Ulrich Matthes, Ana Cátia Vasconcelos, Werner Konold, Gayane Grigoryan, Markus Casper, Tilmann Sauer, Ernst-Dieter Spies, Gregor Tintrup, Matthias Trapp, Jörn Buse, Eva Maria Griebeler, Alfred Seitz, Clementine Kraus, Michael Bücking

Klima- und Landschaftswandel in Rheinland-Pfalz

Projekt zur Vulnerabilitätsanalyse und zur Entwicklung landesspezifischer Strategien zur Anpassung

Folgen des Klimawandels betreffen sämtliche Umweltsektoren und alle Formen der Landnutzung, wobei die Auswirkungen regional unterschiedlich und spezifisch sein werden. Welche Effekte, Risiken und Chancen der Klimawandel in Rheinland-Pfalz haben kann und welche möglichen Anpassungsoptionen daraus ableitbar sind, wird im Rahmen des Projektes Klima- und Landschaftswandel in Rheinland-Pfalz (KlimLandRP) untersucht. Für flächendeckende Aussagen und ein zukunftsorientiertes Landschaftsmanagement wird ein integrativer Projektansatz mit fünf Modulen verfolgt: Die Grundlagenmodule Wasser und Boden befassen sich u. a. mit Fragen zu Wasserhaushalt, Fließgewässerbiozönosen, Humushaushalt und Erosionsgefährdung. Die Landnutzungsmodule Wald und Landwirtschaft widmen sich Standortveränderungen und Anpassungspotenzialen von Baumarten und landwirtschaftlichen Kulturen, einschließlich des Einflusses abiotischer und biotischer Faktoren. Das Querschnittsmodul Biodiversität fokussiert auf den Einfluss des Klimawandels auf Arten und ihre Lebensräume.
Der Betrachtungszeitraum des Projektes ist bis 2100. Inhaltlich setzen alle Module an der aktuellen Klimasituation und bereits existierenden Effekten an. Vor dem Hintergrund regionalisierter Klimaprojektionen und mit Hilfe von Szenarioanalysen sowie Simulationsmodellen werden aktuelle und zukünftige vulnerable Räume identifiziert und mögliche künftige Entwicklungen aufgezeigt. Ziel ist es, für das Land Rheinland-Pfalz die Bandbreite möglicher klimabedingter Entwicklungen abzuschätzen und deren Folgen für relevante Umweltsektoren und die Landnutzung sowie Biodiversität aufzuzeigen. Im Dialog mit Stakeholdern sollen daraus landesweite und regionalspezifische Anpassungsoptionen an den Klimawandel abgeleitet werden.

Stichworte: Klimaprojektionen, Landnutzungsszenarien, Simulationsmodelle, Regionalstudie, Rheinland-Pfalz, Landschaftsmanagement, Stakeholderanalyse

Climate and landscape change in Rhineland-Palatinate – a project for vulnerability analysis and development of regional adaptation strategies

Consequences of climate change concern all environmental fields and all land use types, whereby the effects on the regional level will be different and specific. Which effects, risks and chances climate change can have in Rhineland-Palatinate and which possible adaptation options can be developed, will be examined in the project Climate and Landscape Change in Rhineland-Palatinate ("KlimLandRP").
In order to place area-wide statements for a future-oriented landscape management, an integrative project approach with five modules is applied: The basic modules water and soil deal with questions of water balance, stream water flows biocoenosis, erosion and humus balance. The land use modules forest and agriculture deal with site shifting and adaptation potentials of tree species and cultures, including the influence of abiotic and biotic factors and thereby identified conflict areas. The transverse module biodiversity focuses on the influence of climate change in terms of species and habitats, as well as area shifting and their influencing factors.
The period under consideration is until 2100. All modules have as reference the actual climate situation and present evidences. According to different regional climate projections, through simulation models and scenario analysis, actual and future vulnerable areas will be identified, which will lead to possible management options. The research should lead to national as well as regional-specific statements.
The aim is to estimate the range of possible climate change development and its effect on relevant environmental fields, land use and biodiversity in Rhineland-Palatinate. Consequently, in dialog with stakeholders flexible adaptation options in response to climate change should be derived.

Keywords: Climate projections, land use scenarios, simulation models, regional study, Rhineland-Palatinate, landscape management, stakeholder analysis

1 Einleitung, Problemstellung, Zielsetzung

Der Klimawandel und die Anpassung daran werden wichtige Herausforderungen des 21. Jahrhunderts sein (vgl. Umweltbundesamt 2007 und 2008). Höhere Durchschnittstemperaturen, häufigere Extremwetterereignisse und Naturphänomene wie früher beginnende und längere Vegetationszeiten sind Indizien für bereits eingetretene klimatische Veränderungen – auch in Rheinland-Pfalz. Daher kommt regionalspezifischen Untersuchungen zu den Folgen des Klimawandels in Deutschland eine bedeutende Rolle zu (vgl. hierzu beispielsweise Bayerisches Landesamt für Umwelt, 2008, Bundesministerium für Bildung und Forschung, 2007, Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung, 2006, Kommission der Europäischen Gemeinschaften, 2007, Ministerium für Umwelt und Naturschutz, Landwirtschaft und Verbraucherschutz des Landes Nordrhein-Westfalen, 2009). Welche Wirkungen klimatische Veränderungen für Umwelt und Landnutzung haben können, welche Risiken, eventuell aber auch Chancen sich ergeben und welche Anpassungsoptionen dem Klimawandel in einem zukunftsorientierten Landschaftsmanagement entgegengesetzt werden sollten, widmet sich in Rheinland-Pfalz das landesspezifische Projekt Klima- und Landschaftswandel in Rheinland-Pfalz („KlimLandRP").

Indizien für den globalen Klimawandel zeigen sich in Rheinland-Pfalz in der unbelebten als auch belebten Natur (Henniges et al. 2004). Der Klimabericht Rheinland-Pfalz 2007 (Ministerium für Umwelt, Forsten und Verbraucherschutz Rheinland-Pfalz, 2007) hat hierzu zahlreiche Fakten geliefert. So hat sich die Jahresdurchschnittstemperatur zwischen 1901 bis 2008 um 1,1 °C erhöht. Vor allem die Winter sind je nach Region um bis zu 2,0 °C wärmer geworden, was bereits auf erhebliche Veränderungen der Umweltbedingungen hindeutet.

Westwindwetterlagen sind in den letzten 50 Jahren tendenziell häufiger geworden, verbunden mit einer Erhöhung der mittleren Niederschläge im Winter, insbesondere in den Mittelgebirgslagen Eifel, Hunsrück und Pfälzerwald. Im Sommer dagegen sind die Niederschläge im selben Zeitraum in den meisten Naturräumen zurückgegangen. Bei aller Unsicherheit über das künftige Ausmaß der Veränderungen der Temperatur und des regionalen Niederschlags werden sich die beobachteten Trends nach den vorliegenden regionalisierten Klimaprojektionen auch künftig fortsetzen. Generell erscheint es angebracht, sich auf häufigere Extremwetterereignisse wie zum Beispiel stärkere und länger anhaltende Hitzeperioden einzustellen.

Im biotischen Bereich lässt sich die erwartete klimabedingte Zuwanderung von Arten aus südlichen Verbreitungsräumen bereits nachweisen, z. B. bei klimasensitiven Libellenarten. Arealerweiterungen und Populationszunahmen sind auch bei Wärme liebenden Vogelarten wie dem Bienenfresser feststellbar. Im Wald haben die sturmbedingten Schadholzmengen zugenommen, wie die Holzeinschlagsstatistiken der letzten Jahre belegen. Häufigere warm-trockene Vegetationsperioden in den letzten 15 Jahren haben bei Waldbäumen Stresssituationen bewirkt, die z. B. bei der Baumart Gemeine Fichte zu erhöhtem Borkenkäferbefall geführt haben.

An unvermeidbare Folgen des Klimawandels wird es spezifische Anpassungen (Adaption) geben müssen. Voraussetzung dafür sind Kenntnisse über die Vulnerabilität in den verschiedenen Umweltbereichen. Auch dafür hat der Klimabericht Rheinland-Pfalz 2007 (Ministerium für Umwelt, Forsten und Verbraucherschutz Rheinland-Pfalz, 2007) erste Fakten und Vorarbeiten geliefert. Er hat aber auch Fragen formuliert und den regional- und sektorenspezifischen Forschungsbedarf skizziert. Einige Beispiele sollen die Zusammenhänge verdeutlichen: In der Landwirtschaft wird ein steigender Beregnungsbedarf gesehen; gerechnet wird auch mit vermehrten Trockenschäden und dem häufigeren Auftreten von Pflanzenkrankheiten und Schädlingen in Land- und Forstwirtschaft. Bereits heute sind Ertragseinbußen infolge zu hoher Temperaturen und eingeschränkter Wasserversorgung festzustellen. Beobachtet wird auch schon das vermehrte Auftreten von Schaderregern (Mäuseplage 2007; im Wald verstärkter Befall u. a. durch Schwammspinner und Eichenprozessionsspinner). Im Bereich Naturschutz werden Veränderungen des Artenspektrums und Arealverschiebungen erwartet. Es sind also vorsorgende, auf Risikominimierung abzielende Planungen gefordert, die über erkennbare Veränderungen und ihre Implikationen informieren (ZEBISCH et al. 2005).

Vor diesem Hintergrund ergibt sich in den einzelnen Umweltsektoren eine Vielzahl von Forschungsfragen. In der Land- und Wasserwirtschaft ist z. B. die klimasensitive Beregnungssteuerung ein zentrales Thema. Die Landwirtschaft erwartet außerdem Erkenntnisse zu geeigneten Fruchtarten und Sorten sowie zu klimaangepassten Düngestrategien. Im Weinbau stellt sich die Frage, welche Rebsorten auf welchen Standorten künftig geeignet sein werden und wie die Typizität der rheinland-pfälzischen Weine erhalten werden kann. Die Forstwirtschaft muss sich u. a. mit der Frage befassen, wie sich der Wasserhaushalt von Waldstandorten verändern könnte und welche Baumarten folglich auf welchen Standorten geeignet sein werden. Bezogen auf den Arten- und Biotopschutz ist noch zu wenig über die Abläufe und funktionellen Zusammenhänge innerhalb von Populationen und Lebensgemeinschaften bekannt: Werden sich wärmetolerante Lebensräume nach Norden und in die Höhe ausbreiten und welche dynamischen Veränderungen von Lebensräumen und daran gebundenen Lebensgemeinschaften sind zu erwarten?

Der Klimawandel wirkt vor allem in der Fläche und betrifft Umweltsektoren (u. a. Boden, Wasser) und Bereiche der Landnutzung (Land- und Forstwirtschaft, Weinbau), wobei die Effekte regional unterschiedlich und spezifisch sein werden (Klimabericht Rheinland-Pfalz, 2007, a. a. O.). Angestrebt ist ein zukunftsorientiertes Landschaftsmanagement, das Schutz und Nutzung unter dem Gesichtspunkt des Klimawandels integriert. Insofern müssen zunächst möglichst repräsentative und belastbare Erkenntnisse erarbeitet werden, um durch flexible Anpassungsoptionen die Unsicherheit bzw. das Risiko zu verkleinern.

Mit Blick darauf verfolgt das Projekt folgende Ziele:

- Überblick über die aktuelle Klimaentwicklung und bereits vorhandene Beobachtungen/Erkenntnisse verschaffen
- Regionale Klimaprojektionen analysieren und aufbereiten
- Erkenntnisse über zukünftig zu erwartende Folgen und Wirkungen des Klimawandels in den einzelnen Umweltsektoren bzw. Landnutzungsbereichen gewinnen
- Risiken und Chancen des Klimawandels abschätzen
- Ausgewählte bzw. exemplarische Anpassungsoptionen erarbeiten und insbesondere für die Politikberatung Entscheidungskorridore für Anpassungsoptionen aufzeigen
- Weitergehende wissenschaftliche Fragestellungen und weiteren Forschungsbedarf formulieren
- Bestehende Umweltmonitoringsysteme weiter entwickeln

2 Projektstruktur

Die Projektstruktur zeichnet sich durch einen interdisziplinären modularen Aufbau aus (Abbildung 1), transdisziplinär erweitert durch eine integrierende Stakeholderanalyse.

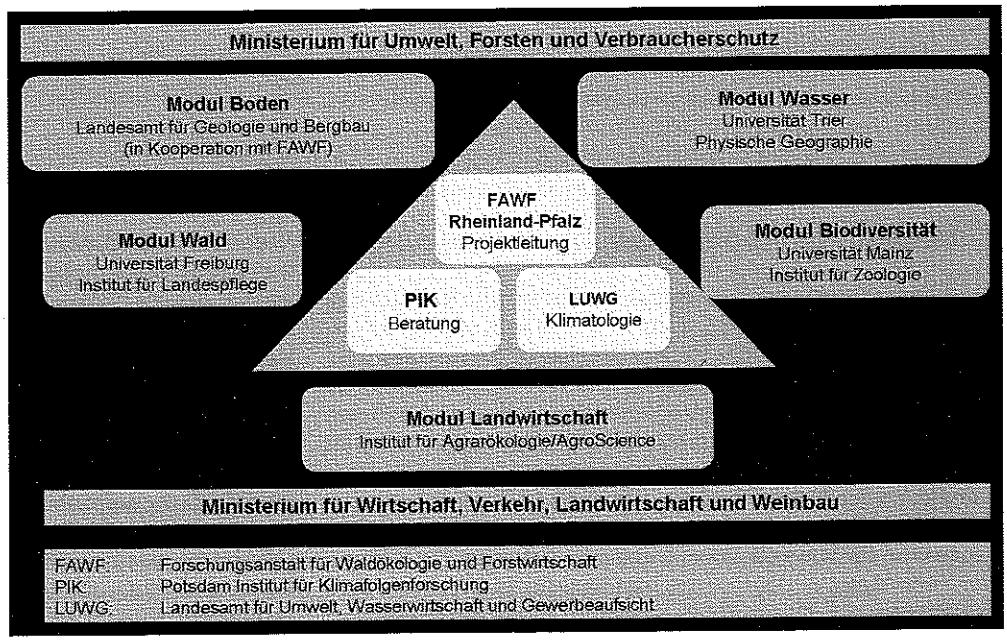

Abbildung 1: *Thematische Module und Projektpartner*

Figure 1: *Thematic moduls and project partners*

Es erscheint zielführend, den skizzierten Projektansatz und die Zielsetzungen auf der Basis von 5 Modulen zu verfolgen: für die Waldlandschaft das Modul Wald; für die Flächennutzung im Offenland (Landwirtschaft/Weinbau) das Modul Landwirtschaft; für den Arten-/Naturschutz das Modul Biodiversität; für die landschaftsbezogene Wasserhaushaltsmodellierung das Modul Wasser und für klimabedingte Veränderungen des Bodens/Standorts das Modul Boden. Die benötigten regionalen Klimaprojektionen werden durch das Landesamt für Umwelt, Wasserwirtschaft und Gewerbeaufsicht (LUWG) bereitgestellt. Das Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung (PIK) steht dem Projekt als Kooperationspartner beratend zur Seite. Die zu betrachtenden Zeithorizonte sind bis 2050 und bis 2100.

3 Modul Wasser

3.1 Einführung

Die für Rheinland-Pfalz erwartete Zunahme der Jahresmitteltemperatur und die Änderung in der zeitlichen und räumlichen Verteilung der Niederschläge (z. B. Umweltbundesamt, 2007) werden sich unmittelbar auf den Wasserkreislauf auswirken. Je nach Region sind deshalb geeignete Anpassungsstrategien im Bereich der Oberflächenwassernutzung, der Grundwassernutzung, der landwirtschaftlichen Nutzung und des vorbeugenden Hochwasserschutzes gefordert (Ministerium für Umwelt, Forsten und Verbraucherschutz Rheinland-Pfalz, 2007).

Für Rheinland-Pfalz liegen bereits einige Untersuchungen zu den Auswirkungen des Klimawandels auf den Wasserhaushalt vor. Von BELZ et al. (2007) durchgeführte Bruchpunktanalysen bei Hochwasserabflüssen zeigen für ausgewählte Pegel in Rheinland-Pfalz ebenso wie bei HENRICHS et al. (2005) Sprünge Mitte der siebziger Jahre auf, welche mit dem vermehrten Auftreten von zyklonalen Westwetterlagen begründet werden. Die Trendanalysen für das Niedrigwasser zeigen für die Rhein-Pegel im Winterhalbjahr und im Gesamtjahr einen positiven signifikanten Trend auf dem 80 %-Niveau. Für den Pegel Trier/Mosel ergibt sich für das Niedrigwasser ein signifikanter negativer Trend auf dem 95 %-Niveau, mit einem Sprung Anfang der vierziger Jahre. In den Szenariensimulationen von SCHWANDT (2003) wird als zukünftige Entwicklung des Wasserhaushalts am Mosel-Pegel Cochem eine Zunahme der mittleren Abflüsse vorhergesagt. Für den Pegel Grolsheim/Nahe zeigen die Szenarienberechnungen von MENZEL et al. (2001) deutliche Zunahmen der mittleren Abflüsse im Winter. Die bisher vorliegenden Untersuchungen sind auf Einzelaspekte bezogen und zum Teil auf Grundlage von veralteten globalen Szenarien berechnet, so dass weitere Untersuchungen unabdingbar sind.

3.2 Ziele/Fragestellungen

Als eines der Grundlagenmodule hat das Modul Wasser zum Ziel, die Auswirkung der Klimaänderung auf den Wasserhaushalt und auf ausgewählte Aspekte der Wasserqualität in Rheinland-Pfalz zu untersuchen und den Projektpartnern die entsprechenden Ergebnisse zur Verfügung zu stellen.

Die Untersuchungen werden zum Einen auf der Landesebene und zum Anderen auf der Meso- und Mikroskala durchgeführt. Zunächst wird analysiert, in welchen Regionen der Wasserhaushalt bereits heute kritisch ist. Danach wird geprüft, wie sich die Klimaänderung auf dessen raumzeitliche Verteilung auswirken kann. Analog zum Wasserhaushalt werden diese Fragen für den Nitrat- und Phosphateintrag in die Gewässer beantwortet. Die Ergebnisse sind die Grundlage für die landesweite GIS-basierte Abgrenzung von kritischen Räumen hinsichtlich Wasserhaushalt und die Gewässergüte bestimmende Stoffeinträge. Mesoskalige Simulationen für diese Regionen werden bezüglich der räumlichen und zeitlichen Veränderung von Niedrigwasserführung, Hochwasserhäufigkeit und flächenhafter Grundwasserneubildung im Einzugsgebiet ausgewertet. Von zentraler Bedeutung ist dabei die Frage, wie sich sommerliche Extremereignisse auf das Abflussverhalten an ausgesuchten Pegeln auswirken werden. Ein weiterer Schwerpunkt der Arbeiten liegt auf der mikroskaligen Wasserhaushaltssimulation auf der Plot-, Hang- und Einzugsgebietsskala mit dem Ziel der Einbindung der Fragestellungen aus den Modulen Boden, Wald und Offenlandnutzung (Bodeneigenschaften, Waldzusammensetzung, Bewirtschaftungsformen).

Aus den Ergebnissen der Wasserhaushaltssimulationen werden Abschätzungen für die Veränderungen der Gewässergüte getroffen. Hier interessiert vor allem die Frage, ob und inwiefern eine veränderte Wasserführung eine Verschiebung im Temperaturregime, der Schadstoffkonzentrationen und des Sedimenthaushalts des Gewässers erwarten lässt.

Auf der Basis der im Projekt KlimLandRP erzielten Erkenntnisse werden wasserwirtschaftliche und zusammen mit den Modulen Landwirtschaft und Biodiversität gewässerökologische Anpassungsoptionen an den Klimawandel vorgeschlagen, mit einem Schwerpunkt auf der räumlichen Zuordnung der jeweils mit den Optionen verbundenen Maßnahmen.

3.3 Methodischer Ansatz

Für eine erste landesweite Übersicht wird das Modell STOFFBILANZ (GEBEL et al. 2005) parametrisiert, welches den flächenhaften Nitrat-, Phosphor- und Sedimenteintrag in die Gewässer überschlägig berechnet. Die Nährstoffbilanzierung in den Teileinzugsgebieten erfolgt durch die Berücksichtigung von punktuellen und diffusen Einträgen sowie Stoffrückhaltung (Retention) entlang der Fließwege. Auf der Basis aktueller Messdaten können Teilgebiete identifiziert werden, welche im Hinblick auf ihren Wasserhaushalt und auf die Wasserqualität bereits heute kritisch sind. Als Grundlage hierfür ist in Abbildung 2 der mittlere jährliche Gesamtabfluss flächendeckend für Rheinland-Pfalz modelliert. Anhand von unterschiedlichen Landschafts- und Klimaprojektionen kann dann in einem zweiten Schritt eine Bandbreite an Reaktionen für die Zukunft abgeschätzt werden. Als Klima-Antrieb werden WETTREG-Projektionen bis zum Jahr 2100 hinzugezogen.

Um die Wirkung des Klimawandels auf den Wasserhaushalt von Waldstandorten quantifizieren und in der Forsteinrichtungsplanung berücksichtigen zu können, wurde ein Ansatz entwickelt, der es erlaubt, den Einfluss des Klimas bei der Bestimmung der Wasserhaushaltsstufe in der forstlichen Standortkartierung direkt zu integrieren (s. a. Modul Wald). Dabei wird der Zusammenhang zwischen der Wüchsigkeit und den Klimaparametern Temperatur und Niederschlag untersucht. Gezielte Standortsimulationen mit dem Wasserhaushaltsmodell WaSiM-ETH (SCHULLA, JASPER 2007) liefern die Reaktionsbandbreite für einen Standardbestand (zunächst 100-jährige Buche, später auch Fichte als Referenz). Als Klima-Antrieb dienen die Messwerte der rheinland-pfälzischen bzw. an Rheinland-Pfalz angrenzenden DWD-Stationen (Referenzperiode) und die entsprechenden WETTREG-Projektionen bis zum Jahr 2100.

Des Weiteren wird für das Nahe-Einzugsgebiet untersucht, inwiefern sich zukünftige klimatische Extremereignisse auf den Wasserkreislauf auswirken. Dazu wird das Wasserhaushaltsmodell LARSIM (BREMICKER 2000; LUDWIG, BREMICKER 2007) angewendet, welches mit Projektionen des regionalen Klimamodells COSMO-CLM (CCLM) für den Zeitraum 2015 bis 2024 angetrieben wird.

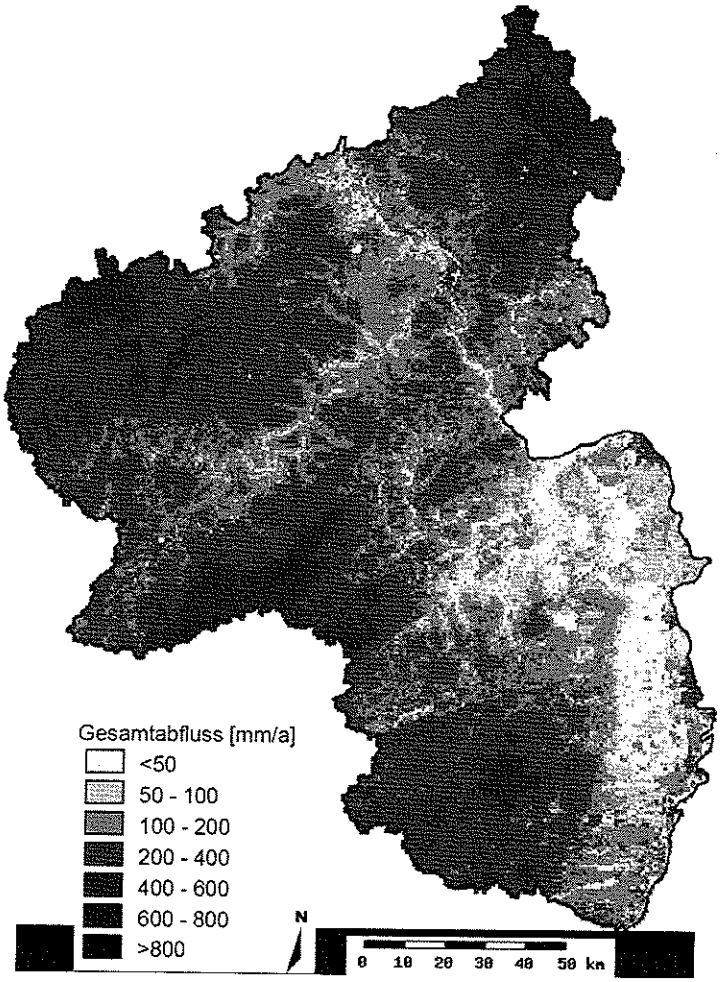

Abbildung 2: *Mittlerer jährlicher Gesamtabfluss für Rheinland-Pfalz (nach STOFFBILANZ-Modell)*

Figure 2: *Average annual total runoff for Rhineland-Palatinate (model STOFFBILANZ)*

Die Vorgaben der Europäischen Wasserrahmenrichtlinie sehen eine integrierte Betrachtung von Fliessgewässern und ihren Einzugsgebieten sowie der zeitlichen Dynamik der auf die Biozönose wirkenden Einflussfaktoren vor (Europäische Union 2000). Dazu benötigte zeitlich und räumlich hoch aufgelöste Daten liegen in Rheinland-Pfalz nur für wenige Fließgewässer vor. Dies gilt noch mehr für Sedimente, die für den Stoffumsatz und als Lebensraum für Organismen eine unverzichtbare Rolle spielen. Auf der Basis u. a. der Bevölkerungsdichte, der Landnutzung, der Siedlungsstruktur, der anthropogenen Beeinflussung des Wasserhaushaltes, der hydromorphologischen Struktur und Daten zur Gewässergüte werden daher potenzielle Belastungsfaktoren in ausgewählten Einzugsgebieten ermittelt (s. LEIBUNDGUT, EISELE 2005).

Das Modul Wasser arbeitet in Synergie mit dem KLIWA-Kooperationsvorhaben (KLIWA – Klimaveränderung und Konsequenzen für die Wasserwirtschaft) der Länder Baden-Württemberg, Bayern und Rheinland-Pfalz (s. KLIWA, 2006; URL: http://www.kliwa.de). Im Rahmen von KLIWA werden zurzeit flächendeckend möglichst einheitliche Wasserhaushaltsmodelle aufgestellt, die eine vergleichende Bewertung in den beteiligten Ländern erlauben soll. Für Rheinland-Pfalz wird von KLIWA dazu ein entsprechendes Grundwassermodell aufgebaut, das es erlauben soll, den Einfluss des Klimawandels auf die Grundwasserneubildung besser abzuschätzen (Ministerium für Umwelt, Forsten und Verbraucherschutz Rheinland-Pfalz 2007).

3.4 Erwartete Ergebnisse

Das Modul Wasser will folgende Ergebnisse liefern:

- Benennung und Abgrenzung von vulnerablen Räumen im Hinblick auf die Wasserwirtschaft und auf die Gewässergüte
- Zukünftige Hochwassergefährdung durch sommerliche Extremniederschläge (konvektive Ereignisse) auf der Basis raum-zeitlich hochaufgelöster Klimaprojektionen für ausgewählte Einzugsgebiete für die Dekade 2015 bis 2024
- Ermittlung klimasensitiver Wasserhaushaltsstufen für die forstliche Standortkartierung
- Ableitung räumlich differenzierter wasserwirtschaftlicher und zusammen mit den Modulen Landwirtschaft und Biodiversität gewässerökologischer Anpassungsoptionen an den Klimawandel

4 Modul Boden

4.1 Einführung

Der Boden ist ein Hauptbestandteil terrestrischer Ökosysteme und erfüllt wichtige Funktionen für Mensch und Umwelt. Das Klima beeinflusst als bodenbildender Faktor langfristig nicht nur die Bodengenese, sondern zu jeder Zeit auch die Bodenfunktionen. Klimaänderungen wirken sich auf den Wasserhaushalt, den Stofftransport und den Stoffumsatz in Böden aus, wodurch alle natürlichen Bodenfunktionen betroffen sind.

Der prognostizierte Klimawandel wird voraussichtlich zu einer differenzierten Veränderung der Standortbedingungen in Rheinland-Pfalz führen, die von der regionalen Ausprägung des zukünftig zu erwartenden Niederschlags- und Temperaturregimes, von Relief, Bodeneigenschaften und der Landnutzung abhängen wird (BYRNE et al. 2004; FREIBAUER, SCHRUMPF 2005; WEIGEL et al. 2005; BELLAMY et al. 2005; JANSSENS et al. 2005; Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft 2007).

4.2 Ziele/Fragestellungen

Aus der Kernfrage nach den Auswirkungen des Klimawandels auf die Böden und deren Funktionen im Wald, auf landwirtschaftlich genutzten Flächen sowie auf Brachen leiten sich die Forschungsfragen ab, die sich in den drei Arbeitsschwerpunkten des Moduls Boden widerspiegeln: Welche Auswirkungen hat der Klimawandel auf die Erosionsgefährdung, den Bodenwasserhaushaltes und den Humushaushalt?

Im Vordergrund der bodenkundlichen Arbeiten steht eine landesweite Betrachtung, um mittels Berechnung von Szenarien, aufbauend auf Klimaprojektionen (Umweltbundesamt 2007, 2008; Ministerium für Umwelt, Forsten und Verbraucherschutz Rheinland-Pfalz 2007) Räume zu identifizieren, die besonders sensibel auf den Klimawandel reagieren. Für diese Regionen (vgl. auch ECKELMANN et al. 2006) müssen Maßnahmenkonzepte und Anpassungsstrategien zum Bodenschutz und zur Bodennutzung entwickelt werden.

4.3 Methoden

Neben der Auswertung der Fachliteratur bilden Bodenflächendaten (BFD) auf verschiedenen Maßstabsebenen die Arbeitsgrundlage. Für landesweite Berechnungen stehen die Bodenübersichtkarte 1 : 200 000 (BFD 200) und die Bodenflächendaten 1 : 50 000 (BFD 50) (Ministerium für Umwelt und Forsten 2005) zur Verfügung. Für großmaßstäbige Untersuchungen kann

auf die Auswertung von Bodenschätzungsdaten im Maßstab 1:5 000 (BFD 5L) (Hessisches Landesamt für Umwelt und Geologie, Landesamt für Geologie und Bergbau 2008) und die Weinbergsbodenkate (BFD 5W) (Landesamt für Geologie und Bergbau 2005) zurückgegriffen werden.

Des Weiteren sind die Ergebnisse aus dem mehr als einhundert Jahre währenden Dauerfeldversuchswesen eine wertvolle Datenbasis für die Interpretation der Bodenhumus- und Nährstoffvorräte und ihrer Dynamik. Ebenso wichtig ist die landesweite Erschließung von bodenkundlichen Punktdaten. Dazu gehören Nährstoffuntersuchungen aus der Agrar- und Weinbauverwaltung, Daten der Bodenzustandserhebung und des Bodenmonitorings, wie Dauerfeldversuche, Bodendauerbeobachtung (BDF), Bodenzustandserhebung Wald (BZE I und BZE II), und das forstliche Umweltmonitoring.

Aus den Bodenflächendaten der verschiedenen Maßstabsebenen werden unter Berücksichtigung der aktuellen Landnutzung Bodenfunktionen abgeleitet. Ein besonderer Schwerpunkt liegt dabei auf Wasserhaushaltsparametern und der organischen Substanz. Die abgeleiteten Bodenfunktionskarten dienen zum einen als Datengrundlage für die Arbeiten der anderen Module, zum anderen werden aus den Karten durch Verschneidung in einem geographischen Informationssystem (GIS) Grundlagen für die Identifizierung vulnerabler Räume in Rheinland-Pfalz erarbeitet. Als Ergebnis soll auf verschiedenen Maßstabsebenen für die einzelnen Landnutzungen ein Index für die Anfälligkeit der Böden für ein verändertes Klima bereitgestellt werden.

In Rheinland-Pfalz liegen – wie in den meisten Bundesländern – für landesweite Betrachtungen die für physikalisch begründete Erosionsmodelle geforderten bodenkundlichen Eingangsdaten (z. B. Oberflächenrauigkeit) nicht vor. Es kann also auf dieser räumlichen Ebene nur mit Modellen gearbeitet werden, deren Eingangsdaten kurzfristig und digital zur Verfügung stehen. Aus diesem Grund wird auf den empirisch-mathematischen Ansatz der Allgemeinen Bodenabtragsgleichung (ABAG, s. u.) (SCHWERTMANN et al. 1987) zurückgegriffen, der aber um einen modifizierten Relieffaktor zu ergänzen ist. Der Ansatz wird auch im Modell STOFFBILANZ verwendet, welches zusammen mit den Modulen Wasser und Landwirtschaft für die Erarbeitung von landesweiten Aussagen eingesetzt wird. Die Formel der ABAG lautet:

$$A = R \cdot K \cdot L \cdot S \cdot C \cdot P$$

- A langjähriger, mittlerer jährlicher Bodenabtrag als zu errechnende Größe
- R Regen- und Oberflächenabflussfaktor
- K Bodenerodierbarkeitsfaktor
- L Hanglängenfaktor
- S Hangneigungsfaktor
- C Bedeckungs- und Bearbeitungsfaktor
- P Erosionsschutzfaktor

Mindestens zwei Faktoren der ABAG sind klimaabhängig: Der R-Faktor wird aus der kinetischen Energie des Niederschlags in kJ m^{-2}, aus der Intensität des Niederschlags in mm h^{-1} und der Höhe des Niederschlags in mm berechnet. Durch den Vergleich der heutigen Erosionsgefährdung (1960 bis 2000, Status quo), dem Produkt aus R-, K- L- und S-Faktor, mit der prognostizierten Erosionsgefährdung (Neuberechnung des R-Faktors auf Grundlage von Klimaprojektionen) kann die Entwicklung des potenziellen Erosionsrisikos flächendeckend für Rheinland-Pfalz abgeschätzt werden. Dabei muss allerdings berücksichtigt werden, dass die Klimaprojektionen bei der Betrachtung der Veränderungen bei Extremniederschlägen nur begrenzt aussagefähig sind. Als Ergebnis können Landschaftsräume identifiziert werden, in denen die Erosionsgefährdung infolge des Klimawandels überproportional ansteigt. Für diese vulnerablen Gebiete müssen in Abhängigkeit von den Standorteigenschaften und zu definierenden Nutzungsszenarien Optionen für Gegenmaßnahmen erarbeitet werden.

Will man über die potenzielle Erosionsgefährdung hinaus Aussagen treffen, so muss der C-Faktor berücksichtigt werden, da sich infolge des Klimawandels auch die Vegetationszeit ändern wird. Mit der möglichen Verlängerung der Hauptwachstumsperiode werden sich auch die Bodenbedeckungsgrade unterschiedlicher Fruchtarten, die Kulturpflanzenwahl, Saat- und Erntetermine sowie Bodenbearbeitungssysteme potenziell ändern. Das hat Folgen für die Höhe des Bodenabtrags, aber auch für potenzielle Offsite-Schäden und die Gewässereutrophierung durch Eintrag partikulär gebundenen Phosphors. Hier erfolgt eine enge Zusammenarbeit mit dem Modul Wasser. Während in diesem ersten Arbeitsschritt landesweite Aussagen getroffen werden, sind in einem zweiten Arbeitsschritt in klima-relevanten Landschaftsausschnitten Detailuntersuchungen auf Basis unterschiedlicher Landnutzungsszenarien mit physikalisch begründeten Erosionsmodellen vorgesehen.

Die im „Klimabericht Rheinland-Pfalz 2007" (Ministerium für Umwelt, Forsten und Verbraucherschutz Rheinland-Pfalz 2007) prognostizierte Veränderung des Niederschlag- und Temperaturregimes wird sowohl für die landwirtschaftliche als auch für die forstwirtschaftliche Bodennutzung Änderungen des lokalen Bodenwasserhaushaltes hervorrufen. Da das Bodenwasser die Steuerungsgröße für zentrale Bodenfunktionen (z. B. Standort für die landwirtschaftliche und forstliche Nutzung, Lebensraum für Tiere, Regelungsfunktion

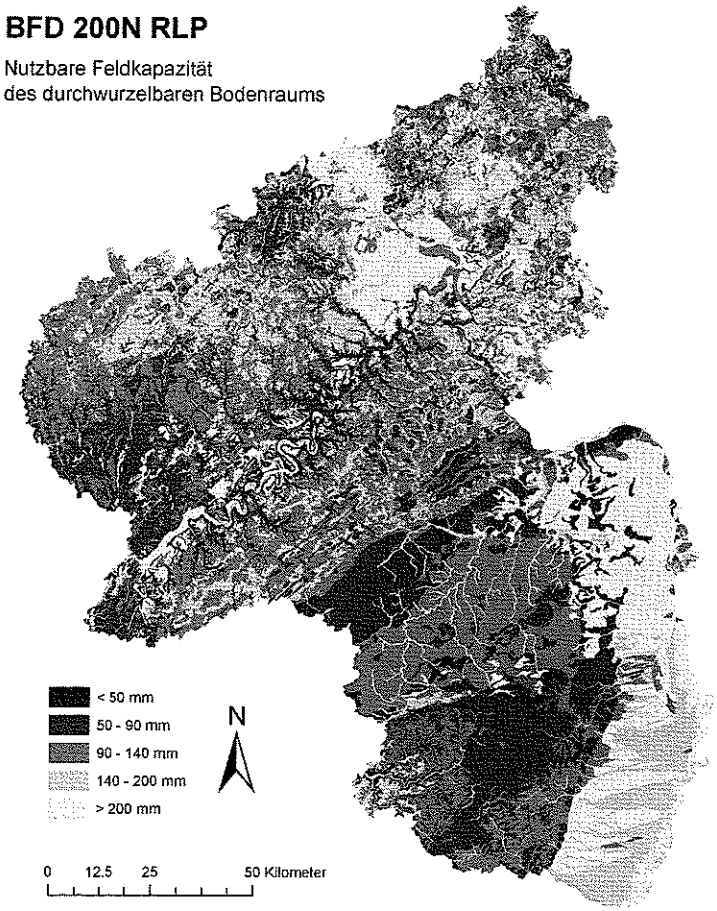

Abbildung 3: *Nutzbare Feldkapazität des durchwurzelbaren Bodenraums auf Basis der Bodenübersichtskarte 1:200 000*

Figure 3: *Plant available soil water of the potential rooting zone on basis of the soil map 1:200.000*

im Wasser- und Stoffhaushalt) ist, werden auch bei diesem Arbeitsschwerpunkt landesweite Berechnungen durchgeführt, um über den Vergleich von Status quo und Klimaprojektion Gebiete für Handlungsempfehlungen zu identifizieren. Zielgrößen sind die Sickerwasserrate und der Bodenwassergehalt. Die Sickerwasserrate trägt zur Grundwasserneubildung und zum Transport von Stoffen (z. B. Nitrat) aus der durchwurzelten Bodenzone in tiefere Schichten bei. Sie ist somit für die Bewertung des Wirkungspfads Boden – Grundwasser und von Stoffeinträgen ausgehenden Gefahren für das Grundwasser von Bedeutung.

Die Berechnung der Sickerwasserrate erfolgt in enger Zusammenarbeit mit dem Modul Wasser. Zentrale bodenkundliche Eingangsparameter sind die nutzbare Feldkapazität im Wurzelraum sowie der kapillare Aufstieg aus dem Grundwasser.

Während für das Offenland eine digitale Karte der nutzbaren Feldkapazität im Maßstab 1 : 5000 nahezu flächendeckend vorliegt, muss für die Waldflächen auf kleinmaßstäbigere Daten zurückgegriffen werden. Erste Erfahrungen mit der Ableitung großmaßstäbiger Karten der nutzbaren Feldkapazität aus der Forstlichen Standortskarte bestehen für Rheinland-Pfalz (SAUER et al. 2005). Abbildung 3 zeigt eine Karte der nutzbaren Feldkapazität des durchwurzelbaren Bodenraums, abgeleitet aus der Bodenübersichtskarte 1 : 200000. In diesem Maßstabsbereich lassen sich Regionen identifizieren, die aufgrund von Böden mit einer geringen nutzbaren Feldkapazität besonders von einer erhöhten Verdunstung und einem Rückgang der Niederschläge in den Sommermonaten betroffen sein werden.

Im Boden ist eine Änderung der Biomasse besonders schwierig zu messen, da die kleinräumige Heterogenität groß ist. Daher sind kleine Änderungen im Kohlenstoffgehalt gegenüber den vorhandenen C-Gesamtgehalten besonders schwer nachzuweisen (WELLBROCK, BOLTE 2008). Um flächenhafte Aussagen zu machen, wird der Humusvorrat auf Grundlage der Bodendaten der Leitbodenformen berechnet. Parallel dazu werden die bodenkundlichen Punktdaten erschlossen und in einer Datenbank zusammengeführt. Die Bodenzustandserhebung und das Bodenmonitoring, wie die Dauerfeldversuche, die Bodendauerbeobachtung (BDF), die Bodenzustandserhebung Wald (BZE II), das forstliche Umweltmonitoring und die Daten der Bodenschätzung sind dafür eine Datengrundlage. Daran anschließend wird die Auswertung der $C_{org.}$-Gehalte in Abhängigkeit vom Ausgangssubstrat der Bodenbildung, der Landnutzung und Klimakennwerten vorgenommen. Im Idealfall lassen sich unter Berücksichtigung der Ergebnisse der Literaturstudie erste Trends zur Entwicklung der Humusgehalte ableiten.

4.4 Erwartete Ergebnisse

Folgende Ergebnisse sollen im Modul erarbeitet werden:

- Bodenfunktionskarten auf verschiedenen Maßstabsebenen
- Ausweisung vulnerabler Räume für Anpassungsmaßnahmen in Rheinland-Pfalz durch Analyse und Verschneidung der Bodenfunktionskarten mit Landnutzungsdaten, aktuellen Klimadaten und Klimaprojektionen
- Entwicklung des potenziellen Erosionsrisikos und Identifizierung von Konfliktträumen flächendeckend für Rheinland-Pfalz
- Simulation und Visualisierung von Veränderungen im Bodenwasserhaushalt mit den Modellen STOFFBILANZ und dem Bodenwasserhaushaltsmodell WaSimETH
- Berechnungen der landesweiten Kohlenstoffvorräte
- Abschätzung der Auswirkungen des Klimawandels auf die Humusbilanz durch Auswertung von Punktdaten sowie über eine Literaturstudie

5 Modul Wald

5.1 Einführung

Folgen des Klimawandels für die Forstwirtschaft sind auf verschiedenen Ebenen spürbar (vgl. PRETZSCH et al. 2002; BOLTE und IBISCH 2007; Ministerium für Umwelt, Forsten und Verbraucherschutz Rheinland-Pfalz 2007, Bundesregierung 2008: S. 30–32). Vor diesem Hintergrund lassen sich bereits heute Risikoflächen identifizieren, in denen mit höherer Wahrscheinlichkeit Schäden eintreten werden. So muss beispielsweise damit gerechnet werden, dass die Gemeine Fichte im trockenwarmen Weinbauklima ausfallen wird (KÖLLING 2007: S. 36). Auch ist bei einer Klimaerwärmung mit wesentlichen Veränderungen im Wirt-Parasit-Verhältnis der einheimischen Arten zu rechnen (SEEMANN et al. 2001).

Die waldbaulichen Entscheidungen erfolgen unter der Faktorenkombination Langfristigkeit, Entscheidungssituationen in zeitlich offenen Entscheidungsfeldern und, damit korrespondierend, Unsicherheit (vgl. RÖDER, BÜCKING 2004). Eine Anpassungsstrategie muss deshalb grundsätzlich darauf ausgerichtet sein, die Resistenz und Resilienz der Wälder zu verbessern (s. RIGLING et al. 2008).

Als methodische Instrumente stehen Waldökosystemmodelle mit der Möglichkeit von Szenarioanalysen zur Verfügung. Klimasensitive Entscheidungsunterstützungssysteme werden derzeit entwickelt (vgl. JANSEN et al. 2008; HANEWINKEL und KÄNDLER 2008). Als Daten- und Validierungsgrundlage vorgenannter Systeme sind allerdings auch Langzeituntersuchungen nach wie vor unverzichtbar.

5.2 Ziele / Fragestellungen

Auf der Basis regionaler Klimaprojektionen sollen Erkenntnisse über die zukünftig zu erwartenden Wirkungen des Klimawandels auf die rheinland-pfälzischen Wälder erarbeitet werden. Daraus kann ein Korridor möglicher Handlungsoptionen abgeleitet werden, der Vorschläge zu den Themen standortgerechte Baumartenwahl, Waldnaturschutz und Risikoverminderung gegenüber abiotischen und biotischen Schadereignissen beinhaltet. In diesem Zusammenhang ist aber nicht nur die primär naturwissenschaftliche Betrachtungsweise von Belang, sondern auch die sozial-empirische Einbindung von Stakeholdern (vgl. STOCK 2007; VASCONCELOS et al. 2008).

Folgende Fragestellungen lassen sich zusammenfassend skizzieren:

- Wie verändern sich forstliche Standorteigenschaften (v. a. Bodenwasserhaushalt)?
- Wie sehen die Ansprüche und Anpassungspotenziale von wichtigen rheinland-pfälzischen Baumarten (incl. Herkünfte) aus und welche Potenziale haben Pionierbaumarten?
- Welche Baumarten und Mischungstypen sind künftig als standortgerecht anzunehmen?
- Wie verändern sich voraussichtlich Wachstum, Vitalität und Gefährdungen von Baumarten und Waldmischungstypen?
- Wie müssen Waldentwicklungsziele angepasst werden?
- Welche Auswirkungen hat der Klimawandel auf Schutzzweck und Maßnahmen im Waldnaturschutz?

5.3 Methodischer Ansatz

Bundesweit existiert bereits eine Reihe von Untersuchungen zu den landschaftsbezogenen Veränderungen in Folge des Klimawandels, die auch eine waldbezogene Ebene abbilden (vgl. GERS-

TENGARBE et al. 2003; SUCKOW 2005; PAAR 2005; BEIERKUHNLEIN 2008) oder detailliert Waldaspekte behandeln (vgl. Bayerische Landesanstalt für Wald und Forstwirtschaft 2007; Forstliche Versuchs- und Forschungsanstalt Baden-Württemberg 2008). Dort verwendete methodische Ansätze können z. T. in adaptierter Form in diesem Modul Anwendung finden.

Ein Grundbaustein des Moduls Wald wird eine literaturgestützte Analyse der Ansprüche der (Haupt-)Baumarten an ihren Lebensraum sein, inkl. einer Auswertung von landesspezifischen Versuchsflächen. Dabei wird man sich auf möglichst repräsentative Baumarten und Waldtypen (ökologische Hauptbaumart und wichtigste Mischbaumart) konzentrieren und Synergieeffekte zu Parallelprojekten im Themenfeld Klima und Wald (z. B. ForeStClim – vgl. http://www.forestclim.eu) gezielt nutzen.

Im Mittelpunkt einer klimabedingten Veränderung von Waldstandorten steht die Bewertung des Wasserhaushalts unter künftigen Klimabedingungen mit Hilfe adaptierbarer, möglichst einfacher Wasserhaushaltsmodelle. Durch Vergleiche mit der heutigen Situation und der Variation klimabeeinflusster Modellparameter sollen standörtliche Sensitivitäten erkannt werden. Bedeutung erlangt die GIS-gestützte Klassifizierung der nutzbaren Feldkapazität mit dem Ziel einer „klimasensitiven" Objektivierung der Wasserhaushaltsansprache in der Standortkartierung (s. SCHULTZE et al. 2005; s. a. Modul Wasser in diesem Beitrag).

Die Waldbestockung kann dabei auf mehreren Ebenen betrachtet werden: Der aktuellen Ist-Bestockung nach ökologischen Hauptbaumarten wird das von der Forsteinrichtung für den nächsten Planungszeitraum definierte Waldentwicklungsziel gegenübergestellt. Aus der digitalen Verschneidung der Einzelergebnisse können bisherige Waldentwicklungsziele kritisch hinterfragt werden, mit dem Ziel, Neuausrichtungen herbeizuführen. In diesem Kontext sollen auch das Potenzial für Pionierbaumarten aufgezeigt (vgl. KÄTZEL 2008: S. 11; LEGAY et al. 2008) und die künftige Rolle der Douglasie (vgl. Bayerische Landesanstalt für Wald und Forstwirtschaft 2008) in Rheinland-Pfalz diskutiert werden.

Ein wichtiger methodischer Schritt ist eine operationale Waldlandschaftsstratifizierung (MOSHAMMER 2006: S. 1164) auf der Grundlage der Forsteinrichtungsdaten und der Landeswaldinventur von Rheinland-Pfalz. Es sind repräsentative bzw. relevante Waldtypen auszuwählen, deren mögliche Entwicklung in Abhängigkeit von unterschiedlichen Klimaprojektionen und Standortparametern exemplarisch und mit Hilfe etablierter physiologischer Wachstumsmodelle wie BALANCE in Kombination mit dem managementorientierten Waldwachstumsmodell SILVA (RÖTZER, MOSHAMMER 2008) untersucht werden soll. Dazu müssen neben einer Referenzvariante und dem vorgegebenen Waldentwicklungsziel alternative Behandlungsoptionen (RÖTZER, MOSHAMMER 2008) verglichen und ggf. iterativ angepasst werden. In Was-wäre-wenn-Betrachtungen können ferner durch normative Variation forstlich relevanter klimatischer Parameter (SCHULZ, ASCHE 2008: S. 21) und deren Projektion bis 2100 Sensitivitäten in Bezug auf Ausprägungen waldbaulicher Kenngrößen abgeschätzt werden.

In einem weiteren Schritt setzt sich das Modul kritisch mit Ansätzen zur Abbildung von Beeinflussungen der Baumartenverbreitung und -eignung im Zusammenhang mit dem Klimawandel auseinander. Gemeint sind hier in erster Linie die Ansätze „Klimahüllen" (KÖLLING 2007) unter Berücksichtigung der Methodenkritik (BOLTE et al. 2008; ZELLWEGER 2008) und die Idee der „Klima-Arten-Matrix" (ROLOFF, GRUNDMANN 2008).

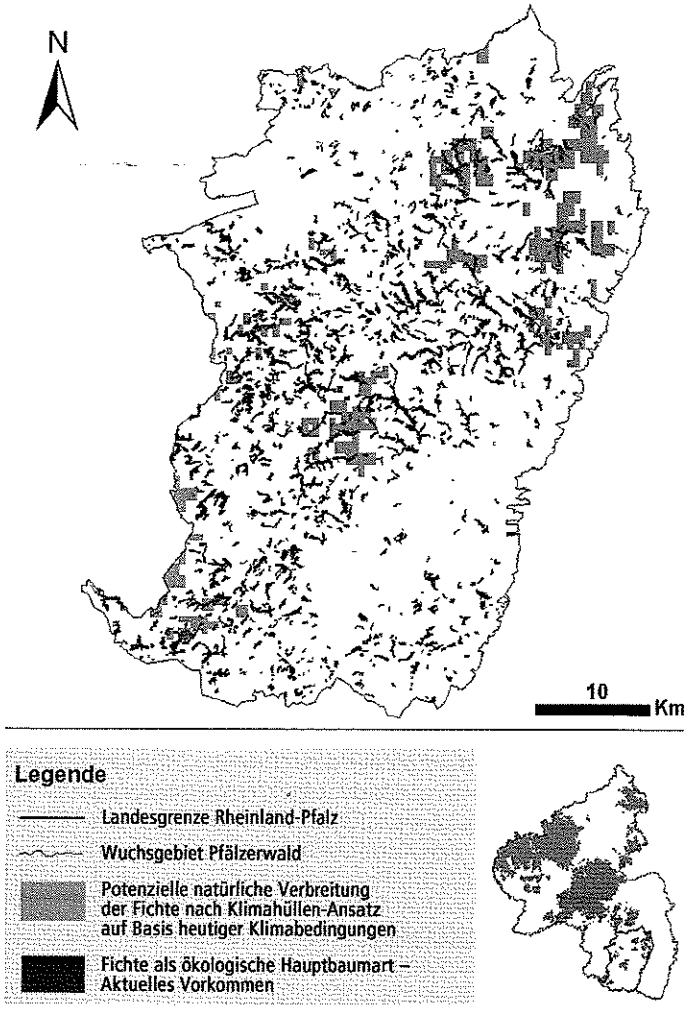

Abbildung 4: *Überlagerung der potenziell natürlichen Verbreitung der Fichte nach Ansatz „Klimahülle" aufgrund heutiger Klimabedingungen mit dem derzeitigen Vorkommen der Fichte im Pfälzerwald (Rheinland-Pfalz)*

Figure 4: *Overlay of the potential natural distribution of spruce concerning bio-climatic envelopes with the actual area of spruce in "Pfälzerwald" (Rhineland-Palatinate)*

Abbildung 4 zeigt exemplarisch für die Gemeine Fichte im Pfälzerwald die Divergenz zwischen ihrem aktuellen Areal und ihrer Klimahülle. Mit Blick auf die Methodenkritik ist daraus ableitbar, dass neben den ökologischen auch die physiologischen Potenziale (u. a. Bodenwasserhaushalt) der Baumarten abzubilden sind und zur Einschätzung der Baumarteneignung verschiedene methodische Ansätze im Hinblick auf eine multikriterielle Entscheidungsfindung in geeigneter Weise kombiniert bzw. angepasst werden müssen.

Angesichts der Komplexität von Wirt-Parasit-Beziehungen und der Lebensraumansprüche von Schadinsekten (FEEMERS et al. 2003) soll im Modul Wald exemplarisch für einzelne ausgewählte Schadinsekten die im Klimawandel mögliche Schaderregerentwicklung auf der Grundlage vorhandener Daten und Erkenntnisse qualitativ und mit gutachtlichen Aussagen abgeschätzt werden.

Für die Einschätzung des Waldbrandrisikos wird auf erprobte methodische Ansätze zurückgegriffen (z. B. DWD-Waldbrandindex M68, s. SUCKOW 2005: S. 101–103). Hinsichtlich möglicher Sturmgefährdungen liegt eine GIS-gestützte „Windfeldkarte Rheinland-Pfalz" vor (vgl. FREEDEN et al. 2005). Die Möglichkeit der Kopplung verschiedener Klimaprojektionen an dieses Tool soll im Rahmen dieses Moduls erprobt werden.

Auf der Basis unterschiedlicher Klimaprojektionen und des dadurch aufgespannten Fächers von Klimaentwicklungen sollen also denkbare Szenarien der Waldnutzung für ausgewählte Waldlandschaftsräume exemplarisch analysiert werden. Mögliche Behandlungsstrategien werden zudem unter Einbindung von Stakeholdern auf Realitätsnähe und Praxisrelevanz überprüft und ggf. angepasst.

5.4 Erwartete Ergebnisse

Die generelle Linie erwarteter Ergebnisse – vor allem in digitaler, GIS-gestützter Form – lässt sich folgendermaßen nachzeichnen:

- Verbesserte „klimasensitive" Standortkarten bzw. -schätzungen für forstlich bedeutende Landschaftsräume
- Karten und Erkenntnisse zur Baumarteneignung im Klimawandel für in Rheinland-Pfalz vorkommende Hauptbaumarten und künftig wichtige Mischbaumarten
- Simulationsergebnisse zu Waldwachstum und Strukturvielfalt
- Exemplarische Waldentwicklungsszenarien für ausgewählte Landschaftsräume
- Räumliche Abschätzungen von Gefährdungen (z. B. Sturm und Waldbrand)
- Karten mit Gegenüberstellung aktueller Waldtypenverteilung, heutigen Waldentwicklungszielen und künftig ggf. angepassten Waldentwicklungszielen
- Empfehlungen zum Waldnaturschutz

6 Modul Landwirtschaft

6.1 Einführung

Etwa 42 % der rheinland-pfälzischen Landesfläche sind landwirtschaftlich genutzt, wobei der Weinbau mit über 62 000 ha eine besondere Bedeutung hat (Statistisches Landesamt RLP 2009). Nach den Klimaprojektionen sind Veränderungen in der landwirtschaftlichen Nutzung sehr wahrscheinlich (BINDI, HOWDEN 2004; ZEBISCH et al. 2005; STOCK et al. 2007). Um die Folgen einer Klimaänderung einschätzen und mögliche Handlungsoptionen zur Sicherung und Anpassung der rheinland-pfälzischen Landwirtschaft zu erschließen, werden im Modul Landwirtschaft umfangreiche geodatenbasierte Untersuchungen durchgeführt.

6.2 Ziele/Fragestellungen

An vorliegende Klimaprojektionen werden Landnutzungsszenarien gekoppelt und darauf aufbauend geeignete Anpassungsoptionen für die landwirtschaftliche Beratung und Praxis entwickelt. Eine zentrale Stellung nimmt in diesem Zusammenhang der Begriff „Standort" ein. Von seinen Eigenschaften hängt die landwirtschaftliche Nutzung ab, wichtige Standortparameter sind direkt an das Klima gebunden und können durch Klimaveränderung beeinflusst werden (OLESEN, BINDI 2003). Die Arbeit des Moduls soll die möglichen, durch einen Wandel des Klimas bedingten Veränderungen der landwirtschaftlichen Standorte räumlich erfassen.

6.3 Methodischer Ansatz

Im Zusammenhang mit der raumzeitlichen Analyse der natürlichen (insbesondere der klimatisch beeinflussten) Standortfaktoren fällt besonderes Augenmerk auf die Frage, wo sich räumlich in der Landwirtschaft durch den Klimawandel etwas verändern könnte. Zur Verarbeitung bzw. Erzeugung von Informationen mit Raumbezug werden in einem GIS raumbezogene Daten dargestellt, analysiert und modelliert.

Basis für die Arbeit des Moduls ist eine möglichst detaillierte räumliche (GIS-basierte) Ist-Analyse der rheinland-pfälzischen Landwirtschaft. Dazu gehören eine Analyse der Verteilung der landwirtschaftlichen Nutzung sowie die Erfassung ihrer bestimmenden Faktoren.

Ein Vergleich der tatsächlichen Verteilung landwirtschaftlicher Flächen mit der aktuellen räumlichen Ausprägung relevanter Standortparameter ermöglicht die Identifikation von Räumen („Standorthüllen"), die für den Anbau bestimmter Kulturarten/-sorten gut oder weniger gut geeignet sind. Das gilt sowohl für die Standorte von Kulturarten, als auch für das Auftreten bestimmter Schaderreger oder anderer Geofaktoren, sofern sie räumlich ausreichend abschätzbar sind. Es eröffnet sich so die Möglichkeit, Räume mit einer erhöhten Verwundbarkeit (Vulnerabilität) und einer erhöhten Toleranz gegenüber klimatischen oder klimainduzierten Veränderungen abzugrenzen.

Die klimabedingte Veränderung landwirtschaftlicher Standortfaktoren in der Zukunft entscheidet über Möglichkeiten und Bedingungen des Anbaus der aktuell vertretenen Kulturarten. Eine Aussage über die zukünftig möglichen quantitativen und qualitativen Veränderungen des Musters landwirtschaftlicher Nutzung in Rheinland-Pfalz wird durch die Einbeziehung regionalisierter Klimaprojektionen erreicht. Über die Modellierung eines Spektrums zukünftiger „Standorthüllen" wird so die räumliche Abschätzung klimabedingter Risiken bestimmter Kulturarten ermöglicht.

Dieser Schritt ist unverzichtbar für die Entwicklung standortsichernder Maßnahmen oder anderer Anpassungsoptionen (z. B. Kulturwechsel). Hier fließt auch die Modellierung weiterer Risikofaktoren wie z. B. klimasensitiver Schaderreger, Kaltluftpotenzial (Spätfröste) oder die Erosionsneigung von Standorten ein.

Die Ist-Analyse zu Art, Umfang und Verbreitung landwirtschaftlicher Nutzungsformen in Rheinland-Pfalz baut auf vorhandenen Datenquellen, insbesondere des Landesinformationssystems (LIS, Statistisches Landesamt Rheinland-Pfalz), auf, die ausgewertet und zu Geodaten weiterverarbeitet werden. Dazu werden Flächen- und Bewirtschaftungsinformationen mit Geometrien aus offiziellen Datensätzen (Gemeindegrenzen) verknüpft, so dass sie in Geoinformationssystemen zur Erstellung von Karten und räumlichen Analysen genutzt werden können. Neben einem Überblick über die rheinland-pfälzische Landwirtschaft dienen die Daten auch als Grundlage für die Arbeit anderer Projektmodule.

Ein weiterer Schritt ist die Entwicklung einer Methode, die flächenhaft – auf der Basis verschiedener Parameter – eine qualitative Aussage über die Eignung eines Standortes für eine bestimmte landwirtschaftliche Nutzung erlaubt. Dazu werden verschiedene Ansätze zur multikriteriellen Entscheidungsfindung geprüft, die den Einfluss mehrerer Faktoren mit unterschiedlicher Gewichtung bündeln und bewerten (MEYER 2002; MARINONI 2004; THIERE, DEUMLICH 2004). Ein erster Modellansatz zeigt bereits gute Ergebnisse, wie Abbildung 5 zu entnehmen ist: Die im Jahr 2007 als Weinbauflächen registrierten Flurstücke (Abbildung 5b) liegen nahezu vollständig innerhalb der potenziell für Weinbau geeigneten Flächenkulisse (Abbildung 5a), wie sie als Modellergebnis mit den Einflussfaktoren Höhe über NN, Besonnung und topografischer Bodenfeuchteindex ermittelt wurde. Begleitend findet eine umfangreiche Literaturrecherche statt, die sich neben Möglichkeiten zur Standortcharakterisierung auch auf die Standortansprüche von Kulturarten erstreckt. In diesem Zusammenhang sol-

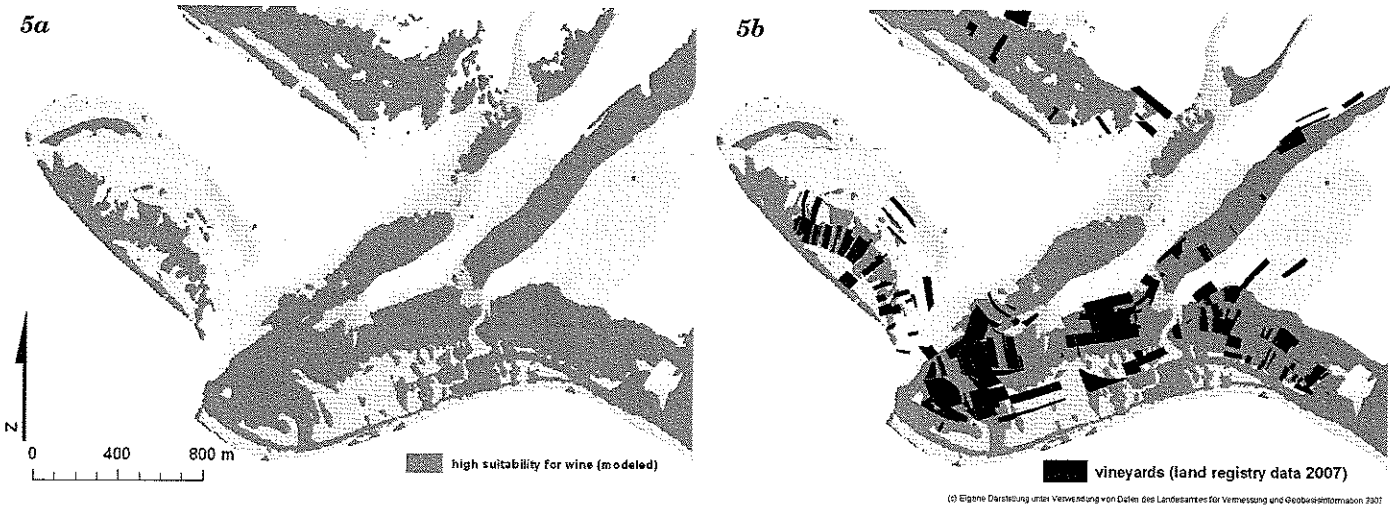

Abbildung 5a: *Multikriteriell modellierte Standorteignung für Weinbau mit den Einflussfaktoren Höhe über NN, Besonnung und topografischer Bodenfeuchteindex;* ***Abbildung 5b:*** *tatsächliche Weinbauflächen im Jahr 2007 (eigene Darstellung, Liegenschaftskataster RLP, Folie 21)*

Figure 5: *Areas suitable for wine growing derived by means of multi-criteria analysis (Altitude above sea level, insolation and topographic wetness index) compared to 2007 existing vineyards (Official land registry data Rhineland-Palatinate, ALK layer 21, "real land use")*

len weitere Eingangsparameter (z. B. Wärmesumme; Vergleich mit Huglin-Index) für die Standortanalyse ermittelt werden. Darüber hinaus spielt in der Recherche die Auswahl von Referenzarten/-sorten eine besondere Rolle, da die Fülle der Kulturen, Arten und Sorten eine Beschränkung auf einzelne, aussagekräftige erfordert.

Die entwickelte Methode zur Standortcharakterisierung bildet einerseits die Grundlage für die Einschätzung aktueller Situationen. Mit veränderten, an Klimaprojektionen angepassten Standortparametern wird sie andererseits zur Abbildung möglicher zukünftiger Zustände genutzt werden. Ein Vergleich der aktuellen mit projizierten Situationen ermöglicht die Identifizierung vulnerabler Bereiche. Eine Analyse der verantwortlichen Einflussfaktoren (vgl. Abbildung 5) wird dabei helfen, Handlungsoptionen zu entwerfen.

6.4 Erwartete Ergebnisse

Die erwarteten Ergebnisse des Moduls Landwirtschaft lassen sich folgendermaßen zusammenfassen:

- Vektorbasierte Geodaten und Geodatenbanken mit möglichst genauer räumlicher Verteilung der in Rheinland-Pfalz angebauten Fruchtfolgen
- Ableitungen von geomorphografischen Parametern als Grundlage zur Charakterisierung der landwirtschaftlichen Standorte in Rheinland-Pfalz
- Klimabedingte Standortparameter, flächendeckend als Geoinformation, zur landesweiten Modellierung von durch den Klimawandel verursachten Veränderungen der Produktionsbedingungen in der Landwirtschaft
- Generierung und kartengestützte Visualisierung u. a. von „Standorthüllen" und „Gunsträumen"
- Neuberechnung der aktuellen kulturspezifischen Standorthüllen und Gunsträume für mögliche zukünftige Gegebenheiten und Entwicklung adäquater Anpassungsoptionen

7 Modul Biodiversität

7.1 Einführung

Die Erforschung der Auswirkungen von Klimaänderungen auf die Biodiversität ist ein besonders stark wachsender Bereich internationaler ökologischer Forschung (Abbildung 6). Auf allen Integrationsebenen, von Individuen über Populationen bis hin zur Zusammensetzung von Lebensgemeinschaften, sind bereits Einflüsse des Klimawandels auf terrestrische und aquatische Arten in ihren Lebensräumen nachgewiesen (Both, Visser 2001; Warren et al. 2001; Bale et al. 2002; Edwards et al. 2002; Sanz 2003; Beckage et al. 2008). Im Gegensatz zu bereits beobachteten Auswirkungen erscheinen die Effekte, die Klima- und Landnutzungsänderungen aber in Zukunft bewirken können, oft unvorhersagbar (Harrington et al. 2001). Je nach benutzter Modellierungsmethode sind die Erwartungen zudem nach bisherigen Modellrechnungen höchst variabel und je nach Region unterschiedlich (Hampe 2004; Lawler et al. 2006). Auch differenziertere Modelle als die zurzeit verwendeten können niemals die zukünftige Verbreitung einer Art vorhersagen, sie können nur Anhaltspunkte für eine mögliche Entwicklung unter bestimmten Annahmen liefern (Dormann 2007). Dennoch sind Verbreitungsmodelle wichtig, um bestehende Verbreitungsmuster besser verstehen und Aussagen zu den Auswirkungen sich ändernder Umweltbedingungen treffen zu können. Die Integration von Landnutzungsvariablen, biotischen Interaktionen und des artspezifischen Ausbreitungsvermögens ist eine der zentralen Herausforderungen für zukünftige Verbreitungsmodelle (Heikkinen et al. 2006; Dormann 2007; Tylianakis et al. 2008). Insbesondere bei Projektionen für kleine geografische Räume mit schwachen klimatischen Gradienten sollten diese Parameter eine größere Bedeutung haben. Deshalb werden diese ökologischen Aspekte besonders berücksichtigt.

7.2 Ziele/Fragestellungen

Im Modul soll die aktuelle Verteilung von wichtigen Teilaspekten des rheinland-pfälzischen Biodiversitätsspektrums erklärt werden. Im Rahmen des Projekts konzentrieren sich die Untersuchungen zunächst auf Arten und ihre Habitatansprüche mit dem Ziel, am Ende des Projekts oder in einer sich daran anschließenden Phase einen stärkeren Fokus auf Lebensraumveränderungen bzw. Szenarien der Landnutzung zu legen.

Für Untersuchungen zu aktuell beobachteten und durch den Klimawandel verursachten Veränderungen in der Verbreitung von Arten eignen sich vor allem Tiergruppen, über die ein relativ guter faunistischer Kenntnisstand besteht und die von besonderem Interesse für den Naturschutz im Land Rheinland-

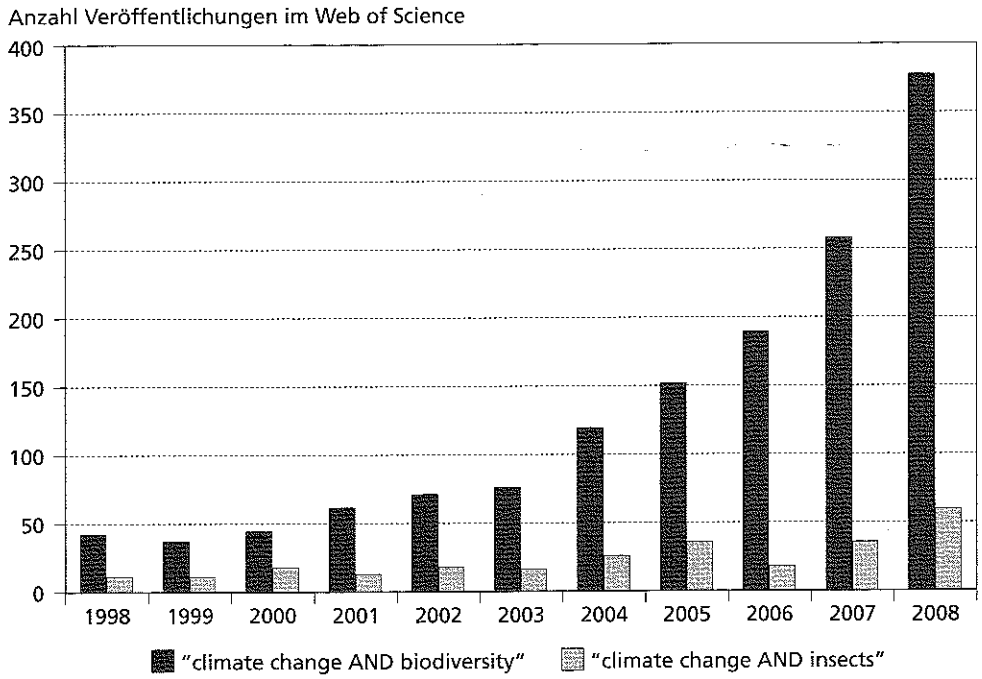

Abbildung 6:
Anzahl der im „Web of Science" 1998 – 2008 veröffentlichten internationalen Artikel zum Thema Biodiversität und Klimaänderungen (Suchbegriffe waren „climate change AND biodiversity" bzw. „climate change AND insects")

Figure 6:
Number of international publications in "Web of Science" 1998 – 2008 with respect to "biodiversity and climate change" (search items were "climate change AND biodiversity" or "climate change AND insects", respectively)

Pfalz sind. Zu diesen Gruppen gehören Amphibien, Reptilien (BITZ et al. 1996) und einige Wirbellose, v. a. Heuschrecken, Schmetterlinge (SCHULTE et al. 2007a,b), Libellen (OTT 2005) und diverse Käferfamilien (SCHIMMEL 1989; NIEHUIS 2001, 2004). Alle diese Tiergruppen beinhalten Arten mit sehr unterschiedlichen Ansprüchen an ihr Habitat. Diese eignen sich hervorragend als Modellarten für klimabedingte Änderungen der Habitatqualität. Insekten sind auch deshalb ein Schwerpunkt dieses Projektes, da diese bisher in der Klimaforschung nicht entsprechend ihrer Bedeutung und Artenzahl bearbeitet wurden (Abbildung 6).

Bei den Pflanzenarten sollen insbesondere diejenigen bearbeitet werden, die auf spezielle Interaktionen mit den untersuchten Tierarten angewiesen oder von denen diese abhängig sind. Ergänzt werden soll diese Auswahl der Pflanzen durch solche, die auf Roten Listen verzeichnet sind und für die eine besonders gute Datengrundlage (z. B. in BioLFlor-Datenbank biologisch-ökologischer Merkmale der Flora Deutschlands des Helmholtz-Zentrums für Umweltforschung) vorhanden ist.

Basierend auf den gewonnenen Erkenntnissen soll eine Prognose der zukünftigen regionalen Verteilung von Teilaspekten der Biodiversität unter dem Einfluss von Klima- und Landschaftswandel für Rheinland-Pfalz erstellt werden. Dies wird es ermöglichen, eine Reihe von Fragen zu beantworten, deren Antworten unabdingbar für ein zukunftsorientiertes Landschafts- und Artenschutzmanagement sind, u. a.:

- Spiegelt sich der Klimawandel bereits heute im Auftreten und der Ausbreitung von Arten wider?
- Welche Arten werden in Zukunft Arealverschiebungen und/oder -erweiterungen durchführen?
- Welche Arten können aus Nachbarregionen nach Rheinland-Pfalz einwandern (Neozoen, Neophyten)?
- Werden die Arealänderungen der Arten durch größere Barrieren (geografisch, Landnutzung) eingeschränkt oder gar verhindert?

7.3 Methodischer Ansatz

Im Modul werden Arten aus den zur Untersuchung vorgesehenen Gruppen (s. Kap. 7.2) anhand definierter Kriterien wie Schutzstatus und Verbreitungshäufigkeit selektiert. Für diese Arten werden aus der Verteilung in Rheinland-Pfalz und – mit Blick auf die zu erwartende Zuwanderung von Arten aus dem Süden – den angrenzenden südlichen Bundesländern sowie Frankreich (Kooperation mit der Arbeitsgruppe Biodiversität des deutsch-französischen Biosphärenreservates Pfälzerwald-Vosges du Nord) statistische Verbreitungsmodelle (ENGLER et al. 2004; PEARCE, BOYCE 2006) auf der Basis von abiotischen (Temperatur, Strahlungsbilanz, Niederschlag, Bodentypen, Landnutzung) und biotischen (Verfügbarkeit von Futterpflanzen und Mutualisten, Dispersionsfähigkeit) Habitateigenschaften entwickelt. Als Modellierungsmethode soll hauptsächlich mit logistischer Regression gearbeitet werden. Bisherige Modelle zur Wirkung von Klimaänderungen auf das Verbreitungsbild von Arten wurden fast ausschließlich großräumig (z. B. für Europa) und basierend auf Klimadaten erstellt (Climate envelope models). Die Entwicklung kleinräumigerer Modelle erlaubt die Verwendung relativ präziser Umweltdaten, vor allem auch zur Landnutzung und zum Wasser- und Stoffhaushalt des Bodens, ist aber zugleich eine große Herausforderung. Als Bezugsraum dient entweder ein Raster auf Basis der Messtischblätter oder es werden die naturräumlichen Haupteinheiten eines jeden Bundeslandes verwendet. Letztere haben gegenüber einem willkürlich gewählten Raster den Vorteil, dass die Variabilität von Umweltparametern potentiell geringer als in systematischen Rastereinheiten ist. Projektionen zukünftiger Veränderung der klimatischen Bedingungen, des Bodens, der Verfügbarkeit von Wasser und der Landnutzung, die in den anderen Modulen des Verbundprojekts entwickelt werden, werden benutzt, um eine zukünftige Verteilung von Arten und Schwerpunkten der Biodiversität in Rheinland-Pfalz zu extrapolieren.

7.4 Erwartete Ergebnisse

Aus dem Modul Biodiversität dürfen mit Blick auf die einleitend skizzierten Fragestellungen folgende Ergebnisse erwartet werden:

- Entwicklung regionaler Modelle zur Abbildung der Auswirkungen bestimmter Umweltparameter und Landschaftsstrukturen auf die Verteilung von Artenvielfalt
- Nutzung der entwickelten Modelle zur Ableitung von Aussagen, ob und wie sich die Artenvielfalt in unterschiedlichen Regionen von Rheinland-Pfalz unter

modifizierten Umweltbedingungen in naher (2021 bis 2050) und ferner (2071 bis 2100) Zukunft verändern wird
- Änderung der Verbreitung von untersuchten Arten in Rheinland-Pfalz
- Erkenntnisse zur möglichen Einwanderung von Arten aus angrenzenden Regionen

Literatur

BALE, J. S., MASTERS, G. J., HODKINSON, I. D., AWMACK, C., BEZEMER, T. M., BROWN, V. K., BUTTERFIELD, J., BUSE, A., COULSON, J. C., FARRAR, J., GOOD, J. E. G., HARRINGTON, R., HARTLEY, S., 2002: Herbivory in global climate change research: direct effects of rising temperature on insect herbivores. Global Change Biology 8: 1–16.

Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft (LfL) (Hrsg.), 2007: Klimaänderung und Landwirtschaft – Bestandesaufnahme und Handlungsstrategien für Bayern, Freising.

Bayerische Landesanstalt für Wald und Forstwirtschaft (LWF) (Hrsg.), 2007: Wälder im Klimawandel, LWF Aktuell 60.

Bayerische Landesanstalt für Wald und Forstwirtschaft (LWF) (Hrsg.), 2008: Die Douglasie – Perspektiven im Klimawandel, LWF Wissen 59.

Bayerisches Landesamt für Umwelt (Hrsg.), 2008: Klimaanpassung Bayern 2020. Der Klimawandel und seine Auswirkungen – Kenntnisstand und Forschungsbedarf als Grundlage für Anpassungsmaßnahmen, 42 S. URL: http://www.lfu.bayern.de, Zugriff: 18. 02. 2009.

BECKAGE, B., OSBORNE, B., GAVIN, D. G., PUCKO, C., SICCAMA, T., PERKINS, T., 2008: A rapid upward shift of a forest ecotone during 40 years of warming in the Green Mountains of Vermont. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America 105: 4197–4202.

BEIERKUHNLEIN, C., FOKEN, T., 2008: Klimawandel in Bayern – Auswirkung und Anpassungsmöglichkeiten. Bayreuther Forum Ökologie. Vol. 113/2008. Universität Bayreuth, Bayreuth: 205–217 und 362–369.

BELLAMY, P. H., LOVELAND, P. J., BRADLEY, R. I., LARK, R. M., KIRK, G. J. D., 2005: Carbon losses from all soils across England 1978–2003. Nature, 437: 245–248.

BELZ, J. U., BRAHMER, G., BUITEVELD, H., ENGEL, H., GRABHER, R., HODEL, H., KRAHE, P., LAMMERSEN, R., LARINA, M., MENDEL, H.-G., MEUSER, A., MÜLLER, G., PLONKA, B., PFISTER, L., VUUREN, W. v., 2000: Das Abflussregime des Rheins und seiner Nebenflüsse im 20. Jahrhundert – Analyse, Veränderung, Trends. Internationale Kommission für die Hydrologie des Rheingebietes (KHR), Bericht Nr. I-22.

BINDI, M., HOWDEN, M., 2004: Challenges and opportunities for cropping systems in a changing climate, Proceedings of the 4th International Crop Science Congress, 26 Sep–1 Oct 2004, Brisbane.

BITZ, A., FISCHER, K., SIMON, L., THIELE, R., VEITH, M., 1996: Die Amphibien und Reptilien in Rheinland-Pfalz. Band 1, Gesellschaft für Ornithologie und Naturschutz Rheinland-Pfalz, Landau, 312 S.

BOLTE, A., IBISCH, P., 2007: Die Anfälligkeit der Wälder Deutschlands gegenüber dem Klimawandel. AFZ-DerWald, 11/2007: 572–576.

BOLTE, A., IBISCH, P., MENZEL, A., ROTHE, A., 2008: Was Klimahüllen uns verschweigen. AFZ-DerWald 15/2008: 800–803.

BOTH, C., VISSER, M. E., 2001: Adjustment to climate change is constrained by arrival date in a long-distance migrant bird. Nature 411: 296–298.

BREMICKER, M., 2000: Das Wasserhaushaltsmodell LARSIM. Modellgrundlagen und Anwendungsbeispiele. Freiburger Schriften zur Hydrologie, Band 11. Institut für Hydrologie, Universität Freiburg.

Bundesministerium für Bildung und Forschung (Hrsg.), 2007: Die Hightech-Strategie zum Klimaschutz, 44 S. URL: http://www.bmbf.de, Zugriff 23. 03. 2008.

Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung (Hrsg.), 2006: Future Landscapes – Perspektiven der Kulturlandschaftsentwicklung, 118 S.

BYRNE, K. A., CHOJNICKI, B., CHRISTENSEN, T. R., DRÖSLER, M., FREIBAUER, A., 2004: EU peatlands: Current carbon stocks and trace gas fluxes. CarboEurope-GHG Concencerted Action – Synthesis of the European Greenhouse Gas Budget, Report 4/2004.

DORMANN, C. F., 2007: Promising the future? Global change projections of species distributions. Basic and Applied Ecology 8: 387–397.

ECKELMANN, W., BARITZ, R., BIALOUSZ, S., BIELEK, P., CARRÉ, F., HOUSKOVÁ, B., JONES, R. J. A., KIBBLEWHITE, M., KOZAK, J., LE BAS, C., TÓTH, G., TÓTH, T., VÁRALLYAY, G., YLI HALLA, M., ZUPAN, M., 2006: Common criteria for risk area identification according to soil threats. EUR 22185 EN. European Communities. European Soil Bureau. Research Report 20, Luxemburg.

EDWARDS, M., BEAUGRAND, G., REID, P. C., ROWDEN, A. A., JONES, M. B., 2002: Ocean climate anomalies and the ecology of the North Sea. Marine Ecology Progress Series 239: 1–10.

ENGLER, R., GUISAN, A., RECHSTEINER, L., 2004: An improved approach for predicting the distribution of rare and endangered species from occurrence and pseudo-absence data. Journal of Applied Ecology 41: 263–274.

Europäische Union, 2000: Richtlinie 2000/60/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 23. Oktober 2000 zur Schaffung eines Ordnungsrahmens im Bereich der Wasserpolitik – Amtsblatt der Europäischen Gemeinschaften, L327.

FEEMERS, M., BLASCHKE, M., SKATULLA, U., GULDER, H.-J., 2003: Klimaveränderungen und Biotische Schäden im Wald, LWF Aktuell 37: 19–22.

Forstliche Versuchs- und Forschungsanstalt Baden-Württemberg (Autorenkollektiv), 2008: Wald und Klima. FVA-einblick+, 1/2008, 64 S.

FREEDEN, W., GRAMSCH, S., LUTHER, A., SCHÜLER, G., 2005: Konstruktive Approximation des Windfelds – Entscheidungsgrundlage für waldbauliche Planungen. Forstarchiv 76. Jg.: 44–53.

FREIBAUER, A., SCHRUMPF, M., 2005: Ergebnisse aus dem EU-Projekt CarboEurope zu Fragen der standortgerechten Bodennutzung und des Klimaschutzes. In: MATHEWS, J., MARAHRENS, S., SCHMIDT, S. (Hrsg.): UBA-Workshop: Klimaänderungen – Herausforderungen für den Bodenschutz am 28. und 29. September 2005, S. 137–147.

GEBEL, M., HALBFASS, S., KAISER, M., GRUNEWALD, K., 2005: Mesoskalige Modellierung diffuser Nährstoffeinträge in Flussgebieten mit dem Modell STOFFBILANZ – Entwicklungsstand und Perspektiven. In: WITTMANN, J., NGUYEN XUAN THINH (Hrsg.): Simulation in Umwelt- und Geowissenschaften – Workshop Dresden 2005, ASIM-Mitteilung AMB 91, S. 159–168, Aachen.

GERSTENGARBE, F.-W., BADECK, F., HATTERMANN, F., KRYSANOVA, V., LAHMER, W., LASCH, P., STOCK, M., SUCKOW, F., WECHSUNG, F., WERNER, P. C., 2003: „Studie zur klimatischen Entwicklung im Land Brandenburg bis 2055 und deren Auswirkungen auf den Wasserhaushalt, die Forst- und Landwirtschaft sowie die Ableitung erster Perspektiven." PIK Report No. 83. Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung, 79 S.

HAMPE, A., 2004: Bioclimate envelope models: what they detect and what they hide. Global Ecology and Biogeography 13: 469–471.

HANEWINKEL, M., KÄNDLER, G., 2008: Ein Entscheidungsunterstützungssystem „Wald_Klima_BW" für Südwestdeutschland – konzeptionelle und methodische Aspekte einer komplexen Entscheidungshilfe für Forstpraktiker bei sich ändernden Klimabedingungen. In: Freiburger Forstliche Forschung, Heft Nr. 76, Freiburg, 42 S.

HARRINGTON, R., FLEMING, R. A., WOIWOD, I., 2001: Climate change impacts on insect management and conservation in temperate regions: can they be predicted. Agricultural and Forest Entomology: 233–240.

HEIKKINEN, R. K., LUOTO, M., ARAUJO, M.B., VIRKKALA, R., THUILLER, W., SYKES, M. T., 2006: Methods and uncertainties in bioclimatic envelope modelling under climate change. Progress in Physical Geography 30: 751–777.

HENNIGES, Y., DANZEISEN, H., ZIMMERMANN, R.-D., 2004: Regionale Klimatrends mit Hilfe der phänologischen Uhr, dargestellt am Beispiel Rheinland-Pfalz. Beitragsserie: Klimaänderungen und Klimaschutz. UWSF – Z Umweltchem Ökotox 2004 (OnlineFirst), S. 1–7.

HENRICHS, Y., MEUSER, A., PRELLBERG, D., 2005: Analyse der langjährigen Abflussverhältnisse im Hochwasserbereich vor dem Hintergrund eines Kimwandels. Landesamt für Umwelt, Wasserwirtschaft und Gewerbeaufsicht Rheinland-Pfalz (Hrsg.).

Hessisches Landesamt für Geologie und Umwelt, Landesamt für Geologie und Bergbau Rheinland-Pfalz (Hrsg.), 2008: Großmaßstäbige Bodeninformationen für Hessen und Rheinland-Pfalz, Wiesbaden.

JANSEN, M., DÖRING, C., AHRENDS, B., CZAJKOWSKI, T., PANFEROV, O., ALBERT, M., SPELLMANN, H., NAGEL, J., LEMME, H., HABERMANN, M., STAUPENDAHL, K., MÖHRING, B., BÖCHER, M., STORCH, S., KROTT, M., NUSKE, R., THIELE, J. C., NIESCHULZE, J., SABOROWSKI, J., BEESE, F., 2008: Anpassungsstrategien für eine nachhaltige Waldbewirtschaftung unter sich wandelnden Klimabedingungen – Entwicklung eines Entscheidungsunterstützungssystems „Wald und Klimawandel" (DSS-WUK). Forstarchiv 79: 131–142.

JANSSENS, I. A., FREIBAUER, A., SCHLAMADINGER, B., CEULEMANS, R., CIAIS, P., DOLMAN, A. J., HEIMANN, M., NABUURS, G. J., SMITH, P., VALENTINI, R., SCHULZE, E. D., 2005: The carbon budget of terrestrial ecosystems at country-scale – a European case study. Biogeosciences 2: 15–26.

KÄTZEL, R., 2008: Klimawandel – Zur genetischen und physiologischen Anpassungsfähigkeit der Waldbaumarten. Archiv für Forstwesen und Landschaftsökologie 42 (2008) 1: 9–15.

KLIWA (Hrsg.), 2006: KLIWA-Bericht Heft 10: Beiträge zum 3. KLIWA-Symposium am 25. und 26. 10. 2006 in Stuttgart, URL: http://www.kliwa.de, Zugriff 25. 02. 2009.

KÖLLING, C., 2007: Bäume für die Zukunft, LWF Aktuell 60: 35–37.

Kommission der Europäischen Gemeinschaften (Hrsg.), 2007: Grünbuch. Der Kommission an den Rat, das europäische Parlament, den europäischen Wirtschafts- und Sozialausschuss und den Ausschuss der Regionen. Anpassung an den Klimawandel in Europa – Optionen für Maßnahmen der EU, 31 S. URL: http://www.eurlex.europa.eu/LexUriServ/site/de/com/2007/com2007_0354de01.pdf, Zugriff 02. 03. 2009.

Landesamt für Geologie und Bergbau Rheinland-Pfalz (Hrsg.), 2005: Begleitheft zur Weinbergsbodenkarte von Rheinland-Pfalz 1:10.000, Mainz.

LAWLER, J. J., WHITE, D., NEILSON, R. P., BLAUSTEIN, A. R., 2006: Predicting climate-induced range shifts: model differences and model reliability. Global Change Biology 12: 1568–1584.

LEGAY, M., CORDONNIER, T., DHÓTE, J.-F., 2008: Des Forêts Mélangées pour composer avec les Changements climatiques. Rev. For. Fr. LX 2-2008: 181–190.

LEIBUNDGUT, CH., EISELE, M., 2005: Weiterentwicklung des Bewertungsverfahrens „Hydrologische Güte" als Expertensystem zum operationellen Einsatz im Flussgebietsmanagement. Abschlußbericht – Programm Lebensgrundlage Umwelt und ihre Sicherung, FKZ BWC 21013 – Freiburg.

LUDWIG, K., BREMICKER, M., (Eds.), 2007: The Water Balance Model LARSIM – Design, Content and Applications. Freiburger Schriften zur Hydrologie, Band 22. Institut für Hydrologie, Universität Freiburg.

MARINONI, O., 2004: Implementation of the analytical hierarchy process with VBA in ArcGIS, Amsterdam.

MENZEL, L., BÜRGER, G., SCHWANDT, D., 2001: Klimaänderungen und Hochwasser: Ergebnisse aus einer DFNK-Studie im Rheingebiet. Zweites Forum Katastrophenvorsorge 24.–26. 9. 2001.

MEYER, B.-C., 2002: Multikriterielle Landschaftsoptimierung – Ermittlung nachhaltiger Landnutzung auf Basis funktionaler Landschaftsbewertung. In: DECH, S., MEHL, H., STRUNZ, G. (Hrsg.), Tagungsband 19. DFD-Nutzerseminar 15./16. 10. 2002, Oberpfaffenhofen, S. 139–148.

Ministerium für Umwelt und Naturschutz, Landwirtschaft und Verbraucherschutz des Landes Nordrhein-Westfalen (Hrsg.), 2009: Anpassung an den Klimawandel. Eine Strategie für Nordrhein-Westfalen. 186 S. URL: http://www.umwelt.nrw.de, Zugriff: 02. 06. 2009.

Ministerium für Umwelt, Forsten und Verbraucherschutz Rheinland-Pfalz (Hrsg.), 2007: Klimabericht Rheinland-Pfalz. Mainz, 98 S. und Anhang.

Ministerium für Umwelt, Forsten (Hrsg.), 2005: Schutzwürdige Böden in Rheinland-Pfalz, Mainz.

MOSHAMMER, R., 2006: Vom Inventurpunkt zum Forstbetrieb. AFZ-DerWald 21: 1164–1165.

NIEHUIS, M., 2004: Die Prachtkäfer in Rheinland-Pfalz und im Saarland. Fauna und Flora in Rheinland-Pfalz, Beiheft 31, Landau.

NIEHUIS, M., 2001: Die Bockkäfer in Rheinland-Pfalz und im Saarland. Schriftenreihe „Fauna und Flora in Rheinland-Pfalz", Gesellschaft für Naturschutz und Ornithologie Rheinland-Pfalz, Landau.

OLESEN, J. E., BINDI, M., 2003: Agricultural impacts and adaptions to climate change in Europe, Farm Policy Journal, Potsdam.

OTT, J., 2005: Libellen als Indikatoren des Klimawandels – Konsequenzen für Biodiversität und Naturschutz. In: KORN, H., SCHLIEP, R., STADLER, J. (Red.), 2005. Biodiversität und Klima – Vernetzung der Akteure in Deutschland. BfN-Skript 131. Bonn-Bad Godesberg, S. 64–65.

PAAR, U., SCHMIDT, M., SCHÖNFELDER, E., MUES, V., SCHELER, B., EICHHORN, J., 2005: InKlim 2012 Baustein II – „Kartenbezogene Grundlagen der Waldentwicklung unter dem Einfluss von Klimaänderungen" – Abschlussbericht für den Bereich Forstwirtschaft. Hessen-Forst: Servicestelle für Forsteinrichtung, Information und Versuchswesen. Hann. Münden.

PEARCE, J. L., BOYCE, M. S., 2006: Modelling distribution and abundance with presence-only data. Journal of Applied Ecology 43: 405–412.

PRETZSCH, H., LINDNER, M., SUDA, M. (Eds.), 2002: German Forest Sector under Climate Change. Forstwissenschaftliches Centralblatt – German Journal of Forest Science, Volume 121 Supplement 1, May 2002.

RIGLING, A., BRANG, P., BUGMANN, H., KRÄUCHI, N., WOHLGEMUTH, T., ZIMMERMANN, N., 2008: Klimawandel als Prüfstein für die Waldbewirtschaftung. Schweizerische Zeitschrift für Forstwesen (10): 316–325.

RÖDER, A., BÜCKING, M., 2004: Forstbetriebliches Management unter Ungewissheit und Unwissenheit. In: LÖWENSTEIN , W., OLSCHEWSKY, R., BRABÄNDER, H.-D., MÖHRING, B. (Hrsg.): Perspektiven forstökonomischer Forschung. S. 167–184, J. D. Sauerländer's Verlag, Frankfurt/M.

ROLOFF, A., GRUNDMANN, B., 2008: Klimawandel und Baumarten-Verwendung für Waldökosysteme. Forschungsbericht. Technische Universität Dresden, Institut für Forstbotanik und Forstzoologie, Professur für Forstbotanik. Tharandt.

RÖTZER, T., MOSHAMMER, R., 2008: Waldentwicklungsszenarien für die Dübener Heide. Forst und Holz 63 (10): 18–22.

SANZ, J. J., 2003: Large-scale effects of climate change on breeding parameters of pied flycatchers in Western Europe. Ecography 26: 45–50.

SAUER, S., GAUER, J., WILL, D., 2005: Entwicklung eines großmaßstäbigen und Bodenfunktionsbezogenen Kartenwerks für Rheinland-Pfalz. Mitteilungen der DBG 107(2): 753–754.

SCHÄR, C. VIDALE, P. L., LÜTHI, D., FREI, C., HÄBERLI, C., LINIGER, M. A., APPENZELLER, C., 2004: The role of increasing temperature variability in European summer heat waves. Nature 427: 332–336.

SCHIMMEL, R., 1989: Monographie der rheinland-pfälzischen Schnellkäfer (Insecta: Coleoptera: Elateridae). Pollichia 16, Bad Dürkheim.

SCHULLA, J., JASPER, K., 2007: Model description WaSiM-ETH. Zürich.

SCHULTE, T., ELLER, O., NIEHUIS, M., RENNWALD, E., 2007 a: Die Tagfalter der Pfalz. Band 1, Fauna und Flora in Rheinland-Pfalz, Beiheft 36, Landau.

SCHULTE, T., ELLER, O., NIEHUIS, M., RENNWALD, E., 2007 b: Die Tagfalter der Pfalz. Band 2, Fauna und Flora in Rheinland-Pfalz, Beiheft 37, Landau.

SCHULTZE, B., KÖLLING, C., DITTMAR, C., RÖTZER, T. ELLING, W., 2005: Konzept für ein neues quantitatives Verfahren zur Kennzeichnung des Wasserhaushalts von Waldböden in Bayern: Modelling – Regression – Regionalisierung. Forstarchiv 76: 155–163.

SCHULZ, N., ASCHE N., 2008: Klima, Standort, Wald. AFZ-DerWald 1/2008: 20–24.

SCHWANDT, D., 2003: Abflussentwicklung in Teileinzugsgebieten des Rheins – Simulationen für den Ist-Zustand und für Klimaszenarien. PIK Report No. 88, Potsdam.

SCHWERTMANN, U., VOGL, W., KAINZ, M., 1987: Bodenerosion durch Wasser – Vorhersage des Abtrags und Bewertung von Gegenmaßnahmen. Stuttgart.

SEEMANN, D., DELB, H., SCHRÖCK, H.-W., 2001: Empfehlungen zur Behandlung von durch den Zweipunkt-Eichenprachtkäfer (*Agrilus biguttatus*) geschädigten Eichenbeständen. Merkblatt der FVA Baden-Württemberg und der FAWF Rheinland-Pfalz.

Statistisches Landesamt RLP, 2009: URL: http://www.infothek.statistik.rlp.de/lis/MeineRegion/index.asp. (25. 02. 2009)

STOCK, M., 2007: Akteure im Wald und ihre Gemeinwohlleistungen – Brauchen wir sie im Klimawandel?, Eberswalder Forstliche Schriftenreihe Band XXXIII: 14–20.

STOCK, M., BADECK, F., GERSTENGARBE, F.-W., KARTSCHALL, T., ÖSTERLE, H., WERNER, P. C.; WODINSKI, M., 2007: Perspektiven der Klimaänderung bis 2050 für den Weinbau in Deutschland. PIK Report No. 106; Potsdam.

SUCKOW, F., LASCH, P., BADECK, F.-W., HAUF, Y.: Forstsektor. In STOCK, M. (Hrsg.), 2005: Klara – Klimawandel, Auswirkungen, Risiken, Anpassung. PIK Report No. 99. Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung: 89–106.

THIERE, J., DEUMLICH, D., 2004: Standortbeurteilungen und Standortvergleiche nach Programm „VERMOST" (Vergleichsmethode Standort), Müncheberg.

TYLIANAKIS, J. M., DIDHAM, R. K., BASCOMPTE, J., WARDLE, D. A., 2008: Global change and species interactions in terrestrial ecosystems. Ecology Letters 11: 1351–1363.

Umweltbundesamt (Hrsg.), 2008: Klimaauswirkungen und Anpassung in Deutschland – Phase 1: Erstellung regionaler Klimaszenarien für Deutschland. Umweltforschungsplan des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit. Forschungsbericht 204 41 128, UBA-FB 000969. 11/08: 154 S. URL: http://www.umweltbundesamt.de, Zugriff: 18. 02. 2009

Umweltbundesamt (Hrsg.), 2007: Neuentwicklung von regional hoch aufgelösten Wetterlagen für Deutschland und Bereitstellung regionaler Klimaszenarios auf der Basis von globalen Klimasimulationen mit dem Regionalisierungsmodell WETTREG auf der Basis von globalen Klimasimulationen mit ECHAM5/MPI-OM T63L31 2010 bis 2100 für die SRES-Szenarios B1, A1B und A2, Forschungsbericht zum FuE-Vorhaben 204 41 138, Publikation des UBA, Berlin.

Umweltbundesamt, 2006: Klimaänderungen – Herausforderungen für den Bodenschutz, Workshop, Dessau.

VASCONCELOS, A., KONOLD, W., MATTHES, U., 2008: Multifunktionale Wälder im Klimawandel – Risiken, Chancen und Anpassungsoptionen für Rheinland-Pfalz. In: Freiburger Forstliche Forschung, Heft Nr. 76, Freiburg.

WARREN, M. S., HILL, J. K., THOMAS, J. A., ASHER, J., FOX, R., HUNTLEY, B., ROY, D. B., TELFER, M. G., JEFFCOATE, S., HARDING, P., JEFFCOATE, G., WILLIS, S. G., GREATOREX-DAVIES, J. N., MOSS, D., THOMAS, C. D., 2001: Rapid responses of British butterflies to opposing forces of climate and habitat change. Nature 414: 65–69.

WELLBROCK, N., BOLTE, A., 2008: Carbon sequestration potential of soils in commercial forests in Germany – contribution of National Forest Monitoring to the advancement of knowledge. Landbauforschung – vTI Agriculture and Forestry Research 4 (58): 247–252.

WEIGEL, H. J., PACHOLSKI, A., WALOSZCZYK, K., FRÜHAUF, C., MANDERSCHEID, R., ANDERSON, T. H., HEINEMEYER, O., KLEIKAMP, B. HELAL, M., BURKART, S., SCHRADER, S., STICHT, C., GIESEMANN, A., 2005: Spurenstoffaustausch zwischen der bodennahen Atmosphäre und ackerbaulich genutzten Flächen: Erfahrungen aus dem braunschweiger Kohlenstoffprojekt. In: MATHEWS J., MARAHRENS S., SCHMIDT, S. (Hrsg.): UBA-Workshop: Klimaänderungen – Herausforderungen für den Bodenschutz am 28. und 29. September 2005, S. 137–147.

ZEBISCH, M., GROTHMANN, T., SCHRÖTER, D., HASSE, C., FRITSCH, U., CRAMER, W., 2005: Klimawandel in Deutschland – Vulnerabilität und Anpassungsstrategien klimasensitiver Systeme, Umweltbundesamt, Dessau.

ZELLWEGER, F., 2008: Die Anfälligkeit unserer Baumarten gegenüber den prognostizierten Klimabedingungen. Paper Seminar Wald und Landschaft ETHZ – HS 08. URL: http://www.eva-elba.unibas.ch/?c=14231, Zugriff 26. 01. 2009.

Autoren/Co-Autoren

Korrespondierender Autor:

***Dr. Ulrich Matthes**, Projektleitung Klima- und Landschaftswandel in Rheinland-Pfalz (KlimLandRP)*
FAWF Rheinland-Pfalz, Hauptstraße 16, 67705 Trippstadt
E-Mail: ulrich.matthes@wald-rlp.de
Telefon: + 49 (0) 6306 911 15
Fax: +49 (0) 6306 911 200

Co-Autoren Modul Wald

***Prof. Dr. Werner Konold**, Sprecher des Deutschen Rates für Landespflege, Albert-Ludwigs-Universität Freiburg, Institut für Landespflege*

***Forst-Ing. Ana Cátia Vasconcelos**, Albert-Ludwigs-Universität Freiburg, FAWF Rheinland-Pfalz*

Co-Autoren Modul Boden

***Dr. Ernst-Dieter Spies**, Landesamt für Geologie und Bergbau, Abteilung Boden, Mainz*

***Dr. Tilmann Sauer**, Landesamt für Geologie und Bergbau, Abteilung Boden, Mainz*

Co-Autoren Modul Wasser

***Prof. Dr.-Ing. Markus Casper**, Universität Trier, Fachbereich Physische Geographie, Trier*

***Gayane Grigoryan**, Universität Trier, Fachbereich Physische Geographie, Trier*

Co-Autoren Modul Landwirtschaft

***Dr. Matthias Trapp**, Leiter AG Umweltinformationssysteme am Institut für Agrarökologie der RLP AgroScience, Neustadt-Weinstraße*

***Dipl.-Geograph Gregor Tintrup gen. Suntrup**, AG Umweltinformationssysteme am Institut für Agrarökologie der RLP AgroScience, Neustadt-Weinstraße*

Co-Autoren Modul Biodiversität

***Prof. Dr. Alfred Seitz**, Institut für Zoologie, Abt. Ökologie, Johannes Gutenberg-Universität Mainz*

***Dr. Eva Maria Griebeler**, Insitut für Zoologie, Abt. Ökologie, Johannes Gutenberg-Universität Mainz*

***Dr. Jörn Buse**, Institut für Zoologie, Abt. Ökologie, Johannes Gutenberg-Universität Mainz*

Co-Autoren Klimaprojektionen für Rheinland-Pfalz

***Dipl.-Meteorologin Clementine Kraus**, Landesamt für Umwelt, Wasserwirtschaft und Gewerbeaufsicht Rheinland-Pfalz, Referat Umweltmeteorologie, Mainz*

***Dr. Michael Bücking**, Ministerium für Umwelt, Forsten und Verbraucherschutz Rheinland-Pfalz, Referat Berichtswesen, Kompetenznetzwerke, Klimawandel, Mainz*