



Klimawandel und seine Folgen in Hessen

– Forschungsergebnisse von INKLIM 2012 II plus –

Einleitung

Die globale Erwärmung zeigt sich sowohl im großen Maßstab auf der ganzen Erde als auch im kleinen in den einzelnen Ländern und Regionen. Somit ist auch für das Land Hessen mit veränderten Temperatur- und Niederschlagsbedingungen zu rechnen, die sich wiederum u. a. auf die Bodeneigenschaften, das Pflanzenwachstum oder auf die Flüsse und das Grundwasser auswirken. Diese Folgen müssen wir abschätzen, um Maßnahmen zur Anpassung an die neuen Bedingungen zu entwickeln.

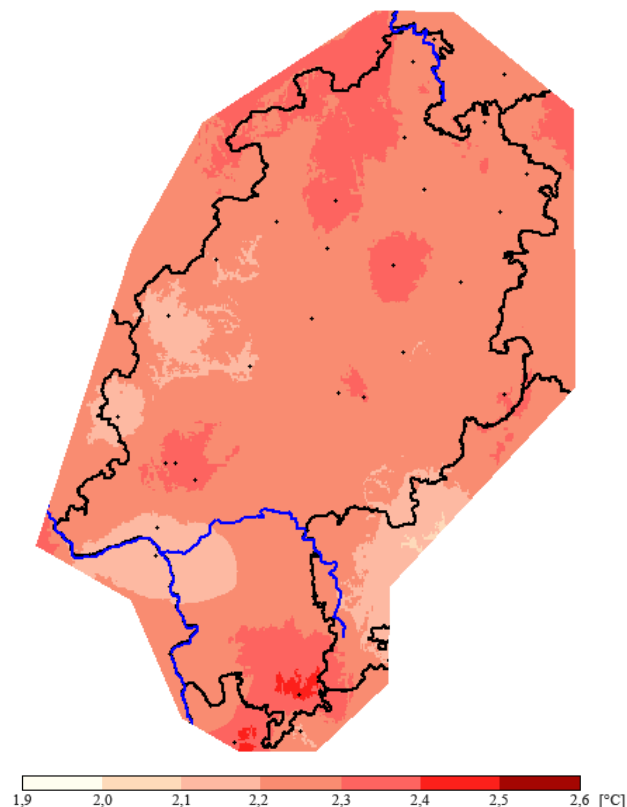
Aus diesen Gründen wurde im Jahr 2004 vom Hessischen Ministerium für Umwelt, ländlichen Raum und Verbraucherschutz (HMULV, seit 2009: Hessisches Ministerium für Umwelt, Energie, Landwirtschaft und Verbraucherschutz, HMUELV) das Forschungsprojekt Integriertes Klimaschutzprogramm Hessen 2012 (INKLIM 2012) initiiert und 2006 abgeschlossen. Es befasste sich mit Szenarios zu den Kohlendioxid-Emissionen in Hessen, mit Maßnahmen zur Minderung von Treibhausgasen sowie mit dem Klimawandel und seinen Folgen in Hessen. Das letztgenannte Thema, der sog. Baustein II, wurde vom Hessischen Landesamt für Umwelt und Geologie (HLUG) geleitet. Im Jahr 2007 hat das hessische Kabinett darauf aufbauend den Aktionsplan Klimaschutz beschlossen.

Im Anschluss daran wurde von Sommer 2007 bis Frühjahr 2009 das Nachfolgeprojekt INKLIM 2012 II plus durchgeführt. Das HLUG bzw. seit Oktober 2008 das neu gegründete Fachzentrum Klimawandel Hessen betreute die acht Projekte zu regionalen Klimafolgen in Hessen. Als neuntes Projekt kam eine Vorstudie zur Kohlendioxid-Speicherung im Untergrund hinzu. Die Ergebnisse dieser Projekte werden im Folgenden zusammenfassend dargestellt, aufbauend auf einer kurzen Einführung zum Thema Klimaprojektionen. Auf Seite 8 findet sich eine Liste der bearbeitenden Institutionen.

Klimawandel

Klimaprojektionen für Hessen

Klimaprojektionen beschreiben mögliche zukünftige Reaktionen des Klimasystems in Abhängigkeit von unterschiedlichen Treibhausgas-Konzentrationen. Mit Computerprogrammen werden Klimamodellsimulationen durchgeführt, deren Ergebnisse die Projektionen sind. Eine Klimasimulation wird zunächst mit einem *Globalmodell* berechnet, welches klimatologische Prozesse in der Atmosphäre für die gesamte Erde simuliert. Um jedoch genauere Ergebnisse für Teilregionen wie z. B. Hessen erhalten zu können, müssen noch sog. *Regionalisierungsverfahren* angewendet werden.



Änderung der mittleren Temperatur in Hessen 2071–2100 relativ zu 1971–2000 (ECHAM5, WETTREG, Szenario A1B), mittlere Temperaturerhöhung: + 2,3 °C

Hierbei gibt es zwei Möglichkeiten: die *statistische* Regionalisierung, die z. B. Wetterlagen aus dem Globalmodell statistisch mit gemessenen meteorologischen Stationsdaten verknüpft, und die *dynamische* Regionalisierung, die wie ein Globalmodell funktioniert, jedoch nur für einen bestimmten Ausschnitt des Globus rechnet.

Die unterschiedlichen Treibhausgas-Emissionen für die Projektionen werden aus *Szenarios* berechnet, die vom Weltklimarat festgelegt wurden. Es gibt vier Szenariofamilien, die jeweils unterschiedliche Annahmen über die zukünftige Bevölkerung, Wirtschaft sowie die technologische und ökologische Entwicklung treffen. Die sog. A1B- und A2-Szenarios gehen beide von einer ökonomisch orientierten Welt aus. Die B1- und B2-Szenarios sind ökologisch orientiert und somit auch moderater bezüglich der Treibhausgas-Emissionen.

Für die INKLIM 2012 II plus-Projekte wurden die Daten des Globalmodells ECHAM5 vom Max-Planck-Institut für Meteorologie in Hamburg herangezogen.

Als Regionalisierungsverfahren dienen das statistische Modell WETTREG und in einigen Projekten auch das dynamische Modell REMO.

Die zugrunde gelegten Szenarios waren das A1B-, A2- und B1-Szenario, wobei für Hessen die Ergebnisse aus A1B und A2 sehr ähnlich ausfallen.

Zum Vergleich: Die Klimaprojektionsdaten des Vorgängerprojekts INKLIM 2012 II basierten auf ECHAM4, WETTREG und dem Szenario B2.

Die Klimaprojektionsdaten, die bei INKLIM 2012 II plus als Eingangsgrößen in den Untersuchungen über mögliche Folgen des Klimawandels dienen, lagen zu Projektbeginn vor. Sie sind im Auftrag des Umweltbundesamts für ganz Deutschland und den Zeitraum bis 2100 berechnet worden.

Die Projektionen werden häufig für Zeiträume von 30 Jahren ausgewertet (z. B. 2071–2100 für das Ende des 21. Jahrhunderts). Als Referenzperiode wird 1961–1990 oder 1971–2000 verwendet.

Generell handelt es sich bei Klimaprojektionen *nicht* um Klimavorhersagen, sondern um Aussagen über *mögliche* Klimaentwicklungen. Grundaussagen wie z. B. die erwartete Temperaturzunahme sind zwar als sehr wahrscheinlich einzustufen, die *Höhe* des Erwärmungstrends weist aber eine gewisse Bandbreite auf. Dies liegt zum einen an den unterschiedlichen Szenarios und zum anderen an den unterschiedlichen Modellen.

Einige wichtige Ergebnisse für **Hessen** werden im Folgenden dargestellt, immer angegeben als Differenzwerte zum Zeitraum 1971–2000:

- Die Lufttemperaturen werden sich insgesamt immer mehr erhöhen: in der Mitte des Jahrhunderts um 0,7 °C bis 1,4 °C und gegen Ende des Jahrhunderts sogar um 1,8 °C bis 3,1 °C, je nach Szenario und Modell und mit nur geringen regionalen Unterschieden (siehe auch Karte, S. 1).
- Die Temperaturerhöhungen fallen bei REMO tendenziell höher aus und zeigen beim Szenario B1 die niedrigsten Werte.

Temperaturänderung (2031–2060 gegen 1971–2000)

	A1B	A2	B1
WETTREG	+1,2 °C	+1,3 °C	+0,8 °C
REMO	+1,3 °C	+1,4 °C	+0,7 °C

Temperaturänderung (2071–2100 gegen 1971–2000)

	A1B	A2	B1
WETTREG	+2,3 °C	+2,1 °C	+1,8 °C
REMO	+3,1 °C	+3,0 °C	+2,0 °C

- Beim Niederschlag bleibt die Jahresgesamtmenge relativ unverändert, aber innerhalb des Jahres findet eine deutliche Umverteilung statt: Im Sommer wird es weniger Niederschläge geben, im Winter hingegen mehr.
- In der Jahrhundertmitte ist das Änderungssignal nicht eindeutig: Im Winter nimmt der Niederschlag leicht zu (1 bis 26 %), im Sommer ergeben sich ungleiche Vorzeichen (+9 % bis –11 %).
- Gegen Ende des Jahrhunderts ist für die Sommermonate mit Niederschlagsabnahmen (–11 % bis –15 %) zu rechnen und für die Wintermonate mit Zunahmen (10 bis 58 %).

Niederschlagsänderung im Sommer (Juni, Juli, August) (2071–2100 gegen 1971–2000)

	A1B	A2	B1
WETTREG	–14,5 %	–11,9 %	–11,4 %
REMO	–15,1 %	–12,9 %	–13,2 %

Niederschlagsänderung im Winter (Dez., Januar, Februar) (2071–2100 gegen 1971–2000)

	A1B	A2	B1
WETTREG	+57,7 %	+44,6 %	+37,0 %
REMO	+19,3 %	+18,7 %	+9,8 %

Für weitere Informationen zum Thema sei hier auf den Umweltatlas Hessen (Themenbereich Klimawandel) verwiesen: <http://atlas.umwelt.hessen.de>

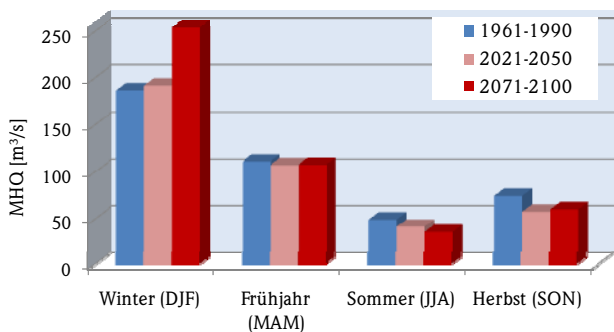
Folgen des Klimawandels

Flüsse

Die Auswirkungen des Klimawandels auf das Abflussverhalten im Lahnggebiet und im hessischen Maingebiet wurden in diesem Projekt untersucht. Durch die Kombination eines Wasserhaushaltsmodells mit Klimaprojektionsdaten wurden zukünftige Abflusszeitreihen auf Tageswertbasis erzeugt. Die verwendeten Klimadaten bis Ende des 21. Jahrhunderts basieren dabei auf dem Regionalisierungsverfahren WETTREG sowie den Szenarios A1B, A2 und B1; als Referenzperiode dient 1961–1990.

Betrachtet man die Ergebnisse aller drei Szenarios für die untersuchten Pegel im hessischen Rheingebietsanteil in den beiden 30-Jahreszeiträumen 2021–2050 und 2051–2080 und bezieht außerdem noch die Resultate aus dem Vorgängerprojekt (ECHAM4, WETTREG, Szenario B2) mit ein, zeichnet sich für die Abflusswerte in der Jahrhundertmitte folgende Entwicklung ab:

- Zunahme um 10 % im hydrologischen Winterhalbjahr (November bis April)
- Abnahme um 15 % im hydrologischen Sommerhalbjahr (Mai bis Oktober)
- Jahresabfluss-Zunahme um 5 %
- Rückgang des mittleren Niedrigwasserabflusses um 10 bis 15 %.



Mittlere jahreszeitliche Hochwasserabflüsse am Pegel Leun für das Szenario A1B (ECHAM5, WETTREG)

In der Abbildung ist für das Szenario A1B der mittlere Hochwasserabfluss am Pegel Leun/Lahn dargestellt. Für die Wintermonate Dezember, Januar und Februar wird für das Jahrhundertende eine Zunahme der mittleren Hochwasserabflüsse um ca. 36 % verglichen mit 1961–1990 errechnet. Für das Frühjahr werden keine großen Veränderungen erwartet, wohingegen im Sommer und Herbst mit einem Rückgang dieser Abflusswerte zu rechnen ist.

Als Anpassungsmaßnahmen, die sich hinsichtlich Niedrigwasser und Hochwasser positiv auswirken, kommen bessere Infiltration des Niederschlags,

vermehrter Rückhalt von Hochwasserabflüssen in Auen sowie Vermeidung von Oberflächenabfluss in Betracht. Der Niedrigwasserproblematik lässt sich u. a. durch angepasste bewilligte Entnahmemengen oder Gewässerrenaturierung begegnen. Um einer möglichen Hochwasserverschärfung aufgrund des Klimawandels entgegenzuwirken, sollten die Anstrengungen zum Hochwasserschutz priorisiert und verstärkt werden.

Boden

Im Boden sind erhebliche Mengen an organischem Kohlenstoff gespeichert – fast zweimal so viel wie in der Atmosphäre. Erste Berechnungen ergaben für die hessischen Böden einen Kohlenstoffvorrat von ca. 240 Millionen Tonnen. Mit steigenden Temperaturen im Zuge des Klimawandels könnte jedoch der Abbau der organischen Substanz im Boden zunehmen. Das dabei gebildete Kohlendioxid (CO₂) wird in die Atmosphäre abgegeben, was wiederum eine Verstärkung des Treibhauseffekts bedeutet.

Dieses Projekt befasste sich mit der Untersuchung der CO₂-Freisetzung aus Böden infolge von Erwärmung. Zum einen wurde der Kohlenstoffgehalt von den in ganz Hessen verteilten sog. Boden-Dauerbeobachtungsflächen im Zeitraum 1992–2007 ausgewertet. Die Ergebnisse belegen, dass die Kohlenstoffkonzentration der hessischen Böden in diesem Zeitraum nicht generell abgenommen hat, sondern weitgehend konstant geblieben ist. Allerdings werden – abhängig von der Bodennutzung und der geographischen Lage innerhalb Hessens – durchaus Zu- und auch Abnahmen des Kohlenstoffgehalts beobachtet.

Zum anderen wurden Laborversuche durchgeführt, in denen Böden hessischer Boden-Dauerbeobachtungsflächen unter kontrollierten Bedingungen einer simulierten Temperaturänderung ausgesetzt wurden. In Inkubationsversuchen wurde die CO₂-Freisetzung unterschiedlicher Bodenarten (Acker Unterboden, Acker Oberboden, Grünland und Wald) bestimmt.

Die Ergebnisse aller Versuchsvarianten (verschiedene Standorte, Nutzungsarten, Tiefen und Temperaturniveaus) zeigen, dass die CO₂-Freisetzung tendenziell mit steigender Temperatur zunimmt. Daneben ist die gemessene Freisetzungsrates abhängig von der Nutzungsform bzw. dem Gehalt an organischem Kohlenstoff im Boden: Die höchste Rate findet sich bei Waldböden, eine mittlere bei Grünland und die niedrigste bei Ackerböden.

Betrachtet man jedoch die *potentiell* freisetzbare CO₂-Gesamtmenge pro Hektar, kehrt sich die beschriebene Reihenfolge genau um: Ackerland kann bis zu dreimal mehr CO₂ emittieren als Wald. Ackerboden weist zwar einen geringeren organischen Kohlenstoffgehalt auf, aber die humose Schicht ist mächtiger, da durch Bodenbearbeitung der Kohlenstoffvorrat auf eine größere Tiefe verteilt ist; somit sind auch die Gesamtkohlenstoffvorräte größer.

Eine genaue Bilanzierung des Umfangs der Kohlenstofffreisetzung aus Böden ist zurzeit noch nicht möglich. Aufbauend auf den Projektergebnissen müssen weitere Versuche z. B. zum Einfluss des Wassergehalts sowie zu regionalen und nutzungsbedingten Unterschieden folgen.

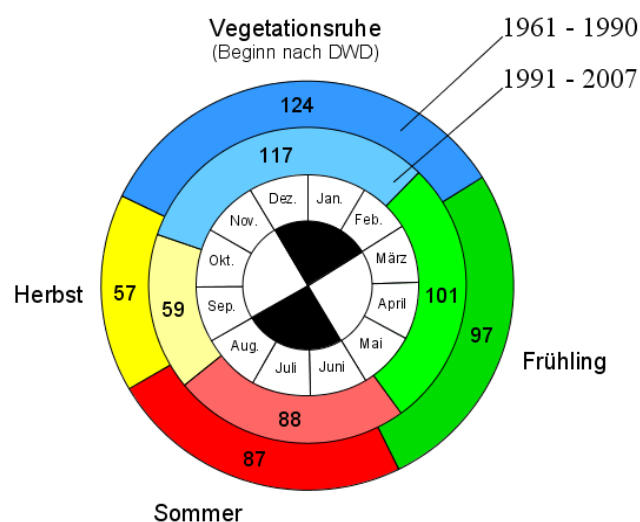
Pflanzenentwicklung

Die Pflanzenentwicklung wird maßgeblich durch den Temperaturverlauf bestimmt und ist daher gut zur Untersuchung der Auswirkungen des Klimawandels geeignet. Die Pflanzenphänologie befasst sich mit den verschiedenen im Jahresablauf periodisch wiederkehrenden Wachstumserscheinungen bei Pflanzen wie Blüte, Fruchtreife, Laubverfärbung und Blattfall. So wird z. B. der Beginn des Vorfrühlings durch die Haselnuss- oder auch die Schneeglöckchenblüte angezeigt.

Im Land Hessen werden vom Deutschen Wetterdienst ca. 550 phänologische Beobachtungsstationen geführt. Im vorliegenden Forschungsprojekt wurden Daten von 170 dieser Stationen statistisch ausgewertet im Hinblick auf die zeitliche Entwicklung in den Jahren von 1961 bis 2007.

Die sog. phänologische Uhr ist eine gute Möglichkeit, die Verschiebungen der Jahreszeiten zwischen zwei Zeiträumen anzuzeigen. Der Zeitraum 1991–2007 ist im inneren Ring dargestellt, während der äußere Ring den Vergleichszeitraum von 1961–90 anzeigt. Die Zahlen stehen für die Anzahl der Tage und somit für die Dauer der jeweiligen Jahreszeit.

Es fällt auf, dass der innere Ring gegen den Uhrzeigersinn verschoben ist. Im Zeitraum 1991–2007 setzen die vier phänologischen Jahreszeiten früher ein, das Frühjahr durchschnittlich 14 Tage und der Sommer 10 Tage eher als in den Jahren 1961–1990. Auch die Dauer der Jahreszeiten hat sich verändert: Die Vegetationsruhe (Winter) hat sich um 7 Tage verkürzt; dementsprechend hat sich die Vegetationsperiode um 7 Tage verlängert.



Phänologische Uhr für Hessen

Allerdings muss darauf hingewiesen werden, dass die genannten Werte Mittelwerte für ganz Hessen darstellen und es hinsichtlich der Pflanzenentwicklung große regionale Unterschiede innerhalb Hessens gibt. Eine besonders große Vorverlagerung des Frühlings ist beispielsweise im Thüringer Becken mit 26 Tagen zu verzeichnen.

Mit Hilfe von Modellen wurde die zukünftige Pflanzenentwicklung in vier hessischen Regionen abgeschätzt (Region Gießen, Eschwege, Geisenheim und Frankfurt). Für die Berechnungen wurden Klimaprojektionsdaten verwendet, die auf der Regionalisierungsmethode WETTREG und den Szenarios A1B, A2 und B1 basieren; zusätzlich einbezogen wurden auch die ECHAM4/B2-Ergebnisse aus dem Vorgängerprojekt INKLIM 2012 II. So ist z. B. für das Marburg-Gießener-Lahntal in der Jahrhundertmitte (2035–2065) zu erwarten, dass das Frühjahr nochmals um ± 8 Tage früher als im Zeitraum 1991–2007 eintritt. Außerdem dürfte sich der Trend zur Verlängerung der Vegetationsperiode in Zukunft weiter fortsetzen.

Der frühere Beginn der Vegetationsperiode birgt jedoch auch Gefahren für den Obstbau. Das Auftreten von Spätfrösten zur Zeit des Blühbeginns wurde für unterschiedliche Obstgehölze und Beerensträucher in den vier o. g. hessischen Regionen abgeschätzt. Dabei ergab sich für den Zeitraum 2036–2065, dass durchschnittlich 2 bis 5 Jahre pro Dekade mit Spätfrost auftreten könnten. Demnach bleibt trotz der zu erwartenden Klimaerwärmung die Gefährdung durch Spätfrost in der Zukunft bestehen, was erhebliche Ernteauffälle zur Folge haben kann.

Forstwirtschaft

Im Bereich der Forstwirtschaft wurden die Risiken des Klimawandels für den Wald in der Rhein-Main-Ebene untersucht. Die Wälder sind hier verglichen mit anderen hessischen Waldgebieten besonders stark geschädigt. Die Region gehört zu den niederschlagsärmsten Gegenden Hessens und weist überdies als Ballungsraum einen hohen Wasserverbrauch auf. Durch großräumige Grundwasserabsenkungen hat sich der Vitalitätszustand vieler Wälder im Hessischen Ried stark verschlechtert. Buche und Eiche zeigen einen hohen Anteil geschädigter Bäume; bei der Kiefer ist ein starker Mistelbefall festzustellen.

In diesem Projekt wurden ein Eichen-, ein Buchen- und ein Kiefernstandort verglichen. Mit einem Wasserhaushaltsmodell wurde die Wasserverfügbarkeit als Indikator für das Auftreten von Trockenstress berechnet. Hierbei wurde sowohl der zurückliegende Zeitraum 1961–1990 simuliert als auch unter Einbeziehung von Klimaprojektionen der Zeitraum bis 2050 abgeschätzt. Verwendet wurden Daten des Modells WETTREG (trockene und feuchte Variante) für die Szenarios A1B und B1.

Bereits in der Zeitspanne 1961–1990 traten teilweise ausdauernde Trockenperioden auf, die auf ehemals grundwassernahen Waldstandorten zu deutlichen Vitalitätseinbußen geführt haben. Für die Zukunft werden je nach Szenario sehr unterschiedliche Wasserbilanzen simuliert. Insgesamt ist jedoch eine weitere Zunahme von Trockenstressbedingungen bis zur Jahrhundertmitte wahrscheinlich, da höhere Temperaturen und geringere Sommerniederschläge zu erwarten sind.

Es hat sich gezeigt, dass waldbauliche Eingriffe größere Auswirkungen auf den Wasserhaushalt der Forststandorte haben können als die hier betrachteten Klimaänderungen bis zum Jahr 2050.

Abschließend wurden einige Empfehlungen für die trockenstressgefährdeten Standorte abgeleitet:

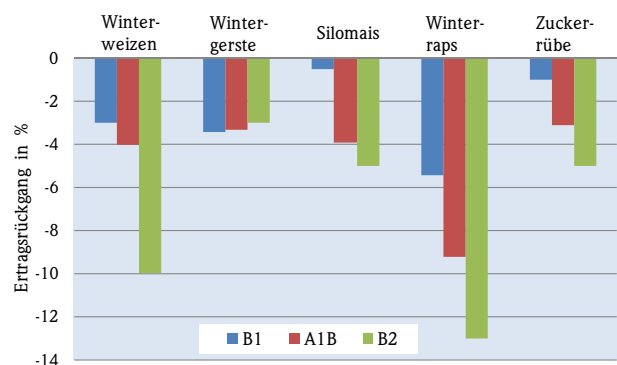
- Angepasste Bestockungsdichten, die eine verringerte Verdunstung aufweisen, ohne jedoch die Ausbreitung von Grasdecken durch die Bestandsauflichtung zu begünstigen
- Risikoverteilung gegenüber biotischen und abiotischen Schädigungen durch angepasste Baumartenmischungen.

In dem Forschungsprojekt „Waldentwicklungsszenarien für das Hessische Ried“ (Projektzeitraum 2008–2011) werden die Untersuchungen großflächig fortgeführt.

Landwirtschaft

Der Einfluss des Klimawandels auf die landwirtschaftlichen Erträge in Hessen wurde in diesem Forschungsprojekt untersucht. Die Ertragsänderungen für die fünf wichtigsten Feldfrüchte Hessens (Winterweizen, Wintergerste, Silomais, Wintererbsen und Zuckerrübe) wurden für den Zeitraum 2041–2070 relativ zu den Jahren 1971–2000 mithilfe eines Ertragsmodells ermittelt. Dieses Modell berechnet das Pflanzenwachstum und die Bodenprozesse in Abhängigkeit von Temperatur sowie Wasser- und Nährstoffverfügbarkeit. Die zugrunde gelegten Klimaprojektionsdaten stammen aus der Regionalisierungsmethode REMO und den Szenarios A1B und B1.

Den Berechnungen nach kommt es in der Mitte des 21. Jahrhunderts wahrscheinlich zu einem Ertragsrückgang in den meisten hessischen Landkreisen. Allerdings unterscheiden sich die Ergebnisse abhängig von den Feldfrüchten und Landkreisen teilweise recht stark. Von den 260 Ertragsänderungen (26 Landkreise, 5 Feldfrüchte, 2 Szenarios) fallen fast drei Viertel gering aus ($\pm 5\%$). In einem knappen Viertel der Fälle beträgt der Ertragsrückgang -5 bis -13% . In Einzelfällen liegt die Ertragszunahme bei $+5$ bis $+10\%$. Eine Ertragsabnahme in besonders vielen Landkreisen lässt sich bei Wintererbsen im Szenario A1B beobachten.



Ertragsänderungen in Hessen 2041–2070 relativ zu 1971–2000. B1 und A1B: ECHAM5, REMO. B2: ECHAM4, WETTREG (aus Vorgängerprojekt INKLIM 2012 II)

Die Abbildung zeigt die über Hessen gemittelten Ertragsänderungen der fünf betrachteten Feldfrüchte zur Jahrhundertmitte. Die Ergebnisse aus dem Vorgängerprojekt INKLIM 2012 II, dem Klimaprojektionsdaten aus ECHAM4, WETTREG und dem Szenario B2 zugrunde lagen, sind ebenfalls dargestellt. In beiden Projekten gehen die mittleren Erträge zurück: im aktuellen Projekt um 1 bis 9 %, im Vorgängerprojekt um 3 bis 13 %. Demnach ist trotz Verwendung unterschiedlicher Global- und Regionalmodelle sowie Szenarios die Grundaussage eine ähnliche, nämlich dass für alle fünf Feldfrüch-

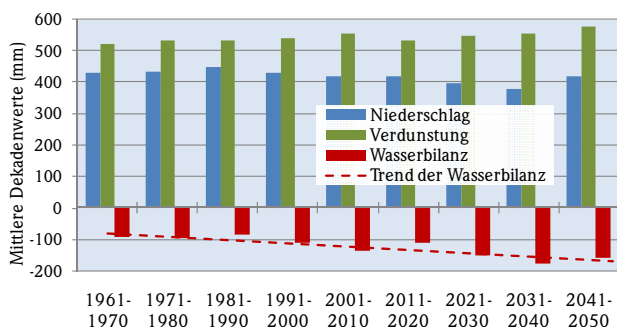
te mit leichten bis mittleren Ertragsabnahmen zu rechnen ist.

Gezielte Anpassungen an die Folgen des Klimawandels können Ertragsrückgängen und den daraus entstehenden wirtschaftlichen Schäden entgegenwirken. Als Beispiele seien hier die Ausweitung von Bewässerungsmaßnahmen, Sortenwechsel von Feldfrüchten sowie Züchtung und Anbau von hitze- und schädlingsresistenten Sorten genannt.

Landwirtschaftlicher Zusatzwasserbedarf

Die Projektregion Hessisches Ried ist geprägt von einem hohen Anteil an Sonderkulturen; der Anteil der erschlossenen Beregnungsfläche beträgt 96 %. Eine wirtschaftliche Pflanzenproduktion ist schon jetzt nur durch die Verabreichung von Zusatzwassergaben erreichbar.

Dieses Projekt untersuchte die Entwicklung der Wasserbilanz (Differenz aus Niederschlag und potentieller Verdunstung) bis zur Mitte des Jahrhunderts. Hierzu wurden Klimaprojektionsdaten aus der Region Hessisches Ried verwendet, die auf der Regionalisierungsmethode WETTREG und dem Szenario A1B basieren.



Mittlere Dekadenwerte in mm für Niederschlag, Verdunstung und Wasserbilanz innerhalb der Beregnungssaison von 1961–2050 in Mannheim (ECHAM5, WETTREG, A1B)

Die Abbildung zeigt deutlich die zu erwartenden Veränderungen innerhalb der Beregnungssaison (Ende März bis Anfang Oktober): Die Wasserbilanz ist bereits heute negativ und wird stärker negativ werden. Der negative Trend der Wasserbilanz um ca. 10 mm pro Jahrzehnt ist auf abnehmende Niederschlagsmengen und zunehmende Verdunstungsraten zurückzuführen. Daher ist mit einer Erhöhung des Zusatzwasserbedarfs um etwa 10 l/m² pro Dekade zu rechnen. Im Gegensatz dazu entwickelt sich die Wasserbilanz in der beregnungsfreien Zeit positiv, so dass auch eine höhere Wahrscheinlichkeit besteht, dass der Bodenwasserspeicher zu Vegetationsbeginn aufgefüllt ist.

Im Hessischen Ried wurde innerhalb dieses Projekts außerdem eine Befragung zum Bewässerungsaufwand durchgeführt. Die Ergebnisse aus der aktuellen Erhebung wurden denen aus einer früheren Abschätzung (1994) gegenübergestellt. Der Zusatzwasserbedarf in sog. Nassjahren belief sich 1994 auf 3,5 Mio. m³, 2008 auf 10 Mio. m³; dies entspricht einer Zunahme von rund 12 l/m² in zehn Jahren. Demgegenüber beläuft sich die zusätzliche Bewässerungsmenge in sog. Trockenjahren auf 35 Mio. m³, also auf das Zehnfache; sie ist aber zwischen 1994 und 2008 unverändert geblieben.

Es ist von einem steigenden Grundbedarf an Zusatzwasser im Hessischen Ried auszugehen, denn beide Methoden – Befragung *und* Klimamodellierung – führen zu einem relativ ähnlichen Mehrbedarf. Eine Ausweitung der Tropfbewässerung ist zur Optimierung der Bewässerung empfehlenswert.

Weinbau

Der Wasserhaushalt von steillagigen Weinbergen stand in dieser Untersuchung im Vordergrund. Es wurden exemplarisch zwei Rebstandorte betrachtet: Beim Rüdesheimer Schlossberg handelt es sich um eine extreme Trockenlage, wohingegen der Weinberg unterhalb des Johannisberger Schlosses über eine gute Wasserversorgung verfügt.

Mit einem rebenspezifischen Wasserhaushaltsmodell, das in der vorliegenden Arbeit weiterentwickelt wurde, konnte der Wasserstress bis zum Ende des 21. Jahrhunderts abgeschätzt werden. Als Klimaprojektionsdaten dienten WETTREG-Daten der Station Geisenheim auf Basis der Szenarios A2 und B1. Die WETTREG-Daten lagen jeweils als trockene und feuchte Variante vor. Insgesamt wurden also vier mögliche Klimaentwicklungen simuliert.

Die Ergebnisse zeigen generell eine Entwicklung zu größerer Trockenheit. Dieser Trend ist – wenn auch unterschiedlich stark – bei allen Szenarios zu beobachten und bei dem trockenen Standort wesentlich stärker ausgeprägt.

Beim *Rüdesheimer Schlossberg* nimmt die Anzahl der Tage mit starkem Stress (heute: etwa 40 Tage pro Jahr) bis zum Ende des Jahrhunderts um ca. 50 % zu, wenn man die Klimaentwicklung A2-trocken oder B1-trocken zugrunde legt. Dieser Weinberg ist bereits heute mit einer Zusatzbewässerung ausgestattet, die den Berechnungen nach in Zukunft deutlich an Bedeutung gewinnen wird.

Für den Standort *Johannisberger Schloss* wurde für die Klimaentwicklung A2-trocken errechnet, dass

die Anzahl der Tage mit starkem Stress gegen Ende des Jahrhunderts auf rund 10 Tage pro Jahr ansteigt. Während hier gegenwärtig kein Bewässerungsbedarf besteht, könnte am Jahrhundertende etwa alle 6 Jahre eine Bewässerung sinnvoll sein.



Im Weinbau kann Wassermangel beispielsweise zur Ausbildung von Fehlparmen oder zu deutlich reduzierten Erträgen führen. Als Anpassungsmaßnahmen, um dem Trockenstress zu begegnen, kommen u. a. Tröpfchenbewässerung, Bodenabdeckungen oder die Züchtung von trockenstress-toleranten Unterlagen (Wurzelreben) in Betracht. Solche angepassten Bewirtschaftungssysteme können dazu dienen, den Steillagenweinbau zu erhalten, der regionale Kulturlandschaften wie den Rheingau prägt.

Obstbau

Dieses Projekt untersuchte Auswirkungen von Klimaveränderungen auf den Obstanbau in Hessen. Dabei wurde schwerpunktmäßig das phänologische Stadium der Apfelblüte betrachtet.

Zunächst wurden aus den phänologischen Beobachtungsdaten des Deutschen Wetterdiensts Hessenkarten erstellt, die das Blühdatum von Apfel für die Jahre 1951–2005 abbilden. Insgesamt beträgt die Differenz des Blühdatums zwischen Jahren mit besonders frühem bzw. spätem Einsetzen der Blüte etwa 20 Tage. Die Variabilität zwischen den Jahren entspricht in etwa der Variabilität in ganz Hessen innerhalb eines Jahres.

Im Anschluss daran wurde ein für Hessen geeignetes phänologisches Modell für die Beispielkultur Apfel ausgewählt. Dieses wurde dann mit Klimaprojektionsdaten gekoppelt (WETTREG-Daten, Szenario A2 sowie REMO-Daten, Szenario A1B). In der Mitte des 21. Jahrhunderts (2031–2060) ist im Mittel eine Verfrühung der Blüte zu erwarten. Auf Basis der REMO-Daten wurde eine Verschiebung der Apfelblüte um 7 Tage nach vorne im Vergleich zur 2. Hälfte des 20. Jahrhunderts errechnet.

CO₂-Speicherung im tiefen Untergrund

Die Möglichkeiten einer CO₂-Speicherung in tiefen geologischen Formationen in Hessen wurden innerhalb dieses Teilprojekts untersucht. Hintergrund der Fragestellung ist der sog. CCS-Prozess (Carbon Dioxide Capture and Storage): Dabei soll das in Kraftwerken entstehende CO₂ abgeschieden und anschließend unter Druck eingelagert werden, um es für möglichst lange Zeiträume (länger als 10 000 Jahre) der Atmosphäre zu entziehen, um so der Klimaerwärmung entgegenzuwirken.

Hierfür können die natürlich vorhandenen Hohlräume in Gesteinen des tieferen Untergrunds genutzt werden. Die für die Injektion des CO₂ erforderlichen Druck- und Temperaturverhältnisse werden erst ab Tiefen von 800–1000 m unterhalb der Geländeoberkante erreicht. Eine wichtige Voraussetzung für die Speichersicherheit ist das Vorhandensein von undurchlässigen Deckschichten.

Grundsätzlich kommen zur CO₂-Speicherung saline Aquifere (salzhaltige Grundwasserleiter), ausgeförderte Erdgas- und Erdölfelder, tiefe Kohleflöze sowie Salzstöcke in Frage. Die beiden letztgenannten Bereiche werden für Hessen aus Kapazitäts- und Sicherheitsgründen nicht in Erwägung gezogen.

Für die Studie wurden insgesamt die Schichtenverzeichnisse von ca. 1200 Bohrungen aus dem Archiv des HLUG gesichtet. Die entleerten Erd- und Erdgasfelder im hessischen Oberrheingraben sind prinzipiell als CO₂-Speicher geeignet. Allerdings weisen sie nur geringe Kapazitäten auf und dienen an einigen Stellen als Erdgasspeicher.

In Bezug auf die salinaren Aquifere ist vielfach die Datengrundlage nicht ausreichend für eine zuverlässige Bewertung. So müssten beispielsweise zusätzliche Bohrungen im Raum Kassel, Vogelsberg und der Hohen Rhön vorgenommen werden. Auch sind die Anzahl sowie die möglichen Speicherkapazitäten hessischer salinärer Aquifere gering: Ein 500 MW-Kohlekraftwerk würde einen Aquifer-Standort mittlerer Größe schon in etwa vier Jahren mit CO₂ ausfüllen.

Das beschriebene Projekt war eine Vorstudie zum bundesweiten Forschungsvorhaben „Speicher-Kataster Deutschland“ (Projektzeitraum 2009–2011). Dieses wird vom Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie gefördert, die Federführung liegt bei der Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe. Ziel ist die systematische Erfassung der unterirdischen Porenspeicherräume.

Zusammenfassung und Ausblick

Abschließend werden die möglichen Folgen des Klimawandels in Hessen kurz zusammengefasst:

- Für das Lahnggebiet und das hessische Maingebiet ist mit einer Zunahme der Gesamtabflüsse im Winterhalbjahr und einer Abnahme im Sommerhalbjahr zu rechnen.
- Bei den hessischen Böden ist der Kohlenstoffgehalt zwischen 1992 und 2007 weitgehend konstant geblieben. Aufgrund der höheren Kohlenstoffvorräte können Ackerböden potentiell bis zu dreimal mehr CO₂ abgeben als Waldböden.
- Bei den Pflanzen hat die Verfrühung der Entwicklungsstadien und die Verlängerung der Vegetationsperiode bereits eingesetzt und wird sich weiter fortsetzen. Die Gefährdung durch Spätfröste besteht im Obstbau weiterhin.
- Die Wälder in der Rhein-Main-Ebene sind bereits stark durch Grundwasserabsenkungen geschädigt. Zukünftig muss mit einer weiteren Abnahme der Wasserverfügbarkeit infolge zunehmender Sommertrockenheit gerechnet werden.
- In der Landwirtschaft wird es wahrscheinlich zu leichten bis mittleren Ertragsrückgängen in den meisten Regionen kommen. Allerdings variieren die Ergebnisse zwischen den einzelnen Land-

kreisen und Feldfrüchten recht stark.

- Der Bedarf an Zusatzwasser im Hessischen Ried wird weiter zunehmen, da von einem negativen Trend der Wasserbilanz auszugehen ist.
- Im Weinbau muss mit einer steigenden Anzahl von Trockenstresstagen gerechnet werden. Wegen des Trends zu stärkerer Sommertrockenheit wird der Bewässerungsbedarf zunehmen.
- Im Bereich Obstbau ergab die Simulation mit einem für ganz Hessen geeigneten phänologischen Modell eine Verfrühung der Apfelblüte.
- Insgesamt sind in Hessen nur geringe CO₂-Speicherkapazitäten im Untergrund vorhanden. Die Erdöl-/Erdgasfelder werden z. T. als Gasspeicher genutzt, die salinaren Grundwasserleiter müssten weiter untersucht werden.

Die hier vorgestellten Auswirkungen zeigen uns, dass der Klimawandel die Umwelt des Menschen unmittelbar betrifft. Daher fördert und begleitet das Fachzentrum Klimawandel Hessen eine Vielzahl an neuen Forschungsprojekten unter der Bezeichnung INKLIM-A; diese Projekte sollen sich insbesondere dem Aspekt der *Anpassung* an die Folgen des Klimawandels widmen. Daneben wird zurzeit eine Anpassungsstrategie für das Land Hessen erarbeitet, die gegen Ende des Jahres 2010 vorliegen soll.

Übersicht über alle Teilprojekte von INKLIM 2012 II plus und die verantwortlichen Projektpartner

Teilprojekt	Projektpartner (Institution)
Flüsse*	HLUG Wiesbaden, Dezernat W3 ¹ ; Ingenieurbüro Ludwig Karlsruhe ¹
Boden	HLUG Wiesbaden, Dezernat G3 ¹ ; AGROFOR Consulting Wettengel ²
Pflanzenentwicklung*	Universität Gießen, Institut für Pflanzenökologie ¹
Forstwirtschaft	Nordwestdeutsche Forstliche Versuchsanstalt Göttingen ¹
Landwirtschaft*	Universität Kassel, Wissenschaftliches Zentrum für Umweltsystemforschung ¹
Landwirtschaftlicher Zusatzwasserbedarf	HLUG Wiesbaden, Dezernat W4 ¹
Weinbau	Forschungsanstalt Geisenheim, Fachgebiet Weinbau ¹
Obstbau	Forschungsanstalt Geisenheim, Fachgebiet Obstbau ¹
CO ₂ -Speicherung im tiefen Untergrund	HLUG Wiesbaden, Dezernat G2 ²

¹ Projektpartner bereits in INKLIM 2012 II ² neuer Projektpartner * direkte thematische Fortsetzung des Vorgängerprojekts

Hinweise

Internetseiten des Fachzentrums Klimawandel Hessen:
<http://klimawandel.hlug.de/>

Alle Berichte von INKLIM 2012 II plus finden Sie unter:

- > Forschungsprojekte > INKLIM 2012 Baustein II plus
- > Berichte

Der Klimaschutz-Monitor enthält Informationen zur Klimaschutzpolitik (z. B. Abkommen, Forschung, Emissionen):

- > Klimaschutz-Monitor

Impressum

Hessisches Landesamt für Umwelt und Geologie
Fachzentrum Klimawandel Hessen
Rheingaustraße 186, 65203 Wiesbaden
Telefon: 0611/6939-291, Telefax: 0611/6939-282
E-Mail: fachzentrum.klimawandel@hlug.hessen.de

Bearbeiter:
Dr. Cornelia Fooker
Julia Tüshaus

Stand: Februar 2010

