



# **Integriertes Klimaschutzprogramm Hessen**

## **INKLIM 2012**

**Projektbaustein II:  
Klimawandel und Klimafolgen in Hessen**

**Abschlussbericht**

**HLUG, Dezernat I 1**

**Dezember 2005**



## Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	2
2	Ergebnisse der Teilprojekte	3
2.1	Klimawandel: Klima-Analyse	3
2.2	Klimawandel: Klima-Prognose	12
2.3	Klimafolgen in der Wasserwirtschaft (Grundwasser)	16
2.4	Klimafolgen in der Wasserwirtschaft (Oberflächengewässer)	23
2.5	Klimafolgen in der Landwirtschaft	30
2.6	Klimafolgen in der Forstwirtschaft	33
2.7	Klimafolgen in der Pflanzenphänologie	38
2.8	Klimafolgen im Weinbau	41
2.9	Klimafolgen im Obstbau	44
2.10	Klimafolgen im Bereich Naturschutz	48
2.11	Klimafolgen im Bereich Gesundheitsschutz	53
2.12	Klimafolgen im Bereich Bodenschutz	58
3	Zusammenfassung	65
4	Anhang: Zusammenstellung der Berichte und Dateien aus allen Projekten von INKLIM 2012 – Baustein II	67

## 1 Einleitung

Das Hessische Landesamt für Umwelt und Geologie (HLUG) ist vom Hessischen Ministerium für Umwelt, ländlichen Raum und Verbraucherschutz (HMULV) mit der Projektleitung für den Baustein II des Integrierten Klimaschutzprogramms Hessen (INKLIM 2012) beauftragt worden. Baustein II – Klimawandel und Klimafolgen in Hessen – wurde im Juni 2004 begonnen und Ende September 2005 beendet. Mit den Projektmitteln von rund 150.000 Euro wurden innerhalb von circa 16 Monaten zwölf Teilprojekte durchgeführt, deren beachtliche Ergebnisse im Kapitel 2 dargestellt werden. In Kapitel 3 wird eine Zusammenfassung vorgenommen.

Wichtige Ereignisse im Verlauf des Ablaufs von Baustein II waren:

- Projekttreffen im HLUG am 29. Juni 2004
- Projekttreffen im HLUG am 17. November 2004
- Vorstellung erster Ergebnisse beim 8. Hessischen Klimaschutzforum am 18. November 2004 in Wiesbaden
- Vorlage des Zwischenberichts im Februar 2005
- Abschlussworkshop zum Baustein II im HLUG am 6. Juli 2005
- Vorstellung von Ergebnissen beim 9. Hessischen Klimaschutzforum am 30. November 2005 in Kassel
- Vorlage des Abschlussberichts im Dezember 2005.

## 2 Ergebnisse der Teilprojekte

### 2.1 Klimawandel: Klima-Analyse

**Thema:** Analyse der Klimaveränderungen in Hessen für den Zeitraum 1901-2003

**Auftragnehmer:** Prof. Dr. Christian-D. Schönwiese, Institut für Atmosphäre und Umwelt, J.W. Goethe-Universität, Frankfurt a. M.

**Projektbeteiligte:** Prof. Dr. Christian-D. Schönwiese, Dr. Tim Staeger, Heiko Steiner

**Projekt-Laufzeit:** September 2004 bis Mai 2005, Abschlussbericht zum 31.07.2005

#### Beschreibung

Der globale Klimawandel im Industriezeitalter, d. h. in den letzten ungefähr ein bis zwei Jahrhunderten, ist eine Beobachtungstatsache. Und es besteht weitgehender wissenschaftlicher Konsens darüber, dass dabei der Klimafaktor Mensch in zunehmenden Ausmaß beteiligt ist, und zwar vor allem durch die Emission klimawirksamer Spurengase (Kohlendioxid usw.) aufgrund der Nutzung fossiler Energieträger (Kohle, Öl, Gas, einschließlich Verkehr; anthropogener „Treibhauseffekt“). Insbesondere der Anstieg der global gemittelten bodennahen Lufttemperatur („Global Warming“) in den letzten Jahrzehnten wird mit großer Wahrscheinlichkeit darauf zurückgeführt.

Vor diesem Hintergrund ist anhand von Beobachtungsdaten der Temperatur und des Niederschlags untersucht worden, welche Erkenntnisse sich über die Klimaveränderungen in Hessen gewinnen lassen. Es ist nämlich ebenfalls offenbar, dass sich das Klima regional bzw. jahreszeitlich gesehen sehr unterschiedlich ändert. Zu diesem Zweck sind für die Zeit 1951-2000 und die Region 49° bis 52° Nord / 7° bis 11° Ost – das ist Hessen mit Teilbereichen der angrenzenden Bundesländer – folgende Daten betrachtet worden: Temperatur an 53 Stationen und Niederschlag an 674 Stationen. Die Zeit ab 1901 ist leider weniger gut abgedeckt. Immerhin konnten für diese Zeit aber die Temperaturdaten von 4 Stationen und die Niederschlagsdaten von 10 Stationen genutzt werden. Ausgehend von den Klimadaten werden nun folgende Fragen beantwortet:

- Wie groß waren in dieser Zeit die Temperatur- und Niederschlagstrends? Gibt es dabei jahreszeitliche/monatliche und regionale Unterschiede?
- Gibt es auffällige Fluktuationen, die diesen Trends überlagert sind?
- Hat sich die Häufigkeit von extremen Temperaturen und Niederschlägen systematisch geändert?
- Lassen sich auch in einer so kleinen Region wie Hessen Hinweise auf Ursachen finden, die beim globalen Klimawandel eine Rolle spielen?
- Liefern die bisher beobachteten Klimatrends Ansätze für die Abschätzung der künftigen Entwicklung?

Die Antworten auf diese Fragen sind in einem ausführlichen Projektbericht zusammengestellt worden. Die wichtigsten dieser Ergebnisse werden im Folgenden kurz zusammengefasst.

## Ergebnisse

### Temperaturtrends

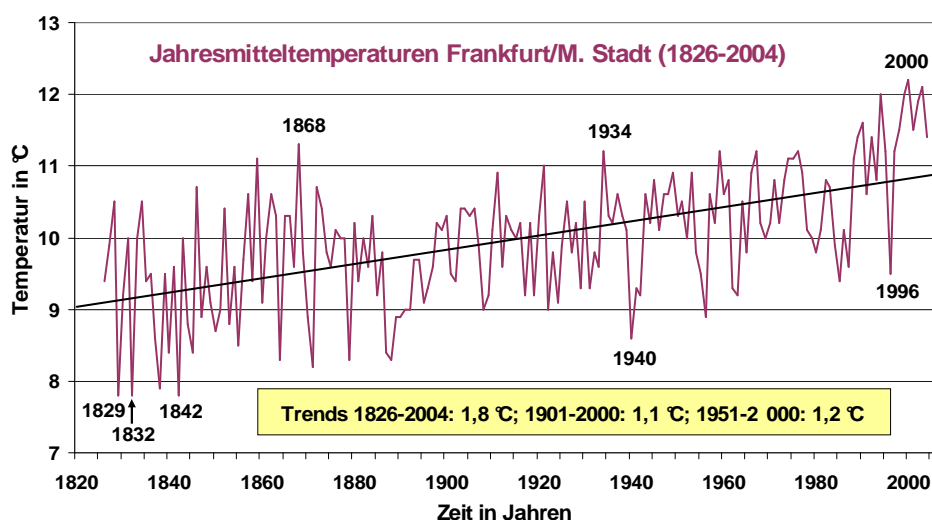
Im Flächenmittel und im Mittel über alle Jahreszeiten hat sich Hessen in der Zeit 1951-2000 um 0,9 °C erwärmt, siehe Tab. 1. Das entspricht fast genau der Erwärmung, wie sie auch für das Flächenmittel Deutschland gefunden worden ist. Der größte Beitrag dazu kommt vom Winter mit 1,6 °C, der geringste vom Herbst mit 0,2 °C. Monatlich gesehen ist jedoch der August mit 1,8 °C Erwärmung der Spitzenreiter, gefolgt von Januar, Februar (jeweils 1,7 °C), März (1,6 °C) und Mai (1,4 °C). Dagegen hat sich der November abgekühlt, jedoch mit -0,1 °C nur äußerst gering.

**Tab. 1:** Übersicht der in Hessen (Flächenmittel) beobachteten Temperaturtrends 1951-2000.

Frühling	Sommer	Herbst	Winter	Jahr
1,1 °C	1,0 °C	0,2 °C	1,6 °C	<b>0,9 °C</b>

Hinweis: Der Jahrestrend ist aus mehreren Gründen nicht gleich dem Mittelwert der jahreszeitlichen Trends. Zum einen beeinflussen die den Trends stets überlagerten Fluktuationen und Anomalien (vgl. Abb. 1) die Trendwerte in sehr unterschiedlicher Weise; dies kann sich bei der Zusammenfassung zu Jahreswerten mehr oder weniger aufheben bzw. anders gestalten. Weiterhin enthält der Winterwert jeweils auch die Dezember-Daten des Vorjahres.

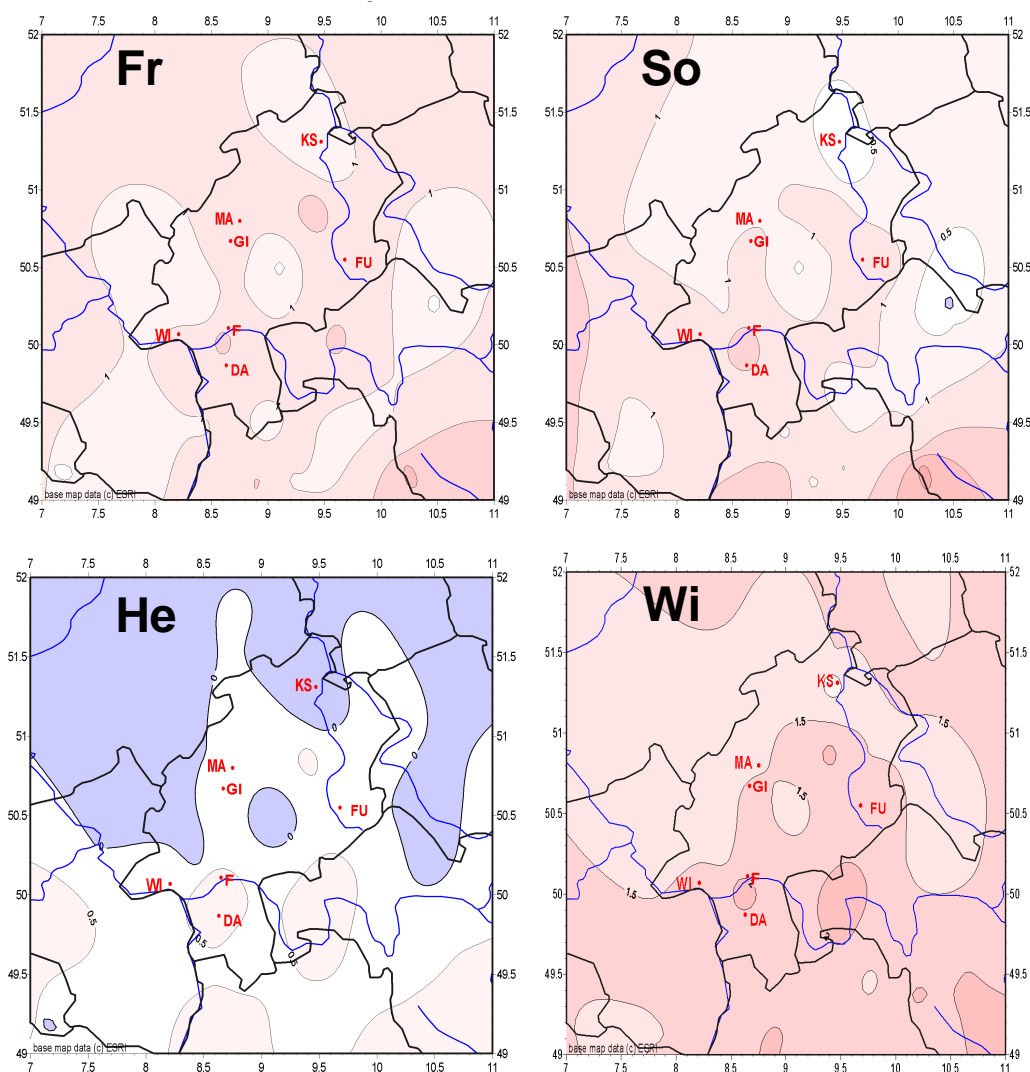
1901 bis 2003 liegen die jährlichen Erwärmungen an den erfassten Stationen im Bereich von 0,7 °C bis 1,8 °C und somit zumeist deutlich über dem globalen Trend (1901-2000: +0,7 °C). Beispielsweise beträgt die Erwärmung an der Station Frankfurt am Main 1901-2000: 1,1 °C bzw. 1901-2003: 1,4 °C, seit Beobachtungsbeginn im Jahr 1826: 1,8 °C und allein in den letzten 20 Jahren, wo auch global der Temperaturanstieg besonders drastisch gewesen ist: 1,5 °C (vgl. Abbildung 1). Dies zeigt zugleich, dass die Klimatrends je nach betrachtetem Zeitintervall sehr unterschiedlich sind, was an den überlagerten Fluktuationen und einzelnen Extremwerten liegt. Diese Fluktuationen spielen sich beispielsweise in Frankfurt mit Zykluslängen von unter anderem 2,3 , 5,4 und 7,8 Jahren ab.



**Abb. 1:** Jahresmittelwerte 1826-2004 der bodennahen Lufttemperatur in Frankfurt/Main (Stadtgebiet), mit Gesamttrend und Trendwerten für verschiedene Zeitintervalle (Datenquellen: Ziegler und König, 1896; Mollwo, 1958; Giesel, 1988; DWD; bearbeitet).

Bei der Analyse der räumlichen Strukturen der Temperaturänderungen in Hessen zeigt sich folgendes Bild: Relativ gleichmäßig über Hessen verteilte Erwärmungen findet man im Januar bis März, Mai, Juli, August und Dezember, mit einem deutlichen Maximum im August. Im April, September und Oktober überwiegt zwar die Erwärmung, aber teilweise treten auch Abkühlungen in Erscheinung. Im November überwiegen diese Abkühlungen, die Regionen Frankfurt-Darmstadt und Fulda ausgenommen, und im Juni ergibt sich eine Zweiteilung: Abkühlung in Nord- und teilweise auch Mittelhessen, Erwärmung in Südhessen.

Fasst man die Temperaturdaten (1951-2000) jahreszeitlich zusammen (Winter: Dezember des Vorjahres, Januar und Februar; Frühling: März-Mai usw.), so ergeben sich die in Abb. 2 gezeigten Trendstrukturen. Wie in Tab. 1 fällt dabei die starke winterliche Erwärmung auf, die im Bereich von ca. 1-2 °C liegt, mit den höchsten Werten in Südhessen. Mit einem Bereich von ca. 0,5-1,5 °C ist die Erwärmung im Frühjahr und Sommer etwas geringer, wobei – im Gegensatz zum Winter – die sommerliche Erwärmung vor allem von einem Monat, nämlich dem August (vgl. oben), getragen wird. Der Herbst weist mit Trends zwischen ca. -0,5 °C und +0,5 °C auch Abkühlungen auf, und zwar in der Region Kassel und weiteren relativ kleinen Regionen in West- und Mittelhessen, während in Südhessen auch in dieser Jahreszeit die Erwärmung dominiert.



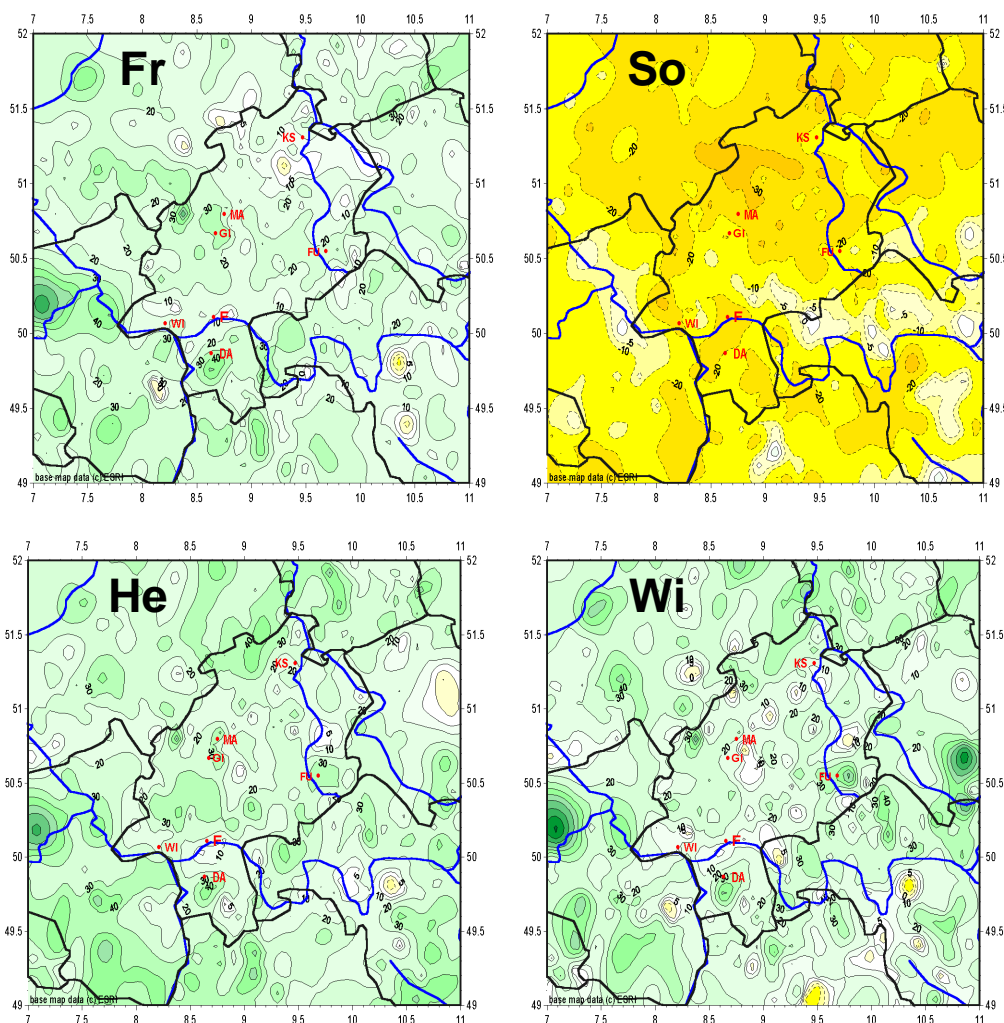
**Abb. 2:** Räumliche Verteilung der jahreszeitlichen Temperaturtrends 1951-2000 in Hessen in °C (Fr: Frühling, Monate März-Mai; So: Sommer, Juni-August; He: Herbst, September-November; Wi: Winter, Dezember des Vorjahres, Januar und Februar). Erwärmungen sind durch Rot-, Abkühlungen durch Blautöne hervorgehoben.

Niederschlagstrends

Der Niederschlag zeigt ein wesentlich komplizierteres Trendbild. Zunächst, bezogen auf das Flächenmittel Hessen und die Zeit 1951-2000, stehen Niederschlagszunahmen im Herbst, Winter und Frühling mit rund 25 %, 22 % und 20 % sommerlichen Abnahmen um rund 18 % gegenüber, siehe Tab. 2. In der Jahressumme ist eine Zunahme um 8,5 % eingetreten. Monatlich gesehen fallen der März mit einer enormen Zunahme um rund 62 % und der August mit einer Abnahme um 18 % besonders auf, Trends, die in diesen Monaten zeitlich wie auch regional innerhalb Hessens ziemlich stabil sind. In ähnlicher Weise zeigen 1901-2000/2003 alle in Hessen erfassten Stationen Niederschlagszunahmen im Winter, Frühling und Herbst und fast alle Abnahmen im Sommer.

**Tab. 2:** Übersicht der in Hessen (Flächenmittel) beobachteten Niederschlagstrends 1951-2000 (vgl. auch Hinweis unter Tab. 1).

Frühling	Sommer	Herbst	Winter	Jahr
+ 20,3 %	- 17,8 %	+ 24,9 %	+ 22,2 %	+ 8,5 %



**Abb. 3:** Räumliche Verteilung der jahreszeitlichen Niederschlagstrends 1951-2000 in Hessen in Prozent. Zunahmen sind durch Grün-, Abnahmen durch Gelbtöne hervorgehoben.

Bei regionalen Differenzierungen ist für die Zeit 1951-2000 eine scharfe Zwei- bzw. Dreiteilung im Juli bemerkenswert: Abnahme bis über 30 % in Nordhessen, starke Zunahme bis über 50 % in Mittelhessen und eher moderate Zunahme (ca. 5-20 %) in Südhessen. Ebenfalls regional unterschiedlich, aber mit unsystematischer Verteilung der Zu- und Abnahme-Bereiche, bei überwiegender Zunahme, zeigen sich die Monate Januar, Februar, April, September und November. Im Mai lassen sich größere Bereiche mit Abnahmen auffinden, wobei im Hessensmittel die Zunahme gerade noch überwiegt, und im Juni ist die Abnahme flächendeckend, ähnlich wie im August, wenn auch nicht so extrem (Juni je nach Station ca. 0-30 %, August bis über 50 %).

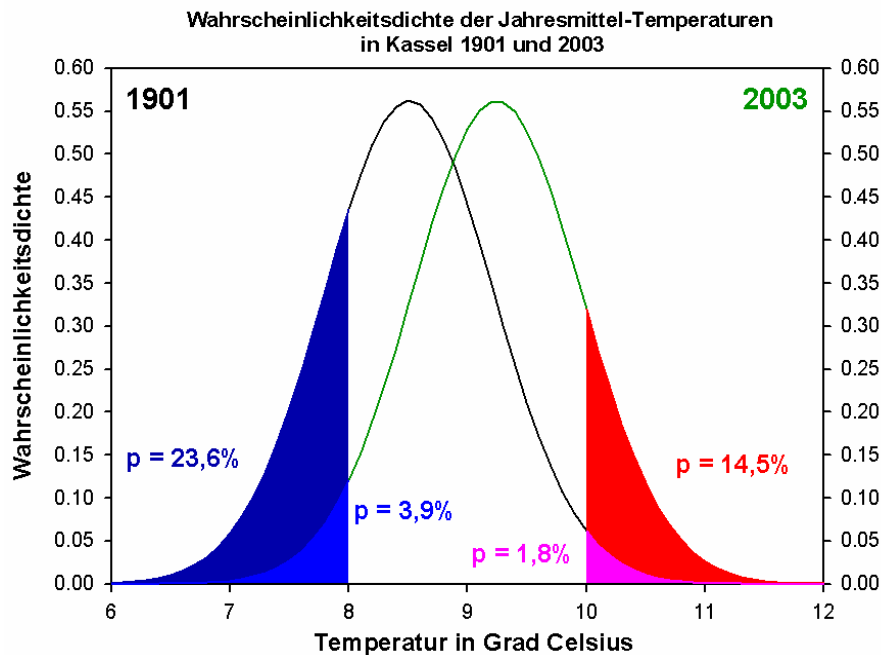
Jahreszeitlich zusammengefasst, siehe Abb. 3, fällt wie in Tab. 2 der Sommer mit Niederschlagsabnahmen aus dem Rahmen, die sich regional zwischen ca. 5 % und 30 % bewegen. In den anderen Jahreszeiten treten fast nur Zunahmen in Erscheinung, und zwar zwischen ca. 0 % und 40 %. Bemerkenswert ist dabei die hochkomplizierte räumliche Struktur, die allerdings bei einem Klimaelement mit so ausgeprägter räumlicher Variabilität, wie es der Niederschlag ist, nicht überraschen kann.

### Extremwert-Trends

Im Rahmen des Klimawandels sind außer den Trends der Mittelwerte auch Erkenntnisse darüber gefragt, ob diese Trends mit Veränderungen der Häufigkeit und somit Wahrscheinlichkeit des Eintretens von Extremwerten verknüpft sind. Um dieser Frage nachzugehen, müssen an den einzelnen Stationen die Häufigkeitsverteilungen und ihre zeitlichen Änderungen betrachtet werden. Dank einer beim Auftragnehmer neu entwickelten Methode ist es möglich, solche Veränderungen im zeitlich kontinuierlichen Ablauf zu berechnen und dementsprechend auch die Veränderung der Eintrittswahrscheinlichkeit relativ hoher bzw. relativ niedriger Werte anzugeben. Bei den hier betrachteten Klimaelementen Temperatur und Niederschlag geht es dabei um extreme Kälte bzw. extreme Hitze sowie extreme Stark- bzw. extrem geringe Niederschläge.

In Abb. 4 ist diese Analysetechnik anhand des Beispiels der Jahresmitteltemperaturen 1901-2003 in Kassel veranschaulicht. Diese Daten folgen recht genau einer sog. Normalverteilung, die die Form einer symmetrischen Glockenkurve aufweist. In der Zeit 1901-2003 hat sie sich ohne signifikante Änderung der Streuung (anschaulich: Breite der Verteilung) systematisch zu wärmeren Werten hin verschoben (vgl. schwarze und grüne Kurve in Abb. 4). Da die Fläche unter der gesamten Kurve jeweils gleich 1 bzw. 100 % ist (Normierung), gibt die Fläche oberhalb beliebiger Wertintervalle an, mit welcher Wahrscheinlichkeit diese Werte zu erwarten sind. Für das in Abb. 4 gezeigte Beispiel Kassel bedeutet das, dass die Wahrscheinlichkeit dafür, dass Jahresmittelwerte unter 8 °C eintreten, von 23,6 % auf 3,9 % abgesunken, dagegen die Wahrscheinlichkeit der Werte oberhalb 10 °C von 1,8 % auf 14,5 % angestiegen ist.

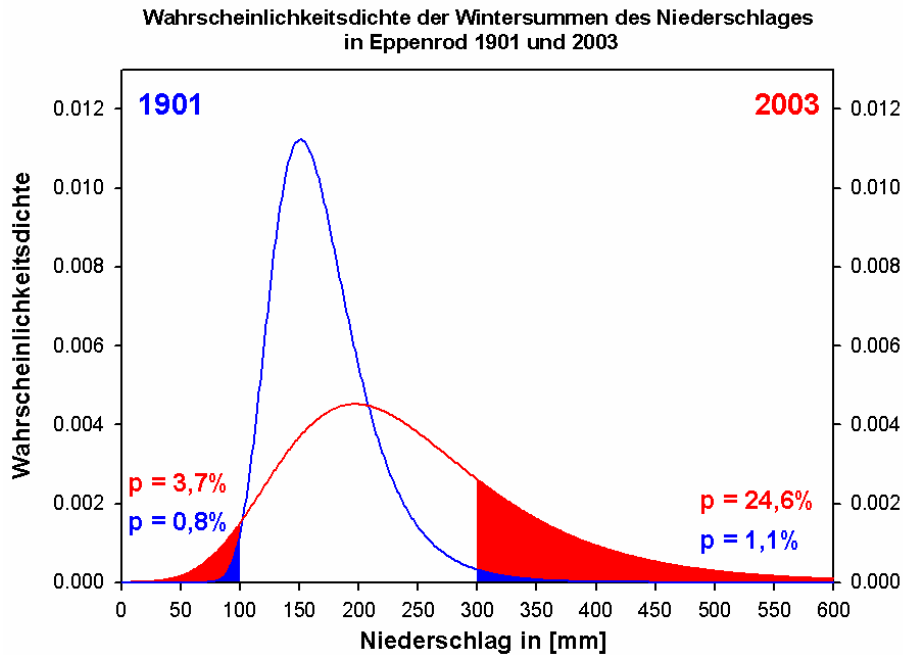
Für ganz Hessen lässt sich in groben Zügen sagen, dass sich bei der Temperatur – da sich in diesem Fall, zumindest bei den Monatsdaten, die Streuung nicht systematisch geändert hat – im Extremverhalten die Trends widerspiegeln. Das heißt: Extrem kalte Jahreszeiten bzw. Monate werden seltener, extrem warme häufiger. Das gilt weitgehend für Frühling und Sommer. Im Winter ist das Verhalten insofern etwas anders, als bei den Tagesdaten die Eintrittswahrscheinlichkeit extrem kalter Tage nicht in dem Maß abgenommen wie sie für extrem warme Tage zugenommen hat. Der Herbst zeigt, vergleichbar den Trends, kaum eine Neigung zu Häufigkeitsänderungen von Extremereignissen.



**Abb. 4:** Veränderung der Wahrscheinlichkeit des Eintretens relativ hoher bzw. niedriger Werte der Jahresmitteltemperatur in Kassel in der Zeit zwischen 1901, schwarze Kurve, und 2003, grüne Kurve. Diese Kurve ist idealisierend (hier sog. Normalverteilung) an die Häufigkeitsverteilung der Beobachtungsdaten angepasst und gibt in normierter Form (d.h. die Fläche unter der gesamten Kurve beträgt 1 oder 100 %) an, mit welcher Wahrscheinlichkeit Daten in bestimmten Wertebereichen zu erwarten sind. Daher wird sie auch Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion genannt. Im vorliegenden Fall ist die Wahrscheinlichkeit, dass Jahresmittelwerte unter 8 °C eintreten, von 23,6 % (dunkelblaue Fläche) auf 3,9 % (hellblaue Fläche) abgesunken, dagegen die Wahrscheinlichkeit, dass Jahresmittelwerte über 10 °C eintreten, von 1,8 % (lila Fläche) auf 14,5 % (rote Fläche) angestiegen.

Abb. 5 bringt insofern ein Gegenbeispiel zu Abb. 4, als sich in diesem Fall zwar auch der Mittelwert, aber gleichzeitig außerdem die Streuung erhöht hat. Es handelt sich um die bei Limburg im Lahn-Einzugsgebiet an der Grenze zu Hessen gelegene Station Eppenrod, deren Winterniederschläge analysiert worden sind. Dies bedeutet, dass die Wahrscheinlichkeit für das Eintreten sozusagen mittlerer Niederschläge abgenommen, für das Eintreten sowohl extrem hoher als auch extrem niedriger Niederschläge jedoch zugenommen hat. In diesem Beispiel ist die Wahrscheinlichkeit für Winterniederschläge von mehr als 300 mm von 1,1 % auf 24,6 % und somit enorm angestiegen, aber auch die Wahrscheinlichkeit für weniger als 100 mm, und zwar von 0,8 % auf 3,7 %. Es handelt sich somit um ein eklatantes Beispiel für ein in beiderlei Hinsicht extremer werdendes Klima.

Für ganz Hessen sind die Abnahme extrem feuchter Monate im Sommer und die Zunahme extrem feuchter Tage im Herbst und Winter am auffälligsten. Dabei neigt wie in Abb. 5 der Winter allgemein zu stärkerer Streuung, so dass die Wahrscheinlichkeit sowohl extrem trockener als auch extrem feuchter Tage bzw. Monate zunimmt, jeweils auf Kosten mittlerer Gegebenheiten. Im Sommer ist dagegen eher das Gegenteil feststellbar, das heißt, mittlere Gegebenheiten werden häufiger, aber zugleich auch extrem viel Niederschlag wesentlich seltener und extrem wenig Niederschlag etwas häufiger. Immer wieder fällt dabei der Monat August ins Auge, der auf dem Weg zu einem besonders extrem warm-trockenen Monat ist.



**Abb. 5:** Veränderung der Wahrscheinlichkeit des Eintretens relativ hoher bzw. niedriger Werte des Winter-Niederschlags in Eppenrod (bei Limburg) in der Zeit zwischen 1901, blaue Kurve, und 2003, rote Kurve. Im Gegensatz zu Abb. 4 folgen diese Daten einer (asymmetrischen) Gumbel-Verteilung, die sich zwar auch zu höheren Werten hin verschoben hat, aber gleichzeitig „breiter“ geworden ist (Zunahme der Streuung). Daher hat sowohl die Wahrscheinlichkeit extrem hoher als auch extrem niedriger Werte zugenommen, und zwar oberhalb von 300 mm von 1,1 % auf 24,6 % und unterhalb von 100 mm von 0,8 % auf 3,7 %.

Wie drastisch zum Teil die Änderungen des Extremverhaltens sind, mögen zwei Beispiele belegen, die sich jeweils auf die Zeitspanne 1901-2001 beziehen und von einer so genannten Jährlichkeit von 100 Jahren ausgehen. Darunter versteht man Ereignisse, die im statistischen Mittel nur einmal innerhalb von 100 Jahren zu erwarten sind. So ist in Alsfeld (Mittelhessen) die Jährlichkeit für einen extrem feuchten Winter auf 5,6 Jahre zurückgegangen, d. h. nun ist er viel häufiger als zu der Zeit um 1900, nämlich im statistischen Mittel alle 5,6 Jahre, zu erwarten. Die entsprechende Jährlichkeit eines extrem feuchten Sommers in Bad Camberg (Taunus) ist dagegen so stark angestiegen, dass die Wahrscheinlichkeit dafür nun nahe Null ist.

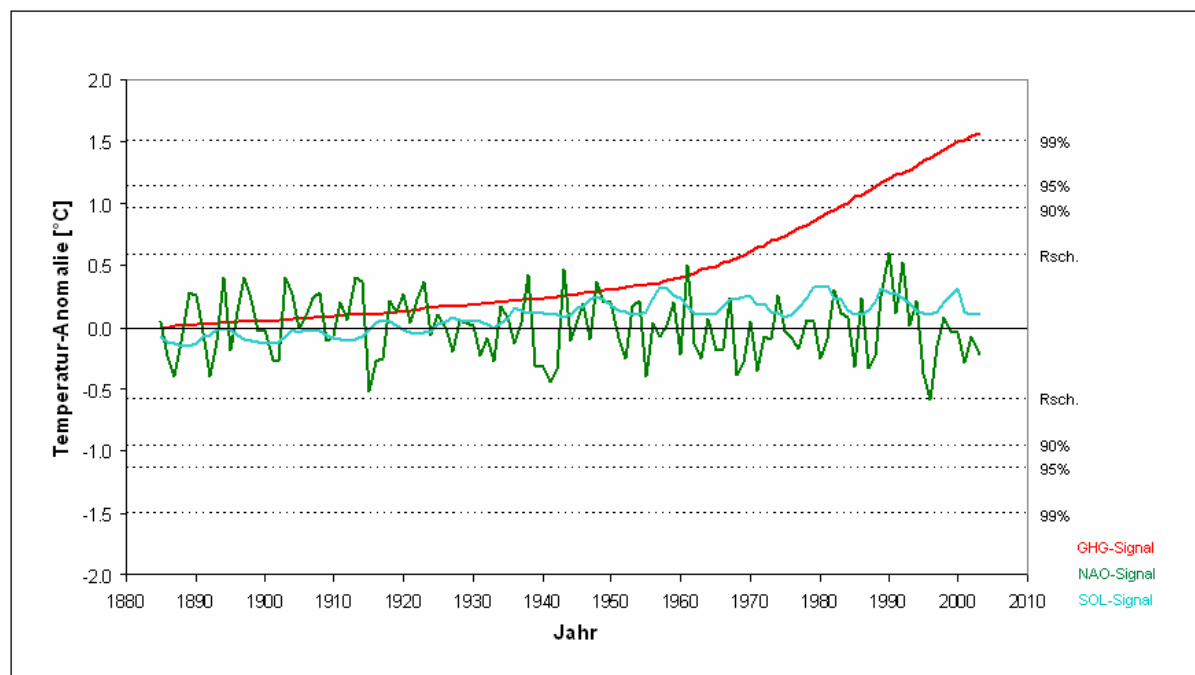
### Ursachenanalyse

Analysen zur Verursachung des in Hessen beobachteten Klimawandels sind in diesem Projekt nur sehr randständig durchgeführt worden, weil diesem Problem eher unter globalen Aspekten und mit Hilfe aufwendiger Klimamodelle nachgegangen werden muss, in denen auf physikalischer bzw. physikochemischer Basis die Effekte sowohl natürlicher als auch anthropogener Einflüsse auf das Klima simuliert werden (zum anthropogenen Einfluss vgl. Klima-Prognose der Firma Meteo-Research, Kapitel 2.2.). Zudem hat sich die Arbeitsgruppe des Auftragnehmers in einem umfangreichen, vom Umweltbundesamt (UBA) geförderten Projekt (Abschlussbericht 2000) mit der Frage beschäftigt, ob es möglich ist, allein aufgrund der Analyse von Beobachtungsdaten natürliche und anthropogene Effekte im Klimageschehen zu trennen und somit den Anteil zu erkennen, der auf den Klimafaktor Mensch zurückgeht. Damit ist vor allem der Ausstoß von klimawirksamen Spurengasen wie CO<sub>2</sub> (primär aufgrund der Nutzung fossiler Energieträger und Waldrodungen) usw. gemeint (anthropogener „Treibhauseffekt“).

Empirisch, somit rückblickend, und mit Hilfe statistischer Methoden lässt sich nun zeigen, dass zeitliche und räumliche Ähnlichkeiten zwischen potentiellen Einflussgrößen wie Sonnenaktivität, Vulkanismus, Zirkulationsvorgängen wie der für Europa wichtigen Nordatlantik-

Oszillation NAO (damit wird die Luftdruckkonstellation über dem Nordatlantik gekennzeichnet, die für die nach Europa gerichtete Strömungskomponente entscheidend ist) und eben auch dem anthropogenen „Treibhauseffekt“ einerseits sowie Klimatelementen wie insbesondere der Lufttemperatur andererseits Abschätzungen darüber erlauben, in welchem Ausmaß diese Einflüsse bisher das Klima gesteuert haben (Korrelations- und Regressionsrechnungen, aber auch aufwendigere Techniken). Im oben genannten UBA-Projekt konnte gezeigt werden, dass dies am besten mit Blick auf die globale gemittelte Lufttemperatur gelingt, wobei 80 % der beobachteten Temperaturvarianz durch solche Einflüsse erklärbar sind, davon 60 % durch den anthropogenen „Treibhauseffekt“. Dieser anthropogene Anteil ist durch eine langfristige Trendstruktur charakterisiert. Generell werden die erklärbaren Varianzanteile umso geringer, je kleinräumiger die Betrachtungen sind, und verschwinden fast völlig beim Niederschlag.

Trotzdem lag es nahe, diese empirisch-statistische Analysetechnik zumindest auch auf einige in Hessen beobachtete lange Temperaturreihen anzuwenden, so beispielsweise auch auf die Reihe der Frankfurter Temperaturjahresmittelwerte 1885-2003. Als Resultat ergibt sich, dass darin der anthropogene „Treibhauseffekt“ mit einem Varianzanteil von rund 39 % entdeckbar ist, während es alle natürlichen Einflüsse zusammen auf rund 32 % bringen. Die Abb. 6 zeigt den zeitlichen Verlauf der zugehörigen Signale, d. h. der Temperatureffekte, die sich aufgrund der jeweils erklärten Varianz bestimmten einzelnen Einflussfaktoren zuordnen lassen. Offenbar ist die durch die Treibhausgase (engl. greenhouse gases, GHG) erklärte Varianz, ähnlich wie bei der globalen Mitteltemperatur, praktisch allein in einem Erwärmungstrend realisiert, der rund 1,5 °C beträgt.



**Abb. 6:** Temperaturvariationen, sog. Signale, der Frankfurter Temperaturreihe 1885-2003 (vgl. Abb. 1), die sich aufgrund einer statistischen Analyse auf die Einflussgrößen Sonnenaktivität (SOL, hellblau), Nordatlantik-Oszillation (NAO, grün) und den anthropogenen „Treibhauseffekt“ (greenhouse gases, GHG, rot) zurückführen lassen. Die gestrichelten Linien markieren die Signifikanzgrenzen gegenüber zufälliger Variabilität (sog. Zufallsrauschen). Demnach ist der anthropogen bedingte Temperaturanstieg (rote Kurve) seit etwa 1980 mit einer Wahrscheinlichkeit von 90 % und neuerdings sogar mit einer Wahrscheinlichkeit von 99 % realistisch und kein zufälliger Artefakt der statistischen Analyse.

Der tatsächlich beobachtete Trend ist deswegen etwas geringer, weil zeitweise auch eine anthropogene Abkühlung durch Sulfatpartikel eingetreten ist, die auf Schwefeldioxid-Emissionen zurückgeht, und auch die Frankfurter „städtische Wärmeinsel“ nicht vernachlässigt werden darf, die einen Trendbeitrag von ungefähr 0,2-0,3 °C geliefert haben dürfte. Obwohl die im Detail weitaus kompliziertere Problematik hier nur angedeutet werden kann, lässt sich doch sagen, dass zumindest in der Temperaturentwicklung von Hessen somit auch ein erheblicher globaler Anteil enthalten ist, der sich dem Klimafaktor Mensch zuschreiben lässt.

#### Vergleich von Klimaanalyse und Klimaprognose

Vergleicht man unter dieser Prämisse, das heißt, dass in den Beobachtungsdaten der Vergangenheit bereits ein erheblicher Anteil menschlicher Beeinflussung realisiert ist, die daraus abgeleiteten Trends mit Modellprojektionen in die Zukunft (gemeint ist hier wiederum das oben zitierte Projekt der Firma Meteo-Research), die aufgrund von Szenarien genau von einem solchen Einfluss ausgehen (allerdings nur von diesem Einfluss, was die Vergleichbarkeit wieder einschränkt), so lässt sich sagen: Bei der Temperatur ist auf Jahreszeitenbasis die Übereinstimmung sehr gut, so dass auch in Zukunft die stärkste Erwärmung im Winter und die geringste im Herbst erwartet werden kann. Ähnliches gilt für die winterliche Niederschlagszunahme, während die sommerliche Niederschlagsabnahme mit Blick auf die Beobachtungen der Vergangenheit noch deutlich stärker ausfallen könnte als derzeit aufgrund von Klimamodellrechnungen und daraus abgeleiteten Regionalprognosen erwartet wird. Dagegen stehen sich im Frühling und Herbst in Modellprojektionen erwartete Niederschlagsabnahmen und in den Beobachtungen der Vergangenheit festgestellte Zunahmen gegenüber. Daher besteht bei der künftigen Niederschlagsentwicklung in diesen Übergangsjahreszeiten eine besondere Unsicherheit.

#### **Ausblick**

Die bisher beobachteten Klimaänderungen, die im Gegensatz zu Zukunftsprojektionen immerhin gesicherte Fakten sind, können dazu dienen, sowohl die Auswirkungen dieser Änderungen eingehender zu untersuchen als auch sich bei Anpassungsstrategien daran zu orientieren. Im Vergleich mit Zukunftsprojektionen, die möglichst auf unterschiedlichen Szenarien und unterschiedlichen Klimamodellrechnungen beruhen sollten, lässt sich – wenn auch mit einiger Vorsicht – abschätzen, welche dieser Projektionen und in welchen Teilbereichen relativ zuverlässig sind bzw. wo besondere Unsicherheiten bestehen. Aus Sicht der Klimamodellrechnungen sollten sich solche Unsicherheiten durch die Nutzung alternativer Szenarien der Emission von Treibhausgasen und verschiedener Modellvarianten abbauen lassen.

Aber auch bei der klimatologischen Analyse der Vergangenheit gibt es durchaus noch Forschungsbedarf, z. B. bei der Frage, ob bei Situationen, die zum Auftreten von Extremwerten führen, eine Änderung der Erhaltungsneigung und somit Andauer nachweisbar ist. Solche noch kaum untersuchten Fragestellungen könnten auch Aufschluss darüber bringen, ob es in der Abfolge extremer Tage, z. B. mit großer Hitze, Trockenheit oder auch relativ starkem Niederschlag, Änderungen gibt. Insgesamt sollte ein ständiges und genaues Klima-Monitoring, d. h. eine laufend aktualisierte Erfassung und Analyse der Klima-Beobachtungsdaten, zu weiterem Erkenntnisgewinn verhelfen.

## 2.2 Klimawandel: Klima-Prognose

**Thema:** Erweiterung des Simulationszeitraumes der wetterlagenbasierten Regionalisierungsmethode auf der Basis des ECHAM4-OPYC3 Laufes für die Dekaden 2011/2020 und 2051/2100, Szenario B2

**Auftragnehmer:** Dr. Wolfgang Enke, Meteo-Research und Freie Universität Berlin

**Projektbeteiligte:** Dr. Wolfgang Enke, Dr. Thomas Deutschländer, Dr. Frank Schneider

**Projekt-Laufzeit:** Juli 2004 bis November 2004

### Beschreibung

Klimaprognose für Hessen für die Zeiträume 2011 bis 2021 sowie 2051 bis 2100 mit derselben Methode wie für eine im Jahr 2003 abgeschlossene Klimaprognose (für den Zeitraum von 2021 bis 2050). Dabei handelt es sich um eine statistische Regionalisierungsmethode, die von Dr. Enke in den 1990er Jahren entwickelt und kontinuierlich verbessert wurde. Anhand von Reanalyse-Datensätzen werden zunächst objektive Wetterlagen abgeleitet und diese nach bestimmten Kriterien klassifiziert. Wenn eine synthetische Abfolge der zufällig zusammengesetzten Witterungsabschnitte bestimmte Randbedingungen erfüllt, wird der erzeugte Witterungsablauf mit Hilfe historischer Wetterdaten kalibriert, indem die Häufigkeitsverteilung der Wetterlagen des „Jetztklimas“ vorgegeben wird.

Angetrieben durch tägliche Daten eines Globalen Zirkulationsmodells (GCM, hier ECHAM4-OPYC3 des Max-Planck-Instituts für Meteorologie für das B2-Szenarium des Intergovernmental Panel on Climate Change – IPCC) werden an den Orten der zur Kalibrierung verwendeten (rund 60) Klimastationen und (rund 500) Niederschlagsstationen des Deutschen Wetterdienstes in Hessen und Umgebung tägliche Datensätze der von den Stationen gelieferten Klimaparameter erzeugt. Dabei wird jede Dekade des gesamten Prognosezeitraumes getrennt betrachtet (aus Gründen der statistischen Stabilität wird eine Dekade durch einen 20-Jahres-Zeitraum beschrieben). Für alle Klima- und Niederschlagsstationen und jede Dekade wurden zudem 10 Simulationsläufe durchgeführt, um die Variabilität der Methode abzudecken.

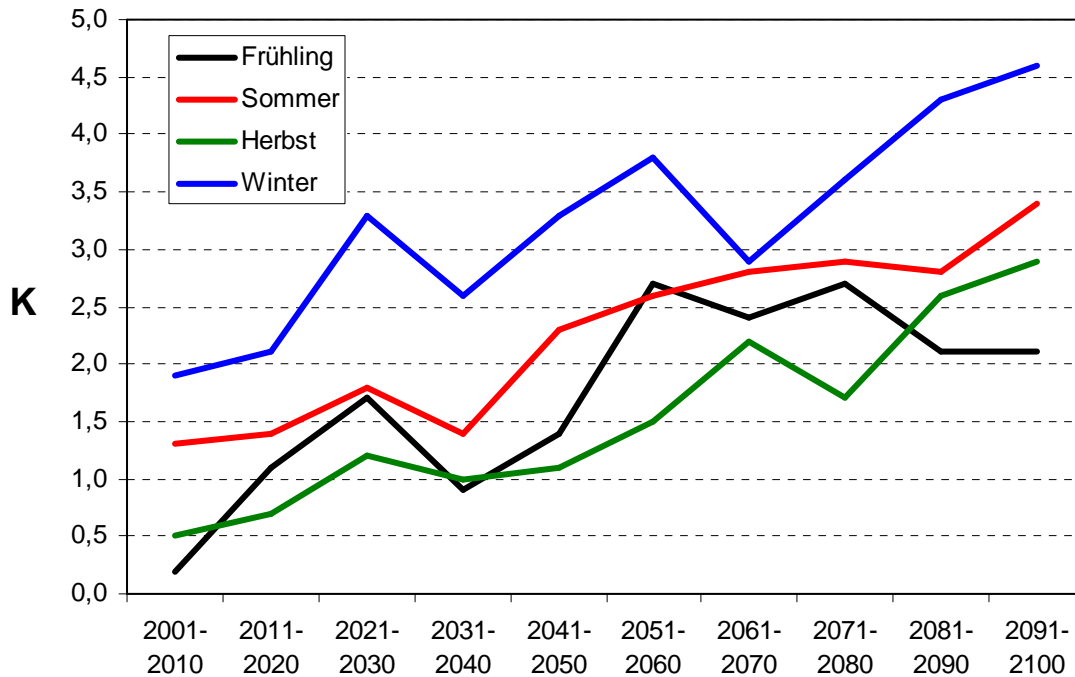
Die räumlich und zeitlich gut aufgelösten Datensätze der Klimaprognose sind als Eingangsdaten für Untersuchungen von Klimawandelfolgen u. a. in den Bereichen Wasserwirtschaft, Land- und Forstwirtschaft geeignet.

### Ergebnisse

#### Temperatur

Die Tagesmitteltemperatur verändert sich am stärksten im Winter und zwar um rund 4 K bis zum Ende des 21. Jahrhunderts (alle hier und im Folgenden beschriebenen Änderungen sind bezogen auf den Mittelwert der Referenzperiode 1981 bis 2000). Auch der Sommer wird viel wärmer. Im Herbst bzw. Frühjahr findet dagegen nur eine leichte Erwärmung statt.

Die Änderungen der Tagesmaximumtemperatur sind in Abb. 1 dargestellt. Im Winter nehmen die Maxima bis um ca. 4,5 K zu und im Sommer um bis zu 3,4 K, wohingegen die Zunahme im Frühjahr und Herbst 2-3 K beträgt.



**Abb. 1:** Änderung der Tagesmaximumtemperatur von 2001-2010 bis 2091-2100 gegenüber dem Referenzzeitraum 1981-2000 (Dekadenmittelwerte für Hessen)

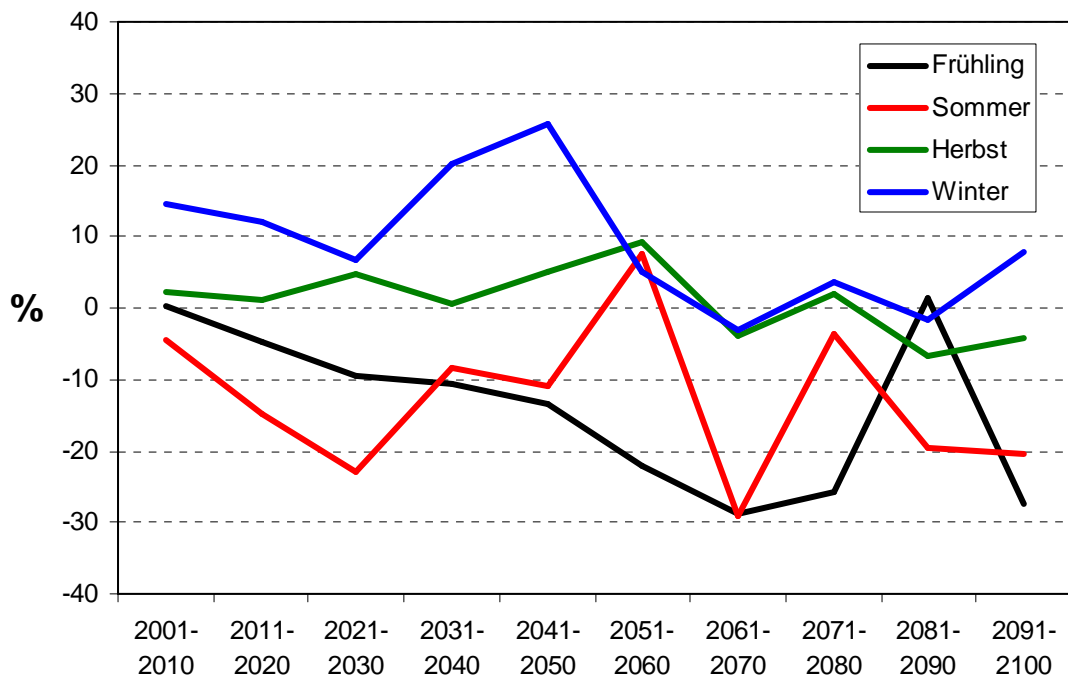
Die Tagesminimumtemperaturen nehmen nicht so stark zu, nämlich im Winter um knapp 4 K, im Sommer um etwa 2 K, im Frühjahr und Herbst um 1-2 K.

Bei der räumlichen Verteilung sind bis zur Mitte des 21. Jahrhunderts keine Unterschiede zu beobachten. Danach weist der Nordosten eine stärkere Zunahme auf als der Süden. Die Höhenlagen erwärmen sich im Sommer mehr, im Winter hingegen weniger als das Tiefland.

### Niederschlag

Die prognostizierte Änderung des Niederschlags ist in Abb. 2 zu sehen. Bis zur Mitte des 21. Jahrhunderts wird der Winter feuchter (um bis zu 25 Prozent); danach wird er wieder trockener und am Ende des 21. Jahrhunderts ist das Winter-Niederschlagsniveau wieder ähnlich dem der Referenzperiode. Frühjahr und Sommer werden ausgeprägt trockener (um bis zu 30 Prozent) unter Zunahme der Variabilität. Im Herbst ist keine signifikante Änderung zu erwarten.

Die räumliche Niederschlagsvariabilität ist im Sommer sehr groß (und nimmt stetig zu), im Winter gering (dafür existieren hier ausgeprägte Luv- und Lee-Effekte). Im Sommer trocknen der Nordosten und die Mittelgebirge stärker aus als der Süden.



**Abb. 2:** Änderung der Tagessumme des Niederschlags von 2001-2010 bis 2091-2100 gegenüber dem Referenzzeitraum 1981-2000 (Dekadenmittelwerte für Hessen)

### Weitere Klimaelemente

Die Sonnenscheindauer nimmt im Frühjahr am stärksten (kontinuierlich bis um 1,5 Stunden pro Tag bis zum Ende des 21. Jahrhunderts) zu. Im Sommer erfolgt die Zunahme um rund 1 Stunde pro Tag schon im ersten Drittel des 21. Jahrhunderts und verharrt dann auf diesem Niveau. Herbst und Winter zeigen keine signifikanten Änderungen.

Bei der Windgeschwindigkeit sowie der relativen Feuchte sind keine großen Veränderungen zu erkennen.

### Extremereignisse

Während beim Frühjahr bzw. Sommer die höchsten Maximaltemperaturen bereits bis zur Mitte des 21. Jahrhunderts erreicht werden und danach eine Stagnation auf hohem Niveau bzw. wieder ein leichter Rückgang zu verzeichnen ist, steigen die Maximaltemperaturen im Herbst und Winter bis zum Ende des Jahrhunderts quasi kontinuierlich an. Die Anzahl extrem heißer Tage (Tagesmaximumtemperatur über 35 °C) steigt im Sommer bis zum Ende dieses Jahrhunderts an. Dies deutet auf immer länger andauernde Hitzeperioden hin.

Trotz im Sommer zunehmender Trockenheit steigt auch die Anzahl der Ereignisse mit extremen Niederschlägen an. Dies deutet auf zunehmende Austrocknung im Sommer hin und mögliche starke Schäden durch Oberflächen-Abflüsse von Böden, die in diesen Fällen die großen Wassermengen nicht aufnehmen können. Im Winter sinkt die Tendenz zu Starkniederschlägen hingegen.

### Verlässlichkeit der Prognosen

Das statistische Downscaling-Verfahren liefert eine Spannweite von Ergebnissen. Aus diesem Grund werden grundsätzlich 10 Modellläufe durchgeführt. Generell ist zu erwarten, dass Resultate zu robusten Klimaparametern (wie der Tagesmitteltemperatur) mit geringerem Fehler behaftet sind als solche zu labilen Parametern (wie der räumlichen Niederschlagsverteilung). Die größte Fehlerbandbreite wird bei Aussagen zu Extremwerten erwartet, weil statistische Methoden sich schwer tun, neue (im bisherigen Kollektiv also noch nicht vertretene) Zustände konstruieren zu können.

### **Ausblick**

Die von der Firma Meteo-Research durchgeführte Klimaprognose basiert auf dem globalen Klimamodell ECHAM4 und dem eher moderaten IPCC-Szenarium B2. Es ist davon auszugehen, dass in naher Zukunft neue und wesentlich erweiterte Klimaprognosedaten zur Verfügung stehen werden: Ausgehend von ECHAM5 sollen in den kommenden Monaten neue Klimaprojektionen erstellt werden, wiederum mit dem statistischen Downscaling-Verfahren von Meteo-Research, und zwar für die IPCC-Szenarien A2, A1B und B1. Dies eröffnet die Möglichkeit, sowohl zu verlässlicheren Prognosedaten zu gelangen als auch eine Spannweite möglicher Wirkungen der Klimaänderungen abzudecken.

## 2.3 Klimafolgen in der Wasserwirtschaft (Grundwasser)

**Thema:** Flächendifferenzierte Untersuchungen zu möglichen Auswirkungen einer Klimaänderung auf die Grundwasserneubildung in Hessen

**Projektbeteiligte:**

Dr. Georg Berthold, HLUG, Dezernat W3 „Grundwasser und Hydrologie“ (Projektleiter)  
Mario Hergesell, GIS-Service (Auftragnehmer)

**Projekt-Laufzeit:** Juni 2004 bis Juli 2005

### Beschreibung

Ziel des hier beschriebenen Teilprojektes ist die Untersuchung der zu erwartenden Auswirkungen des Klimawandels in Hessen auf den Grundwasserhaushalt. Als Datengrundlage für die Modellierung des Grundwasserhaushalts dienen die Klimaprojektionsdaten der Firma Meteo-Research für den Szenarienzeitraum 2011 bis 2050. Diese stationsweise vorliegenden Daten wurden vom Deutschen Wetterdienst in ein 1 km x 1 km-Raster überführt. Als Referenzperiode wird das 30-jährige Mittel von 1971 bis 2000 zu Grunde gelegt. Dieser Zeitraum umfasst das Trockendezennium 1971-1980, das Nassdezennium 1981-1990 und das Dezennium 1991-2000 mit mittleren Verhältnissen.

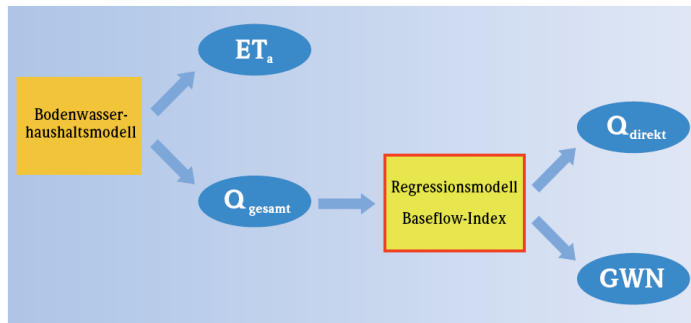
Im Vordergrund der Untersuchungen stehen die Ermittlung der Spannbreiten der infolge der Klimaprojektion zu erwartenden Änderung bezüglich der Grundwasserneubildung sowie die regional unterschiedlichen Verteilungsmuster der geänderten Grundwasserneubildung.

Regional differenzierte Grundwasserneubildungsraten dienen vor allem zur Abschätzung der erschließbaren Grundwassermengen und sind eine Voraussetzung für die nachhaltige Bewirtschaftung der natürlichen Grundwasserressourcen. Regional differenzierte Kenntnisse über die Grundwasserneubildung werden auch für die Abschätzung des Gefährdungspotenzials des Grundwassers durch den Eintrag von Schadstoffen, wie z. B. infolge Nitratauswaschung, benötigt.

### Methodik

Für die Modellierung der Grundwasserneubildung kommt ein zweistufiges, GIS-gestütztes Verfahren zum Einsatz, mit dem sich sowohl die zeitliche als auch die räumliche Variabilität der Grundwasserneubildung untersuchen lässt. Bei dem Verfahren handelt es sich um die Kopplung eines empirischen Einschicht-Bodenwasserhaushaltsmodells (BWHM) mit einem speziell für Hessen entwickelten Regressionsmodell (HERGESELL & BERTHOLD 2005).

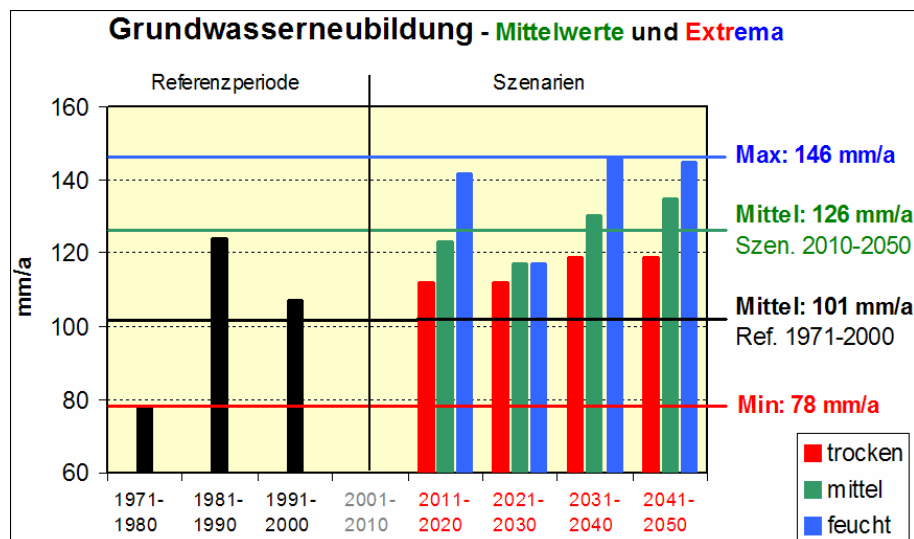
Das BWHM berechnet in Abhängigkeit von Klima, Landnutzung und Bodeneigenschaften im ersten Verfahrensschritt die tatsächliche Evapotranspiration ( $ET_a$ ) und die gesamte aus einem Bilanzierungsraum abfließende Wassermenge, die als Gesamtabfluss ( $Q_{\text{gesamt}}$ ) bezeichnet wird. Im zweiten Verfahrensschritt wird der Gesamtabfluss ( $Q_{\text{gesamt}}$ ) mit dem im HLUG auf Basis von Abflussmessungen entwickelten Regressionsmodell in Abhängigkeit von klimatologischen, landnutzungsspezifischen, morphographischen, pedologischen und hydro(geo)-logischen Gebietseigenschaften in die beiden Abflusskomponenten Grundwasserneubildung (GWN) und Direktabfluss ( $Q_{\text{direkt}}$ ) separiert (siehe auch Abb. 1).



**Abb. 1:** 2-stufiger Verfahrensablauf zur Berechnung flächendifferenzierter Abflusskomponenten

## Ergebnisse

Da für die Grundwasserneubildung der Niederschlag die wichtigste Steuergröße ist, wurde auf Basis der stationsweise vorliegenden Niederschlagsdaten aus den jeweils 10 Realisierungen jedes Dezenniums (2011-2020, 2021-2030, 2031-2040 und 2041-2050) jeweils eine Trocken- und eine Feuchtrealisierung ausgewählt. In Abb. 2 werden die Modellergebnisse der Grundwasserneubildung für jedes Dezennium (unterteilt in extrem trockene, feuchte und mittlere Verhältnisse) dargestellt.



**Abb. 2:** Zeitliche Variabilität der Grundwasserneubildung in Hessen

Die Ergebnisse der modellierten Grundwasserneubildung sind in Abb. 2 als auf die Landesfläche bezogene Mittelwerte dezennienweise dargestellt. Die schwarzen Balken in der linken Diagrammhälfte entsprechen jeweils den Mittelwerten der drei Dezennien der Referenzperiode 1971-2000. Die Mittelwerte der vier Dezennien des Szenarienzitraums 2011-2050 sind durch die grünen Balken dargestellt. Die roten bzw. blauen Balken entsprechen den extremen Trocken- bzw. Feuchtrealisierungen und sind als einzelne extreme Trocken- bzw. Feuchttore der jeweiligen Dezennien zu verstehen.

Über den gesamten Szenarienzitraum betrachtet nimmt die Grundwasserneubildung gegenüber dem Mittelwert der Referenzperiode von 101 mm/a auf 126 mm/a um ca. 25 % zu. Der Mittelwert des gesamten Szenarienzitraums überschreitet somit den Wert der Nassperiode des Dezenniums 1981-1990. Das bedeutet, dass die mittleren Verhältnisse der Zukunft den Feuchtperioden der Vergangenheit entsprechen. Die Mittelwerte der Dezennien 2031-2040

und 2041-2050 liegen deutlich über dem maximalen Wert des Feuchtdezenniums 1981-1990. Selbst die Grundwasserneubildung der einzelnen extremen Trockenrealisierungen liegt deutlich über dem Mittelwert des Referenzzeitraums, der von keiner der Realisierungen unterschritten wird. Mit geringen Grundwasserneubildungsraten, wie sie für das Trockendezennium 1971-1980 vorherrschten, ist daher zukünftig nicht zu rechnen.

In Abb. 3 sind die mittlere Zunahme für den gesamten Szenarienzeitraum und die maximalen Spannbreiten der Veränderung der Mittelwerte der Dezennien und der extremen Einzelrealisierungen gegenüber der Referenzperiode dargestellt. Während die mittlere Grundwasserneubildung des gesamten Szenarienzeitraums 25 mm/a (24,8 %) oberhalb des Mittelwertes des Referenzzeitraumes liegt, schwankt die Zunahme der Mittelwerte der Dezennien 2021-2030 und 2041-2050 zwischen 16 mm/a (15,8 %) und 34 mm/a (33,7 %). Die maximale Spannweite wird durch die Trockenrealisierung des Dezenniums 2011-2020 und die Feuchtrealisierung des Dezenniums 2031-2040 mit Zunahmen der Grundwasserneubildung zwischen 11 mm/a (10,9 %) und 45 mm/a (44,5 %) erreicht.

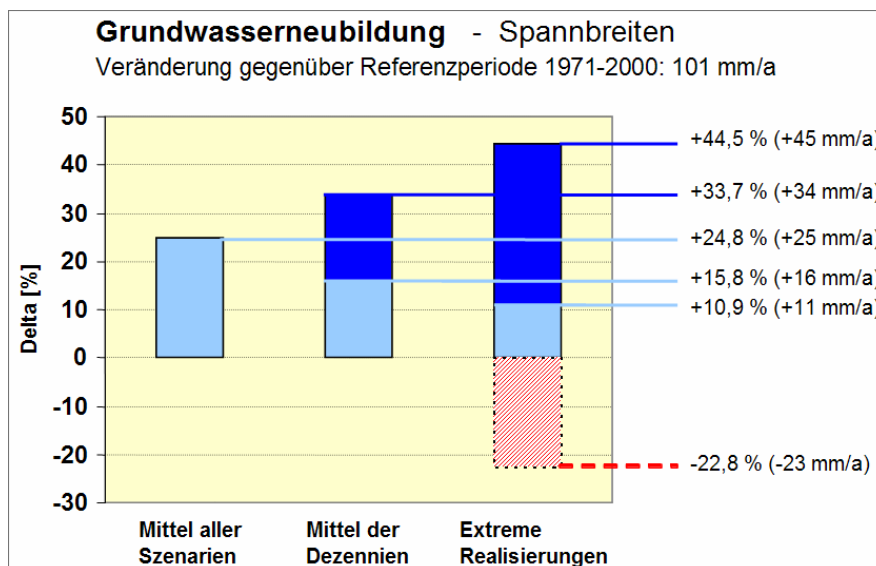
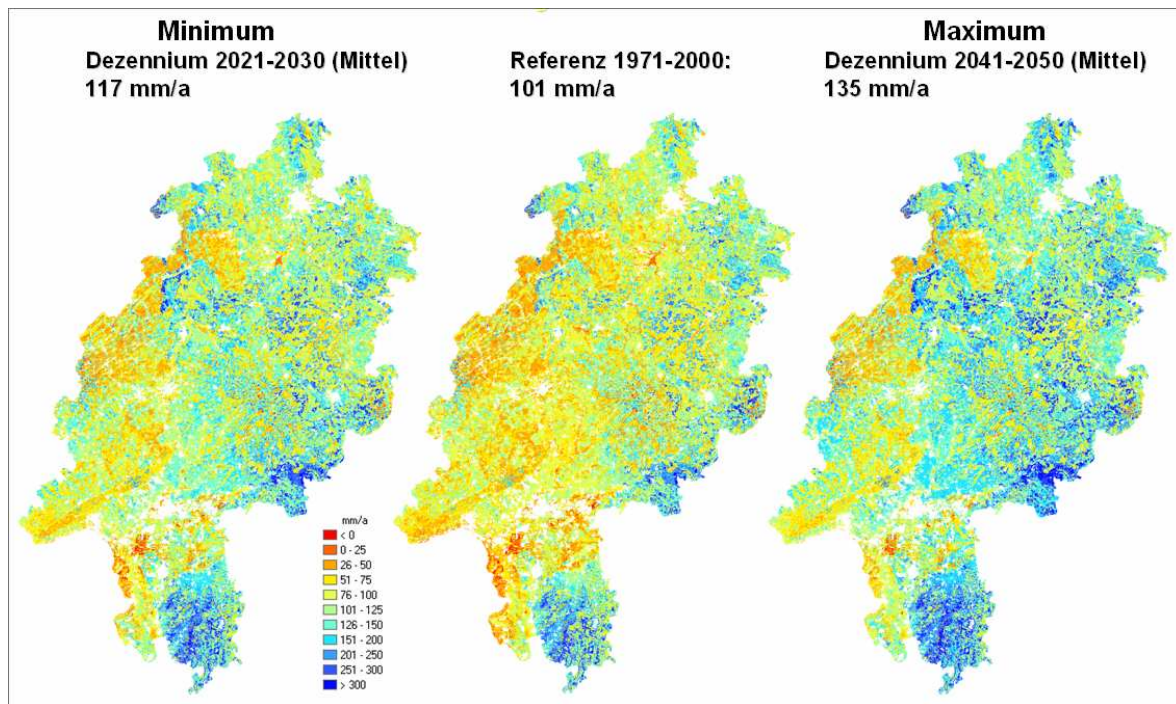


Abb. 3: Spannbreiten der Veränderung gegenüber der Referenzperiode

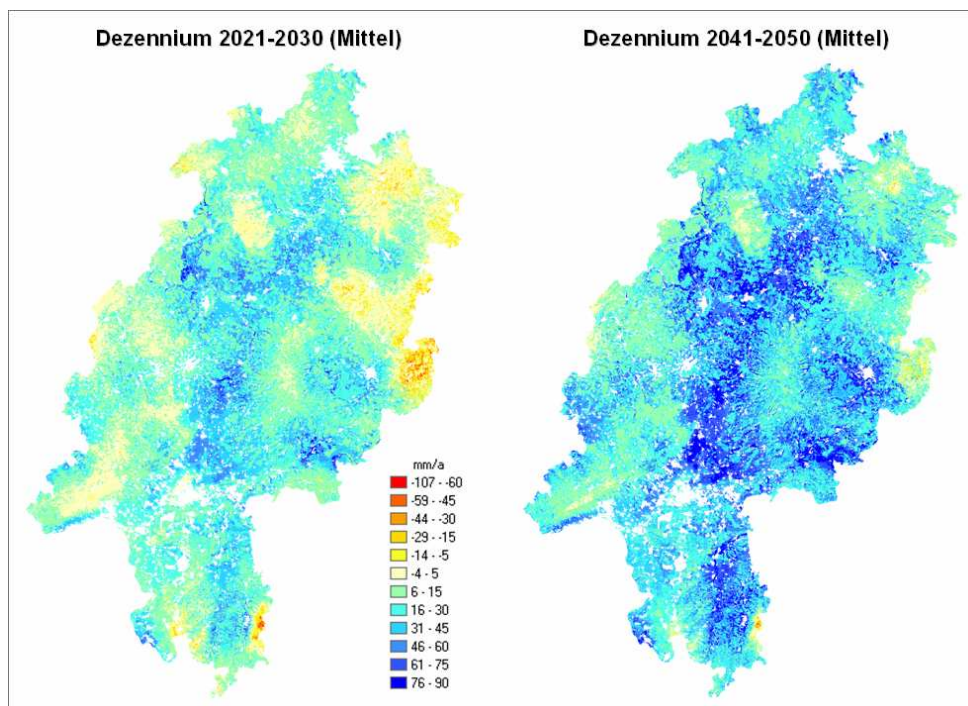
Rot gestrichelt ist die negative Abweichung der mittleren Grundwasserneubildung des historischen Dezenniums 1971-1980 gegenüber der 30-jährigen Referenzperiode dargestellt.

In Abb. 4 wird die räumliche Verteilung der Grundwasserneubildung der Dezennien mit der geringsten (2021-2030) und der höchsten (2041-2050) Zunahme der Grundwasserneubildung der Referenzperiode gegenübergestellt.



**Abb. 4:** Flächendifferenzierte Darstellung der Grundwasserneubildung

Hohe Grundwasserneubildungsraten sind großflächig vor allem im Odenwald, in der Vogelsbergregion und in den osthessischen Mittelgebirgsregionen Spessart, Rhön, Ringgau und Kaufunger Wald zu beobachten. Aber auch im Norden im Gebiet des Reinhardswalds sowie in den westlichen Regionen des Waldecker Uplands und der Frankfurter Bucht werden höhere Grundwasserneubildungsraten erreicht. Für das hessische Ried und der Hanau-Seligenstädter Senke sowie im westlichen Landesteil des Rheinischen Schiefergebirges werden gleichfalls erhöhte Grundwasserneubildungsraten im Vergleich zur Referenzperiode berechnet.



**Abb. 5:** GWN-Differenzkarten – Abweichungen gegenüber Referenzperiode

Die klimatisch bedingten regionalen Veränderungen der Neubildung gegenüber der Referenzperiode lassen sich am anschaulichsten in Form von Differenzkarten visualisieren (Abb. 5). Links sind die regional differenzierten Änderungen der Grundwasserneubildung des Dezenniums mit der geringsten landesweiten Zunahme, rechts mit der größten landesweiten Zunahme dargestellt. Obwohl für das Dezennium 2021-2031 im Landesmittel die Grundwasserneubildung um fast 16 % zunimmt, sind im Süden und Nordosten Hessens Gebiete mit einer Abnahme der Grundwasserneubildung zu erkennen. Für das sehr feuchte Dezennium 2041-2050 ist mit einer deutlichen Zunahme der Grundwasserneubildung in fast allen Regionen Hessens zu rechnen. Gebiete mit hohen Zunahmen in der Neubildung sind neben Mittelgebirgsregionen im Odenwald, Spessart und Vogelsbergbereich auch landwirtschaftlich intensiv genutzte Bereiche wie Hessisches Ried, Wetterau, Limburger Becken und Kasseler Graben.

### **Auswirkungen des Klimawandels**

Die vorliegenden Ergebnisse machen deutlich, dass die für Hessen prognostizierte Klimaänderung einen wesentlichen Einfluss auf die Grundwasserneubildung ausüben wird. Im Landesmittel zeigen die Berechnungen eine deutliche Erhöhung der Grundwasserneubildung (ca. 25 % zur Referenzperiode, Spannbreite 16 bis 34 %). Ein wesentliches Ergebnis der Modellrechnung ist, dass das Auftreten von Trockendezennien (wie 1971-1980) zukünftig immer unwahrscheinlicher erscheint. Lediglich im Nordosten von Hessen sind Gebiete mit verringerter Grundwasserneubildung zu erkennen. Die zukünftigen mittleren Verhältnisse hinsichtlich der Grundwasserneubildung im betrachteten Zeitraum von 2011 bis 2050 entsprechen etwa den Grundwasserneubildungsraten ausgesprochener Nassperioden in der Vergangenheit (1981-1990).

### Nitratverlagerung/Grundwasserbeschaffenheit

Die prognostizierten Klimaveränderungen (feuchte, milde Winter und trockene wärmere Sommer) würden bedingen, dass während der Sommermonate die Nitratbildung trotz hoher Temperaturen durch die geringe Bodenfeuchte nahezu zum Stillstand kommt. Im Herbst, bei Wiederbefeuchtung des Bodenkörpers und noch relativ hoher Bodentemperatur, kann es allerdings zu einer verstärkten N-Mobilisation aus der organischen Bodensubstanz und damit zu einer verstärkten Anlieferung von Nitrat kommen. Damit würde die Nitratanlieferung in eine Zeit fallen, in der das Pflanzenwachstum weitgehend abgeschlossen ist und somit nur ein geringer Entzug durch den Pflanzenaufwuchs gegeben wäre. Die Folge wäre eine erhöhte Nitratanreicherung im Oberboden. Da durch die prognostizierte Erhöhung der Winterniederschläge mit einer erhöhten Grundwasserneubildung zu rechnen ist, ist daher von einer erhöhten Nitratverlagerung auszugehen. Durch diese Mechanismen könnten selbst Böden, die ein hohes Nitratrückhaltevermögen aufweisen (z. B. Lössböden der Wetterau), in Zukunft vermehrt zu Eintrag von Nitrat in den Grundwasserleiter beitragen.

Gleichfalls ist zu erwarten, dass die landwirtschaftliche Beregnung im Sommerhalbjahr intensiviert werden wird. Dies betrifft sowohl die Anzahl der Beregnungsgaben pro Jahr als auch die Ausweitung der Beregnungsflächen. Mit dieser Entwicklung wäre eine erhebliche Zunahme des Wasserverbrauchs im Agrarbereich verbunden.

Durch eine erhöhte Grundwasserneubildung ist ebenfalls ein verstärktes Auslaugen von Schadstoffen denkbar. Dies könnte eine verstärkte Verlagerung von Schadstoffen in den Grundwasserraum zur Folge haben. In der Abb. 6 werden die einzelnen Auswirkungen im Zusammenhang illustriert. Andererseits führt eine Erhöhung der Grundwasserneubildung zu Verdünnungseffekten, die alle Wasserinhaltsstoffe betrifft und somit gegebenenfalls zu einer „Verbesserung“ der Grundwasserqualität beitragen kann (falls nur die Konzentration der

Stoffe betrachtet wird). Bei der Betrachtung von zeitlichen Entwicklungen hinsichtlich der Grundwasserqualität muss dieser Aspekt in Zukunft wesentlich stärker berücksichtigt werden.



**Abb. 6:** Mögliche Auswirkungen der Klimaänderung

### Wasserwirtschaft/Grundwasserstände

Für die dezentrale Wasserversorgung von Gemeinden könnte der prognostizierte Rückgang der Sommerniederschläge negative Auswirkungen haben. Insbesondere Quellen, die zur Trinkwasserversorgung herangezogen werden, könnten während der Sommermonate in ihrer Schüttung stark nachlassen, so dass die Trinkwassergewinnung erheblich beeinträchtigt wäre. Dies wäre vor allem in Gebieten mit geringem Speicherpotenzial für Grundwasser der Fall.

In Lockergesteinsgebieten mit ihrem wesentlich höheren nutzbaren Hohlraumvolumen und somit auch größerer Pufferkapazität als in Festgesteinsregionen dürfte dieser negative Effekt keine Rolle spielen, im Gegenteil wird hier das Grundwasserdargebot positiv beeinflusst werden. Davon würden vor allem Großwasserwerke, die insbesondere in Südhessen für die zentrale Wasserversorgung eine bedeutsame Rolle spielen, profitieren.

Mit der Erhöhung der Grundwasserneubildung geht gleichzeitig eine Erhöhung der Grundwasserstände einher. Es muss jedoch beachtet werden, dass die simulierten Klimadaten keine Aussage über die Häufung von extrem nassen Jahren bzw. trockenen Jahren erlauben. Diese Abfolge bestimmt jedoch sehr stark die tatsächliche Ausprägung der Grundwasserstände bzw. von extremen Hoch- und Niedrigständen des Grundwassers.

Als wahrscheinlich wird angenommen, dass sich die bereits vorhandenen Vernässungsflächen ausdehnen werden bzw. die Häufigkeit von Vernässungen in Zukunft zunimmt. Dies kann zu erheblichen Beeinträchtigungen der gegebenen Landnutzung führen. Ackerflächen könnten infolge der Vernässung nicht termingerecht bestellt werden, Biotope könnten durch extremer werdende Grundwasserstandsänderungen in Stresssituationen geraten und Waldgebiete längere Zeiten im Jahr Staunässe erfahren.

Ebenfalls ist eine Zunahme von Vernässungsschäden an Gebäuden zu erwarten. Das Auftreten feuchter Keller, Tiefgaragen und überschwemmter Unterführungen könnte in grundwasserbeeinflussten Regionen räumlich und zeitlich eine Anhäufung erfahren.

## **Mögliche Anpassungsmaßnahmen**

Da eine enge Kopplung von Klima und Wasserkreislauf besteht, werden sich Klimaänderungen immer auch auf alle Komponenten des Wasserkreislaufes auswirken. Alle Maßnahmen müssen daher im Zusammenhang gesehen und diskutiert werden. Wie die bereits bestehende Vernässungsproblematik im Hessischen Ried zeigt, ist ein nachträgliches Reagieren auf Veränderungen im Wasserhaushalt nur mit erheblichem Aufwand möglich. Bestehende Bauwerke können nur mit großem Aufwand gegen Vernässungen geschützt werden. Die prognostizierten Veränderungen hinsichtlich der Grundwasserneubildung sollten daher Eingang in die Planung und Ausgestaltung von regionalen Bewirtschaftungsplänen finden. Diese orientieren sich zurzeit überwiegend an der Aufrechterhaltung einer bestimmten Grundwasserneubildungsrate innerhalb eines Gebietes, die durch Wasserentnahmen nicht unterschritten werden soll. Zukünftig sollte hierbei verstärkt der Aspekt von Vernässungen bzw. verstärkter Auswaschungsgefahr von Schadstoffen betrachtet werden.

Bei der Ausweisung von Baugebieten bzw. Planung von Bauwerken sollte ein zukünftiges Ansteigen der Grundwasserflurabstände stärker Berücksichtigung finden. Baugebiete sollten möglichst nicht in stark vernässungsgefährdeten Gebieten ausgewiesen werden. Bei geplanten Bauwerken ist auf eine sachgerechte Abdichtung zu achten, auch wenn diese Maßnahmen die Bauvorhaben zunächst mit höheren Kosten belegen.

Aus landbaulicher Sicht muss die Gefahr einer erhöhten Nitratauswaschung stärker als bisher berücksichtigt werden, da die prognostizierte Erhöhung der Grundwasserneubildung auch Gebiete mit intensiver Landnutzung (z. B. Wetterau, Limburger Becken, Kasseler Graben und Hessisches Ried) betrifft. In den auswaschungsgefährdeten Gebieten sollte daher die Zusammenarbeit zwischen Fachbehörden, Landwirtschaft und Wasserwirtschaft verstärkt werden bzw. der Eingangsgröße „Klimaänderung“ eine gewichtigere Rolle zukommen.

## **Ausblick**

Die Abschätzung der zukünftigen Entwicklung der Grundwasserneubildung beruht auf einem Emissionsszenario, das für den Raum Hessen als wahrscheinlich angesehen wird. Zugrunde gelegt wurde hierbei das moderate Emissionsszenario B2, das von einem gemäßigten Anstieg der CO<sub>2</sub>-Konzentrationen und damit gemäßigten Klimaänderungen ausgeht. Selbst dieses gemäßigte Szenario zeigt eine deutliche Erhöhung der Grundwasserneubildung auf. Aus Sicht des Grundwasserschutzes erscheint es erforderlich, Modellrechnungen auch mit anderen Emissionsszenarien durchzuführen, um mögliche Bandbreiten hinsichtlich der Variation der Grundwasserneubildung ausloten zu können. Gleichfalls sollten neue Erkenntnisse aus der Klimaforschung zeitnah Eingang in den Bereich Grundwasser/Wasserwirtschaft finden.

## **Literatur**

HERGESELL, M., BERTHOLD, G. (2005): Entwicklung eines Regressionsmodells zur Ermittlung flächendifferenzierter Abflusskomponenten in Hessen durch die Regionalisierung des Baseflow Index (BFI). Jahresbericht 2004 des Hessischen Landesamtes für Umwelt und Geologie, Wiesbaden

## 2.4 Klimafolgen in der Wasserwirtschaft (Oberflächengewässer)

**Thema:** Untersuchungen zu möglichen Auswirkungen einer Klimaveränderung auf die Abflussverhältnisse an hessischen Gewässern

**Projektbeteiligte:**

Dr. Gerhard Brahmer, HLUG, Dezernat W3 „Grundwasser und Hydrologie“ (Projektleiter)  
Dr. K.-G. Richter und R. Czesniak, Ingenieurbüro Ludwig (Auftragnehmer)

**Projekt-Laufzeit:** Juni 2004 bis Januar 2005

### Beschreibung

Inhalt des Teilprojekts im Rahmen von INKLIM 2012 ist die Untersuchung der Auswirkungen der mittels der Regionalisierung für Hessen nach ENKE (2003) abgeleiteten klimatischen Parameter für die Zukunftsszenarien 2011-2050 des ECHAM4-Rechenlaufs mit dem Emissionsszenario B2 auf die hydrologischen Verhältnisse an hessischen Oberflächengewässern. Aufgrund der engen Verflechtung zwischen Klima und dem Gebietswasserhaushalt können Klimaveränderungen mit einhergehenden Veränderungen in den maßgeblichen Wasserhaushaltsgrößen Niederschlag und Verdunstung zu erheblichen Auswirkungen auf das Abflussgeschehen und den Wasserhaushalt führen.

Zur Untersuchung der Auswirkung der simulierten Klimadaten auf die Abflussverhältnisse an hessischen Gewässern konnte auf das Wasserhaushaltsmodell LARSIM (Large Area Runoff Simulation Modell, BREMICKER 2000) zurückgegriffen werden, für das beim Ingenieurbüro Ludwig (Karlsruhe) aus verschiedenen Projekten aufgestellte Modelle vorliegen, die hessische Flussgebiete mit abdecken. Mittels der stationsweise vorliegenden aus der ECHAM-Simulation regionalisierten Klimadaten für den Vergleichszeitraum 1981 bis 2000 und für die Szenariodekaden 2011 bis 2050 werden im Modell LARSIM die Prozesse Niederschlag, Interzeption, Verdunstung, Schneedeckenentwicklung, Bodenfeuchteentwicklung, lateraler Wassertransport und Wellenablauf im Gerinne auf Rasterbasis abgebildet.

Ergänzend zu der Wasserhaushaltssimulation wurden im HLUG für Pegel im hessischen Lahnggebiet die Veränderungen im Abflussgeschehen der letzten 50 Jahre vor dem Hintergrund klimatischer Einflüsse untersucht. Weitere statistische Untersuchungen der aus dem Wasserhaushaltsmodell hervorgegangenen Ergebnisdaten bezüglich wasserwirtschaftlicher Kenngrößen wurden im HLUG durchgeführt. Die Projektergebnisse wurden darüber hinaus mit Ergebnissen ähnlicher Untersuchungen in Baden-Württemberg und Bayern verglichen und eingeordnet.

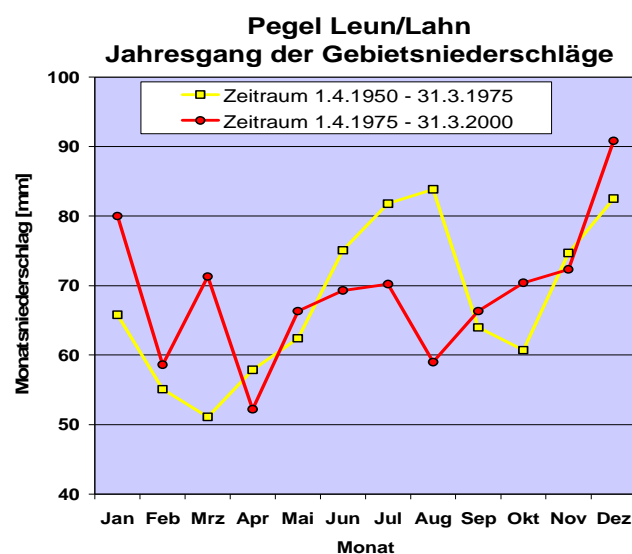
### Ergebnisse

Als Ergebnis liegen für größere Einzugsgebiete bezogen auf 9 Pegelmessstellen Zeitreihen des Abflusses mit täglicher Auflösung vor (RICHTER und CZESNIAK 2004). Insbesondere der Vergleich von aus den Tageswerten abgeleiteten statistischen hydrologischen Kennwerten wie mittlere monatliche Mittelwasser-, Niedrigwasser- und Hochwasserabflüsse zwischen der simulierten Bezugsperiode 1981 bis 2000 und den Szenariodekaden erlaubt eine Quantifizierung der Auswirkung des Klimaeinflusses auf das mögliche zukünftige Abflussverhalten. Dabei wurden für jede Dekade 10 Realisierungen der Klimasimulationsergebnisse durchgerechnet und als Ergebnis jeweils die Mittelwerte dieser 10 statistisch gleich wahrscheinlichen Realisierungen verglichen. Für die untersuchten Pegel wurden die gewässerkundlichen

Hauptwerte MNQ (Mittlerer Niedrigwasserabfluss), MQ (Mittelwasserabfluss für Jahr, Sommer- und Winterhalbjahr), MHQ (Mittlerer Hochwasserabfluss) und ein statistischer Extremhochwasserabfluss ermittelt und ihre prozentuale Veränderung gegenüber dem Jetztzeitraum dargestellt.

### Veränderungen im Niederschlags- und Abflussverhalten im Lahnggebiet 1951-2000

Der Niederschlagjahresgang im Lahnggebiet (Abb. 1) ist durch eine 2-gipflige jahreszeitliche Verteilung der Niederschläge mit Maximum im Winter (Dez/Jan) und sekundärem Maximum im Hochsommer (Jul/Aug) gekennzeichnet. Beim Vergleich der Teilzeiträume 1950 bis 1975 und 1975 bis 2000 geht das sekundäre Maximum im Hochsommer deutlich zurück, während insbesondere eine starke Zunahme der März-Niederschläge zu verzeichnen ist. Auch das Maximum im Dez/Jan verstärkt sich im zweiten Teilzeitraum.



**Abb. 1:** Veränderung des Jahresganges der Gebietsniederschläge Pegel Leun/Lahn

Für den Lahnpegel Leun mit einem Einzugsgebiet von 3571 km<sup>2</sup> zeigen die Winterniederschläge eine zunehmende Tendenz, wenngleich diese aufgrund der hohen Variabilität der Niederschläge nicht als statistischer Trend absicherbar ist. In den halbjährlichen Gebietsabflüssen zeigt sich für das Sommerhalbjahr eine abnehmende Entwicklung, deren Ursache vermutlich in einer Zunahme der Verdunstung zu suchen ist. Bei der Betrachtung der Entwicklung der Abflussverhältnisse einzelner Monate lassen sich deutlichere Ergebnisse mit statistisch signifikant abnehmendem Trend für den Monat August und signifikant zunehmendem Trend für den Monat März erkennen, die ursächlich auf eine eingetretene Veränderung im Niederschlagsgeschehen zurückzuführen sind (siehe Abb. 2).

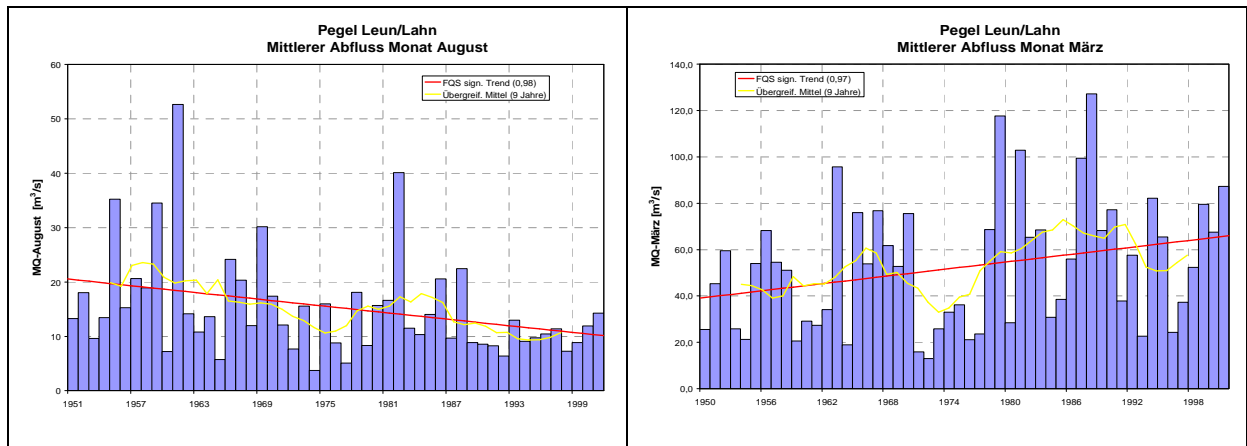


Abb. 2: Entwicklungen der Abflussverhältnisse im März und August 1951-2000 am Pegel Leun/Lahn

Abschätzung möglicher Klimaveränderungen und Konsequenzen für die Abflussbildung

Als Mittel der in Hessen liegenden Klimastationen ergibt sich im Vergleich zum Bezugszeitraum 1981 bis 2000 eine Zunahme der Jahresmitteltemperatur für den Szenariozeitraum 2011 bis 2050 zwischen +1,2 und +1,8 Grad je nach Dekade. Für den Wasserhaushalt bedeutet die Temperaturzunahme insbesondere in den Sommermonaten eine Erhöhung der potentiellen Verdunstung. Die Veränderungen in der Niederschlagseinnahme zeigt die nachfolgende Grafik:

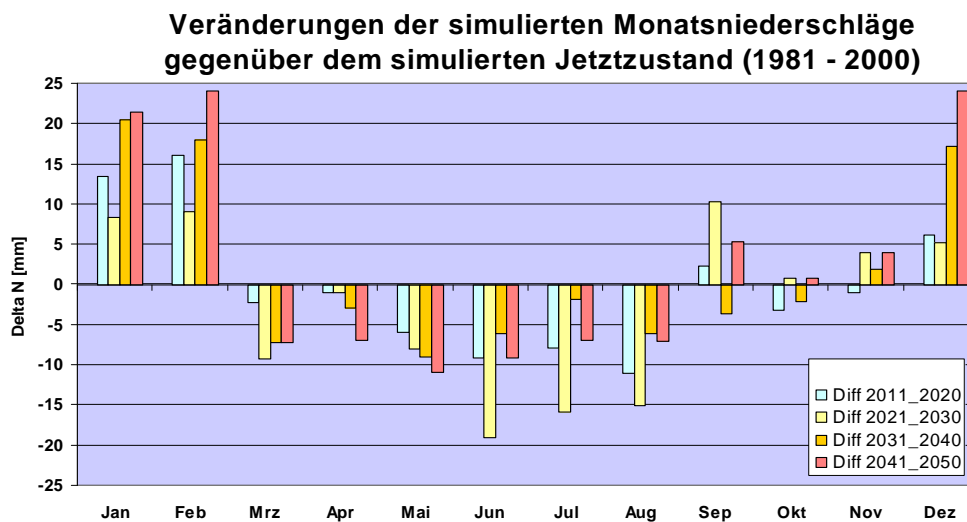


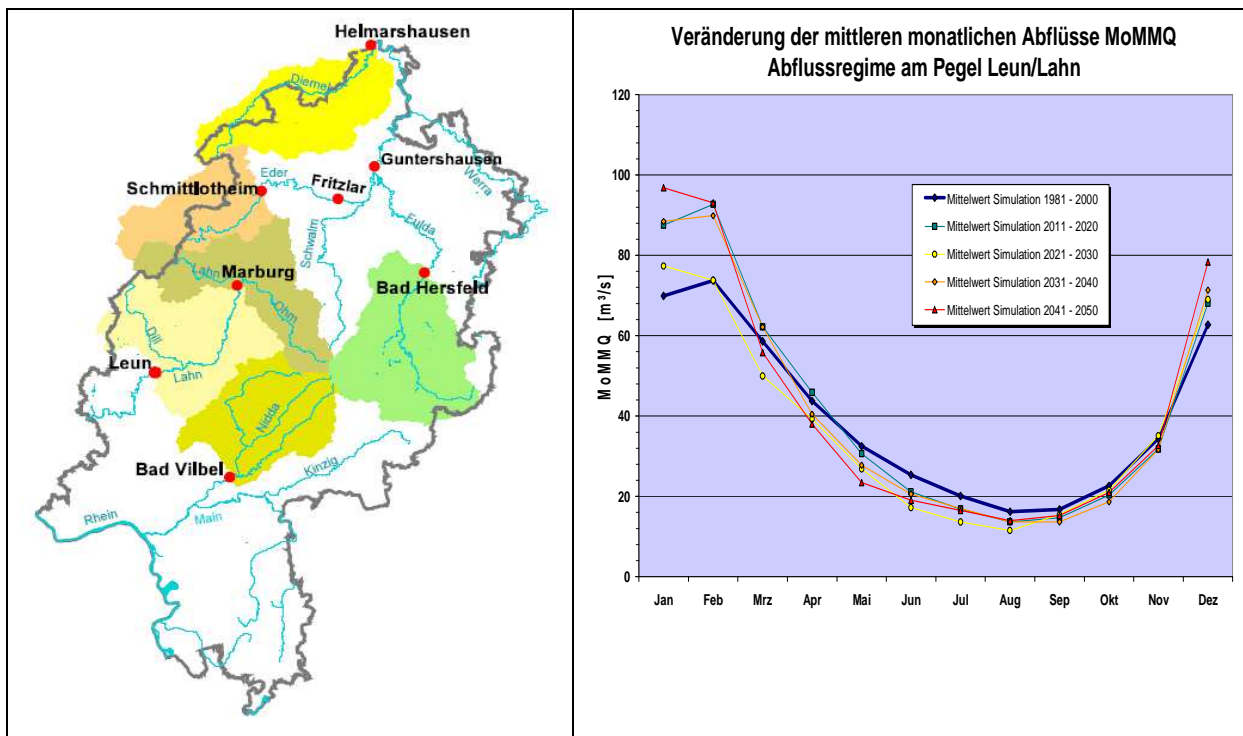
Abb. 3: Veränderungen der monatlichen Niederschlagsmengen in den Zukunftsszenarien

Während sich für die Jahresniederschlagsmenge im Vergleich zum simulierten Bezugszeitraum 1981-2000 erst für die beiden letzten Dekaden gewisse Zunahmen ergeben, ist insbesondere eine Veränderung im Niederschlagsjahrgang zu erwarten. Im hydrologischen Winterhalbjahr nimmt die Niederschlagsmenge um 8 % zu, während im hydrologischen Sommerhalbjahr eine um 8 % abnehmende Niederschlagsmenge zu verzeichnen ist. Die Veränderungen im Niederschlagsverhalten treten regional in Hessen mit einem unterschiedlichen Ausmaß auf. Aus dem Zusammenwirken höherer Wintertemperaturen und höherer Winterniederschläge lässt sich unmittelbar eine Auswirkung hin zu geringerem Schneeanteil an den Niederschlägen und geringerer Schneedeckenentwicklung ableiten, was sich wiederum auf das Abflussgeschehen auswirken kann. Die Winterniederschläge werden also vermehrt direkt abflusswirksam, während die Niederschlagsrücklage in Schnee mit verzögerter Schmelzwasserabgabe im Mittel zurückgehen dürfte.

Mögliche Auswirkungen einer Klimaveränderung auf die Abflussverhältnisse in Hessen

Insgesamt wurden die möglichen klimabedingten Abflussveränderungen für die Pegel Marburg (1666 km<sup>2</sup>) und Leun (3571 km<sup>2</sup>) an der Lahn, Bad Vilbel/Nidda (1619 km<sup>2</sup>), Bad Hersfeld/Fulda (2120 km<sup>2</sup>), Schmittlotheim/Eder (1202 km<sup>2</sup>) und Helmarshausen/Diemel (1755 km<sup>2</sup>) untersucht (Abb. 4). Aufgrund der komplexen Steuerung der Edertalsperre (202 Mio m<sup>3</sup>), die auch für Energieerzeugung und Niedrigwasseraufhöhung in Abhängigkeit von Wasserständen an der Weser gesteuert wird, wurden für die Unterliegerpegel Fritzlar/Eder (1804 km<sup>2</sup>) und Guntershausen/Fulda (6366 km<sup>2</sup>) lediglich die Hochwasserabflüsse mit den hierfür wesentlichen Steuerungsregeln simuliert.

Das Abflussregime der hessischen Gewässer (vgl. Lahn in Abb. 4) ist gekennzeichnet durch höchste Monatsabflüsse von Dezember bis März und danach deutlich abfallenden Monatswerten bis in den Spätsommer. Für die Monate Dezember und vor allem für Januar und Februar sind markante Zunahmen der mittleren Abflüsse festzustellen, während für den Zeitraum von April bis Oktober die Abflüsse des simulierten Vergleichszeitraumes 1981-2000 unterschritten werden. Ein ähnliches Muster ergibt sich auch für die mittleren monatlichen Niedrigwasser- und Hochwasserabflüsse.



**Abb. 4:** Untersuchte Pegel an hessischen Gewässern und Veränderungen für MQ am Pegel Leun/Lahn

Bezüglich der Veränderungen der gewässerkundlichen Kennwerte lassen sich bei den untersuchten Pegeln zwei Gruppen mit ähnlichem Verhalten unterscheiden (Abb. 5):

Lahn-Nidda-Fuldaoberlauf (Pegel Marburg, Leun, Bad Vilbel und Bad Hersfeld):

Die Pegel dieser Gruppe, deren Einzugsgebiete alle im Vogelsberg aneinandergrenzen, zeigen übereinstimmend eine Zunahme der mittleren Abflüsse in einer Größenordnung von rund 5 %. Dabei treten etwas höhere Zunahmen von 8 bzw. 9 % in den Oberläufen von Lahn und Fulda auf. Für das hydrologische Winterhalbjahr ergeben sich bis auf den Pegel Leun (10 %) Zunahmen von 18 %, während im hydrologischen Sommerhalbjahr Abnahmen um 15 bis 20 % resultieren. Die Niedrigwasserkenngröße MNQ nimmt an diesen Pegeln generell zwi-

schen 10 % und 15 % ab. Größere Unterschiede gibt es bei dem Ausmaß der Änderungen der Hochwasserkennwerte. Die größten Zunahmen für den mittleren monatlichen Hochwasserabfluss der Monate Dezember bis Februar (+ 30 %), für den mittleren jährlichen Hochwasserabfluss MHQ (+ 15 %) und den statistischen Extremhochwasserabfluss (+ 39 %) werden für den Pegel Bad Hersfeld ermittelt. Die übrigen Pegel weisen Zunahmen zwischen 8 und 20 % für den Hochwasserabfluss der Monate Dezember bis Februar, 2 bis 8 % für den mittleren Hochwasserabfluss und 20 bis 25 % für den statistischen Extremhochwasserabfluss auf.

Eder-Diemel-Gebiet (Pegel Schmittlotheim und Helmarshausen):

Die Ergebnisse der beiden in Nord- bzw. Nordwesthessen gelegenen Pegel zeigen im Gegensatz zu den übrigen Pegeln für alle Mittelwasserkenngrößen und den mittleren Niedrigwasserabfluss abnehmende Abflüsse in den Zukunftsszenarien. In diesen im Norden und Nordwesten Hessens gelegenen Gebieten nehmen die Niederschläge in den Zukunftsszenarien nicht oder nur unwesentlich zu, so dass eine Zunahme der Verdunstung überwiegt und zum Rückgang der Abflüsse führt. Die Abnahmen betragen für den mittleren Jahresabfluss 16 % (Helmarshausen) bzw. 20 % (Schmittlotheim), für das Sommerhalbjahr 25 % bzw. etwa 50 % und für das Winterhalbjahr je etwa 10 %. Aufgrund der insgesamt trockeneren Verhältnisse ergeben sich für diese beiden Pegel auch nur geringere Veränderungen in einer Größenordnung von ± 5 % für die Hochwasserkenngrößen.

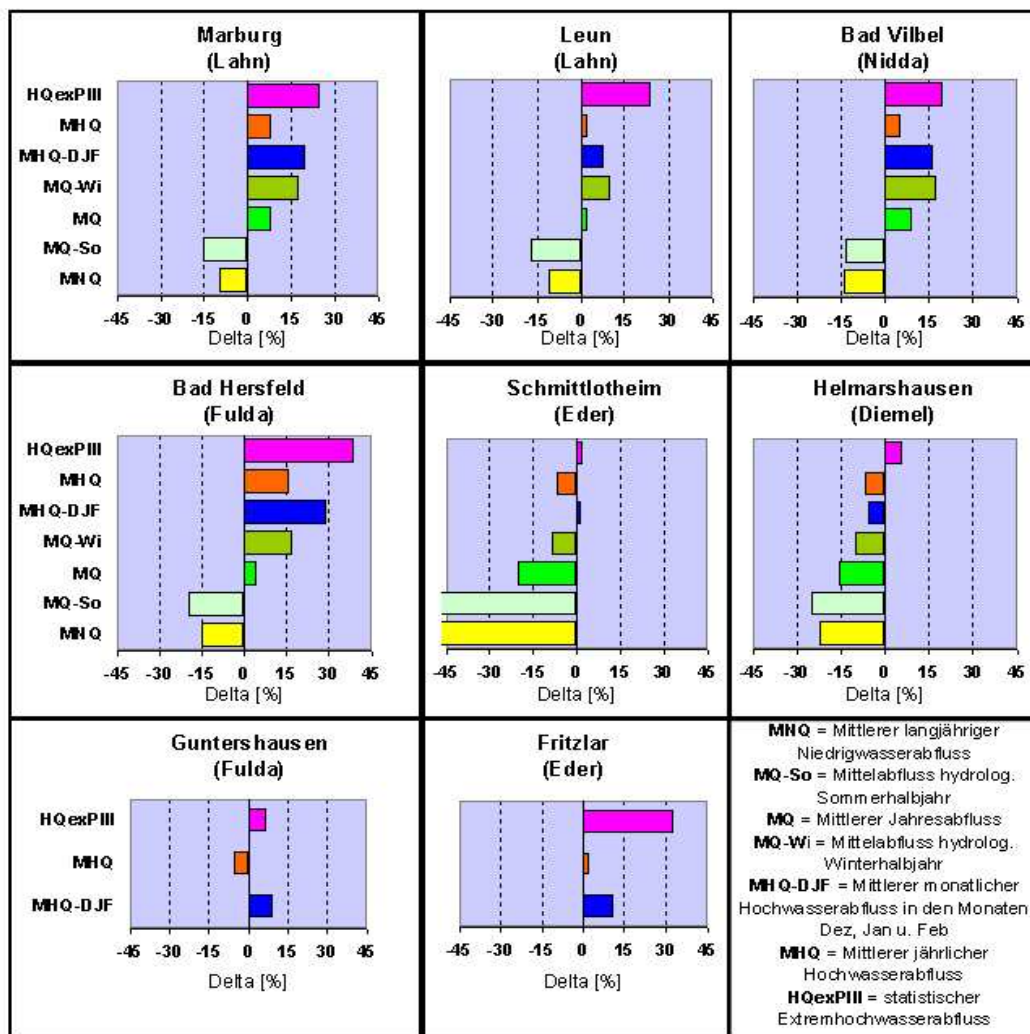


Abb. 5: Mittlere prozentuale Veränderungen gewässerkundlicher Hauptwerte in den vier Szenariodekaden gegenüber der Referenzperiode 1981-2000

### Vergleich mit Ergebnissen aus anderen Untersuchungen

Die Ergebnisse für die hessischen Pegeleinzugsgebiete lassen sich recht gut mit Untersuchungen aus benachbarten Ländern/Flussgebieten vergleichen: Für das Neckargebiet ergibt sich vor allem in den Wintermonaten eine starke Zunahme der mittleren monatlichen Abflüsse. Auch für die monatlichen Hochwasserabflüsse zeigt sich ein zu den hessischen Pegeln ähnliches Bild mit jedoch noch größerem Ausmaß der Hochwasserzunahme. Im Gegensatz zur Abflussminderung in den Sommermonaten in Hessen ergibt sich für das Neckargebiet keine Niedrigwasserverschärfung. Für das Gebiet des oberen Mains ergibt sich eine deutliche Zunahme der mittleren monatlichen Abflüsse von Dezember bis März um 60 bis 80 %, während diejenigen der Sommermonate um bis zu 20 % zurückgehen. Bei den Niedrigwasserabflüssen zeigt sich ein Rückgang um bis zu 10 %, die mittleren monatlichen Hochwasserabflüsse zeigen eine Zunahme um bis zu 60 % für die Monate Dezember bis Februar.

### **Auswirkungen des Klimawandels**

Aus den vorliegenden Ergebnissen lässt sich eine deutliche Veränderung im Abflussverhalten hessischer Gewässer ableiten. Insbesondere eine Umverteilung hin zu Mehrabflüssen im Winterhalbjahr und verminderten Abflüssen im Sommerhalbjahr mit korrespondierender Abnahme der Niedrigwasserabflüsse ist anzunehmen. Eine Verschärfung der Hochwassersituation scheint nach den Ergebnissen wahrscheinlich.

### **Mögliche Anpassungsmaßnahmen**

Wasserwirtschaftliches Planen und Handeln wird in den Bereichen Hochwasserschutz, Wasserversorgung und den möglichen Auswirkungen veränderter Abflüsse auf die Gewässerqualität unmittelbar durch mögliche Klimabeeinflussung berührt. Die Wasserwirtschaft hat sich schon immer an Veränderungen (Klimaschwankungen, geänderte Nutzungsansprüche) anpassen müssen. Eine generelle Strategie liegt daher in Planungen mit anpassbaren Maßnahmen (Berücksichtigung von späteren Ausbaustufen) und einer pragmatischen Vorgehensweise, solange die Prognosen der Klimaänderungen nicht ausreichend abgesichert sind.

Anpassungsmaßnahmen bezüglich unausgeglichener Wasserführung sind lediglich bei vorhandenen Talsperren im Rahmen der Optimierung der Talsperrensteuerung möglich. Eder- und Diemeltalsperre werden z. B. zur Niedrigwasseraufhöhung für die Schifffahrt auf der Weser genutzt. Eine Anpassung wird dabei laufend auf die aktuelle hydrologische Situation vorgenommen, ist aber durch unterschiedliche konkurrierende Nutzungsansprüche (Hochwasserschutz und Niedrigwasseraufhöhung) nur in einem engen Rahmen möglich.

Bezüglich einer Niedrigwasserverschärfung im Sommer mit möglicher Beeinträchtigung der Gewässerqualität und der Wasserentnahmemöglichkeit (Kühlwasser für Kraftwerke, Brauchwasser, Bewässerungswasser, Fischteiche) liegen Handlungsmöglichkeiten (neben eventueller Nutzung von Grundwasser in seltenen Fällen) lediglich in einer Fortschreibung der Bemessungsgrößen für Einleit- und Entnahmebescheide, wo dies rechtlich möglich ist.

Einer möglichen Zunahme der Hochwasserabflüsse muss durch Beibehaltung und Intensivierung der Anstrengungen zur Verbesserung des Hochwasserschutzes begegnet werden. Konkrete Anpassungsmaßnahmen baulicher Art an vorhandenen Einrichtungen sind vergleichsweise kostenintensiv bzw. nicht machbar. Für neue Hochwasserschutzmaßnahmen ist es sinnvoll, schon bei der Planung eine ggf. spätere Erweiterungsmöglichkeit vorzusehen, so dass sich dann erforderliche Anpassungsmaßnahmen technisch durchführen lassen und sich vom Aufwand her in Grenzen halten. Fortschreibung von Bemessungsgrößen („Klimazuschlag“) sind insbesondere für neue Maßnahmen und besonders gefährdete Gebiete denkbar, wenn

schärfere Aussagen für die Veränderungen von Hochwasser vorliegen, die aufgrund der Verwendung von Tageswerten und der Unsicherheit von vorhergesagten Starkniederschlägen in Klimaszenarien von allen hier untersuchten Kenngrößen die größte Unschärfe aufweisen.

### **Ausblick**

Die Ergebnisse können aufgrund der Unsicherheiten der Zukunftsszenarien nur als Abschätzung regionaler Klimaänderungsauswirkungen auf das Abflussverhalten der Gewässer angesehen werden. Es erscheint daher notwendig, die aktuellen Entwicklungen der Klimamodellierung aus Sicht der wasserwirtschaftlichen Praxis weiterzuverfolgen und eine Strategie zur rechtzeitigen Berücksichtigung möglicher Klimaänderungen in hydrologischen Bemessungsgrößen zu entwickeln. Weitere Auswertemöglichkeiten liegen in der Untersuchung von Abflussdauerlinien, der Untersuchung des Auftretens und der Andauer von Niedrigwasser-Ereignissen und Unterschreitungsdauern von Schwellwerten. Hochwasserauswirkungen lassen sich sinnvollerweise erst nach Ergebnissen weiterentwickelter Klimamodelle mit Stundenwerten angehen.

### **Literatur**

BREMICKER, M. (2000): Das Wasserhaushaltsmodell LARSIM, Modellgrundlagen und Anwendungsbeispiele, Freiburger Schriften zur Hydrologie. Bd. 11.

ENKE, W. (2003): Anwendung eines statistischen Regionalisierungsmodells auf das Szenario B2 des ECHAM4 OPYC3 Klima-Simulationslaufes bis 2050 zur Abschätzung regionaler Klimaänderungen für das Bundesland Hessen. Abschlussbericht, Stahnsdorf.

RICHTER, K-G. u. R. CZESNIAK (2004): Untersuchungen zum Einfluss der Klimavariabilität und anthropogen verursachten Klimaschwankungen auf Abflüsse für verschiedene Einzugsgebiete in Hessen. Erläuterungsbericht im Auftrag des HLUG.

## 2.5 Klimafolgen in der Landwirtschaft

**Thema:** Klimawandel und Landwirtschaft in Hessen: Mögliche Auswirkungen des Klimawandels auf landwirtschaftliche Erträge

**Auftragnehmer:** Prof. Dr. Joseph Alcamo, Dr. Jörg Priess, Wissenschaftliches Zentrum für Umweltsystemforschung, Universität Kassel

**Projektbeteiligte:** Maik Heistermann, Matthias Mimler, Dr. Janina Onigkeit, Dr. Jörg Priess, Dr. Rüdiger Schaldach, Daniela Trinks

**Projekt-Laufzeit:** Februar 2005 bis Juli 2005

### Beschreibung

Es ist absehbar, dass der zu erwartende Klimawandel Auswirkungen auf viele gesellschaftliche und wirtschaftliche Bereiche haben wird. Die Landwirtschaft, als direkt vom Klima und Wetter abhängiger Sektor, ist in besonderer Weise betroffen, sowohl hinsichtlich ihrer Flächenausdehnung als auch hinsichtlich des unter den gegebenen bzw. erwarteten Klimabedingungen erzielbaren Fruchtertrags. In dieser Studie wurden für die kommenden fünf Dekaden die Auswirkungen des Klimawandels auf die wichtigsten in Hessen angebaute Feldfrüchte abgeschätzt. Basierend auf dem von der Firma Meteo-Research für Hessen regionalisierten IPCC-SRES B2-Klimaszenario wurden Futtermais, Wintergerste, Winterraps, Winterweizen, Zuckerrüben und Grünland untersucht. Dabei wurden sowohl Klimaauswirkungen auf die Ernteerträge als auch auf die Variabilität der Erträge, die Ertragssicherheit, analysiert.

Die Abschätzung der für die hessische Landwirtschaft möglichen Klimafolgen beruht auf der Simulation gegenwärtig genutzter Sorten und Anbaupraktiken. Die Quantifizierung der möglichen Ertragsgewinne neuer Sorten, neuer Kulturen oder anderer Anpassungsmaßnahmen war nicht Gegenstand dieser Untersuchung, kann aber in Folgestudien abgeschätzt werden. Risiken durch klimabedingte Pflanzenkrankheiten und Schädlingsbefall sowie durch häufigere Starkregen verursachte Bodenerosion bleiben hier unberücksichtigt.

Für diese Untersuchung wurde das ursprünglich an der Colorado State University (USA) und an der Universität Kassel modifizierte und weiter entwickelte Simulationsmodell DAYCENT verwendet. Die physiologischen Parameter der simulierten Feldfrüchte und des Grünlands wurden soweit erforderlich neu erhoben und für nord-, mittel- und südhessische Klima- und Anbaubedingungen und Ertragsniveaus angepasst.

### Ergebnisse und Auswirkungen des Klimawandels

Die Simulationsergebnisse zeigen, dass im landesweiten Durchschnitt der Einfluss des Klimawandels auf die hessische Landwirtschaft in den nächsten 5 Dekaden voraussichtlich zu sinkenden (bis -14 %) bis leicht steigenden Erträgen (bis +5 %) führen wird, innerhalb eines Bereichs von etwa -40 % bis +20 %. Die Ursachen für die Änderungen der Ertragsniveaus liegen einerseits in den steigenden Temperaturen, welche bei Getreide im Mittel zu einem verfrühten Abreifen führen. Weiterhin treten häufigere Phasen von warmen bis heißen Sommern bei gleichzeitiger Sommertrockenheit auf, die sich an wasserlimitierten Standorten negativ auf das Pflanzenwachstum und die Ertragsbildung auswirken können. Die Ertragsrückgänge sind mit bis zu -14 % am stärksten bei Raps, gefolgt von Weizen (bis -10 %) ausgeprägt, während Gerste kaum betroffen ist. Mais und Zuckerrüben nehmen mit etwa 5 %

Ertragsreduktion eine Mittelstellung ein. Grünland profitiert mit bis zu +10 % Ertragszuwachs von den durch die höheren Temperaturen bedingten längeren Vegetationsperioden.

Durch die Zunahme der Häufigkeit extremer Wetterbedingungen nimmt die Variabilität der Erträge vor allem bei Zuckerrüben und Gerste bis 58 % zu, und auch die Biomasseproduktion von Grünland zeigt eine bis 57 % erhöhte Variabilität. Die Ertragssicherheit für die Landwirte nimmt für die genannten Feldfrüchte deutlich ab. Die Ertragsvariabilität der anderen Feldfrüchte Mais, Raps und Weizen bleibt weitgehend im Rahmen des Vergleichszeitraums 1980-2000.

Die im Mittel für Hessen zu erwartenden Klimaänderungen werden weder zeitlich noch räumlich homogen oder in einem kontinuierlichen Trend auftreten. Die auch in Zukunft zu erwartende hohe kleinräumige Klimavariabilität spiegelt sich in dieser Studie in den teils gegenläufigen Ertragstrends der hessischen Agrarregionen Nord – Mitte – Süd wider, was hier am Beispiel der Gerste verdeutlicht werden soll. In Nordhessen zählt Gerste mit 4-6 % Ertragssteigerung zu den „Gewinnern“ des Klimawandels, während sie im Süden bei mittlerer Variabilität auf heutigem Niveau verbleibt, aber in Mittelhessen bei gleichzeitig hoher Variabilität um bis zu 10 % Mindererträge zu erwarten sind. Die Erträge der anderen Feldfrüchte entwickeln sich zum Teil ebenfalls regional unterschiedlich, aber nicht notwendigerweise gleichsinnig mit den Gerstenerträgen. Unsere Ergebnisse belegen darüber hinaus, dass auch auf Landkreisebene mit unterschiedlichen Klimawandelfolgen für die Landwirtschaft zu rechnen ist.

### **Mögliche Anpassungsmaßnahmen**

Die negativen Klimawirkungen auf die Erträge in Hessen angebaute Feldfrüchte können durch den Anbau geeigneter Sorten, welche an die höheren Temperaturen und trockeneren Sommer angepasst sind, kompensiert oder sogar für Mehrerträge genutzt werden. Sowohl Neuzüchtungen als auch die Verwendung von Sorten aus wärmeren Klimazonen sind in diesem Kontext denkbar. Ob der Einsatz von Bewässerungsmaßnahmen zur Kompensation von Ertragsverlusten ökonomisch (und ökologisch) sinnvoll ist, kann nur standortspezifisch beurteilt werden. Weitere Anpassungsstrategien sollten darauf zielen, die durch die Zunahme der Klimavariabilität verursachten Risiken zu minimieren. Da – wie in dieser Studie gezeigt – die Klimawirkung auf die hessischen Feldfrüchte unterschiedlich ausfällt, könnte Diversifizierung im Anbau eine geeignete Maßnahme zur Kompensation eventueller Mindererträge sein.

Anpassungsmaßnahmen an den zu erwartenden Klimawandel sollten nach Möglichkeit neben neuen Risiken auch neue Chancen für die hessische Landwirtschaft berücksichtigen. Der frühere Vegetationsbeginn im Frühjahr kann zur Vorverlegung zukünftiger Aussattermine und damit zu einer besseren Ausnutzung der gesamten Vegetationszeit verwendet werden. Darüber hinaus sollte untersucht werden, ob sich durch den Klimawandel in Hessen neue Möglichkeiten für die Einführung von Feldfrüchten oder anderer Kulturen bieten und damit neue Chancen für eine in vielen Teilregionen Hessens durch Flächenstilllegung und Extensivierung gekennzeichnete Landwirtschaft.

Die Kosten für Anpassungsmaßnahmen sind im einfachsten Fall bei Verwendung bereits existierender Sorten und Agrartechnologie vernachlässigbar. Kosten für Neuzüchtungen sind zwar nur teilweise klimabedingt, entstehen aber im Rahmen einer gezielten Weiterentwicklung von Sorten hinsichtlich eines höheren Temperaturoptimums und einer höheren Trockentoleranz. Nennenswerte Kosten entstehen ebenfalls bei der möglichen Neuinstallation bzw. Erweiterung von Bewässerungsanlagen sowie bei Neueinführung von Kulturen während der Etablierung und für die benötigte Agrartechnologie.

**Ausblick**

Abschließend kann festgestellt werden, dass die innerhalb der nächsten 50 Jahre zu erwartenden Ertragsänderungen von -40 % bis +20 % die Landwirtschaft vermutlich nicht vor unlösbare Probleme stellen, vorausgesetzt, dass die hier angenommenen sehr moderaten Klimaänderungen eintreten. Jedoch stellen die Auswirkungen des Klimawandels in jedem Fall neben den zu erwartenden sozioökonomischen Veränderungen durch EU-Erweiterung und veränderte nationale und europäische Agrarpolitik eine zusätzliche Belastung und Herausforderung an die Anpassungsfähigkeit der hessischen Landwirtschaft dar.

Um in einem nächsten Schritt konkrete Handlungsempfehlungen für die Landwirte vor Ort zu erarbeiten, sind weitere Studien erforderlich, welche die in dieser Arbeit belegten Auswirkungen der kleinräumigen Klimavariabilität auf landwirtschaftliche Erträge näher untersuchen. Für die hessische Landwirtschaft wird vor allem die Beantwortung der Frage entscheidend sein, in welcher Spannbreite mit Klimaveränderungen zu rechnen ist, eine Frage, die nur unter Einbeziehung weiterer Klimaszenarien zu beantworten sein wird.

## 2.6 Klimafolgen in der Forstwirtschaft

**Thema:** Kartenbezogene Grundlagen der Waldentwicklung unter dem Einfluss von Klimaänderungen

**Auftragnehmer:** Prof. Dr. Johannes Eichhorn, HESSEN-FORST Forsteinrichtung, Information, Versuchswesen (FIV), Hann. Münden

**Projektbeteiligte:** Prof. Dr. Johannes Eichhorn, Dr. Uwe Paar, Dr. Marcus Schmidt, Dr. Egbert Schönfelder, Birte Scheler, HESSEN FORST FIV (Hann. Münden) sowie Dr. Volker Mues

**Projekt-Laufzeit:** Januar 2005 bis Juni 2005

### Beschreibung

Zu einer ersten Abschätzung möglicher Folgen der Klimaveränderungen für die Forstwirtschaft wurden folgende Fragestellungen bearbeitet:

- Wie verändern sich klimabedingt die Standortselemente „Wuchszone“ und „Klimafeuchte“ (HAFEA)?
- Wie verändert sich die Bewertung für die Hauptbaumarten hinsichtlich des Standorts- und Betriebszieltyps gemäß der Hessischen Anweisung für Forsteinrichtungsarbeiten (HAFEA)?
- Welche Folgerungen sind aus den Ergebnissen abzuleiten?

Grundlage der Auswertungen zu den Auswirkungen von Klimaveränderungen auf hessische Wälder ist ein 4 km x 4 km-Raster über die hessische Landesfläche. Fällt ein Schnittpunkt des Rasternetzes in Wald gemäß Hessischem Forstgesetz, wird dieser Ort zum Stichprobenpunkt. Dieses Stichprobennetz der Waldzustandserfassung (WZE) umfasst insgesamt 540 Messpunkte und ist für die Standorts- und Baumartenverteilung in Hessen repräsentativ. Insgesamt 534 der 540 einbezogenen Punkte sind mit jeweils mindestens 5 Bäumen der Hauptbaumarten bestockt und werden demzufolge in der Auswertung berücksichtigt. Jede Hauptbaumart wird gesondert betrachtet.

Für die von HESSEN-FORST FIV übermittelten WZE-Stichprobenpunkte wurden für die Zeiträume 1971-2000 sowie 2011-2050 die folgenden Parameter vom HLUg (Dezernat W3, Herr Dr. Georg Berthold, Herr Mario Hergesell) aufbereitet und zur Verfügung gestellt:

- Mittlere Niederschlagssumme Jahr
- Mittlere Lufttemperatur Jahr
- Mittlere Niederschlagssumme Vegetationszeit (Mai-Sept.)
- Mittlere Lufttemperatur Vegetationszeit (Mai-Sept.).

Die Konvertierung der Klimadaten und -szenarien auf das 4 km x 4 km-Rasternetz erfolgte im Rahmen eines aufwändigen Rechenverfahrens und wurde vom HLUg vorgenommen.

Für die Periode 1971-2000 (30-jähriger Referenzzeitraum des Deutschen Wetterdienstes) konnten sowohl für die Niederschlagsdaten als auch für die Temperaturdaten die gefragten Parameter (mittlere Jahreswerte, Werte für die Vegetationsperiode) korrigiert und aufbereitet werden. Für die vier Dezennien zwischen 2011 und 2050 lagen die Ergebnisse der Klimaszenarien der Firma Meteo-Research vor.

Als „Ist-Zustand“ wird aufgrund seiner Bedeutung in der Forsteinrichtung der Zeitraum 1891-

1955 definiert. Die Ergebnisse für die einzelnen Perioden bzw. Dekaden verdeutlichen die Veränderungen gegenüber dem „Ist-Zustand“.

Grundlage für die Analyse der Standortveränderungen sind die Festlegungen zur Herleitung des Standortstyps gemäß der Hessischen Anweisung für die forstliche Standortaufnahme (HAFEA). Die nachfolgenden Analysen umfassen dabei die Elemente Wuchszone und Klimafeuchte.

#### Wuchszone

Für die Abgrenzung der Wuchszonen wurden die Temperaturen in der Vegetationszeit zugrunde gelegt (Klimahaupttyp).

#### Klimafeuchte

Die Klimakomponente des Wasserhaushalts wird in Hessen mithilfe der Klimafeuchte als „Feuchtigkeitsindex“ gekennzeichnet. Indikator dafür ist ein Quotient aus der mittleren Niederschlagssumme Mai bis September dividiert durch die Summe aus mittlerer Temperatur Mai bis September plus 10.

### **Ergebnisse**

#### Analyse des Standortselements Wuchszone

Zum Zeitpunkt des „Ist-Zustands“ liegen  
12 % der Punkte in den Buchenzonen,  
50,8 % der Punkte in der Oberen Buchen-Mischwaldzone,  
27,4 % in der Unteren Buchen-Mischwaldzone,  
6,5 % in der Randlichen Eichen-Mischwaldzone  
und 3,3 % in der Zentralen Eichen-Mischwaldzone.

Für die Dekade 2041-2050 ergibt sich schließlich folgende Häufigkeitsverteilung:

Untere Buchenzone 0,4 %,  
Obere Buchen-Mischwaldzone 1,7 %,  
Untere Buchen-Mischwaldzone 3,0 %,  
Randliche Eichen-Mischwaldzone 29,8 %  
und Zentrale Eichen-Mischwaldzone 65,1 %.

Die Obere Buchenzone ist nicht mehr vertreten. Nach den Szenarienberechnungen sind somit Mitte des 21. Jahrhunderts ca. 95 % der hessischen Waldfläche dem Klimahaupttyp der Eichen-Mischwaldzonen zuzuordnen. Diese Aussage betrifft ausschließlich den Standortfaktor „Temperatur in der Vegetationszeit“. Die Einflüsse aller übrigen Standortfaktoren (Niederschlag, Bodenwasserhaushalt, Exposition usw.) sind ausgeblendet.

#### Analyse des Standortselements Klimafeuchte

Für 1891-1955 zeigt sich eine Häufigkeitsverteilung, bei der ca. 50 % der hessischen Waldfläche dem schwach subkontinentalen und ca. 25 % dem schwach subatlantischen Klimafeuchte-Bereich zuzuordnen sind. Die Veränderungen der Klimafeuchte bis 2050 zeigen weniger deutliche Tendenzen als die der Wuchszonen. Für die Dekade 2041-2050 wird gegenüber 1891-1955 nur eine Verschiebung um eine Klimafeuchtestufe zum subkontinentalen Bereich hin erwartet.

## **Auswirkungen des Klimawandels**

Für die Forstwirtschaft ist eine Analyse von Auswirkungen des Klimawandels schwierig aufgrund

- langfristiger Produktionszeiträume
- einer großen Variabilität von Standorten und Baumarten
- komplexer Regelkreise in naturnahen Ökosystemen
- großem Anpassungsvermögen von Baumarten sowie
- vielfältiger Eingriffsmöglichkeiten durch die Waldbewirtschaftung.

Im engen zeitlichen und finanziellen Rahmen des INKLIM-Programms wurde von forstlicher Seite daher eine Untersuchung eingebracht, die den Charakter einer Vorstudie hat.

Die Ergebnisse der Untersuchung lassen einen möglicherweise erheblichen Einfluss der prognostizierten Klimavariabilität auf den hessischen Wald erkennen. Wirkungen können sich sowohl auf forstliche Standorte als auch auf Betriebsziele der Hauptbaumarten ergeben.

Die folgenden Aussagen beziehen sich jeweils auf die Eignung als Hauptbaumart eines Bestandes. Die Standortpalette der Eignung als Mischbaumart wird deutlich breiter sein.

### Buche

Von den 534 einbezogenen WZE-Punkten sind heute 215 (40 %) betriebszielkonform mit Buche bestockt; weitere 262 Punkte (49 %) sind potenziell für den Buchen-Anbau geeignet (betriebszielkonform).

Im Verlauf der Szenarien für die Dekaden bis 2050 reduziert sich der Anteil von heute mit Buche betriebszielkonform bestockten Flächen auf 28 % (150 Punkte), derjenige der potenziell geeigneten auf 34 % (182 Punkte). Die deutliche Reduzierung des Anteils potenziell für die Buche geeigneter Standorte ist bedingt durch die Zunahme von in der HAFEA nicht beschriebenen Standortkombinationen, weil diese bisher nicht vorkommen oder unter heutigen Produktionsbedingungen nicht vorgesehen sind. Es ist davon auszugehen, dass die Mehrzahl dieser Standortkombinationen für den Buchen-Anbau geeignet ist.

### Eiche

Insgesamt 80 von 534 WZE-Punkten (15 %) sind heute betriebszielkonform mit Eiche bestockt; potenziell geeignet wären weitere 309 (57 %).

Der Anteil von heute mit Eichen bestockten Flächen, die in der Dekade 2041-2050 noch betriebszielkonform wären, bleibt mit 13 % (70 Punkten) relativ konstant. Potenziell geeignet wären weitere 48 % (258 Punkte). Der Rest entfällt auf nicht beschriebene Standortkombinationen, die aber möglicherweise in der Mehrzahl eichentauglich wären.

### Fichte

Der Gesamtanteil betriebszielkonformer Standortbereiche liegt heute für die Fichte in Hessen bei 61 %.

Der Anteil von Standorten, auf denen die Fichte dem Betriebszieltyp entspricht, reduziert sich im Verlauf der Szenarien für die Dekaden bis 2050 erheblich. Inwieweit die Kategorie „nicht beschrieben“ den Anteil von potenziell für den Fichten-Anbau geeigneten Flächen erhöhen kann, ist zu analysieren. Es ist davon auszugehen, dass ein Teil dieser Standortbereiche für den Fichten-Anbau geeignet ist.

## Kiefer

Der Anteil der betriebszielkonformen Kiefern-Fläche in Hessen (aktuell und potenziell mit Kiefer bestockt) liegt bei ca. 39 %.

Im Verlauf der Szenarien für die Dekaden bis 2050 bleibt dieser Anteil trotz geringfügiger Variabilitäten im Verlauf der Szenarien weitgehend konstant und liegt in der Dekade 2041-2050 bei ca. 45 %.

Die Summe der prognostizierten Standorteignungen für die vier Hauptbaumarten liegt wegen Mehrfacheignung weit über 100 %. Nicht berücksichtigt wurden in der Studie mögliche Einflüsse von Extremereignissen wie Sturmwurf oder Insektengradationen.

## **Mögliche Anpassungsmaßnahmen**

### Anpassungsmaßnahmen mit ökonomischer Relevanz

Eine Anpassung an veränderte Rahmenbedingungen erfordert zunächst Anpassungen in strategischen Überlegungen. Durch den möglichen Ausfall einer Baumart/eines Sortiments und eingeschränkte Flexibilität, Produkte am Markt anzubieten, können Mindererlöse entstehen. Mögliche Anpassungsmaßnahmen sind:

- Mehraufwendungen für verstärkte Kulturbegründungen, etwa bei einem notwendigen Bestockungswandel bzw. nach Kalamitäten
- Mehraufwendungen im Waldschutz für Monitoring, Beratung und Maßnahmen
- Mehraufwendungen für anwendungsorientierte Forschungsarbeiten.

### Forschungsbedarf

Das für die Forstwirtschaft in Hessen sehr relevante Thema erfordert weitere wissenschaftliche Arbeiten, die möglichst in einer dem INKLIM-Programm ähnlichen Struktur fortgeführt werden sollten.

Konkret ist folgender Forschungsbedarf zu benennen:

- Auswertung von ökologischen Grundlageninformationen zu den Baumarten (z. B. Ökogramme); Definition von Standortsgerechtigkeit im Rahmen einer Arbeitsgruppe innerhalb des Landesbetriebes HESSEN-FORST
- Überarbeitung des standortbezogenen Betriebszieltypenkatalogs mit Eignung als Haupt- oder Mischbaumart
- Berechnung von Szenarien zur Bewertung der Standortsgerechtigkeit auf der Basis der ökologischen Ansprüche der Baumarten
- Diskussion waldbaulicher Konsequenzen bzw. Anpassungsmaßnahmen; Einbringung in eine Fortschreibung der Waldbaurichtlinien
- Weiterführung der Szenarienberechnung bis 2100
- Berechnung der „Extremszenarien“
- Standorts- und Betriebszielanalyse für Douglasie
- Überarbeitung der Wuchszoneneinteilung
- Herleitung notwendiger forstlicher Anpassungsmaßnahmen hinsichtlich der Neuausrichtung von Betriebszieltypen.

**Ausblick**

Die Studie zeigt, dass gerichtete Einflüsse einer möglichen Klimaänderung auf die Waldentwicklung wahrscheinlich sind.

Noch erscheinen die Szenarien in ihrer räumlichen und zeitlichen Auflösung nicht als hinreichend sicher, das Ausmaß der Wirkungen wie zu empfehlende Anpassungsmaßnahmen nicht als ausreichend geklärt. Eine Validierungsmöglichkeit bietet das Informationssystem der Waldzustandserhebung.

Weitere Anstrengungen sind notwendig, um Politik, Verwaltung, Betrieb und Öffentlichkeit angemessen beraten zu können.

## 2.7 Klimafolgen in der Pflanzenphänologie

**Thema:** Klimawandel und Pflanzenphänologie in Hessen

**Auftragnehmer:** Herr PD Dr. Ludger Grünhage & Herr Prof. Dr. Dr. h. c. Hans-Jürgen Jäger, Institut für Pflanzenökologie, Universität Gießen

**Projektbeteiligte:** Anita Streitfert, Herr PD Dr. Ludger Grünhage

**Projekt-Laufzeit:** September 2004 bis August 2005

### Beschreibung

In unseren Breiten wird die Pflanzenentwicklung maßgeblich durch den Temperaturverlauf bestimmt. Phänologische Beobachtungen sind daher gute Indikatoren zur Untersuchung der Auswirkungen von Klimaänderungen in der Biosphäre.

Im Rahmen von INKLIM 2012 – Baustein II – wurden die phänologischen Zeitreihen aus Hessen ausgewertet und im Hinblick auf regionale Klimaänderungen beurteilt.

### Ergebnisse

Das Klima in Hessen hat sich in dem Untersuchungszeitraum (1961-2000) nachweislich verändert. Am Beispiel von Gießen konnte gezeigt werden, dass die Jahresmittelwerte der Lufttemperatur um 1 °C in den letzten 4 Dekaden gestiegen sind und damit verbunden die Anzahl der Sommertage ( $T_{\max} \geq 25 \text{ °C}$ ) und der heißen Tage ( $T_{\max} \geq 30 \text{ °C}$ ) zugenommen und die der Frosttage ( $T_{\min} < 0 \text{ °C}$ ) abgenommen hat.

Die Ergebnisse dieser Studie zeigen, dass die Pflanzen auf die Klimaänderung in Hessen reagiert haben. In der Pflanzenentwicklung konnten – wie nachstehend zusammengefasst – in den letzten 40 Jahren zeitliche Verschiebungen beobachtet werden.

Beginn der phänologischen Jahreszeiten in Hessen

Phänologische Jahreszeit	Zeigerpflanze und phänologische Phase	Eintrittsdatum der Phänophase (JTZ)			Trend	
		1961 - 1990	1991 - 2000	Signifikanz	Tage/Dekade	Signifikanz
Vorfrühling	Haselnuss (Blüte)	60	46	*	-5,5	**
Erstfrühling	Forsythie (Blüte)	95	84	*	-3,9	*
Vollfrühling	Apfel (Blüte)	126	118	**	-2,2	*
Frühsommer	Schwarzer Holunder (Blüte)	157	148	**	-3,1	**
Hochsommer	Sommer-Linde (Blüte)	180	171	***	-2,8	**
Spätsommer	Frühapfel (Pflückreife)	222	217	*	-0,4	n.s.
Frühherbst	Schwarzer Holunder (Fruchtreife)	244	237	**	-2,8	**
Vollherbst	Stiel-Eiche (Fruchtreife)	269	264	**	-1,8	**
Spätherbst	Stiel-Eiche (Blattverfärbung)	288	289	n.s.	0,5	n.s.
Vegetationsruhe	Winterweizen (Beginn des Auflaufens)	301	295	***	-2,5	***

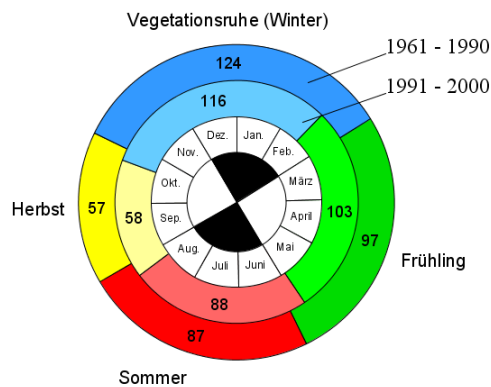
JTZ = Jahrestagszahl  
 n.s.: nicht signifikant    \*: signifikant    \*\*: hoch signifikant    \*\*\*: höchst signifikant

Der Eintritt der phänologischen Phasen hat sich verfrüht, wobei die Frühjahrsphasen den stärksten Trend zeigen. Sie reagieren sehr deutlich auf die höheren Temperaturen in den

Wintermonaten. Der frühere Beginn der Phänophasen wurde im Jahresverlauf kleiner und hat sich im Herbst in manchen Regionen sogar verzögert, was eine Folge milder Witterung sein könnte.

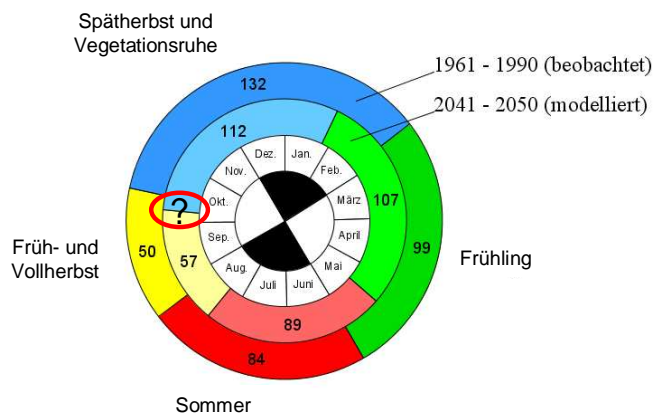
Die klimatischen Veränderungen haben folglich unterschiedliche Auswirkungen auf die Pflanzen. Nicht alle Pflanzenphasen reagieren mit einer früheren Entwicklung. Die Blattverfärbung der Stiel-Eiche setzt in vielen Regionen Hessens später ein. Am Beispiel dieser Phase wird deutlich, dass sich die Pflanzen regional unterschiedlich entwickelt haben. Dadurch kommt es zu gegensätzlichen Trends in benachbarten Naturräumen. Dies spiegelt sich auch im Bezug auf die Dauer der Vegetationsperiode wider. Während sich die Vegetationszeit in manchen Regionen verlängert hat, ist sie wiederum in anderen unverändert geblieben. Im Taunus konnte sogar eine Verkürzung der Vegetationsperiode beobachtet werden.

Bei Betrachtung der vereinfachten phänologischen Uhr für Hessen zeigt sich, dass sich die



innere Uhr mit den Eintrittsdaten für die Dekade 1991-2000 im Vergleich mit der äußeren Uhr (Klimanormalperiode 1961-1990) entgegen den Uhrzeigersinn gedreht hat.

Die beobachteten Veränderungen in der Pflanzenentwicklung setzen sich auch in der Zukunft fort. Beispielhaft konnte für den Naturraum 348 (Marburg-Gießener-Lahntal) mit Hilfe von Modellen aufgezeigt werden, dass sich – wie in der nachstehenden vereinfachten phänologischen Uhr für die Dekaden 1961-1990 und 2041-2050 illustriert – der Eintritt der Jahreszei-



(Das Fragezeichen in der inneren Uhr symbolisiert die unsichere Prognose des Beginns von Spätherbst und Vegetationsruhe)

ten weiter verfrühen wird: Der Frühling wird in der Dekade 2041-2050 im Mittel bereits am 27.01. beginnen. Der Trend zur Verlängerung der Vegetationsperiode, hauptsächlich auf dem früheren Vegetationsbeginn basierend, wird sich in der Zukunft weiter verstärken.

Die Abschätzung des Auftretens von Spätfrösten zur Zeit des Blühbeginns ( $\pm 10$  Tage) von ausgewählten Obstgehölzen (Apfel, Birne, Süß- und Sauerkirsche) und Beerensträuchern

(Rote Johannisbeere, Stachelbeere) im Naturraum 348 (Marburg-Gießener-Lahntal) zeigt, dass in der Dekade 2041-2050 im Mittel je nach Obst 6 bis 9 Jahre mit Spätfrost auftreten könnten. In der Gesamtschau sind im Vergleich zu den letzten 40 Jahren keine gravierenden Änderungen zu beobachten: Ein Vergleich der Dekade 2041-2050 mit dem Zeitraum 1991-2000 zeigt eine leichte Abnahme der Anzahl der Jahre mit Spätfrost, ein Vergleich dieser Dekade mit der Klimanormalperiode 1961-1990 dagegen eine leichte Zunahme der Spätfrostgefahr. Für den Apfel nimmt die Gefahr bei dieser Betrachtungsweise durch eine annähernde Verdopplung der Anzahl der Jahre mit Spätfrost im Vergleich zur Klimanormalperiode 1961-1990 sogar deutlich zu. Betrachtet man nur den Zeitraum nach Beginn der Blüte, so erhöht sich – im Vergleich zur Klimanormalperiode – die Gefahr durch Spätfrost für Apfel, Birne und Sauerkirsche.

### **Auswirkungen des Klimawandels und mögliche Anpassungsmaßnahmen**

Für den Obstbau ist der Spätfrost von besonderer Bedeutung, da Frost während der Obstblüte zu völligen Ertragsausfällen führen kann. Durch den früheren Beginn der Vegetationsperiode und damit zeitigeren Austrieb der Pflanzen wird diese Gefahr in der Zukunft trotz der prognostizierten Klimaerwärmung weiterhin bestehen.

Erhöhte Temperaturen und verminderte Niederschläge im Sommer bzw. längere Trockenperioden haben vielfältige Auswirkungen auf Pflanzen in ihren Ökosystemen zur Folge. Verallgemeinernd lässt sich sagen, dass die sich verschlechternden Wachstums- und Entwicklungsbedingungen in geringerer Biomasseproduktion resultieren könnten. Eine lang anhaltende Trockenheit im Sommer kann eine vorzeitige Reife bei Obst und Getreide verursachen, was ebenfalls Ertragseinbußen zur Folge haben könnte. Diese könnten durch den Anbau von besser angepassten Kulturen minimiert werden. Daneben sind evtl. neu angepasste Bestandesdichten, Aussaat- und Pflanztermine zu bedenken. Auch Intensivierung und Ausweitung der Bewässerung sowie bodenschonende Maßnahmen und standortangepasste Bewirtschaftungsformen zur Gewährleistung der Nährstoffverfügbarkeit auch in niederschlagsarmen, d. h. trockenen Zeiten, kann das Ertragsrisiko minimieren. Eine trocken warme Witterung kann zudem zu Massenvermehrungen und damit zu starkem Schädlingsbefall in Wäldern, aber auch in der Landwirtschaft führen. Erosionsmindernde Anbauverfahren, die das Bodengefüge schützen und damit eine gute Durchwurzelung, d. h. gute Wasseraufnahme gewährleisten, können die Folgen von Starkniederschlagsereignissen abmildern.

Für die Wälder sind besonders die Folgen der Trockenheit problematisch. Geringe Niederschläge führen zu Wachstumsschäden und Absterben der Bäume. Diesem könnte durch Pflanzung von trockentoleranteren Arten entgegengewirkt werden.

Erhöhte Niederschläge in den Wintermonaten – wie für Hessen prognostiziert – könnten darüber hinaus Folgen für die Bestellung von Ackerflächen nach sich ziehen.

### **Ausblick**

Die für den Naturraum 348 (Marburg-Gießener-Lahntal) und die Dekade 2041-2050 durchgeführte Analyse zur Gefährdung von Obstgehölzen und Beerensträuchern durch Spätfrost sollte auf weitere Naturräume und Kulturen (Pflaume, Erdbeere, Himbeere, Brombeere) ausgeweitet werden und für jede Dekade dieses Jahrhunderts erfolgen.

## 2.8 Klimafolgen im Weinbau

**Thema:** Der Einfluss klimatischer Veränderungen auf die phänologische Entwicklung der Rebe, die Sorteneignung sowie Mostgewicht und Säurestruktur der Trauben

**Auftragnehmer:** Prof. Dr. Hans R. Schultz, Forschungsanstalt Geisenheim, Fachgebiet Weinbau

**Projektbeteiligte:** Prof. Dr. Hans R. Schultz, Dr. Dieter Hoppmann, Marco Hofmann

**Projekt-Laufzeit:** November 2004 bis Mai 2005

### Beschreibung

Basierend auf den Daten der Firma Meteo-Research wurden verschiedene Abschätzungsmodelle verwendet bzw. entwickelt, um die Auswirkungen klimatischer Veränderungen auf den Weinbau in Hessen quantifizieren zu können. Dabei wurde immer mit einem warmen und einem kühlen Szenario für 3 Standorte gerechnet. Diese Standorte waren Geisenheim, repräsentativ für den Rheingau, Frankfurt, repräsentativ für die östlichste Ausdehnung des Weinbaus in Hessen und Gernsheim, repräsentativ für das Anbaugebiet Hessische Bergstraße. Es wurden Modelle zur Berechnung der Rebenphänologie, der Mostgewichtsbildung, des Wasserhaushalts, der Sorteneignung und des Äpfelsäureabbaus verwendet bzw. entwickelt und mit den Szenarien gerechnet.

### Ergebnisse

Bei den Berechnungen hinsichtlich der temperaturabhängigen Größen ist deutlich geworden, dass der Klimawandel sich nicht langsam bis zum Ende des Jahrhunderts vollziehen wird, sondern dass die meisten temperaturbedingten Auswirkungen, welche den Weinbau betreffen, schon im Jahrzehnt von 2050-2060 vollständig ausgeprägt sein werden.

Ein Temperaturanstieg wird die phänologische Entwicklung der Rebe sowie die Sorteneignung nachhaltig beeinflussen. Die milderen Winter, Frühjahre und wärmeren Sommer werden den Vegetationsablauf beschleunigen. Bereits heute liegt der Austriebstermin in Geisenheim ca. 7 Tage früher als im Durchschnitt der letzten 40 Jahre, die Blüte beginnt 10 Tage früher und der Reifebeginn hat sich bereits 12 Tage nach vorne geschoben. Diese Tendenz wird anhalten und je nach verwendetem Klimaszenario wird sich eine weitere Verfrühung des Austriebs von bis zu 1 Woche und eine Verfrühung der Blüte von bis zu 10 Tagen einstellen. Trotz früheren Austriebs wird sich das Spätfrostisiko vermindern.

In unseren Simulationsberechnungen zeigen sich deutlich positive Entwicklungen im Bereich des Mostgewichts, welches ansteigen wird, vorausgesetzt, dass die trockenen Jahre nicht überproportional zunehmen und es zu häufigen Wassermangelsituationen kommen wird. Gleichzeitig kommt es aber zu erhöhten Abbauraten der Äpfelsäure, was langfristig auch zu einem anderen Weintyp führen könnte.

Die Ergebnisse zeigen, dass in den hessischen Weinbaugebieten in Zukunft andere Sorten angebaut werden könnten als dies bisher der Fall ist. Gleichzeitig zum Anstieg der Temperaturen wird eine Veränderung der Niederschlagsverteilung erwartet. Die Tendenz ist zumindest für den Winter eindeutig. So werden dort deutlich mehr Niederschläge fallen. Beim Sommer ist die Richtung nicht ganz klar, doch geht hier die Tendenz zu geringeren Niederschlagssummen. Insgesamt werden mehr Starkregen fallen als bisher, was bei gleich bleibender Gesamtmenge niedrigere Bodenwasserwerte durch höheren Oberflächenablauf bedeutet. Dadurch

wird sich das Bodenwassermanagement vor allem in Trockenlagen verändern müssen.

### **Auswirkungen des Klimawandels**

Von weinbaulicher Relevanz ist die errechnete Verfrühung der phänologischen Entwicklung vor allem für die Reifephase, die dann unter sehr viel höheren Temperaturen ablaufen wird, was die Inhaltsstoffbildung nachhaltig beeinflusst. In Kalifornien geht man bereits von Einflüssen auf die Weinqualität aus, die vor allem auf den durchschnittlich wärmeren Nachttemperaturen beruhen sollen. Die erhöhten Temperaturen haben einen deutlichen Einfluss auf die Abbauraten bei der Äpfelsäure. Da Säuerung nach dem deutschen Weingesetz nicht erlaubt ist, müssten hier in Zukunft auch rechtliche Grundlagen geschaffen werden, um den zu erwartenden Problemen entgegenzuwirken. Diese liegen vor allem im Bereich von niedrigen Säuren und dadurch bedingt hohen pH-Werten, die dann zu mikrobiologisch problematischen Bedingungen führen können.

In Europa wird die Erwärmung mittelfristig auch zu Verschiebungen im Sortenspektrum führen. Insgesamt wird im Rheingau die Anbaueignung von Sorten wie Merlot oder Cabernet Sauvignon erreicht werden und die Produktion von Eiswein wird für die Erzeuger ein zunehmendes Risiko darstellen. Der Temperaturanstieg wird die potenziell möglichen Anbaugrenzen um 200 bis 400 km nordwärts und um 100 bis 150 m in die Höhe verschieben. Dies wird Auswirkungen auf den Weinmarkt haben, welche den Weinbau vielleicht stärker beeinflussen als die direkten klimatischen Änderungen.

In dieser Arbeit wurden in erster Linie die Folgen erörtert, welche von einer Zunahme der Temperatur bewirkt werden. Neben der Temperaturerhöhung gibt es noch andere Faktoren. Der starke Anstieg der atmosphärischen CO<sub>2</sub>-Konzentration ist neben der Temperatur der auffälligste Faktor der Klimaänderung. Bei der Rebe wird wie bei anderen Kulturpflanzen ein so genannter CO<sub>2</sub>-Düngeeffekt beobachtet, der aus einer Erhöhung der Photosyntheseleistung resultiert und eine Verbesserung der Wassernutzungseffizienz bewirkt. Dieser Effekt ist noch nicht genügend quantifiziert, um ihn in Modellrechnungen einfließen zu lassen.

Durch die prognostizierte ausgeprägtere Trockenheit im Sommer wird sich das Bodenwassermanagement vor allem in Trockenlagen verändern müssen. Um hierzu klare Aussagen machen zu können, sind die hier gezeigten Hochrechnungen allerdings zu unsicher. Es wird allerdings bei einigen Standorten die Frage aufkommen, ob in manchen Lagen selbst eine Teilflächenbegrünung als Erosionsschutz, als Lieferant organischen Materials und als Grundlage der Mechanisierung risikofrei einsetzbar bleibt oder ob dies nur in Kombination mit Bewässerung erfolgen kann. Dies ist ein zwiespältiges Problem, da einerseits Modellabschätzungen ein stark erhöhtes Erosionsrisiko belegen, andererseits Wasser ein noch knapperes Gut werden wird und auch weitgehend die Infrastruktur zur Bewässerung fehlt (z. B. Reservoirs). Das Bodenmanagement wird aber auch Veränderung dadurch erfahren, dass sich die Abbauraten von organischem Material erhöhen werden.

Dies wird eine Anpassung der Humuswirtschaft erforderlich machen. Zusätzlich werden dadurch die Nährstoffauswaschungsraten wieder zunehmen und die ausreichende Nährstoffversorgung der Rebe im Sommer wird eventuell vermehrt über Blattapplikationen erfolgen müssen. Auch die Frage der Wahl der Unterlagen müsste unter diesen Klimaszenarien dann neu aufgegriffen werden. Trockenresistente Unterlagen, deren Einsatzgebiet bisher nur auf Südeuropa begrenzt war, könnten sich als ein zusätzlich geeignetes Instrument zur Verhinderung größerer Trockenschäden erweisen. Allerdings ist mit diesen Unterlagen auch eine relativ starke Wüchsigkeit und damit Neigung zu höherer Krankheitsanfälligkeit verbunden.

Es wird vermutet, dass die Ausbreitung verschiedener Rebschädlinge nach Norden durch Veränderung im Klima mit begünstigt wurde. Zikaden, Esca, Eutypia oder Schwarzfäule

waren vor 20 Jahren bei uns noch nahezu unbekannt, beim Traubenwickler wurde die bekreuzte Form nur in so genannten ‚warmen‘ Jahren angetroffen. Die milden Winter sorgen für ein relativ großes Reinfektionspotential im Frühjahr durch Pilzsporen, und die Generationenzahl bei Insekten nimmt zu. Ein Beispiel aus jüngster Vergangenheit aus Kalifornien zeigt, dass durch eine Reihe von sehr milden Wintern sich starke Populationen an Insekten (Leafhopper) aufbauen können, die nach Norden wandern und dort zu Überträgern gefährlicher Rebkrankheiten wie z. B. der sog. Pierces Disease werden.

### **Mögliche Anpassungsmaßnahmen**

Von weinbaulicher Seite können folgende Maßnahmen ergriffen werden:

- Verändertes Laubwandmanagement, um die Reife zu verzögern und aus den warmen Sommermonaten nach hinten zu schieben. Dies könnte den Weintyp weitgehend erhalten.
- Verändertes Humusmanagement mit verstärktem Eintrag an organischer Masse, um die Wasserspeicherfähigkeit der Böden zu erhöhen und den höheren Abbauraten entgegenzuwirken.
- Wassersparendes Bodenmanagement durch Abdeckung mit organischem Material.
- Verwendung trockentoleranter Unterlagen und Änderung des Stickstoffmanagements.
- Einsatz von Bewässerung.
- Gesetzesänderung hinsichtlich der Zugabe von Säure zur Stabilisierung des pH-Wertes.
- Anbau von Rebsorten, die derzeit in Deutschland noch kaum Verwendung finden.
- Einsatz anderer Pflanzenschutzmittel, um neu auftretende Schädlinge und Pilzkrankheiten zu bekämpfen.

### **Ausblick**

Für manche Standorte in Hessen könnten die aufgezeigten Szenarien problematisch werden. Dies gilt vor allem für flachgründige Steillagen, die nur ein geringes Wasserspeichervermögen aufweisen und dementsprechend stressgefährdet sind. Dies könnte zur vermehrten Bildung von Aromafehlern bei Weißwein führen. Des Weiteren könnte sich der Weincharakter unserer Rebsorten verändern. Es ist anzunehmen, dass die Weine mehr Alkohol, geringere Säuregehalte, niedrigere Extraktwerte und eine veränderte Aromatik aufweisen werden.

## 2.9 Klimafolgen im Obstbau

**Thema:** Folgen, Maßnahmen und Kosten des Klimawandels für den Obstbau in Hessen

**Auftragnehmer:** Prof. Dr. Helmut B. Jacob, Forschungsanstalt Geisenheim, Fachgebiet Obstbau

**Projektbeteiligte:** Prof. Dr. Helmut B. Jacob, Dipl.-Ing. Michael Koch

**Projekt-Laufzeit:** Dezember 2004 bis Juni 2005

### Beschreibung

Im Rahmen des Projektes „Integriertes Klimaschutzprogramm für Hessen 2012“ wurden durch das Fachgebiet Obstbau der Forschungsanstalt Geisenheim mögliche Folgen des Klimawandels für den hessischen Obstbau untersucht. Auf der Basis von Klimadaten und phänologischen Aufzeichnungen des Deutschen Wetterdienstes der Jahre 1951 bis 2004 sowie den simulierten Klimazeitreihen für Hessen bis 2050, die aus der „Anwendung eines statistischen Regionalisierungsmodells auf das Szenario B2 des ECHAM4 OPYC3 Klima-Simulationslaufes, bis 2050 zur Abschätzung regionaler Klimaänderungen für das Bundesland Hessen“ hervorgegangen sind, wurden mögliche Veränderungen in der Entwicklung kultivierter und wildwachsender Obstarten untersucht. Dabei standen sowohl der phänologische Trend der letzten 50 Jahre als auch die zukünftig zu erwartende Entwicklung, die anhand eines Temperatursummenmodells simuliert wurde, im Mittelpunkt der Arbeit. Dabei wurden regionale Unterschiede berücksichtigt, indem die hessischen Naturraumgruppen getrennt voneinander betrachtet wurden. Die hessische Obstbaufläche wurde dafür von der Ebene der Landkreise auf Naturraumgruppenebene umgerechnet, um die Bedeutung des Obstbaus in den Naturraumgruppen abschätzen zu können. Für einige wesentliche Risikofaktoren im Obstbau wurden mögliche Gegenmaßnahmen und die dadurch entstehenden Kosten aufgezeigt.

### Ergebnisse

Bereits die phänologischen Zeitreihen der letzten 50 Jahre lassen die tendenzielle Richtung bezüglich der Pflanzenentwicklung erkennen. Mit wenigen Ausnahmen ist für alle phänologischen Entwicklungsstadien und für alle Naturraumgruppen eine Verfrühungstendenz erkennbar. Das heißt, wesentliche Entwicklungsphasen der Obstgehölze wie Beginn des Austriebs, Blühbeginn oder Beginn der Fruchtreife haben sich in den letzten 40 Jahren zeitlich nach vorne verschoben. Zu beachten ist allerdings, dass die wenigsten Trends statistisch gesichert werden konnten und deshalb wirklich nur als Tendenz interpretiert werden können.

Durch die starke Abhängigkeit der Pflanzenentwicklung von der Temperatur ist es möglich, mit Hilfe eines Temperatursummenmodells die zukünftig zu erwartende Pflanzenentwicklung darzustellen. Grundlage dafür ist die in der Vergangenheit durchschnittlich benötigte Temperatursumme bis zum Eintritt einer bestimmten Entwicklungsphase. Aufgrund der durch den Klimawandel zu erwartenden höheren Temperaturen wird die durchschnittlich benötigte Temperatursumme zukünftig früher erreicht. Daraus resultiert ein früherer Beginn der wesentlichen Entwicklungsphasen aller Obstarten. Dabei sind keine ausgeprägten regionalen Unterschiede festzustellen. Die zu erwartende Verfrühung liegt in einem Bereich zwischen 10 und 15 Tagen, wobei die Verfrühung nicht gleichförmig voran schreitet, sondern vielmehr Schwankungen zwischen den einzelnen Dekaden unterworfen ist.

## **Auswirkungen des Klimawandels**

Rein auf die Pflanze bezogen, ist durch den Klimawandel bis zur Dekade 2041/2050 eine um bis zu 15 Tage verfrühte Pflanzenentwicklung (gg. 2001/2010) zu erwarten. Ebenso ist mit einer Verlängerung der Vegetationsperiode und einer größeren Jahrestemperatursumme zu rechnen. Diese Veränderung bietet die Chance, Obstarten und Sorten anzubauen, die bislang aufgrund des hohen Wärmebedarfs nicht zum Produktionsprogramm gehörten.

Der Klimawandel wird sich jedoch nicht nur in einer Temperaturerhöhung ausdrücken. Auch bei anderen Klimaparametern wie Niederschlag, Wind oder Strahlungsintensität ist mit Veränderungen zu rechnen. Der Obstbau ist in starkem Maße wetterabhängig und damit auch hohen Risiken durch ungünstige oder extreme Wetterereignisse ausgesetzt. Das war schon immer so und ist zunächst keine Folge des Klimawandels. Durch den Klimawandel ist jedoch eine Häufung extremer Wetterereignisse zu erwarten, was die Anbau Risiken für den Obstbau verschärfen kann.

Die Verfrühung der Pflanzenentwicklung an sich verursacht zunächst noch keine Kosten. Nur wenn Maßnahmen zur Frostabwehr ergriffen werden müssen, um die Produktion zu sichern, muss mit zusätzlichen Kosten, auf die im Punkt „mögliche Anpassungsmaßnahmen“ noch eingegangen wird, gerechnet werden. Durch extreme Wetterereignisse wie Hagel, Sturm, Starkregen, Trockenheit oder auch intensive Sonneneinstrahlung und hohe Temperatur können Schäden an Pflanzen und Früchten hervorgerufen oder die Fruchtqualität beeinträchtigt werden. Auf den heutigen gesättigten Märkten können beschädigte oder qualitativ minderwertige Früchte nicht abgesetzt werden. Die so entstehenden Ertragseinbußen, die sich auch als finanzieller Verlust für den Produzenten bemerkbar machen, können jedoch nicht genau quantifiziert und als Kosten definiert werden.

Der Aspekt Pflanzenschutz wurde in der aktuellen Arbeit nicht berücksichtigt. Es ist jedoch möglich, dass durch die erhöhte Lufttemperatur nicht nur die Entwicklung der Pflanzen, sondern auch die Entwicklung von Schädlingen und Krankheiten schneller voranschreitet, und dadurch Probleme im Erwerbsobstbau entstehen. Erhöhte Infektions- und Befallsrisiken ziehen einen erhöhten Bedarf an Pflanzenschutzmaßnahmen nach sich, die eine entsprechende finanzielle Belastung für die Produzenten darstellen.

Ein weiterer Aspekt kommt eher aus dem Nacherntebereich. Durch die höhere Temperatur kann die Haltbarkeit von obstbaulichen Produkten im Handel und beim Konsumenten herabgesetzt werden. Einer durchgängigen Kühlkette kommt somit eine größere Bedeutung zu, um Qualitätsverlusten entgegen zu wirken. Kann die Qualität nicht erhalten werden, sind Absatzrückgänge im Bereich des Möglichen. Demgegenüber kann aber auch ein erhöhter Absatz von Obst stehen, wenn die Konsumenten aufgrund der hohen Temperaturen auf kleine leichte Snacks zurückgreifen wollen. Auf diese Veränderungen kann der Produzent jedoch kaum reagieren. Es kann jedoch sein, dass die Vermarktungskosten aufgrund verstärkter Maßnahmen zur Qualitätserhaltung steigen.

## **Mögliche Anpassungsmaßnahmen**

Bei den Anpassungsmaßnahmen im Obstbau handelt es sich hauptsächlich um Maßnahmen zum Schutz der Kulturen vor extremen Wetterereignissen, die zu Schäden an Pflanzen oder Früchten führen würden. Viele dieser Maßnahmen werden aktuell schon vereinzelt eingesetzt. Der Klimawandel kann aber dazu führen, dass der Einsatz von Schutzmaßnahmen zwingend notwendig wird, um die Erzeugung von qualitativ hochwertigem Obst in Hessen weiterhin zu gewährleisten. Für einige wesentliche Risikofaktoren folgt an dieser Stelle eine Abschätzung der möglichen entstehenden Kosten für die hessische Obstbaufläche.

Schäden durch Frost werden auch in Zukunft nicht auszuschließen sein, so dass auf Maßnahmen zum Frostschutz nicht verzichtet werden kann. Die praxisübliche Frostschutzberechnung kann mit einer Vegetationsberechnung kombiniert werden, so dass mit einer Investition auch noch dem Risikofaktor Trockenheit entgegengetreten werden kann. Die jährlichen Kosten für die Erstellung und den Betrieb von Bewässerungsanlagen schwanken je nach Ausstattung und Bewässerungsbedarf zwischen 550 und 5.500 Euro pro Hektar. Um also die gesamte hessische Baumobst- und Erdbeeranbaufläche mit Bewässerungsanlagen zum Schutz vor Trockenheit und Frost zu versehen, ist ein jährlicher Aufwand im Bereich zwischen 0,5 und 5,9 Millionen Euro pro Jahr zu veranschlagen.

Hagel lässt sich nur schwer vorhersagen und wird auch in den simulierten Klimazeitreihen nicht prognostiziert. Es ist jedoch möglich, dass durch eine Zunahme extremer Wetterereignisse auch die Gefahr durch Hagelschlag zunimmt. Entsprechende Schutzmaßnahmen in Form von Hagelschutznetzen sichern die Produktion und die Marktversorgung nachhaltig. Darüber hinaus kann die schattierende Wirkung der Netze zukünftig als positiv bewertet werden, weil dadurch das Kleinklima der Anlage verbessert wird und die Gefahr von Sonnenrandschäden reduziert werden kann. Für die Erstellung von einem Hektar Hagelschutznetz ist bei einer Laufzeit von 15 Jahren eine jährliche Belastung zwischen 1.100 und 1.300 Euro zu berücksichtigen. Für den Schutz der gesamten hessischen Stein- und Kernobstfläche von 540 Hektar beläuft sich die jährliche Belastung somit auf 0,6 bis 0,7 Millionen Euro.

Neben dem Hagel stellt auch der Regen ein gewisses Anbaurisiko dar. Natürlich ist Regen zur richtigen Zeit in der richtigen Menge etwas Positives, aber die zu erwartenden Verschiebungen im Niederschlagsverhalten sind für den Obstbau eher negativ zu bewerten. Starke Niederschläge im Zeitraum der Ernte können vor allem bei Beerenobst und bei Kirschen zu starken Beschädigungen und Qualitätsverminderung führen. Eine Überdachung der Kulturen mit Regenschutzkappen kann Abhilfe schaffen und führt zudem zu einer verbesserten Fruchtqualität, die den Absatz auch in schwierigen Marktlagen sicherstellt. Allerdings ist die Anschaffung von Regenschutzkappen mit hohen Investitionskosten verbunden. Für einen Hektar liegt die jährliche Belastung bei einer Laufzeit von 15 Jahren und ohne Berücksichtigung von Zinseffekten bei etwa 4.400 Euro. Für eine Ausstattung der hessischen Steinobstfläche von 194 Hektar mit Regenschutzkappen wäre somit ein jährlicher Aufwand von etwa 850.000 Euro notwendig. Hinzu kämen noch Kosten für den Schutz der Flächen mit Strauchbeerenobst, die aktuell eine Ausweitung im Raum Waldeck in ackerbaulichen Betrieben erfahren.

Für den Wind sind aufgrund der Simulationen keine großen Veränderungen zu erwarten. Starke Windböen, die mit schauerartigen Niederschlägen einhergehen können, stellen aber durchaus eine Gefährdung der Obstanlagen dar. Windschutzhecken verbessern neben ihrer primären Aufgabe auch das Kleinklima in der Obstanlage und bieten Rückzugsmöglichkeiten für viele nützliche Insekten. Die Kosten für die Anlage von Windschutzhecken sind jedoch nicht exakt zu beziffern.

Ein recht neues Problem ist die Gefährdung der Früchte durch Sonnenbrand, der infolge hoher Temperaturen und hoher Einstrahlung entstehen kann. Direkte Maßnahmen wie das Benetzen der Früchte mit verschiedenen Substanzen sind zulassungstechnisch umstritten und zudem in ihrer Wirkung noch nicht bestätigt. Mehr Erfolg versprechen indirekte Maßnahmen zur Schattierung und Kühlung. Dazu zählen die klimatisierende Bewässerung und die Ausbringung von Schattinetzen über der Kultur. Durch den Einsatz von Bewässerungsanlagen oder Hagelschutznetzen sind diese Möglichkeiten bereits gegeben und verursachen keine zusätzlichen Kosten.

Wenn es im Extremfall nötig sein sollte, alle hessischen Obstabauflächen gegen alle Risiken durch Witterungseinflüsse zu schützen, würden jährliche Kosten in einem Bereich von etwa 7,5 Millionen Euro zu erwarten sein. Diese Zahl ist jedoch nur als grober Anhaltspunkt zu

sehen und soll deutlich machen, dass der Klimawandel auch finanzielle Folgen für die hessischen Obstproduzenten haben kann.

### **Ausblick**

Weitere Untersuchungen im Bereich Obstbau und Klima sind unbedingt notwendig. Der gesamte Komplex des Pflanzenschutzes sollte getrennt untersucht werden, da viele Entwicklungen bei Schädlingen und Krankheiten temperaturabhängig sind. Darüber hinaus wird es nötig sein zu überprüfen, inwieweit die mit der Temperatursummenmethode prognostizierten Daten zukünftig auch wirklich eintreten, um die Prognosemethode zu verbessern. Die Arbeit sollte deshalb als Grundlage für weitere Forschungen verstanden werden. Es erscheint jedoch auch wichtig, Produzenten und Berater mit in die Arbeit einzubinden, um Beobachtungen direkt an der Basis mit zu berücksichtigen und so den Obstbau der Zukunft auf eine solide Basis zu stellen.

## 2.10 Klimafolgen im Bereich Naturschutz

**Thema:** Einschätzungen zu möglichen und bereits nachweisbaren Auswirkungen des globalen Klimawandels auf die Biodiversität in Hessen

**Auftragnehmer:** Dr. Miriam Pampus, Ökologische Forschungsstation Schlüchtern

**Projektbeteiligte:** Dr. Miriam Pampus

**Projekt-Laufzeit:** April 2005 bis Juni 2005

### Beschreibung

Auf Grundlage einer Literatur- und Internetrecherche wurden Informationen und Einschätzungen zu möglichen und bereits nachweisbaren Auswirkungen des globalen Klimawandels auf die Biodiversität in Hessen zusammengestellt. Dabei standen Auswirkungen von Klimaänderungen auf die Flora und einzelne Tiergruppen wie Insekten, Amphibien, Vögel und Säugetiere im Vordergrund. Über die Wirkung klimatischer Veränderungen auf einzelne Arten hinaus werden mögliche oder bereits festgestellte Veränderungen der Wechselwirkungen zwischen verschiedenen Arten und die Bedeutung des Klimawandels für ganze Ökosysteme (z. B. Gewässer und Feuchtgebiete) dokumentiert. Ergänzt wird der Bericht durch ein umfangreiches weiterführendes Literaturverzeichnis.

### Ergebnisse

Die vorliegende Aufstellung und Bewertung besonders relevanter Aspekte der Folgen des Klimawandels für den Naturschutz in Hessen gibt zunächst einen Einblick in die Vielfalt und Komplexität der Phänomene, die mit der Reaktion biologischer Systeme auf den globalen Klimawandel verbunden sind. Sie deckt einen gravierenden Mangel an Langzeituntersuchungen von einzelnen Arten und Ökosystemen auf und kann als Grundlage zur Auswahl künftiger, für Hessen wesentlicher Forschungsschwerpunkte dienen. Weiterhin wird ein Überblick über erforderliche Maßnahmen zur Abmilderung der Effekte des Klimawandels auf die Biodiversität in Hessen gegeben.

### Auswirkungen des Klimawandels

Der globale Klimawandel bringt eine Erhöhung der Temperatur, größere Trockenheit durch Veränderungen der Niederschlagshäufigkeit und -intensität und eine Zunahme von Wetterextremen wie Stürme, Dürren und Fluten mit sich. Zusätzlich wirken die Treibhausgase selbst, wie Kohlendioxid und Ozon, auf die Organismen. Diese Wirkungen werden ergänzt durch andere anthropogene Einflüsse wie saurer Regen, erhöhte Nährstoffeinträge, Schadstoffe, Grundwasserabsenkung, Flächenversiegelung und verschiedene Formen der Landnutzung. Da jede Art in ihrer eigenen Weise auf die Kombination der auf sie einwirkenden Faktoren reagiert und zahlreiche Wechselwirkungen zwischen den Arten eines Ökosystems bestehen, sind die Folgen des Klimawandels über allgemeine Trends hinaus schwer vorhersehbar.

Einige Auswirkungen des Klimawandels auf die Biodiversität in Hessen sind bereits zu beobachten. So hat sich die Phänologie von Pflanzen und Tieren, zum Beispiel die Blüte des Fuchsschwanzes, die Eiablage der Kohlmeise und das Erwachen des Siebenschläfers aus dem Winterschlaf, in den letzten 30-50 Jahren verfrüht. Die Verbreitungsareale vieler Tier- und Pflanzenarten haben sich nach Norden und in der Höhenzonierung der Gebirge aufwärts

verschoben. Wärmeliebende Arten wie die Feuerlibelle sind nach Hessen eingewandert und haben ihre Areale ausgedehnt, während feuchtigkeitsliebende und an kühle Standorte angepasste Pflanzen im Rückzug begriffen sind. Die einwandernden Tiere und Pflanzen sind zum Teil gebietsfremd und verändern das Artenspektrum hessischer Lebensräume vermutlich dauerhaft. Besonders trocken-heiße Jahre wie 2003 haben zu Massenvermehrungen wärmeliebender Schädlinge und zur Schädigung von Waldbäumen geführt. Insbesondere die natürlicherweise in Hessen bestandsbildende Rotbuche hat aufgrund ihrer geringen Widerstandskraft gegen Trockenheit gelitten.

Diese Effekte des Klimawandels werden sich noch verstärken und das Aussterben von Arten oder zumindest einzelnen Populationen zur Folge haben, die aufgrund ihrer Ausbreitungsmechanismen oder aufgrund von Barrieren in der fragmentierten Landschaft nicht in der Lage sind, schnell genug mit den von ihnen benötigten klimatischen Bedingungen mitzuwandern.

Auf Tiere wirken zusätzlich eine Vielzahl indirekter Klimafolgen, die von Veränderungen ihrer Nahrungspflanzen oder der Lebensbedingungen ihrer Beutetiere abhängen. Je höher die trophische Ebene einer Art, desto komplexere Wirkungen des Klimawandels sind zu erwarten. Die Verschiebung des Artenspektrums und die unterschiedlichen Reaktionen verschiedener Organismen auf Temperaturveränderung, Trockenheit und Treibhausgase verändert Konkurrenzverhältnisse, Schädlingsresistenz und Schädlingsbefall, Räuber-Beute-Verhältnisse und viele andere Beziehungen zwischen Elementen von Ökosystemen, wodurch es ebenfalls zum Aussterben von Populationen oder sogar Arten kommen wird.

Besonders vom Klimawandel bedroht sind in Hessen feuchte Grünland- und Waldgesellschaften der Mittelgebirge, Moore und alle anderen Feuchtgebiete und Gewässer mit ihren charakteristischen Pflanzen- und Tierarten. Generell ist jedoch anzunehmen, dass es in allen Lebensräumen zu gravierenden Veränderungen kommen wird.

Tiere und Pflanzen sind in der Lage, auf klimatische Veränderungen zu reagieren, und zwar einerseits durch phänologische Plastizität, also die Flexibilität der Individuen. Arealveränderungen und Vorverlegung der Fortpflanzung sind Beispiele für diese Anpassungsfähigkeit. Andererseits können auf Grundlage der genetischen Vielfalt innerhalb von Populationen durch natürliche Selektion die unter den geänderten Bedingungen erfolgreichsten Individuen ausgelesen werden, was zu einer dauerhaften Veränderung der vererbten Eigenschaften einer Art führt. Verändertes Zugverhalten bei Vögeln ist ein Beispiel für eine erbliche Anpassung an den Klimawandel durch genetische Variation und Selektion.

Sowohl die phänologische Plastizität als auch die Fähigkeit zur genetischen Anpassung an den Klimawandel ist jedoch begrenzt und wird bei vielen Arten nicht ausreichen, um mit dem schnellen Klimawandel mitzuhalten. Viele Pflanzenarten brauchen zum Beispiel Jahrzehnte, um ihr Areal um wenige Meter zu verlagern. Die Verschiebung der klimatischen Bedingungen geht jedoch viel schneller vonstatten. Andererseits können zum Beispiel wind- und wasserverbreitete Pflanzen in jeder Generation mehrere Kilometer zurücklegen und werden außerdem durch Barrieren kaum in ihrer Verbreitung behindert. Auch bei Tieren gibt es artspezifische Unterschiede in der Mobilität, die die Reaktionsgeschwindigkeit auf den klimatischen Wandel bestimmen. Sehr mobile Tierarten, die auch größere Barrieren überwinden können, wie viele Vögel und Insekten, können auf Veränderungen ihrer Lebensräume schneller reagieren als wenig mobile Tiere wie Amphibien und Reptilien.

Genetische Veränderungen laufen langsamer ab als individuelle Verhaltensanpassungen. Je kürzer die Generationenfolge, desto schneller ist eine Anpassung durch Selektion möglich. Einjährige Pflanzen und Insekten werden sich daher schneller genetisch verändern können als Bäume oder große Säugetiere. Unterschiedliche Anpassungsgeschwindigkeiten können wiederum zu Verschiebungen von Konkurrenzverhältnissen führen.

## Mögliche Anpassungsmaßnahmen

Die vorangegangenen Ausführungen haben deutlich gemacht, dass die Biodiversität in extrem komplexer Weise vom Klimawandel beeinflusst wird und Prognosen bezüglich der Überlebenschancen einzelner Arten mit dem heutigen Wissensstand kaum zu stellen sind. Eine Vertiefung unseres Wissens über die Ökologie einzelner Arten und ihre gegenseitigen Abhängigkeiten ist dringend erforderlich, um negative Entwicklungen rechtzeitig zu erkennen und wirksame Schutzmaßnahmen zu entwickeln. Auffällig ist dabei die erstaunlich kleinräumige Variation der vom globalen Klimawandel angetriebenen Wetterphänomene. Aufgrund globaler Tendenzen können die regionalen Wirkungen der Klimaänderungen auf die Biodiversität kaum vorhergesagt werden, und selbst innerhalb verschiedener Regionen Deutschlands stellen sich die beobachteten Klimafolgen häufig unterschiedlich dar. Daher kommt der regionalen Klimafolgenforschung im Bereich Ökologie und Naturschutz große Bedeutung für Hessen zu.

Besonders vielversprechend, aber leider noch selten, sind Studien über kombinierte Effekte mehrerer Einflussfaktoren. Hier sollten neben den eigentlichen Klimaeffekten auch Wirkungen von Nährstoffeinträgen, Nutzungs- und Pflegemaßnahmen erforscht werden, um – wo möglich – landwirtschaftliche oder Habitatpflegemaßnahmen an die veränderten Bedingungen anpassen zu können. Ein gutes Beispiel für eine solche Studie ist das Begasungsexperiment der Universität Gießen, das die Pflanzen, Tiere und Bodenorganismen einer natürlichen Grünlandgemeinschaft unter erhöhtem CO<sub>2</sub>-Einfluss untersucht (Institut für Pflanzenökologie, Justus-Liebig-Universität Gießen).

Um ökologische Zusammenhänge besser zu verstehen, langsame Veränderungen zu erkennen und Gefährdungen von Arten und Lebensräumen rechtzeitig zu bemerken, ist ein dauerhaftes Monitoring möglichst vieler Habitattypen, Pflanzenarten und Tiergruppen nötig. Bekanntermaßen empfindliche oder durch andere Einflüsse bereits vorgeschädigte Ökosysteme und Pflanzengesellschaften sollten dabei besonders berücksichtigt werden. Vielversprechende Forschungsansätze zu bedrohten Pflanzengesellschaften und einwandernden gebietsfremden Pflanzen kommen aus der langjährigen Erforschung des Taunus durch Botaniker der J. W. Goethe-Universität Frankfurt (Arbeitskreis Prof. Wittig).

Für den Nachweis eines Populationsrückgangs einer Art sind aufgrund der natürlichen Fluktuationen häufig viele Untersuchungsjahre erforderlich. Langzeituntersuchungen fehlen jedoch leider weitgehend für Säugetiere, Amphibien und Reptilien und die meisten anderen Tiergruppen. Nur bei Vögeln gibt es eine relativ breite Datenbasis und lange Zeitreihen. Langzeituntersuchungen der Biodiversität limnischer Ökosysteme in Hessen laufen in der Forschungsstation für Mittelgebirge des Forschungsinstituts Senckenberg und einer Außenstelle des Max-Planck-Instituts in Schlitz.

Auch Wechselwirkungen zwischen verschiedenen Elementen eines Ökosystems oder einer Nahrungskette werden bislang viel zu selten untersucht. Eine Ausnahme bildet die Langzeitstudie an höhlenbrütenden Singvögeln der Ökologischen Forschungsstation Schlüchtern, die unter anderem Verschiebungen der Konkurrenzverhältnisse zwischen höhlennutzenden Vögeln und Säugern untersucht. Eine Ausweitung solcher Studien mit möglichst hohen Individuenzahlen der untersuchten Arten ist dringend erforderlich.

Dabei sollte besonderer Wert auf die Erhebung phänologischer Daten und auf die Aufdeckung von Verwandtschaftsbeziehungen zwischen Individuen gelegt werden. Solche so genannten Pedigree-Daten, die beim Höhlenbrütermonitoring beispielsweise durch die Beringung von Eltern und Jungvögeln gewonnen werden, sind nötig, um genetische Veränderungen in Anpassung an den Klimawandel festzustellen.

Weiterhin sollten die Verbreitungsareale möglichst vieler Arten regelmäßig erfasst werden.

Im Zuge dessen ist auch die Beobachtung und Erforschung von Neozoen und Neophyten notwendig, um gegebenenfalls frühzeitiges Eingreifen zu ermöglichen.

Gezielte Schutzmaßnahmen für bestimmte Arten setzen Erkenntnisse aus den oben skizzierten Beobachtungsprogrammen voraus. Darüber hinaus erscheinen aufgrund der vorliegenden Erkenntnisse und Prognosen folgende Maßnahmen sinnvoll und wichtig:

- Durch Vernetzung von Habitaten zum Ausgleich der Fragmentierung der Landschaft, wie sie durch das europäische Programm eines Schutzgebietsnetzes NATURA2000 vorgesehen ist, muss Pflanzen und Tieren das Mitwandern mit den veränderten Bedingungen ermöglicht werden und einer genetischen Verarmung kleiner isolierter Populationen entgegengewirkt werden.
- Die genetische Vielfalt sollte nicht nur durch die Vernetzung isolierter Standorte, sondern gleichzeitig durch den Schutz möglichst vieler isolierter Bestände seltener und gefährdeter Arten aufrechterhalten werden, denn sie ist das Potential einer Art für Veränderungen in Anpassung an den Klimawandel. Genetische Vielfalt innerhalb einer Population kann auch die Resistenz von Ökosystemen gegen Störungen erhöhen.
- Besonderer Wert sollte auch auf den Schutz intakter, stabiler Ökosysteme gelegt werden, da diese widerstandsfähiger gegen die Einwanderung von Neozoen und Neophyten sind als gestörte Habitate. Frühzeitiges Eingreifen gegen Neozoen und Neophyten kann erforderlich werden, falls von ihnen ein Gefährdungspotential ausgeht. Um das natürliche Potential von Ökosystemen zur Selbstregulation zu erhalten, sollte bei Unterschutzstellung von Gebieten auch auf eine ausreichende Größe der Flächen geachtet werden.
- Aufgrund der bereits eingetretenen Veränderung in Artenspektrum und Populationsdichten z. B. von Insekten lassen sich offenbar ältere ökologische Bewertungen von Flächen nicht mehr aufrechterhalten. Inzwischen eignen sich z. B. auch Tiergruppen wie Tagfalter und Heuschrecken zur Bewertung von Grünlandstandorten, die früher nur mit wenigen anspruchslosen Arten in wenigen Individuen vertreten waren. Die Bewertungskriterien müssen der veränderten Situation angepasst werden.
- Auch zeichnet sich ab, dass eine Veränderung der Nutzung bzw. Pflege von Grünland- und anderen Flächen nötig wird. Untersuchungen des Naturschutzzentrums Hessen (NZH) wiesen zum Beispiel darauf hin, dass ein generelles Nutzungsverbot für Grünland vor dem 15. Juni angesichts der eingetretenen Verfrühung der Phänologie vieler Arten nicht mehr sinnvoll und auch in Bezug auf die Erzielung einer möglichst großen Artenvielfalt zu starr ist.
- Besondere Anstrengungen müssen unternommen werden, um alle zusätzlichen Umweltbelastungen wie Habitatzerstörung, Flächenversiegelung, sauren Regen, Grundwasserabsenkung und Entwässerung von Feuchtgebieten, Überdüngung und Schadstoffeintrag einzudämmen. Hierzu kann vor allem eine nachhaltige Landnutzung mit reduziertem Produktionsmitteleinsatz, eine ressourcenschonende Energie- und Umweltpolitik und eine Förderung erneuerbarer Energien beitragen.
- Selbstverständlich muss alles getan werden, um den Ausstoß von Treibhausgasen zu vermindern. Ein großflächiges wahlloses Anpflanzen schnellwüchsiger Bäume, das als Maßnahme zur vermehrten Bindung des Kohlendioxids der Luft ins Gespräch gekommen ist, würde jedoch dem Arten- und Naturschutz einen schlechten Dienst erweisen und wird aufgrund neuer Erkenntnisse auch nicht für wirksam gehalten. Stattdessen ist ein Umbau von Forsten in naturnahe, eine höhere Biodiversität tragende Wälder sinnvoll. Durch standortgerechte Baumartenwahl und den Umbau von Reinbeständen zu Mischwaldbeständen kann der Wald widerstandsfähiger gegen die Folgen des Klimawandels gemacht werden.

**Ausblick**

Die bereits deutlich sichtbaren Veränderungen von Ökosystemen im Zuge des globalen Klimawandels werden fortschreiten und sind nicht mehr aufzuhalten. Der damit verbundene prognostizierte Verlust von Biodiversität durch massives Artensterben kann verhindert oder zumindest eingedämmt werden, wenn sofort Maßnahmen ergriffen werden. Zunächst ist das Erlangen eines besseren Verständnisses der Ökosysteme durch Langzeitbeobachtung erforderlich, um rechtzeitig wirksame Schutzmechanismen zu entwickeln. Gleichzeitig müssen alle zusätzlichen Umweltbelastungen so weit wie möglich reduziert sowie natürlichen und naturnahen Lebensräumen und extensiver Bewirtschaftung mehr Platz eingeräumt werden.

## 2.11 Klimafolgen im Bereich Gesundheitsschutz

**Thema:** Auswirkungen einer prognostizierten Klimaänderung auf Belange des Gesundheitsschutzes in Hessen

**Auftragnehmer:** Dr. Helmut Uphoff, Hessisches Landesprüfungs- und Untersuchungsamt im Gesundheitswesen, Dillenburg

**Projektbeteiligte:** Dr. H Uphoff, Dr. A Hauri

**Projekt-Laufzeit:** April 2005 bis Juli 2005

### Beschreibung

Die Recherche soll die vorhandene Literatur zu den Themen nachgewiesene und denkbare Auswirkungen von Klimaänderungen im Bereich Gesundheitsschutz (direkte und indirekte Auswirkungen) zusammenstellen.

Mögliche Verwendung der Ergebnisse: Erkennung von negativen Effekten von Klimaänderungen auf die Gesundheit hessischer Bürgerinnen und Bürger, Erkennung von Gefahren, Schaffung von Planungsgrundlagen für einen zukunftsfähigen Gesundheitsschutz.

### Vorbemerkung zu den Ergebnissen

Gesundheitliche Risiken befinden sich im ständigen Wandel. Änderungen von Ökosystemen, Demographie, Lebensumständen, Lebenswandel sowie technischer Fortschritt, Migration, Tourismus, Handel etc. sind neben klimatischen Änderungen wesentliche Faktoren dafür. In Deutschland haben sich die gesundheitlichen Risiken von der Nachkriegszeit bis heute stark verändert, wozu die geänderten Lebensumstände durch die Industrialisierung, Impfungen, Verfügbarkeit von Antibiotika, Reisen etc. maßgeblich beigetragen haben. Migration und Reisen führen zu einer weiten Verbreitung von humanpathogenen Erregern, die dann in Regionen endemisch werden können, in denen sie bisher nicht auftraten, wenn sich geeignete Bedingungen finden wie Wirte, Vektoren, Zwischenwirte. Weltweiter Handel und Austausch von Pflanzen und Tieren, die teils auswildern, beeinflussen die Ökosysteme ebenso wie Veränderungen der Landnutzung.

Der Wandel von gesundheitlichen Risiken ist sehr komplex und unterliegt vielen Einflüssen, die teils wesentlich drastischer und kurzfristiger sind als die vergleichsweise allmähliche Klimaveränderung mit Zeithorizonten von 20 bis 100 Jahren. Es ist somit kaum möglich, den Faktor Klimaveränderung im Hinblick auf die gesundheitlichen Risiken isoliert zu betrachten und zu bewerten. Noch schwieriger ist es, Auswirkungen der Klimaveränderungen in der Zukunft abzusehen, zumal diese Prognosen zur Klimaentwicklung selbst mit einem hohen Grad von Unsicherheit behaftet sind. Darüber hinaus sind die Entwicklungen in den anderen, für die Gesundheit wichtigen Bereichen kaum abzusehen und auch Adaptionsmechanismen können nur begrenzt vorhergesehen werden. Die folgenden Überlegungen sind daher mit großen Unsicherheiten behaftet.

### Auswirkungen des Klimawandels

Bei den Auswirkungen des Klimawandels auf die Gesundheit unterscheidet man direkte und indirekte Auswirkungen.

Zu den direkten Auswirkungen werden die unmittelbaren Folgen von z. B. Hitzewellen, er-

höherer Sonnenexposition und von Wetterextremen auf die menschliche Gesundheit gezählt. Damit sind z. B. vermehrte Todesfälle durch Hitzeextreme, vermehrte Sonnenbrände und Fälle von Hautkrebs sowie unmittelbare gesundheitliche Folgen von Überschwemmungen, Blitzschlag, Sturm, Dürre etc. gemeint.

Für Hessen wird ein Anstieg der Temperatur und damit ein häufigeres Auftreten von Hitzeextremen erwartet. Gefährdet sind hierbei insbesondere ältere Menschen und Menschen, die nur eingeschränkt für sich sorgen können. In diesen Risikogruppen können Hitzeperioden zu einem deutlichen Exzess der Todesfälle und vermehrter Beanspruchung der Versorgung führen. Für den Hitzesommer 2003 kann für Hessen ein Exzess von etwa 1000 Todesfällen geschätzt werden. In Zukunft muss mit häufigeren und noch extremeren Hitzeperioden gerechnet werden.

Die Inzidenz des malignen Melanoms hat sich seit 1970 in Deutschland etwa um das Vierfache erhöht und erreichte Ende des vergangenen Jahrhunderts etwas mehr als 7 je 100.000 und Jahr (für Deutschland geschätzt). Für Hessen ist neben einer Erwärmung auch eine vermehrte Sonnenscheindauer insbesondere im Frühjahr und Sommer prognostiziert. In einem Klima wie dem in Hessen führt dies meist – insbesondere im Frühjahr – zu deutlich vermehrten Aufenthaltszeiten im Freien bei leichter Kleidung. Eine Zunahme von Sonnenbränden, Sonnenallergien und Hautkrebs ist daher plausibel. Inwiefern auch Lichtschädigungen der Augen in Form von Katarakten zunehmen, ist kaum abzuschätzen, ebenso wie die Auswirkungen von UV-bedingten Immunsuppressionen.

Für Hessen können auch häufiger Witterungsextreme erwartet werden. Bedeutsam dürften hier insbesondere extreme Niederschläge, Gewitter und Stürme sein. Diese können direkt gesundheitliche Schäden in Form von Verletzungen, Traumatisierung oder Ertrinken auslösen. Das Auftreten solcher, aber auch in Zukunft vermutlich seltener, Extremereignisse ist jedoch kaum vorherzusehen und somit sind die Folgen kaum abzuschätzen. Besiedelung von überschwemmungsgefährdeten Gebieten, ungenügende Hochwasser-Vorbeugung und Mängel im Katastrophenschutz können das Risiko für die menschliche Gesundheit jedoch erhöhen.

Indirekte Auswirkungen umfassen Risiken, die aufgrund klimabedingter Änderungen der Ökosysteme, des Lebensraumes oder der Lebensbedingungen entstehen.

Günstige Lebensbedingungen für Überträger von Krankheitserregern oder Wirtstieren für bestimmte Erreger können den Infektionsdruck auf die menschliche Population erhöhen oder die Verbreitung von Endemiegebieten für bestimmte Erkrankungen erheblich verändern.

Die Vermehrung und winterlichen Überlebensraten verschiedener, für Krankheitsübertragungen wichtiger Insekten und Nagetiere sind stark von der Temperatur beeinflusst. Eine Klimaerwärmung erhöht somit die Gefahr massenhafter Vermehrung vorhandener Arten oder des „Ansiedelns“ neuer Arten. Eine Vermehrung von bereits heimischen Zeckenarten könnte die Häufigkeiten von Erkrankungen wie Borreliose oder FSME erhöhen. Ein Einwandern weiterer, bisher nicht in Hessen heimischer Vektoren (Überträger) oder Wirtstiere ist aufgrund der Klimaerwärmung möglich. So wurden Populationen der "Braunen Hundezecke" (*Rhipicephalus sanguineus*) und verschiedene Arten von Schmetterlingsmücken (*Phlebotomus*) bereits in Baden-Württemberg beobachtet. Das Auftreten von überwiegend tropischen Erkrankungen mit hoher epidemischer Potenz ist nicht sehr wahrscheinlich. Vermehrte Infektionen mit selteneren Erkrankungen wie Babesien, Mittelmehrfleckfieber und anderen Rickettsiosen, Ehrlichiosen sind möglich, aber vermutlich von geringerer epidemiologischer Bedeutung, und ein Zusammenhang mit der erwarteten Klimaveränderung ist nicht offensichtlich. Durch eine Erhöhung der Nagerzahlen kann das Infektionsrisiko für Erkrankungen, die durch Nager übertragen werden, stark ansteigen, wie z. B. für Hantaviren oder Leptospiiren. Darüber hinaus könnte über ein verbessertes Nahrungsangebot z. B. durch eine massenhafte Vermehrung der Mäuse auch die Fuchspopulation zunehmen und damit auch das

Befallsrisiko durch z. B. Fuchsbandwurm oder Hundespulwurm. Auch für die Tollwutbekämpfung ist eine erhöhte Fuchspopulation bedeutsam.

Somit ergeben sich in Zusammenhang mit der Klimaerwärmung auch für Hessen gesundheitliche Risiken durch Infektionskrankheiten, die von heimischen oder eingeschleppten Wirbeltieren und Vektoren ausgehen, deren epidemiologische Bedeutung bei guter Gesundheitsversorgung aber eher gering ist.

Lebensmittel-übertragbare Erkrankungen, durch Toxine oder die Erreger selbst, können bei höheren Temperaturen aufgrund besser Vermehrungsbedingungen für die Erreger zunehmen. In Hessen treten lebensmittelbedingte Vergiftungen und Infekte mit bakteriellen Erkrankungen in der warmen Jahreszeit vermehrt auf. Ein gewisser Zusammenhang mit der Temperatur kann hergestellt werden, wobei mehrere Faktoren wie z. B. günstigere Bedingungen für die Erreger, aber auch Verhaltensänderungen (Grillen etc.) eine Rolle spielen. Für die Entwicklung der Häufigkeit solcher Erkrankungen in Hessen spielen die hygienischen Maßnahmen vermutlich eine größere Rolle als die klimatischen Entwicklungen.

In Deutschland werden etwa 2/3 des Trinkwassers aus Grundwasser gewonnen, was bereits eine hohe Reinheit hat. Es wird eine Zunahme des Niederschlags im Winter erwartet, so dass eine ausreichende Grundwasserneubildung gewährleistet scheint. Aufgrund der Grundwasserreserven und technischen Möglichkeiten sind für Hessen Versorgungsengpässe der Bevölkerung mit sauberem Trinkwasser unwahrscheinlich. Probleme dürften sich auf Phasen extremer Witterung beschränken und regional, z. B. nach Überschwemmungen oder in Ballungszentren, auftreten. Verschmutzung des Oberflächenwassers, der Feldfrüchte und des Bodens etc. aufgrund von Überschwemmungen führen jedoch möglicherweise zu einer erhöhten gesundheitlichen Gefährdung.

Infektionen über Badegewässer können durch höhere Temperaturen begünstigt werden. Dabei spielt zum einen das Verhalten, d. h. häufigere und längere Aufenthalte im Wasser aufgrund der Klimaerwärmung eine Rolle, und zum anderen klimabedingte Einflüsse auf die Gewässerqualität. Die Qualität der Gewässer und die Überwachung der Qualität hat sich in den letzten Jahren insbesondere durch intensivierete Schutzmaßnahmen verbessert. Die erwartete Klimaerwärmung könnte jedoch aufgrund höherer Gewässertemperaturen sowie Verunreinigungen der Oberflächengewässer infolge von Witterungsextremen (Überschwemmungen und Dürre) einen negativen Effekt auf die Wasserqualität haben. Auch das Auftreten von Toxin-produzierenden Algen wird durch höhere Gewässertemperaturen begünstigt. Die derzeitige Überwachung kann eine Früherkennung der Gefahren nur für einen Teil der Risiken bieten (koliforme Erreger als Indikatoren und einige chemische Indikatorsubstanzen). Virale Belastungen und Erreger, die nicht mit der Belastung durch koliforme Bakterien korrelieren, sind nicht ausreichend abgedeckt.

Im Rahmen der Erwärmung und vermehrten Sonneneinstrahlung sind zunehmende gesundheitliche Belastungen durch Ozon und Luftschadstoffe (Sommersmog) möglich. Hohe Belastungen mit Schadstoffen sind im Rahmen der Klimaänderung insbesondere in Stadtgebieten mit Kessellage auch in Hessen zu befürchten. In ländlichen Gebieten ist durch Eintrag der Vorstufen und vermehrter Ozonbildung ebenfalls mit Sommersmog zu rechnen. Diese Faktoren können ebenfalls zu einer steigenden Belastung der Gesundheitsversorgung und vermehrten Todesfällen, insbesondere bei Risikogruppen wie älteren Menschen und Menschen mit chronischen Erkrankungen der Atemwege etc. führen.

Allergische und Autoimmunerkrankungen zeigen in den letzten Jahren eine zunehmende Tendenz. Hier sind die Zusammenhänge ebenfalls sehr komplex und das Zusammenspiel genetischer Faktoren und Veränderungen der Lebensumstände (z. B. wesentlich breiteres Nahrungsangebot, Kontakt mit wesentlich mehr chemischen und biochemischen Substanzen, verändertes Stillverhalten, geringere Exposition gegenüber Parasiten und Krankheitserregern

etc.) ist nicht detailliert entschlüsselt.

In Zusammenhang mit den klimatischen Änderungen können insbesondere bei den Allergien und Asthma Veränderungen angenommen werden. Eine zeitliche Verschiebung ist durch z. B. veränderte Blühperioden oder Sporenbildung wahrscheinlich. Inwiefern eine Zunahme der Inzidenz dieser Autoimmunprobleme in Folge einer veränderten Vegetation auftritt, ist kaum abzuschätzen. Neben den Pollen und Sporen stellen toxische oder allergieauslösende Produkte von Schädlingen oder Lästlingen wie Eichenprozessionsspinner, Mehlmilbe, Hausstaubmilbe, Speckkäfer etc. weitere denkbare Gesundheitsrisiken dar. Massenvermehrungen von Schädlingen und Lästlingen wie Mäusen, Schaben und Fliegen etc. sind im Zuge der Klimaerwärmung möglich und können eine vermehrte Exposition des Menschen bedingen, sowohl gegenüber Bekämpfungsmitteln als auch gegenüber von den Tieren übertragenen Erregern oder abgegebenen Allergenen. Eine Abschätzung der Folgen ist aufgrund der komplexen Sachverhalte nicht möglich.

Deutliche regionale und kleinräumige Unterschiede in der Verwundbarkeit der Bevölkerung und Ökosysteme einerseits und den klimatischen Auswirkungen der Klimaerwärmung andererseits erschweren eine generelle Abschätzung der Folgen, auch für Regionen wie z. B. Hessen.

### **Mögliche Anpassungsmaßnahmen**

Als Vorbeugung für Hitzewellen haben sich Warnsysteme bewährt, wie 2004 in Hessen in Zusammenarbeit mit dem DWD eingeführt. Die Hessische Arbeitsgruppe – Hitzeprävention – arbeitet Empfehlungen für Risikopersonen in Gemeinschaftseinrichtungen aus. Aufklärungskampagnen sind des Weiteren geeignet die Bevölkerung zu informieren und ein Verhalten zu erreichen, das die gesundheitlichen Risiken reduziert. Dies scheint z. B. für Hitzeextreme und die Exposition gegenüber UV-Strahlen sinnvoll. Da die Klimaveränderung ein langfristiger Prozess ist, kann die Berücksichtigung baulicher, städte-, umwelt- und verkehrsplanerischer Aspekte in den Bereichen Katastrophenschutz, Wasserwirtschaft, Flächennutzung, Abfallwirtschaft etc. das Risiko für gesundheitliche Gefahren reduzieren.

Das Infektionsrisiko durch Vektoren oder durch Schädlinge übertragene, nicht impfpräventable Infektionskrankheiten ist ebenfalls bei geeignetem Verhalten zu reduzieren. Somit können gezielte Informationen und Aufklärungskampagnen dienlich sein. Bekämpfungsmaßnahmen gegen Vektoren oder Wirtstiere reduzieren das Risiko ebenfalls. Die Erkrankungslast hängt neben der Häufigkeit des Auftretens von dem Erkrankungsverlauf, der Behandlung und den Folgeschäden ab. Die Erkrankungslast kann somit durch eine zeitgerechte Diagnose und adäquate Behandlung vermindert werden. Insbesondere bei selteneren, eingeschleppten und daher unerwarteten Erkrankungen kann gezielte Aufklärung der Fachkreise sinnvoll sein.

Das Risiko für lebensmittelbedingte Erkrankungen kann durch Hygienemaßnahmen reduziert werden. Während für die gewerbliche und industrielle Produktion Vorschriften und Kontrollen eingesetzt werden können, sind Privathaushalte eher durch Aufklärungskampagnen zu erreichen.

Besonderes Augenmerk sollte auf wasserbedingte Übertragungen gelegt werden, die bei epidemiologischen Untersuchungen stärker berücksichtigt werden sollten. Daraus lassen sich erste Hinweise auf gesundheitliche Risiken ableiten. Diese können bei den Untersuchungen der Wasserqualität berücksichtigt werden und Probleme eingrenzen, die nicht ausreichend durch die momentan verwendeten Indikatoren und Nachweisverfahren erfasst werden. Durch geeignete wasserwirtschaftliche Planungs- und Schutzmaßnahmen kann die zukünftige Trinkwassergewinnung und -qualität nachhaltig gewährleistet und verbessert werden.

Zur Verringerung der Gefahren durch Luftverunreinigungen in Verbindung mit der Klimaerwärmung und vermehrter Sonneneinstrahlung sind städte- und verkehrsplanerische Maßnahmen erfolgversprechend, um die Belastung zu reduzieren. Die individuellen Gesundheitsrisiken können weiterhin durch geeignete Information und Aufklärung günstig beeinflusst werden. Dies gilt auch für das Auftreten und den Verlauf von Allergien und Asthma, bei denen die Erkrankungslast durch geeignete Therapie, aber auch Verhalten (Vermeiden einer Exposition) und Prävention in Form einer Bekämpfung der Allergenquellen gemindert werden kann.

### **Ausblick**

Alle diese Maßnahmen sollten gezielt und bedarfsgerecht eingesetzt werden. Daher spielt die frühzeitige Erfassung und Beurteilung von Veränderungen der gesundheitlichen Risiken eine wesentliche Rolle. Das Wissen um die komplexen Zusammenhänge ist in vielen Bereichen zu gering, um den Einfluss der Klimaänderung eingrenzen zu können. Daher kommt einem vorausschauenden Monitoring der verschiedenen Teilgebiete sowohl seitens der menschlichen Gesundheit als auch der beteiligten Faktoren (wie z. B. Auftreten von Vektoren, Wirten und Erregern, Veränderungen der Wassergewinnung und -qualität etc.) eine herausragende Bedeutung zu. Bedrohungen können rechtzeitig erkannt werden und die Hypothesenbildung zu ursächlichen Zusammenhängen wird unterstützt. Dadurch können Prognosen ermöglicht oder in der Qualität verbessert werden. Die dann in weiteren Studien zu prüfenden Erkenntnisse sind für Empfehlungen nutzbar. Bekämpfungs-Maßnahmen und Kampagnen können mit kontinuierlichen Monitoringsystemen besser evaluiert werden.

## 2.12 Klimafolgen im Bereich Bodenschutz

**Thema:** Mögliche Auswirkungen des Klimawandels auf Erosion und Kohlenstoffgehalt im Boden

**Projektbeteiligte:** Karl-Heinz Emmerich, HLUG, Dezernat G5 „Bodenschutz“

**Vorstudie:** Umriss der Problematik und erste Abschätzungen

### Beschreibung der Problematik

Die Wechselwirkung zwischen Klimaänderung und Veränderungen in der Bodenqualität ist komplexer Natur und wird noch nicht in ihrem vollen Ausmaß erkannt. Bewertungen der Auswirkungen von Klimaänderungen auf Eigenschaften und Verhalten des Bodens sowie zum Einfluss des Bodens auf globale Klimaänderungen beruhen zumeist auf hypothetischen Szenarien und Daten, die unter kontrollierten Bedingungen gewonnen wurden. Somit sind die Voraussagen eher qualitativ als quantitativ bestimmt und könnten erhebliche systematische Fehler enthalten.

Viele Veränderungen des Bodens vollziehen sich langsam und über einen langen Zeitraum hinweg, manche hingegen wie etwa die Bodenerosion und die Abnahme des organischen Bodenkohlenstoffs sehr rasch.

### Erosion

Der erosive Bodenabtrag durch Wasser ist bei landwirtschaftlich genutzten Flächen ein schwerwiegendes Problem. Durchschnittlich werden jährlich in Deutschland ca. 6 t/ha Bodensubstrat abgetragen. Schluffreiche (Löss-)Böden sind bei entsprechend langen Schlägen mit starker Hangneigung besonders gefährdet. Starkregen sind oft entscheidend für Erosionsereignisse. Bei solchen Ereignissen und bei geringer Bodenbedeckung können bis zu 30 t/ha und mehr Boden auf Straßen und im Tal landen.

Damit sind Boden- und Schadstoffverlagerungen verbunden, die mehr oder weniger schnell zur Ausbildung von Abtrags- und Auftragsbereichen des Bodens führen, dies verstärkt die ohnehin schon bestehende Heterogenität. Erosion führt an Hängen zum Verlust von humosem Oberbodenmaterial, einschließlich Saatgut, Dünge- und Pflanzenschutzmitteln (sog. On-Site-Schäden). Die Folge sind eine Verminderung der Wasserspeicherfähigkeit, eine Verarmung an Pflanzennährstoffen und eine verminderte Fließ- und Filterstrecke bis zum Grundwasser und erschwerte Bearbeitbarkeit.

In Senken, Mulden und Flusssystemen kommt es hingegen zur Anreicherung von Nährstoffen (u. a. organische Substanz, Stickstoff) sowie Chemikalien aus Dünge- und Pflanzenschutzmitteln (sog. Off-Site-Schäden). Saatgut und Kulturpflanzen können mit Bodenmaterial bedeckt und erstickt werden.

Einen Sonderfall der Erosionsgefährdung durch Wasser stellen Ackerflächen in Überschwemmungsgebieten dar. Hier sind es die zeitweise auftretenden Hochwasser, die erodierend auf den Boden wirken können. Für diese Flächen muss generell von einer hohen Gefährdung ausgegangen werden.

### Kohlenstoff

Beim Thema Kohlenstoff stehen Kohlendioxid-Ausstoß aus Energieerzeugung oder Brandro-

dungen tropischer Urwälder im Brennpunkt der Aufmerksamkeit. Der Boden, der erhebliche Mengen Kohlenstoff bindet, wird dagegen hinsichtlich seiner klimawirksamen Möglichkeiten oder Gefahren oft zu wenig beachtet. Mit ca. 1500 Gigatonnen ist im Boden derzeit etwa doppelt so viel Kohlenstoff gebunden, wie – bei steigender Tendenz – im Kohlendioxid der Atmosphäre vorkommt. Die weltweit vorhandene Menge an organischem Bodenkohlenstoff hat unmittelbare Auswirkungen auf den Kohlenstoffgehalt der Atmosphäre. Wenn der Humusgehalt zunimmt, leistet der Boden als Senke einen Beitrag zur Minderung des CO<sub>2</sub>-Anstiegs in der Atmosphäre und damit letztendlich zur Reduzierung der globalen Erwärmung. Wenn hingegen Humus abgebaut wird, trägt er als Quelle zur Zunahme des klimarelevanten Gases z. T. erheblich bei. Die geringsten Veränderungen beim organischen Bodenkohlenstoff, ob Zunahme oder Abnahme, können unvorhersehbare Folgen für den Kohlenstoffgehalt der Atmosphäre nach sich ziehen, wobei diese Änderungen lediglich einem kleinen Teil des gesamten organischen Bodenkohlenstoffs entsprechen (KIMBLE, LAL & GROSSMAN 1998).

Die Zunahme bzw. Abnahme der organischen Substanz im Boden ist abhängig von der Bilanz zwischen der Bildung abgestorbener pflanzlicher Biomasse (Streu) und der Zersetzungs- und Mineralisierungsrate der Streu und der organischen Substanz im Boden. Dabei erzeugen die Makro- und Mikroorganismen durch heterotrophe Bodenrespiration CO<sub>2</sub>. Diese Prozesse werden durch Umweltbedingungen wie z. B. Bodentemperatur, Bodenfeuchte und Bodenacidität stark beeinflusst. Bereits heute gut dokumentiert ist der Einfluss der Temperatur auf den Abbau des Bodenkohlenstoffs. Mit steigender Temperatur ist auch mit einer Erhöhung der Bodentemperatur und einem dadurch erhöhten mikrobiellen Abbau von organischem Material zu rechnen.

Allerdings beruht der Kohlenstoff-Abbau bei Erwärmung auf einer enormen Bandbreite chemischer Eigenschaften des organischen Bodenkohlenstoffs. Diese Eigenschaften reichen von zuckerähnlichen labilen Verbindungen bis zu kohleartigen stabilen Komplexen, die für Mikroorganismen schwerer abbaubar sind. Diese extreme Mischung ganz unterschiedlich stabiler Verbindungen hatte bisher die Interpretation der Laborergebnisse erschwert. Bisher berücksichtigen die Klima-Boden-Simulationen nur die leichter messbaren Eigenschaften der labilen Bestandteile des Bodenkohlenstoffs. Man schätzt, dass etwa 90 Prozent des weltweit in den Böden enthaltenen Kohlenstoffs in der chemisch stabilen Variante vorliegt. Die neuen Forschungsergebnisse sagen nun vorher, dass diese stabilen Anteile wesentlich sensibler auf die Klimaerwärmung reagieren als die bisher betrachteten etwa 10 Prozent labilen Verbindungen. Die Folge: Bei einer globalen Erwärmung gelangt mehr zusätzliches Kohlendioxid in die Atmosphäre als bisher angenommen und die Klimaerwärmung beschleunigt sich zusätzlich (KNORR et al. 2005, POWLSON 2005).

Bei erhöhtem mikrobiellen Abbau von organischem Material sinkt auch das C/N-Verhältnis im Boden. Der Prozess der Nitrifikation wird gehemmt, wohingegen die Denitrifikation angetrieben wird, was zur Freisetzung von Stickstoffverbindungen ins Grundwasser oder direkt in die Atmosphäre führt. Allerdings ist bisher über die Kopplung zwischen Stickstoff- und Kohlenstoffkreislauf im Boden noch zu wenig bekannt, um endgültige Aussagen über die Dimension der zusätzlichen Stickstofffreisetzung zu machen.

## **Ergebnisse und Auswirkungen des Klimawandels**

### Erosion

Eine allgemein bekannte und oft verwendete methodische Grundlage für die Abschätzung der Bodenerosion durch Wasser bildet die „Universal Soil Loss Equation“ (USLE) nach WISCHMEYER & SMITH (1978) bzw. deren Übertragung auf deutsche bzw. hessische Verhältnisse als „Allgemeine Bodenabtragsgleichung“ (ABAG) (z. B. MOLLENHAUER et al. 1990).

Nach der Allgemeinen Bodenabtragungsgleichung wird die Bodenerosion durch Wasser berechnet als  $A = R * K * L * S * C * P$ , wobei:

A = Langjähriger, mittlerer Bodenabtrag in t/ha \* a (zu berechnende Zielgröße)

R = Regen- und Oberflächenabflussfaktor:  $\text{kJ/m}^2 * \text{mm/h}$ , Maß für die Erosivität der Niederschläge

K = Bodenerodierbarkeitsfaktor: Maß für die Erodierbarkeit des Bodens

L = Hanglängenfaktor

S = Hangneigungsfaktor

C = Bedeckungs- und Bearbeitungsfaktor: Verhältnis des Bodenabtrags unter beliebiger Bewirtschaftung (z. B. Kulturpflanze) zur Schwarzbrache

P = Erosionsschutzfaktor: Verhältnis des Bodenabtrags bei beliebigen Erosionsschutzmaßnahmen (z. B. Konturpflügen) zu den Verhältnissen ohne jegliche Schutzmaßnahmen

Direkt über das Klima gesteuert sind in dieser Formel der R-Faktor und indirekt die bewirtschaftungsabhängigen Faktoren C und P.

Für die Berechnung des R-Faktors gibt es verschiedene Methoden, die die unterschiedlichen Datengrundlagen und Maßstäbe berücksichtigen. Je nach Lage des Anwendungsgebietes und Verfügbarkeit regionalisierter Klimadaten kann der R-Faktor auch aus dem mittleren Jahresniederschlag berechnet werden. In Hessen wird zzt. die folgende vereinfachte Formel benutzt:  $R = 0.0520 * NJ + 14.44$  (NJ = mittlere Jahresniederschläge) (BGR 2005).

Um eine erste Abschätzung der Erosion nach den von ENKE (2004) simulierten Klimaprognosen zu gewinnen, wurden Vergleichsrechnungen für zwei verschiedene Fruchtarten (Mais, Winterweizen) gerechnet: L-Faktor = Standardhanglänge 22 m, S-Faktor = 9 % Neigung, K-Faktor = 0,3, P-Faktor = 1.0, C-Faktor (Winterweizen) = 0.036 und C-Faktor (Mais) = 0.27.

**Tab. 1:** Berechnete Bodenerosion für Ackerflächen

Szenarium und Zeitraum	Winterweizen		Mais		Für beide Nutzungen	Nutzungsänderung Winterweizen zu Mais	
	Abtrag (t/ha * a)	Änderung (t/ha * a)	Abtrag (t/ha * a)	Änderung (t/ha * a)	Änderung %	Änderung (t/ha * a)	Änderung %
1981-2000 Referenzzeitraum Messwerte	0,61		4,70				
2011-2020 Maximal	0,64	0,03	4,96	0,26	5,52	4,35	712
2011-2020 Minimal	0,60	-0,01	4,62	-0,08	-1,75	4,01	656
2011-2020 Mittel aller Realisierungen	0,62	0,01	4,76	0,06	1,38	4,15	680
2021-2030 Maximal	0,61	0,003	4,73	0,03	0,55	4,12	674
2021-2030 Minimal	0,60	-0,01	4,59	-0,11	-2,39	3,98	651
2021-2030 Mittel aller Realisierungen	0,60	-0,01	4,66	-0,04	-1,01	4,05	662
2031-2040 Maximal	0,65	0,04	4,97	0,27	5,74	4,36	713
2031-2040 Minimal	0,62	0,01	4,76	0,06	1,29	4,15	679
2031-2040 Mittel aller Realisierungen	0,63	0,02	4,86	0,16	3,37	4,25	695
2041-2050 Maximal	0,67	0,06	5,14	0,44	9,38	4,53	742
2041-2050 Minimal	0,60	-0,01	4,64	-0,06	-1,29	4,03	660
2041-2050 Mittel aller Realisierungen	0,64	0,03	4,92	0,22	4,57	4,31	705
<b>Maximum aller Realisierungen</b>	<b>0,67</b>	<b>0,06</b>	<b>5,14</b>	<b>0,44</b>	<b>9,38</b>	<b>4,53</b>	<b>742</b>

Tab. 1 zeigt die Ergebnisse, jeweils für die trockenste (Minimal) und feuchteste (Maximal) Realisierung der einzelnen Dekaden sowie für das Mittel aller Realisierungen. Bezugspunkt der berechneten Erosionsänderung ist der Bodenabtrag in t/ha \* a bezogen auf die gemessenen Niederschläge aller Stationen für den Zeitraum 1981-2000. Die Änderungen sind in t/ha \* a und Prozent angegeben (die relativen Änderungen in Prozent sind für beide Nutzungsformen gleich, da in der Formel nur der C-Faktor geändert wurde). Es zeigt sich, dass es bei allen Realisierungen langfristig zu einem Anstieg der Erosion kommt. Maximal kommt es zu einem Anstieg von 9,4 %. Das bedeutet bei Winterweizen einen zusätzlichen erosiven Abtrag von 0,06 t/ha, bei Mais ist es fast eine halbe Tonne pro Hektar. Die prognostizierten Klimaänderungen werden auch die landwirtschaftliche Nutzung beeinflussen, die Maisanbaufläche wird sich vergrößern. Rechnet man diesen Fruchtwechsel mit ein, dann stellt sich die Situation dramatischer dar. Dann kommt es zu einer Zunahme der Erosionsbeträge um bis zu 742 %, das entspricht einem zusätzlichen Abtrag von 4,5 Tonnen pro Hektar.

### Kohlenstoff

Die Reaktionsempfindlichkeit von Bodenkohlenstoff auf Klimaänderungen war lange Zeit mit vielen Unsicherheiten behaftet. Neben der Temperatur spielt auch die schwerer zu bewertende Bodenfeuchte eine Rolle. In letzter Zeit hatten sich Berichte gehäuft, wonach sich die für die Kohlenstoffzersetzung im Boden verantwortlichen Mikroorganismen allmählich an die wärmeren Bedingungen gewöhnen und die Abbaurate dabei an die höheren Temperaturen anpassen würden. Die Folge wäre, dass das Kohlendioxid in praktisch konstanten, nicht zunehmenden Raten freigesetzt würde (GRACE & RAYMENT 2000; JARVIS & LINDNER 2000). Neueste Forschungsergebnisse zeigen jedoch, dass Bodenkohlenstoff sensibler auf Klimaerwärmung, vor allem die Temperaturerhöhung, reagiert als bisher erwartet und zusätzliches Treibhausgas in die Atmosphäre liefert (KNORR et al. 2005, POWLSON 2005).

Tab. 2 zeigt die durchschnittlichen Kohlenstoffgehalte hessischer Böden gemäß dem aktuellen Auswertungsstand (erste Bilanzierung nach MOLDENHAUER als Auftragnehmer des HLUg).

**Tab. 2:** Kohlenstoffgehalte hessischer Böden der Hauptnutzungsarten

Kohlenstoff (kg/ha)	Wald	Grünland	Acker
Streuaufgabe	9.000		
Organische Auflage	19.800		
Oberboden	62.400	64.350	43.200
Unterboden bis 1m Tiefe	93.600	884.00	72.800
Gesamtgehalt 1m Bodenprofil	<b>175.800</b>	<b>152.750</b>	<b>116.000</b>

Rechnet man diese Gehalte auf die Landesfläche um, ergibt sich für Hessen ein Gesamtvorrat von 265.498.927 Tonnen Bodenkohlenstoff.

**Tab. 3:** Gespeicherter Bodenkohlenstoff in Hessen

(t)	Wald	Grünland	Acker	Gesamt
Gesamtkohlenstoffvorrat hessischer Böden	148.278.510	49.879.749	67.340.668	265.498.927

Sowohl das Modell von KNORR et al. (2005), in das hauptsächlich die Temperaturänderung einfließt, als auch das Modell von POST et al. (2004), in dem der Wasserhaushalt stärker

berücksichtigt wird, prognostizieren den Abbau des Kohlenstoffpools im Boden. KNORR et al. (2005) errechnen bei einer Modellanpassung auf Basis von Laborexperimenten (Temperaturerhöhung von 2°C) eine Abnahme des Kohlenstoffpools im Boden um 10-13 % in weniger als einem Jahr. Unter Freilandbedingungen haben RINKLEBE & MAKESCHIN (2003) bei Ackerböden in Deutschland einen Verlust von Kohlenstoff zwischen 2 und 8 % in 27 Jahren gemessen.

Die Enke-Prognosen zur Temperaturentwicklung in Hessen (ENKE 2004) liegen für die Dekaden 2011-2050 zwischen +1,3 und +2,0 °C, für die Dekaden bis 2100 zwischen +2,6 und +3,3 °C (mittleres Tagesmaximum). Der aktuelle Auswertungsstand lässt noch keine genaue Prognose der klimatisch bedingten Kohlenstofffreisetzung aus hessischen Böden zu. Daher kann derzeit nur mit groben Abschätzungen gearbeitet werden. Bei einer hypothetischen Erhöhung der Kohlenstofffreisetzung von nur 0,5 % für den Zeitraum bis 2050 gelängen in Hessen über 1,25 Millionen Tonnen Kohlenstoff zusätzlich in die Atmosphäre.

### **Mögliche Anpassungsmaßnahmen**

Sowohl die Erosion als auch die Kohlenstofffreisetzung haben, wie schon erwähnt, auch eine verstärkte Nitratbelastung der Gewässer zur Folge. Technisch ist es möglich, die durch Erosion verlorene Bodenfruchtbarkeit wiederherzustellen bzw. das nitratbelastete Trinkwasser genießbar zu machen. Wie hoch diese Kosten sind, ist schwierig zu berechnen. Hier zwei Beispiele aus der Schweiz:

#### **1. Bodenregenerierung:**

Eine Wiederherstellung der Böden umfasste: Tieflockerung, Einbringen von Filterkies, Nachfolgenutzung durch Extensivwiesen und mehrmaliges Auftragen von organischer Substanz. Die Fachleute rechnen für die ersten drei Maßnahmen mit Kosten von ca. Fr. 90.000,- pro Hektar für eine Zeitperiode von 20 Jahren (4.500 Fr./ha/Jahr). Für das Auftragen von organischer Substanz ist mit Kosten von ca. Fr. 200.000,- pro Hektar, verteilt auf 50 Jahre zu rechnen (4.000,-Fr./ha/Jahr). 1990 betrug die Ackerfläche im Kanton Bern rund 90.000 Hektar. Nur 10 % wiederherzustellen würde schon ungefähr 80 Mio. Franken pro Jahr kosten.

#### **2. Nitratentfernung:**

Nitrat kann mittels Elektrodialyse denitrifiziert werden. Hier rechnen die Fachleute mit Kosten von Fr. 4.500,-/ha und Jahr. Grundsätzlich trägt praktisch jede Fläche zur Trinkwasserbildung oder -gefährdung bei. Im Kanton Bern bestehen rechtsgültige Schutzzonen von rund 35.000 Hektar. Diese Fläche wird durch den Einbezug des Zuströmbereiches mindestens verdoppelt. Wenn nur 10 % der Flächen so starke Nitratausscheidungen aufweisen, dass eine Denitrifizierung nötig wird, so entstehen Folgekosten von zusätzlich ca. 30 Mio. Franken pro Jahr. Die Kosten für den Bau einer Denitrifizierungsanlage (in Münchenbuchsee ist eine in Betrieb) belaufen sich beispielsweise auf 2,6 Mio. Franken. Bei der gemeinderechtlich vorgegebenen Amortisationsdauer von zehn Jahren ergibt dies bei voller Auslastung der Anlage Kosten von 1,25 Franken pro Kubikmeter Wasser. Um Kosten zu sparen, werden oft – anstelle einer Denitrifizierungsanlage – Leitungen gebaut, um Ersatzwasser zu beschaffen und die beanstandeten Fassungen stillgelegt (BEA 2002).

Auf dem WORLD CONGRESS ON CONSERVATION AGRICULTURE 1-5 Oktober 2001 in Madrid wurden die ökonomischen Auswirkungen der zunehmenden Erosion mit 53 Euro pro ha und Jahr beziffert. Rechnet man die „off-site“-Kosten hinzu, die durch Bodenerosion verursacht werden, werden die Gesamtkosten auf ungefähr 85,5 Euro pro ha und Jahr geschätzt.

## Ausblick

### Erosion

Eine flächendeckende Neuberechnung der Erosion bzw. der Erosionsgefährdung mit einem angepassten Modell für Hessen ist zum Jahresende 2005 geplant. Danach könnten auch die hessenweiten Veränderungen mit unterschiedlichen Klimamodellen problemlos simuliert werden. Das Ergebnis wäre vor allem bezüglich der räumlichen Variabilität in den unterschiedlichen Kultur- und Naturlandschaften von Bedeutung. Der erforderliche personelle Aufwand könnte mit den aktuellen Kapazitäten geleistet werden.

### Kohlenstoff

Aus den vorliegenden Daten über die Kohlenstoffgehalte der Boden-Dauerbeobachtung lässt sich zurzeit noch kein einheitlicher Trend ableiten. Das liegt u. a. an der noch zu kurzen Zeitreihe (< 15 Jahre). Zur Anpassung des Kohlenstoffmodells müssen zunächst die neuesten Daten aus dem Fachinformationssystem Boden/Bodenschutz in die Fläche umgerechnet werden. Dieser Prozess sollte ebenfalls bis Jahresende 2005 abgeschlossen sein.

Der Aufwand für die Anpassung der bestehenden Modelle (z. B. KNORR et al. 2005 und POST et al. 2004) an die hessischen Verhältnisse kann nur sehr schwer abgeschätzt werden. Angesichts der enormen im Boden gespeicherten Potentiale wäre es allerdings wichtig zu wissen, in welchen Dimensionen sich die Kohlenstofffreisetzung aus hessischen Böden bewegen könnte.

## Literatur

BEA (2002): Expo Grünes Zentrum: Sonderschau Boden-Wiederherstellung: Kosten für die Wiederherstellung zerstörter Böden bzw. die Hebung der Trinkwasserqualität.

BGR (2005): Download neu dokumentierter bodenkundlicher Auswertungsmethoden und Verknüpfungsregeln. – Informationen aus den Bund/Länder-Arbeitsgruppen der Staatlichen Geologischen Dienste; [http://www.bgr.de/index.html?/saf\\_boden/AdhocAG/methoden.html](http://www.bgr.de/index.html?/saf_boden/AdhocAG/methoden.html).

ENKE, W. (2004): Erweiterung des Simulationszeitraumes der wetterlagenbasierten Regionalisierungsmethode auf Basis des ECHAM4-OPYC3 Laufes für die Dekaden 2011/2020 und 2051/2100, Szenario B2 (Abschlussbericht für INKLIM 2012, Baustein II).

GRACE, J. & RAYMENT, M. (2000): Respiration in the balance. – *Nature* Vol. **404**: 819-820.

JARVIS, P. & LINDNER, S. (2000): Constraints to growth of boreal forests. – *Nature* **404**: 904-905.

KIMBLE, J.M., LAL, R. & GROSSMAN, R.B. (1998): Alteration of soil properties caused by climate change. In: Blume H.-P., H. Eger, E. Fleischhauer, A. Hebel, C. Reij, K.G. Steiner (Eds.): *Towards Sustainable Land Use*, Vol. I, 175-184, *Advances in Geocology* 31, Catena Verlag, Reiskirchen.

KNORR, W., PRENTICE, I.C., HOUSE, J.I. & HOLLAND, E.A. (2005): Long-term sensitivity of soil carbon turnover to warming. – *Nature* Vol. **433**: 298-301.

MOLLENHAUER, K., RATHJEN, C.-L., CHRISTIANSEN, T. & ERPENBECK, C. (1990): Zur Erosivität der Niederschläge im Gebiet der deutschen Mittelgebirge, besonders im hessischen Raum. – *DVWK-Schriften*, **86/II**: 79-162.

POST, J., KRYSANOVA, V. & SUCKOW, F. (2004): Simulation of Water and Carbon Fluxes in Agro- and Forest Ecosystems at the Regional Scale. – [www.iemss.org/iemss2004/sessions/regional.html](http://www.iemss.org/iemss2004/sessions/regional.html).

POWLSON, D. (2005): Will soil amplify climate change? – Nature Vol. **433**: 204-205.

RINKLEBE, J. & MAKESCHIN, F. (2003): Der Einfluss von Acker- und Waldnutzung auf Boden und Vegetation – ein Zeitvergleich nach 27 Jahren. – Forstwissenschaftliches Centralblatt Volume **122** Issue 2 Page 81 .

WISCHMEYER, W.H. & SMITH, D.D. (1978): Predicting rainfall erosion losses. A guide to conservation planning. US Department of Agriculture. Agric. Handbook No. 537, Washington D.C. 58p.

### 3 Zusammenfassung

Das Forschungsprojekt Entwicklung eines Integrierten Klimaschutzprogramms Hessen (INKLIM 2012) wurde vom Hessischen Ministerium für Umwelt, ländlichen Raum und Verbraucherschutz (HMULV) initiiert und besteht aus insgesamt drei Bausteinen. Die Bausteine I und III, die vom HMULV koordiniert werden, befassen sich im Schwerpunkt mit der Entwicklung von Szenarien für die CO<sub>2</sub>-Entwicklung in Hessen unter verschiedenen Randbedingungen sowie Vorschlägen für ein Umsetzungsprogramm von Maßnahmen zur Minderung von Treibhausgasen. Der Baustein II des INKLIM 2012-Projekts wurde vom Hessischen Landesamt für Umwelt und Geologie koordiniert und umfasst Untersuchungen zum Themenkomplex Klimawandel in Hessen und den sich daraus ergebenden möglichen Folgen. An den Ausarbeitungen waren 12 unterschiedliche Institutionen (Forschungseinrichtungen, staatl. Ämter, Landesbetriebe und Büros) beteiligt.

Im Rahmen der Arbeiten zur Klimaanalyse konnte gezeigt werden, dass sich das Klima in Hessen bereits im vergangenen Jahrhundert nachweisbar gewandelt hat. Ähnliche Ergebnisse wurden auch für das globale Klima, beispielsweise durch die Wissenschaftler des Zwischenstaatlichen Ausschusses zu Fragen des Klimawandels (IPCC), erzielt.

Im Vergleich zur globalen Erwärmung (rund 0,6 Grad im 20. Jahrhundert) war der mittlere Temperaturanstieg in Hessen mit 0,9 Grad größer und entspricht damit dem Wert für Deutschland. Besonders rasant stieg die Temperatur in den letzten 20 Jahren des 20. Jahrhunderts, im Winter beispielsweise um 2,3 Grad. Selbst die Jahresdurchschnittstemperatur stieg in dieser Zeit um 1,1 Grad. Das entspricht 0,55 Grad pro Dekade und liegt damit erheblich über der vom Wissenschaftlichen Beirat Globale Umweltveränderungen der Bundesregierung (WBGU) höchstens für zulässig gehaltenen Änderungsrate von 0,2 Grad pro Dekade.

Insgesamt wurde es dabei feuchter; die Niederschläge nahmen – außer im Sommer – in allen Jahreszeiten zu. Besonders stark war diese Zunahme in der Zeit von 1971 bis 2000 im Winter (34 Prozent). Der Sommerniederschlag nahm in der zweiten Hälfte des 20. Jahrhunderts so stark (um 16 Prozent) ab, dass sich die Hauptregenzeit vom Sommer in den Winter verschob. Erst in den letzten 30 Jahren des vergangenen Jahrhunderts kam es wieder zu einer leichten Zunahme des Sommerniederschlages (um 4 Prozent).

Die Klimaveränderung wird sich auch im 21. Jahrhundert fortsetzen, wie die Ergebnisse der Klimaprognose zeigen. Auf Grundlage eines moderaten Szenariums (B2) des IPCC und unter Verwendung der Ergebnisse eines Modelllaufes des ECHAM4-OPYC3-Klimamodells des Max-Planck-Instituts für Meteorologie wurde mit einem wetterlagenbasierten statistischen Regionalisierungsverfahren für das 21. Jahrhundert ein mehr als viermal so starker Temperaturanstieg der Winter-Mitteltemperaturen abgeschätzt, als er für das vergangene Jahrhundert ermittelt werden konnte. Besonders schnell werden danach die Temperaturen nach 2050 ansteigen.

Auch wenn die Niederschlagsprojektionen viel weniger zuverlässig erscheinen als die für Temperatur, werden Trends zu größerer Trockenheit im Sommer und Zunahme der Winter-niederschläge erwartet.

Dies kann Auswirkungen auf viele Systeme und Sektoren haben, die bei der Untersuchung der regionalen Klimafolgen von Bedeutung sind.

Für hessische Flüsse wird beispielsweise im Winter eine Zunahme der Hochwassergefahr erwartet, während im Sommer durch extreme Niedrigwasserstände die Schifffahrt, der Betrieb

von Großkraftwerken und die Einleitung aus Kläranlagen problematisch werden können.

Für das Grundwasser bedeuten die Projektionen in weiten Gebieten Hessens größere Neubildungsraten und somit eine Tendenz zu höheren Grundwasserständen.

In der Landwirtschaft ist mit tendenziell sinkenden Erträgen, vor allem aber mit einer größeren Jahr-zu-Jahr-Variabilität der Erträge zu rechnen.

Für Obst- und Weinbau könnte eine Gefahr in Verbrennungen der Früchte bestehen, die zu Qualitäts- und Ertragsrückgängen führen können. Ferner sind durch höhere Temperaturen Veränderungen der Wein-Charakteristik zu erwarten. Im Obstbau wiederum könnten die größere Hagelgefahr und Spätfröste Risiken darstellen.

Insgesamt zeigen Untersuchungen der Veränderung phänologischer Phasen wie Blühbeginn oder Blattaustrieb bei Pflanzen eine Verschiebung zu früheren Terminen im Jahr, während sich das Ende der Vegetationsperiode nicht oder nur unwesentlich verlagern wird.

Für die Forstwirtschaft bedeutet Temperaturerhöhung und Sommertrockenheit eine Gefährdung von flach wurzelnden Bäumen (Fichte) besonders in sandigen Böden.

Wegen der großen Kohlenstoff-Vorräte im Boden (weltweit rund doppelt so viel wie in der Atmosphäre) könnte die Klimaveränderung hier zu Rückkopplungseffekten führen, wenn der mikrobielle Kohlenstoff-Abbau beschleunigt wird. Als weiteres Problem könnte sich die Erhöhung der Erosion erweisen, wodurch bei sommerlichen Starkregen nach Trockenperioden viel fruchtbarer Boden für die landwirtschaftliche Nutzung verloren gehen kann.

Auch für die biologische Vielfalt in Hessen werden sich negative Auswirkungen durch die Klimaveränderung ergeben. Dies betrifft direkte Folgen wie das Aussterben von Arten, weil sich ihre Gebiete schneller verschieben als sie ihr folgen können, oder auch auf komplexen Wechselwirkungen basierende Zusammenhänge wie die unterschiedliche zeitliche Verschiebung der Entwicklung in Räuber-Beute-Beziehungen.

Auch im Gesundheitsschutz werden sich Risiken ergeben, die durch direkte Hitzewirkungen, aber auch durch Verbreitung von bisher in Hessen unbekanntem Krankheiten entstehen können.

Wie dieser kurze Überblick schon zeigt, ist kaum ein Bereich des menschlichen Lebens denkbar, auf den die Klimaveränderung keine Auswirkungen hätte. In den einzelnen Arbeiten zum Projekt ist das auf eindrucksvolle Weise dokumentiert. Es wird nun darauf ankommen, in den jeweiligen Fachgebieten die Prognosen durch weitere Forschungsprojekte abzustützen, die Risiken zu bewerten und entsprechende Maßnahmen zur Risikominimierung zu entwickeln. So konnte der Baustein II nur ein Startpunkt für weitere vertiefende Arbeiten – auch in Kooperation mit anderen Bundesländern – sein. Dabei steht insgesamt vor allem die ökonomische Bewertung regionaler Schadenspotentiale noch am Anfang.

Auf dem Fachgebiet der regionalen Klimaprojektionen werden durch weitere Vorhaben auf Landes- bzw. auf Bundesebene innerhalb des nächsten Jahres verbesserte Vorhersagen vorliegen. Die Prognosen werden auf den neuesten globalen Klimamodellen basieren und decken eine Spanne von Szenarien ab, von sehr optimistisch bis sehr pessimistisch. Damit werden dann auch Grundlagen für die verbesserte Abschätzung der Risiken des Klimawandels in den einzelnen Fachgebieten geschaffen.

## 4 Anhang

### Zusammenstellung der Berichte und Dateien aus allen Projekten von INKLIM 2012 – Baustein II

<b>Projektbereich</b>	<b>Projektpartner</b>	<b>Umfang von Bericht (Anhang)</b>	<b>weitere Dateien</b>
Klima-Analyse	Universität Frankfurt, Herr Prof. Schönwiese	62 (12) Seiten	Karten zu Trend- und Extremwertanalysen (ca. 18 MB)
Klima-Prognose	Firma Meteo-Research, Herr Dr. Enke	29 (37) Seiten	Rohdaten aus Simulationsläufen (ca. 22 GB)
Grundwasser	HLUG, Herr Dr. Berthold	21 Seiten	–
Oberflächengewässer	HLUG, Herr Dr. Brahmer	26 (219) Seiten	–
Landwirtschaft	Universität Kassel, Herr Prof. Alcamo	22 (14) Seiten	Daten zu Kalibration, Simulation, Ergebnissen (ca. 565 MB)
Forstwirtschaft	Hessen Forst, Herr Prof. Eichhorn	24 Seiten	–
Pflanzenphänologie	Universität Gießen, Herr Dr. Grünhage	64 Seiten	Daten zu Phänologie und Spätfrost (ca. 206 MB)
Weinbau	Forschungsanstalt Geisenheim, Herr Prof. Schultz	43 Seiten	–
Obstbau	Forschungsanstalt Geisenheim, Herr Prof. Jacob	128 (2) Seiten	Daten zu Phänologie und Klima (ca. 143 MB)
Naturschutz	Ökologische Forschungsstation, Frau Dr. Pampus	151 Seiten	–
Gesundheitsschutz	Hess. Landesprüfungs- und Untersuchungsamt im Gesundheitswesen, Herr Dr. Uphoff	71 Seiten	–

Alle Berichte wurden in zweifacher Ausfertigung an das Hessische Ministerium für Umwelt, ländlichen Raum und Verbraucherschutz weitergegeben.

Die oben angeführten Berichte und Dateien können beim Hessischen Landesamt für Umwelt und Geologie, Dezernat I 1 angefordert werden.

HESSEN



**Hessisches Landesamt für Umwelt und Geologie**

Dezernat I 1

Rheingaustraße 186  
65203 Wiesbaden

<http://www.hlug.de/medien/luft/inklim/index.htm>