen vor vielen Fragen und versuchen in der vorliegenden Broschüre erste Antworten zu geben. Dabei wollen wir so objektiv wie möglich über die jüngsten Ergebnisse sächsischer Untersuchungen des aktuellen und künftigen regionalen Klimawandels sowie die resultierenden Folgen informieren. Wir stehen vor der großen Herausforderung: Wie können wir auf den projizierten regionalen Klimawandel reagieren?

Zentrale Themen bestimmen den Inhalt der Publikation: Die mittel- und langfristige Veränderung des Klimas in den verschiedenen Regionen Sachsens. Die Entwicklung von Wetterextremen. Konkrete Auswirkungen auf die Landwirtschaft, die Forstwirtschaft, die Wasserwirtschaft oder den Biotop- und Artenschutz.

Nunmehr vorliegende Szenarien zu den Klimafolgen bilden die Grundlage, um wirksame Anpassungsstrategien zu entwickeln, die die Auswirkungen des Klimawandels in Sachsen mindern können. Gemeinsam widmen sich das Landesamt für Umwelt und Geologie (LfUG), die Landesanstalt für Landwirtschaft (LfL), das Landesforstpräsidium (LFP) und die Landestalsperrenverwaltung (LTV) mit ihrer jeweils spezifischen Fachkompetenz dieser komplexen Aufgabenstellung.

Die Entwicklung geeigneter Anpassungsmaßnahmen steht auch weltweit erst am Anfang. Gerade deshalb ist das konsequente und zielgerichtete Handeln des Freistaates Sachsen auf den Gebieten Klimawandel und Klimafolgen neben dem Klimaschutz unabdingbarer Bestandteil seines Integrierten Klimaschutzkonzeptes.

Hartmut Biele, Präsident LfUG

Dr. Hartmut Schwarze, Präsident LfL

Dr. Bartel Klein, Präsident LFP

Hans-Jürgen Glasebach, Geschäftsführer LTV

Inhaltsverzeichnis

Vorwort		**1**
1	**Klimawandel, Klimafolgen, Klimaschutz – Die sächsische Umweltpolitik vor neuen Herausforderungen**	**5**
2	**Der globale Klimawandel**	**7**
2.1	Klimageschichte	7
2.2	Klimaentwicklung im 20. Jahrhundert	9
2.3	Ursachen globaler Klimaänderungen	11
2.4	Natürlicher und anthropogener Treibhauseffekt	14
2.5	Klimafaktor Treibhausgase	15
3	**Das Klima Sachsens**	**17**
3.1	Besonderheiten des Klimas in Sachsen	17
3.2	Großwetterlagen für die Beschreibung des Klimas	19
3.3	Tendenzen und Trends des sächsischen Klimas	21
3.4	Die Sächsische Klimadatenbank	25
4	**Klimaprojektionen für Sachsen**	**27**
4.1	Globale und regionale Klimamodelle	27
4.2	Das sächsische Klimamodell WEREX	30
4.3	Die Ergebnisse im Überblick	31
5	**Extremereignisse in Sachsen**	**37**
5.1	Extremereignisse – Indizien des Klimawandels?	37
5.2	Die Extremniederschläge im August 2002	39
5.3	Die Dürreperiode im Sommer 2003	42
6	**Folgen des Klimawandels in Sachsen**	**49**
6.1	**Mögliche Auswirkungen klimatischer Veränderungen auf die Vegetationsentwicklung in Sachsen**	**49**
6.1.1	Einführung	49
6.1.2	Methodik	49
6.1.3	Ergebnisse	50
6.1.4	Zusammenfassung und Schlussfolgerungen	57
6.2	**Acker- und Pflanzenbau im Klimawandel – Handlungsoptionen und Rahmenbedingungen in Sachsen**	**59**
6.2.1	Einführung	59
6.2.2	Allgemeine Wirkungen der klimatischen Rahmenbedingungen im Acker- und Pflanzenbau	59
6.2.3	Auswirkungen auf den Acker- und Pflanzenbau in Sachsen	60
6.2.4	Anpassungsoptionen	61
6.2.5	Gestaltung der Rahmenbedingungen	63
6.2.6	Ausblick	63
6.3	**Auswirkungen des Klimawandels auf die Forstwirtschaft**	**64**
6.3.1	Einführung	64
6.3.2	Klimafolgen für den Wald im sächsischen Tiefland/Hügelland	65
6.3.3	Klimafolgen für den Wald im sächsischen Mittelgebirgsraum	69
6.3.4	Zusammenfassung und Ausblick	74

6.4	**Die Talsperrenbewirtschaftung im Spannungsfeld von Trockenperioden und Hochwasserereignissen**	**75**
6.4.1	Einführung	75
6.4.2	Das Talsperren-System Klingenberg/Lehnmühle	75
6.4.3	Grundzüge der Talsperrenbewirtschaftung	76
6.4.4	Vorliegende Beobachtungen und deren Bewertung	78
6.4.5	Simulation der Auswirkungen von Klimaänderungen auf die Bewirtschaftung des Talsperrensystems Klingenberg/Lehnmühle, Wilde Weißeritz im Osterzgebirge	83
6.5	**Konsequenzen der klimatischen Veränderungen für den Wasserhaushalt in Sachsen**	**86**
6.5.1	Einführung	86
6.5.2	Zum Klimawandel in Sachsen	86
6.5.3	Auswirkungen auf den Wasserhaushalt	88
6.5.4	Bedeutung für die Wasserwirtschaft	90
6.5.5	Schlussbemerkung	91
6.6	**Der Klimawandel und seine Auswirkungen auf Arten, Lebensgemeinschaften und Ökosysteme**	**93**
6.6.1	Grundlagen und Problemstellung	93
6.6.2	Temperatur und Niederschlag als Umweltfaktoren	93
6.6.3	Klimaänderungen und ihre Folgen für Arten und Ökosysteme	94
6.6.4	Biologische Vielfalt im Wandel	95
6.6.5	Klimawandel in Sachsen – eine Herausforderung für Naturschutz und Landschaftspflege	95
7	**Glossar**	**97**
8	**Literaturverzeichnis**	**105**
9	**Abbildungsverzeichnis**	**109**

1 Klimawandel – Klimafolgen – Klimaschutz Die sächsische Umweltpolitik vor neuen Herausforderungen

Klimaschutz ist eine der zentralen Herausforderungen des 21. Jahrhunderts. Er wird in Zukunft zunehmend alle Politikbereiche prägen. Die Klimatologen gehen bereits heute von eindeutigen Anzeichen für einen Klimawandel aus. Die jüngsten Klimaprojektionen sprechen von einer Erhöhung des globalen Mittels der bodennahen Lufttemperatur zwischen 1,4 und 5,8 Grad in den kommenden 100 Jahren. Basis ist dabei das Jahr 1990. Eine deutliche Klimaänderung hätte nicht nur dramatische ökologische, sondern auch erhebliche volkswirtschaftliche Schäden zur Folge. Mit dem Kyoto-Protokoll hat die internationale Staatengemeinschaft ein wichtiges völkerrechtliches Signal für den globalen Klimaschutz gegeben. Es sind die Industrienationen der Welt, die am meisten zur Belastung der Atmosphäre beitragen. Daher müssen diese auch die deutlichsten Zeichen für eine Reduktion der Treibhausgase setzen.

Der weltweite Klimawandel mit seinen möglichen regionalen Auswirkungen stellt auch Sachsen vor völlig neue Herausforderungen. Es gilt nicht nur, sich auf die Folgen der zu erwartenden Klimaänderungen in Land-, Forst- und Wasserwirtschaft einzustellen und wirksame Anpassungsmaßnahmen zu entwickeln. Vielmehr müssen auch konkrete Maßnahmen zur Minderung der Treibhausgasemissionen und damit für einen wirksamen Klimaschutz umgesetzt werden. Die sächsische Staatsregierung ist sich ihrer Verantwortung bewusst und unterstützt deshalb eine klimaverträgliche und ressourcenschonende Wirtschaftsweise. Dies dient der Umwelt und der Wirtschaft durch die Entwicklung nachhaltiger Rahmenbedingungen und innovativer Geschäftsfelder.

Mit einer integrierten Klimaschutzstrategie stellt sich Sachsen diesen künftigen Aufgaben:

- rechtzeitige Abschätzung der zu erwartenden Auswirkungen des Klimawandels auf Sachsen,
- Entwicklung geeigneter mittel- und langfristiger Anpassungsstrategien an die Folgen der Klimaänderungen,
- Reduzierung der Emissionen klimarelevanter Gase durch Umsetzung konkreter Maßnahmen auf der Grundlage des Sächsischen Klimaschutzprogramms, insbesondere durch die
- Erhöhung der Energieeffizienz
- Steigerung des Anteils erneuerbarer Energieträger auf 5 % des Endenergieverbrauchs bis 2010

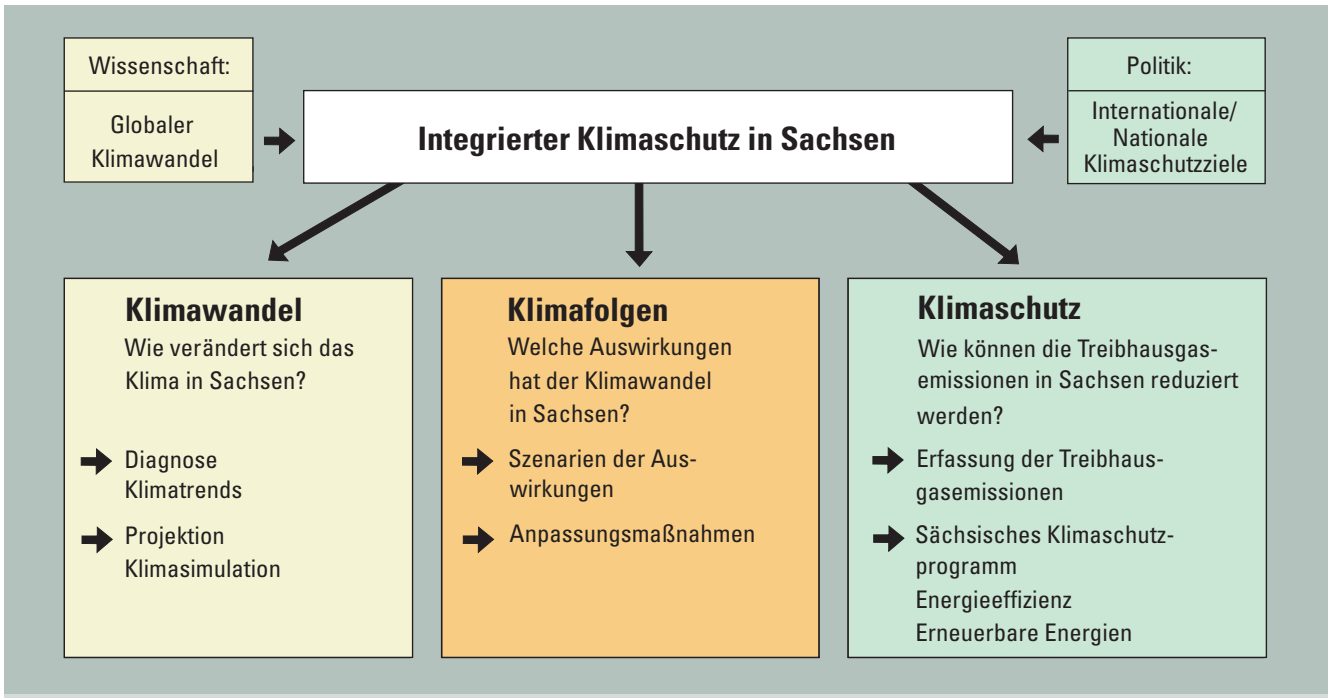


Abb. 1.1: Die integrierte Klimaschutzstrategie des Freistaates Sachsen

Da die globalen Klimamodelle je nach ihrer räumlichen Auflösung in ihren regionalen Aussagen sehr begrenzt und wenig zuverlässig sind, hat Sachsen den Weg einer Entwicklung regionaler Szenarien eingeschlagen. Durch deren Ergebnisse existiert inzwischen ein konkretes Bild möglicher Veränderungen von Temperatur und Niederschlag bis etwa zum Jahr 2050, die je nach Region und Topographie unterschiedliche Ausprägungen aufweisen werden. Mit der zunehmenden Instabilität der Atmosphäre in Folge der globalen Erwärmung ist insbesondere eine Häufung von extremen Witterungsereignissen zu erwarten. Sachsen hat mit der Flut 2002 und der extremen Trockenheit 2003 in jüngster Zeit bereits Erfahrungen mit solchen Ereignissen machen müssen.

Im Rahmen einer fach- und behördenübergreifenden Klimafolgenforschung wurde in Sachsen begonnen, die Auswirkungen der prognostizierten Klimaänderungen auf die Land- und Forstwirtschaft, die Wasserwirtschaft und die Talsperrenbewirtschaftung sowie die Vegetationsentwicklung für Sachsen zu konkretisieren. So wurde u. a. den Fragen nachgegangen: Welchen Einfluss hat die Niederschlagsabnahme auf die Waldbewirtschaftung insbesondere in Nordsachsen? Gibt es Zusammenhänge zwischen der Klimaänderung und dem Auftreten von Schaderregern in der Landwirtschaft? Müssen die Einzugsgebiete der Talsperren sowie deren Bewirtschaftungspläne angesichts der Niederschlagsprognosen verändert werden? Zeigen sich in der Vegetationsentwicklung bereits erste Anzeichen des Klimawandels? Indikatoren sollen dabei helfen, Tendenzen des Klimawandels deutlicher sichtbar zu machen.

In Sachsen sind die Kohlendioxidemissionen zwischen 1990 und 2002 um rund 71 Millionen Tonnen zurückgegangen. Sachsen leistet damit einen wesentlichen Beitrag zum Erreichen des deutschen Klimaschutzziels.

Mit dem Sächsischen Klimaschutzprogramm hat sich der Freistaat im Jahr 2001 verpflichtet, die jährlichen CO_2-Emissionen um weitere 2,5 Mio. t bis spätestens 2010 in den Bereichen Industrie, Haushalte, Kleinverbraucher und Verkehr zu senken. In diesem Rahmen sollen ebenfalls bis 2010 fünf Prozent des Endenergieverbrauchs aus erneuerbaren Energien gedeckt werden werden. Das ist nahezu eine Verdreifachung im Vergleich zum heutigen Stand und damit ein ambitioniertes Ziel.

Mit einer integrierten Klimaschutzstrategie leistet der Freistaat Sachsen nicht nur einen aktiven Beitrag zur Klimavorsorge und zur Schonung unserer natürlichen Ressourcen. Gleichzeitig trägt er damit zur Sicherung von Arbeitsplätzen, zur Stärkung der Wettbewerbsfähigkeit sächsischer Unternehmen, zur Stärkung der regionalen Wertschöpfung und nicht zuletzt zur Entwicklung und Markteinführung von Zukunftstechnologien bei.

2 Der globale Klimawandel

2.1 Klimageschichte

Seit Entstehung der Erde vor etwa 4,5 Milliarden Jahren hat es im Laufe der Erdgeschichte immer wieder zum Teil drastische Klimaänderungen gegeben. Das Klima der letzten 2–3 Milliarden Jahre gliedert sich in ein relativ warmes Klima ohne jegliche Eisvorkommen an der Erdoberfläche und episodisch eintretende kältere Abschnitte von jeweils einigen Jahrmillionen Dauer, die so genannten Eiszeitalter. In den meisten Abschnitten der Erdgeschichte war es wärmer als heute. Wir leben heute im jüngsten Eiszeitalter (Quartär), das vor etwa 2,4 Millionen Jahren begann. Es ist gekennzeichnet durch einen zyklischen Wechsel von Kaltzeiten bzw. Eiszeiten (Glaziale) und Warmzeiten (Interglaziale). Die jüngste Eiszeit endete vor etwa 11.000 Jahren.

Im **Präkambrium** (Erdurzeit) sind für zwei Abschnitte ausgedehnte Vereisungen nachgewiesen worden. Die älteste Vereisung fällt in die Zeit vor etwa 2–2,5 Milliarden Jahren, die zweite fand vor etwa 750–550 Millionen Jahren statt.

Das **Paläozoikum** (Erdaltertum) umfasst den Zeitraum vor 590–250 Mio. Jahren. Es war eine Epoche mit zum Teil erheblichen klimatischen Gegensätzen. Europa lag zur damaligen Zeit am Äquator und hatte tropisches Klima.

Das **Mesozoikum** (Erdmittelalter), der Zeitraum vor etwa 250 bis 65 Millionen Jahren, war geprägt durch Perioden eines überdurchschnittlich warmen Klimas mit geringen Temperaturunterschieden zwischen den Polen und den äquatornahen Zonen.

Das jüngste Erdzeitalter, das **Känozoikum** (Erdneuzeit), begann vor etwa 65 Millionen Jahren und umfasst das Tertiär und das Quartär. Das Tertiär war gekennzeichnet von einer globalen Abkühlung, die schließlich zu den ausgedehnten Vereisungen des Quartärs führte.

Die jüngste Periode der Erdgeschichte, das **Quartär**, begann vor etwa 2,4 Millionen Jahren und ist durch den häufigen Wechsel von Warmzeiten und Kaltzeiten geprägt. Kaltzeiten sind Epochen anhaltender Vergletscherungen der sonst eisfreien Gebiete mittlerer Breite.

Die Eigenschaften historischer Klimate sind in den Sedimenten, den Eisschilden der Antarktis und Grönlands, in biosphärischen Spuren sowie für die jüngste Geschichte auch in menschlichen Zeugnissen gespeichert. Besonders wertvoll sind jüngste Klimainformationen aus Bohrkernen, die aus dem Eis der Antarktis gewonnen wurden und ein Klimaarchiv enthalten, das mittlerweile mehr als 800.000 Jahre zurückreicht.

Die daraus rekonstruierten Wärme- und Kältephasen der Erdgeschichte deuten darauf hin, dass während dieser Zeitspanne Kaltphasen eher die Regel als die Ausnahme darstellen. Diese zum Teil extremen Klimaänderungen im Quartär hängen primär mit den sehr langfristigen Änderungen der Bahnparameter der Erde um die Sonne (Milankovitch-Zyklen, vgl. Abb. 2.5 und siehe Glossar), die zu einer Umverteilung der einfallenden Sonnenenergie auf der Erde führen, und mit Änderungen der Strahlungsintensität der Sonne selbst zusammen. Darüber hinaus stellte sich heraus, dass die Treibhausgas-Konzentrationen während des gesamten Zeitabschnittes nie höher waren als heute. Noch vor etwa 20.000 Jahren waren das heutige Kanada und Skandinavien unter dickem Inlandeis begraben, mächtige Eismassen reichten in Deutschland bis zum Mittelgebirgsrand. Ab etwa 15.000 vor heute zog sich das Inlandeis in zwei Phasen auf den heutigen Stand zurück.

Zusätzliche Auskunft für die Nordhalbkugel geben Eisbohrkerne vom grönländischen Eis. Diese lassen beispielsweise extrem schnelle Klimaänderungen innerhalb weniger Jahre am Ende der letzten Eiszeit erkennen. Das Klima der Nacheiszeit (Holozän) hat sich im Vergleich zum Quartär als bislang bemerkenswert stabil erwiesen und ist insgesamt eine warme und relativ ruhige Klimaperiode. Die letzten 10 Jahrtausende sind somit eine Ausnahmeerscheinung in der jüngeren Klimageschichte unseres Planeten. Nie zuvor in den vergangenen 100.000 Jahren herrschten über so lange Zeit derart ausgeglichene Witterungsbedingungen.

Das Klima während des Holozäns wurde von Erwärmungs- und Abkühlungsphasen geprägt (Abb. 2.1). Als warme Episoden gelten beispielsweise das Klimaoptimum der Römerzeit (Lufttemperatur im Mittel etwa 1 Grad höher als heute) und das mittelalterliche Optimum (Lufttemperatur im Mittel etwa wie heute). Die käl-

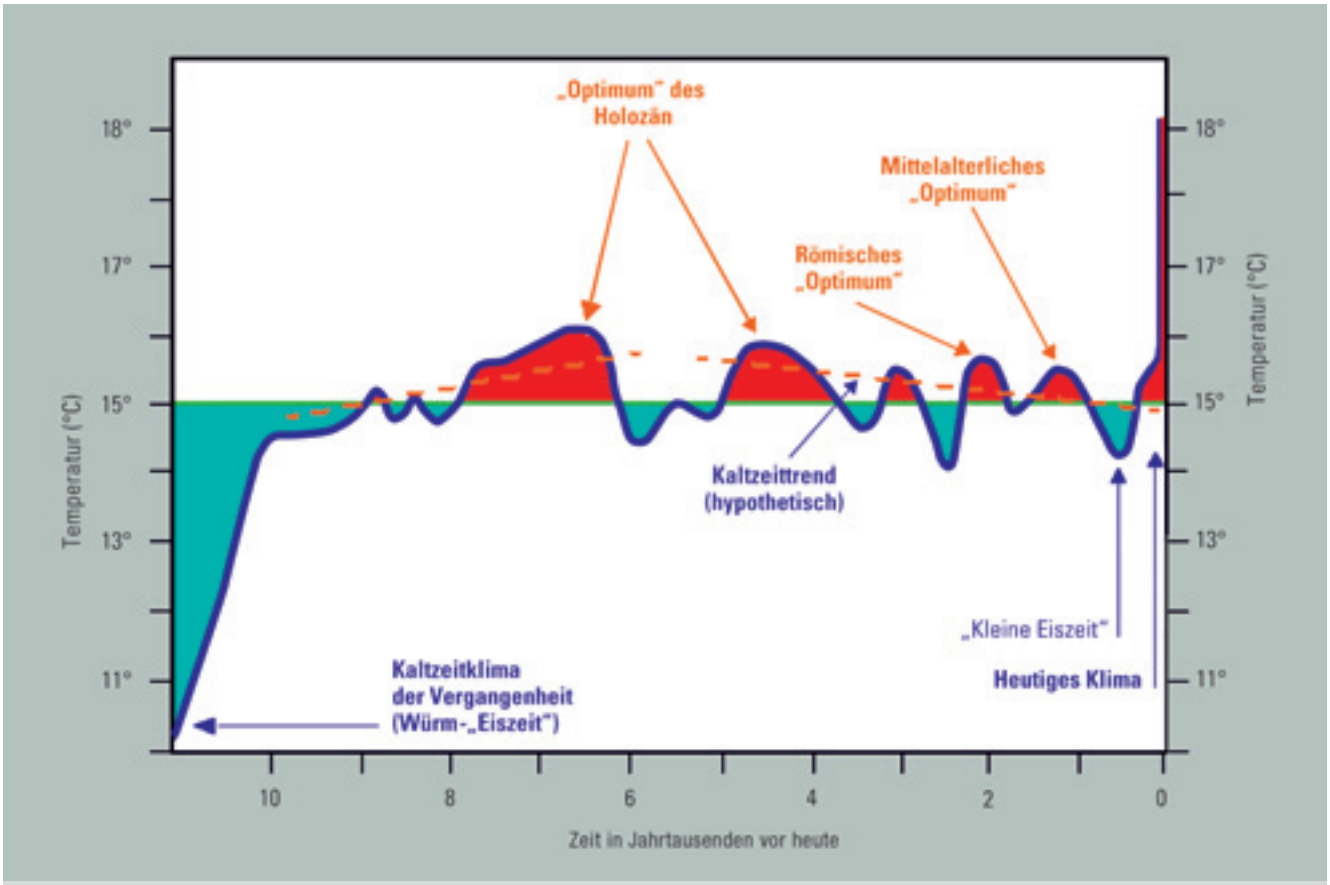


Abb. 2.1: Temperaturschwankungen in den letzten 11.000 Jahren (Quelle: SCHÖNWIESE, 2004)

teste Epoche des hier erfassten Zeitraumes ist offensichtlich vor ca. 2.000 bis 2.500 Jahren eingetreten. In diese Zeit fällt auch die indogermanische Völkerwanderung. Die Zeitspanne von 1350 bis 1850 war in der Nordhemisphäre insgesamt etwa 1 Grad kälter („Kleine Eiszeit") als die meisten Abschnitte des Holozäns und gipfelte schließlich in der Maximalausdehnung der Gletscher um die Mitte des 18. Jahrhunderts. Im 14. Jahrhundert wurde ganz Europa von kalten Sommern und Missernten heimgesucht. Die normannische Besiedlung Grönlands fand ein jähes Ende.

In der 2. Hälfte des 19. Jahrhunderts setzte ein globaler Temperaturanstieg mit einem ersten Maximum um 1940 ein. Seit etwa 30 Jahren hat sich der Anstieg erheblich verstärkt. Bemerkenswert ist dabei, dass sich diese Erwärmung – von kleineren Regionen mit gegenläufigen Tendenzen abgesehen – im globalen Maßstab vollzieht. Die früheren Episoden des Holozän traten offensichtlich nicht weltweit auf, sondern beschränkten sich auf bestimmte Regionen der Erde. Als Ursachen für die Klimaänderungen der letzten 1.000 Jahre werden neben den jüngsten anthropogenen Faktoren (Treibhausgas-Emissionen) gegen Ende des 20. Jahrhunderts vor allem Veränderungen der Sonneneinstrahlung, der Vulkanismus und Wechselwirkungen zwischen Atmosphäre und Ozean diskutiert (sog. interne Variationen im Klimasystem, vgl. S. 11).

Experiment mit ungewissem Ausgang

Durch die gegenwärtig immer stärker in Erscheinung tretende Einflussnahme des Menschen besteht die Gefahr, dass die in den letzten 10 Jahrtausenden zu beobachtende relative Stabilität unseres Klimas innerhalb weniger Jahrzehnte durch abrupte Klimaänderungen beendet wird – mit im Einzelnen kaum absehbaren Folgen für Mensch und Natur.

2.2 Klimaentwicklung im 20. Jahrhundert

Die globale Klimaentwicklung

Im 20. Jh. stieg die mittlere jährliche globale Lufttemperatur in Bodennähe um 0,7 Grad an. Dieser Trend hat sich im Laufe der Zeit verstärkt und ist in den letzten ca. 20–25 Jahren besonders groß gewesen. Allerdings wird der Trend von vielfältigen Fluktuationen und Jahresanomalien überlagert. Die wärmsten je gemessenen Jahre liegen alle in dem Zeitraum seit 1990 (Abb. 2.2). 1998 war das im globalen Mittel mit Abstand wärmste Jahr seit Beginn weltweiter Messungen im Jahr 1861, gefolgt von den Jahren 2002, 2003, 2001, 1997, 1995, 1990, 1999, 2000, 1991, 1994.

Das 20. Jahrhundert ging also mit immer neuen Wärmerekorden bezüglich der mittleren globalen Lufttemperatur zu Ende. Diese Entwicklung hat sich seit dem Jahr 2000 offensichtlich noch verstärkt. Durch die globale Erwärmung verändern sich auch die regionalen Charakteristiken des Niederschlages und der Luftfeuchtigkeit, da höhere Temperaturen den hydrologischen Zyklus von Verdunstung und Niederschlag antreiben und eine wärmere Atmosphäre eine höhere Wasserdampfspeicherkapazität aufweist. Mit der damit verbundenen Zunahme latenter Energie in der Troposphäre nahmen Extremereignisse wie Hitzeperioden, Stürme oder Starkniederschläge weltweit zu. In vielen Regionen der Erde wurde in den letzten Jahrzehnten bereits eine Zunahme extremer Temperaturen, der Häufigkeit und Intensität von Starkniederschlägen sowie stärkerer Dürren beobachtet.

Die Klimaentwicklung in Europa

Regionale bzw. lokale Klimaänderungen weisen stets eine wesentlich höhere zeitliche Variabilität als globale Mittelwerte auf. Außerdem bestehen wesentliche jahreszeitliche Unterschiede (Schönwiese und Rapp, 1997). Als Beispiel sind in Abb. 2.3 für Europa die Temperaturtrends 1891–1990 im Winter und Sommer miteinander verglichen. Dabei zeigen sich sehr unterschiedliche räumliche Strukturen mit den maximalen Trendwerten im Winter (bis zu 2,5 Grad Erwärmung und 1 Grad Abkühlung).

Die Niederschlagsentwicklung der letzten 100 Jahre zeigt in Nord- und Südeuropa Abnahmen. In Mitteleuropa sind diese Trends im Jahresmittel ausgeglichener; jahreszeitlich betrachtet überwiegen winterliche Zunahmen und sommerliche Abnahmen. Dabei bestehen gerade in Europa enge Verbindungen zur nordatlantischen atmosphärischen Zirkulation, im Winter insbesondere zur Nordatlantik-Oszillation (NAO; vgl. S. 12 und siehe Glossar).

Die Klimaentwicklung in Deutschland

In Deutschland hat sich die bodennahe Lufttemperatur in den letzten 100 Jahren um 0,9 Grad und damit stärker als im globalen Mittel erhöht. Mit Ausnahme des Jahres 1996 können seit 1988 alle Jahre gegenüber der zugrunde gelegten Referenzperiode 1961–1990 als zu warm eingeschätzt werden (Abb. 2.4). In den letzten 30 Jahren sind dabei vor allem die Winter im Mittel um mehr als 1,5 Grad wärmer geworden. Das Jahr 2000 war mit einer Jahresmitteltemperatur von 9,9 °C das wärmste des Jahrhunderts in Deutschland (1,6 Grad über dem Mittelwert 1961–1990).

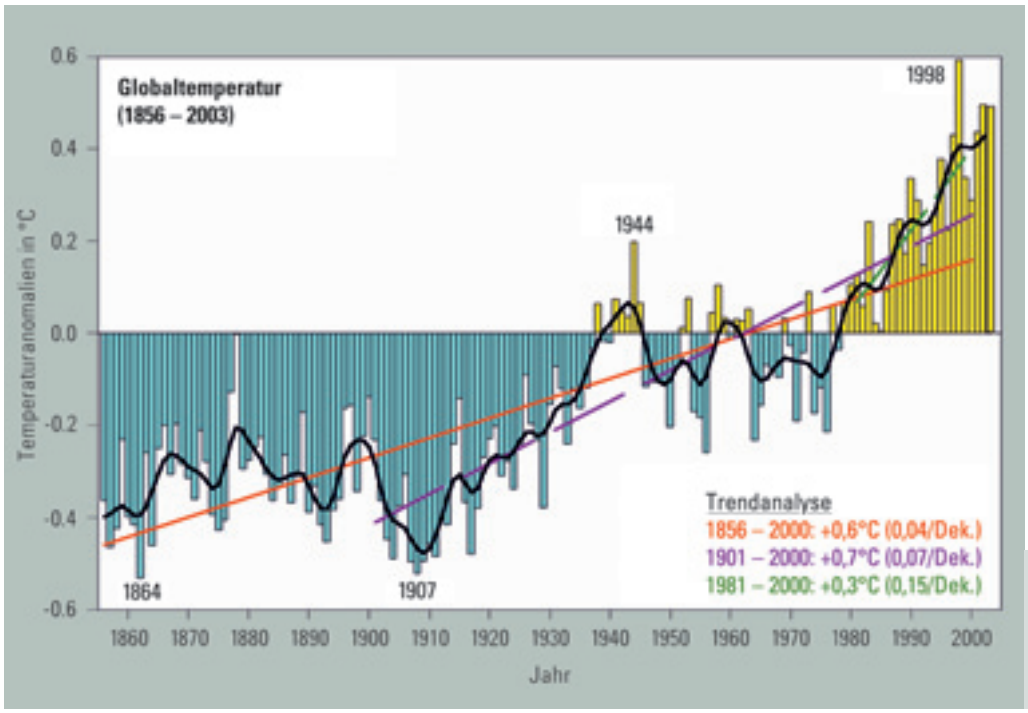


Abb. 2.2:
Trends der globalen Mitteltemperatur in verschiedenen Zeitabschnitten
(Quelle: Schönwiese, 2004)

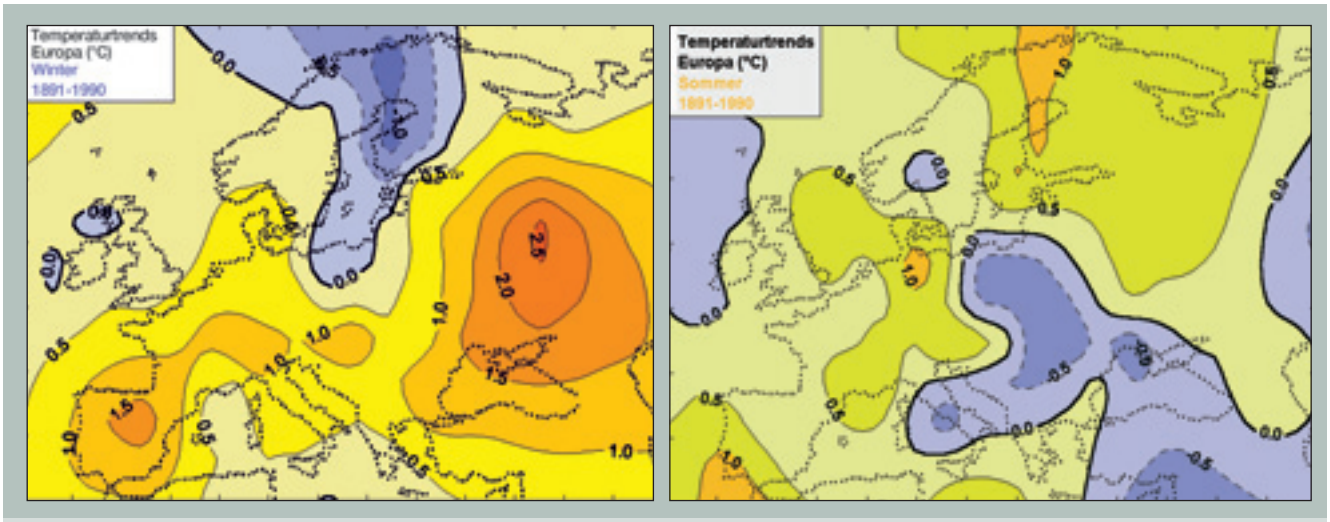


Abb. 2.3: Beobachtete Temperaturtrends in Europa (Quelle: SCHÖNWIESE, 2004)

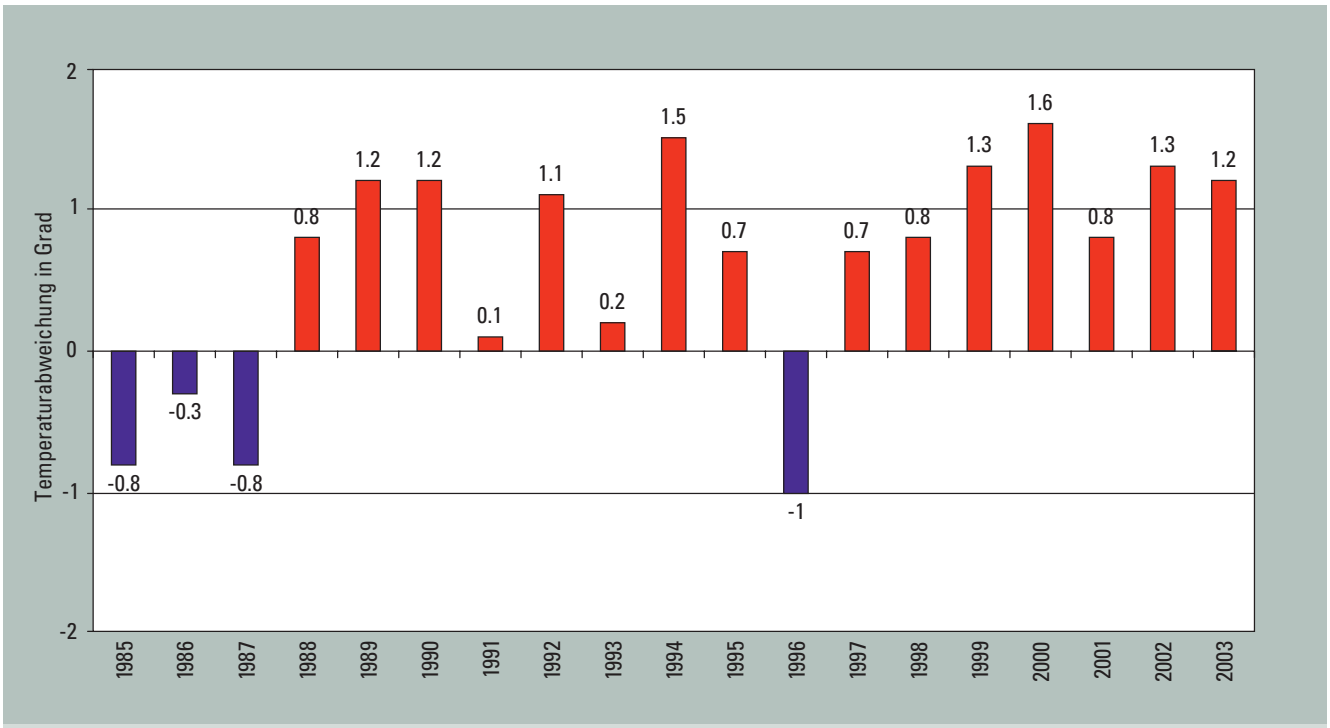


Abb. 2.4: Abweichungen der Jahresmittel der Lufttemperaturen vom Referenzwert 1961–1990 in Deutschland

Beim Niederschlag zeigt sich eine bemerkenswerte jahreszeitliche Umverteilung derart, dass die Sommer eher trockener, die Wintermonate dagegen in weiten Teilen Deutschlands deutlich feuchter werden (RAPP und SCHÖNWIESE, 1996). Die gegenwärtig zu beobachtende Tendenz zu milden und feuchten Wintern sowie zu wärmeren Sommern mit häufigeren Trockenperioden kann durch veränderte atmosphärische Zirkulationsverhältnisse in Europa erklärt werden.

2.3 Ursachen globaler Klimaänderungen

Die globalen Klimaänderungen werden von sehr verschiedenen Einflussfaktoren bestimmt. So wird die interne Variabilität des Klimasystems von den externen Einflussfaktoren unterschieden. In den klimatologischen Datenreihen spiegeln sich immer beide Faktoren wider (Graßl, 2003). Zudem werden externe Einflüsse stets durch die interne Klimavariabilität modifiziert. Externe Einflüsse können terrestrisch (erdgebunden) oder extraterrestrisch sein. Entscheidend ist, dass sie zumindest primär keine Wechselwirkungen darstellen. Das heißt, das Klima wird von ihnen beeinflusst, aber umgekehrt nimmt das Klima keinen Einfluss auf diese Faktoren. So ist der explosive Vulkanismus klimawirksam, weil er die Zusammensetzung der Atmosphäre ändert und dadurch auf die klimarelevanten Strahlungsprozesse in der Atmosphäre Einfluss nimmt. Umgekehrt verursachen Klimaänderungen nach unseren Kenntnissen aber keine Vulkanausbrüche. Die im Folgenden genannten wichtigsten externen Einflussfaktoren spielen sich in sehr unterschiedlichen zeitlichen Größenordnungen ab (Schönwiese, 2003).

Externe Einflussfaktoren

- Solare Variationen (Sonnenaktivität mit Zyklen um 11, 22, 76 usw. Jahren, aber auch wesentlich längerfristige Vorgänge)
- Tektonische Prozesse (insbesondere Kontinentaldrift, in vielen Jahrmillionen)
- Orbitalparameter des Erdumlaufs um die Sonne (Zyklen von ca. 20.000 bis 100.000 Jahren)
- Explosiver Vulkanismus (episodisch mit Wirkung von einigen Jahren nach einer Eruption)
- Einschläge von Meteoriten und Meteoren (in Abständen von vielen Jahrmillionen sind entsprechende kosmische Katastrophen eingetreten)

Für Klimaänderungen, die sich über *Jahre bis Jahrhunderte* einstellen, sind vor allem die Einflussfaktoren Sonnenaktivität, Vulkanismus und anthropogener Treibhauseffekt entscheidend. Bei Zeiträumen von einigen *Zehn- bis Hunderttausend Jahren* kommen noch die Variationen der Erdumlaufbahn um die Sonne (Abb. 2.5) und die Verschiebung der Kontinente (*Jahrmillionen*) hinzu. Die Veränderung der Erdbahnparameter stellt die Hauptursache für das Kommen und Gehen der Kaltzeiten (Eiszeiten) dar (Milankovitch-Zyklen; siehe Glossar). Grundsätzlich ist also zu berücksichtigen, dass je nach betrachtetem Zeitraum die maßgebenden Klimafaktoren sehr unterschiedlich sind.

Interne Einflussfaktoren

- Atmosphärische Zirkulationsphänomene wie z.B. die Nordatlantik-Oszillation (siehe unten)
- Atmosphärisch-ozeanische Wechselwirkungen wie z. B. ENSO (siehe ebenfalls unten) oder Änderungen der ozeanischen Tiefenzirkulation

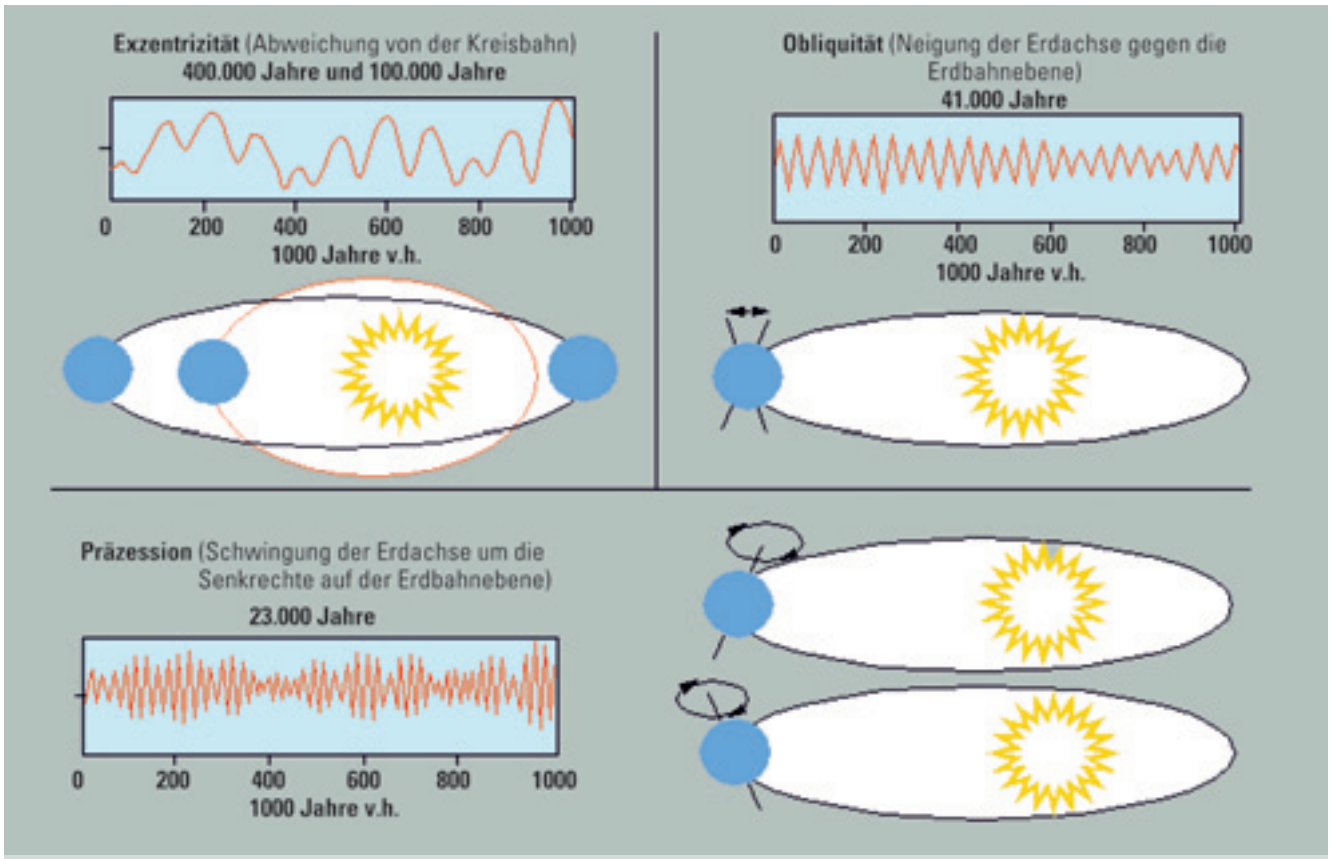


Abb. 2.5: Die wichtigsten Erdbahnparameter und ihre charakteristischen Zeitskalen (Zyklen) (Quelle: Hamburger Bildungsseminar)

- Wechselwirkungen der Atmosphäre mit weiteren Komponenten des Klimasystems, nämlich Land- und Meereis sowie Vegetation

Das wohl bekannteste Phänomen interner Klimavariabilität ist die *El Nino-Southern Oscillation* (ENSO) bzw. ihre ozeanische Komponente *El Nino*. Die Southern Oscillation kann man als eine Art Luftdruckschaukel verstehen, wobei die Bodendruckvariationen in der westlichen und in der östlichen Hemisphäre einander entgegengesetzt sind. Wegen der engen Verbindung zwischen dem El Nino und der Southern Oscillation spricht man heute im Allgemeinen vom ENSO-Phänomen (Latif, 2003).

Die *Nordatlantische Oszillation* (NAO) ist das wichtigste Muster der atmosphärischen Zirkulation über dem Nordatlantik. Die NAO bestimmt zu einem großen Teil die Klimavariabilität über dem Nordatlantik und Europa. Obwohl die NAO selbst seit über 100 Jahren bekannt ist, sind die sie bestimmenden Mechanismen bislang weitgehend unbekannt. Während der letzten Jahrzehnte wurde ein Anstieg des NAO-Index (Luftdruckdifferenz zwischen Messstationen auf den Azoren und auf Island) beobachtet, der stärkere und häufigere Winterstürme über dem Nordatlantik, mildere Winter in Europa und strengere Winter in Nordkanada und Grönland mit sich brachte. Die wissenschaftliche Debatte darüber, ob dieser Anstieg ein Signal für den anthropogenen Klimawandel ist oder als Teil einer natürlichen Klimavariabilität erklärt werden kann, ist noch im Gange. Wahrscheinlich ist es eine Kombination beider Einflussfaktoren (Gillett et al., 2003).

Anthropogene Einflussfaktoren

- Änderung der atmosphärischen Konzentration von klimawirksamen Spurengasen („Treibhausgasen") und Aerosolen
- Änderung des Stoff- und Energieflusses an der Erdoberfläche durch Landnutzung, einschließlich Waldrodungen und Bebauung

Die anthropogene Klimabeeinflussung erfolgt über Veränderungen der Landnutzung, Eingriffe in den Wärme-, Energie- und Wasserhaushalt und insbesondere über nachhaltige Veränderungen der chemischen Zusammensetzung der Atmosphäre. Seit Beginn der Industrialisierung hat sich durch den Gebrauch fossiler Energieträger eine neue Qualität der anthropogenen Klimabeeinflussung eingestellt. Letztere verändern den Strahlungs- und Wärmehaushalt der Atmosphäre und damit auch die atmosphärische Zirkulation im Klimasystem. Fraglich bleiben allein das quantitative Ausmaß sowie die regionale Ausprägung der unter diesen Voraussetzungen unvermeidlichen globalen Klimaänderungen.

Die Beantwortung der Frage, ob der Mensch das Klima verändert oder schon verändert hat, erforderte den Nachweis, dass sowohl die in die Zukunft projizierten als auch in der jüngeren Vergangenheit beobachteten Klimaände-

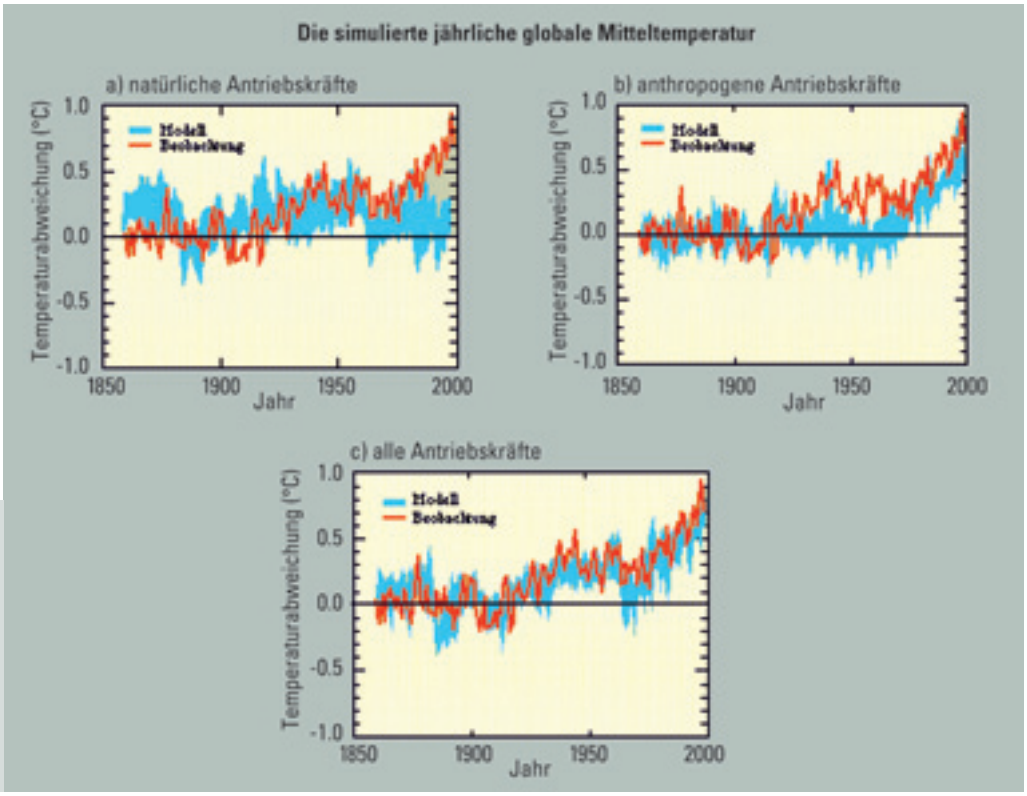


Abb. 2.6:
Jährliche globale Mitteltemperatur unter Berücksichtigung natürlicher, anthropogener und aller Antriebskräfte. Modellsimulation (blau), Beobachtungen (rot) (Quelle: IPCC)

rungen größer sind als dies in einem vom Menschen ungestörten System der Fall wäre. Klimamodell-Simulationen, die die Erhöhung der Treibhausgase nicht berücksichtigen, können die Erwärmung der zweiten Hälfte des 20. Jahrhunderts nicht erklären. Lässt man in Szenarienrechnungen also die Treibhausgase konstant, wird die beobachtete Erwärmung nicht erklärt (Abb. 2.6). Auch Studien auf der Basis statistischer Untersuchungen zeigen, dass die Erwärmung während der letzten Jahrzehnte vor allem dem markanten Anstieg der Treibhausgase zugeschrieben werden muss.

Der IPCC (siehe Glossar) hat im 2001 vorgelegten 3. Sachstandsbericht aufgezeigt, dass der Mensch die wichtigste Ursache für den bereits stattfindenden globalen Klimawandel ist (IPCC, 2001a, 2002). Aktuelle Untersuchungen belegen, dass sich rund 80 % der Variabilität der globalen Lufttemperatur durch anthropogene Einflussgrößen erklären lassen, wobei der größte Anteil (fast 60 %) auf den vom Menschen verursachten Treibhauseffekt zurückgeführt werden kann (Schönwiese et al., 2001).

2.4 Natürlicher und anthropogener Treibhauseffekt

Während die Zusammensetzung der Atmosphäre hinsichtlich der Hauptkomponenten Stickstoff, Sauerstoff und Edelgase als konstant angesehen werden kann, nehmen die Konzentrationen der Spurengase CO_2, CH_4 und N_2O durch menschliche Aktivitäten stark zu. In den vergangenen 200 Jahren haben sich die Konzentrationen von CO_2 um rund ein Viertel, von CH_4 auf das Doppelte und von N_2O um rund ein Fünftel erhöht. Der hierdurch verursachte zusätzliche anthropogene Treibhauseffekt (Abb. 2.8) wird zu ca. 2/3 durch CO_2-Emissionen in Folge der Verbrennung fossiler Energieträger verursacht. Dieser anthropogene Beitrag verstärkt inzwischen in erheblichem Maße den durch Wasserdampf, Spurengase und Ozon bedingten natürlichen Treibhauseffekt (Abb. 2.7), der durch die Erhöhung der bodennahen Lufttemperatur das Leben auf der Erde erst ermöglicht. Der natürliche Treibhauseffekt bewirkt eine mittlere Erdoberflächentemperatur von gegenwärtig etwa 15 °C. Ohne natürliche Treibhausgase würde die Temperatur der Erdoberfläche bei etwa –18 °C liegen. Der Unterschied von 33 Grad resultiert also letztendlich daraus, dass die Erde von einer Atmosphäre umgeben ist, die für Infrarotstrahlung nur teilweise durchlässig ist. Durch den hohen Verbrauch fossiler Brennstoffe wird der Anteil der klimawirksamen Gase in der Atmosphäre erhöht und damit der Treibhauseffekt verstärkt. Die so genannten atmosphärischen Fenster, über die die Wärmeabstrahlung der Erde erfolgt, werden zunehmend geschlossen. In der Folge kommt es zu einer zusätzlichen Aufheizung der Atmosphäre.

Der Beitrag des anthropogenen Treibhauseffektes beläuft sich gegenwärtig auf etwa 2 % des natürlichen Treibhauseffektes. Schon eine grobe lineare Überschlagsrechnung ergibt, dass 2 % von 33 Grad etwa 0,7 Grad Erwärmung verursacht haben sollten – was exakt der im 20. Jahrhundert tatsächlich beobachteten Erderwärmung entspricht (Rahmstorf, 2003).

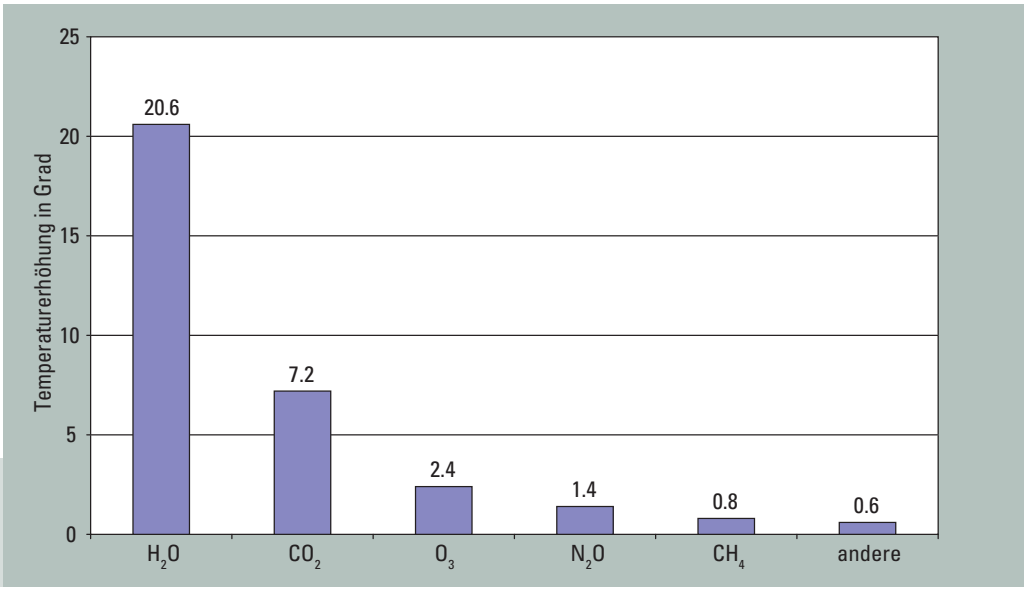


Abb. 2.7:
Beiträge atmosphärischer Spurengase zum natürlichen Treibhauseffekt

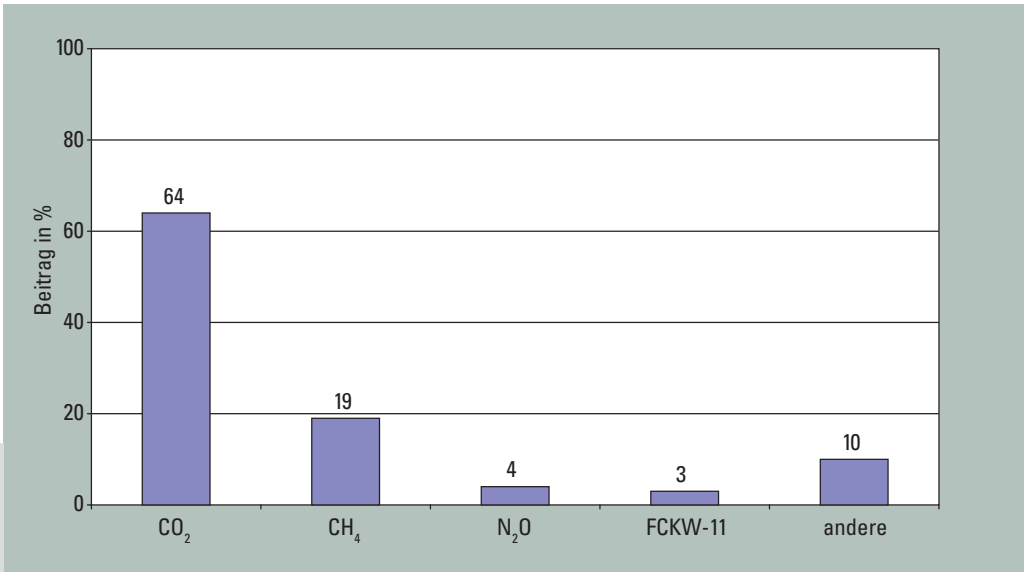


Abb. 2.8:
Beiträge der Klimagase zum anthropogenen Treibhauseffekt

2.5 Klimafaktor Treibhausgase

Bis in die 2. Hälfte des 19. Jahrhunderts hinein kann der Einfluss des Menschen auf das Klima als relativ gering bezeichnet werden und war eher von lokaler bis regionaler Bedeutung. Seit Beginn der Industrialisierung hat sich durch den Gebrauch fossiler Energieträger eine neue Qualität der anthropogenen Klimabeeinflussung eingestellt. Letztere verändern den Strahlungs- und Wärmehaushalt der Atmosphäre und damit auch die atmosphärische Zirkulation im Klimasystem.

Mit den heutigen statistischen und numerischen Modellen lässt sich bereits nachweisen, dass die Erwärmung in den vergangenen Jahrzehnten nicht durch natürliche Klimaschwankungen erklärbar ist. Menschliche Aktivitäten müssen inzwischen als dominanter Klimafaktor angesehen werden. Klimaänderungen durch die anthropogen bedingten Emissionen klimawirksamer Spurengase (anthropogener Treibhauseffekt) und deren Risiken zeichnen sich bereits ab und werden nach Modellrechnungen in ihrer Bedeutung deutlich zunehmen, wenn nicht weltweit wirksame Klimaschutz-Maßnahmen umgesetzt werden. Die nahe Klimazukunft unseres Planeten hängt somit in zunehmendem Maße vom Menschen selbst ab.

Die Konzentrationen von Kohlendioxid (CO_2) und anderen Treibhausgasen in der Atmosphäre weisen seit Beginn des industriellen Zeitalters einen ansteigenden Trend auf. Sowohl die Messungen seit 1958 am Observatorium Mauna Loa (Hawaii) als auch weltweite Vergleichsmessungen zeigen eine stetige Zunahme des CO_2-Gehaltes in der Atmosphäre. Der Konzentrationsanstieg von rund 280 ppm (d. h. 0,028 Volumenprozent) seit Beginn der Industrialisierung auf 375,6 ppm im Jahr 2003 (Abb. 2.9) beruht zweifellos auf anthropogenen Emissionen. Sie betragen weltweit derzeit jährlich rund 30 Mrd. Tonnen, wobei Waldrodungseffekte berücksichtigt sind. Über Jahrmillionen in der Geosphäre als Kohle, Erdöl und Erdgas gespeicherter Kohlenstoff wird von der Menschheit in einem erdgeschichtlich extrem kurzen Zeitraum als CO_2 wieder freigesetzt. Die Atmosphäre enthält schon jetzt so viel CO_2 wie seit mindestens etwa 800.000 Jahren nicht mehr.

Die Treibhausgase in der Atmosphäre werden in den nächsten Jahrzehnten weiter deutlich ansteigen. In den SRES-Emissionsszenarien (siehe Glossar) bewegt sich die projizierte CO_2-Konzentration für das Jahr 2100 zwischen 540 ppm (Szenario B1) und 970 ppm (Szenario A1F1). In Abb. 2.10 wird die Entwicklung der CO_2-Emission und CO_2-Konzentration für aktuelle SRES-Szenarien sowie zum Vergleich für das früher gebräuchliche Szenario IS92a dargestellt.

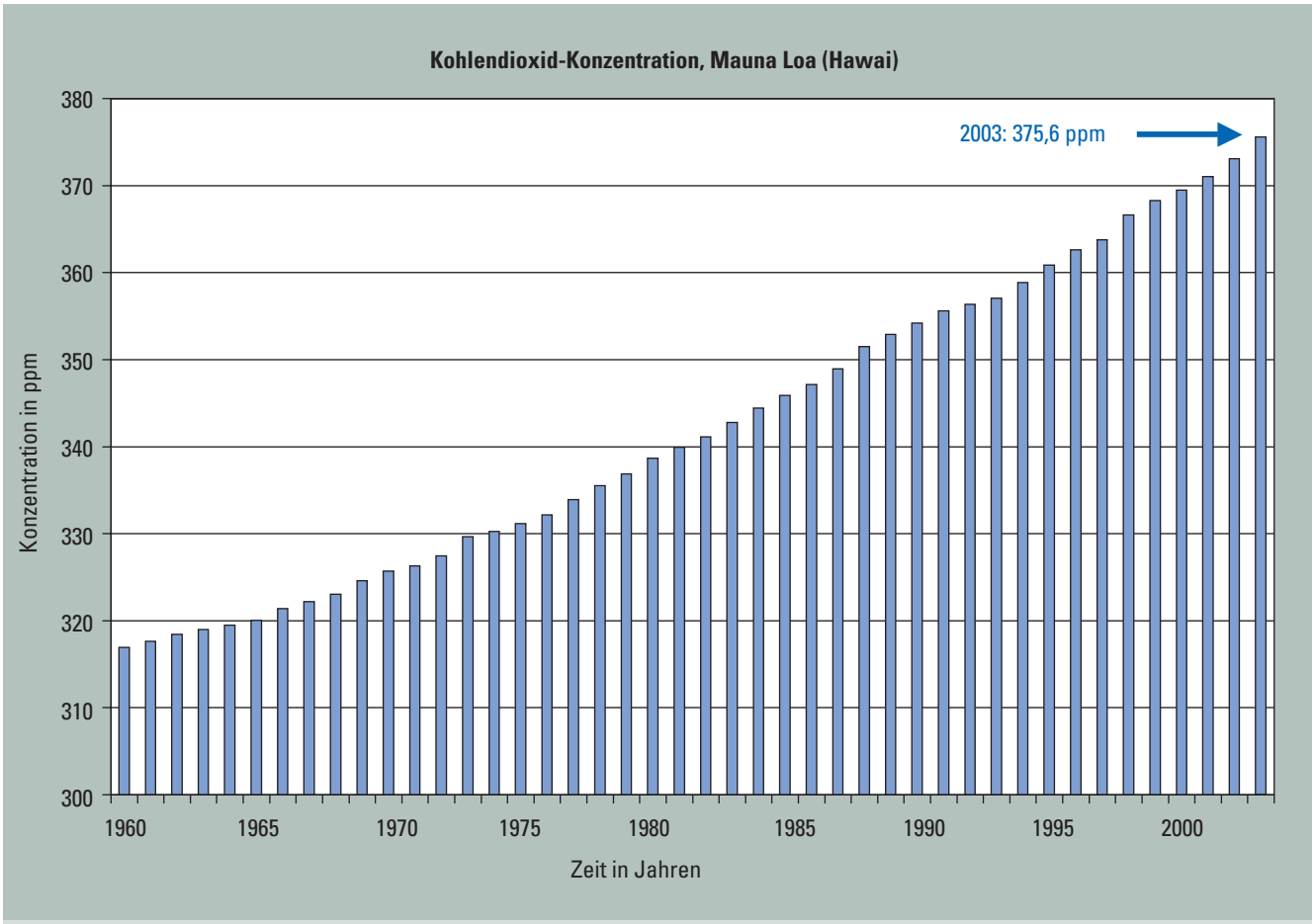


Abb. 2.9: Trend der Jahresmittelwerte der CO_2-Konzentration 1960–2003 in Mauna Loa (Hawaii)

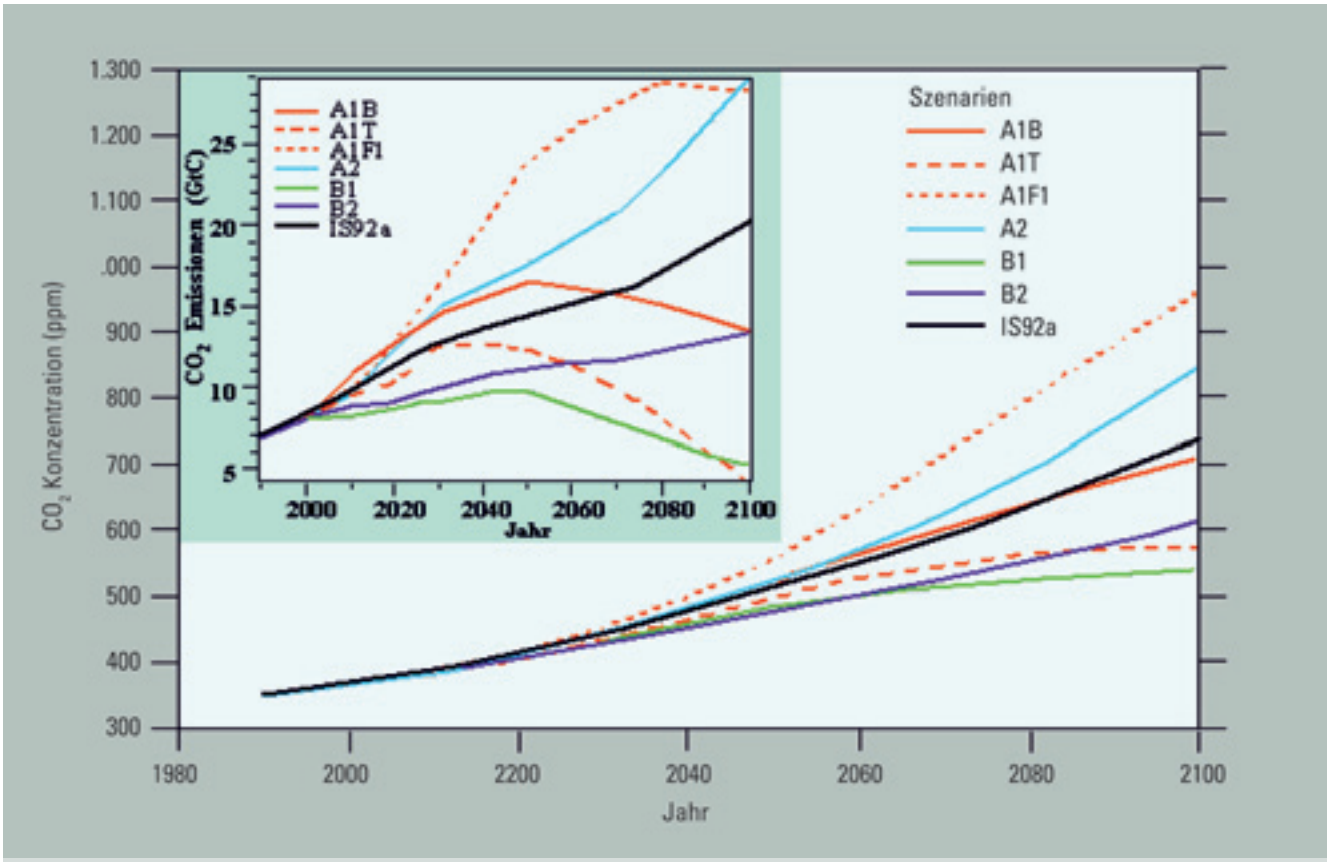


Abb. 2.10: SRES-Szenarien für die jährliche globale Emission und atmosphärische Konzentration von CO_2 (1990–2100). (Quelle: IPCC)

Wenn die Emissionen der Treibhausgase nicht steigen würden, gäbe es derzeit gar keinen Grund für einen Klimawandel, denn Sonnenaktivität, Vulkanaktivität oder kosmische Strahlung weisen in den letzten Jahrzehnten keinen signifikanten Trend auf und auch die Milankovitch-Zyklen sowie die Kontinentaldrift spielen in absehbarer Zeit keine Rolle für die globale Klimaentwicklung (Rahmstorf, 2004). Insofern lassen Prognosen auf der Grundlage der Milankovitch-Zyklen eine neue Eiszeit erst in einigen 10.000 Jahren als möglich erscheinen.

Aktuelle Projektionen mit einer Auswahl von Klimamodellen unter Anwendung der SRES-Emissions-Szenarien ergeben für den Zeitraum von 1990 bis 2100 eine Erhöhung der mittleren globalen Temperatur von 1,4 bis 5,8 Grad mit voraussichtlich gravierenden Folgen für natürliche Ökosysteme und die menschliche Gesellschaft.

Die wichtigsten Zukunftsprojektionen globaler Klimamodelle

- Erwärmung der unteren Atmosphäre (global bis 2100 um 1,4–5,8 Grad; Maxima vermutlich im subarktischen Winter, in Mitteleuropa ebenfalls im Winter)
- Abkühlung der Stratosphäre (mit Begünstigung des dortigen Ozonabbaus)
- Niederschlagsumverteilungen (beispielsweise Mittelmeerregion generell trockener, Mitteleuropa im Sommer trockener und im Winter feuchter, Südskandinavien sowie Polargebiete generell feuchter)
- Meeresspiegelanstieg (bis 2100 um ca. 10–90 cm; aufgrund der thermischen Ausdehnung des oberen Ozeans und des Rückschmelzens außerpolarer Gebirgsgletscher)
- Häufigere Extremereignisse (regional unterschiedlich) wie Hitzewellen und Dürreperioden, aber auch Gewitter-, Hagel- und Starkniederschlagsepisoden, tropische Wirbelstürme, Tornados u. a. (dies im Einzelnen aber sehr unsicher)

3 Das Klima Sachsens

3.1 Besonderheiten des Klimas in Sachsen

Mitteleuropa hat bezüglich seiner geographischen Breite ein ausgesprochen mildes Klima, wenn man es mit Orten in Nordamerika oder Asien vergleicht, die auf dem gleichen Breitengrad oder gar noch südlicher liegen. Deutschland gehört zur warm-gemäßigten Klimazone der mittleren Breiten mit feuchttemperiertem Klima. Mit überwiegend westlichen Winden werden meist feuchte Luftmassen vom Atlantik herangeführt, die häufig zu Niederschlägen führen. Der ozeanische Einfluss, der von Nordwest nach Südost abnimmt, sorgt für relativ milde Winter und nicht zu heiße Sommer. Da in Deutschland der kontinentale Einfluss nach Osten hin eine immer größere Bedeutung erlangt, wird das Klima Sachsens im deutschlandweiten Vergleich bereits relativ stark kontinental geprägt.

Sachsen kann in drei verschiedene Klimabezirke unterteilt werden:

- Deutsches Mittelgebirgs-Klima (Erzgebirge; Vogtland)
- Deutsches Berg- und Hügelland-Klima (Mittelgebirgsvorland; Elbsandsteingebirge)
- Ostdeutsches Binnenland-Klima (Leipziger Tieflandsbucht; Lausitz; Elbtal)

Die gebirgige Südostgrenze Sachsens zu Tschechien bedeutet oft eine Wetterscheide, was sich längerfristig auch in den Klimacharakteristiken widerspiegelt. An der West-, Nord- und Ostgrenze dagegen bestehen fließende Übergänge zum Klima Thüringens, Sachsen-Anhalts, Brandenburgs und Polens. Im Sommer sind die Niederungen in Sachsen aufgrund des stärkeren kontinentalen Einflusses etwa genauso warm wie der milde Südwesten Deutschlands. Sachsen ist wegen seiner größeren Entfernung zum Atlantik relativ trocken. Die niederschlagsreichsten Gebiete sind die Westhänge der Erzgebirgskammlagen.

Durch die topographische Struktur (Relief) im zentralen Mitteleuropa wird das Klima Sachsens stark modifiziert. Bei südwestlichen Windrichtungen verursacht das Erzgebirge Föhneffekte mit entsprechender Erwärmung und zusätzlichem Regenschatten auf der Erzgebirgsnordseite. Großräumiger Nordwestwind bedeutet eine generelle, weiträumige Tendenz zum Ausgleich horizontaler Temperaturunterschiede durch die bei dieser Strömungsrichtung stärker ausgeprägte Turbulenz. Bei den mit besonders niedriger Turbulenz gekoppelten Südostwinden (einschließlich Föhnsituationen) ergeben sich hingegen außerordentlich vielfältige räumliche Klimadifferenzierungen in Sachsen.

Für den Niederschlag ist dabei die Lage der Gebirge relativ zur Hauptwindrichtung durch resultierende Luv- und Lee-Effekte von größter Bedeutung. Der Regenschatteneffekt der drei westlich vorgelagerten Mittelgebirge Fichtelgebirge, Thüringer Wald (mit Schiefergebirge) und Harz macht sich sogar noch im Erzgebirge bemerkbar. Besondere Effekte treten am Nordrand des Erzgebirges auf. Bei Windströmungen mit einer südlichen Komponente kommt es dort häufig zu einer Abschwächung von Niederschlagsfeldern und häufiger als in vielen anderen Regionen Deutschlands zu sonniger und warmer Witterung. Aus der relativ großen Häufigkeit von Nordwestwinden im Sommer und den entsprechenden Staueffekten auf der Nordseite des Erzgebirges resultiert eine Zunahme des sommerlichen Niederschlagsmaximums (Sommerregentyp). Im Erzgebirge gibt es somit im Gegensatz zu Harz und Thüringer Wald keine Gebiete mit einem Niederschlagsmaximum im Winter (Winterregentyp). Diese Besonderheiten spiegeln sich in Klimadiagrammen sächsischer Mittelgebirgsregionen in einem ausgeprägten Sommermaximum der Niederschläge wider. Allerdings verändern sich auch diese Monatsmittelwerte im Laufe der Zeit systematisch und/oder zufällig. Beispielsweise kommt das früher stark hervortretende Julimaximum an der Station Fichtelberg in den hier exemplarisch betrachteten Referenzzeiträumen immer schwächer zum Ausdruck (Abb. 3.1). Es ist sehr wahrscheinlich, dass im Zusammenhang mit den von Klimamodellen vorgezeichneten Änderungen der großräumigen Strömungsverhältnisse in Europa signifikante Veränderungen der mittleren Jahresgänge des Niederschlags eintreten werden. Hierbei könnten insbesondere Abnahmen der sommerlichen Nord- und Nordwestlagen und Zunahmen der Südwestwetterlagen im Winter eine bedeutende Rolle spielen.

Abb. 3.1:
Monatliche Niederschlagshöhen für die Referenzzeiträume 1931–1960 (hellgrün), 1951–1980 (grün) und 1961–1990 (dunkelgrün) an der Station Fichtelberg (Quelle: DWD, 1994; HEYER, 1984)

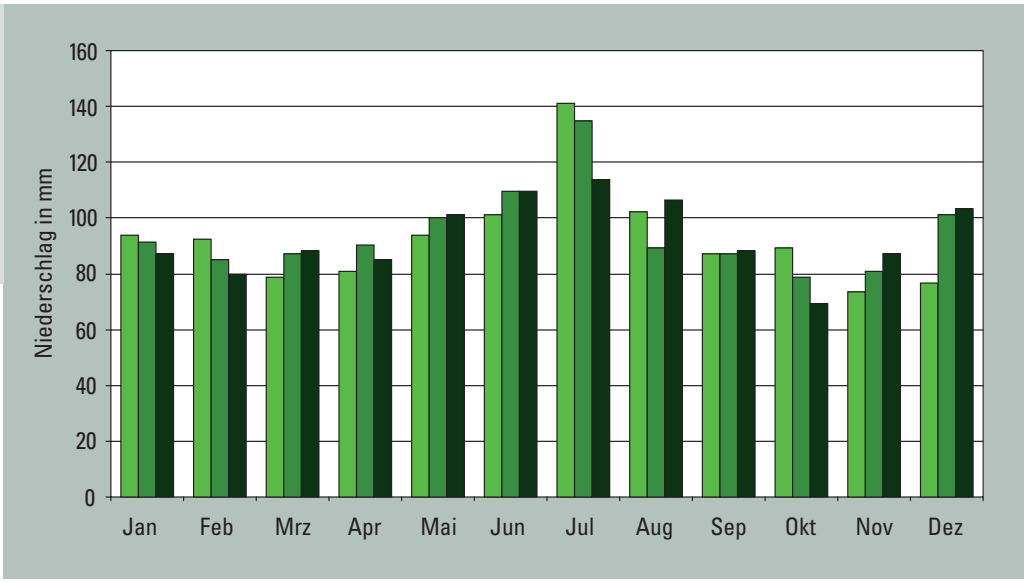
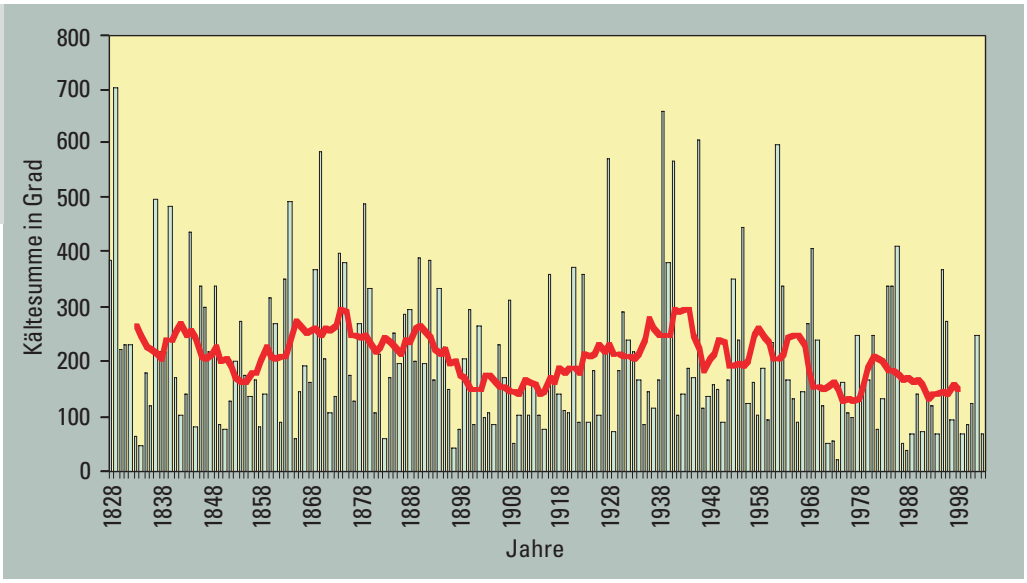


Abb. 3.2:
Kältesummen der Winterhalbjahre 1828/1829 bis 2003/2004 für den Raum Dresden sowie elfjährige gleitende Mittelwerte der Kältesummen (rote Kurve).



Die klimatische Entwicklung in den Jahreszeiten der letzten Jahrzehnte ist besonders durch die Milderung der Winter gekennzeichnet, die auch im Gang der Kältesummen (siehe Glossar) im Raum Dresden in Abb. 3.2 zum Ausdruck kommt. Der mittels linearer Regression geschätzte Rückgang der mittleren Kältesummen im betrachteten Zeitraum beläuft sich auf etwa 80 Grad. Der letzte strenge Winter wurde 1995/96 registriert, der letzte extrem strenge Winter trat 1962/63 auf. Der elfjährig übergreifende Gang der winterlichen Kältesummen lässt im Zeitabschnitt 1895 bis 1915 ein ähnlich niedriges Niveau wie in den vergangenen Jahrzehnten erkennen. Hieraus wird unter anderem deutlich, dass das natürliche Schwankungsspektrum der Winterstrenge in Sachsen recht groß ist. Eine Aussage darüber, ob die gegenwärtigen Änderungen den Bereich der natürlichen Variabilität bereits verlassen haben (etwa infolge der globalen Erwärmung), ist auf der vorliegenden Datenbasis nicht möglich.

Das Klima Sachsens im Wandel

Analysen der räumlich-zeitlichen Struktur der Klimaentwicklung in Europa in den letzten 100 Jahren lassen erkennen, dass Zirkulationsschwankungen im atlantisch-europäischen Raum und damit verbundene Variationen der Häufigkeitsverteilung der Großwetterlagen offenbar in enger Beziehung zu den korrespondierenden Änderungen der Klimaelemente stehen. Hieraus folgt auch die komplexe Struktur der beobachteten Temperaturtrends in Europa (vgl. Abb. 2.3). Aus diesen Beobachtungen und Relationen ist eine wichtige Schlussfolgerung zu ziehen: Die langfristigen Trends der Lufttemperatur und des Niederschlages im regionalen bzw. lokalen Bereich müssen nicht mit globalen Trends übereinstimmen, sondern können gebietsweise sogar gegenläufige Tendenzen aufweisen. Auf der Basis einzelner regionaler Trends der Klimaelemente in Sachsen kann der anthropogene Klimawandel somit weder nachgewiesen noch in Frage gestellt werden.

3.2 Großwetterlagen für die Beschreibung des Klimas

Aus der Definition des Klimabegriffs folgt, dass Wetterlagen zwar nicht einzeln für sich, wohl aber in ihrer Gesamtheit über einen längeren Zeitraum zur Beschreibung des Klimas und seiner Veränderungen beitragen können. Wenn sich die Häufigkeit bestimmter Wetterlagen über einen längeren Zeitraum hinweg signifikant verändert, kann man durchaus von einer Klimaänderung sprechen, denn charakteristisch für eine Wetterlage ist die räumliche Verteilung der atmosphärischen Größen, die auch das Klima beschreiben, wie z. B. Luftdruck, Lufttemperatur, Niederschlag und Wind. Es liegt also nahe, zunächst die Veränderungen der Wetterlagenhäufigkeiten im Verlauf des 20. Jahrhunderts zu untersuchen.

Die für Mitteleuropa primär genutzte Wetterlagenklassifikation ist diejenige nach Hess/Brezowsky (Hess u. Brezowsky, 1969; Gerstengarbe et al., 1993). Sie beschreibt **Großwetterlagen** (siehe Glossar), die als „die mittlere Luftdruckverteilung eines Großraumes, mindestens von der Größe Europas während eines mehrtägigen Zeitraumes" definiert werden. Die Länge eines solchen Zeitraumes wurde auf drei Tage festgelegt. Die Klassifizierung besteht darin, dass für jeden Tag die jeweilige Wettersituation, d. h. die Position der vorherrschenden Druckgebiete und die Lage der Frontalzone über Europa einer bestimmten Wetterlagenklasse zugeordnet wird. Eine Datenreihe dieser Klassen liegt seit 1881 vor und deckt damit das gesamte 20. Jahrhundert ab. Es handelt sich dabei um eine rein subjektive Klassifikation.

Auf der Grundlage der vom Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung überarbeiteten und aktualisierten Großwetterlagen Europas nach Hess/Brezowsky für den Zeitraum 1881–2000 konnten Tendenzen und Trends relevanter Großwetterlagen untersucht werden. Für Sachsen sind neben den vorherrschenden Westlagen insbesondere auch die für episodische Starkregenereignisse verantwortlichen Mittelmeerzyklonen oder so genannten Vb-Wetterlagen relevant. Während die Westwetterlagen den Osten Mitteleuropas, also auch Sachsen, meist in abgeschwächtem Zustand erreichen, spielen die **Vb-Wetterlagen** (siehe Glossar) gerade dort für Witterung und Klima eine große Rolle (Abb. 3.3).

Innerhalb Sachsens nimmt der Einfluss der häufig mit lang anhaltenden Starkniederschlägen gekoppelten Vb-Wetterlagen von West nach Ost zu. Die mit Vb-Zugbahnen der Tiefdruckgebiete gekoppelte Großwetterlage Trog Mitteleuropa zeigt im Sommer in den letzten Jahrzehnten eine zunehmende Tendenz (Abb. 3.4). Der Fragestellung, inwieweit sich diese Entwicklungen im Zuge des Klimawandels voraussichtlich fortsetzen werden, wird forschungsseitig gegenwärtig nachgegangen.

Seit Ende der sechziger Jahre ist in den Wintermonaten eine Zunahme der zonalen Zirkulation bzw. der West- und Südwestwetterlagen zu beobachten, die in Deutschland zu insgesamt milderen und feuchteren Wintern geführt hat. In den Sommermonaten ist andererseits seit den fünfziger Jahren eine Abnahme der von relativ kühler und feuchter Witterung begleiteten West- und Nordwestwetterlagen zu verzeichnen.

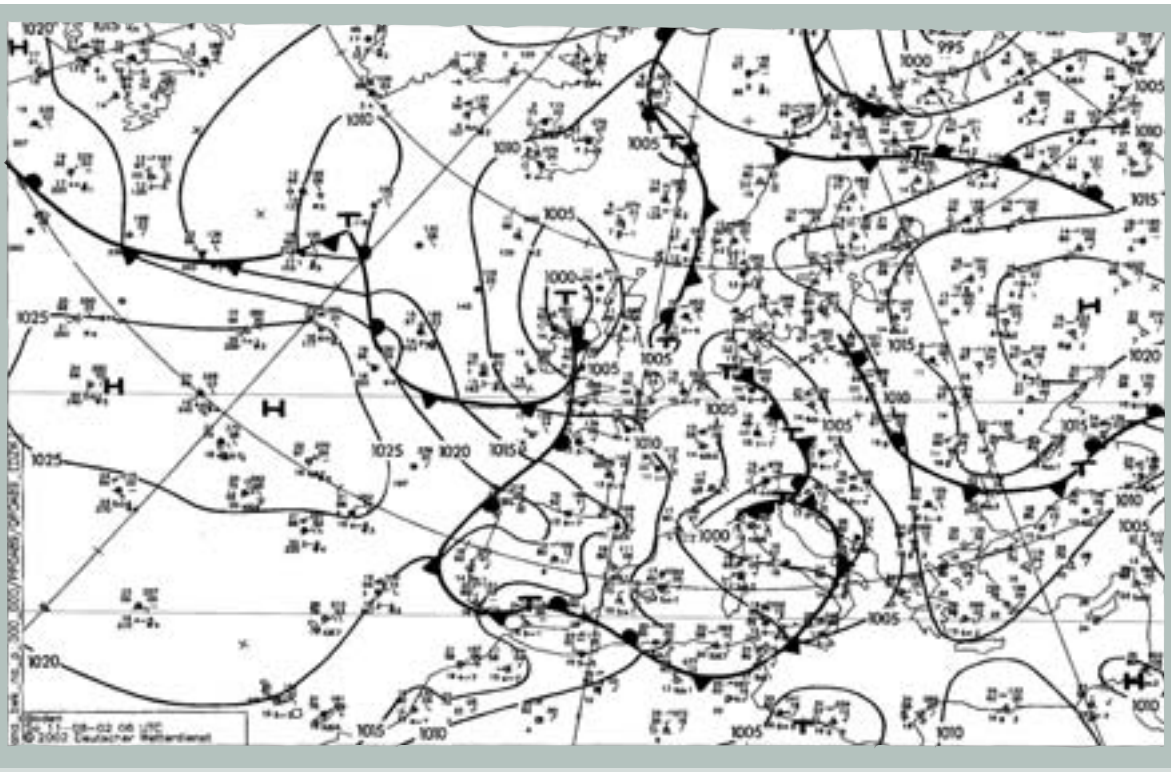
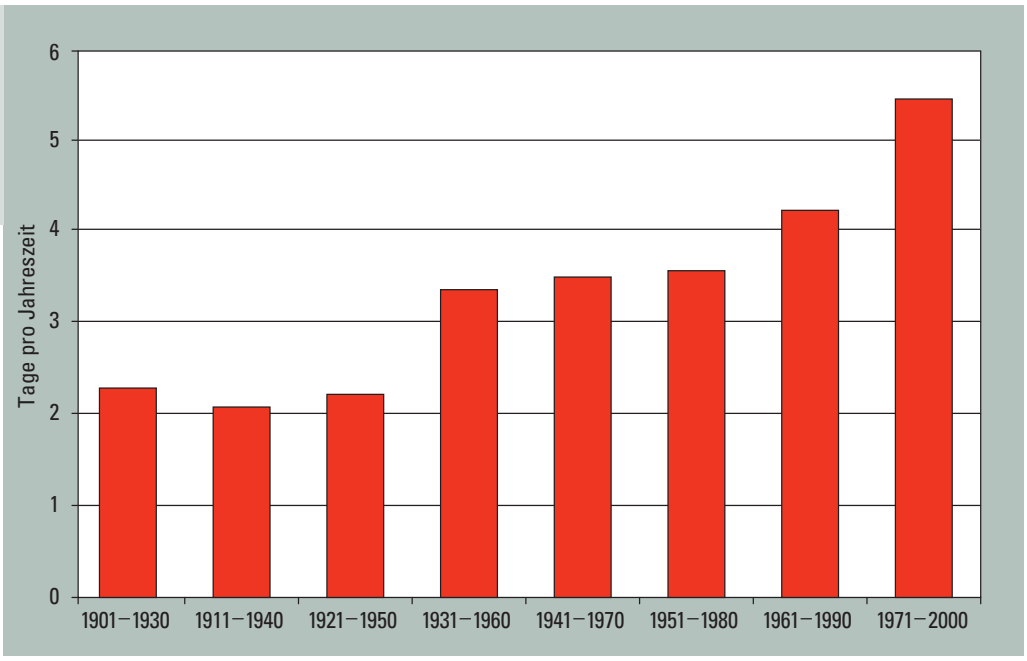


Abb. 3.3: Vb-Wetterlage/Bodenwetterkarte vom 11. August 2002

Aktuelle globale Klimaszenarien zeigen, dass sich die gegenwärtig zu beobachtenden Tendenzen in Richtung Zirkulationsumstellung in Mitteleuropa offensichtlich fortsetzen werden. Somit muss in weiten Teilen Sachsens vor allem im Sommerhalbjahr künftig mit im Mittel geringeren Niederschlägen und einer stärkeren Verdunstung infolge des Temperaturanstiegs gerechnet werden.

Inzwischen werden spezifische Untersuchungen für Sachsen auf der Grundlage einer *objektiven* (automatische Zuordnung aus numerischen Analysedaten) Wetterlagenklassifikation durchgeführt. Die Methodik ist jederzeit nachvollziehbar – immer mit dem gleichen Ergebnis. Es gibt keine unbestimmten Fälle. Aus diesen Gründen wurde – im Vergleich zur „subjektiven" Klassifikation des Meteorologen – die Bezeichnung „objektive" Wetterlagenklassifikation abgeleitet. Es zeigte sich, dass die Unterschiede zwischen objektiver und subjektiver Wetterlagenklassifikation des Temperaturregimes relativ gering sind, beim Niederschlag jedoch deutlicher hervor treten.

Abb. 3.4:
Entwicklung der Häufigkeiten der Großwetterlage Trog Mitteleuropa im Sommer in Mitteleuropa 1901–2000 (jeweils aggregiert über 30 Jahre)



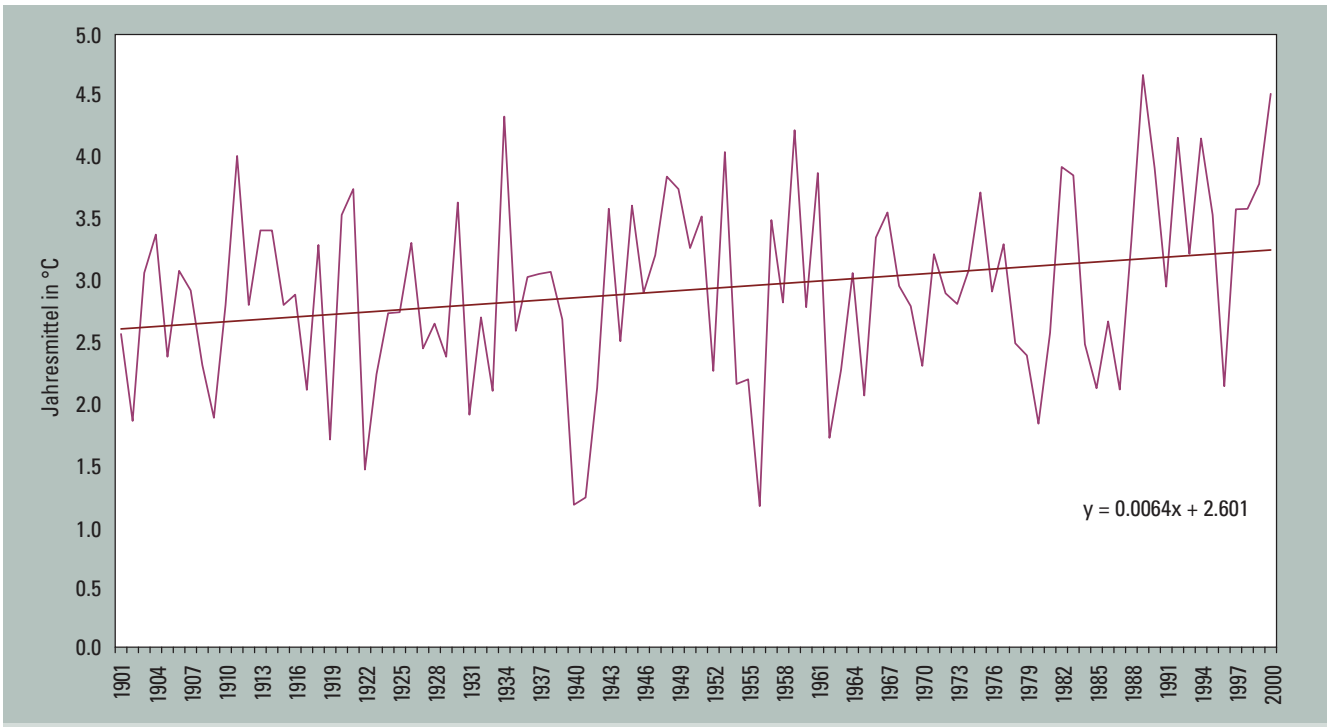


Abb. 3.5: Trend der Jahresmittelwerte der Lufttemperatur 1901–2000 auf dem Fichtelberg (1214 m ü. NN)

3.3 Tendenzen und Trends des sächsischen Klimas

Klimadiagnose

Untersuchungen zur Klimaentwicklung in Deutschland seit 1900 dokumentieren einen Anstieg des Jahresmittels der Lufttemperatur um 0,9 Grad, der in den Wintermonaten der letzten Jahrzehnte sogar noch drastischer ausfällt. Der in Abb. 3.5 exemplarisch dargestellte Trend der Lufttemperatur auf dem höchsten Gipfel Sachsens zeigt einen langfristigen Anstieg der Jahresmittel um 0,6 Grad.

In den vergangenen 30 Jahren hat sich die großräumige Zirkulation in Europa signifikant verändert, wobei gegenläufige Tendenzen zwischen Sommer- und Winterhalbjahr zu erkennen sind (Abb. 3.6). Diese Veränderungen spiegeln sich auch in den sächsischen Klimadatenreihen wider. Im Rahmen sächsischer Forschungsvorhaben (Sächsisches Landesamt für Umwelt und Geologie, 2001, 2002; Franke et. al., 2004) wurden umfangreiche statistische Untersuchungen regionaler Klimatrends für die verschiedenen Regionen des Freistaates Sachsen durchgeführt. Auf der Grundlage dieser Analysen lassen sich kurz zusammengefasst folgende Aussagen treffen:

Die Jahresmitteltemperatur hat sich in den letzten 50 Jahren flächendeckend um 1 Grad erhöht, wobei die weitaus stärksten Zunahmen im Winter zu verzeichnen sind. Winterniederschläge zeigen vielerorts eine Zunahme, wobei diese Tendenz nördlich des Erzgebirgskammes in Folge von Föhneffekten deutlich schwächer in Erscheinung tritt. Auffallend ist eine markante Niederschlagsabnahme in Nordsachsen um etwa 10 bis 30 % im Sommer. Eine gegenüber anderen sächsischen Regionen vergleichsweise geringe Abnahme der Niederschläge ist im Sommer für Stationen des Erzgebirgskammes zu konstatieren. Die Häufigkeit ergiebiger Niederschläge (Tagessummen ≥ 10 mm) nimmt in allen Gebieten Sachsens geringfügig ab. Dauer und Mächtigkeit der Schneedecke in den sächsischen Mittelgebirgen haben abgenommen.

Hinsichtlich der Entwicklung der Wetterextreme zeichnen sich gegenwärtig folgende Tendenzen ab:

- In den Monaten April, Mai und Juni (Vegetationsperiode 1) nimmt sowohl die Häufigkeit als auch die maximale Länge von Trockenperioden im Mittel zu. Am stärksten ausgeprägt ist dieser Trend in Nordsachsen.
- Für Starkregen (Tagessummen ≥ 20 mm) ist in den Monaten Juli und August eine signifikante Zunahme der Häufigkeit zu beobachten.

Klimaprojektion

Der absehbare globale Klimawandel im 21. Jahrhundert wird in Europa mit signifikanten Veränderungen der atmosphärischen Zirkulation verbunden sein. Klimasimulationen für Sachsen deuten darauf hin, dass sich hierbei die gegebene räumliche Differenzierung der Klimatrends noch weiter verstärken wird (Abbildungen 3.7 bis 3.10). Die Veränderungen werden sich dann vor allem in den Niederschlagscharakteristiken widerspiegeln.

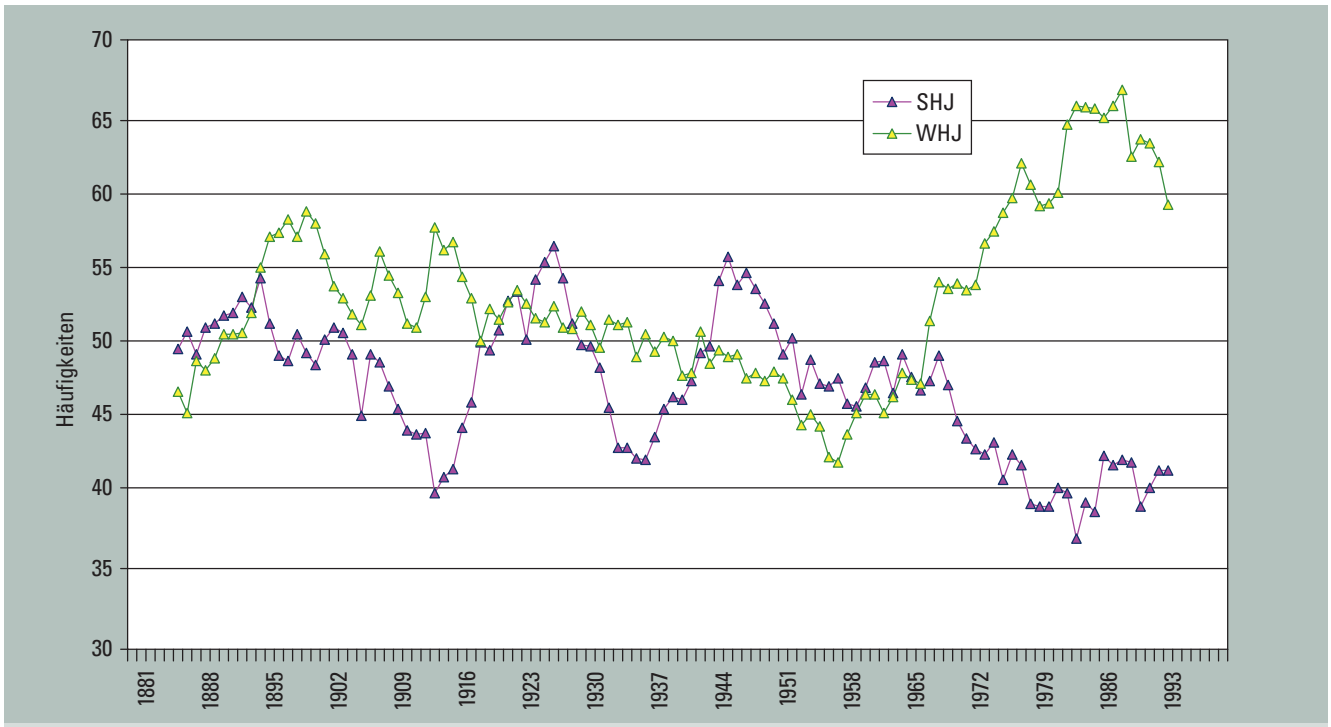


Abb. 3.6: Häufigkeiten des Großwettertyps West im Sommer- und im Winterhalbjahr in Mitteleuropa 1881–1998 (gleitende Mittel über jeweils 11 Jahre)

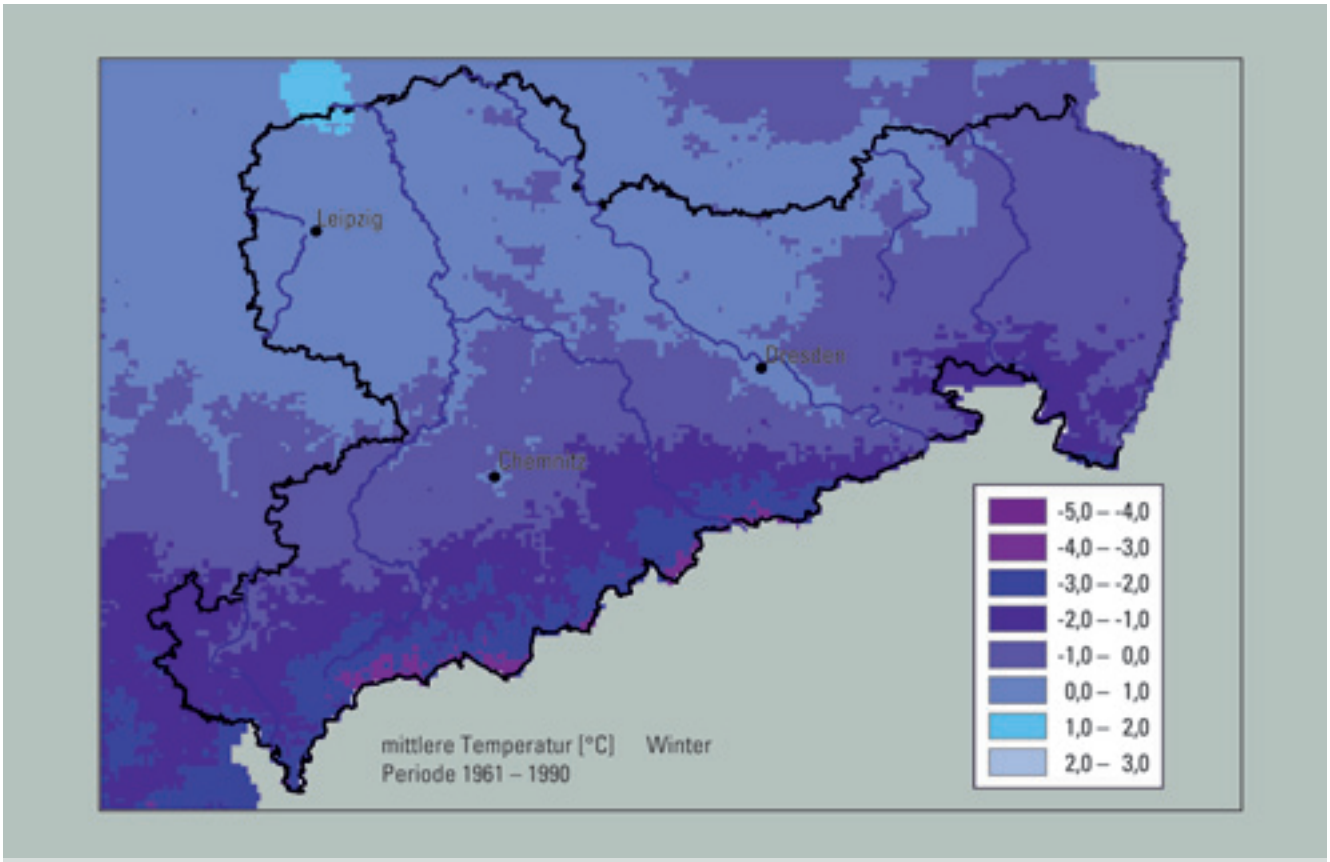


Abb. 3.7: Diagnostizierte 30-jährige Wintermittelwerte der Lufttemperatur Zeitraum 1961–1990

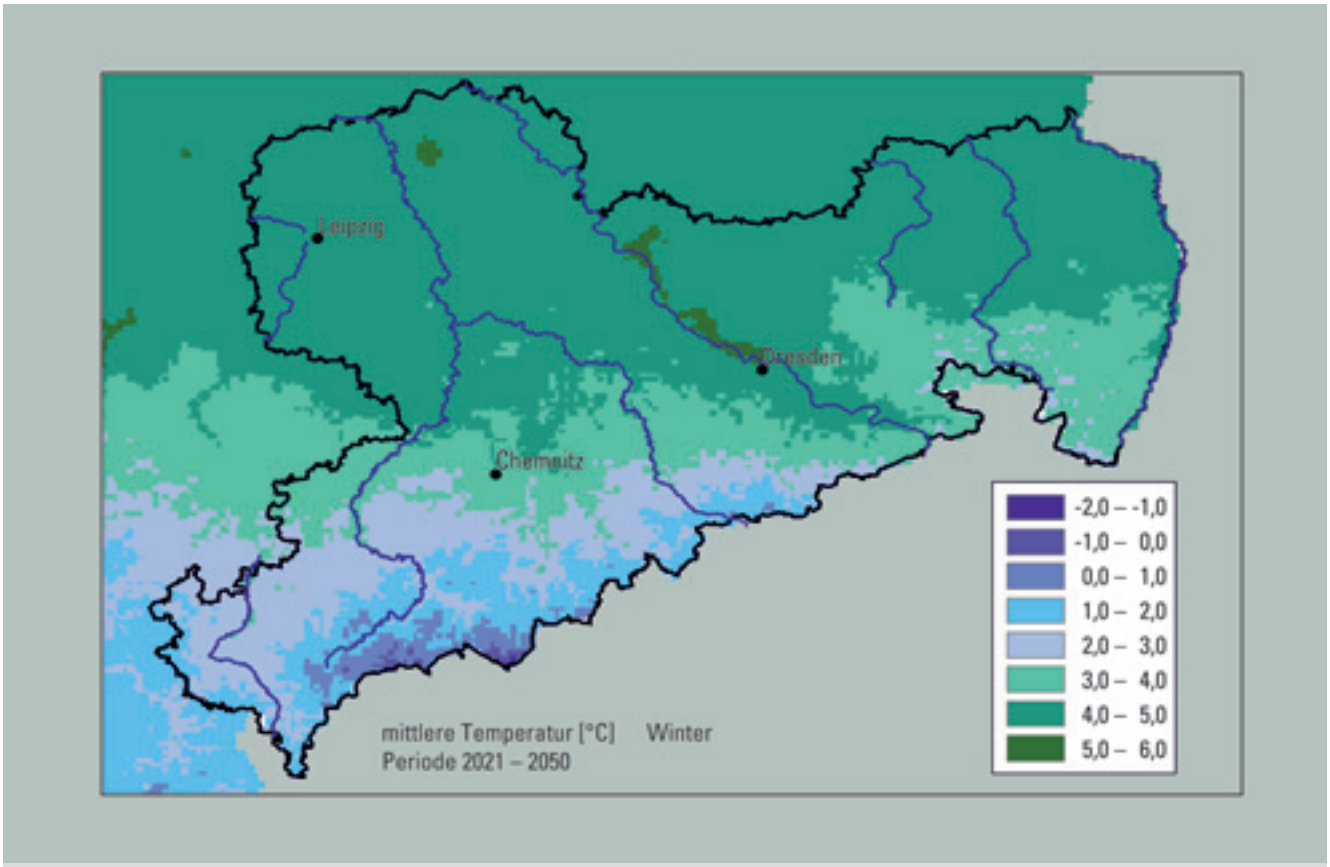


Abb. 3.8: Projizierte 30-jährige Wintermittelwerte der Lufttemperatur Zeitraum 2021–2050

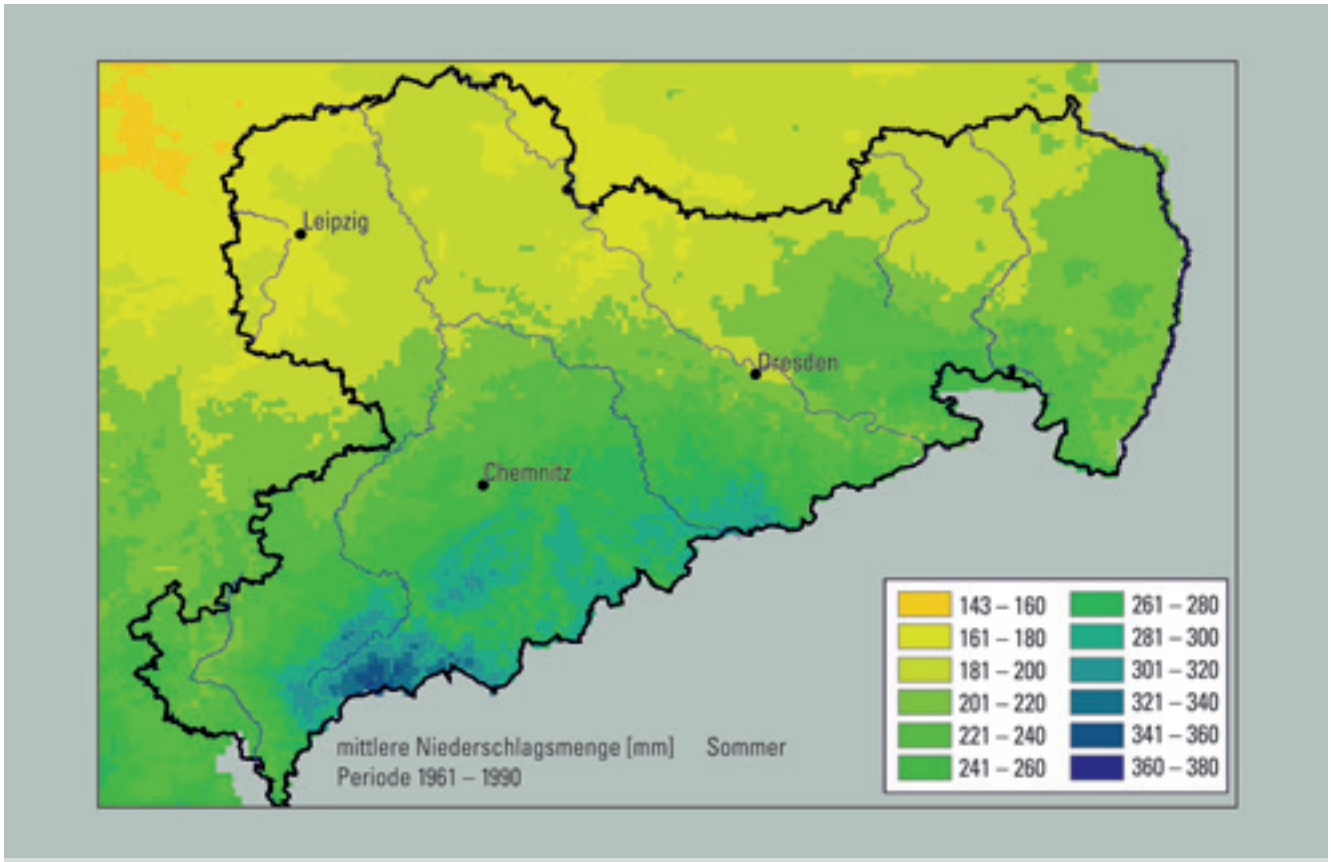


Abb. 3.9: Diagnostizierte 30-jährige Sommermittelwerte der Niederschlagsmenge Zeitraum 1961–1990

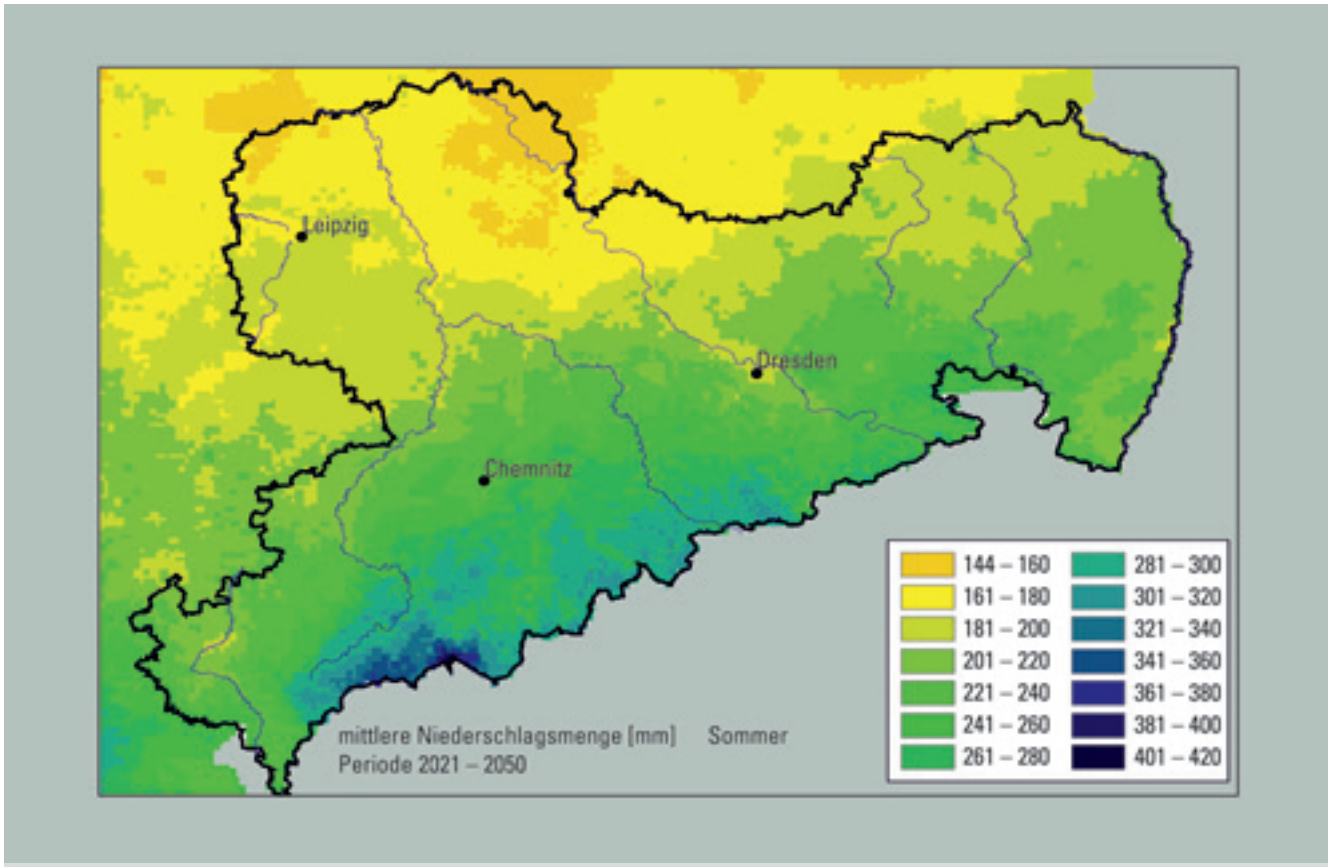


Abb. 3.10: Projizierte 30-jährige Sommermittelwerte der Niederschlagsmenge Zeitraum 2021–2050

In Abb. 3.7 und Abb. 3.8 sind Normalwerte der Lufttemperatur im Winter für den Referenzzeitraum 1961–1990 sowie mit dem sächsischen Klimamodell WEREX (siehe Glossar) projizierte Mittelwerte der Lufttemperatur für die Winter im Zeitraum 2021–2050 dargestellt. Deutlich zu erkennen ist die im Mittel zu erwartende markante Erwärmung um meist etwa 3 Grad. Entsprechend diagnostizierte und projizierte Mittelwerte für die Niederschlagsmenge im Sommer werden in Abb. 3.9 und Abb. 3.10 wiedergegeben und lassen vor allem im nördlichen Sachsen auf signifikante Abnahmen schließen.

Nach neuesten Projektionen des sächsischen Klimas bis zum Jahr 2100 erfolgt die Entwicklung der Niederschläge insbesondere in den Sommermonaten nicht gleichmäßig. Auf trockenere Jahrzehnte folgen auch relativ feuchte Jahrzehnte. Dieser Variabilität ist ein langfristiger Trend zu zunehmend trockeneren Sommern überlagert. Insgesamt werden die Sommer aufgrund geringerer Niederschläge und die stärkere Verdunstung infolge Temperaturerhöhung stärker durch lang anhaltende Trockenperioden und Dürre geprägt sein als heute. Aus der Kenntnis dieser detaillierten Informationen ergeben sich auch Chancen im Sinne der Entwicklung vorausschauender Anpassungsstrategien.

3.4 Die Sächsische Klimadatenbank

Im Auftrag des Sächsischen Landesamtes für Umwelt und Geologie wurde in den Jahren 2001/2002 innerhalb der Projekte CLISAX („Statistische Untersuchungen regionaler Klimatrends in Sachsen") und CLISAX II („Assimilation von standardisierten und abgeleiteten Klimadaten für die Region Sachsen und Ausbau der Sächsischen Klimadatenbank") die Sächsische Klimadatenbank durch die Professur für Meteorologie der TU Dresden mit Unterstützung des Deutschen Wetterdienstes (DWD) und des Czech Hydrometeorological Institut (CHMI) aufgebaut. Die Datennutzung regelt sich, an den Zielstellungen bei der Schaffung der Sächsischen Klimadatenbank ausgerichtet, nach den Vorgaben der beteiligten Institutionen.

Folgende Zielstellungen werden mit dem Aufbau der Sächsischen Klimadatenbank verfolgt:

- zentrale Verwaltung aller für die Region Sachsen beschaffbarer Klimadaten (DWD, CHMI, TU Dresden, diverse Datenarchive)
- Datengrundlage zur Klimadiagnose für Sachsen
- Datengrundlage zur Klimaprojektion für Sachsen
- Datengrundlage zur Erzeugung von Flächendaten
- Datengrundlage für öffentliche Planungs-, Informations- und sonstige wissenschaftliche Arbeiten
- effektive Datenbereitstellung für vom Sächsischen Landesamt für Umwelt und Geologie geförderte Forschungsprojekte

Die Sächsische Klimadatenbank enthält aktuell folgende auf Homogenität geprüfte Datenreihen mit Tages- bzw. Monatswerten:

- Niederschlag: 188 deutsche und 24 tschechische Stationen
- Temperatur: 78 deutsche und 32 tschechische Stationen
- Relative Feuchte: 52 deutsche und 32 tschechische Stationen
- Windgeschwindigkeit: 44 deutsche und 32 tschechische Stationen
- Globalstrahlung (Angström): 51 deutsche und 25 tschechische Stationen
- Potentielle Verdunstung (Penman): 37 deutsche und 25 tschechische Stationen

Als Quellen wurden hauptsächlich zu digitalisierende Archive des DWD und des Institutes für Hydrologie und Meteorologie der TU Dresden (IHM) sowie die Datenbanken vom DWD, CHMI und IHM genutzt. Bei den Archiven handelt es sich um Grundblätter, Meteorologische Jahrbücher, Monatliche Witterungsberichte, Witterungsübersichten für Sachsen, Wetterkarten, Witterungsreporte und tägliche Wetterberichte.

Weiterhin sind die subjektiven Großwetterlagen (Europa) nach Hess u. Brezowsky ab 1881 sowie objektiven Wetterlagen nach Enke ab 1951 in der Sächsischen Klimadatenbank enthalten.

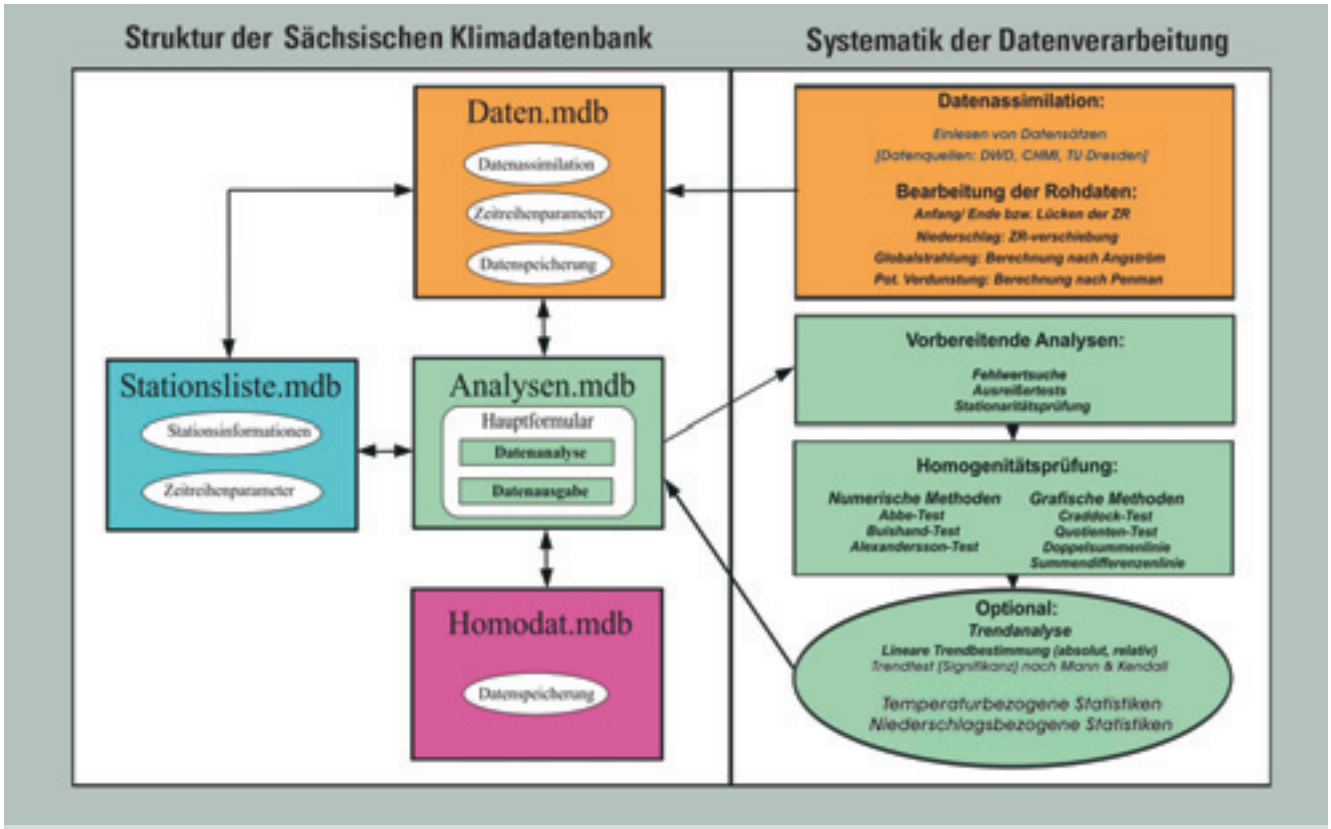


Abb. 3.11: Struktur und Systematik der Sächsischen Klimadatenbank

Die Sächsische Klimadatenbank ist ein Datenbankkomplex, welcher aus vier verknüpften Subdatenbanken besteht. Die Subdatenbanken realisieren zur Datenverwaltung die Funktionen:

- Zeitliche Fortführung von Rohdaten
- Berechnung von Zeitreihenparametern
- Berechnung abgeleiteter bzw. komplexer Klimagrößen
- Datenspeicherung
- Datenprüfung mittels Fehlwertsuche, Ausreißertest, Stationaritätsprüfung, graphischer und numerischer Homogenitätstests (relative Homogenität)
- Datenanalyse durch Trendberechnungen mit Prüfung auf Signifikanz, niederschlags- und temperaturbezogene Statistiken
- Daten extrahieren

Um die Anforderungen an die Sächsische Klimadatenbank auch zukünftig erfüllen zu können ist die Datenbankpflege eine stetige Aufgabe. Das umfasst die Assimilation der Daten weiterer Stationen, die Aktualisierung der Zeitreihen und die Optimierung bzw. Anpassung der Datenbankfunktionen. Es wird angestrebt, auch polnische Klimadaten in die Sächsische Klimadatenbank aufzunehmen.

Weiterhin sollen Zeitreihen zur Klimaprojektion in Sachsen sowie von Daten höherer zeitlicher Auflösung in die Klimadatenbank integriert werden.

Der Regionalbezug sowie die zentrale Datenpflege und -verwaltung der Sächsischen Klimadatenbank ermöglichen eine hohe Qualität und Effektivität bei der Bereitstellung von sächsischen Klimadaten entsprechend den unterschiedlichen Anforderungen der Nutzer.

4 Klimaprojektionen für Sachsen

4.1 Globale und regionale Klimamodelle

Die Erkenntnis, dass der Mensch weitestgehend für die beobachtete globale Erwärmung der Erdatmosphäre verantwortlich ist, macht es notwendig, die voraussichtliche Entwicklung und die möglichen Konsequenzen eines sich schnell verändernden Klimas für Natur und Mensch bestmöglich abzuschätzen. Zur Entwicklung geeigneter Klimaschutzstrategien sind belastbare Prognosen des sich abzeichnenden Klimawandels unerlässlich. Klimaprognosen sind jedoch keine Vorhersagen, sondern Projektionen des künftigen Klimas in Abhängigkeit von möglichen Verhaltensweisen der menschlichen Gesellschaft. Ziel ist es, zuverlässige Aussagen über das Ausmaß sowie die regionale Ausprägung der nach diesen Szenarien zu erwartenden globalen Klimaänderungen zu erhalten. Klimamodelle sind quantitative Beschreibungen des Klimasystems. Dabei werden die entsprechenden atmosphärischen Zustände und Prozesse durch zeitabhängige mathematische Gleichungen beschrieben. Zur Projektion des Klimawandels sind komplexe Computersimulationen unerlässlich. Eine wesentliche Aufgabe der Klimaforschung besteht darin, die komplexen Simulationsergebnisse der globalen Klimamodelle auf einen regionalen Maßstab zu übertragen (Regionalisierung). Für Projektionen des sächsischen Klimas wird das statistische Regionalisierungsverfahren WEREX (Sächsisches Landesamt für Umwelt und Geologie, 2003 a, b) der Firma Meteo-Research eingesetzt.

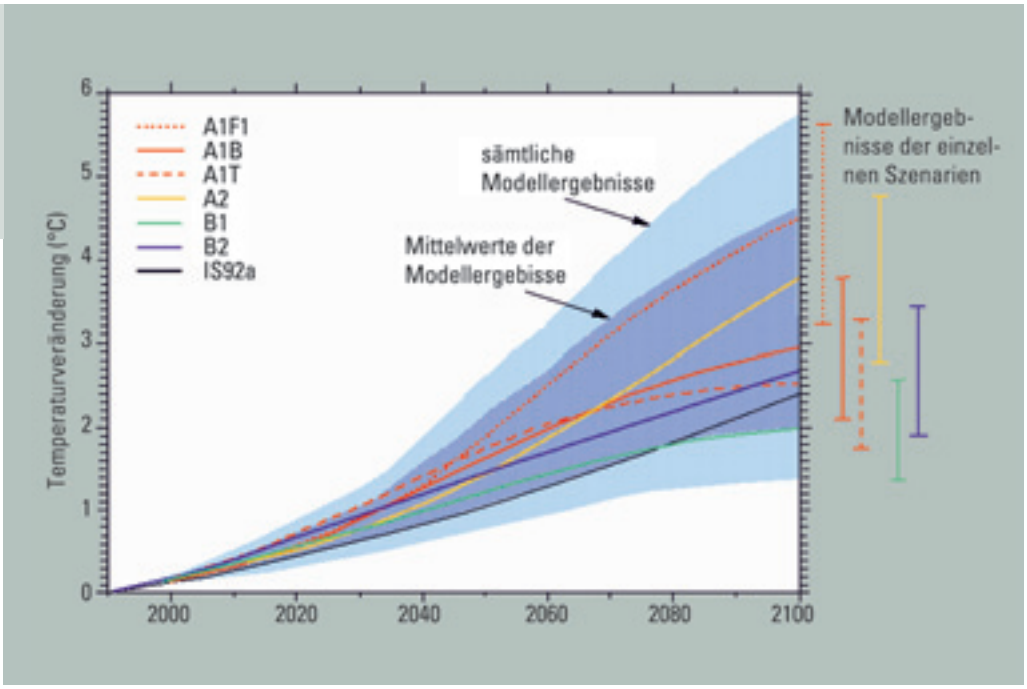
Globale Klimamodelle

Klimamodelle simulieren das Klimasystem und seine möglichen zukünftigen Veränderungen. Globale Klimamodelle, wie sie an allen namhaften Klimazentren der Welt entwickelt werden, sind die derzeit besten Instrumente, künftige Klimaänderungen zu simulieren und zu beschreiben. Das eingesetzte Klimamodell muss zunächst in der Lage sein, die jüngste Klimageschichte möglichst detailgetreu zu simulieren. Die Leistungsfähigkeit sowohl globaler als auch regionaler Modelle ist also insbesondere daran zu messen, wie gut das globale bzw. regionale heutige Klima durch die Simulationen beschrieben wird. Die bekanntesten und am weitesten entwickelten Klimamodelle, die die atmosphärischen Prozesse als Teil des Klimasystems erfassen, sind die Globalen Zirkulations-Modelle (GCM's; siehe Glossar). Im Kern unterscheiden sie sich dabei nicht von den Wettervorhersagemodellen. Während Wettervorhersagemodelle aufgrund des chaotischen Charakters der Atmosphäre jedoch lediglich den Ablauf von Prozessen in der Atmosphäre bis zu ca. zwei Wochen prognostizieren können, berechnen Klimamodelle statistische Kenngrößen (z. B. Mittelwerte der Temperatur) und die Änderung dieser Werte bei sich wandelnden Randbedingungen (z. B. Verdoppelung des CO_2-Gehaltes der Atmosphäre; $2 \times CO_2$-Szenario) über Jahrzehnte bis Jahrhunderte.

Der nichtlineare Charakter der Atmosphäre führt dazu, dass kleine Fehler in den *Anfangsbedingungen* der Wetterprognosemodelle rasch anwachsen und damit die Unsicherheit der Wettervorhersagen innerhalb weniger Tage schnell erhöhen. Für Klimamodelle sind im Unterschied dazu nicht die Anfangsbedingungen, sondern möglichst zuverlässige Annahmen über globale *Randbedingungen* ausschlaggebend (z. B. SRES-Emissionsszenarien für unterschiedliche Wirtschafts-, Bevölkerungs- und Technologieentwicklung). Im Unterschied zu Wettervorhersagen besteht die Aufgabe einer Klimamodellierung nicht in der Vorhersage des konkreten Wettergeschehens für ein bestimmtes Zeitintervall, sondern in der Vorhersage statistischer Kenngrößen, die den mittleren Zustand und die Variabilität des Wettergeschehens unter diesen veränderten Randbedingungen in der Zukunft beschreiben.

Heute werden die Simulationen des künftigen Klimas unter Annahme plausibler Randbedingungen mit Hilfe von gekoppelten Ozean-Atmosphäre-Modellen durchgeführt. Sie entstehen durch Ankopplung globaler ozeanischer Zirkulationsmodelle an die o. g. GCM's für die Atmosphäre. Die aktuellen Klimamodellversionen des Deutschen Klimarechenzentrums (DKRZ) in Hamburg enthalten für die Atmosphäre 19 übereinander liegende Schichten, die bis in eine Höhe von ca. 30 km reichen, für den Ozean 11 Schichten bis in eine Tiefe von 5 000 m bzw. bis zum Tiefseeboden. Komplexe Ozean-Atmosphären-Modelle sind in der Lage, die zukünftige Entwicklung des Klimas abzuschätzen. Da Klimasimulationen auch für historische Zeitabschnitte durchgeführt werden können bzw. durchgeführt werden, kann man die Zuverlässigkeit der zu Grunde gelegten Modelle inzwischen recht gut beurteilen. Durch die erfolgreiche Validierung der Klimamodelle hat sich das Vertrauen in die auf gleicher Modellbasis realisierten Klimaprojektionen für das 21. Jahrhundert deutlich erhöht.

Abb. 4.1:
Simulierte Temperaturänderung im 21. Jahrhundert gegenüber 1990 für die SRES-Emissionsszenarien
(Quelle: IPCC)



Die Projektionen über die zukünftige globale Klimaentwicklung zeigen mit weiterer Verbesserung der Klimamodelle eine zunehmende Übereinstimmung. Die erwartete globale Erwärmung im 21. Jahrhundert wird mit der vom IPCC angegebenen Spanne von 1,4 bis 5,8 Grad das Ausmaß der bereits beobachteten Temperaturzunahme im 20. Jahrhundert von 0,7 Grad erheblich übertreffen (Abb. 4.1). Die dargestellte Spannweite der Projektion der Lufttemperatur ergibt sich aus der Zugrundelegung verschiedener Emissionsszenarien einerseits und den auf dieser Basis realisierten Projektionen mittels der weltweit eingesetzten globalen Klimamodelle andererseits.

Regionale Klimamodelle

Mit globalen Klimamodellen ist es gegenwärtig noch nicht möglich, die konkrete Klimaentwicklung in einer Region (z. B. Sachsen) zuverlässig zu simulieren, da diese für regionale und lokale Prognosen eine immer noch zu geringe Auflösung besitzen. Erst nach weiteren Optimierungen der globalen Klimamodelle und mit der Entwicklung neuer Computergenerationen kann damit gerechnet werden, dass rein dynamische Modellvarianten für Regionalisierungen Erfolg versprechend herangezogen werden können.

Um dennoch zu zuverlässigen Aussagen über regionale Auswirkungen zu gelangen, kommen regionale Klimamodelle zur Anwendung, die in der Regel Ergebnisse globaler Modellsimulationen als Eingangsgrößen verwenden. Als Regionalisierungsansätze lassen sich statistische, dynamische und gemischte statistisch-dynamische Methoden unterscheiden:

- **Genestete hoch auflösende regionale Klimamodellierung (dynamische Methoden)**
  Für eine vorgegebene Region wird ein zeitlich und räumlich höher aufgelöstes dynamisches Modell in ein globales Modell eingebettet. Mit diesem Modelltyp ist eine vollständige Simulation des Klimas auf lokaler Ebene möglich.

- **Statistisch-dynamische Zeitscheibenmodellierung (gemischte Methoden)**
  Ein hoch auflösendes dynamisches Modell wird für typische Wettersituationen oder Anströmrichtungen der Luftmassen an Gebirgen (z. B. aus großräumigen Druckverteilungen) berechnet. Mit Hilfe dieser für typische Wetterlagen durchgeführten regionalen Modellsimulation wird über die Häufigkeitsverteilung der Wetterlagen eines Klimaszenarios das lokale Klima simuliert.

- **Statistisches Downscaling**
  Die zeitlichen Bezüge zwischen den Resultaten des globalen Modells und den lokalen Messreihen von Klimagrößen werden mittels geeigneter statistischer Methoden hergestellt. Grundsätzlich haben alle statistischen Modelle gegenüber dynamischen Modellen den Vorteil, hinsichtlich erforderlicher Rechenzeit und Personaleinsatz äußerst kosteneffizient zu sein.

Die globalen Modelle simulieren einen möglichen zukünftigen Wetterablauf, der über den betrachteten Zeitraum statistisch ausgewertet werden kann, um voraussichtliche Veränderungen im durchschnittlichen Verhalten des Wetters (Klima) zu ermitteln. In den globalen Simulationen spiegeln sich damit auch Veränderungen der atmosphärischen Zirkulation wider.

In Deutschland wurden erste Pilotstudien zur regionalen Klimaentwicklung auf der Basis unterschiedlicher Simulationsmodelle in den 90er Jahren durchgeführt (Gerstengarbe et al., 1996; Bayerischer Klimaforschungsverbund, 1999). Bei allen Klimaprojektionen für den Freistaat Sachsen (seit 1999) wurden statistische Beziehungen zwischen den großräumigen Informationen der globalen Modelle (z. B. Felder des Geopotentials) und lokalen Klimagrößen (z. B. Niederschlag an sächsischen Stationen) verwendet. Dadurch können die von globalen Klimamodellen vorgezeichneten Änderungen objektiver Wetterlagen direkt zu ihren möglichen lokalen und regionalen Auswirkungen im sächsischen Raum in Beziehung gebracht werden (Wetterlagenkonzept). Inzwischen ist dieses Modell weiter entwickelt worden und erlaubt qualitativ deutlich verbesserte Projektionen der künftigen regionalen Klimaentwicklung. Das nachfolgend skizzierte Wetterlagenkonzept stellt das Grundgerüst für die diskutierten sächsischen Klimasimulationen dar.

Das Wetterlagenkonzept

Im regionalen Maßstab stellen die Veränderungen der atmosphärischen Zirkulationsparameter im atlantisch-europäischen Raum die wichtigste Ursache für die regionalen bzw. lokalen Klimaänderungen in Mitteleuropa dar. Das sächsische Klima wird dabei im Wesentlichen durch die Veränderungen des Strömungssystems im atlantischen Ozean und die Nordatlantische Oszillation (NAO) beeinflusst, deren Fluktuationen und Trends den mittel- und längerfristigen Ablauf der Witterung in Mitteleuropa entscheidend prägen. Es kann davon ausgegangen werden, dass künftige Klimaänderungen mit Veränderungen der Zirkulationsverhältnisse bzw. der Veränderung von Häufigkeit und Andauer der **Großwetterlagen** (siehe Glossar) gekoppelt sein werden. Simulationen mittels globaler Klimamodelle bilden die Grundlage für eine bestmögliche Projektion der großräumigen Zirkulation. Auf der Basis entsprechender Modelloutputs globaler Modelle können voraussichtliche Veränderungen der Häufigkeiten und Andauern der charakteristischen Wetterlagen in den nächsten Jahrzehnten dargestellt werden.

In der Praxis fasst man verwandte Großwetterlagen zu Großwettertypen zusammen. In Abb. 4.2 werden exemplarisch die großräumigen Strömungsverhältnisse bei den Großwettertypen West und Tief Mitteleuropa dargestellt.

Durch das Zusammenspiel der Klimafaktoren Relief und atmosphärische Zirkulation im zentralen Mitteleuropa wird das Klima Sachsens stark modifiziert. Die Vielgestaltigkeit des Witterungsablaufs bei bestimmten Großwetterlagen und die hohe räumliche Variabilität des regionalen Klimas in Deutschland sind vor allem auf die Ausrichtung unserer Mittelgebirge und die damit verbundenen Stau- und Föhngebiete bei vorherrschender Südwest- bzw. Nordwestströmung zurückzuführen. So bildet das Erzgebirge ausgeprägte Stau- und Föhngebiete bei Nordwestströmung; für den Thüringer Wald trifft dies in gleicher Weise bei vorherrschender Südwestströmung zu. In Folge dieses Stau- und Föhneffektes treten auf relativ engem Raum deutliche Unterschiede der Niederschlagsmengen, in geringerem Maße auch der Niederschlagshäufigkeit, auf. Bereits auf kleinere Änderungen der Häufigkeits- und der jahreszeitlichen Verteilung der mit den Zirkulationsprozessen verbundenen Wetterlagen reagiert das regionale Klima in Sachsen insofern sehr empfindlich. Die Beantwortung der Frage, inwieweit sich gegenwärtig zu beobachtende Tendenzen und Trends einer Zirkulationsumstellung in Zukunft fortsetzen oder verändern werden, bildet die Grundlage für Prognosen der lokalen und regionalen Temperatur- und Niederschlagsverhältnisse in Sachsen bis zum Jahr 2100.

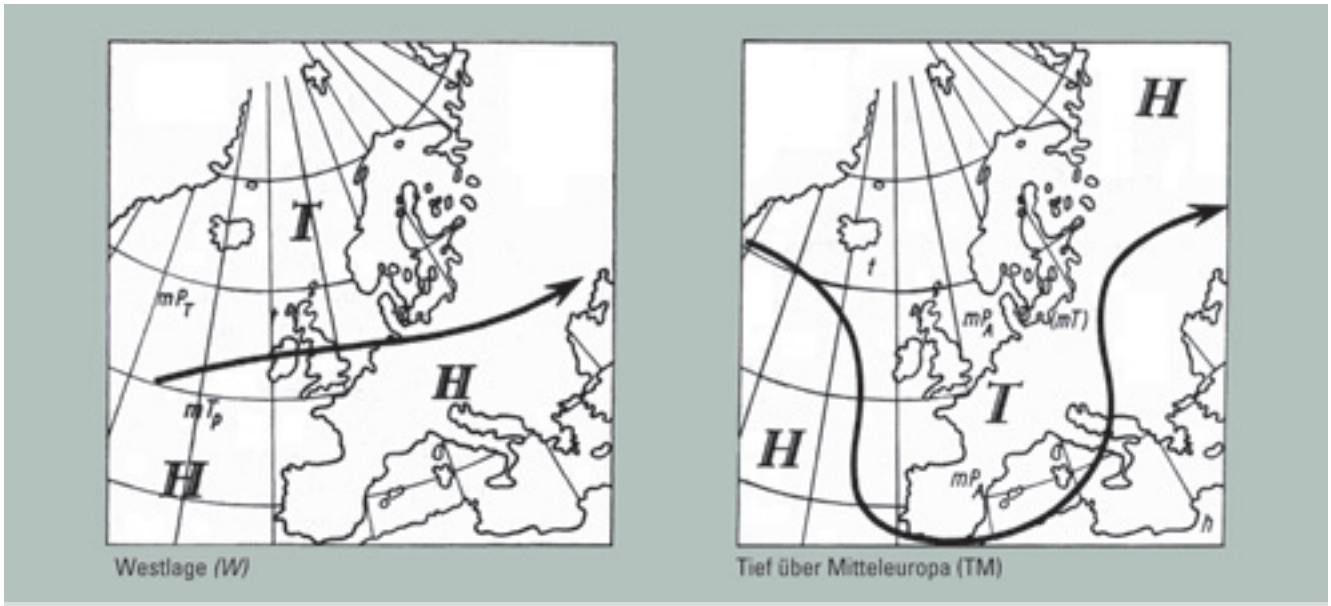


Abb. 4.2: Die Großwettertypen West und Tief Mitteleuropa

4.2 Das sächsische Klimamodell WEREX

Erste Projektionen des Klimas in Sachsen sind mit dem Regionalisierungsverfahren *REKLISA* (siehe Glossar) durchgeführt worden (Sächsisches Landesamt für Umwelt und Geologie, 2000). Die Stärke des hier zugrunde gelegten Regionalisierungsansatzes für globale Klimamodelldaten besteht in der statistischen Kopplung großräumiger meteorologischer Datenfelder der freien Atmosphäre (objektive Wetterlagen) mit Messreihen der Klimaelemente an Bodenstationen in Sachsen.

Alle seit 2000 eingesetzten Modellvarianten für Klimaprojektionen in Sachsen basieren auf dieser Grundstruktur (Abb. 4.3). Das sächsische Modell wurde den wachsenden Anforderungen seitens der Klimafolgenforschung kontinuierlich angepasst. Es interpretiert Änderungen großräumiger Strömungsmuster, wie sie durch globale Klimamodelle prognostiziert werden, für den lokalen Bereich. Auf der Grundlage von Simulationen mit dem globalen Klimamodell ECHAM4-OPYC3-T42 des DKRZ Hamburg (siehe Glossar) wurden Mittelwerte der Klimaelemente in Bodennähe für Monate, Jahreszeiten und Jahre an sächsischen Klimastationen statistisch abgeleitet.

Projektionen von Klimaextremen, wie Dürren oder Starkregenereignisse, befinden sich im internationalen Maßstab erst im Anfangsstadium. Die neue Regionalisierungsmethode *WEREX* (siehe Glossar) stellt eine wesentliche Erweiterung und Optimierung des Vorläufermodells *REKLISA* dar und bietet über die Kombination von objektivem Wetterlagenkonzept und Zeitreihensimulation eine gänzlich neue Möglichkeit, zu zuverlässigen regionalen Aussagen über die voraussichtliche Ausprägung von Klimaextremen in der Zukunft zu gelangen. Als Ergebnis liegen Simulationen von Zeitreihen täglicher Werte unterschiedlichster Wetterelemente (z. B. Temperatur, Niederschlag, Sonnenscheindauer, Wind, Feuchte und Bedeckung) für definierte Zeitintervalle eines Klimaszenarios vor. Diese können beispielsweise auch als Inputdaten für wasserwirtschaftliche, forstwirtschaftliche oder ökologische Modellsimulationen verwendet werden. Die Aussagen zu Extremen sind naturgemäß mit größeren Unsicherheiten behaftet als die projizierten Mittelwerte entsprechender Klimagrößen.

Die Regionalisierungsmethode WEREX bestimmt mögliche Klimaänderungs-Szenarien auf regionaler Ebene in der ersten Stufe aus der sich ändernden Häufigkeit der Wetterlagen des Temperaturregimes, wie sie durch ein globales Klimamodell prognostiziert werden. Es ist mit hoher Wahrscheinlichkeit davon auszugehen, dass sich die zu erwartende Klimaänderung nicht nur in einer Änderung der Häufigkeitsverteilung der Wetterlagen niederschlägt, sondern dass sich das Wettergeschehen auch *innerhalb der einzelnen Wetterlagen* im Laufe der Jahrzehnte ändert. Diese für jede Klimareihe berechnete mittlere wetterlagenspezifische Änderung wird in einer zweiten Stufe des Verfahrens auf die Simulation dieser Zeitreihen aufgeprägt. Somit wird bei Einsatz der aktuellen Modellvariante WEREX III ein Klimaänderungs-Szenario nicht allein durch die Änderung der Häufigkeit der Wetterlagen, sondern zusätzlich durch die Änderung des Wettergeschehens innerhalb der Wetterlagen bestimmt. Das Modell WEREX III ist somit in der Lage, auch diese internen Modifikationen der atmosphärischen Verhältnisse zu berücksichtigen (Sächsisches Landesamt für Umwelt und Geologie, 2004 a). Eine weitere Besonderheit des Modells liegt in der Möglichkeit der Bereitstellung beliebig vieler Simulationen eines beliebigen Szenarios, wobei auch die Länge der simulierten Zeitreihe nicht a priori festgelegt ist. Das modifizierte Modell liefert im Vergleich zu anderen regionalen Klimamodellvarianten derzeit die stabilsten und wahrscheinlichsten Ergebnisse im Rahmen der Zukunftsszenarien bis 2050 (Bartels, 2004).

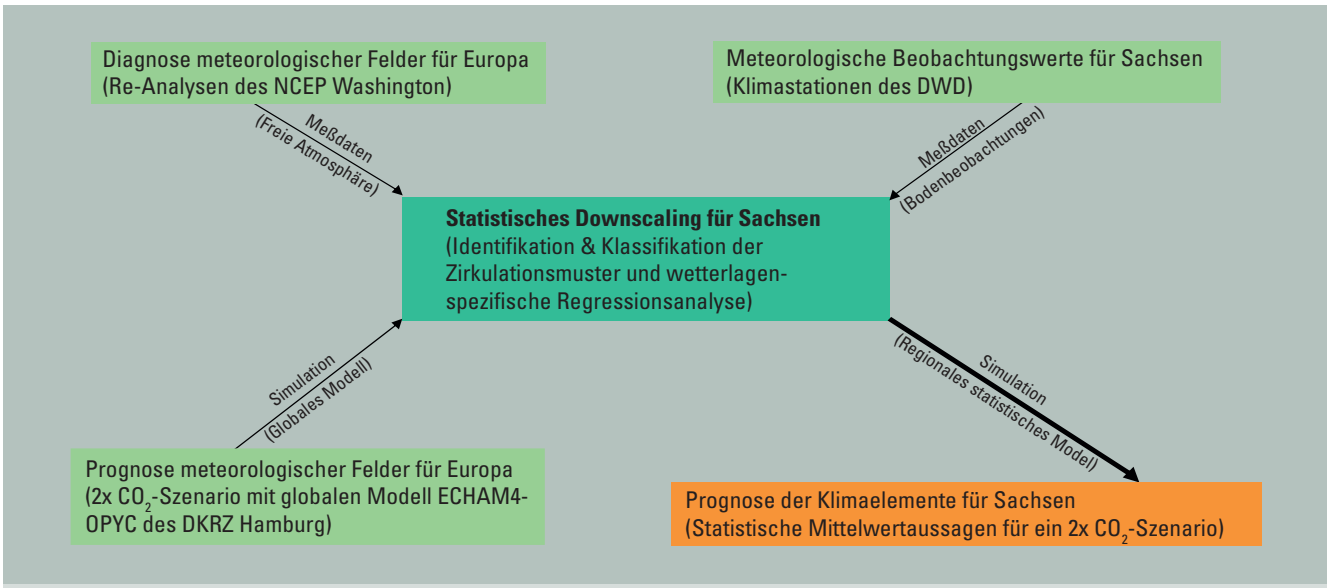


Abb. 4.3: Grundstruktur des sächsischen Klimamodells

4.3 Die Ergebnisse im Überblick

Mit dem auf die sächsischen Verhältnisse zugeschnittenen Regionalisierungsverfahren WEREX (Sächsisches Landesamt für Umwelt und Geologie, 2003 a, b, 2004 a) sind die Auswirkungen der von globalen Klimamodellen vorgezeichneten Szenarien auf die Klimaentwicklung in Sachsen bis Mitte des 21. Jahrhunderts detailliert untersucht worden. Das Verfahren basiert auf Ergebnissen von Simulationen des deutschen globalen Klimamodells ECHAM4-OPYC3-T42 des DKRZ Hamburg unter einem SRES-Szenario B2. Das SRES-Szenario B2 (siehe Glossar) ist ein relativ moderates Emissionsszenario, was eine ökologisch orientierte Entwicklung zumindest in einigen industriellen Kernregionen der Erde annimmt.

Nachfolgend werden ausgewählte Ergebnisse der Klimaprojektionen mit dem Modell WEREX sowie daraus resultierende Besonderheiten der Klimaentwicklung im sächsischen Raum skizziert. In Abb. 4.4 und Abb. 4.5 sind die für Deutschland berechneten Veränderungen der Niederschlagsmengen für den Zeitraum 2041–2050 gegenüber heutigen Verhältnissen exemplarisch für Sommer und Winter dargestellt. Abb. 4.4 dokumentiert für Sachsen eine vergleichsweise moderate Zunahme gegenüber anderen Regionen Deutschlands im Winter; teilweise kommt sogar eine geringfügige Abnahme der Niederschläge nördlich des Erzgebirgskammes zum Ausdruck. Dieser orographische Effekt im Lee des Erzgebirgskammes erfasst weite Teile Sachsens und ist auf die erwähnte Zunahme der Luftströmungen aus Südwest in Verbindung mit entsprechenden Wetterlagen zurückzuführen. Für den Sommer sind stärkere Niederschlagsrückgänge in Nordsachsen, insbesondere aber in Ostsachsen zu erwarten (Abb. 4.5). Bemerkenswert sind vergleichbare Tendenzen im Sommer auch in anderen Regionen Deutschlands, so vor allem gebietsweise in Süddeutschland und in Brandenburg.

Zusammenfassend kann hervorgehoben werden, dass tendenziell auch das regionale Modell WEREX die von globalen Modellen vorgezeichnete Entwicklung für Deutschland zum Ausdruck bringt, wonach bei allgemeiner Erwärmung bis zum Jahr 2050 die Winter feuchter und die Sommer trockener werden. Diese regionale Tendenz stützt zudem eine Kernaussage des IPCC, nach der der globale Klimawandel mit hoher Wahrscheinlichkeit von einer Zunahme der kontinentalen Sommertrockenheit über den großen Landmassen mittlerer Breite begleitet wird. Nord- und Ostsachsen könnte bei diesem projizierten Wandel des Klimas in besonderem Maße vom Problem der Wasserverfügbarkeit betroffen sein, da der insgesamt zu erwartende Rückgang der klimatischen Wasserbilanz im Sommer zu zeit- und gebietsweise angespannten Situationen des Bodenwasserhaushaltes führen kann. Hierbei ist auch in Betracht zu ziehen, dass im Kontext mit der globalen Erwärmung ähnliche Hitze- und Dürreperioden wie im Jahr 2003 in Zukunft häufiger auftreten werden als unter heutigen Klimaverhältnissen. Ein zusammenfassender Bericht zum Forschungsprojekt wurde vom Sächsischen Landesamt für Umwelt und Geologie herausgegeben (Enke et al., 2003).

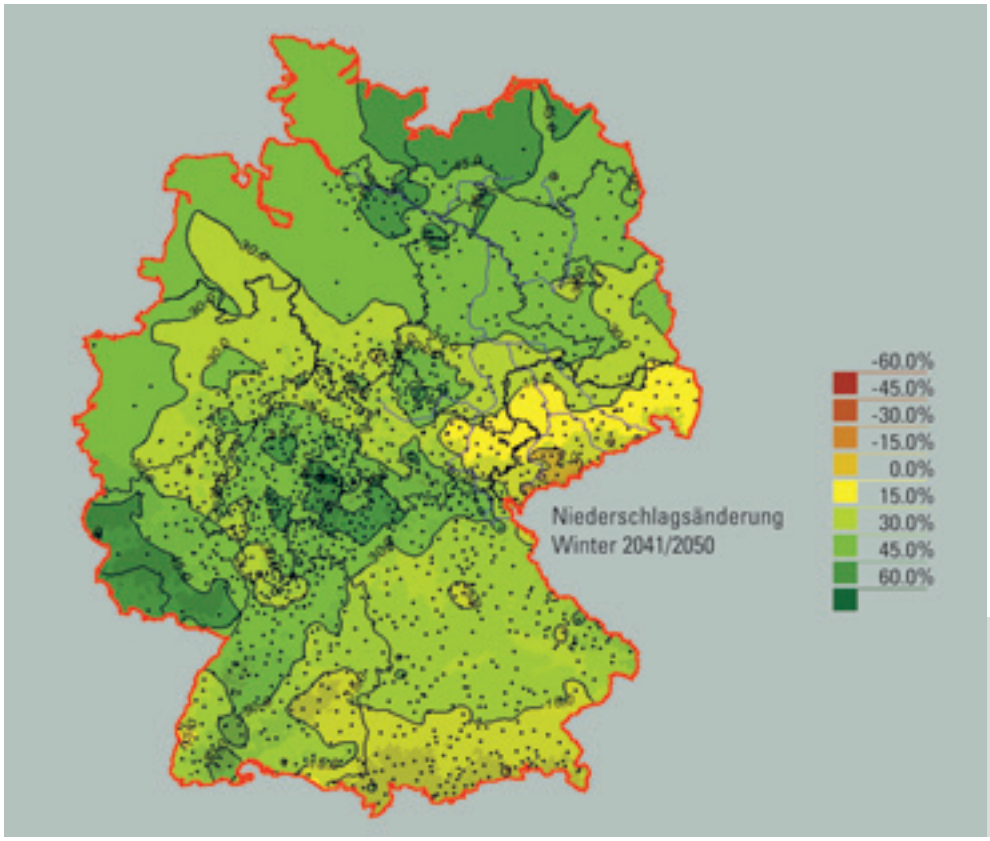
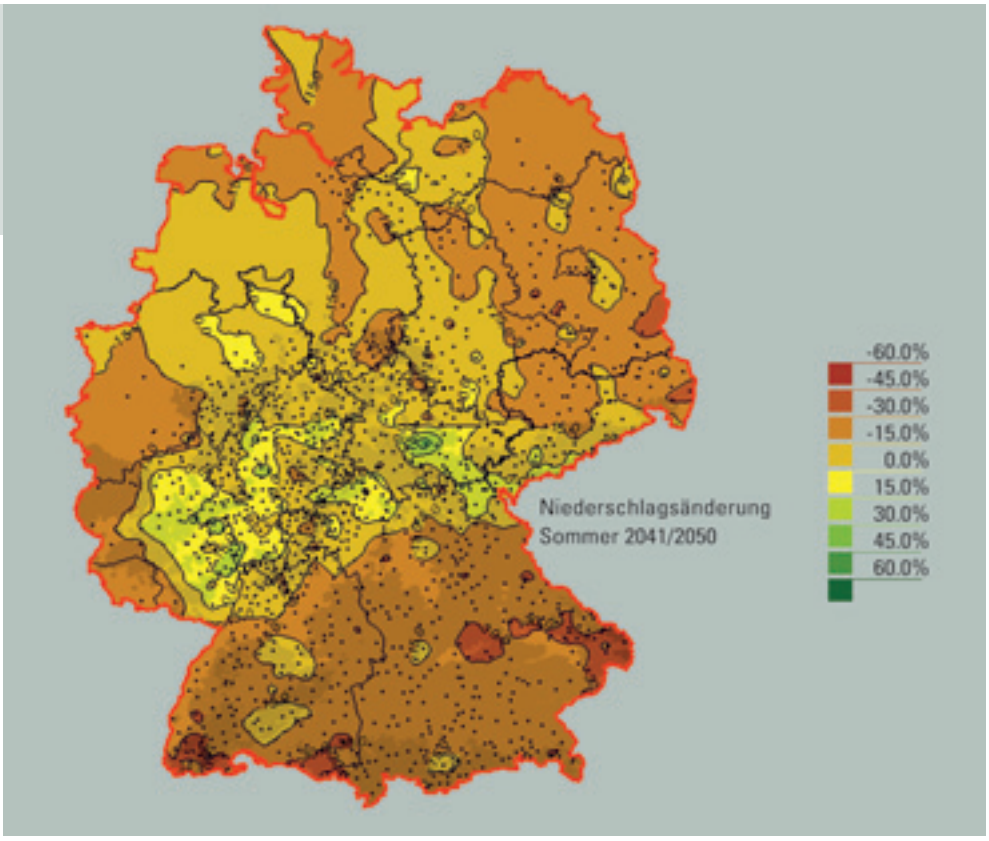


Abb. 4.4:
Szenario der Niederschlagsänderung in Deutschland im Winter in der Dekade 2041–2050 gegenüber der Referenzperiode 1981/2000
(Basis: Modell WEREX)

Abb. 4.5:
Szenario der Niederschlagsänderung in Deutschland im Sommer in der Dekade 2041–2050 gegenüber der Referenzperiode 1981/2000
(Basis: Modell WEREX)



Für das Emissions-Szenario B2 können folgende Kernaussagen für Sachsen getroffen werden:

Nach den aktuellen Simulationen mit dem Klimamodell WEREX wird es in Sachsen in den nächsten 50 Jahren deutlich wärmer. Die mittlere Lufttemperatur steigt bis 2050 um etwa 2 Grad an. Im Sommerhalbjahr werden ausgeprägte Hitze- und Dürreperioden weit häufiger auftreten als heute. Insbesondere im Winter ist mit einer deutlichen Zunahme der Häufigkeit warmer Wetterlagen in Verbindung mit vorherrschender Südwestanströmung zu rechnen. Folglich werden mit Niederschlagsabschwächung verbundene Lee-Effekte nördlich des Erzgebirges eine zunehmende Rolle spielen. Diese voraussichtliche Entwicklung deutet sich in den aktuellen Trends der Klimaparameter bereits an.

Die projizierte Zunahme der Lufttemperatur schreitet bis Mitte des 21. Jahrhunderts in Sachsen von Dekade zu Dekade nicht gleichförmig voran und weist jahreszeitliche Unterschiede auf. Der stärkste Temperaturanstieg wird im Winter erwartet (Abb. 4.6). Es existieren keine signifikanten geographischen Unterschiede für den simulierten Temperaturtrend.

Zu erwarten ist eine sehr markante Verringerung der Anzahl der Frost- und Eistage. Die Zahl der Sommertage und heißen Tage nimmt deutlich zu (Abb. 4.7). Im Sommer können Temperaturmaxima bis zu 42 °C erreicht werden.

Gemäß Klimaszenario ist im Winter insgesamt eine Zunahme der mittleren Niederschlagssummen zu erwarten, wobei sich im Zusammenhang mit einer verstärkten Südwestanströmung insbesondere Lee-Effekte nördlich des Erzgebirges widerspiegeln.

Ein markanter Rückgang der monatlichen Niederschlagssummen zeigt sich im sächsischen Mittel im Sommer (Abb. 4.8). Die Simulationen lassen aber auch erkennen, dass die Veränderungen des Niederschlages in den einzelnen Regionen Sachsens recht differenziert ausfallen werden. So zeichnen sich in Nord- und Ost-

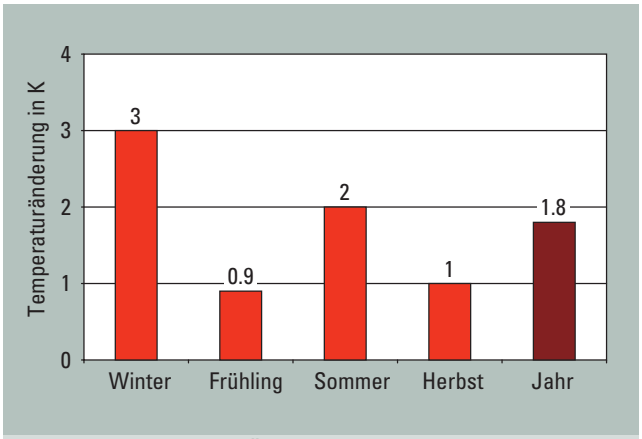


Abb. 4.6: Szenario der Änderung der Lufttemperatur in der Dekade 2041–2050 gegenüber der Referenzperiode 1981/2000

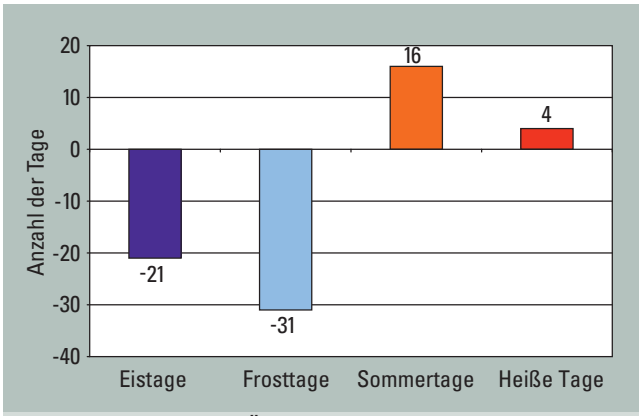


Abb. 4.7: Szenario der Änderung der Anzahl der Ereignistage in der Dekade 2041–2050 gegenüber der Referenzperiode 1981/2000

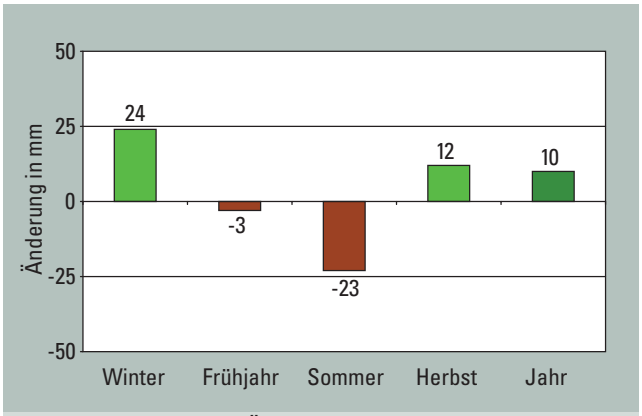


Abb. 4.8: Szenario der Änderung der Niederschlagshöhen in der Dekade 2041–2050 gegenüber der Referenzperiode 1981/2000 in Sachsen

sachsen markante Rückgänge der Regenmengen in den Sommermonaten Juni, Juli und August um 15 bis 30 % ab, während im Vogtland und Westerzgebirge sogar geringe Zunahmen festzustellen sind (Abb. 4.9 und 4.10).

Hinsichtlich der voraussichtlichen Entwicklung von Extremereignissen (Trockenperioden; Starkniederschläge) werden folgende Veränderungen erwartet:

Obwohl es im Sommerhalbjahr insgesamt trockener wird, nehmen die Tage mit extremen Niederschlägen in diesem Zeitabschnitt zu. Hieraus kann auf eine Verstärkung der Intensität lokaler Schauer und Gewitter in den kommenden Jahrzehnten geschlossen werden. Im Winter sind hingegen trotz im Mittel zunehmender Niederschlagshöhen keine signifikanten Veränderungen extremer Niederschlagsereignisse zu erkennen (Abb. 4.11).

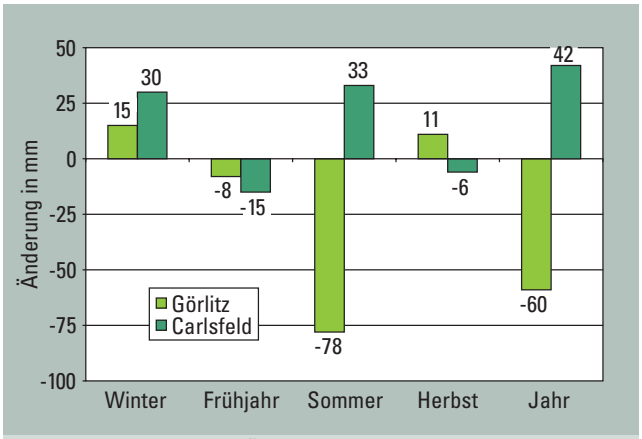


Abb. 4.9: Szenario der Änderung der Niederschlagshöhen in der Dekade 2041–2050 gegenüber der Referenzperiode 1981/2000 für eine Station im Osten Sachsens (Görlitz) und im Erzgebirge (Carlsfeld)

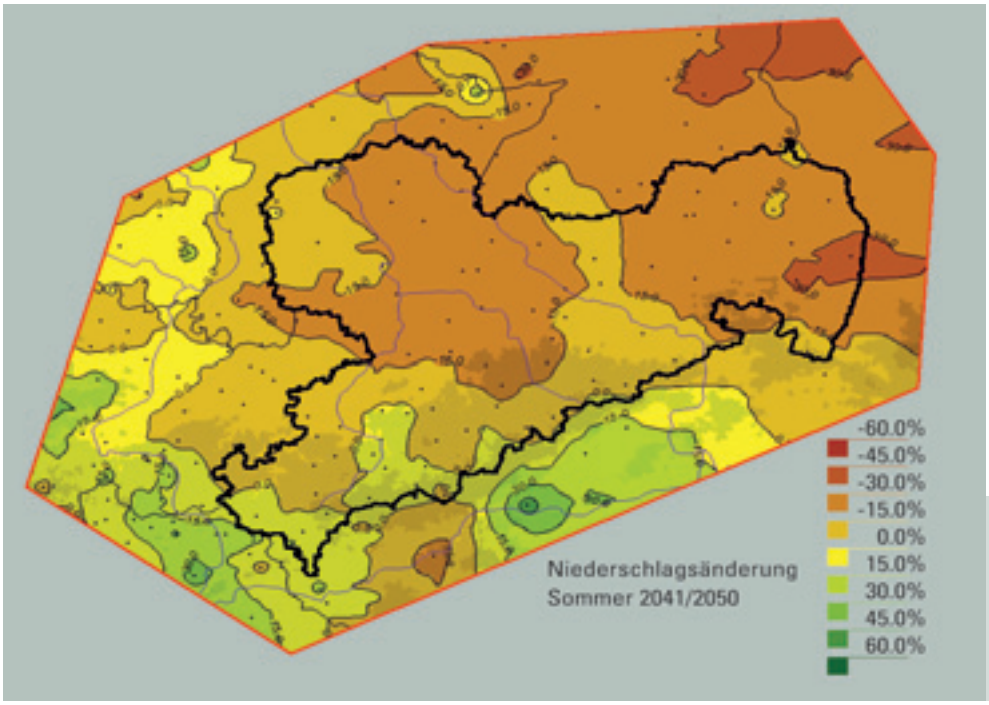
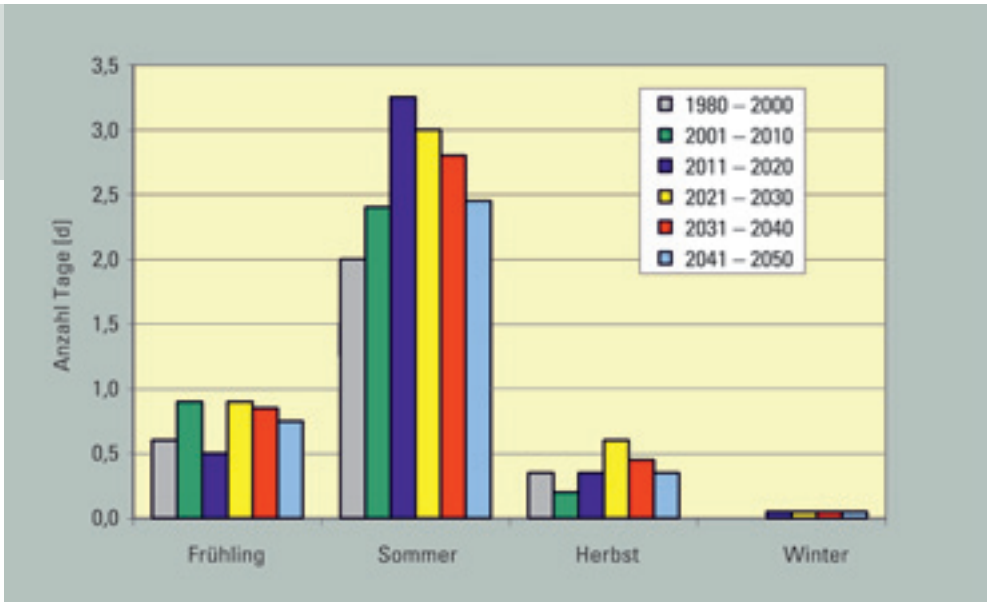


Abb. 4.10: Szenario der prozentualen Änderung der Niederschlagshöhen im Sommer in der Dekade 2041–2050 gegenüber der Referenzperiode 1981/2000

Abb. 4.11:
Szenario der Anzahl der Tage mit mehr als 55 mm Tagesniederschlag für verschiedene Dekaden bis 2050



Die Entwicklung der Niederschläge von Dekade zu Dekade erfolgt dabei nicht gleichförmig. Relativ feuchte Jahrzehnte werden von trockeneren Jahrzehnten abgelöst. Dabei existieren signifikante geographische Unterschiede für die simulierten monatlichen Niederschläge in Sachsen. Betrachtet man diese räumliche Änderung der monatlichen Niederschlagssummen im Detail, fällt auf (hier nicht dargestellt), dass im Winter im Lee-Bereich des Erzgebirges eine gegenüber anderen Regionen im Südwesten und Norden Sachsens deutlich verringerte Niederschlagszunahme zum Ausdruck kommt. Für den Sommer zeigen die entsprechenden Modellsimulationen ein völlig anderes, recht diffuses Bild. Auf kleinstem Raum treten teilweise erhebliche Unterschiede in der Änderung der Niederschlagssummen auf. Diese sind letztendlich ein Beleg dafür, dass verstärkt konvektive Niederschläge (Schauer und Gewitter) die räumliche Variabilität in Sachsen prägen werden. Abb. 4.11 verdeutlicht diese nach den Modellsimulationen zu erwartende generelle Tendenz zu intensiven, allerdings in der Regel räumlich meist eng begrenzten Starkniederschlägen.

Resümee

Nach den Ergebnissen der aktuellen Klimasimulationen werden in den nächsten 50 Jahren in Sachsen ausgeprägte Dürreperioden im Sommerhalbjahr häufiger auftreten. Diese voraussichtliche Grundtendenz deutet sich in den aktuellen Trends der Klimaparameter bereits an. Andererseits werden auch lokale Hochwasserereignisse in den nächsten Jahrzehnten offensichtlich eine zunehmende Rolle spielen. Regional bedeutsame Hochwasserereignisse in Sachsen im Sommer (Beispiel Augusthochwasser 2002) sind hingegen in der Regel an die so genannten Vb-Wetterlagen gebunden. Nach ersten Untersuchungen des Landesamtes für Umwelt und Geologie lassen diese Wetterlagen mit Blick auf das vergangene Jahrhundert eine zunehmende Tendenz für den Sommer erkennen. Setzt sich diese Entwicklung fort, müssten auch diese hinsichtlich ihrer Auswirkungen noch bedeutsameren Ereignisse zunehmend in Betracht gezogen werden.

Ausblick

Die in vorliegender Broschüre diskutierten sächsischen Klimasimulationen beziehen sich auf das „optimistische" **SRES-Emissionsszenario B2** (lokal ökologisch orientiert) und den Zeithorizont 2050. Gegenwärtig erfolgen Computersimulationen für Sachsen zusätzlich unter dem „pessimistischen" **SRES-Emissionsszenario A2** (weltweit rein wachstumorientiert) und für das Zeitfenster bis 2100. Erste Ergebnisse liegen vor. Auf der Grundlage eines Vergleichs zwischen den Szenarien B2 und A2 kann die Schwankungsbreite der möglichen Klimaänderungen für Sachsen künftig weit besser abgeschätzt werden. Unter dem Szenario A2 zeichnet sich folgende Entwicklung bis zum Jahr 2100 ab (Enke, 2004):

- Zunahme lang anhaltender Hitzewellen im Sommerhalbjahr
- Zunahme der Dürreereignisse im Sommerhalbjahr. Markante Differenzierung von Häufigkeit und Ausprägung projizierter Dürreereignisse zwischen der 1. und 2. Vegetationsperiode. Dramatische Zunahme lang anhaltender Dürreperioden in der 1. Vegetationsperiode (erhebliche Verschärfung gegenwärtig zu beobachtender Tendenzen).
- Fortschreitende Abnahme der Kälteepisoden im Winterhalbjahr

Strenge Winter, wie man sie aus der Vergangenheit kennt, werden in den letzten Jahrzehnten des 21. Jahrhunderts in

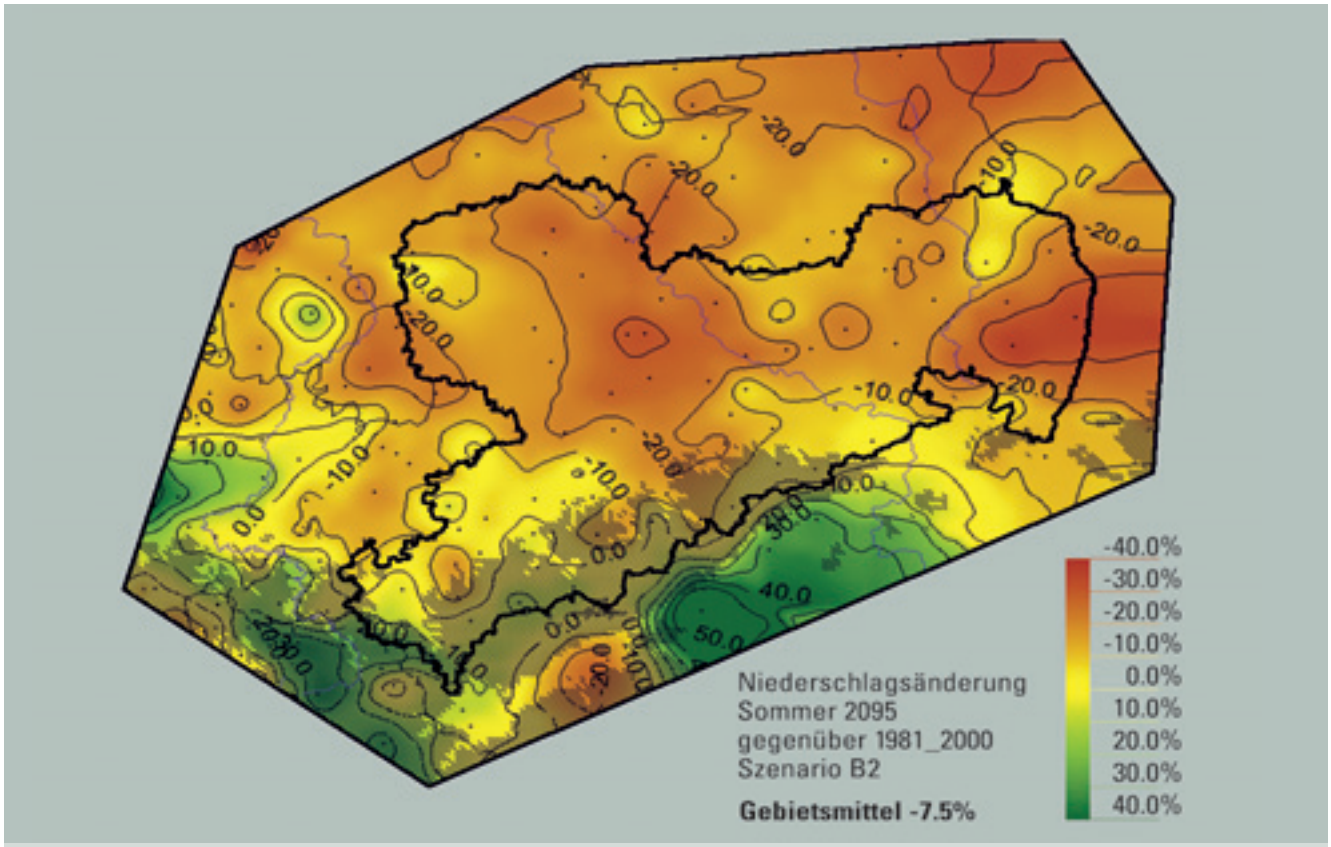


Abb. 4.12: Szenario der Niederschlagsänderung in Sachsen im Sommer in der Dekade 2091–2100 gegenüber der Referenzperiode 1981/2000 (Basis: Modell WEREX, SRES-Szenario B2)

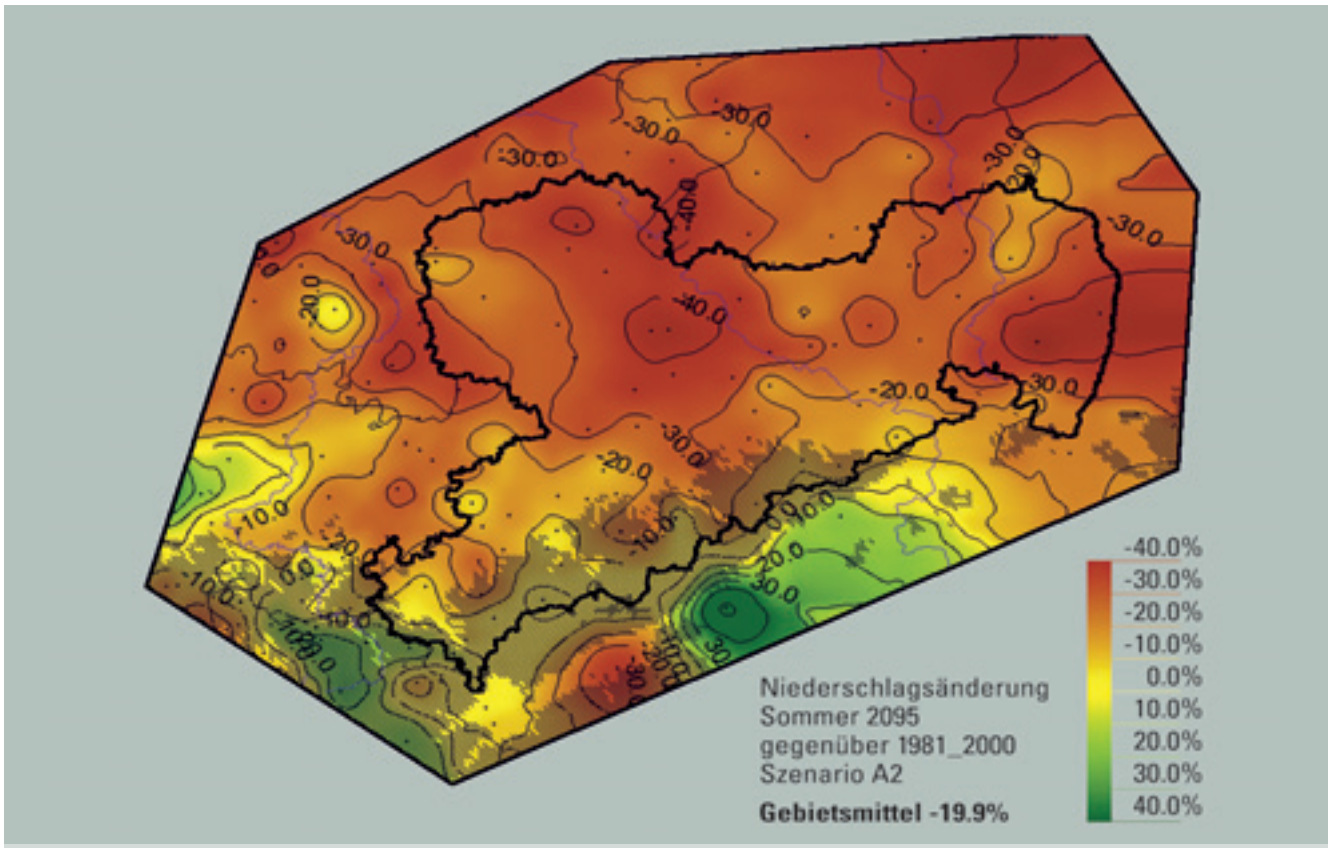


Abb. 4.13: Szenario der Niederschlagsänderung in Sachsen im Sommer in der Dekade 2091–2100 gegenüber der Referenzperiode 1981/2000 (Basis: Modell WEREX, SRES-Szenario A2)

Abb. 4.14: Winterstimmung in der Sächsischen Schweiz – gehören solche Bilder immer mehr der Vergangenheit an?

Sachsen unter einem A2-Szenario nicht mehr auftreten. Im jüngsten Klimabericht der Europäischen Umweltagentur wird auf diese gravierende Konsequenz der globalen Erwärmung ebenfalls hingewiesen (European Environment Agency, 2004).

Die Jahresmittelwerte der Lufttemperatur würden in der Dekade 2091–2100 unter einem B2-Szenario um 2,4 Grad und unter einem A2-Szenario um 3,2 Grad höher liegen als heute (Referenzzeitraum jeweils 1981/2000). Für den Winter simulierte Trends liegen für das B2-Szenario bei 3,3 Grad und für das A2-Szenario bei 3,9 Grad. Die entsprechenden Werte für den Sommer betragen 2,9 Grad (B2-Szenario) und 4,7 Grad (A2-Szenario). Gemäß dieser Ergebnisse der Simulationen muss im 21. Jahrhundert in Sachsen mit drastischen Veränderungen des Klimas gerechnet werden, wobei das konkrete Ausmaß der Erwärmung in einem hohen Maße von der heutigen und zukünftigen Entwicklung der globalen Emission von Treibhausgasen gesteuert wird.

Die Veränderungen des Niederschlages fallen in Abhängigkeit vom gewählten Emissionsszenario in den einzelnen Regionen Sachsens sehr unterschiedlich aus. Exemplarisch zeigt ein erster Vergleich der Simulationen für die Sommer der Dekade 2091–2100 unter den Szenarien B2 und A2, dass für das A2-Szenario mit etwa –20 % im Gebietsmittel für Sachsen insgesamt ein deutlich stärkerer Rückgang der Sommerniederschläge festzustellen ist als für das alternative B2-Szenario mit –7,5 % (Abb. 4.12 und Abb. 4.13).

5 Extremereignisse in Sachsen

5.1 Extremereignisse – Indizien des Klimawandels?

Eine wesentliche Frage, die die Klimaforschung aktuell zu beantworten hat, ist die der Entwicklung der Extremereignisse, da diese stärker erfahren werden als ein langfristiger, sich schrittweise vollziehender Klimawandel. Weltweit, insbesondere auch in Europa, zeichnet sich seit Anfang der 90er Jahre eine im Ausmaß bislang noch nicht beobachtete starke Erwärmung der Erdatmosphäre ab. Flut, Dürre und Stürme sind zwar seit Menschengedenken unsere ständigen Begleiter, doch es ist sehr wahrscheinlich, dass durch den globalen Klimawandel die Wetterextreme weltweit in ihrer Häufigkeit weiter zunehmen werden. Die globale Erwärmung im 21. Jahrhundert wird mit der vom IPCC angegebenen Spanne von 1,4 bis 5,8 Grad das Ausmaß der bereits beobachteten Temperaturzunahme von 0,7 Grad im 20. Jahrhundert noch erheblich übertreffen. Die Geschwindigkeit dieser prognostizierten Klimaänderungen ist in der Menschheitsgeschichte bislang ohne Beispiel. Paläoklimatologische Untersuchungen suggerieren, dass das Klimasystem instabil wird, wenn es sich rasch ändert. Dabei treten gehäuft Extreme in alle Richtungen auf (Dürreperioden, Überschwemmungen, Temperaturextreme etc.). Bei einem Anstieg der Mitteltemperatur um etwa 2 Grad muss mit einer Zunahme der Extremereignisse um etwa 50 bis 100 % gerechnet werden.

Klimaänderungen lassen sich prinzipiell durch den Anstieg der mittleren Lufttemperaturen wesentlich zuverlässiger belegen als durch eine Statistik der Niederschläge oder gar von Extremereignissen. Vor diesem Hintergrund wird auf internationaler Ebene gegenwärtig extremwertstatistischen Methoden und Untersuchungen im Rahmen der Klimaforschung eine ganz besondere Aufmerksamkeit gewidmet. Allein auf der Basis von Untersuchungen langjähriger Klimadatenreihen mittels statistischer Methoden kann der Zusammenhang zwischen Klimaänderung und Extremereignissen nicht dargestellt werden, da vergleichbare Ereignisse sehr

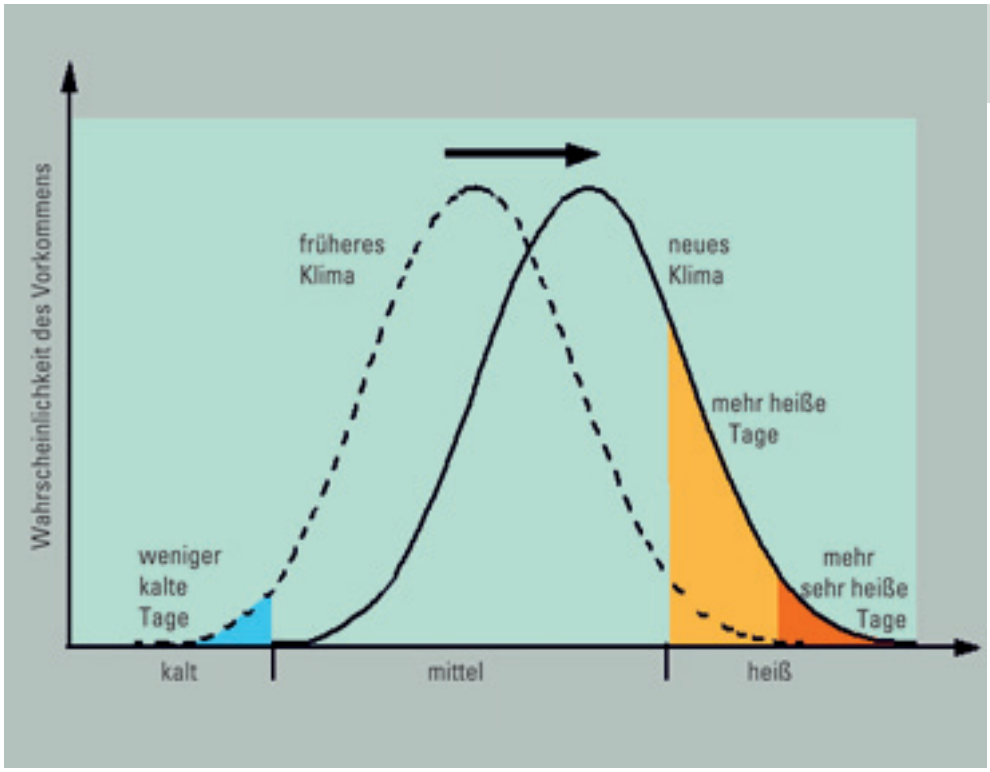


Abb. 5.1: Klimawandel und Wetterextreme (Quelle: LATIF, 2004)

selten auftreten und sich statistisch im Allgemeinen noch in das Spektrum der natürlichen Schwankungen einpassen. Mit einer durch die anthropogene Treibhausgasemission angestoßenen Zunahme der mittleren Temperatur kommt es nach Aussage der Klimamodelle auch zu einer Intensivierung des Wasserkreislaufes. Hierdurch gelangt gleichzeitig mehr verfügbare Energie in die Atmosphäre, die zu einer Verstärkung der Unwetter, Stürme und Hitze- und Dürreperioden führen kann. Es scheint paradox, doch sommerliche Dürren werden trotz intensiviertem Wasserkreislauf im Zuge der globalen Erwärmung nach aktuellen Klimasimulationen in vielen Regionen der Erde noch weit deutlicher in Erscheinung treten.

Ein kausaler Zusammenhang zwischen der beobachteten Zunahme von Dürreperioden und Starkniederschlägen in vielen Regionen der Erde und der globalen Erwärmung erscheint auch physikalisch plausibel und wird von vielen Klimamodellen wiedergegeben. Allerdings können einzelne Extremereignisse für sich genommen grundsätzlich nicht als Signale einer Klimaänderung gewertet werden. So stellen weder die Starkniederschläge im August 2002 in Sachsen noch die Hitze- und Dürreperiode 2003 für sich betrachtet ein Signal für die Klimaänderung dar.

Werden in Sachsen künftig Extremereignisse häufiger und intensiver auftreten?

Die Beantwortung dieser Frage erlangt voraussichtlich eine enorme ökonomische, ökologische und soziale Bedeutung. Das Sächsische Landesamt für Umwelt und Geologie hat bereits 1999 erste Klimaszenarien initiiert, mit denen Aussagen über das sich voraussichtlich in den nächsten Jahrzehnten einstellende regionale Klima getroffen werden sollten. Die konkreten regionalen Veränderungen des Klimas, z. B. in Sachsen, hängen primär ab von den langfristigen Veränderungen der atmosphärischen Zirkulation in Europa. Allein in diesem Kontext kann beispielsweise auch die wichtige Frage nach den Wetterlagen bzw. der Abfolge von Wetterlagen, die zu Hochwassersituationen oder längeren Dürreperioden führen können, beantwortet werden.

In Sachsen treten in den vergangenen Jahrzehnten insbesondere Trends zu längeren trockenen Episoden im Sommerhalbjahr in den Vordergrund (Hänsel et al., 2004). Die Analyse der Starkniederschläge zeigt andererseits aber auch, dass die Extremniederschläge (siehe Glossar) im Zeitraum 1951–2000 zugenommen haben, obwohl es im Sommerhalbjahr insgesamt trockener wird. Betrachtet man hingegen Intensivniederschläge, kommt man zu gegenteiligen Aussagen, denn diese zeigen an den meisten sächsischen Messstellen eine Abnahme. Das trifft in gleicher Weise auch auf die maximalen Tagesniederschlagssummen zu.

Die Simulationen mit der neuesten Modellvariante WEREX erlauben inzwischen auch einen recht zuverlässigen Blick auf die künftige Entwicklung der Extremereignisse. Erste Projektionen mit dem sächsischen Klimamodell im Jahr 2000 deuteten bereits auf folgende Entwicklung des künftigen Klimas hin: Im Sommerhalbjahr werden sowohl längere Trockenperioden als auch extreme Niederschläge offensichtlich signifikant zunehmen. Sachsen hat in den Sommermonaten 2002 und 2003 beide Extremfälle als -Jahrhundertereignisse erlebt. Entsprechenden Forschungsprojekten wird derzeit am Sächsischen Landesamt für Umwelt und Geologie größte Beachtung geschenkt, wobei das zugrunde gelegte Wetterlagenkonzept (siehe Kapitel 4.1) einen Erfolg versprechenden Ansatz darstellt. Für Sachsen werden nach den aktuellen regionalen Klimaszenarien folgende Veränderungen des regionalen Klimas und der Extremereignisse erwartet:

Die Lufttemperaturen werden bis Mitte des 21. Jahrhunderts gegenüber der Referenzperiode 1961 bis 1990 im Mittel voraussichtlich um 1,8 Grad, im Winter sogar um nahe 3 Grad ansteigen. Im Sommer werden künftig extrem heiße Tage mit Spitzentemperaturen bis zu 42 °C erwartet (vgl. Abb. 5.1). Mit ausgeprägten Dürreperioden muss im Sommerhalbjahr in 50 Jahren weit häufiger gerechnet werden als unter dem heutigen Klima, gleichzeitig werden lokal eng begrenzte Starkniederschläge stärker in Erscheinung treten. Diese voraussichtlichen Grundtendenzen deuten sich in den aktuellen Trends der Klimaparameter bereits an. Insofern könnten lokale Hochwasserereignisse künftig eine zunehmende Rolle spielen. Offen ist noch, inwieweit auch mit einer Zunahme regional bedeutsamer Hochwasserereignisse in Sachsen im Sommer gerechnet werden muss. Detaillierte wissenschaftliche Untersuchungen zu diesen Fragestellungen werden gegenwärtig im Auftrag des Sächsischen Landesamtes für Umwelt und Geologie durchgeführt.

Der Sommer 2003 steht offensichtlich im Zusammenhang mit dem zu beobachtenden sommerlichen Erwärmungstrend in den vergangenen 100 Jahren und die damit in Verbindung stehende Zunahme der Hitze- und extremen Hitzetage. Er ist ein weiteres wichtiges Indiz für den diagnostizierten Klimawandel in Mitteleuropa. Offensichtlich hat die Variabilität des Klimas in den letzten Jahren bereits deutlich zugenommen und wird sich in den nächsten Jahrzehnten im Zuge der globalen Erwärmung weiter fortsetzen. Aktuelle Untersuchungen zur künftigen Klimaentwicklung suggerieren, dass in der 2. Hälfte des Jahrhunderts vor allem in Mitteleuropa mit erheblichen Zunahmen der Temperaturvariabilität gerechnet werden muss (Schär et al., 2004). Vergleichbare Hitzeperioden wie im Jahr 2003 könnten dann eine immer größere Rolle spielen.

5.2 Die Extremniederschläge im August 2002

Die typische Sommerwitterung in Europa wird geprägt von einer Frontalzone, die sich vom Nordatlantik über die Britischen Inseln und Skandinavien bis ins nördliche Russland erstreckt. Abweichend davon zeichnete sich der Sommer 2002 durch eine starke Mäandrierung dieser Frontalzone aus, d.h. Tröge über Westeuropa griffen immer wieder weit nach Süden aus. Ein blockierendes Hoch über Nordosteuropa führte zur Aufspaltung der Frontalzone. Diese Wetterlagen-Konstellation führte zu starken regionalen Abweichungen der Temperatur und des Niederschlages in Europa. Von Südskandinavien über das Baltikum bis nach Russland war es erheblich zu warm und zu trocken. Weite Bereiche West- und Südwesteuropas wiesen hingegen unternormale Temperaturen auf. Übernormale Niederschlagsmengen waren in Mitteleuropa und im Mittelmeerraum zu verzeichnen.

Entwicklung der Vb-Wetterlage

Im Bereich eines Troges gelangte am 10. August 2002 hoch reichende Kaltluft vom Nordatlantik über die Britischen Inseln und Frankreich ins westliche Mittelmeer. Sie löste im Golf von Genua durch die dort einsetzende Einbeziehung sehr warmer und feuchter Mittelmeerluft eine kräftige Tiefdruckentwicklung aus, ein wesentlicher Ausgangspunkt für die nachfolgende Wetterentwicklung in Mitteleuropa. Am 11. August wanderte das Zentrum des Bodentiefs in die obere Adria, wobei sich im Laufe des Tages ein Teiltief nördlich der Alpen entwickelte und dort schließlich am 12. 8. einen Kerndruck von 996 hPa erreichte. Im Gegensatz zur klassischen Vb-Wetterlage, bei der sich an der Vorderseite eines Höhentroges ein Bodentief im Genua- und Adriaraum entwickelt und sich dann zügig über Österreich und Tschechien nordwärts nach Polen verlagert, verblieb diesmal der Tiefdruckkomplex aufgrund von Abschnürungsprozessen in den höheren Atmosphärenschichten relativ lange im Alpenraum und führte bereits dort zu lang anhaltenden und ergiebigen Niederschlägen.

Die Starkniederschläge verlagerten sich von der Alpensüdseite über Bayern, Österreich und Tschechien in den Osten Deutschlands. Als Sachsen auf die Westflanke des Tiefs geriet, kam eine massive Nordströmung hinzu, die am Nordrand des Erzgebirges zu ausgeprägten Staueffekten und damit zu einer markanten lokalen Niederschlagsverstärkung führte. Die extrem hohen Tagesniederschläge im Osterzgebirgsraum resultierten nach Abschätzungen des Deutschen Wetterdienstes (Rudolf und Rapp, 2002) vor allem aus diesem Staueffekt am Nordrand des Erzgebirges. Schließlich verlagerte sich das Tief über Ostsachsen nur noch langsam nordwärts, so dass die intensiven Regenfälle ungewöhnlich lange anhielten.

Rekord-Niederschläge in Sachsen

Den sintflutartigen Regenfällen im Laufe des 12. August 2002 folgte ein sehr rasches Ansteigen der Pegelstände der Nebenflüsse der Elbe, das zu verheerenden regionalen Hochwasserereignissen führte. Dabei ergaben sich an mehreren sächsischen Messstationen neue Rekordwerte

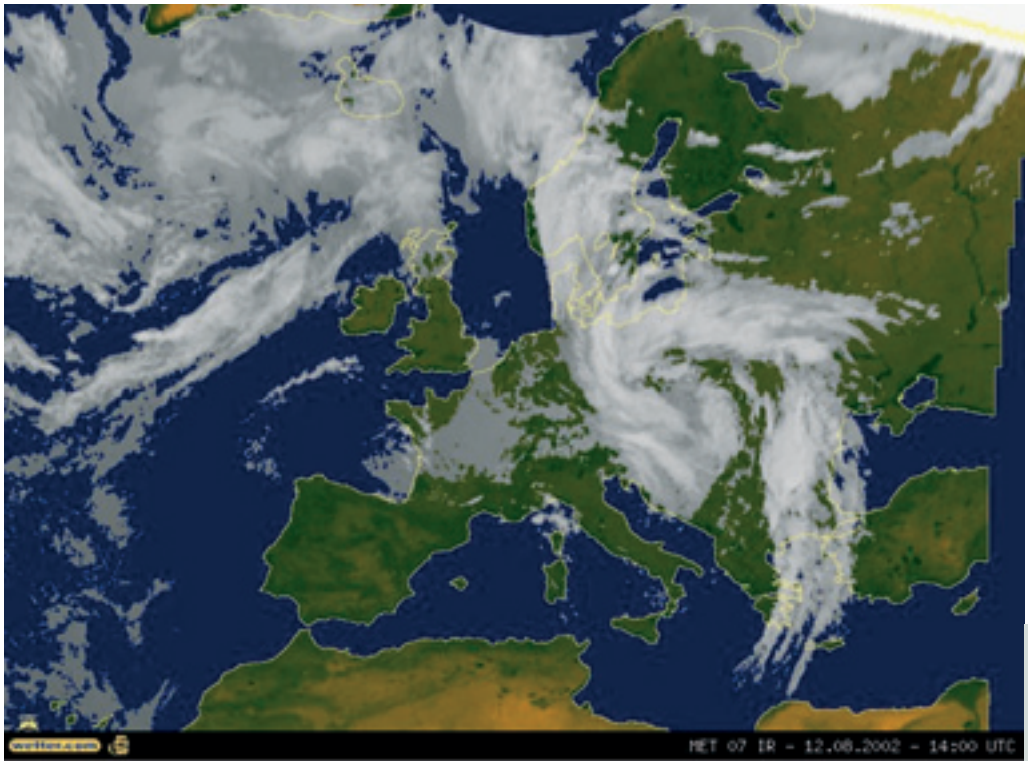


Abb. 5.2:
Wolkenspirale des Vb-Tiefs am 12.08.2002, 14:00 UTC (Quelle: DWD)

Abb. 5.3:
Bodenwetterkarte des DWD vom 11.08.2002, 00 UTC (großes Bild) und absolute Topographie 500 hPa vom 11.08.2002, 12 UTC (kleines Bild)

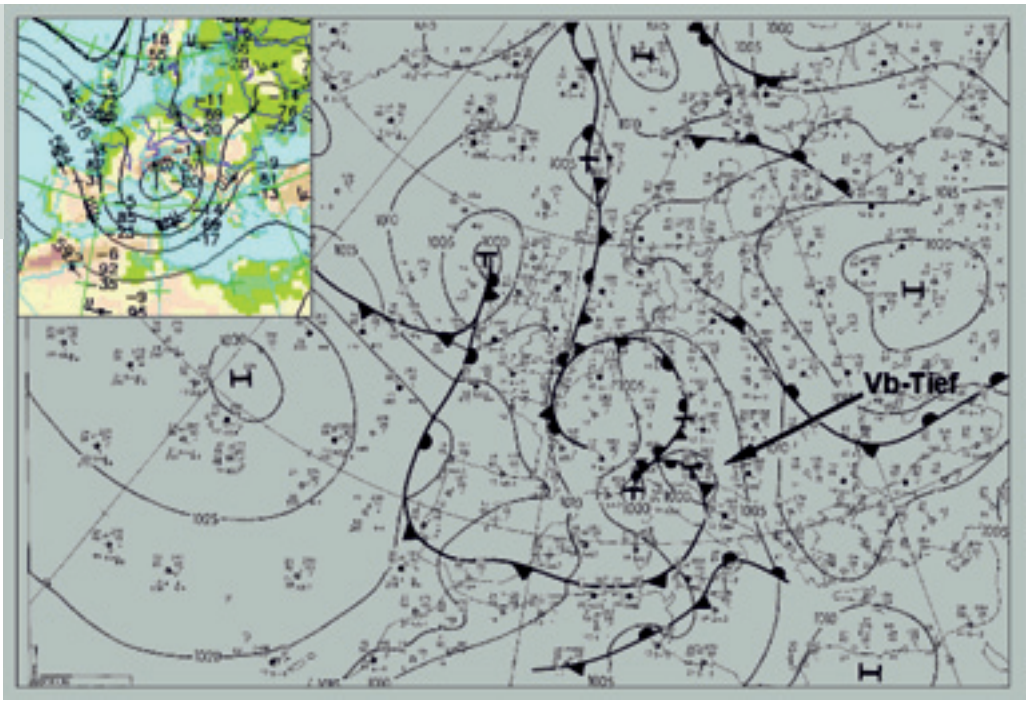
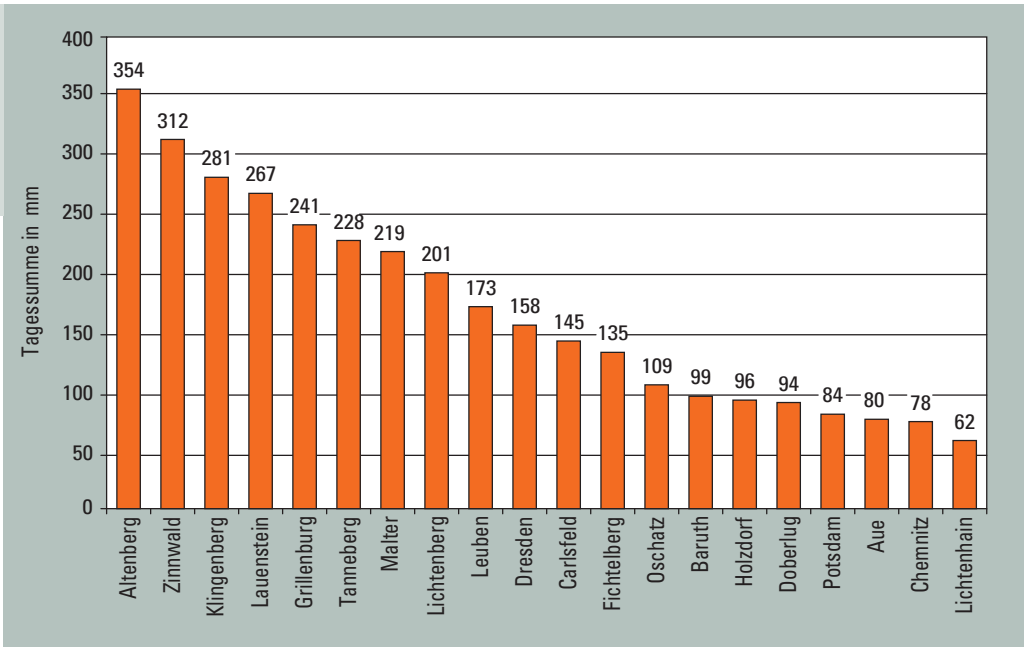


Abb. 5.4:
Tagessummen der Starkniederschläge am 12. August 2002 an ausgewählten Messstellen in Sachsen und Brandenburg



für den 24-stündigen Niederschlag. So wurden in Dresden 158 mm Niederschlag registriert (bisheriger Rekord 77 mm am 02.08.1998). An der Station Zinnwald-Georgenfeld wurden sogar eine Tagessumme von 312 mm (bisheriger Rekord 260 mm in Zeithain bei Riesa am 06.07.1906) und Stundensummen bis zu 30 mm ermittelt. Die Talsperrenverwaltung Sachsens unterhält in Altenberg eine eigene Messstation. An dieser Messstelle wurde am 12.08.2002 mit 354 mm (Abb. 5.4) sogar eine um 42 mm höhere Niederschlagssumme registriert als in Zinnwald. Diese Summen sind die mit Abstand höchsten Tagesniederschläge, die je in Deutschland beobachtet wurden. Insbesondere im Bereich der Nebenflüsse der Elbe im Osterzgebirgsraum kam es in der Folge am 12. und 13. August zu verheerenden Hochwasserereignissen (Abb. 5.5).

Das historische Hochwasser der Elbe trat erst Tage später ein (Einzugsgebiet der Elbe liegt größtenteils in Böhmen). Die Hochwassersituation an der Elbe kann vor allem auf die großflächigen Starkniederschläge am 12. und 13. August, die regenreiche Vorwitterung in ihrem böhmischen Einzugsgebiet sowie die lange Andauer der Regenfälle zurückgeführt werden. Am 17. August wurde schließlich der historische Höchststand der Elbe in Dresden mit 9,40 m erreicht.

Abb. 5.5: Die Müglitz in der Ortslage Weesenstein im August 2002 (Foto: Stefan Häßler)

Resümee

Das extreme Niederschlagsereignis im August 2002 in Sachsen war das Ergebnis des Zusammenspiels zahlreicher Prozesse in der Atmosphäre. Hierzu gehören die Luftdruckverteilung, die Strömungsverhältnisse, die potentielle Energie sowie die Vertikalverteilung von Temperatur und Feuchte in der Troposphäre. Es handelte sich um ein Einzelereignis infolge einer Verkettung verschiedener ungünstiger meteorologischer Umstände, wobei vor allem anhaltende Staueffekte am Nordrand des Erzgebirges zu den Rekordniederschlägen geführt haben.

5.3 Die Dürreperiode im Sommer 2003

Das Jahr 2003 war ein weit überdurchschnittlich warmes, sonnenscheinreiches und vor allem sehr niederschlagsarmes Jahr. Insbesondere die Monate Juni und August waren insgesamt die wärmsten seit über 100 Jahren in Deutschland. Der Sommer 2003 zeichnete sich durch bislang absolut unbekannte Rekordwerte bezüglich Hitze und Trockenheit aus.

Mit 75 % des langjährigen Mittelwertes des Jahresniederschlages war das Jahr 2003 in Deutschland wesentlich zu trocken. Das Gebietsmittel für Sachsen im gleichen Zeitraum lag bei 69 %, wobei einige Regionen – z. B. in Ostsachsen – noch deutlichere negative Abweichungen zeigten (Görlitz mit 401 mm lediglich 61 % des langjährigen Mittels). Kubschütz (Kreis Bautzen) war mit einer Jahressumme des Niederschlages von nur 301 mm der trockenste Ort Deutschlands. Aus der Kombination der drei Klimaparameter Lufttemperatur (zu warm), Sonnenscheindauer (überdurchschnittlich) und Niederschlag (sehr trocken) resultierten insgesamt sehr hohe Verdunstungsraten, die aufgrund des fehlenden Wasservorrates im Boden zu äußerst extremen Stresssituationen für die Pflanzen führten. Selbst in Gebieten, in denen vergleichsweise viel Regen fiel, war die Situation sehr kritisch, da die registrierten Niederschläge fast ausschließlich in Verbindung mit Schauern und Gewittern innerhalb weniger Stunden auftraten und damit nicht tief in den ausgetrockneten Boden eindringen konnten.

Witterung im Sommerhalbjahr (Vegetationsperioden 1 und 2)

Das Sommerhalbjahr umfasst die Monate April bis September, die Vegetationsperiode 1 die Monate April, Mai und Juni und die Vegetationsperiode 2 die Monate Juli, August und September. Die Vegetationsperiode 1 stellt den witterungsseitig sensibelsten Abschnitt der Gesamt-Vegetationsperiode dar. In diese Zeit fällt das Hauptwachstum der meisten Feldfrüchte, insbesondere der Getreidearten.

Typisch für den Witterungsverlauf in der gesamten Vegetationsperiode (Monate April bis September) waren lang anhaltende warme, strahlungsreiche und sehr trockene Witterungsabschnitte.

Eine wichtige Maßgröße zur Beurteilung von Trockenperioden stellen die kumulativen Niederschlagsdefizite im Jahresverlauf dar. Aus Abb. 5.6 ist exemplarisch für Görlitz erkennbar, dass im Jahr 2003 vielerorts lediglich der Monat Juli einen nennenswerten Niederschlagsüberschuss aufwies. Seit Februar führten alle anderen Monate zu einer mehr oder weniger deutlichen Erhöhung des summarischen Niederschlagsdefizits. Insgesamt akkumulierten sich infolgedessen bis Ende August 2003 die Jahres-Niederschlagsdefizite in Sachsen gebietsweise bereits auf etwa 200 mm und erreichten schließlich zum Jahresende verbreitet ein Defizit von etwa 250 mm.

Bereits Mitte August wiesen viele Flüsse Pegelstände in der Nähe der historischen Tiefststände auf (Abb. 5.7), zahlreiche Bäche fielen trocken.

Markantes Anzeichen für den teils nahezu vollständigen Verbrauch der Bodenwasservorräte zu dieser Zeit war die an bestimmten Standorten schlagartige Verfärbung (Trockenfärbung im Unterschied zur Herbstfärbung) oder gar Vertrocknung des Laubes der Bäume etwa ab Mitte August (Abb. 5.8).

Auch für Nadelgehölze bedeutete die lange Trockenheit Gift: ein starker Abfall von Nadeln und das Absterben von

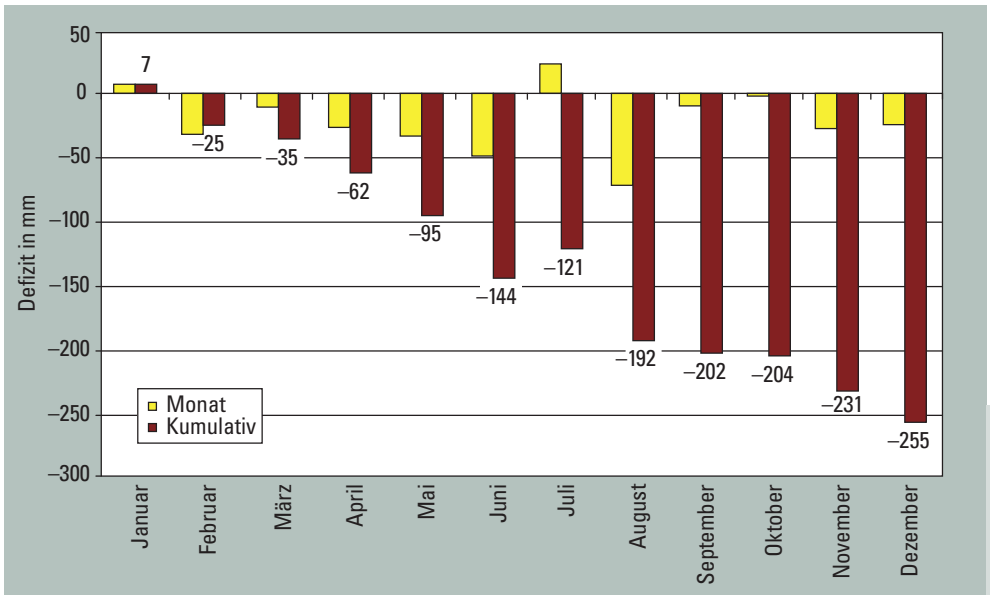


Abb. 5.6:
Entwicklung des Niederschlagsdefizits im Jahr 2003 an der Station Görlitz (Basis: Vergleich mit dem langjährigen Mittel 1961–1990)

Abb. 5.7: Die Elbe bei Radebeul im August 2003

Abb. 5.8: Trockenschäden an Bäumen in Sachsen im August 2003

Abb. 5.9: Verdorrtes Maisfeld während der Dürreperiode 2003

Ästen konnte in vielen Gebieten Deutschlands, nicht nur in Sachsen, beobachtet werden. Dass im Tiefland dennoch zunächst Trockenschäden in größerem Umfang nicht sichtbar wurden, resultiert vermutlich aus den im Vorjahr und Winter besonders gut gefüllten Grundwasservorräten und einem kapillaren Wasseraufstieg bis in den Wurzelraum der Bäume auf tiefgründigen Standorten. Für verschiedene Schaderreger, wie zum Beispiel den Borkenkäfer, boten der Witterungsverlauf und die eingeschränkte Vitalität der Waldbestände ausgesprochen günstige Entwicklungsbedingungen.

Witterung in der Vegetationsperiode 1

Mit 72 % des langjährigen Mittelwertes des Jahresniederschlages war die Vegetationsperiode 1 im Jahr 2003 in Deutschland wesentlich zu trocken. Dabei nehmen die Bundesländer Sachsen und Brandenburg mit jeweils lediglich 55 % eine unrühmliche Spitzenposition ein. Abb. 5.10 bringt die regionale Differenzierung der Niederschläge innerhalb Sachsens zum Ausdruck. So sind in weiten Teilen Nord- und Ostsachsens, wie hier exemplarisch anhand der Fallbeispiele Dresden und Görlitz dargestellt, sogar weit weniger als 50 % der Normalwerte registriert worden.

Aus klimatologischer Sicht kann für das östliche Sachsen die 100-jährige Niederschlagsreihe der Station Görlitz betrachtet werden. Richtet man nun den Blick auf die Monate April, Mai, Juni (Vegetationsperiode 1), so trat die bisher extremste Trockenheit innerhalb dieses Zeitabschnittes im Jahr 2003 auf (42 % des langjährigen Mittelwertes). Es folgen die Jahre 1976 mit 44 % und 1934 mit 48 %. Einen Vergleich der kumulativen Niederschlagshöhen in Jahren mit extrem trockenen Vegetationsperioden liefert Abb. 5.11. Dargestellt wird auch der entsprechende Mittelwert für den Referenzzeitraum 1961–1990 zum Vergleich.

Dabei ist zu berücksichtigen, dass diese Einstufung aufgrund der hauptsächlich durch konvektive Niederschläge geprägten Witterung in diesem Zeitabschnitt nicht für alle Regionen und Orte in Sachsen gleichermaßen zutrifft.

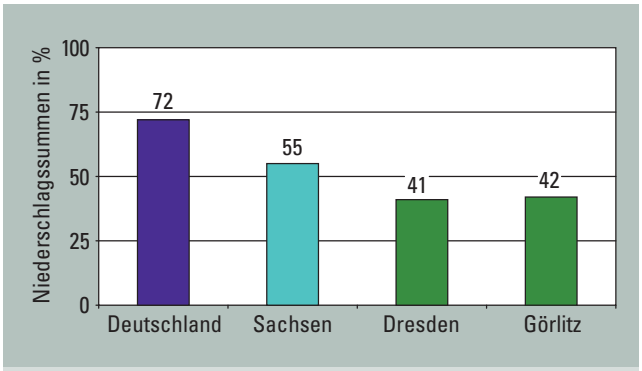


Abb. 5.10: Vergleich der Niederschlagssummen in der Vegetationsperiode 1 des Jahres 2003 mit dem langjährigen Mittel 1961–1990

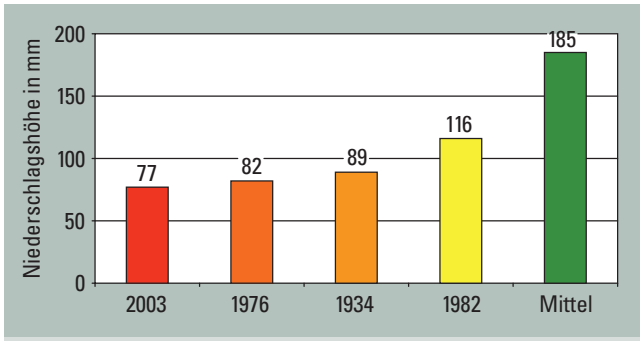


Abb. 5.11: Niederschlagssummen in der Vegetationsperiode 1 in Dürrejahren an der Station Görlitz

Blockierende Hochdruckwetterlagen im Juni und August

Die Lufttemperatur war seit 1761 in Deutschland noch nie so hoch wie im Sommer 2003. Die positiven Abweichungen der bisher wärmsten Sommer in den Jahren 1826, 1834, 1947, 1992 und 1994 wurden erheblich überschritten. Typisch für den Witterungsverlauf waren vor allem die in den Monaten Juni und August zu beobachtenden warmen, strahlungsreichen und sehr trockenen Witterungsabschnitte in Verbindung mit blockierenden stabilen Hochdruckwetterlagen, die ein Übergreifen atlantischer Wetterfronten von Westen her verhinderten.

Im **Juni** bestimmten vorwiegend tropische Luftmassen aus Afrika das Wettergeschehen vor allem im Süden und Südwesten Deutschlands. Bereits in der ersten Junidekade trat eine zu dieser Jahreszeit ungewöhnliche Hitzewelle mit Maxima der Lufttemperatur um 32 °C auf. Zwei Faktoren waren aus meteorologischer Sicht dabei kennzeichnend:

- Die wetterbestimmende Hochdruckzone reichte von Nordskandinavien bis Südeuropa, bildete eine Blockierung der Westdrift, wenngleich nicht in Form einer klassischen „Omega-Lage“ (Abb. 5.12).
- Diese Konstellation stellte sich bereits Anfang Juni ein (Zeitpunkt des Auftretens bislang ohne Beispiel. Üblicherweise treten ähnliche Situationen erst zu den so genannten Hundstagen auf), war außergewöhnlich stabil und bestimmte das Wettergeschehen in Deutschland.

Die Grenze zwischen feuchteren und trockeneren Luftmassen erstreckte sich dabei von Nord nach Süd mitten über Deutschland hinweg, so dass Niederschläge vor

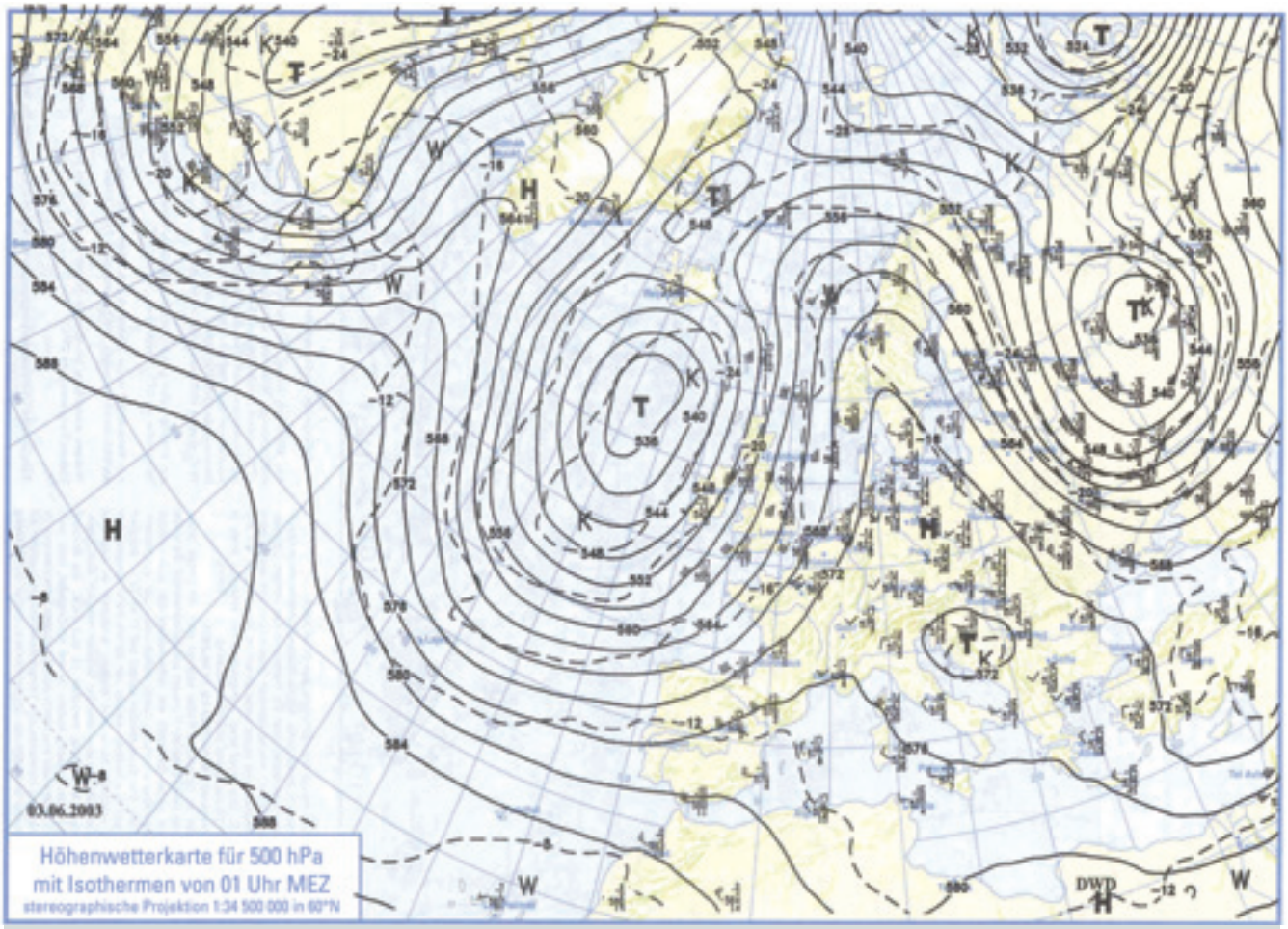


Abb. 5.12: Berliner Wetterkarte vom 03.06.2003 – Höhenwetterkarte 500 hPa, 01 Uhr MEZ

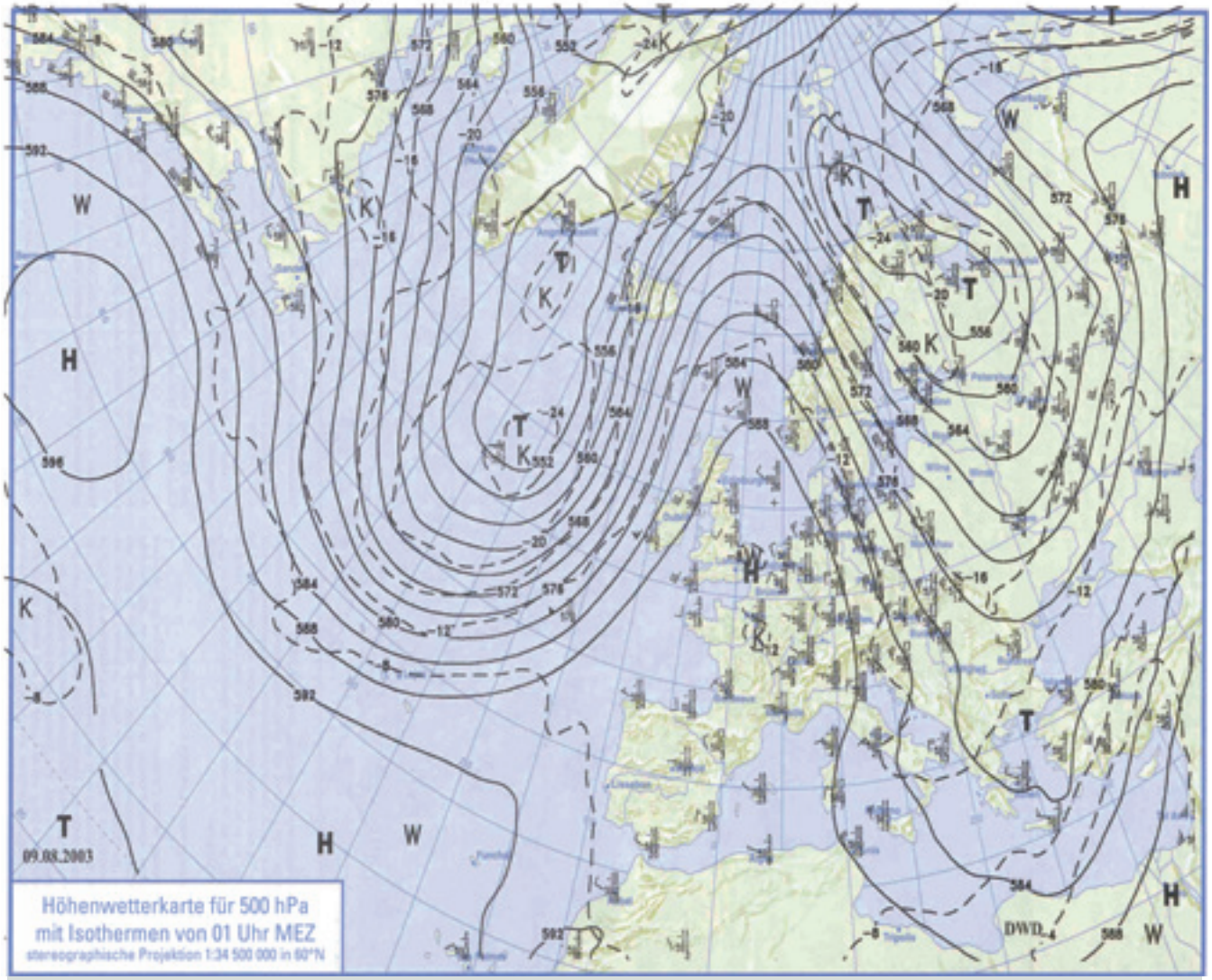


Abb. 5.13: Berliner Wetterkarte vom 09.08.2003 – Höhenwetterkarte 500 hPa, 01 Uhr MEZ

allem in Westdeutschland beobachtet wurden. In Ostdeutschland blieb es meist trocken, so dass sich insbesondere in diesen Regionen die Dürresituation erheblich verschärfte.

Im **August** bestimmte ein stabiler Höhenhochkeil über West- und Mitteleuropa die Witterung in Deutschland (Abb. 5.13).

Infolge des Blockierungseffektes gegenüber atlantischen Wetterfronten setzte sich die Trockenheit in Deutschland damit weiter fort. Bereits Mitte August wiesen viele Flüsse Pegelstände in der Nähe der historischen Tiefststände auf und es traten standortabhängig verbreitet Trockenfärbungen von Bäumen auf.

Insbesondere in der ersten Dekade des August trat eine im Ausmaß bislang nicht beobachtete Hitzeperiode über West- und Südeuropa auf. Allein in Frankreich forderte diese extreme Hitzewelle offiziell etwa 15.000 Hitzeopfer. Diese Hitzewelle erfasste auch weite Teile Süd- und Westdeutschlands und führte dort zu Rekordtemperaturen und einer extrem langen Andauer von heißen Tagen. Im Osten Deutschlands herrschten während dieser Zeit durch das Einsickern trockener Festlandsluft erträglichere Witterungsbedingungen vor. Insgesamt prägte den Witterungscharakter des Sommers 2003 in Sachsen weniger die Hitze, sondern vor allem die permanente Trockenheit (daher Bezeichnung *Dürreperiode 2003*).

Glücklicherweise waren die über Deutschland liegenden Luftmassen – vor allem im Osten Deutschlands – deutlich trockener als in Frankreich oder im Mittelmeerraum. Infolgedessen konnte die Übersterblichkeit offensichtlich auch nicht das Ausmaß erreichen wie z. B. in Frankreich. Während dieser Zeit wurden in Sachsen auch keine mit West- und Südwestdeutschland vergleichbaren Monatsmittel (Abb. 5.14) und Maxima der Lufttemperatur erreicht, da in Verbindung mit einer nordöstlichen Bodenströmung zeitweise etwas kühlere Luft einsickern konnte (Beispiele Monatsmaxima: Dresden und Leipzig 36 °C; Freiburg 40,2 °C; Frankfurt/Main 38,7 °C).

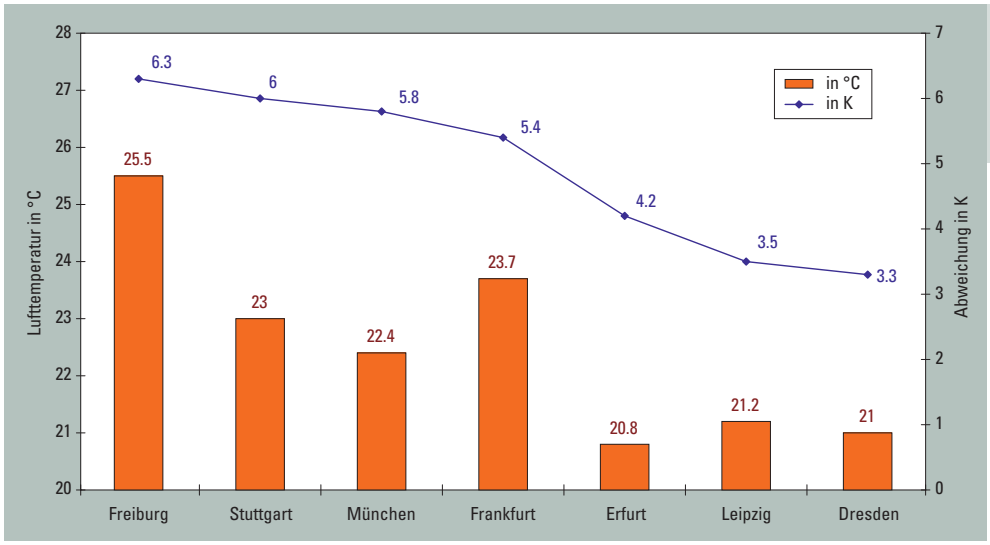


Abb. 5.14:
Monatsmittelwerte der Lufttemperatur (rot) und Abweichungen von Referenzwerten 1961–1990 (blau) im August 2003

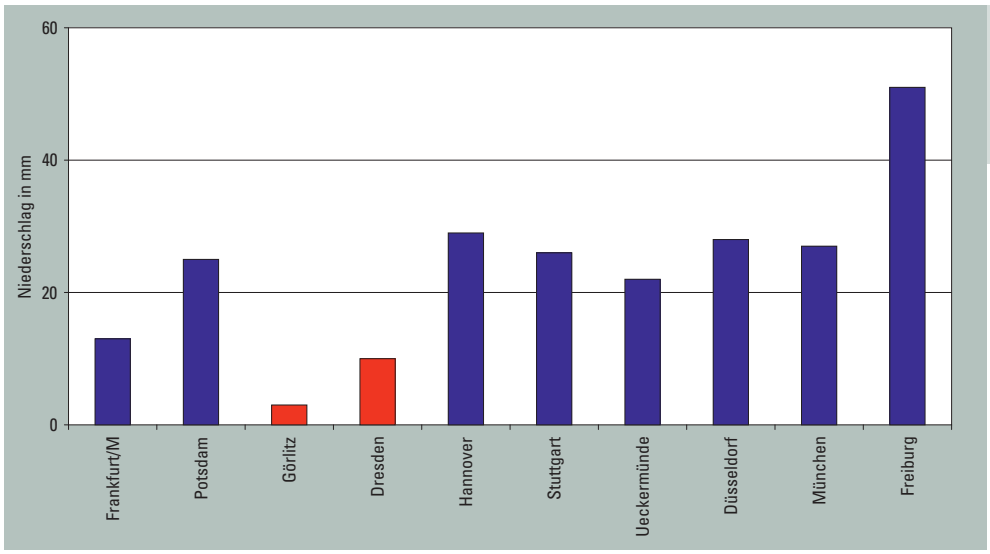


Abb. 5.15:
Monatssummen des Niederschlags an ausgewählten Stationen in Deutschland im August 2003 (Quelle: DWD)

Aus Abb. 5.15 ist zu ersehen, dass Ostsachsen – wie auch Gebiete im Norden Sachsens – von der Trockenheit im August besonders betroffen war. An einigen Stationen konnte seit Beginn meteorologischer Aufzeichnungen der trockenste August registriert werden (z.B. Görlitz 3 mm im Jahr 2003 / bislang Negativrekord 11 mm im August 1942).

Resümee

Der Sommer 2003 wurde geprägt durch eine hohe Persistenz blockierender Hochdruckwetterlagen, die in Sachsen zu ausgesprochen niederschlagsarmer Witterung führten. Eine solche Wiederholungstendenz der Wetterabläufe resultiert aus einer großräumigen Stationarität der planetarischen Zirkulationsmuster. Für den Zeitraum der meteorologischen Messungen seit 1761 kann der Sommer 2003 in Deutschland als äußerst extremes und statistisch gesehen nahezu „unmögliches" Ereignis gewertet werden (Temperaturanomalie +3,5 K; bisheriger Rekord 1947 mit +2,3 K). Unter Annahme eines konstanten Klimas sollte sich eine solche Hitzeperiode wie im Sommer 2003 höchstens alle 10.000 Jahre ereignen (Schönwiese et al., 2004). Maßgeblich geprägt wurde die Dürreperiode durch die extrem warme und trockene Witterung im Juni und August.

Die Dürreperiode 2003 in der Vegetationsperiode 1 in Sachsen ist, wie auch schon das Starkregenereignis im August 2002, als „Jahrhundert-Ereignis" einzuordnen.

6 Folgen des Klimawandels in Sachsen

6.1 Mögliche Auswirkungen klimatischer Veränderungen auf die Vegetationsentwicklung in Sachsen

6.1.1 Einführung

Durch den bereits stattfindenden Klimawandel sind Ökosysteme, Wälder und landwirtschaftliche Nutzpflanzen erheblich gefährdet. So kann ein zeitigerer Austrieb der Pflanzen im Frühjahr zu einem erhöhten Spätfrostrisiko mit einer Zunahme von Frostschäden führen. Verschiebungen der Vegetationsperiode können in der landwirtschaftlichen Produktion Veränderungen in der Bewirtschaftung zur Folge haben und damit ökonomische Bedeutung erlangen. Zunehmende Trockenheit im Sommer in Verbindung mit höheren Temperaturen kann sowohl für die natürlichen als auch für die gestalteten Ökosysteme zu vielfältigen negativen Auswirkungen führen.

Phänologische Daten ermöglichen die Saisonalität von Pflanzen zu beschreiben, die natürliche Vegetationszeit einer Region zu definieren und den jährlichen Entwicklungsverlauf der Vegetation darzustellen. Da die Entwicklungsprozesse der Pflanzen in hohem Maße temperaturabhängig sind, werden phänologische Beobachtungen zu empfindlichen Bioindikatoren für Klimaänderungen in den mittleren und höheren Breiten.

Dies gilt vor allem für die Frühjahrsphasen, d.h. das Aufbrechen der Knospen, die Blattentfaltung und die Blüte von Pflanzen. Bereits zum Ende der Vegetationszeit im Herbst bereiten sich die Bäume und Sträucher auf den Vegetationsbeginn im kommenden Jahr vor. Knospen werden angelegt und die Pflanze tritt nachfolgend in die Winterruhe ein. In diesem Zustand führen für das Wachstum und die Entwicklung der Pflanzen normalerweise förderliche Temperaturen noch nicht zum Austrieb der Knospen. Die Pflanze muss erst über einen bestimmten Zeitraum, der von Pflanzenart zu Pflanzenart verschieden ist, niedrigen Temperaturen (ca. 0–10 °C) ausgesetzt sein, bevor die Knospen die Winterruhe überwunden haben. Diesen Zustand erreichen die Bäume und Sträucher meist schon gegen Ende des Jahres. Erst jetzt können für das Wachstum der Pflanzen förderliche Temperaturen die Entwicklung der Knospen weiter vorantreiben, so dass nach dem Erreichen einer bestimmten Temperatursumme im Frühjahr die Knospen aufbrechen, sich die Blätter entfalten bzw. die Pflanzen zu blühen beginnen.

Das Sächsische Landesamt für Umwelt und Geologie hat im Jahr 2002 das Forschungsprojekt KLIVEG an die Humboldt-Universität Berlin, Institut für Pflanzenbauwissenschaften vergeben. Das Vorhaben sollte einen ersten detaillierten Beitrag zur Beurteilung der Auswirkungen von gegenwärtigen und zu erwartenden Klimaänderungen auf die Vegetationsentwicklung in Sachsen liefern (Chmielewski et al., 2004). Die Ergebnisse werden nachfolgend vorgestellt.

6.1.2 Methodik

Für die Untersuchungen zur Vegetationsentwicklung in Sachsen wurden phänologische Beobachtungsdaten des Deutschen Wetterdienstes (DWD) im Zeitraum 1961–2000 verwendet. Aus dem Beobachtungsprogramm des DWD sind diejenigen Pflanzenarten ausgewählt worden, die für Sachsen relevant sind und für die möglichst viele Beobachtungen vorlagen. Die untersuchten Pflanzen sind drei Gruppen zugeordnet:

- **Natürliche Vegetation**
  Hänge-Birke, Rosskastanie, Stiel-Eiche, Sommer-Linde, Flieder, Fichte, Robinie, Schwarzer Holunder, Sal-Weide, Wiesen-Knaulgras
- **Obstgehölze**
  Apfel, Süßkirsche, Sauerkirsche, Stachelbeere, Rote Johannisbeere
- **Landwirtschaftliche Nutzpflanzen**
  Winterroggen, Hafer

Zur Analyse der Beziehungen zwischen Klima und Vegetationsentwicklung wurden Klimadaten aus den CLISAX-Studien verwendet. Diese Daten umfassen Beobachtungswerte aller sächsischen Klimastationen sowie einiger weiterer Standorte im Grenzbereich zu den benachbarten Bundesländern. Für die Untersuchungen im Rahmen dieses Vorhabens wurden in erster Linie Beobachtungswerte der Lufttemperatur benötigt, da die Pflanzenentwicklung in den mittleren Breiten maßgeblich durch diesen Parameter gesteuert wird. Lang anhaltende Trockenperioden haben ebenfalls vielfältige Wir-

kungen auf die Pflanzen, so dass auch die Veränderungen im Niederschlagsregime für Sachsen von Interesse waren.

Der in der Studie verwendete Zeitraum umfasst entsprechend den phänologischen Beobachtungen die Periode 1961–2000.

Die Beurteilung der künftigen Vegetationsentwicklung in Sachsen basiert auf der speziell für den Freistaat Sachsen entwickelten Regionalen Klimaprojektion REKLISA bzw. WEREX mit den Szenarien I (2021–2030), II (2031–2040), III (2041–2050) und dem Kontrolllauf (1981–2000).

6.1.3 Ergebnisse

Fröste

Die häufigsten Frostschäden treten nicht im Winter auf, wenn die Gehölze sich in der Ruhephase befinden und damit größtenteils frostresistent sind, sondern im Herbst und Frühjahr, wenn dieser Zustand noch nicht erreicht ist oder die Pflanzen keine ausreichende Kälteresistenz mehr besitzen. Dementsprechend wird der Zeitraum zwischen dem letzten Frost im Frühjahr und dem Auftreten des ersten Frostes im Herbst zur Definition der Vegetationszeit verwendet. Für den Obst-, Gemüse- und Weinbau sowie den Anbau einiger Sonderkulturen ist vor allem der Termin des letzten Frostes im Frühjahr (Spätfrost) von Bedeutung. Frost während der Obstblüte kann zu völligen Ertragsausfällen führen. Hierbei ist die Stärke, Andauer und der Zeitpunkt von Frösten entscheidend. Ebenfalls spielt die Pflanzenart und Resistenz der Sorte eine Rolle. Die Empfindlichkeit der Pflanzen gegenüber Spätfrost steigt mit ihrer fortschreitenden Entwicklung. Geschlossene Blütenknospen beim Apfel halten kurzzeitig noch Temperaturen von –4 °C aus, voll entfaltete Blüten nur noch Tiefsttemperaturen bis etwa –2 °C, kleine Früchte hingegen keine Minima mehr unter –1°C. Kirschen hingegen sind deutlich frostempfindlicher. Hier können die schwellenden Knospen bereits bei –2 °C erfrieren.

Für Sachsen ergibt sich im vieljährigen Mittel ein frostfreier Zeitraum von 172 Tagen zwischen dem 29. 04. und 19.10. In den letzten 40 Jahren hat sich die frostfreie Zeit signifikant um 17 Tage verlängert. Die Ausdehnung der frostfreien Zeit ist annähernd zu gleichen Teilen auf das spätere Auftreten der Frühfröste und das zeitigere Ende der Spätfröste zurückzuführen. Pflanzen, die in ihrer Entwicklung im Frühjahr eine stärkere Verfrühung als 2,0 Tage pro Jahrzehnt aufweisen, sind somit zunehmend spätfrostgefährdet.

Das Auftreten von Spätfrösten ist deutlich von der Topographie abhängig. Mit zunehmender Höhenlage verspä-

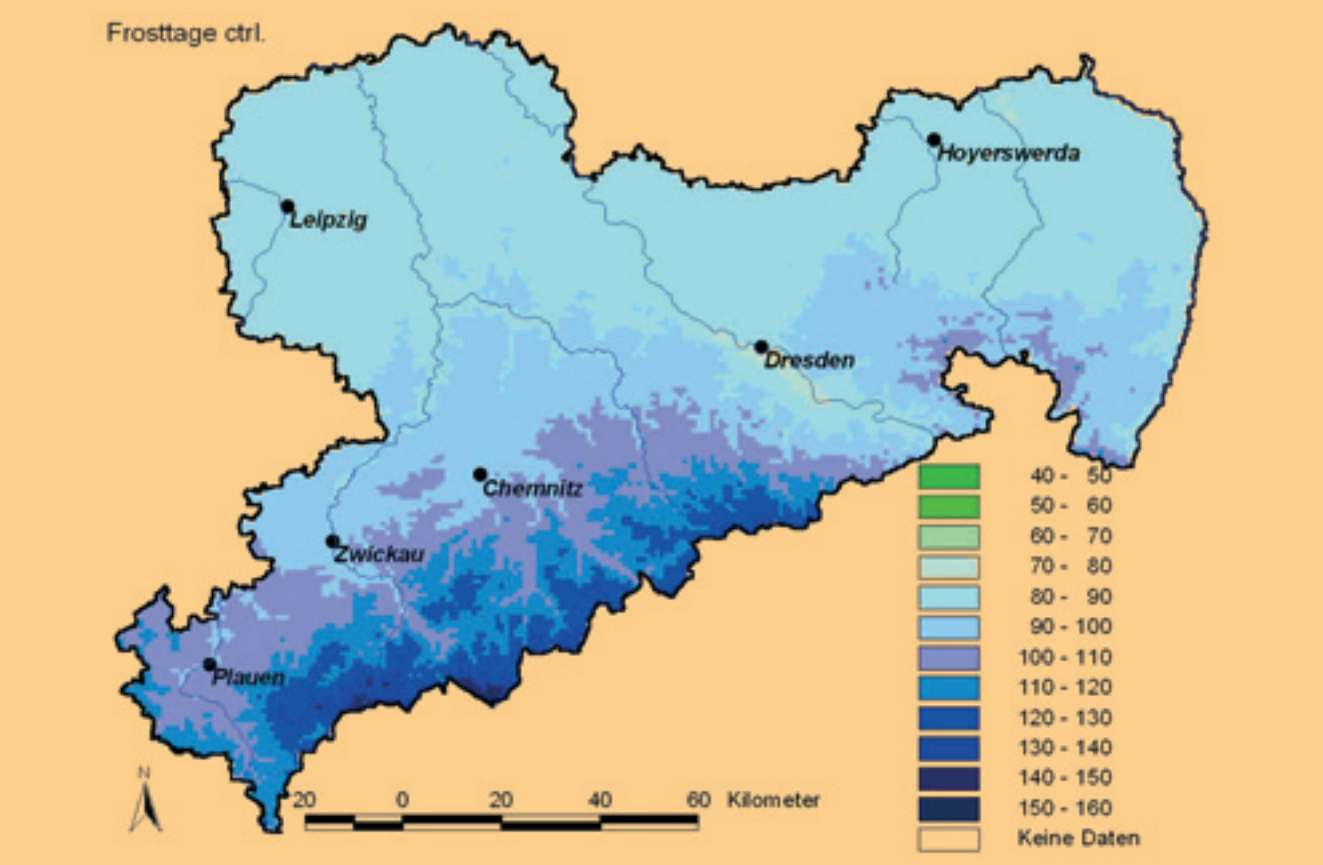


Abb. 6.1.1: Jährliche Anzahl von Frosttagen im Kontrolllauf (1981–2000)

tet sich der Beginn der frostfreien Zeit. Über 800 m ü. NN kommt es noch nach dem 15. 05. zu Spätfrösten. Auf den höchsten Lagen werden noch bis Ende Mai Spätfröste beobachtet. Im Elbtal und den Tälern der Flüsse werden diese im Mittel nur bis zum 25. April registriert.

In den Szenarien zeichnet sich eine weitere Verlängerung der frostfreien Zeit ab. Hierfür ist im Gegensatz zu den Beobachtungen ausschließlich das verspätete Auftreten der ersten Frühfröste verantwortlich. Diese verschieben sich je nach Szenario um 8 bis 13 Tage nach hinten. Veränderungen bei den Spätfrösten sind nicht erkennbar. Dies hat zur Folge, dass die Gefahr von Spätfrost für die Pflanzen steigen wird, da die Vegetationsentwicklung aufgrund des höheren Temperaturniveaus generell früher einsetzt und schneller abläuft. Die geringe Veränderlichkeit der Spätfröste gegenüber den Frühfrösten ist sehr wahrscheinlich durch regionale Besonderheiten bedingt. Hierfür ist vor allem die Zunahme von Ostwetterlagen im Frühjahr verantwortlich, die immer wieder zum Absinken der nächtlichen Tiefsttemperaturen unter den Gefrierpunkt infolge intensiver Ausstrahlung führt.

Nur in den Tieflandsbereichen zeigt sich eine geringe Verfrühung des letzten Spätfrostes. Die Frühfröste hingegen verspäten sich in ganz Sachsen, woraus eine Verlängerung der frostfreien Zeit resultiert. Selbst in den Hochlagen ist diese Veränderung erkennbar.

Eine Ausdehnung der frostfreien Zeit bedeutet zugleich eine Abnahme der jährlichen Zahl von Frosttagen. Diese reduziert sich von 101 Tagen auf bis zu 73 Tage je nach Szenario bis 2050.

Thermische Vegetationsperiode

Die Länge der Vegetationsperiode bestimmt im Wesentlichen den Zeitraum, der in einer Region für das Wachstum und die Entwicklung der Pflanzen jährlich zur Verfügung steht. Im Allgemeinen wird die thermische Vegetationszeit durch das Über- bzw. Unterschreiten der Tagesmitteltemperatur von 5 °C definiert. Dieser Zeitraum dauert in Sachsen im Mittel 223 Tage, d. h. ca. 7 Monate. Der mittlere Vegetationsbeginn in Sachsen (28. 03.) fällt annähernd mit der Aussaat des Sommergetreides zusammen. Die Vegetationsperiode endet im Mittel am 7. November.

Über den Untersuchungszeitraum 1961–2000 ergibt sich ein Trend zur Verlängerung der Vegetationsperiode von 2,2 Tagen pro Jahrzehnt, der hauptsächlich durch die Verfrühung des Vegetationsbeginns bedingt ist. Damit bestätigt sich auch für Sachsen die allgemeine Tendenz zu einer Verlängerung der Vegetationsperiode.

Räumlich gesehen variiert die Andauer der Vegetationszeit zwischen 180 Tagen in den Höhenlagen der Mittel-

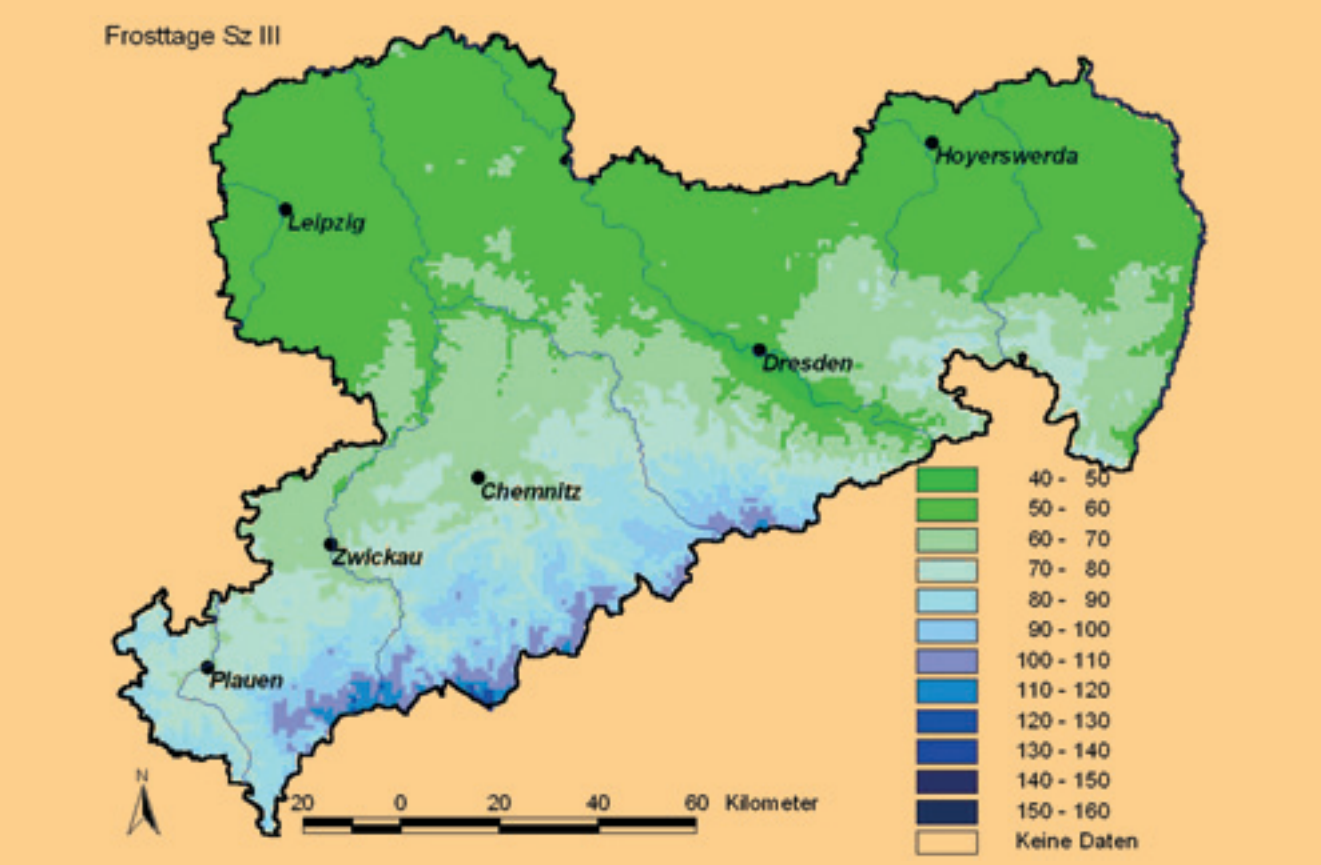


Abb. 6.1.2: Jährliche Anzahl von Frosttagen im Szenario III (2041–2050)

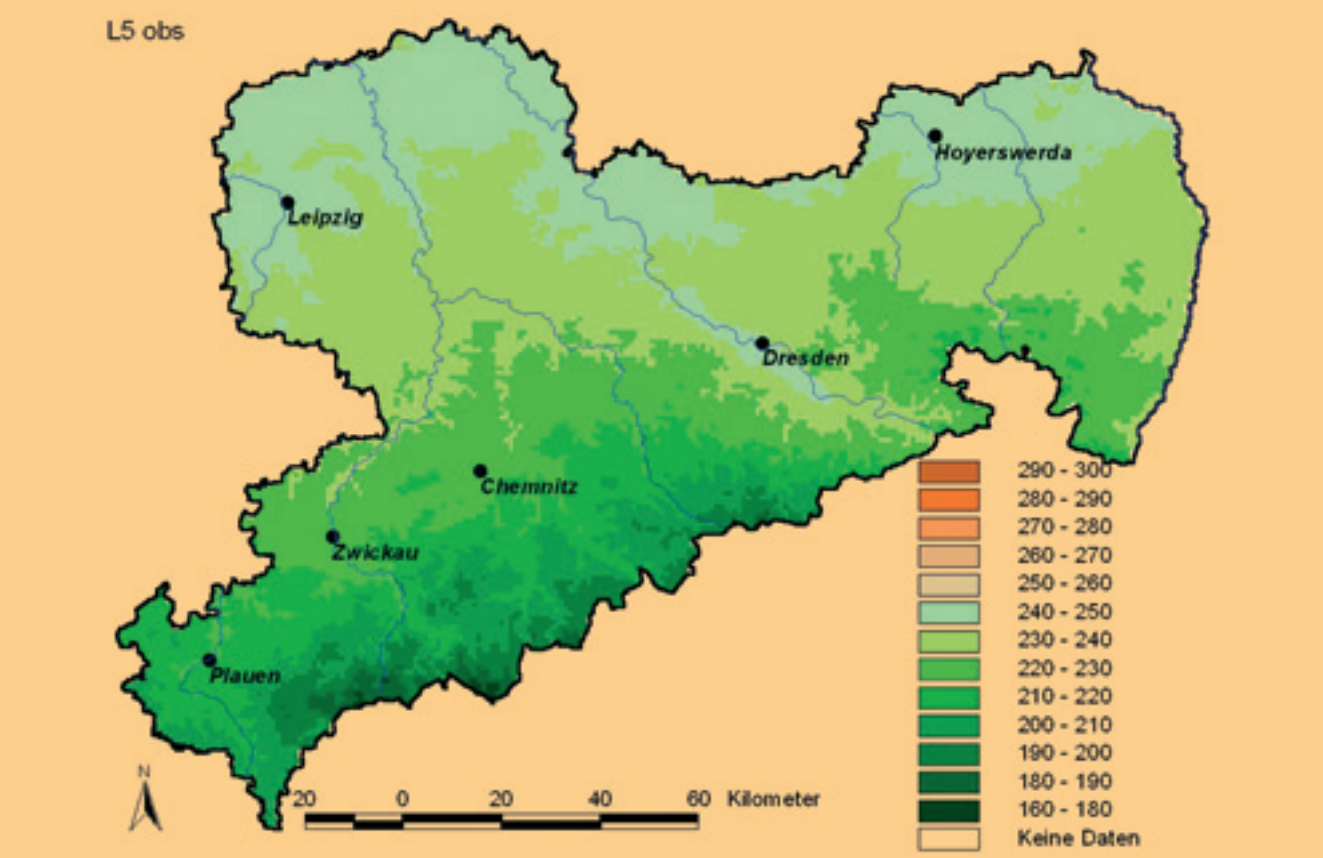


Abb. 6.1.3: Mittlere Dauer der thermischen Vegetationsperiode (in Tagen), 1961–2000

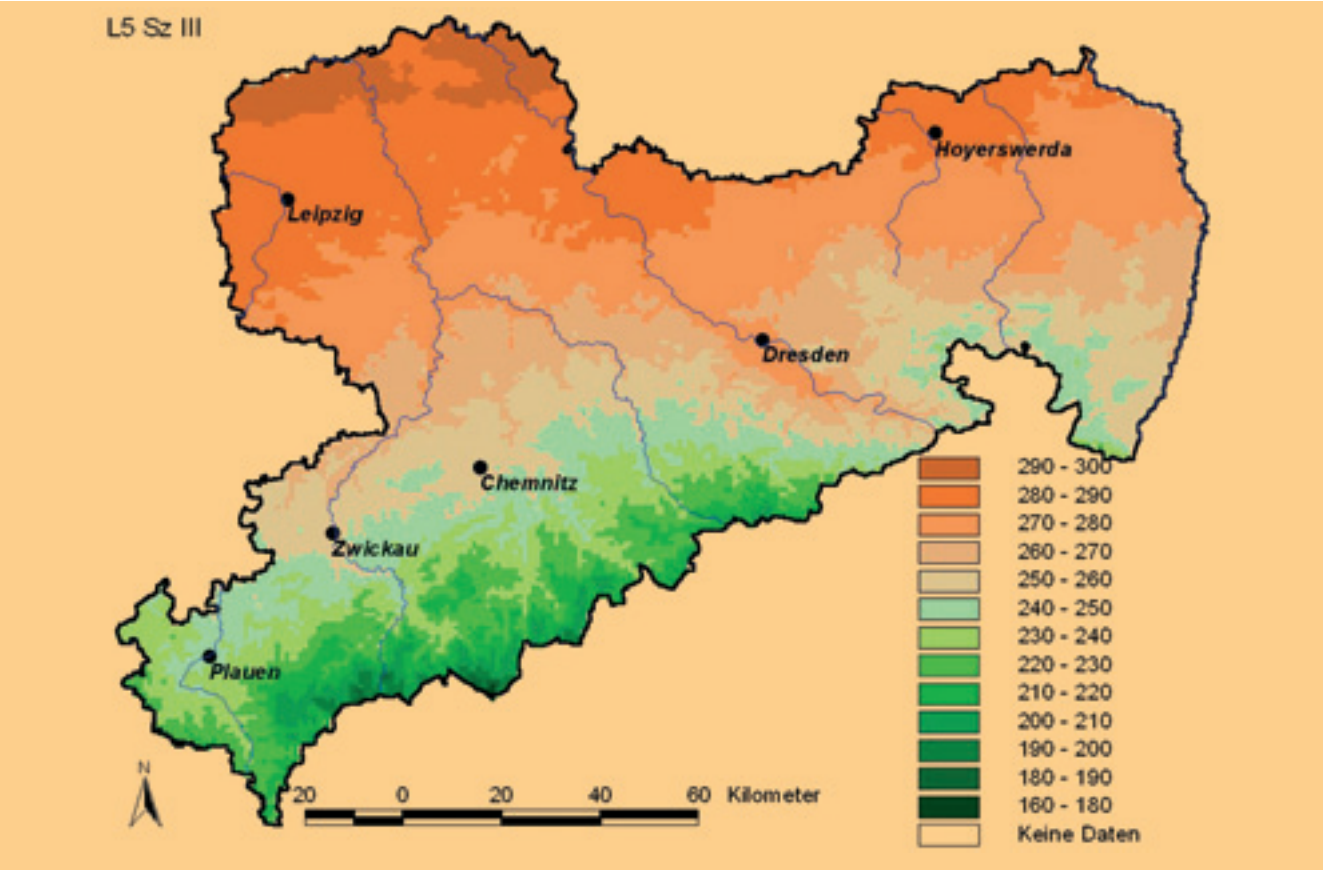


Abb. 6.1.4: Dauer der Vegetationsperiode (in Tagen) im Szenario III (2041–2050)

gebirge und 250 Tagen in den nördlichen Tieflandsbereichen und im Elbtal. Dabei beginnt die Vegetationsperiode im Tieflandsbereich um den 16. März und verzögert sich nach Süden mit zunehmender Höhe auf den 15. April und später. Das Ende der Vegetationsperiode vollzieht sich genau gegenläufig. Es setzt in den Höhenlagen vor dem 31. Oktober ein und erreicht das Tiefland bis zum 16. November.

Die bereits beobachtete Verlängerung der thermischen Vegetationszeit wird sich künftig fortsetzen. Die mittlere Andauer wird um mindestens 10 Tage bis maximal 31 Tage zunehmen. Als Ursache ist sowohl die Verfrühung des Vegetationsbeginns als auch die Verspätung des Vegetationsendes anzusehen. Hierbei kommt es vor allem an den Stationen bis ca. 450 m ü. NN zu einer deutlichen Verfrühung des Vegetationsbeginns. Die Länge der thermischen Vegetationsperiode ändert sich demzufolge vor allem in den Tieflandsbereichen und bleibt mit zunehmender Höhe annähernd gleich. In der Leipziger Tieflandsbucht, im Leipziger Land bis in das südliche Sächsische Hügelland verlängert sich die Vegetationsperiode bis 2050 auf 280–300 Tage, d. h. um immerhin 30–50 Tage. Auch in der Elbtalweitung kann noch eine Verlängerung von 20–30 Tagen beobachtet werden. In den höchsten Lagen des Sächsischen Mittelgebirges fällt die Verlängerung mit weniger als 5 Tagen nur gering aus.

Klimatische Bedingungen in der Hauptvegetationszeit

Der Zeitraum von April bis Oktober kann als Hauptvegetationszeit definiert werden, da das Pflanzenwachstum der meisten Kulturarten in diese Periode fällt. Für die Entwicklung des Getreides sind hiervon die ersten 4 Monate relevant, für das Wachstum der Hackfrüchte vor allem der Zeitraum ab Juli. Für die natürliche Vegetation ist dieser Zeitabschnitt ebenfalls von Bedeutung, da in dieser Zeit der Hauptbiomassezuwachs erfolgt. Die mittlere Temperatur in der Hauptvegetationszeit beträgt heute 12,3 °C. In den Szenarien setzt sich der Temperaturanstieg innerhalb der Hauptvegetationszeit fort, so dass bis 2050 die Mitteltemperatur 14,3 °C beträgt. Der Temperaturanstieg ist sachsenweit zu beobachten, wobei die Erwärmung in den Höhenlagen geringfügig stärker ausfällt als in den tiefer gelegenen Gebieten. Zudem wird die Niederschlagshöhe in der Hauptvegetationszeit deutlich abnehmen. Bis 2050 kann der Wert von heute 436 mm auf 402 mm sinken. Damit ergibt sich in diesem für die Entwicklung der Vegetation wichtigen Zeitraum eine Reduktion des mittleren Niederschlages um nahezu 34 mm. Sowohl der Temperaturanstieg als auch die fehlenden Niederschläge im Zeitraum zwischen April und Oktober werden sich negativ auf den Bodenwasserhaushalt und damit auf das Pflanzenwachstum auswirken.

Trends der Pflanzenentwicklung

Die Ergebnisse der Untersuchungen belegen, dass die für Europa und Deutschland gefundenen Trends in der Pflanzenentwicklung uneingeschränkt auf Sachsen übertragbar sind. Seit dem Ende der 1980er Jahre zeigen sich bei nahezu allen Pflanzen deutliche Verfrühungen in den einzelnen Phasen, die außerordentlich gut mit den Veränderungen der Lufttemperatur korrespondieren. Die Ergebnisse des Forschungsprojektes zeigen, dass sowohl die natürliche Vegetation als auch Obstgehölze und landwirtschaftliche Kulturen auf die Klimaveränderungen bereits deutlich reagiert haben. Unterschiede in der Reaktionsstärke bestehen sowohl zwischen den Pflanzenarten als auch in der Jahreszeit. Generell zeigen die Frühjahrsphasen den stärksten Trend zur Verfrühung. Innerhalb einer Pflanzenart nimmt dieser Trend im Jahresverlauf ab und kann sich bis zum Herbst teilweise in eine Verspätung des Phaseneintritts umwandeln. Die Pflanzen reagieren im Frühjahr außerordentlich stark auf die Variabilität der Witterung, während im Herbst höhere Temperaturen die physiologischen Prozesse der Pflanze noch aufrechterhalten können, so dass bei einem Anstieg der Herbsttemperaturen eine verlängerte Pflanzenentwicklung zu erwarten ist, wenn nicht vorausgehende Trockenheit zu vorzeitiger Blattverfärbung und zum Blattfall führt.

Auch für die Zukunft ist zu erwarten, dass sich sowohl bei der natürlichen Vegetation als auch beim Obst die größten Veränderungen für die zeitigen Frühjahrsphasen zeigen. Diese starken Verfrühungen sind auf die markanten Veränderungen der Lufttemperaturen in den beiden letzten Wintermonaten zurückzuführen. Die später im Jahresverlauf auftretenden Sommer- und Herbstphasen zeigen deutlich geringere Veränderungen. Während für die Phasen der Fruchtreife noch ein leichter negativer Trend vorhanden ist, zeigt der Termin der Blattverfärbung im Herbst kaum noch eine Verschiebung. Beim Obst wurde ebenfalls eine deutliche Verfrühung der zeitigen Phasen nachgewiesen.

Die Pflückreife beim Obst liegt in den Monaten Juni und Juli. Aufgrund der steigenden Sommertemperaturen insbesondere in den ersten beiden Monaten wird die Fruchtreife merklich beschleunigt. Die maximalen Verfrühungen bei den Obstarten betragen 5 bis 9 Tage. Hierdurch wird jedoch die Länge des Reifezeitraums der Gehölze nicht beeinträchtigt, da sich der Blühbeginn in ähnlichem Maße verfrüht hat.

Bei den landwirtschaftlichen Nutzpflanzen sind nur geringe Veränderungen in der Entwicklung erkennbar. Die Phase der Bestellung konnte bei beiden untersuchten Getreidearten (Hafer, Winterroggen) nicht berechnet werden, da der Termin von vielfältigen Faktoren abhängig ist. Beim Hafer besteht ein sehr enger Zusammenhang zwischen der Bestellung und dem Auflaufen der Saat.

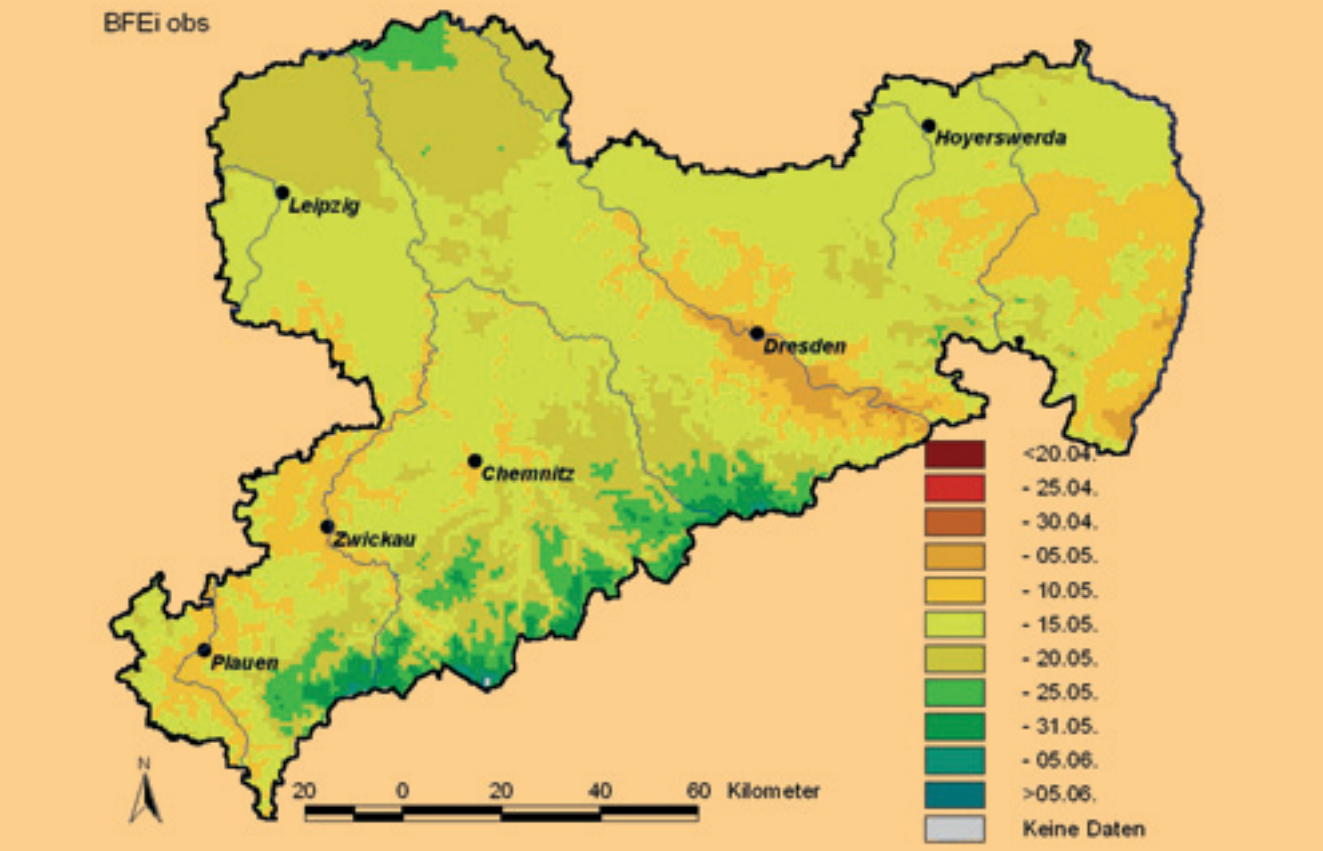


Abb. 6.1.5: Beginn der Blattentfaltung bei der Stieleiche, 1961–2000

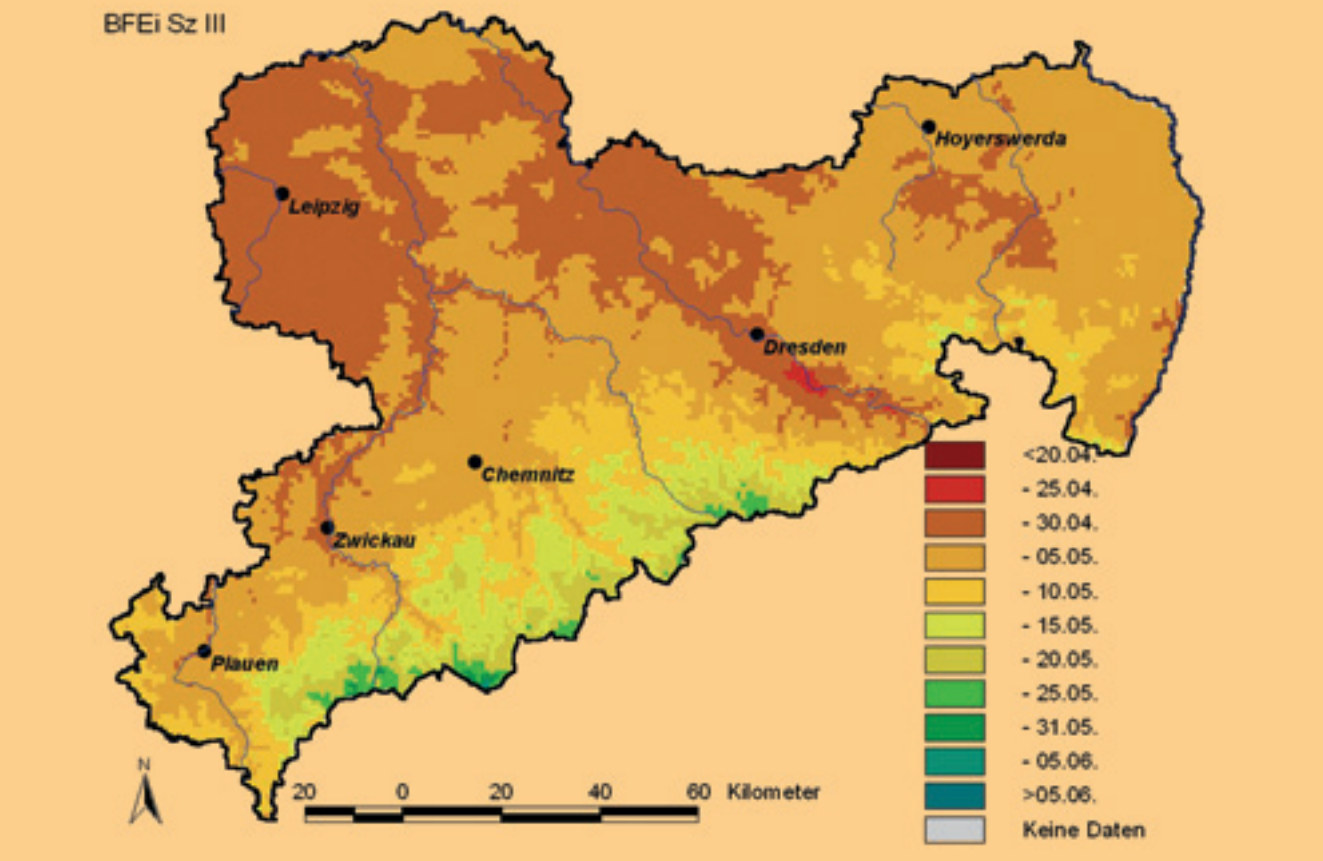


Abb. 6.1.6: Beginn der Blattentfaltung bei der Stieleiche, Szenario III (2041–2050)

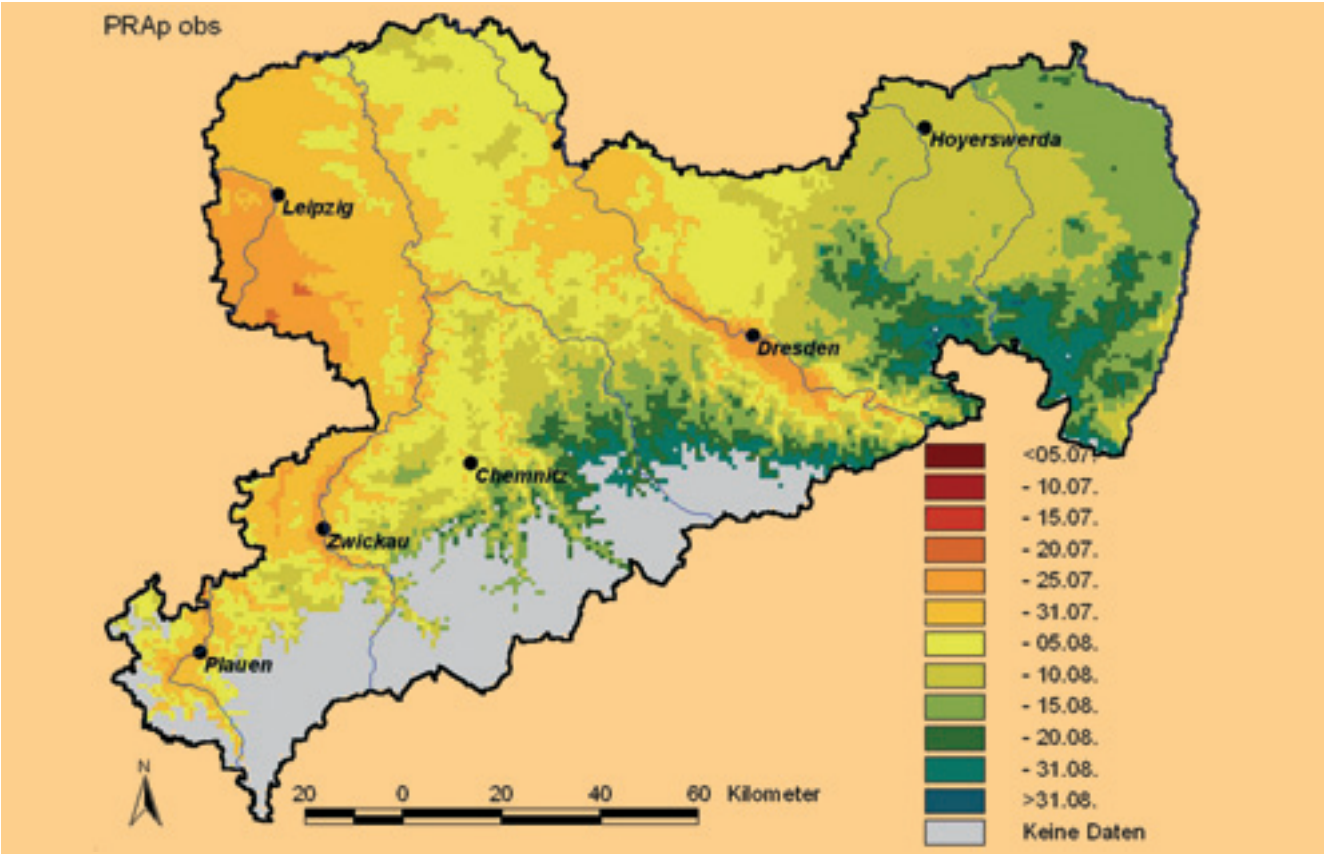


Abb. 6.1.7: Pflückreife des Apfels, 1961–2000

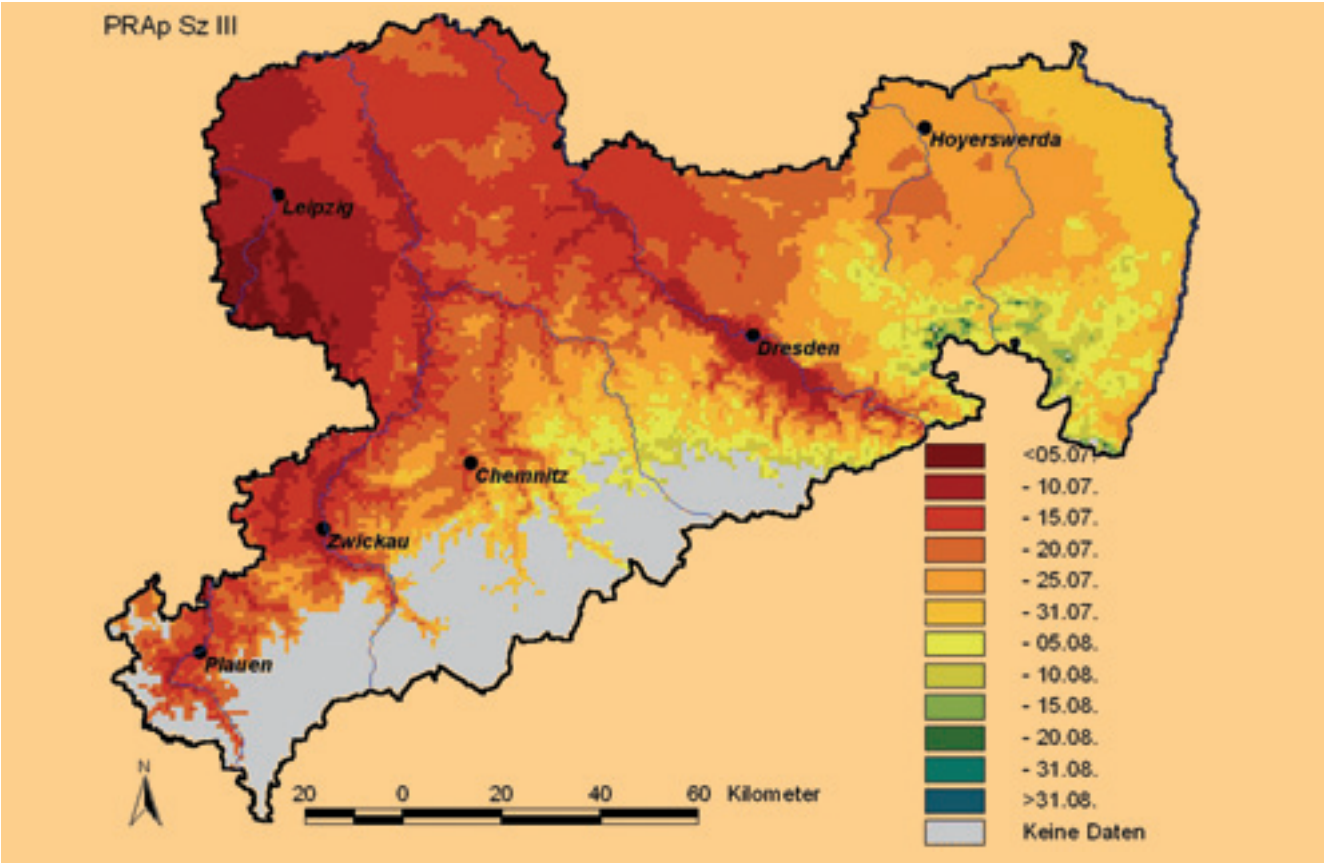


Abb. 6.1.8: Pflückreife des Apfels, Szenario III (2041–2050)

Die nachfolgenden Phasen sind schon relativ unabhängig vom Aussaattermin und werden zunehmend durch den Witterungsverlauf gesteuert. Die sich in den Szenarien ergebenden Veränderungen im Eintrittstermin der Phasen sind jedoch äußerst gering. Beim Winterroggen erfolgen die Bestellung und das Auflaufen der Saat zum Ende der Vegetationsperiode im Herbst. Die nachfolgenden Phasen wie Schossen, Ährenschieben, Vollblüte und Ernte werden erst im darauf folgenden Jahr beobachtet und sind somit unabhängig vom Aussaattermin. Der Schossbeginn und der Beginn des Ährenschiebens werden maßgeblich durch die Temperaturen im zeitigen Frühjahr beeinflusst. Da in diesem Zeitraum die Temperaturänderungen eher gering sein werden, beträgt die maximale Verfrühung beider Phasen im Durchschnitt nur moderate 3 Tage.

Veränderung der Frostgefahr während der Blüte von Obstgehölzen

Die potentielle Spätfrostgefährdung der Pflanzen ist von vielen Faktoren abhängig. Hierzu zählen neben Pflanzenart und Sorte der Zeitpunkt, die Stärke und die Andauer des Frostes. Für den Anbau von Obst und Wein ist die Frostgefahr von außerordentlicher Bedeutung, da durch einzelne Frostnächte die Ernte eines ganzen Jahres vernichtet oder merklich dezimiert werden kann. Der Witterungsverlauf während der Obstblüte ist daher von größerer Bedeutung als die Bedingungen während der Reife. Die Untersuchungen haben ergeben, dass sich der Blühbeginn bei allen untersuchten Obstarten bis 2050 weiter verfrühen wird. Die Abnahme der jährlichen Anzahl von Frosttagen ist vor allem auf die Reduktion der herbstlichen Frühfröste zurückzuführen. Das zeitliche Auftreten von Spätfrösten hingegen unterliegt kaum Veränderungen. Hierdurch wird sich für einige Obstbäume eine zunehmende Frostgefährdung ergeben. Für alle untersuchten Gehölze zeigt sich eine deutliche Zunahme der leichten und mittleren Fröste während der Blüte. Für die Süßkirschen ergibt sich beispielsweise nahezu eine Versechsfachung der Frostgefahr. Da die Knospen und Blüten von Kirschbäumen weniger frostresistent sind als die von Apfelbäumen ist hier die Gefahr von Frostschäden äußerst hoch.

Abb. 6.1.9: Apfelblüte

Insgesamt zeigt sich, dass durch die Verfrühung der Obstblüte die Spätfrostgefahr deutlich zunehmen wird. Die früher blühenden Kirschbäume sind hiervon extrem betroffen. Bei Äpfeln kann annähernd mit einer Verdoppelung von Spätfrostschäden gerechnet werden.

Auswirkungen von Trockenheit auf die Pflanzenentwicklung

Die Untersuchungen haben gezeigt, dass überdurchschnittliche Temperaturen zu einer Verfrühung der phänologischen Phasen im Frühjahr und Sommer führen. Ein milder Herbst kann im Gegensatz hierzu die physiologischen Prozesse der Pflanze noch verlängern und somit den Zeitpunkt der Blattverfärbung verzögern. Voraussetzung hierfür sind ausreichende Niederschläge innerhalb der Vegetationszeit. Extreme Trockenheit, die in unseren Breiten meist mit überdurchschnittlichen Temperaturen einhergeht, kann den Einfluss der Lufttemperatur auf die Pflanzenentwicklung verstärken oder kompensieren. Lang anhaltende Trockenheit im Sommer führt vor allem zu vorzeitiger Reife, beispielsweise beim Getreide und beim Obst. Die durch Trockenheit und Hitze eingeleitete Notreife ist meist mit deutlichen Ertragseinbußen verbunden. Trockenperioden im Sommer und Herbst führen vor allem bei Bäumen zum frühzeitigen Laub- bzw. Nadelabwurf. Diese Reaktion ist vor allem auf extremen Trockenstress zurückzuführen. Der Sommer 2003 war beispielhaft dafür, welche Auswirkungen Trockenheit und Hitze auf die Pflanzenentwicklung haben können. Eine quasi-stationäre Hochdruckwetterlage über Mitteleuropa führte in diesem Jahr zu Rekordtemperaturen, einer überdurchschnittlichen Sonnenscheindauer und erheblichen Niederschlagsdefiziten in weiten Teilen Europas. Die Sommertemperatur lag in Europa um 2 °C, in Deutschland sogar um 3,4 °C über dem langjährigen Durchschnitt. In Sachsen betrug die mittlere Temperaturanomalie zwischen März und Juni +2,1 °C, das Niederschlagsdefizit belief sich im selben Zeitraum bereits auf 176 mm. Vielerorts waren deutliche Trockenschäden an Bäumen erkennbar. Die ausgesprochen intensive Blüte und Fruchtbildung bei fast allen Gehölzen im Jahr 2003 stellte einen zusätzlichen Kraftaufwand für die Bäume dar, so dass zur Bewältigung der extremen Witterung kaum Reserven vorhanden waren. Dementsprechend offensichtlich waren die Schäden.

Auch in Sachsen wurden Reaktionen der Bäume auf die Trockenheit festgestellt. Besonders betroffen von einem vorzeitigen Blatt- und Fruchtfall waren die Buchen-, Eichen- und Kiefernbestände. Die Blattverfärbung setzte ca. 1–3 Wochen früher als normal ein. Bei Fichten war 2003 ein starker Borkenkäferbefall zu verzeichnen. Die trocken-warme Witterung führte zu einer Massenvermehrung der Schädlinge. In einigen Regionen wurden bis zu vier Generationen von Borkenkäfern beobachtet. Die Schäden an den durch die Trockenheit geschwächten Bäumen waren selbst noch im Folgejahr 2004 erkennbar. Vor allem die Eichen zeichneten sich noch im Frühjahr

2004 durch ein sehr dünnes Blattkleid aus. Vermutlich haben die Bäume aufgrund der Trockenheit im Jahr 2003 zu wenig Nährstoffe aufgenommen, so dass ihnen folglich die Kraft zum Austreiben fehlte. Die wenigen, selbst erst im Mai ausgetriebenen Blätter waren deutlich von Schädlingen (u. a. Frostspanner, Eichenwickler) befallen. Stärkerer Schädlingsbefall war auch an Buchen zu erkennen, die 2003 gleichfalls stark unter der Trockenheit gelitten haben.

Einzelne trocken-heiße Sommer werden gewiss nicht zu irreversiblen Schäden an der Vegetation führen. Die Klimaszenarien für Sachsen deuten jedoch auf eine Zunahme solcher Ereignisse hin. Trockenheit und Hitze werden daher zunehmend das Wachstum und die Entwicklung der Pflanzen in Sachsen beeinträchtigen.

6.1.4 Zusammenfassung und Schlussfolgerungen

Über die letzten 40 Jahre (1961–2000) haben sich in Sachsen nachweisbare klimatische Veränderungen vollzogen. Diese äußern sich in einem Anstieg der Lufttemperatur, der vor allem im Winter und Frühjahr ausgeprägt ist sowie in einer zunehmenden Vorsommertrockenheit von April bis Juni. Verbunden mit dem Anstieg der winterlichen Lufttemperatur ist die Abnahme der jährlichen Anzahl von Frosttagen und dementsprechend die Verlängerung der frostfreien Zeit um immerhin 17 Tage. Die thermische Vegetationszeit hat sich hauptsächlich infolge eines früheren Vegetationsbeginns um 9 Tage verlängert.

Phänologische Beobachtungen erlauben, die Reaktion von Pflanzen auf Klimaänderungen zu beschreiben. Die im Rahmen von KLIVEG gewonnenen Ergebnisse belegen, dass die Pflanzen in Sachsen bereits auf den Klimawandel reagiert haben. Sowohl die natürliche Vegetation als auch Obstgehölze und landwirtschaftliche Nutzpflanzen zeigen Verfrühungen im Eintritt der phänologischen Phasen, die außerordentlich gut mit den Veränderungen der Lufttemperatur korrespondieren. Sehr anschaulich ist dies in den 1990er Jahren erkennbar, die überdurchschnittlich warm waren. Je früher eine Phase im Jahresverlauf zu beobachten ist, desto stärker ist ihr Trend zur Verfrühung, wie sich beispielsweise an der Blattentfaltung der Stachelbeere (1961–2000: –12 Tage) erkennen lässt. Ursache hierfür sind die deutlich milderen Wintertemperaturen. Mit dem allmählichen Anstieg der Lufttemperatur im Jahresverlauf werden die beobachteten Verfrühungen im Phaseneintritt kleiner. Milde Witterung im Herbst kann die Blattverfärbung verzögern. Auf extreme Witterungsverläufe reagieren die Pflanzen deutlich. Dies betrifft sowohl starke Temperaturanomalien als auch hohe Niederschlagsdefizite.

Der prognostizierte Anstieg der Lufttemperatur in Sachsen wird zu einer Abnahme der jährlichen Anzahl von Frosttagen und damit einer weiteren Verlängerung der frostfreien Zeit um 13 Tage führen. Hierbei ist von außerordentlicher Bedeutung, dass die Abnahme in der Frosthäufigkeit ausschließlich auf die Reduktion der Frühfröste zurückzuführen ist, da im Frühjahr keine wesentlichen Änderungen der Lufttemperatur prognostiziert wurden. Dies hat außerordentliche Bedeutung für die Spätfrostgefährdung der Pflanzen. Die thermische Vegetationszeit wird sich gegenüber heute nochmals deutlich um einen Monat verlängern. Hieran sind zu gleichen Teilen der Vegetationsbeginn und das Vegetationsende beteiligt. Die längere Vegetationszeit wird vor allem in den tieferen Lagen bis ca. 450 m zu beobachten sein. In den Höhenlagen sind die Veränderungen hingegen nur gering. Der Anstieg der Lufttemperatur und die klimatischen Veränderungen innerhalb der Vegetationszeit können verschiedenste Auswirkungen auf die Pflanzenentwicklung in Sachsen haben.

Abb. 6.1.10: Süsskirschen

Auf die zunehmend milderen Winter werden die Pflanzen mit einem zeitigeren Austrieb reagieren. Große Veränderungen in den Eintrittsterminen sind bei den frühen Phänophasen (z. B. Blühbeginn) zu erwarten. Der im Frühjahr vorhandene Vorsprung in der Entwicklung wird durch die ansteigenden Sommertemperaturen teilweise wieder kompensiert. Für Obstgehölze werden sich damit kaum nennenswerte Veränderungen in der Länge der Reifephase ergeben. Der gesamte Entwicklungszeitraum wird lediglich nach vorn verschoben.

In Extremjahren, in denen Abweichungen der Lufttemperatur von mehr als 8 °C im Januar und Februar möglich sind, wird es zu außerordentlich frühen Terminen der Blüte und Blattentfaltung kommen. Nach dem frühen Austrieb ist das Frostrisiko sehr hoch, so dass in solchen Jahren mit erheblichen Frostschäden an den Bäumen und Sträuchern zu rechnen ist.

Selbst in durchschnittlichen Jahren ist von einem höheren Spätfrostrisiko auszugehen. Beim Apfel, der einen großen Stellenwert im sächsischen Obstanbau einnimmt, ist mit einer Verdoppelung der mittelschweren Fröste (–2 bis –4 °C) während der Blüte zu rechnen.

Ein weiterer wichtiger Aspekt des Klimawandels ist die sich in den Klimaprojektionen abzeichnende Zunahme der Trockenheit in Sachsen. Verschärfend kommt hinzu, dass in den Sommermonaten die Lufttemperatur um immerhin 2 °C im Durchschnitt ansteigen wird. Damit erhöht sich für die Pflanzen die Gefahr von Trockenstress. Die abnehmenden Niederschläge werden sowohl für die Getreidearten als auch für die Hackfrüchte zu schlechteren Wachstums- und Entwicklungsbedingungen führen. Vor allem auf den leichteren Böden wird das Ertragsrisiko zunehmen. Mit der Intensivierung und Ausweitung der Bewässerung, bodenschonenden Maßnahmen und einer standortangepassten Bewirtschaftung kann das Ertragsrisiko minimiert werden. Die längere Vegetationszeit bietet der Landwirtschaft generell einen größeren Spielraum hinsichtlich Sortenwahl, Fruchtfolge und Zwischenfruchtanbau. Heute regional etablierte Kulturarten und Sorten könnten durch besser angepasste Fruchtarten ersetzt werden. Das wärmere Klima in Sachsen kann beispielsweise den Anbau von Körnermais und Wein verbessern.

Für die natürliche Vegetation gestalten sich regulative Eingriffe des Menschen wesentlich schwieriger, wenn man die lange Generationsdauer von Wäldern berücksichtigt. Trockenheit kann die individuelle Vegetationszeit von Bäumen durch vorzeitige Blattverfärbung bzw. frühen Blattfall verringern. Die Nährstoffaufnahme der Pflanzen und der Biomassezuwachs sind in trockenen Jahren sehr begrenzt, so dass sich nach extremer Trockenheit noch im Folgejahr Wirkungen an den Pflanzen nachweisen lassen. Die meisten Insektenarten reagieren auf Trockenheit und Wärme mit gesteigerter Aktivität, höherer Reproduktivität und schnellerer Entwicklung. Dies stellt eine zusätzliche Gefahr für die Wälder dar. Der Forstwirtschaft ist daher schon heute beim Umbau der Wälder sowohl die standortgerechte Baumartenwahl als auch der Umbau von Reinbeständen zu Mischwaldbeständen zu empfehlen. Einzelne trockenheiße Jahre können Wälder kompensieren. Eine Häufung oder sogar Aufeinanderfolge mehrerer Jahre mit ausgeprägter Niederschlagsarmut wäre für die in unseren heutigen Wäldern vertretenen Baumarten nur schwer zu verkraften.

6.2 Acker- und Pflanzenbau im Klimawandel – Handlungsoptionen und Rahmenbedingungen in Sachsen

6.2.1 Einführung

Der globale Klimawandel wirkt sich in starkem Maße auch auf die Landwirtschaft sowie auf die von ihr genutzten Agrarökosysteme aus. Beeinträchtigungen wie z. B. Desertifikation, Bodendegradation sowie quantitative und qualitative Beanspruchung der Wasserressourcen sind hierbei genauso von globaler Bedeutung wie die ökonomischen Folgekosten durch Ertragsverluste und Anpassungsmaßnahmen.

Neben den ökologischen Aspekten haben Fragen der landwirtschaftlichen Erzeugung mit ihren Wechselwirkungen zu wirtschaftlichen und sozialen Fragen weltweit einen hohen Stellenwert und beeinflussen politische Entscheidungen.

Im landwirtschaftlichen Bereich liegen für Sachsen sowie die Bundesrepublik keine detaillierteren Überlegungen und Studien zu den möglichen Folgen und Wirkungen des Klimawandels vor. In Deutschland sind in jüngster Zeit hierzu erste Studien und Forschungen begonnen worden (FAL, 2002; Gerstengarbe et al., 2003).

Mit den vorliegenden Klimaprojektionen für Sachsen ist es erstmals möglich, die voraussichtlichen Auswirkungen des zukünftigen Klimas auf den Acker- und Pflanzenbau verschiedener regionaler Agrarökosysteme in Sachsen näher zu beleuchten und Handlungsoptionen aufzuzeigen (Enke u. Küchler, 2003).

6.2.2 Allgemeine Wirkungen der klimatischen Rahmenbedingungen im Acker- und Pflanzenbau

Temperatur im Jahresverlauf und -durchschnitt, Niederschlagshöhe und -verteilung, Sonnenscheindauer sowie die CO_2-Konzentration in der Atmosphäre sind die wesentlichen klimatischen Faktoren, welche sich auf das Wachstum und den Anbau der Kulturpflanzen und die Agrarökosysteme auswirken. Hierbei bestehen vielfältige Wechselwirkungen. Acker- und pflanzenbaulich beeinflussen sie zudem die Termine und Zeitspannen für die optimale Arbeitserledigung.

Folgende Faktoren des Klimawandels beeinflussen maßgeblich den Acker- und Pflanzenbau:

Temperaturerhöhung

Für die Entwicklung und das Wachstum von Pflanzenbeständen ist die Temperatur maßgeblich. Bei vielen Pflanzen muss für die Keimung (z. B. Lein) oder die Ertragsbildung (z. B. Mais) eine bestimmte Wärmesumme erreicht werden (Baeumer, 1992).

Wintergetreide benötigt bestimmte Frosttemperaturen, um von der vegetativen in die generative Phase umzuschalten (Vernalisation). Ferner ist der Verdunstungsanspruch der Atmosphäre, und damit der Wasserbedarf der Pflanzen, temperaturabhängig. Zu hohe Temperaturen führen zum Schließen der Stomata und begrenzen somit die Assimilation und infolgedessen die Ertragsbildung.

Die maximale Netto-Photosynthese liegt in den mittleren Breiten zwischen 18–25 °C, bei Winterweizen 17–23 °C, Mais 18–25 °C, Kartoffeln und Soja 15–20 °C.

Simulationen zur Ertragsbildung unter Verwendung globaler Klimamodelle ergeben auf Grund dieser Zusammenhänge für Kulturpflanzen der nördlichen Hemisphäre, bei Verwendung der heute in diesen Regionen üblichen Sorten, eine Nordwanderung der optimalen Wachstumsgebiete vieler Kulturpflanzen (IPCC, 2001b).

Steigende Temperaturen verändern z. B. die einzelnen Entwicklungsphasen bei Getreide. Bei optimaler Wasserversorgung in allen Phasen ist durch die Verlängerung der Vegetationszeit mit höheren Erträgen zu rechnen. Treten Perioden mit Wassermangel auf, ist hingegen auf Grund des erhöhten Verdunstungsanspruchs der Atmosphäre mit Ertragsrückgängen zu rechnen.

Hohe Temperaturen in Verbindung mit sinkenden Niederschlägen verändern zudem das Spektrum an tierischen Schädlingen, Unkräutern und pilzlichen Schaderregern. Bei Insekten sind hier z. B. Blattsauger gegenüber Blattfressern im Vorteil (IPCC, 2001b). Phasen mit hoher Luftfeuchtigkeit und langer Wasserbenetzung der Blätter nehmen ab.

CO_2-Anstieg in der Atmosphäre

Versuche im Labor- und Feldmaßstab deuten an, dass die heutigen Kulturpflanzen und deren Sorten auf steigende atmosphärische CO_2-Konzentrationen bei den meisten ertragsbildenden Parametern positiv reagieren (FAL, 2003; IPCC, 2001b). Dagegen scheinen qualitätsbezogene Parameter wie z. B. der Rohproteingehalt auf eine CO_2-Düngung negativ zu reagieren.

Ferner wird angenommen, dass unter Wassermangelbedingungen C4-Pflanzen schon bei heutigen CO_2-Konzentrationen in der Atmosphäre ihre maximale Photosyntheserate erreichen. Bei C3-Pflanzen steigt hingegen unter diesen Bedingungen noch die Photosyntheserate (IPCC, 2001b). In weltweit durchgeführten Ertragssimulationen ist dies ein Grund dafür, warum der Klimawandel sich weltweit betrachtet eher positiv auf die Nahrungsmittelversorgung auswirken kann.

Insgesamt besteht aber noch erheblicher Forschungsbedarf bezüglich der Wechselwirkungen von CO_2- und Temperaturerhöhung sowie Niederschlagsveränderungen, insbesondere Wassermangel, bei der Ertragsbildung.

Bezüglich der Auswirkungen erhöhter CO_2-Konzentrationen auf den Boden als Kohlenstoffsenke (Humus) sowie dessen mikrobielle Aktivität konnten erste Untersuchungen in Deutschland bisher keine Auswirkungen feststellen (FAL, 2002). Insgesamt ist diese Frage bislang nicht eindeutig geklärt.

Niederschlagsveränderung

Die durch den Klimawandel bedingten Niederschlagsveränderungen sind ein wesentlicher Faktor für die weltweit prognostizierte Zunahme der Wetterextreme. Lange Trockenperioden in Verbindung mit Starkregen und Hagel beeinträchtigen das Wachstum der Kulturpflanzen und führen zu erheblichen Umweltfolgen.

Dürrebedingte Ertragsausfälle, wie sie 2003 in vielen Regionen Europas zu verzeichnen waren, sind zukünftig häufiger zu erwarten. Stark ausgetrocknete Bodenoberflächen, z. B. im Frühjahr nach der Bestellung, erhöhen die Gefahr von Winderosion (IPCC, 2001b). Häufige Extremniederschläge erhöhen das Risiko von Wassererosion und Überschwemmungen. Insgesamt wird in vielen Regionen Wasser zu einem ertragslimitierenden Faktor und zunehmend zu einer knappen Ressource, da zudem die Grundwasserneubildung vermindert ist.

6.2.3 Auswirkungen auf den Acker- und Pflanzenbau in Sachsen

Die regionale Landwirtschaft steht über den Weltagrarhandel in enger Wechselwirkung mit der Landwirtschaft in anderen Regionen dieser Erde. Im landwirtschaftlichen Bereich können sich daher die Auswirkungen des Klimawandels aus globaler Sicht anders darstellen als aus nationaler bzw. regionaler Sicht. Besonders betroffen werden vor allem die Länder des Südens sein, sowohl in Bezug auf Ertragsrückgänge als auch bezüglich der Anpassungskosten (IPCC, 2001b).

Für Brandenburg wurden auf der Basis globaler Modelle die Auswirkungen der Klimaveränderung auf die Landwirtschaft abgeschätzt. Auf der Grundlage der regionalen Klimaprojektionen von Enke und Küchler (2003) ist dies auch für Sachsen möglich.

Demnach werden von den verringerten Niederschlägen im Frühjahr und Sommer wahrscheinlich vor allem die sandigen Böden der Sächsischen Heide- und Teichlandschaften betroffen sein. Sie besitzen eine geringe Wasserspeicherfähigkeit und die Kulturpflanzen sind daher auf Niederschläge in der Vegetationsperiode angewiesen. Stärker wasserbedürftige Fruchtarten wie Rüben, Kartoffeln, Futterkulturen, Weizen und Raps können hier mit starken Mindererträgen reagieren. Selbst der trockentolerante Roggen, das hat das Dürrejahr 2003 gezeigt, reagiert in sehr trockenen Jahren mit Ertragsrückgängen.

Das Jahr 2003 zeigt aber auch, dass die Löß-Standorte auf Grund ihrer größeren Wasserspeicherkapazität Trockenheit besser überbrücken können. Daher dürfte sich hier der beschriebene Klimawandel in geringem Maße auswirken, insbesondere da sich die Niederschlagsmengen in ihrer Summe kaum verändern. Hier ist es entscheidender, sich acker- und pflanzenbaulich auf die erwarteten hohen Niederschlagsintensitäten im Frühjahr und Sommer einzustellen.

Allgemein ist von großer Bedeutung, dass die Wurzeln das zur Verfügung stehende Bodenwasser erreichen. Daher ist insbesondere der Unterboden in einer durch-

Abb. 6.2.1:
Erosion nach einem Gewitter bei konventioneller (linke Bildhälfte) und konservierender (rechte Bildhälfte) Bodenbearbeitung

wurzelbaren Struktur zu erhalten, pflanzenbaulich schädliche Verdichtungen sind zu vermeiden.

Steigende Temperaturen in Verbindung mit längeren Trockenperioden lassen auch Auswirkungen auf Pflanzenschädlinge und -krankheiten sowie Unkräuter erwarten. So wird z. B. ein Anstieg von Rostkrankheiten in den Wintergetreidearten, der Netzfleckenkrankheit in Wintergerste und ein stärkeres Auftreten von Kartoffelkäfern und Getreideblattläusen erwartet. Gleichzeitig werden bei diesen Klimaveränderungen Blattfleckenerreger wie Rhynchosporium secalis und Septoria nodorum sowie die Krautfäule an Kartoffeln (Phytophthora infestans) seltener auftreten (Jahn et al., 1996). Erhebungen zum Braunrostbefall in Winterweizen und Triticale im Rahmen der Schaderregerüberwachung in Sachsen scheinen diesen Trend zu bestätigen. In den nächsten Jahrzehnten könnte somit der Aufwand an Insektiziden gegenüber dem für Fungizide steigen. Unter Einbeziehung der Regionsunterschiede für Sachsen (welche insbesondere bei der extremen Frühjahrs- und Sommertrockenheit 2003 deutlich wurden) würden die zuvor beschriebenen Zusammenhänge vor allem für die Regionen der Sächsischen Heide- und Teichlandschaften mit vorwiegend sehr leichten Böden aber auch teilweise für die Sächsischen Lößgebiete zutreffen.

Tab. 6.2.1: Pflanzenbauliche Anpassungsoptionen an den Klimawandel (verändert nach Abildtrup u. Gylling, 2001).

Anbaubedingungen

- Änderung der Saat- und Pflanzzeiten
- Neue Kultur- und Futterpflanzen
- Züchtung angepasster Sorten
- Verbesserung und Anwendung von Modellen zur Ertragsprognose

Nutzungssysteme

- Änderung der Bodenbearbeitungssysteme
- Änderung von Fruchtfolgen und -artenspektrum
- Änderung der Besatzdichte und Weidesysteme (Grünland)
- Ausweitung von Brachflächen

Ertragsvariabilität

- Diversifizierung des Fruchtartenspektrums
- Versicherungssysteme für Ertragsausfälle
- Verbesserung und Anwendung von Modellen zur Ertragsprognose
- Beregnung

Pflanzenschutz

- Veränderung des Pflanzenschutzmittelspektrums und/oder der Anwendungszeitpunkte
- Anwendung von Zusatzstoffen für Pflanzenschutzmittel zur Verbesserung der Wirkung bei Trockenheit
- Anpassung bzw. Entwicklung von Prognosemodellen

Wasserbedarf

- Verbesserte Verfahren zur Nutzung und Konservierung des Bodenwassers
- Auswahl trockenheits- und hitzeresistenter Sorten bzw. Arten
- Änderung der Saat- bzw. Pflanztermine
- Wassersparende Beregnungsverfahren und -methoden

Erosion, Stoffauswaschung, Humushaushalt

- Konservierende Bodenbearbeitung
- Windschutzstreifen
- Änderung der Fruchtfolgen
- Anpassung der organischen und mineralischen Düngung

Bei Schadpflanzen ist allgemein davon auszugehen, dass eine Klimaerwärmung eine Zunahme der Artenvielfalt bewirkt. Auswertungen für Deutschland zeigten beim Vergleich zwischen kälteren und wärmeren Regionen eine deutliche Zunahme der Kräuterarten mit steigendem Temperaturniveau (Profil, 2003). Die Tendenz der Ausbreitung Wärme liebender Arten lässt sich in Sachsen bereits heute am Beispiel solcher Arten wie Samtpappel oder Giftbeere erkennen, welche insbesondere im trocken-warmen Jahr 2003 örtlich verstärkt auftraten und wenige Jahre zuvor als Unkraut noch nahezu unbekannt waren. Einige dieser neu auftretenden Unkrautarten könnten zukünftig zu Problemunkräutern werden.

Profitieren werden vom Klimawandel am wahrscheinlichsten die Verwitterungsstandorte im Süden von Sachsen. Ursache sind vor allem die steigenden Temperaturen im Winter und Frühjahr, die die Vegetationsperiode verlängern sowie die niedrigen Jahresdurchschnittstemperaturen erhöhen. Beide Faktoren sind anbau- und ertragslimitierend. So könnten z. B. die Bedingungen für den Weizen- und Maisanbau in diesen Lagen günstiger werden.

6.2.4 Anpassungsoptionen

Im Pflanzenbau besteht eine Vielzahl von Maßnahmen und Möglichkeiten, sich mittel- und langfristig an den Klimawandel anzupassen (Tab. 6.2.1). Viele dieser Maßnahmen werden die Landwirte nach und nach selbstständig erproben. Damit dieser Anpassungsprozess nicht zu betrieblichen oder ökologischen Fehlentwicklungen führt, bedarf er einer begleitenden Beratung und angewandten Forschung. Insbesondere die Züchtung neuer Sorten, die Suche nach neuen geeigneten Kulturpflanzen sowie die Erprobung neuer Anbaumethoden und -systeme erfordert Feldversuche im regionalen Maßstab (Abildtrup u. Gylling, 2001).

Die weltweite Verbreitung der Getreidearten veranschaulicht ihre hohe genotypische Variabilität und Anpassungsfähigkeit. Somit steht Zuchtmaterial aus den unterschiedlichsten Regionen zur Verfügung, um das

mitteleuropäische Sortiment den sich ändernden klimatischen Bedingungen langfristig anzupassen. Dabei sind differenzierte Eigenschaften der Kulturpflanzen von Nutzen, wie z. B. die Rangfolge in der Trockentoleranz: Roggen – Triticale – Weizen – Gerste – Hafer. Die gleiche Reihenfolge lässt sich in der Winterfestigkeit (Frosthärte) feststellen. Zudem bestehen innerhalb der Arten deutliche Unterschiede zwischen den Sorten.

Da Klimawandel und Züchtung gleichermaßen als langfristige Prozesse zu betrachten sind, ist mit einer kontinuierlichen Anpassung zu rechnen. Aus der Sicht der regionalen Sortenprüfung und -beratung gilt es allerdings, stets auf eine komplexe Umwelttoleranz und eine ausreichende Sortenvielfalt zu achten, um Nachhaltigkeit und Stabilität in der Pflanzenproduktion unter den jährlich wechselnden Witterungsbedingungen zu gewährleisten.

Ferner sind für viele Kulturpflanzen neue angepasste Bestandesdichten, Aussaat- und Pflanztermine zu erproben. Die Düngung muss auf die klimabedingten Veränderungen in der Bestandesentwicklung und in der Nährstoffaufnahme eingehen, um Ertrags- und Qualitätsverluste und Umweltbelastungen weitestgehend auszuschließen. Insbesondere betrifft dies die Stickstoffdüngung. Sie ist künftig so zu bemessen, dass der Aufbau zu üppiger, biomassereicher Bestände mit hohem Wasserverbrauch vermieden wird. Zur Stabilisierung der Ertragsbildung sind ausreichend hohe verfügbare Nährstoffgehalte an Phosphor, Kalium und Magnesium im Boden anzustreben, um auch unter trockenen Bedingungen die Nährstoffaufnahme der Pflanzen zu gewährleisten. Dabei wird der Beitrag des Unterbodens zur Nährstoffversorgung immer wichtiger. Neue Applikationsverfahren (Injektion, Depot, Unterkrumendüngung, Teilschlagdüngung) sowie Düngerformen (stabilisierte, flüssige, langsam fließende etc.) sind mit dem Ziel zu entwickeln und zu erproben, die Nährstoffverfügbarkeit auch unter trockenen Bedingungen sicherzustellen.

Abb. 6.2.2: Ackerland an Fließgewässern – Gefahr von Nährstoffeinträgen und Bodenerosion

Tab. 6.2.2: Rahmenbedingungen für die pflanzenbauliche Anpassung an den Klimawandel (verändert nach Abildtrup u. Gylling, 2001).

Anbaubedingungen
■ Angewandte Forschung zu neuen Sorten und Pflanzen ■ Erhalt regionaler Genbanken ■ Verbesserte Wetter-/Klimavorhersagen ■ Beratungsangebote zur Anpassung an den Klimawandel
Nutzungssysteme
■ Angewandte Forschung zu Fruchtfolgen, Bodenbearbeitungssystemen und Grünlandnutzung
Ertragsvariabilität
■ Entwicklung und Unterstützung von Versicherungssystemen
Pflanzenschutz
■ Förderung des integrierten Pflanzenschutzes ■ Angewandte Forschung zum Einfluss von Witterungskriterien auf das Auftreten von Schadorganismen ■ Monitoring potentiell gefährlicher Schadorganismen und Schaderregerüberwachung
Wasserbedarf
■ Unterstützung wassereinzugsgebietsbezogener Planungen/Programme ■ Förderung und Entwicklung wassersparender Anbausysteme und Beregnungsverfahren ■ Einzugsgebietsbezogene Managementpläne und Abschätzung der Grundwasserneubildung
Erosion, Stoffauswaschung, Biodiversität, Humushaushalt
■ Unterstützung der Forschung zu neuen Bodenbearbeitungssystem und alternativen Nutzungen z. B. nachwachsende Rohstoffe ■ Agrarumwelt-Monitoring

Vor dem Hintergrund häufiger Starkregen sind zukünftig verstärkt erosionsmindernde Anbauverfahren anzuwenden. Das Bodengefüge insbesondere des Unterbodens ist durch geeignete acker- und pflanzenbauliche Maßnahmen zu schützen, um eine gute Durchwurzelung und damit Wasseraufnahme der Pflanzen zu gewährleisten.

Die im Rahmen der Schaderregerüberwachung und des Warndienstes im Pflanzenschutz bestehenden Beobachtungs- und Überwachungsmaßnahmen bzw. das laufende Monitoring zur Befallserfassung von Krankheiten in Getreide, Kartoffeln und Zuckerrüben müssen intensiver auch für Erfassungen zur Veränderung in der Struktur und dem Verhalten der Schadorganismenpopulation sowie der Artenvielfalt in der Unkrautflora genutzt werden. Das setzt eine vergleichbare Methodik bei den Erhebungen voraus und unterstreicht die Bedeutung einer gut organisierten effektiven Schaderregerüberwachung sowie von witterungs-

basierten Prognoseverfahren. Nur so lassen sich auch exakte Aussagen über mögliche Auswirkungen der prognostizierten Klimaveränderungen ableiten. Die Grundsätze des integrierten Pflanzenschutzes sind dementsprechend anzupassen und zu fördern.

Für sehr wasserbedürftige Kulturen wie z. B. Zuckerrüben oder Kartoffeln könnte auf leichten Böden eine Beregnung interessant werden, um Erträge und Qualitäten zu sichern. Hierbei ist auf besonders wassersparende Verfahren Wert zu legen.

6.2.5 Gestaltung der Rahmenbedingungen

Der Anpassungsprozess der Landwirtschaft an den Klimawandel muss durch geeignete Rahmenbedingungen, d. h. entsprechende Instrumente und Maßnahmen unterstützt und erleichtert werden. Nur so sind Fehlentwicklungen ökonomischer und ökologischer Art zu vermeiden (Tab.6.2.2).

6.2.6 Ausblick

Die Landwirtschaft ist am jeweiligen Standort ständig den sich verändernden Bedingungen von Klima und Witterung ausgesetzt. Die Vielfalt an Kulturpflanzen und deren Sorten, an differenzierten Bewirtschaftungsverfahren und verschiedenartigen Landnutzungssystemen ermöglicht es ihr, sich in der ganzen Bandbreite auch in Zukunft auf die zu erwartenden Klima- und Witterungsänderungen einzustellen.

Unnötige Reibungsverluste und Fehlentwicklungen können hierbei vermieden werden, wenn geeignete Anpassungsmaßnahmen eingeleitet werden. Insbesondere ist der in vielen Fällen autonome Anpassungsprozess durch die Schaffung geeigneter Rahmenbedingungen z. B. angewandte Forschung und Beratung zu begleiten und zu unterstützen (Abildtrup u. Gylling; 2001).

Aus diesem Grunde hat die Sächsische Landesanstalt für Landwirtschaft begonnen sich dieser Thematik zuzuwenden. Dazu wurde im Jahr 2004 im Rahmen der angewandten Forschung das Projekt „Entwicklung und Erprobung standortangepasster Anbausysteme unter besonderer Berücksichtigung der Klimaveränderungen“ begonnen, welches aus den Teilprojekten „Fruchtfolge, Nährstoffempfehlungen und Pflanzenschutz in unterschiedlichen Intensitätsstufen sowie Beregnung“ besteht. In dem Projekt sollen Fruchtfolgen mit trockentoleranten Sorten von Getreide, Ölpflanzen, Futterkulturen und Hackfrüchten für die sandigen niederschlagsarmen Standorte der sächsischen Heide- und Teichlandschaft, die Löß-Lehmböden des Übergangsgebietes von der Leipziger Tieflandsbucht in das Mittelsächsische Hügelland und für die Verwitterungsböden des Erzgebirges untersucht werden.

In den Fruchtfolgen werden acker- und pflanzenbauliche Anpassungsstrategien an die zunehmend trockenen und niederschlagsarmen Witterungsbedingungen erprobt. Die Untersuchung umfasst u. a. die Anwendung nichtwendender Bodenbearbeitungssysteme, um die „Regenverdaulichkeit“ des Bodens zu erhöhen und seine Wasserverdunstung zu mindern. Weiter werden in das Anbausystem trockentolerantere Sorten integriert. Durch die Erprobung einer gezielten Injektionsdüngung in die durchwurzelte Bodenzone soll eine optimale Pflanzenernährung auch bei länger währender Trockenheit gesichert werden. In diese Richtung zielen auch spezielle Maßnahmen der Blattdüngung.

Beim Pflanzenschutz ist vorgesehen, unterschiedliche Intensitätsstufen zu prüfen. In Abhängigkeit von der Bodenfeuchtesituation und der angebauten Kulturart ist auch eine Zusatzbewässerung vorgesehen.

Die Gesamtwirkung der genannten Faktoren auf Ertrag und Wirtschaftlichkeit des Fruchtfolgesystems wird erfasst.

6.3 Auswirkungen des Klimawandels auf die Forstwirtschaft

6.3.1 Einführung

Die Ergebnisse einer ersten regionalisierten Studie zu möglichen Klimaänderungen in Sachsen (Enke u. Küchler, 2001) sind für die Forstwirtschaft insofern von besonderer Bedeutung, als erstmals für Sachsen nicht nur allgemeine Angaben über die Erhöhung der Mitteltemperaturen vorliegen, sondern für konkrete Regionen die Temperatur- und Niederschlagsentwicklung sowie deren jahreszeitliche Verteilung projiziert wurden.

Erst auf dieser Basis können die Auswirkungen einer angenommenen Klimaveränderung auf Waldökosysteme abgeschätzt werden.

In Verbindung mit dem prognostizierten Temperaturanstieg ergeben die Szenarien eine Tendenz zu wärmeren und trockeneren Frühjahren bzw. Frühsommern. Dies allein ist eine überaus wichtige Information bspw. für die Bewirtschaftung großer Teile der Sandstandorte im sächsischen Tiefland, für die schon jetzt angespannte Bodenwasserressourcen und periodische Trockenperioden typisch sind.

Seit 1991 wurde in allen Standort- und Klimaregionen Sachsens ein repräsentatives Versuchsflächensystem zum Waldumbau angelegt (Sächsische Landesanstalt für Forsten, 1999). Auf der Grundlage der umfangreichen Messungen in diesem Versuchsflächensystem werden umweltabhängige Wachstums- und Entwicklungsprognosen der Waldumbaubaumarten erstellt sowie Wasserhaushaltsänderungen und die daraus erkennbaren Trockenstressverhältnisse für bestimmte Baumarten und Waldstrukturen ermittelt.

Das sächsische Versuchsflächensystem Waldumbau, die darin vorgenommenen Untersuchungen sowie die abgeleiteten Erkenntnisse für den praktischen Waldbau wurden in der Schriftenreihe der Sächsischen Landesanstalt für Forsten und anderen Berichten veröffentlicht, bspw. in: (Sächsische Landesanstalt für Forsten, 1997, 1999; Irrgang, 2001).

Eine ausführlichere Darstellung der hier angewandten Methodik und berücksichtigter Literaturquellen ist in (Irrgang, 2002) vorhanden.Hier soll nur kurz die Ableitung der klimatischen Eignung bestimmter Hauptbaumarten für die jeweils limitierend wirkenden Umweltfaktoren Wasserversorgung (im sächsischen Tiefland) sowie Wärme und Licht (im Mittelgebirgsraum) als Grundprinzip dieses ersten Ansatzes der Klimafolgenabschätzung für die Forstwirtschaft dargestellt werden.

Tiefland

Auf der Grundlage von Untersuchungen zum Waldumbau und zum Wasserhaushalt repräsentativer Waldökosysteme wurden Schwellwertbereiche der jährlichen und vegetationsbezogenen Niederschlagsmengen für eine Rangfolge der Trockentoleranz der gegenwärtigen Hauptbaumarten ermittelt, die für die dauerhaft stabile Existenz dieser Hauptbaumarten (Waldgesellschaften) – differenziert nach den wichtigsten Bodensubstrattypen – zwingend notwendig erscheinen. Lediglich ein Grundwassereinfluss kann diese Boden – bzw. Niederschlagsabhängigkeit der Baumarten- und Waldstruktureignung entscheidend verändern.

Da die Waldgesellschaften im sächsischen Tiefland ein hohes Adaptationspotenzial gegenüber der in den regionalen Szenarien angenommenen Erwärmung aufweisen, wurde angenommen, dass im wesentlichen nur die Wasserversorgung in Wechselwirkung mit einigen edaphischen Faktoren (Substrattyp, Grundwassernähe) über die Existenz der ansonsten angepassten Waldgesellschaften entscheidet.

Mittelgebirgsraum

Die regionalen Klimaszenarien berechnen für die sächsischen Mittelgebirge einen Rückgang der Niederschläge hauptsächlich in der Vegetationsperiode. Aufgrund des hohen Ausgangsniveaus der Niederschläge wird jedoch angenommen, dass die Wasserversorgung grundsätzlich nicht zum limitierenden Umweltfaktor für die Existenz und die Entwicklung der Waldökosysteme wird.

Sowohl aus allgemein verfügbaren standörtlichen (Schwanecke et al., 1996) und vegetationskundlichen (Schmidt, 1995) Betrachtungen, aber auch über Untersuchungen typischer Standort- und Bestandsbedingungen in sächsischen Mittelgebirgen (Sächsische Landesanstalt für Forsten, 1999) ist bekannt, dass hier die Umweltfaktoren Wärme und Licht unter heutigen klimatischen Bedingungen die Anbaufähigkeit (im Sinne von Standortgerechtigkeit) wichtiger Waldumbaubaumarten einschränken.

Daher werden für den sächsischen Mittelgebirgsraum die vorherrschenden Jahresmitteltemperaturen (als Ausdruck des Wärmeangebotes) als das entscheidende Kriterium für die vertikale Zonierung der potenziell natürlichen Waldgesellschaften herangezogen.

Um die Folgen der Klimaänderung im Mittelgebirge abzuschätzen, wurden nun Schwellwertbereiche der durchschnittlichen Lufttemperatur für die regional-klimatische Eignung der Hauptbaumarten festgelegt.

Weiterhin wurde eine Adaptionsfähigkeit der Hauptbaumarten/Waldgesellschaften an die Veränderung der Jahresmitteltemperatur bei die Festlegung der Schwellwertbereiche berücksichtigt. Diese Annahme geht davon aus, dass eine weitere Temperaturerhöhung, welche die gegenwärtige Amplitude der Jahresmitteltemperatur für die aktuellen Waldgesellschaften um mindestens plus

0,5 Grad überschreitet, durch die Elastizität dieser Ökosysteme und die ökologische Valenz der beteiligten Baumarten kompensiert werden kann.

6.3.2 Klimafolgen für den Wald im sächsischen Tiefland/Hügelland

Für die derzeitigen klimatischen Bedingungen (Schwanecke et al., 1996) wurden durch das angewandte Berechnungsverfahren Karten der potenziell natürlichen Waldgesellschaften angefertigt. Das Ergebnis entspricht im wesentlichen der aktuellen Verteilung der potenziell natürlichen Waldgesellschaften (Schmidt, 1996), was die Eignung des gewählten Ansatzes grundsätzlich bestätigt.

Auf den Sandstandorten Nordsachsens ist die Dominanz von Kiefern-Eichen-Mischwäldern zu erkennen. Kiefernwälder kommen ausschließlich auf extrem armen Standorten vor. Die Niederungen der Flusssysteme bzw. die grundwassernahen Standorte sind mit den hier typischen Waldgesellschaften gut zu erkennen. Auf den gegenwärtig fast ausschließlich landwirtschaftlich genutzten Löß-Standorten würden Laubbaum (Trauben-Eichen) dominierte Mischwälder vorherrschen. Die Standortregion „Hügelland" wäre mit Eichen- und Eichen-Rotbuchen-Mischwäldern bestockt. (vgl. Abb. 6.3.1).

Szenario 1

- **Verringerung der Jahresniederschläge um 13 % (mit Schwerpunkt in der Vegetationsperiode Frühjahr und Sommer)**
- **50 % des Jahresniederschlages entfallen auf die Vegetationsperiode**

(Ausgangsbasis sind die Wuchsbezirksangaben und das mittlere Niederschlagsniveau der letzten 50 Jahre)

Bei einer mittleren jährlichen Niederschlagssumme von 600 mm entfallen gegenwärtig ca. 310 mm auf die - Vegetationsperiode. Nach diesem Klimaszenario wäre während der Vegetationsperiode von einer Reduktion der Niederschläge auf ca. 230 mm auszugehen (vgl. Abb. 6.3.2).

Für die grundwasserfernen (terrestrischen) Standorte zeigt sich schon bei einem moderaten Rückgang der Niederschläge eine deutliche Ausdehnung der trockentoleranteren Waldgesellschaften, so dass bspw. Kiefern- und Eichen-Kiefern-Wälder auf den Sandstandorten dominieren. Eine Ausnahme bilden grundwasserbeeinflusste und lößbetonte Standorte.

Waldgesellschaften, deren Struktur und Baumartenzusammensetzung höhere Ansprüche an die Wasserversorgung stellen, ziehen sich auf Standorte mit besseren Substraten (Lößanteile) und/oder klimatisch günstigere

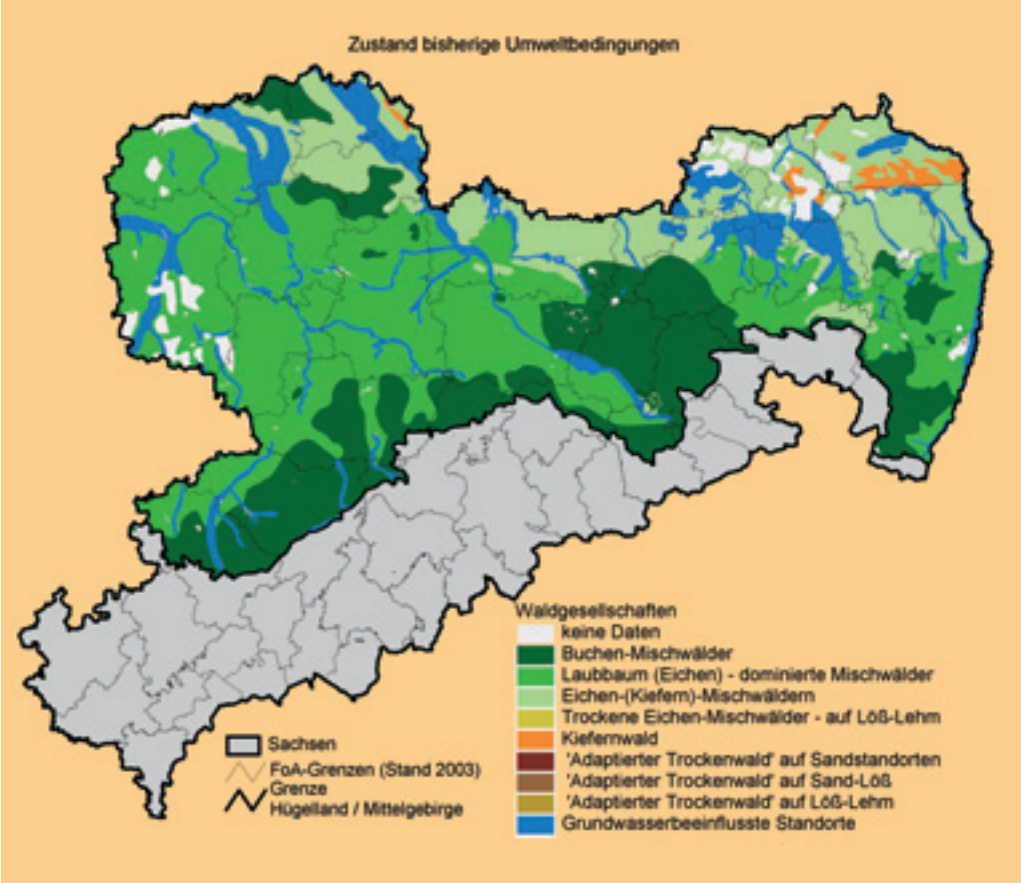
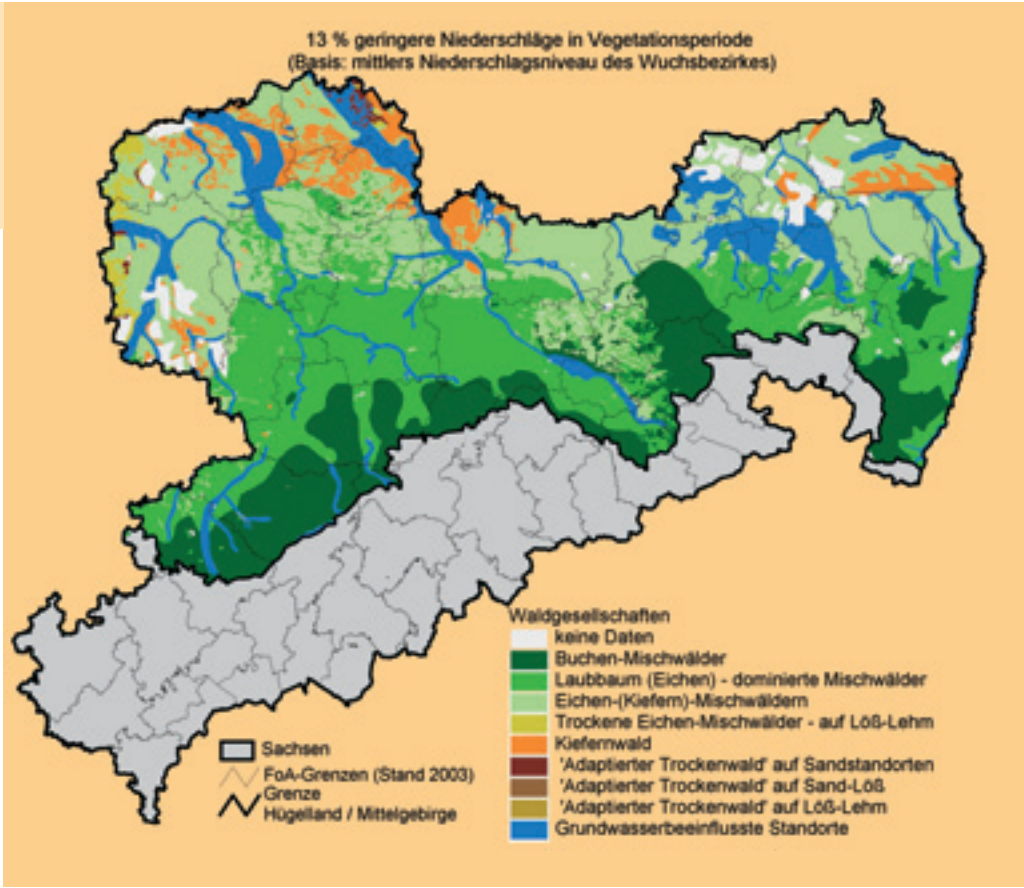


Abb. 6.3.1: Verteilung der Waldgesellschaften im sächsischen Tiefland unter den gegenwärtigen Umweltbedingungen nach der oben genannten Methodik

Abb. 6.3.2:
Mögliche Verteilung der Waldgesellschaften unter der Annahme einer Verringerung der Niederschläge in der Vegetationsperiode um 13 %



Standorte im Übergangsbereich zur Hügellandregion zurück. Rotbuchen-dominierte Waldgesellschaften kommen nur noch in den niederschlagsbegünstigsten Regionen und/oder auf Standorten mit begünstigtem Bodenwasserhaushalt vor.

Darüber hinaus entstehen Gebiete, in denen der Wasserhaushalt auch für die trockentoleranten Kiefern-Waldgesellschaften in der uns jetzt vertrauten Struktur, Vitalität und Leistung problematisch wird. Die Niederschläge wären dann so gering, dass als Waldgesellschaft ein hypothetischer „adaptierter Trockenwald" angenommen wurde. Die Baumschicht könnte aus Baumarten mit einer besonders hohen Trockentoleranz gebildet werden. Eine stark aufgelockerte horizontale Struktur würde zur weiteren Optimierung des Wasserverbrauchs beitragen.

Dabei ist nicht auszuschließen, dass die relativ gute Trophie der Standorte das Aufkommen einer vitalen, trockenadaptierten Bodenvegetation begünstigt, welche als zusätzliche Wasserkonkurrenz, aber auch als Verjüngungshindernis größere Bedeutung erlangen könnte.

Als Baumarten für diese trockenen Bereiche kämen neben der Kiefer – insbesondere auf Standorten mit besseren (bspw. lehmige bzw. schluffige) Bodensubstraten – alternativ weitere einheimische Baumarten (z. B. Eiche und Winterlinde) aus besonders trockentoleranten, kontinental geprägten Klimabereichen in Betracht sowie Baumarten, die bis jetzt nicht als standortheimisch angesehen werden (z. B. Robinie und weitere Eichenarten etc.).

Alle potenziellen Baumartenalternativen sollten möglichst aus besonders geeigneten Ökotypen oder Provenienzen dieser Arten stammen, die für den Aufbau nachhaltig funktionsfähiger Waldökosysteme geeignet sind.

Szenario 2

- **Verringerung der Jahresniederschläge um 13 % (mit Schwerpunkt im Frühjahr und Sommer)**
- **Zusätzlich erhöhter Transpirationsbedarf (durch ansteigende Temperaturen und höheres Strahlungsangebot)**

Zusätzlich zur Verringerung der Niederschläge in der Vegetationsperiode (Szenario 1) wird nun ein gesteigerter Transpirationsbedarf der Waldgesellschaften angenommen. Dieser ist durch ansteigende Temperaturen und ein höheres Strahlungsangebot (Sonnenscheindauer) während der Vegetationsperiode begründet. Der angenommene Mehrbedarf von 20 mm Niederschlagsäquivalent pro Vegetationsperiode ist in diesem Zusammenhang eher eine optimistische Schätzung.

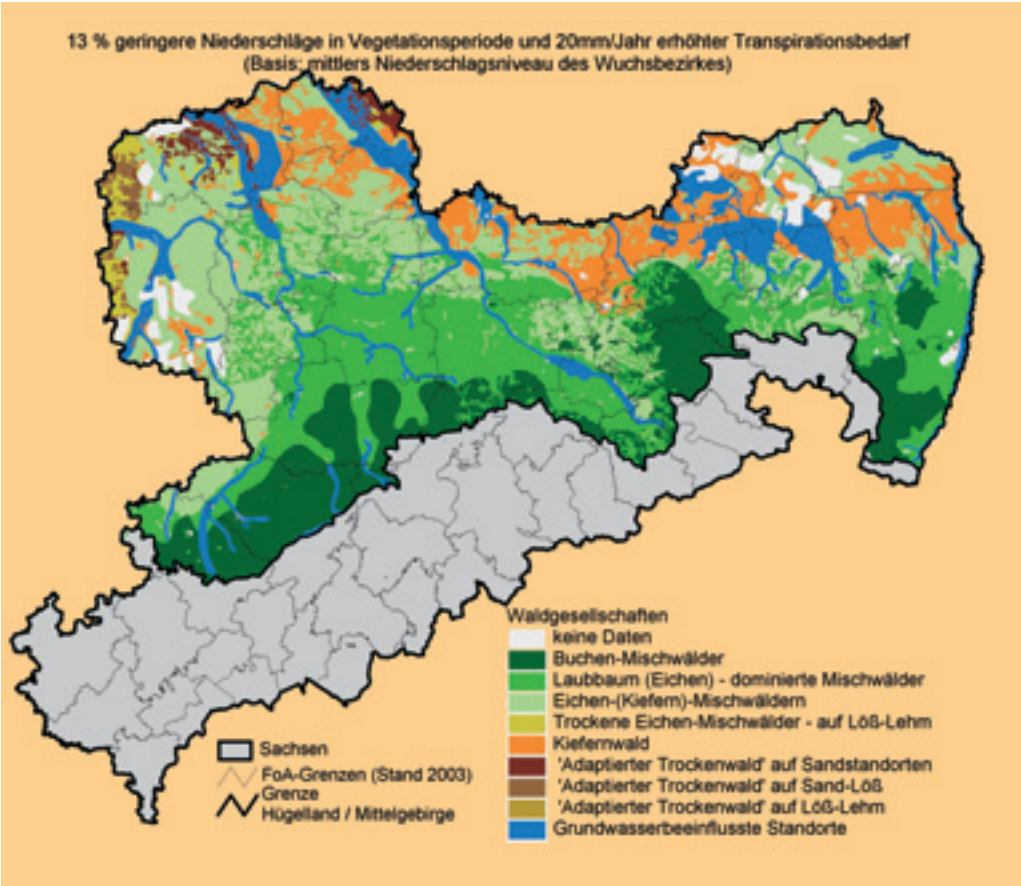


Abb. 6.3.3:
Mögliche Verteilung der Waldgesellschaften unter der Annahme einer Verringerung der Niederschläge in der Vegetationsperiode um 13% und gleichzeitiger Steigerung des Transpirationsbedarfs um 20 mm (Niederschlagsäquivalent)

Die zusätzliche Berücksichtigung eines Mehrbedarfs der Transpiration führt im Vergleich zum Szenario 1 zur erheblichen Ausweitung der extremen Trockengebiete (adaptierter Trockenwald) und der (Sand-) Standorte, die durch Kiefernwaldgesellschaften besiedelt werden (vgl. Abb. 6.3.3).

Szenario 3 – größte klimatische Änderung

- **Verringerung der Jahresniederschläge auf 95 mm**
- **Erhöhter Transpirationsbedarf um 40 mm/Jahr**

In diesem Szenario vergrößert sich der angenommene Niederschlagsrückgang im Mittel auf 95 mm pro Jahr. Dies liegt noch immer im Rahmen des möglichen Niederschlagrückgangs der regionalen Klimaszenarien.

Zudem werden nicht die mittleren Niederschlagsniveaus der letzten 50 Jahre als Ausgangsbasis angenommen, sondern die gemittelten unteren Werte der Niederschlagsmengen, die für einen Wuchsbezirk registriert wurden. Dieses untere Niederschlagsniveau dürfte dem aktuellen Niederschlagsangebot in den Wuchsbezirken sehr nahe kommen (Messungen an Waldklimastationen des Landesforstpräsidiums), womit dieses Szenario durchaus die aktuellen Ausgangsbedingungen für eine prognostizierte Klimaänderung berücksichtigt. Außerdem geht in die Simulation eine realistischere Steigerung des Transpirationsbedarfs um 40 mm Niederschlagsäquivalent pro Jahr ein.

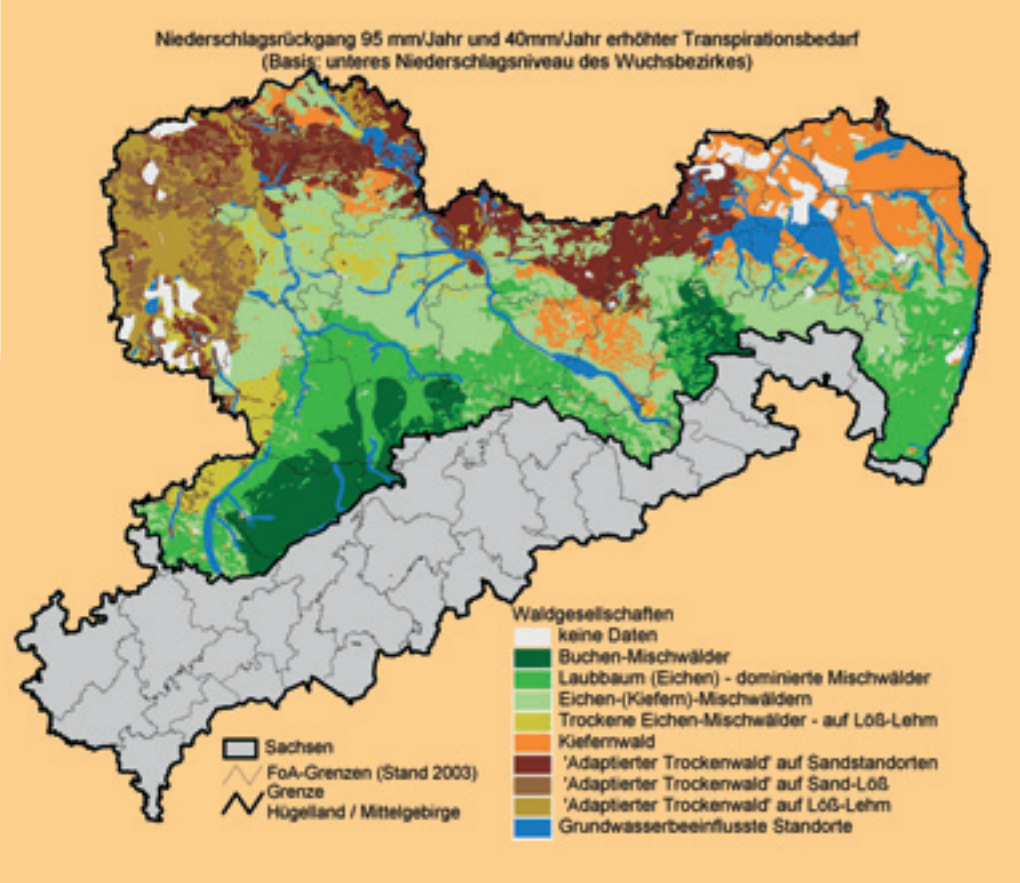
Obwohl die Annahmen auch im Szenario 3 noch im Rahmen der regionalen Klimaprojektion bleiben, kann man hierbei bereits von einem „worst case – Szenario" ausgehen. In großen Teilen des sächsischen Tieflandes würden extreme Wasserversorgungsbedingungen vorherrschen, die nur noch den „adaptierten Trockenwald" als fiktive, sehr gut an diese Bedingungen angepasste Waldgesellschaften/Waldaufbauform zuließen (vgl. Abb. 6.3.4).

Kiefernwälder heutiger Prägung würden auf solche Sand-dominierte Tieflandsstandorte zurückgedrängt werden, die relativ höhere Niederschläge und noch die günstigeren edaphischen Bedingungen aufweisen. Eichen-Kiefern-Waldgesellschaften wären schon an Standorte mit besseren Bodensubstrattypen/Grundwassereinfluss gebunden.

Anspruchsvollere und produktivere (Misch-)Waldgesellschaften (Trauben-Eichen) benötigen dann offenbar das edaphisch und klimatisch günstigere Löß-Hügelland.

Rotbuchen-dominierte Waldgesellschaften wären im Tief- und Hügelland Sachsens unter diesen extremen Bedingungen auf größeren Flächen praktisch nur noch in den Standortregionen mit den günstigsten Boden- und Klimabedingungen am Rand der Mittelgebirge überlebensfähig.

Abb. 6.3.4:
Mögliche Verteilung der Waldgesellschaften unter der Annahme einer jahreszeitlich indifferenten Abnahme der Niederschläge um 95 mm bei gleichzeitiger Steigerung des Transpirationsbedarfs um 40 mm (Niederschlagsäquivalent)



Ökologische und forstwirtschaftliche Konsequenzen

Aufgrund bisheriger Untersuchungen (bspw. Müller, 2001, Hofmann et al., 2000, Sächsische Landesanstalt für Forsten, 1999) ist die Wasserversorgung schon heute der limitierende Umweltfaktor für die Waldökosysteme auf Sandstandorten. Diese Situation wird sich unter den angenommenen Klimaveränderungen zukünftig weiter verschärfen und sich zunehmend auch auf edaphisch bessere Standorte ohne Grundfrische oder Grundwassereinfluss ausdehnen. Die Wasserversorgung wird im sächsischen Tiefland nicht nur über das Baumwachstum sondern auch über die nachhaltige Existenz bestimmter Waldgesellschaften entscheiden.

Die prognostizierte Abnahme der Niederschläge in Verbindung mit der Temperaturerhöhung, einer längeren Sonnenscheindauer und dem daraus folgenden steigenden Transpirationsbedarf wird Verschiebungen der Standortgerechtigkeit von Baumarten und Waldgesellschaften verursachen. Damit ist eine eingeschränkte Anbaufähigkeit anspruchsvollerer Baumarten zu erwarten. Die ohnehin standörtlich begrenzten Möglichkeiten des Waldumbaus im Sinne eines Baumarten- und Waldstrukturwandels verringern sich erheblich. Die Grundwasserneubildung wird auf ein sehr geringes Niveau sinken, fast nur noch im Winter erfolgen oder bleibt unter bestimmten Bedingungen ganz aus.

Die Bewirtschaftung der Wälder im Tieflandbereich muss auch unter sich ändernden Umweltbedingungen eine ökologische Stabilisierung zum Ziel haben. Da trotz aller Simulationen das genaue Ausmaß klimatischer Veränderungen nicht vorhergesagt werden kann, sollten waldbauliche Maßnahmen vorrangig auf eine **Risikominimierung** und **Risikoverteilung** ausgerichtet sein.

Baumartenzusammensetzung und Waldstruktur müssen auch für den Fall, dass die heute angenommenen Klimaänderungen nicht oder nur zum Teil eintreten, eine hohe Stabilität des Waldökosystems gewährleisten. Dies kann aus heutiger Sicht hauptsächlich durch eine Baumartenverteilung erreicht werden, die sich stärker an den kleinstandörtlichen Bedingungen orientiert.

Grundsätzlich sind heute vorkommende wärmeadaptierte und trockentolerante Baumarten bzw. Ökotypen zu fördern. Neben Baumarten wie Traubeneiche, Roteiche, Hainbuche, Winterlinde, Spitzahorn und Douglasie sind hochwertige Baumarten von Interesse, die sich durch ein noch höheres Maß an Trockentoleranz auszeichnen, wie z. B. die Robinie. Im Fall der Rotbuche werden selbst Ökotypen mit einer hohen Anpassung an Trockenperioden nur auf Standorten anbauwürdig sein, die eine günstige Wasserversorgung bzw. bessere Substrattypen aufweisen.

Die Verbesserung der Strukturvielfalt, der mikroklimatischen Bedingungen und Ressourcenverfügbarkeit in den großflächigen Reinbeständen des sächsischen Tieflandes kann im Wesentlichen nur über die horizontale Differenzierung dieser Bestände erreicht werden.

Vertikale Strukturierungen bspw. mit dauerhaft mehreren Baumschichten scheiden aus Gründen der begrenzten Wasserressourcen auf einem Großteil der grundwasserfernen sand-dominierten Standorte prinzipiell aus. Anspruchsvollere Baumarten sollten hier nur auf Kleinstandorten mit einer optimalen Wasserversorgung für die jeweilige Baumart angebaut werden. Standörtliche Grenzbereiche sind wegen möglicher Verschiebungen der Standortbedingungen für den Anbau anspruchsvollerer Laubbaumarten zu meiden.

Dadurch kann unter den gegebenen standörtlichen und klimatischen Bedingungen ein Optimum der Widerstandsfähigkeit gegenüber klimatischen Extremen, anthropogenen Stoffeinträgen und biotischen Schaderregern erreicht werden. Gleichzeitig werden die Investitionsrisiken minimiert.

Die Bestandspflege muss im Sinne eines Wasser-Ressourcenmanagements eine mäßige ganzflächige Konkurrenzauflockerung (Dichteregulierung) herbeiführen. Dabei sollte insbesondere die übermäßige Entwicklung von Konkurrenzpotenzialen, bspw. der Bodenvegetation, durch die Steuerung der Waldstruktur vermieden werden.

Auch Maßnahmen der Waldpflege sollten die Förderung standortgerechter Mischbaumarten unter Beachtung des kleinstandörtlichen Mosaiks verstärkt berücksichtigen. Die Notwendigkeit von Unterbaumaßnahmen geringer Intensität zur Verhinderung der flächig als (Wasser-) Konkurrenzpotenzial und/oder dämmend wirkender Bodenvegetation muss nach der örtlichen Tendenz zur Bodenverwilderung und vorhandenen Verjüngungsvorräten eingeschätzt werden.

Die Auswahl und Prüfung der Anbaueignung von Ökotypen einheimischer Baumarten, deren ökologische Valenz auch künftigen Umweltbedingungen entspräche, ist ein entscheidender Beitrag zum Aufbau stabiler Waldökosysteme. Ähnlich sind Anbauversuche von ausgewählten fremdländischen Baumarten zu bewerten, die sich durch eine hohe Trockenheitstoleranz, hinreichende Resistenz gegenüber Frostereignissen sowie eine möglichst hohe Produktionsleistung und Holzeigenschaften auszeichnen, die zu einer nachhaltigen Rohstoffproduktion beitragen. Um den notwendigen Forschungsvorlauf zu gewährleisten, sollten entsprechende Untersuchungen in nächster Zukunft eingeleitet werden.

Langfristig entsteht so ein horizontal strukturiertes, unter Berücksichtigung der projizierten Klimaänderungen standortgerechtes Baumartenmosaik mit der Gemeinen Kiefer und der Traubeneiche als Hauptbaumarten, welche durch besonders trockentolerante, standortheimische oder gegenwärtig noch nicht standortheimische Baumarten erweitert werden.

6.3.3 Klimafolgen für den Wald im sächsischen Mittelgebirgsraum

Auch für die Waldökosysteme unter Mittelgebirgsbedingungen wurden verschiedene Untersuchungen zur Abschätzung der Veränderung des Wasserhaushaltes durchgeführt. Danach wird in diesen Regionen auch zukünftig die Wasserversorgung der Wälder ausreichend sein. Nur für bestimmte Kombinationen aus Standort und Hauptbaumart werden auch im Mittelgebirge die Niederschläge zum begrenzenden Umweltfaktor. In diesen Fällen ist, ähnlich wie im Tiefland, eine Baumartenzusammensetzung und Waldstruktur erforderlich, die sich zur Sicherung einer ausreichenden Wasserversorgung streng am Kleinstandort ausrichtet.

Die Standortgerechtigkeit der insgesamt für den sächsischen Mittelgebirgsraum angepassten Waldgesellschaften wird dagegen weitaus stärker durch den Wärmebedarf bzw. die Wärmetoleranz der beteiligten Baumarten beeinflusst. Damit werden die Jahresmitteltemperaturen zu einem entscheidenden Kriterium für die vertikale Zonierung der Standortgerechtigkeit potenziell natürlicher Waldgesellschaften.

Die mögliche Verteilung der Waldgesellschaft auf der Grundlage aktueller klimatischer Kenngrößen der einzelnen Wuchsbezirke (Schwanecke et al., 1996) und der Zuordnung von klimatischen „Existenzbereichen" für die jeweilige Waldgesellschaft führt im wesentlichen zur gegenwärtigen Verteilung der potenziell natürlichen Waldgesellschaften in den sächsischen Mittelgebirgen (Schmidt, 1995), was den gewählten methodischen Ansatz grundsätzlich bestätigt (vgl. Abb. 6.3.5).

Die Fichtenwälder dominieren klar in den Kammlagen des Erzgebirges. In den Hochlagen findet ein Übergang zu den Fichten-Buchen-Mischwäldern statt. Der eigentliche Bergmischwald unter Beteiligung von Fichte, Weißtanne, Rotbuche und Bergahorn prägt die Vegetation der mittleren Berglagen. In den unteren Lagen sind Eichen-Buchenwaldgesellschaften vorherrschend. Die Beteiligung der Höhenkiefer ist als Hinweis auf flachgründige und/oder exponierte Standorte mit angespanntem Wasserhaushalt zu werten.

Szenario 1

- **Erhöhung der Jahresmitteltemperatur um 1,5 Grad**

Dieses Szenario geht für die betrachteten Wuchsbezirke (Schwanecke et al., 1996) von einer Temperaturerhöhung

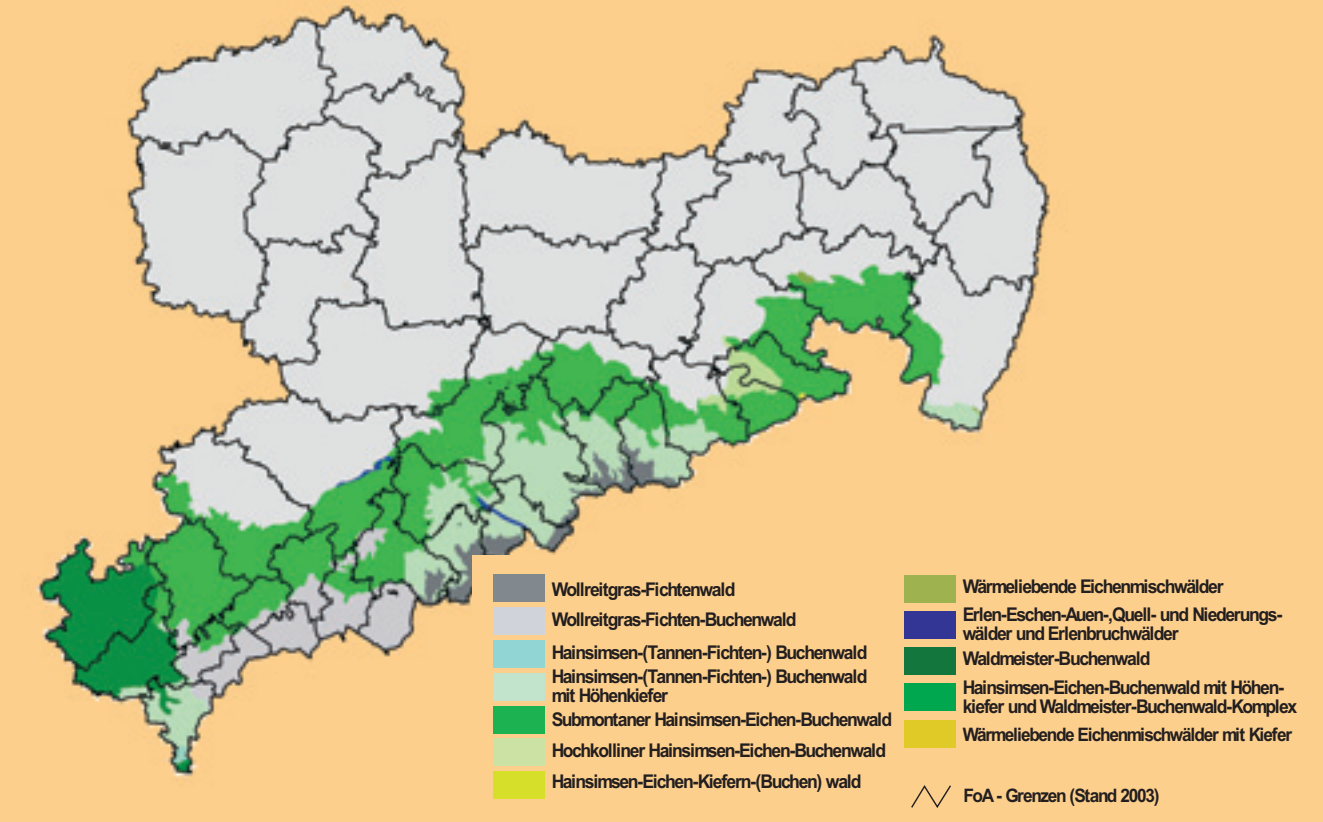


Abb. 6.3.5: Verteilung der Waldgesellschaften im sächsischen Mittelgebirgsraum unter den gegenwärtigen Umweltbedingungen nach der oben genannten Methodik

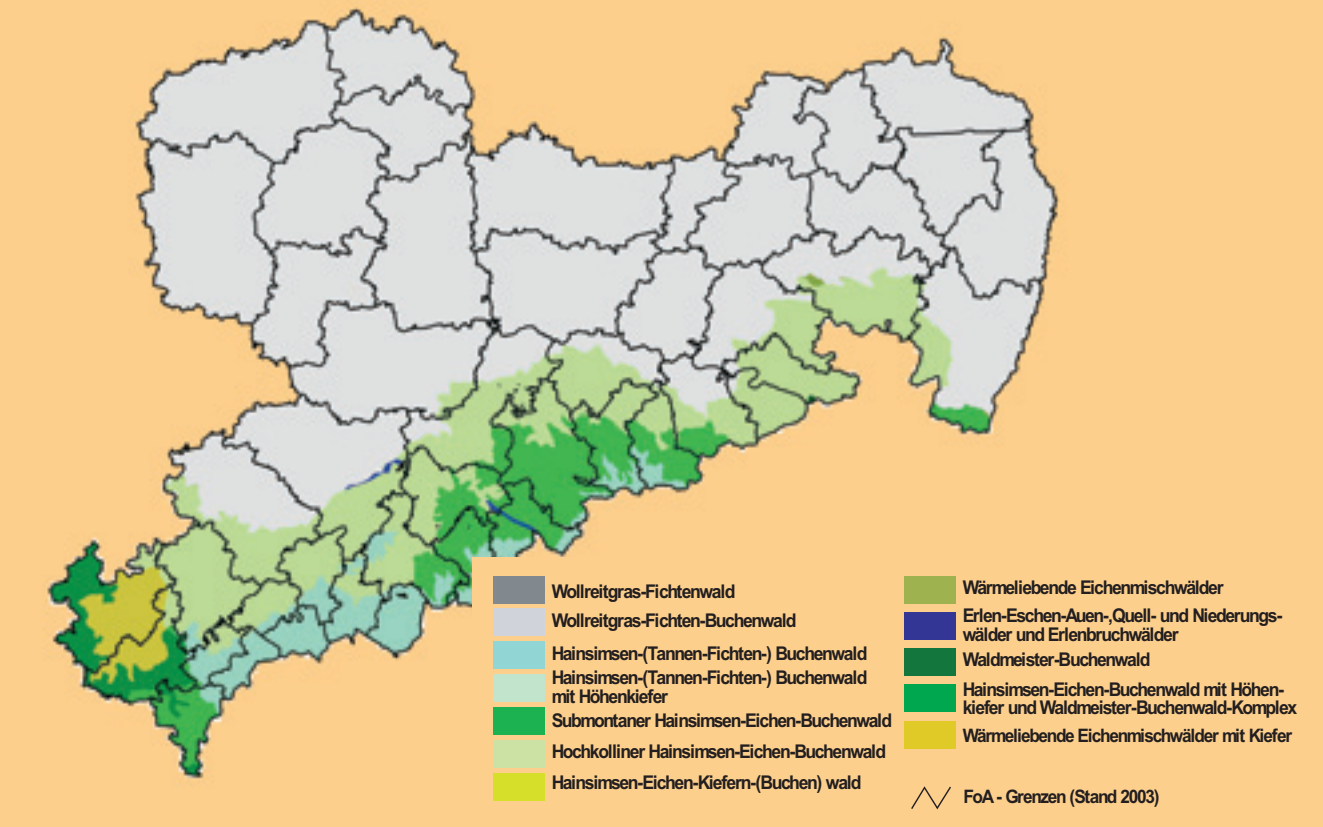


Abb. 6.3.6: Mögliche Verteilung der Waldgesellschaften im sächsischen Mittelgebirgsraum unter der Annahme einer Erhöhung der Jahresmitteltemperatur um 1,5 Grad

um 1,5 Grad (gegenüber dem langjährigen Mittel 1961–1990) aus und liegt damit noch unter den regionalen Klimaszenarien für Sachsen (Enke et al., 2001).

Selbst unter Berücksichtigung der Anpassungsfähigkeit der Baumarten in einem Bereich von + 0,5 Grad führt diese Temperaturerhöhung zu gravierenden Veränderungen in der Verteilung der potenziell natürlichen Waldgesellschaften im sächsischen Mittelgebirgsraum.

Waldgesellschaften, in deren Baumschicht die Fichte als alleinige Hauptbaumart dominiert, sind quasi nicht mehr existenzfähig.

Die Bergmischwälder dringen bis in die Kammlagen vor. Die Fichte als Mischbaumart dieser Waldgesellschaften ist dann flächendeckend nur noch in den Hoch- und Kammlagen der Mittelgebirge vorhanden. Ihre Konkurrenzkraft ist deutlich reduziert. Submontane Eichen-Buchen-Mischwaldgesellschaften prägen das Bild der mittleren Berglagen.

Die unteren Berglagen werden dann von hochkollinen Eichen-Buchenwaldgesellschaften dominiert, die ursprünglich für den Hügellandbereich charakteristisch waren. Auf wärmebegünstigten Standorten werden diese Waldgesellschaften bis in die mittleren Berglagen aufsteigen (vgl. Abb. 6.3.6).

Szenario 2

■ Erhöhung der Jahresmitteltemperatur um 2 Grad

Dieses Szenario geht von einer Temperaturerhöhung um 2 Grad aus, die den Annahmen der regionalen Klimaszenarien entspricht. Nach diesem Temperaturanstieg werden in den Hoch- und Kammlagen der Mittelgebirge überwiegend die wärmeadaptierteren Varianten des Bergmischwaldes unter Beteiligung der Höhenkiefer vorkommen.

Vermutlich werden Buchenwälder mit größeren Mischanteilen von Tannen und Fichten die am besten adaptierte Waldgesellschaft darstellen. Hochkolline Eichen-Buchenwaldgesellschaften prägen dann die Vegetation der mittleren Berglagen.

Wärmebegünstigte Standorte mit temporär angespanntem Bodenwasserhaushalt könnten bereits von Kiefern-Eichen oder wärmeliebenden Eichenmischwäldern besiedelt werden. Ansonsten dominieren diese Waldgesellschaften auf den entsprechenden Standorten der unteren Berglagen.

Größere Fichtenanteile/Fichten-dominierte Waldgesellschaften werden vermutlich an Standorte gebunden sein, deren Bodenwasserhaushalt und Exposition auch unter einem veränderten Temperaturniveau eine ausreichende Wasserversorgung und kühleres Lokalklima ermöglichen (vgl. Abb. 6.3.7).

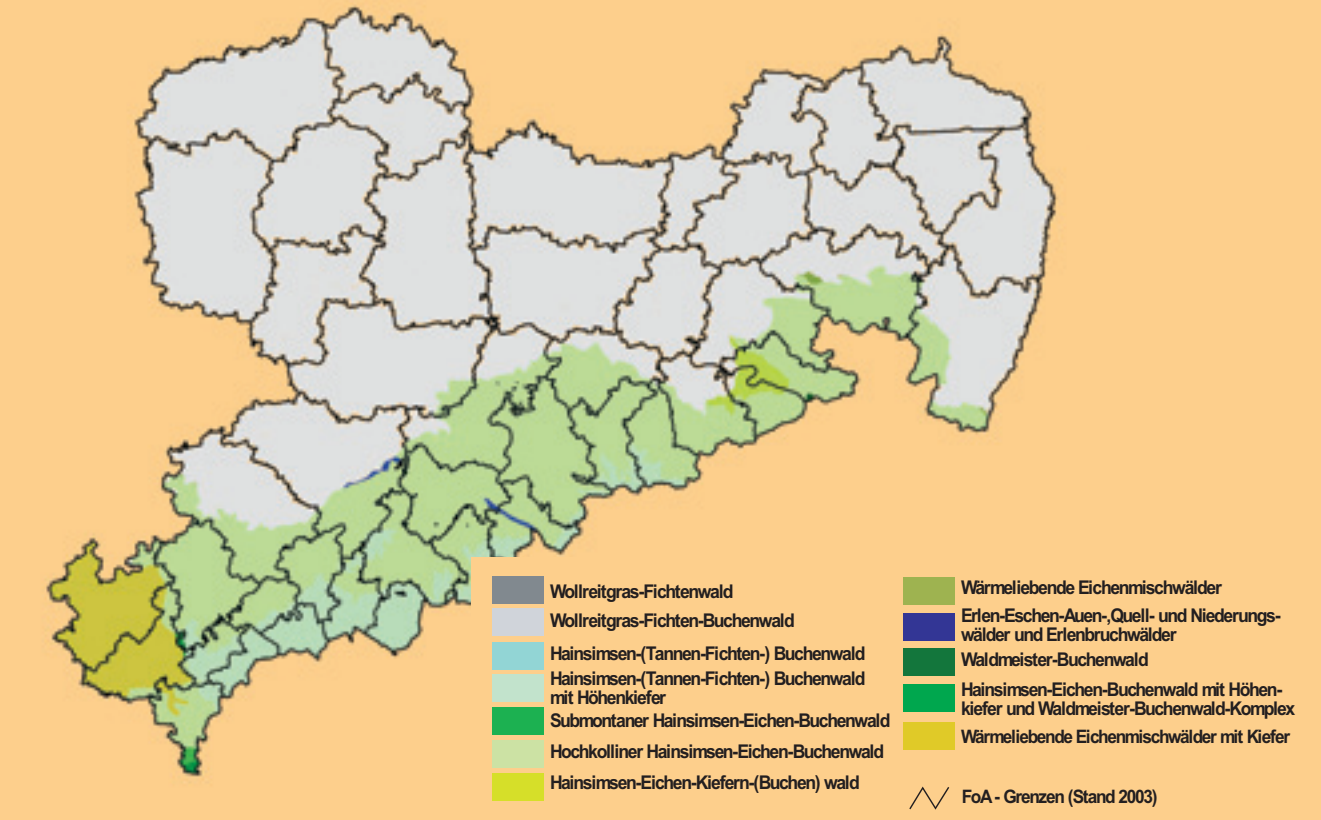


Abb. 6.3.7: Mögliche Verteilung der Waldgesellschaften im sächsischen Mittelgebirgsraum unter der Annahme einer Erhöhung der Jahresmitteltemperatur um 2,0 Grad

Ökologische und forstwirtschaftliche Konsequenzen

Veränderungen in der Standortgerechtigkeit der Baumarten und die daraus folgende Verschiebung der potenziell natürlichen Waldgesellschaften sind anhand der zuvor dargestellten Simulationsergebnisse offensichtlich. Waldgesellschaften, in deren Baumschicht die Fichte vorherrscht, werden danach an Bedeutung verlieren. Dagegen werden Eichen-, insbesondere aber Buchenwaldgesellschaften in mittleren Lagen bzw. in den Hoch- und Kammlagen der Mittelgebirge wesentlich adaptierter und damit ökologisch stabiler erscheinen. Insgesamt wird die Wasserversorgung für den Wald im Mittelgebirgsraum auch zukünftig ausreichend sein.

In Verbindung mit höheren Temperaturen und steigendem Transpirationsbedarf wird jedoch die Anbaufähigkeit von feuchteadaptierten Baumarten oder von Baumarten, die eine hohe Anpassung an ein feucht-kühles Standortklima aufweisen, eingeschränkt.

Insbesondere auf flachgründigen Standorten mit einer geringen Wasserspeicherkapazität und auf besonders exponierten Standorten könnte es dann verstärkt zu periodischen Trockenstresserscheinungen kommen. Zudem muss von einer Verringerung der Abflussraten aus Waldökosystemen ausgegangen werden, was besonders in waldbestockten Einzugsgebieten von Talsperren von Bedeutung sein wird.

Da die heutigen Bestände noch überwiegend durch großflächig gleichaltrige Fichtenreinbestände geprägt sind, muss über den Waldumbau ein intensiver Baumartenwechsel betrieben werden. Dies kann nur langfristig erreicht werden, die Möglichkeiten der Extensivierung sind hierbei begrenzt.

Da das reale Ausmaß der Klimaänderungen auch für den Mittelgebirgsraum derzeit nicht mit Sicherheit bekannt ist, müssen waldbauliche Strategien auch hier auf eine Risikominimierung gerichtet sein. Diese ist mit kleinflächig horizontal differenzierten Waldstrukturen gegeben, die in enger Anlehnung an den Kleinstandort ein möglichst weites Spektrum standortgerechter Baumarten mit einer größeren Wärme- und Trockentoleranz in den Waldumbau einbezieht. Unter sächsischen Mittelgebirgsbedingungen dürften modifizierte „Femelbewirtschaftungsverfahren" (Waldumbauverfahren) mit den angestrebten Mindestflächengrößen und Mindestauflichtungen (LAF, 1999) am effektivsten diesem Ziel dienen.

Ziel muss sein, die Elastizität von Waldökosystemen soweit auszubauen, dass ihre Fähigkeit zur strukturellen Erneuerung auch unter veränderten Umweltbedingungen erhalten bleibt. Nur auf diese Weise wird eine höchstmögliche Widerstandsfähigkeit gegenüber klimatischen Extremen, anthropogenen Stoffeinträgen und biotischen Schaderregern (bspw. von periodischen Borkenkäferkatastrophen) zu erreichen sein.

Deshalb sind verstärkt Bemühungen zur Erweiterung des Baumartenspektrums erforderlich. Das betrifft vorrangig die Einbringung wärme- und trockentoleranterer Ökotypen autochthoner, aber auch gegenwärtig nicht standortheimischer Baumarten mit entsprechenden ökophysiologischen Eigenschaften. Die notwendige ökologische Amplitude ergibt sich aus der Bandbreite der in den Szenarien angenommenen zukünftigen klimatischen Bedingungen.

Im Sinne der o.g. Risikominimierung sollte bei vorhandenen Baumartenalternativen möglichst die „sicherere" Alternative hinsichtlich der Toleranz gegenüber den zu erwartenden klimatischen Änderungen unter Beachtung

Abb. 6.3.8:
Herbststimmung im Naturschutzgebiet Trostgrund, Forstamt Brand-Erbisdorf

der angestrebten hohen Stabilität und Produktivität des Waldökosystems gewählt werden.

Baumartenanteile und Flächenverteilungen können letztendlich nur an konkreten standörtlichen Bedingungen und Beständen entschieden werden.

Folgende Baumarten sind für einen Waldumbau in den sächsischen Mittelgebirgen, der sich an den zukünftig möglichen klimatischen Bedingungen orientiert, von besonderer Bedeutung:

- **Stiel- und Traubeneiche,** (Roteiche) –
  gehören zu den Hauptbaumarten in den unteren Berglagen mit abnehmender Bedeutung bis in die mittleren Berglagen, wärmebegünstigte Standorte,
- **Rotbuche** –
  dominierende Baumart der mittleren und höheren Berglagen, auf wärmebegünstigten Standorten bis in die Kammlagen.Überschreitet das Niederschlagsangebot eine für die Rotbuche erforderliche Schwelle, ist diese Baumart aufgrund Ihrer Belaubungsdynamik, Transpirationseffizienz und Glattrindigkeit (Müller, 2001) eine den Wasserhaushalt und die Abflussdynamik positiv beeinflussende Baumart, auch in Mischung mit anderen Baumarten,
- **Weißtanne** –
  Mischbaumart zur Rotbuche in allen Berglagen, in den Kammlagen auf wärmebegünstigten Standorten, stabilisierendes Element im Hinblick auf die vertikale Standorterschließung, die Sturmfestigkeit der Bestände und den Oberbodenzustand,
- **Douglasie** –
  unter Beachtung geeigneter Herkünfte und Ökotypen von den unteren Berglagen bis in die Kammlagen, von besonderer Bedeutung für die Holzproduktion unter veränderten Umweltbedingungen,
- **Bergahorn/Esche** –
  in den mittleren und höheren Berg- und Kammlagen sowie auf Standorten mit stabiler Wasserversorgung und einem feucht-kühlen Mesoklima,
- **Höhenkiefer** –
  bevorzugt auf austrocknungsgefährdeten Standorten der unteren bis höheren Berglagen.

Dem Erhalt der Fichte in standortgerechter Mischung mit anderen Baumarten sollte auf geeigneten Standorten eine angemessene Bedeutung zukommen.

Inwiefern andere, wirtschaftlich interessante Nadelbaumarten mit hoher Produktivität, aber einer deutlich höheren Temperatur- und Trockentoleranz in den Waldumbau einbezogen werden, ist durch entsprechende Untersuchungen und auf der Grundlage von Anbauversuchen zu klären.

Pflegemaßnahmen müssen wiederum zu einer ganzflächigen Konkurrenzauflockerung in der Baumschicht

Abb. 6.3.9: Bergmischwald im Forstamt Brand-Erbisdorf

bei Erhalt der Steuerungsmöglichkeiten gegenüber der Bodenvegetation und zur Anreicherung von Verjüngungsvorräten standortgerechter Mischbaumarten führen.

Unter Berücksichtigung der sich abzeichnenden Umweltveränderungen ist in den sächsischen Mittelgebirgen die langfristige Weiterführung des Waldumbauprogramms der wichtigste Grundpfeiler für eine ökologisch nachhaltige multifunktionale Forstwirtschaft.

Das Ergebnis dieses Waldumbaus wird ein ungleichaltriges, räumlich strukturiertes und standortgerechtes Baumartenmosaik mit einem Maximum an ökologischer Stabilität und Multifunktionalität der Wälder sein.

Praktische Probleme und flankierende Maßnahmen

Der notwendige intensive Waldumbau auf größeren Flächen und über längere Zeiträume ist kostenintensiv und erfordert eine erhebliche staatliche Förderung. Im Verhältnis zum zeitlichen Rahmen (50 Jahre) der Klimaszenarien sind die waldbaulichen Rationalisierungsmöglichkeiten relativ gering. Diese Situation ist vor allem durch das geringe Samenangebot standortgerechter Baumarten und deren Verteilung auf der Waldfläche bedingt.

Das bedeutendste Rationalisierungspotenzial birgt die strikte Umsetzung der Verwaltungsvorschrift Jagd, deren Ziel die Waldverjüngung ohne Zaunschutz ist. Hiervon werden nicht nur die Höhe der Investitionen sondern

auch deren Erfolgschancen, also letztendlich die praktische Realisierbarkeit des Waldumbauprogramms entscheidend beeinflusst.

Die Einführung fremdländischer Baumarten, für die bisher kaum repräsentative Erfahrungen vorliegen, erfordert einen umfassenden Forschungsvorlauf. Soll auf den heute bewaldeten Flächen der Wald nicht nur als Vegetationsform erhalten werden, sondern auch der nachhaltigen Rohstoffproduktion dienen, ist es unausweichlich, diesen Fragen entsprechende Aufmerksamkeit zu widmen.

Weiterhin ist es zwingend notwendig darauf zu verweisen, dass den forstlichen Möglichkeiten Grenzen gesetzt sind, die mit fortschreitenden anthropogen verursachten Umweltveränderungen weiter eingeengt werden. Die bisherigen, in sehr kurzer Zeit erreichten Erfolge sollten dazu ermutigen, die Schadstoffbelastung weiter zu reduzieren.

Grenzbelastungen von Waldökosystemen, die das critical load – Konzept vorgibt, wurden bisher nur in Ausnahmefällen erreicht (Raben, 1999). In diesem Zusammenhang müssen auch lokal differenzierte flankierende Maßnahmen zur Bodensanierung (Kompensations- und meliorative Kalkungen) langfristig fortgesetzt werden (Raben, 2000).

6.3.4 Zusammenfassung und Ausblick

Im Jahr 2001 wurde auf der Grundlage der im Auftrag des Sächsischen Landesamtes für Umwelt und Geologie erstellten regionalen Klimaszenarien für Sachsen eine Abschätzung ihrer Auswirkungen auf die Waldentwicklung durchgeführt. In einem ersten Ansatz wurde die klimatische Eignung bestimmter Hauptbaumarten bezüglich der jeweils limitierend wirkenden Umweltfaktoren Wasserversorgung (im sächsischen Tiefland) sowie Wärme (im Mittelgebirgsraum) betrachtet. Auf der Basis der ermittelten Trockentoleranzreihen und Wärmeadaptionen der Hauptbaumarten erfolgte eine „modellhafte“ Anpassung an die „veränderten“ klimatischen Bedingungen der einzelnen Wuchsbezirke.

Die Klimaänderungsszenarien sind danach so weitreichend, dass es zu erheblichen Verschiebungen der potenziell natürlichen Baumartenverteilung kommen kann.

In der Tieflandsregion Sachsens wird der Wasserhaushalt weit über das aktuelle Maß hinaus zum limitierenden Umweltfaktor für die Baumartenzusammensetzung und Struktur der Wälder.

Der Waldumbau, verbunden mit einem Hauptbaumartenwechsel hin zu anspruchsvolleren Baumarten, wird im trockeneren Spektrum der Sandstandorte des Tieflandes fragwürdig.

Bewirtschaftungseingriffe müssen streng ressourcenorientiert durchgeführt werden. In den trockensten Regionen wird eine Waldstrukturanpassung und der Anbau besonders trockentoleranter Baumarten bzw. Herkünfte erforderlich, um den Wald zu erhalten.

In den Mittelgebirgen wird das Wasser nicht generell zum limitierenden Umweltfaktor, wenngleich auch hier häufiger mit temporären Austrocknungserscheinungen gerechnet werden muss. Vielmehr werden ehemals planare und kolline Waldgesellschaften aufgrund der Temperaturerhöhung bis in die höheren Lagen der Mittelgebirge hinein standortgerecht sein.

Anpassungsstrategien der Forstwirtschaft, die im wesentlichen als Risikominimierung und -verteilung zusammengefasst werden können, sollten heute so ausgerichtet sein, dass sie auch dann noch zu stabilen Wirtschaftwäldern führen, wenn die angenommenen Klimaänderungen nicht oder nicht in vollem Umfang stattfinden sollten.

Die Berücksichtigung der dargestellten Klimaszenarien bedeutet keine prinzipielle Abkehr vom aktuellen Waldumbauprogramm in Sachsen, sondern zielt eher auf eine Optimierung. Es erscheint jetzt zweckmäßig, den Forschungsvorlauf für potenzielle Fragen der Praxis zu schaffen.

Die dargestellten ersten Überlegungen zu möglichen regionalen Auswirkungen des Klimawandels auf den Wald und die Forstwirtschaft müssen natürlich in einem Prozess der Weiterentwicklung und Berücksichtigung neuer Erkenntnisse laufend überarbeitet werden.

Neben vielen anderen ökologischen und forstwirtschaftlichen Faktoren sind diese ersten Erkenntnisse dennoch wichtige Aspekte, die in strategische Bewirtschaftungsentscheidungen einfließen.

Die Weiterentwicklung der Klimaszenarien für Sachsen wird künftig eine feinräumigere Regionalisierung, eine stärkere jahreszeitliche Differenzierung und die Berücksichtigung von Extremereignissen ermöglichen. Damit werden unter Einbeziehung digitaler Standortinformationen, neuer Erkenntnisse zum Wasserhaushalt von Waldökosystemen und zur Temperaturadaption wichtiger Hauptbaumarten präzisere Analysen zu den Folgen der Klimaänderungen auf den Wald und die Forstwirtschaft abgeleitet werden können.

6.4 Die Talsperrenbewirtschaftung im Spannungsfeld von Trockenperioden und Hochwasserereignissen

6.4.1 Einführung

Untersuchungen zu möglichen Auswirkungen von Klimaänderungen auf die Bewirtschaftung der Talsperren in Sachsen wurden bereits im Jahr 2001 beispielhaft für das Talsperrensystem Klingenberg/Lehnmühle im Osterzgebirge durchgeführt. Die Betrachtungen bezogen sich dabei auf die Leistungsfähigkeit der beiden Stauanlagen für Rohwasserabgaben zur Trinkwasserversorgung. Die erzielten Ergebnisse sind nachfolgend im Abschnitt „Simulation der Auswirkungen von Klimaänderungen auf die Bewirtschaftung des Talsperrensystems Klingenberg/Lehnmühle, Wilde Weißeritz im Osterzgebirge“ dargestellt.

Mit der projizierten Klimaänderung in den kommenden Jahrzehnten werden gravierende Auswirkungen auf die Bewirtschaftung der Talsperren in Sachsen erwartet.

Abb. 6.4.1: Schwergewichtsstaumauer der Talsperre Klingenberg

Abb. 6.4.2: Schwergewichtsstaumauer mit Dammanschluss der Talsperre Lehnmühle

So wird u.a. von einer Abnahme der Jahressumme des Niederschlages, einer Zunahme der mittleren Jahrestemperatur und der Verdunstung und daraus resultierend schließlich von einer Reduzierung der mittleren Talsperrenzuflüsse bis hin zur Minderung der Leistungsfähigkeit für Rohwasserabgaben der Talsperren ausgegangen.

Die Landestalsperrenverwaltung des Freistaates Sachsen, die für Planung, Bau, Betrieb und Unterhaltung der landeseigenen Stauanlagen zuständig ist, wird sich bei der Fortführung dieser Untersuchungen am jeweils aktuellen Forschungsstand der Klimaforschung in Sachsen orientieren. Nach Vorliegen aktualisierter Ergebnisse sächsischer Klimaszenarien, insbesondere für meteorologische Extremereignisse (ausgeprägte Trockenperioden und Starkniederschlagsereignisse) werden die nachfolgend dargestellten Untersuchungen aus dem Jahre 2001, die sich auf ein mittleres Systemverhalten beziehen, weiter ausgebaut.

6.4.2 Das Talsperren-System Klingenberg/ Lehnmühle

Die Talsperren Lehnmühle und Klingenberg liegen hintereinander in der Wilden Weißeritz (vergl. Abb. 6.4.3). Beide Talsperren stellen im Verbundbetrieb Rohwasser für die Trinkwasserversorgung der Stadt Dresden und umliegender Versorgungsgebiete bereit. Das Talsperren-

Abb. 6.4.3: Lage des Talsperren-Systems Klingenberg/ Lehnmühle einschließlich der „Beileitungs-Talsperre” Rauschenbach

system kann durch Beileitungen von Rohwasser aus der Talsperre Rauschenbach und ggf. auch aus der Talsperre Lichtenberg im mittleren Erzgebirge gestützt werden. Hierzu wurde in den letzten Jahren ein umfangreiches Überleitungssystem mit der Streckenführung „TS Rauschenbach – Revierwasserlaufanstalt – Oberer Großhartmannsdorfer Teich – TS Lichtenberg – TS Klingenberg“ geschaffen. Die wichtigsten, aktuellen Kenndaten zu den Talsperren Klingenberg, Lehnmühle und Rauschenbach können der Tabelle 6.4.1 entnommen werden.

Die nach dem Augusthochwasser 2002 vorgenommenen Vergrößerungen der gewöhnlichen Hochwasserrückhalteräume führten zur Verringerung der Betriebsräume. Trotz dieser Maßnahme kann die Leistungsfähigkeit für Rohwasserabgaben zur Trinkwasserversorgung von 1000 l/s unter verstärkter Einbeziehung der Talsperre Rauschenbach weiterhin gewährleistet werden.

6.4.3 Grundzüge der Talsperrenbewirtschaftung

Die Mehrheit der sächsischen Talsperren, so auch die Anlagen im Talsperrensystem Klingenberg/Lehnmühle, sind Mehrzweck-Stauanlagen. Mit einer Talsperre werden im Regelfall mehrere Bewirtschaftungsziele erfüllt. Die durch das Talsperrensystem Klingenberg/Lehnmühle zu steuernden wasserwirtschaftlichen Hauptnutzungen sind die Rohwasserbereitstellung für die Trinkwasserversorgung und der Hochwasserschutz für den Unterlauf der Wilden und Vereinigten Weißeritz. Die beiden Bewirtschaftungsziele stellen an die Bewirtschaftung unterschiedliche Anforderungen. So verlangt die Trinkwasserversorgung einen ausreichend groß bemessenen Reserve- und Betriebsraum (IR sowie IBR), um die Anforderungen an die Rohwasserqualität und die Mengenbewirtschaftung erfüllen zu können. Der Hochwasserschutz für den Unterlauf erfordert einen ausreichend groß bemessenen gewöhnlichen Hochwasser-

Tabelle 6.4.1: Kenndaten zu den Talsperren Klingenberg, Lehnmühle und Rauschenbach

	TS Klingenberg	**TS Lehnmühle**	**TS Rauschenbach**
Baujahr	1908/1914	1927/1931	1960/1968
Fließgewässer	Wilde Weißeritz		Flöha
Nutzung im Verbund	1. Rohwasserbereitstellung zur Trinkwasserversorgung 2. Hochwasserschutz 3. Energieerzeugung 4. „sanfter Tourismus“		
Hochwasserschutz	insbesondere für Dresden und Freital		Neuhausen, Olbernhau
Leistungsfähigkeit im Verbund	$Q_{A99\%BSS}$ = 1000 l/s		
Inhaltsaufteilungen			
Totraum (Mio. m³)	0,00	0,00	0,00
Reserveraum (Mio. m³)	2,00	2,50	2,30
Betriebsraum (Mio. m³)	12,38	12,42	8,90
gew. Hochwasserrückhalteraum (Mio. m³)	2,00	7,00	4,00
Stauraum	16,38	21,92	15,20
Ausbaugrade			
für Eigeneinzugsgebiet (%)	146 (ohne TS Lehnmühle)	63	81 (ohne TS Flaje)
das Gesamteinzugsgebiet (%)	35 (mit TS Lehnmühle)	entfällt	36 (mit TS Flaje)
Bei Vollstau			
Seefläche (ha)	116	135	98
mittlere Tiefe (m)	14	16	15
Einzugsgebiete			
Eigeneinzugsgebiet (km³)	29 (ohne TS Lehnmühle)	60,4	26,9 (ohne TS Flaje)
Gesamteinzugsgebiet (km³)	89,4 (mit TS Lehnmühle)	entfällt	70,5 (mit TS Flaje)
Zuflüsse			
aus Eigeneinzugsgebiet (m³/s-Mio. m³/a)	0,350 m³/s = 11,0 Mio. m³/a	1,10 m³/s = 34,7 Mio. m³/a	0,600 m³/s = 18,9 Mio. m³/a
aus Gesamteinzugsgebiet (m³/s-Mio. m³/a)	1,45 m³/s = 45,7 Mio. m³/a		1,34 m³/s = 42,2 Mio. m³/a
Vorhandene Pegelanlagen			
Zuflusspegel	Beerwalde	Ammelsdorf	Deutschgeorgenthal 1, 2 und Neuwernsdorf
Abgabepegel	Klingenberg UP	Lehnmühle UP	Rauschenbach 1
Historische Zuflussreihe	für die 3 Talsperrren jeweils von 1921/2003		

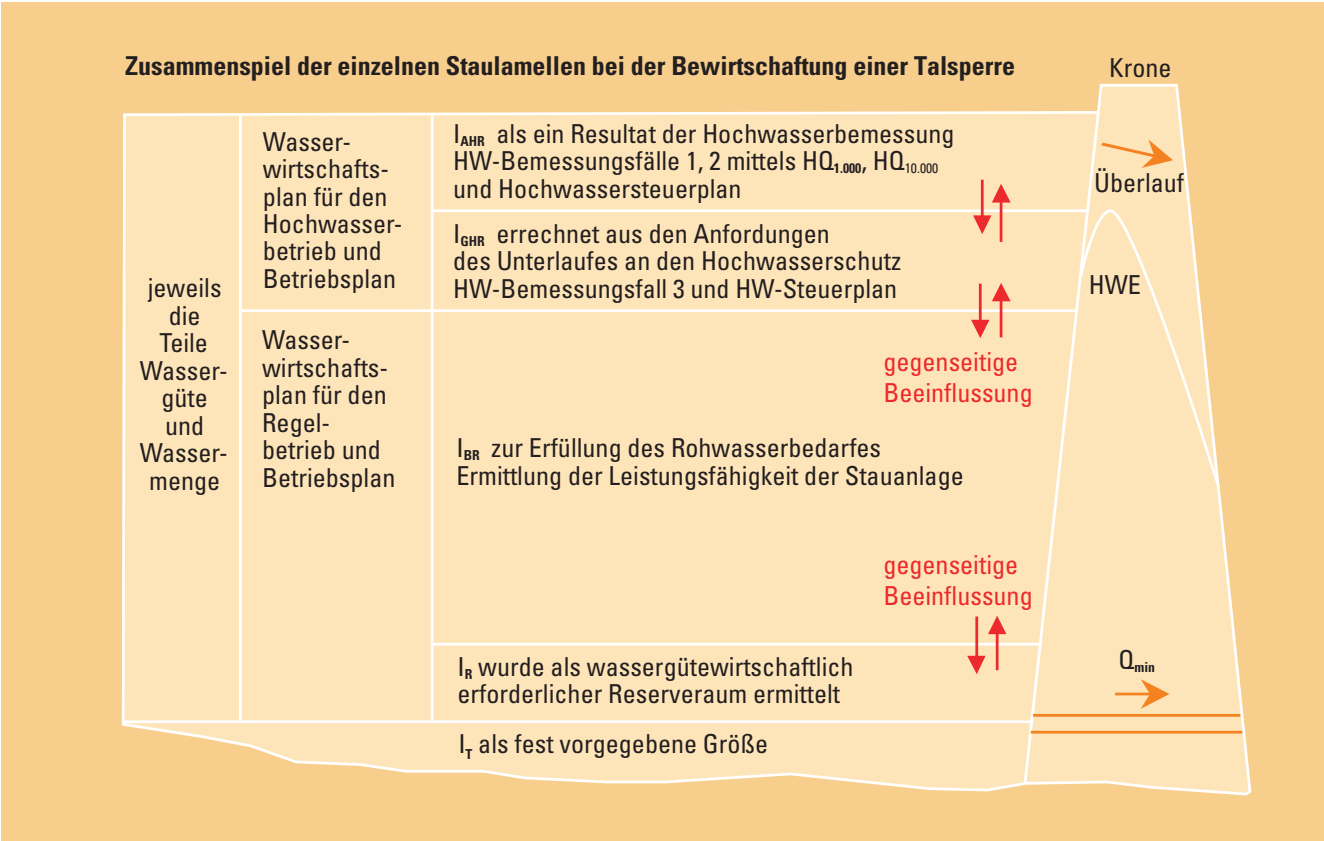


Abb. 6.4.4: Darstellung des Bewirtschaftungsprinzips einer Mehrzweck-Talsperre zur Rohwasserabgabe und zum Hochwasserschutz

rückhalteraum (IGHR), um Hochwasserzuflüsse in der Talsperre aufnehmen und schadlos abführen zu können. Der gewöhnliche Hochwasserrückhalteraum muss auch in Zeiten des Normalbetriebes erhalten bleiben und steht für eine geregelte Bewirtschaftung für Rohwasserabgaben nicht zur Verfügung. Es gilt für verschiedene Hauptnutzen, die sich zueinander konträr verhalten können, eine Bewirtschaftungsform zu entwickeln, die insgesamt auf ein Bewirtschaftungsoptimum abzielt und damit den zur Verfügung stehenden Stauraum als Summe von Totraum IT, Reserveraum IR, Betriebsraum IBR und gewöhnlichem Hochwasserrückhalteraum IGHR, bestmöglich ausnutzt (vergl. Abb. 6.4.4). Die vorliegenden Ergebnisse der Untersuchungen zu Klimaänderungen in Sachsen lassen erhebliche Auswirkungen auf den Betrieb der sächsischen Talsperren erwarten. So wird mit einer sich allmählich vollziehenden Klimaänderung insbesondere ein häufigeres Auftreten von Wetterextremen erwartet. Dieses Phänomen bezieht sich dabei sowohl auf vermehrt auftretende Trockenperioden als auch auf eine „Häufung" von Hochwasserereignissen. Exakte Abschätzungen zu Größenordnungen der künftigen Trockenperioden sowie der Hochwasserereignisse sind allerdings aus heutiger Sicht nicht möglich.

Die sich abzeichnende Klimaänderung kann aber zu einer weiteren Verschärfung der Nutzungsinteressen u. a. zwischen Rohwasserbereitstellung und Hochwasserschutz führen. Die Registrierung und Auswertung zukünftiger Trockenperioden wird an die Bemessung und die Größe des Betriebsraumes IBR zum Zwecke der Rohwasserbereitstellung unter Umständen erhöhte Anforderungen stellen. Vergleichbare Schlüsse können auch zukünftige Hochwasserereignisse zulassen. Hier können ebenso erhöhte Anforderungen an die Bemessung und die Größe des gewöhnlichen Hochwasserrückhalteraumes IGHR entstehen. Dabei wird auch zukünftig zur Lösung der zahlreichen Bewirtschaftungsaufgaben nur ein begrenzter Stauraum zur Verfügung stehen. Eine der vordringlichsten Aufgaben der Stauanlagenbewirtschaftung besteht deshalb in den kommenden Jahren und Jahrzehnten in der Entwicklung geeigneter Steuerverfahren und Konzeptionen, um den veränderten Bewirtschaftungsbedingungen begegnen zu können.

Speziell für das Talsperrensystem Klingenberg/Lehnmühle beschreitet die Landestalsperrenverwaltung des Freistaates Sachsen folgenden Weg: Für die Talsperren Klingenberg, Lehnmühle und Rauschenbach sind Vergrößerungen der gewöhnlichen Hochwasserrückhalteräume beantragt worden. Die Anträge wurden im Jahr 2003 durch die zuständigen Regierungspräsidien in Dresden (für die Talsperren Klingenberg und Lehnmühle) und Chemnitz (für die Talsperre Rauschenbach) bewilligt. So konnten die in der Abbildung 6.4.5 dargestellten Vergrößerungen der gewöhnlichen Hochwasserrückhalteräume in die Bewirtschaftung der Tal-

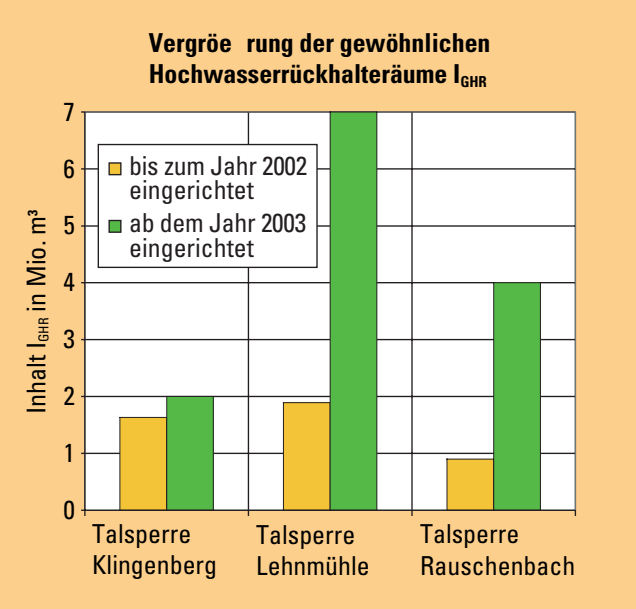


Abb. 6.4.5: Vergrößerung des gewöhnlichen Hochwasserrückhalteraumes in den Talsperren Klingenberg, Lehnmühle und Rauschenbach

sperren eingeführt werden. Diesen wichtigen, im Interesse des Hochwasserschutzes vorgenommenen Bewirtschaftungsschritten gingen wassergüte- sowie wassermengenwirtschaftliche Machbarkeitsstudien voraus. Seit Ende des Jahres 2003 ist es möglich, mittels Rohwasserbeileitungen aus der TS Rauschenbach bis zur TS Klingenberg zur Stabilisierung der Systembewirtschaftung beizutragen.

6.4.4 Vorliegende Beobachtungen und deren Bewertung

Die Beobachtung, Registrierung und Auswertung der Zuflussreihen zu den Talsperren ist unbedingte Voraussetzung für eine zuverlässige und plausible Bewirtschaftung und Bemessung der Stauanlagen.

Lange Reihen von im Regelfall Monatsmittelwerten sind notwendig, um zuverlässige Zuflussgenerierungen über mehrere 1000 Jahre und damit Speicherrechnungen zur Leistungsfähigkeitsbemessung für Rohwasserabgaben vornehmen zu können. Dabei ist sowohl die Erfassung von beobachteten Trockenperioden als auch die Simulation von denkbaren, möglichen Trockenperioden und deren Auswertung zur Leistungsbemessung besonders wichtig.

Die Beobachtung und Registrierung von Hochwasserereignissen ist unbedingte Voraussetzung der Hochwasserbemessung von Stauanlagen. Hier wird zwischen verschiedenen Hochwasserbemessungsfällen unterschieden. Mit fast jeder Stauanlage wird Hochwasserschutz für den Unterlauf des gestauten Fließgewässers gewährleistet. Dieser Hochwasserschutz ist zu bemessen und nachzuweisen. Darüber hinaus ist die Stauanlagensicherheit selbst für sehr große und zugleich seltene Hochwasserereignisse zu bemessen und zu gewährleisten. Nicht zuletzt spielt die Erarbeitung eines umfassenden Hochwassersteuerplanes eine wichtige Rolle.

In den vergangenen Jahren wurden im mittleren Zufluss zum Talsperrensystem Klingenberg/Lehnmühle Veränderungen beobachtet, die erste Anzeichen einer Klimaänderung erkennen lassen. Mit der Verschiebung des mittleren Zuflusses ging eine Häufung von Extremereignissen, sowohl von Niedrigwasser- als auch von Hochwasserereignissen einher.

Abb. 6.4.6: Die TS Lehnmühle bei deutlich abgesenktem Stauspiegel (508 m ü. NN). Ein Betriebsfall der Regelbewirtschaftung, d.h. im Rahmen der Rohwasserabgabe für Trinkwasser.

Abb. 6.4.7: Die Hochwasserentlastungsanlage der Talsperre Lehnmühle bei einem Stauspiegel über 524 m ü. NN in Betrieb. Ein Betriebsfall im Rahmen der Hochwassersteuerung.

Verschiebung des mittleren Zuflusses

Aus den Beobachtungen des Talsperrenzuflusses zum System Klingenberg/Lehnmühle lässt sich seit Beginn der 90er Jahre eine innerjährliche Verschiebung des Zuflusses ableiten, die jetzt bereits 15 Jahre anhält und eine gewisse Stabilität erlangt hat. So sind die Wintermonate vom November bis März abflussreicher geworden. In den letzten Jahren war über diesen Zeitraum seltener eine geschlossene Schneedecke bei anhaltendem Frost zu verzeichnen. Vielmehr traten oftmals Tauperioden mit Niederschlägen auf, die in den letzten Jahren zu hohen Winterzuflüssen geführt haben. Der früher in den Kammlagen des Erzgebirges zuflussreichste Monat April ist heute vergleichbar mit den trockeneren Frühsommermonaten. Die Sommer- und Herbstmonate haben eine deutliche Reduzierung des Zuflusses erfahren (vgl. Abb. 6.4.8). Trotz der deutlich sichtbaren, innerjährlichen Verschiebung des Abflusses zum Talsperren-System Klingenberg/Lehnmühle sind Reduzierungen der Jahressumme des Talsperrenzuflusses wie auch Veränderungen des Zuflusses vieler Einzelmonate bis zum heutigen Tage noch nicht signifikant nachweisbar. Auswirkungen der sich bereits abzeichnenden Klimaänderung auf die Wassermengenbewirtschaftung der Talsperren konnten bisher nicht nachgewiesen werden. Die Landestalsperrenverwaltung verfolgt die Entwicklung des Zuflusses zu den Stauanlagen ständig und wird rechtzeitig erforderliche Anpassungsmaßnahmen in den Wasserwirtschaftsplänen der Stauanlagen vornehmen.

Niedrigwasserzuflüsse

Die Jahre 2000/2001 und 2003/2004 waren u. a. von sehr intensiven, aber verhältnismäßig kurzen Trockenperioden geprägt. So konnte im Zeitraum vom Mai 2000 bis Januar 2001 ein mittlerer Zufluss zum Talsperrensystem Klingenberg/Lehnmühle über 9 Monate in Höhe von 255 l/s beobachtet werden. Die Trockenperiode ab Mai 2003 erbrachte über 9 Monate bis Ende Januar 2004 einen mittleren Zufluss von 220 l/s, was nur 15 % des langjährigen Mittelwasserzuflusses zur Talsperre Klingenberg entspricht. Damit wurde der trockenste, jemals beobachtete, zusammenhängende Zeitraum über die Dauer von 9 Monaten im Zufluss zum Talsperrensystem Klingenberg/Lehnmühle registriert. Allerdings gab es bereits mehrere vergleichbare, trockene Zeiträume. Neben den Jahren 2000/2001 brachte auch die Periode von Juni 1962 bis Februar 1963 bei einem mittleren Zufluss von 230 l/s sehr geringe Wassermengen.

Trotz der Trockenheit 2003/2004 bleibt für die Bemessung der Leistungsfähigkeit für Rohwasserabgaben zur Trinkwasserversorgung nach wie vor der Zeitraum von Juni 1962 bis März 1964 maßgebend. Diese Periode zeichnete sich bei einem mittleren Talsperrenzufluss von 455 l/s, was zirka 30 % des langjährigen Mittelwasserzuflusses zur Talsperre Klingenberg entspricht, besonders durch die Länge der Trockenheit aus.

Die Abbildung 6.4.9 vergleicht den Verlauf der maßgebenden Trockenperiode von 1962/64 mit dem Verlauf

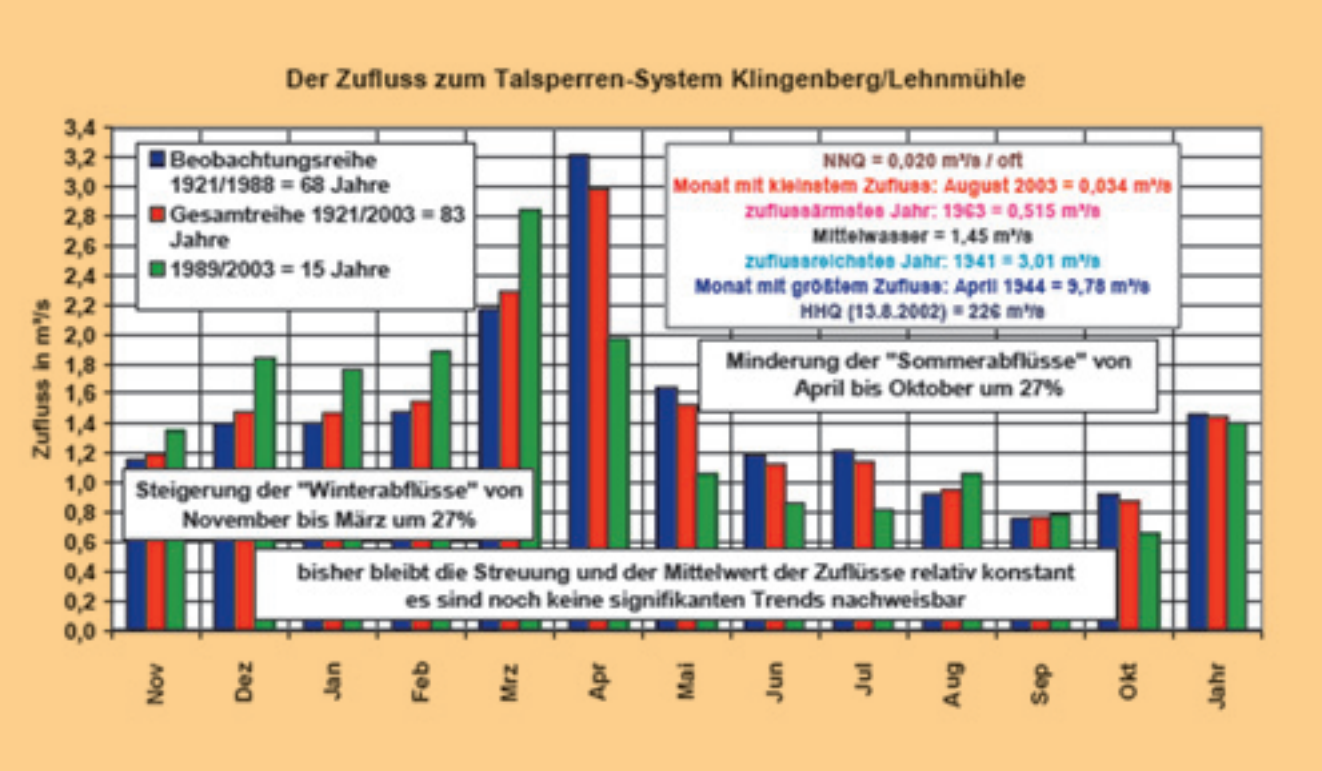


Abb. 6.4.8: Mittlere Zuflüsse zum Talsperren-System Klingenberg/Lehnmühle

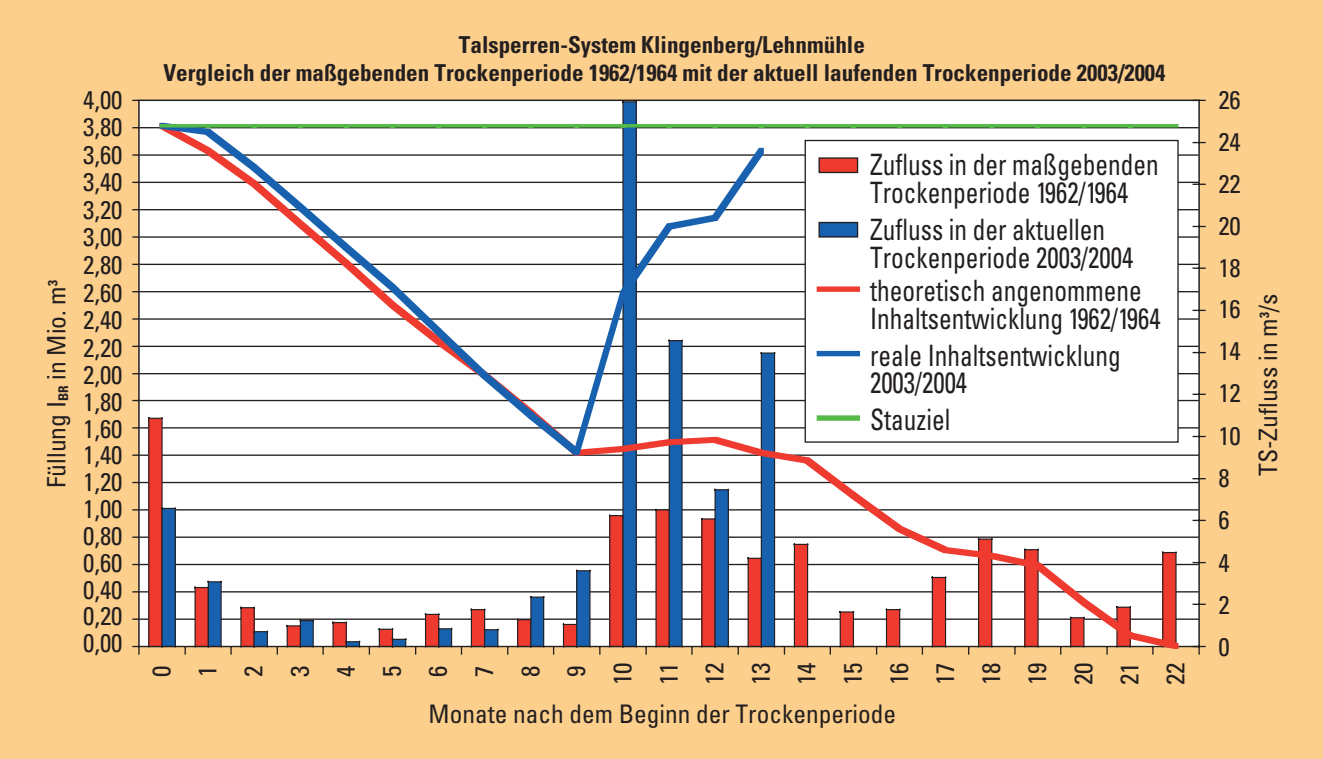


Abb. 6.4.9: Vergleich der beiden Trockenperioden 1962/1964 und 2003/2004 im Zufluss zum Talsperren-System Klingenberg/Lehnmühle

Dauer	Historisch	Aktuell
über 6 Monate	09/1953 – 02/1954 MQ = 170 l/s	05/2003 – 10/2003 MQ = 130 l/s **= – 24%**
über 9 Monate	06/1962 – 02/1963 MQ = 230 l/s	05/2003 – 01/2004 MQ = 130 l/s **= – 4%**
über 12 Monate = 1 Jahr	06/1962 – 05/1963 MQ = 410 l/s	02/2003 – 01/2004 MQ = 460 l/s **= + 12%**
über 24 Monate = 2 Jahr	08/1962 – 07/1964 MQ = 610 l/s	05/2000 – 04/2002 MQ = 1140 l/s **= + 87%**

Tab. 6.4.2: Vergleich der Intensität historischer und aktueller Trockenperioden im Zufluss zur Talsperre Klingenberg (MQ = mittlerer Zufluss)

der aktuellen Trockenperiode von 2003/04. Dargestellt sind sowohl die Zuflüsse zur Talsperre Klingenberg als auch die Entwicklung des Betriebsinhaltes des TS-Systems Klingenberg/Lehnmühle.

Die Tabelle 6.4.2 zeigt einen Vergleich der Talsperrenzuflüsse in historischen und in aktuellen Trockenperioden ab dem Jahr 2000. Deutlich werden die absoluten „Minusrekorde" der Trockenperiode 2003/04 für die relativ kurze Dauer von 6 bzw. 9 Monaten. Die Trockenheitsrekorde aus den Jahren 1962 bis 1964 über die längere Dauer von 12 bzw. 24 Monaten, die für die Bemessung der Talsperren-Leistungsfähigkeit im Erzgebirge maßgebend sind, bleiben aber bestehen.

Hochwasserzuflüsse

Im Zufluss zur Talsperre Lehnmühle, der seit 73 Jahren beobachtet wird, ereignete sich im März 2000 das bis dahin höchste Hochwasser. Das Augusthochwasser 2002 hat wiederum das Ereignis des Jahres 2000 weit übertroffen. Einen Vergleich beider Ereignisse zeigt die Abbildung 6.4.10. Die Abbildung 6.4.11 gibt einen Hinweis zur statistischen Einordnung des Augusthochwassers 2002 im Zufluss zur Talsperre Lehnmühle. Das zufällige Auftreten eines außergewöhnlich großen Hochwasserereignisses im August 2002 kann allein nicht als Nachweis einer Klimaänderung herangezogen werden. Vielmehr fällt die Häufung von Extremereignissen in den letzten Jahren auf, die erste Anzeichen einer Klimaänderung erkennen lässt. Diesen Umstand illustrieren die Abbildungen 6.4.12 und 6.4.13. Dabei zeichnen sich große, seltene Hochwasser durch einen schnellen Verlauf ab. Ein solches Ereignis läuft innerhalb weniger Tage ab. Trockenperioden im Sinne der Talsperrenbewirtschaftung erstrecken sich im Gegensatz zum Hochwasser über viele Monate bis hin zu mehreren Jahren.

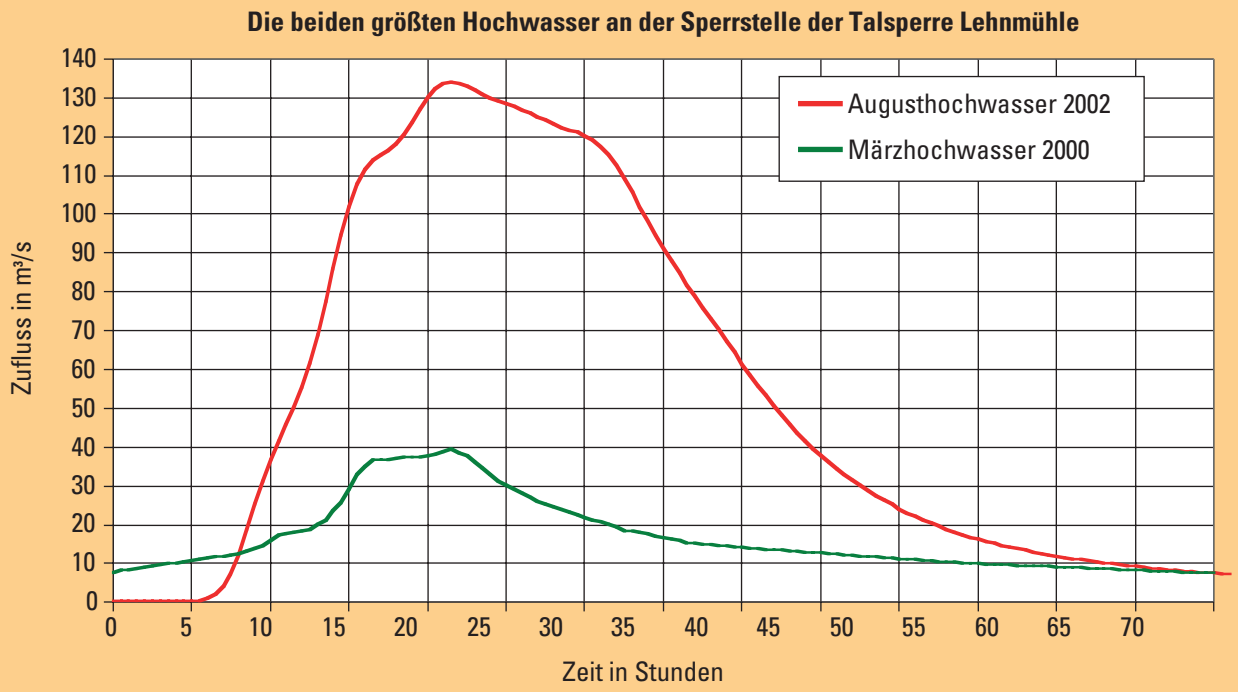


Abb. 6.4.10: Darstellung der beiden größten Hochwasser im Zufluss zur Sperrstelle der TS Lehnmühle

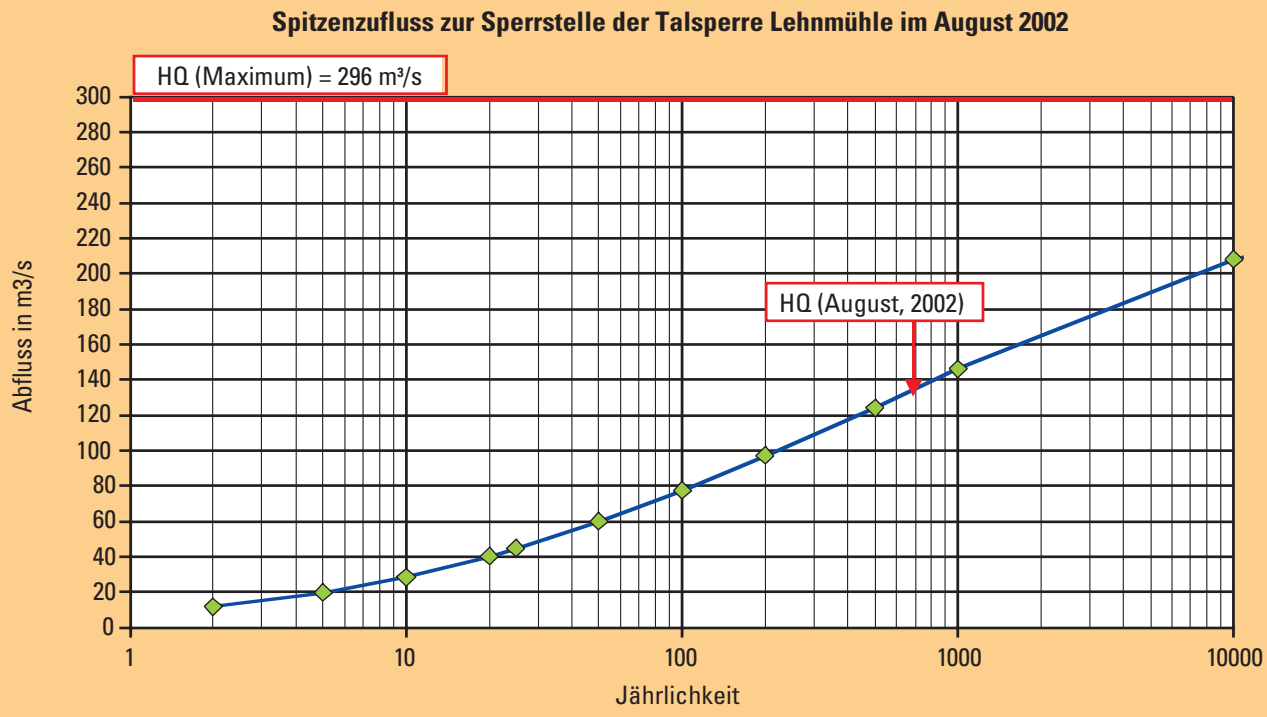


Abb. 6.4.11: Statistische Einordnung des Augusthochwassers 2002 im Zufluss der TS Lehnmühle im Vergleich zum maximal möglichen Hochwasser an diesem Querschnitt

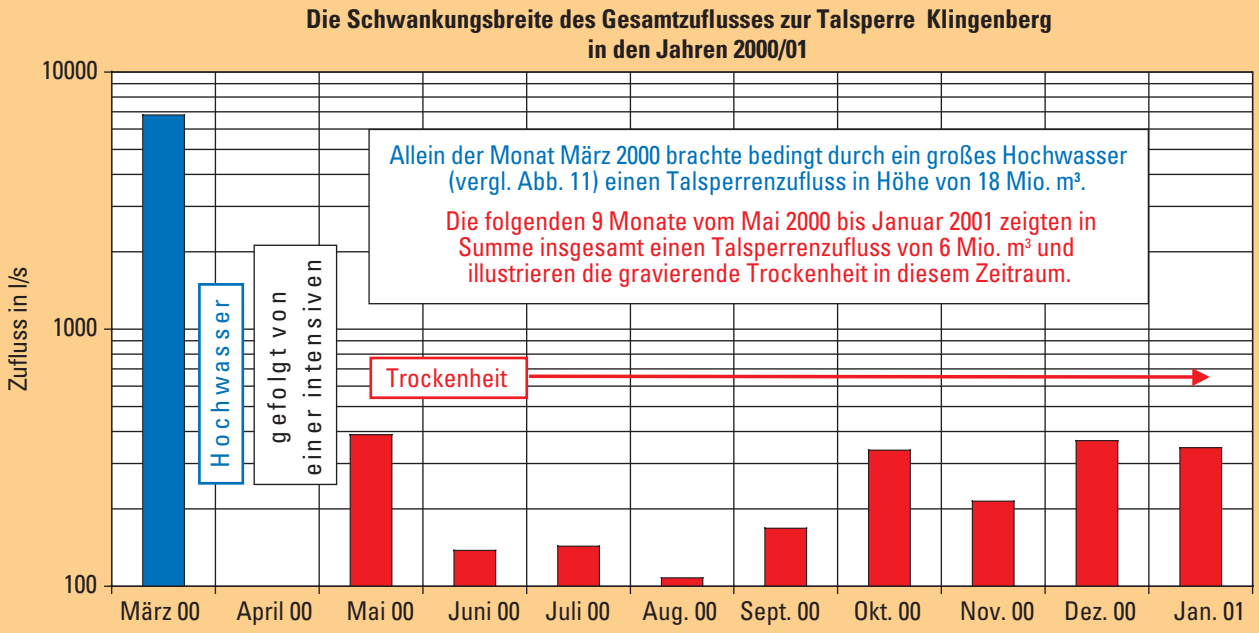


Abb. 6.4.12: Das Märzhochwasser 2000 gefolgt von einer 9 Monate andauernden, intensiven Trockenheit an der Sperrstelle der TS Klingenberg

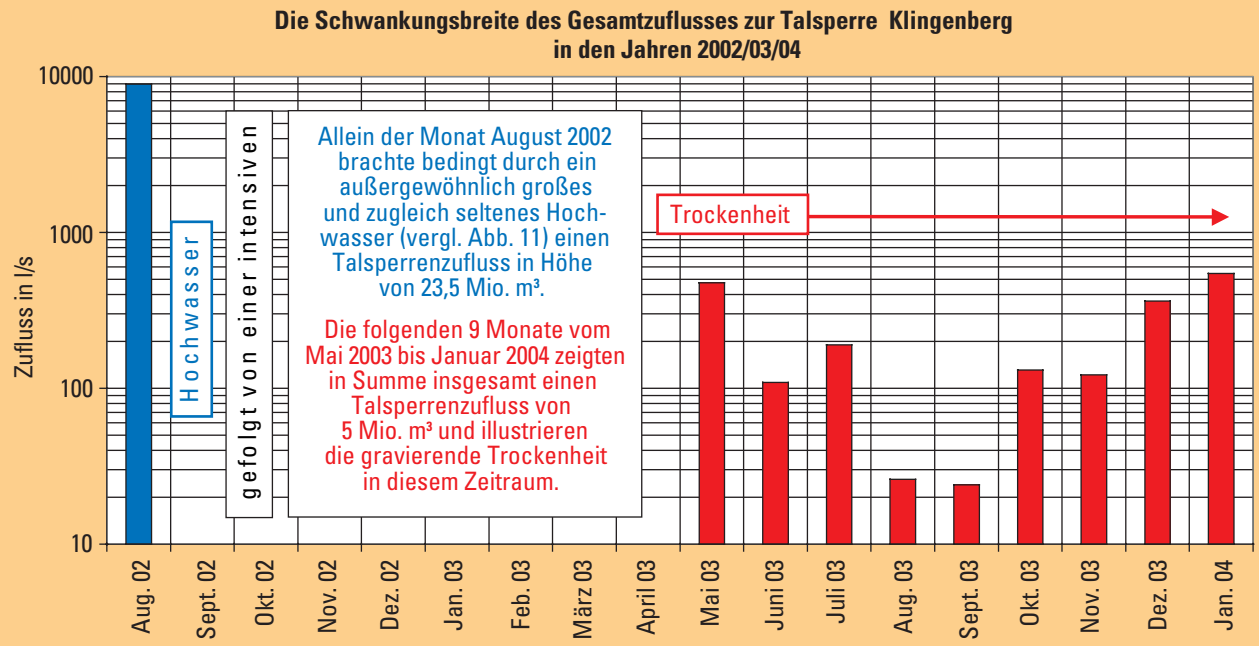


Abb. 6.4.13: Das Augusthochwasser 2002 gefolgt von einer 9 Monate andauernden, intensiven Trockenheit an der Sperrstelle der TS Klingenberg

6.4.5 Simulation der Auswirkungen von Klimaänderungen auf die Bewirtschaftung des Talsperrensystems Klingenberg/Lehnmühle, Wilde Weißeritz im Osterzgebirge

Grundlagen der Untersuchungen

Die Untersuchungen wurden im Auftrag der Landestalsperrenverwaltung des Freistaates Sachsen durch die Firma Dr. Dittrich & Partner Hydro-Consult GmbH durchgeführt.

Zur Wasserhaushaltsmodellierung wurde das Modell AKWA-M genutzt. Dieses Modell berechnet die Komponenten des Wasserhaushaltes von Gewässereinzugsgebieten. Eingangsgrößen sind Niederschlag und Energieeintrag bzw. potentielle Verdunstung (berechnet aus Lufttemperatur, relativer Luftfeuchte und Sonnenscheindauer). In der Wechselwirkung dieser Eingangsgrößen mit den morphologischen, geologischen und pedologischen Bedingungen sowie mit der Landnutzung (berücksichtigt wurden Forst-, Grünland-, Gewässer- und versiegelte Flächen in ihrer jahreszeitlichen Entwicklung) entsteht eine bestimmte Aufteilung des Niederschlages in Abfluss und Verdunstung. Der Abfluss setzt sich aus den Komponenten Direktabfluss, schneller Basisabfluss (Zwischenabfluss) und langsamer Basisabfluss (Grundwasserneubildung) zusammen. Um die Unterschiede dieser Bedingungen in dem relativ großen, unterschiedlich genutzten und stark höhenabhängig gegliederten Einzugsgebiet berücksichtigen zu können, wurde eine Differenzierung in 42 hydrologisch ähnlich reagierende Teilflächen vorgenommen.

Die Eingangsgrößen in das genutzte Wasserhaushaltsmodell AKWA-M waren homogene, konsistente Reihen der Klimaelemente Niederschlagssumme, Summe der Sonnenscheindauer, mittlere Lufttemperatur und mittlere relative Luftfeuchte. Diese Werte stehen für den Feuchte- und Energieeintrag, welcher die im Einzugsgebiet ablaufenden Verdunstungs-, Speicher- und Abflussprozesse steuert. Darüber hinaus wurden die Messungen der meteorologischen Stationen Zinnwald-Georgenfeld, Geisingberg (repräsentativ für die Kammlagen des Einzugsgebietes), Tharandt-Grillenburg (repräsentativ für die Tallagen des Einzugsgebietes) und Dresden-Klotzsche herangezogen. Weiterhin fanden die an den Talsperren Klingenberg und Lehnmühle gemessenen Niederschläge Verwendung.

Die historischen Zuflussdaten zum Talsperren-System wurden vom Pegel Ammelsdorf, Wilde Weißeritz genutzt. Sowohl die Klima- als auch die Abflussdaten wurden in der Auflösung von einem Monat zusammengestellt.

Die entsprechenden Klimaszenarien wurden vom Sächsischen Landesamt für Umwelt und Geologie bereitgestellt. Nach der Eichung des Modells AKWA-M für den Referenzzeitraum 1948 bis 1995 konnte aus den gewonnen Modellergebnissen für diesen Zeitraum mit Hilfe statistischer Methoden eine 2000 Jahre lange „Normalreihe bzw. Ausgangsreihe“ des Talsperrenzuflusses generiert werden. Mit dieser Reihe wurde eine Speicherbewirtschaftung des Talsperrensystems Klingenberg/Lehnmühle vollzogen. In einem nächsten Schritt wurde das geeichte Modell AKWA-M mit den Daten zweier Klimaszenarien (robustes Szenario 1; lokal differenziertes Szenario 2) gespeist. Hier entstand jeweils eine Talsperren-Zuflussreihe, die den geänderten klimatischen Bedingungen Rechnung trägt. Diese beiden veränderten Reihen stellen die Grundlage für eine jeweils 2000 Jahre lange, generierte Reihe dar und sind schließlich Ausgangsbasis für Speicherrechnungen, die etwa um das Jahr 2050 Relevanz erlangen könnten.

Die Modellergebnisse

Die zusammengefassten Projektergebnisse in Form einer „Gewinn- und Verlustrechnung“ für die Speicherbewirtschaftung zeigen die Abbildungen 6.4.14 und 6.4.15. So stellt die Abbildung 6.4.14 die Entwicklung des Niederschlagsdargebotes und daraus folgend des Abflusses (gleichbedeutend mit dem Gesamtzufluss zur Talsperre Klingenberg) für die Referenzperiode, Klimaszenario 1 und 2 dar. Die Abbildung 6.4.15 geht auf die Verdunstungshöhen ein.

So ist gegenüber der Referenzperiode von einer Niederschlagsreduzierung um 9 % im Klima-Szenario 1 bzw. 12 % im Szenario 2 auszugehen. Der Gebietsabfluss, der praktisch als Gesamtzufluss zur Talsperre Klingenberg aufzufassen ist, reduziert sich noch stärker. Im Szenario 1 erfährt diese Bewirtschaftungsgröße gegenüber der Referenzperiode eine Abminderung um 26 %, im Szenario 2 sogar um 35 %. Im Gegensatz hierzu nehmen die Verlustgrößen aus der Verdunstung deutlich zu (vgl. Abb. 6.4.15).

Die innerjährliche Verteilung der Zuflüsse im Vergleich der Referenzperiode 1921/2001 zu den Klimaszenarien 1 und 2 zeigt die Abbildung 6.4.16. Mit Ausnahme der Wintermonate wird über den gesamten restlichen Zeitraum des Jahres die gravierende Abnahme des Talsperrenzuflusses deutlich. Nach den durchgeführten Speicherrechnungen mit den nach Szenario 1 und 2 veränderten Zuflussreihen ist abschließend die Veränderung bzw. Reduzierung der Leistungsfähigkeit des Talsperrensystems für Rohwasserabgaben zur Trinkwasserversorgung von Interesse. Dieses Ergebnis kann Abbildung 6.4.17 entnommen werden. Die Leistungsfähigkeit des Speichersystems Klingenberg/Lehnmühle für Rohwasserabgaben zur Trinkwasserversorgung beträgt ohne die Stützung durch die Talsperre Rauschenbach für die Referenzperiode, d. h. für den Ist-Zustand = 920 l/s. Diesem Wert liegt eine Bereitstellungssicherheit nach der Häufigkeit (bezogen auf die Bereitstellungsjahre) von PH = 99 % bei konstanter Abgabe (PH 99 % const.) zugrunde. Im Szenario 1 wird diese Leistungsfähigkeit auf

Abb. 6.4.14:
Modellergebnisse für den Niederschlag und den Abfluss (= Talsperrenzufluss)

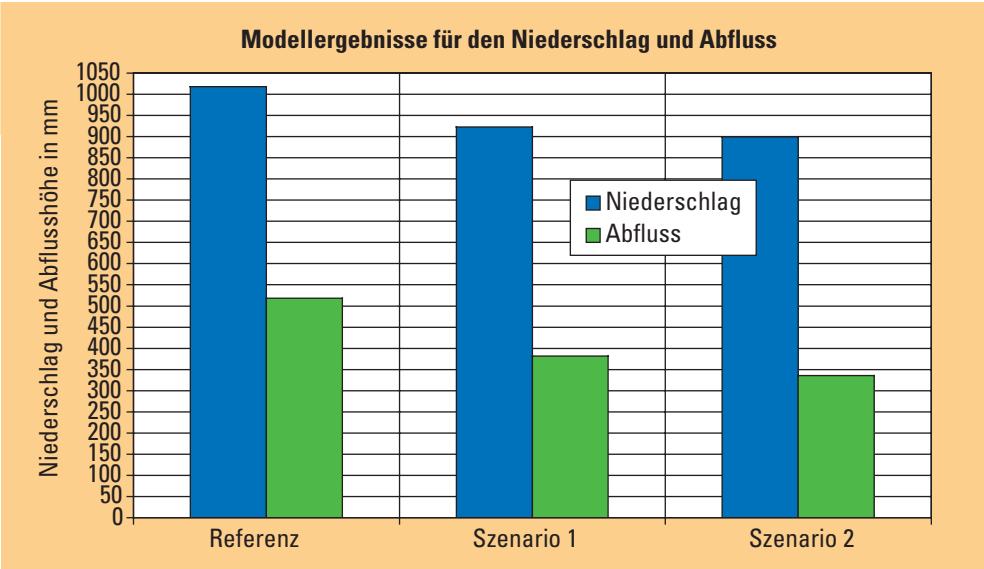
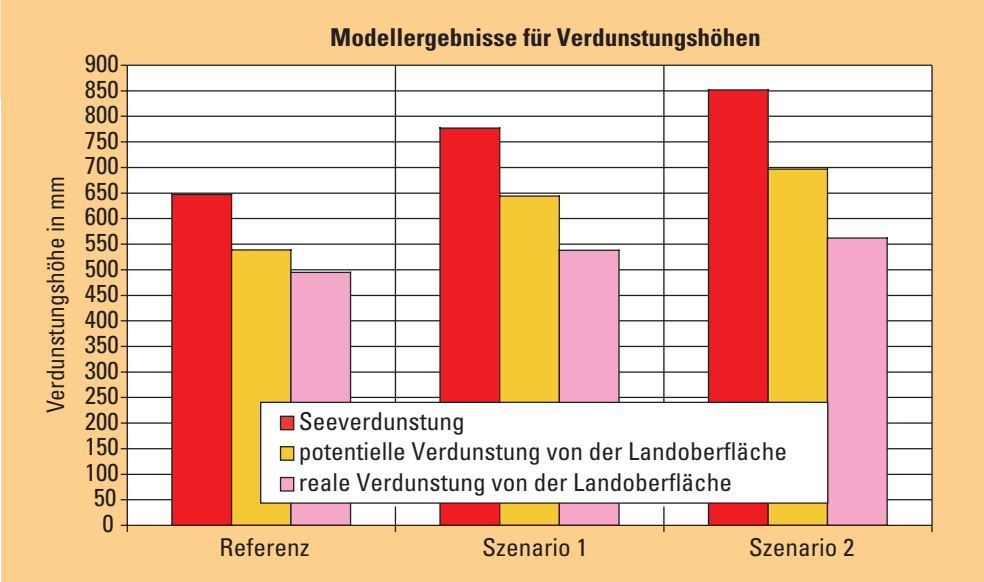


Abb. 6.4.15:
Modellergebnisse für die Verdunstungshöhen



73,5 % gegenüber dem Ist-Stand reduziert. Szenario 2 bringt sogar eine Reduzierung auf 64,3 % (vgl. Abb. 6.4.17). Unter Zugrundelegung der gegenwärtigen Zuflusssituation ist es mittels der Beileitungen von Rohwasser der Talsperre Rauschenbach bis zur Talsperre Klingenberg möglich, eine Leistungsfähigkeit von 1000 l/s aus dem Talsperrensystem zu garantieren. Diese Abgabeleistung zur Trinkwasserbereitstellung ist seit Jahren vertraglich mit den Rohwasserabnehmern gebunden.

In den Klimaszenarien 1 und 2 wäre es selbst bei Ausnutzung der vollen Beileitungsmöglichkeiten über die Talsperre Rauschenbach bis zur Talsperre Klingenberg nicht mehr möglich, diese 1000 l/s zu garantieren. Die Abnahme der Talsperren-Leistung ist in den Klimaszenarien 1 bzw. 2 so beträchtlich, dass zum Abschluss der angestellten Untersuchungen noch eine kurze Betrachtung zu möglichen bewirtschaftungsseitigen Reaktionen auf Klimaänderungen erfolgt.

Folgende bewirtschaftungsseitige Maßnahmen an Talsperren sind zusammenfassend als Reaktion auf mögliche Klimaänderungen denkbar:

- Eine höhere bzw. vollständige Auslastung der zur Zeit vorhandenen Kapazitäten.
- Verbundbewirtschaftung der zur Verfügung stehenden Kapazitäten
  - im Rahmen eines Kapazitätsausgleichs zwischen Talsperren.
  - zur Erhöhung der Talsperren-Leistungsfähigkeit.
- Anpassung der bestehenden speicherwirtschaftlichen Randbedingungen durch Flexibilisierung der Bewirtschaftung.
- Erschließung neuer Wasserdargebote durch
  - Anschluss von Einzugsgebieten an bestehende Talsperren durch Beileitungen.
  - Neubau von Talsperren.

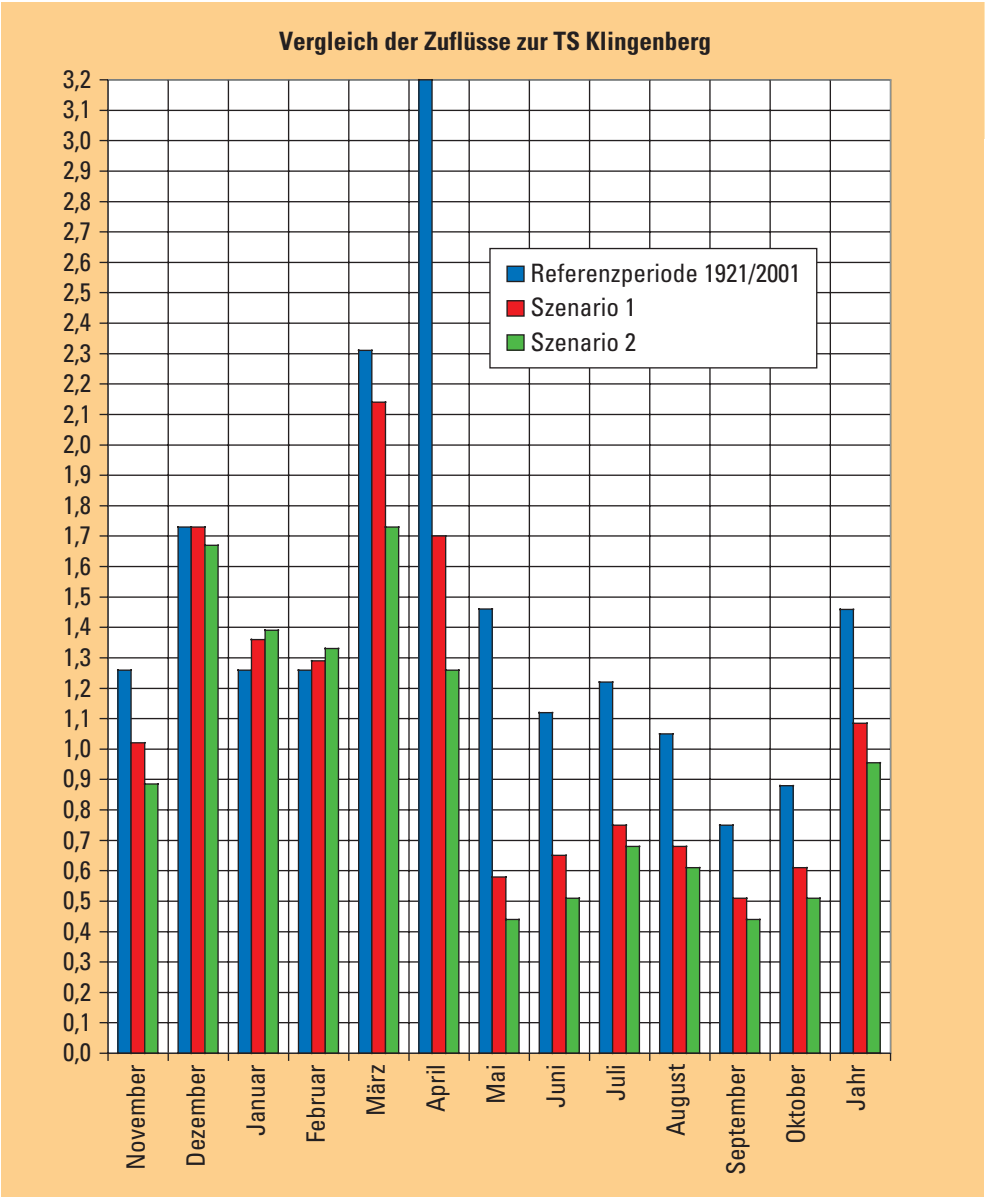


Abb. 6.4.16:
Veränderung des innerjährlichen Zuflussregimes sowie des Gesamtzuflusses

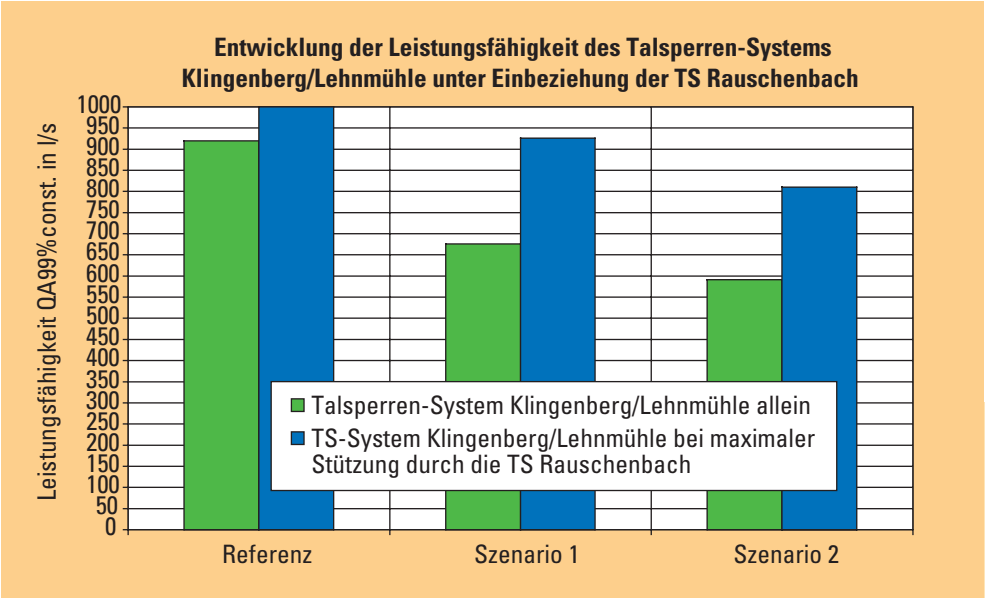


Abb. 6.4.17:
Veränderung der Leistungsfähigkeit des TS-Systems Klingenberg/Lehnmühle unter Beachtung der TS Rauschenbach

6.5 Konsequenzen der klimatischen Veränderungen für den Wasserhaushalt in Sachsen

6.5.1 Einführung

Klimabedingte Veränderungen des Wasserhaushaltes (Niederschlag, Verdunstung, Bodenwasser, Grundwasser, Standgewässer, Fließgewässer) können bereits heute mit ökologischen und ökonomischen Folgen verbunden sein. Der EEA Report No 2/2004 (European Environment Agency, 2004) belegt anhand von Untersuchungen in ausgewählten Flussgebieten Deutschlands, dass sich hier während der letzten Jahrzehnte die mittleren jährlichen Abflüsse lokal um – 4 bis + 6 % geändert haben.

Während in Deutschland insgesamt eine deutliche Zunahme der Niederschlagsmenge im Winter bei geringfügigerer Abnahme im Sommer zu erkennen ist, wird in Sachsen eher eine Entwicklung zu insgesamt geringeren Jahresniederschlagsmengen festgestellt.

An der innerjährlichen Umverteilung der Niederschläge wird deutlich, dass die Analyse von klimatischen Veränderungen und deren Auswirkungen auf den Wasserhaushalt eine regional und zeitlich sinnvoll differenzierte Betrachtung erfordert. So reicht nur die Betrachtung des mittleren jährlichen Abflusses allein nicht aus, um Veränderungen des Wasserhaushaltes und seine Konsequenzen zu erkennen.

6.5.2. Zum Klimawandel in Sachsen

Temperatur und potenzielle Verdunstung

Die Jahresmitteltemperatur hat sich in Sachsen in den letzten 30 Jahren flächendeckend um 0,9 Grad erhöht. Im Winter ist die stärkste Temperaturzunahme von lokal 1,4 Grad bis 2,6 Grad zu verzeichnen. Damit sind die Abnahme von Eis- und Frosttagen sowie ein Rückgang der Schneedecken (Mächtigkeit, Dauer, Verbreitung) verbunden. Die mittlere Erwärmung im Sommer geht mit der Zunahme an Sommer- und heißen Tagen sowie der Erreichung neuer Temperaturmaxima einher. Abweichend weist der Herbst in den letzten 50 Jahren bis zu 1 Grad Temperaturabnahme auf.

Mit der Erwärmung nahm in den letzten 30 Jahren die potenzielle Verdunstung in Sachsen um 6 % bis 16 % zu. Die lokale Differenzierung der Zunahme weist neben der Abhängigkeit von den Höhenstufen auch ein deutliches Gefälle von Ost nach West auf. Der Zunahmetrend der potenziellen Verdunstung verstärkt sich mit zunehmender Kontinentalität (Abb. 6.5.1).

Niederschlag und Trockenperioden

Im Gegensatz zu anderen Regionen Deutschlands weist die Mehrzahl der Stationen in Sachsen abnehmende Jahresniederschlagsmengen auf.

Das Auftreten des Großwettertyps West ist im Sommerhalbjahr in den vergangenen 50 Jahren rückläufig. Wetterlagen mit der Zufuhr von Luftmassen aus nordwestlicher Richtung haben ebenfalls abgenommen. Diese Entwicklungen haben im Sommer insgesamt zu einem deutlichen Rückgang der Niederschläge geführt.

Hingegen trat im Winterhalbjahr der vergangenen 50 Jahre der Großwettertyp West verstärkt auf (vgl. Kapitel 3, Abb. 3.6). Bei West- und Südwestwetterlagen wirken sich Lee-Effekte der vorgelagerten Mittelgebirge

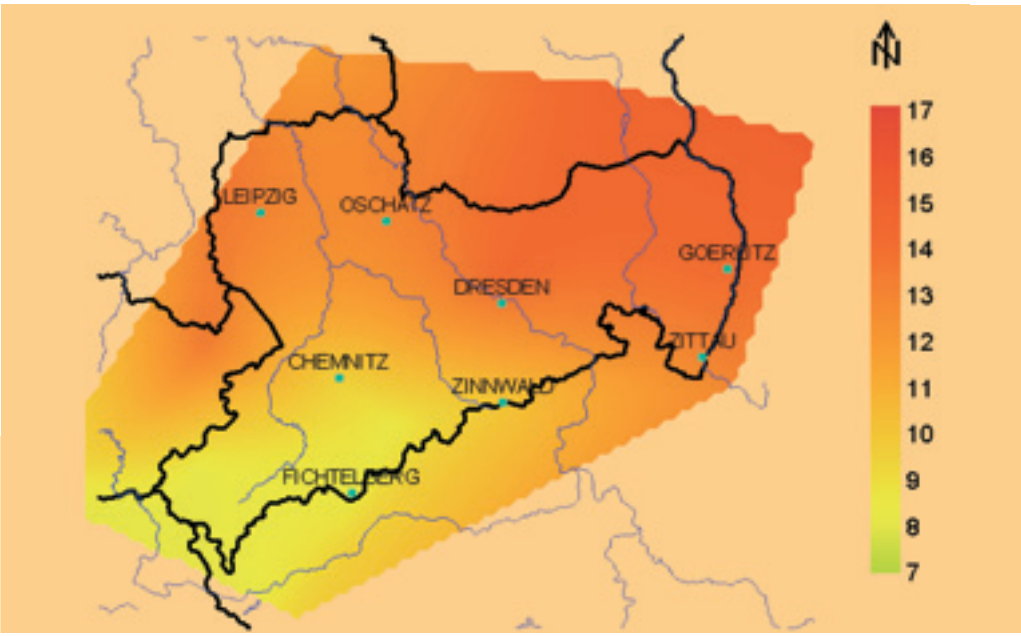


Abb. 6.5.1:
Relativer Trend (%) der potenziellen Verdunstung in Sachsen, 1971–2000 (Quelle: TU Dresden, Professur für Meteorologie)

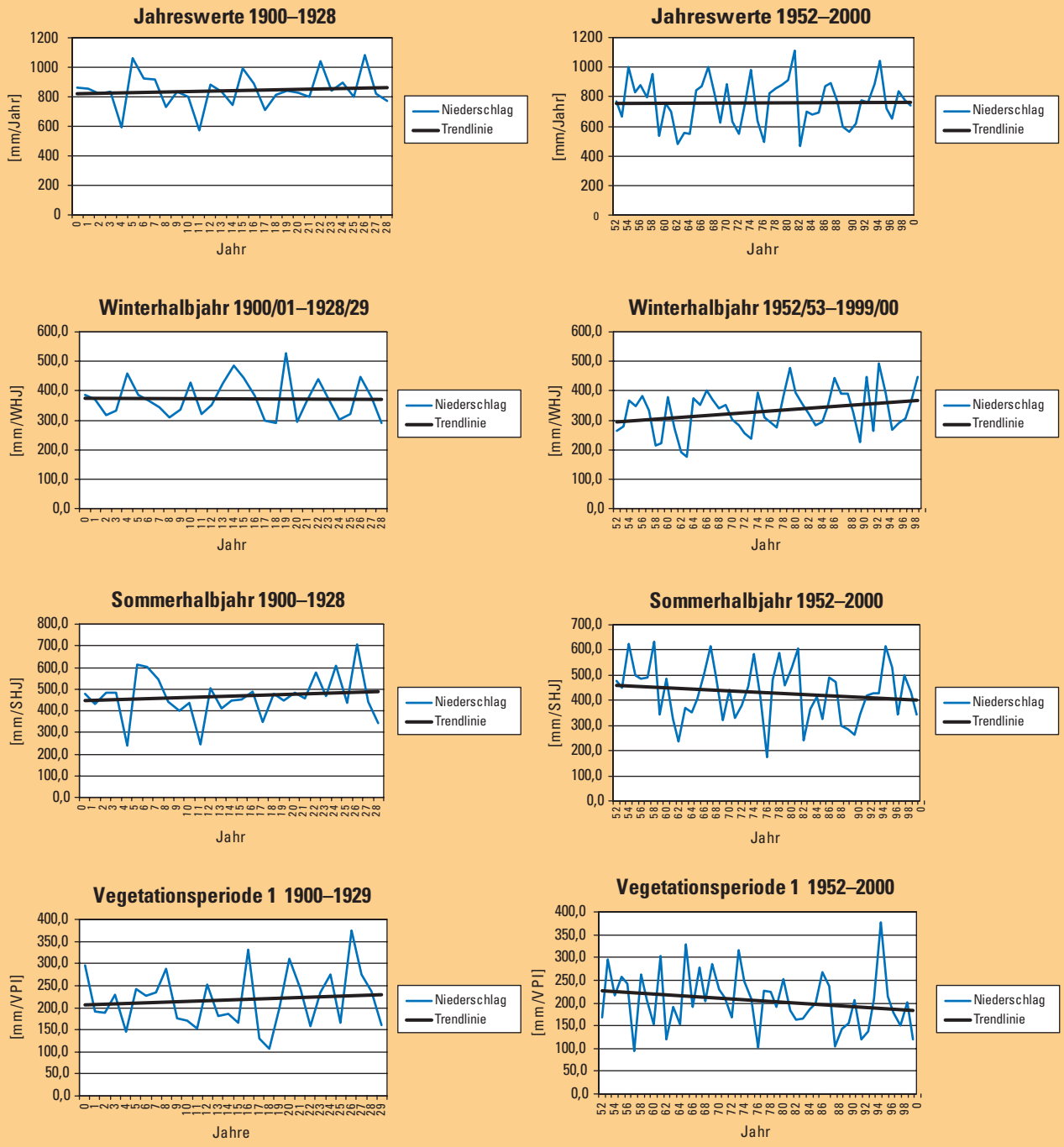


Abb. 6.5.2.: Lineare Trends im Niederschlag an der Station Tharandt (Quelle: LfUG, Sächsische Klimadatenbank)

	1901 – 2000	1971 – 2000	
Winter	bis +10 %, Zittauer und Johanngeorgenstädter Region kein Trend	Nordsachsen: +20 … +30 % Erzgebirge: +10 … +20 % Zittauer Region kein Trend	Trendverstärkung in den letzten 30 a
Sommer	–10 … –20 %, Sächsische Schweiz und Lausitzer Bergland unter 10 % Abnahme	0 … +10 % Sächsische Schweiz und Lausitzer Bergland über 10 % Zunahme	Betrachtung der letzten 30 a erfasst trendgegenläufige Phase

Tab. 6.5.1: Lineare Niederschlagtrends in Sachsen

(Fichtelgebirge, Erzgebirge, Thüringer Wald) in Sachsen niederschlagsvermindernd aus. Damit ist in Sachsen der Anstieg der Niederschlagsmengen im Winter weniger deutlich, als er allgemein in Deutschland stattfindet.

Bei der Auswertung der Trendentwicklung von Niederschlagsmengen ist jedoch zu beachten, dass Großwetterlagen allein nicht das Auftreten von Niederschlägen erklären. Kleinräumige, z.T. starke Niederschlagsereignisse können die Zeitstruktur der Messreihen wesentlich beeinflussen.

Trenduntersuchungen des Niederschlages an der Station Tharandt veranschaulichen die in Sachsen typische Situation (Abb. 6.5.2). Sie besteht in einer mittleren Jahresniederschlagsmenge auf geringfügig niedrigerem Level als zu Beginn des 20. Jahrhunderts bei gleichzeitig zunehmender Variabilität. Im Winterhalbjahr (November bis April) nehmen an der Station Tharandt in letzter Zeit die Niederschläge von einem tiefen Niveau aus zu. Insbesondere in den Monaten Februar und März ist in Sachsen über Jahrzehnte eine deutliche Zunahme der Niederschlagsmenge zu beobachten. Parallel dazu muss an der Station Tharandt im Sommerhalbjahr, noch verstärkter in den Monaten April, Mai und Juni (Vegetationsperiode 1) eine Abnahme der Niederschlagsmengen festgestellt werden. Am stärksten tritt der negative Trend im Grenzbereich zu Südbrandenburg und am Westabfall des Erzgebirges auf.

Stationen mit einem leichten Anstieg der mittleren Jahresniederschlagsmenge sind in den höheren Lagen des Erzgebirges und im äußersten Westen Sachsens sowie östlich von Leipzig festzustellen.

Die winterliche Temperatur- und Niederschlagszunahme ist in Sachsen signifikant mit Abnahmen der Schneedeckendauer und -mächtigkeit verbunden. Zuerst zeigte sie sich in den flacher gelegenen Gebieten und hat nun auch das lange „verschont“ gebliebene westliche Erzgebirge erreicht. Die Veränderungen der Schneeschmelze lassen eine Abnahme der Schneeakkumulation erwarten.

Häufigkeit und maximale Länge von Trockenperioden nahmen in ganz Sachsen in den Monaten April, Mai, Juni deutlich zu. Am stärksten ausgeprägt ist dieser Trend in Nordsachsen, im Vogtland, im Westerzgebirge und im Erzgebirgsbecken. Bei gleich bleibendem Trend wäre in 50 bis 100 Jahren in der Vegetationsperiode 1 z. T. mehr als eine Verdoppelung der maximalen Länge von Trockenperioden zu erwarten.

Klimaprojektion

Die zukünftige Klimaentwicklung ist wesentlich von der weiteren Entwicklung der Treibhausgasemission abhängig. Die Verdopplung der CO_2-Emission kann dabei als ein mögliches Szenario betrachtet werden.

Unabhängig davon ist generell einzuschätzen, dass im 21. Jahrhundert im Mittelmeerraum der Effekt der mittleren Erwärmung dominieren wird. In Zentral- und Osteuropa muss hingegen mit einer kräftigen Zunahme der Unterschiede von Jahr zu Jahr gerechnet werden. Die regionalspezifischen Auswirkungen auf den Wasserhaushalt werden derzeit erst zunehmend Gegenstand wissenschaftlicher Untersuchungen.

6.5.3 Auswirkungen auf den Wasserhaushalt

Mit den fortschreitenden klimatischen Veränderungen wird auch ein sich bereits abzeichnender, regionalspezifischer Wandel im Wasserhaushalt Sachsens deutlicher ausgeprägt werden. Quantitative Veränderungen stehen dabei auch immer in Rückkopplung mit der Wasserbeschaffenheit. Zu den sich bereits abzeichnenden Veränderungen des Wasserhaushaltes lassen sich folgende Thesen aufstellen:

- **Klimatische Wasserbilanz**
  Die klimatische Wasserbilanz als Differenz aus dem Niederschlag und der potentiellen Verdunstung muss im Jahresgang betrachtet werden.
  Dem mit zunehmender Erwärmung steigenden atmosphärischen Verdunstungsanspruch stehen im Sommer abnehmende Niederschläge gegenüber. Aus der sich damit verschärfenden Wasserknappheit im Boden und den oberirdischen Gewässern resultieren zunehmend Restriktionen für aquatische und terrestrische Ökosysteme sowie die Bewirtschaftung der Ressource Wasser. Der Sommer kristallisiert sich für Sachsen als kritischster Zeitraum heraus.

- **Bodenwasserhaushalt**
  In den letzten Jahren wechselten sich Sommer mit neuen Hitzerekorden mit solchen durchschnittlicher Werte ab. Es ist zu vermuten, dass sich in Zentraleuropa die Variabilität von Jahr zu Jahr weiter verstärkt. Die Zunahme heißer, trockener Sommer in Sachsen gekoppelt mit einem Niederschlagsrückgang in der Vegetationsperiode 1 hat eine immer umfassendere Ausschöpfung des Bodenwassers zur Folge. Ist der Untergrund ausgetrocknet, wird die Verdunstung unterdrückt, was zu einem noch stärkeren Aufheizen der Luft führt. An Lysimetern konnten mit dem Hitzerekord im Jahr 2003 Rekordwerte der innerjährlichen Bodenwasserausschöpfung gemessen werden.
  Die zunehmende Variabilität im Klima (Niederschlag, Temperatur) von Jahr zu Jahr wird in Sachsen das eigentliche Problem des Klimawandels darstellen. An relativ konstante Verhältnisse können sich die Natur sowie Land-, Forst- und Wasserwirtschaft anpassen, sprunghafte Änderungen allerdings machen eine Anpassung in den einzelnen Bereichen schwierig. Der

Bodenwasserhaushalt nimmt zur Bewertung der Auswirkungen der klimatischen Veränderungen eine Schlüsselstellung ein.

- **Grundwasserneubildung und -dargebot**

Da die Grundwasserneubildung hauptsächlich im Winterhalbjahr stattfindet war in den letzten Jahrzehnten bei zunehmenden Winterniederschlägen und geringerer Frostgefährdung der Böden ein Zunahmetrend bei der Grundwasserneubildung zu erwarten.
Der lineare Trend der Niederschlagssumme des Winterhalbjahres an der Station Tharandt zeigt beispielhaft, dass die letzten Jahrzehnte im Vergleich zum Zeitraum 1900–1928 durch eine stärkere Variabilität der Niederschlagssumme im Winterhalbjahr aufgrund des Auftretens deutlich geringerer Werte in einzelnen Winterhalbjahren gekennzeichnet sind.
Für Grundwasservorkommen ist jedoch das langfristige mittlere Dargebot ausschlaggebend. Trotz des linearen Anstiegstrends beim Winterniederschlag kann dieser auf einem geringeren Niveau als im ersten Drittel des 20. Jahrhunderts stattfinden. Je größer ein Grundwasservorkommen ist, umso besser wird es eine zunehmende Variabilität der Grundwasserneubildung ausgleichen. Für den grundwasserbürtigen Abfluss sowie die Trinkwassergewinnung aus Grundwasser sind standortspezifisch für eine Bewirtschaftung zu beachtende Veränderungen möglich.
Die Auswirkungen des jeweiligen lokalen Niederschlagstrends auf das Grundwasserdargebot werden durch die Bodeneigenschaften, den Grundwasserflurabstand und die Vegetation wesentlich modifiziert, so dass Aussagen zur Dargebotsentwicklung nur standortspezifisch getroffen werden können. Weiterhin wird die Grundwasserneubildung von der Landnutzung beeinflusst. Zum Beispiel weisen im Winterhalbjahr Laubbäume gegenüber Nadelbäumen einen geringeren Interzeptionsverlust auf, was sich auf die Grundwasserneubildung erhöhend auswirken kann.

- **Mittleres Abflussdargebot**

In Abhängigkeit von Gebietsgröße, Bilanzzeitraum und den lokalen Verhältnissen sind in den Flusseinzugsgebieten Sachsens künftig regionalspezifisch sowohl Ab- als auch Zunahmen bis in den zweistelligen Prozentbereich denkbar.
Entscheidend ist, wie sich gleichartige oder entgegen gesetzte Niederschlagstendenzen im Winter- und Sommerhalbjahr auf die Jahresbilanz im langjährigen Mittel auswirken.
In trockenen Sommern liegen die mittleren Monatsdurchflüsse unter den langjährigen mittleren Monats-

Abb. 6.5.3: Ausgetrockneter Lockwitzbach im Friedewald bei Dresden im Sommer 2003

Abb. 6.5.4: Pegellatte am Lockwitzbach 2004

durchflüssen. Mit Zunahme der trockenen Sommer werden in den Sommermonaten auch die niedrigen Abflussverhältnisse zunehmend auftreten. Von den langjährigen mittleren Monatsdurchflüssen im Sommerhalbjahr ist zu erwarten, dass sie zukünftig geringer werden. Im Winterhalbjahr zeichnen sich besonders in den Monaten Februar und März genau gegenläufige Tendenzen ab.

- **Hochwasser**
  Im Winterhalbjahr ist an vereinzelten Pegeln eine Abnahme der Jahreshöchstabflüsse vorstellbar, während insgesamt Hochwässer häufiger zu erwarten sind.
  Im Sommerhalbjahr zunehmende Starkniederschläge müssen sich in Abhängigkeit von Intensität, Dauer und aktuellen Gebietszuständen nur bedingt auf die Häufigkeit sommerlicher Hochwässer auswirken. Bei der Häufigkeit sommerlicher Extremhochwässer wird eine signifikante Änderung nicht nachweisbar sein.
  Die Häufigkeiten der Hochwässer könnten sich z.B. dahingehend verschieben, dass an einem Pegel das HQ(5) zum HQ(2) und das HQ(25) zum HQ (50) tendieren.

- **Niedrigwasser**
  Für Sachsen sind hier die durchgreifendsten Veränderungen zu erwarten. Infolge einer zunehmend früheren Anspannung der klimatischen Wasserbilanz ist bereits ab April eine Abnahme des mittleren monatlichen Abflussdargebotes und im Sommerhalbjahr eine Verschärfung von Niedrigwasserperioden in Dauer und Länge zu erwarten. Die Entwicklung in Sachsen unterscheidet sich von Untersuchungsergebnissen der Bundesanstalt für Gewässerkunde, welche in der Vergangenheit innerhalb Deutschlands eine Dargebotserhöhung für den Niedrigwasserbereich ergaben. In Flusseinzugsgebieten mit alpinen Anteil kann dies durch das Abtauen der Gletscher mit verursacht sein.

6.5.4 Bedeutung für die Wasserwirtschaft

Um die vielfältigen Ansprüche an die Ressource Wasser nach Menge und Beschaffenheit in Sachsen zu erfüllen, bedarf es einer abgestimmten, Prioritäten setzenden Bewirtschaftung der Gewässer. Die am 24. Juni 2004 verabschiedete Novelle des Sächsischen Wassergesetzes schreibt als Bewirtschaftungsziel den „guten Zustand" der Gewässer und die Aufstellung von gemeinsamen Bewirtschaftungsplänen und Maßnahmenprogramme für Flussgebietseinheiten vor. Die Wasserwirtschaft in Sachsen steht dabei vor Nutzungskonflikten, welche von den Auswirkungen des Klimawandels auf den Wasserhaushalt zusätzlich beeinflusst werden.

Beispiele konkreter Konflikte, welche einen Zusammenhang mit den Auswirkungen des Klimawandels auf den Wasserhaushalt vermuten lassen:

1. Zur Sanierung des Wasserhaushaltes im Lausitzer Braunkohlegebiet werden still gelegte Tagebaue gezielt geflutet. In den letzten Jahren ist die Flutung unter anderem deswegen langsamer vorangekommen als im Mittel bilanziert, weil das Dargebot in den Flüssen zu gering ausfiel.

2. In Talsperren und Standgewässern sind in den letzten Jahren immer wieder Blaualgen aufgetreten, welche vor allem in wärmeren Gebieten der Erde vorkommen. Sie beeinträchtigen die Wasserqualität für unterschiedliche Nutzungen nachteilig.

3. Im Jahre 2003 sind in Fischen bei anhaltender Niedrigwasserführung höhere Schadstoffbelastungen als erwartet festgestellt worden.

4. Im Sommer 2003 fielen in Gemeinden im Osterzgebirge Hausbrunnen trocken, welche an kein öffentliches Versorgungsnetz angeschlossen sind.

Abb. 6.5.5: Pegel Dresden: 9,40 m, 17.08.2002
(Foto: Ulrich van Stipriaan)

Abb. 6.5.6: Pegel Dresden: 0,75 m, 10.08.2003
(Foto: Ulrich van Stipriaan)

Durch den regionalspezifischen Klimawandel kann die Wasserwirtschaft in Sachsen zusätzlich mit Auswirkungen auf die sich beeinflussenden Bereiche Menge und Beschaffenheit konfrontiert werden. Mit einer Abnahme des Wasserdargebotes können bei der Wassermenge folgende Aspekte bedeutsam werden:

- Die Trinkwasserversorgung aus Oberflächenwasser (Talsperren) und Grundwasser muss sich durch geeignete Bewirtschaftungsstrategien an die Veränderungen anpassen.
- Abwassereinleitungen in die Fließgewässer können insbesondere während der Niedrigwasserphasen für einen tolerierbaren Gewässerzustand zunehmend kritischer werden.
- In der Landwirtschaft kann der Aufwand zur Bewässerung steigen. Der Anbau bewässerungsbedürftiger Kulturen würde erschwert werden. Die Verbesserung des Wasserrückhaltes in der Landschaft ist auch in diesem Zusammenhang positiv zu sehen.
- Mit geringeren Abflüssen aus den Einzugsgebieten kann der Nährstoffeintrag in die Gewässer derart zurückgehen, dass neben den Frachten auch die Konzentrationen abnehmen.
- In der Teichwirtschaft bedeutet zum Ausgleich von Versickerungs- und Verdunstungsverlusten fehlendes Wasser eine Zunahme der Gefahr der Notbefischung. Die Folgen können die Aufgabe unrentabler Teiche sein. Für die Teichfüllung im Februar/März sind zunehmende Restriktionen nicht zu erwarten.
- Im Wasserbau ist bei Veränderung von minimalen und maximalen Abflussverhältnissen die Anpassung von Bemessungsgrößen zu überdenken (Fischaufstiegshilfen, Deiche, Brückendurchlässe).
- Für die Bemessungsanforderungen an die Stadtentwässerung (Hydraulik, Stoßbelastungen) sind gezielte Untersuchungen zur Veränderung der Starkniederschläge notwendig.
- Veränderungen im Abflussregime der Fließgewässer bedingen Veränderungen der natürlichen Gewässerbettmorphologie und -dynamik. Fließgewässerentwicklungspläne müssen zur Gewährleistung natürlicher Abflussverhältnisse darauf eingestellt sein.
- Eine Dargebotsverringerung bedeutet für die Schifffahrt und die Energieerzeugung mittels Wasserkraftanlagen Ertragsverluste. Hier können sich Rentabilitätsprobleme verschärfen.

Mit einer Abnahme des Wasserdargebotes können bei der Wasserbeschaffenheit z. B. folgende Aspekte bedeutsam werden:

- Geringere Wasserführung, höhere Schadstoffkonzentrationen, erhöhte Aufwärmung der Gewässer beeinflussen den Chemismus und die Biologie der Gewässer. Kritische Zustände werden häufiger auftreten, Veränderungen der ökologischen Verhältnisse sind möglich. Daraus resultieren zusätzliche Einschränkungen für verschiedenste Nutzungsansprüche an die Gewässer. So können Fischsterben zunehmend durch begünstigte Entwicklungsmöglichkeiten für Krankheitserreger verursacht werden.
- An Standgewässern kann die Temperaturzunahme im Sommer zu stabileren Schichtungsverhältnissen führen. Ein damit verbundener behinderter Sauerstofftransport in den Tiefenbereich kann an den betroffenen Gewässern negative Auswirkungen wie Nährstoffrücklösungen haben.

6.5.5 Schlussbemerkung

Wasserwirtschaftliche Maßnahmen, die einer möglichen Klimaveränderung begegnen, können erst dann geplant und realisiert werden, wenn regionale und lokale Daten über die wahrscheinliche zukünftige meteorologische und hydrologische Situation und deren Auswirkungen auf die Wasserwirtschaft (Hoch- und Niedrigwasser, Stadtentwässerung, Grundwasserbewirtschaftung, Gewässergüte, Gewässerökologie) vorliegen.

In Sachsen stehen gezielte Auswertungen der lokalen vergangenen und zukünftig zu erwartenden Veränderungen des Klimas mit der Ableitung der Auswirkungen auf den Wasserhaushalt am Anfang. Von Bedeutung sind dabei die meteorologisch determinierten Wasserhaushaltsgrößen wie Starkniederschläge, Gebietsniederschläge, Schneedeckenregime und Verdunstung, die hydrologischen Größen wie Höchst- und Niedrigwasserabflüsse, Wasserdargebot, Bodenwasserausschöpfung, Grundwasserneubildung, Quellschüttung sowie ökologisch/gütewirtschaftliche Größen. Neben der statistischen Auswertung vorhandener Datenreihen sind prozessorientierte Forschungsansätze zur Bewertung konkreter Auswirkungen notwendig.

Im Rahmen des Forschungsprojektes KLIWEP (Sächsisches Landesamt für Umwelt und Geologie, 2004 b) wurden erstmalig mit einem gekoppelten Boden-, Grund- und Oberflächenwassermodell Auswirkungen einer Klimaprojektion bis 2050 auf den Wasserhaushalt in einem sächsischen Flusseinzugsgebiet des mitteldeutschen Tieflandes unter Berücksichtigung von 2 Landnutzungsszenarien ermittelt. Zielgrößen waren dabei die Auswirkungen auf die reale Verdunstung, die Boden- und Grundwasservorräte, die Grundwasserstände und das Abflusskomponentenregime.

Von grundlegender Bedeutung ist die Ausrichtung der vorhandenen Messnetze auf die Erfassung der klimatisch bedingten Veränderungen. Als Grundsätze sind kontinuierliche, langfristige Messprogramme, Repräsentanz für wichtige Naturräume, hohe Datenqualität, gezielte Datenauswertung und vor allem die integrierte Auswertung der Messnetze verschiedener Institutionen zu beachten.

Im Bereich der globalen und regionalen Klimamodellierung und der Auswirkungen des Klimawandels auf den Wasserhaushalt gibt es noch viele offene Fragen. Trotzdem ist es bereits jetzt geboten, im Sinne des Vorsorgeprinzips über mögliche angepasste wasserwirtschaftliche Handlungsstrategien nachzudenken. Für eine nachhaltige Bewirtschaftung der Ressource Wasser ist es keine geeignete Strategie, abzuwarten und auf bereits beobachtete Trends und eindeutige Veränderungsindikatoren nur im Nachhinein zu reagieren. Sobald die projizierten, regionalen Klimaänderungen objektiv nachweisbar geworden sind, können Entscheidungen nur reaktiv und mit entsprechend hohem Aufwand getroffen werden. Spielräume für flexible Handlungsstrategien sind dann nicht mehr gegeben. Angezeigt ist eine Strategie des vorausschauenden, situationsangepassten und flexiblen Handelns. Langfristige Pläne sollten an wachsende Erkenntnisse angepasst werden, laufende Aktivitäten sollten mit vorbeugenden Maßnahmen kombiniert werden. Über eine integrative Ausrichtung vorhandener Messnetze und die gezielte Auswertung historischer und aktueller Daten sind sachgerechte Erkenntnisse und Instrumentarien zu schaffen, welche möglichst bald konkrete Aussagen als Basis für wasserwirtschaftliche Handlungsempfehlungen ermöglichen.

6.6 Der Klimawandel und seine Auswirkungen auf Arten, Lebensgemeinschaften und Ökosysteme

6.6.1 Grundlagen und Problemstellung

Klimadaten und Witterungsverläufe in den zurückliegenden Jahrzehnten, besonders ab 1990, geben deutliche Hinweise auf sich anbahnende Klimaveränderungen. Weltweit beobachtete Entwicklungen der Lufttemperatur, des Niederschlags, der Windgeschwindigkeit, zunehmender Sturmhäufigkeit, abnehmender Schneebedeckung in Gebirgen u. a. betreffen auch Mitteleuropa und seine Regionen. Ausgehend von der Klimadiagnose mit nachgewiesenen Klimatrends der vergangenen 50 Jahre wurden die wahrscheinlichen Auswirkungen des globalen Klimawandels für Sachsen in den nächsten 50 Jahren ermittelt (Sächsisches Landesamt für Umwelt und Geologie, 2001, 2003a, b; Beiträge in diesem Heft).

Wenn sich der Klimawandel, vor allem Erwärmung und verändertes Niederschlagsregime, nach den Projektionen innerhalb einer relativ kurzen Zeitspanne vollziehen wird, sind auch in Sachsen alle Kompartimente des Naturhaushaltes, insbesondere aquatische und terrestrische Ökosysteme, ihre Lebensräume und Artvorkommen betroffen.

6.6.2 Temperatur und Niederschlag als Umweltfaktoren

Direkte Folgewirkungen des Klimawandels auf Tier- und Pflanzenarten betreffen die Überlebenswahrscheinlichkeit und den Reproduktionserfolg (Fitness). So steuert vor allem die Temperatur als eines der wichtigsten Klimaelemente entscheidende Lebensvorgänge bei Tieren und Pflanzen, wie Keimung, Stoffwechsel, Fortpflanzung, Mobilität und Verhalten. Temperaturerhöhungen verändern die Bedingungen für diese Lebensvorgänge unmittelbar und bewirken gleichzeitig Standortsveränderungen, wie z. B. die Zunahme der mikrobiellen Bodenaktivität mit den Folgen gesteigerter Mineralisierung und Nährstofffreisetzung.

Als indirekte Folgen kommen Veränderungen der Lebensumwelt, insbesondere der Nahrungsgrundlage, der Bodeneigenschaften, des Wasserhaushaltes oder anderer Habitateigenschaften in Betracht (Leuschner und Schipka, 2004). Für viele Pflanzenarten sind die Niederschläge und davon ausgehend die Bodenfeuchte entscheidender als die Temperatur und bestimmen wesentlich ihre Verteilung im Raum. Bereits geringe Änderungen von Menge, zeitlicher Verteilung und Intensität können das regionale Wasserregime und damit den Wasserhaushalt der Ökosysteme empfindlich stören.

6.6.1: Naturnaher Fichten-Moorwald im oberen Westerzgebirge mit Bindung an kühl-feuchte Klima- und Standortbedingungen. Als Folge des Klimawandels könnte dieser bereits seltene Ökosystemtyp in Sachsen aussterben.

Änderungen von Temperatur und Niederschlag ziehen als zusammen wirkende Stressfaktoren in der Regel komplexe Wirkungen nach sich (Gebhardt, 2000), z. B. Veränderungen des Bodenwasserhaushaltes aufgrund der Absenkung des Grundwasserspiegels.

6.6.3 Klimaänderungen und ihre Folgen für Arten und Ökosysteme

Eine Art existiert aufgrund der in der Evolution erworbenen Anpassung nur innerhalb spezifischer klimatischer Bedingungen, unter denen ihre Populationen in der Lage sind, im ökosystemaren Gefüge zu überleben. Jede Art kann sich nur in dem (bio-)geographischen Raum bewegen, in dem diese artspezifisch typischen klimatischen Bedingungen herrschen (Leuschner u. Schipka, ebenda). Hinzu kommen veränderte Konkurrenzbedingungen, da die Arten in einer Lebensgemeinschaft unterschiedlich auf veränderte Klimabedingungen reagieren. Hieraus können sich Dominanzverhältnisse verschieben und Veränderungen der Populationsdichte (Abundanz) im Verbreitungsgebiet ergeben. Eine Veränderung dieser klimatischen Verhältnisse führt also zwangsläufig zu einer Verschiebung des Arten- und Lebensraumspektrums. Bestimmte Arten und Ökosysteme werden zurückgedrängt, andere dagegen gefördert.

Die Gefahr des Erlöschens (Extinktionsrisiko) von Populationen bestimmter Tier- und Pflanzenarten mit engerer Klima- und Standortbindung nimmt zu. Zumindest regional betroffen sind konkurrenzfähige Arten mit erworbenen Anpassungen an stabile Standort- bzw. Habitatbedingungen (so genannte K-Strategen; Müller, 1988). Besonders gefährdet sind boreal und arktisch-alpin verbreitete Arten mit kleinen, räumlich isolierten Reliktarealen in Mitteleuropa, die neue, ihnen zusagende Lebensräume nicht mehr erreichen können. Einige dieser Standortspezialisten mit kühl- bzw. kalt-stenothermen Lebensansprüchen bzw. an kühl-(luft)-feuchten Standorten besiedeln Gewässer und Moore im sächsischen Tiefland und im Bergland, kühl-schattige Täler und Felsreviere sowie Wälder, Heiden, Rasengesellschaften u. a. im Bereich der oberen Berglagen. Ein Anstieg der Jahresmitteltemperatur um 1,5 Grad würde bedeuten, dass die betroffenen Arten eine Distanz von 125 km überwinden müssten, um auf entsprechende Standorte zu treffen und damit das langfristige Überleben zu sichern (Klose, 2000).

6.6.2: Traubeneiche (rechts) und Feldahorn (links) sind kennzeichnende Baumarten der Eichen(misch)wälder trocken-warmer Standorte. Werden Temperaturanstieg und zunehmende Sommertrockenheit ihre Ausbreitung fördern?

Der überwiegende Teil der im Zuge einer Klimaerwärmung potenziell vom Rückgang betroffenen Arten ist bereits durch anthropogene Änderung und Zerstörung meso- bis oligotropher Standorte gefährdet (zumeist Arten der Roten Liste). Hier lassen sich klimabedingte Ursachen von anderen (anthropogenen) Gefährdungsfaktoren schwer abgrenzen.

Dementsprechend werden auch die Lebensbedingungen für Ökosysteme mit Anpassungen an gemäßigt- bis kühlfeuchte Bedingungen ungünstiger, so dass in besonders betroffenen Regionen Sachsens (Tiefland und Bergland) mit qualitativen Veränderungen, Arealverschiebungen und auch mit Verlusten gerechnet werden muss. Hierzu zählen vor allem planare Buchen(misch)wälder, Tieflandsfichtenwälder, Berg(misch)wälder der höheren Lagen, (hoch)-montane Fichtenwälder, Schatthang- und Schluchtwälder, Gebirgsregenmoore, hygrophile Hochstaudenfluren. Hinzu kommen alle Biotope mit Bindung an hohen Grundwasserstand (Auen-, Bruch- und Moorwälder, Zwischen- und Niedermoore, Feuchtheiden, Sümpfe, Quellen, Quellfluren, Uferstaudenfluren, Nass- und Feuchtgrünland).

Gleichzeitig wird schon seit Jahren die Ausbreitung von Arten mit höheren Wärmeansprüchen in Deutschland beobachtet (Überblick bei Leuschner u. Schipka, ebenda). Dies betrifft vor allem Arten mit submediterraner bis mediterraner und atlantischer Verbreitung. In Sachsen kann eine Ausbreitung bzw. Einwanderung wärmebedürftiger Arten vor allem in den nach Klimaprojektionen zunehmend warmen und trockenen, z. T. durch Dürre geschädigten Bereichen des Tief- und Hügellandes angenommen werden. Hierzu zählen u.a. auch Neophyten (sogar aus subtropischen Regionen) und andere synanthrope Pflanzenarten, vor allem auf den vom Menschen stark beeinflussten ruderalen Standorten. Besonders in aquatischen Lebensräumen werden sich Wärme liebende Arten ausbreiten. – Im Bereich Ökosysteme eröffnen sich im Tief- und Hügelland Ausbreitungschancen für Trockenwälder und -gebüsche, Zwergstrauchheiden trockener Standorte, Trockenrasen und Halbtrockenrasen, Ruderal- und Segetalfluren trockener Standorte.

Als Folge der Verlagerung der Klimazonen ist bei einer Temperaturerhöhung um 1 Grad von einer Verschiebung der Vegetationszonen um etwa 200–300 km polwärts beziehungsweise um 200 Höhenmeter auszugehen. Für die sächsischen Mittelgebirge kann dies eine Ablösung

montaner Fichtenwälder und Bergmischwälder durch mesophile bis wechseltrockene Eichenmischwälder, in den Kammlagen durch Buchen(misch)wälder bedeuten.

Hinzu kommen Auswirkungen von künftig zunehmenden Extrem-Wetterereignissen auf Ökosysteme bzw. Ökosystemkompartimente: Einerseits kommt es zu Schadwirkungen durch Hitze-/Trockenstress, Wind- oder Schneebruch, Starkregen und Hochwasser. Andererseits werden durch diese und andere Naturprozesse Flächen bzw. Standorte geschaffen, auf denen z.T. neuartige, noch nicht im Einzelnen vorhersehbare Naturentwicklungsprozesse (Sukzessionen) in bisher nicht gekannter Vielfalt und Größenordnung ablaufen können. Besonders dort werden sich für heimische und neu einwandernde Besiedlungspioniere der Flora und Fauna mit kurzer Lebensdauer und hoher Vermehrungsrate (r-Strategen; Müller, ebenda) sowie für Generalisten, die ein breites Spektrum der sich ändernden Umweltfaktoren tolerieren, neue Lebensmöglichkeiten eröffnen.

6.6.4 Biologische Vielfalt im Wandel

Die mit dem Klimawandel einhergehenden, hier angedeuteten Ablösungs- und Veränderungsvorgänge bei Arten und Ökosystemen führen also aller Voraussicht nach nicht nur zu Einbußen, sondern auch zur Ausbreitung von Arten. Für den Naturschutz ist eine wesentliche Frage, wie sich diese Veränderungen auf die biologische Vielfalt auswirken werden.

Die Entwicklung der heute anzutreffenden biologischen Vielfalt (Biodiversität) wurde durch klimatisch relativ konstante Bedingungen in der jüngeren Vergangenheit möglich, wobei Biodiversität nicht auf die Artenvielfalt zu reduzieren ist, sondern auch die Vielfältigkeit der Lebensgemeinschaften und deren Wechselbeziehung einschließt (Haber, 2003).

Aus der Erdgeschichte sind mehrfache Reduktionen der Diversität (zumindest auf Artebene) bekannt (Klose, 2000). Nach Anpassung an neue, veränderte Lebensbedingungen nahm die Diversität jedoch – in geologischen Zeiträumen – wieder zu und hat jeweils immer höhere Niveaustufen eingenommen. Nach Klose spricht vieles dafür, dass über lange Zeiträume hin eine Selbstregulierung der Biodiversität durch Rückkopplungseffekte erfolgt sein muss. Gleichzeitig warnt der Autor vor dem derzeit anhaltenden, weltweiten Trend zu höheren Aussterbewahrscheinlichkeiten, die vom Menschen vor allem durch zunehmende Beeinträchtigungen der Lebensräume verursacht werden. Bereits die für die letzten Jahrzehnte diagnostizierte klimatische Entwicklung trifft nicht mehr auf eine stabile, sondern bereits durch vielfältige anthropogene Einflüsse (einschließlich der Lebensraumzersplitterung) belastete und geschwächte Biosphäre.

Über langfristige Auswirkungen der künftigen Klimaentwicklung auf die Biosphäre, insbesondere die Funktionsfähigkeit von Ökosystemen besteht bislang noch weitgehend Unklarheit. Plötzliche Klimaschwankungen in der Erdgeschichte sind noch nicht so detailliert erforscht, um Extrapolationen zuzulassen (Klose, 2000). Es ist jedoch nicht auszuschließen, dass zu geringer bis fehlender Spielraum für entsprechende Anpassungsprozesse zur Abkopplung der zu erwartenden Vorgänge von bisher aus der Erdgeschichte bewährten Mustern führen kann (Klose, 2000).

Während aus globaler Sicht irreversible Verluste an Arten und Ökosystemen durch Klimaänderungen nicht auszuschließen sind, werden sich in den mittleren Breiten vor allem Verschiebungen bisheriger Verbreitungsgebiete von Arten und Ökosystemen vollziehen. In Sachsen werden über einen längeren Zeitraum mit wechselnder Intensität, aber nahezu zeitgleich Abwanderungs- und Zuwanderungsprozesse von Arten stattfinden sowie Umbildungen von Ökosystemen erfolgen. Während dieser Umbruchs- und Übergangsphase kann mit einer Zunahme der Biodiversität gerechnet werden.

6.6.5 Klimawandel in Sachsen – eine Herausforderung für Naturschutz und Landschaftspflege

Die Umwelt- und Naturschutzverwaltung Sachsens verfügt derzeit noch nicht über einen hinreichenden Kenntnisvorlauf zu den Folgen prognostizierter Klimaänderungen für Arten, Biotope und Ökosysteme.

Im FuE-Projekt „Folgewirkung der Klimaänderungen für den Naturschutz – ausgewählte Ökosysteme und Arten“ werden auf der Basis von Klimadaten und Forschungsergebnissen zum Klimawandel in einem ersten Schritt wesentliche Zusammenhänge zwischen erkannten Klimaänderungen und möglichen Entwicklungstrends für den Naturhaushalt recherchiert. Davon ausgehend gilt es, für sächsische Verhältnisse geeignete Strategien und Maßnahmen für den Naturschutz und die Landschaftspflege in Sachsen im Hinblick auf die Folgewirkungen von Klimaänderungen vorzuschlagen.

Erhaltung und Förderung der Biodiversität sollten dabei einen zentralen Stellenwert einnehmen. Zum einen sind, soweit möglich, die Auswirkungen des Klimawandels auf betroffene Ökosysteme und Arten durch geeignete konservierende Maßnahmen abzufedern, d. h. absehbare Verluste substantiell abzumindern und zeitlich zu strecken. Zum anderen sind konservierende Strategien dort zu überprüfen, wo die betroffenen Arten auf Grund des Klimawandels langfristig keine geeigneten Lebensbedingungen finden. Durch Flächensicherung, flexibles naturschutzfachliches Management und begleitendes Monitoring, aber auch durch die Vielfalt der Landnutzungen und der damit verbundenen landschaftlichen Strukturen sind die Voraussetzungen dafür zu schaffen, dass auch bei fortschreitendem Klimawandel die Arten- und Ökosystemvielfalt langfristig gesichert werden kann.

7 Glossar

Anthropogene Emission
Ausstoß von Treibhausgasen oder deren Vorläufern (d. h. Stoffe, die sich später mit anderen Stoffen zu Treibhausgasen verbinden können) und von Aerosolen, die mit menschlichen Aktivitäten (anthropogen = durch den Menschen verursacht) in Verbindung stehen. Anthropogene Emissionen werden primär durch die Verbrennung fossiler Brennstoffe zur Energiegewinnung, durch Brandrodung und andere Landnutzungsänderungen verursacht.

Anthropogener Treibhauseffekt
Vom Menschen durch den Ausstoß von → Treibhausgasen verursachter zusätzlicher → Treibhauseffekt.

Antizyklone
Hochdruckgebiet. Bezeichnet ein Gebiet mit hohem Luftdruck.

Antizyklonal
Bezeichnung für großräumige Luftbewegungen, die auf der Nordhalbkugel im Uhrzeigersinn um ein Hochdruckgebiet (→ Antizyklone) verlaufen. Auch zur Kennzeichnung des Wetters oder einer Wetterlage unter Hochdruckeinfluss verwendet.

Atmosphäre
Die gasförmige Hülle, welche die Erde umgibt. Die trockene Atmosphäre besteht fast gänzlich aus Stickstoff (78,1 %) und Sauerstoff (20,9 %), zusammen mit einer Anzahl von Spurengasen wie Argon (0,93 %), Helium und strahlungsaktiven Treibhausgasen wie Kohlendioxid (0.04 %) und Ozon. Zusätzlich enthält die Atmosphäre Wasserdampf, dessen Menge stark schwankt, sowie Wolken und Aerosole. Bedeutsam ist auch das in der → Stratosphäre enthaltene Ozon als Filter gegen die harte UV-B-Strahlung der Sonne.

Biosphäre
Der von Lebewesen besiedelte Teil der Erde.

Blockierendes Hoch
Ein blockierendes Hoch ist eine stationäre, warme und hoch reichende → Antizyklone in den mittleren Breiten, die aus der Abschnürung eines vom subtropischen Hochdruckgürtel polwärts vorstoßenden Hochdruckkeils entsteht. Es zeichnet sich durch eine hohe Beständigkeit aus und kann die Witterung in einer Region über Wochen bestimmen.

DWD
Deutscher Wetterdienst. Der DWD unterhält Beobachtungs-, Vorhersage-, Wirtschaftswetter-, Flugwetter- und Seewetter- sowie agrar- und medizinmeteorologische Dienste.

DKRZ
Deutsches Klimarechenzentrum: 1987 in Hamburg gegründet. Überregionale Service-Einrichtung für die Realisierung globaler Klimamodell-Simulationen.

Dürre
Dürren sind gekennzeichnet durch anhaltend niedrige Bodenwasservorräte, vorwiegend in der warmen Jahreszeit. Definitionen von D. gehen meist vom Bodenwasservorrat und der Verdunstungsgröße aus; der Fehlbetrag an Niederschlag spielt hierbei, im Gegensatz zur → Trockenheit, eine sekundäre Rolle.

ECHAM-Klimamodelle
Die *ECHAM*–Klimamodelle basieren auf Wettervorhersagemodellen beim Europäischen Zentrum für mittelfristige Wettervorhersagen in Reading/England (*EC*). Die Weiterentwicklung erfolgte am Max-Planck-Institut für Meteorologie in Hamburg (*HAM*). Gegenwärtig werden Versionen gekoppelter Ozean-Atmosphären-Modelle eingesetzt. Für die Klimasimulationen in Sachsen wurde dabei die Horizontalauflösung T42 (ca. 280 km in mittleren Breiten) verwendet und das Ozeanmodell *OPYC* (ozeanisches Zirkulationsmodell mit isopyknischen Koordinaten) an das Atmosphärenmodell gekoppelt (Modellversion ECHAM4-OPYC3-T42).

Eistag
Tage mit einem Temperaturmaximum unter 0,0 °C.

Eiszeit, Kaltzeit
Abschnitt der Erdgeschichte, in dem die Temperaturen auf der Erde so stark absanken, dass große Gebiete auch außerhalb der Polarregionen dauerhaft von Eismassen bedeckt waren. E. treten gewöhnlich innerhalb von → Eiszeitaltern auf.

Eiszeitalter
Erdgeschichtliche Periode, in der aufgrund starker Klimaschwankungen → Eiszeiten und bedeutend wärmere Zwischeneiszeiten (Warmzeiten) mehrfach wechselten.

Emission
Abgabe, Ausstoß. Man spricht im Umwelt- und Klimaschutz von der → Anthropogenen E. von Verunreinigungen in die Atmosphäre sowie in das Meer und andere Gewässer.

Emissionsszenario
Eine plausible Darstellung der zukünftigen Entwicklung der Emissionen von Substanzen, die den Strahlungshaushalt der Erde beeinflussen (z. B. Treibhausgase, Aerosole), basierend auf einer Reihe von Annahmen über die treibenden Kräfte (wie demographische und sozioökonomische Entwicklung oder Technologiewandel) und deren Schlüsselbeziehungen. 1992 präsentierte das → IPCC eine Reihe von Emissionsszenarien, die als Basis für die Klimaprojektionen im Zweiten Wissensstandsbericht (IPCC 1996) dienten. Diese Emissionsszenarien werden als IS92-Szenarien bezeichnet. Im IPCC Special Report on Emission Scenarios, Februar 2001, werden neue Emissionsszenarien, die so genannten → SRES-Szenarien empfohlen.

Extremes Wetterereignis
Ein Ereignis, das an einem bestimmten Ort im Vergleich zu seiner normalen statistischen Verteilung selten ist. Die zugrunde gelegten Schwellenwerte für „selten" variieren. Ein extremes Wetterereignis wäre beispielsweise so selten wie oder seltener als das 99 %-Perzentil der Normalverteilung. Die Definitionen für „Extremwetter" können sich auch von Ort zu Ort stark unterscheiden.

Extremniederschläge
Hier als Tagessummen des Niederschlages größer oder gleich dem 99 %-Perzentil der Häufigkeitsverteilung definiert (siehe auch → Intensivniederschläge).

FCKW
Fluorchlorkohlenwasserstoffe (FCKWs) sind sehr stabile und nicht brennbare Gase, die als Treibmittel für Lebensmittel oder Kosmetika sowie als Kältemittel für Klimaanlagen und Kühlschränke eingesetzt wurden. FCKWs werden in großer Höhe vom energiereichen Sonnenlicht zu Chlorverbindungen gespalten, die das lebenswichtige Ozon (→ Stratosphäre) zerstören. Deshalb werden FCKW inzwischen durch andere Einsatzstoffe ersetzt (→ Montreal-Protokoll). Zusätzlich absorbieren FCKWs in der → Troposphäre Strahlung im Infrarotbereich (tausendfach stärker als CO_2) und tragen damit als Treibhausgase ebenfalls zur Erwärmung der Erdatmosphäre bei.

Frosttag
Tage mit einem Temperaturminimum unter 0,0 °C.

Föhn
F. nennt man einen warmen, trockenen Wind, der auf der Nord- und Südseite der Alpen auftritt. Föhnartige Erscheinungen findet man auch in den deutschen Mittelgebirgsregionen (z. B. an der Nordseite des Erzgebirges Erwärmung und Wolkenauflösung bei entsprechenden → Großwetterlagen). F. ist an Mittel- und Hochgebirgen ein wichtiger Witterungsfaktor auf der jeweiligen → Leeseite eines Gebirges.

GCM
General Circulation Model: Allgemeines Zirkulationsmodell der Atmosphäre oder des Ozeans.

Gleitender Mittelwert
Speziell berechnete Mittelwerte von Datenreihen, die die Funktion eines numerischen Tiefpassfilters haben, d. h. die kurzperiodischen Schwankungen unterdrücken.

Großwetterlage
Mittlere Luftdruckverteilung eines größeren Gebietes, mindestens von der Größe Europas, während eines mindestens 3-tägigen Zeitraumes, in welchem gewisse Abfolgen von Wetterlagen gleich bleiben. Man unterscheidet nach Hess & Brezowsky 29 Großwetterlagen (z. B. Trog Westeuropa; Westlage zyklonal).

Großwettertyp
Verwandte Großwetterlagen werden zu 10 Großwettertypen zusammengefasst (z. B. Westlage; Südwestlage; Hoch Mitteleuropa). In unseren Breiten dominieren Westlagen.

Hitzetag
Tage mit einem Temperaturmaximum über 30,0 °C. Als **Extreme Hitzetage** werden Tage mit einem Temperaturmaximum über 35,0 °C bezeichnet.

Hydrosphäre
Das gesamte Wasser auf der Erde (Meere, Binnengewässer, Grundwasser sowie das Wasser in der → Atmosphäre und → Kryosphäre).

Intensivniederschläge
Hier als Tagessummen des Niederschlages größer oder gleich dem 90 %-Perzentil bzw. 95 %-Perzentil der Häufigkeitsverteilung definiert (siehe auch → Extremniederschläge und → Starkregen).

IPCC
Intergovernmental Panel on Climate Change: Zwischenstaatlicher Ausschuss für Klimafragen. Wurde 1988 von der → WMO eingerichtet, um über den aktuellen Forschungsstand auf dem Gebiet der Klimaforschung und der Klimafolgenforschung zu berichten. Untergliedert sich in drei Arbeitsgruppen. Arbeitsgruppe I befasst sich mit den naturwissenschaftlichen Aspekten des Klimasystems, Arbeitsgruppe II bewertet die Auswirkungen des Klimawandels für Natur und Gesellschaft und Arbeitsgruppe III konzentriert sich auf mögliche Strategien, die resultierenden Probleme zu lösen. Im Jahr 2001 wurde der dritte Bericht vorgelegt. Er skizziert die in den nächsten Jahrzehnten zu erwartenden Klimaänderungen und deren voraussichtlichen Folgen und bestätigt den inzwischen domi-

nierenden Einfluss des Menschen auf das Klima. Der vierte Bericht wird 2007 erscheinen.

Kältesumme
Betrag der Summe der negativen Tagesmittel der Lufttemperatur in Grad Celsius (negative Celsiusgrade) für die Monate November bis März. Auf Basis der K. kann die Strenge der Winter beurteilt werden. Als streng gilt beispielsweise in Berlin (Hupfer, 1996) ein Winter mit einer Kältesumme von mehr als 300 Grad Celsius (weitere Beispiele: extrem mild = Kältesumme maximal 20 Grad Celsius; äußerst mild = Kältesumme maximal 55 Grad Celsius; sehr streng = Kältesumme mehr als 360 Grad Celsius; extrem streng = Kältesumme mehr als 550 Grad Celsius).

Kelvin, K
Einheit der absoluten Temperaturskala. Es gilt T(K) = T(°C) + 273,15. Nach dem Internationalen Einheitensystem werden Temperaturdifferenzen in K angegeben. Temperaturdifferenzen in K und °C sind identisch. In vorliegender Broschüre wird zur Kennzeichnung von Temperaturdifferenzen die Bezeichnung Grad verwendet.

Klima
Unter Klima versteht man einerseits den mittleren Zustand der meteorologischen Klimaelemente, andererseits aber auch den charakteristischen jährlichen Witterungsablauf über einen ausreichend langen Referenzzeitraum hinweg. Nach Empfehlung der → WMO sollten dabei mindestens 30-jährige Perioden als Bezugs- oder Referenzzeitraum verwendet werden (zurzeit 1961–1990/ *demnächst 1971–2000*). Aber auch Betrachtungen für Jahrhunderte, Jahrtausende usw. fallen unter den Begriff „Klima". Statistisch wird das Klima durch Mittel- und Extremwerte von → Klimaelementen charakterisiert.

Klimaänderung
K. bezieht sich auf jede Änderung des Klimas im Verlauf der Zeit, sei dies aufgrund von natürlichen Schwankungen oder menschlichen Aktivitäten. Dieser Gebrauch unterscheidet sich von demjenigen des Rahmenübereinkommens der Vereinten Nationen über Klimaänderungen (UNFCCC), das „Klimaänderungen" definiert als „Änderungen des Klimas, die unmittelbar oder mittelbar auf menschliche Tätigkeiten zurückzuführen sind, welche die Zusammensetzung der Erdatmosphäre verändern, und die zu den über vergleichbare Zeiträume beobachteten natürlichen Klimaschwankungen hinzukommen."

Klimaänderungsszenario
Ein K. beschreibt den Unterschied zwischen einem → Klimaszenario und dem gegenwärtigen Klima.

Klimaelemente
K. sind meteorologische Größen, die einzeln sowie durch ihr Zusammenwirken das Klima kennzeichnen (z. B. Temperatur, Niederschlag, Verdunstung, Strahlungsbilanz).

Klimafaktoren
Als K. bezeichnet man diejenigen Wirkungen, die die Klimaelemente beeinflussen. Zu den „klassischen" K. zählen die Sonnenstrahlung, die Land- und Meerverteilung und die Höhe über dem Meeresniveau. Für das Klima eines Ortes oder einer Region spielt die atmosphärische Zirkulation als sekundärer Klimafaktor oft eine entscheidende Rolle. Das Klima der Erde wird nicht allein von der Sonne und weiteren externen K. (starke Vulkanausbrüche; Einschläge von Meteoren etc.) bestimmt, sondern auch durch vielfältige Wechselwirkungen zwischen Atmosphäre, Geosphäre, Hydrosphäre, Kryosphäre und Biosphäre der Erde (interne K.). Eine immer wichtigere Rolle für das Klima der nahen Zukunft spielt als externer K. der menschliche Einfluss (→ Treibhauseffekt).

Klimamodell
Eine numerische Darstellung des Klimasystems, die auf den physikalischen, chemischen und biologischen Eigenschaften seiner Bestandteile, seinen Wechselwirkungen und Rückkopplungsprozessen basiert und alle oder einige seiner bekannten Eigenschaften berechnet. Das Klimasystem kann von Modellen unterschiedlicher Komplexität dargestellt werden. Gekoppelte Atmosphären-Ozean-Meereis-Zirkulationsmodelle bieten eine umfassende Darstellung des Klimasystems. Sie werden in Richtung noch komplexerer Modelle mit aktiver Chemie und Biologie weiter entwickelt. Klimamodelle werden zur Untersuchung und Simulation des Klimas herangezogen.

Klimaprognose
Eine K. ist eine Schätzung der wahrscheinlich Entwicklung des Klimas in der Zukunft. Der Begriff wird in Fachkreisen immer weniger verwendet und meist durch den Ausdruck → Klimaprojektion ersetzt, da es sich bei den Klimamodell-Ergebnissen um bedingte, weil Szenariengestützte, Aussagen handelt.

Klimaprojektion
Klimaprojektionen werden von Klimaprognosen unterschieden, um zum Ausdruck zu bringen, dass eine K. von den verwendeten Emissions-, Konzentrations- und Strahlungsantriebs-Szenarien abhängt, die wiederum auf Annahmen, z. B. über zukünftige gesellschaftliche und technologische Entwicklungen, beruhen und deshalb mit größeren Unsicherheiten verbunden sind. Es handelt sich also um keine Prognosen oder Vorhersagen im landläufigen Sinne.

Klimaschwankungen
K. werden innerhalb des Klimasystems durch Instabilitäten innerhalb bzw. durch instabile Wechselwirkungen zwischen den Klimasubsystemen Atmosphäre, Hydrosphäre, Biosphäre und Kryosphäre verursacht. Weiterhin werden K. durch äußere Einflüsse auf das Klima, z. B. durch Vulkanausbrüche, Schwankungen der Sonnenstrahlung oder durch den Einfluss des Menschen (→ Treibhauseffekt) erzeugt.

Klimasystem
Das K. ist ein höchst komplexes System, das aus fünf Hauptbestandteilen besteht: der Atmosphäre, der Hydrosphäre, der Kryosphäre, der Landoberfläche und der Biosphäre sowie den Wechselbeziehungen zwischen diesen. Das K. verändert sich über die Zeit unter dem Einfluss seiner eigenen inneren Dynamik und durch externe Kräfte wie Vulkanausbrüche, solare Schwankungen und menschlich induzierte Einflüsse wie die Änderung der Landnutzung und der Zusammensetzung der Atmosphäre.

Klimaszenario
Eine plausible und oft vereinfachte Beschreibung des zukünftigen Klimas, die auf einer in sich konsistenten Zusammenstellung von klimatologischen Beziehungen beruht, um die möglichen Folgen einer anthropogenen Klimaänderung zu erforschen.

Klimatische Wasserbilanz
Differenz aus Niederschlag und potentieller Verdunstung

Klimavariabilität
K. bezieht sich auf Schwankungen des mittleren Zustandes und anderer Statistiken (wie Standardabweichungen, Vorkommen von Extremerscheinungen etc.) des Klimas auf allen zeitlichen und räumlichen Skalen. Die Variabilität kann durch natürliche interne Prozesse innerhalb des Klimasystems (interne Variabilität) oder durch natürliche oder anthropogene externe Einflüsse (externe Variabilität) begründet sein.

KLIWA
Klimaveränderungen und Konsequenzen für die Wasserwirtschaft (KLIWA). Kooperationsvorhaben der Länder Baden-Württemberg und Bayern mit dem Deutschen Wetterdienst.

Kontinentalverschiebung
Hypothese zur Beschreibung der Bewegung der Kontinente über die Erdoberfläche, die zuerst von Alfred Wegener (1880–1930) aufgestellt wurde.

Kryosphäre
Die K. ist Teil des Klimasystems der Erde und enthält das gefrorene Wasser in Form von Gletschern, Inlandeis, Permafrost, Schnee und Meereis. Infolge starker Reflexion der Sonnenstrahlung durch Eis- und Schneeflächen wirken sich Veränderungen der K. besonders stark auf das Klima aus.

Kyoto-Protokoll
Das K. ist ein internationales Abkommen zum Klimaschutz. Es schreibt verbindliche Ziele für die Verringerung des Ausstoßes von → Treibhausgasen fest, welche als Auslöser der globalen Erwärmung gelten. Die Zunahme dieser Klimagase, zu denen vor allem Kohlendioxid (CO_2), Methan und die Ozon zersetzenden FCKW (Fluorchlor-Kohlenwasserstoffe) zählen, wird primär auf menschliche Aktivitäten zurückgeführt. Das K. wurde im japanischen Kyoto 1997 verabschiedet. Das Protokoll sieht vor, dass die Industrieländer ihre Emissionen bis zum Jahre 2012 um insgesamt 5,2 % unter das Niveau von 1990 senken müssen. Das K. trat am 16. 02. 2005 in Kraft. Die USA und Australien haben das Abkommen nicht ratifiziert.

Leeseite, Luvseite
Die Luvseite eines Gebirges ist die Seite, aus der der Wind kommt. Lee bezeichnet im Gegensatz hierzu die Seite, wohin der Wind weht. In der Klimatologie oft im Sinne der Leeseite (Luvseite) eines Gebirges als der Seite, wohin (aus der) die häufigsten Winde wehen (siehe auch → Stau und → Föhn).

Milankovitch-Zyklen
Merkmale der Erdbahn, die geringfügigen Schwankungen unterliegen. Benannt nach dem serbischen Mathematiker Milutin Milankovic (1879–1958). Diese langperiodischen Änderungen der Erdbahnelemente führen zu Veränderungen der Einstrahlung und der Verteilung der Strahlung (um 5–10 %) auf der Erde.
Im Einzelnen handelt es sich um die *Exzentrität* der Erdumlaufbahn (Abweichung von der Kreisbahn; Periode ca. 110.000 Jahre), die *Obliquität* (Neigung der Erdachse gegen die Erdbahnebene; Periode ca. 40.000 Jahre) und die *Präzession* (Kreiselbewegung bzw. Schwingung der Erdachse um die Senkrechte auf der Erdbahnebene; Periode ca. 23.000 Jahre). Die M. verursachen wesentlich den Übergang zwischen → Eiszeiten und Warmzeiten innerhalb von → Eiszeitaltern.

Montreal-Protokoll
Im Jahr 1985 von den Vereinten Nationen verabschiedete Konvention, in der 49 Unterzeichnerstaaten ein Auslaufen der Produktion der → FCKW bis zum Ende des Jahrhunderts zusagten. 1987 wurde ein Abkommen zum Schutz der Ozonschicht von 36 Staaten signiert und später ratifiziert. Die Europäische Gemeinschaft (heute Europäische Union) schlug 1989 ein vollständiges Nutzungsverbot von FCKWs während der neunziger Jahre vor, dem sich die US-amerikanische Regierung anschloss. Im Juni 1990 wurde auf der Internationalen Konferenz zum Schutz der Ozonschicht in London beschlossen, die Herstellung und Anwendung der FCKW ab dem Jahr 2000 zu verbieten oder zumindest stark einzuschränken. Man einigte sich, den FCKW-Einsatz bis 1995 um 50 %, bis 1997 um 85 % zu reduzieren.

NAO
Nordatlantische Oszillation. Druck- bzw. Geopotentialdifferenz zwischen Islandtief und Azorenhoch, dividiert durch den Abstand zwischen der jeweiligen Lage dieser Zentren.

Orbitaler Strahlungsantrieb
Hierzu zählen die Präzession, die Obliquität sowie die Exzentrität. Wirkung auf das Klima über Umverteilung der Sonnenstrahlung infolge Änderung der Erdbahnelemente → Milankovitch-Zyklen.

Phänologie
P. ist die Lehre vom Einfluss der Witterung und des Klimas auf den jahreszeitlichen Entwicklungsgang und die Wachstumsphasen der Pflanzen (und Tiere). Der schwedische Naturforscher Carl von Linne (1707–1778) schuf ihre wissenschaftlichen Grundlagen und führte zwischen 1750 und 1752 phänologische Beobachtungen durch. Sie betreffen leicht und eindeutig feststellbare Phasen im Lebenslauf verbreiteter Wild- und Kulturpflanzen, wie Blühbeginn, Blattentfaltung, Fruchtreife und Blattfall.

Regionalisierung
Reduktion der Modellskala von einem globalen auf einen regionalen Maßstab (engl. „Downscaling"). Bewirkt eine zeitlich und räumlich höhere Auflösung von → Klimaelementen

REKLISA
Re*gionalisierung der* ***Kli****maänderungen für* ***Sa****chsen:* Mit dem Regionalisierungsverfahren R. sind bereits 1999 erste Projektionen des Klimas in Sachsen durchgeführt worden. Grundprinzip ist eine statistische Kopplung zwischen typisierten großräumigen meteorologischen Datenfeldern der freien Atmosphäre (objektive Wetterlagen) und Messreihen der Klimaelemente an Bodenstationen in Sachsen. Eine wesentliche Erweiterung und Optimierung dieses Verfahrens stellt die aktuelle Modellvariante → WEREX dar.

Sedimente
Als S. bezeichnet man nicht verfestigtes Gesteinsmaterial, das durch Wind, Wasser, Eis, chemische oder biologische Vorgänge abgelagert worden ist. Je nach Interesse lassen sich hier Rückstände anderer Stoffe, also vor allem auch organische Reste als Indikatoren für die Klimageschichte, untersuchen.

Sommerhalbjahr
Umfasst hier die Monate April bis September.

Sommertag
Tage mit einem Temperaturmaximum über 25,0 °C.

Sonnenaktivität
Gesamtheit von Prozessen auf der Sonne, die mit Variationen der elektromagnetischen Strahlungsflussdichte und der Korpuskularstrahlung verbunden sind.

SRES-Szenarien
Special Report on Emission Scenarios: SRES-Szenarien des → IPCC sind Emissionsszenarien, die unter anderem als Basis für Klimaprojektionen verwendet werden. Das SRES-Szenarienset umfasst vier Szenarienfamilien: A1, A2, B1 und B2. Die SRES-Szenarien berücksichtigen keine zusätzlichen Klimainitiativen, was bedeutet, dass keine Szenarien einbezogen sind, die explizit von einer Umsetzung der Emissionsziele des → Kyoto-Protokolls ausgehen.

Starkregen
Starkniederschläge, die innerhalb von einer Stunde mehr als 20 mm (Liter pro Quadratmeter) ergeben.

Stau
S. der Luftmassen tritt auf, wenn diese bei entsprechenden → Großwetterlagen gegen ein Gebirge strömen und dort zum Aufsteigen gezwungen werden. Dabei kommt es zur Wolkenbildung und zu (verstärkten) Niederschlägen. S. ist an Mittel- und Hochgebirgen ein wichtiger Witterungsfaktor auf der → Luvseite eines Gebirges.

Strahlungsantrieb
Der Strahlungsantrieb ist die Veränderung in der vertikalen Nettoeinstrahlung (ausgedrückt in Watt pro Quadratmeter) aufgrund einer internen Veränderung oder einer Veränderung im externen Antrieb des Klimasystems, wie z.B. eine Veränderung in der Konzentration von CO_2 oder der Sonnenstrahlung.

Stratosphäre
Mittlere Schicht der inneren Atmosphäre; etwa 12 bis 80 km über der Erdoberfläche. Nach unten schließt sich die → Troposphäre, nach oben die Ionosphäre an. In etwa 20 bis 50 km Höhe befindet sich die Ozonschicht. Dieses Ozon absorbiert einen großen Teil der lebensfeindlichen UV-Strahlung und schützt damit das Leben auf der Erde. Ozonbildung und Ozonabbau in der Ozonschicht stehen im Gleichgewicht. Der Mensch greift durch Freisetzung von bestimmten → Treibhausgasen (z. B. Fluorchlorkohlenwasserstoffe bzw. FCKWs) in dieses Gleichgewicht ein (Zerstörung der Ozonschicht; siehe → Montreal-Protokoll). Eine Verringerung der stratosphärischen Ozonkonzentration führt zu einer intensiveren UV-B-Einstrahlung, der so genannten „sonnenbrandwirksamen Strahlung".

Szenario
In der Klimatologie der Entwurf von Randbedingungen und ihrer zeitlichen Entwicklung, die eine Grundlage für Klimasimulationen bilden. Die Ergebnisse dieser Simulationen werden auch als → Klimaszenarien bezeichnet. Es handelt sich um keine Prognosen oder Vorhersagen im landläufigen Sinne.

Tornado
Verheerende Wirbelstürme in Nordamerika. Diese Bezeichnung wird zunehmend auch für Wirbelstürme anderer Erdteile verwendet.

Treibhauseffekt
Wasserdampf und atmosphärische Spurengase wie Kohlendioxid, Distickstoffoxid, Methan und Ozon lassen die kurzwellige Sonnenstrahlung durch die Atmosphäre weitgehend ungehindert zur Erdoberfläche passieren, absorbieren aber mehr oder weniger die von der Erdoberfläche abgegebene langwellige Wärme-(Infrarot-)Strahlung. Hierdurch erwärmt sich die bodennahe Luftschicht – ähnlich wie in einem Treibhaus – auf eine globale Durch-

schnittstemperatur von etwa 15 °C. Ohne diesen *natürlichen Treibhauseffekt* wäre es um ca. 33 Grad kälter (–18 °C). Leben wäre dann auf der Erde nicht möglich. Menschliche Aktivitäten führen heute in verstärktem Maße zur zusätzlichen Freisetzung von klimawirksamen Gasen, die sich in der Atmosphäre zunehmend anreichern. Hieraus resultiert ein verstärkter Treibhauseffekt, der im globalen Mittel einen weiteren Anstieg der Lufttemperatur in der bodennahen Schicht der → Troposphäre bewirkt. Man bezeichnet diesen zusätzlichen Einfluss durch den Menschen als *anthropogenen Treibhauseffekt*.

Treibhausgase
T. sind diejenigen gasförmigen Bestandteile in der Atmosphäre (sowohl natürlichen wie anthropogenen Ursprungs), die diejenige Strahlung spezifischer Wellenlängen innerhalb des Spektrums der Infrarotstrahlung absorbieren und wieder ausstrahlen, die von der Erdoberfläche, der Atmosphäre und den Wolken ausgestrahlt wird. Diese Eigenschaft verursacht den → Treibhauseffekt. Wasserdampf (H_2O), Kohlendioxid (CO_2), Lachgas (N_2O), Methan (CH_4) und Ozon (O_3) sind die Haupttreibhausgase in der Erdatmosphäre. Außerdem gibt es eine Anzahl von ausschließlich vom Menschen produzierten Treibhausgasen in der Atmosphäre, wie die Halogenkohlenwasserstoffe und andere chlor- und bromhaltige Substanzen. Neben CO_2, N_2O und CH_4 befasst sich das → Kyoto-Protokoll mit den Treibhausgasen Schwefelhexafluorid (SF_6), Fluorkohlenwasserstoffe (HFCs) und Perfluorkohlenwasserstoffe (PFCs).

Trockenheit
Eine Zeit mit signifikantem Niederschlagsmangel. Definitionen von T. gehen primär von Mittelwerten der Lufttemperatur und des Niederschlags aus (siehe auch → Dürre).

Trog
Ein T. ist ein großräumiges Gebiet niedrigeren Luftdrucks im Vergleich zur Umgebung. Im Gegensatz zu Tiefs sind Tröge nicht vollständig von höherem Druck umschlossen. Während Tiefs besonders in Bodennähe vorkommen, sind in höheren Luftschichten oft Tröge zu beobachten.

Tromben
Relativ kleinräumige Wirbelstürme, bei denen eine Luftsäule rasend schnell um eine fast senkrechte Drehachse gewirbelt wird. Hierzu gehören die → Tornados (span. Tornar = sich drehen) sowie die Wind- und Wasserhosen.

Troposphäre
Unterste Schicht der Atmosphäre; je nach geographischer Breite unterschiedlich mächtig: Sie reicht in polaren Breiten bis zu einer Höhe von ca. 8 km, in den mittleren Breiten bis ca. 11 km und in den Tropen bis ca. 16 km. Nach oben wird die T. durch die Tropopause gegen die → Stratosphäre abgegrenzt.

Vegetationsperiode
Zeitspanne innerhalb eines Jahres, in der die Entwicklung der Pflanzen verläuft. Schematisch setzt man die V. von April bis September an. Oft wird die V. noch unterteilt in die Vegetationsperioden 1 und 2. Die Vegetationsperiode 1 umfasst dabei die Monate April, Mai und Juni, die Vegetationsperiode 2 die Monate Juli, August und September.

Vb-Wetterlage
Ältere, aber noch gebräuchliche Bezeichnung für eine spezielle Großwetterlage in Mitteleuropa. Sie geht zurück auf Untersuchungen VAN BEBBERS, der 1884 die Zugstraßen der Tiefdruckgebiete in Europa näher analysierte und mit römischen Ziffern bezeichnete. Die Zugstraße Vb führt von der Adria über das östliche Mitteleuropa nordwärts. Dabei liegt ein so genannter Höhentrog (eine Tiefdruckzone in höheren Luftschichten) über Mitteleuropa. Diese allgemein sehr niederschlagsintensiven Wetterlagen (Beispiele: Oder-Hochwasser 1997 und Augusthochwasser 2002) sind relativ selten und treten bevorzugt im Frühjahr und Herbst auf.

WEREX
We*tterlagenbedingte* ***R****egression für* ***Ex****tremwerte:* Die Regionalisierungsmethode W. bestimmt mögliche Klimaänderungsszenarien auf regionaler Ebene aus der sich ändernden Häufigkeit der Wetterlagen, wie sie durch ein globales Klimamodell vorgezeichnet werden. Auch die Änderungen des Wettergeschehens innerhalb der einzelnen Wetterlagen werden berücksichtigt. W. stellt eine wesentliche Erweiterung und Optimierung des Vorläufermodells → REKLISA dar. W. ermöglicht Aussagen über die voraussichtliche Ausprägung von Klimaextremen in der Zukunft.

Wetter
Das W. ist der Momentanzustand der Atmosphäre an einem bestimmten Ort und unterliegt ständiger Veränderung. Der dem Begriff zu Grunde liegende Zeitraum umfasst in der Regel nicht mehr als einen Tag (z. B. Wetterbericht für heute oder morgen).

Winterhalbjahr
Umfasst hier die Monate Oktober bis März.

Witterung
Unter W. versteht man den vorherrschenden Charakter des Wetterablaufes der meteorologischen Erscheinungen über mehrere Tage bis Monate (z. B. Witterungsbericht für einen bestimmten Monat).

WMO
World Meteorological Organization: Organisation der Vereinten Nationen, die die weltweite meteorologische Zusammenarbeit organisiert. 1950 gegründet.

Zyklone
Tiefdruckgebiet. Bezeichnet ein Gebiet mit tiefem Luftdruck.

Zyklonal
Bezeichnung für großräumige Luftbewegungen, die auf der Nordhalbkugel entgegengesetzt dem Uhrzeigersinn um ein Tiefdruckgebiet (→ Zyklone) verlaufen. Auch zur Kennzeichnung des Wetters oder einer Wetterlage unter Tiefdruckeinfluss verwendet.

8 Literaturverzeichnis

Abildtrup, J., Gylling, M. (2001): Climate change and regulation of agricultural landuse: A literature survey on adaptation options and policy measures. Working paper to project ACCELERATES: Assessing Climate Change Effects on Land use and Ecosystems: from Regional Analysis to The European Scale – EVK2-2000-00567, Danish Institute of Agricultural and Fisheries Economics, Farm Management and Production Systems Division, December 2001

Baeumer, K. (1992): Allgemeiner Pflanzenbau. 3. Aufl. – Stuttgart: Ulmer, 1992

Bartels, H. (2004): Ergebnisse und Bewertung verschiedener regionaler Klimaszenarienberechnungen aus dem Projekt KLIWA. Vortrag zum 1. KLARA-Symposium am 07. Juli 2004 in Stuttgart

Bayerischer Klimaforschungsverbund (1999): Klimaänderungen in Bayern und ihre Auswirkungen, Abschlussbericht des Bayerischen Klimaforschungsverbundes, München, November 1999

Chmielewski, F.-M., Müller, A., Küchler, W. (2004): Mögliche Auswirkungen klimatischer Veränderungen auf die Vegetationsentwicklung in Sachsen, FuE-Vorhaben des Sächsischen Landesamtes für Umwelt und Geologie, Humboldt-Universität Berlin, Eigenverlag der HU Berlin, Juni 2004

Deutscher Wetterdienst (1994): Langjährige Normalwerte hauptamtlicher Wetterstationen in Sachsen, Geschäftsfeld Klima- und Umweltberatung, Radebeul

Dr. Dittrich & Partner Hydro-Consult GmbH Bannewitz (2001): Auswirkungen von Klimaänderungen auf die Bewirtschaftung des Talsperrensystems Klingenberg/Lehnmühle, Wilde Weißeritz im Osterzgebirge, Untersuchungen im Auftrag der Landestalsperrenverwaltung des Freistaates Sachsen, Bannewitz, Juni 2001

Enke, W., Küchler, W., Sommer, W. (2001): Zusammenfassender Bericht zum FuE-Bericht „Regionalisierung von Klimamodell-Ergebnissen mittels des statistischen Verfahrens der Wetterlagen-Klassifikation und nachgeordneter multipler Regressionsanalyse für Sachsen", Sächsisches Landesamt für Umwelt und Geologie

Enke, W., Küchler, W., Sommer, W. (2003): Zusammenfassender Bericht zum FuE-Bericht „Anwendung eines Verfahrens zur wetterlagenkonsistenten Projektion von Zeitreihen und deren Extreme mit Hilfe globaler Klimasimulation", Sächsisches Landesamt für Umwelt und Geologie

Enke, W. (2004): Erweiterung der sächsischen Klimaprognose WEREX III für das Zeitfenster 2050 bis 2100 und für die Emissionsszenarien B2 und A2 (WEREX 2100). METEO-RESEARCH, November 2004

European Environment Agency (2004): Impacts of Europe's changing climate, EEA Report No 2, Copenhagen

FAL (2002): Jahresbericht der Bundesforschungsanstalt für Landwirtschaft (FAL)

Franke, J., Goldberg, V., Eichelmann, U., Freydank, E., Bernhofer, C. (2004): Statistical analysis of regional climate trends in Saxony, Germany, Clim Res Vol. 27: 145–150, October 2004

Gebhardt, H. (2000): Klimaveränderungen und Auswirkungen auf Ökosysteme. – In: KLIWA-Bericht 1. – KLIWA-Symposium vom 29./30.11.2000 in Karlsruhe. Karlsruhe 2000, S. 255–268

Gerstengarbe, F.-W., Werner, P. C. (1993): Katalog der Großwetterlagen Europas nach Paul Hess und Helmuth Brezowsky 1881–1992, Berichte des Deutschen Wetterdienstes, Nr. 113 (Band 15), 4., vollständig neu bearbeitete Auflage, Offenbach a. M.

Gerstengarbe, F.-W., Werner, P. (1996): Szenarien zur Klimaentwicklung im Land Brandenburg bis zum Jahr 2050, Pilotstudie, Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung, Potsdam

Gerstengarbe F.-W., Badeck, F., Hattermann, F., Krysanova, V., Lahmer, W., Lasch, P., Stock, M., Suckow, F., Wechsung, F., Werner, P. C. (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. PIK-Bericht No. 83, Potsdam, 6/2003.

Gillett, N. P., Graf, H.F., Osborn, T. J. (2003): Climate change and the NAO, American Geophysical Union, Washington DC, USA

Graßl, H. (2003): Natürliche Klimaschwankungen – eine Einführung, promet, Jahrg. 29, Nr. 1–4, Juni 2003

Haber, W. (2003): Biodiversität – ein neues Leitbild und seine Umsetzung in die Praxis. Vortragsveranstaltung am 30. Oktober 2002 im Blockhaus, Dresden. – Sächs. Landesstiftung Natur und Umwelt (Hrsg.). Dresden, 1. Aufl. 2003

Hänsel, S., Küchler, W., Matschullat, J. (2004): Regionaler Klimawandel in Sachsen – Extreme Niederschlagsereignisse und Trockenperioden 1934–2000, Zeitschrift für Umweltchemische Ökotoxikologie, Beitragsserie: Klimaänderung und Klimaschutz, 1–7

Hess, P., Brezowsky, H. (1969): Katalog der Großwetterlagen Europas, Berichte des Deutschen Wetterdienstes, Nr. 113 (Band 15), Offenbach a. M.

Heyer, E. (1984): Witterung und Klima – Eine allgemeine Klimatologie, BSB B.G. Teubner Verlagsgesellschaft, Leipzig, 7. Auflage

Hofmann, G., Anders, S., Matthes, B. (2000). Das potentiell-natürliche und derzeitige Waldbild in den ostdeutschen Ländern. Übersichtsinformation zu Verbreitung, Flächenanteil, Baumartenzusammensetzung, Ökologie und Nettoprimärproduktion der potentiell-natürlichen Waldvegetation und der derzeitigen Forsten. Hamburg: Max Wiedebusch Kommiss.-Verlag, 93 S. Mitt. Bundesforschungsanstalt für Forst und Holzwirtschaft. Hamburg, Nr. 196.

IPCC (2001a): Climate Change 2001: The Scientific Basis. Contribution of the Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change; Cambridge University Press

IPCC (2001b): Climate Change 2001: Impacts, Adaption and Vulnerability. Contribution of the Working Group II to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change; Chap. 5 and 13, Cambridge University Press

IPCC (2002): Klimaänderung 2001, Synthesebericht, Bonn, September 2002

Irrgang, S. (2001): Wasserhaushaltsmodellierung für den Kiefern-Waldumbau, Vortrag zum BMBF Fachkolloquium Themenschwerpunkt Wasserhaushalt „Ökologie des Waldumbaus, Dynamik in Strukturen und Prozessen" Kolloquium an der BFH in Eberswalde am 13./14. 3. 2001

Irrgang, S. (2002). Klimaänderung und Waldentwicklung in Sachsen – Auswirkungen auf die Forstwirtschaft FORSTARCHIV, 73. Jg, 2002, Heft 4, S. 137–148

Jahn, M., Enzian, S., Kluge, E. (1996): "Influence of climate diversity on fungal diseases of field crops-evaluation of long-term monitoring data", Aspects of Applied Biology 45.

Jones, P. D., Lister, D. H., Jaggard, K. W. and Pidgeon, J. D. (2003): Future climate impact on the productivity of sugar beets (beta vulgaris L.) in europe. Climatic Change, Vol. 58, No. 1–2, May, pp. 93–108.

JRC (2003): Commission's Joint Research Centre (JRC) forecasts this year's crop losses caused by drought; http://www.jrc.cec.eu.int/download/press/releases/pr_crop_yield_200308.pdf – 762.0KB – JRC Corporate Web Site.

Klose, S. (2000): Konsequenzen globaler Klimaveränderungen für die biologische Vielfalt. – Alfred Toepfer Akademie für Naturschutz (Hrsg.): NNA-Ber. 13, H. 2, Schneverdingen, S. 90–95

Krysanova, V. (2002): Wasserhaushalt und landwirtschaftliche Erträge bei sich änderndem Klima., GLOWA-Elbe-Statuskonferenz, www.glowa-elbe.de.

Landestalsperrenverwaltung des Freistaates Sachsen/Winkler, U. (2002): Prognostische Einschätzungen zur Entwicklung der Talsperrenabgabeleistungen unter Berücksichtigung extremer Dargebotssituationen und des Klimawandels am Beispiel des Talsperren-Systems Klingenberg/Lehnmühle, Vortragssammlung zum Fachkolloquim anlässlich 10 Jahre Landestalsperrenverwaltung des Freistaates Sachsen, Pirna, Februar 2002

Latif, M. (2003): Simulation und Vorhersage von ENSO-Extremen, promet, Jahrg. 29, Nr. 1–4, Juni 2003

Latif, M. (2004): Simulationen zum globalen Klimawandel, 4. Annaberger Klimatage, Annaberg/Erzgebirge, 12. Mai 2004

Leuschner, Chr., Schipka, F. (2004): Vorstudie Klimawandel und Naturschutz in Deutschland. A-Bericht eines F+E-Vorhabens zur Erstellung einer Literaturstudie (FKZ: 80383010) i. A. des Bundesamtes für Naturschutz. – BfN-Skripten 115, Bonn, 34 S.

Müller, H. J. (1988): Ökologie. – Studienreihe Biowissenschaften. 2. Aufl., Jena

Müller, J. (2001): Ermittlung von Kennwerten des Wasserhaushaltes in Kiefern- und Buchenbeständen des nordostdeutschen Tieflandes. Beitr. Forstwirtsch. u. Landsch.ökol., Berlin 35 , 14–18

Raben, G. (1999) und (2001): Kritische Belastungsraten (Critical Loads) in Sächsischen Waldökosystemen. Beiträge zu Waldzustandsberichten 1999 und 2001 (Im Druck)

Rapp, J., Schönwiese, Ch. (1996): Atlas der Niederschlags- und Temperaturtrends in Deutschland 1891–1990, Frankfurter geowissenschaftliche Arbeiten: Ser. B, Meteorologie und Geophysik; Bd. 5, Frankfurt am Main, 1996

Rahmstorf, S. (2003): Klimawandel – Rote Karte für die Leugner, Bild der Wissenschaft, 1/2003

Rahmstorf, S. (2004): Persönliche Mitteilung

Rudolf, B., Rapp, J. (2003): Das Jahrhunderthochwasser der Elbe: Synoptische Wetterentwicklung und klimatologische Aspekte, Klimastatusbericht 2002

Saarikko, R. A. (1999): Climate change and crop potential in Finland: regional assessment of spring wheat. Dissertation University of Helsinki. Department of plant production, section crop husbandary, Publication no. 55.

Sächsisches Landesamt für Umwelt und Geologie (2000): Regionalisierung von Klimamodell-Ergebnissen mit Hilfe des statistischen Verfahrens der Wetterlagenklassifikation und nachgeordneter multipler Regressionsanalyse auf der Basis des globalen Modells ECHAM4 (REKLISA), Dezember 2000

Sächsisches Landesamt für Umwelt und Geologie (2001): Statistische Untersuchung regionaler Klimatrends in Sachsen – Schwerpunkt Niederschlagsdatenreihen (CLISAX I), FuE-Vorhaben des Sächsischen Landesamtes für Umwelt und Geologie, Institut für Hydrologie und Meteorologie der TU Dresden

Sächsisches Landesamt für Umwelt und Geologie (2002): Statistische Untersuchung regionaler Klimatrends in Sachsen – Schwerpunkt Temperatur, Strahlung, Wind (CLISAX II), FuE-Vorhaben des Sächsischen Landesamtes für Umwelt und Geologie, Institut für Hydrologie und Meteorologie der TU Dresden

Sächsisches Landesamt für Umwelt und Geologie (2003 a): Anwendung eines Verfahrens zur wetterlagenkonsistenten Projektion von Zeitreihen und deren Extrema mit Hilfe globaler Klimasimulationen auf der Basis des globalen Modells ECHAM4 (WEREX I). FuE-Vorhaben des Sächsischen Landesamtes für Umwelt und Geologie, METEO-RESEARCH, Februar 2003

Sächsisches Landesamt für Umwelt und Geologie (2003 b): Neusimulation des Klimaänderungs-Szenarios 2050 für den Freistaat Sachsen (WEREX II). Werkvertrag zwischen dem Sächsischen Landesamt für Umwelt und Geologie und METEO-RESEARCH, Dezember 2003

Sächsisches Landesamt für Umwelt und Geologie (2004 a): Ableitung von Wetterlagen aus großräumigen Zirkulationsmustern zur Identifikation von extremen Witterungsperioden mit Schwerpunkt lang anhaltende Trockenheit und deren Projektion in Klimaszenarien (WEREX III). FuE-Vorhaben des Sächsischen Landesamtes für Umwelt und Geologie, METEO-RESEARCH, Dezember 2004

Sächsisches Landesamt für Umwelt und Geologie (2004 b): KliWEP – Abschätzung der Auswirkungen der für Sachsen prognostizierten Klimaveränderungen auf den Wasser- und Stoffhaushalt im Einzugsgebiet der Parthe. FuE-Vorhaben des Sächsischen Landesamtes für Umwelt und Geologie, Abschlussbericht, November 2004

Sächsische Landesanstalt für Forsten (1997): Waldklimastationen Schriftenreihe der Sächsischen Landesanstalt für Forsten, Heft 11/1997

Sächsische Landesanstalt für Forsten (1999): Waldumbau auf Tieflands- und Mittelgebirgsstandorten in Sachsen Schriftenreihe der Sächsischen Landesanstalt für Forsten, Heft 19/1999

Schär, C., Vidale, P. L., Lüthi, D., Frei, C., Häberli, C., Liniger, M. A., Appenzeller, C. (2004): The role of increasing temperature variability in European summer heatwaves, Nature 427, pp. 1–4

Schmidt, P. A. (1995): Übersicht der natürlichen Waldgesellschaften Deutschlands.Schriftenreihe der Sächsischen Landesanstalt für Forsten, Heft 4/1995

Schmidt, P. A. (1996): Natürliche Waldvegetationslandschaften Sachsens (VL) 1:300.000

Schönwiese, Ch., Rapp, J. (1997): Climate Trend Atlas of Europe – Based on Observations 1890–1990, Kluwer Ac. Publ., Dordrecht, 228 pp.

Schönwiese, Ch. et al. (2001): Klimastatement der Deutschen Meteorologischen Gesellschaft, der Österreichischen Gesellschaft für Meteorologie und der Schweizerischen Gesellschaft für Meteorologie, September 2001

Schönwiese, Ch. (2003): Klimatologie, Verlag Eugen Ulmer Stuttgart, 440 S., 2. Auflage

Schönwiese, Ch. (2004): Klimawandel und Extremereignisse in Deutschland, 4. Annaberger Klimatage, Vortrag Mai 2004

Schönwiese, C.-D., Staeger, T., Trömel, S., Jonas, M. (2004): Statistisch-klimatologische Analyse des Hitzesommers 2003 in Deutschland, Klimastatusbericht 2003

Schwanecke, W., Kopp, D., LAF Graupa (1996): Forstliche Wuchsgebiete und Wuchsbezirke im Freistaat Sachsen, Schriftenreihe der Sächsischen Landesanstalt für Forsten, H.8/1996

Sirotenko, O.D., Abashina, H. V., Pavlova, V. N. (1997): Sensitivity of the Russian Agriculture to changes in climate, CO_2 and tropospheric ozone concentrations and soil fertility. Climate change, Vol. 36, No. 1–2, May – June, pp. 217–232.

9 Abbildungsverzeichnis

Abb. 1.1: Die integrierte Klimaschutzstrategie des Freistaates Sachsen

Abb. 2.1: Temperaturschwankungen in den letzten 11.000 Jahren (Quelle: Schönwiese, 2004)

Abb. 2.2: Trends der globalen Mitteltemperatur in verschiedenen Zeitabschnitten (Quelle: Schönwiese, 2004)

Abb. 2.3: Beobachtete Temperaturtrends in Europa (Quelle: Schönwiese, 2004)

Abb. 2.4: Abweichungen der Jahresmittel der Lufttemperaturen vom Referenzwert 1961–1990 in Deutschland

Abb. 2.5: Die wichtigsten Erdbahnparameter und ihre charakteristischen Zeitskalen (Zyklen) (Quelle: Hamburger Bildungsseminar)

Abb. 2.6: Jährliche globale Mitteltemperatur unter Berücksichtigung natürlicher, anthropogener und aller Antriebskräfte. Modellsimulationen (blau), Beobachtungen (rot) (Quelle: IPCC)

Abb. 2.7: Beiträge atmosphärischer Spurengase zum natürlichen Treibhauseffekt

Abb. 2.8: Beiträge der Klimagase zum anthropogenen Treibhauseffekt

Abb. 2.9: Trend der Jahresmittelwerte der CO_2-Konzentration 1960–2003 in Mauna Loa (Hawaii)

Abb. 2.10: SRES-Szenarien für die jährlichen globalen Emissionen und atmosphärischen Konzentrationen von CO_2 (1990–2100) (Quelle: IPCC)

Abb. 3.1: Monatliche Niederschlagshöhen für die Referenzzeiträume 1931–1960 (hellgrün), 1951–1980 (grün) und 1961–1990 (dunkelgrün) an der Station Fichtelberg (Quelle: DWD, 1994; Heyer, 1984)

Abb. 3.2: Kältesummen der Winterhalbjahre 1828/1829 bis 2003/2004 für den Raum Dresden sowie elfjährige gleitende Mittelwerte der Kältesummen (rote Kurve)

Abb. 3.3: Vb-Wetterlage / Bodenwetterkarte vom 11. August 2002

Abb. 3.4: Entwicklung der Häufigkeiten der Großwetterlage Trog Mitteleuropa im Sommer in Mitteleuropa 1901–2000 (jeweils aggregiert über 30 Jahre)

Abb. 3.5: Trend der Jahresmittelwerte der Lufttemperatur 1901–2000 auf dem Fichtelberg (1214 m ü. NN)

Abb. 3.6: Häufigkeiten des Großwettertyps West im Sommer- und Winterhalbjahr in Mitteleuropa 1881–1998 (gleitende Mittel über jeweils 11 Jahre)

Abb. 3.7: Diagnostizierte 30-jährige Wintermittelwerte der Lufttemperatur Zeitraum 1961–1990

Abb. 3.8: Projizierte 30-jährige Wintermittelwerte der Lufttemperatur Zeitraum 2021–2050

Abb. 3.9: Diagnostizierte 30-jährige Sommermittelwerte der Niederschlagsmenge 1961–1990

Abb. 3.10: Projizierte 30-jährige Sommermittelwerte der Niederschlagsmenge Zeitraum 2021–2050

Abb. 3.11: Struktur und Systematik der Sächsischen Klimadatenbank

Abb. 4.1: Simulierte Temperaturänderung im 21. Jahrhundert gegenüber 1990 für die SRES-Emissionsszenarien (Quelle: IPCC 2001)

Abb. 4.2: Die Großwettertypen West und Tief Mitteleuropa

Abb. 4.3: Grundstruktur des sächsischen Klimamodells

Abb. 4.4: Szenario der Niederschlagsänderung in Deutschland im Winter in der Dekade 2041–2050 gegenüber der Referenzperiode 1981/2000 (Basis: Modell WEREX)

Abb. 4.5: Szenario der Niederschlagsänderung in Deutschland im Sommer in der Dekade 2041–2050 gegenüber der Referenzperiode 1981/2000 (Basis: Modell WEREX)

Abb. 4.6: Szenario der Änderung der Lufttemperatur in der Dekade 2041–2050 gegenüber der Referenzperiode 1981/2000

Abb. 4.7: Szenario der Änderung der Anzahl der Ereignistage in der Dekade 2041–2050 gegenüber der Referenzperiode 1981/2000

Abb. 4.8: Szenario der Änderung der Niederschlagshöhen in der Dekade 2041–2050 gegenüber der Referenzperiode 1981/2000 in Sachsen

Abb. 4.9: Szenario der Änderung der Niederschlagshöhen in der Dekade 2041–2050 gegenüber der Referenzperiode 1981/2000 für eine Station im Osten Sachsens (Görlitz) und im Stau des Erzgebirges (Carlsfeld)

Abb. 4.10: Szenario der prozentualen Änderung der Niederschlagshöhen im Sommer in der Dekade 2041–2050 gegenüber der Referenzperiode 1981/2000

Abb. 4.11: Szenario der Anzahl der Tage mit mehr als 55 mm Tagesniederschlag für verschiedene Dekaden bis 2050
Abb. 4.12: Szenario der Niederschlagsänderung in Sachsen im Sommer in der Dekade 2091–2100 gegenüber der Referenzperiode 1981/2000, (Basis: Modell WEREX, SRES-Szenario B2)
Abb. 4.13: Szenario der Niederschlagsänderung in Sachsen im Sommer in der Dekade 2091–2100 gegenüber der Referenzperiode 1981/2000, (Basis: Modell WEREX, SRES-Szenario A2)
Abb. 4.14: Winterstimmung in der Sächsischen Schweiz – gehören solche Bilder immer mehr der Vergangenheit an? (Foto: Wilfried Küchler)
Abb. 5.1: Klimawandel und Wetterextreme (Quelle: LATIF, 2004)
Abb. 5.2: Wolkenspirale des Vb-Tiefs am 12.08.2002, 14.00 UTC (Quelle: DWD)
Abb. 5.3: Bodenwetterkarte des DWD vom 11.08.2002, 00 UTC und absolute Topographie 500 hPa vom 11.08.2002, 12 UTC
Abb. 5.4: Tagessummen der Starkniederschläge am 12. August 2002 an ausgewählten Messstellen in Sachsen und Brandenburg
Abb. 5.5: Die Müglitz in der Ortslage Weesenstein im August 2002 (Foto: Stefan Häßler)
Abb. 5.6: Entwicklung des Niederschlagsdefizits im Jahr 2003 an der Station Görlitz, (Basis: Vergleich mit dem langjährigen Mittel 1961–1990)
Abb. 5.7: Die Elbe bei Radebeul im August 2003 (Foto: Wilfried Küchler)
Abb. 5.8: Trockenschäden an Bäumen in Sachsen im August 2003 (Foto: Wilfried Küchler)
Abb. 5.9: Verdorrtes Maisfeld während der Dürreperiode 2003 (Foto: Wilfried Küchler)
Abb. 5.10: Vergleich der Niederschlagssummen in der Vegetationsperiode 1 des Jahres 2003 mit dem langjährigen Mittel 1961–1990
Abb. 5.11: Niederschlagssummen in der Vegetationsperiode 1 in Dürrejahren an der Station Görlitz
Abb. 5.12: Berliner Wetterkarte vom 03.06.2003 – Höhenwetterkarte 500 hPa, 01 Uhr MEZ
Abb. 5.13: Berliner Wetterkarte vom 09.08.2003 – Höhenwetterkarte 500 hPa, 01 Uhr MEZ
Abb. 5.14: Monatsmittelwerte der Lufttemperatur und Abweichungen von Referenzwerten 1961–1990 im August 2003
Abb. 5.15: Monatssummen des Niederschlags an ausgewählten Stationen in Deutschland im August 2003 (Quelle: DWD)
Abb. 6.1.1: Jährliche Anzahl von Frosttagen im Kontrolllauf (1981–2000)
Abb. 6.1.2: Jährliche Anzahl von Frosttagen im Szenario III (2041–2050)
Abb. 6.1.3: Mittlere Dauer der thermischen Vegetationsperiode (in Tagen), 1961–2000
Abb. 6.1.4: Dauer der Vegetationsperiode (in Tagen) im Szenario III (2041–2050)
Abb. 6.1.5: Beginn der Blattentfaltung bei der Stieleiche, 1961–2000
Abb. 6.1.6: Beginn der Blattentfaltung bei der Stieleiche, Szenario III (2041–2050)
Abb. 6.1.7: Pflückreife des Apfels, 1961–2000
Abb. 6.1.8: Pflückreife des Apfels, Szenario III (2041–2050)
Abb. 6.1.9: Apfelblüte
Abb. 6.1.10: Süsskirschen
Abb. 6.2.1: Erosion nach einem Gewitter bei konventioneller (linke Bildhälfte) und konservierender (rechte Bildhälfte) Bodenbearbeitung
Abb. 6.2.2: Ackerland an Fließgewässern – Gefahr von Nährstoffeinträgen und Bodenerosion (Foto: S. Hauer)
Abb. 6.3.1: Verteilung der Waldgesellschaften im sächsischen Tiefland unter den gegenwärtigen Umweltbedingungen nach der oben genannten Methodik
Abb. 6.3.2: Mögliche Verteilung der Waldgesellschaften unter der Annahme einer Verringerung der Niederschläge in der Vegetationsperiode um 13 %
Abb. 6.3.3: Mögliche Verteilung der Waldgesellschaften unter der Annahme einer Verringerung der Niederschläge in der Vegetationsperiode um 13 % und gleichzeitiger Steigerung des Transpirationsbedarfs um 20 mm (Niederschlagsäquivalent)
Abb. 6.3.4: Mögliche Verteilung der Waldgesellschaften unter der Annahme einer jahreszeitlich indifferenten Abnahme der Niederschläge um 95 mm bei gleichzeitiger Steigerung des Transpirationsbedarfs um 40 mm (Niederschlagsäquivalent)
Abb. 6.3.5: Verteilung der Waldgesellschaften im sächsischen Mittelgebirgsraum unter den gegenwärtigen Umweltbedingungen nach der oben genannten Methodik
Abb. 6.3.6: Mögliche Verteilung der Waldgesellschaften im sächsischen Mittelgebirgsraum unter der Annahme einer Erhöhung der Jahresmitteltemperatur um 1,5 Grad
Abb. 6.3.7: Mögliche Verteilung der Waldgesellschaften im sächsischen Mittelgebirgsraum unter der Annahme einer Erhöhung der Jahresmitteltemperatur um 2 Grad
Abb. 6.3.8: Herbststimmung im Naturschutzgebiet Trostgrund, Forstamt Brand-Erbisdorf
Abb. 6.3.9: Bergmischwald im Forstamt Brand-Erbisdorf
Abb. 6.4.1: Schwergewichtsstaumauer der Talsperre Klingenberg
Abb. 6.4.2: Schwergewichtsstaumauer mit Dammanschluss der Talsperre Lehnmühle
Abb. 6.4.3: Lage des Talsperren-Systems Klingenberg/Lehnmühle einschließlich der „Beileitungs-Talsperre“ Rauschenbach

Abb. 6.4.4: Darstellung des Bewirtschaftungsprinzips einer Mehrzweck-Talsperre zur Rohwasserabgabe und zum Hochwasserschutz
Abb. 6.4.5: Vergrößerung des gewöhnlichen Hochwasserrückhalteraumes in den Talsperren Klingenberg, Lehnmühle und Rauschenbach
Abb. 6.4.6: Die TS Lehnmühle bei deutlich abgesenktem Stauspiegel (508 m ü. NN). Ein Betriebsfall der Regelbewirtschaftung, d.h. im Rahmen der Rohwasserabgabe für Trinkwasser
Abb. 6.4.7: Die Hochwasserentlastungsanlage der Talsperre Lehnmühle bei einem Stauspiegel über 524 m ü. NN in Betrieb. Ein Betriebsfall im Rahmen der Hochwassersteuerung.
Abb. 6.4.8: Mittlere Zuflüsse zum Talsperren-System Klingenberg/Lehnmühle
Abb. 6.4.9: Vergleich der beiden Trockenperioden 1962/1964 und 2003/2004 im Zufluss zum Talsperren-System Klingberg/Lehnmühle
Abb. 6.4.10: Darstellung der beiden größten Hochwasser im Zufluss zur Sperrstelle der TS Lehnmühle
Abb. 6.4.11: Statistische Einordnung des Augusthochwassers 2002 im Zufluss der TS Lehnmühle im Vergleich zum maximal möglichen Hochwasser an diesem Querschnitt
Abb. 6.4.12: Das Märzhochwasser 2000 gefolgt von einer 9 Monate andauernden, intensiven Trockenheit an der Sperrstelle der TS Klingenberg
Abb. 6.4.13: Das Augusthochwasser 2002 gefolgt von einer 9 Monate andauernden, intensiven Trockenheit an der Sperrstelle der TS Klingenberg
Abb. 6.4.14: Modellergebnisse für den Niederschlag und den Abfluss (=Talsperrenzufluss)
Abb. 6.4.15: Modellergebnisse für die Verdunstungshöhen
Abb. 6.4.16: Veränderung des innerjährlichen Zuflussregimes sowie des Gesamtzuflusses
Abb. 6.4.17: Veränderung der Leistungsfähigkeit des TS-Systems Klingenberg/Lehnmühle unter Beachtung der TS Rauschenbach
Abb. 6.5.1: Relativer Trend (%) der potenziellen Verdunstung in Sachsen, 1971–2000 (Quelle: TU Dresden, Professur für Meteorologie)
Abb. 6.5.2: Lineare Trends im Niederschlag an der Station Tharandt (Quelle: Lfug, Sächsische Klimadatenbank)
Abb. 6.5.3: Ausgetrockneter Lockwitzbach im Friedewald bei Dresden im Sommer 2003 (Foto: Udo Mellentin)
Abb. 6.5.4: Pegellatte am Lockwitzbach 2004 (Foto: Udo Mellentin)
Abb. 6.5.5: Pegel Dresden: 9,40 m, 17.08.2002 (Foto: Ulrich van Stipriaan)
Abb. 6.5.6: Pegel Dresden: 0,75 m, 10.08.2003 (Foto: Ulrich van Stipriaan)
Abb. 6.6.1: Naturnaher Fichten-Moorwald im oberen Westerzgebirge mit Bindung an kühl-feuchte Klima- und Standortbedingungen. Als Folge des Klimawandels könnte dieser bereits seltene Ökosystemtyp in Sachsen aussterben (Foto: Siegfried Slobodda)
Abb. 6.6.2: Traubeneiche (rechts) und Feldahorn (links) sind kennzeichnende Baumarten der Eichen(misch)wälder trocken-warmer Standort. Werden Temperaturanstieg und zunehmende Sommertrockenheit ihre Ausbreitung fördern? (Foto: Siegfried Slobodda)