

Sächsisches Landesamt für Umwelt und Geologie

Zusammenfassender Bericht

zum
Forschungs- und Entwicklungsvorhaben

**„Anwendung eines Verfahrens zur wetterlagenkonsistenten
Projektion von Zeitreihen und deren Extreme mit Hilfe globaler
Klimasimulationen**

Projektdurchführung: Dr. Wolfgang Enke
Fa. Meteo-Research, Am Wiesengrund 30,
14532 Stahnsdorf

Projektlaufzeit: 06/2002 – 02/2003

Projektbegleitung: Dipl. Met. Wilfried Kuchler,
Sächsisches Landesamt für Umwelt und Geologie

Zusammenfassender Bericht: Wilfried Kuchler , Werner Sommer
Sächsisches Landesamt für Umwelt und Geologie

Juli 2003

Inhalt

1.	Zusammenfassung	
2.	Einführung	S. 3
2.1	Grundsätzliche Aspekte des Klimawandels	S. 4
2.2	Klimamodelle	S. 5
2.2.1	Globale Klimamodelle	S. 5
2.2.2	Regionale Klimamodelle	S. 6
3.	Die Regionalisierungsverfahren <i>REKLISA</i> und <i>WEREX</i>	S. 7
3.1	Das Wetterlagenkonzept als Basis	S. 7
3.2	Das Regionalisierungsverfahren <i>REKLISA</i>	S. 9
3.3	Das Regionalisierungsverfahren <i>WEREX</i>	S. 10
3.4	Die Simulation von Extremwerten mit <i>WEREX</i>	S. 13
4.	Ergebnisse der <i>WEREX</i> – Simulationen	S. 15
4.1	Datenbasis	S. 15
4.2	Datenauswertung	S. 16
4.3	Ergebnisse	S. 16
5.	Ausblick	S. 19
6.	Literatur	S. 20

1 Zusammenfassung

Im Rahmen des Aufgabenschwerpunktes Klimawandel des Sächsischen Landesamtes für Umwelt und Geologie besteht ein Hauptziel der Forschungsarbeiten darin, das künftige Klima auf dem neuesten wissenschaftlichen Stand mit möglichst geringer Fehlerbreite zu projizieren, die möglichen Klimafolgen abzuschätzen und für die einzelnen Schutzgüter notwendige Maßnahmen vorzuschlagen. Im Rahmen entsprechender Forschungsprojekte wurde in Sachsen bislang vor allem der Fragestellung nachgegangen, welche Klimatrends sich in den vergangenen 50 Jahren bereits abzeichnen (Klimadiagnose) und mit welchen regionalen Auswirkungen des globalen Klimawandels in den nächsten 50 Jahren gerechnet werden muss (Klimaprojektion). Dabei hat sich der Schwerpunkt des fachlichen und politischen Interesses zunehmend in Richtung **Wetterextreme** verlagert.

Mit der aktuellen Modellvariante WEREX (Wetterlagenbedingte Regression für Extremwerte) wurde das bisherige regionale Klimamodell REKLISA (Regionale Klimaprognose Sachsen) weiter entwickelt, so dass es nun direkt für die Simulation von Zeitreihen und damit für die Abschätzung der Ausprägung extremer Wetterelemente eingesetzt werden kann. Die Simulationen für Sachsen basieren auf Modelloutputs des globalen Modells des Deutschen Klimarechenzentrums (DKRZ) im Max-Planck-Institut Hamburg ECHAM4/OPYC3 unter einem SRES - Szenario B2 (Verdoppelung der CO₂-Äquivalent-Emissionen bis zum Jahr 2100). Die vorliegenden ersten Ergebnisse stellen eine neue Qualität von Inputdaten für wasserwirtschaftliche, forstwirtschaftliche oder ökologische Modelle dar. Folgende Kernaussagen können für Sachsen getroffen werden:

- Die mittlere **Lufttemperatur** wird sich im 21. Jahrhundert weiter erhöhen, allerdings von Dekade zu Dekade nicht gleichförmig. Dieser Effekt wird besonders im Winter deutlich. Es existieren in Sachsen keine signifikanten räumlichen Unterschiede für den simulierten Temperaturtrend. Die erwartete Zunahme der mittleren Temperatur ist mit großer Wahrscheinlichkeit mit der Zunahme der Temperaturextreme in Sachsen verknüpft.
- Auch die Entwicklung der **Niederschläge** erfolgt von Dekade zu Dekade nicht gleichförmig. Relativ feuchte Jahrzehnte werden von trockeneren Jahrzehnten abgelöst. Im Winter ist eine deutliche Zunahme der monatlichen Niederschlagssummen zu erwarten, wobei Lee-Effekte des Mittelgebirges in weiten Teilen Sachsens eine deutliche Abschwächung dieses Trends bewirken.

Hervorzuheben sind die signifikanten regionalen Unterschiede bei den simulierten monatlichen Niederschlägen.

Bei der voraussichtlichen Entwicklung von **Extremereignissen** (Trockenperioden; Starkniederschläge) werden perspektivisch nach der WEREX-Simulation folgende Veränderungen erwartet:

- Es tritt eine sehr deutliche Verringerung der Anzahl der Frost- und Eistage auf. Die Zahl der Sommertage und heißen Tage nimmt deutlich zu. Im Sommer werden Temperaturmaxima bis zu 42° C erwartet. Dieser Wert liegt über 2 Grad höher als der bisher gemessene absolute Höchstwert. Analog verläuft die Zunahme der höchsten Tagesminima.
- Obwohl es insgesamt trockener werden wird, nehmen die Tage mit extremen Niederschlägen insbesondere im Sommer zu. Dies lässt Rückschlüsse auf eine Verstärkung der Intensität lokaler Schauer den kommenden Jahrzehnten zu. Im Herbst und Winter sind hingegen keine signifikanten Veränderungen extremer Niederschläge zu erwarten, obwohl es insgesamt feuchter wird.

Weitere Resultate liegen für die Klimaparameter **Relative Feuchte**, **Sonnenscheindauer**, **Windgeschwindigkeit** und **Bedeckungsgrad** vor, auf die hier jedoch nicht näher eingegangen werden kann.

2 Einführung

2.1 Grundsätzliche Aspekte des Klimawandels

Inzwischen besteht unter den Klimatologen weltweit Einigkeit darüber, dass der Mensch den natürlichen Treibhauseffekt durch den steigenden Ausstoß klimarelevanter Gase insbesondere Kohlendioxid (CO₂) entscheidend verstärkt. Zwar konnte bislang die Beweiskette aufgrund der komplexen Zusammenhänge des Klimasystems nicht lückenlos geschlossen werden, alle Indizien sprechen jedoch für einen entscheidenden anthropogen bedingten Anteil. Besorgniserregend ist die Tatsache, dass sich die Erwärmung im 21. Jahrhundert weiter beschleunigt. Nach dem letzten Sachstandsbericht des Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) wird sich die Atmosphäre je nach Entwicklung von Bevölkerung, Wirtschaft und Klimaschutz zwischen 1,4 und 5,8 K in den nächsten 100 Jahren erwärmen.

Ein solcher Klimawandel würde nach Einschätzung aller führenden Klimatologen zwangsläufig dramatische Konsequenzen nach sich ziehen. Nach Erkenntnissen zweier Vorhaben zur Klimadiagnose in Sachsen (CLISAX I und CLISAX II) hat diese Entwicklung auch in Sachsen offensichtlich bereits eingesetzt.

Globale Klimaänderungen spiegeln sich in den regional ganz unterschiedlich wider. So werden auch die Regionen in Deutschland von der Klimaveränderung offensichtlich in unterschiedlichem Maße betroffen sein. Es ist bereits jetzt abzusehen, dass im sächsischen Raum lokale Klimaänderungen eintreten werden, die sich in einigen Details, insbesondere was den wichtigen Klimaparameter Niederschlag angeht, deutlich von der Entwicklung in anderen Regionen Deutschlands unterscheiden. Somit ergibt sich die Notwendigkeit, Klimasimulationen auch für Sachsen separat durchzuführen. Aus diesem Grunde hat das Sächsische Landesamt für Umwelt und Geologie im März 2003 eine aktualisierte zweite Klimastudie zur Untersuchung der Auswirkungen des erwarteten globalen Wandels auf das künftige Klima in Sachsen vorgelegt, deren Ergebnisse im Detail dem Abschlussbericht dieser Studie entnommen werden können (SÄCHSISCHES LANDESAMT FÜR UMWELT UND GEOLOGIE 2003).

2.2 Klimamodelle

2.2.1 Globale Klimamodelle

Der hochgradig nichtlineare Charakter der Atmosphäre führt dazu, dass kleine Fehler in den *Anfangsbedingungen* der Prognosemodelle rasch anwachsen und damit die Unsicherheit der Wettervorhersagen innerhalb weniger Tage schnell erhöhen. Somit wird es auch in Zukunft nicht möglich sein, die theoretische Grenze der Vorhersagbarkeit des Wetters von etwa zwei Wochen weiter zu verlängern. Jenseits dieser Grenze gibt es aber dennoch eine Vorhersagbarkeit in der Atmosphäre, die mittel- und langfristige Zeitskalen umfasst und ihren Ursprung in langsamen Veränderungen der globalen *Randbedingungen* hat. Klimamodelle schließlich unterscheiden sich zwar in der Modellarchitektur kaum von den Wettervorhersagemodellen. Für sie sind jedoch nicht die Anfangsbedingungen (Ausgangswettersituation für den Start des Klimamodells), sondern möglichst zuverlässige Annahmen über relevante Randbedingungen ausschlaggebend (z.B. Annahmen zur Entwicklung des anthropogenen CO₂-Ausstoßes in die Atmosphäre in den nächsten Jahrzehnten, d.h. Emissionsszenarien).

Modifikationen des regionalen Klimas lassen sich nur verstehen, wenn man sie im Zusammenhang mit globalen Klimaänderungen betrachtet. Insbesondere muss sich eine regionale Klimaanalyse auf globale Tendenzen des Klimas stützen, die aus Modellsimulationen mit globalen Klimamodellen erhalten werden. Hierbei ist der Einfluss von CO₂ und anderen Treibhausgasen auf die Modellsimulationen evident. Letztlich sind auf dieser Basis auch Szenarienrechnungen möglich, bei denen bestimmte Konzentrationsniveaus von Treibhausgasen vorgegeben werden und dann entsprechend dieser Vorgaben ein globales Klima errechnet wird. An diese Resultate lassen sich schließlich regionale Klimamodelle ankoppeln, um zu zusätzlichen Aussagen für die betrachtete Region zu gelangen.

Die Modelle, die als Ausgangspunkt einer regionalen Klimamodellierung für Sachsen betrachtet werden, sind globale Modelle der gekoppelten atmosphärischen und ozeanischen Zirkulation (General circulation models; GCM's). Diese für Langzeitsimulationen (>100 Jahre) verwendeten Modelle arbeiten gegenwärtig mit Gitterpunktsystemen, die in der Atmosphäre einen Abstand von ca. 250 km Maschenweite aufweisen. Diese Modelle sind in so genannte Modellschichten übereinander angeordnet, meist ca. 10 bis 20 an der Zahl. Es gibt weltweit verschiedene Modellstrategien für die gleichen Simulationsziele. Die verwendeten Modelle unterscheiden sich durch unterschiedliche Modellphysik (Niederschlag, Grenzschicht, Energieflüsse usw.). Gewisse Unsicherheiten der nachfolgend diskutierten Regionalisierung globaler Modellergebnisse sind insofern gegeben, als die rund 10 international eingesetzten globalen Klimamodelle zwar in ihren allgemeinen Aussagen gut übereinstimmen, im Detail jedoch fall- und gebietsweise größere Unterschiede insbesondere beim Niederschlag zu verzeichnen sind. Die für Sachsen durchgeführten regionalen Klimaprojektionen stützen sich auf Modellversionen des globalen Modells des Deutschen Klimarechenzentrums Hamburg (Klimamodell ECHAM4). Es besteht Hoffnung, dass längerfristig Unsicherheiten durch eine verbesserte Datenlage und Fortschritte in der Forschung verringert werden können. Der Schlüssel zu einer wirkungsvollen Verringerung der Unsicherheiten dürfte in einem besseren Verständnis der Konvektion, der Wolkenbildung und der ozeanischen Zirkulation liegen.

2.2.2 Regionale Klimamodelle

Durch die Vorgabe von Szenarien der künftigen Emission von Treibhausgasen kann mit globalen Klimamodellen eine Abschätzung des Klimas der Zukunft vorgenommen werden. Die Modelle simulieren dann einen möglichen zukünftigen Wetterablauf, der über die

betrachtete Zeitspanne statistisch ausgewertet wird, um voraussichtliche Veränderungen im durchschnittlichen Verhalten des Wetters (Klima) zu ermitteln. Die Modellauflösungen der derzeitigen globalen Klimamodelle sind für die Ableitung regionaler Interpretationen zu grob. Um diesen Problemen zu begegnen, wurden verschiedene Regionalisierungsverfahren entwickelt, die entweder auf statistischen Methoden basieren oder hoch auflösende dynamische Modelle einsetzen. Die Aufgabe der Regionalisierungsverfahren besteht darin, die globalen Klimasimulationsergebnisse auf einen regionalen Maßstab zu übertragen. Dadurch können die berechneten klimatischen Änderungen direkt mit ihren möglichen Auswirkungen z.B. in Sachsen in Zusammenhang gebracht werden.

3 Die sächsischen Regionalisierungsverfahren *REKLISA* und *WEREX*

Auf der Grundlage der auf die sächsischen Verhältnisse zugeschnittenen Regionalisierungsverfahren REKLISA und WEREX (SÄCHSISCHES LANDESAMT FÜR UMWELT UND GEOLOGIE 2000 und 2003) sind die Auswirkungen der von globalen Klimamodellen vorgezeichneten Szenarien auf die Klimaentwicklung in Sachsen bis Mitte des 21. Jahrhunderts detailliert untersucht worden. Beide Verfahren basieren auf Ergebnissen von Simulationen des globalen Klimamodells ECHAM4-OPYC3-T42 des DKRZ Hamburg.

3.1 Das Wetterlagenkonzept als Basis

Das Klima in Sachsen wird vor allem durch das Zusammenspiel der atmosphärischen Zirkulation (Großwetterlagen) und der regionalen Topographie bestimmt. Signifikante Veränderungen der atmosphärischen Zirkulation über Mitteleuropa sind seit Mitte der 70er Jahre erkennbar und haben beispielsweise auch den markanten Anstieg der mittleren Wintertemperaturen in den letzten zwei Jahrzehnten verursacht. Die weitere Entwicklung in unserem Raum hängt nun vor allem davon ab, inwieweit sich diese Tendenzen der Zirkulations-Modifikation in den nächsten Jahren und Jahrzehnten fortsetzen. Eine Schlüsselrolle spielt hierbei die künftige Ausprägung der so genannten Nordatlantik – Oszillation (NAO - Index), deren Fluktuationen und Trends den mittel- und längerfristigen Ablauf der Witterung in Mitteleuropa entscheidend prägen. Simulationen mittels globaler Klimamodelle bieten einen sinnvollen und gangbaren Weg, die weitere Entwicklung der großräumigen Zirkulation bestmöglich und auf wissenschaftlicher Grundlage abzuschätzen. Das Wetterlagenkonzept der für Sachsen entwickelten Regionalisierungsverfahren REKLISA und WEREX beruht primär auf der Nutzung dieser Outputs globaler Klimamodelle.

Die Basis für die Übertragbarkeit der Ergebnisse globaler Klimasimulationen auf die regionale Situation bildet eine objektive Wetterlagenklassifikation, die im Rahmen der ersten sächsischen Klimaprognose REKLISA speziell für den Freistaat Sachsen entwickelt wurde.

Bei einem Vergleich dieser objektiven Wetterlagen mit den sachsotypischen Wetterlagen zeigte sich, dass die für das engere Mitteleuropa zugeschnittenen Wetterlagen auch für die Simulation des Wetter- und Witterungsverlaufes in Sachsen gut anwendbar sind. Da gegenwärtig auch für andere Bundesländer und Regionen in Deutschland auf der Basis von WEREX vergleichbare Klimastudien durchgeführt werden, ist es sinnvoll, die einheitliche Wetterlagenklassifikation für das engere Mitteleuropa zu verwenden. Nur so ist eine Vergleichbarkeit der Ergebnisse der einzelnen Klimastudien gewährleistet. Für die vorliegende sächsische Klimastudie WEREX konnte aufgrund dieser Gesichtspunkte die auf das engere Mitteleuropa optimierte Wetterlagenklassifikation des Temperatur- und Feuchteregimes verwendet werden (Abb. 1 und Abb. 2).

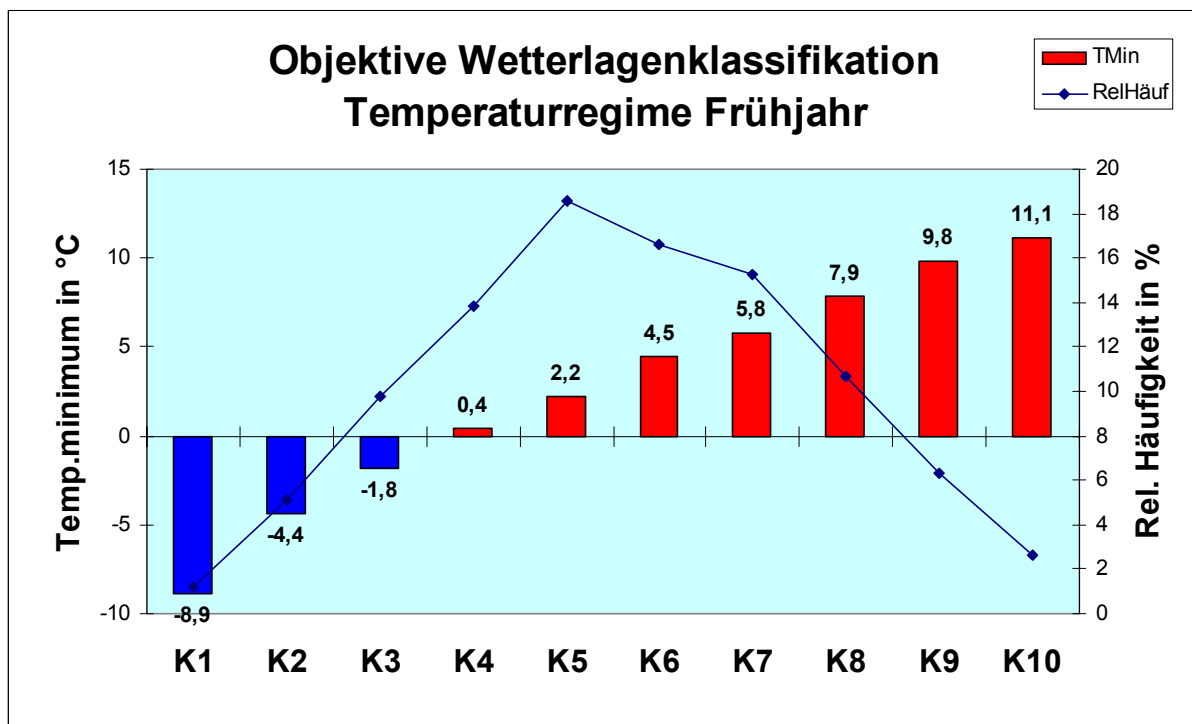


Abb. 1: Wetterlagenklassifikation für das Temperaturregime (Frühjahr; 10 Klassen)

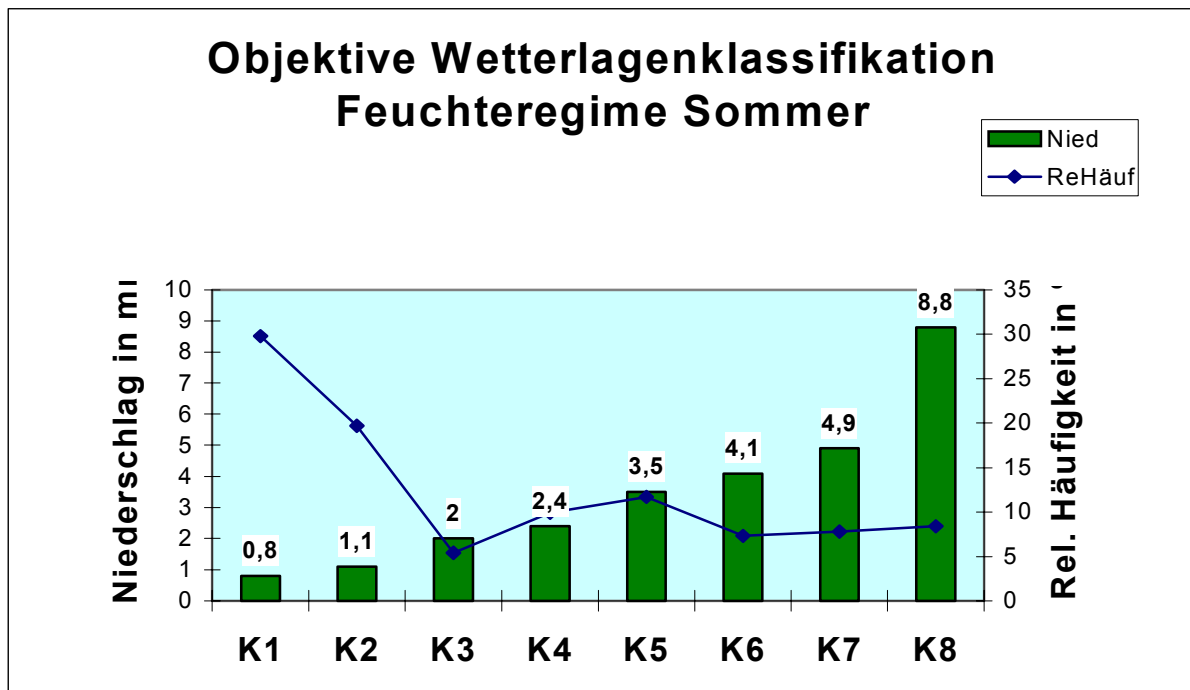
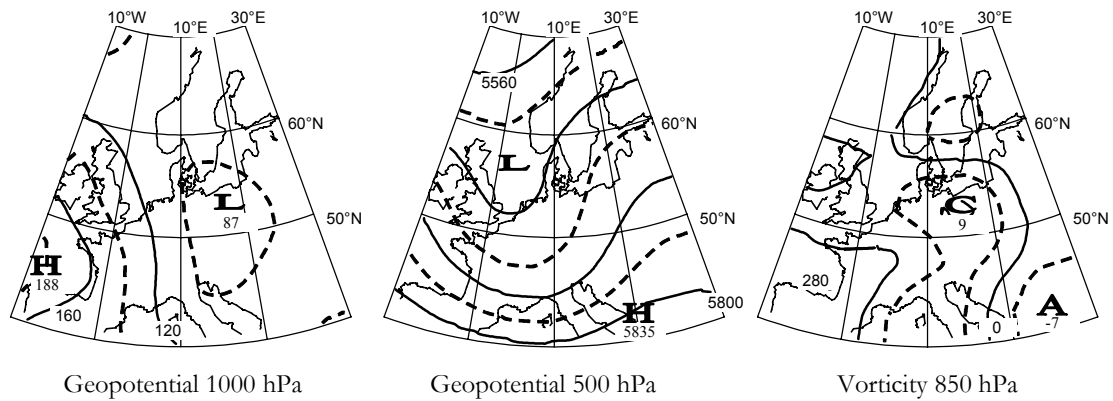
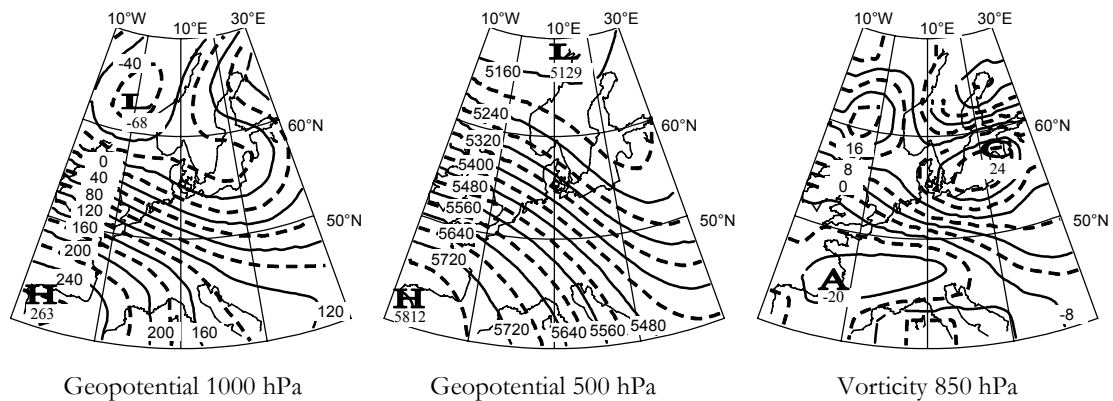


Abb. 2: Wetterlagenklassifikation für das Feuchteregime (Sommer; 8 Klassen)

In Abb. 3 werden exemplarisch die empirischen objektiven Wetterlagen des Feuchteregimes der für Sommer bzw. Winter jeweils „niederschlagsträchtigen“ Klasse (Klasse 8 in Abb. 2) dargestellt. Vergleicht man hier die Geopotentialfelder 500 hPa für Sommer und Winter, so erkennt man bereits auf den ersten Blick sehr differenzierte Strukturen der atmosphärischen Zirkulation über Europa. Während im Winter die stark ausgeprägte nordwestliche Strömung im Mittel zu täglichen Niederschlagshöhen von etwa 5 mm führt, kennzeichnet die entsprechende Abbildung für den Sommer eine Zirkulationsstruktur, die den so genannten Vb-Wetterlagen (Beispiel Augusthochwasser 2002) bzw. der Wetterlage „Trog Mitteleuropa“ sehr nahe kommt. Im Durchschnitt fallen in Verbindung mit dieser Wetterlagenklasse im Einzugsgebiet der Elbe im Sommer tägliche Regenmengen von etwa 9 mm. Diese Beispiele unterstreichen unter anderem sehr deutlich, welche Bedeutung die jahreszeitliche Betrachtung bei Klimaanalyse und Klimasimulation hat.



Klasse 8 (Sommer)



Klasse 8 (Winter)

Abb. 3: Objektive Wetterlagenklassifikation für das Feuchteregime/ engeres Mitteleuropa (Beispiel: feuchteste Klasse im Sommer und im Winter)

3.2 Das Regionalisierungsverfahren REKLISA

Eine wesentliche Aufgabe der Regionalisierungsverfahren besteht darin, die globalen Klimasimulationsergebnisse auf einen regionalen Maßstab zu übertragen. Dadurch können die berechneten klimatischen Änderungen direkt mit ihren möglichen Auswirkungen z.B. im sächsischen Raum in Zusammenhang gebracht werden. Das regionale Klimamodell REKLISA interpretiert Änderungen großräumiger Strömungsmuster, wie sie durch globale Klimamodelle prognostiziert werden für den lokalen Bereich. Auf der Grundlage eines 2xCO₂-Szenarios mit dem ECHAM4-OPYC3-Modell wurden sowohl für das Klassifikationsverfahren als auch für die Kombination Klassifikation und nachfolgende

wetterlagenspezifische Regressionsanalyse Mittelwerte der Klimaelemente in Bodennähe für Monate, Jahreszeiten und Jahresmittel an sächsischen Klimastationen statistisch abgeleitet.

REKLISA basiert auf einer Regionalisierung der globalen Modellergebnisse mit Hilfe statistischer Beziehungen (Kombination von Wetterlagenklassifikation und nachfolgender multipler Regression) und erlaubt die Berücksichtigung großräumiger Prozesse. Die Stärke dieses Regionalisierungsansatzes globaler Klimamodelldaten besteht in der statistischen Kopplung zwischen großräumigen meteorologischen Datenfeldern der freien Atmosphäre (objektive Wetterlagen) und Messreihen der Klimaelemente an Bodenstationen in Sachsen.

Wetterlagenspezifische Regressionsanalysen wurden auf Kontroll-Lauf und Szenario angewandt. Untersucht wurden dabei die Zusammenhänge zwischen den an Klimastationen erfassten Werten Tagesmaximum, Tagesminimum, Tagesmitteltemperatur, Tagesmittel der relativen Feuchte, Sonnenscheindauer, Tagessumme des Niederschlages und Tagesmittel des Gesamtbedeckungsgrades und den Geopotential- und Temperaturanalysen der "freien" Atmosphäre sowie daraus abgeleiteten Größen.

Die Ergebnisse der Simulationen mittels REKLISA können dem Abschlussbericht dieser ersten sächsischen Klimaprognose entnommen werden (SÄCHSISCHES LANDESAMT FÜR UMWELT UND GEOLOGIE 2000). Danach sind bis Mitte des 21. Jahrhunderts voraussichtlich folgende Klimaänderungen in Sachsen zu erwarten:

- Zunahme der Häufigkeit warmer Wetterlagen
- Anstieg der mittleren Jahrestemperatur um bis zu 2,7 Grad
- Anstieg der Maximaltemperatur im Frühjahr bis zu 4 Grad
- Deutliche Zunahme der Sonnenscheindauer im Frühjahr und Sommer
- Drastischer Rückgang der Niederschläge in der Vegetationsperiode

Nach dieser Projektion der Klimaparameter werden sich bislang beobachtete Klimatrends in Sachsen in der Zukunft voraussichtlich verstärken.

3.3 Das Regionalisierungsverfahren *WEREX*

Analyse und Projektion von Klimaextremen, wie Dürren oder Starkregenereignisse, befinden sich im internationalen Maßstab erst in ihrem Anfangsstadium. In einem veränderten Klima mit höheren Temperaturen und höherem potentiellen Energiegehalt der Atmosphäre ist

zunächst grundsätzlich auch mit einer Zunahme der Extremereignisse zu rechnen. Globale Modelle können in ihrer gegenwärtigen Form jedoch noch keine der energiereichen kleinräumigen Phänomene wie etwa Gewitter oder tropische Wirbelstürme modellieren. Darüber hinaus ist eine Abschätzung, ob extreme Ereignisse wie zum Beispiel Dürren oder Starkniederschläge künftig gehäuft auftreten, unsicherer als Abschätzungen z. B. für die globale Mitteltemperatur oder mittlere regionale Temperatur- und Niederschlagsverhältnisse.

Extreme Ereignisse sind sowohl mit numerischen als auch mit statistischen Verfahren schwer zu modellieren. Die Regionalisierungsmethode WEREX bietet über die Kombination von objektiven Wetterlagen mit Zeitreihensimulationen eine gänzlich neue Möglichkeit, dennoch zu relativ zuverlässigen regionalen Aussagen über die voraussichtliche Ausprägung von Klimaextremen in der Zukunft zu gelangen. Die simulierten Zeitreihen bilden gleichzeitig auch die Basis für die Projektion künftiger Extremereignisse in Sachsen. Allerdings sind die mit WEREX getroffenen Aussagen zu Extremen mit größerer Unsicherheit zu bewerten als Aussagen über mittlere Zustände der Klimaszenarios mittels REKLISA und WEREX.

Das aktuell verwendete Regionalisierungsverfahren WEREX stützt sich wie auch das Vorläuferverfahren REKLISA auf eine objektive Wetterlagenklassifikation. An Hand einer Führungsgröße, z.B. einer regional gemittelten Temperaturreihe, wird nun aber die Zeitreihe täglicher Wetterlagen und der Klimabeobachtungen in Witterungsabschnitte zerlegt.

An dieser Stelle sei darauf hingewiesen, dass die Simulation der Zeitreihen ausschließlich unter Verwendung der temperaturoptimierten Wetterlagen realisiert wird, da bezüglich des Temperaturregimes – nicht aber für das Feuchteregime - eine „perfekte“ Simulation der Häufigkeiten der Wetterlagen realisiert werden kann.

In einem weiteren Schritt werden die mittels Zufallsgenerator ausgewählten Witterungsabschnitte so zusammengesetzt, dass sie einer vorgegeben Häufigkeitsverteilung der Wetterlagen möglichst nahe kommen. Es bleibt noch die Frage offen, wie die Stetigkeit der Übergänge zwischen den Witterungsabschnitten und den Wetterlagen garantiert werden kann. Für die Gebietsmittel der Tagesmitteltemperatur als Leitgröße ist dies gegeben, da die Witterungsperioden als Übergänge zwischen übernormal warmen und unternormal kalten Abschnitten definiert werden. Problematischer ist dies für die Stetigkeit der Übergänge zwischen den Wetterlagen. Um auch hier den erforderlichen stetigen Übergang zu gewährleisten, wird eine Matrix der Übergangswahrscheinlichkeiten zwischen den Wetterlagen für jede Jahreszeit und jeden Wetterlagentyp berechnet. Dabei gilt die empirisch

begründete Bedingung, dass eine aufeinander folgende Witterungsperiode bezüglich der Wetterlagen des Temperaturregimes eine Übergangswahrscheinlichkeit von $\geq 10\%$ aufweisen muss.

Am Ende der Erzeugung einer konsistenten Zufallsreihe steht eine Abfolge von Witterungsabschnitten zur Verfügung, denen sowohl täglich Wetterlagen des Temperatur- und Feuchteregimes als auch die Wetterbeobachtungen aller Klimastationen zugeordnet sind. Der auf das Datum orientierte Bezug bleibt somit erhalten, so dass eine räumliche Konsistenz der Stationen und der Wettererscheinungen in der Zufallsreihe gegeben ist. Zu einer Zeitreihe, die die realen Temperatur- und Niederschlagsverhältnisse im Jahresverlauf widerspiegelt, gelangt man, indem abschließend auf jede Beobachtungsreihe der stationsspezifische Jahresgang wieder aufprägt wird.

Wesentliche Vorteile des Verfahrens sind:

- Die zugrunde liegende Wetterlagenklassifikation verwendet überwiegend solche Felder, die von globalen Klimamodellen möglichst gut prognostiziert werden können.
- Systematische Fehler der globalen Klimamodelle können teilweise eliminiert werden.
- Die mittleren regionalen Klimaänderungen bestimmen sich aus der prognostizierten Änderung der Häufigkeitsverteilung der Wetterlagen.
- Das Verfahren garantiert den Erhalt der inneren statistischen Struktur der Zeitreihen und deren räumliche Konsistenz im Untersuchungsgebiet.
- Die Simulationsergebnisse des Jetztzeit-Klimas wurden validiert. Insgesamt rechtfertigen die Simulationsergebnisse eine Anwendung des Verfahrens auf Klimaszenarien.

WEREX ermöglicht somit die Simulation von Zeitreihen der Temperatur und des Niederschlages, während das Vorgängervorhaben REKLISA auf mittlere oder regional gegliederte Auswirkungen möglicher globaler Klimaänderungen orientierte, da die damals vorhandene Entwicklung der Regionalmodelle noch keine weiterführenden Aussagen ermöglichte. Im Rahmen der regionalen Klimafolgenforschung wächst aber der Bedarf an diagnostischen und prognostischen Informationen zu Extremen der meteorologischen Kenngrößen. Konkret hieß das, das regionale Klimamodell REKLISA qualitativ wesentlich zu modifizieren, um es auch für die Simulation von Extremereignissen - unter Erhalt der statistischen Struktur der Zeitreihen – einsetzen zu können. Als Resultat liegt nun das komplexere Modell WEREX zur regionalen Klimasimulation vor. Das neuartige Verfahren

ermöglicht die Abschätzung sowohl der Änderung der Ausprägung extremer Wetter-Erscheinungen als auch die Änderung der Häufigkeit des Auftretens dieser Ereignisse. Im Ergebnis der Untersuchungen liegen dann Simulationen von Zeitreihen täglicher Werte unterschiedlichster Wetterelemente (z.B. Temperatur, Niederschlag, Sonnenscheindauer, Wind, Feuchte und Bedeckung) für vorzuziehende Zeitintervalle eines Klimaszenarios vor, die nicht zuletzt als Inputdaten für wasserwirtschaftliche, forstwirtschaftliche oder ökologische Modelle verwendet werden können.

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. Da sich die Erzeugung der stationsspezifischen Zufallsreihen auf historische Messreihen stützt, können Extremereignisse in Klimaszenarien die im historischen Datensatz beobachteten Extremereignisse in ihrer absoluten Höhe nicht überschreiten, wohl aber die Häufigkeit des Auftretens von extremen Ereignissen. Es ist aber 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. So kann eine warme Wetterlage z.B. deutlich feuchter werden oder mit höheren Windgeschwindigkeiten verbunden sein als dies gegenwärtig der Fall ist. Diese Änderung muss ihren Ausdruck in einer Veränderung der Ausprägung der wetterlagenspezifisch gemittelten Feldtypen (Geopotential, Schichtdicke, Wirbelgröße usw.) finden. 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 Regionalisierungsmethode *WEREX* ein Klimaänderungs-Szenario nicht allein durch die **Änderung der Häufigkeit der Wetterlagen**, sondern zusätzlich durch die **Änderung** des Wettergeschehens **innerhalb der Wetterlagen** bestimmt.

Durch die Kombination der Szenarien der beiden Wetterlagentypen (Temperaturregime, Feuchteregime) ist es nicht nur möglich, die mittleren Niederschlagsverhältnisse besser zu beschreiben, sondern auch die Änderung der Häufigkeit und Ausprägung extremer Niederschläge besser abzuschätzen.

Eine weitere Besonderheit von *WEREX* gegenüber *REKLISA* liegt in der Möglichkeit der Bereitstellung beliebig vieler Simulationen eines beliebigen Szenarios. Die Begrenzung auf

10 Simulationen mit einer Länge von je 20 Jahren ist das Ergebnis aus Voruntersuchungen, die die Variationsbreite eines Klimaszenarios aus 100 Simulationen berechnete. Daraus ergab sich, dass mit 10 Simulationen der wesentlichste Teil der Variation erfasst werden kann. Diese Zeitreihensimulationen bilden die Basis für alle nachfolgenden Auswertungen und bieten zudem die Möglichkeit, hydrologische, agrar- und forstwirtschaftliche Modelle, Schneemodelle usw. mit diesen Datensätzen zu treiben.

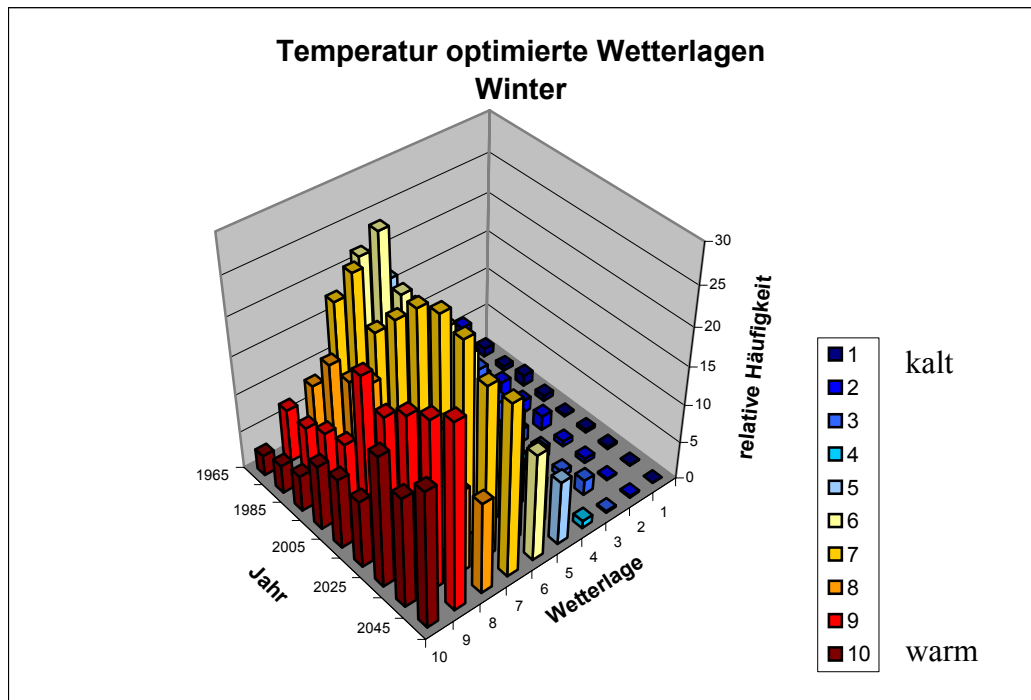


Abb. 4: Entwicklung der relativen Häufigkeit der Wetterlagen des Temperaturregimes von 1960 bis 2050 (Winter)

Die im vorliegenden Bericht dargestellten Resultate der Klimasimulationen für Sachsen unter Einsatz des neuen Regionalisierungsverfahrens *WEREX* beruhen auf Klimaoutputs des globalen Modells des Deutschen Klimarechenzentrums des Max-Planck-Instituts Hamburg ECHAM4/OPYC3 unter einem SRES-Szenario B2 (Verdoppelung der CO₂-Äquivalent-Emissionen bis zum Jahre 2100).

3.4 Die Simulation von Extremwerten mit *WEREX*

(A) Temperatur, relative Feuchte, Bedeckungsgrad und Windgeschwindigkeit

Die Simulation der Extremwerte erfolgt für die Wetterelemente Temperatur (Temperaturmaximum, Temperaturminimum, Tagesmitteltemperatur), relative Feuchte, Bedeckungsgrad und Windgeschwindigkeit über eine wetterlagenspezifische

Regressionsanalyse. Grundsätzlich ergibt sich die mittlere wetterlagenspezifische Änderung des betreffenden Wetterelementes (Zielgröße) aus der Änderung der meteorologischen Felder (Prediktoren) zwischen Szenario und gegenwärtigem Klima. Folglich werden für jede Zielgröße und für jede objektive Wetterlage multiple Regressionsgleichungen zur Abschätzung der wetterlagenspezifischen Änderung der Zielgröße berechnet. Die Abschätzungen erfolgen über alle verfügbaren Klimastationen in Sachsen.

Die auf diese Weise für jede Klimareihe separat berechnete wetterlagenspezifische Änderung eines Szenarios gegenüber dem gegenwärtigen Klima wird nachfolgend auf die Simulation dieser Zeitreihen aufgeprägt.

(B) Niederschlag

Die Simulation von Extremwerten für den Niederschlag wird wetterlagenspezifisch über eine Anpassung der Niederschlagsverteilungen der Wetterlagen des Temperaturregimes und der Wetterlagen des Feuchteregimes realisiert. Für die Simulation des Wetterelementes Niederschlag wird also ein Sonderweg beschritten, da eine auf hohe Niederschlagsmengen bezogene Regressionsanalyse – analog der für die anderen Wetterelemente beschriebenen Verfahrensweise - keine brauchbaren Zusammenhänge zu den oben aufgeführten potentiellen Prediktoren liefert.

Die Wetterlagen des Feuchte- und Temperaturregimes beschreiben unterschiedliche atmosphärische Zustände und erlauben somit eine komplexere Betrachtungsweise von Klimaänderungsszenarien. Es lassen sich somit auch grundsätzlich zwei verschiedene Typen von Zeitreihen erzeugen. Während der erstere Typ auf die Häufigkeitsverteilung der temperaturoptimierten Wetterlagen eines Szenarios hin optimiert wird, basiert der zweite Typ der simulierten Zeitreihen auf Wetterlagen, die hinsichtlich des Feuchteregimes optimiert werden. Die berechneten Häufigkeitsverteilungen der 24-stündigen Niederschlagssummen für beide Zeitreihentypen zeigen erwartungsgemäß deutliche Unterschiede. Nun wird die Häufigkeitsverteilung der 24-stündigen Niederschlagssummen der auf das Temperaturregime optimierten Zeitreihen eines Szenarios an die Häufigkeitsverteilung der auf das Feuchteregime optimierten Zeitreihen des gleichen Szenarios angepasst. Dies geschieht unter der plausiblen Annahme, dass die Niederschlagsreihen durch das Feuchteregime besser simuliert werden als von den Wetterlagen des Temperaturregimes. Eine einfache Substitution der simulierten Niederschlagsreihe des Temperaturregimes durch die des Feuchteregimes ist jedoch nicht möglich, da in diesem Falle sowohl die Konsistenz der Zeitreihen zwischen den

Wetterelementen als auch die räumliche Konsistenz nicht gewährleistet wären. Mit anderen Worten, der synoptische Zusammenhang zwischen Niederschlag und den Wetterelementen Temperatur, Bedeckungsgrad, relativer Feuchte, Sonnenscheindauer und Bedeckungsgrad würde dann verletzt. Folglich wird eine iterative Anpassung realisiert. Diese Anpassung erfolgt für jede einzelne Klasse der temperaturoptimierten Wetterlagen, jede einzelne Zeitreihe, jedes Szenario und jede Simulation eines Szenarios separat. Nähere Details zur methodischen Verfahrensweise können dem Abschlussbericht entnommen werden.

4 Ergebnisse der *WEREX*-Simulationen

4.1 Datenbasis

Für das Forschungsvorhaben wurden die folgenden Datensätze genutzt:

- ❖ NCAR/NCEP Reanalysen der Jahre 1950 bis 2000 für den Ausschnitt erweitertes Mitteleuropa (Quelle: National Center for Environmental Prediction, Washington, D.C.; National Center for Atmospheric Research, Boulder, CO.)
- ❖ Globale Klimasimulation eines transienten Laufes des EHAM4-OPYC3 B2 Szenarios vom Max-Planck-Institut – Hamburg (Quelle: Institut für Meteorologie; Deutsches Klimarechenzentrum Hamburg) für die Jahre 1990 bis 2050.
- ❖ Beobachtungsdaten für Sachsen und angrenzende Regionen der Jahre 1950 bis 2000. Datenreihen täglicher Beobachtungen von 36 Klimastationen und zusätzlich 60 Niederschlagszeitreihen. (Quelle: Deutscher Wetterdienst Radebeul; TU Dresden, Institut für Hydrologie und Meteorologie Tharandt).

An den 36 Klimastationen wurden folgende Wetterelemente betrachtet:

- *Tagesmaximum [K]*
- *Tagesminimum [K]*
- *Tagesmittel [K]*
- *Niederschlagssumme 7⁰⁰ bis 7⁰⁰ Folgetag [mm]*
- *Tagesmittel der relativen Feuchte [%]*
- *Bedeckungsgrad [/8]*
- *Tagesmittel der Windgeschwindigkeit [m/s]*
- *Sonnenscheindauer [Std.]*

4.2 Datenauswertung

Alle Auswertungen liegen in tabellarischer Form für jede Station, je 10 Simulationen und für alle Dekaden zwischen 2001 bis 2050 vor. Eine erste Möglichkeit, zu verallgemeinerten Aussagen zu kommen, ist die Bildung von täglichen Mittelwerten über alle Klimastationen. Eine weitere Möglichkeit der Modellbewertung bietet der direkte Vergleich von Beobachtungsreihen und simulierten Zeitreihen eines Szenarios ausgewählter statistischer Maßzahlen für ausgewählte Stationen. Es eignen sich jedoch nur einige der Maßzahlen für den direkten Vergleich zwischen Beobachtungsreihen und simulierten Reihen eines Klimaszenarios. Schließlich kann eine weitere Verdichtung der Ergebnisse erfolgen, indem über die 10 Simulationen, die für jede Klimastation und jede Dekade vorliegen, gemittelt wird. Diese Ergebnisse können dann mit den Beobachtungszeitreihen verglichen werden.

Die über 10 Simulationen gemittelten Ergebnisse zeigen das Klimaszenario mit der höchsten Eintrittswahrscheinlichkeit an, während die einzelnen Simulationen die Bandbreite des möglichen Szenarios widerspiegeln.

4.3 Ergebnisse

Die nachfolgend aufgeführten Resultate der WEREX-Modellrechnungen für das Emissions-Szenario B2 stützen sich einerseits auf eine zusammenfassende flächenhafte Auswertung der Simulationsergebnisse und andererseits auf die Analyse extremer Wetter- und Witterungsereignisse der simulierten Zeitreihen für unterschiedliche Klimaszenarien.

Maximum-Temperatur

Die Zunahme der Maximumtemperatur ist im Frühling mit 0.1 Grad am geringsten, sie beträgt im Herbst 1.6 Grad, im Sommer 2.3 Grad und im Winter 3.5 Grad. Es existieren keine signifikanten regionalen Unterschiede für die Maximumtemperatur.

Der Erwärmungsprozess schreitet von Dekade zu Dekade nicht gleichförmig voran. Dieser Effekt wird besonders im Winter deutlich. Dies bedeutet jedoch nicht, dass die zu erwartende Erwärmung in den einzelnen Dekaden exakt so eintreffen wird. Es wirft nur ein Schlaglicht auf die Variabilität des zukünftigen Klimas von Dekade zu Dekade, grundsätzlich geprägt durch einen allgemeinen Temperaturanstieg.

Minimum-Temperatur

Die prognostizierten Änderungen der Minimumtemperatur fallen im Vergleich zur Maximumtemperatur deutlich geringer aus. Im Frühling und Herbst (0,0 Grad bzw. 0,4 Grad) ist keine wesentliche Erhöhung der Minimumtemperatur zu erwarten, im Sommer beträgt die Zunahme 0.7 Grad und im Winter 1.1 Grad.

Signifikante regionale Unterschiede bei der Minimumtemperatur sind nicht zu erkennen.

Niederschlag

Zwischen den einzelnen Simulationen wird eine deutliche Variabilität sichtbar, wobei die großräumige Struktur stets erhalten bleibt.

Besonders im Winter führt die verstärkte Südwestanströmung zu einer Verstärkung des Luv/Lee-Effektes an den Mittelgebirgen.

Die Variabilität der Niederschlagsänderung ist von Station zu Station im Sommer deutlich höher als im Winter. Dies ist trotz einer Abnahme der mittleren Niederschläge mit einer deutlichen Verstärkung lokal begrenzter Schauer erklärbar.

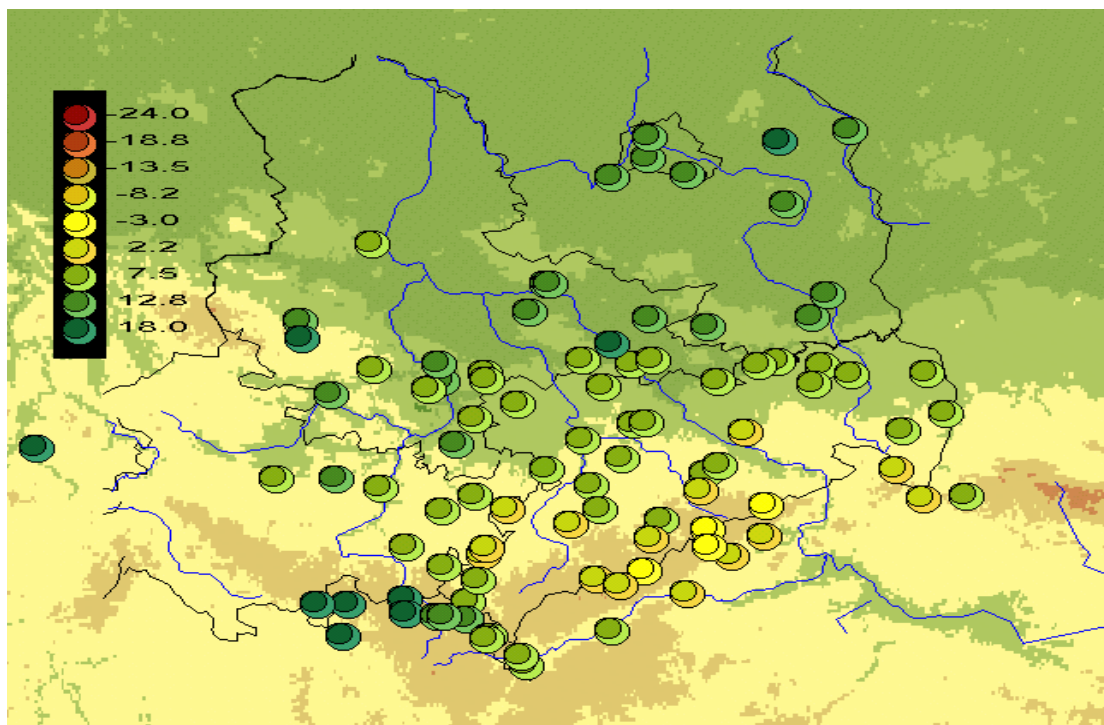


Abb. 5: Änderung der monatlichen Niederschlagssummen [mm] in der Dekade 2041-2050 gegenüber der Referenzperiode 1981/2000 (Winter; Mittel über 10 Simulationen)

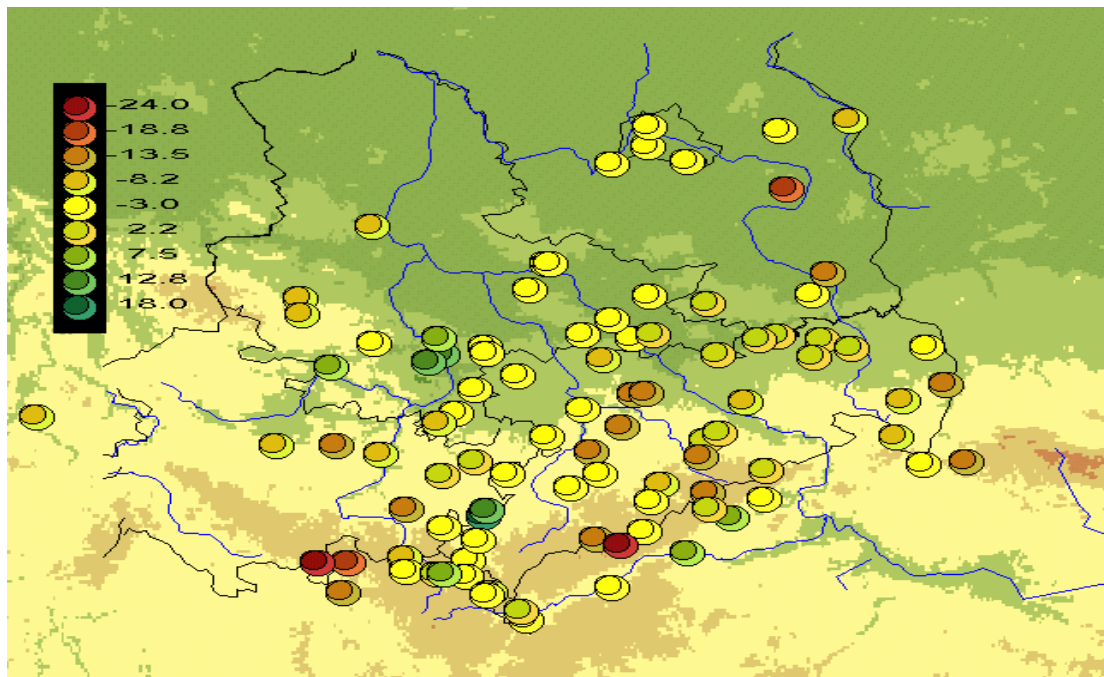


Abb. 6: Änderung der monatlichen Niederschlagssummen [mm] in der Dekade 2041-2050 gegenüber der Referenzperiode 1981/2000 (Sommer; Mittel über 10 Simulationen)

Bei der Änderung der Monatssumme der Niederschlagshöhe sind signifikante regionale Unterschiede erkennbar. Dies trifft besonders für den Winter zu, wo eine verstärkte Südwestanströmung zu einer Verstärkung des Luv/Lee-Effektes an den Mittelgebirgen führt. In Ansätzen ist dieser Effekt auch im Sommer sichtbar.

- Die Entwicklung der Niederschläge erfolgt von Dekade zu Dekade nicht gleichförmig. Relativ feuchte Jahrzehnte werden von trockneren Jahrzehnten abgelöst.
- Im Winter ist eine deutliche Zunahme der monatlichen Niederschlagssummen zu erwarten. Im Mittel beträgt diese 4.8 mm, wobei besonders im Stau der Mittelgebirge und außerhalb des Lee – Effektes der Mittelgebirge eine Zunahme der Niederschläge bis zu 20mm/Monat erwartet wird.
- In den anderen Jahreszeiten ist eine Abnahme der mittleren Monatsniederschläge zu erkennen. Im Mittel über alle Stationen und 10 Simulationen betragen diese Abnahmen im Frühling 4.7 mm, im Sommer 2.7 mm und im Herbst 4.5 mm.

Weitere Resultate liegen für die Klimaparameter Relative Feuchte, Sonnenscheindauer, Windgeschwindigkeit und Bedeckungsgrad vor, auf die hier jedoch nicht näher eingegangen werden kann..

Extremereignisse

Es tritt eine sehr deutliche Verringerung der Anzahl der Frost- und Eistage auf. Die Zahl der Sommertage und heißen Tage nimmt deutlich zu.

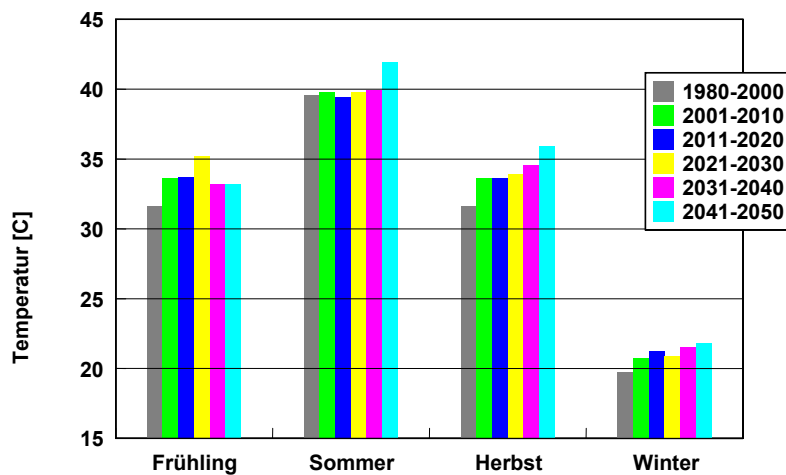


Abb. 7: Höchstes Tagesmaximum aus 40 Klimastationen und 10 Klimasimulationen für das Zeitintervall

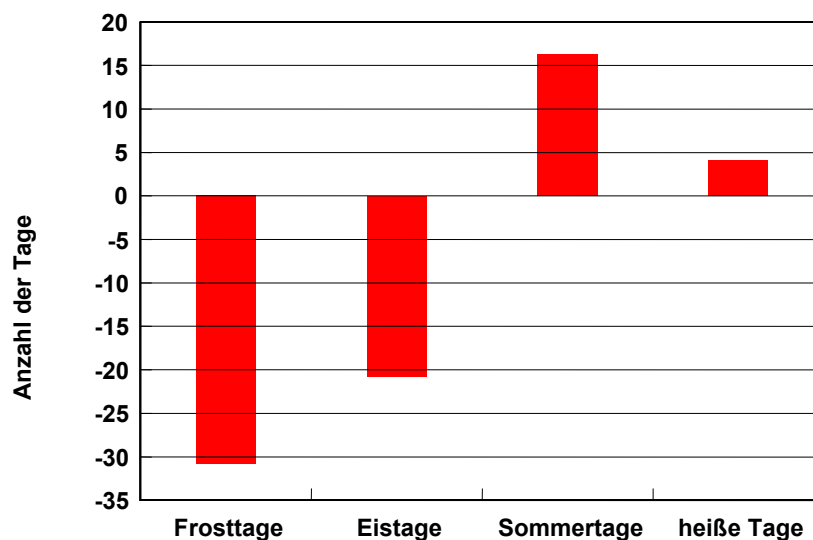


Abb. 8: Änderung der Anzahl der Ereignistage in der Dekade 2041-2050 gegenüber der Referenzperiode 1981/2000 (Mittel über 36 Stationen und 10 Simulationen)

Im Sommer werden Temperaturmaxima bis zu 42° C erwartet. Dieser Wert liegt über 2 Grad höher als der bisher gemessene absolute Höchstwert. Analog verläuft die Zunahme der höchsten Tagesminima.

Die stärkste Zunahme der Tage mit extremen Niederschlägen wird künftig im Sommer erwartet, obwohl es insgesamt trockener wird. Dies bedeutet, dass sich die Intensität der Schauerstätigkeit in den kommenden Jahrzehnten verstärken wird. Im Herbst und Winter sind hingegen keine größeren Veränderungen zu erwarten, obwohl es insgesamt mehr Niederschläge geben wird.

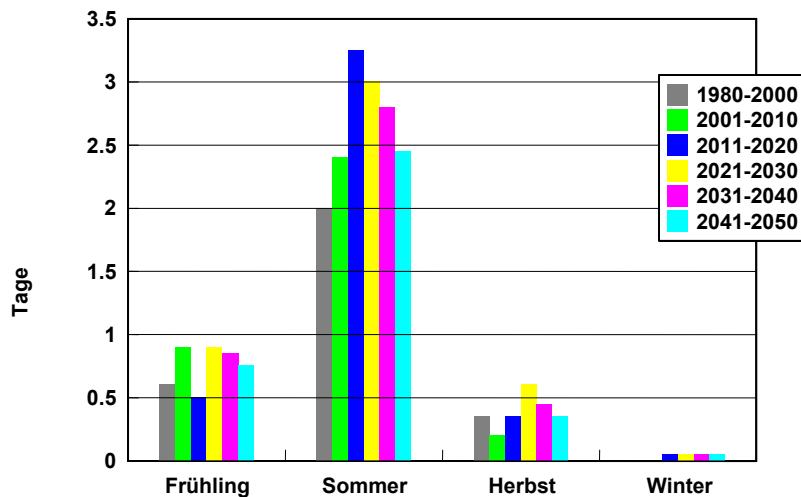


Abb. 8: Zahl der Tage pro Jahreszeit mit mehr als 55 mm Tagesniederschlag an mindestens einer der 100 Niederschlagsmessstellen

Im Frühling, Herbst und Winter werden sich die absoluten Spitzenwerte gegenüber den bisher aufgetretenen Werten des Zeitraumes 1980 bis 2000 deutlich erhöhen.

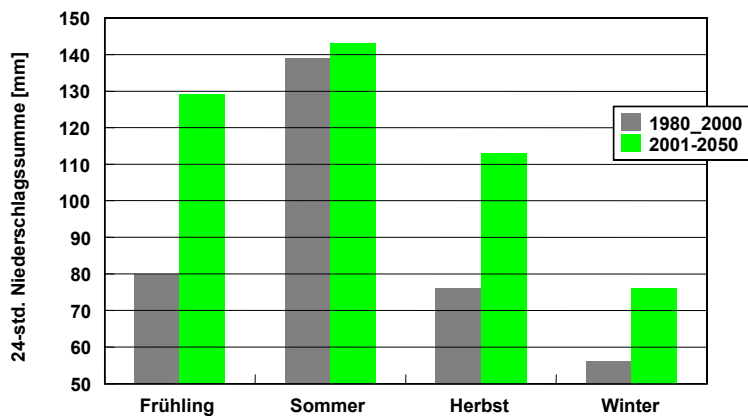


Abb. 9: Höchster simulierter Tagesniederschlag (100 Stationen; 10 Simulationen)

Abschließend sei darauf hingewiesen, dass die Angaben über die dargestellte Änderung der Zahl der Ereignistage (Frosttage, Eistage, Sommertage, heiße Tage) vergleichsweise am zuverlässigsten sind, da diese auf den Simulationen der Tagesmaximum- und Tagesminimum-Temperatur beruhen und diese unter allen Wetterelementen die sichersten Aussagen erlauben.

5 Ausblick

Bei den realisierten Szenarien handelt es sich um Abschätzungen, die den momentanen Wissensstand widerspiegeln und zu gegebener Zeit aktualisiert werden müssen.

Klimaszenarien auf der Grundlage verschiedener Regionalisierungsverfahren für Brandenburg, Sachsen und Bayern treffen in der Grundtendenz ähnliche Aussagen; das trifft insbesondere auf den Rückgang des Niederschlages im Sommer zu. Den Projektionen nach dürfte sich beispielsweise im Sommer die in der Grenzregion Brandenburg/Sachsen bereits erkennbare Tendenz zu mehr Trockenheit in den nächsten Jahrzehnten noch erheblich verschärfen. Wie verlässlich die gegenwärtig in Deutschland eingesetzten regionalen Klimamodelle sind, ist noch umstritten. Gegenwärtig erfolgt im Auftrag des Umweltbundesamtes ein Abgleich der aktuell in Deutschland eingesetzten Modelle (Mitwirkung: Deutscher Wetterdienst, Bundesländer Baden-Württemberg, Bayern, Sachsen).

Das sächsische Regionalisierungsverfahren WEREX wird inzwischen bereits auch in anderen Bundesländern eingesetzt (Hessen, Thüringen, Baden-Württemberg und Bayern). Damit bietet sich künftig die Möglichkeit, in größerem räumlichen Maßstab regionale Ausprägungen des Klimawandels vergleichen zu können und dabei Gemeinsamkeiten und Unterschiede herauszuarbeiten. Erfolgversprechende Ansätze zielen derzeit auf eine intensivere Abstimmung und Kooperation zwischen den Bundesländern, um die vorhandenen Ressourcen effizient im Sinne einer Schwerpunktbildung und Arbeitsteilung einsetzen zu können. Nur dadurch kann den gestiegenen Herausforderungen insbesondere im Hinblick auf die Bewältigung von Extremereignissen wie Trockenperioden oder Starkniederschläge wirksam begegnet werden.

6 Literatur

SÄCHSISCHES LANDESAMT FÜR UMWELT UND GEOLOGIE (2000): Forschungsvorhaben „Regionalisierung von Klimamodell-Ergebnissen des statistischen Verfahrens der Wetterlagenklassifikation und nachgeordneter multipler Regressionsanalyse (REKLISA)“, Abschlußbericht, Az.: 13-8802.3521/44

SÄCHSISCHES LANDESAMT FÜR UMWELT UND GEOLOGIE (2003): Forschungsvorhaben „Anwendung eines Verfahrens zur wetterlagenkonsistenten Projektion von Zeitreihen und deren Extreme mit Hilfe globaler Klimasimulationen (WEREX)“, Abschlußbericht, Az.: 13-8802.3521/51

ENKE, W., SCHNEIDER, F., KÜCHLER, W. (2003): A downscaling method for a weather pattern-consistent construction of time series and their extremes using GCM-scenarios. Atmospheric Environment (in Vorbereitung)

ENKE, W., KÜCHLER, W., SOMMER, W. (2000): Klimaprognose für Sachsen – Zusammenfassender Bericht, Sächsisches Landesamt für Umwelt und Geologie