

Angenommen zur Veröffentlichung in „Raumforschung und Raumordnung“, Heft 2/2009

Manfred Stock, Jürgen P. Kropp, Oliver Walkenhorst

Risiken, Vulnerabilität und Anpassungserfordernisse für klimaverletzliche Regionen

Risks, vulnerability and needs for adaptation in climate sensitive regions

Kurzfassung

Regionalisierte Szenarien des Klimawandels ermöglichen die Ermittlung von Auswirkungen und damit verbundener Risiken im Rahmen von Vulnerabilitätsanalysen. Sie sind nicht als Prognosen anzusehen, wie beim Wetter, sondern als Werkzeuge, um verschiedene alternative Zukunftsperspektiven auf ihre Folgen hin zu analysieren. Es werden Faktoren zur Ermittlung regionaler Vulnerabilität und Anpassung dargestellt und wie Klimaszenarien dabei einzusetzen sind. Beispiele mit Bezug zur räumlichen Planung sind Wasserwirtschaft, Flusshochwasser, Küstenschutz, Land- und Forstwirtschaft sowie Naturschutz.

Stichworte: Anpassung, Extremereignisse, Hochwasser, Klimaszenarien, Klimawandel, Klimawirkungen, räumliche Planung, Vulnerabilität

Abstract

Regional scenarios of climate change are used to evaluate impacts and risks using vulnerability assessments. The scenarios should not be seen as weather type forecasts, but as tools to analyze alternative future perspectives and their consequences. The role of climate scenarios together with additional factors for the assessment of regional vulnerability and adaptability are described. Given examples with references to spatial planning are water resource management, river floods, coastal protection, agriculture and forestry as well as nature protection and landscape conservation.

Keywords: adaptation, extreme events, floods, climate change, climate scenarios, climate impacts, spatial planning, vulnerability

1 Einleitung

Die Entwicklung regionalisierter Szenarien des Klimawandels hat in den letzten Jahren enorme Fortschritte gemacht und bietet mittlerweile eine gute Grundlage zur Ermittlung möglicher Auswirkungen und damit verbundener Risiken. Aus diesen Klimaszenarien lassen sich jedoch nicht unmittelbar regionale Risiken ableiten. Ziel dieses Beitrags ist es aufzuzeigen, welche weiteren Faktoren wesentlich sind und wie sich Klimaszenarien interpretieren und für Anpassungsstrategien einsetzen lassen. Dies erfordert auch einen Bewusstseinswandel, Klimaszenarien nicht als Prognosen in der Art von Wettervorhersagen anzusehen sondern als Werkzeuge, um verschiedene alternative Zukunftsperspektiven auf ihre Folgen hin zu analysieren. Wir verwenden dazu den Begriff Projektion. Mit unterschiedlichen Projektionen in die Zukunft lassen sich bestehende Unsicherheiten berücksichtigen und im Idealfall verschiedene Anpassungsstrategien auf ihre regionale und sektorale Wirksamkeit sowie eventuelle Nebenwirkungen untersuchen. Hier liegt auch der Bezug zur räumlichen Planung mit ihren Maßnahmen und Möglichkeiten zur Anpassung.

Beim Klimawandel wie auch bei räumlicher Planung geht es um heutige Entscheidungen unter Unsicherheit, die Weichenstellungen für zukünftige Entwicklungen sind. Eine gemeinsame Per-

spektive ist neben dem Klimaschutz die Eingrenzung zukünftiger Risiken in klimaverletzlichen Regionen durch Maßnahmen der Anpassung. Während für den Klimaschutz durch die Meseberger Beschlüsse der Bundesregierung (BMU 2007) ehrgeizige politische Zielvorgaben hinsichtlich einer Reduktion der Treibhausgase formuliert worden sind, liegen Ziele und Ansätze einer nationalen Anpassungsstrategie noch weniger konkret in einem ersten Konzept vor (BMU 2008). Die Anpassung an den Klimawandel hat dabei eine starke regionale Komponente mit unterschiedlichen administrativen Zuständigkeiten und Interessen, die eine Ausformulierung von Strategien erschweren. Zur Überwindung damit verbundener Barrieren bedarf es ebenfalls eines Bewusstseinswandels, um die auch für Deutschland bestehenden Risiken im Hinblick auf Klimafolgen wahrzunehmen und Anpassungsmaßnahmen rechtzeitig, das heißt jetzt, einzuleiten.

2 Raumbezogene Ermittlung der Vulnerabilität

Erwartungsgemäß wird der Klimawandel vermehrte Gefahren für Menschen und schützenswerte Güter weltweit und auch in Deutschland mit sich bringen. Die mit einem veränderten Auftreten von Extremereignissen verbundene Gefährdung kann durch das Risiko als Maß für die Wahrscheinlichkeit des Eintritts der damit verbundenen Schäden quantifiziert werden. Daneben gibt es aber noch Schäden, die nicht aus Einzelereignissen herrühren, sondern aus einer Trendverschiebung der Betriebsbedingungen in relevanten Wirtschaftssektoren aus ihrem für das bisherige regionale Klima ermittelten Optimum. Die Konsequenzen des Klimawandels ergeben sich nicht direkt aus den Ergebnissen der Klimamodelle, sondern erfordern Methoden zur Analyse der raum- und sektorbezogenen Vulnerabilität.

Wir verwenden den aus dem englischen abgeleiteten Begriff Vulnerabilität für Verwundbarkeit gegenüber dem Globalen Wandel und Klimawandel in Anlehnung an Turner et al. (2003). Vulnerabilität bedeutet die Anfälligkeit des Mensch-Umwelt-Systems gegenüber den in der Regel nachteiligen Auswirkungen des Klimawandels. Der Klimawandel umfasst Veränderungen von Mittelwert, Variabilität und Extremen der regionalen Klimaparameter. Die Auswirkungen hängen von der Dynamik dieser Veränderungen und der Dynamik der Reaktion des Systems darauf ab. Letzteres wird durch die Empfindlichkeit und das Anpassungspotenzial des Systems bestimmt.

Das Vulnerabilitätskonzept ist in mehreren wissenschaftlichen Kontexten unabhängig voneinander entwickelt worden und aus diesen Gründen gibt es auch immer wieder Verständnisprobleme zwischen Wissenschaft und Entscheidungsträgern (vgl. Birkmann 2006). Während die Klimawirkungsforschung hauptsächlich die langfristige Entwicklung betrachtet und die Anpassungskapazität dabei berücksichtigt (prozessbezogener Ansatz), ist in der Katastrophenforschung dieser Begriff mit der Risikoterminologie verknüpft und ereignisbezogen (z.B. Schutz vor konkreten Extremereignissen). Dies führt in der Diskussion oft zu Verwirrung, vor allem, weil auch noch eine sich überschneidende Terminologie für den Begriff der Anpassung verwendet wird („Adaptation“ in der Klimafolgenforschung entspricht dem Begriff „Nachhaltige Mitigation“ in der Katastrophenforschung). Das Vulnerabilitätskonzept erfordert darüber hinaus eine gemeinsame und systematische Basis für die Analyse von Gebietseinheiten oder Sektoren und einen Vergleich der Resultate. Auf diese Weise lässt sich ermitteln wo raumbezogen und in welchem Sektor Handeln notwendig erscheint und welche Prioritäten zu setzen sind.

2.1 Analyse regionaler Vulnerabilität im Klimawandel

Angesichts unvermeidlicher Unsicherheiten der zukünftigen regionalen Klimaänderungen und den damit verbundenen Schwierigkeiten der Planer spielt das Vulnerabilitätskonzept eine heraus-

ragende Rolle, schematisch skizziert in **Abb. 1**. Im Zentrum der Analyse steht ein klimasensitives System mit den vom Klimawandel betroffenen wirtschaftlichen Sektoren und Ressourcen einer Region. Als Klimastimulus bezeichnen wir hier die Merkmale einer regionalen Klimaänderung, die in einer Ursache-Wirkungs-Beziehung bestimmte (oftmals nachteilige) Klimawirkungen auf das System zur Folge haben. Zwei Typen von Klimastimuli mit verschiedenartigen Ursache-Wirkungs-Beziehungen sind grundsätzlich zu unterscheiden:

- Allmähliche Trendverschiebungen der Klimaparameter (Mittel- und Extremwerte) mit der Folge, dass ökologisch oder ökonomisch an das bestehende Klima optimierte Prozesse weniger effizient oder anders verlaufen und
- charakteristische Veränderungen in Häufigkeit, Andauer und Stärke von Extremwetterereignissen dergestalt, dass bestehende Risiken sich verschärfen oder bisher in einer Region vernachlässigbare Risiken relevant werden.

Die Klimaszenarien liefern vor allem Klimastimuli des ersten Typs, beim zweiten Typ lassen die noch bestehenden Unsicherheiten nur sehr vorsichtige Eingrenzungen der Risiken zu, vor allem mit Hilfe nichtklimatischer Indikatoren der Vulnerabilität.

Abbildung 1

Analyseschema der Vulnerabilität klimasensitiver Systeme. 1) Die Klimaänderung ist ein Stimulus zur des Zustandsänderung des Systems = Klimawirkung. 1+) parallel wirken zivilisatorische Umwelt- und Zustandsänderungen, z.B. Landnutzungsänderungen. 2) Rückwirkungen von Klimawirkungen auf die Umwelt oder interne Systemparameter ergeben sekundäre Klimawirkungen. 3) proaktive Anpassung an zukünftig erwartete Klimawirkungen, z.B. in der räumlichen Planung.

Ursachen und Wirkungen sind in Vulnerabilitätsanalysen nach Abb. 1 wie folgt verknüpft:

(1) Ein System befindet sich in einem Zustand, der durch interne und externe, umweltbestimmte Prozesse hergestellt wird. Dieser Zustand macht es gegenüber Klimastimuli mehr oder weniger empfindlich, was eine entsprechende Klimawirkung zur Folge hat. Bisher beschränken sich Klimafolgenanalysen weitgehend auf diesen Teil der Wirkungskette, wobei als Klimastimuli z.B. Veränderungen der regionalen Klimaparameter aus Klimamodellrechnungen verwendet werden.

(1+) Parallel zum Klimawandel verändern andere zivilisatorische Einflüsse die Umweltbedingungen und den Zustand des Systems und damit wiederum die Klimawirkungen. Die Berücksichtigung dieser Einflussfaktoren in Form von regionalen Indikatoren, soweit sie in Form von Geodaten vorliegen, liefert wesentliche Erkenntnisse zur Klimasensitivität auch da, wo die Klimaszenarien zu unsichere Daten liefern. Dies ist zum Beispiel bei der Abschätzung der Risiken von Extremwetterereignissen hilfreich, wie weiter unten gezeigt werden wird.

(2) Die Klimawirkung eines Klimastimulus hat wiederum Umweltveränderungen und damit eine Zustandsänderung des Systems zur Folge, z.B. eine Beschädigung. Dies kann die Klimasensitivität gegenüber weiteren Klimastimuli, wie z.B. Extremwetterereignissen, erhöhen und wiederum sekundäre Klimawirkungen mit kritischeren Folgen nach sich ziehen, als es ohne die Vorschädigung der Fall wäre.

(3) Der Zustand eines Systems und damit seine Klimasensitivität wird wie schon erwähnt vor allem durch eine Vielzahl zivilisatorischer Einflüsse bestimmt, z.B. durch Vorsorge und Reparaturmaßnahmen. Hier setzt proaktiv und vorsorgend die Anpassungsstrategie bei Planung und

Ausführung unter Berücksichtigung der zu erwartenden Wirkungen des Klimawandels an, um die Klimasensitivität und damit mögliche Schäden zu verringern.

Die Vulnerabilität eines „klimasensitiven Systems“ hinsichtlich der Wirkungen des Klimawandels ist daher eine Funktion des Klimastimulus, seiner Größenordnung und Rate, der Sensitivität (Empfindlichkeit gegenüber dem Stimulus) des betrachteten Systems und dessen adaptiver Kapazität, als Teil zivilisatorischer Einflüsse, wie z.B. der räumlichen Planung. **Tab. 1** listet Beispiele für die Elemente von Vulnerabilitätsanalysen auf.

Tabelle 1 Beispiele für Elemente von Vulnerabilitätsanalysen (ohne Anspruch auf Vollständigkeit). Einige Stimuli und Wirkungen treten bei mehreren klimasensitiven Systemen auf.

Klimastimulus	klimasensitives System	zivilisatorische Einflüsse	Klimawirkung
Temperaturanstieg	Gletscher, Permafrostgebiete	Luftverschmutzung	Gletscherschwund
Meeresspiegelanstieg	Küsten und Niederungen	Küstenschutz	Landverlust d. Sturmfluten
mehr, längere und stärkere Stürme	Wald- und Forstgebiete	Forstmanagement, Landnutzung	mehr Sturmschäden
intensivere und längere Hitzewellen	städtische Ballungsräume	Stadt- und Gebäudeplanung, Sozialstruktur	Einbußen an Lebenstagen und Lebensqualität
mehr und längere Trockenperioden	Agrarwirtschaft	Sortenwahl, Landnutzung und -bewirtschaftung	vermehrte Ernteeinbußen und -ausfälle
mehr, extremere und längere Regenfälle	Flusseinzugsgebiete und Hochwasserzonen	Gewässer- und Einzugsgebietsmanagement	mehr Überflutungs- und Erosionsschäden
extremere Kälteperioden und Eisregen	Infrastruktur und Transport	Logistik und betriebswirtschaftliches Management	Produktionsausfälle und Infrastrukturschäden
veränderte Wasserbilanz	Wasserressourcen	Management von Stau- und Rückhaltesystemen	Rückgang bei Grundwasser- und Seenspiegel
veränderte Klimazonen	Ökosysteme und Ökosystemfunktionen	Naturschutz, Landnutzung	veränderte Artenvielfalt und Artenmigration

2.2 Einsatz nichtklimatischer Indikatoren in Vulnerabilitätsanalysen

Die Bestandteile, Parameter und Prozesse, die Klimastimulus, klimasensitives System sowie die zivilisatorische Einflüsse beschreiben, basieren in der Regel auf Modellergebnissen, es können aber auch aus Modell- und Beobachtungsdaten generierte Indikatoren miteinander verknüpft werden. Letzteres bietet sich insbesondere an, wenn die Klimamodelle keine ausreichend zuverlässigen Ergebnisse liefern, beispielsweise bei Extremwetterereignissen wie konvektive Starkregen, Stürme oder Hagel. Hier können zusätzliche Geodaten zur Sensitivität des Systems einen Ausgleich für die bestehenden Unsicherheiten der Klimaszenariendaten liefern. **Abb. 2** zeigt das Ergebnis einer indikatorbasierten Analyse der regionalen Vulnerabilität des Forstsektors in Nordrhein-Westfalen gegenüber Wetterextremen, hier Sturmereignissen (Kropp et al. 2006) im Vergleich mit später tatsächlich eingetretenen Sturmschäden durch den Orkan Kyrill (NRW 2007). Die verwendeten Geodaten zur Analyse der regionalen Vulnerabilität sind Hangneigung, Baumarten und statistisch erfasste Sturmhäufigkeit in der Vergangenheit. Die gute Übereinstimmung zeigt, wie fehlende Genauigkeit der Klimaszenariendaten, z.B. bei der Windgeschwindigkeit und deren Extremen, durch andere Daten ergänzt werden kann. Analysen dieser Art weisen auch den Weg in Richtung Anpassung, wie Abb. 2 unten zeigt. Die aggregierten Schadensklassen belegen eine geringere Vulnerabilität von Laub- und Mischwäldern gegenüber Stürmen als Nadelwaldmonokulturen. Ein frühzeitiger Waldumbau ist also ein Mittel der Wahl.

Abbildung 2

Oben links: Regionales Muster der Vulnerabilität des Forstsektors in Nordrhein-Westfalen gegenüber Wetterextremen, d.h. Sturmereignisse, ermittelt 1999 basierend auf Baumarten, Hangneigung und Sturmhäufigkeit (Kropp et al. 2006). Oben rechts: Erhebung der Sturmschäden des Orkans Kyrill, Januar 2007, sowie unten: Auswertung der aggregierten Schadensklassen (nach NRW Forst & Wald 2007).

Ein weiterer Aspekt, der bei der Analyse der Vulnerabilität klimasensitiver Systeme bislang oft vernachlässigt wird, ist die soziale Differenziertheit von Vulnerabilität, d.h. nicht alle Akteure in einem klimasensitiven System sind gleich verwundbar. Schließlich ist auch die Anpassungsfähigkeit nicht für alle Menschen gleich, wer etwa die Gefahren weniger wahrnimmt oder über geringere finanzielle Mittel verfügt, wird sich weniger anpassen können (vgl. IPCC FAR 2007, WG II, Kap. 17). So sind etwa unterschiedliche Bevölkerungsgruppen gegenüber auftretenden Klimastimuli verschieden exponiert, z.B. war der Anteil schwarzer und armer Menschen in den von Hurrikan Katrina in New Orleans 2005 überschwemmten Gebieten höher als in den weniger betroffenen Gebieten (Cutter 2006).

Ein anderes Beispiel ist die Anfälligkeit gegenüber Hitzewellen, die ebenfalls sozial ungleich verteilt ist, da alte und kranke Menschen besonders sensitiv sind. Bei einer Untersuchung der Auswirkungen des Klimawandels auf die witterungsbedingte Mortalität in Baden-Württemberg wurde die geschätzten witterungsbedingten Todesfälle im Basisszenarium (1951-2000) mit den prognostizierten für das Zukunftsszenarium (2001-2055) für einzelnen Kreise miteinander verglichen (Koppe, Jendritzki 2004). Die Bewertung der thermischen Umweltbedingungen (Exposition) wurde mit dem Standardverfahren des Deutschen Wetterdienstes, dem Klima-Michel-Modell, vorgenommen. Die zentrale Größe zur Charakterisierung der thermischen Umwelt des menschlichen Körpers ist dabei die „gefühlte Temperatur“, die aus Lufttemperatur, Windgeschwindigkeit, Wasserdampfdruck und mittlerer Strahlungstemperatur berechnet wird. Durch Festlegung von Schwellenwerten der gefühlten Temperatur werden 9 thermische Belastungsklassen von „extremer Kältestress“ bis „extreme Wärmebelastung“ definiert. Diese Belastungsklassen beziehen im Gegensatz zu verschiedenen anderen Indizes die kurzfristige Anpassung an die aktuellen Witterungsbedingungen durch eine jahreszeitliche Abhängigkeit der Schwellenwerte mit ein. In der Untersuchung hat der Vergleich zwischen Basis- und Zukunftsszenarium gezeigt, dass es zu einem deutlichen Anstieg der Anzahl der Tage mit Wärmebelastung und zu einem Rückgang der Anzahl der Tage mit Kältestress kommen wird. Dabei fällt der Anstieg der Zahl der Tage mit Wärmebelastung relativ gesehen stärker aus als der Rückgang des Kältestresses. Neben der Auftretenshäufigkeit thermischer Belastungen wurde die Sensitivität der Bevölkerung für diese Art von Stress bestimmt.

Auf der Basis von täglichen Sterbefallzahlen für das gesamte Bundesland von 1968 bis 2003 wurde die Sensitivität der Bevölkerung für jede der 9 thermischen Belastungsklassen - aufgeteilt in zwei Altersgruppen (unter und über 75 Jahre) - abgeschätzt. Dabei zeigte sich, dass die Bevölkerungsgruppe über 75 Jahre besonders sensitiv auf thermische Belastung reagiert (siehe **Abb. 3**). Unter der Annahme, dass sich die altersspezifische Sensitivität über den gesamten Zeitraum des Basis- und Zukunftsszenariums nicht ändert und unter Verwendung von demographischen Szenarien für den Anteil der über 75-Jährigen, wurde die Sensitivität der Gesamtbevölkerung in den einzelnen Kreisen in den Zukunftszeitraum extrapoliert.

Abbildung 3

Sensitivität (Mittelwert der Mortalität in Prozent des Erwartungswertes) für die einzelnen thermischen Belastungsklassen in Baden-Württemberg für den Zeitraum 1968-2003 getrennt für die Altersgruppen unter und über 75 Jahre und die Gesamtbevölkerung unter Berücksichtigung der jeweils optimalen Zeitverschiebungen. Die Balken stellen die Standardabweichung der Mittelwerte dar. (Stock 2005a, nach Koppe und Jendritzky 2004).

Das Produkt aus der Auftretenshäufigkeit einer thermischen Belastung und der Sensitivität der Bevölkerung für diesen Stress liefert die Vulnerabilität, wobei mögliche zukünftige Anpassungsmaßnahmen hier nicht berücksichtigt wurden. Ein Vergleich zwischen Basis- und Zukunftsszenarium zeigt, dass sich die Vulnerabilität der Bevölkerung für Wärmebelastung über alle Landkreise gemittelt um ca. 20% erhöht. Im Zukunftsszenarium ist daher landesweit mit jährlich 180 bis 400 zusätzlichen hitzebedingten Todesfällen zu rechnen. Der ermittelte Rückgang der Vulnerabilität für Kältestress kann diesen Anstieg nicht kompensieren.

2.3 Interpretation und Einsatz regionaler Klimaszenarien

Im Unterschied zu Wetterprognosen, die das Wetter unter der Annahme weitgehend deterministischer meteorologischer Prozesse möglichst genau vorhersagen, liefern Klimamodelle auf der Basis unterschiedlicher demographischer, sozioökonomischer und technologischer Szenarien eine andere Art von Prognosen, die als verschiedene alternative Projektionen möglicher zukünftiger Veränderung der Klimaparameter anzusehen sind. Dazu werden als Antrieb plausible Zukunftswelten definiert, die natürlich auch mit unterschiedlichen Emissionen verbunden sind, sog. SRES-Szenarien (IPCC 2001). Da viele der zu berücksichtigen Faktoren, wie Bevölkerungs- oder Wirtschaftsentwicklung nicht exakt vorhersagbar sind, existieren eine Reihe solcher Zukünfte, die je nach Ausprägung z.B. eine Weltbevölkerung von 7 oder 15 Milliarden im Jahre 2100 annehmen. Verglichen mit dem physikalischen Wissen über Klimaprozesse, ist die Unsicherheit in den demographischen und technologischen Basisannahmen daher sehr viel größer. Auf der Basis solcher Annahmen lassen sich langjährige Trendentwicklungen der Klimaänderung angeben, während eine auch nur näherungsweise Prognose der spezifischen klimatischen Variabilität in einem bestimmten kürzeren Zukunftszeitraum, z.B. für ein bestimmtes Jahr, nicht möglich ist. Dies hat seine Ursache in den zufälligen, nicht determinierbaren Wetterprozessen und spiegelt sich auch in den Unterschieden verschiedener Modellrechnungen auf der „Kurzzeitskala“ wieder. Unter gleichbleibenden Rand-, aber veränderten Anfangsbedingungen, unterscheiden sich verschiedene Rechenläufe und ergeben so verschiedene Realisierungen von Zukunftsprojektionen.

Abb. 4 veranschaulicht die zufallsbedingte Unsicherheit am Beispiel des Verlaufs der Jahresmitteltemperaturen von 1950 bis 2055, berechnet für Brandenburg mit dem statistischen Regionalmodell STAR (Gerstengarbe et al. 2003). Den beobachteten Temperaturen im Zeitraum 1950-2000 stehen verschieden realisierte Jahrestemperaturverläufe im Zeitraum 2001-2055 gegenüber, die den gleichen Trend der Temperaturzunahme zeigen. Entsprechend unterscheiden sich die Realisierungen auch bezüglich der übrigen Klimaparameter wie z.B. der Niederschlagsverteilung oder der klimatischen Wasserbilanz. Dies gilt prinzipiell für alle Klimamodellrechnungen, unabhängig von Typ und räumlich-zeitlicher Auflösung, und die Ursache dafür ist eine nicht restlos auflösbare grundsätzliche Unbestimmtheit der Zukunft.

Abbildung 4

Verlauf der Jahresmitteltemperaturen von 1950 bis 2055. Den beobachteten Temperaturen im Zeitraum 1950-2000 stehen verschieden realisierte Temperaturverläufe mit gleichem

Trend der Temperaturzunahme im Zeitraum 2001-2055 gegenüber, berechnet für Brandenburg mit dem statistischen Regionalmodell STAR (Gerstengarbe et al. 2003).

Die mit einem Klimamodell berechneten verschiedenen Realisierungen des zukünftigen Regionalklimas sind im Prinzip mögliche Zukunftspfade mit unterschiedlichen Eintrittswahrscheinlichkeiten. Hinzu kommen außerdem die zum Teil beträchtlichen Unterschiede, die die verschiedenen Modelle bezüglich der mittleren zeitlichen Entwicklung der Klimaparameter liefern und Ausdruck bestehender Unsicherheiten der Modellierung sind. Bei der Ermittlung der Klimastimuli und damit der zu erwartenden Klimawirkungen ist weniger die räumliche Auflösung der limitierende Faktor, als vielmehr die Unbestimmtheit des stochastischen Zeitverlaufs sowohl in der Wirklichkeit, wie auch in solchen Realisierungen, und zwar schon hinsichtlich der saisonalen oder mehrjährigen Verteilung der Klimaparameter. Das Streben nach möglichst hoher räumlich-zeitlicher Auflösung kann die Unsicherheiten sogar vergrößern.

Verschiedene Realisierungen unterscheiden sich, trotz gleicher Trendentwicklung der gemittelten Klimaparameter, hinsichtlich der Auswirkungen. Langandauernde zusammenhängende Hitze-, Dürre- oder Regenperioden haben in der Summation der Effekte kritischere Auswirkungen, als viele verteilte Extremtage im Wechsel mit weniger extremen Tagen. Erst recht gilt das für das gehäufte Auftreten trockener oder nasser Jahre hintereinander, wie in dem in der Bibel angeführten Beispiel der sieben fetten und sieben mageren Jahre (1.Mose 41). Der Grund ist, dass das klimasensitive System aus den mageren Vorjahren bereits geschädigt ist und weitere, zusätzliche Schäden daher verheerendere Klimawirkungen zeigen können als dies bei durchmischten Jahresabfolgen mit zwischenzeitlichen Erholungsphasen der Fall ist. Betrachtet man Extremwerte oder risikorelevante Extremwetterereignisse, so wird noch deutlicher, dass die von Klimamodellen berechneten Projektionen und Szenarien keine diesbezüglichen Prognosen des zukünftigen Klimas darstellen und alleine nicht ausreichen, die zu erwartenden regionalen Auswirkungen des Klimawandels zu ermitteln. Sie sind aber eine wesentliche Grundlage in Vulnerabilitätsanalysen mit möglichst unterschiedlichen Realisierungen und verschiedenen Klimamodellen.

In Deutschland werden derzeit vier regionale Klimamodelle verwendet. Es sind die statistischen Modelle WETTREG (CEC Potsdam) und STAR (PIK Potsdam) sowie die dynamischen Modelle REMO (MPI Hamburg) und CLM. Letzteres ist eine Gemeinschaftsentwicklung verschiedener Institutionen (CLM: Climate Limited-area Modelling Community, <http://clm.gkss.de/>). Szenarien für Deutschland aus Berechnungen der Modelle WETTREG und REMO stellt das Umweltbundesamt bereit (UBA 2007). Beim DWD und am PIK wurden Modellvergleiche durchgeführt. Beim DWD wurde untersucht, welche Unterschiede die regionalen Klimaszenarien zeigen. Erste Ergebnisse des Szenarienvergleichs sind in der im Dezember 2008 vorgestellten Deutschen Anpassungsstrategie an den Klimawandel dargestellt (BMU 2008). Dabei zeigen alle Ergebnisse der vier regionalen Klimamodelle deutliche Trends auf der Basis des antreibenden Globalmodells ECHAM5. Neben der Abhängigkeit vom gewählten Emissionsszenario unterscheiden sich die Resultate der regionalen Klimamodelle deutlich. Betrachtet man die räumliche Verteilung der Erwärmung beispielhaft für ein mittleres Emissionsszenario A1B (**Abb. 5**), so stimmen die dynamischen Klimamodelle REMO und CLM sowie das statistische Modell STAR hinsichtlich der Struktur einer sich nach Süden verstärkenden Erwärmung weitgehend überein. Das statistische Modell STAR regionalisiert dabei anhand der Vorgabe des Temperaturtrends des globalen Klimamodells und es ergibt sich für den Zeitraum 2021-2050 eine Erwärmung um 2°C. Demgegenüber weisen die dynamischen Klimamodelle mit Erwärmungen um 1°C für diesen Zeitraum nur etwa halb so hohe Werte aus. Das statistische Modell WETTREG zeigt für den Zeitraum 2021-2050 eine sich eher von Osten nach Westen

verstärkende Erwärmung mit Werten um $0,5^{\circ}\text{C}$ auf. Dieses Modell projiziert auch für den Zeitraum 2071-2100 mit Werten um 2°C die vergleichsweise geringste Erwärmung, während die dynamischen Klimamodelle REMO und CLM für diesen Zeitraum Erwärmungen um bis zu $3,5^{\circ}\text{C}$, in den deutschen Alpenregionen auch leicht darüber, erwarten lassen. Hinsichtlich der von der Erwärmung am stärksten betroffenen Jahreszeit sind sich hingegen alle Modelle einig: Diese wird besonders im Winter zu spüren sein.

Abbildung 5

Von den regionalen Klimamodellen REMO, CLM, WETTREG und STAR für das A1B-Emissionsszenario projizierte Änderung der Jahresmitteltemperatur in den Perioden 2021-2050 (oben) und 2071-2100 (unten) im Vergleich zum modellspezifischen Kontrollzeitraum 1961-1990. Quelle: Deutsche Anpassungsstrategie (BMU 2008), Auswertung des DWD.

Für die Auswirkungen des Klimawandels sind besonders auch Menge und Verteilung der Niederschläge maßgeblich. Zwar bleiben die Mengen in Deutschland auf das Jahr gerechnet annähernd konstant, doch muss mit einer Verschiebung des Niederschlagszyklus und der regionalen Verteilung gerechnet werden. So lassen die Ergebnisse aller vier Modelle schließen, dass die Niederschläge im Sommer bundesweit um bis zu 40% abnehmen könnten, wobei der Südwesten Deutschlands erneut besonders stark betroffen sein könnte (BMU 2008). Die Ergebnisse der statistischen Modelle deuten auch für den Osten Deutschlands auf abnehmende Niederschläge im Sommer hin. Im Winter dagegen könnten die Niederschlagsmengen abhängig vom Modell um 0% bis 40% zunehmen. Das statistische WETTREG-Verfahren zeigt in den Mittelgebirgsregionen der Bundesländer Rheinland-Pfalz, Hessen sowie den nordöstlichen Landesteilen Bayerns sogar Gebiete, in denen die Winterniederschläge für den Zeitraum 2071-2100 um bis zu 70% gegenüber dem Kontrollzeitraum 1961-1990 ansteigen könnten. Die dynamischen Klimamodelle CLM und REMO deuten zudem auf einen zusätzlichen Anstieg der Niederschlagsmengen im Frühjahr hin, der aber geringer ausfällt als in den Wintermonaten.

Aus dem vom DWD durchgeführten Vergleich von WETTREG und REMO ergibt sich, dass sich Extremereignisse künftig im Ausmaß steigern und häufiger werden könnten. Beispielsweise könnten sich die Anzahl von Sommertagen ($T > 25^{\circ}\text{C}$) bis zum Ende des Jahrhunderts verdoppeln, die Anzahl von heißen Tagen ($T > 30^{\circ}\text{C}$) sogar verdreifachen. Erste Analysen lassen erwarten, dass auch die Intensität von Starkniederschlägen ansteigen kann. Auf der Basis dieser ersten Betrachtungen lassen sich, was die Häufigkeiten von Sturmtagen betrifft, keine Unterschiede zu heutigen Verhältnissen feststellen. Hier sind noch weitere Untersuchungen erforderlich.

Am PIK wurde darüber hinaus untersucht, wie gut die Berechnungen für die vergangenen Jahrzehnte mit den Beobachtungsdaten übereinstimmen. Eine umfangreiche statistische Evaluierung der verschiedenen Modellergebnisse im Zeitraum 1976–2000 im Vergleich zu Beobachtungsdaten zeigt noch größere Unsicherheiten bei den dynamischen Modellen gegenüber den statistischen (Kücken et al. 2008).

2.4 Beispiel einer Analyse der Vulnerabilität in Deutschland

Eine erste umfassende Studie zur Vulnerabilität Deutschlands im Klimawandel hat das Potsdam Institut für Klimafolgenforschung (PIK) im Auftrag des Umweltbundesamtes (UBA) durchgeführt (Zebisch et al. 2005). Die Studie baut auf Ergebnissen des vom PIK koordinierten europäischen Verbundprojektes ATEAM auf (Schröter et al. 2004). Diese basieren auf einem Satz konsistenter, räumlich expliziter Szenarien des Globalen Wandels, einer Reihe von Ökosystemmodel-

len, Indikatoren für Ökosystemfunktionen sowie einem kontinuierlichen Dialog mit Stakeholdern. Die Analyse verzichtete auf den Einsatz regionaler Klimaszenarien und zeigt, dass man auch ohne hohe räumliche Auflösung der Klimastimuli wertvolle Erkenntnisse erhalten kann. Die auf den SRES-Szenarien (IPCC 2001) beruhenden Ergebnisse globaler Klimamodelle wurden auf eine Auflösung von 10'x10' (ca. 16km x 16km) herunterskaliert, wobei man sich der Unsicherheit dieses Verfahrens durchaus bewusst war. Innovativ ist die Studie auch dahingehend, dass auch die sozioökonomischen Einflussfaktoren der SRES-Szenarien hinsichtlich Landnutzung mit gleicher Auflösung zugrunde gelegt wurden, also etwa auf Landkreisebene.

Neben dem Projekt ATEAM dienten zahlreiche andere Studien und Projekte auf nationaler und regionaler Ebene als Informationsquelle. Um Einschätzungen der regionalen und bereichsspezifischen Bedeutsamkeit von potenziellen Auswirkungen des Klimawandels des bisherigen Anpassungsgrades und geeigneter Anpassungsmaßnahmen an diese Auswirkungen zu erhalten, wurde eine Expertenbefragung in den sieben untersuchten klimasensitiven Bereichen (Forstwirtschaft, Landwirtschaft, Wasserwirtschaft, Tourismus, Naturschutz / Biodiversität, Gesundheit und Verkehr) in verschiedenen Regionen Deutschlands durchgeführt. Als Regionen für diese Bewertung wurden verschiedene Naturräume hinsichtlich ihrer klimasensitiven biologischen und geographischen Faktoren identifiziert (siehe **Abb. 6**).

Abbildung 6

Bewertete Naturräume unterschiedlicher Vulnerabilität hinsichtlich der in Abbildung 7 dargestellten potenziellen Auswirkungen des Klimawandels (Zebisch et al. 2005).

Zur Einschätzung der Vulnerabilität wurden die Ergebnisse der innerhalb dieses Projektes berechneten Szenarien potenzieller Auswirkungen des Globalen Wandels in Deutschland, Befunde anderer Studien und Projekte und die Resultate der Befragungen integriert. Die Ergebnisse wurden auf mehreren, vom UBA durchgeführten Klimafachgesprächen und auf einem Stakeholder-Workshop mit Vertretern aus Politik, Verwaltung, Wirtschaft und Gesellschaft zur Diskussion gestellt; **Abb. 7** zeigt eine zusammenfassende Matrix-Darstellung der regionalen und sektoralen Vulnerabilität in Deutschland, aber noch ohne Berücksichtigung weiterer Maßnahmen der Anpassung. Deren Einfluss auf die Vulnerabilität wird derzeit am PIK in mehreren Projekten untersucht. Dabei werden statt der globalen Klimaszenarien die Szenarien der Regionalmodelle verwendet. Wesentlich für eine genauere Analyse der Vulnerabilität ist aber nicht die vergrößerte räumliche Auflösung der Klimadaten, sondern deren Ergänzung durch nichtklimatische Geodaten und andere raumbezogenen Informationen.

Abbildung 7

Zusammenfassende Darstellung der regionalen und sektoralen Vulnerabilität gegenüber Globalem Wandel und Klimawandel in Deutschland ohne weitere Maßnahmen der Anpassung (Zebisch et al. 2005).

3 Mögliche Auswirkungen des Klimawandels in Deutschland

Höhere Temperaturen und veränderte Niederschlagsmuster zeigen auch in Deutschland bereits spürbare Auswirkungen, wie eine allmähliche Verschiebung der regionalen Verteilung der Klimatypen mit signifikanten Unterschieden der räumlichen, jährlichen und saisonalen Verteilung von Temperatur- und Niederschlagsänderungen (Gerstengarbe und Werner (2003)). Es zeigte sich neben dem beobachteten mittleren Anstieg der Temperatur um 1,2°C regionale Unterschiede zwi-

schen 0 und +2,3°C. Auch die Struktur der Niederschlagsverteilung zeigt große räumliche Unterschiede und hängt im Wesentlichen von der Orographie ab.

Im weiter fortschreitenden Klimawandel werden in Deutschland vordringlich Extremwetterereignisse und Hochwasser an Flüssen im Fokus stehen. Außerdem sind die Küsten durch den Meeresspiegelanstieg, der Alpenraum durch Gletscherschmelze und Schneearmut verstärkt betroffen sowie die Land- und Forstwirtschaft durch Trockenheit und Hitze. Die primären Auswirkungen *in* Deutschland, die im Kontext von Maßnahmen der räumlichen Planung von Interesse sind, sollen im Folgenden exemplarisch an diesen Beispielen diskutiert werden.

3.1 Gewässer und Wasserwirtschaft

In den langfristigen Trends bei den Grundwasserständen, der Änderung alpiner Abflussregime, z.B. von Rhein und Donau, oder bei der Veränderung der Gewässergüte zeigen sich die möglichen Auswirkungen des Klimawandels auf den Wasserhaushalt. Hinzu kommt auch ein zu erwartendes häufigeres Auftreten von Extremereignissen, wie Hochwasser, Sturmfluten und Dürren. Zunehmend werden Seen und Flüsse im Sommer niedrige Pegelstände und sinkende Wasserqualität zeigen. Dabei verstärken sich zudem die bereits bestehenden regionalen Unterschiede in der Wasserverfügbarkeit, z.B. im Osten Deutschlands, der stärker als der Westen von Dürre betroffen ist. Durch den Klimawandel ergeben sich erhöhte Herausforderungen an das komplexe Zusammenspiel der Gewässernutzungen, woraus vielfältige Anpassungserfordernisse auf Seiten der Bundesländer für die Wasserwirtschaft und den Hochwasserschutz erwachsen. Die möglichen Auswirkungen von Dürreperioden hängen stark von der Entwicklung der Wasserressourcen sowie einem angepassten Wassermanagement ab. Das erfordert im Bereich der Wasserwirtschaft eine stärkere Flexibilität hinsichtlich der zu erwartenden stärkeren Variabilität bei Niederschlägen und Abflüssen. Neben einer gefahrlosen Ableitung der zu erwartenden Starkniederschläge kommt dem Schutz natürlicher Speicherfunktionen von Böden und Vegetation im Landschaftswasserhaushalt eine zunehmende Bedeutung zu, wobei standortbedingt auch eine dezentrale Versickerung von geklärtem Abwasser in Betracht zu ziehen ist. Die Deutsche Anpassungsstrategie listet zum Wassersektor einige Brennpunkten und Handlungserfordernissen auf (BMU 2008).

Schnee in allen Regionen und zusätzlich Gletscher im Alpenraum sind bedeutsame Süßwasserspeicher, die als Ressource für die Landwirtschaft und Trinkwassergewinnung genutzt werden, um die es bereits heute Konkurrenz zwischen Skitourismus und Landwirtschaft gibt. Dazu gibt es eine Studie von Hahn (2004). So speichern Skiliftbetreiber Wasser in Teichen im hochalpinen Bereich, um im Falle von Schneearmut die touristische Auslastung sichern zu können. Für einen Hektar Skipiste benötigt man in einer Saison in etwa 4000 m³ Wasser zu Beschneigung. Im ganzen Alpenraum existieren zurzeit ca. 25 km² Piste (~25%), die künstlich beschneit werden können. Dies entspräche einem Wasserverbrauch von mehr als 90 Mio. m³, etwa der Verbrauch einer Stadt wie Hamburg innerhalb eines ganzen Jahres. Entzogen wird der Natur das Wasser nicht nur in der Zeit in der das meiste freie Wasser gebunden ist, also von November bis Februar, sondern die Wasserfassungsanlagen werden auch zunehmend im Sommer aufgefüllt. In Frankreich führen Alpenflüsse im Winterhalbjahr bereits bis zu 70% weniger Wasser als vor der Einführung von Schneekanonen (de Jong 2008). Besonders nach schneearmen Wintern wie z.B. im Jahr 2006/2007 zeigen sich deutliche Effekte auch für große Flüsse, die 2007 Rekordniedrigstände aufwiesen. In den Alpen nimmt der Bestand an Beschneigungsanlagen weiter rasant zu, in Bayern z.B. zwischen 1997-2002 um 140% (Hahn 2004). Die OECD (2006) schätzt, dass die Schneesicherheit für Skigebiete bis zum Ende des Jahrhunderts massiv abnehmen wird, d.h. der Konkurrenzdruck um Wasser in den Alpen wird sich, zumindest temporär, verschärfen. Für Deutschland

gilt das bei nur 1°C Temperaturerhöhung für über 60% der Skigebiete. Schmelzende Gletscher und Permafrostböden können vorübergehend extremere Abflüsse in den Alpen bedeuten, begleitet von Abgängen von Muren und Schlammlawinen. Schmelzen die Gletscher weiter ab und bleibt Schneefall aus, können viele Flüsse zukünftig zu saisonalen Flüssen werden. Dies kann sich am Ende des Jahrhunderts auch auf die Schifffahrt der großen Ströme (Donau, Rhein) negativ auswirken.

3.2 Veränderung bei Extremereignissen - Beispiel Hochwasserrisiken

Die physikalischen Prozesse der globalen Erwärmung machen es sehr wahrscheinlich, dass Intensität und Frequenz von Wetterextremen zunehmen wird, wenn auch regional unterschiedlich. Die beobachteten zeitlichen Veränderungen der Niederschlagsstatistik zeigen eine Vergrößerung der Varianz, d.h. sowohl einen Trend zu mehr Starkregen- als auch zu mehr Trockentagen (Trömel, Schönwiese 2009). Gleichwohl ist zwischen Wetter- und Klimaextremen zu unterscheiden. Das Klima ist auf die Analyse von mittleren Eigenschaften des Wetters ausgerichtet. Obwohl eine bessere Repräsentation von Extremen in Modellen angestrebt wird und auch Gegenstand der Forschung ist, werden diese reale Extreme nicht in allen wesentlichen Eigenschaften abbilden können. Die Wetterextreme sind aber für Entscheidungsträger wichtig, sei es aufgrund der Nachjustierung von Bemessungsgrößen, oder wegen einer konkreten Risikoeinschätzung. Auch der IPCC betont in seinen Berichten, dass Projektionen allein nicht für eine Risikoeinschätzung ausreichend sind, sondern das Erfahrungen aus der Vergangenheit (z.B. jene der Hitzewelle 2003) mit in das Kalkül einbezogen werden müssen (Beniston 2004, Rebetez et al. 2006). Dennoch verfügt die Klimawirkungsforschung über Hinweise wo zukünftig Entwicklungen besonders problematisch werden (Alexander et al. 2006, Klein-Tank et al. 2003, Luterbacher et al. 2004). Weitere Instrumente hierfür sind der ‚Climate Change Index‘ von Bättig et al 2007 oder auch Projektionsverfahren zukünftiger Hitzewellen (Diffenbaugh et al. 2007).

Die Klassifizierung von Wetterextremen ist nicht ausschließlich eine statistische Größe, denn die Gesellschaft entscheidet - zumindest partiell - was als extrem empfunden wird und was nicht. Mithin ist jedes statistische Verfahren eine Hilfskonstruktion, um Risiken einschätzen zu können. Zudem basieren Schätzgrößen zur Häufigkeit von Extremen auf empirisch gemessenen Daten, also auf der Vergangenheit, für die methodisch obligatorisch zusätzlich Stationarität und eine Unabhängigkeit der Ereignisse angenommen werden muss (Fisher-Tippet Theorem). Dieses sind mit Bezug auf die Klimaprojektionen sehr unwahrscheinliche Annahmen. Ähnlich wie bei See- deichen auch werden Bemessungsgrößen für Flussdeiche auf der Basis von Flutjährlichkeiten (z.B. 100-jährige Wiederkehr) bestimmt. Weil bekannt ist, dass diese Messgrößen unsicher sind, werden beispielsweise in Bayern Unsicherheitszuschläge von 10-15% und zusätzlich ein Klimafaktor von 10-20% addiert. Neuere methodische Entwicklungen (Kropp und Schellnhuber 2009) zeigen jedoch, dass verbesserter Bewertungsverfahren möglich und der Informationsgehalt empirischer Messreihen bei weitem noch nicht ausgeschöpft ist, wie am Beispiel der Bemessungswasserstände für das Donaueinzugsgebiet (**Abb. 8**) gezeigt wird. Es zeigt sich in der Analyse, dass die Jährlichkeit von 100-jährigen Ereignissen mit Standardverfahren entweder deutlich über- oder deutlich unterschätzt werden. Im Mittel kann man für 100-jährige Ereignisse von 10-20% zu niedrigen Wiederkehrschwellen ausgehen. Das das Bild für eine Einzugsgebiet sehr uneinheitlich sein kann, zeigt die Abb. 8 unten. Hier sind die Trendentwicklungen der Pegel im Donaueinzugsgebiet dargestellt, wobei rot einen steigenden, grün einen fallenden und türkis keinen Trend bedeutet. Es spielt dabei eine Rolle, das Wiederkehrschwellen und Trends außer von der Niederschlagsentwicklung von verschiedenen anderen Faktoren abhängen, die in Vulnerabilitätsanaly-

sen integriert mit der Klimaveränderung betrachtet werden müssen, um planungsrelevante Schlüsse ziehen zu können.

Abbildung 8

Veränderung der momentanen Bemessungswasserstände für das Donaueinzugsgebiet (Schutzlevel) unter Berücksichtigung von internen Korrelationen sowie Nichtstationarität (oben). Es zeigt sich, dass die Jährlichkeit von 100-jährigen Ereignissen bisher entweder deutlich über- oder unterschätzt wurden. Das das Bild für eine Einzugsgebiet sehr uneinheitlich sein kann, zeigt die Abbildung unten. Hier sind die Trendentwicklungen der Pegel im Donaueinzugsgebiet dargestellt, wobei rot einen steigenden, grün einen fallenden und türkis keinen Trend bedeutet.

3.3 Küsten- und Meeresschutz

Der projizierte Meeresspiegelanstieg ist ein besonders gutes Beispiel für die unterschiedlichen Zeitskalen des Klimawandels. Die Kryosphäre reagiert auf eine Erwärmung ca. 1000mal langsamer als die Atmosphäre selbst, wobei der Anstieg zur Zeit ca. je zur Hälfte durch abschmelzende Inlandeismassen und thermischer Ausdehnung verursacht wird. Es besteht daher ein Unterschied hinsichtlich des Gleichgewichtes zwischen globaler Mitteltemperatur und Meeresspiegel und der projizierten Situation. Aus geologischen Daten konnte Archer (2006) eine lineare Beziehung zwischen beiden Größen ableiten. Es zeigte sich, dass der Meeresspiegel vor 35 Mio. Jahren (Eozän) ca. 70m höher war als heute und die Erde nicht über Eiskappen an den Polen verfügte. Auch während des Pliozäns, vor ca. 3 Mio. Jahren, lag der Meeresspiegel um ca. 35 m höher. Zu diesem Zeitpunkt war die mittlere Erdtemperatur ca. 3°C wärmer als heute, was wir realistischerweise auch bis zum Ende des 21. Jahrhunderts erwarten können. Offenbar sind in langfristigen Zeitskalen erhebliche Änderungen des Meeresspiegels infolge Temperaturänderungen möglich und es ergibt sich die Frage, ob die durch den Menschen stark beschleunigte Erwärmung auch den Meeresspiegelanstieg beschleunigen kann. Neue Ergebnisse deuten in der Tat darauf hin, dass die Meeresspiegelprojektionen durch den IPCC zu niedrig sein könnten (WBGU 2006, Rahmstorf 2007). Das Abschmelzen beispielsweise der grönländischen Eismassen beschleunigt sich erheblich (Chen et al. 2006). Rahmstorf schätzt, dass der Anstieg 2100 durchaus bis zu 140 cm betragen könnte, räumt aber auch ein, dass erhebliche Unsicherheiten bestehen. Festzuhalten ist, dass eine beschleunigte Erwärmung auch ein längerfristig beschleunigtes Abschmelzen bedingt, auf deren Konsequenzen die räumliche Planung vorbereitet sein sollte. Dazu gehört beispielsweise eine Analyse der Küstengebiete an Nord- und Ostsee, die im Fall eines Deichversagens bei einem Meeresspiegelanstieg von 1 m Höhe durch Überflutung bedroht wären, wie in **Abb. 9** dargestellt (Kropp, Costa 2008). Für deutsche Küsten besteht hinsichtlich der Deichhöhen zurzeit noch ein ausreichender Schutz bei einer Höhe bis zu 10m an der Nordsee und 3,5-6,5 m an der Ostsee. In den vergangenen Jahren wurde in den überarbeiteten Generalplänen zum Küstenschutz eine Erhöhung der Bemessungswasserstände um 50 cm vorgesehen. Sollten sich in den nächsten beiden Dekaden weitere wesentliche Veränderungen zeigen, kann darauf noch adäquat reagiert werden.

Abbildung 9

Küstengebiete an Nord- und Ostsee, die im Fall eines Deichversagens bei einem Meeresspiegelanstieg von 1m Höhe durch Überflutung bedroht wären (Kropp & Costa 2008).

Die Bemessungshöhe eines Deiches ist eine komplexe Größe. Sie setzt sich zusammen aus Vergleichswerten (höchste jemals gemessene Wasserstände), statistischen Größen (Eintrittswahrscheinlichkeit für eine 100-jährige Flut), Sicherheitszuschlägen sowie Erfahrungen über Windrichtung, Windstau und seeseitiger Wellenaufbauhöhe. Aus diesem Grunde liefern einfache Darstellungen wie in Abb. 9 zwar einen Hinweis darauf welche Regionen potentiellen Risiken ausgesetzt sind, aber sie können auch eine scheinbare Sicherheit vorspiegeln. Wie beim Flusshochwasser sind auch hier Berechnungen der Bemessungswasserstände retrospektiv und nehmen beispielsweise an, das sich die Eintrittswahrscheinlichkeit für eine 100-jährigen Flut auch in Zukunft nicht ändert, was in einem beschleunigten Klimawandel nicht der Fall ist. Zudem ist unbekannt, inwieweit sich das sogenannte Wellenklima, also z.B. der Winddruck und die vorherrschende Windrichtung ändern wird. Als sinnvolle Ergänzung von Vulnerabilitätsanalysen können ereignisbezogene Simulationen mit Hilfe von Extremwetterszenarien dienen. Für Sturmfluten in der Deutschen Bucht hat Woth (2006) eine solche Analyse vorgestellt. Das Überflutungsrisiko von New Orleans infolge von Hurrikans und unzureichenden Deichbemessungen hat Fischetti bereits 2001, also lange vor Hurrikan Katrina 2005, in einer Simulation aufgezeigt. Daraus wurden bekanntlich keine Konsequenzen für Handlungen abgeleitet.

3.4 Ökosysteme, Land- und Forstwirtschaft

Die beobachtete und zukünftig beschleunigte rasche Veränderung von klimatischen Randbedingungen, wie die Verschiebung von Vegetationsgrenzen, bedeutet generell Stress für die Flora und Fauna, weil sich deren ökologische Nische verändert und die Anpassungsgeschwindigkeit mit dieser Veränderung möglicherweise nicht Schritt halten kann. Die einhergehende Veränderung des Artenspektrums ist gekennzeichnet durch das Eindringen gebietsfremder Arten in neue Regionen und so genannte Schädlinge erschweren zunehmend Naturschutz, Wald- und Forstwirtschaft ebenso wie die Landwirtschaft (BMU 2008). Die Bewertung der Entwicklung in Deutschland erweist sich als komplex, denn der Bedrohung ursprünglicher Arten und Systeme stehen auch neue Möglichkeiten gegenüber (Germanwatch 2007). Ein Faktor vor allem die Forstwirtschaft bedroht und Gewinnmargen schmälert, sind Schädlinge und Pilzbefall. Beispielsweise ist der Borkenkäfer hinsichtlich seiner Brutzeiten direkt von der Temperatur abhängig. Die Erwärmung der letzten Jahre hat daher zu seiner massenhaften Verbreitung in den letzten Jahren geführt und zu massiven Konsequenzen geführt (Breda et al. 2006). Eier und Puppen verschiedener Schädlinge können infolge milderer Temperaturen den Winter überleben, mit entsprechenden Konsequenzen für die folgende Vegetationsperiode. Veränderte Produktionsmethoden, ein angepasster Einsatz von Mitteln gegen Schädlinge können die Konsequenzen des Klimawandels aber weitgehend eingrenzen.

Für die Landwirtschaft hat der Klimawandel positive und negative Wirkungen zugleich. Einerseits steigt der Wasserstress der Pflanzen in den Sommermonaten, andererseits wirkt der Anstieg der Konzentration von Kohlendioxid (CO_2) in der Atmosphäre wie ein Düngemittel. Er stimuliert die Photosynthese und mindert die Folgen der Trockenheit. Die regionalen Projektionen der Klimaentwicklung werden sich unmittelbar auf den Alltag der landwirtschaftlichen Betriebe auswirken. So sind langfristige Ertragsaussichten wichtige Faktoren für Bodenpreise und Pachten. Traditionell richten sich landwirtschaftliche Produktionsmethoden und Standortwahl nach naturräumlichen, wie z.B. der Bodenbeschaffenheit, und klimatologischen Bedingungen, wie der Wasserverfügbarkeit. Bereits geringfügige klimatische Verschiebungen können sich auf die landwirtschaftliche Produktivität, auf Vegetationsbeginn, Wachstum und Erntebeginn auswirken. In einigen Regionen nimmt der Wasserstress im Sommer stark zu. Ertragseinbußen von 10-20% für

Wintergetreidearten sind, bei einem ungebremsten Klimawandel, z.B. im Osten Deutschlands ein durchaus vorstellbares Szenario. Eine neue Studie zeigt aber eine teilweise Entwarnung (Wechsung et al. 2008). Die gute Nachricht für die ostdeutsche Landwirtschaft lautet danach, dass es sich weiterhin lohnt, hier zu investieren – und das auch unter den Bedingungen des Klimawandels. Selbst an niederschlagsarmen sandigen Standorten ist Anpassung an die veränderten Anbaubedingungen möglich. Weitere Beispiele wie sensitiv bereits heute einzelne Sektoren auf klimatische Veränderungen reagieren sind Obst- und Weinbau (Stock 2005a, 2005b). Dies zeigt auch eine Untersuchung von Chmielewski (2007). Im Alten Land bei Hamburg, dem größten zusammenhängenden Obstanbaugebiet Mitteleuropas, hat sich die Durchschnittstemperatur innerhalb der letzten 30 Jahre um ca. 1,7°C erhöht. Dies führt zum früheren Einsetzen der Apfelblüte und benachteiligt bestimmte Sorten, wie z.B. den Holsteiner Cox, der keine extremen Hochsomertemperaturen mag, sondern kühle Herbstnächte, um seine typische Rotfärbung zu erhalten. Im südlichen Deutschland dagegen wird dagegen bei jungen Obstbäumen ein erschwertes Wachstum beobachtet, da es im Juni durchschnittlich trockener geworden ist (ca. 50% weniger Niederschläge im Juni seit 1990). Umgekehrt nehmen die Zeiten mit hoher Feuchtigkeit im Herbst zu, was den Pilzbefall fördert.

Aber nicht allein die langfristigen Trendänderungen des Klimas haben einen Einfluss auf die Landwirtschaft, sondern vor allem auch die zunehmende Variabilität. Wie eingangs von Kapitel 3.2 angemerkt, wird in diesem Zusammenhang eine Zunahme extremer Wetterereignisse, wie Starkregen oder auch Dürren erwartet. Dies gilt vermutlich auch für konvektive Wetterextreme, wie Hagel und Gewitterstürme, wie Veränderungen von Konvektionsindizes andeuten (Kunz, Kottmeier 2005). Hagelschlag kann zu unmittelbaren Ernteverlusten, extremer Niederschlag und Dürreperioden die Bodenerosion befördern, wodurch kurzfristig ökonomische Verluste verursacht werden, mittel- bis langfristig aber auch eine Verschlechterung der Standortbedingungen die Folge sein kann. Hier wird man zukünftig vermehrt über Kompensationsmechanismen, z.B. in Form von Ausgleichsfonds oder Ernteversicherungen (Erweiterung auf klimabedingte Verluste) nachdenken müssen, um Schäden extremer Jahre ausgleichen zu können. Weitere Optionen für die Zukunft liegen in der Züchtungsforschung oder auch in Landbaupraktiken, die Erosion vermindern helfen, z.B. durch Heckenpflanzungen.

4 Warum Anpassung jetzt und worauf kommt es dabei an?

4.1 Warum ist zukunftsorientierte Anpassung jetzt erforderlich?

Von Entscheidungsträgern wird Anpassung häufig als Antwort auf beobachtete Ereignisse verstanden. Zwar kann auch Reaktion zu qualitativ anderem Verhalten führen (Birkmann et al. 2008), doch angesichts der anthropogenen Klimawandels sind andere Verfahrensweisen notwendig. Bei einer Erhöhung der globalen Mitteltemperatur bis 2100 um ca. 3°C, so ist die Geschwindigkeit der Veränderungen mindestens um den Faktor 10-15 mal schneller, als am Ende der letzten Eiszeit vor ca. 15-12.000 Jahren. Sowohl diese Dynamik also auch die absolute Temperaturhöhe liegen jenseits des Erfahrungshorizontes des modernen Menschen. Daher stößt reaktive Anpassung an ihre Grenzen und muss durch eine vorausschauende Planung ergänzt werden, d.h. durch die Entwicklung und Bereithaltung von zukunftsorientierten Problemlösungsstrategien (Kropp, Daschkeit 2008). Wo und wie das geschehen kann zeigen Verwundbarkeitsanalysen. Vielfach ist nicht fehlendes Wissen das Problem, sondern eher die daraus zu ziehenden Schlussfolgerungen und deren Umsetzung mit dem Argument zu hoher Kosten. Berechnungen auf der Basis des heutigen Wissens zeigen zwar, dass es günstiger ist in Küsten- und Hochwasserschutz

zu investieren, als Schäden auszugleichen, gelten jedoch immer nur für bestimmte Zeithorizonte und Abschreibungsraten, was in einer Risikoeinschätzung unter Unsicherheit zu berücksichtigen ist. Dies wurde in New Orleans 2001 versäumt, mit den 2005 eingetretenen desaströsen Folgen (Fischetti 2001, Kates et al 2006).

Nichthandeln, wie im Beispiel von New Orleans, wird häufig mit der Unsicherheit hinsichtlich des Eintretens solcher Ereignisse sowie möglicherweise hohen volkswirtschaftlichen Kosten für die Anpassung begründet. Beides ist jedoch kurzfristig angesichts der Aufgabe der Daseinsvorsorge für die Menschen. Sollte diese nicht bezahlbar erscheinen, so sind andere, möglicherweise unpopuläre und ebenfalls kostenträchtige Maßnahmen in Betracht zu ziehen, wie z.B. die Aufgabe von Küstenregionen. Monetäre Argumente sind daher häufig nicht in allen Konsequenzen bedacht. Verschieden Beispiele zeigen, dass proaktive Anpassung Kosten sparen kann (Kropp, Costa 2008). Das gilt nicht nur für die Relation zwischen Kosten für Anpassungsmaßnahmen und vermiedenen Schäden, sondern auch zwischen vorausschauender und nachträglicher Planung, wie in Tabelle 2 aus dem Projekt KLIWA am Beispiel einer Hochwasserschutzmauer dargestellt (Wald 2004). Wird ein höherer Bemessungswert als das hundertjährige Hochwasser (HQ_{100}) bereits in der Planung berücksichtigt, bleiben die Kosten im Rahmen üblicher Schwankungen. Eine nachträgliche Anpassung kann fast dreimal höhere Kosten für den Neubau bedeuten.

Tabelle 2 Beispiel für die Kostenersparnis bei einer Hochwasserschutzmauer durch proaktive Anpassungsmaßnahmen gegenüber nachträglichem Neubau infolge veränderter Bemessungsrichtwerte (hundertjähriges Hochwasser HQ_{100}) als Reaktion auf eingetretene Ereignisse (nach Wald 2004)

Lastfall Klimaänderung	BHQ = $HQ_{100,IST}$	BHQ +20% = + 0,29 m	BHQ +30% = +0,44 m
Kosten bei Berücksichtigung in der Planung	100%	110%	113%
Kosten bei nachträglicher Anpassung mit Neubau	100%	155%	257%

4.2 Rolle der Maßnahmen zur Anpassung

Im Rahmen der Entwicklung einer Deutschen Anpassungsstrategie an den Klimawandel ist der Stand des Wissens zu den verschiedenen Themen und der Forschungsbedarf erarbeitet worden (BMU 2008). Hinsichtlich einiger klimasensitiver Bereiche wurden verschiedene mögliche Anpassungsmaßnahmen auch mit Bezug zur Raumplanung diskutiert.

Raum-, Regional- und Bauleitplanung stehen am Anfang der Risikovermeidungskette, da sie räumliche Vorsorgekonzepte entwickeln, die Planungsdokumente hohe Bestandsdauer und rechtliche Verbindlichkeit besitzen und bis zur praktischen Umsetzung der Planinhalte teilweise lange Vorlaufzeiten entstehen. Der räumlichen Planung kommt dabei die wichtige Aufgabe zu, verschiedene Ansprüche an den Raum miteinander zu vereinbaren. Räumliche Planung kann mit den bereits bestehenden rechtlichen und planerischen Instrumenten sowohl Klimaschutz als auch Anpassung unterstützen. Für den Klimaschutz ist räumliche Planung bereits ein bewährtes Instrument, die Eignungsgebiete für Windkraftanlagen ausweist oder Flächen für Photovoltaikanlagen festlegt und diese mit anderen Nutzungsansprüchen umfassend abstimmt. In Städten und Ballungsräumen sorgt die räumliche Planung für zusammenhängende, nicht bebaute Grünzüge und Frischluftschneisen, die vor allem einer Überwärmung im Sommer vorbeugen helfen, womit bereits Anpassung betrieben wird.

In Bezug auf die Anpassung ist die räumliche Planung vor allem für die Umsetzung eines integrativen Ansatzes unter folgenden Aspekten von großer Bedeutung:

- Risikovorsorge durch die Anpassung an die erwartete zukünftige Zunahme der Intensität und Häufigkeit von Extremwetterlagen,
- Anpassung an den Landschaftswandel und mögliche Einschränkungen der Nutzbarkeit natürlicher Ressourcen,
- Bevölkerungsschutz im Zeichen des Klimawandels.

Im Bereich Wasser geht es zum einen um Bewirtschaftungsmaßnahmen für Niedrigwassersituationen mit Konkurrenz um Wasser zwischen Landwirtschaft, Industrie, Kraftwerken und Privathaushalten. Zum anderen tragen unterschiedliche planerische und Informationsinstrumente (z.B. Zonierungskarten) zur proaktiven Anpassung an zunehmende Hochwassergefährdung bei.

Der Bereich Land- und Forstwirtschaft, Biodiversität und Naturschutz ist eine Balance zwischen klimaschutzbegründeter Biomasseproduktion und anpassungsrelevanten Schutzgebieten zu finden. Angesichts von Habitatveränderungen und Änderungen des Migrationsverhaltens von Arten ist eine grundlegende Anforderung an die Raumplanung, die Landschaft „durchlässiger“ zu machen, eventuell durch die Schaffung von Korridoren, damit Arten eine Chance haben, ihren „Nischenräumen“ gemäß den veränderten Klimazonen folgen zu können.

Hinsichtlich des Bereichs Tourismus sollten Klimawandelszenarien bei der Regionalplanung berücksichtigt werden. Sich verändernde klimatische Bedingungen ändern die wetterabhängigen Charakteristika von Destinationen für Tourismus und Erholung.

4.3 Voraussetzungen der Anpassungsfähigkeit unserer Gesellschaft

Drei Voraussetzungen für die Anpassungsfähigkeit unserer Gesellschaft an die Auswirkungen des Klimawandels sind vorrangig:

- Ein effektiver Klimaschutz, der die globale Erwärmung auf 2 Grad über dem vorindustriellen Niveau begrenzt, um das Unbeherrschbare zu vermeiden (Rahmstorf, Schellnhuber 2006).
- Eine klimabewusste vorausschauende Planung aller Maßnahmen sowohl bezüglich ihrer Wirkung auf das Schutzgut Klima, als auch im Hinblick auf die Folgen des Klimawandels. Dazu ist es eine Voraussetzung, die Klimaszenarien nicht als Prognosen zu verstehen, sondern als Werkzeuge in integrativen Vulnerabilitätsanalysen, die es ermöglichen, zwischen verschiedenen Zukunftswegen unter Unsicherheit entscheiden zu können.
- Eine fortlaufende Nachjustierung von Strategien und Maßnahmen zur Anpassung, die gezielt auf die aktuellen Erkenntnisse der spezifischen regionalen und sektoralen Vulnerabilität abgestimmt sind und Interessenskonflikte managen. Das ist die Ebene, auf der sich das Unvermeidbare des Klimawandels hoffentlich beherrschen lässt (Rahmstorf, Schellnhuber 2006).

Dabei sollte man aber auch deutlich machen, dass eine 100%ige Sicherheit niemals garantiert werden kann. Schutzziele sind Größen, die approximativ ein Maximum an Schutz unter Kosten-Nutzen Erwägungen und anderen Optimierungszielen zu erzielen suchen. Ziel ist es, je nach Raumfunktion heutige Emissionen zu minimieren und die zukünftige Sicherheit zu maximieren, so dass der Klimawandel begrenzt und die Klimafolgen beherrscht werden können.

5 Literatur

- Adger, W. N.; Brooks, N. et al. (2004) New Indicators of Vulnerability and Adaptive Capacity. Tyndall Centre Technical Report 7, Norwich, UK, 128 p.
- Alexander, L.V.; Zhang, X.; Peterson; T.C.; et al. (2006): Global observed changes in daily climate extremes of temperature and precipitation. *Journal of Geophysical Research* **111**: D05109
- Archer, D. (2006): Global Warming – Understanding Forecasts. Blackwell Publ. Oxford.
- Beniston, M. (2004): The 2003 heatwave in Europe. A shape of things to come. An analysis based on Swiss climatological data and simulations. *Geophysical Research Letters* **31**: 2022-2026.
- Bättig, M.B.; Wild M.; Imboden, D.M. (2007): A climate change index: Where climate change may be most prominent in the 21st century. *Geophysical Research Letters* **34**: L01705.
- Birkmann, J.; Buckle, P.; Jaeger, J.; Pelling, M.; Setiadi, N.; Garschagen, M.; Fernando, N; Kropp, J.P. (2008): Extreme Events and Disasters: A Window of Opportunity for Change? Analysis of Changes, Formal and Informal Responses After Mega-Disasters. *Natural Hazards*. Im Druck.
- Breda, N; Huc. R.; Granier, A. et al. (2006): Temperate forest trees and stands under severe drought: a review of ecophysiological responses, adaptation processes and long term consequences. *Annals of Forest Science* **63**(6): 625-644
- BMU 2007: Eckpunkte für ein integriertes Energie- und Klimaprogramm, (<http://www.bmu.de/klimaschutz/downloads/doc/39875.php>)
- BMU 2008: Deutsche Anpassungsstrategie an den Klimawandel, (<http://www.bundesumweltministerium.de/klimaschutz/downloads/doc/42783.php>)
- Chen, J.L.; Wilson, C.R. & Tapley, B.D. (2006): Satellite Gravity Measurements Confirm Accelerated Melting of Greenland Ice Sheet. *Science* **313**, 1958–1960.
- Chmielewski, F.-M. (2007): Folgen des Klimawandels für Land- und Forstwirtschaft; in: Endlicher, W.; Gerstengarbe, F.-W. (Hrsg.); Der Klimawandel – Einblicke, Rückblicke und Ausblicke, Berlin 2007, S. 75-85
- Cutter, S. (2006): The Geography of Social Vulnerability: Race, Class, and Catastrophe; <http://understandingkatrina.ssrc.org/Cutter/>
- de Jong, C. (2008): Resource conflicts in mountain: source and solutions, Mountain Forum Bulletin, Vol. 8 (1), p. 5-7.
- Diffenbaugh, N.S.; Pal, J.S.; Giorgi, F.; Gao, Y. (2007): Heat stress intensification in the Mediterranean climate change hotspot. *Geophysical Research Letters* **34**: L11706
- Fischetti, M. (2001): Drowning New Orleans. *Scientific American*, October, p. 78-85
- Fraedrich K, Gerstengarbe FW, Werner PC (2001): Climate shift during the last century. *Climatic Change*, **50**, 405-417
- Fricke, W.; Kaminski, U. (2002); GAW Brief des Deutschen Wetterdienstes Nr.12, Sept. 2002

- Germanwatch (2007): Auswirkungen des Klimawandels auf Deutschland; <http://www.germanwatch.org/klima/klideu07.htm>
- Gerstengarbe, F.-W., Werner, P.C. (2003): Klimaänderungen zwischen 1901 und 2000. In: Nationalatlas Bundesrepublik; Spektrum Akademischer Verlag Heidelberg/Berlin, 58-59
- Hahn, F. (2004): Künstliche Beschneidung im Alpenraum. CIPRA, Alpmedia Dezember 2004.
- IPCC 2001: Special Report on Emissions Scenarios (SRES). Special Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, N. Nakicenovic and R. Swart (Eds.), Cambridge 2000
- IPCC 2007: Intergovernmental Panel on Climate Change - Climate Change 2007: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, M.L. Parry, O.F. Canziani, J.P. Palutikof, P.J. van der Linden and C.E. Hanson, Eds., Cambridge University Press, Cambridge, UK, 976 pp.
- Jonas, M.; Staeger, T.; Schönwiese, C.D. (2005) Berechnung der Wahrscheinlichkeiten für das Eintreten von Extremereignissen durch Klimaänderungen - Schwerpunkt Deutschland; Umweltbundesamt, Forschungsbericht 201 41 254
- Kates, R.W.; Colten, C.E.; Laska, S.; Leatherman, S.P. (2006): Reconstruction of New Orleans after Hurricane Katrina: A research perspective. *PNAS* 103(40): 14653–14660.
- Klein-Tank, A.M.G.; Können, G.P. (2003): Trend in indices of daily temperature and precipitation extremes in Europe 1946–99. *Journal of Climate* 16: 3665–3680.
- Koppe, C.; Jendritzky, G. (2004): Auswirkungen der Hitzewelle 2003 auf die Gesundheit. In: Klimastatusbericht 2003: 152-162. <http://www.ksb.dwd.de>
- Kropp, J.P.; Schellnhuber, H.J. (2009): In Extremis: Trends, Correlations and Extremes in Hydrology and Climate. Springer, Berlin, im Erscheinen.
- Kropp, J.P.; Costa, L. (2008): Impacts and Costs of Sea-Level Rise in Europe. *Journal of Coastal Research*, eingereicht
- Kropp, J.P.; Daschkeit, A. (2008): Planungshandeln im Lichte des Klimawandels. Informationen zur Raumentwicklung (6-7): 353-361
- Kropp, J.P.; Block, A.; Reusswig, F.; Zickfeld, K.; Schellnhuber, H.J. (2006): Semiquantitative Assessment of Regional Climate Vulnerability: The North Rhine - Westphalia Study. *Climatic Change*. 76(3-4): 265-290
- Kreienkamp, F.; Spekat, A.: Aufbau eines Expertensystems zur Diagnose- und Präsentation von Klimaszenarien; Teilbericht zum Aufbau des Fachinformationssystems „Klimaanpassung“ (FISKA); CEC-Potsdam, 1. November 2007
- Kuecken, M.; Gerstengarbe, F.-W.; Orłowsky, B. (2008): A combination of cluster analysis and Kappa statistic for the evaluation of climate model results, *Journal of the American Meteorological Society* (submitted)
- Kunz, M.; Kottmeier, Ch. (2005): Studie zur Häufigkeit und Intensität meteorologischer Ereignisse mit großem Schadenspotential; Abschlussbericht im Rahmen des Projekts KLARA (Land Baden-Württemberg), 59 S.

- Luterbacher, J.; Dietrich, D.; Xoplaki, E.; et al. (2004): European seasonal and annual temperature variability, trends and extremes since 1500. *Science* **303**: 1499-1503.
- OECD (2006): Adaptation to Climate Change in the European Alps: Adapting Winter Tourism and Natural Hazards Management, ed. S. Agrawala,
- Rahmstorf, S. und Schellnhuber, H.J. (2006): Der Klimawandel, C.H.BECK, München 2006, ISBN: 3 406 508669
- Rahmstorf, S. (2007) A semi-empirical approach to projecting future sea-level rise. *Science*, 315, 368-70.
- Rebetez, M.; Meyer, H.; Dupont, O.; et.al. (2006): Heat and drought 2003 in Europe: a climate synthesis. *Annals for Forest Science* **63**: 569–577
- Schmidt-Thomé, P. & Kallio, H. (2006): Natural and technological hazard maps of Europe. In: Schmidt-Thomé, P. (Hrsg.): Natural and Technological Hazards and Risks Affecting the Spatial Development of European Regions. Espoo: Geological Survey of Finland, Special Paper 42, S. 17-63.
- Spekat, A.; Enke, W.; Kreienkamp, F.: Neuentwicklung von regional hoch aufgelösten Wetterlagen für Deutschland und Bereitstellung regionaler Klimaszenarios auf der Basis von globalen Klimasimulationen mit dem Regionalisierungsmodell WETTREG; Umweltbundsamt. 2007, Förderkennzeichen 204 41 138.
- Stock, M. (2003): Chancen und Risiken im Klimawandel: Welche Strategien kann die Wissenschaft ableiten? Aus: Akademie für Raumforschung und Landesplanung (ARL), Karl Helmut Pohl Jürgen (Hrsg.), (2003): Raumorientiertes Risikomanagement in Technik und Umwelt - Katastrophenvorsorge durch Raumplanung. Hannover. S. 132-153.
- Stock, M. (2004): Klimafolgenforschung. Mögliche Auswirkungen von Klimaänderungen auf die Gesellschaft – Fallstudien. UWSF – Zeitschrift für Umweltchemie und Ökotoxikologie 16, 2, 115-124.
- Stock, M. (Hrsg.) (2005a): KLARA, Klimawandel - Auswirkungen, Risiken, Anpassung; PIK-Report No. 99. Potsdam
- Stock, M. (2005b): Klimaveränderungen fordern die Winzer - Bereitschaft zur Anpassung ist erforderlich; Geisenheimer Berichte, Band 57, 29-48
- Stock, M.; Walkenhorst, O. (2006): AMICA - Adaptation and Mitigation – an Integrated Climate Policy Approach - Literature Review; <http://www.amica-climate.net/uploads/media/amica-literature-review-1Logo.pdf>
- Stock, M. (2007) „Fachinformationssystem Klimafolgen: Generierung von Risikokarten“, Vortrag auf dem dritten nationalen Workshop „Anpassung an Klimaänderungen in Deutschland“ des UBA, Dessau, 6.-7. November 2007
- Schröter, D.; Acosta-Michlik, L.; Arnell, A.W.; et.al. (2004). ATEAM (Advanced Terrestrial Ecosystem Analyses and Modelling) Final Report. Potsdam Institute for Climate Impact Research (PIK), Potsdam.
- Trömel, S., Schönwiese, C.D., 2009: Extreme value and trend analysis based on statistical modelling of precipitation time series. In Kropp, J.P., Schellnhuber, H.J. (eds.): In Extremis -

- Extremes, Trends, and Correlations in Hydrology and Climate. Springer, Berlin etc., pp. 4-20.
- Turner, B.L.; Kasperson, R.E.; Matson, P.A.; et al. (2003): A framework for vulnerability analysis in sustainability science. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 100, 8074-8079.
- Wald, J. (2004): Auswirkungen der Klimaänderungen auf Planungen – Praxisbeispiele. KLIWA-Berichte, Vol 4, p.169-186.
- WBGU (2006): The future of the oceans: to warm, to high, to sour. German Advisory Council on Global Change to the Federal Government (WBGU), Special Report.
- Wechsung, F.; Gerstengarbe, F.-W.; Lasch, P. & Lüttger, A. (2008): Die Ertragsfähigkeit Ostdeutscher Ackerflächen unter Klimawandel; Studie im Auftrag der Bodenverwertungs- und -verwaltungs- GmbH (BVVG)
- Werner, P.C., Gerstengarbe, F.-W. (2007): Welche Klimaänderungen sind in Deutschland zu erwarten? In: *Der Klimawandel - Einblicke, Rückblicke und Ausblicke*. Hrsg.: Endlicher, W., Gerstengarbe, F.-W., Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung und Humboldt-Universität zu Berlin, S. 56-59, ISBN 978-3-9811871-0-6
- Woth, K. (2006): Regionalisation of global climate change scenarios: An ensemble study of possible changes in the North Sea storm surge statistics. Vom Fachbereich Geowissenschaften der Universität Hamburg als Dissertation angenommene Arbeit. GKSS-Report 2006/13
- Zebisch, M.; Grothmann, T.; Schröter, D.; Hasse, C.; Fritsch, U.; Cramer, W. (2005): Klimawandel in Deutschland. Vulnerabilität und Anpassungsstrategien klimasensitiver Systeme. UBA-FB 000844
- Zemp, M., W. Haeberli, M. Hoelzle, and F. Paul (2006): Alpine glaciers to disappear within decades?, *Geophys. Res. Lett.*, 33, L13504

Abb.1

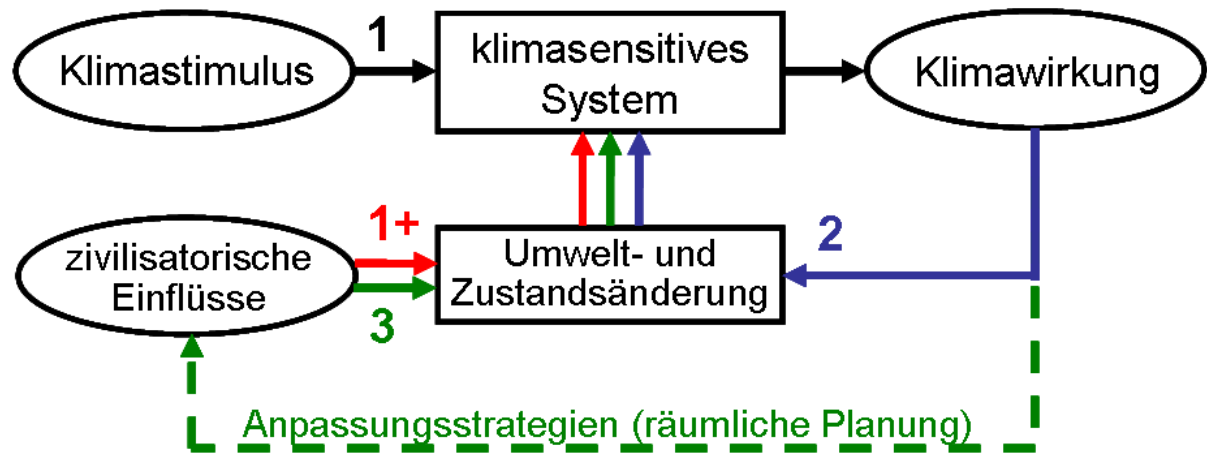


Abb.2

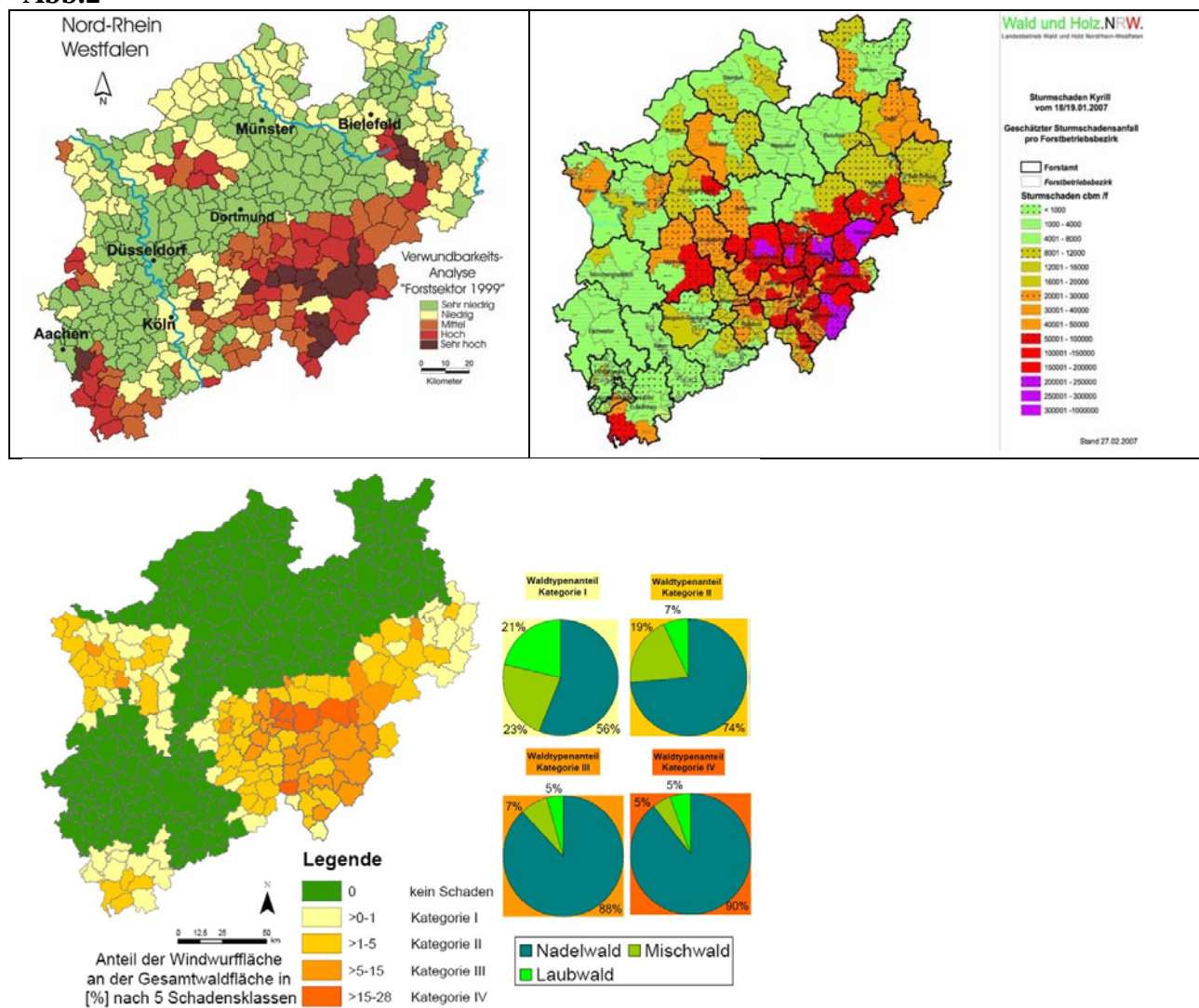


Abb.3

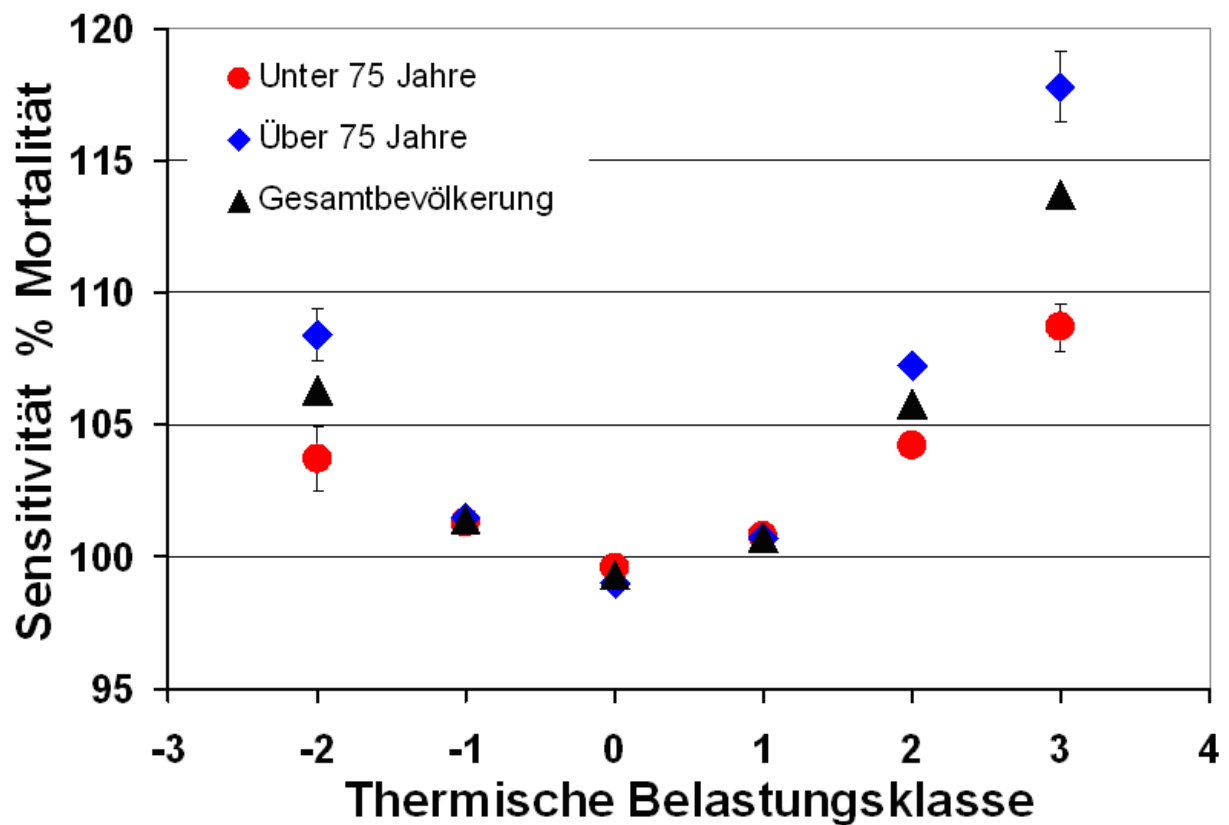


Abb.4

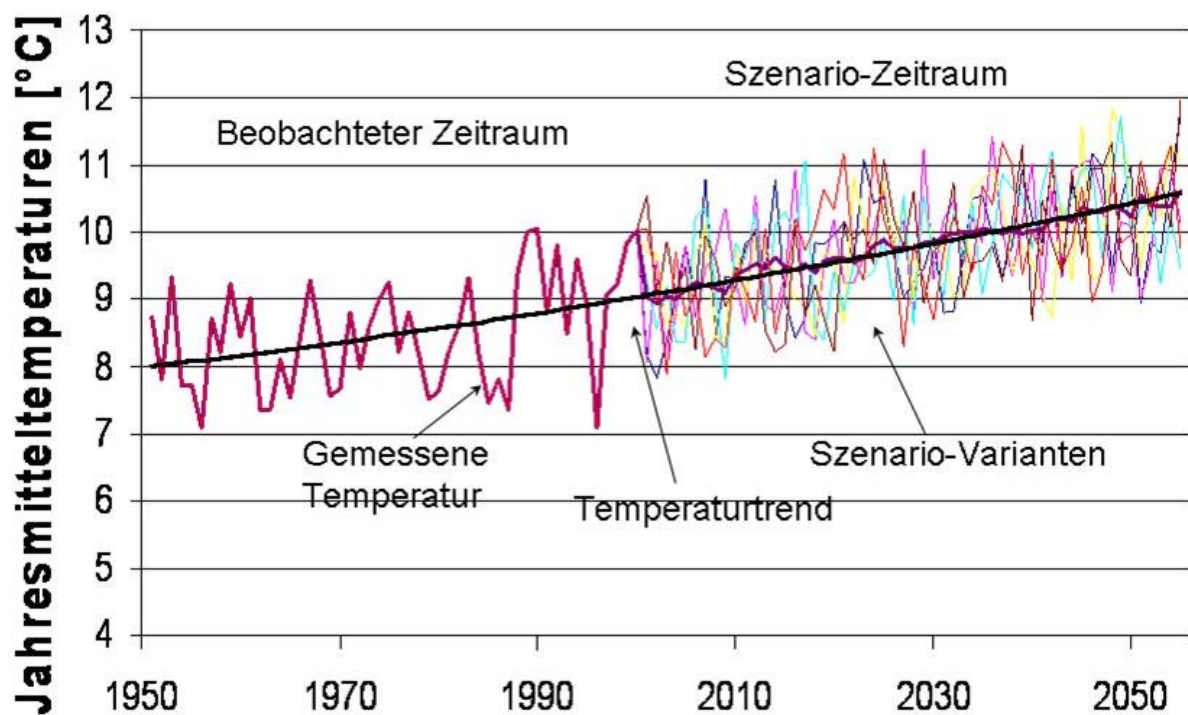


Abb.5

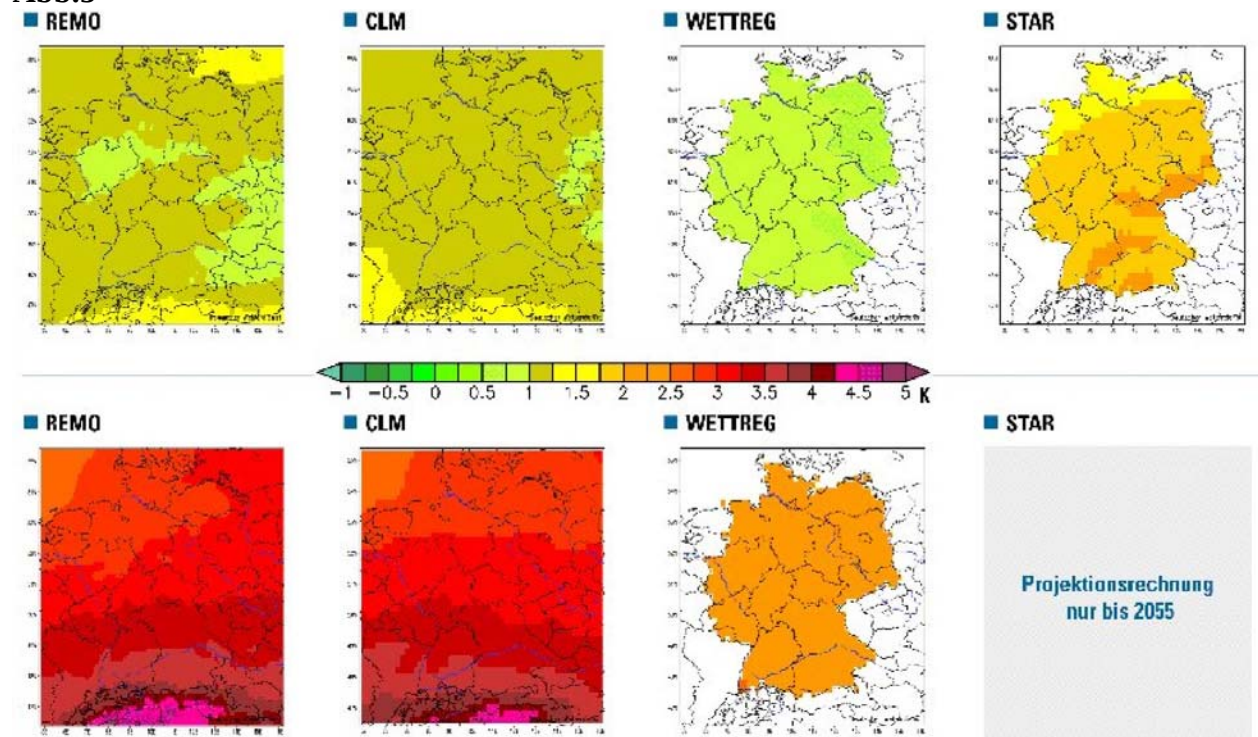


Abb.6

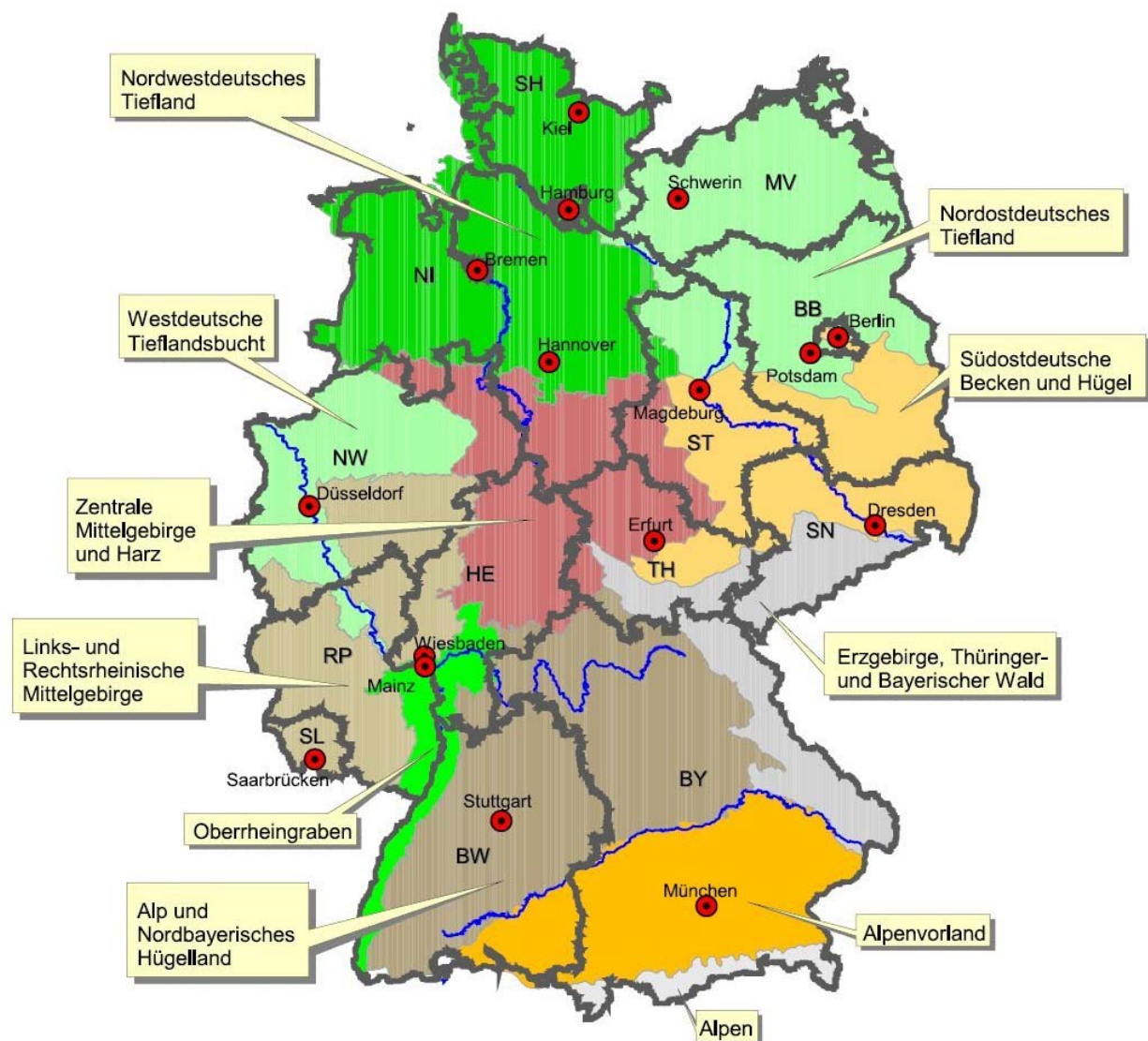


Abb.7

Bereich Naturraum	Wasser		Land- wirt- schaft	Forst- wirt- schaft	Biodiver- sität und Natur- schutz	Gesundheit		Tourismus		Verkehr	Alle Bereiche
	Hochwasser	Dürre				Hitzebelastung	Vektor übertragene Krankheiten	Wintersporttourismus	Sonst. Tourismusformen		
Küste	-- ⁽¹⁾	~	~	~	-/- -? ⁽²⁾	~	-?	k.A.	-	-	-
Nordwestdeutsches Tiefland	--	~	~	~	-/- -? ⁽²⁾	~	-?	k.A.	-	-	-
Nordostdeutsches Tiefland	--	--	--	--	-/- -? ⁽²⁾	-	-?	k.A.	-	-	--
Westdeutsche Tieflandsbucht	--	-	-	-	-/- -? ⁽²⁾	--	--?	k.A.	-	-	-
Zentrale Mittelgebirge und Harz	--	-	~	-	-/- -? ⁽²⁾	-	-?	--	-	-	-
Südostdeutsche Becken und Hügel	--	--	--	--	-/- -? ⁽²⁾	--	--?	k.A.	-	-	--
Erzgebirge, Thüringer und Bayerischer Wald	--	-	-	-	-/- -? ⁽²⁾	-	--?	--	-	-	-
Links- und rechtsrheinische Mittelgebirge	--	-	-	-	-/- -? ⁽²⁾	-	--?	--	-	-	-
Ober rheingraben	--	-	-	--	-/- -? ⁽²⁾	--	--?	k.A.	-	-	--
Alp und nordbayerisches Hügelland	--	-	-	-	-/- -? ⁽²⁾	-	--?	--	-	-	-
Alpenvorland	--	-	-	--	-/- -? ⁽²⁾	-	--?	k.A.	-	-	-
Alpen	--	~	~	-	--	~	-?	--	-	-	--
Deutschland gesamt	--	-	-	-	-/- -? ⁽²⁾	-	--?	--	-	-	-

<u>Bewertung:</u> -- hohe Vulnerabilität - mäßige Vulnerabilität ~ geringe Vulnerabilität ? Hohe Unsicherheit bzw. Schwierigkeit bei der Einschätzung k.A. keine Angaben	<u>Bewertung „alle Bereiche“:</u> hohe Vulnerabilität, wenn mehr als 2 Bereiche hoch mäßige Vulnerabilität, wenn 1-2 Bereiche hoch geringe Vulnerabilität, wenn kein Bereich hoch („halbe“ Bereiche zählen nur halb) <u>Bewertung „Deutschland gesamt“:</u> Mittelwert	(1) Sturmfluten und Meeresspiegelanstieg (2) Vulnerabilität abhängig von Schutzziel. - Schutz des Status Quo: hohe Vulnerabilität - Prozessschutz: mäßige Vulnerabilität
---	---	---

Abb.8

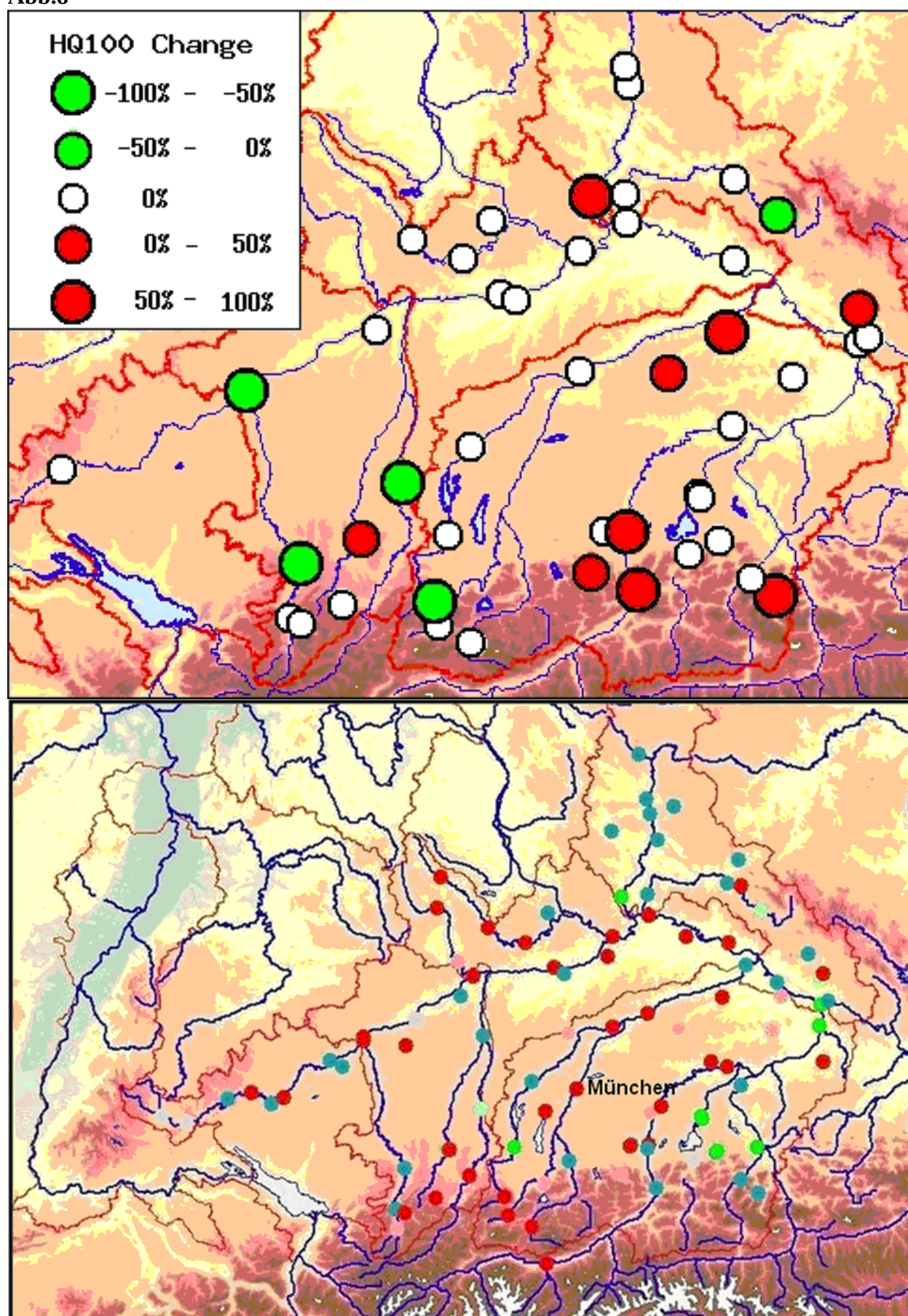


Abb.9

