Grundlegende Aspekte für die Entwicklung von Anpassungsstrategien an den Klimawandel auf der Basis von Vulnerabilitäts- und Wirkungsanalysen

K.-A. Höpker[1], [2]H. Hübener, [3]T. Sauer

im Auftrag des B-L-FG Klimafolgen und Anpassung

[1]Landesanstalt für Umwelt Baden-Württemberg (LUBW)

[2]HessischesLandesamt für Naturschutz, Umwelt und Geologie

[3] Rheinland-Pfalz Kompetenzzentrum für Klimafolgen

Oktober 2017

Inhaltsverzeichnis

1 Entwicklung von Anpassungsstrategien 3
1.1 Grundlegende Aspekte 3
1.2 Allgemeine Prozessanforderungen 5
2 Grundlagen für Anpassungsstrategien 5
2.1 Klimatische Rahmenbedingungen der Zukunft 5
2.2 Klimaprojektionen 7
3 Vulnerabilitäts- und Klimawirkungsanalysen 9
3.1 Methoden 13
3.2 Bewertung 14

Anhang: Beispiele von Klimawirkungsstudien

A1 Klimahüllen für Niedermoor-Flächen 16
A2 Pilotstudien Niedrigwasser in KLIWA 21
A3 Simulation des Grundwasseranstiegs durch den Klimawandel in Hamburg-Wilhelmsburg 30
A4 Veränderung von Depositionen und Critical Load durch den Klimawandel 32

1 Entwicklung von Anpassungsstrategien

1.1 Grundlegende Aspekte

Die Entwicklung einer Anpassungsstrategie an den Klimawandel mit ihren Teilstrategien muss als ein flexibler und iterativer Prozess gestaltet werden, der die Dynamik der zukünftigen Klimaentwicklung und der gesellschaftlichen Prozesse sowie den Kenntniszuwachs berücksichtigen kann. Die Umsetzung von Strategien wird langjährige Anstrengungen erfordern.

Folgende grundlegenden Gesichtspunkte sind bei der Erstellung von Anpassungsstrategien zu beachten:

- Anpassung an den Klimawandel umfasst den Schutz der Gesellschaft und der Umwelt vor Klimawirkungen, die Verringerung der Verwundbarkeit von Gesellschaft und Ökosystemen, sowie die Erhöhung der Anpassungskapazität. Ziel von Anpassungsmaßnahmen ist es auf der einen Seite, Gefahren und Schäden für Ökosysteme, Wirtschaft, die Gesellschaft und speziell die menschliche Gesundheit sowie Infrastrukturen zu minimieren. Auf der anderen Seite sollen auch positive Folgen des Klimawandels genutzt werden. Dabei sollen mögliche Synergieeffekte beachtet und soziale, ökonomische und demographische Aspekte und Wirkungen berücksichtigt werden. Anpassung an den Klimawandel ist ein Beitrag zur Risiko- und Gefahrenvorsorge.
- Die Anpassungsstrategie soll einen Handlungsrahmen liefern, der im Sinne des klassischen Strategieverständnisses konkrete Ziel- und Zeitelemente, sowie Umsetzungsstrukturen beinhaltet. Diese Elemente sind gegebenenfalls aufgrund der möglichen Dynamik der Klimafolgenentwicklung flexibel anzulegen.
- Als Anpassungsstrategie wird hier folglich die Entwicklung, Priorisierung sowie Festlegung von Anpassungszielen und Anpassungsmaßnahmen für verschiedene Handlungsfelder und deren Umsetzung im Rahmen eines mehrstufigen Zeitplanes verstanden.
- Die Anpassungsstrategie muss die Dynamik der zukünftigen Klimaentwicklung berücksichtigen, und sie ist infolgedessen selbst als ein flexibler Prozess zu gestalten, der über mehrere Jahrzehnte läuft. Gerade deswegen ist es notwendig die Erstellung der Anpassungsstrategie durch ein eindeutiges politisches Mandat abzusichern, den Prozess strukturiert zu gestalten und die notwendigen Ressourcen konsequent bereitzustellen.
- Die Anpassungsstrategie kann nationale und regionale als auch internationale Elemente der Politik enthalten. Die Anpassungsstrategie soll staatliches Wirken, aber auch den Einsatz von privater und privatwirtschaftlicher Seite enthalten und wird somit als eine gemeinschaftlich zu bewältigende Aufgabe verstanden. Infolgedessen soll die Entwicklung der Anpassungsstrategie in einem partizipativen Prozess unter Einbindung von Bürgerinnen und Bürgern sowie wichtiger gesellschaftlicher Strukturen (Verbände, Unternehmen etc.) erfolgen.
- Die Anpassung an den Klimawandel wird die Gesellschaft als Ganzes betreffen. Vor diesem Hintergrund muss die Information und die Motivierung aller Betroffenen ein wesentlicher Bestandteil einer Anpassungsstrategie sein, zumal nur in Teilbereichen staatliche Strukturen direktiv und regulativ Einfluss nehmen können.

- Eine Anpassungsstrategie soll für die einzelnen Handlungsfelder im jeweilig zuständigen Ressort entwickelt und umgesetzt werden. Eine ressortübergreifende Koordination und Abstimmung der Entwicklungs- und Umsetzungsmaßnahmen ist sinnvoll, weil eine Vielzahl auch miteinander verknüpfter Handlungsfelder (z.B. Katastrophenschutz und Wasserwirtschaft) betroffen ist und weil die Ressourcen begrenzt sind. Hinzu kommt, dass Strategien und Anpassungsmaßnahmen auch zu Überschneidungen, Nebeneffekten und Konflikten zwischen den Handlungsfeldern führen können, sodass Abstimmungen notwendig werden.
- Die Anpassungsstrategie kann nicht losgelöst von dem Handlungsdreieck Klimaschutz – Anpassung – Monitoring entwickelt werden. Nur durch ein konsequentes Klimafolgenmonitoring kann die Notwendigkeit und der Erfolg von Anpassungsmaßnahmen belegt werden. Klimaschutzmaßnahmen können Anpassungsmaßnahmen beeinflussen und umgekehrt.
- Die Anpassungsziele sind für verschiedene Sektoren bzw. Handlungsfelder konkret zu erarbeiten. Diese sind aus den Zukunftsszenarien für die Entwicklung des Klimas und den daraus abzuleitenden erwarteten Klimafolgen zu entwickeln.
- Die zu entwickelnden Anpassungsziele sind von strategischen Annahmen abhängig, die aus den Klimaszenarien abzuleiten sind. Unterschiedliche Modelle und Emissionsszenarien führen beispielsweise zu verschiedenen Aussagen zur Temperatur- und Niederschlagsentwicklung, die nicht unerheblich abweichen. Infolgedessen sind z.B. worst-case- Annahmen oder best-case Annahmen etc. zu vereinbaren und strategische Ziele zu entwickeln.
- Für die Entwicklung und Vergleichbarkeit von Anpassungsstrategien für verschiedene Handlungsfelder ist es erforderlich, dass von gleichen Annahmen für die klimatischen Rahmenbedingungen der Zukunft ausgegangen wird. Hierzu sind vorrangig Ergebnisse aus Klimasimulationen mit einem Ensemble aus verschiedenen Klimamodellen zu verwenden.
- Trotz der wissenschaftlichen Fortschritte ist also die Entwicklung der Anpassungsstrategie auch ein Handeln mit Unsicherheiten.
- Aufgrund der existierenden Unsicherheiten in der Vorhersagbarkeit der Klimaentwicklung und -folgen werden als Anpassungsmaßnahmen derzeit „no-regret“- Maßnahmen empfohlen. In der Konzeption der Anpassungsstrategie müssen zusätzlich der Zeitfaktor und die Dynamisierbarkeit von Maßnahmen mit ins Kalkül gezogen werden.
- Im Fokus der Strategieentwicklung muss insbesondere die Anpassung an die Folgen von Extremwetterlagen stehen, aus denen große Personen- und Sachschäden resultieren können. Schon heute wird die zunehmende Intensität von Extremereignissen in Mitteleuropa, wie z.B. Stürme und Hochwasser auf den Klimawandel zurückgeführt. Zum Beispiel konnte in Baden-Württemberg in den letzten 30 Jahren ein drastischer Anstieg der Hagelereignisse festgestellt werden (in einen grauen Kasten?).
- Die Szenarien für die zukünftige Klimaentwicklung legen nahe, dass die stärksten Effekte im globalen Klimageschehen erst Mitte des Jahrhunderts eintreten werden. Abhängig von der Emissionsentwicklung werden dann sehr steile Temperaturanstiege möglich, mit entsprechenden Konsequenzen in den

Klimafolgen. Gleichwohl ist zu beachten, dass gerade die zukünftigen Entwicklungen von Extremereignissen von Klimamodellen am schwierigsten zu berechnen sind und hier große Unsicherheiten bestehen. Das Klima ist von Jahr zu Jahr variabel und hat auch eine multidekadische Variabilität. Diese Variabilität wird von einem anthropogenen Trend überlagert. Der Trend verstärkt sich in der 2. Hälfte des Jahrhunderts, abhängig vom Emissionsszenario.

- Auch die Konsequenzen der gleitenden Klimaveränderungen, gekennzeichnet durch die Mittelwertveränderungen z.B. für Jahresabschnitte (z.B. Hydrologisches Winter- und Sommerhalbjahr, Vegetationsperioden, Heizgradtagzahl etc.) sind in entsprechenden Strategien für die Handlungsfelder zu berücksichtigen. Gerade aus ihnen ergibt sich Anpassungsbedarf z.B. für Maßnahmen für Infrastrukturen (Energiewirtschaft, Verkehrswege), Land- und Forstwirtschaft etc., die erhebliche Vorlaufzeiten benötigen.

1.2 Allgemeine Prozessanforderungen

Die Erarbeitung von Anpassungsstrategien und -maßnahmen erfordert ein möglichst weitgehend abgestimmtes und fachlich wie wissenschaftlich fundiertes Vorgehen der beteiligten Akteure, seien es Verwaltungen, Wirtschaftsbetriebe oder gesellschaftliche Gruppen.

Die Ausgangssituation bezüglich Kenntnisstand, Ziel- und Maßnahmenentwicklung etc. ist in den verschiedenen Handlungsfeldern sehr unterschiedlich, so dass der Aufwand für die Entwicklung der Gesamt- und Teilstrategien für alle Handlungsfelder unterschiedlich ist. Deswegen sollte in der Strategieentwicklung zunächst die Bestandsaufnahme in den verschiedenen Handlungsfeldern im Vordergrund stehen und eine detaillierte Analyse der Vulnerabilität erfolgen.

Aus den Ergebnissen der Bestandsaufnahme in den Handlungsfeldern sowie der Klimafolgen und Vulnerabilitätsanalyse sollte die Anpassungsstrategie entwickelt werden. In diesem Dokument sollen die politischen Rahmenbedingungen, die finanziellen und personellen Ressourcen, die organisatorischen und fachlichen Verantwortlichkeiten, die Zeithorizonte sowie die Meilensteine festgelegt werden. Gegebenenfalls ist es sinnvoll die Anpassungsstrategien in den Kontext der Deutschen Anpassungsstrategie, den Aktivitäten anderer Bundesländer oder der EU zu stellen. Wegen der grundsätzlichen Bedeutung von Anpassungsstrategien sind partizipative Elemente für Bürgerinnen und Bürger und relevante gesellschaftliche Gruppen vorzusehen. Hierzu ist z.B. eine schriftliche Befragung von Wirtschaftsbranchen, der Kommunen etc. möglich, sowie die Veranstaltung von Workshops/Symposien mit diesen Akteuren zu einzelnen Aspekten der Anpassungsaufgaben.

2 Grundlagen für Anpassungsstrategien

2.1 Klimatische Rahmenbedingungen der Zukunft

Der erste Schritt für die Entwicklung von Anpassungsstrategien sollte die Klärung der Frage sein, auf welche klimatischen Rahmenbedingungen in der Zukunft müssen wir uns in den Handlungsfeldern anpassen. Diese Kernfrage ist, da es sich um eine in die Zukunft gerichtete Frage handelt, nicht mit absoluter Sicherheit zu beantworten. Gerade vor diesem Hintergrund sind die klimatischen Rahmenbedingungen, an die

eine Anpassung erfolgen soll, besonders sorgfältig zu ermitteln. Es ist erforderlich, dass in allen Handlungsfeldern von den gleichen Annahmen für die zukünftigen Klimatischen Rahmenbedingungen („Klimatischen Leitplanken“) ausgegangen wird. Nur so ist eine methodische Konsistenz, eine Vergleichbarkeit der Ergebnisse und Beurteilung der Betroffenheit der verschiedenen Handlungsfelder auch möglich.

Es wird vorgeschlagen folgende grundlegenden Aspekte zu berücksichtigen:

- Eine einheitliche Referenzperiode muss allen Auswertungen zu Grunde liegen. (1961-1990 oder 1971-2000). Es wird davon abgeraten die Referenzperiode kontinuierlich zu aktualisieren (z.B. auf 1981-2010 oder später auf 1991-2020), weil damit die Bewertung der Klimaänderung erschwert wird.

- Auswahl einheitlicher Betrachtungszeiträume für die Zukunft (nahe Zukunft 2021-2050, ferne Zukunft 2071-2100)

- Nutzung von Modelensembles mit einer Minimalgröße von ca. 18 (nach Erfahrungen des DWD) Regionalmodellen auf der Basis von mehreren, möglichst unabhängigen Globalmodellen. (z.B. aus den Projekten EURO-CORDEX und ReKliEs-De). Das Modellensemble soll nach Möglichkeit sowohl statistische als auch dynamische regionale Klimamodelle beinhalten.

- Verwendung desselben Emissions- oder Konzentrationsszenarios im Ensemble (z.B. A1B, oder RCPx.y). Für bestimmte Anwendungen (Abwägung Mitigation/Anpassung) kann der Vergleich von Ensembles für verschiedene Emissionsszenarien sinnvoll sein.

- Regionale Minimumauflösung 25 x 25 km (räumliche Auflösung). Die erforderliche zeitliche Auflösung hängt von der geplanten Anwendung ab.

- Für strategische Auswertungen ist die Beschreibung der Bandbreite erforderlich. Dazu gehört neben dem Mittelwert oder Median auch die Angabe von Perzentilen (15%, 50%, 85%) oder bei Bedarf von Minimum und Maximum nach dem Delta-Change-Verfahren.

- Delta-Change Verfahren: Das Klimaänderungssignal einer Simulation muss relativ zur von diesem Modell simulierten Referenzperiode angeben werden (und NICHT relativ zu den Beobachtungsdaten)

- Validierung des Ensembles über die Modellierung des Referenzzeitraum 1971-2000, Angabe der Abweichung vom Median, Darstellung der Streuung

- Ableitung verschiedener klimatischer Kennwerte/Größen, die in den einzelnen Handlungsfeldern nutzbar sind. Siehe Kennwerttabellen bei LUBW (2013, http://www4.lubw.baden-wuerttemberg.de/servlet/is/244014/).

- Einordnung der Qualität der Modellierung des Kennwertes hinsichtlich der Richtungssicherheit, der Streuung, der Validierung der Istzeit etc. nach Experteneinschätzung und Statistik. (Belastbarkeit)

- Es kann sinnvoll sein die eigenen Ergebnisse / Erkenntnisse in Bezug zu Ergebnissen anderer Bundesländer oder Akteuren zu setzen.

- Graphische Darstellung der Mittelwerte der Modellergebnisse für die Kennwerte mit Box-Whisker-Plots, sowie Darstellung der räumlichen Entwicklung der Kennwerte.

- Bei speziellen Fragestellungen soll auch die Verwendung von einem Szenarium und einem Modell möglich sein, wenn das Handlungsfeld dies erfordert. Eine Begründung sowie Einordnung in das Ensemble muss auf jeden Fall erfolgen.

- **Übergreifende (vergleichende) wissenschaftliche Evaluierung**, wie sie zwischen Klimamodellen üblich ist, ist auch für Wirkmodelle (Definition fehlt noch) erforderlich und sollte zusammen mit den Ergebnissen kommuniziert werden. Auch die verwendeten **Wirkmodelle** sollten miteinander vergleichbar sein und verglichen werden, um Unterschiede in den ermittelten Ergebnissen mit verschiedenen Modellen wissenschaftlich diskutieren und bewerten zu können.

- Gehen in die Auswertungen Annahmen über die künftige **demographische Entwicklung** ein, so sind auch die hierfür verwendeten Datenquellen bzw. Demographiemodelle zu nennen und wenn möglich mit anderen Auswertungen zu harmonisieren.

2.2 Klimaprojektionen

- Modelle, die in den Ensembles verwendet werden sollen, müssen zuvor einer **Plausibilitätsprüfung** ihrer Ergebnisse für die verschiedenen Klimakennwerte unterzogen werden. Eine solche Plausibilitätsprüfung sollte die Simulationsergebnisse für die Vergangenheit berücksichtigen, die physikalische Konsistenz verschiedener simulierter Parameter (z.B. Bewölkung / Strahlung / Niederschlag / Bodenfeuchte) und die physikalische Nachvollziehbarkeit des simulierten Klimaänderungssignals. (Hilfestellungen dazu werden 2017 im Nutzerhandbuch des Projektes ReKliEs-De veröffentlicht; www.reklies.hlnug.de.)

- Ausreißer-Modelle, die um mehr als 2 Standardabweichungen vom Mittelwert über alle beteiligten Modelle abweichen, sollten gekennzeichnet werden und können ggf. aus der Ensemble-Auswertung ausgeschlossen werden. (Vgl. Plausibilitätsprüfung)

- **Signifikanz**: Mit statistischen Signifikanztests lässt sich prüfen, ob der analysierte Trend tatsächlich aussagekräftig ist, oder ob er im Rahmen der Variabilität der betrachteten Zeitreihe auch zufällig entstanden sein kann. Die Auswahl eines geeigneten Signifikanztests ist von der untersuchten Variable abhängig (für Temperatur können andere Tests verwendet werden als für Niederschlag). Die Signifikanz (oder deren Fehlen!) sollte bei der Kommunikation der Ergebnisse erwähnt werden.

- **Richtungssicherheit**: Auch wenn ein Ergebnis nicht signifikant ist, können doch Aussagen daraus gezogen werden wenn alle Modelle ein Signal in dieselbe Richtung zeigen. In diesem Fall handelt es sich eher um ein Indiz als um einen Beweis. Trotzdem kann eine solche Aussage für die Planung von Anpassungsmaßnahmen herangezogen werden, insbesondere dann, wenn phy-

sikalische Überlegungen diese Trendrichtung prinzipiell erwarten lassen. Bei der Auswertung von Bandbreiten sollten daher Aussagen über grundlegende Trends und ggf. eine Richtungssicherheit (z.B. alle Modelle zeigen eine Niederschlagszunahme im Winter o.ä.) so weit wie möglich getroffen werden.

- **Robustheit**: Für manche Untersuchungen zeigt sich, dass alle Modelle nur sehr geringe Änderungen simulieren. In einem solchen Fall ist das Änderungssignal natürlich nicht signifikant und es gibt auch keine Richtungssicherheit, die Ergebnisse können aber trotzdem robust sein (d.h. alle Modelle zeigen keine oder sehr geringe Änderung). Im Unterschied dazu wäre eine Aussage nicht robust, wenn ein Ensemblemittelwert nahe Null herauskommt, weil die beteiligten Modelle Signale in unterschiedliche Richtungen zeigen.

- **Extremereignisse** sind per Definition selten. Die Auswertung von Extremen kann von einem Ensemble besonders profitieren, da eine Vielzahl von Simulationen eine größere Daten-Grundgesamtheit für eine statistische Extremwertanalyse bereitstellt, als eine einzelne Simulation. (Beispiel: Ein im Mittel alle 100 Jahre auftretendes Niederschlagsereignis kann von einem Modell in der simulierten Referenzperiode 1961 – 2000 simuliert werden oder auch nicht. Das Auftreten oder nicht-Auftreten eines 100-jährigen Ereignisses in einer 40-jährigen Simulation sagt noch nichts über die Qualität der Simulation. Ein Ensemble von Simulationen ist dann als gut anzusehen, wenn in zehn 40-jährigen Simulationen ungefähr vier 100-jährige Niederschlagsereignisse auftreten.) Hierbei sind jedoch systematische Unterschiede zwischen verschiedenen Modellen zu berücksichtigen, insbesondere zwischen punktbezogenen Informationen (Stationsdaten und z.T. statistische regionale Klimamodelle) und flächenbezogenen Daten (Rasterdaten, dynamische Klimamodelle).

- Viele Klimamodelle zeigen eine systematische Abweichung der Simulationsergebnisse von den beobachteten Werten; einen sogenannten **Bias**. Diesen Bias kann man verringern, durch eine geeignete Bias-Adjustierung (wurde bisher meist Bias-Korrektur genannt. Der Begriff Bias-Korrektur ist irreführend, weil er suggeriert, nach der Korrektur seien die Daten so gut wie Beobachtungsdaten. Da es sich aber weiterhin um Simulationsdaten mit den dazugehörigen Schwächen handelt, sollte der Begriff der Bias-Adjustierung - also Anpassung – verwendet werden). Wurde eine Bias-Adjustierung durchgeführt, so muss diese unbedingt dokumentiert und mit den Ergebnissen für dieses Modell kommuniziert werden. Eine solche Bias-Adjustierung sollte die physikalischen Zusammenhänge zwischen korrigierten und nicht-korrigierten Größen (z.B. Niederschlag und Bodenfeuchte o.ä.) möglichst weitgehend erhalten oder in der weiteren Auswertung entsprechend berücksichtigen.

- Ein Vergleich zwischen verschiedenen **Szenarien** sollte zwischen den resultierenden Ensemble-Bandbreiten für die verschiedenen Szenarien ausgeführt werden.

- Ist die Verwendung eines Ensembles (z.B. aus technischen Gründen) in der Ermittlung von Klimafolgen nicht möglich, so ist bei Wirkungsuntersuchungen zu prüfen, welche klimatologischen Daten für das untersuchte System (z.B. Waldwachstum, Zeckenausbreitung, etc.) relevante **Schwellenwerte** darstellen (z.B. Über- oder Unterschreitung bestimmter Temperaturschwellen oder Niederschlagswerte). Es lässt sich dann prüfen, wie viele Modellsimulationen

diese Schwellenwerte über- oder unterschreiten und daraus eine Gefährdung des betrachteten Systems durch die Klimaänderung ableiten.

- Existierende Klimafolgenabschätzungen auf der Basis älterer Modellsimulationen sollten zu dem verwendeten Ensemble (z.B. EURO-CORDEX) in Bezug gesetzt werden, indem die antreibende Simulation (z.B. SRES A1B ECHAM5-Lauf1-WETTREG2006) mit der Bandbreite aus den EURO-CORDEX-Simulationen verglichen wird.

- **Unsicherheit**: Es gibt verschiedene Ursachen für Unsicherheiten von Klimaprojektionsergebnissen, zwischen denen unterschieden werden muss. Es gibt 1. eine Szenario-Unsicherheit, d.h. dass unser heutiges und zukünftiges Verhalten das Ausmaß des zu erwartenden Klimawandels mitbestimmt ohne dass dies im Szenario abgebildet werden kann. Es gibt 2. eine im Klimasystem inhärente Unsicherheit (Variabilität), da das Klimasystem – innerhalb gewisser Bandbreiten – unterschiedliche Verläufe gleich wahrscheinlich zeigen kann. Hierzu gehört auch die natürliche Variabilität des Klimas. Und es gibt 3. eine Modellunsicherheit, die aus den Vereinfachungen eines Klimamodells gegenüber dem realen Klimasystem sowie den Grenzen unseres Wissens über die komplexen Zusammenhänge im Klimasystem besteht. Auch wenn theoretisch alle Szenarien gleich wahrscheinlich sind, ist doch festzustellen, dass die Emissions- oder Konzentrationspfade, die zu einem geringen Klimawandel führen sich bereits heute deutlich von dem Pfad unterscheiden, dem die realen Emissionen und Konzentrationen folgen. Wenn wir diesem aktuellen Pfad weiter folgen, dann muss mit sehr großem Klimawandel gerechnet werden (z.B. Ergebnisse des Szenarios A1FI oder RCP8.5). Der zweite Aspekt (Variabilität) wird immer unsicher bleiben, jedoch hilft die Abschätzung der natürlichen Variabilität eines Klimaparameters (z.B. Jahr-zu-Jahr-Schwankung des Sommerniederschlags in Deutschland), die Gefährdung durch den Klimawandel einzuschätzen (liegt die simulierte Änderung z.B. des Sommerniederschlages im Bereich der natürlichen Variabilität, dann müssen wir uns an das anpassen, was auch heute schon vorkommen kann). Die Modellunsicherheit können wir durch weitere Forschung zum Klimasystem und Weiterentwicklung von Klimamodellen weiter reduzieren. Jedoch wird ein Klimamodell immer ein Abbild der Realität bleiben und die Realität nicht in jedem Aspekt perfekt wiedergeben können.

- Umgang mit Unsicherheiten: Die Darstellung der Sicherheit/Unsicherheiten sollte sich an der Darstellungsweise in den IPCC-Berichten orientieren. Die Aspekte der Eintrittswahrscheinlichkeit, der Gefährdung und der Kosten-Nutzen-Abwägung für Klimaschutz- und Anpassungsmaßnahmen sollten berücksichtigt werden.

3 Vulnerabilitäts- und Klimawirkungsanalysen

Die Vulnerabilität beschreibt die Verwundbarkeit ökologischer, technischer, ökonomischer und sozialer/politischer Systeme gegenüber inneren und äußeren Störereignissen unter Berücksichtigung ihrer Fähigkeiten, mit Störereignissen so umzugehen, dass die Systemdienstleistungen weiterhin aufrecht erhalten werden können.

Zur Bewältigung der Wirkungen des Klimawandels ist Wissen über die Vulnerabilität eine wichtige Voraussetzung, um den Bedarf und die Dringlichkeit von Anpassungsmaßnahmen einschätzen, Maßnahmen planen und die notwendigen Ressourcen bereitstellen zu können.

Im Kontext des Klimawandels ist ein System vulnerabel, wenn es für nachteilige Auswirkungen des Klimawandels anfällig und nicht in der Lage ist, diese dauerhaft zu bewältigen. Im Umkehrschluss ist die Vulnerabilität eines Systems, einer Region, einer Kommune oder eines Haushaltes umso niedriger, je größer die Möglichkeiten zur Bewältigung und/oder zur Anpassung an sich ändernde Klimabedingungen sind.

Die **Vulnerabilität** eines Systems setzt sich gemäß der IPCC-Definition (2007) aus folgenden drei Teilen zusammen:

- **Klimatische Exposition**: Wie ausgeprägt ist der Klimawandel in der betrachteten Region oder in Bezug auf ein betrachtetes System? Die klimatische Exposition ist abhängig von Art, Größenordnung und Geschwindigkeit der Klimaänderung und gibt an, wieweit eine Region/ein System bestimmten Änderungen von Klimaparametern (z.B. Niederschlag, Temperatur etc.) ausgesetzt ist.
- **Sensitivität**: Wie ist eine vom Klimawandel betroffene Region oder ein betroffenes System charakterisiert und wie werden sich sozio-ökonomische und bio-physikalische Veränderungsprozesse auf diese Eigenschaften auswirken? Die Sensitivität beschreibt die Empfindlichkeit des betroffenen Systems gegenüber Klimaänderungen unter der Berücksichtigung des aktuellen Anpassungsgrades.
- **Anpassungskapazität**: Wie hoch ist das Potenzial einer vom Klimawandel betroffenen Region/ eines Systems sich zukünftig an den Klimawandel anzupassen? Die Anpassungskapazität beschreibt die Fähigkeit einer Region/eines Systems, sich durch Planung und Umsetzung von weiteren Anpassungsmaßnahmen an die veränderten Bedingungen anzupassen oder die Veränderungen auch zum Vorteil nutzen zu können. Die Anpassungskapazität ist von verschiedenen Faktoren abhängig, wie den ökonomischen Ressourcen, Know-how und Technologie, institutionellen Kapazitäten, politischem Willen etc..

Ein Zwischenergebnis stellt die **Klimawirkung** dar. Sie beschreibt, wie stark sich der Klimawandel auf ein System gegenwärtig oder zukünftig auswirken kann und ergibt sich aus der Kombination von klimatischer Exposition und Sensitivität eines Systems ohne Berücksichtigung der Anpassungskapazität.

Obwohl die **Anpassungskapazität** ein zentraler Bestandteil des **Vulnerabilitätskonzepts** des IPCC von 2007 ist, gibt es bisher kein gemeinsames Verständnis darüber, wie sie abzuleiten ist. Die Auswahl und Messung der relevanten Faktoren ist nur für ein bestimmtes System/Region und für eine bestimmte Fragestellung möglich und beinhaltet immer wertbasierte Entscheidungen, die nicht von der Wissenschaft getroffen werden können. Zudem kann die Anpassungskapazität nur Vulnerabilitätsmindernd wirken, wenn sie tatsächlich umgesetzt wird. Eine hohe Anpassungskapazität, die zu einer geringen Vulnerabilität führt, kann jedoch so missverstanden werden, dass kaum Anpassungsbedarf besteht. Daher wird die Anpassungskapazität in vielen Vulnerabilitätsstudien nur narrativ/beschreibend/qualitativ berücksichtigt. Viele Vulnerabilitätsstudien sind damit eigentlich Klimawirkungsstudien.

Zum Verständnis regionaler Risiken und Chancen des Klimawandels und zur Entwicklung regionaler Klimaanpassungsstrategien sind regionale Klimawirkungs- und Vulnerabilitätsabschätzungen notwendig. Solche Studien (im Weiteren vereinfacht

Vulnerabilitätsstudien genannt) sind ein wichtiger Schritt auf dem Weg zu einer Anpassungsstrategie.

Folgende Punkte sollten bei einer Vulnerabilitätsstudie berücksichtigt werden:

- Die Vulnerabilität gegenüber dem Klimawandel ist **stark von der Ausgangssituation abhängig**. Oft steht eine Region bzw. ein Bereich/System schon heute unter Druck. So können aktuelle klimatische oder naturräumliche Rahmenbedingungen Beschränkungen mit sich bringen (z.B. geringe Niederschläge und/oder arme Böden für die Bereiche Land- und Forstwirtschaft).
- Viele Bereiche werden **von den sozioökonomischen Rahmenbedingungen beeinflusst** (z.B. Land- und Forstwirtschaft, Gesundheit, Tourismus, Verkehr). Solche Rahmenbedingungen bestimmen zum großen Teil die Empfindlichkeit einer Region bzw. eines Handlungsfelds gegenüber Auswirkungen des Klimawandels und sind in hohem Maße mitverantwortlich für die regionale Differenzierung von Vulnerabilität. Auch ihre Veränderungen mit der Zeit werden die zukünftige Vulnerabilität stark beeinflussen, möglicher Weise mehr als klimatische Veränderungen.
- Bei allen Veränderungsprozessen muss berücksichtigt werden, dass das **Systemverständnis unvollständig** ist. Erwartungen und Voraussagen sollten daher vorsichtig formuliert und kommuniziert werden.
- Der Begriff Vulnerabilität wird meist im Zusammenhang mit komplexen dynamischen Systemen verwendet. Beim Umgang mit solchen Systemen muss immer auch mit **unvorhersagbaren Ereignissen** (Überraschungen) gerechnet werden. Bereits geringe Veränderungen in den Rahmenbedingungen oder in den Parametern können zu einem unerwarteten Systemverhalten führen. Überraschungen ergeben sich vor allem aus dynamischen Rückkopplungen und Wechselwirkungen außerhalb der betrachteten Systeme (z.B. wenn Klimawandel auf die politische Stabilität in Rohstoffländern einwirkt und dies zu Versorgungskrisen führt).
- Es ist unmöglich alle **externen Systemdynamiken** in eine Vulnerabilitätsuntersuchung zu integrieren.
- Vulnerabilität ist oftmals nicht unmittelbar messbar. Aufgrund der Komplexität des Untersuchungsgegenstandes kann die Analyse und Bewertung von Klimawirkungen und Vulnerabilität immer normative Elemente enthalten. Wo fachliche Begründungen an ihre Grenzen stoßen, muss normativ entschieden werden. Die Transparenz des Verfahrens zur Vulnerabilitätsbestimmung ist wichtig, damit die Ergebnisse von außen nachvollzogen werden können.
- Die Nutzbarkeit der Ergebnisse erhöht sich, wenn deren Robustheit ausgewiesen wird, indem Bandbreiten berücksichtigt,Gewissheiten und unsicherheiten genannt werden.
- Je intensiver die Akteure, die über die Umsetzung von Klimaanpassungsmaßnahmen entscheiden, bereits in die Analyse und Bewertung einbezogen werden, desto wahrscheinlicher ist es, dass sie dieHandlungsnotwendigkeiten in konkrete Maßnahmen überführen.

Idealtypische Vorgehensweise bei der Durchführung einer Vulnerabilitätsstudie:

1. **Zusammenstellung des vorliegenden Kenntnisstands** über mögliche Folgen und Auswirkungen des Klimawandels und über mögliche Anpassungsmaßnahmen anhand von Literatur-, Projekt- und Internetrecherchen (Identifizierung von Wirkpfaden) sowie Auswahl der für die Durchführung einer regionalen klimawandelbezogenen Vulnerabilitätsanalyse relevanten Klimawirkungen. Letzteres kann mittels Wirkungsketten erfolgen. Klimawirkungen sind beispielsweise Auswirkung von Hitze auf die menschliche Gesundheit, Trockenschäden in der Landwirtschaft oder Unterspülung von Straßen.
2. **Analyse der für die einzelne Klimafolge relevanten Klimaparameter und ihrer Veränderungen** auf der Basis von Klimadaten zur Bestimmung der gegenwärtigen und zukünftigen klimatischen Exposition. Für die zukünftige Exposition ist eine Bandbreite von Klimaszenarien zu beachten. Bei der Klimawirkung Unterspülung von Straßen sind beispielweise als klimatischer Parameter Starkregentage oder Hochwassergefährdete Flächen zu beachten.
3. **Identifizierung von Sensitivitäten des vom Klimawandels betroffenen Systems/Region**. Die Betrachtung der heutigen Sensitivität enthält dabei den heutigen bzw. momentanen Anpassungsgrad, d. h. sie schließt in der Vergangenheit erfolgte Anpassungen der natürlichen und gesellschaftlichen Systeme an Klimaänderungen oder Veränderungen anderer Rahmenbedingungen mit ein. Dieses ist von Bedeutung, da Anpassungsbemühungen der Vergangenheit häufig nicht explizit als Reaktionen auf klimawandelbedingte Veränderungen erfolgt sind, aber heute sehr wohl dafür geeignet sein können. Bei der Betrachtung der zukünftigen Sensitivität sind Veränderungsprozesse zu berücksichtigen, z.B. sozio-ökonomische (z.B. Demographie) die bereits heute absehbar sind. Soweit möglich sollten auch hier Bandbreiten berücksichtigt werden.
4. Zusammenführung von Exposition und Sensitivität zur Einschätzung der **Klimawirkung** für die betrachteten Zeithorizonte. Es ist dabei auf eine räumlich und zeitlich konsistente Zusammenführung zu achten, d.h. die Daten für klimatische Exposition und Sensitivität sollten für den gleichen Zeitraum und Ort gelten. Da bei der Klimawirkung noch keine Anpassungskapazität und damit keine weiteren Maßnahmen berücksichtigt wurden, entspricht dies einem Ohne-Maßnahmen-Szenario. Die Ergebnisse der einzelnen Klimawirkungen können pro Sektoren oder Handlungsbereiche oder allgemein (pro Region) aggregiert werden, beispielweise in dem ein Betroffenheitsindex ausgerechnet wird.
5. Wenn möglich: **Darstellung der Anpassungskapazität** gegenüber den potenziellen Auswirkungen des Klimawandels. Man sollte hierbei zwischen der Anpassungskapazität pro Klimawirkung, pro Sektor und im Allgemeinen unterscheiden. Die Anpassungskapazität pro Klimawirkung ergibt sich aus der Verfügbarkeit von Maßnahmen, um sich genau an diese Klimawirkung anzupassen. Zusammenführung der Erkenntnisse über die Klimawirkung und über die Anpassungskapazität zu Aussagen über die **Vulnerabilität eines Systems** gegenüber einer Klimawirkung, pro Sektor- oder Handlungsfeld oder allgemein (pro Region).

3.1 Methoden

Im Wesentlichen kommen zwei Ansätze für die Operationalisierung von Klimawirkungen und Anpassungskapazität zum Einsatz. Diese sollten im Idealfall beide verfolgt und miteinander kombiniert werden.

A) (Semi-)Qualitative Experteneinschätzung

- Die Auswirkungen von Veränderungsprozessen wie dem Klimawandel können durch Befragungen von Experten untersucht werden (Experteneinschätzung). Über Befragungen können Aussagen zu der Sensitivität einzelner Systeme oder Regionen, einschließlich des bisherigen Anpassungsgrades, und der potenziellen Auswirkungen von Klimaänderungen erhalten werden. Auch können über Experteneinschätzungen Informationen über geeignete Anpassungsmaßnahmen sowie die Anpassungskapazität von Sektoren oder Regionen erhalten werden. Zudem kann man die Experten auch befragen, wie sicher ihre Aussagen sind und damit einen Grad der Gewissheit der Aussagen ableiten.
- Bei einer Vulnerabilitätsbewertung durch Experten werden explizite und implizite Schutzziele mitberücksichtigt und die Vulnerabilitätseinschätzungen kann damit auf eine breitere Bewertungsbasis gestellt werden.

B) Datenbasierte Abschätzung

- Bei der Auswahl der zu untersuchenden Klimawirkungen haben sich sogenannte Wirkungsketten bewährt. Basierend auf diesen Wirkungsketten können die Wirkungsbeziehungen und Parameter identifiziert werden, die im Zuge der weiteren Untersuchung mit Wirkmodellen berücksichtigt werden sollten.
- Bei der datenbasierten, quantitativen Abschätzung kann man einerseits Wirkmodelle oder andererseits Proxyindikatoren verwenden.
- Wirkmodelle beruhen auf einem - meist naturwissenschaftlichen oder ökonomischen – Systemverständnis, bei dem die wichtigsten Prozesse eines Systems mathematisch beschrieben werden, (z.B. Abflussmodelle, um Änderungen im Wasserhaushalt zu identifizieren) oder auf statistisch abgesicherten Beziehungen (sogenannte Black-Box-Modelle). Idealerweise wird die Wirkmodellierung in Kooperation mit Akteure aus der Praxis durchgeführt, um die Dynamik des Systems und gegebenenfalls auftretende Nebenwirkungen besser einschätzen zu können. Mit Hilfe von Simulationen und Szenarien können Wirkungszusammenhänge und mögliche Zukünfte untersucht werden (bzw. die Folgen von Anpassungsmaßnahmen abgeschätzt werden). Wirkmodelle können genutzt werden, um Klimawirkungen oder auch Auswirkungen einzelner Maßnahmen zu modellieren.
- Wenn keine Wirkmodelle vorliegen, aber ein grundlegendes Systemverständnis vorhanden ist, können für die klimatische Exposition und die Sensitivität Proxyindikatoren verwendet und miteinander verschneiden werden (z.B. Hitzetage und Bevölkerundaten zur Ableitung von Aussagen zur Hitzebelastung). Diese Verschneidung beruht nicht auf einem detaillierten Prozessverständnis oder empirisch abgeleiteten Funktionen, daher müssen die unterschiedlichen Einheiten der verwendeten Proxyindikatoren beachtet werden. Meist werden die Indikatoren normalisiert, um einheitenlosen Daten zu erhalten. Das hat den Vorteil, dass Klimadaten relativ einfach mit anderen Daten verknüpft werden können, um Aussagen zu Klimawirkungen und deren räumliche Muster abzuleiten.

- Die Ergebnisse beider Verfahren müssen hinsichtlich ihrer Qualität und Sicherheit bewertet werden. Im IPCC hat sich hierfür ein expertenbasierte Befragen zum Grad der Gewissheit (level of confidence) etabliert.
- Bei der Verwendung von Wirkmodellen muss die Klimasensitivität des Untersuchungsgegenstandes durch Sensitivitätsstudien ermittelbar sein.
- Ist die Verwendung von vielen Klimaprojektionen mit dem gewählten Wirkmodell nicht möglich, so muss ggf. eine geeignete Auswahl für die Wirkmodellierung getroffen werden. Hier kann die Auswahl eines „Worst Case“, eines „Best Case“ und eines „Mittleren Szenariums“ aus dem Ensemble zielführend sein.
- Wenn der Untersuchungsgegenstand sich neben klimatischen Parametern auch von anderen Variablen beeinflusst wird, sollte deren zeitliche Dynamik ebenfalls durch Szenariodaten abgebildet werden, um die Veränderung der Sensitivität abzubilden.
- Nach Möglichkeit sollte auch bei den Wirkmodellen ein Ensemble mehrerer Modelle verwendet werden.
- Für manche Fragestellungen kann eine Interpolation der Klimaparameter notwendig sein, um eine höhere räumliche Auflösung zu erreichen. Dabei ist zu beachten, dass die Daten mit der geringsten Auflösung die Aussagekraft in Raum und Zeit begrenzen. Anderenfalls muss eine räumliche und zeitliche Verfeinerung des grob aufgelösten Datensatzes vorgenommen werden.
- Durch die Ermittlung von Schwellenwerten des untersuchten Systems kann bestimmt werden, wann relevante Änderung im untersuchten System ausgelöst werden, d.h. welche Änderungen für das System zu einem kritischen Zustand führen und welche nicht.
- Die Validierbarkeit der Ergebnisse von Wirkmodellen muss – analog wie bei Klimamodellen – möglich sein und durchgeführt werden und sich auf einen Referenzzeitraum (1961- 1990 oder 1971-2000) beziehen.
- Ist eine Diskrepanz zwischen Klimamodelldaten und Beobachtungsdaten festgestellt worden, so muss ggf. eine Bias-Adjustierung vorgenommen werden.

3.2 Bewertung

Wissenschaftliche Studien zur Vulnerabilität zeigen, wie sich ökologische und soziale Systeme oder Regionen infolge des Klimawandels und anderer Veränderungsprozesse verändern können.

- Die so erzielten Ergebnisse sind wissenschaftlich objektiv, das heißt: durch Dritte überprüfbar und nicht gebunden an Interessen.
- Die Ergebnisse können aus fachwissenschaftlicher Perspektive interpretiert und bewertet werden.
- Idealerweise gibt es für diese fachwissenschaftliche Bewertung einen objektiven Bewertungsmaßstab, zum Beispiel einen Grenzwert.
- Wesentlich ist, dass die Bewertungsmaßstäbe derjenigen, die bewerten, offen dokumentiert werden.

Diese Ergebnisse von Vulnerabilitätsstudien werden im Rahmen von Anpassungsstrategien in einen politischen Kontext gestellt und damit auch aus einer nicht-wissenschaftlichen Perspektive bewertet.

Damit auch diese Bewertung nachvollziehbar bleibt, sollte im Detail offen dokumentiert werden, wer diese Ergebnisse nach welchen Maßstäben aus gesellschaftlicher, politischer, wirtschaftlicher oder anderer Perspektive bewertet.

Daraus ziehen wir zwei Schlussfolgerungen:

- Die Bewertung von wissenschaftlich fundierten Vulnerabilitätsstudien – egal durch wen und egal nach welchen Maßstäben – muss nachvollziehbar sein.
- Diejenigen, die Anpassungsstrategien erstellen und umsetzen, haben sowohl die Aufgabe, wissenschaftliche Ergebnisse zu bewerten, als auch die Verantwortung, dies nachvollziehbar zu tun.

Die Bewertung der Ergebnisse sollte über im Voraus definierte und – wo möglich – anerkannte Vorgaben erfolgen, ähnlich wie es der IPCC für Aussagen zur Wahrscheinlichkeit des Eintretens zukünftiger Ereignisse vorgenommen hat:

- Wahrscheinlichkeit des Eintretens: Abstufung, wann die abgeschätzten Klimaauswirkungen „sicher“, „wahrscheinlich“, „sehr unwahrscheinlich“ usw. eintreten werden.
- Stärke der Veränderung: Abstufung, wann die Änderung einer Klimawirkung als „gering“, „moderat“ oder „stark“ eingeschätzt wird.
- Häufigkeit: Insbesondere wenn es um das verstärkte Auftreten von Ereignissen (zum Beispiel Extremwetterereignissen) geht, sollte klar definiert sein, was „selten“, „häufig“ oder „sehr häufig“ bedeutet, und Einteilung entsprechend konsistent verwendet werden.

In der Studie „Vulnerabilität Deutschlands gegenüber dem Klimawandel – Sektorenübergreifende Analyse des Netzwerks Vulnerabilität“ hat das Netzwerks Vulnerabilität unter der Leitung des Umweltbundesamts für alle Sektoren der Deutschen Anpassungsstrategie (DAS) die Vulnerabilität anhand von systematisch ausgewählten Klimawirkungen mittels einer über alle Sektoren hinweg konsistenten Methodik untersucht. Die Bewertung der fachlichen Ergebnisse erfolgte durch die im Netzwerk Vulnerabilität vertretenden 16 Bundesbehörden und -institutionen. Das methodische Grundgerüst und das Vorgehen des Netzwerks Vulnerabilität bei der Vulnerabilitätsanalyse für Deutschland kann als Beispiel für Vulnerabilitätsstudien dienen. Die Anwendbarkeit auf Länderebene muss in jedem Einzelfall geprüft werden.

Anhang: Beispiele von Klimawirkungsstudien

A1 **Klimahüllen für Niedermoor-Flächen**

Kai-Achim Höpker
Landesanstalt für Umwelt Baden-Württemberg (LUBW)

Das Beispiel stammt aus dem Fachgutachten Handlungsfeld "Naturschutz und Biodiversität" (2013) für die Strategie zur Anpassung an den Klimawandel in Baden-Württemberg (2015). Der Text wurde geringfügig angepasst. Das Fachgutachten wurde erstellt durch Dr. Helmut Schlumprecht, Büro für ökologische Studien GdbR, Bayreuth, unter Mitarbeit von Dipl. Geoökol. Martin Friedel. Das umfangreiche Gutachten mit weiteren Beispielen für Vulnerabilitätsabschätzungen findet sich unter http://www4.lubw.baden-wuerttemberg.de/servlet/is/243535/.

Methode

Klimahüllen (climate envelopes) bieten die Möglichkeit, die gegenwärtigen klimatischen Standortanforderungen einer Art oder eines Biotops anschaulich darzustellen. Dazu werden verschiedene klimatische Parameter der Orte gegeneinander aufgetragen, an denen die Arten oder Biotope derzeit vorkommen. Aus der räumlichen Verteilung der Punkte ergibt sich in der Grafik der klimatische Bereich, in dem die Art oder das Biotop existieren können. Durch einen Vergleich der derzeitigen klimatischen Bedingungen an den Standorten der Arten/Biotope und den Bedingungen, die sich voraussichtlich im Zuge des Klimawandels an diesen Standorten ergeben werden, lassen sich Projektionen ableiten, ob an diesen Stellen in Zukunft die betroffenen Arten/Biotope noch existieren können, d. h. die klimatischen Voraussetzungen überhaupt gegeben sind.

Für die vorliegende Untersuchung wurden als Parameter folgende Größen gewählt:

- **Arithmetisches Mittel der Tagesmitteltemperaturen** (\temperatur\elementweise_perzentile\7x7\temp_7x7_gesamt_perzentile_mean-elementweise_mean_gc.txt)
- **Arithmetisches Mittel des gesamten Jahresniederschlags** (\niederschlag\elementweise_perzentile\7x7\prec_7x7_gesamt_perzentile_mean-elementweise_sum_mm.txt)
- **Arithmetisches Mittel der Niederschlagssumme im hydrologischen Sommerhalbjahr** (niederschlag\elementweise_perzentile\7x7\prec_7x7_gesamt_perzentile_mean-elementweise_hydrosummer_sum_mm.txt)
- **Klimatische Wasserbilanz** (klwb_25x25_gesamt_perzentile_mean_elementweise_jahr.txt)

Von den ersten drei Parametern lagen für Baden-Württemberg jeweils der Ist-Zustand (1971-2000) und die modellierte Veränderung in naher Zukunft (2021-2050) in einem 7x7 km- Raster vor. Für die nahe Zukunft wurde ein Ensemble aus 24 Modellen und für die ferne Zukunft aus 15 Modellen verwendet. (Siehe LUBW 2013; http://www4.lubw.baden-wuerttemberg.de/servlet/is/229985/).

Die klimatische Wasserbilanz wurde für das 25x25 km Raster verwendet.

Für den Niederschlag wurde sowohl der Gesamtniederschlag als auch die Niederschlagssumme während des hydrologischen Sommers gewählt, da die Modellergebnisse auf eine Änderung der Niederschlagsverteilung zwischen Sommer und Winter

hindeuten und sich daraus unterschiedliche Effekte auf die Vegetation ergeben können. Zudem zeigt sich bei den Modellierungen von Beierkuhnlein et al. (2012), dass für viele FFH-LRT ein Klimaparameter, der den Niederschlag in der Vegetationsperiode beschreibt (z. B. ein oder mehrere Monate), wesentlicher Faktor ist.

Die gewählten Parameter wurden über eine räumliche Verknüpfung im GIS den Naturräumen 4. Ordnung zugeteilt. Wo mehrere Messpunkte in einen Naturraum fielen, wurde aus den enthaltenen Punkten das arithmetische Mittel gebildet. Naturräumen, in deren Grenzen kein Messpunkt lag, wurden die jeweils am nächsten liegenden Punkte zugewiesen. Durch dieses Verfahren hatte jeder Naturraum 4. Ordnung anschließend jeweils einen Wert für die zuvor genannten Parameter.

Durch einen Vergleich der derzeitigen Bedingungen in Baden-Württemberg mit den projizierten Klima-Parametern (Bezug: Mediane (=50 %-Perzentil, p50-Werte)) in diesen Naturräumen (orange Linie) lässt sich abschätzen, wie sehr die Klima-Bedingungen in naher oder ferner Zukunft sich gegenüber jetzt verändern.

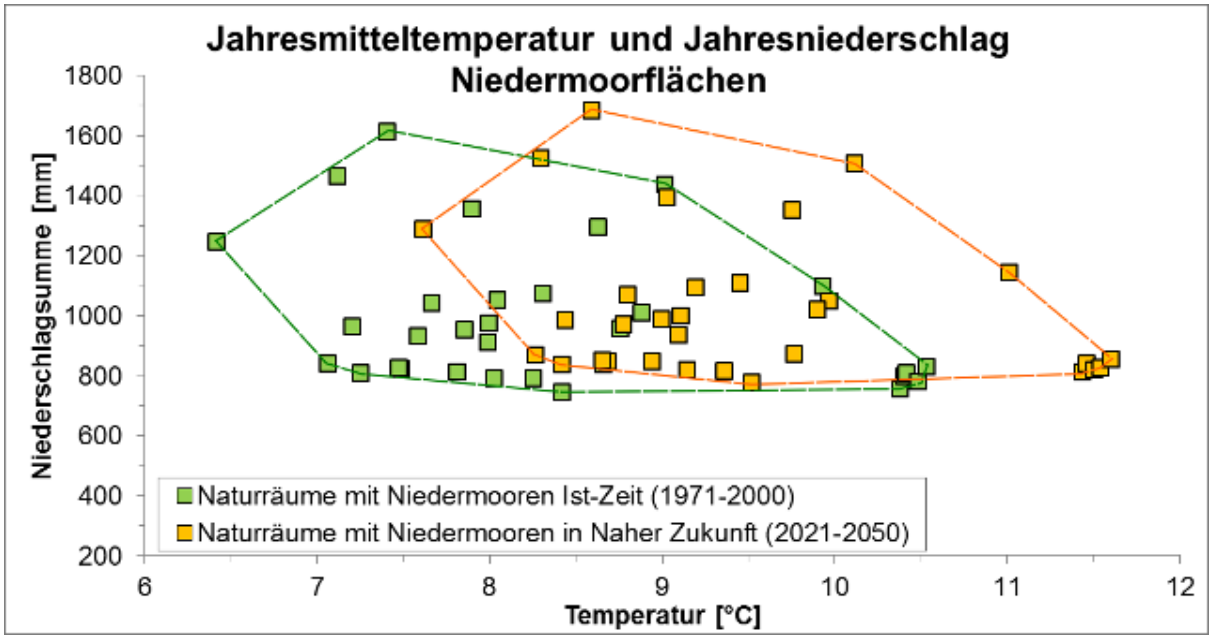

Abb. 1: Klimahülle aus Jahresmitteltemperatur und Niederschlagssumme für Niedermoor-Flächen.

Hinweis: Ein Quadrat stellt einen Naturraum 4. Ordnung mit Niedermoor-Standorten dar. Je stärker die Veränderung, desto eher kann es möglich sein, dass die untersuchten Standort-Typ oder Biotoptyp Bedingungen erfahren, die in Baden-Württemberg bislang nicht aufgetreten sind. Unterschieden werden drei Fälle:

- Geringe Veränderung: Standort-Typ oder Biotoptyp verbleibt im Naturraum weiterhin in der von den heutigen Standorten aufgespannten Klimahülle (Fall A), die jetzt von den Parametern Temperatur und Niederschlag in Baden-Württemberg aufgespannt wird. Dieser Naturraum wird voraussichtlich auch zukünftig für den Biotoptyp bzw. Moor-Standort geeignete Klimabedingungen bieten.
- Mittlere Veränderung: Klima-Parameter Temperatur und Niederschlag sind außerhalb der derzeitigen Klimahülle in Baden-Württemberg, aber im heutigen Spektrum (Fall B). Sowohl der Temperatur- als auch der Niederschlagswert liegen jeder für sich und unabhängig voneinander im Spektrum der heutigen Para-

meter. Diese Naturräume werden voraussichtlich auch in naher Zukunft für den betreffenden Standort-Typ oder Biotoptyp geeignet sein. Bei Betrachtung der Moore fallen unter diese Kategorie auch diejenigen Naturräume, deren Niederschlagsmenge über der der heutigen Moorstandorte liegt, da Moore naturgemäß keine maximal tolerierbare Niederschlagsmenge aufweisen.

- Große Veränderung: Standort-Typ oder Biotoptyp erfährt im Naturraum Klimabedingungen (Temperatur und Niederschlag), die außerhalb der jetzigen Klimahülle für Baden-Württemberg liegen, und ganz oder teilweise außerhalb des heutigen Parameter-Spektrums (Fall C). Da Temperatur- und/oder Niederschlagswerte außerhalb des Spektrums der heutigen Biotopstandorte liegen, könnten Naturräume mit solchen Parametern in Zukunft für den betreffenden Typ ungeeignet werden.

Diese drei Fälle können in Karten der Naturräume veranschaulicht werden. In den Karten wird nur das Ausmaß der Veränderung dargestellt. Die folgenden Karten (Abb. 2 und 3) stellen für den Projektionszeitraum nahe Zukunft (2021 – 2050) die voraussichtlichen Veränderungen von Klimaparametern für ausgewählte Standort-Typ oder Biotoptyp (Hoch- und Niedermoor-Flächen nach Moor-Kataster in den Naturräumen 4. Ordnung dar, wie sie aus den Analysen zu den Klimahüllen (Parameter Jahresmitteltemperatur und Niederschlag im hydrologischen Sommerhalbjahr) hervorgehen.

Einschränkungen und Aussagemöglichkeiten

Geraten Biotope außerhalb der derzeitigen Klimahülle für Baden-Württemberg, bedeutet das nicht, dass sie nicht mehr existieren können und damit vollständig verloren gehen. Außerhalb Baden-Württembergs (z. B. Schweiz, Frankreich, benachbarte Bundesländer) könnten diese Lebensräume ggf. jetzt unter solchen Bedingungen vorkommen wie sie für die Zukunft für Baden-Württemberg prognostiziert werden. Dies ist bei einer Auswertung der Klimadaten für Baden-Württemberg nur nicht bekannt.

Auch innerhalb von Naturräumen, die in der Klimahülle verbleiben, sind Veränderungen möglich. So können sich regionale Ausprägungen von Lebensgemeinschaften ändern, wenn beispielsweise sich Tieflagen-Varianten von Pflanzengesellschaften in montane Lagen ausbreiten und Hochlagen-Varianten zurückgehen. Diese Problematik kann mit Klimahüllen auf dem Niveau von Biotoptypen nicht angegangen werden.

Insgesamt verbleiben im Beispiel der Niedermoor-Standorte 22 der 31 Naturräume mit Niedermoorstandorten im Bereich der heutigen Klimahülle (Fall A). Diese decken mit 32.397,6 Hektar 96,3 % der heutigen Flächen (33.655,1 ha) ab und beinhalten damit auch die fünf Naturräume mit den größten Flächenanteilen. Weitere 0,9 % (316,3 ha) liegen außerhalb der Klimahülle, bleiben aber im Spektrum der heutigen Temperatur- und Niederschlagswerte (Fall B). Lediglich 2,8 % der jetzigen Niedermoorflächen liegen in Naturräumen, die in naher Zukunft (Projektionen: 50 %-Perzentil) starke Veränderung ihrer klimatischen Rahmenbedingungen erfahren werden (Fall C), da in diesen Naturräumen voraussichtlich Kombinationen von Änderungen in Temperatur und Niederschlag auftreten werden, die außerhalb der derzeitigen Klimahülle der Niedermoorflächen in Baden-Württemberg liegen. Aus Gründen der Übersichtlichkeit wurde auf eine Nummerierung der Naturräume in der Grafik verzichtet. Stattdessen wurden die drei Fälle in Karten visualisiert.

Eine starke Veränderung der Standortbedingungen (rote Farbe in den Karten der Abb. 2 und 3) bedeutet nicht zwangsläufig, dass diese Naturräume möglicherweise nicht mehr für Niedermoore geeignet sein werden, jedoch ist in diesen Naturräumen mit deutlichen Veränderungen in der Arten-Zusammensetzung von Niedermooren oder Nasswiesen auf Niedermoorflächen zu rechnen.

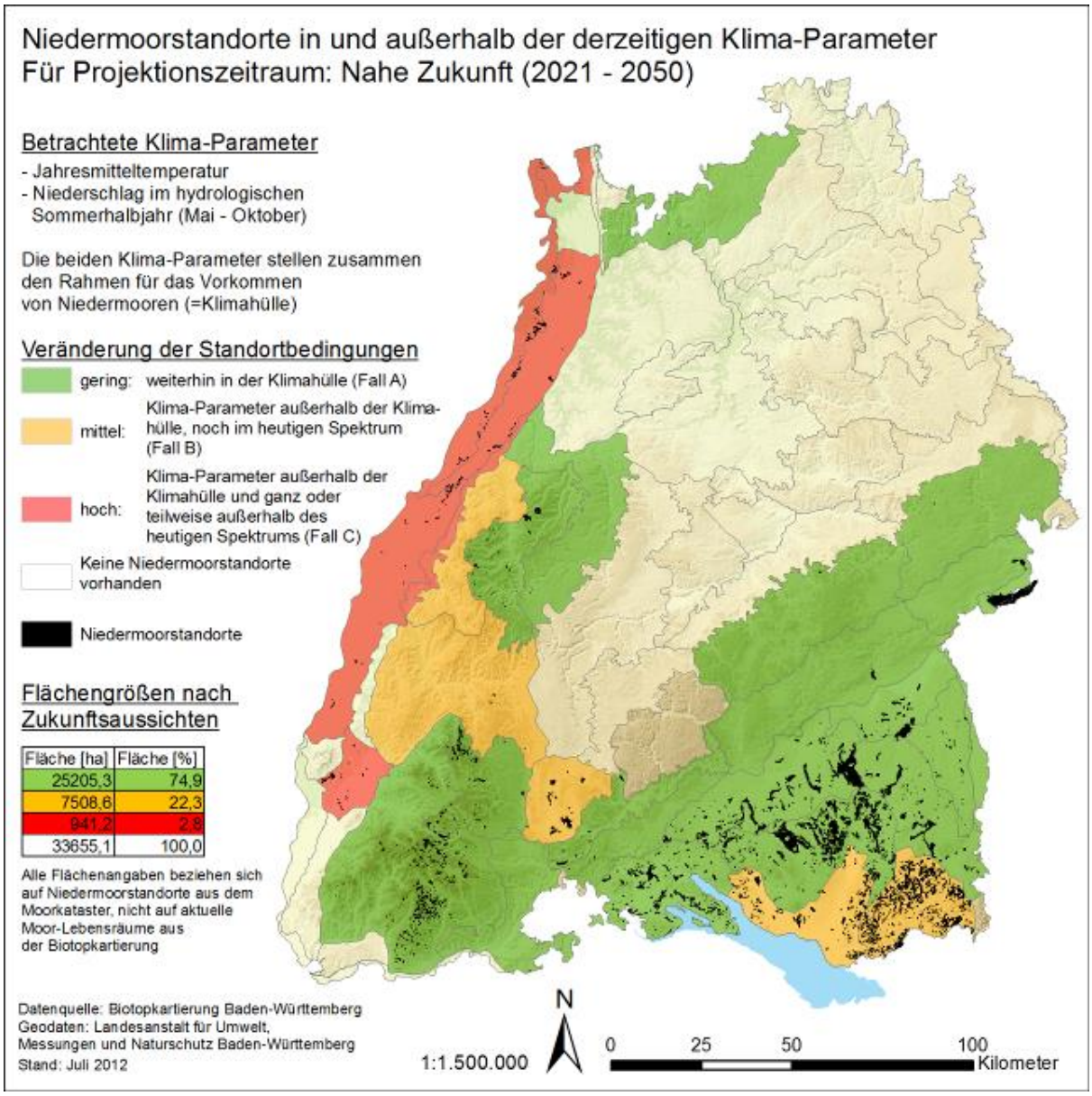

Abb. 2: Veränderung der Standortbedingungen gemäß Klimahülle für Niedermoor-Standorte. Bezug nahe Zukunft: Mediane (50 %-Perzentil, p50-Werte). Datenquelle: Flächen nach Moor-Kataster LUBW, Stand 16.07.2012.

Große Veränderungen werden sich für Niedermoorstandorte voraussichtlich im Bereich des Nördlichen, Mittleren und Südlichen Oberrhein-Tieflandes ergeben. In den Naturräumen Hoch- und Grinden-Schwarzwald und in weiten Teilen des Voralpinen Hügel- und Moorlandes sowie der Donau-Iller-Lech-Platte bzw. im Alpenvorland werden sich vergleichsweise geringe Veränderungen ergeben, da diese Niedermoor-Flächen voraussichtlich in der Klimahülle der derzeitigen Bedingungen (Jahres-Mitteltemperatur und -Niederschlagssumme) verbleiben werden. Die abweichende Einschätzung von kleinflächigen Naturräumen wie der Baar (mittlere Veränderung,

im Umfeld jedoch geringe) könnte auch an der Methodik (Extrapolation von einem Klima-Projektionspunkt auf einen Raum) liegen. Die Naturräume mit relativ geringen Veränderungen machen insgesamt einen Anteil von fast 75 % an den heutigen Flächen der Niedermoorstandorte aus.

Die Zukunftsaussichten der Hochmoorflächen in naher Zukunft variieren zwischen den einzelnen Naturräumen. In den Höhenlagen des Schwarzwaldes sind in naher Zukunft geringe Veränderungen für die Standorte zu erwarten, teilweise auch im Alpenvorland. In einigen Naturräumen dürften jedoch laut den Klima-Projektionen die Hochmoor-Standorte außerhalb der derzeitigen Klimahülle zu liegen kommen und daher starke Veränderungen erfahren. Dies kann zu deutlichen Veränderungen in der bisherigen Artenzusammensetzung führen. Die Zukunftsaussichten der Hochmoorstandorte stellen sich somit ungünstiger dar als die der Niedermoorstandorte.

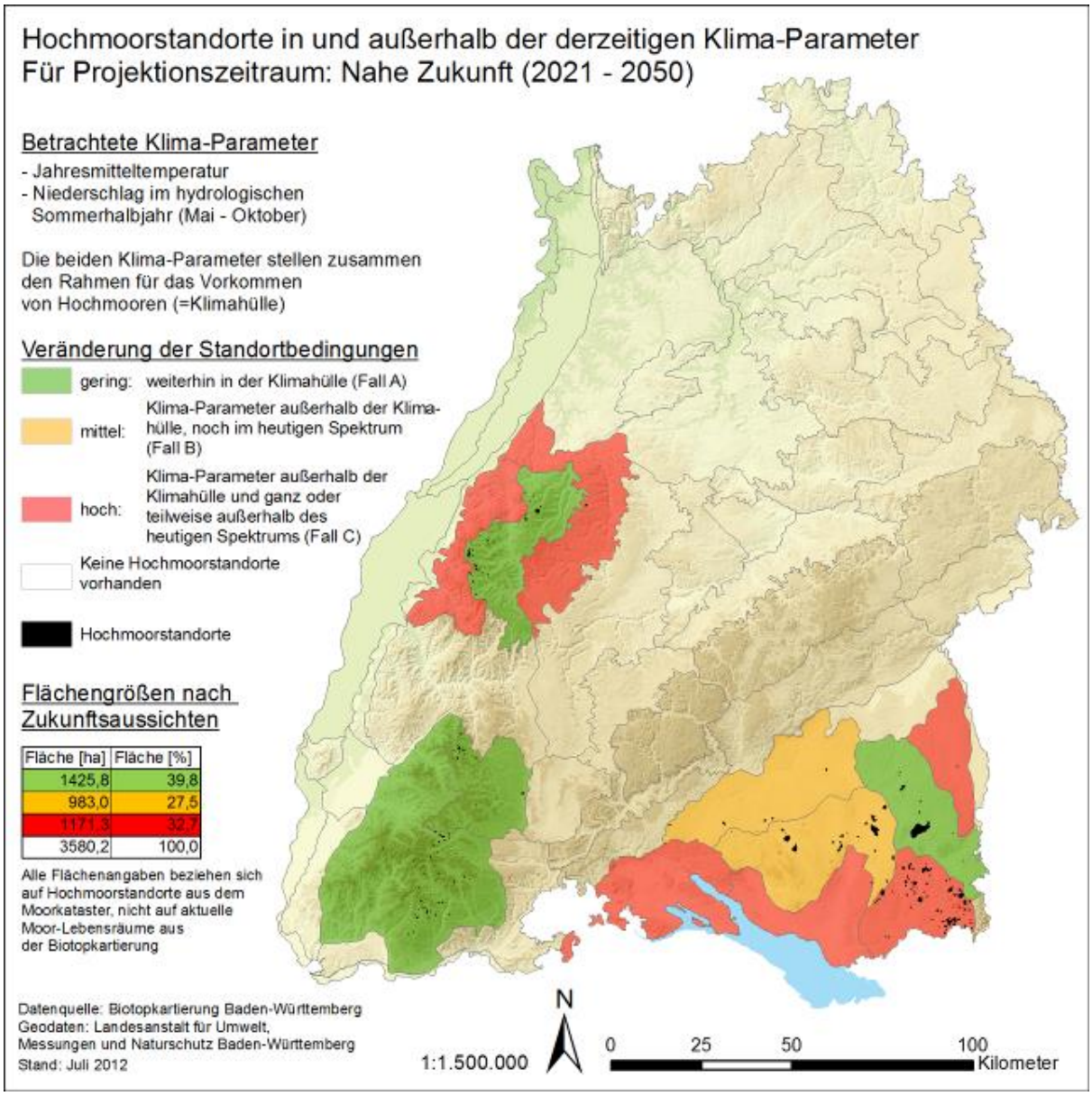

Abb. 3: Veränderung der Standortbedingungen gemäß Klimahülle für Hochmoor-Standorte. Bezug nahe Zukunft: Mediane (50 %-Perzentil, p50-Werte). Datenquelle: Flächen nach Moor-Kataster LUBW, Stand 16.07.2012.

A2 **Pilotstudien Niedrigwasser in KLIWA**

Dipl-Geoökol. Maria Foltyn
Bayerisches Landesamt für Umwelt

Einordnung und Zielstellung der Studien

Das folgende Beispiel entstammt dem Kooperationsvorhaben KLIWA („Klimawandel und Konsequenzen für die Wasserwirtschaft“). In diesem haben sich die Länder Baden-Württemberg, Bayern und Rheinland-Pfalz das Ziel gesetzt, mögliche Auswirkungen des Klimawandels auf den Wasserhaushalt der genannten Bundesländer herauszuarbeiten, Konsequenzen aufzuzeigen und Handlungsempfehlungen abzuleiten.

Das Thema Niedrigwasser gewinnt unter dem Gesichtspunkt des Klimawandels in den letzten Jahren zunehmend an Brisanz und stellt nunmehr einen Bearbeitungsschwerpunkt innerhalb von KLIWA dar. Die wasserwirtschaftlichen Nutzungen und ökologischen Funktionen, die durch Niedrigwasser beeinträchtigt werden können, hängen in einem vielschichtigen Wirkgefüge zusammen. Dieses kann aufgrund dieser Komplexität nicht in seiner Gesamtheit betrachtet werden. Daher wurde die Fragestellung anhand ausgewählter wasserwirtschaftlicher Nutzungssektoren untersucht (Abb. 1). Während Baden-Württemberg und Bayern je zwei Fallstudiengebiete betrachteten (Dreisam und Leimbach sowie Sächsische Saale und Naab), bezog sich die rheinland-pfälzische Studie auf die gesamte Landesfläche. Ziel waren konkrete Handlungsempfehlungen zur Anpassung an den Klimawandel.

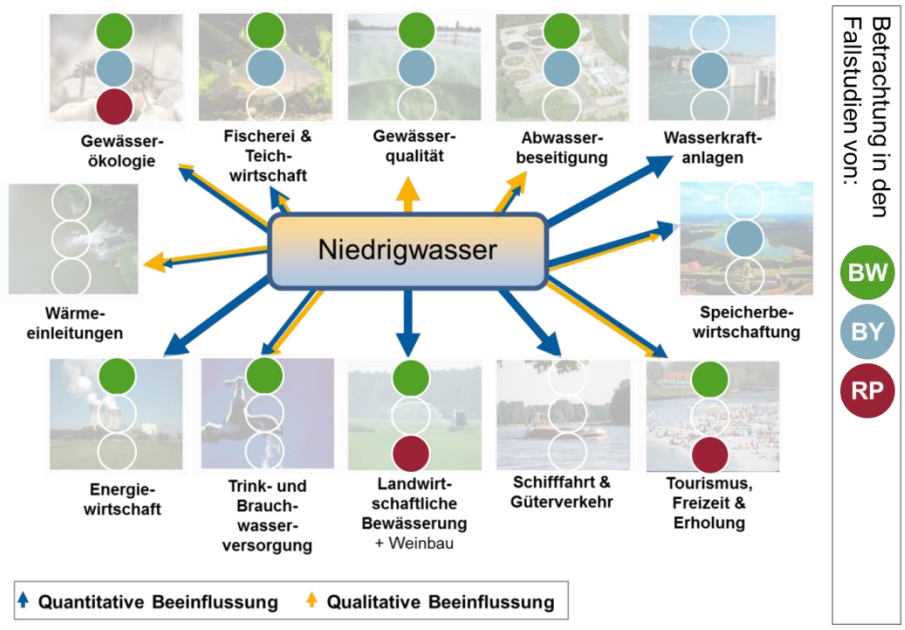

Abb. 1: Schema zum Einfluss von Niedrigwasser auf Gewässerökologie und Wasserwirtschaft und Betrachtung der Nutzungsbereiche in den jeweiligen Fallstudien.

Die Abschätzung der Vulnerabilität, wie in diesem Leitfaden erörtert, stellte dabei eher ein „Nebenprodukt“ dar und wurde nur qualitativ beschrieben. Vielmehr handelt es sich um eine Klimawirkungsanalyse einschließlich Konfliktpotential und Handlungsempfehlungen. Nichtsdestotrotz lieferten die Studien wertvolle inhaltliche und methodische Ergebnisse hinsichtlich der Zwischenschritte einer Vulnerabilitätsanaly-

se. Im Folgenden werden einige methodische Schlaglichter, vor allem aus bayerischer Sicht, vorgestellt.

Die Bearbeitung der baden-württembergischen Fallstudie erfolgte durch die Universität Freiburg, die der beiden anderen Bundesländer durch die HYDRON GmbH Karlsruhe.

Methodik

Allgemeines

Bei der Bearbeitung der Klimawirkungsanalysen gingen die drei Bundesländer Baden-Württemberg, Bayern und Rheinland-Pfalz zum Teil unterschiedliche, in den Grundzügen aber abgestimmte, Wege. Das allgemeine Vorgehen lässt sich allerdings in die Analyseketten nach IPCC-einordnen:

1. (Klimatische) Exposition/ Klimaänderungssignal + Sensitivität = Wirkung sowie
2. Wirkung + Anpassungskapazität = Vulnerabilität

Hauptaugenmerk lag auf der ersten Analysekette, da Anpassungskapazitäten schwerer zu fassen sind. Auch wurden in den Fallstudien unterschiedliche Schwerpunkte in der Herangehensweise gesetzt und unterschiedliche Kombinationen von Niedrigwasserszenarien (Exposition), Sensitivität und Auswirkungsableitung verfolgt (Abb. 2). So konzentrierte sich Baden-Württemberg auf die quantitative Analyse der Vergangenheit sowie auf die quantitative Sensitivitätsanalyse der hydrogeologischen Eigenschaften in seinen zwei Pilotgebieten. Auswirkungen auf die wasserwirtschaftliche Nutzung wurden über (Experten-)Einschätzungen lokaler Wassernutzer abgeleitet und zusätzlich das Konfliktpotential abgefragt. Im Gegenzug dazu lehnte sich Bayern an das Vorgehen des „Netzwerks Vulnerabilität“ des UBA (2015) an und versuchte neben der qualitativen Experteneinschätzung mit der lokalen Wasserwirtschaftsverwaltung Auswirkungen auch mit Hilfe quantitativer Kennwerte aus einer Wasserhaushaltsmodellierung zu beschreiben. Das Vorgehen in Rheinland-Pfalz ähnelt eher dem bayerischen, allerdings in geringerer Detailtiefe.

Vor allem in Bayern wurde formal zwischen den beeinflussten Systemen „Einzugsgebiet“, also dem Wasserhaushalt und den Abflüssen, und „Wasserwirtschaftliche Nutzung (einschließlich der Gewässerökologie)“ unterschieden. Daraus folgte, dass die Bausteine der Vulnerabilitätsanalyse per Definition verschieden inhaltlich belegt sein können: So konnte eine Abflussänderung sowohl die Auswirkung eines Klimaänderungssignals (klimatische Exposition) darstellen als auch das eingehende Änderungssignal (hydrologische Exposition) für die Auswirkung auf eine wasserwirtschaftliche Nutzung. Für die Analyse machte das aber keinen Unterschied.

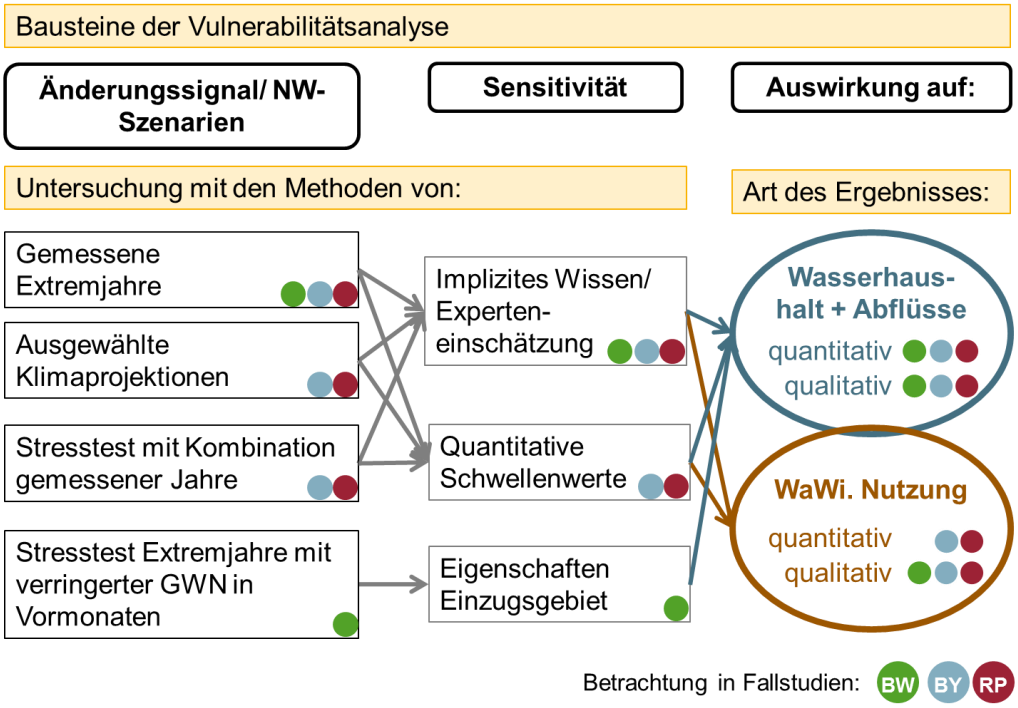

Abb. 2: Herangehensweisen in der Untersuchung der ersten drei Bausteine der Vulnerabilitätsanalyse (ohne Anpassungskapazität) durch die Fallstudien in Baden-Württemberg, Bayern und Rheinland-Pfalz. Der Begriff Änderungssignal ist mit der Exposition gleichzusetzen

Die in den Fallstudien verwendeten hydro(meteoro-)logischen Kennwerte wurden zwischen den Bundesländern abgestimmt. Nach Möglichkeit wurde darauf geachtet, dass die Kennwerte auch in der wasserwirtschaftlichen Praxis Anwendung finden. Ein wesentlicher Kennwert war dabei der mittlere Niedrigwasserabfluss MNQ.

Das Zusammentragen des Kenntnisstandes zu den einzelnen Fallstudiengebieten geschah im Zuge von deren Auswahl über bereits bekannte oder vermutete Konflikte (Studien in BW und BY). Für Bayern liegt mit dem Bericht „Niedrigwasser in Bayern“ (LfU 2016) zudem eine umfangreiche Materialsammlung vor.

Änderungssignal (Exposition)

In allen drei Fallstudien wurde hinsichtlich der Exposition, entgegen der Empfehlungen im hiesigen Leitfaden, keine Ensemblebetrachtung im klassischen Sinne verwendet. Vielmehr wurde ein „Was-wäre-wenn…?“-Ansatz mit ausgewählten Niedrigwasserszenarien verfolgt. Das hatte folgende pragmatische Gründe:

- **Datenverfügbarkeit:** Die Anzahl der in den Bundesländern vorhandenen und als verlässlich eingestuften Abflussprojektionen ist zu begrenzt, um ein Ensemble zu bilden. Lediglich in Bayern liegt flächendeckend ein Ensemble aus 11 plausibilitätsgeprüften Wasserhaushaltssimulationen vor. Dieses diente aber zur Auswahl von Projektionen als Niedrigwasserszenarien mit bestimmten Eigenschaften (s.u.).
- **Auswertungskapazitäten und Kommunizierbarkeit:** Bei der Auswirkungsbetrachtung multipliziert sich der Bearbeitungsaufwand mit jedem eingehenden Expositionsszenario. Auch sind die Projektpartner aus der wasserwirtschaftlichen Praxis schnell durch zu viele Szenarien überfordert.

- **Signalausprägung:** Für Handlungsempfehlungen zu Niedrigwasser und der Prüfung von deren Notwendigkeit und Wirksamkeit braucht es auch tatsächliche Niedrigwassersignale. Daher war nur der untere Bereich von Abflussänderungen interessant. Zeigen Median und obere Perzentile keine Verschärfung der Niedrigwassersituation, können sie vernachlässigt werden.

Der „Was-wäre-wenn…?“-Szenarienansatz setzt sich aus ausgewählten Klimaprojektionen und zwei unterschiedlichen Stresstestansätzen zusammen. Die Analyse der gemessenen (Extrem-)Jahre der Vergangenheit zählen nicht dazu. Vielmehr dienten sie der Abbildung des Status quo sowie dazu, die Szenarien besser einordnen zu können.

Ausgewählte Projektionen

Mit Projektionen wurde nur in Rheinland-Pfalz und Bayern gearbeitet. Für Rheinland-Pfalz war nur die Projektion A1B-ECHAM5-CCLM4.8 in 3 Realisationen verfügbar. Deren Änderungssignale streuen jedoch ausreichend, um eine Art „Mini-Ensemble“ für eine moderate Niedrigwasseränderung bilden zu können.

Das bayerische Ensemble von Abflussprojektionen basiert auf 11 Klimaprojektionen, deren klimatische Eingangsgrößen für die Wasserhaushaltsmodellierung in einem standardisierten Verfahren plausibilitätsgeprüft wurden („Klimaaudit“, Publikation in Bearbeitung). Die Auswahl für die Niedrigwasserszenarien beinhaltet einerseits die Abflussprojektion basierend auf der regionalen Klimaprojektion A1B-HadRM-HadGM3Q3. Diese zeigte in der nahen Zukunft in den Fallstudiengebieten trockenere Sommer, aber gleichzeitig feuchtere Winter an. Andererseits ist die Projektion A1B-ECHAM5-WETTREG2010 durch ganzjährig deutlich trockenere Verhältnisse charakterisiert und wird in Bayern als „worst case“-Szenario geführt.

Beide Bundesländer werten die in KLIWA gebräuchlichen Zeiträume 1971-2000 (Referenz) und 2021-2050 („nahe Zukunft“) aus. Die bayerischen Studien betrachten zusätzlich die Zeiträume 2041-2070 („mittlere Zukunft“) und 2071-2100 („ferne Zukunft“). Dies bot die Möglichkeit, eine Bandbreite der Niedrigwasserverschärfung aufzuspannen zwischen eher „gering“ (HadGM3Q3, nahe Zukunft) und „extrem“ (WETTREG2010, ferne Zukunft).

Stresstests Klimagrößen und Oberflächengewässer

Auf den in Baden-Württemberg verwendeten Stresstest wird im Abschnitt Sensitivität eingegangen. Rheinland-Pfalz und Bayern kombinierten ausgewählte gemessene Jahre mit bestimmten Eigenschaften (normal, trocken, feucht) als Antrieb der Wasserhaushaltsmodelle. So enthält die gemeinsame erste Stresstestdekade die dreifache Abfolge des Jahres 2003, die zweite Stresstestdekade (nur BY) zusätzlich die dreifache Abfolge von trockenem Sommer und vorangehendem trockenen Winter.

Vorteile dieses Szenarienansatzes sind die gute Kommunizierbarkeit sowie die jahresweise Analyse von Stress- und Erholungsphasen. Nachteil ist die unterschiedliche räumliche Ausprägung von Extremjahren und damit schlechtere Vergleichbarkeit von Gebieten.

Sensitivität

Unter der Sensitivität wurde in den hiesigen Studien die derzeitige Ausstattung der betrachteten Systeme verstanden, also beispielsweise die hydro(geo-)logische Pufferkapazität hinsichtlich des Systems Einzugsgebiet oder die aktuelle technische Ausstattung von Wasserkraftanlagen. Zukünftige Sensitivitäten blieben aus Gründen des Aufwands (v.a. BY, RLP) oder des Ansatzes der Studien (BW) unberücksichtigt.

Schwellenwerte

In Rheinland-Pfalz und Bayern wurden die Sensitivitäten quantitativ u. a. über die Verrechnung von Schwellenwerten abgebildet:

- MNQ als häufiger Richtwert für Mindestwassermengen an Ausleitungskraftwerken oder Abwassereinleitungen (BY + RLP)
- Mindestwassertiefen zur Fischwanderung (RLP)
- Orientierungswerte der Wassertemperatur nach OGewV (BY)

Stresstest Basisabfluss/ Grundwasser

Im Niedrigwasserfall besteht der Großteil des Abflusses im oberirdischen Gewässer aus dem Basisabfluss des Grundwassers. Wie empfindlich der Gerinneabfluss eines Gebietes in Trockenzeiten reagiert, hängt dabei hinsichtlich der natürlichen Randbedingungen von den hydrogeologischen Puffereigenschaften ab.

In den beiden betrachteten Einzugsgebieten Baden-Württembergs Dreisam und Leimbach wurde mittels des Bodenwasserhaushaltsmodells GWN-BW zunächst die Grundwasserneubildung in den historischen Trockenjahren 1976, 1992, 2003 und 2011 sowie ihren Vorgänger- und Nachfolgerjahren modelliert. Für eine Analyse der Sensitivität der Einzugsgebiete wurden schließlich die tatsächlichen Grundwasserneubildungen der Vorjahre durch zahlreiche Variationen verminderter Grundwasserneubildung unterschiedlicher Stärke und Länge ersetzt (Abb. 3). Die so erhaltenen Zeitreihen von zusammengerechnet je 48 Monaten ging dann in das Modell FLEX ein, um den Basisabfluss in beiden Gewässern zu berechnen. Über die daraus simulierte Reaktion des Basisabflusses konnte abgebildet werden:

- wie schnell und stark ein Gebiet auf Trockenheit reagiert
- wie lang es benötigt, um sich zu regenerieren
- welche Andauern und Ausprägungen von Trockenheit zu besonders kritischen Niedrigwassersituationen führen.

Dieser Ansatz der Sensitivitätsuntersuchung erlaubt, unterschiedliche Gebiete einem vergleichbaren Trockenstress auszusetzen. Der Nachteil besteht in einer schlechteren Kommunizierbarkeit und schlechterer Kopplung an hydrometeorologische Größen.

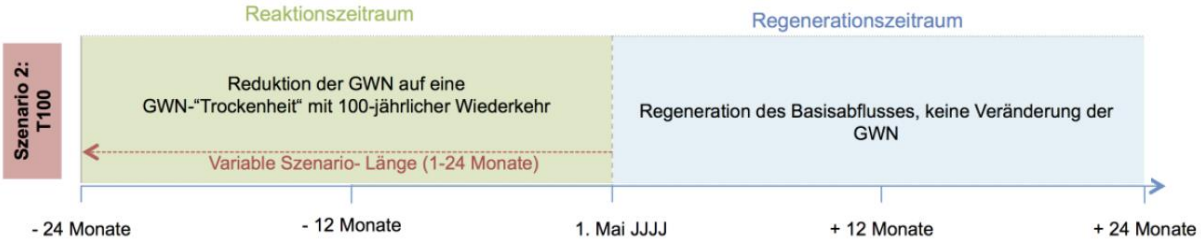

Abb. 3: Beispiel zum schematischen Aufbau der unterschiedlichen Stresstestszenarien in Baden-Württemberg. Der Regenerationszeitraum umfasst die Zeitreihe der tatsächlichen Grundwasserneubildung (GWN) in einem von 5 historischen Trockenjahren und dessen Folgejahr. Der Reaktionszeitraum basiert auf der GWN der beiden Vorjahre dieses Trockenjahrs, allerdings mit 24 Variationen einer extremen Verminderung. Diese ergeben sich dadurch, dass die GWN je in den letzten 1, 2, …, 24 Monaten des Reaktionszeitraums auf ein 100-jährliches Ereignis reduziert wurde. Jede Variation des Reaktionszeitraums wurde einzeln mit der Zeitreihe des Regenerationszeitraums kombiniert und damit der Basisabfluss simuliert. Weitere Variationen ergaben sich durch andere Wiederkehrsintervalle oder andere Vorjahre (nicht dargestellt).

Qualitative Beurteilung

Ferner ist die Sensitivität in allen Fallstudien qualitativ über das implizite Wissen der beteiligten Experten bei der Abschätzung von Auswirkungen enthalten. So ergab sich indirekt, dass auch wasserwirtschaftliche Nutzungen die Sensitivität eines Einzugsgebietes beeinflussen. Beispielsweise erhöht die Niedrigwasseraufhöhung im Gebiet der Sächsischen Saale (BY) den Abfluss in Trockenzeiten und vermindert damit die Sensitivität im Unterlauf des Wasserspeichers. Im Gegenzug erhöhen Wasserentnahmen, wie z.B. an der Dreisam die Sensitivität, indem dem System künstlich Wasser entzogen wird.

Auswirkung

Für die Einschätzung der Klima- bzw. Abflusswirkung wurden in den drei Fallstudien unterschiedliche Wege beschritten. Ebenso bewegte sich die Expertenbeteiligung auf verschiedenen Ebenen: Während Rheinland-Pfalz die gesamte Landesfläche im Blick hatte und nur die Expertise auf Landesamtebene hinzuzog, beteiligte Bayern die Ebene der lokalen Wasserwirtschaftsverwaltung für Einzugsgebiete von ~1.000 bzw. 5.000 km² Fläche. Baden-Württemberg betrachtete Gebiete von 120 bzw. 930 km² und bezog alle lokalen Stakeholder ein.

Je höher der Beteiligungsgrad, desto detaillierter sind die Informationen, aber auch der Aufwand in der Durchführung der Studien. Für Auswirkungs- und Vulnerabilitätsanalysen ist also abzuwägen, auf welcher räumlichen Ebene die Bearbeitung stattfindet und welchen Generalisierungsgrad die gewünschte Aussage haben soll.

Qualitative Auswirkungsanalyse (v.a. BW)

So beschäftigte sich Baden-Württemberg vorrangig mit der Niedrigwasserauswirkung im Status quo, insbesondere mit Blick auf historische Extremereignisse. Exposition und (implizite) Sensitivität lagen somit im gleichen Zeithorizont. Durch Workshops und Befragungen mit vielen in den Gebieten vertretenen Wassernutzern war der

Blickwinkel auf die möglichen Betroffenheiten am weitesten und erlaubte somit eine detaillierte Bewertung der Auswirkungen und Konflikte im Ist-Zustand.

Quantitative (datenbasierte) Auswirkungsanalyse (BY + RLP)

Bayern und Rheinland-Pfalz nutzten hingegen die datenbasierte Auswirkungsanalyse über die Verschneidung von Klima- bzw. Abflusssignal der jeweils vorliegenden Szenarien und gegenwärtigen Sensitivitätsschwellenwerten. Gut geeignete Auswirkungsindikatoren waren dabei z. B. die Summe der Unterschreitungstage (SumD) für Mindestwassertiefen der Fischwanderung (RLP) oder die maximale Anzahl der Überschreitungstage (maxD) von Wassertemperaturgrenzwerten (BY).

Quantitative (datenbasierte) Auswirkungsanalyse mit Expertenbefragung (BY)

Um diese erhaltenen quantitativen Indikatoren besser bewerten zu können, führte Bayern mit Vertretern der lokalen Wasserwirtschaftsverwaltung ebenfalls Workshops durch. Die Beteiligten wurden gebeten, qualitativ die Auswirkung in ihrem Gebiet auf die untersuchten Wassernutzungen zu bewerten. Sie gaben zunächst eine Einschätzung ohne jegliche Vorkenntnis der Niedrigwasserszenarien, sondern nur aus der ihnen bekannten Entwicklung in der Vergangenheit und der vermuteten zukünftigen Änderung. Anschließend folgte die Einschätzung nach Präsentation der Szenarienergebnisse zur „bestmöglichen Niedrigwasserverschärfung“ (Hadley-Projektion, nahe Zukunft) und dem „worst case“ (WETTREG2010, ferne Zukunft) (Abb. 4). Diese „szenarienbasierte Auswirkungsanalyse“ erwies sich aus bayerischer Sicht als das am besten geeignete Vorgehen, da es die Bandbreite an Auswirkungen gut zeigte.

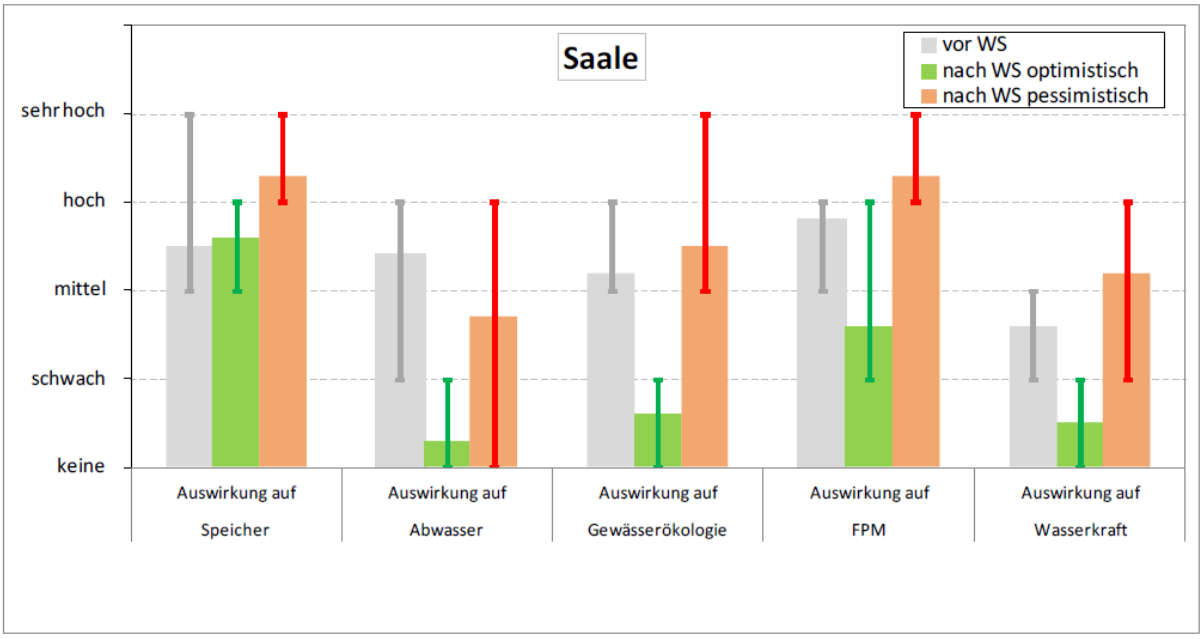

Abb. 4: Beispiel aus Fallstudie Sächsische Saale (BY): Experteneinschätzung der Auswirkung einer Niedrigwasserverschärfung auf verschiedene Nutzungsbereiche: ohne Vorkenntnisse („vor WS“), bestmögliche Verschärfung („nach WS optimistisch“) und worst case („[…] pessimistisch“)

Einschränkend ist jedoch zu erwähnen, dass die Größe und Zusammensetzung des Expertenkreises einen wesentlichen Einfluss auf das Ergebnis hat.

Quantitative (datenbasierte) Auswirkungsanalyse mit Normierung (BY)

In Bayern wurde zudem geprüft, inwieweit das vom UBA im „Netzwerk Vulnerabilität“ (UBA 2015) entwickelte Verfahren mit normierten Auswirkungsindikatoren einen Mehrwert für Handlungsempfehlungen in der Wasserwirtschaft bringt. Dies funktioniert entweder über die Multiplikation von zuvor gebietsnormierten Kennwerten von Exposition und Sensitivität oder über die Berechnung von Auswirkungsindikatoren über Wirkmodelle. Ein solcher Indikator ist beispielsweise der zuvor genannte SumD. Anschließend wurden die Auswirkungsindikatoren auf den Wertebereich der betrachteten Gebiete normiert.

Im Ergebnis erwiesen sich diese Indikatoren gut für den räumlichen Vergleich von Auswirkungen innerhalb abgeschlossener Gebiete mit einem feststehenden und überschaubaren Wertebereich von Exposition und Sensitivität. Allerdings bestand die Herausforderung darin, im Normierungsverfahren noch einen sinnvoll kommunizierbaren Indikator zu behalten. Das vom UBA empfohlene Kriterium des maximalen Wertebereiches war dafür z. T. ungeeignet. Vielmehr erforderte die Normierung wertende und nicht zwingend auf andere Gebiete übertragbare Eingriffe. Auch erfordert es stets eine Neuberechnung wenn der Wertebereich durch neue Daten in Exposition oder Sensitivität erweitert wird. Aufwand und Nutzen des Verfahrens stehen daher in keinem guten Verhältnis. Auch die Zusammenführung der Indikatoren verschiedener Nutzungen erschien als eine zu große Verallgemeinerung.

Anpassungskapazität, Anpassungsoptionen und Vulnerabilität

Die Anpassungskapazität wurde in keiner der drei Studien direkt untersucht. Allerdings ließe sie sich aus der Bewertung von qualitativ diskutierten Anpassungsoptionen mit Blick auf den Status quo ableiten.

Dazu wurden zunächst Handlungsoptionen aus der Literatur je Nutzungssektor zusammengetragen und anschließend mit den beteiligten Experten und Wassernutzern über Fragebögen und in Workshops diskutiert und ggf. erweitert.

Die Abschätzung der Anpassungsoptionen geschah in Rheinland-Pfalz über Literaturstudien und die Expertise des Landesamtes für Umwelt. Bayern nutzte ein einfaches Punktesystem nach den Kriterien Wirksamkeit, technische Realisierbarkeit und finanzielle Realisierbarkeit. Nach Wichtung über die subjektive Sicherheit ergab sich ein Mittelwert der potentiellen Eignung einer Handlungsoption. Außerdem bestand die Möglichkeit, weitere Hemmnisse in der Umsetzung beschreibend anzugeben, ob die Maßnahme im Gebiet bereits Anwendung fand und ob sie als regret oder no-regret-Maßnahme eingestuft wird.

Eine sehr ähnliche Bewertung kam auch in der baden-württembergischen Studie zum Einsatz. Zusätzlich wurden bei der qualitativen Akteursbefragung weitere Kriterien angesetzt: Beispielsweise zur genutzten Wasserquelle, dem Kenntnisstand zur Einhaltung des Wasserrechts, dem Informationsfluss in Trockenzeiten, dem tatsächlichen Ergreifen von Maßnahmen, der Koordination untereinander oder potentiellen Konflikten. Auch der Wirkungsbereich von Maßnahmen bezogen auf den Gewässerverlauf und die bewertende Akteursgruppe floss ein. Als am wirksamsten wurden die Anpassungsoptionen eingestuft, welche die häufigsten Nennungen erfuhren.

Allgemeine Erkenntnisse aus den drei Vorgehen:

- Die drei Verfahren führen oft zu ähnlichen Ergebnissen. Einzelne Maßnahmen können je nach Gebiet aber auch sehr unterschiedlich gewichtet werden. Wie bereits in der Bewertung der Auswirkungen spielen aber auch hier die Zusammensetzung der befragten Gruppe und die zuvor gegebenen Informationen eine wichtige Rolle. Eine Diskussion der verfügbaren Anpassungsoptionen ist unerlässlich sobald daraus tatsächliche Handlungsempfehlungen werden sollen.
- Das reale Handeln der Wassernutzer geht vom Status quo und den Anforderungen im Tagesgeschäft aus. Wenn es keinen Handlungsbedarf gibt oder sozioökonomische oder subjektive Gründe dagegen sprechen, wird kein Wert auf Vorsorgemaßnahmen gelegt.

Der nächste Schritt aus den hier vorgestellten Fallstudien wäre die Erarbeitung eines lokalen Niedrigwassermanagements. Aus dem Katalog an Anpassungsoptionen können als hoch prioritär eingestufte Maßnahmen eine gute Diskussionsgrundlage und damit auch als unmittelbare „Handlungsempfehlungen“ dienen.

Theoretisch ließe sich die Anpassungskapazität auf Grundlage der hiesigen Ergebnisse folgendermaßen ableiten: Hoch wirksame Maßnahmen vom Typ „no regret“ mit einer guten Realisierbarkeit, geringen Hemmnissen, bereits erfolgter Anwendung und hoher Akzeptanz durch viele Akteure könnten demnach qualitativ als ein hohes Anpassungspotential gewertet werden. Dies traf hier am ehesten auf Maßnahmen der Öffentlichkeitsarbeit zu. Je weniger Kriterien erfüllt sind, desto geringer wäre das Potential. Dieses könnte dann mit quantitativen Auswirkungsindikatoren zu einer Vulnerabilität verschnitten werden. Aufgrund des hohen subjektiven Anteils in der Bewertung von Auswirkung und Anpassungskapazität wurde davon allerdings Abstand genommen, sondern lediglich qualitative Einschätzungen abgegeben.

Ausblick

Detaillierte Informationen zu den drei Fallstudien sind in einem Synthesebericht zusammengefasst, der innerhalb von KLIWA im Laufe des Sommers 2017 veröffentlicht wird. Zum Teil sollen die einzelnen Abschlussberichte auch in den jeweiligen Bundesländern zugänglich gemacht werden.

Literatur

UBA [Hrsg.] (2015): Vulnerabilität Deutschlands gegenüber dem Klimawandel. Umweltbundesamt. Climate Change 24/2015, Dessau-Roßlau.

LfU (2016): Niedrigwasser in Bayern. Grundlagen, Veränderung und Auswirkungen. Bayerisches Landesamt für Umwelt, Augsburg

A3 **Simulation des Grundwasseranstiegs durch den Klimawandel in Hamburg-Wilhelmsburg**

Exzerpt aus dem KLIMZUG-NORD, Projektbericht, erstellt von:
Heike Huebener
Hessisches Landesamt für Naturschutz, Umwelt und Geologie (HLUG)

Im Projekt KLIMZUG-NORD wurden für den Hamburger Stadtteil Wilhelmsburg verschiedene Aspekte klimainduzierter Veränderungen untersucht. Basis der Auswertungen für die Zukunft waren 13 Simulationen mit den Modellen REMO und C-CLM, alle angetrieben mit globalen Simulationen des Modells ECHAM5-MPI-OM, für mehrere mögliche Emissionsszenarien.

Die Modellierung der Grundwassergleichen erfolgte zunächst für den Beobachtungszeitraum 1997-2007 (Abb. 1).

Zur Untersuchung eines durch den Klimawandel verursachten Elbwasserspiegelanstiegs auf das oberflächennahe Grundwasser der Großen Elbinsel wurden die mittleren Elbwasserstände stufenweise zwischen (a) 20 cm und (b) 80 cm angehoben (Abb. 2).

Der Einfluss eines möglichen zukünftigen Meeresspiegelanstiegs und langanhaltend niedriger Oberwasserzuflüsse auf die Wasserstandsverhältnisse und die Lage der Trübungs- und Brackwasserzone im Elbeästuar wird über Sensitivitätsstudien (Kwadijk et al., 2010) analysiert. Diese bieten eine effektive Möglichkeit, mit den (den Klimaprojektionen inhärenten) Unsicherheiten umzugehen und trotz Unsicherheiten Aussagen zu zukünftigen möglichen Veränderungen zu ermitteln. Das Konzept der hier durchgeführten Sensitivitätsstudien ist wie folgt: In einem hochaufgelösten 3D-hydrodynamisch-numerischen Modell (UnTrim, s. Casulli und Walters, 2000) werden die Haupteinflussfaktoren (hier: Meeresspiegel und Oberwasserzufluss) auf die Tideelbe einzeln und in Kombination variiert, um die Reaktion der Zustandsgrößen Wasserstand, Strömung, Salzgehalt, Schwebstoffgehalt auf die veränderten Randbedingungen zu ermitteln. Die Analyse der Berechnungsergebnisse auf Basis der Tidekennwerte ermöglicht eine klare Beschreibung des Systemverhaltens unter den möglichen Folgen des Klimawandels. Somit kann festgestellt werden, unter welchen Bedingungen eine mögliche Klimaänderung zu Betroffenheiten auf der Großen Elbinsel führen kann.

80 cm Anstieg des Elbwasserstandes entspricht dem errechneten Anstieg. Mögliche höhere Wasserspiegelanstiege wurden unberücksichtigt gelassen. Alle anderen Randbedingungen, wie die Grabenwasserstände im Entwässerungssystem und die Zusickerung von Niederschlägen zur gesättigten Bodenzone, wurden unverändert übernommen.

Die Modellergebnisse (Abb. 2 a, b) zeigen, dass infolge eines Elbwasseranstiegs von 20 cm respektive 80 cm die Grundwasserpotenziale in den nicht entwässerten Gebieten ebenfalls um diesen Änderungsbetrag zunehmen. In dem zentralen Bereich des Stadtteils Wilhelmsburg, welcher über das Entwässerungssystem entwässert wird, ist diese Änderung abgeschwächt. Sowohl für den Fall eines Anstiegs von 20 cm als auch bei einer Zunahme der Elbwasserstände von 80 cm wird eine Reduktion der Potenzialanstiege von bis zu 70 % simuliert.

Abb. 64: Mittlere Grundwassergleichen [m NHN] für den Zeitraum 1997 bis 2007 (Modellergebnis; eigene Darstellung Meier).

Abb. 1 (aus KLIMZUG-NORD, Projektbericht, S. 58, http://klimzug-nord.de/file.php/2014-09-11-Schluenzen-K.-H.-Linde-M.-Hrsg.-2014-Wilhelmsburg-im-).

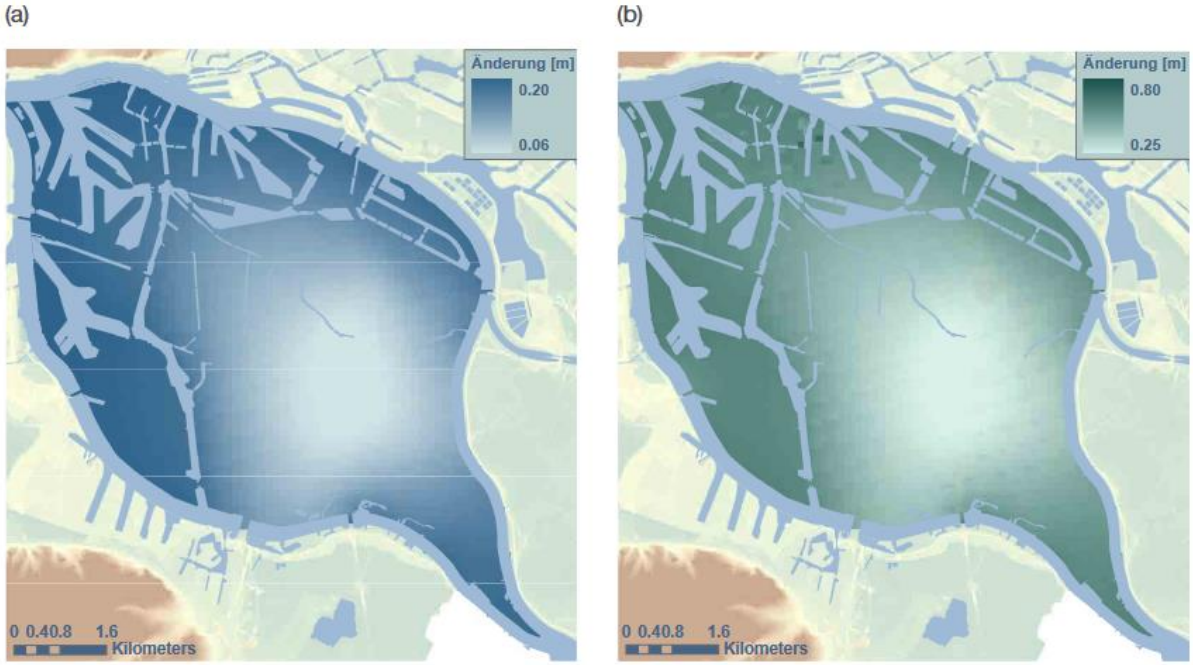

Abb. 65: Änderung der Grundwasserpotenziale der Großen Elbinsel bei einem Elbwasseranstieg von (a) 20 cm und (b) 80 cm (Modellergebnisse; eigene Darstellung Meier).

Abb. 2: (aus KLIMZUG-NORD, Projektbericht, S. 58, http://klimzug-nord.de/file.php/2014-09-11-Schluenzen-K.-H.-Linde-M.-Hrsg.-2014-Wilhelmsburg-im-).

A4 **Veränderung von Depositionen und Critical Load durch den Klimawandel**

Andreas Völlings,

Sächsisches Landesamt für Umwelt Landwirtschaft und Geologie, Referat 51 Klima, Luftqualität

Hintergrund

Das EU-Projekt KLAPS („*Klimawandel, Luftverschmutzung und ökologische Belastungsgrenzen von Ökosystemen im polnisch-sächsischen Grenzraum*“) untersuchte u. a. grenzüberschreitende Zusammenhänge zwischen dem Klimawandel und der Konzentration und Deposition von Luftschadstoffen sowie der Beeinflussung ökologischer Belastungsgrenzen (Critical Load).

Detaillierte Darstellungen der verwendeten Methoden und Ergebnisse können den Projektberichten „Das Klima im polnisch-sächsischen Grenzraum“ (Mehler et al. 2014) und „Klimaprojektionen, Luftverschmutzung und Belastungsgrenzen von Ökosystemen“ (Schwarzak et al. 2014) entnommen werden (siehe https://www.umwelt.sachsen.de/umwelt/klaps/projektberichte_klaps.htm).

Seit 1990 sind im Grenzgebiet zwischen Südsachsen, Niederschlesien und Nordböhmen die Emissionen für Schwefeldioxid SO_2 und Stickoxide NO_X deutlich zurückgegangen. Basierend auf Emissionsprognosen wird sich dieser Trend bis zum Jahr 2030 sehr wahrscheinlich fortsetzen. Dagegen verbleiben die Emissionen von Ammoniak auf ähnlich hohem Niveau von etwa 30 Gg bis zum Jahr 2030.

Diesem allgemeinem Emissionstrend folgend wird auch eine sich fortsetzende Verringerung der Deposition von Schwefel und oxidiertem Stickstoff modelliert, während die Deposition von reduziertem Stickstoff, dem größten Anteil der Stickstoffdepositionen, auf ähnlich hohem Niveau verbleibt.

Aus den Maßnahmen zur Luftreinhaltung und zur Minderung von Schadstoffen resultieren im Projektgebiet letztendlich auch die Entwicklungen der Critical Load. Es stellte sich die Frage, in welchem Umfang die projizierte Klimaentwicklung künftig die Entwicklungen von Depositionen und Critical Load beeinflussen wird.

Methodik

Klimadaten

Grundlage für die Klimawirkungsanalysen zu Depositionen und zu Critical Load war zunächst die Erstellung einer länderübergreifenden, klimatischen Datengrundlage für Beobachtungs- und Projektionsdaten im KLAPS-Untersuchungsgebiet.

Insgesamt standen Klimarohdaten von 26 deutschen und polnischen Klimastationen zur Verfügung. Aus der Datenverfügbarkeit leitet sich der Datenzeitraum 1971 bis 2010 für die Untersuchungen ab; eine Anlehnung an den WMO-Referenzzeitraum 1961-1990 war wegen Datenlücken nicht möglich. Zur Erreichung eines vollständigen und qualitätsgeprüften Datensatzes wurden die Rohdaten des Messstationen auf Plausibilität geprüft, Lücken in den Datensätzen logisch geschlossen und die Zeitreihen einer Homogenitätsprüfung unterzogen (vgl. Datenstatus in Abb. 4-2-a).

Die Auswahl der Klimaszenarien erfolgte in einem Expertengespräch. Randbedingung waren im Projekt die Verwendung eines Ensemble-Ansatzes, die Verknüpfung

von RCP- mit SRES-Szenarien sowie eine rechenseitig maximale Anzahl von 5 Szenarien.

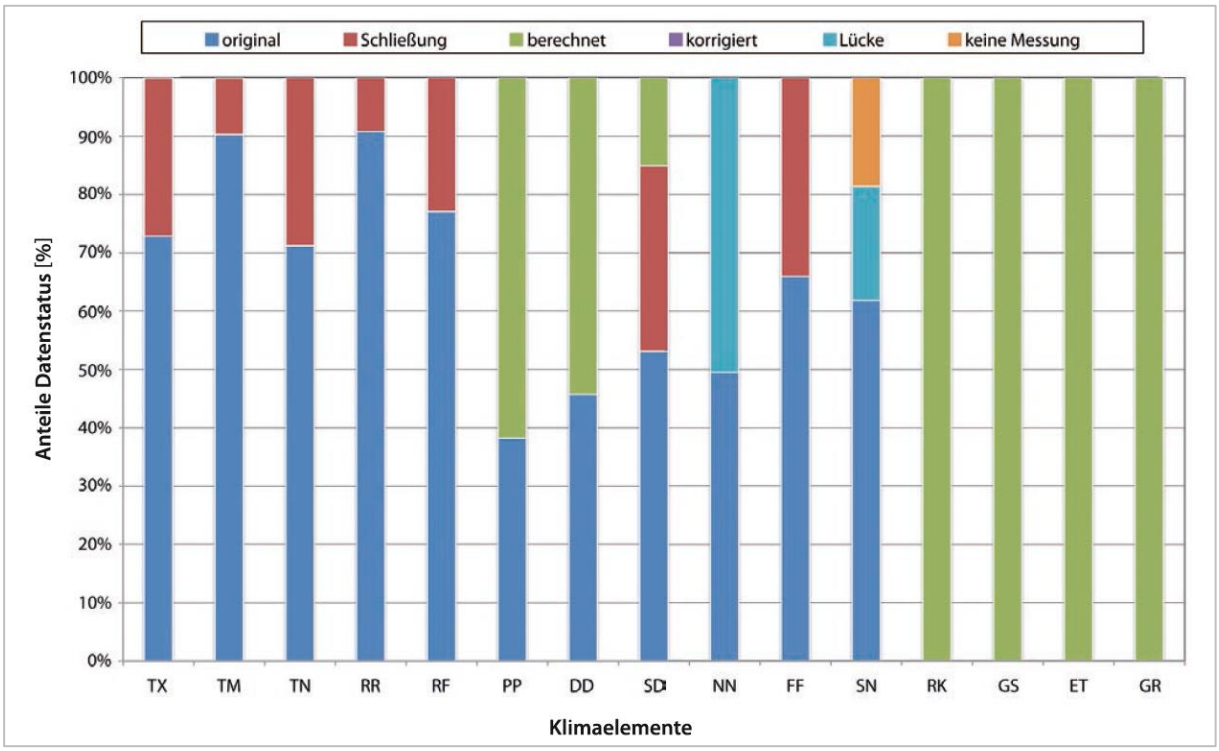

Abb. 1: Datenstatus im KLAPS-Projektgebiet.
(TX = Maximumtemperatur, TM = Mitteltemperatur, TN = Minimumtemperatur, RR = Niederschlag, RF = Relative Feuchte, PP = Luftdruck, DD = Dampfdruck, SD = Sonnenscheindauer, NN = Wolkenbedeckung, FF = Windgeschwindigkeit, SN = Schneedeckenhöhe, RK = Korrigierter Niederschlag, GS = Globalstrahlung, ET = Evapotranspiration, GR = Gras-Referenzverdunstung)

Zum Einsatz kamen das für Sachsen weiterentwickelte statistische Regionalmodell WETTREG 2013 mit den Globalantrieben der deutschen Modelle ECHAM5 MPI-OM (SRES) und MPI ESM-LR (RCP). Es wurden für die 26 Klimastationen jeweils 10 Realisierungen für die 5 gewählten Szenarien A1B_1, RCP2.6_1, RCP8.5_1, RCP8.5_2 und RCP8.5_3 für den Zeitraum 1951-2100 berechnet und validiert sowie zuletzt mit Hilfe eines Residual-Kriging-Ansatzes in die Fläche interpoliert. Der Datensatz wurde erst danach der Wirkanalyse übergeben.

Die Analyse der Beobachtungs- und Projektionsdaten zeigen die erwarteten Zunahmen der mittleren jährliche Temperaturzunahme (+1,0 °C bis +3,5 °C im Zeitraum 2071–2100 gegenüber 1971-2000 mit räumlichen Unterschiede des Änderungssignals zwischen Tiefland und Mittelgebirge. Mit der Abnahme der Dauer der Frostperiode und der starken Zunahme der Länge der Vegetationsperiode wird eine Abnahme der Niederschlagsmenge im gesamten Jahr, v.a. aber in den Sommermonaten modelliert (ohne Trend bei Starkniederschlag). Aufgrund der deutlich zunehmenden Verdunstung und der abnehmenden Niederschlagsmenge im Projektgebiet nimmt die klimatische Wasserbilanz generell ab, mit stärkeren Änderungssignalen zum Ende des 21. Jahrhunderts.

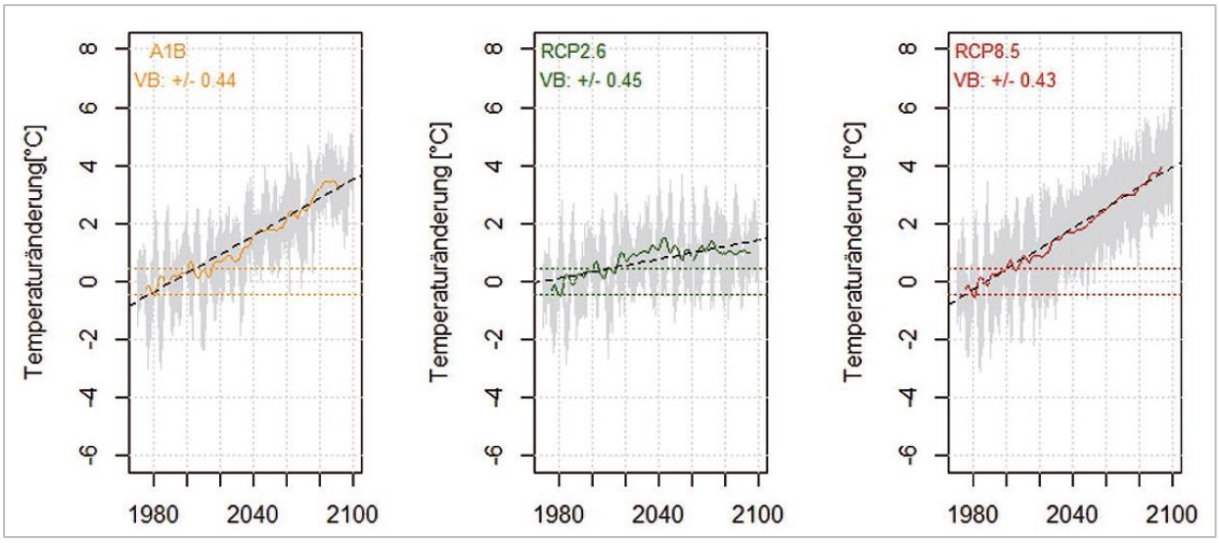

Abb. 2: Jährliche Änderung der mittl. Lufttemperatur [°C] 1971–2100 unter den Klimaszenarien A1B, RCP2.6 und RCP8.5 im Projektgebiet.
(gepunktet = Vertrauensbereich, gestrichelt = linearer Trend, Linie = 11-jährig gleitendes Mittel, grau = Schwankungsbereich aller Realisierungen)

Aus der erkennbaren Veränderung des Klimas im Projektgebiet bis 2100 folgt die Frage, ob und inwieweit sich die Änderung relevanter Klimaelemente (Temperatur, Wind, Niederschlag) auf Luftbelastung und Belastungsgrenzen ökologischer Systeme auswirken.

Modellierung der Luftbelastung und Critical Load

Für die Modellierung der Luftbelastung wurde das Ausbreitungsmodell *„Fine Resolution Atmospheric Multipollutant Exchange“,* kurz FRAME verwendet. Das Modell ist so konfiguriert, dass Informationen über vergangene, aktuelle und zukünftige Depositionen von Schwefel- und Stickstoffverbindungen berechnet werden können. Vorteile von FRAME sind die hohe räumliche (1 x 1 km) und vertikale Auflösung, die gute Übereinstimmung der Ergebnisse für Schwefel- und Stickstoffkonzentrationen und Depositionen mit Beobachtungsdaten sowie der geringe Rechen- und Zeitaufwand bei der Modellierung.

Als sogenanntes Lagrange-Modell berechnet FRAME die Schadstoffausbreitung über geradlinige Trajektorien (Bahnen) einer Vielzahl von Teilchen in einem dreidimensionalen Windfeld. Das Modell besteht aus 33 vertikalen Schichten unterschiedlicher Dicke, die sich im Bereich zwischen 1 m über der Erdoberfläche und 100 m über der höchsten Erhebung (Schneekoppe, 1603 m) im Projektgebiet erstrecken. Die chemischen Randbedingungen in FRAME entsprechen dem Lagrange-Modell EMEP (European Monitoring and Evaluation Programme, Barr et & Seland 1995). Beachtet werden in FRAME vegetationsbedingte Depositionsgeschwindigkeiten für jeden Schadstoff der trockenen Deposition sowie Auswaschungskoeffizienten und Drizzle-Effekte (Nieselregen) für die nasse Deposition. Durch die Verwendung von CORINE Land Cover 2006 liegt grenzüberschreitend eine einheitliche Landnutzung vor.

Die Schaffung einer homogenen Emissionsdatenbasis (SNAP-Klassen) war eine der Hauptschwierigkeiten im Projekt. Emissionsdaten stammten aus den Emissionskataster von Sachsens und Brandenburg sowie in Polen aus berechneten Daten (Top-Down-Ansatz) und lagen nur für Hausbrand, Verkehr und Landwirtschaft als Raster-

daten vor. Die unterschiedlichen Datenquellen führten zu einer erkennbaren Inhomogenität bei den Ergebnissen in der räumlichen Darstellung.

Neben der Betrachtung der gegenwärtigen Entwicklung der Depositionen wurden zukünftige Entwicklungstrends in 5-Jahresschritten modelliert. Grundlage hierfür waren GAINS PRIMES-Emissionsszenarien.

Das FRAME-Modell benötigt zur Modellierung relativ wenige meteorologische Eingangsparameter (Windrosen der Windgeschwindigkeit, Häufigkeit der Windrichtung, mittlere jährliche Niederschlagssumme). Für die Modellierung der zukünftigen Entwicklung der Luftverschmutzung im Projektgebiet wurde eine konstante mittlere Windrose für den Zeitraum 2001– 2100 auf Basis des regionalen Klimamodells CLM berechnet. Die räumliche Verteilung der Niederschlagssummen wurde für die Analyse jedes Jahr individuell und für die Klimaszenarien für die Zeiträume 2021– 2050 und 2071–2100 berechnet und für das Projektgebiet interpoliert (geographisch gewichtete Regression mit Residual-Kriging-Ansatz).

Die Validierung der FRAME-Ergebnisse zeigt für die nasse Deposition von Schwefel- und Stickstoffverbindungen generell eine hohe Übereinstimmung mit den verfügbaren Messdaten und interpolierten Werten und bilden damit auch eine gute Basis für die Analyse der Critical Load (CL).

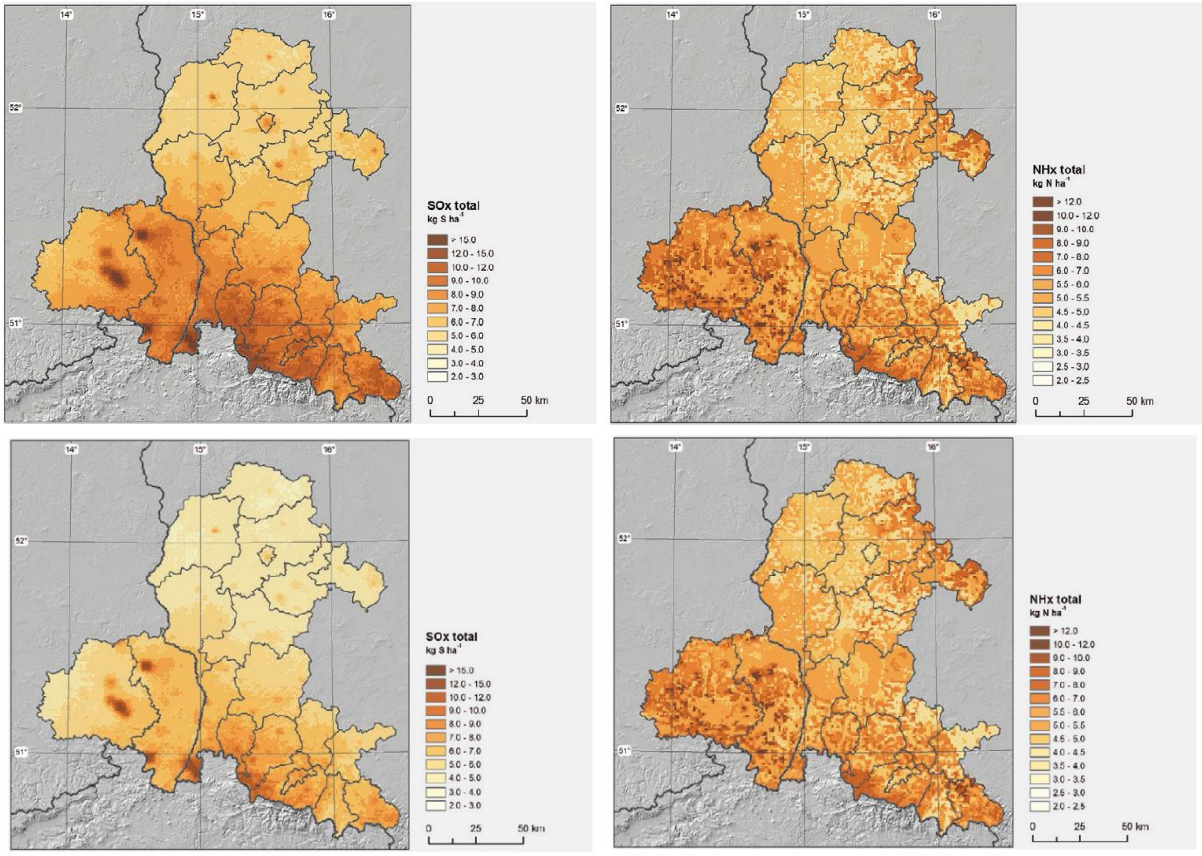

Abb. 3: Gesamtdeposition von SOX (links) und NHX (rechts) im Jahr 2010 (oben) und 2030 (unten) bei konstanten meteorologischen Verhältnissen.

Die höchsten Depositionen werden aktuell und künftig aufgrund hoher nasser Depositionen für die höheren Lagen der Mittelgebirge und in unmittelbarer Nähe der Emissionsquellen modelliert.

Basierend auf den verwendeten Klimaszenarien ergeben sich vor allem unter den Szenarien A1B und RCP8.5 Abnahmen der Schwefel- und Stickstoffdepositionen von

0,5 Gg zum Ende des 21. Jahrhunderts gegenüber dem Zeitraum 2021–2050. Dies wird im Wesentlichen durch die projizierte Abnahme der jährlichen Niederschlagssumme bedingt. Unter RCP2.6 ist der klimatische Einfluss auf die Depositionshöhe eher vernachlässigbar.

Insgesamt ist der klimatische Einfluss auf die Schwefel- und Stickstoffdepositionen aber geringer einzuschätzen als die Minderung der Emissionen im Projektgebiet.

Modellierung von Critical Load

Im Rahmen des Projekts wurden CL von versauernden und eutrophierenden Luftschadstoffen sowie deren Überschreitung für Wald- und andere naturnahe Ökosysteme bestimmt. Neu war hierbei die Einbindung aktueller sowie zukünftiger Klima- und Luftschadstoffdaten (Depositionen). Die Berechnung der CL erfolgt nach der einfachen Massenbilanzmethode, bei der Stoffeinträge mit potentiellen Senken und erlaubten Stoffausträgen verglichen werden.

Die Klassifizierung der Ökosysteme (ökologischen Rezeptoren gemäß EUNIS-Klassifikation) basiert auf dem CORINE Land Cover 2006 Datensatz, sowie aus der NATURA2000-Datenbank (Koordinaten von Schutzgebieten, z.B. FFH, SPA). Ergänzend benötigt die Berechnung der CL auch Informationen aus Bodendaten (European Soil Database Version v2.0) für Verwitterungsraten oder die Säureneutralisationskapazität.

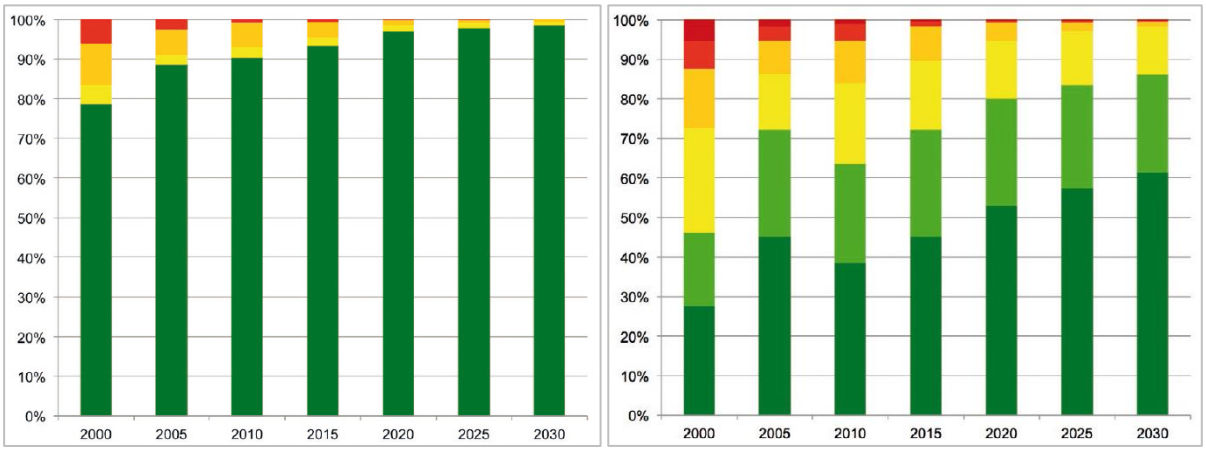

Abb. 4: Überschreitung der Critical Load für Versauerung (links) und Eutrophierung (rechts) in Abhängigkeit der Depositionsprognosen 2000–2030.
(Skala: grün = kein Risiko bis rot = Sehr hohes Risiko)

Bereits aktuell zeigen rückgängige Schwefeldepositionen bei nur rd. 10 % der Ökosysteme ein Versauerungsrisiko (v. a. Nadelwälder). Ohne Beachtung klimatischer Veränderungen zeigen zukünftigen Prognosen der Schwefeleinträge bis Jahr 2030 einen Schutz nahezu aller Ökosysteme vor Versauerung. Das Risiko einer Eutrophierung liegt trotz deutlicher Stickstoffminderungen 2010 noch bei 60 % (bes. relevant für Nadelwälder, Sümpfe, Torfmoore); sinkende Stickstoffemissionen werden aber auch hier bis 2030 das Eutrophierungsrisiko 2030 senken können.

Spannend ist die Auswirkung klimatischer Veränderungen auf die Critical Load, insbesondere hinsichtlich Eutrophierung haben. Projizierte Temperaturanstiege und rückgängige Niederschlagssummen führen zu einer Zunahme der Empfindlichkeit von Ökosystemen gegenüber Stickstoffeinträgen, vor allem zum Ende des 21. Jahrhunderts. Den deutlichsten Effekt zeigt das Szenario RCP8.5 (Lauf 1).

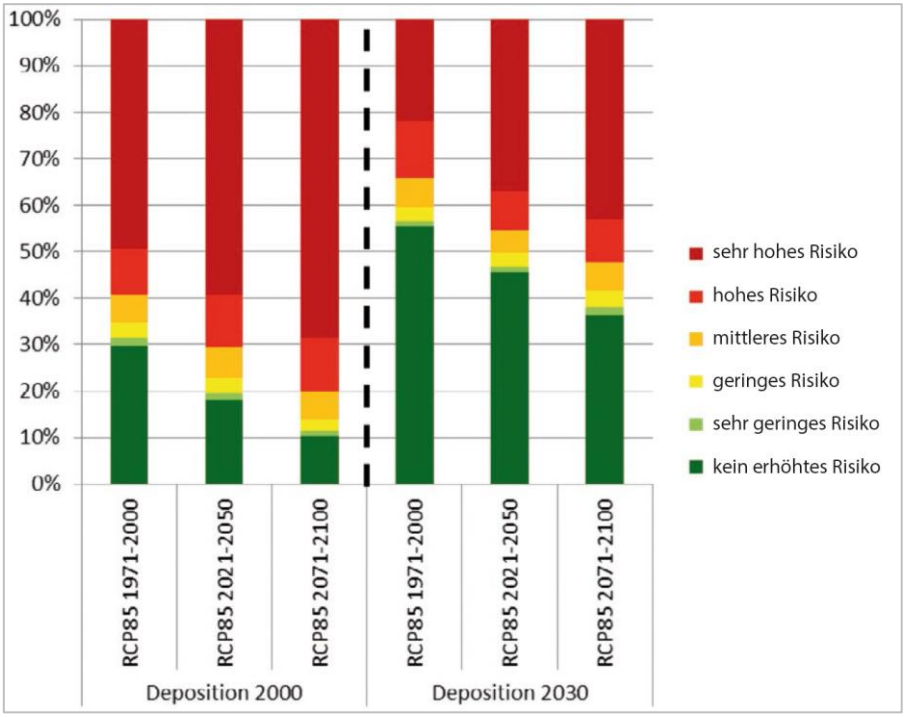

Abb. 5: Risikoklassen der Eutrophierung in Abhängigkeit von Schadstoffeinträgen 2000 bzw. 2030 im Klimaszenario RCP8.5 (Lauf 1).

Insgesamt kompensieren sich hierdurch stoffliche und klimatische Änderungen gegenseitig, so dass nur etwa die Hälfte der durch Maßnahmen zur Luftreinhaltung erreichten Minderung von Schadstoffeinträgen dem Schutz der Ökosysteme zu Gute kommt. Klimatische Änderungen sollten daher in der zukünftigen Luftreinhaltepolitik zwingend berücksichtigt werden.

Einschätzung der Ergebnisse

Erstmalig wurden im Projekt KLAPS für eine grenzüberschreitende Region die Auswirkungen der aktuellen und künftigen Klimaentwicklung auf Depositionen und Critical Load untersucht. Die Ergebnisse sind fachlich sauber hergeleitet und in Ihrer Aussage nachvollziehbar.

Das Projekt selber unterlag jedoch einer Vielzahl von Kompromissen, die zu Änderungen der methodischen Vorgehensweise führten.

- Klimadaten lagen für den WMO-Referenzzeitraum 1961-1990 nicht vor, entsprechend wurde als Bezugsperiode der Zeitraum 1971-2000 gewählt.
- Fachlich aufwändig war die Erstellung eines vollständigen, grenzüberschreitenden Klimadatensatzes für alle relevanten untersuchungsrelevanten Klimaelemente. Die Qualität für einzelne Elemente ist differenziert. Plausibilitätskontrollen und Homogenitätsprüfungen erzeugten letztendlich einen belastbaren Datensatz.
- Das Modellensemble unterlag den Vorgaben, SRES- und RCP-Szenarien vergleichend zu kombinieren sowie max. 5 Szenarien berechnen zu können. Die Auswahl der Szenarien durch eine Expertengruppe konnte dies kompensieren. Es erfolgte eine umfangreiche Validierung der Ergebnisse, die gute bis sehr gute Konfidenzen zwischen Beobachtungs- und Modelldaten ergab.

- Die Klimawirkungsanalyse zum Einfluss des Klimawandels auf Depositionen hängt v.a. von einer guten Datenbasis zu Emissionen ab. Verschiedene Datengrundlagen in Deutschland (Emissionskataster) und Polen (Top-Down-Ansatz) schafften Inhomogenitäten, die kritisch gesehen werden müssen.
- Der erzeugte Klimadatensatz fand nur z.T. Beachtung in der Modellierung mit dem FRAME-Modell. Während z.B. Niederschlagsdaten übernommen wurden, wurde das Potential von Winddaten nicht genutzt. Hingegen wurde nur eine erzeugte Windrose für das Projektgebiet und für den gesamten Zeitraum 1970 – 2010 genutzt. Dennoch wurden die Ergebnisse, auch nach Vergleich mit anderen Modelldaten (EMEP), als fachlich gut eingestuft.
- Die Kompromisse bei der Erstellung von Datengrundlagen (u.a. Nutzung von CORINE-Landnutzungsdaten) für die Modellierung von Critical Load schränkte ebenfalls die Aussagetiefe ein. Die Ergebnisse hinsichtlich des Einfluss des Klimawandels auf das Risiko einer Eutrophierung sind fachlich dennoch gut belastbar; dies zeigt auch der Vergleich mit bisherigen und parallelen Studien.

Insgesamt zeigt das Projekt KLAPS eine fachlich anerkannte Modellkette für eine Klimawirkungsanalyse im Bereich Depositionen und Critical Load. Alle Unsicherheiten bei der Erstellung von Datengrundlagen wurden fachlich nachvollziehbar beseitigt oder alternativ die Ergebnisse der Wirkanalysen über Vergleiche mit parallelen Studien in Ihrer Aussagerichtung verifiziert. Insgesamt kann deshalb davon ausgegangen werden, dass eine Verbesserung der Datenlage die Gesamtergebnisse nicht wesentlich ändern wird.