

Chancen und Risiken von Regionen im Klimawandel: Welche Strategien kann die Wissenschaft ableiten?

Manfred Stock, Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung (PIK)

Kurzfassung

Der globale Klimawandel als Teil eines Globalen Wandels wird zunehmend deutlichere Auswirkungen zeigen, aber die verschiedenen Regionen der Erde sind davon sehr unterschiedlich betroffen. Über die Veränderung des Regionalklimas und seiner Variabilität verschieben sich Chancen und Risiken der Regionen in einem komplexen Wirkungsmuster. Die Wissenschaft entwickelt computergestützte Methoden, um die Zusammenhänge in Abhängigkeit von den vielfältigen Faktoren zu ermitteln, wie Treibhausgasemissionen, Bevölkerungswachstum oder Landnutzung. Ein vorsorgendes raumorientiertes Risikomanagement kann auf dieser Basis zukünftige Entwicklungen positiv beeinflussen. Beispiele sind unter anderem Wasserversorgung und Hochwassergefahren. Geeignete Strategien der Vorsorge können hier Chancen nutzen oder dort Risiken vermeiden und so im globalen Wettbewerb der Regionen untereinander über Höhe und Vorzeichen von Wachstum und Wohlstand entscheiden.

1 Globale Erwärmung: die Ausgangslage

Eine nüchterne Analyse der verfügbaren umfangreichen Daten zeigt, dass eine globale Erwärmung begonnen hat, deren erste Auswirkungen bereits in verschiedenen Regionen der Erde deutlich spürbar sind. Auch in Deutschland lassen sich bereits deutliche Verschiebungen der Klimazonen und andere Veränderungen feststellen [Werner et al. 2002]. Dieser Prozess ist für die nächsten Jahrzehnte nicht mehr aufzuhalten, sondern wird sich höchstwahrscheinlich noch verschärfen und beschleunigen. Folgende Sachverhalte werden dabei immer deutlicher:

- a) Anthropogene Emissionen von Treibhausgasen haben im Vergleich zu natürlichen Ursachen inzwischen einen wesentlichen Anteil am Klimawandel, der weiter zunehmen wird.
- b) Maßnahmen zur Verminderung dieser Emissionen erfolgen nur zögerlich und führen dann mit systembedingt großer Verzögerung zu einer verminderten Zunahme der globalen Erwärmung.
- c) Seit Ende der letzten Eiszeit war keine Klimaänderung an Ausprägung und Geschwindigkeit nur annähernd dem vergleichbar, was uns in den kommenden Jahrzehnten bevorsteht.

Vor diesem Hintergrund wird deutlich, dass der Klimawandel, der im Rahmen des Globalen Wandels bisher nur eine Nebenrolle spielt, zukünftig von immer stärkerer Bedeutung für Natur und Gesellschaft werden wird und es daher angezeigt erscheint, sich eingehend mit den damit verbundenen möglichen Konsequenzen zu befassen. Im Folgenden soll der Bogen gespannt werden von Ursachen über Wirkungen zu möglichen Folgen und geeigneten Maßnahmen der Vorsorge. Die Ursachen des Klimawandels werden hier nur kurz, die Methoden zur Ermittlung von Folgen und Strategien dagegen ausführlicher behandelt, wobei Arbeiten des PIK lediglich exemplarisch für eine Vielzahl von weltweiten Forschungsaktivitäten stehen.

1.1 Ursachen, Szenarien und Projektionen

Anerkannte Aussagen über die voraussichtliche Entwicklung des Erdklimas in der Zukunft sind die Szenarien des ‚Intergovernmental Panel on Climate Change‘ (IPCC). Ausgehend von verschiedenen Szenarien der Wirtschaftsentwicklung ergeben sich über die Freisetzung von Treibhausgasen in die Atmosphäre unterschiedliche Entwicklungen der globalen Erwärmung. **Bild 1** zeigt für den Leitparameter $\langle \Delta T \rangle$, die Änderung des globalen langfristigen Mittelwerts der Temperatur an der Erdoberfläche bezogen auf das Jahr 1990, links die in den letzten 100 Jahren beobachtete (+ 0,6 K) und rechts die für die nächsten 100 Jahre projizierte Entwicklung. Es ergibt sich eine Spanne zwischen 1,4 und 5,8 K, d.h. nahezu 6 K, Temperaturerhöhung [IPCC 2001].

Je nach Szenarium von Bevölkerungsentwicklung, technischer Innovation der Energieversorgung und global oder regional, bzw. rein ökonomisch oder partiell ökologisch orientiertem Wirtschaftssystem (siehe **Tabelle 1**) ergeben sich unterschiedliche Emissionen von Aerosolen, Kohlendioxid und anderen Treibhausgasen (SRES: Special Report on Emission Scenarios [IPCC 2000]). Die verschiedenen Varianten des aktuellen ‚Business as usual‘ Szenariums A1 liegen über dem vergleichbaren Szenarium IS92a des früheren Reports [IPCC 1996], da damals der Anteil von Schwefeldioxid

an Verbrennungsprozessen überbewertet wurde. Dieser Anteil bewirkt eine Luftverschmutzung durch Aerosole, die der Erwärmung entgegenwirkt. Inzwischen wurde deutlich, dass die Maßnahmen der Luftreinhaltung die Schwefelemissionen wirksam vermindern.

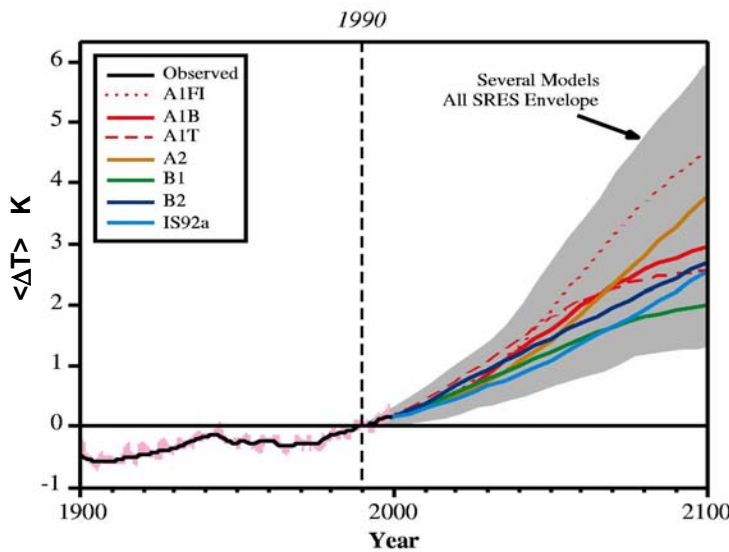


Tabelle 1: Klassifizierung der links in Bild 1 farblich eingezeichneten Emissionsszenarien nach Struktur und Entwicklung der Weltwirtschaft [IPCC 2000]

	Global	Regional
Ökonomisch	A1	A2
Ökologisch	B1	B2

Bild 1: Änderung der langjährigen mittleren globalen Temperatur an der Erdoberfläche; vor 1990: Beobachtungsdaten / ab 1990: zu erwartende Erwärmung bis 2100 für verschiedene Emissionsszenarien (farbige Kurven) und verschiedene Modelle (grauer Bereich der Unsicherheiten); aus dem Bericht der IPCC Working Group I [IPCC 2001].

Neben den anthropogenen Emissionen von Treibhausgasen und Schwefeldioxid gehen in die Berechnung der globalen Erwärmung durch die Klimamodelle auch natürliche Einflussfaktoren ein, wie Vulkanismus und Solarstrahlung. Parametervariationen machen deutlich, dass die beobachtete Erwärmung etwa ab 1970 nicht mehr allein aus natürlichen Faktoren erklärt werden kann. Eine signifikante Übereinstimmung von Computersimulation und Beobachtung erhält man erst bei Berücksichtigung der anthropogenen Treibhausgase, vor allem CO_2 , deren Einfluss auf die Erwärmung inzwischen weit über 50% ausmacht.

1.2 Bewertung der Klimaprojektionen

Für die in Bild 1 farblich eingezeichneten Linien der Erwärmung bei den verschiedenen sozio-ökonomischen Emissionsszenarien liegt die Spanne im Jahre 2100 zwischen 2 und ca. 4,5 K. Durch zusätzliche Unsicherheiten bei Klimamodellen (grauer Bereich) weitet sich der mögliche zukünftige Bereich der globalen Erwärmung zur oben genannten Spanne von 1,4 bis 5,8 K weiter auf. Wie ist diese Unsicherheit hinsichtlich möglicher Konsequenzen zu bewerten? In einem Artikel in Nature stellen Forscher der Universität Bern Ergebnisse zur Wahrscheinlichkeit der zu erwartenden globalen Erwärmung im Unsicherheitsbereich vor [Knutti et al. 2002]. Dies wurde durch Ensemble-Simulationen mit einem Klimamodell erreicht, welches die Unsicherheiten der verschiedenen Antriebsmechanismen (Treibhausgaskonzentrationen, Sonnenaktivität, Vulkanemissionen, Sulphataerosole, etc.) systematisch berücksichtigt. Damit gelang es, die Unsicherheiten einzugrenzen und Wahrscheinlichkeiten zu ermitteln. Das Modell zeigt eine gute Übereinstimmung mit der beobachteten Erwärmung der Atmosphäre und des Ozeans im 20. Jahrhundert, und liefert Wahrscheinlichkeiten von 40%, dass die Erwärmung im Jahr 2100 den vom IPCC gezogenen Bereich übersteigt, bzw. nur 5%, dass sie kleiner ausfällt. Anders formuliert: für eine Abschätzung der Auswirkungen ist man mit einem Wert im Mittelfeld des Schwankungsbereichs auf der sicheren, eher unterschätzenden Seite. Hinsichtlich der sozio-ökonomischen Szenarien würde eine Untersuchung vermutlich zu ähnlichen Ergebnissen führen. Die bisherigen Anstrengungen, um zu verbindlichen Reduktionsvereinbarungen zu kommen, legen dies nahe. Beispiel ist das noch nicht ratifizierte Protokoll von Kyoto, das im Falle der Umsetzung lediglich zu einer Abmilderung der globalen Erwärmung um 0,1 K führen würde.

Wie vertrauenswürdig ist die Grundlage dieser Projektionen des Klimawandels angesichts immer mal wieder zu hörender kritischer Äußerungen?. Einige schon früh geäußerte Kritiken lieferten wertvolle Hinweise auf Anfangsschwächen der aus Wettermodellen entwickelten GCM-Klimamodelle (GCM: Global Circulation Model) und haben dadurch wesentlich zu ihrer Verbesserung beigetragen. Andere

Schwachpunkte bestehen nach wie vor, wie die für Folgenabschätzungen noch zu geringe räumliche Auflösung oder die derzeit noch mangelnde Brauchbarkeit zur Berechnung langer Zeiträume. Letzteres ist z.B. für das Verständnis vergangener Klimaänderungen wie der Wechsel zwischen Eis- und Warmzeiten erforderlich und damit für die Validierung der Klimamodelle. Die Klimaschwankungen prähistorischer Zeiten konnten erfolgreich durch Computersimulationen mit einem Erdsystemmodell intermediärer Komplexität nachvollzogen werden [Ganopolski et al. 2002]. Das Modell koppelt Atmosphäre, Ozean, Eis, Landoberfläche, Biosphäre und Kohlenstoffkreislauf und rechnet mit gemittelten Parametern des Klimas. Es simuliert die nichtlineare Dynamik der Klimavergangenheit der Erde übereinstimmend mit paläologischen Daten und die zukünftige Entwicklung des Klimas genau wie die GCM Klimamodelle. Unter Klimaforschern besteht heute weltweit ein grundsätzlicher Konsens zu obigen Projektionen des IPCC zum Klima.

Im Gegensatz zur derzeit weitgehend einhelligen Auffassung der Klimawissenschaftler erscheint das Thema in den Medien oft kontrovers. Ein Grund liegt im Selbstverständnis der Medien, die bestrebt sind konträre Positionen gegenüberzustellen. Dabei finden leider nicht nur Klimaforscher oder andere am Themenkomplex aktuell arbeitende Wissenschaftler Gehör und längst überholte oder widerlegte Argumente werden wiederholt. Immer noch kommt es vor, dass ohne Beachtung physikalischen Grundwissens und experimenteller Belege sogar die Existenz des ‚Treibhauseffektes‘ in Frage gestellt wird. Kritisiert werden auch Mängel der Modelle, die zwar früher existierten, inzwischen aber lange behoben sind, oder in Unkenntnis des heutigen Stands der Forschung wird behauptet, wichtige Einflussfaktoren und ihre Variabilität, wie z.B. der Sonnenstrahlung, seien nicht berücksichtigt. Eine kritische Analyse des Medienechos findet sich bei Rahmstorf (2002).

Inzwischen betrifft die Skepsis zur globalen Erwärmung durch anthropogene Treibhausgase allenfalls noch die projizierte Höhe. Die Kritik zum Klimawandel verlagert sich hin zu den Klimafolgen. Zweifel werden daran geäußert, dass Untersuchungen hauptsächlich negative Auswirkungen beschreiben und es wird im Hinblick auf historische Daten angemerkt, dass auch positive Auswirkungen erwartet werden könnten. Mit diesem Argument muss man sich ernsthaft auseinandersetzen.

1.3 Aufgaben und Methoden der Ableitung von Konsequenzen

Die Ableitung möglicher zukünftiger Konsequenzen des Klimawandels hat nicht die Aufgabe, schöne Zukunftsbilder zu entwerfen. Ähnlich der Funktion von Radar und Echolot sollen Gefahren und Untiefen aufgezeigt werden, um rechtzeitige Kurskorrekturen vornehmen zu können. Werkzeuge sind hierbei „prognosefähige“ Computermodelle mit bestimmten Anforderungen an Realitätsbezug und Zuverlässigkeit. Anstelle des Begriffs ‚Prognose‘, wie er z.B. in den Wirtschaftswissenschaften gebräuchlich ist, wird – in Anlehnung an das Radar - hier eher von ‚Projektion‘ gesprochen. Dies schließt auch die Möglichkeit verschiedener gleichwertiger zukünftiger Entwicklungen („Zukünfte“) ein. Welche dann eintritt, hängt von verschiedenen, nicht immer vorhersehbaren Weichenstellungen ab.

Modelle zur Ableitung von Konsequenzen des Klimawandels müssen u.a. drei Grundbedingungen genügen und dies auch nachweisen: Prognosefähigkeit, Realitätsbezug und Entscheidungsrelevanz.

Prognosefähigkeit: Die nichtlineare Dynamik komplexer Systeme, wie Klima- oder Erdsystem, lässt sich ohne Computermodelle nicht in die Zukunft extrapolieren. Selbst wenn wir das Auf und Ab des Klimas der Vergangenheit aus paläologischen Daten exakt und lückenlos rekonstruieren könnten (inklusive Sonnenstrahlung und Vulkanismus), so würde dies als Information nicht ausreichen (Stichwort: chaotisches Verhalten). Erst Modelle, die mit verifizierten Daten ertüchtigt, die nicht-linearen Beziehungen von Ursachen und Wirkungen nachbilden können, erlauben einen - wenn auch unscharfen und lückenhaften - Blick in die Zukunft. Dazu braucht es zusätzlich Szenarien, um die für das Ergebnis wesentlichen, aber nicht vorhersehbaren Weichenstellungen in Form von Wenn-dann-Aussagen einzubringen. Dies trägt zwar zusätzlich zur Unschärfe bei, dient aber dem Realitätsbezug.

Realitätsbezug: Die angesprochene eingeschränkte Prognosefähigkeit besitzen streng genommen nur heuristische Modelle, die beanspruchen, die in der Realität vorhandene nichtlineare Dynamik von Ursache und Wirkung virtuell nachzubilden und dies anhand nachvollziehbarer Kriterien überprüfen lassen. Sie liefern übrigens selbst bei nicht mit der Realität übereinstimmenden Resultaten einen Erkenntnisgewinn. Die dadurch schrittweise erweiterte Einsicht in die kausalen Zusammenhänge eines komplexen Systems macht den eigentlichen Wert dieser Modelle aus. Viele Modelle gehören nicht in diese Kategorie, z.B. wenn sie auf der Basis von Daten abgeleitete statistische Beziehungen verwenden oder durch Parametrisierung Phänomene in begrenzten Gültigkeitsbereichen nachbilden.

Entscheidungsrelevanz: Das Bestreben, die kausalen Zusammenhänge der Wirklichkeit in einem Modell abzubilden, eröffnet prinzipiell Möglichkeiten zur Einflussnahme. Wenn Ursachen danach analysiert werden, ob und mit welchem Aufwand sie beeinflussbar sind, ergeben sich Ansätze für Strategien, die entweder zu diesen oder jenen Entwicklungen mit jeweils unterschiedlichen Konsequenzen führen. Dies stellt hohe Anforderungen zur Nachvollziehbarkeit und zum Realitätsbezug an Computermodelle und Anwender, um in einem iterativen Prozess die oben definierte Prognosefähigkeit zu erreichen. Komplexe Systeme, die sich grundsätzlich einer Vorhersage entziehen, können dennoch gezielt mit Hilfe von derartigen prognosefähigen Modellen und mittels Indikatoren zum Realitätsbezug strategisch gesteuert werden, wie von Schellnhuber (1998) dargelegt.

Ziel der Ableitung von Auswirkungen ist also nicht die Vorhersage, sondern die Vermeidung negativer Konsequenzen durch Aufzeigen von Handlungsoptionen. Das Verhältnis von negativen und positiven Folgen des Klimawandels hängt außerdem vom Verhältnis der Geschwindigkeiten von Einwirkung und Aktionen dagegen ab. Vor diesem Hintergrund gewinnt ein raumorientiertes Risikomanagement an Bedeutung, das vor allem auf regionaler und lokaler Ebene nicht nur Risiken vorausschauend verringert, sondern auch günstige Alternativen aufzeigen und Chancen eröffnen kann.

2 Regionale Klimaänderungen und Wirkungszusammenhänge

Bei der Frage möglicher Konsequenzen des Klimawandels täuscht der in Bild 1 dargestellte Leitparameter $\langle \Delta T \rangle$ die Anschaulichkeit der erfahrbaren Größe Temperatur vor. Es handelt sich aber lediglich um eine Orientierungsgröße zum Vergleich von Szenarien oder von Vergangenheit und Zukunft. Sie ermöglicht keine direkten Schlussfolgerungen auf zu erwartende Auswirkungen, die von anderen, feiner räumlich und zeitlich aufgelösten Parametern abhängen. Bei einem Winterhochwasser im Schwäbischen zum Beispiel reicht die Kenntnis des mittleren Niederschlags des Monats Februar im Großraum Schwaben nicht aus, sondern man braucht eine stundengenaue Auflösung für kleinräumige Teilflächen des betroffenen Flusseinzugsgebiets. Solche Informationen können die Klimamodelle bisher nicht mit der erforderlichen Zuverlässigkeit liefern. Zur Abschätzung von Auswirkungen braucht man daher andere Methoden der hochaufgelösten Regionalisierung von Klimaänderungen bezüglich der wirkungsrelevanten Parameter, wie des schwankenden zeitlichen Verlaufs von Temperatur und Niederschlag.

2.1 Anforderungen und Methoden der Regionalisierung des Klimas

Eine Regionalisierung des Klimas muss zum einen die Übergänge der Klimazonen wiedergeben und hinsichtlich der Auswirkungen müssen zum anderen natürliche Zusammenhänge, wie Flusseinzugsgebiete, oder solche politischer und wirtschaftlicher Art erfasst werden. Diese sind nicht immer kompatibel und die Eingrenzung der betrachteten Region hängt wesentlich von der Fragestellung ab.

Neben der Einbettung hochauflösender regionaler Teilgitter in das Grobgitter eines GCM, was bisher noch keine zuverlässigen Resultate liefert, werden derzeit drei weitere Methoden der Regionalisierung alternativ verfolgt:

Downscaling: Globale Modellergebnisse werden mittels statistischer Verfahren in regionale Bereiche mit feinerer Skalierung transformiert. Auch hier genügt die Genauigkeit zur Zeit noch nicht den Anforderungen, da Fehler der Ausgangsdaten nicht oder nur unzureichend ausgeglichen werden können.

Regionale atmosphärische Modelle werden weiterentwickelt, bei denen die kleinskaligen atmosphärischen Prozesse erfasst und die spezifischen topologischen Bedingungen abgebildet werden. Sie erhalten die Randwerte der Klimaänderung von globalen Klimamodellen. Von diesen Regionalmodellen wird in absehbarer Zeit erwartet, zukünftige Veränderungen bei risikoträchtigen Extremwetterereignissen, z.B. Starkregen, befriedigend genauig simulieren zu können. Neben dem hohen Aufwand der Methode begrenzt derzeit auch noch mangelnde Genauigkeit die Einsatzmöglichkeiten.

Szenarienmodelle: Bei einer dritten Methode werden mittels statistischer Modelle Szenarien der Entwicklung regionaler Klimaparameter auf der Basis langjähriger regionaler und lokaler Beobachtungsreihen berechnet. Dabei werden zukünftig wahrscheinlich auftretende Datenreihen generiert, die sowohl den mit globalen Modellen berechneten Trend, als auch die regionale Charakteristik der Klimaparameter meteorologisch konsistent wiedergeben [Werner et al. 1997].

Die drei Methoden haben jeweils unterschiedliche Vor- und Nachteile, bzw. Fehler. Die ersten beiden sind äußerst aufwendig. Die erste liefert derzeit noch keine befriedigenden Ergebnisse, während die zweite punktuell schon bei Simulationen von Starkregen- und Hochwasserereignissen nützlich sein

kann. Die am PIK entwickelte dritte Methode ist bezüglich ihrer Aussagen verifiziert und wird derzeit für umfassende Regionalstudien zu möglichen Auswirkungen als am besten geeignet angesehen.

2.2 Das Szenarienmodell für regionale Klimaänderungen

Das Klimaszenarienmodell wird am PIK in verschiedenen Regionalstudien u.a. für Berlin-Brandenburg eingesetzt und erste Ergebnisse wurden in einer Pilotstudie vorgestellt [Stock et al. 1996]. Das Modell wurde seitdem wesentlich weiterentwickelt und bezüglich seiner Gültigkeit an von den Eingabedaten unabhängigen Beobachtungsdaten verifiziert. Es erlaubt zuverlässige Aussagen zur Entwicklung wirkungsrelevanter Klimaparameter bei relativ kleinen und stetigen Änderungen und auch zur Wahrscheinlichkeit der abgeleiteten Szenarien. **Bild 2** zeigt die wesentlichen Schritte.

Vorgegeben wird erstens die zukünftig zu erwartende großräumige Änderung eines meteorologischen Referenzparameters (z.B. der Temperatur) von globalen Klimamodellrechnungen. Das bisherige Regionalklima wird zweitens mittels langjähriger Beobachtungsdaten (Temperatur (min., mittel, max.), Niederschlag, Luftfeuchte, Sonnenscheindauer, Windgeschwindigkeit, usw.) in hoher räumlicher und zeitlicher Auflösung (mehrere Stationen, Tagesdaten) als Basisszenarium ermittelt. Aus beiden Informationen erzeugt das Modell eine neue Zeitreihe des Referenzparameters zur regionalen Wiedergabe des globalen Trends im langjährigen Mittel. Dann werden die übrigen regionalen Klimaparameter mit Hilfe einer nicht-hierarchischen multivariaten Cluster-Analyse meteorologisch konsistent der Zeitreihe des Referenzparameters zugeordnet. Ergebnis ist eine neue Zusammensetzung der simulierten und zugeordneten Zeitreihen der Klimaparameter zu einem Datensatz, der das zu erwartende regionale Klimaszenarium infolge der globalen Änderung beschreibt.



Bild 2: Vereinfachtes Schema des Szenarienmodells zur Generierung zukünftiger regionaler Klimaszenarien aus dem zukünftigen globalen Trend und dem bisher beobachteten Regionalklima mit räumlich und zeitlich hochaufgelösten Daten [Werner et al. 1997]

2.3 Entwicklung von Klimavariabilität und Wetterextremen

Mit der Szenarienmethode erhält man relativ gesicherte Entwicklungen der langfristigen Trends der Mittelwerte von Temperatur, Niederschlag und anderen Klimaparametern. Nach wie vor sehr unsicher sind Angaben zu Schwankungen und Extremwerten, die aber wegen ihrer Bedeutung für mögliche Auswirkungen außerordentlich wichtig sind. Hier besteht ein klarer Forschungsbedarf, insbesondere zur Weiterentwicklung der oben erwähnten Regionalen atmosphärischen Modelle.

Hinsichtlich der Entwicklung von Extremwetterereignissen beobachtet man in den letzten dreißig Jahren bei einigen ursächlich damit verbundenen Großwetterlagen signifikante Veränderungen, die mit dem Klimawandel in Zusammenhang gebracht werden. Für bestimmte Westwind-wetterlagen in Europa (Zyklon West), konnte eine signifikante Zunahme der Andauer seit den siebziger Jahren des letzten Jahrhunderts gezeigt werden [Fraedrich et al. 2001]. Dies ist in **Bild 3 links** deutlich zu erkennen, wobei die beiden Achsen die unterschiedliche zeitliche Dimension von Klima (x-Achse: 100 Jahre) und Wetter (y-Achse: 2 bis 4 Tage) wiedergeben. Diese Großwetterlagen im Winter sind häufig mit extremen lokalen Niederschlägen oder heftigen Stürmen verbunden, z.B. der Lawinenkatastrophe von Galtür, Anfang 1999, oder dem Sturm Lothar, Ende 1999.

Auch bei einigen im Sommer auftretenden Großwetterlagen, die vermehrt Starkregenereignissen mit sich bringen, zeigen sich signifikante Veränderungen. **Bild 3 rechts** zeigt eine Zunahme der

Häufigkeit von Starkregentagen (> 30 mm) im Sommer (Juni-August) für verschiedene Großwetterlagen zwischen 1881 und 2001 [Fricke et al. 2002]. Auffällig ist der Anstieg bei Vb-Lagen (TrM), die bei den Hochwasserereignissen an der Oder 1997 und an der Elbe 2002 vorlagen.

Aus solchen Beobachtungen lassen sich unter Vorbehalt auch Erwartungen zur Entwicklung von Extremwetterereignissen herleiten, wie eine Zunahme von Winterstürmen oder im Sommer zunehmend heftigere Starkregenereignisse. Anzumerken ist, dass auch gegenläufige Trends bei anderen Wetterlagen beobachtet werden, woraus sich insgesamt ein regional und jahreszeitlich sehr differenziertes Bild unterschiedlicher Betroffenheit ergeben dürfte.

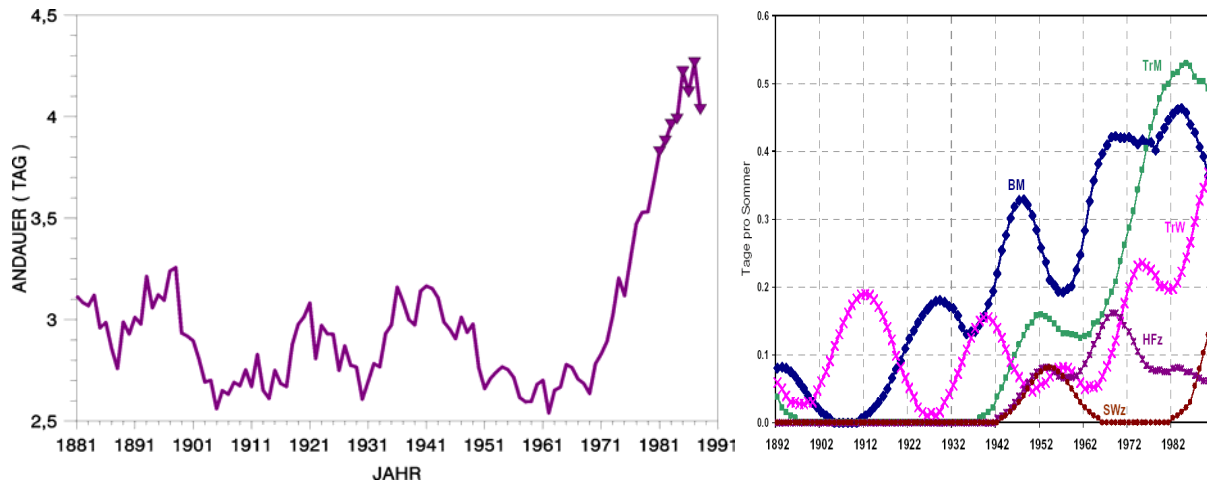


Bild 3 links: Ergebnis einer statistischen Analyse von winterlichen Westwind-Wetterlagen in Europa für den Zeitraum 1881 bis 1991 [Fraedrich et al. 2001]. Die Andauer in Tagen ist im zehnjährigen Mittel angegeben. Seit etwa 1970 nimmt sie signifikant zu. Diese Großwetterlagen sind auch mit Extremereignissen wie Starkregen und Stürmen verbunden, z.B. Sturm ‚Lothar‘ (26.12.1999).

Bild 3 rechts: Trends der Häufigkeit von Starkregentagen (> 30 mm) im Sommer (Juni-August) für verschiedene Großwetterlagen zwischen 1881 und 2001 mit signifikant ansteigender Anzahl [Fricke et al. 2002]. Auffällig ist der Anstieg bei Vb-Lagen (TrM). Eine solche Großwetterlage gab es bei den Hochwasserereignissen an der Oder 1997 und an der Elbe 2002.

3 Regionale Auswirkungen und Managementstrategien

Die zukünftigen Auswirkungen des Klimawandels ergeben sich in einem komplexen Wirkungssystem des Globalen Wandels, der eine Vielzahl an Veränderungen von Umwelt und Gesellschaft umfasst, die einerseits globale Beziehungsmuster erkennen lassen und andererseits deutliche Wirkungen auf regionaler und lokaler Ebene zeigen. Neben der Änderung der Klimaparameter, als einer Facette von vielen, müssen gleichermaßen auch andere Veränderungen, wie z.B. Bevölkerungsentwicklung, technische Innovation oder der Wandel ökonomischer Bedingungen einbezogen werden. Diese regional sehr unterschiedlich ausgeprägten Faktoren führen zu entsprechend differenzierter Exposition von Regionen im Klimawandel. Wo sich welche Auswirkungen in welcher Ausprägung und Intensität zeigen werden, kann nur eine Forschung aufzeigen, die vorhandene Methoden nach oben beschriebenen Kriterien weiterentwickelt, sowie neue Methoden zu ihrer Integration erarbeitet.

Die Methoden der Analyse hängen von der Art der Wirkungen und der raum-zeitlichen Dimension der Zusammenhänge ab. Dies reicht einerseits von der Mikroebene zellbiologischer Vorgänge, wie der CO_2 Aufnahme und Abgabe in der Biosphäre, bis zur Makroebene mit geologischen und planetarischen Einflüssen (z.B. Erdbahnparameter) andererseits. Damit reicht die Skala immerhin über fünf bis sechs Größenordnungen sowohl räumlich wie zeitlich. Hinzu kommt als dritte Dimension die Vielfalt erforderlicher wissenschaftlicher Disziplinen, d.h. Methoden, Modelle und Daten. Trotz dieser Schwierigkeiten lassen sich regionalspezifische Ansatzpunkte für Auswirkungen und Gegenmaßnahmen erkennen und darlegen.

3.1 Exposition von Regionen im Klimawandel

Folgende Wirkungsstrukturen im Klimawandel mit allmählichen Veränderungen oder Extremereignissen betreffen die verschiedenen Regionen der Erde sehr unterschiedlich.

3.1.1 Allmähliche Veränderungen

Meeresspiegelanstieg: Nach dem jüngsten Bericht des IPCC führt die Temperaturerhöhung gemäß Bild 1 infolge Wärmeausdehnung zu einem Anstieg des Meeresspiegels im Bereich 0,2-0,7 m im globalen Mittel in den nächsten 100 Jahren. Berücksichtigt man auch die unsicheren Veränderungen beim Inlandeis, so erweitert sich die Spanne auf 0,1-0,9 m. Die regionalen Unterschiede insbesondere verstärkt durch Meeresströme und Stürme, können beträchtlich sein. Auswirkungen sind erhöhte Küstenerosion, sowie Versalzung und Degradation von Böden.

Klimazonen: Nach jüngsten Untersuchungen unter anderem am PIK sind die in den letzten 100 Jahren zu beobachtenden Verschiebungen von Klimazonen beträchtlich. In Deutschland können sie regional z.T. bis zu vier Zonen ausmachen [Werner et al. 2002]. Die Folgen dieses weltweit zu beobachtenden Phänomens sind verstärkter Anpassungsdruck und Artenschwund. Rückwirkungen auf das Klimasystem (Albedo, Kohlenstoff- und Wasserkreislauf, Permafrostböden, etc.) sind zu erwarten. Die Analyse der Auswirkungen auf natürliche Ökosysteme geben erste Hinweise für Anpassungsmaßnahmen in Land- und Forstwirtschaft.

Nichtlineare Prozesse: Als nichtlineares System kann das Klima unter bestimmten Voraussetzungen selbst auf kleine Änderungen stark und sogar sprunghaft reagieren. Veränderungen und Instabilitäten können ozeanische Strömungen („Golfstrom“) oder die Wechselwirkungen von Atmosphäre und Ozean, wie El Niño Southern Oscillation (ENSO), North Atlantic Oscillation (NAO) oder Monsun zeigen. Eine Begleiterscheinung sind Veränderungen der Klimavariabilität.

Großwetterlagen und Klimavariabilität: Einige bereits zu beobachtende Änderungen der Charakteristik von Großwetterlagen wurden schon erwähnt. Daraus lässt sich noch kein stringentes Bild zukünftig veränderter Klimavariabilität erkennen, jedoch zeichnet sich ab, dass gewohnte regional spezifische Praktiken und Erfahrungswerte, wie z.B. Bauernregeln, zukünftig noch weniger verlässlich sein werden. Für die Auswirkungen bedeutsam sind zu erwartende Veränderungen der Extreme.

3.1.2 Extremwetterereignisse

Etwa 5 bis 10% des Bruttosozialprodukts westlicher Industrienationen unterliegen Wettereinflüssen, das entspricht etwa 300 Milliarden US\$. Dabei spielen Wetterextreme eine große Rolle, die wahrscheinlich in einigen Regionen, aber nicht generell, häufiger und heftiger auftreten werden. Erste Trendanalysen deuten steigende Zahlen wetterbedingter ‚Elementarereignisse‘ (Stürmen, Hochwasser, Lawinen, usw.) an. Dies ist noch nicht statistisch signifikant, wohl aber die Zunahme der dabei verursachten Schäden, wie sie die Versicherer registrieren [Münchner Rück].

Starkregen: Folgen sind Überschwemmungen, Sturzfluten und Erdbeben. Die oben erwähnte signifikante Veränderung bestimmter Großwetterlagen, die häufig mit extremen lokalen Niederschlägen verbunden sind, lässt hier eine Zunahme erwarten. Vereinzelt zeigen sich bereits entsprechende Verschärfungen in Hochwasserstatistiken [Caspary 2000].

Andere Niederschlagsextreme sind Hagel, Eisregen, extreme Schneefälle (Lawinen). Hier kann punktuell auch eine Zunahme eintreten, aber die Daten sind noch unsicherer als beim Starkregen.

Nebeltage werden möglicherweise vereinzelt lokal bis regional häufiger, woanders seltener.

Stürme: Erste statistische Nachweise für eine Zunahme von Stürmen liegen inzwischen vor. Seit den siebziger Jahren werden zunehmend höhere Wellen im Atlantik beobachtet [Grevemeyer 2000] und nach Modellrechnungen auch erwartet [Bauer et al. 2000]. Die Seegangswellen nehmen mit dem Quadrat der Windgeschwindigkeit zu und sind somit ein empfindlicher Indikator für zunehmende Windstärken und –dauern.

Dürreperioden: Wassermangel und seine Begleiterscheinungen, wie Gesundheitsgefahren, Nahrungsknappheit und Bodenerosion sind schon heute eine große Bedrohung in einigen Regionen der Erde, wobei viele Faktoren neben dem Klima eine Rolle spielen (siehe Beispiel Wasserproblematik). Hier werden zum Teil dramatische Verschlechterungen erwartet.

Hitzewellen: Betroffen von Hitzewellen sind vor allem ältere und sehr junge Menschen sowie Personen, die an Herz-Kreislauf- und Atemwegserkrankungen leiden, während gesunde erwachsene Personen über Abwehrmechanismen gegen einen begrenzten Temperaturanstieg verfügen. Der Tod trifft in vielen Fällen ohnehin geschwächte Personen, bei denen der Zeitpunkt des Todes oft nur vorweggenommen wird. Entsprechend sinken die täglichen Todesraten in den Wochen nach einer Hitzewelle. Nach einer Studie in den USA betrifft dies 20-40% der Todesfälle während einer Hitzeperiode [McMichael, 1996]. Untersuchungen in Baden-Württemberg für die Zeit von 1968 bis 1993 zeigen einen Anstieg der Mortalitätsrate um 10% bei extremer Wärmebelastung und einen Rückgang um fast 3% in den darauf folgenden 40 Tagen [Jendritzky, 1998]. Hitzewellen haben deutlich stärkere Auswirkungen in Städten als in den sie umgebenden suburbanen und ländlichen Gebieten, da die Temperaturen in der Stadt Hitzeinseln ausbilden und eine nächtliche Abkühlung weitgehend ausbleibt. Dagegen bedrohen Wald- und Steppenbrände verstärkt naturnahe Gebiete.

Kälteextreme fordern bisher mehr Menschenleben als Hitzewellen. Sie werden zukünftig weniger häufig erwartet – daher ergibt sich in der Gesamtbilanz für Temperaturextreme eine Verringerung der Schäden durch den Klimawandel. Dennoch sind auch neue Kälterekorde wie in letzter Zeit in Sibirien nicht ausgeschlossen.

3.1.3 Komplexe Wirkungsmuster im Globalen Wandel

Die regionalen Auswirkungen des Klimawandels entstehen dynamisch in einem komplexen Zusammenspiel vieler verschiedener Wirkungsfaktoren, wie in **Bild 4** skizziert. Neben Veränderungen des Regionalklimas spielen für die regionale Exposition und Verwundbarkeit auch nicht-klimatische Faktoren eine Rolle, wie z.B. Landnutzungsänderungen.

Zwei parallele Handlungsfelder sind entscheidend. Zum einen der klassische Klimaschutz, der durch Verminderung der Freisetzung von Treibhausgasen aus zivilisatorischen Quellen langfristig eine Abschwächung der ursächlichen Einwirkungen erreichen will. Zum anderen wird es immer wichtiger, sich vorausschauend an die zu erwartenden unvermeidlichen Veränderungen anzupassen. Angesichts der zu erwartenden Stärke und Geschwindigkeit künftiger Klimaänderungen werden autonome Prozesse, die bisher in Industrieländern der hohen Flexibilität der Wirtschafts- und Gesellschaftssysteme zu verdanken sind, nicht mehr ausreichen. Geplante Anpassungs- und Managementmaßnahmen werden daher entscheidend für Verwundbarkeit, Anpassungsfähigkeit und verbleibenden Auswirkungen in einer Region.

Wie schon vorher erläutert, liefert eine Analyse möglicher Auswirkungen des Klimawandels keine Prognose, sondern mögliche Szenarien. Wesentlich daran ist die Wenn-dann-Beziehung zwischen konstatierten Ursachen, Anpassungsmaßnahmen und daraus abgeleiteten Folgen. Ob diese negativ oder positiv sind, hängt wesentlich davon ab wie schnell die Klimaveränderung im Vergleich zur Anpassungsgeschwindigkeit der betroffenen ökologischen, ökonomischen oder sozialen Strukturen erfolgt. Unterstellt man ein natürliches Beharrungsvermögen dieser Strukturen, die erst nach negativen Erfahrungen mit Anpassung reagieren, so werden negative Folgen unvermeidbar, positive dagegen eher zufällig sein – die Strukturen sind verwundbar. Die besonders beim Klimawandel vorhandene zeitliche Verzögerung zwischen Ursache und Wirkung verschärft einerseits diese Verwundbarkeit passiv reagierender Systeme, ermöglicht aber andererseits vorausschauend agierenden Strukturen eine Steuerung auf der Grundlage einer wissenschaftlichen Analyse.

Eine derartige wissenschaftliche Analyse *möglicher* zukünftiger Auswirkungen und Einflussfaktoren soll Ansätze für Aktionen, Handlungsoptionen und Risiken aufzeigen. Mit dieser Kenntnis können die Beziehungen von Ursachen und Wirkungen und damit die *tatsächlich* eintretenden Folgen gezielt positiv beeinflusst werden. Dieser Mechanismus einer ‚self-destroying prophesy‘ ist Aufgabe der Analyse in Verbindung mit einem vorausschauenden Risikomanagement.

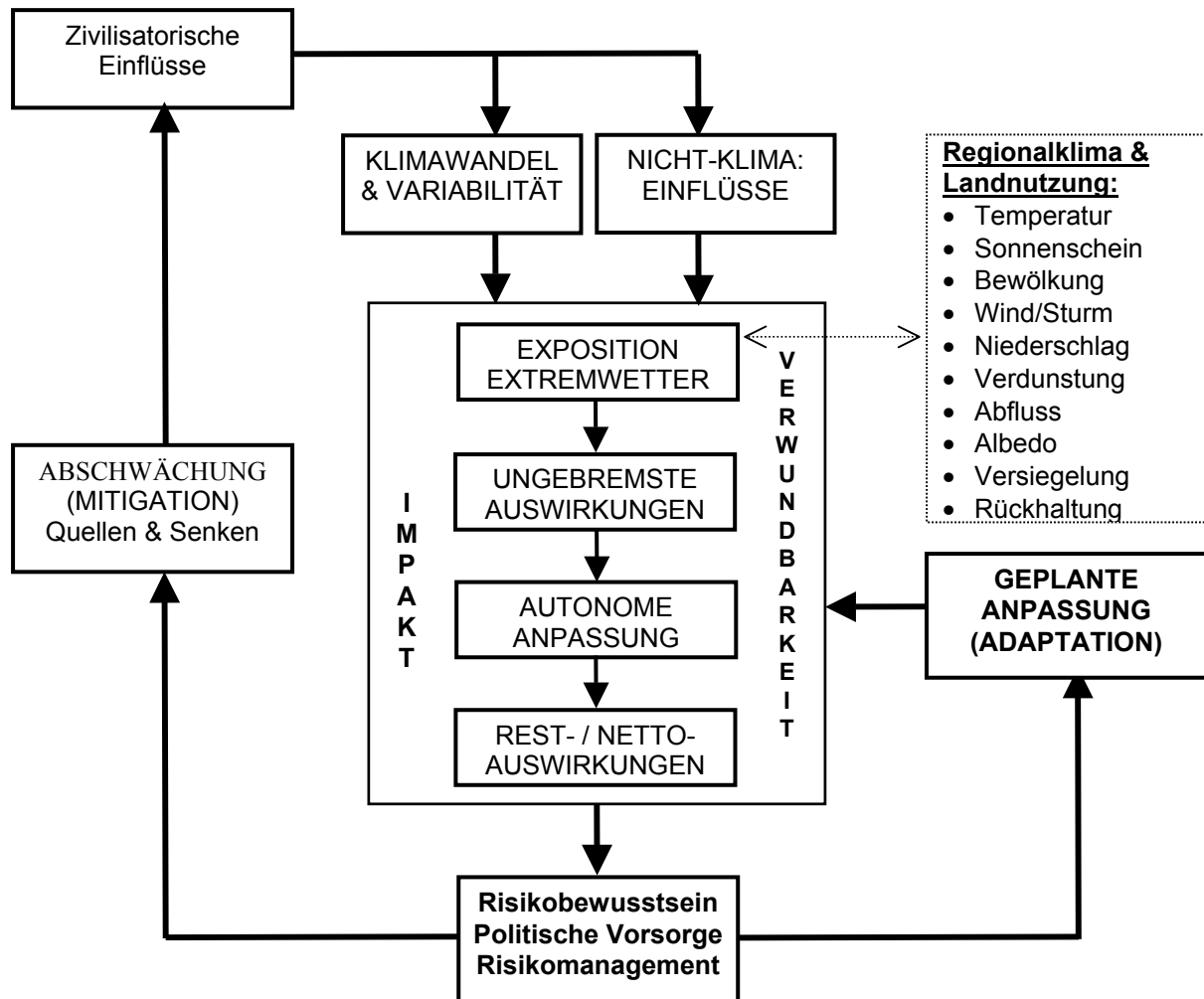


Bild 4: Rolle eines vorsorgenden Risikomanagements in der Wirkungskette von den Ursachen des Globalen Wandels bis zu den regionalen Auswirkungen. Neben Aktionen zur Vermeidung zusätzlicher Treibhausgasemissionen, die mit zeitlicher Verzögerung die globale Erwärmung abschwächen, ist die rechtzeitige Anpassung an die zu erwartenden Folgen wichtig. Maßnahmen, die dazu als Vorsorge im Hinblick auf mögliche Auswirkungen vor deren Eintreten erfolgen, können die später *tatsächlich* real eintretenden Auswirkungen wesentlich positiv beeinflussen.

3.2 Regionale Verwundbarkeit und Anpassungsfähigkeit

Mit Indikatoren für die Verwundbarkeit von zivilisatorischen Strukturen, natürlichen Ressourcen und deren Nutzung kann man regionale und sektorale Unterschiede im Handlungsbedarf ermitteln, und darauf aufbauend gezielt weiter gehende Analysen zur Anpassungsfähigkeit durchführen.

3.2.1 Beispiel: Die globale Wasserproblematik

Die ausreichende Versorgung mit Wasser betrifft die Regionen der Erde sind schon heute sehr unterschiedlich. Wo können sich zukünftig unter den Bedingungen des Globalen Wandels und des Klimawandels, die Probleme verschärfen, wo eventuell entspannen? Um in einer ersten Analyse kritische Regionen herauszufinden, wurde am PIK eine auf Indikatoren basierende Methode entwickelt, die regional aufgelöst Veränderungen verschiedenster Art erkennen und bewerten lässt.

Bei der Wasserproblematik wurde ein regional aufgelöster, zusammengesetzter Indikator der Kritikalität $K(r)$ definiert und untersucht (siehe **Bild 5**). Methode und Ergebnisse wurden in Kapitel 3.1 des WBGU Jahresgutachtens 1997 beschrieben [WBGU 1997]. Die Wasserentnahme wird bestimmt durch die regionale Bevölkerungsdichte, die in Bezug auf Wassereffizienz und Wasserverschmutzung spezifischen Wirtschaftsformen, die Umweltbedingungen und die kulturellen Besonderheiten. Für die Wasserverfügbarkeit sind Klima, Klimavariabilität, Vegetation, Bodenbeschaffenheit und Hydro- und

Topographie sowie wasserbauliche Maßnahmen von Bedeutung. Das schwieriger zu fassende Problemlösungspotenzial hängt z.B. ab von der standortspezifischen Wirtschaftskraft, dem Know-how im Umgang mit Wasser, der Ver- und Entsorgungsinfrastruktur sowie der Effizienz und Stabilität der politischen Institutionen. Effiziente Strukturen der Raumordnung erhöhen dieses Potenzial ebenso, wie z.B. vorhandene Energieressourcen und Kapazitäten zu Meerwasserentsalzung.

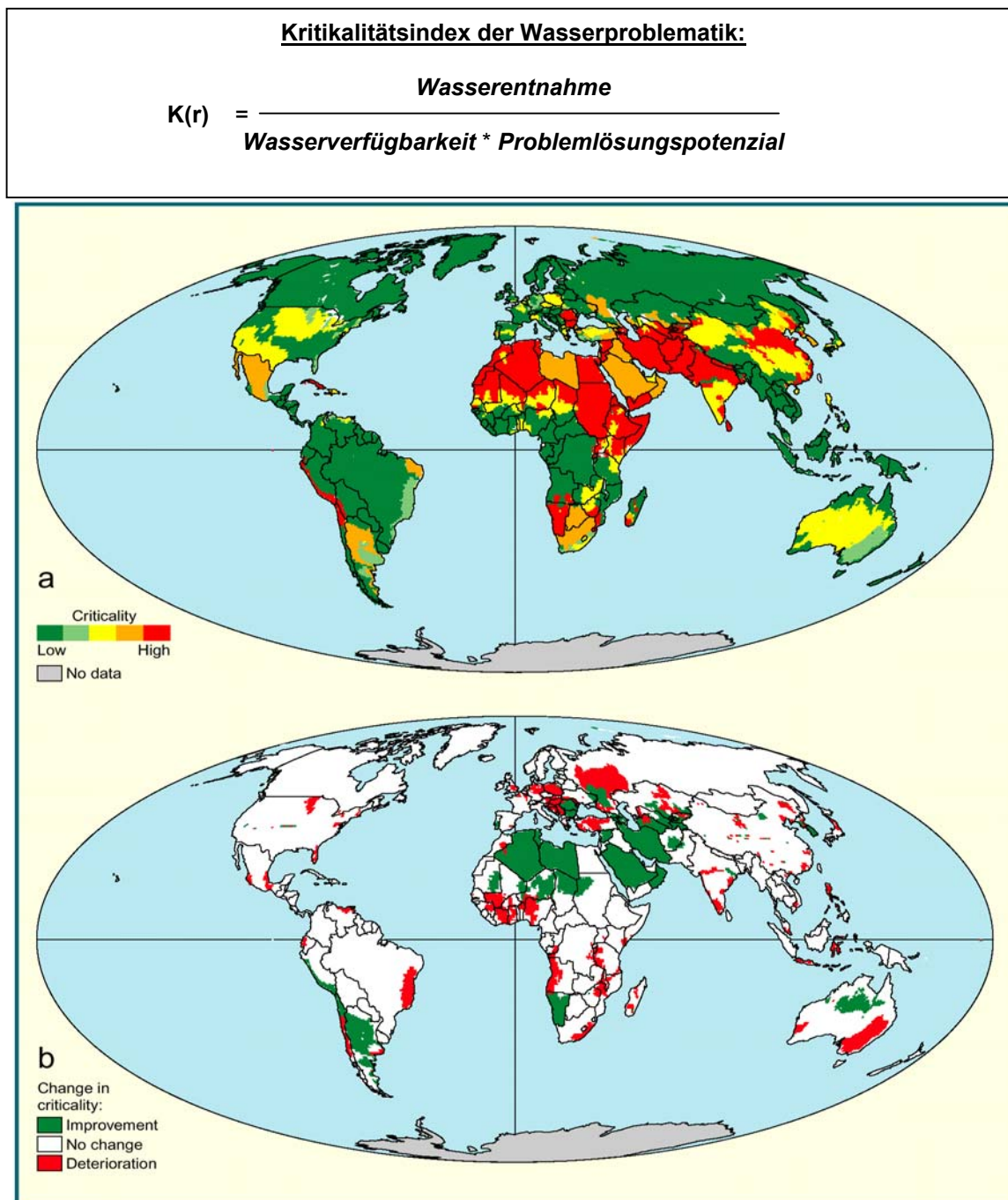


Bild 5: Index der Kritikalität der Wasserproblematik in den Ländern der Erde. **a) Grafik oben:** globale Verteilung der Kritikalität im Jahre 1995. **b) Grafik unten:** Veränderung zwischen 1995 und 2050 für ein Szenarium von Klimaänderung in Kombination mit anderen Faktoren, wie moderate Substituierbarkeit von Ressourcenknappheit durch Kapital, mittleres Szenario der Wasserentnahmeentwicklung, WBGU- IPCC Szenario IS92a für Bevölkerungs- und Wirtschaftswachstum, ECHAM4 Klima-Szenario (IS92a-kompatibel). Rot kennzeichnet Verschlechterung, grün eine Verbesserung. Zu den Gebieten, denen eine Verschlechterung droht, gehört auch die Region Berlin-Brandenburg [WBGU 1997].

Für die Frage, wie sich Wasserproblematik mit dem Klima ändert, wurden neben Bevölkerungswachstum und Wirtschaftsentwicklung Szenarien für die Wasserverfügbarkeit entwickelt. **Bild 5** zeigt

das Ergebnis der Entwicklung bis zum Jahr 2025 für ein Szenarium, mit einem eher zurückhaltend eingeschätzten Problemlösungspotenzial und einer Klimaänderung gemäß dem Szenarium „business as usual“ (IS92a des früheren IPCC Berichts), was etwa im mittleren Bereich der in Bild 1 gezeigten Kurven liegt. Bild 5 a (oben) zeigt die errechnete geographische Verteilung des Kritikalitätsindex für das Jahr 1995., Bild 5 b (unten) die Differenz dazu für das Jahr 2025.

Positive Veränderungen zeigen z.B. Länder mit Erdölreserven, für die Meerwasserentsalzung eine Lösung ist. Zu den Gebieten, bei denen sich in dieser verhältnismäßig groben Abschätzung eine Verschlechterung der Wasserproblematik zeigt, zählt die Region Berlin-Brandenburg. Dies lässt es sinnvoll erscheinen, dort eine genauere, mehr die Wirkungszusammenhänge im Detail betrachtende Analyse durchzuführen, wie sie weiter unten beschrieben wird.

3.2.2 Verwundbarkeitsanalyse einer Region: Beispiel Nordrhein-Westfalen

Die beschriebene Methode zur Analyse der Wasserproblematik ähnelt den Verfahren zur Abschätzung von Risikozonen für Naturkatastrophen, wie sie in der Versicherungswirtschaft eingesetzt werden. Analog lassen sich die regional unterschiedlichen Risiken gegen wetterbedingte Ereignisse und darüber hinaus gegen Klimaänderungen für verschiedene Wirtschaftszweige mit Hilfe von risikospezifischen Indikatoren ermitteln. Zu betroffenen Wirtschaftszweigen zählen etwa Energieversorger, Wasserwirtschaft, Land- und Forstwirtschaft, Tourismus oder Hersteller witterungssensibler Produkte wie Speiseeis, Erfrischungsgetränke oder Kleidung. Die Abschätzung der möglichen Betroffenheit kann auf unterschiedlicher Aggregationsebene beim Unternehmen, dem Wirtschaftszweig oder der Region erfolgen. Dabei werden die wirtschaftlichen Kenngrößen (Basis-Indikatoren) des wettersensiblen Inventars bestimmt, ebenso wie die für die Sensibilität relevanten Indikatoren der Wetterereignisse. Zur Quantifizierung verwendet man statistische Zusammenhänge zwischen den Indikatoren.

Für das Land Nordrhein-Westfalen wurde mit dieser Methode eine Studie zu regionalen Auswirkungen des Klimawandels erstellt, in der die Verwundbarkeit auf Kreis- und Gemeindeebene nach verschiedenen Wirtschaftssektoren untersucht wurde [Block et al. 2001]. Entsprechend den unterschiedlichen Gefahrenlagen lassen sich die verschiedenen Klima- bzw. Wetterwirkungen nach zeitlichen Einwirkungscharakteristiken differenzieren. Wie zwischen kurzzeitigen, aber intensiven Wetterereignissen oder mittel- bis längerfristigen Veränderungen von Niederschlagsverteilungsmustern und Temperaturverläufen.

Solche Ereignisse können - je nach vorhandenem naturräumlichen oder zivilisatorischen Inventar unterschiedliche Schäden hervorrufen, und die wettersensiblen Bestandteile des Naturraums und der Zivilisation bestimmen den Grad ihrer Verwundbarkeit“, die hier beispielsweise auf Gemeindeebene oder je nach Datenlage auch auf Postleitzahlenebene ermittelt wird. Der Anteil dient dabei als quantitativer Indikator. Je nach betroffener Schadenskategorie müssen unterschiedliche Indikatoren herangezogen werden. Die Auswahl ist dabei heuristisch und kann möglicherweise auf eine Einschätzung von Experten beruhen oder auch nur durch Modellergebnisse gestützt werden.

Die in **Bild 6** dargestellten Beispiele der Verwundbarkeit zeigen Ergebnisse dieser Indikator-konstruktion exemplarisch auf. Untersucht wurden diverse Risiken für verschiedene Wirtschaftszweige (siehe **Tabelle 2**). Man erhält für die verschiedenen Verwundbarkeitsarten mit ihren spezifischen Indikatoren jeweils andere regionale Verteilungen des Risikos.

Die unter **Bild 6 A** gezeigte Verwundbarkeit des Arbeitsmarktes beruht auf Daten der Arbeitsplätze, die von den Landesinstitutionen der Arbeitsämter seit Jahren in hinreichend lokaler Auflösung erfasst werden. Ausgewertet und publiziert werden von ihnen in der Regel nur die sogenannten saisonbereinigten Trends, ohne die implizit enthaltene Information, inwieweit die lokale Arbeitsplatzstruktur von den Witterungseinflüssen abhängt. Aus dieser saisonalen Abweichung vom gemessenen Trend lässt sich ein direkter, auf Gemeindeebene aufgelöster Indikator konstruieren, der diesen Verwundbarkeitsaspekt diagnostiziert. Auch das individuelle Wohlbefinden kann durch Klimaänderungen beeinträchtigt werden (**Bild 6 B**), abhängig von Bevölkerungsdichte, Anteil älterer Menschen und dem wetterbedingten Anstieg von Kreislauferkrankungen bei Hitzeperioden.

Andere Beispiele sind Ernteauffälle in der Landwirtschaft durch verschiedene Extremwittersituationen oder die in **Bild 6 C** dargestellte Verwundbarkeit der Forstwirtschaft gegenüber Sturmereignissen. Hier gehen unter anderem Indikatoren wie der Anteil sturmempfindlicher Baumarten in windexponierten Höhenlagen ein. Ein weiteres Beispiel ist die in **Bild 6 D** dargestellte Verwundbarkeit der industriellen Produktion gegen wetterbedingte Ausfälle. Die regionale Verteilung der Verwundbarkeit ergibt sich aus der Abhängigkeit von ‚Just-In-Time‘-Zulieferungen zum einen und

aus dem Anteil der Einpendler unter den Beschäftigten zum anderen. Wetterbedingte Ausfälle häufen sich dabei durch Zunahme der Tage mit Nebel, Eisregen oder anderen Extremwetterereignissen.

Tabelle 2: Beispiele für Indikatoren zur Bewertung von Klimarisiken für Wirtschaftszweige.

Wirtschaftszweig	Basisindikator	Schadensart	Klimatische Faktoren
Landwirtschaft	Hangneigung, Bodenart	Bodenerosion	Starkregenereignisse
Forstwirtschaft	Orographie, Baumarten	Sturmschäden	Sturmereignisse
Produktion, Verkehr	Transportaufkommen Pendleraufkommen	Produktionsausfall	Starkregen, Hagel, Nebel
Gesundheitswesen	Bevölkerung, Altersstruktur	Kreislaufkrankungen Hitzestress	Hitzewellen, mehr heiße, schwüle Tage
Energieversorgung	Altbaubestand	Energieverlust	Kälteperioden

Ziel solcher Studien ist es, mögliche Risiken zu identifizieren und Ansätzen für ein Risikomanagement aufzuzeigen. Wie schon beim Beispiel der Wasserkritikalität zu sehen war, ist die Methode der Konstruktion von Indikatoren grundsätzlich offen hinsichtlich positiver oder negativer Folgen. Indikatoren für mögliche Chancen einer Klimaänderung müssen sich auf positive Effekte der langfristigen Trendentwicklungen für einen bestimmten Sektor stützen können und die Verwundbarkeit gegenüber Extremereignissen darf nicht zu stark sein.

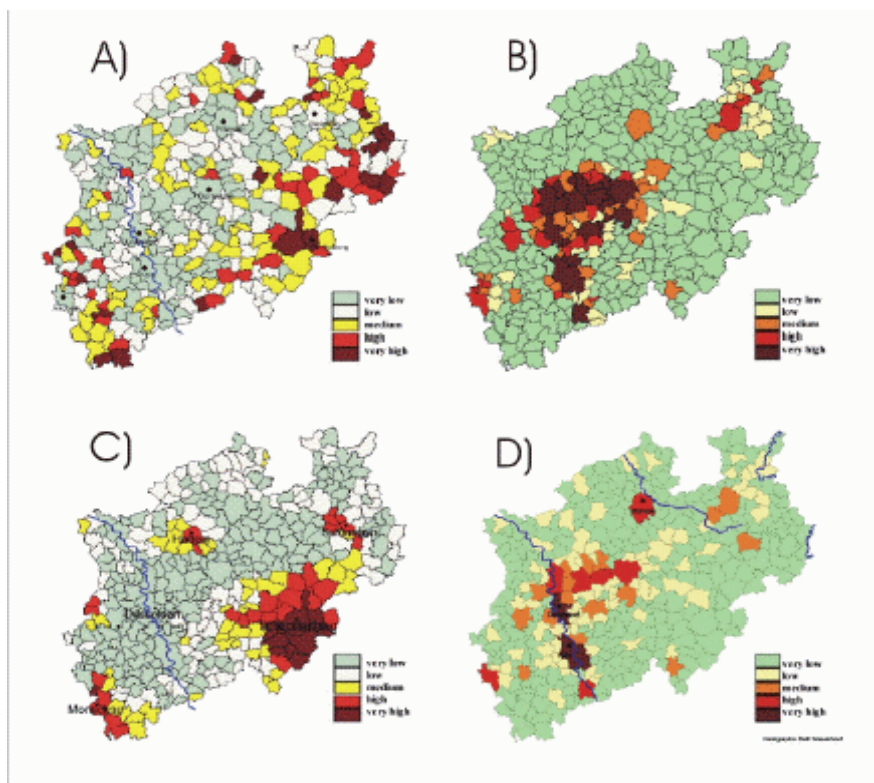


Bild 6: Verwundbarkeit des Landes Nordrhein-Westfalen bezüglich klimatischer Risiken für vier Beispiele und ihre Indikatoren, räumlich aufgelöst auf Kreis- bzw. Gemeindeebene [Block et al. 2001]. Die Verwundbarkeit ist klassifiziert von (1) sehr gering (=grün) bis (5) sehr hoch (=braun). **A) Arbeitsmarkt**, basierend auf saisonalen Schwankungen der Arbeitslosenzahlen; **B) Wohlbefinden**, abhängig u.a. von wetterabhängigen Krankenzahlen; **C) Forstwirtschaft**, basierend auf der Kombination von windexponierten Hanglagen und sturmempfindlichen Baumarten; **D) Industrielle Produktion** Ausfälle infolge Extremwetter (Starkregen, Eisregen und Nebeltage). Basisindikator: Zahl der Einpendler.

3.2.3 Anpassungsfähigkeit wichtiger Wirtschaftszweige

Betrachtet man Risiken und Chancen von sozialen und wirtschaftlichen Bereichen unter dem Einfluss des Klimawandels, so kann man vor allem ohne eine vorausschauende, geplante Anpassung eine Asymmetrie zu Lasten der Chancen erwarten. Zu den Wirtschaftszweigen, die bei vorausschauendem Management teilweise vom Klimawandel profitieren könnten, gehören z.B. Landwirtschaft, Forstwirtschaft, erneuerbare Energien, Versicherungswirtschaft und Tourismus.

Bild 7 zeigt mögliche Auswirkungen des Klimawandels in Europa auf landwirtschaftliche Erträge von Weizen und Weintrauben. Dargestellt sind regionale Verteilungen von Steigerung oder Abnahme [IPCC 2001]. Die Ertragsmodelle errechnen teilweise deutliche Steigerungen, die wesentlich auf dem Düngereffekt durch erhöhten atmosphärischen CO₂-Anteil beruhen. Bei Weizen (Bild 7 a), wie bei vielen anderen Kulturpflanzen, ist der Ertrag durch Niederschläge limitiert, wodurch sich in einigen Gebieten auch Ertragseinbußen zeigen [Harrison et al. 1999]. Dort könnte ein Wechsel zum Anbau von Mais eine mögliche Anpassungsmaßnahme sein. Vielfach, wie bei Sonnenblumen, zeigt sich zwar eine Ausdehnung des Anbaugebiets nach Norden, aber generell ebenfalls abnehmende Erträge.

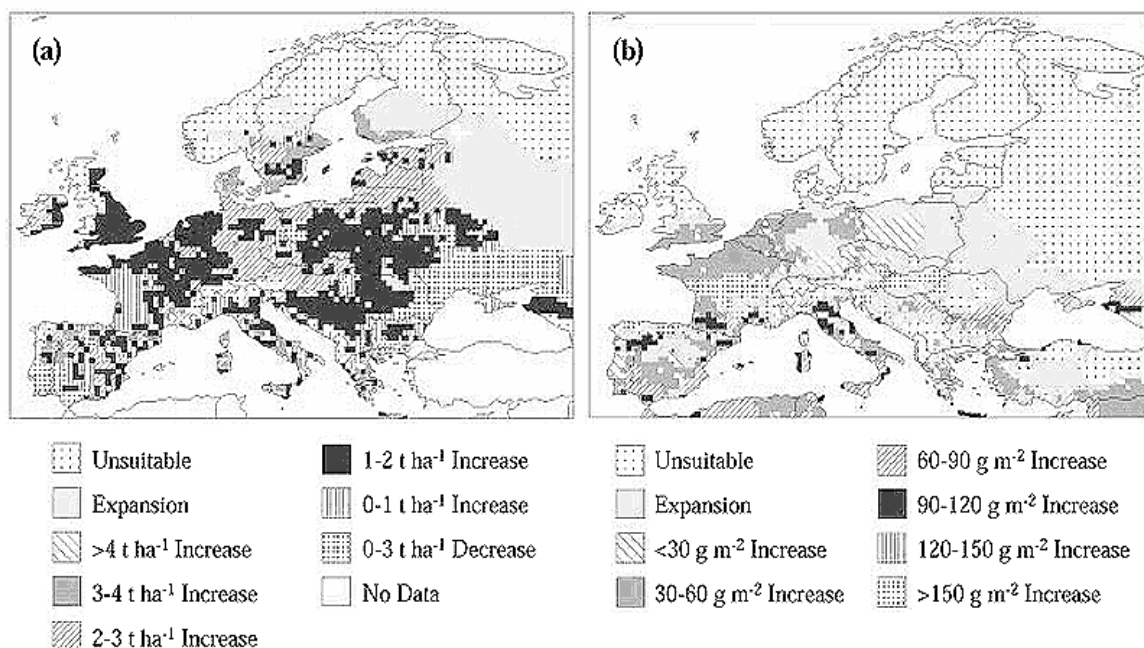


Bild 7: Auswirkungen des Klimawandels in Europa auf landwirtschaftliche Erträge von Weizen (a) und Weintrauben (b). Dargestellt sind die Veränderungen bei einem Klimaszenario für 2050 (HadCM2) im Vergleich zu heute [IPCC 2001, WG II, Fig. 13-6].

Ein interessanter Sektor ist der Weinbau (Bild 7 b) hinsichtlich der Auswirkungen des Klimawandels [Harrison et al. 1999, Bindi et al. 1996]. Auch hier zeigen Rechnungen eine Ausweitung des potenziellen Anbaugebiets nach Norden. In Südengland wird tatsächlich seit etwa 20 Jahren eine stetige Zunahme der Anbaufläche verzeichnet - auch ein Indikator für den Klimawandel. In Deutschland beobachtet man eine Anbauverlagerung von Weiß- zu Rotweinen, die einen höheren Gewinn versprechen - eine Entwicklung die ebenfalls klimatisch begünstigt wird. Es zeigen sich aber auch bereits negative Entwicklungen ab, wie eine erhöhte Anfälligkeit von Rebstöcken und Trauben gegen verschiedene Krankheiten oder Schäden durch Extremwetter kurz vor der Ernte. Sowohl ein stärkerer Einsatz von Chemie, wie auch abnehmende Quantität und Qualität der Trauben infolge Wasseraufnahme oder Fäulnis können die wirtschaftliche Situation der Winzer schwächen.

3.2.4 Extremereignisse und Risikomanagement - Beispiel Hochwasser

Die ausgeführten Indizien lassen vermuten, dass Ereignisse wie extreme Hitzeperioden, Starkregenfälle und Dürreperioden, sowie Orkane häufiger und anders auftreten können als bisher gewohnt. Die Zunahme bei Stürmen wurde angesprochen ebenso wie Hochwasserereignisse, wo sich ähnliches abzeichnet. Für Baden-Württemberg durchgeführte Untersuchungen zeigen, dass Hochwasser seit

Mitte der siebziger Jahre wesentlich häufiger auftreten als vorher [Caspary 2000]. Falls der Trend der letzten 25 Jahre auch für die nähere Zukunft charakteristisch sein sollte, muss in Südwestdeutschland bei verschiedenen Flüssen alle 5 bis 20 Jahre mit einem ‚Jahrhunderthochwasser‘ gerechnet werden. Dieser Trend wurde auch in der Schweiz ermittelt und er dürfte auch für viele andere Regionen zu erwarten sein. So wurde der Klimawandel bei den in Norditalien und der Schweiz 1999 und 2000 gehäuft auftretenden Hochwasserereignissen von Lokalpolitikern mehrfach als Hauptursache genannt. Doch spielen derzeit noch eine Reihe anderer Faktoren eine entscheidende Rolle und diese sollten ernsthaft berücksichtigt werden, damit eine geplante Anpassung an die zukünftige Verschärfung durch den Klimawandel erfolgen kann.

Bild 8 demonstriert das Zusammenspiel verschiedener Faktoren, die beim Hochwasser die Häufigkeit und die Konsequenzen, also im Resultat das Risiko bestimmen. Die vier Einflussbereiche Klima, Landschaft, Gewässer und Besiedlung tragen unterschiedlich dazu bei und sind Veränderungen unterworfen. Noch vor dem Klima verändert der Mensch die Landschaft. Die vom Menschen gestaltete Oberfläche, ob als Acker, Verkehrsfläche oder Skipiste, verhält sich bei Starkregen anders als ein vorher dort vorhandener Wald. Bach- und Flussläufe wurden begradigt und betoniert. Schließlich entstanden Neubauten, Siedlungen und Gewerbegebiete, manchmal ohne deren Gefährdung durch Hochwasser ausreichend zu berücksichtigen. Erst die Werte dort bewirken die Schäden, die das Ereignis Hochwasser zur Katastrophe werden lassen.

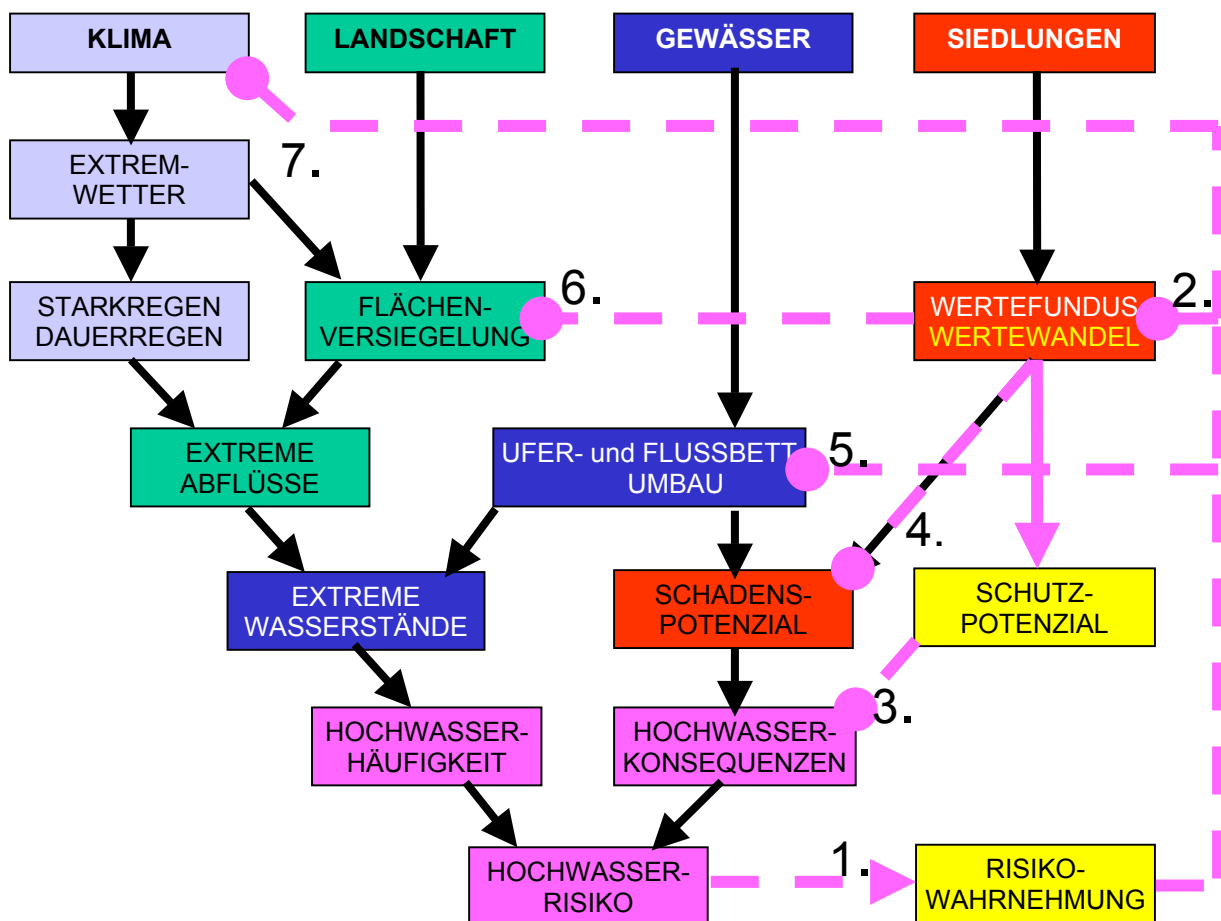


Bild 8: Zusammenwirkende Einflüsse von Klimaänderung, anderen Veränderungen der Land- und Gewässernutzung und Risikowahrnehmung auf das Hochwasserrisiko [Stock 2001]. Ansatzpunkte des Risikomanagements sind 1. Risikowahrnehmung, 2. bis 6. vorsorgende Maßnahmen zur Anpassung an die geänderten Anforderungen des Hochwasserschutzes und 7. Klimaschutz.

Das Bild macht deutlich, wie kleine voneinander scheinbar unabhängige Veränderungen zusammen in einer Art Kaskade von Stufe zu Stufe den Ablauf von Ereignissen vom Starkregen bis zur Hochwasserkatastrophe verstärken können. Diese Verkettung ungünstiger Umstände ist aber kein unabwendbares Schicksal, wie einzelne Beispiele erfolgreichen Risikomanagements belegen. Bei

bewusster Wahrnehmung des Risikos und seiner Ursachen (1.) lassen sich regional zugeschnittene risikomindernde Maßnahmen ableiten (2.-6.). Dazu gehören Beschränkungen eines rein quantitativ orientierten Wachstums von Besiedlung und anderweitiger Inanspruchnahme von Landschaft, naturnähere Gewässergestaltung und verstärkte Maßnahmen des vorbeugenden Hochwasserschutzes.

3.2.5 Landnutzung und Hochwasser

Nach wie vor ist es schwierig, den Einfluss von Landnutzungsänderungen auf die Entstehung von Hochwasser quantitativ zu beschreiben. Dies erfordert die genaue Erfassung der komplexen räumlichen Struktur der Landschaft und die Erstellung von Landnutzungsszenarien. Dabei werden Annahmen darüber getroffen, wie sich die Landschaft in Zukunft verändern könnte, die zum Beispiel Verstädterungstendenzen, die Stilllegung landwirtschaftlicher Fläche oder Aufforstung berücksichtigen.

Anhand eines am PIK entwickelten Verfahrens werden die veränderten Flächenanteile in Landnutzungskarten umgesetzt, die direkt in ein Niederschlag-Abfluss-Modell eingebunden werden, welches bei der Hochwassersimulation zur Anwendung kommt. Bei einem Verstädterungsszenarium im Einzugsgebiet der Lein bei Heilbronn (115 km²) erfolgen Neuansiedlungen nur in Erweiterung bereits bestehender Siedlungen und nur auf Flächen, die dafür geeignet sind. Die Auswirkungen des Siedlungswachstums wurden mit einem detaillierten Niederschlag-Abfluss-Modell simuliert, das die Lage der verschiedenen Landnutzungen im Gebiet berücksichtigt. Ergebnisse von Computersimulationen zeigen in **Bild 9** die Zunahme beim Abfluss für unterschiedliche Siedlungsanteile und Niederschlagsereignisse [Niehoff et al. 2001].

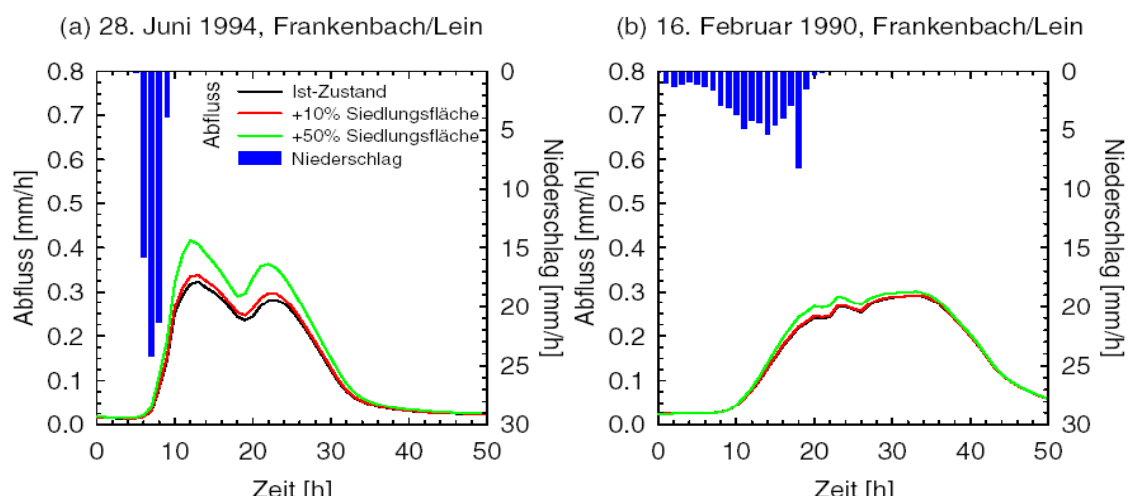


Bild 9: Computersimulation von zwei Hochwasserereignissen im Einzugsgebiet der Lein bei Heilbronn. Die Ergebnisse für den Ist-Zustand entsprechen gut den gemessenen Werten. Die Simulation von Landnutzung in Form einer Zunahme der Siedlungsfläche um 10% oder 50% zeigt die Folgen für das Abflussverhalten. Ereignisse dieser Größenordnung treten dort im Mittel alle 5 Jahre auf, infolge länger anhaltender ergiebiger Landregen [Niehoff et al. 2001].

3.3 Analyse einer Region: Berlin-Brandenburg

Die vorgestellte Verwundbarkeitsanalyse zur globalen Wasserproblematik ergab eine kritische Entwicklung infolge des Klimawandels für den Raum Berlin-Brandenburg, einer Region in Europa, die bereits heute eine gerade noch ausgeglichene Wasserbilanz aufweist. Neben diesem Aspekt werden am PIK in den laufenden Studien zu Brandenburg verschiedene ökologische und ökonomische Auswirkungen im Zusammenhang mit der Klimaveränderung untersucht. Eine erste Pilotstudie wurde bereits vor sechs Jahren vorgestellt [Stock et al. 1996]. Seitdem hat sich auch bei der Analyse der Auswirkungen am PIK einiges weiterentwickelt. Einige der folgenden Ergebnisse sind in einem Sonderband von „Environmental Modelling & Assessment“ veröffentlicht [Schellnhuber et al. 1999].

3.3.1 Weniger Niederschläge und zunehmende Trockenperioden

Mit Hilfe der in Abschnitt 2.2 beschriebenen Methode wurde die regionale Klimaänderung bis zum Jahre 2050 berechnet. **Bild 10** zeigt oben das heutige Klima der Region, von links nach rechts bezüglich Jahresmitteltemperatur, Jahresniederschlagssumme und potenziell natürlicher Vegetation [Lasch et al. 1999]. **Bild 10** zeigt unten die zu erwartenden Änderungen dieser drei Parameter und ihrer regionalen Verteilung bis zum Jahr 2050 bei einem Klimaszenarium mit einem Temperaturanstieg um 1,5 °C. Die Modellrechnungen lassen in Weiterführung eines bestehenden Trends einen deutlichen Rückgang der Niederschläge, in der Jahressumme um 50-100 mm, aber vor allem in der Wachstumsphase der Vegetation und im Sommer erwarten.

Das verwendete Szenarium stellt keinesfalls den schlimmsten möglichen Fall dar, sondern ist eher als moderat anzusehen, hat aber eine hohe Eintrittswahrscheinlichkeit. Der bereits bestehende Trend einer jahreszeitlichen Verschiebung der Niederschläge vom Sommer- ins Winterhalbjahr bei insgesamt signifikanter Abnahme setzt sich bis ca. 2030 fort und beschleunigt sich dann zunehmend. Dies führt zu kritischen Situationen für Land- und Forstwirtschaft, vor allem aber für die Wasserwirtschaft.

3.3.2 Strategien gegen eine Zunahme von Waldbränden

Die in Brandenburg existierenden Kiefernmonokulturen sind schon heute stark von Waldbränden betroffen. Aus den Daten der letzten Jahre lässt sich ein enger Zusammenhang zwischen der Zahl der Waldbrände in einer Vegetationsperiode (1.April bis 30.Sept.) und den Klimaparametern {Zahl der Tage mit $T_{\max} \geq 25^{\circ}\text{C}$ } / {Summe des Niederschlags} ableiten.

Für das in Bild 10 gezeigte Klimaänderungsszenarium der Region Berlin-Brandenburg lässt sich mit diesem Zusammenhang eine deutliche Zunahme der Waldbrände in Kiefernmonokulturen um bis zu 30% ableiten. Ein Programm zum Waldumbau hin zu potenziell natürlicher Artenzusammensetzung in Brandenburg, das den Klimawandel hinsichtlich möglicher Verschiebungen der Arten berücksichtigt, empfiehlt sich als Anpassungsmaßnahme gegen Risiken von Waldbränden und Schädlingen. Hieran zeigt sich, wie die Ableitung möglicher Folgen Maßnahmen initiieren kann, die das Eintreten dieser Folgen verhindern können.

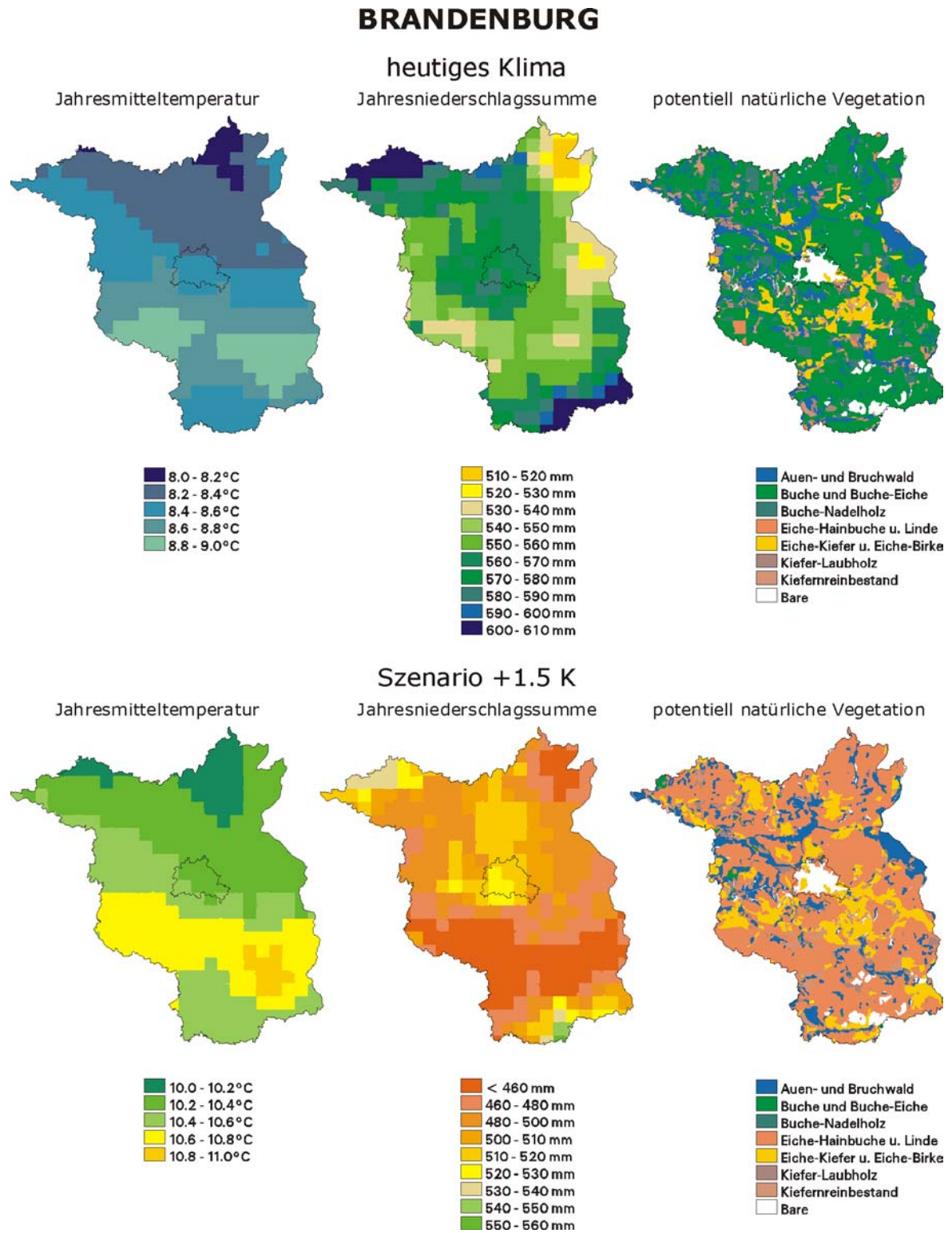


Bild 10: Auswirkung der Klimaveränderung auf die Region Berlin-Brandenburg von heute (oben) bis zum Jahr 2050 (unten) für ein regionales Klimaszenario mit einer Erhöhung der mittleren Temperatur um 1,5 °C. Dargestellt ist von links nach rechts die regionale Verteilung der Jahresmitteltemperatur, der Jahresniederschlagssumme und der potenziell natürlichen Vegetation.

3.3.3 Gefahren für den Wasserhaushalt der Region und Vorsorgemaßnahmen

Die besorgniserregenden ersten Analyseergebnisse machen eine genauere Untersuchung der zukünftig zu erwartenden Wasserbilanz für Berlin-Brandenburg notwendig. Um die Sickerwasserbildung für ein Gebiet wie Brandenburg zu ermitteln, ist der Einsatz eines Wasserhaushaltsmodells notwendig, das für meso- bis makroskalige Gebiete (Flächengrößen von einigen 100 bis zu einigen 10.000 km²) belastbare Ergebnisse liefert. Für die am PIK durchgeführten Arbeiten wurde das hydrologische Modellierungssystem ARC/EGMO EGMO (siehe **Bild 11**) eingesetzt, das für hydrologische Einzugsgebiete sowie beliebig geformte Landschaftseinheiten die Modellierung aller maßgeblichen Prozesse des Landschaftswasserhaushaltes ermöglicht und sich sehr gut für solche Studien eignet (siehe z.B. www.arcegmo.de [LAHMER 2000]). Dazu gehören neben der Anbindung an das Geographische Informationssystem (GIS) ARC/INFO die Verwendung allgemein verfügbare Karten, eine variable Untergliederung (Disaggregation) des Einzugsgebietes in beliebige Flächeneinheiten sowie die zeitliche Aggregation aller Ergebnisgrößen zu Monats-, Jahres-, Sommer- oder Wintersummen sowie zu mittleren Jahreswerten.

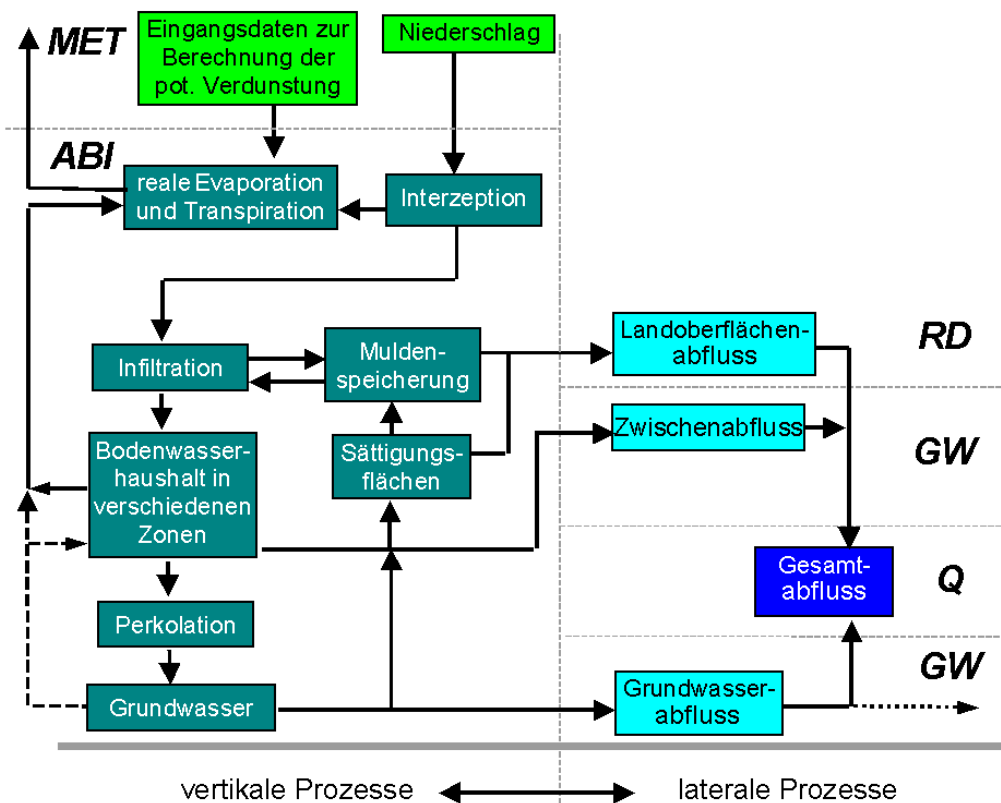


Bild 11: Verknüpfungsschema der Prozesse im hydrologischen Modellierungssystem ARC/EGMO zur Simulation der Wasserhaushaltsgrößen in einer Region (www.arcegmo.de [LAHMER 2000]).

Die Untersuchungen zur Auswirkung des Klimaänderungsszenariums auf den Wasserhaushalt der Region Berlin-Brandenburg liefert zum Teil besorgniserregende Resultate. Einige Punkte:

- Bei abnehmenden Niederschlägen erhöht sich die Gebietsverdunstung über offenen Wasserflächen, die klimatische Wasserbilanz, d.h. die Differenz aus Niederschlag und potentiell verdunstbarer Wassermenge, wird mit ca. -55 mm/Jahr stark negativ und die Grundwasserneubildung sinkt sogar um etwa 35%.
- Der beobachtete Trend beschleunigt sich gegen Ende der Simulationsperiode (240-2050).
- Die Wasserstände in den Flüssen gehen merklich zurück, was in den trockenen Sommermonaten für längere Zeiträume zu Niedrigwasser führt.

- Bei zunehmenden Trockenperioden werden Probleme der Bereitstellung von Trinkwasser auftreten und die Wasserqualität wird sinken.

Eine Schlussfolgerung ist, dass mögliche Klimaänderungen bei mittel- bis langfristigen politischen Entscheidungen, bei denen Hydrologie und Wasserhaushalt betroffen sind, wie z.B. dem Ausbau der Havel und anderer Schifffahrtswege, nicht mehr wie bisher außer Acht gelassen werden dürfen. Eine weitere Konsequenz betrifft die noch vielerorts laufenden Entwässerungsmaßnahmen in der Tradition vergangener Jahrhunderte. Auch hier ist ein Umdenken angeraten.

Nicht nur bei diesen beiden Beispielen fällt auf, dass Planungen mit Investitionen für Jahrzehnte, in der Regel heutige oder frühere Verhältnisse fortschreiben, statt die zu beobachtenden oder zu erwartenden signifikanten Änderungen der Planungsgrundlagen zu berücksichtigen.

3.3.4 Auswirkungen auf Vegetation, Tourismus, Land- und Forstwirtschaft

Die potentielle natürliche Vegetation Brandenburgs sind Wälder, wie sie sich ohne die Eingriffe des Menschen ergeben würden. Dies lässt sich mit Simulationsmodellen nachbilden, die das Klima, die Änderungen von Stoffeinträgen (Stickstoff, Kohlenstoff usw.), die natürliche Waldentwicklung sowie die flächenbezogenen Boden- und Grundwasserverhältnisse berücksichtigen. Am PIK sind dies die Modelle FORSKA und 4C. Die heutige potentielle Vegetation Brandenburgs besteht danach konsistent mit Erfahrungsdaten vorwiegend aus Buchenwäldern, dazu Kiefern-mischwälder und in den Flussniederungen Auenwälder [Lasch et al. 1999].

Die Klimaänderung gemäß dem 1,5°C Szenarium, die eine deutliche Abnahme der Niederschläge aufweist, fördert nach den Simulationsergebnissen wärmeliebende Laubmischwälder (Linde, Eiche, Hainbuche) auf besseren und Kiefern-mischwälder auf schlechteren Standorten. Die Buche könnte auf Grund ihres dann kaum erfüllbaren Wasserbedarfs in Brandenburg verdrängt werden.

Die Forstwirtschaft in Brandenburg sollte bereits heute auf die sich abzeichnenden Umweltveränderungen reagieren, und die zu erwartenden Verschiebungen im Artenspektrum im Rahmen des Waldumbauprogramms berücksichtigen. Ein unter dieser Prämisse laufender Umbau der Wälder in Brandenburg zu Mischwäldern mit hoher Artenvielfalt wäre eine Anpassungsmaßnahme, die die Auswirkungen von Klimaänderungen wirksam reduzieren könnte.

Die Auswirkungen von Klimaänderungen auf landwirtschaftliche Erträge werden am PIK mit Modellen wie DEMETER oder SWIM ermittelt, die die physiologischen Prozesse in Pflanzen wie Winterweizen, Wintergerste, und Mais simulieren. Die Erträge nehmen infolge Erwärmung und zunehmender Trockenheit ab, was aber wesentlich gemildert wird durch den parallel erfolgenden CO₂-Anstieg, der die Photosynthese anregt und die Widerstandsfähigkeit der Pflanzen gegenüber Trockenheit erhöht [Krysanova et al. 2000]. Daraus lassen sich Anpassungsmaßnahmen ableiten.

3.3.5 Ausblick: von Integrierten Modellen zu Regional-Simulatoren

Anhand der Beispiele wurde deutlich, dass die Region Berlin-Brandenburg in den kommenden Jahrzehnten spürbare Veränderungen erfahren wird. Ähnliches ist für viele andere Regionen zu erwarten. Zur Entwicklung geeigneter Anpassungsmaßnahmen reichen die bestehenden, in der Regel singular auf bestimmte Wirkungszusammenhänge ausgelegten Modelle nicht aus.

Allein um den Einfluss der Klimaänderung realistisch zu erfassen, bedarf es der Weiterentwicklung der vorhandenen Modelle zu sogenannten Integrierten Modellen. Regionalklima, Vegetation, Landnutzung und Wasserhaushalt wechselwirken dynamisch miteinander. Dies lässt sich nur unzureichend dadurch erfassen, eine Veränderung jeweils als Szenarium bei der Berechnung der anderen vorzugeben. Die Modelle müssen daher zueinander kompatibel gemacht und miteinander zu einem Integrierten Modell modular gekoppelt werden. Da bereits die Bestandteile komplex sind, ist diese Kopplung nicht trivial und bisher nur in ersten Ansätzen durchgeführt. Welche Module mit welchem Detaillierungsgrad miteinander gekoppelt werden, hängt wesentlich von der Fragestellung ab. Je nach benötigter Art und Genauigkeit der Antwort muss ein dazu passendes Integriertes Regionalmodell zusammengesetzt werden.

Neben dem Klimawandel sind außerdem demographische und wirtschaftliche Veränderungen aufgrund interner Prozesse (Überalterung) oder externer Triebkräfte (Globalisierung, EU-Osterweiterung) zu berücksichtigen. Dies und die soeben problematisierte Auswahl der Fragestellung auf die das Modell eine Antwort geben soll, führt zum nächsten Schritt. Das Integrierte Regionalmodell wird zum Regional-Simulator erweitert. **Bild 12** zeigt das erste Konzept des Brandenburg-Simulators.

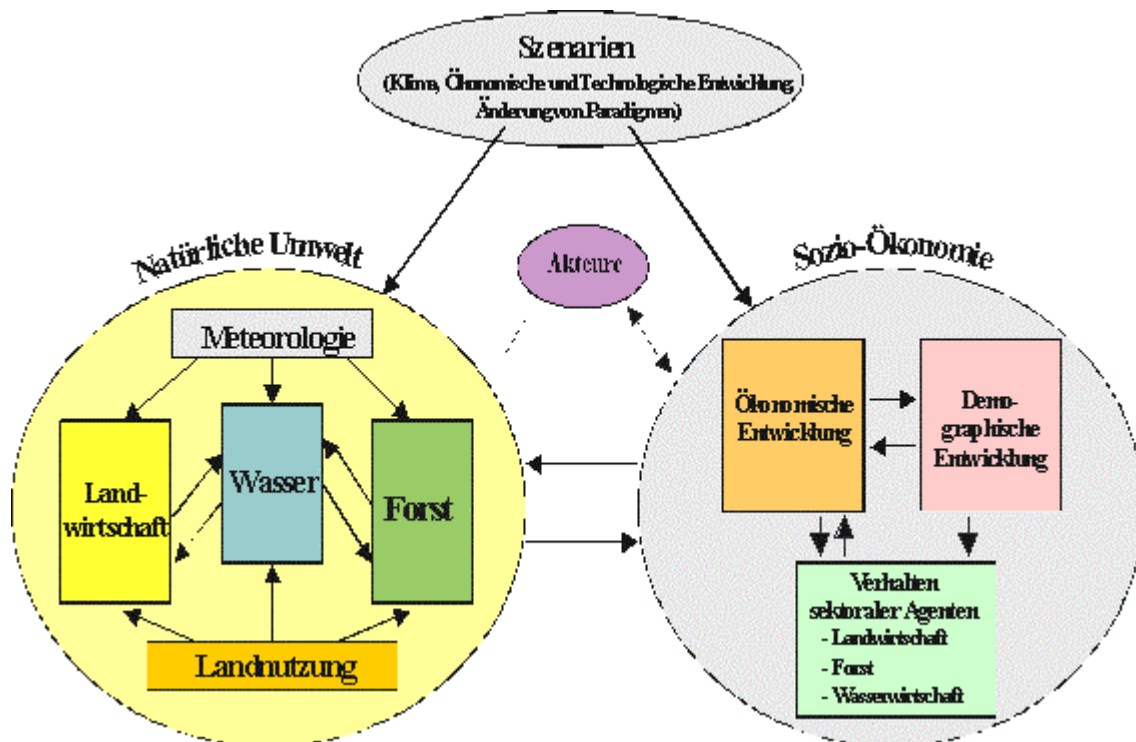


Bild 12: Konzept eines Brandenburg-Simulators (BEST) für ökologische und sozioökonomische Veränderungen der Region Berlin-Brandenburg. Die Kopplung zwischen natürlicher Umwelt und Sozio-Ökonomie erfolgt auf dieser Stufe noch lose über Szenarien, z.B. für die Landnutzung. Gekoppelt werden Prozessmodelle, Szenarien für interne und externe Triebkräfte mit Datensätzen und Managemententscheidungen (Sektorale Agenten). Je nach der benötigten Aufgabenstellung in Diskussion mit den Akteuren und ‚Stakeholdern‘ ändert sich der Zuschnitt des Simulators.

Für den Teil ‚Natürliche Umwelt‘ im Simulator existiert je nach Fragestellung bereits eine gute Auswahl dazu geeigneter Module. Schwierigkeiten bereitet es noch, sie soweit kompatibel zueinander zu machen, dass bei Integration der Module zum Modell keine zusätzlichen Unsicherheiten auftreten. Dies betrifft z.B. die Stoff- und Energieflüsse zwischen den Modulen, aber auch die Beschreibung der Prozesse, z.B. der Verdunstung oder der Evapotranspiration der Vegetation.

Die Verbindung zwischen diesem Teil und der Sozio-Ökonomie ist schwieriger, da ökonomische Modelle in der Regel über einen Zeitraum optimieren, die Klima- und Ökosystemmodelle dagegen in Zeitschritten dynamisch rechnen. Zwei verschiedene Verfahren der Kopplung sind geplant. Zum einen soll das Standardverfahren, die sozio-ökonomischen Parameter als Szenarien zu übergeben, durch vom Kontext abhängige Szenariwahl modifiziert werden. Zum anderen sollen direkt sektorale Agenten im Computer simuliert werden, deren Verhalten in Reaktion auf ökologische Veränderungen zu entsprechenden Vorgaben für Landnutzung, Ressourcenverbrauch und anderem führen.

Übergeordnetes Ziel der Entwicklung eines Regionalsimulators ist es, den Akteuren ein Hilfsmittel zur Entscheidungsfindung an die Hand zu geben. Analog zur Pilotenausbildung im Flugsimulator zeichnet sich die Möglichkeit ab, kritische Entwicklungen und Extremsituationen virtuell im Simulator durchzuspielen und Aktionen auf ihre Konsequenzen und Nebenwirkungen zu testen, bevor dies in der Realität erfolgt. Selbst bei ungenügender Abbildung der Realität im Simulator lässt sich so eine gesteigerte Wahrnehmung potenzieller Risiken und Handlungsoptionen erreichen.

4 Fazit: Strategien der Anpassung werden gebraucht

Die Ergebnisse der Klimafolgenforschung geben Anlass zur Besorgnis. Viele Wirtschaftszweige und Regionen werden vom Klimawandel stark, andere schwächer betroffen sein. Dies verschiebt die Wettbewerbssituation zwischen Regionen und Märkten. Es zeigen sich aber neben den Risiken auch mögliche Lösungswege, Optionen und Alternativen der aktiven Anpassung an die bevorstehenden Veränderungen. **Bild 13** skizziert die Unterschiede zwischen passivem Erdulden des Klimawandels

und aktiver Anpassung. Je nach Robustheit oder Verwundbarkeit der betroffenen Struktur (Ökosystem, Region, Gesellschaft, Wirtschaftszweig) lassen sich durch vorsorgende Aktionen eventuell sogar Gewinne gegenüber einer rein passiven Reaktion erzielen, oder wenigstens katastrophale Verluste vermeiden.

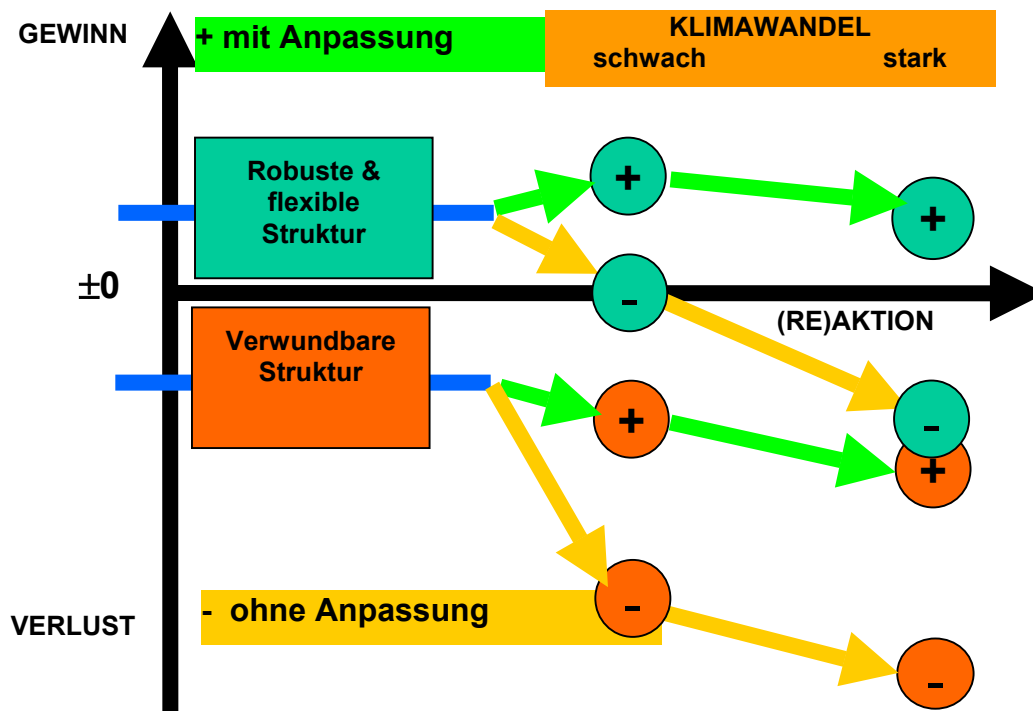


Bild 13: Diagramm der Auswirkungen des Klimawandels mit und ohne Anpassung. Die Auswirkungen hängen außer von der Stärke des Klimawandels auch davon ab, wie robust bzw. verwundbar die betroffene Struktur (Ökosystem, Region, Gesellschaft, Wirtschaftszweig) ist. Durch geeignete Maßnahmen der Anpassung lassen sich eventuell sogar Gewinne gegenüber einer rein passiven Reaktion erzielen, oder wenigstens katastrophale Verluste vermeiden.

Die Wissenschaft kann die Bedingungen und Zusammenhänge zwischen Auswirkungen und Aktionen aufklären. Dabei muss man sich darüber im Klaren sein, dass sich die Dynamik des Gesamtsystems aus Klima, Ökosystemen, Ressourcen, Wirtschaft und Kultur grundsätzlich einer Prognose im landläufigen Sinne entzieht. Dies ist aber weder erforderlich, noch das Ziel einer Analyse möglicher Klimafolgen. Vielmehr soll – ähnlich wie bei einer Analyse wirtschaftlicher Entwicklungstendenzen – aufgezeigt werden, welche Konsequenzen unter welchen Randbedingungen absehbar und wo eventuell Schwachstellen bzw. Eingriffsmöglichkeiten erkennbar sind.

Eine geeignete, auf dieser Grundlage entwickelte Strategie der Anpassung an den Klimawandel im Zusammenspiel mit anderen Veränderungen kann dabei darüber entscheiden, ob die später real eintretenden Auswirkungen in einer Region katastrophal, kritisch oder aber beherrschbar sind. Wo dies rechtzeitig erkannt und in Aktionen umgesetzt wird, besteht ein zusätzlicher Wettbewerbsvorteil gegenüber Regionen, wo Bestehendes unkritisch perpetuiert wird. Es gilt hier und heute, sich auf die zu erwartenden relativ raschen und kräftigen Änderungen unserer Umwelt- und Lebensbedingungen einzustellen. Dies sollten wir als Herausforderung bei aktuellen Planungen in einer Region, d.h. als Beitrag eines raumorientierten Risikomanagements betrachten.

5 Literatur

- Bauer, E., von Storch H. and Stolley M. (2000): Sensitivity of ocean waves to speed changes of the weather stream. *The global Atmosphere and Ocean System* 7, 91-106
- Bindi, M. et al. (1996): Modelling the impact of future climate scenarios on yield and yield variability of grapevine, *Climate Research* 7, 213-224

- Block A., Kropp J. Reusswig F., Wesselhoeft R., Zickfeld K. und H.-J. Schellnhuber (2002): Semiquantitative Assessment of Regional Climate Vulnerability: The North Rhine - Westphalia Study. submitted to: Climate Change.
- Caspary, H. (2000): Hochwasserverschärfung infolge von Klimaänderungen; Kap. 3.19 in: Lozan, J. et al.(Hersg.): Das Klima des 20. Jahrhunderts/Warnsignal Klima, Hamburg
- Claussen, M. *et al.*, Geophys. Res. Lett. **26**, 2037–2040 (1999).
- Fraedrich, K.; Gerstengarbe, F.-W.; Werner, P.C. (2001): Climate shift during the last century. *Intern. J. of Climatology*. (in Druck)
- Fricke, W. and Kaminski, U. (2002); GAW Brief des Deutschen Wetterdienstes Nr.12, Sept. 2002
- Ganopolski, A. and Rahmstorf, S., "Abrupt Glacial Climate Changes due to Stochastic Resonance", *Physical Rev. Lett.* **88** (3) (2002)
- Grevemeyer, I. et al. (2000): Microseismological evidence for a changing wave climate in the northeast Atlantic Ocean, *Nature* **408**, 349-359
- Harrison, P.A. and Butterfield R.E. (1999): Modelling climate change impacts on wheat, potato and grapevine in Europe.; In: Climate Change, Climate Variability and Agriculture in Europe: An Integrated Assessment, Environm. Change Unit, Report No. 9, Oxford, UK, 157pp
- IPCC, Climate Change 1995, Second Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Cambridge University Press, 1996
- IPCC, Special Report on Emission Scenarios (SRES) of IPCC, 2000
- IPCC, Climate Change 2001, Third Assessment Report of IPCC, Working Group I: The Scientific Basis; WG II: Impacts, Adaptation, and Vulnerability; Cambridge University Press, 2001
- Jendritzky, G. (1998): Einwirkungen von Klimaänderungen auf die Gesundheit des Menschen in Mitteleuropa, in: Deutscher Wetterdienst (Hg.): Klimastatusbericht 1998, Offenbach o.J., S.11
- Knutti, R., Stocker, T.F., Joos, F., Plattner, G.-K. (2002) Constrains on radiative forcing and future climate change from observations and climate model ensembles, *NATURE*, Vol. 416, pp. 719-723, 18. April 2002
- Krysanova, V., Wechsung, F. (2000): "Impact of Climate Change and higher CO2 on hydrological processes and crop productivity in the state of Brandenburg", in "Advances in Global Change Research, Wengen
- Lahmer, W. (2000); Beitrag zur 5. Deutschen Klimatagung, Hamburg, 2.-6.10.2000
- Lahmer, W., Becker, A.; Auswirkungen von Klimaänderungen auf die Wasserwirtschaft; KA – Wasserwirt., Abwasser, Abfall 2000 (47), Nr.2, 170-175
- Lasch, P., et al. (1999): Regional impact analysis of climate change on natural and managed forests in the Federal state of Brandenburg,. *Environmental Modeling and Assessment*, 4, 273-286.
- McMichael, A.J. (1996): Human Population Health, in: R.T.Watson, M.C. Zinyowera, R.H. Moss and D.J. Dokken: Climate Change 1995. Impacts, Adaptions and Mitigations of Climate Change: Scientific-Technical Analyses, Cambridge, 561-584
- Münchener Rück.; **topics** – Jahresrückblick Naturkatastrophen 1998, 1999, 2000, 2001
- Niehoff, D. and Bronstert, A. (2001); Influences of land-use and land-cover conditions on flood generation: A simulation study. In: Marsalek, J. et al.: Advances in urban stormwater and agricultural runoff source controls, pp. 267-278.; Kluwer Academic Publishers.
- Rahmstorf, S. (2002): „Flotte Kurven, dünne Daten - Im Medienstreit um den Klimawandel bleibt die Wissenschaft auf der Strecke“, *DIE ZEIT*, 5.9.2002; pdf-Version: <http://www.pik-potsdam.de/~stefan/Publications/Other/flottekurven.pdf>
- Schellnhuber, H.-J. and Wenzel, V. (Eds.) (1998). *Earth System Analysis – Integrating Science for Sustainability*, Springer, Berlin Heidelberg, 1998
- Schellnhuber, H.J., Toth, F. (Ed.); *Environ. Mod. a. Assess.* **4** (1999)
- Schellnhuber; H.-J. (2001). „Die Koevolution von Natur, Gesellschaft und Wissenschaft - Eine Dreiecksbeziehung wird kritisch“, *GAIA* 10 (2001) no. 4, Seite 258-262
- Stock, M. , Toth, F.(Hrsg.): "Mögliche Auswirkungen von Klimaänderungen auf das Land Brandenburg - Pilotstudie", Berlin, 1996
- Stock, M. (2001): Klimawandel: Normalfall für die Erde –Störfall für die Menschheit?; *Energiewirtschaftliche Tagesfragen*, 51.Jg. (2001), Heft 3, 129-135
- WBGU-Jahresgutachten 1997: „Welt im Wandel – Wege zu einem nachhaltigen Umgang mit Süßwasser, Springer, Berlin
- Werner, P.C., Gerstengarbe, F.-W. (1997): "A Proposal for the Development of Climate Scenarios", *Climate Research* 8, 171-182
- Werner, P.C., Gerstengarbe, F.-W., Österle, H. (2002) Klimaänderungen in Deutschland im 20. Jahrhundert; „Klimastatusbericht 2002“ des DWD (im Druck)