

HEFT **24.08**

Klimawandel – Was kann die Wasserwirtschaft tun?

Beiträge zum Symposium Klimawandel – Was kann die Wasserwirtschaft tun?
am 24./25. Juni 2008 in Nürnberg

Hans-B. Kleeberg (Herausgeber)

Veranstalter des Seminars:

- ≈ Fachgemeinschaft Hydrologische Wissenschaften
in der DWA
- ≈ Landesverband Bayern
der DWA

Hans-B. Kleeberg (Herausgeber):

Klimaänderung – Was kann die Wasserwirtschaft tun?

Beiträge zum Symposium Klimaänderung – Was kann die Wasserwirtschaft tun?
am 24./25 Juni m2008 in Nürnberg

Forum für Hydrologie und Wasserbewirtschaftung; Heft 24.08

ISBN: 978-3-940173-97-3

Fachgemeinschaft Hydrologische Wissenschaften, 2008

Forum für Hydrologie und Wasserbewirtschaftung

Herausgeber:

Fachgemeinschaft Hydrologische
Wissenschaften in der DWA
Geschäftsstelle
Theodor-Heuss-Allee 17
D - 53773 Hennef
Tel.: 02242/872 – 0
Fax: 02242/872 – 135
info@FgHW.de
www.FgHW.de

Vertrieb:

DWA Deutsche Vereinigung
für Wasserwirtschaft, Abwasser und
Abfall e.V., Bundesgeschäftsstelle
Theodor-Heuss-Allee 17
D – 53773 Hennef
Tel.: 02242/872 – 333
Fax: 02242/872 – 100
vertrieb@dwa.de
www.dwa.de

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Heribert Nacken
Fachgemeinschaft Hydrologische
Wissenschaften in der DWA

Druck und Binden:
Vasen BigPrint, Hennef

Univ.-Prof. Dr. Uwe Grünewald
Hauptausschuss Hydrologie und
Wasserbewirtschaftung der DWA

Umschlaggestaltung:
Dorit Steinberger, München

© FgHW – Forum für Hydrologie und Wasserbewirtschaftung, 2008

Alle Rechte, insbesondere die der Übersetzung in andere Sprachen, vorbehalten. Kein Teil dieser Publikation darf ohne schriftliche Genehmigung der Herausgeber in irgendeiner Form – durch Fotokopie, Mikrofilm oder irgendein anderes Verfahren – reproduziert oder in eine von Maschinen, insbesondere von Datenverarbeitungsmaschinen, verwendbare Sprache übertragen werden.

Die wissenschaftliche Richtigkeit der Texte, Abbildungen und Tabellen unterliegt nicht der Verantwortung der Herausgeber.

Vorwort

Klimawandel oder Klimaänderung finden statt. Das war immer so. Aber heute ändert sich das Klima wahrscheinlich schneller als in früheren Zeiten. Das macht uns Angst, denn wir sind an „unser“ Klima gewöhnt. Mensch und Natur haben sich leidlich darauf eingerichtet, auch wenn es auf der Erde drastische Unterschiede, z.B. zwischen Tiefebene und Gebirge oder Regenwald und Wüste gibt. Wir möchten keine klimatischen Veränderungen! Und weil wir wissen, dass die jetzige globale klimatische Veränderung stark von menschlichen Aktivitäten verursacht ist, glauben wir, das „Klima schützen“ zu können. Klimaschutz durch Verminderung der CO₂-Belastung der Atmosphäre ist das Mittel der Wahl. Linear gedacht. Aber lässt sich das Klima wirklich schützen oder besser, lässt sich die Biosphäre vor klimatischen Änderungen schützen? Wird ein solcher Schutz überhaupt unserer Natur und ihrem notwendigen Wandel gerecht, ist er sinnvoll? Müssen wir nicht doch akzeptieren, ein gewisses Risiko für Änderungen einzugehen? Schützen wir uns nicht besser, wenn wir uns dieses Risiko bewusst machen?

Vermeidungsstrategien waren noch nie vollkommen erfolgreich. Sie stoßen meistens schnell an Grenzen, die auch wieder menschlich und natürlich bedingt sind. Bedenken wir, dass bis zu Beginn der 1990-er Jahre bei uns der Schutz vor Hochwasser (Hochwasserschutz) mit absoluter Sicherheit (Hochwasserfreilegung) als möglich und als Ziel angesehen worden ist. Man meinte, es seien im Wesentlichen ökonomische und ökologische Gründe sein, die die Erreichbarkeit einschränkten. Das Thema Risiko wurde nicht behandelt, obwohl in unseren Nachbarstaaten dieser Gedanke als selbstverständlich galt und gilt. Inzwischen ist auch bei uns das Bewusstsein dafür erwacht und hat zu umfangreichen Programmen und Aktivitäten der Hochwasservorsorge und zu Anpassungsstrategien geführt.

Anpassen und vorsorgen statt vermeiden! Das ist der Untertitel zum Symposium „Klimawandel – Was kann die Wasserwirtschaft tun? In den vergangenen Jahren sind die Zusammenhänge, die zum jetzigen Klimawandel führen, intensiv untersucht worden, mit vielen neuen Erkenntnissen und – wie es bei der wissenschaftlichen Suche normal ist – mit vielen neuen Fragen. Es sind daraus vor allen Dingen die Folgen für die Physik unserer Erde (z.B. Wasserkreislauf, Hochwasser), für die Biosphäre (z.B. Artenausbreitung und -verluste) sowie für die menschlichen Lebensumstände (z.B. Niedrigwasser- und Hochwassergefahr) abgeleitet worden. Auch wenn dabei sehr viel Spekulation und Glauben im Spiel ist, so ist es doch an der Zeit, über Konsequenzen aus den möglichen Folgen nicht nur nachzudenken, sondern sie auch praktisch umzusetzen. Es ist wichtig zu akzeptieren, dass CO₂-Vermeidung zwar das „Übel an der Wurzel packt“, aber keineswegs als einfache und umfassende Lösung für das Problem „Folgen der Klimaänderung“ angesehen werden kann. Es besteht die Gefahr, dass man sich allzu leicht zurück lehnt und meint, damit genug zu tun. Mit dieser Strategie wird man Abschwächungen (in welchem Sinne auch immer) erreichen. Wir werden uns damit aber weder der Vorsorge noch der Anpassung an die Folgen entziehen können. Es ist wichtig, das allen, insbesondere auch den Akteuren in Politik und Verwaltung, bewusst zu machen!

Für das Symposium ist versucht worden, von ausgewählten Referenten die möglichen Überlegungen zur Problematik „Vorsorgen und Anpassen“ im gesamten Bereich der Wasserwirtschaft vortragen zu lassen und mit den Teilnehmern zu diskutieren. Der größte Teil der Referate wird hier veröffentlicht. Den Autoren sei vielmals Dank gesagt für die Mühe, den Text zu verfassen und zur Verfügung zu stellen. Die Inhalte überdecken einen weiten Bereich, von den Grundlagen und Wirkungen des Klimawandels über die Maßnahmen und Aktivitäten in allen Bereichen der Wasserwirtschaft (Modellierung, Hochwasserschutz, Küstenschutz, Wasserkraftnutzung, Binnenschifffahrt, Landschaft, Forstwirtschaft, Trinkwasserversorgung, Stromproduktion) bis hin zu ökonomischen und politischen Folgen. Es zeigt sich, dass ein umfassender Überblick nicht möglich ist und dass die Intensität, mit der das Thema behandelt wird, sehr differiert, je nachdem, wie betroffen sich die Verantwortlichen einer Sparte fühlen. Keineswegs spiegelt sich darin wider, wie schwer ein Problem ist, sondern höchstens wie schwer es empfunden wird oder wie man die Anpassung auch für sich als notwendig anerkennt. Hier ist also noch Überzeugungsarbeit zu leisten und Problembewusstsein zu fördern.

Anstatt zu mahnen und zu fordern, müssen Beispiele Schule machen. Am weitesten ist hier der Hochwasserschutz, sicherlich auch deshalb, weil deren Defizite in den hochwasserträchtigen letzten zwei Jahrzehnten beim plötzlichen Eintreten der Ereignisse offensichtlich geworden sind und das Programm KLIWA aufgelegt worden ist. Schleichend eintretende Folgen wie bei der Trinkwasserversorgung beunruhigen dagegen weniger oder werden mit dem Hinweis auf vermeintlich positive Effekte verdrängt. Dabei ist eine Anpassung in allen Bereichen unumgänglich, egal wie stark oder schwach und wie positiv oder negativ die Betroffenheit empfunden wird. Wir sollten nicht daran glauben, die schöne „heile“ Welt bliebe gleich, wenn der CO₂-Ausstoß vermindert und die Nutzung fossiler Energieträger effektiver gestaltet und eingeschränkt wird. Es ist mehr zu tun, auch wenn es positive und negative Folgen gibt. Die Wirkungen und Effekte, die sich aufgrund von Vorsorge- und Anpassungsstrategien für Mensch und Natur einstellen werden, müssen sorgfältig abgeschätzt, geprüft und abgewogen werden.

Hans-B. Kleeberg

Klimawandel – Was kann die Wasserwirtschaft tun?

Inhalt

	Seite
Grundlagen und Wirkungen des Klimawandels	
<i>Uwe Grünewald</i> Klimawandel und Wasserbewirtschaftung	5
<i>Josef H. Reichholf</i> Klimaänderung früherer Zeiten, Naturdynamik und die Zukunft der Arten	19
<i>Daniele Jacob, Holger Göttel, Sven Kottlarski, Philip Lorenz</i> Regionale Klimamodellierung in Deutschland und Europa	25
<i>Lucas Menzel</i> Modellierung hydrologischer Auswirkungen von Klimaänderungen	35
<i>Helge Bormann</i> Verfügbarkeit von Oberflächen- und Grundwasser - Modellstudien	53
Maßnahmen bei geänderten extremen Ereignissen	
<i>Bernd Katzenberger</i> Hochwasserschutz und Bemessungsabflüsse	73
<i>Bruno Schädler</i> Hochwasserschutz-Strategie im Gebirgsland Schweiz	87
<i>Günter Moser</i> Wasserkraftnutzung und Hochwasserschutz	103
<i>Michael Schirmer, Bastian Schuchardt</i> Küstenschutz im Klimawandel: Herausforderungen und Anpassungsoptionen	121
<i>Hans Moser, Peter Krahe, Thomas Maurer, Enno Nilson, Benno Rothstein und Anja Scholten</i> Wasserstraßen – Handlungsoptionen für Wirtschaft und Binnenschifffahrt	137

Aktivitäten bei geänderter Wasserverfügbarkeit und Wasserqualität

<i>Albert Göttle</i>	157
Konsequenzen für die wasserwirtschaftliche Infrastruktur	
<i>Axel Bronstert, Fred F. Hattermann</i>	165
Wasser für die Land(wirt)schaft	
<i>Frieder Haakh</i>	175
Auswirkungen des Klimawandels auf die Trinkwasserversorgung	
<i>Benno Rothstein, Ulrike Müller, Stefanie Greis, Anja Scholten, Jeannette Schulz, Enno Nilson</i>	193
Auswirkungen des Klimawandels auf die Elektrizitätsproduktion unter besonderer Berücksichtigung des Aspekts Wasser	
<i>Wolfgang Sailer</i>	215
Klimawandel – Folgen und Möglichkeiten der Forstwirtschaft	

Ökonomische und politische Folgen

<i>Karl Steininger</i>	221
Die wirtschaftlichen Folgen des Klimawandels und extremer Wetterereignisse	
<i>Wolfgang Kron, Thomas Ellenrieder</i>	225
Zunehmende Wetterschäden: Was kostet das die Versicherungswirtschaft?	
Anschriften der Autoren	249
Bisher erschienener Hefte der Schriftenreihe Hydrologie und Wasserbewirtschaftung	253

Klimawandel und Wasserbewirtschaftung

Uwe Grünewald

Zusammenfassung

Veränderte klimatologische und hydrologische Randbedingungen und veränderte politische und ökonomische aber auch soziale und juristische Rahmenbedingungen stellen immer wieder neue Anforderungen an die Bewirtschaftung der Naturressource Wasser in den verschiedenen Gewässereinzugsgebieten. Im Kontext des Globalen Wandels werden gegenwärtig vor allem der Wandel des globalen und regionalen Klimas, dessen gesellschaftliche Relevanz sowie mögliche Vermeidungs- und (seit kurzem) mögliche Anpassungsstrategien diskutiert. Unter Nutzung und Weiterentwicklung vorhandener Verfahren und Methoden der einzugsgebietsbezogenen Wasserbewirtschaftung gilt es auszuweisen, wie Veränderungen und Anpassungen in wasserwirtschaftlichen Systemen, im gesellschaftlichen Umgang mit der Ressource Wasser usw. vorzunehmen sind, um möglicherweise veränderte Dargebots- und Bedarfssituationen oder Gefahrensituationen und Schutzbedürfnisse mit vertretbaren Aufwendungen in Einklang zu bringen. Das verlangt vielfältige Anstrengungen sowohl im Bereich des disziplinären und interdisziplinären Forschens als auch im Bereich des ressortübergreifenden Handelns.

1. „Wasserbewirtschaftung“ als Teil einer vorsorgenden Umwelt- und Wasserwirtschaftspolitik in Deutschland

Nach DIN 4049 wird „Wasserwirtschaft“ definiert als „zielbewusste Ordnung aller menschlichen Einwirkungen auf das ober- und unterirdische Wasser“. In diesem Sinn umfasst sie die Aufgabenbereiche: Wasserbereitstellung, Wasserversorgung, Abwasserbehandlung, Gewässerschutz, Bau und Unterhaltung von Fließgewässern und Wasserstraßen und den Schutz der Bevölkerung vor Schädigungen durch das Wasser.

Werden aus dieser Betrachtungsweise der Wasserwirtschaft die baulichen und technisch-technologischen Aufgabenfelder und Maßnahmen herausgenommen, so ergibt sich als Teilgebiet der Wasserwirtschaft die „Wasserbewirtschaftung“.

Wesentliche Ziele der Wasserbewirtschaftung sind demnach, Wasser in ausreichender Menge und Qualität für verschiedene Nutzungen bereitzustellen, bei wachsender Nutzungsintensität der Ökosysteme eine gute Beschaffenheit der Gewässer in physikalischer, chemischer und biologischer Hinsicht zu erhalten oder wiederherzustellen, die rationelle Nutzung und der Schutz der Gewässer sowie der Schutz der Gesellschaft vor Schäden durch Wasser.

Grundlagen der Wasserwirtschaftspolitik in Deutschland gemäß BMU/UBA (2001, S. 3) sind:

- „Vorrang der Vorsorge
- Kooperation aller Beteiligten
- verursachergerechte Kostenzuordnung und volle Kostendeckung bei subsidiärer und dezentraler Aufgabenerledigung.

Vorsorgende Umweltpolitik verlangt nicht nur die Abwehr drohender Gefahren und die Beseitigung eingetretener Schäden, sondern in erster Linie Schutz und schonende Inanspruchnahme der natürlichen Ressourcen“.

Insbesondere mit der Umsetzung der Europäischen Wasserrahmenrichtlinie steht eine integrierte Planung und Bewirtschaftung der Wasserressourcen in Einheit z. B. von Wassermenge und –beschaffenheit sowie von Wasserdargebot und der Nutzung der Naturpotenziale des Wassers im Mittelpunkt (GRÜNEWALD 2003).

Zwar fordert das bestehende Wasserhaushaltsgesetz der Bundesrepublik Deutschland bereits die Aufstellung von wasserwirtschaftlichen Rahmenplänen (§ 36) und von Bewirtschaftungsplänen (§ 36 b). Es muss jedoch betont werden, dass diese wasserwirtschaftlichen Planungen nicht isoliert durchgeführt werden sollen und können. Letztlich sind sie wesentliche Elemente der Planungs- und Strukturpolitik der jeweiligen Bundesländer. Sie müssen daher sowohl als Bestandteil der Landesplanung und Raumordnung als auch im Zusammenhang mit den vielfältigen anderen Fachplanungen gesehen werden (GRÜNEWALD 2001).

Neben positiven Einschätzungen: „die bereits vorhandenen Instrumente der Flussgebietsplanung in Deutschland haben sich hinsichtlich der jeweils verfolgten Zielsetzung als effektiv erweisen“ (GERLINGER & LUDWIG 1998, 1999) stehen kritischere Stimmen wie „unsere bisherige Bewirtschaftungsplanung war ein recht träges und sehr aufwendiges Instrument“ (IRMER 1999) sowie noch kritischere Einschätzungen hinsichtlich der gegenwärtigen Situation in Deutschland (BMU/UBA 2001, 54) „das bedeutet jedoch nicht, dass bereits auf allen Ebenen eine integrierte Bewirtschaftung realisiert ist, da die Integration von Qualitäts- und Quantitätsfragen auf der Ebene eines Flussgebiets vielfach die Einrichtung neuer Verwaltungsstrukturen und Arbeitsabläufe bedeutet“.

2. Einzugsgebietsbezogene Wasserbewirtschaftung muss sich ständig wechselnden Rahmen- und Randbedingungen stellen

Bei der effektiven Bewirtschaftung von hochbeanspruchten Wasserressourcen-Systemen geht es seit längerem darum, Methoden und Verfahren bereitzustellen, die ausweisen, wie Veränderungen und Anpassungen in wasserwirtschaftlichen Systemen vorzunehmen sind, um mit den in diesen Systemen vorhandenen natürlichen Wasserressourcen den (volkswirtschaftlich gerechtfertigten) Wasserbedarf der Nutzer zu befriedigen und den erforderlichen Schutz vor schädigenden Auswirkungen des Wassers unter minimaler Inanspruchnahme von (gesellschaftlichen) Mitteln zu gewährleisten (z. B. GRÜNEWALD et al. 1977, GRÜNEWALD et al. 2001).

„Wasserbewirtschaftung“ ist durch das Ineinandergreifen von kurz-, mittel- und langfristigen Steuerungs-, Bewirtschaftungs- und Planungsinstrumentarien in der Verknüpfung von Wassermengen- und –beschaffenheitsproblemen unter Berücksichtigung des Zufallscharakters der hydrologischen, meteorologischen, klimatologischen usw. Prozessabläufe charakterisiert. Abbildung 1 vermittelt einen Eindruck von der Vielfalt der bei der integrierten Wasser-(Ressourcen-)Bewirtschaftung in einem Einzugsgebiet zu bewältigenden Problemstellungen.

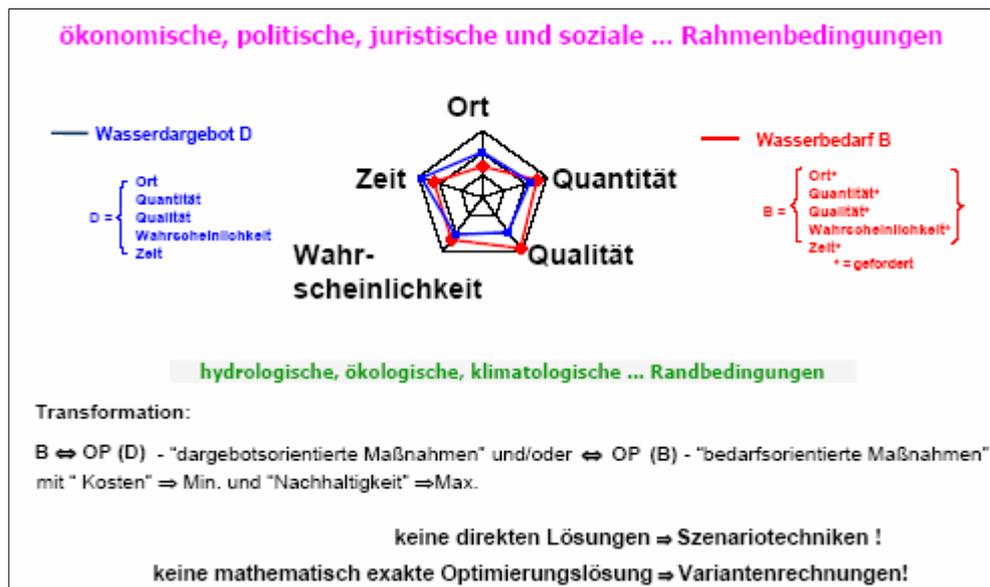


Abb. 1: Hauptprobleme der integrierten Wasser-(Ressourcen-)Bewirtschaftung in einem Einzugsgebiet unter sich verändernden Rahmen- und Randbedingungen

Letztlich gilt es, Wasserdargebot und –bedarf durch „dargebots-“ und/oder „bedarfsorientierte“ Einflussnahmen in ihren Elementen Quantität, Qualität, Ort, Zeit und Wahrscheinlichkeit unter „minimalen Kosten“ bzw. „maximaler Nachhaltigkeit“ in „vertretbare Übereinstimmung“ zu bringen. Die darin vielfältig eingebetteten komplexen Entscheidungsprozesse weisen differenzierte Merkmale (KALTOFEN et al. 2004) auf:

- heterogene Zielvorstellungen aus „Gesellschaft, Wirtschaft und Natur“ sind gleichzeitig zu berücksichtigen
- eine Vielzahl von Alternativen ist die Folge und
- die am Entscheidungsprozess Beteiligten („Entscheidungsträger“, „Betroffene“) bewerten die Bedeutung der einzelnen Zielstellungen durchaus unterschiedlich.

Daraus wiederum ergibt sich, dass die formulierte Optimierungsaufgabe („minimale Kosten“, „maximale Nachhaltigkeit“) wegen der Komplexität der schwierig zu formulierenden Zielfunktion(en) fast immer nicht direkt lösbar ist, sondern die Lösungen iterativ über Varianten- oder Szenarioanalysen zu suchen sind.

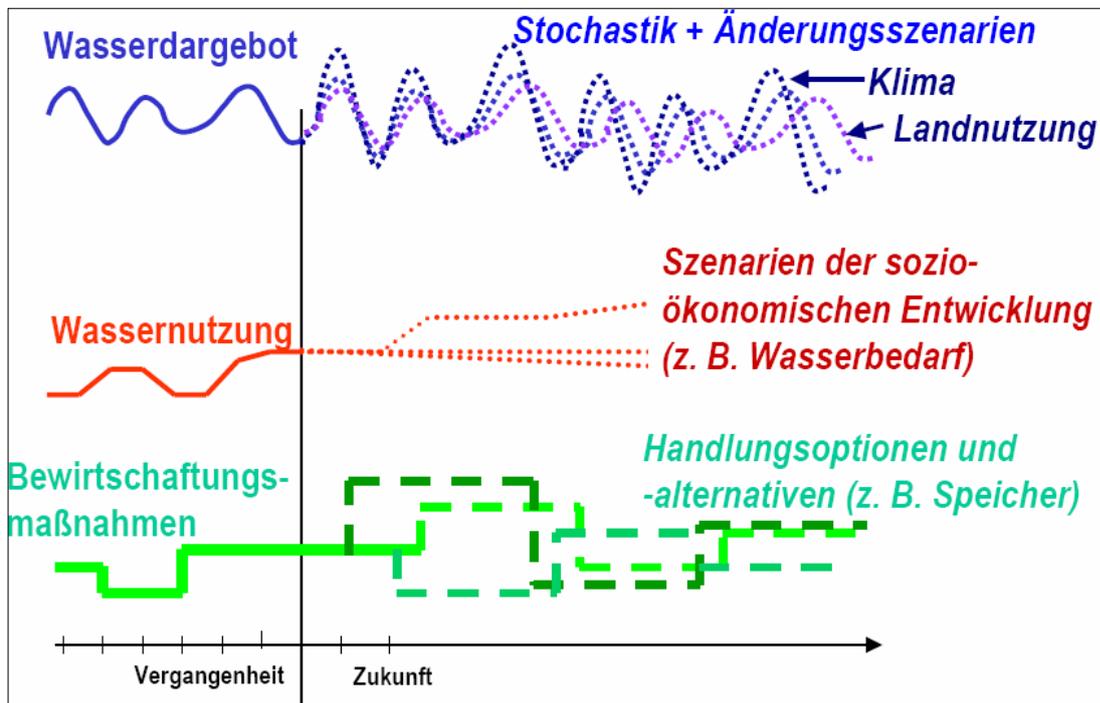


Abb. 2: Gegenwärtige und zukünftige Maßnahmen und Handlungsoptionen der Wasserbewirtschaftung (KADEN et al. 2005)

Abbildung 2 macht deutlich, dass Maßnahmen der Wasserbewirtschaftung vor allem wegen des langfristigen Charakters wasserwirtschaftlicher Planungen und der normalerweise langen Lebensdauer wasserwirtschaftlicher Infrastrukturen auch langfristiger Natur sind. Diesbezügliche Planungen unterliegen demzufolge erheblichen Unsicherheiten. Das gilt einerseits für das natürliche Wasserangebot, welches natürlichen (zufälligen) Schwankungen, aber auch natürlichen und anthropogen bedingten Trends unterliegt. Andererseits betrifft das die gesellschaftlichen Anforderungen an die Wasserverfügbarkeit (z. B. Wasserbedarf der Nutzer nach Menge und Güte) und die Handlungsoptionen und -alternativen (KADEN et al. 2005). Wasserbewirtschaftung ist somit eine Aufgabe mit stochastischem Input (natürliches Wasserangebot) und zumeist determinierten, aber teilweise sich ändernden Zielen und Anforderungen (z. B. differenzierte Nutzungsziele) sowie Randbedingungen (z. B. Klimawandel).

Inzwischen orientiert die deutsche Umweltpolitik im Ergebnis der „Wasserrahmenrichtlinien-Bestandsaufnahme“ (BMU/UBA 2005, S. 61/62) hinsichtlich der „Flusspolitik von morgen“ auf folgende Grundsätze:

„Der Erhalt und die Wiederherstellung der natürlichen Funktionen unserer Gewässer und der Schutz der naturraumtypischen Lebensgemeinschaften gehören dazu ebenso wie die langfristige Gewährleistung der berechtigten Nutzungen. Die unterschiedlichen Schutzziele und Nutzungsinteressen dürfen nicht im Widerspruch zueinander stehen, sondern müssen unverzichtbare Elemente eines gewässerpolitischen Gesamtkonzeptes sein ...“

Eine Schlüsselrolle für die Erreichung der ökologischen Ziele spielt der Ausgleich der unterschiedlichen Nutzungsinteressen, der mit den herkömmlichen Instrumenten und Herangehensweisen allein nicht zu erzielen ist. Gewässerschutzpolitik kann nicht allein durch den Gewässerschutz umgesetzt werden, sie erfordert eine Beteiligung verschiedenster Politikfelder. Eine Kooperation und Koordination der verschiedenen Handlungsebenen, Ressorts und Akteure ist notwendig.“

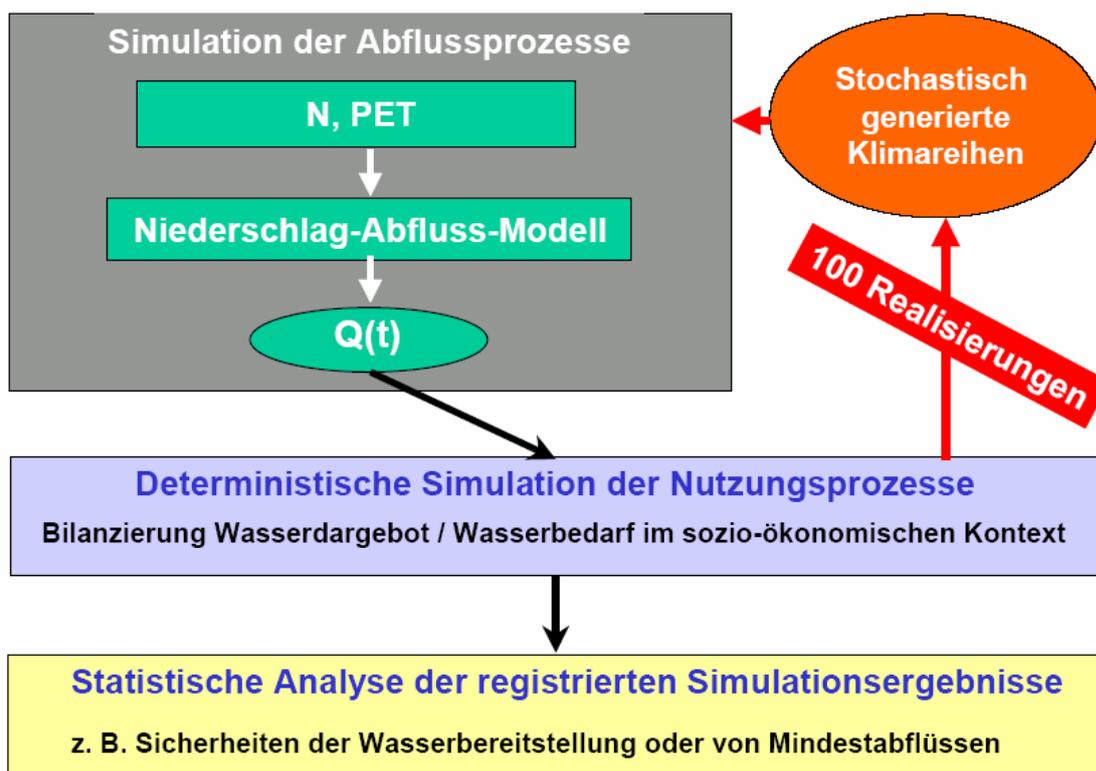


Abb. 3: Methodik stochastischer Bewirtschaftungsmodelle (KADEN et al. 2005)

Im Sinne der Systemanalyse ist die Wasserbewirtschaftung eine multikriterielle, stochastische Optimierungsaufgabe für mehrere Entscheidungsträger. Für deren Lösung haben sich Szenarioanalysen in Kombination mit der Monte-Carlo-Methode (z. B. MORGENSCHWEIS et al. 2008a) zur Berücksichtigung der Unsicherheit der Prognose des zukünftigen Wasserdargebotes und damit der Wasserverfügbarkeit (z. B. KALTOFEN et al. 2004) durchgesetzt.

Das methodische Vorgehen lässt sich gemäß Abb. 3 in vier Etappen gliedern:

- stochastische Simulation der Systeminputs (z. B. Niederschlag, Abflüsse, Verdunstung)
- deterministische Nachbildung der Wassernutzungen im Flussgebiet unter Beachtung unterschiedlichster Bewirtschaftungsregeln,
- Registrierung interessierender Systemzustände (Speicherfüllungen, Abflüsse an bestimmten Gewässerprofilen im Vergleich zu Mindestabflüssen, Defizite bei der Wasserbereitstellung u. a.)
- statistische Analyse der registrierten Systemzustände als Grundlage einer Bewertung der jeweils untersuchten Bewirtschaftungsvariante.

Eine nachhaltige Planung und Bewirtschaftung der Wasserressourcen mit ihren vielfältigen räumlich und zeitlich differenzierten Dargebots- und Bedarfsbedingungen stellt an sich schon eine große Herausforderung dar. Sie verschärft sich deutlich, wenn dabei großräumige und tiefgreifende (globale) Änderungen der Bedingungen – etwa durch einen Wandel der Land- und Wassernutzung oder/und des Klimas, insbesondere der „gefahrenbringende“ Klimawandel (CRAMER 2007) – zu berücksichtigen sind.

3. Anpassung der Wasserbewirtschaftung an Klimawandel – als Teil des globalen Wandels – nötig und möglich

Als globaler Wandel werden zusammenfassend jene Veränderungen in Natur und Gesellschaft bezeichnet, die global wirksam die Lebensgrundlagen der Menschen irreversibel beeinflussen (WBGU 1993, S. 10). Zu den Naturveränderungen gehören der globale Klimawandel, die großräumigen Änderungen der Landnutzungen und der dramatische Verlust an Biodiversität. Zu den Gesellschaftsveränderungen zählen der technologische Wandel, die ökonomische Globalisierung sowie der demographische Wandel.

Obwohl beide „Veränderungsseiten“ in ihren verschiedenen Facetten offensichtlich nicht unabhängig voneinander wirken, dominieren in der öffentlichen Diskussion heute vor allem der Klimawandel, seine Relevanz und seine Konsequenzen sowie mögliche Vermeidungs-, Minderungs- und Anpassungsstrategien.

Zweifellos ist der Klimawandel global und regional eine Tatsache (siehe z. B. HATTERMANN 2008), die sich z. B. auch durch die Änderung von Temperaturen, Niederschlägen sowie von Feuchte- und Strahlungsbilanzen auf den Wasserhaushalt der verschiedenen Regionen auswirkt und an die es sich langfristig anzupassen gilt. Leider existieren aber sowohl bezüglich der globalen Klimaprojektionen (z. B. MPI-M 2006) – und nicht „Prognosen“ - als auch bei deren regionaler Übertragung (z. B. VINER 2002) erhebliche Unsicherheiten. Insofern gilt es, diese Unsicherheiten in die Entwicklung wasserwirtschaftlicher Anpassungsstrategien an den Klimawandel z. B. unter dem Leitmotiv „Mitigation is energy and transport – adaptation is water and landuse“ (HOLZWARTH & STRATENWERTH 2008) adäquat einzubinden.

Demzufolge ist es grundsätzlich erforderlich, die Anpassungsmaßnahmen in die zu entwickelnden integrierten Wasserbewirtschaftungskonzepte gemäß Abbildung 1 einzubinden. Im Rahmen des BMBF-Förderschwerpunktes „Globaler Wandel des Wasserkreislaufes“ wurde z. B. im Projekt „GLOWA-Elbe“ untersucht, wie sich Strategien für eine vorausschauende Bewirtschaftung von Wasser im regionalen Maßstab unter Berücksichtigung globaler Um-

weltveränderungen und sozioökonomischer Randbedingungen entwickeln lassen (WECHSUNG et al. 2005). Für die Wahl des Elbeeinzugsgebietes sprach dabei neben den jüngsten erheblichen politischen und sozioökonomischen Transformationsprozessen insbesondere auf nationaler und europäischer Ebene vor allem die zweitgeringste Wasserverfügbarkeit (nach der Themse) pro Einwohner sowie die vielfältigen (historischen) wasserbezogenen Nachhaltigkeitsdefizite im Elbegebiet. Letztere sind vor allem die hohe Belastung der Elbe durch Schad- und Nährstoffe, die damit verknüpfte Gewässereutrophierung, die großflächig erfolgten Entwässerungen in den Niederungsregionen des Elbegebietes sowie die tiefgreifenden und weitreichenden Senkungen des Grundwasserspiegels in den Braunkohle-Tagebaugebieten. Zweifellos stellte dabei das interdisziplinäre und interinstitutionelle Arbeiten an konkreten Objekten und in Teileinzugsgebieten eine große Herausforderung dar. Detailliert wurde z. B. die Wirkung veränderter (unterschiedlicher) Klimaszenarien eingebettet in die gemäß Abbildung 3 skizzierte Methodik stochastischer Bewirtschaftungsmodelle. Abbildung 4 soll einen Eindruck dieser „Einbettung“ am Beispiel der bergbaubeeinflussten Elbeteileinzugsgebiete Spree und Schwarze Elster in die Methodik der detaillierten wasserwirtschaftlichen Bilanzierung (GRÜNEWALD 2001) vermitteln.

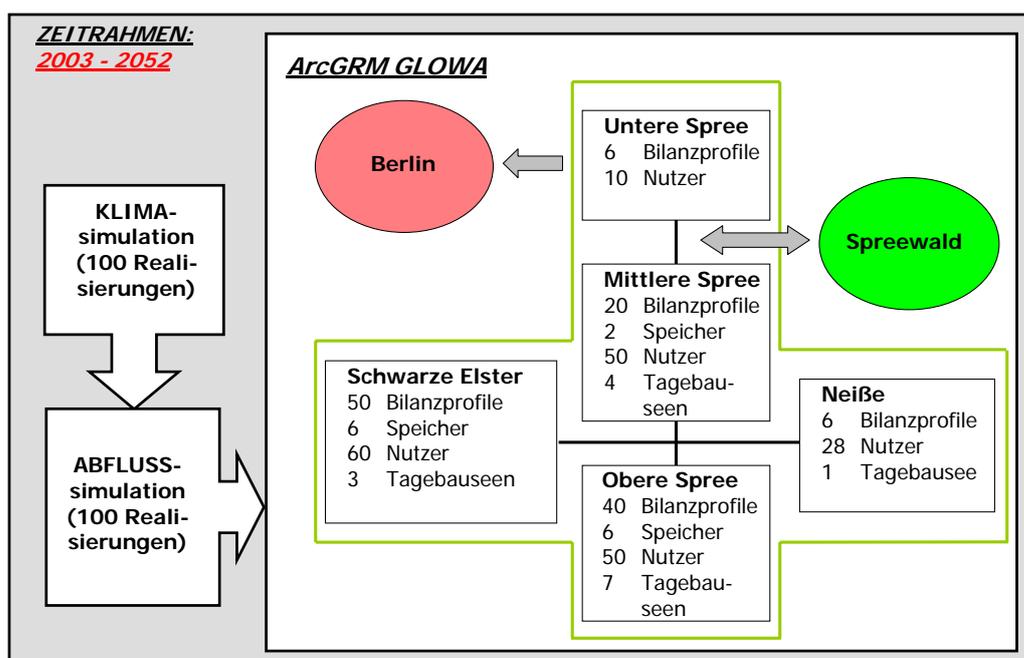


Abb. 4: Einbeziehung veränderter Klimaszenarien in die detaillierte wasserwirtschaftliche Bilanzierung – („ArcGRM GLOWA Spree - Schwarze Elster“, inzwischen Namensänderung in „WBaMo GLOWA Spree-Schwarze Elster“)

Im Ergebnis dieser „Einfluss-Analyse“ war aufzeigbar, wie sich die Sicherheiten z. B. der Wasserverfügbarkeit für die unterschiedlichen Nutzer in den Einzugsgebieten von Spree und Schwarzer Elster unter den verschiedenen Szenarien der Klimaentwicklung verändern und durch welche alternativen Handlungsstrategien sich diese gegebenenfalls mindern lassen. Die Analysen lieferten wirtschaftlich, ökologisch und wasserwirtschaftlich gleichermaßen bedeutsame Ergebnisse. Ist doch beispielsweise die Flutung der vom jahrzehntelangen Braun-

kohlenabbau in Großtagebauen entstandenen Restlöcher Teil eines umfassenden Landschaftsplanes. Er hat u. a. die Schaffung einer vernetzten Seenlandschaft von 12.000 ha Wasserfläche in einer von wirtschaftlicher Niedergang und Raubbau an der Natur gekennzeichneten Region zum Ziel. Sie kann in diesem Kontext zu einer Erhöhung der Wirtschaftskraft, zur Erhöhung des regionalen Artenreichtums und zu einer Steigerung des landschaftlichen Erlebniswertes der Region beitragen (WECHSUNG et al. 2005). Der Wasserbedarf für die Flutung übersteigt jedoch in Folge des Rückgangs der mit der Braunkohlegewinnung verknüpften Grubenwassereinleitung die wasserwirtschaftliche Leistungsfähigkeit der Spree und der Schwarzen Elster erheblich. Hinzu kommen ein hoher Wasserbedarf des Biosphärenreservats Spreewald, ein Feuchtgebiet, das jährlich Millionen Touristen vor allem zu Kahnpartien und Bootsfahrten anzieht. Demzufolge wurde in den Sommermonaten der letzten Jahre der notwendige Mindestabfluss unterhalb des Spreewaldes und für die Spree im Bereich der Hauptstadt Berlin wiederholt unterschritten. Dies führt dort zu schleichenden wasserwirtschaftlichen und ökologischen Schäden, die sich infolge des sich abzeichnenden Klimawandels in diesen wasserwirtschaftlich besonders sensiblen Flusseinzugsgebietsteilen besonders stark ausprägen werden (GRÜNEWALD 2005, DIETRICH 2005). Entsprechende Szenarioanalysen und Anpassungsstrategien wurden mit den regionalen Entscheidungsträgern diskutiert und in (BTU et al. 2002) dargestellt. Neben der Priorisierung von Nutzern und Nutzungen im Einzugsgebiet waren das vor allem verstärkte sowie neue Wasserüberleitungen aus Nachbar-einzugsgebieten z. B. Oder und Neiße sowie der Elbe selbst. Methodisch ähnlich gingen (MORGENSCHWEIS et al. 2008 a) für den „Ballungsraum Ruhr“ vor. Im Gegensatz zum regionalen Klimamodell STAR des PIK Potsdam (GERSTENGARBE & WERNER 2005) im vorangehenden Betrachtungsansatz wurden für das Ruhreinzugsgebiet die regionalen Klimamodelle WETTREG (UBA 2007) und REMO (MPI 2007) genutzt und vier unterschiedliche regionale Klimaszenarien für das Einzugsgebiet der Ruhr entwickelt.

„Als Ergebnis bleibt festzuhalten, dass die Ausfallwahrscheinlichkeit des Ruhrtalsperrensystems hinsichtlich der Sicherstellung der überregionalen Wasserversorgung infolge der Klimaänderung in Zukunft deutlich höher sein könnte als bisher und sich in drei der vier berechneten Klimaszenarien mehr als verdoppeln. Die Erhöhung der Ausfallwahrscheinlichkeit beruht zum größten Teil auf der Annahme, dass in Zukunft eine Erwärmung des Klimas stattfinden wird, die eine höhere Verdunstung bewirkt...

Diese Prognose gilt als relativ sicher. Die Vorhersagen der Niederschlagsänderung und damit auch die Vorhersage ihres Einflusses auf das Ruhrtalsperrensystem bleibt dagegen unsicher und kann beim heutigen Stand der Wissenschaft nicht eindeutig beantwortet werden. Eine deutliche Verschiebung des Niederschlags vom Sommer in den Winter, wie sie insbesondere mit dem regionalen Modell WETTREG vorhergesagt wird, würde sich aufgrund der großen vorhandenen Talsperrenkapazitäten positiv auf das System auswirken. Die Folgen der Temperaturerhöhung würden deutlich abgeschwächt werden. Die in REMO berechnete Niederschlagsänderung verhält sich dagegen im Hinblick auf die Grenzleistungsfähigkeit in etwa neutral.

Als wahrscheinlichstes Szenario kann in der zeitlichen Entwicklung bis zum Jahre 2100 von einer deutlichen Reduzierung der heutigen Betriebssicherheit des Talsperrensystems ausgegangen werden. Das bisherige Wiederkehrintervall von 500 Jahren könnte dabei auf einen

Wert von ca. 200 Jahren absinken. Eine Beibehaltung der heutigen Betriebssicherheit kann entweder durch Veränderung des Talsperrenmanagements, wie z. B. die Verringerung der gesetzlich festgelegten Mindestabflüsse an einzelnen Pegeln oder durch zusätzliche Speichervolumina etwa in der Größe der Möhne- oder Biggetalsperre abgefangen werden“ (MORGENSCHWEIS et al. 2008b, S. 10-11).

Unberücksichtigt bei dieser Art der „Einflussanalyse des Klimawandels auf die Wasserverfügbarkeit“ bleibt u. a. der Einfluss des demographischen Wandels auf den Wasserbedarf gemäß Abbildung 1. Beim beobachteten industriell und erwarteten demographisch bedingten Rückgang des Wasserbedarfs in der Betrachtungsregion (PETERWITZ & BÖDDEKER 2008) sollte dieser aber in die Diskussion der Folgen des globalen Wandels in die Klimaeinfluss-Analysen einbezogen werden.

Beim Versuch, mögliche Auswirkungen des gefahrenbringenden Klimawandels „auf den Wasserhaushalt der süddeutschen Flussgebiete herauszuarbeiten, Konsequenzen aufzuzeigen und Handlungsempfehlungen abzuleiten ...“ haben sich die Länder Baden-Württemberg und Bayern mit dem Deutschen Wetterdienst innerhalb des Projektes KLIWA (KLIWA 2006) zusammengeschlossen. „Auch wenn die Modellkette Globales Modell – Regionale Modelle – Wasserhaushaltsmodelle noch mit einigen Unsicherheiten behaftet ist, weisen die Ergebnisse darauf hin, dass in Zukunft vermehrt mit Hochwasserereignissen zu rechnen ist ... Daher wurde in beiden Ländern – auch aus Vorsorgeaspekten – festgelegt, bei der Bemessung neuer wasserwirtschaftlicher Hochwasseranlagen die Auswirkungen des Klimawandels durch einen Klimaänderungsfaktor zu berücksichtigen“ (ebenda, S. 16).

Zweifellos enthalten die in KLIWA und in den anderen Regionalstudien zum Einfluss des Klimawandels auf die Wasserressourcen – allein schon wegen der Unschärfen der regionalen Klimaszenarien – erhebliche Unsicherheiten. Daher sollte bei daraus abgeleiteten Anpassungsstrategien auf „flexible and no regret“ Maßnahmen orientiert werden. D. h. es gilt, „die Folgen der erwarteten Klimaänderungen mit Maßnahmen abzufangen, die langfristig zweckmäßig und relativ kostengünstig anpassbar sind“ (ebenda) und es sollte versucht werden, alle wasserabhängigen Sektoren so in diese wasserwirtschaftlichen Anpassungsstrategien einzubinden, dass möglichst vielfältige „win-win“ Situationen im Sinne des integrierten Ansatzes der Wasserbewirtschaftung gemäß des Prinzips in Abbildung 1 entstehen (siehe auch: HOLZWARTH & STRATENWERTH 2008).

4. Schlussfolgerungen und Empfehlungen – Was kann die Wasserwirtschaft tun?

Der Klimawandel beeinflusst das mittlere („potenzielle“ und „stabile“) Wasserdargebot wahrscheinlich ebenso wie die veränderte Ausprägung hydrologischer Extreme („Hoch- und Niedrigwasser“) und der Wasserbeschaffenheit in Raum und Zeit. Trotz der nach wie vor großen „Unsicherheiten in den Klimaprojektionen für das 21. Jahrhundert“ wie „die zukünftigen Emissionen; natürliche Klimaschwankungen, die anthropogene Trends überlagern; ein grobes Rechengitter von etwa 200 km; Berechnung der vom Rechengitter nicht auflösbaren Prozesse; fehlende Prozesse wie z. B. biogeochemische Kreisläufe“ (MPI-M 2006, S. 27) sowie bei der Übertragung globaler Klimaszenarien auf regionale Analysen und bei deren Verknüpfung in den Modellketten zur Abschätzung der wasserwirtschaftlichen Folgewirkungen bzw. Anpassungsstrategien (VINER 2002) werden wasserwirtschaftliche Anpassungsstrategien ins-

besondere in Gebieten, die bereits heute durch Wasserverfügbarkeitskonflikte (nach Menge, Zeit, Beschaffenheit usw.) betroffen sind, für notwendig und vernünftig erachtet. Sie sind allgemein so flexibel anzulegen, dass gegebenenfalls weiter notwendige Anpassungsmaßnahmen auf diesen aufbauen können („flexible and no regret strategies“). Sie müssen aber auch die anderen Probleme des globalen Wandels (Welt- und EU-Agrar- und Wirtschaftspolitik, internationale und nationale Energiepolitik, demographischer Wandel, Bevölkerungsentwicklung...) berücksichtigen.

Um die vielfältigen Unsicherheiten schrittweise zu mindern, bedarf es aber auch im Speziellen vielfältiger Anstrengungen sowohl im Bereich der Forschung und deren Praxisumsetzung als auch im institutionellen und politischen Bereich. So werden beispielsweise große Hoffnungen auf dem Weg zu verbesserten, höher auflösenden Klimaregionalmodellen im Zusammenhang mit der seit dem Jahr 2004 gemeinsam vom Deutschen Wetterdienst (DWD) und dem Max-Planck-Institut für Meteorologie (MPI-M) entwickelten „nichthydrostatischen Globalmodell mit lokaler Zoomfunktion“ („ICON: ICOsahedral Non-hydrostatic“) gesetzt.

Es könnte zukünftig einerseits das gegenwärtige Numerische Wettervorhersagemodell des DWD ablösen und andererseits beim MPI-M die atmosphärische Komponente eine zu entwickelnden (besser physikalisch begründeten) Erdsystemmodells liefern.

Solche Entwicklungen im Bereich der meteorologischen und klimatologischen Grund- und Anwendungsforschung zur Verbesserung der Klimaszenariensimulation, zur Abschätzung der Unsicherheiten durch Ensemble-Vorhersagen, zur Klimawirkung auf hydrologische Extrema usw. sollten durch die hydrologisch-wasserwirtschaftliche Fachwelt unterstützt werden. Analog dazu existiert aber auch ein großer Bedarf an Grund- und Anwendungsforschung zu regionalen Auswirkungen des Klimawandels auf die verschiedenen wasserrelevanten wirtschaftlichen Sektoren und politischen Ressorts. Auch hier gibt es zwar über Forschungsförderprogramme (z. B. „Klimazwei – Forschung für den Klimaschutz und Schutz vor Klimawirkungen“ und „KLIMZUG – Klimawandel in Regionen zukunftsfähig gestalten“ (BMBF 2007)) wichtige Startimpulse. Ungenügend werden in den meisten dieser Initiativen aber die effiziente und integrierte Wasserbewirtschaftung und ressort- und sektorübergreifende Planung der Wasserressourcen im Sinne beispielsweise der Verknüpfung von dargebots- und bedarfsorientierten Anpassungsmaßnahmen, der notwendigen Betrachtungseinheit von Wassermenge und –beschaffenheit, von Raum, Zeit und Wahrscheinlichkeit (gemäß Abbildung 1) im Einzugsgebietsmaßstab widergespiegelt.

Die zweifellos ebenfalls nötige stärkere Verknüpfung von Land- und Wasserbewirtschaftung im Rahmen der Anpassung an den Klimawandel wird dagegen in vielen solchen Forschungsansätzen bereits angestrebt.

Große Defizite und Risiken sind nicht nur aus der Sicht des Sachverständigenrates für Umweltfragen (SRU 2007) sondern auch aus der Sicht der „deutschen Wasserwirtschaft“ im institutionellen und politischen Bereich insbesondere im Zusammenhang mit der gegenwärtig durch die Umweltverwaltungen der Bundesländer als „Bürokratieabbau“, „Kommunalisierung“ o. a. deklarierten Verwaltungsreformen zu sehen. Wie soll eine z. B. an Landkreisen angelagerte Wasserwirtschaftsverwaltung differenzierte und effiziente Klimaanpassungsstrategien im Rahmen der hier diskutierten integrierten Wasserbewirtschaftung, aber auch der Umsetzung der Europäischen Wasserrahmenrichtlinie (BMU/UBA 2005) oder der Europäischen

Richtlinie über die Bewertung und das Management von Hochwasserrisiken (EC 2007) flussgebietsübergreifend bewältigen?

Hierzu bedarf es unbedingt eines gravierenden Umdenkens und Umsteuerns in allen Ebenen und Ressorts der „Länder und des Bundes“ in Deutschland insbesondere bei dem politischen und fachlichen Bemühen um die Entwicklung einer Deutschen Anpassungsstrategie an den Klimawandel (BMU 2008), um nicht, wie es die Hochwasserereignisse im Elbegebiet zeigen, erst über schmerzvolle Phasen des Lernens (GRÜNEWALD 2008a, b) „präventiv und nicht nur reaktiv“ mit Naturgefahren und deren möglichen klimawandelbedingten Verstärkungen umzugehen.

Wäre hier eine stärkere Bündelung der Fach- und Sachkompetenz in Form von einzugsgebietsbezogenen Wasserbewirtschaftungsverbänden o. ä., wie es sie beispielgebend im Bundesland Nordrhein-Westfalen heute (noch) gibt und sie früher in Sachsen, Brandenburg und Thüringen gab, eine institutionelle Kompensationsmaßnahme? Wäre es so durch eine „Wasserwirtschaft aus einer Hand“ möglich, das notwendige komplexe Denken und Handeln auch im Zusammenhang mit der Adaption an den globalen Wandel einschließlich des Klimawandels auch über Ländergrenzen hinweg besser zu realisieren?

Ist doch gerade länderübergreifendes Planen und Handeln bei der Wasserrbewirtschaftung im Flussgebietsmaßstab unabdingbar. Dies alles verlangt erhöhte Anstrengungen bezüglich des interdisziplinären Forschens und ressortübergreifenden Handelns und wird aber wie in vielen „Klimafolgebereichen“ ohne zusätzliche ökonomische Aufwendungen nicht zu bewältigen sein (z. B. CICERO 2007).

Literatur

- BMBF (2007): Bundesministerium für Bildung und Forschung: Bekanntmachung des Bundesministeriums für Bildung und Forschung von Richtlinien zur Förderung von Forschungsvorhaben Klimawandel in Regionen zukunftsfähig gestalten (KLIMZUG) Regionen gewinnen im Wettbewerb - die Welt gewinnt mit!, 29.03.2007-31.07.2007, Internet: <http://www.bmbf.de/foerderungen/7764.php>.
- BMU/UBA (2001): Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit/Umweltbundesamt: Umweltpolitik. Wasserwirtschaft in Deutschland. Teil 1 – Grundlagen – Bonn, 69 S.
- BMU/UBA (2005): Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit: Umweltpolitik. Die Wasserrahmenrichtlinie - Ergebnisse der Bestandsaufnahme 2004 in Deutschland. Berlin, 67 S.
- BMU (2008): Deutsche Anpassungsstrategien an den Klimawandel – Materialien - Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit, Stand: 16. April 2008, Berlin.
- BTU, UFZ, WASY (2002): Brandenburgische Technische Universität Cottbus, Helmholtz-Zentrum für Umweltforschung – UFZ, WASY Gesellschaft für wasserwirtschaftliche Planung und Systemforschung mbH: Verbundvorhaben „Integrierte Analyse der Auswirkungen des Globalen Wandels auf die Umwelt und die Gesellschaft im Elbegebiet“ GLOWA-ELBE. Bergbaubeeinflusstes Einzugsgebiet Obere Spree – Nachhal-

- tige Wasserbewirtschaftung und regionale Entwicklung. Fachgespräch „Wasserbewirtschaftung unter geänderten Rahmenbedingungen“ – Vorträge und Diskussion. Cottbus, 18.06.2002.
- CICERO (2007): „Bezahlen müssen wir alle!“. Interview mit Lars Göran Josefsson. Cicero 3/2007 <http://www.cicero.de/1373.php?ausgabe=03/2007> (Zugriff am 25.04.2007).
- CRAMER, C. (2007): Vulnerability to climate change and adaptation of climate sensitive sectors. 4th Espace International Conference. Presentation. Tutzing, 18th April 2007 <http://www.espace-project.org/conf4infopost.htm> (Zugriff am 25.04.2007).
- DIETRICH, O. (2005): Das Integrationskonzept Spreewald und Ergebnisse zur Entwicklung des Wasserhaushaltes. In: Wechsung, F., Becker, A., Gräfe, P. (Hrsg.): Auswirkungen des globalen Wandels auf Wasser, Umwelt und Gesellschaft im Elbegebiet. Konzepte für die nachhaltige Entwicklung einer Flusslandschaft. Band 6. Berlin: Weißensee-Verlag, S. 273-283.
- EC (2007): Directive 2007/60/EC of the European Parliament and of the Council of 23 October 2007 on the assessment and management of flood risks.
- ESPACE NEWS (2006): European Spatial Planning: Adapting to Climatic Events. Espace News (2006) H. 3, 12 S.
- GERLINGER, K. & K. LUDWIG (1998): Flussgebietsplanung in Deutschland (Kurztitel), Studie im Auftrag des Umweltbundesamtes. - Berlin.
- GERLINGER, K. & K. LUDWIG (1999): Aspekte der Flussgebietsplanung gemäß EU-Wasserrahmenrichtlinie. – Wasser und Abfall, 1, H. 3, 22-28.
- GERSTENGARBE, F. W. & P. C. WERNER (2005): Simulationsergebnisse des regionalen Klimamodells STAR. In: Wechsung, F., Becker, A., Gräfe, P. (Hrsg.): Auswirkungen des globalen Wandels auf Wasser, Umwelt und Gesellschaft im Elbegebiet. Konzepte für die nachhaltige Entwicklung einer Flusslandschaft. Band 6. Berlin: Weißensee-Verlag, S. 110-118.
- GRÜNEWALD, U., H. KRIPPENDORF & W. THIELE (1977): Entwicklung und Anwendung eines Bewirtschaftungsmodells für das Flussgebiet der Bode. Mitteilungen des Institutes für Wasserwirtschaft („25 Jahre IfW“), Berlin, 1977, S. 59-67.
- GRÜNEWALD, U. (2001): Wasserwirtschaftliche Planungen. In: Lecher, K., H.-P. Lühr, U. Zanke (Hrsg.): Taschenbuch der Wasserwirtschaft, 8. Auflage, Verlag Paul Parey, Berlin, 1123-1163.
- GRÜNEWALD U., M. KALTOFEN, S. KADEN, & M. SCHRAMM, (2001): Länderübergreifende Bewirtschaftung der Spree und der Schwarzen Elster. In: KA - Wasserwirtschaft, Abwasser, Abfall 2001 (48) Nr. 2, Hennef, 205-213.
- GRÜNEWALD, U. (2003): Wasser in der Landschaft. In: Wasserforschung im Spannungsfeld zwischen Gegenwartsbewältigung und Zukunftssicherung. Denkschrift der Senatskommission für Wasserforschung der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG), WILEY-VCH, Weinheim, S. 14-36.
- GRÜNEWALD, U. (2008a): Klimawandel, Hochwasserrisikomanagement und Bewirtschaftung der Wasserressourcen in Flusseinzugsgebieten. KW Korrespondenz Wasserwirtschaft, 2008 (1) Nr. 1, S. 23-28.

- GRÜNEWALD, U. (2008b): Hochwasserrisikomanagement im Zeichen des Klimawandels – Beispiel Elbe. In: PINNEKAMP, J. (Hrsg.): 41. Essener Tagung für Wasser- und Abfallwirtschaft vom 2.4.-4.4.2008 in der Messe Essen Ost. Aachen, 2008, S.70/1-70-15.
- HATTERMANN, F. F. (2008): Klimawandel und Wasserressourcen. In: PINNEKAMP, J. (Hrsg.): 41. Essener Tagung für Wasser- und Abfallwirtschaft vom 2.4.-4.4.2008 in der Messe Essen Ost. Aachen, 2008, S. 1/1-1/12.
- HOLZWARTH, F. & T. STRATENWERTH (2008): Anpassungsstrategie an den Klimawandel. In: PINNEKAMP, J. (Hrsg.): 41. Essener Tagung für Wasser- und Abfallwirtschaft vom 2.4.-4.4.2008 in der Messe Essen Ost. Aachen, 2008, S. 2/1-2/6.
- IRMER, H. (1999): Europäische Anforderungen zielorientiert und pragmatisch umsetzen. – Wasser und Abfall 1, H.3, 3.
- KADEN, S., M. SCHRAMM & M. REDEZKY (2005): Großräumige Wasserbewirtschaftungsmodelle als Instrumentarium für das Flussgebietsmanagement. In: Wechsung, F., Becker, A., Gräfe, P. (Hrsg.): Auswirkungen des globalen Wandels auf Wasser, Umwelt und Gesellschaft im Elbegebiet. Konzepte für die nachhaltige Entwicklung einer Flusslandschaft. Band 6. Berlin: Weißensee-Verlag, S. 223-233
- KALTOFEN, M., H. KOCH, M. SCHRAMM, U. GRÜNEWALD & S. KADEN (2004): Anwendung eines Langfristbewirtschaftungsmodells für multikriterielle Bewertungsverfahren - Szenarien des globalen Wandels im bergbaugesprägten Spreegebiet. – In: Hydrologie und Wasserbewirtschaftung. 48. 2004, H. 2, S. 60-70.
- KLIWA (2006): Kooperationsvorhaben Klimaveränderung und Wasserwirtschaft der Länder Baden-Württemberg und Bayern: Unser Klima verändert sich. Folgen – Ausmaß – Strategien. Karlsruhe, 17 S.
- MORGENSCHWEIS, G., G. zur STRASSEN & D. SCHWANENBERG (2008a): Reichen die vorhandenen Talsperrenkapazitäten im Einzugsgebiet der Ruhr für eine sichere Wasserversorgung? Ergebnisse einer Langfristbewirtschaftungsanalyse. - KW Korrespondenz Wasserwirtschaft. 2008 (1) Nr. 4, S. 192-199.
- MORGENSCHWEIS, G., D. SCHWANENBERG & G. zur STRASSEN (2008 b): Reichen die vorhandenen Talsperrenkapazitäten für eine langfristig sichere Wasserversorgung des Ballungsraums Ruhr auch im Hinblick auf prognostizierte Klimaänderungen? In: PINNEKAMP, J. (Hrsg.): 41. Essener Tagung für Wasser- und Abfallwirtschaft vom 2.4.-4.4.2008 in der Messe Essen Ost. Aachen, 2008, S. 24/1-24/12.
- MPI-M (2006): Max-Planck-Institut für Meteorologie: Klimaprojektionen für das 21. Jahrhundert. MPI-M, Januar 2006, Hamburg, 28 S., Internet: <http://www.mpimet.mpg.de/fileadmin/grafik/presse/Klimaprojektionen2006.pdf>. (Zugriff am 20.06.2007)
- MPI (2007): REMO Homepage des MPI: <http://www.mpimet.mpg.de/home.html>.
- PETERWITZ, U. & M. BÖDDEKER (2008): Aktuelle Tendenzen und mögliche Folgen des Klimawandels für die Wassergewinnung – Fallbeispiele aus NRW. In: PINNEKAMP, J. (Hrsg.): 41. Essener Tagung für Wasser- und Abfallwirtschaft vom 2.4.-4.4.2008 in der Messe Essen Ost. Aachen, 2008, S. 23/1-23/12.

- UBA (2007): Neuentwicklung von regional hoch aufgelösten Wetterlagen für Deutschland und Bereitstellung regionaler Klimaszenarios auf der Basis von globalen Klimasimulationen mit dem Regionalisierungsmodell WETTREG auf der Basis von globalen Klimasimulationen mit ECHAM5/MPI-OMT63L31 2010 bis 2100 für die SRES-Szenarios B1, A1B und A2. Endbericht. Umweltbundesamt, Januar 2007.
- VINER, D. (2002): A Qualitative Assessment of the Sources of Uncertainty in Climate Change Impact Assessment Studies: A short discussion paper. *Advance in Global Change Research*, 10, S. 139-151.
- WBGU (1993): Wissenschaftlicher Beirat der Bundesregierung Globale Umweltveränderungen. *Welt im Wandel: Grundstruktur globaler Mensch-Umwelt-Beziehungen; Jahresgutachten*, Economica Verlag, Bonn.
- WECHSUNG, F., A. BECKER & P. GRÄFE (Hrsg.) (2005): Auswirkungen des globalen Wandels auf Wasser, Umwelt und Gesellschaft im Elbegebiet. Konzepte für die nachhaltige Entwicklung einer Flusslandschaft. Band 6. Berlin: Weißensee-Verlag, ISBN 3-89998-062-X, 416 S.

Klimaänderungen früherer Zeiten, Naturdynamik und die Zukunft der Arten

Josef H. Reichholf

Zusammenfassung

Das Klima war nie stabil. Frühere Änderungen verliefen in einem Ausmaß, welches die bisherige und für die nächsten Jahrzehnte prognostizierte Stärke der Klimaerwärmung übertroffen hat. Die Folgen für Kultur und Natur waren beträchtlich; zum Teil sogar maßgeblich für historische Entwicklungen. Selbst wenn es gelingen sollte, den Ausstoß von CO₂ beträchtlich zu vermindern, werden allein vom Anwachsen der Weltbevölkerung und von den damit einher gehenden Änderungen in der Landnutzung weitere Auswirkungen auf das Klima zustande kommen. Die Schadensvorsorge ist daher ungleich wichtiger als die langfristige „Stabilisierung“, deren Erfolgchancen zweifelhaft sind. Im Hinblick auf die Erhaltung der Biodiversität spielen gleichfalls die direkten Eingriffe eine weitaus größere Rolle als die vorhergesagten Wirkungen des Klimawandels, zumal der Artenbestand der Erde für realistische Prognosen nicht gut genug bekannt ist. Die Diskussionen um den Klimawandel bergen die Gefahr in sich, dass längst bekannte, notwendige Maßnahmen nicht rechtzeitig durchgeführt werden.

1. Einleitung

Gegenwärtig befinden wir uns in einer Phase globaler Klimaveränderung. Anders als in früheren Klimaschwankungen ist hierbei der Mensch in erheblichem Umfang beteiligt. Im Hinblick auf die Auswirkungen und auf Maßnahmen gegen die Folgen ist es unerheblich, in welchem Umfang der Mensch die Änderungen tatsächlich verursacht. Wichtiger ist es, das Ausmaß zu kennen, um das es sich handelt und wie stark es weiter steigen wird. Vorstellungen hierzu können Betrachtungen der früheren Klimaveränderungen vermitteln. Welche Probleme sie für die Menschen verursachten und wie sie sich auf die Natur auswirkten, ermöglicht uns, die gegenwärtigen Veränderungen einzustufen und die prognostizierten abzuschätzen. Das gilt nicht nur für den Teilbereich der Wasserwirtschaft, sondern auch für viele andere Zweige von Wirtschaft und Gesellschaft, regional und global, sowie für die Natur. Historische Rückblicke können zwar stets nur unvollständig sein, weil es unmöglich ist, für vergangene Zeiten umfassende Analysen der Verhältnisse in allen Bereichen anzustellen, aber so verhält es sich bekanntlich auch für die Gegenwart. Aus der Lückenhaftigkeit des Datenmaterials müssen dennoch die Prognosen für die Zukunft erstellt werden. So kommt ein mehr oder minder hoher Grad an Unsicherheit zustande.

2. Das Klima früherer Zeiten

Wichtigster Befund zum Klima früherer Zeiten ist die Feststellung, dass es nie stabil war. Klimaänderungen hat es immer gegeben, und zwar auf allen Ebenen des klimatischen Geschehens. Auf der Zeitskala der Existenz der Erde ergeben die zahlreichen, massiven Schwankungen in der allgemeinen Tendenz eine Abkühlung. Vereisungen gab es schon vor Hunderten von Jahrillionen. Die Position der wandernden Kontinente zueinander und auf dem Globus bedingten Wechsel zwischen ausgeprägten Kaltzeiten und sehr warmen Perioden. Ein besonders rascher und heftiger Wechsel kam zustande als sich die

Landbrücke zwischen Nord- und Südamerika vor etwa 3,5 Millionen Jahren geschlossen hat. Das warme Wasser aus dem tropischen Atlantik konnte nun nicht mehr in den Pazifik abfließen. „Gestaut“ in der Karibik entstand daraus der Golfstrom. Nach einer Jahrtausenden langen Abkühlungs- und Vereisungsphase beider Pole fing mit der ‚Geburt des Golfstroms‘ die Klimaschaukel des Eiszeitalters (Pleistozäns) mit raschem Wechsel zwischen Kaltzeiten (Galziale) und Warmzeiten (Interglaziale/Interstadiale) an. Maßgeblich beteiligt ist die Schiefe der Erdachse, die zu den so genannten Milankovic-Zyklen von etwa 21.000 Jahren Dauer führt. Die letzte, umgangssprachlich als Eiszeit bezeichnete Kaltzeit, das Würm- oder Weichsel-Glazial (in Nordamerika Wisconsin-Glaciation genannt) ging vor rund 10.000 Jahren mit Temperatursprüngen von über 15 °C zu Ende. Doch auch in der folgenden Warmzeit, eine Zwischeneiszeit, das Holozän, traten kräftige Wechsel im Klima mit Unterschieden von 3 bis mehr als 5°C in Mitteleuropa in ziemlich regelmäßiger Folge auf, deren Ursache unbekannt ist (Abbildung 1).

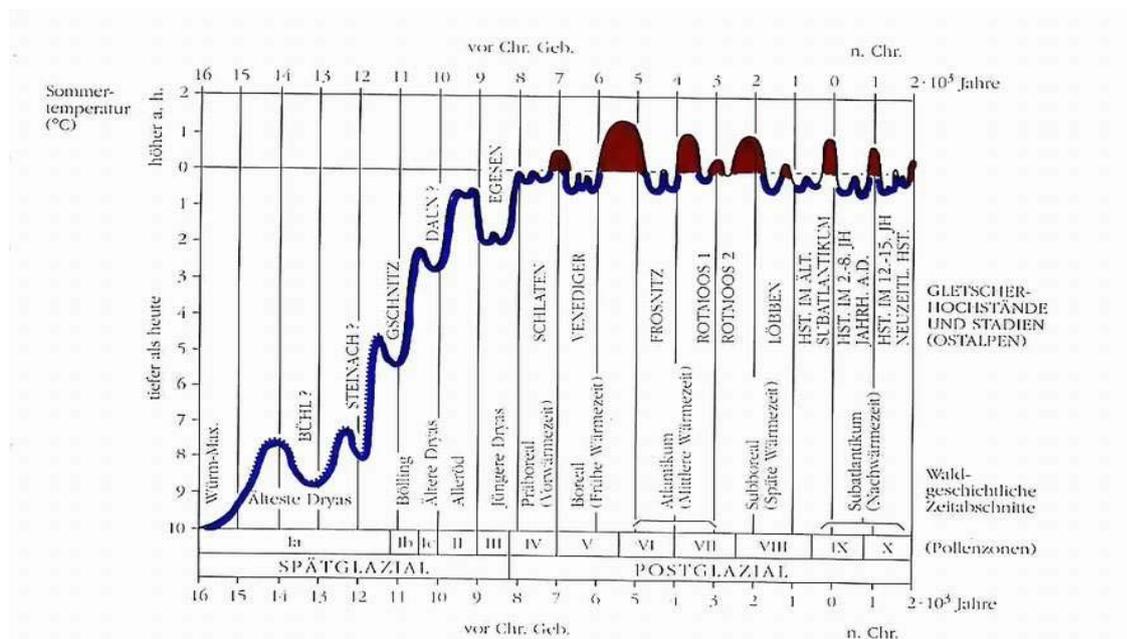
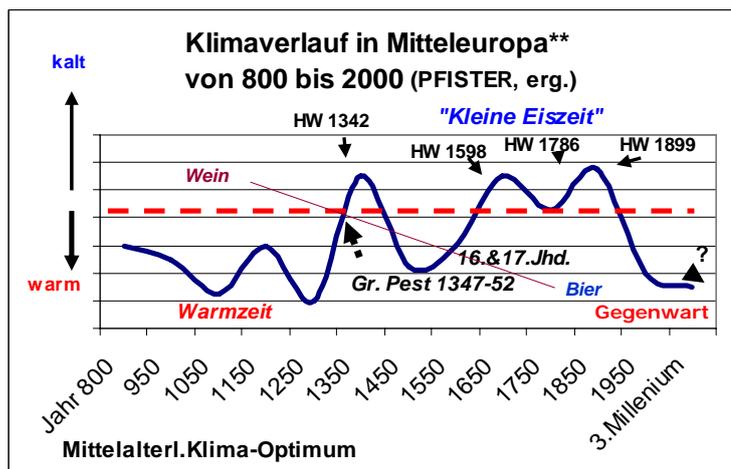


Abb. 1: Wahrscheinlicher Temperaturverlauf in der Spät- und Nacheiszeit in Mitteleuropa (nach KÜSTER 1998). Die dunklen Kuppen zeigen die Warmzeiten.

Den Warmzeiten darin sind kulturhistorisch wichtige Phasen zuzuordnen. So wurde in der ersten großen nacheiszeitlichen Wärmezeit der Ackerbau entwickelt. In den folgenden entstanden die ersten Hochkulturen, dann kamen die Periode des ‚Klassischen Altertums‘ der Griechen- und Römerzeit und die kulturelle Blüte des Hochmittelalters, die nicht nur in Europa, sondern auch in China und Japan sowie in Südasien stattfand. Nach der letzten markanten Abkühlung, der Kleinen Eiszeit zwischen etwa 1350 und 1800 unserer Zeitrechnung setzte die rezente Klimaerwärmung ein (Abbildung 2). Sie gipfelte Ende der 1990er Jahre. Seither nehmen die Durchschnittstemperaturen nachweislich wieder ab. Die kalten Jahrhunderte der Kleinen Eiszeit waren gezeichnet von Naturkatastrophen, wie sie in neuerer Zeit nicht mehr aufgetreten sind. So gab es 1342 das größte jemals in historischen Aufzeichnungen registrierte Hochwasser in Europa und China (!), 1598 das zweitgrößte und 1899 das letzte der ganz großen in Mitteleuropa. Auch die Phasen der schweren Sturmfluten fallen in diese Zeit sowie die großen Seuchenzüge der Pest (Abbildung 2).

Klima-Entwicklung in Mitteleuropa 800-2000



** Befunde aus der alpinen Gletscherforschung!

Abb. 2: Klimaentwicklung in Mitteleuropa von 800 bis 2000 nach Befunden aus der alpinen Gletscherforschung (nach REICHHOLF 2007).

Abbildung 2 zeigt den Verlauf des Klimas in Mitteleuropa anhand der Befunde aus der alpinen Gletscherforschung. Dabei bedeutet Rückgang der Gletscher (die in den Wärmezeiten des Mittelalters in den Alpen weitgehend verschwunden waren) warmes und niederschlagsarmes Wetter, ihr starkes Anwachsen aber kalte und (zu den passenden Zeiten) niederschlagsreiche Zeiten. In Bayern dominierte z. B. im Mittelalter der Weinanbau. Zum „Bierland“ wurde es als in den vielen kalten Wintern der Kleinen Eiszeit genügend Eisblöcke zur Bierkühlung in den Eiskellern geschnitten werden konnten. In diese Zeit fallen nicht nur die höchsten, sondern auch die häufigsten Hochwässer, wobei vor allem der Anteil der Eisstoß-Fluten besonders bedeutsam war (GLASER et al. 2002). Praktisch in allen größeren (und hinreichend alten), an Flüssen gelegenen Städten finden sich alte Marken der Hochwasserstände. Daten und Stärke der Hochwässer sind historisch umfangreich und gut dokumentiert.

Aus der Endphase der Kleinen Eiszeit, aus einer Zeit sehr schlechter, für die Landwirtschaft äußerst ungünstiger Witterungsverhältnisse ging die gegenwärtige Klimaerwärmung hervor. Ein wesentlicher, im Ausmaß umstrittener Anteil des Temperaturanstiegs geht darin auf natürliche Schwankungen zurück. Als Hauptverursacher gilt dabei die Aktivität der Sonne. Bekannt und seit dem 16. Jahrhundert dokumentiert ist die Häufigkeit der Sonnenflecken, die in einem 11jährigen Zyklus schwankt und uns hierzulande in diesem Abstand besonders heiße, dazwischen aber verregnete und kühle Sommer beschert. Diese Witterungsschwankungen wirken jedoch ungleich stärker über Verteilung und Häufigkeit der Niederschläge auf Natur und Kultur als durch die Wärme/Kälte an sich. Das Hochmittelalter muss eine sehr günstige Zeit gewesen sein, weil die Bevölkerung stark anwuchs und auf einer Fläche, die ungefähr dem heutigen Deutschland, Österreich und der Schweiz entspricht um 1350 eine Größenordnung von über 70 Millionen Menschen erreicht hatte. Das sind mehr als zwei Drittel der heutigen Zahl.

3. Naturdynamik

Auf die mitteleuropäischen Verhältnisse bezogen, zeigt sich der historische Klimawandel sehr klar in den Veränderungen in der Natur. So herrschten hier während des Höhepunktes der letzten Eiszeit Verhältnisse ähnlich der arktischen Tundra, aber mit Mammut, Wollnashörnern, Höhlenlöwen und Rentierherden, die nicht den heutigen Tundraverhältnissen gleichgesetzt werden dürfen. Denn am Stand der Sonne hatte sich nichts geändert. Die Mammutsteppe, wie sie besser genannt werden sollte, war hoch produktiv und über Zehntausende von Jahren Heimat der nomadisch umherschweifenden Eiszeitmenschen. Der rasche Wechsel in die Warmzeit setzte eine gewaltige „Völkerwanderung“ von Pflanzen und Tieren in Gang, die in warm genug gebliebenen Refugien die Eiszeit überdauert hatten. Die bedeutendsten waren die Iberische Halbinsel und der südöstliche Balkan mit seinem Anschluss an Vorderasien. Die heutige „natürliche“ Tier- und Pflanzenwelt besteht zum Teil aus diesen Rückwanderern. Aber Fauna und Flora waren stark verarmt, weil während der Kaltzeit viele Arten ausgestorben sind. Mit der Entwicklung des Ackerbaus in Vorderasien und seinem Vordringen nach Europa setzte eine Zuwanderung weiterer Tier- und Pflanzenarten ein, die bis in die Gegenwart anhält. Sie ergänzte das verarmte Artenspektrum, das kaum Besiedler für die neuen, offenen,

landwirtschaftlich genutzten Flächen enthalten hatte, weil es sich bei den ursprünglichen Arten um ein Spektrum von (Laub)Waldarten handelte. In das Kulturland aber drangen Offenland- und Steppenarten ein. Diese doppelte Zuwanderung erzeugte in Mitteleuropa eine vergleichsweise hohe Artenvielfalt. Zu dieser kamen die natürliche Lebensraumvielfalt und die neuen Lebensräume von Land und Stadt hinzu. Insgesamt ergab sich daraus die „Biodiversität“, auf die im heutigen Naturschutz Bezug genommen wird. Der Zustand in der Mitte des 19. Jahrhunderts als das Land weithin extrem übernutzt und ausgebeutet worden war, liegt ihr zugrunde. Da Mangel Vielfalt erzeugt und erhält, spiegelte die hohe Biodiversität des 19. Jahrhunderts die damaligen Mangelverhältnisse. Mit der Einführung des Kunstdüngers, der Flurbereinigung und der Überdüngung ab Mitte der 1970er Jahre kam eine starke Veränderung im Artenspektrum zustande. In der Bilanz ergaben sich massive Rückgänge und Verluste.

4. Zukunft der Arten

Weltweit gelten derzeit etwa 15.000 Arten von Tieren und Pflanzen als vom Aussterben bedroht. Der Klimawandel, so die gängige Ansicht, sei als zusätzliche Gefahr hinzugekommen. Mit dem Verlust von 30 oder mehr Prozent des globalen Artenbestandes müsse bis zum Jahre 2100 gerechnet werden. Diese Einschätzung beruht jedoch nicht auf konkreten Untersuchungen, denn die Zahl der existierenden Arten von Lebewesen ist nicht einmal annähernd bekannt. Die äußerst groben, lediglich auf Hochrechnungen anhand lokaler Befunde beruhenden Abschätzungen bewegen sich nämlich zwischen 10 und 100 Millionen verschiedener Arten, die es geben soll. Dabei sind zur Zeit nur etwa 1,8 Millionen bekannt und wissenschaftlich beschrieben. Die Unsicherheit bewegt sich somit zwischen dem Fünf- und Fünfzigfachen des Bekannten. Globale Vorhersagen zur Auswirkung eines langfristigen Klimawandels auf den Artenbestand sind daher nicht möglich.

Anders sieht es regional aus. In Europa, Nordamerika und einigen weiteren Regionen sind die Vorkommen und Häufigkeiten von Arten hinreichend gut bekannt. Die gegenwärtig umfassendste Untersuchung zum Grad der Gefährdung stammt vom Bayerischen Landesamt für Umweltschutz, das 2003 die „Roten Listen der gefährdeten Tiere und Pflanzen Bayerns“ vorlegte. Untersucht worden waren alle wild wachsenden Pflanzenarten und 16.000 verschiedene Arten von Tieren (knapp die Hälfte aller in Bayern vorkommenden Tierarten). Das Gesamtergebnis weist einen Gefährdungsgrad von rund 50 % aus, aber mit recht unterschiedlichen Anteilen in den verschiedenen Tier- und Pflanzengruppen. Am meisten gefährdet sind überraschender Weise die Wärme liebenden Arten; Arten, die auf trockenwarmen Standorten (Biotopen) vorkommen. Die genauere Betrachtung zeigt den Hauptgrund für diesen Befund: Es ist dies die starke Überdüngung. Mit einem generellen Überschuss von mehr als 100 kg Stickstoff pro Hektar und Jahr wird seit rund 20 Jahren das Land zuge düngt. Die Vegetation entwickelt sich bei dieser exzessiven Düngung weit schneller und dichter als in früheren Zeiten. Das macht die bodennahen Verhältnisse kälter und feuchter. Gleichzeitig ging das Ausmaß der Nutzung der Vegetation stark zurück. Buschwerk wuchert nun und verstärkt die Abkühlwirkung der zu dicht gewordenen Vegetation. Der weitaus größte Teil der Artenrückgänge in Mitteleuropa ist auf diese Überdüngung zurückzuführen. Sie steht in enger Beziehung zu den höchst artenreichen Gebieten in den Tropen und Subtropen. Denn von dort kommen die riesigen Mengen an Futtermitteln für das Stallvieh, die unsere Hochleistungslandwirtschaft benötigt. Mit dem

Sojaanbau in Südamerika frisst unser Stallvieh somit tropische, unersetzbare Biodiversität, während hier das Land überdüngt wird und vor allem die dabei entstehende Gülle zum Hauptproblem für Böden und Grundwasser, aber auch für die Oberflächengewässer geworden ist. Die hohen Ausgaben für die Reinigung der menschlichen Abwässer können trotz exzellenter Reinigungsgrade nicht zur Wirkung kommen, so lange ein Mehrfaches der menschlichen Abwässer völlig ungereinigt übers Land ausgebracht werden kann. Die Zukunft der Arten hängt daher nicht vom Klima und seinem Wandel ab, sondern davon, wie das Land weiterhin genutzt werden wird. Das gilt global wie regional. Besonders starke Veränderungen werden mit der weiteren Förderungen des Anbaus von Biomassepflanzen für die Energiegewinnung zustande kommen. Die Diskussionen um die Klimaänderung und die Maßnahmen zu ihrer Eindämmung lenken so mit ihrer Ausrichtung auf eine (zu) ferne Zukunft von den Problemen und Notwendigkeiten der Gegenwart in Wasserwirtschaft und Umweltsicherung ab. Diese müssen aber mit allem Nachdruck eingefordert werden. Denn die Vorsorge ist allemal wichtiger und sicherer als jede globalstrategische Vorgehensweise, der nur ein höchst ungewisser Ausgang bescheinigt werden kann.

Literatur

- GLASER, R. (2001): Klimageschichte Mitteleuropas. – Wissenschaftl. Buchges., Darmstadt
- GLASER, R., J. JACOBET, M. DEUTSCH & H. STANGL (2002): Hochwasser als historisches Phänomen. – Rundgespräche Kommission für Ökologie, Bayerische Akademie der Wissenschaften 24: 15 – 30.
- KÜSTER, H. (1998): Geschichte des Waldes in Mitteleuropa. – Beck, München
- REICHHOLF, J. H. (2007): Eine kurze Naturgeschichte des letzten Jahrtausends. – S. Fischer, Frankfurt
- REICHHOLF, J. H. (2008): Ende der Artenvielfalt? Gefährdung und Vernichtung von Biodiversität. – s. Fischer, Frankfurt

Regionale Klimamodellierung in Deutschland und Europa

Daniela Jacob, Holger Göttel, Sven Kotlarski, Philip Lorenz

Zusammenfassung

Klimaszenarien für die Zukunft werden mit unterschiedlichen Emissionsentwicklungen für CO₂ und SO₂ durchgeführt. Abhängig davon, welche Emissionsentwicklung zu Grunde liegt, kann sich die globale mittlere Temperatur um 1,5°C bis 5,5°C bis Ende des 21. Jahrhunderts erhöhen. Will man Aussagen über regionale Änderungen treffen, bettet man regionale Modelle in die globalen Modelle ein. Im MPI-M wurde dafür das regionale Klimamodell REMO entwickelt und in das globale Klimamodell des MPI-M ECHAM5/MPI-OM eingebettet.

Im Auftrag des Umweltbundesministeriums wurden drei Szenarien: B1, A1B und A2 (niedrige, mittlere und hohe Emissionsraten) erstellt. Folgende Ergebnisse lassen sich für das Ende des 21. Jahrhunderts zusammenfassen:

- Anstieg der mittleren Jahrestemperatur in Deutschland um bis zu 4°C (abhängig von der Emissionsrate und Region)
- dabei erwärmt sich der Süden und Südosten am Stärksten
- im Sommer in weiten Teilen Deutschlands weniger Niederschläge
- im Winter im Süden und Südosten mehr Niederschlag
- weniger Niederschläge in Form von Schnee

Von besonderem Interesse ist es zu erfahren, ob und wenn ja, in welchem Umfang, extreme bzw. seltene Ereignisse (z. B. Hitzewellen, Starkniederschläge) vorkommen werden. Deshalb werden derzeit detaillierte Analysen der Klimaszenarien am MPI-M durchgeführt.

1. Einleitung

Es ist unumstritten, dass sich das Klima der Erde in den letzten Dekaden gewandelt hat, wie zahlreiche Aufzeichnungen meteorologischer und hydrologischer Dienste weltweit zeigen (Abbildung. 1). Von besonderem Interesse ist hierbei die Frage, ob und wenn ja wie sich extreme bzw. seltene Ereignisse (Starkniederschläge, Hitzewellen, Überschwemmungen, usw.) verändert haben und gegebenenfalls verändern werden. Für derartige Aussagen wurden globale Klimamodelle entwickelt, die zusammen mit verschiedenen Annahmen über die Treibhausgasentwicklung in der Atmosphäre mögliche Entwicklungen des Klimas (Klimaszenarien) in den nächsten 100 Jahren berechnen. Diese Computermodelle können als mathematische Abbilder des Erdsystems gesehen werden, da sie die physikalischen Prozesse im Erdsystem numerisch beschreiben und so real wie möglich berechnen. Um die Güte der Klimamodelle einschätzen zu können, werden sie zunächst für die Berechnung vergangener Zeiten eingesetzt. Bevorzugt wird hierzu eine Zeitperiode gewählt, in der zahlreiche Beobachtungen weltweit vorliegen.

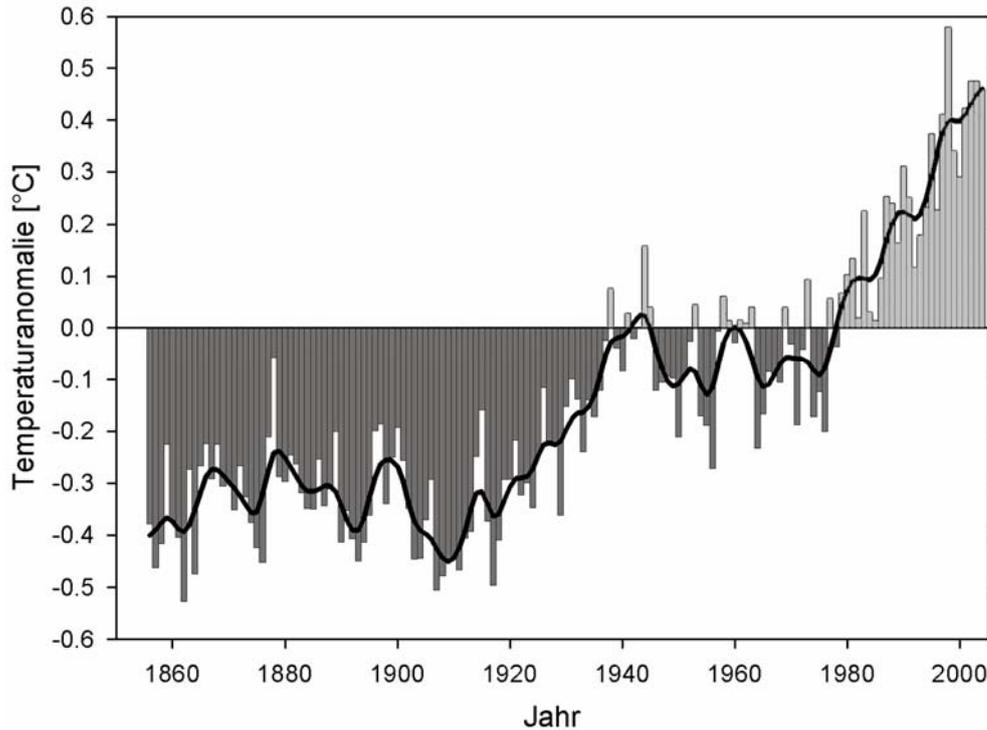


Abb. 1: Abweichung der globalen Mitteltemperatur (C°) in 2 m über Grund von der Referenzperiode 1961 bis 1990

2. Klimaszenarien

In den letzten Jahrzehnten wuchs in der internationalen Gemeinschaft der Klimafor-scher die Sorge, dass menschliche Aktivitäten negative Einflüsse auf das Klima der Erde ausüben könnten. Bereits in einem frühen Stadium der Forschung waren die Wis-senschaftler überzeugt, dass der menschliche Einfluss auf das Klima genauer analy-siert werden müsse, um die wissenschaftlichen Grundlagen für politische Entschei-dungsträger zu schaffen. Dies wurde Ziel des „Zwischenstaatlichen Ausschusses zum Klimawandel“ (Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC), der 1988 unter Federführung zweier UN-Organisationen, UNEP (United Nations Environment Pro-gram) und WMO (World Meteorological Organization) gegründet wurde. Der IPCC er-stellt regelmäßige Zusammenfassungen der aktuellen Forschungsergebnisse, um bei der Formulierung von Zielen für die globale Umweltpolitik, wie z.B. dem Kyoto-Protokoll, zu unterstützen. Dazu gehören auch Projektionen von möglichen zukünftigen Klimaentwicklungen mit Hilfe detaillierter Klimamodelle, gestützt auf vorgegebene Sze-narien zum Ausstoß von CO₂ und anderen Treibhausgasen.

Die bis heute neueste Serie von IPCC- Szenarien (Hauptszenarien A1, B1, A2, B2) folgt abgestimmten möglichen Entwicklungslinien, so genannten *Storylines*, die unter-schiedlichen Entwicklungen der Weltwirtschaft, des Bevölkerungswachstums und an-derer Faktoren folgen (Nakicenovic et al, 2000). Die zugehörigen Emissionsentwick-lungen für CO₂ und SO₂ von 2000 bis 2100 unterscheiden sich in ihrer Stärke ebenso wie in ihrem zeitlichen Verlauf. Diese Emissionen werden in die globalen und regiona-

len Klimamodelle eingespeist und bewirken durch zahlreiche nicht-lineare Wechselwirkungen Veränderungen des globalen und regionalen Klimas.

3. Mögliche Klimaänderungen in Europa

Um die Auswirkungen globaler Klimaänderungen auf Regionen in Europa zu untersuchen, wird ein regionales Klimamodell in das globale Klimamodell eingebettet. So ist es möglich, wie mit einer Lupe eine spezielle Region viel detaillierter zu untersuchen und eine Brücke zwischen globalen Klimaveränderungen und lokalen Konsequenzen zu schlagen.

Für diese Studien wurde das am Max-Planck-Institut für Meteorologie (MPI-M) entwickelte regionale Modell REMO in das globale Klimamodell ECHAM5/MPI-OM des MPI-M integriert, d.h. an den seitlichen Rändern des Untersuchungsgebietes strömen Luftmassen, wie sie im Globalmodell berechnet wurden, in das Berechnungsgebiet des regionalen Modells hinein. In REMO wird dann ein regionales Klima unter Berücksichtigung der globalen Informationen und der lokalen und regionalen Gegebenheiten ausgerechnet. Das hierfür eingesetzte regionale Klimamodell REMO (Jacob, 2000 und Jacob et al, 2007) zeigt die Klimaentwicklung des vergangenen Jahrhunderts recht realitätsnah, wie der Vergleich zu Beobachtungen - auch in stark strukturiertem Gelände wie den Alpen (Frei et al, 2003) - ergibt. Diese Überprüfung ist notwendig, um die Güte der Modellergebnisse zu bewerten. Die regionalen Modellergebnisse sind weitgehend ähnlich zu den mit dem globalen Modell ausgerechneten. Durch die höhere horizontale Gitterauflösung liefert das regionale Modell jedoch wesentlich mehr kleinräumige Informationen, die regional auch durch die Beschaffenheiten des Untergrundes (Hügeligkeit, Bewuchs) abweichen können. Zusätzlich wird eine wesentlich höhere Genauigkeit bei der Simulation seltener kleinräumiger Extremereignisse erreicht (z.B. sommerliche Starkniederschläge).

Für eine mögliche Projektion des Klimas bis 2100 wird REMO zunächst mit einer Gitterweite von 50 km für Europa betrieben. So können mögliche unterschiedliche Entwicklungen in Nord-, Zentral- und Südeuropa erfasst werden. Alle Klimasimulationen - global und regional - wurden mit Unterstützung des Deutschen Klimarechenzentrum (DKRZ) durchgeführt.

Exemplarisch ist für das A1B Szenario aus Abbildung 2 zu erkennen, dass die Temperaturerhöhung in Europa regional unterschiedlich stark ausfallen wird. Schon für die Dekade 2040 bis 2050 wird für den Mittelmeerraum ein Anstieg der Sommertemperaturen (Abbildung 2, unten links) von mehr als 2,5° im Vergleich zu 1961 bis 1990 berechnet, während in weiten Teilen Zentraleuropas nur weniger als 1° Erwärmung erwartet wird. In den Wintermonaten (Abbildung 2 oben links) hingegen beträgt die berechnete Temperaturerwärmung ca. 1,5° bis 2° und erstreckt sich von Skandinavien bis zum Mittelmeer. Nur in Regionen unter direktem Einfluss des Atlantiks (Großbritannien, Portugal, Teile von Spanien) fällt im Winter der Temperaturanstieg geringer aus. Die Verhältnisse in der letzten Dekade des Jahrhunderts (hier nicht dargestellt) zeigen eine

großräumige Erwärmung des gesamten Kontinents um mehr als 3° im Sommer und Winter.

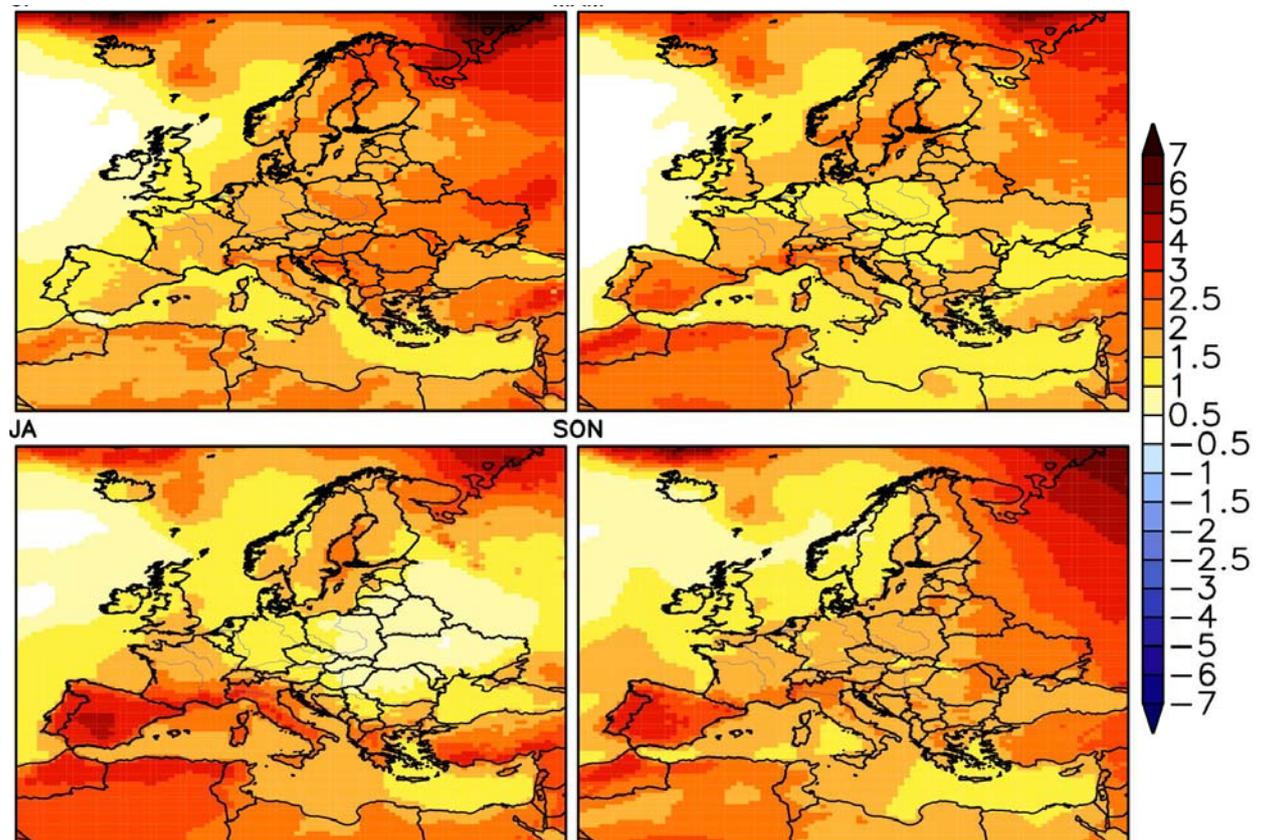


Abb. 2: Jahreszeitliche Abweichung der Mitteltemperatur (°C) in 2 m über Grund um 2050 von der Referenzperiode 1961 bis 1990. Winter (o.l.), Frühjahr (o.r.), Sommer (u.l.) und Herbst (u.r.)

Gleichzeitig mit den projizierten Temperaturänderungen werden Niederschlagsänderungen berechnet. Schon zur Mitte des 21. Jahrhunderts zeigt sich ein deutlicher Trend zur Niederschlagsabnahme von bis zu 50% und mehr im Mittelmeerraum in allen Jahreszeiten, während insbesondere Skandinavien im Winter mit mehr Niederschlag rechnen muss (Abbildung 3). Für die Sommermonate wird nach dem A1B Szenario auch in weiten Teilen Nord- und Zentraleuropas ein Niederschlagsrückgang (z. B. Großbritannien mehr als 30 %) ermittelt. Dies scheint mit einer Verlagerung des Azorenhochs nach Nordosten verbunden zu sein, das die großräumigen Strömungen im Vergleich zu heute verschiebt. Hierzu sind weitere Untersuchungen geplant. Die schon bis 2050 berechneten Trends verstärken sich zum Ende des Jahrhunderts in ganz Europa mit einer weiträumigen Niederschlagsabnahme im Sommer bis nach Südkandinavien (nicht gezeigt).

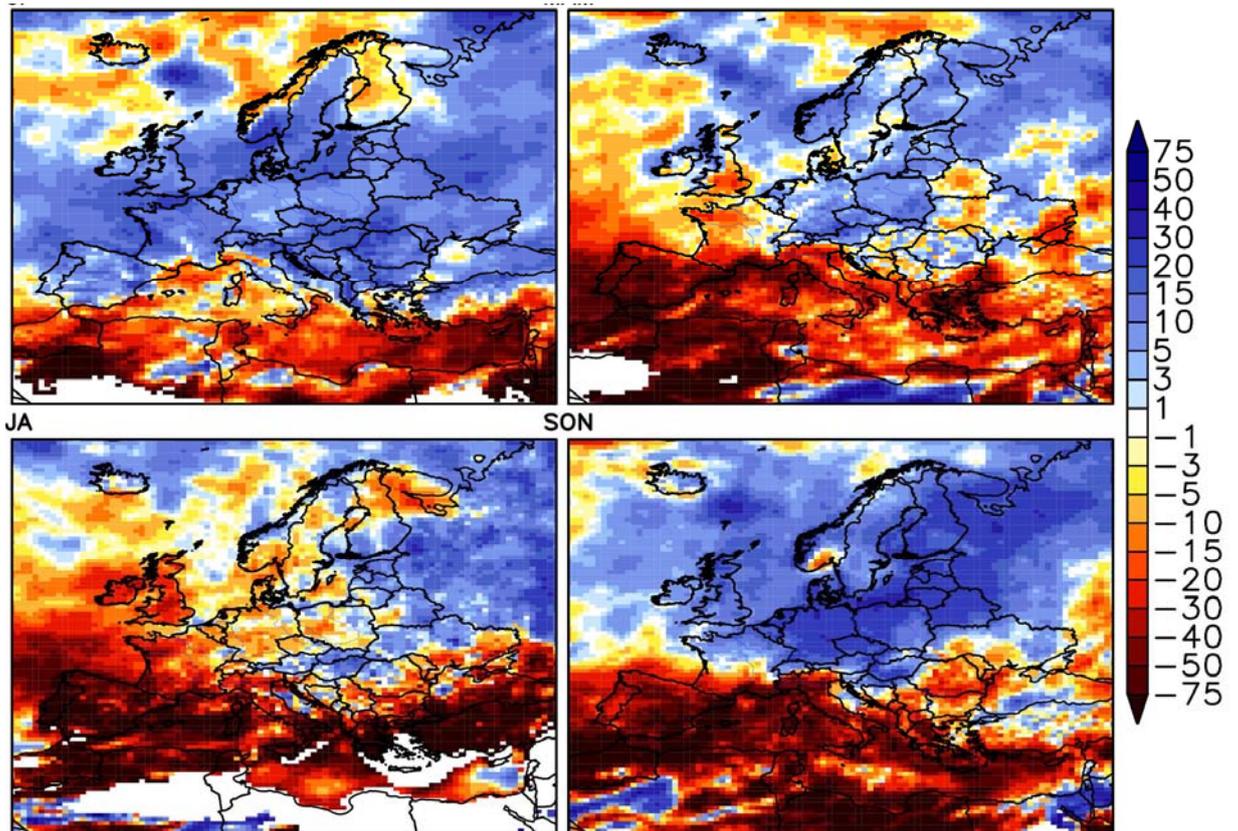


Abb. 3: Jahreszeitliche Abweichung der Niederschlagsmenge (%) um 2050 von der Referenzperiode 1961 bis 1990. Winter (o.l.), Frühjahr (o.r.), Sommer (u.l) und Herbst (u.r)

Beispielhaft für extreme Situationen wurde die Entwicklung der Anzahl der Frosttage ($T_{\min} < 0^{\circ}\text{C}$) und der heißen Tage ($T_{\max} > 30^{\circ}\text{C}$) untersucht: In ganz Europa kann schon bis 2050 die Zahl der Frosttage deutlich abnehmen. Gleichzeitig nimmt die Zahl der heißen Tage im A1B-Szenario bis 2100 um 5 bis 50 Tage zu. Nur für England und Skandinavien wird keine Zunahme der heißen Tage berechnet.

Deutschland ist von möglichen Klimaänderungen unterschiedlich stark betroffen:

Im Auftrag des Umweltbundesamtes (UBA) hat das MPI-M mit Unterstützung des Deutschen Klimarechenzentrums Szenarien für mögliche Klimaänderungen in Deutschland bis zum Jahr 2100 erarbeitet (Jacob et al, 2007). Die Klimasimulationen mit REMO wurden mit einer räumlichen Auflösung von 10 km durchgeführt. Hierbei liefern diese Simulationen Erkenntnisse, die es bislang noch nicht in dieser Detailliertheit gab.

Die Ergebnisse dieser Klimasimulationen lassen sich auf folgende Aussagen verdichten: Je nach Veränderungen der Treibhausgase könnten bis zum Ende des Jahrhunderts die Temperaturen in Deutschland — vor allem im Süden und Südosten — um mehr als 4°C im Vergleich zu den letzten 50 Jahren steigen. Im Sommer kann es in

weiten Teilen Deutschlands weniger Niederschläge geben. Im Winter könnten im Süden und Südosten mehr Niederschläge fallen, wobei allerdings wegen der gestiegenen Temperaturen weniger Schnee fallen kann. Das langjährige Mittel der Jahresniederschlagsmenge scheint jedoch etwa gleich zu bleiben.

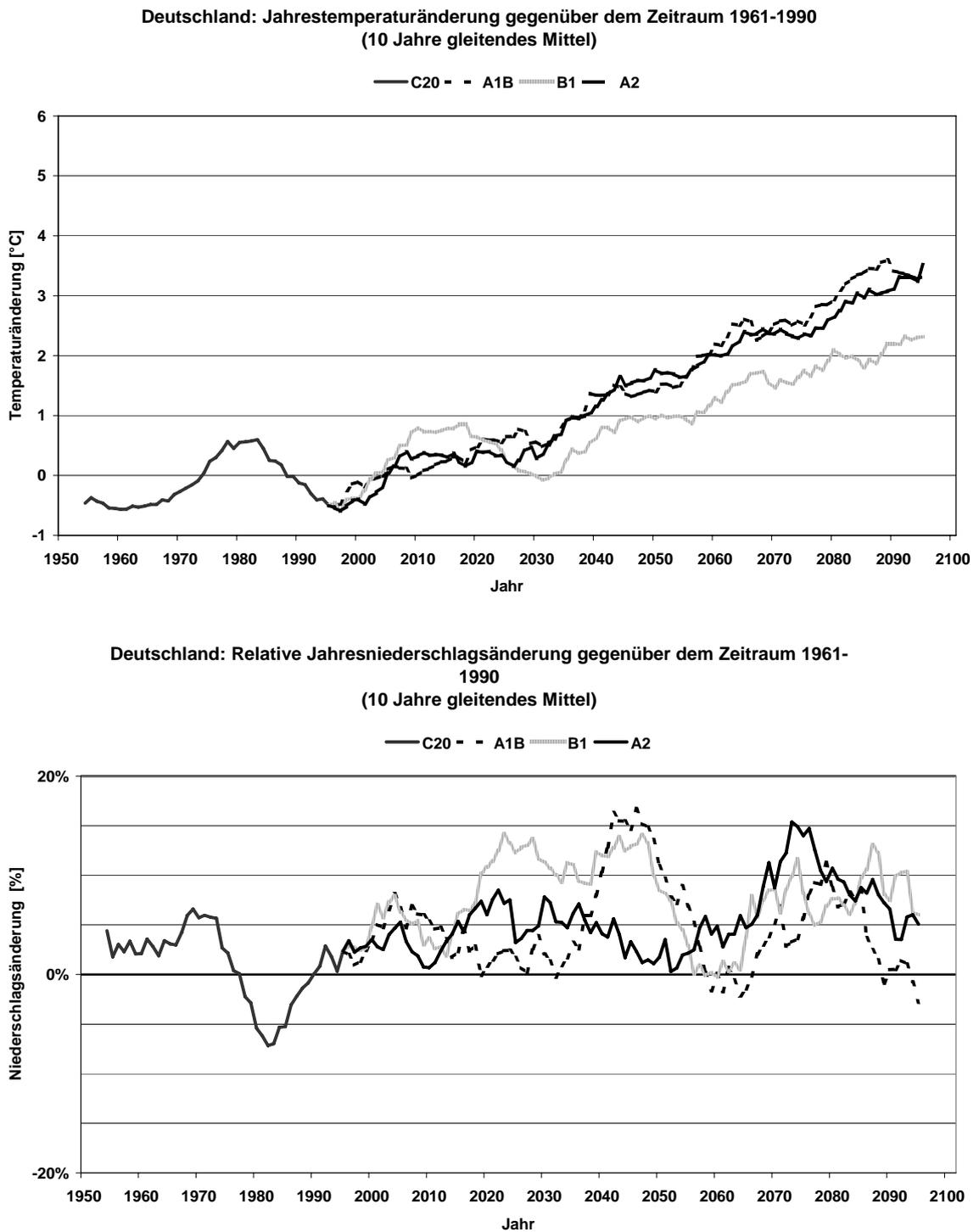


Abb. 4: mittlere Jahrestemperaturänderung (oben) und mittlere relative Niederschlagsänderung (unten) zur Klimanormalperiode 1961-1990 in Deutschland als gleitendes 10-Jahresmittel

Die Ergebnisse im Detail: Mehr Treibhausgase können in Deutschland zu einer mittleren Erwärmung führen, die im Jahr 2100 — abhängig von der Höhe zukünftiger Treibhausgasemissionen — zwischen 2,5°C und 3,5°C liegt (Abbildung 4, oben). Die Entwicklung der jährlichen Niederschlagssummen zeigt eine ausgeprägte dekadische Variabilität, jedoch keinen generellen Trend (Abbildung 4, unten).

Diese Erwärmung wird sich saisonal und regional unterschiedlich stark ausprägen. Am stärksten dürften sich der Süden und Südosten Deutschlands im Winter erwärmen. Bis zum Jahr 2100 könnten die Winter hier um mehr als 4°C wärmer werden als im Zeitraum 1961 bis 1990.

Gleichzeitig könnten in Zukunft — im Vergleich zum Zeitraum 1961 bis 1990 — die sommerlichen Niederschläge großflächig abnehmen. Besonders stark gehen in den Simulationen die Sommerniederschläge in Süd- und Südwest-Deutschland sowie in Nordost-Deutschland zurück. Hier könnte es bis zum Ende dieses Jahrhunderts im Vergleich zu heute ein Minus von bis zu 30 Prozent bei den Sommerniederschlägen geben. Im Gegensatz hierzu könnte im Winter ganz Deutschland feuchter werden. Vor allem in den Mittelgebirgen Süd- und Südwest-Deutschlands ist über ein Drittel mehr Niederschlag zu erwarten als heute. Blickt man zum deutschen Küstenraum, so fällt auf, dass bis zum Jahr 2100 die Erwärmung der Ostseeküste mit 2,8°C etwas stärker sein könnte als die der Nordseeküste (2,5°C). Obwohl sich an beiden Küsten die jährliche Niederschlagsmenge nicht ändert, dürfte den Touristen gefallen, dass es im Sommer bis zu 25 Prozent weniger regnen könnte. Im Winter gibt es jedoch bis zu 30 Prozent mehr Niederschlag.

Wegen gleichzeitig steigender Wintertemperaturen in den Alpen — bis zum Ende des Jahrhunderts könnten es mehr als 4°C sein — wird der Niederschlag häufiger als Regen denn als Schnee fallen. Fiel in der zweiten Hälfte des 20. Jahrhunderts dort im Jahr etwa ein Drittel des Gesamtniederschlags als Schnee, könnte es bis Ende des 21. Jahrhunderts nur noch ein Sechstel sein. Diese Veränderungen haben zur Folge, dass sich die Anzahl der Schneetage pro Jahr reduziert, und zwar stärker in niedrigen Regionen wie z. B. Garmisch-Partenkirchen und Mittenwald, für die Abnahmen um deutlich mehr als die Hälfte möglich sein können. In den höheren Regionen wie Zermatt und St. Moritz wird jedoch nur eine Reduktion um ca. ein Drittel berechnet.

Bis zum Ende des 21. Jahrhunderts könnten daher die schneebedeckten Flächen im Alpenraum sehr stark schrumpfen, wenn die Erwärmung stark zunimmt (z.B. > 4°C). Doch auch schon bei einer Temperaturzunahme von 3°C, wie sie bis zur Mitte des 21. Jahrhunderts simuliert wird, können sehr große schneebedeckte Flächen verschwinden, die heute noch als schneesicher gelten (Abbildung 5).

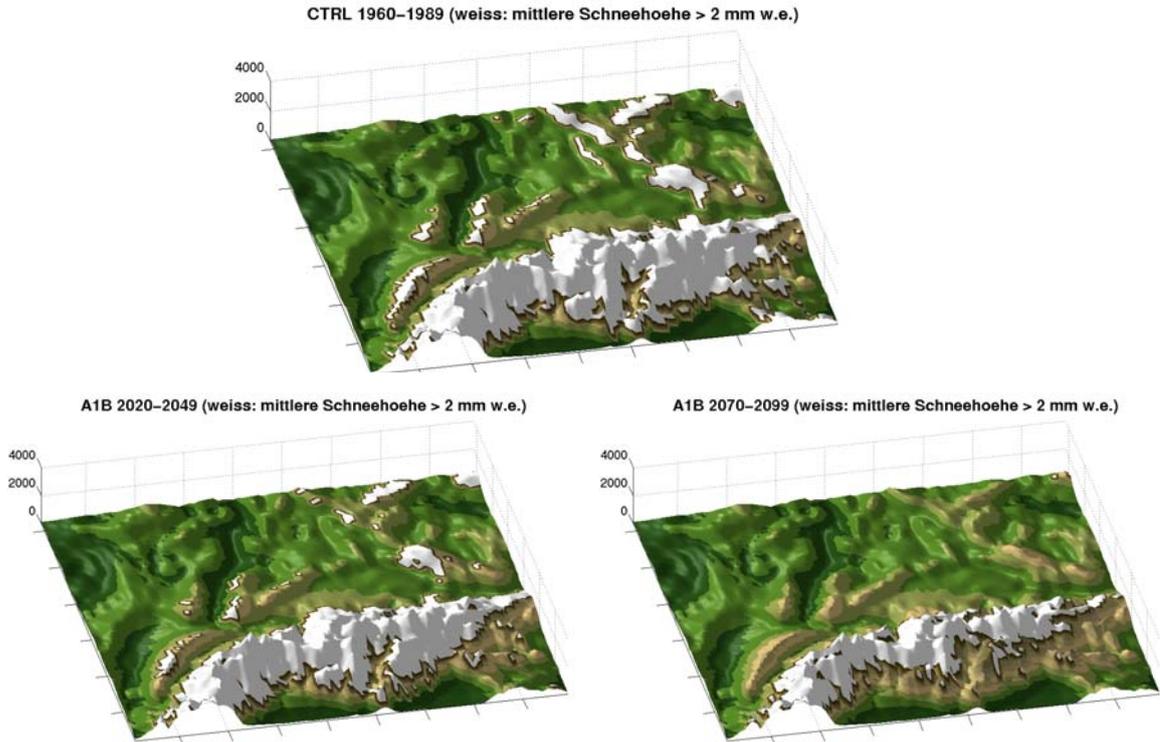


Abb. 5: Flächen im Alpenraum mit mittleren Schneehöhen $> 2\text{mm}$ Wasseräquivalent (weiß) als 30-jährige Mittel nach dem A1B- Szenario.

Diese schnellen und tiefgreifenden Veränderungen des Klimas in Deutschland können gravierende Folgen für die Menschen und die Umwelt haben. Die Schadenspotentiale extremer Wetterereignisse wie Hitzewellen, Starkniederschläge und Stürme sind oftmals noch wesentlich größer als jene der schleichenden Klimaänderungen. Deswegen sind zurzeit am MPI-M detaillierte Analysen der Klimaszenarien in Arbeit, um Aussagen zur Häufigkeit und Stärke künftiger Extremereignisse machen zu können.

Abbildung 6 zeigt hierzu eine zu erwartende Veränderung der Anzahl an Sommertageperioden (zusammenhängende Tage mit einer Maximaltemperatur $> 25^\circ\text{C}$) für das SRES B2 Emissionsszenario für drei europäische Einzugsgebiete (Nordeuropa: Lu-leaelven, Mitteleuropa: Rhein, Südeuropa: Ebro). Hiernach ist in allen Gebieten für den Zeitraum 2071-2100 gegenüber dem Referenzzeitraum 1961-1990 mit einer deutlichen Häufigkeitszunahme insbesondere der langen Perioden zu rechnen.

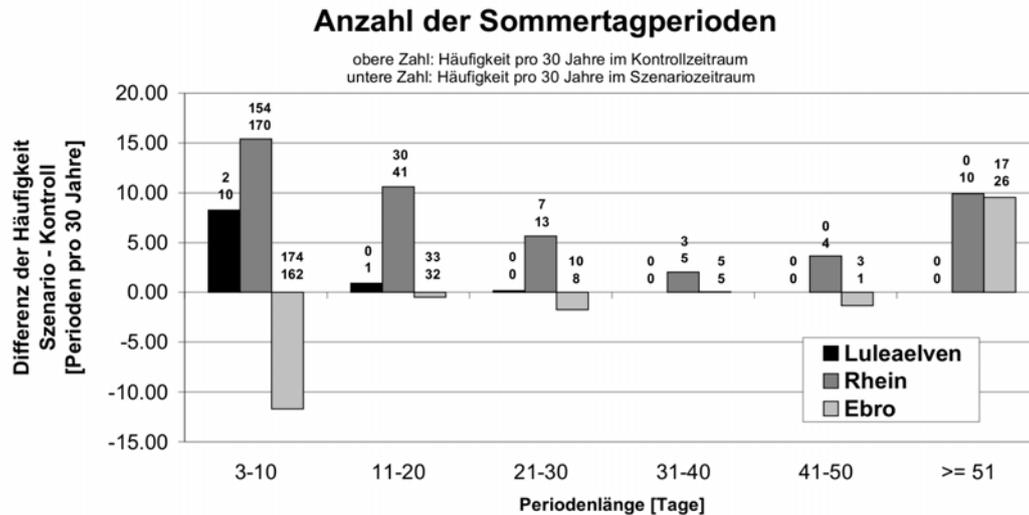


Abb.6: Zukünftige Veränderung der Anzahl von Sommertagperioden (zusammenhängende Tage mit einer Maximaltemperatur > 25°C) in drei europäischen Einzugsgebieten für das SRES B2 Emissionsszenario.

Im Einzugsgebiet des Luleaelven steigt die Häufigkeit von Perioden der Längen 3-10 Tage (11-20 Tage) von 2 auf 10 (von 0 auf 1) Ereignisse pro 30 Jahre. Sommertagperioden mit einer Länge von mehr als 20 Tagen treten im „kalten“ Skandinavien auch im Klimaszenario nicht auf.

Anders verhält es sich im Rhein- und Ebroeinzugsgebiet. Im Rhein zeigen sich im Klimaszenario Periodenlängen > 40 Tage. Derartige lange und heiße Zeiträume treten im berechneten Kontrollklima, das die heutigen klimatischen Bedingungen repräsentiert, nicht auf. Auch im Ebroeinzugsgebiet steigt die Anzahl langer, heißer Perioden mit Längen > 51 Tage deutlich von 17 auf 26 Ereignisse pro 30 Jahre. Hier muss in der Zukunft also fast jedes Jahr mit langen Hitzeperioden gerechnet werden.

Die beschriebenen Veränderungen in Anzahl und Länge von Hitzeperioden werden unweigerlich mit einer erhöhten Auftretswahrscheinlichkeit von Niedrigwasserereignissen verbunden sein. Für den Pegel Kaub (Rhein) ergaben erste Analysen aus der klimatologischen Wasserbilanz für das B2 Emissionsszenario hierzu eine deutliche Häufigkeitszunahme von möglichen Niedrigwasserperioden (definiert als zusammenhängende Tage mit einem mittleren Abfluss < 750 m³/s) bis zu 21 Tagen Länge.

4. Schlusswort

Alle oben erwähnten Ergebnisse entstammen je einer Simulation pro Emissionsszenario. Um die natürliche Variabilität berücksichtigen zu können, müssten viele dieser möglichen Realisationen eines Emissionsszenarios berechnet werden. Dies ist auch geplant und wird dann verwendet, um die Robustheit der Klimaänderungsmuster zu analysieren.

5. Danksagung

Wir danken Katharina Bülow und Stefan Hagemann vom Max-Planck-Institut für Meteorologie in Hamburg, die zur Durchführung der Modellrechnungen, der Erstellung der Abbildungen und Auswertungen der REMO- Ergebnisse beigetragen haben.

6. Literatur

- Frei C., Christensen, J.H., Deque, M., Jacob, D., Jones, R.G., und Vidale P.L.: 2003, 'Daily precipitation statistics in regional climate models: Evaluation and inter-comparison for the European Alps', *J. Geophys. Res.* 108 (D3), 4124, doi:10.1029/2002JD002287.
- Jacob, D.: 2001, 'A note to the simulation of the annual and inter-annual variability of the water budget over the Baltic Sea drainage basin', *Meteorol Atmos Phys* 77, 61-73.
- Jacob, D., Bärring, L., Christensen, O.B., Christensen, J.H., Hagemann, S., Hirschi, M., Kjellström, E., Lenderink, G., Rockel, B., Schär, C., Seneviratne, S.I., Somot, S., van Ulden, A., and van den Hurk, B.: 2007, 'An inter-comparison of regional climate models for Europe: Design of the experiments and model performance', PRUDENCE Special Issue, *Climatic Change*, Vol.81, Supplement 1, May 2007
- Jacob, D., Goettel, H., Lorenz, Ph.: 2007, Hochaufgelöste regionale Klimaszenarien für Deutschland, Österreich und die Schweiz, in DMG Mmitteilungen, 01/2007, 10-12, www.dmg-ev.de
- Nakicenovic, N., Alcamo, J., Davis, G., de Vries, B., Fenhann, J., Gaffin, S., Gregory, K., Grübler, A., Jung, T.Y., Kram, T., La Rovere, E.L., Michaelis, L., Mori, S., Morita, T., Pepper, W., Pitcher, H., Price, L., Raihi, K., Roehrl, A., Rogner, H-H., Sankovski, A., Schlesinger, M., Shukla, P., Smith, S., Swart, R., van Rooijen, S., Victor, N., and Dadi, Z.: 2000, 'IPCC Special Report on Emissions Scenarios', Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.

Modellierung hydrologischer Auswirkungen von Klimaänderungen

Lucas Menzel

Zusammenfassung

Dieser Beitrag befaßt sich mit den hydrologischen Konsequenzen des globalen Klimawandels und diskutiert Ergebnisse gekoppelter, hydro-klimatischer Modellstudien auf unterschiedlichen räumlichen Skalen. Da eine weitere Erhöhung der globalen Mitteltemperatur als sicher gilt, und sich der Temperaturanstieg in allen Regionen der Erde fortsetzt, wird hier vor allem die künftige Entwicklung des Niederschlages und seiner hydrologischen Konsequenzen (Wasserverfügbarkeit, Abflüsse) betrachtet. Für Deutschland werden anhand zweier Fallstudien (Neckar- bzw. Rheingebiet und Weiße Elster- bzw. Elbegebiet) die unterschiedlichen Tendenzen bezüglich Niederschlags- und Abflußentwicklung aufgezeigt. Es werden ferner Probleme beim Nachweis hydrologischer Änderungen angesprochen sowie die hohen Unsicherheiten erläutert, die sich im Zusammenhang mit dem zukünftigen Auftreten und der Identifizierbarkeit von Extremen ergeben.

1. Einleitung

Klimaänderungen treten auf seit die Erde existiert, und das wird sich auch in Zukunft so fortsetzen. Unser Klima ist also nicht statisch, sondern in einem ständigen Wandel begriffen. Hinzu kommt die hohe natürliche Variabilität des Klimas: Selbst während relativ kurzer Zeiträume im Bereich weniger Jahrzehnte zeigen sich auch an gleichen Orten fortwährend Schwankungen z. B. der mittleren Jahrestemperaturen oder der Jahresniederschläge.

Für Klimaänderungen gibt es vielfältige Ursachen. Veränderungen der Erdbahnparameter und der Sonnenaktivität beeinflussen das globale Klima genauso wie Vulkanismus, Oszillationen bei der Ausdehnung von Eisflächen oder in der Intensität von Meeresströmungen. Seit Beginn des Industriezeitalters ist jedoch ein Temperaturanstieg beobachtet worden, dessen Ausmaß nur durch die Aktivitäten des Menschen – insbesondere die Emission von Treibhausgasen – erklärt werden kann.

Langjährige Messungen belegen, daß die mittlere Oberflächentemperatur der Erde im 20. Jahrhundert um etwa 0,7 °C angestiegen ist (im gleichen Zeitraum hat die Mitteltemperatur in Deutschland um mehr als 1 °C zugenommen), und dieser Trend verstärkt sich in jüngerer Zeit zunehmend. Dieser rasche Anstieg ist in der Klimageschichte mindestens der letzten 1000 Jahre ohne Beispiel.

Im 20. Jahrhundert nahmen die Niederschläge über den Kontinenten der mittleren bis hohen Breiten der Nordhemisphäre zum Teil deutlich zu, teilweise im Gefolge intensiverer Niederschlagsereignisse. Schnee- und Eisbedeckung nahmen im Mittel ab und der Meeresspiegel ist angestiegen.

Es wird als nahezu sicher angesehen, daß sich die genannten Trends zukünftig fortsetzen und sogar noch verstärken werden. Der Zwischenstaatliche Ausschuß für Klimaänderung (IPCC) geht von einer Zunahme der globalen Mitteltemperatur um ca. 2 °C bis ca. 5 °C bis zum Jahre 2100 aus. Für Deutschland wird eine weitere Erwärmung bis zum Jahre 2050 um 1,5 °C als realistisch angesehen.

2. Szenarienbegriff und Anwendung von Szenarien

Zur Erstellung von Szenarien werden Vorstellungen zu zukünftigen Veränderungen einzelner Entwicklungsfaktoren (sogenannter „Treiberkräfte“, wie z. B. die Bevölkerungsentwicklung, der wirtschaftliche und technologische Wandel) zu möglichst plausiblen Beschreibungen der Zukunft zusammengefaßt. Szenarien sind daher keine Prognosen, sondern können am ehesten als „Wenn-Dann“-Entwicklungen bezeichnet werden. Diese deskriptiven Szenarien werden für die Klimawirkungsforschung dann in quantitative Szenarien übersetzt – am bekanntesten sind die vom IPCC definierten Szenarien. So benötigen z. B. Klimamodelle Szenarien zur künftigen Entwicklung atmosphärischer Treibhausgaskonzentrationen als Eingangsgrößen (Abbildung 1).

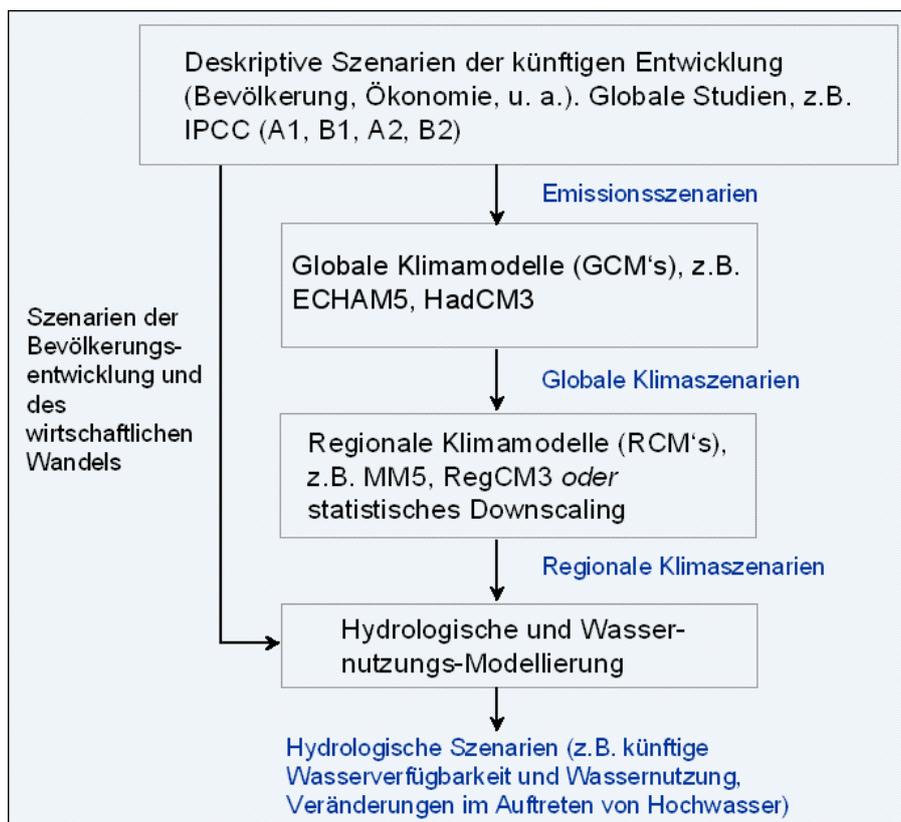


Abb. 1: Übersicht zur Entwicklung und Anwendung von Szenarien. Die hydrologische Modellierung steht am Ende einer Reihe vorgeschalteter Modellanwendungen, die jede für sich mit Unsicherheiten behaftet sind. Die Wassernutzungs-Modellierung berücksichtigt als Treiberkräfte auch demographische und wirtschaftliche Daten, die häufig direkt von den globalen Studien, z. B. als einzelne Länderwerte, direkt übernommen werden können

Um regionalklimatische und hydrologische Aussagen für kommende Zeiträume treffen zu können, werden die Ergebnisse Globaler Klimamodelle entweder über Regionale Klimamodelle (dynamisches Downscaling) oder über statistische Verfahren (statistisches Downscaling) in geeignete räumliche Skalen überführt (BÜRGER 2002, WERNER & GERSTENGARBE, 1997). Damit entstehen jedoch oftmals große Unsicherheiten, weil sich die Fehler des globa-

len Klimamodells, die u. a. durch dessen grobe räumliche Auflösung gegeben sind, zu denen des Regionalisierungsansatzes hinzuaddieren (Abbildung 1). Eine Übersicht zu verschiedenen Verfahren der regionalen Klimamodellierung ist in WERNER & GERSTENGARBE (2007) zu finden.

3. Probleme beim Nachweis hydrologischer Veränderungen

Im Gegensatz zu Veränderungen bei den leicht meßbaren Temperaturen sind Niederschlagstrends (aufgrund der hohen natürlichen Variabilität des Niederschlages) sowie insbesondere Abflußänderungen nur schwer nachzuweisen. Beispielsweise lassen sich regionale Trends in der Entwicklung mittlerer Abflüsse oft nicht erkennen, weil allein die unterschiedlichen natürlichen Eigenschaften der untersuchten Einzugsgebiete (Geologie, Böden, Topographie) den Klimaeinfluß zum Teil deutlich überlagern können. Direkte Einwirkungen des Menschen in die Flußläufe und deren Einzugsgebiete, insbesondere Flußbegradigungen und Eindeichungen oder Änderungen in der Landnutzung, übten bislang häufig stärkeren Einfluß auf die hydrologischen Regimes aus als klimatische Veränderungen. Somit besteht das zusätzliche Problem, aus einem möglicherweise identifizierbaren (statistisch eindeutig nachweisbaren) Abflußtrend den Einfluß des Klimawandels zu separieren und ihn eindeutig zu quantifizieren, was bis heute kaum möglich ist. Ein Beispiel ist in der Abbildung 2 dargestellt.

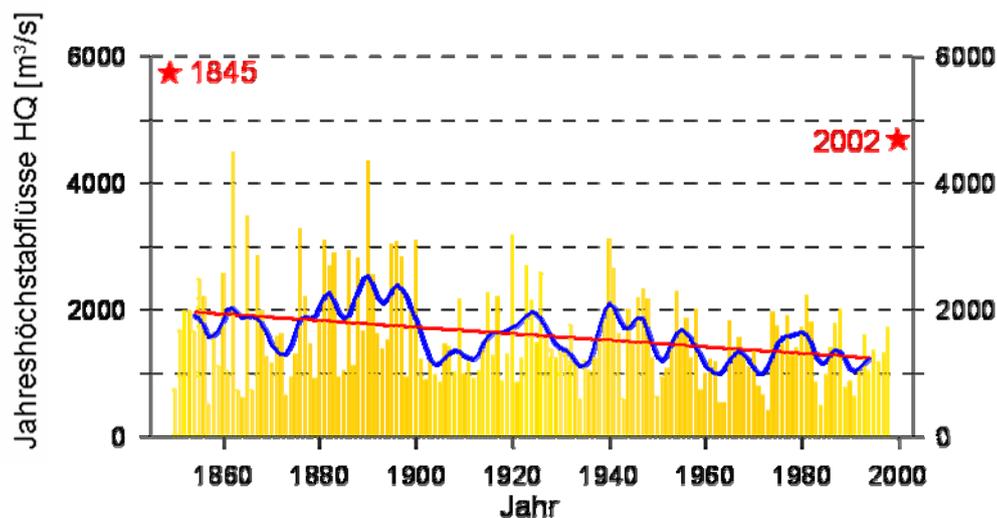


Abb. 2: Jahreshöchstwerte gemessener Abflüsse (gelbe Säulen) am Pegel Dresden / Elbe für die Zeitreihe von 1850-2000. Dargestellt sind auch die über jeweils 10 Jahre tiefpaßgefilterten Werte (blaue Kurve) sowie der lineare Trend (rote Linie). Zusätzlich eingetragen und als Sterne hervorgehoben sind die beiden höchsten, bisher an der Elbe aufgetretenen Hochwässer (Jahre 1845 und 2002)

Die Jahreshöchstwerte des Abflusses am Pegel Dresden/Elbe zeigen über die Zeitreihe 1850-2000 einen abnehmenden Trend. Dies könnte auf ein Klimasignal hindeuten, da bekannt ist, daß sich die Häufigkeit winterlicher Hochwässer in der Elbe deutlich verringert hat, und dies unter anderem auf einen Rückgang der winterlichen Eisbedeckung bzw. dem Auf-

treten von Eisstauereignissen (Zunahme winterlicher Temperaturen) zurückgeführt werden kann. Durch Flußlaufverkürzungen und Begradigungen hat sich jedoch auch die Fließgeschwindigkeit erhöht, was die Ausbildung einer winterlichen Eisdecke zumindest verzögert. Durch Änderungen im Profil des Flusses, beispielsweise durch Uferbebauungen, hat sich auch die Durchgängigkeit für Hochwässer verändert. So betrug der maximale Wasserstand des Extremhochwassers im Jahre 1845 8,8 Meter, bei einem Maximalabfluß von knapp 6000 m³/s (Abbildung 2). Dagegen war der Maximalabfluß des „Jahrhunderthochwassers“ 2002 deutlich niedriger als der des Jahres 1845, jedoch erreichte der maximale Wasserstand mit 9,4 Metern einen Höchststand.

4. Klimaänderung und extreme Ereignisse

Erhöht sich die Mitteltemperatur des Klimasystems, werden bislang als selten eingestufte Extreme mit größerer Häufigkeit auftreten. Die höhere Aufnahmefähigkeit der Atmosphäre für Wasserdampf bei erhöhten Temperaturen kann zu einer Beschleunigung des hydrologischen Kreislaufs und zu höheren Niederschlagsintensitäten führen. Hochwasser könnten beispielsweise durch das schnellere Abschmelzen der winterlichen Schneebedeckung im Gebirge, bei gleichzeitigem Auftreten höherer und intensiverer Winterniederschläge zunehmen.

Es ist jedoch darauf hinzuweisen, daß Extremereignisse eher ungeeignete Indikatoren für die globale Klimaänderung sind. Der Nachweis von Trends bei Extremereignissen (z. B. Hochwasser oder Dürre) stößt aufgrund der Seltenheit der Ereignisse (Abbildung 2) und der damit verbundenen statistischen Unsicherheiten an Grenzen. Das gilt besonders für Auswertungen im Zusammenhang mit Klimaszenarien, die für die Extremwertanalyse nach wie vor mit sehr großen Unsicherheiten behaftet sind.

5. Zur Bedeutung der Verdunstung

Der Einfluß der Verdunstung auf den Wasser- und Energiehaushalt unter sich ändernden klimatischen Rahmenbedingungen wird nach wie vor nicht nur unterschätzt, sondern häufig auch falsch bewertet. So wird im allgemeinen davon ausgegangen, daß mit steigenden Temperaturen auch die Verdunstung ansteigt. Dies trifft tatsächlich aber nur auf den Verdunstungsanspruch der Atmosphäre, also die potentielle Verdunstung zu. Der Verlauf der realen Verdunstung ist aber stark von der für die Verdunstungsprozesse zur Verfügung stehenden Bodenfeuchte abhängig. Eine Zunahme der potentiellen Verdunstung bei gleichzeitig abnehmenden Niederschlägen wird also eine Reduzierung der realen Verdunstung zur Folge haben, was die Diskrepanz zwischen potentieller und realer Verdunstung und damit die Aridität der betroffenen Region erhöht. MENZEL et al. (2003) stellen dies anhand zweier gegensätzlicher Entwicklungen im Westen und Osten Deutschlands heraus. Steigt die Aridität an, wirkt sich dies in einer verringerten Abflußbildung aus, und die eigentlich für die Verdunstung zur Verfügung stehende Energie wird in zusätzliche (sensible) Wärme umgesetzt, welche eine weitere Temperaturerhöhung zur Folge hat. In Gebieten, die auch künftig gut mit Wasser versorgt sein werden, wird die Entwicklung der realen Verdunstung parallel zur potentiellen Verdunstung verlaufen, und die Abhängigkeit der Abflußbildung von den Verdunstungsprozessen ist weniger augenfällig. Daß die globale Erwärmung und deren Rückkopplungen

zur Verdunstung tatsächlich wesentlich komplexer ausfallen als hier diskutiert, macht LI-NACRE (2004) deutlich. So spielen weitere Faktoren, wie z.B. die Entwicklung der Taupunkttemperatur, des Sättigungsdefizites der Luft, der kurzwelligen Einstrahlung bzw. der Bewölkung eine wesentliche Rolle bei der Modifizierung der Verdunstung. Die meisten der hier angeführten Parameter und die damit zusammenhängenden, physikalischen Prozesse bleiben jedoch in der hydrologischen Klimawirkungsforschung nach wie vor unbeachtet.

6. Hydrologische Auswirkungen der Klimaänderung auf globaler Skala

Die folgende Übersicht faßt die Ergebnisse zahlreicher, modellgestützter Studien zur Abschätzung des zukünftigen Klimas (IPCC, 2007) und deren hydrologische Konsequenzen zusammen:

- Die täglichen Temperaturamplituden (Tag-Nacht-Unterschiede) auf den Landflächen verringern sich in den meisten Jahreszeiten und in der Mehrzahl der untersuchten Regionen
- Es treten höhere Maximaltemperaturen, mehr heiße Tage und häufigere Hitzewellen über fast allen Landmassen der Erde auf
- Besonders niedrige Temperaturminima werden dagegen seltener
- Die größten Temperaturzunahmen ergeben sich in den hohen Breiten der Nordhalbkugel im Spätherbst bzw. Winter
- Der globale mittlere Meeresspiegel steigt von 1990 bis 2100 zwischen 9 cm und 88 cm an. Hauptursache ist die thermische Ausdehnung der Ozeane
- Gemäß Modellstudien werden Schnee- und Meereisbedeckung auf der Nordhalbkugel weiter abnehmen und alpine Gletscher intensiver abschmelzen
- Durch die erhöhte Wasserdampf-Aufnahmefähigkeit der wärmeren Atmosphäre wird sich der hydrologische Kreislauf beschleunigen
- Höhere Winter-Niederschläge treten in den mittleren (z. B. Mitteleuropa) und höheren Breiten auf (siehe auch Abbildung 3)
- Vermutete Zunahme intensiver Niederschlagsereignisse (Sommer und Winter) in vielen Gegenden der Erde
- Höhere Klimavariabilität und allgemein größere Häufigkeit von Extremereignissen

Nahezu als sicher kann gelten, daß die weitere Temperaturzunahme in vielen Regionen der Erde zu einem höheren Regenanteil an den Winterniederschlägen führt, was sich auf das zeitliche Auftreten und die Höhe von Abflußspitzen bzw. von Hochwasserereignissen auswirkt, insbesondere in den kontinentalen Klimazonen bzw. in den Gebirgen und ihren Vorländern. Die Frühjahrsschmelze wird zeitlich vorverlegt oder findet mangels Schneebedeckung gar nicht mehr statt. Winterliche Abflüsse erhöhen sich somit in den betroffenen Regionen, und die bislang vergleichsweise ausgeglichenen Abflußregimes der schneebeeinflussten Fließgewässer werden ausgeprägte jahreszeitliche Unterschiede zeigen. Weil bereits heute schätzungsweise eine Milliarde Menschen in Flußgebieten leben, deren Wasserverfügbarkeit von Schmelzwässern gesteuert wird, die den großen Gebirgen der Erde entstammen (z. B. Alpen, Anden, Himalaya, Hindukusch), werden die Konsequenzen für die Wasserversorgung eines großen Teils der (wachsenden) Erdbevölkerung entsprechend schwerwiegend sein (KUNDZEWICZ et al., 2008).

Der sich fortsetzende Klimawandel wird aber nicht nur die Anteile von Schneefall und Regen an den Niederschlägen verschieben. Neben Veränderungen in den jahreszeitlichen (Abbildung 3) und jährlichen Niederschlagssummen werden unter wärmeren atmosphärischen Bedingungen wahrscheinlich die Häufigkeiten und Intensitäten von Starkregenereignissen zunehmen (IPCC, 2007). Verschiedenen Szenarien zufolge werden – vereinfachend ausgedrückt – jene Regionen niederschlagsärmer, die bereits heute vergleichsweise niedrige Niederschläge aufweisen, insbesondere die niederen Mittelbreiten (z. B. Mittelmeerregion) und ganz allgemein Regionen, die den semi-ariden und ariden Klimazonen zuzuordnen sind (MENZEL et al., 2007a). Dagegen sind Zunahmen in den Niederschlagssummen in den heute schon vergleichsweise niederschlagsreichen Gebieten, z. B. der hohen Breiten, zu erwarten (Abbildung 3). Als Konsequenz aus den genannten Niederschlagsänderungen weist eine Reihe von Modellstudien darauf hin, daß die mittleren Abflüsse und Wasserverfügbarkeiten in den subtropisch-randtropischen Trockenzonen bis zur Mitte dieses Jahrhunderts um 10-30 % abnehmen, während sie in den höheren Breiten sowie in den inneren Tropen um 10-40 % zunehmen (MILLY et al., 2005) (siehe auch Abbildung 4). Noch stärkere Änderungen sind bis zum Ende dieses Jahrhunderts zu erwarten.

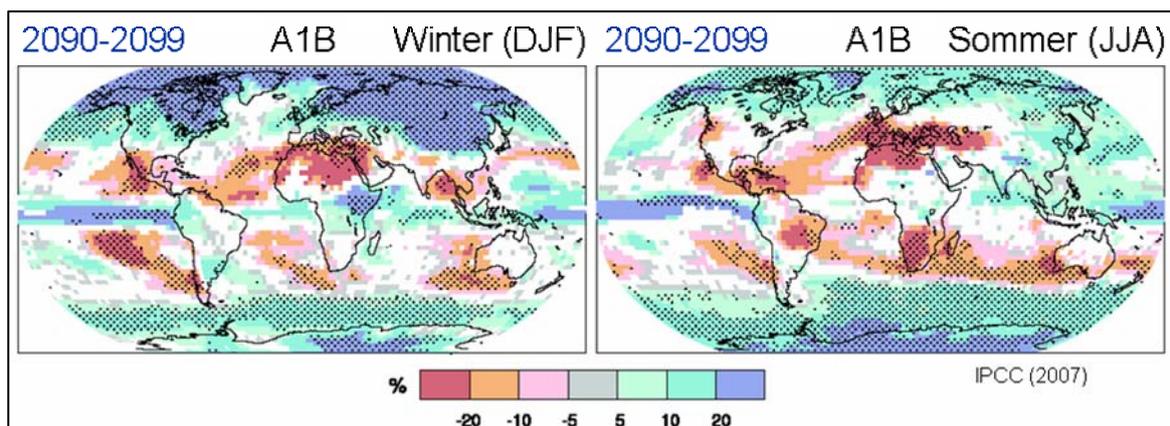


Abb. 3: Szenarien der mittleren, saisonalen Niederschlagsänderungen (links Winter: Dezember, Januar, Februar, rechts Sommer: Juni, Juli, August) für den Zeitraum 2090-2099 relativ zur Bezugsperiode 1980-1999. Die dargestellten Ergebnisse geben die Mittelwerte von unterschiedlichen Klimamodellen wieder, die mit dem IPCC-Emissionsszenarium A1B angetrieben wurden. Die gepunkteten Flächen zeigen an, daß mehr als 90 % der eingesetzten Modelle für diese Regionen die gleichen Änderungen im Vorzeichen (ansteigend / absteigend) aufweisen. Aus IPCC (2007), verändert

Die weitere Zunahme intensiver Niederschlagsereignisse ist nicht an die Veränderungen der Niederschlagssummen gekoppelt. Das heißt, daß die Anteile von Starkregen am Gesamtniederschlag auch in jenen Regionen zunehmen können, die allgemein trockener werden. Dies kann bereits heute durch entsprechende Trends in historischen Zeitreihen gemessener Niederschläge bestätigt werden. Daher kann davon ausgegangen werden, daß sich die Häufigkeit von Hochwässern in vielen Regionen der Erde erhöhen wird, insbesondere in den niederschlagsreichen mittleren und hohen Breiten. In Trockenregionen kann das dazu füh-

ren, daß neben lang anhaltenden Dürreereignissen infolge Rückgangs der Niederschlagssummen auch vermehrt kurzzeitige Hochwässer auftreten, weil die wenigen Niederschläge mit höherer Intensität fallen.

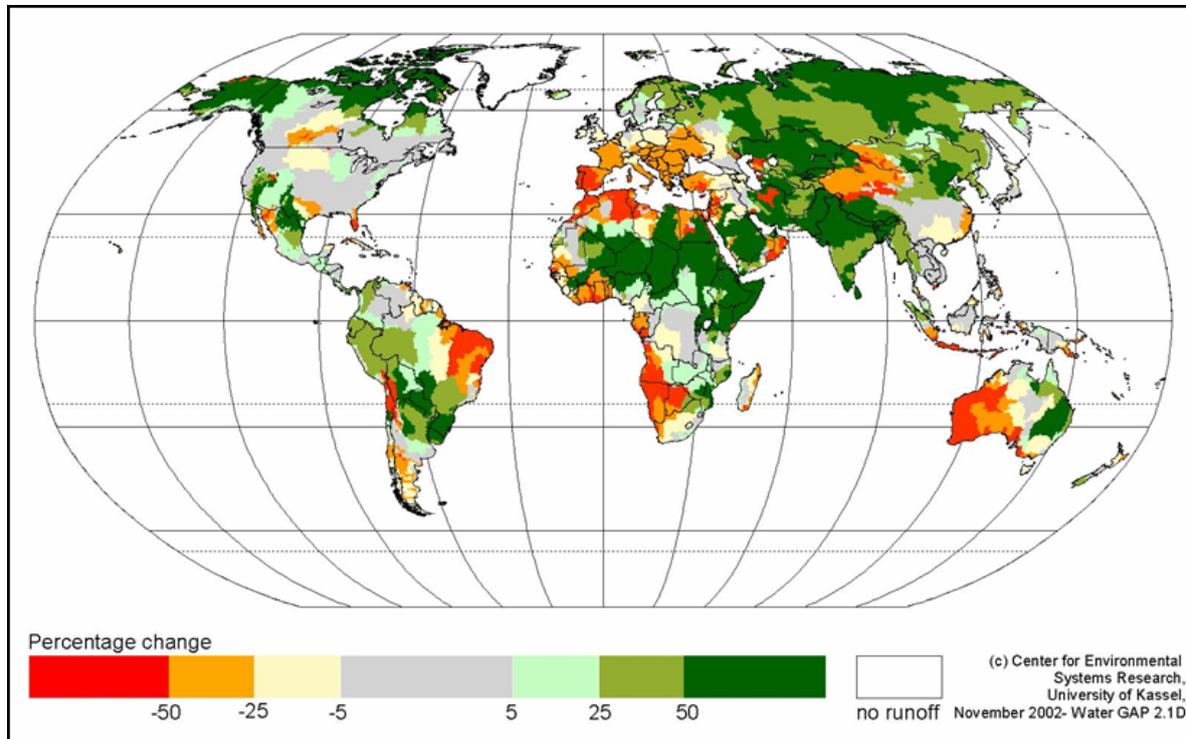


Abb. 4: Modellerte Änderung der Wasserverfügbarkeit (Abfluß und Grundwasserneubildung) in Prozent zwischen der Bezugsperiode 1961-1990 und dem Szenarienzeitraum um 2050. Die Veränderungen sind für einzelne, große Flußgebiete der Erde dargestellt. Zu beachten ist, daß die prognostizierte Erhöhung der Wasserverfügbarkeit in heute vergleichsweise trockenen Regionen (z. B. Teile Nordafrikas, des Westens der USA und Australiens) absolut gesehen keine wesentliche Steigerung der Wasserverfügbarkeit bedeutet. Ergebnis einer Simulation mit dem globalen Wassermodell WaterGAP, das mit Klimadaten des globalen Klimamodells ECHAM4 unter Verwendung des IPCC-Szenariums A2 angetrieben wurde. Für andere Kombinationen von Emissionsszenarien und Klimamodellen können sich unterschiedliche Auswirkungen auf die simulierte Wasserverfügbarkeit ergeben. Quelle: Wissenschaftliches Zentrum für Umweltsystemforschung, Universität Kassel

Bereits heute beträgt die jährliche Ausbreitungsrate der Wüstenbildung etwa 0,5 – 0,7 %, was überwiegend auf falsche landwirtschaftliche und wasserwirtschaftliche Praktiken zurückgeführt werden muß (bei 0,5 % wird jährlich eine Fläche von 80.000 km² erfaßt). Die voraussichtliche Klimaentwicklung wird die Wüstenbildung durch Stagnation oder Abnahme der Niederschläge bei erhöhter Temperatur in vielen Trockengebieten der Erde noch verstärken.

Ein zusätzliches Problem für die Wasserverfügbarkeit dürfte künftig die zunehmende Variabilität der Niederschläge sein. Selbst in den eigentlich niederschlagsreichen Regionen der Er-

de, z. B. in Ost- und Südostasien, könnten somit die Niederschläge in den sonst eigentlich regenreichen Monaten, die für die Wasserversorgung der Bevölkerung eine große Bedeutung haben, in einzelnen Jahren entweder geringer als üblich ausfallen oder ganz ausbleiben.

7. Hydrologische Änderungen in Deutschland

Zunächst sei kurz auf veränderte Niederschlagsverhältnisse in Deutschland eingegangen, die im Laufe der letzten 100 Jahre in Deutschland beobachtet wurden:

- Im ohnehin vergleichsweise regenreichen Westen Deutschlands haben die mittleren jährlichen Niederschlagssummen zugenommen, im Südwesten teilweise um über 10 % (GERSTENGARBE & WERNER, 2007). Diese Zunahme erfolgte nahezu ausschließlich während der Herbst- und Wintermonate
- Im Gegensatz dazu wurde in den relativ trockenen Gebieten im Osten und Südosten Deutschlands ein teilweise deutlicher Rückgang der Niederschläge verzeichnet (GERSTENGARBE & WERNER, 2007). Hier macht sich vor allem die Verringerung der Sommerniederschläge bemerkbar
- In vielen Regionen Deutschlands haben sich die Niederschlagsintensitäten erhöht (Abbildung 5), auch in solchen Gebieten, in denen die Jahresmittel der Niederschläge zurückgingen

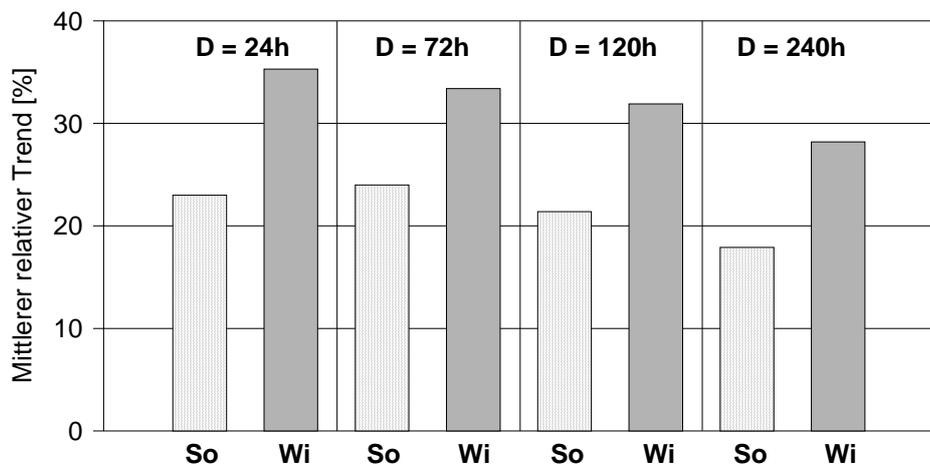


Abb. 5: Mittlere relative Trends der Entwicklung von Starkniederschlägen unterschiedlicher Dauer D in Baden-Württemberg und Bayern im Zeitraum der Jahre 1901-1999. Die Daten sind nach Sommer- (So; Mai – September) und Winter-Halbjahren (Wi; Oktober – April) getrennt. Die Auswertung basiert auf 75 Klimastationen, wobei nur die signifikanten Fälle aufgeführt sind. Daten nach ZIMMERMANN et al. (2003)

Parallel dazu traten seit den 70er Jahren des 20. Jahrhunderts vermehrt sogenannte „Jahrhunderthochwasser“ auf, beispielsweise am Rhein (1993, 1995), an der Oder (1997), der Donau (1999, 2005) sowie an Elbe und Donau (2002). Teilweise ist dies durch die höhere Häufigkeit und längere Andauer der winterlichen Westwetterlagen in West- und Mitteleuropa und der damit verbundenen, häufigeren Zufuhr von milden und feuchten Luftmassen zu er-

klären. Weil sommerliche, hochwasserauslösende – ebenso wie dürregefährliche – Wetterlagen im Vergleich dazu relativ selten bei uns vorkommen, können derzeit noch keine statistisch gesicherten Aussagen zu Veränderungen in deren Auftreten getroffen werden. Es sind außerdem die in Kapitel 4 vorgebrachten Einschränkungen bei der Interpretation hydrologischer Extreme zu beachten.

Im vorangegangenen Kapitel wurde der sich verschärfende, thermisch-hygrische Gegensatz zwischen den trockenen, rand- und subtropischen Regionen (niedere Breiten) und den humiden Gebieten der hohen Mittelbreiten und hohen Breiten herausgestellt (Abbildung 3). Unterschiedliche Kombinationen von Emissionsszenarien und Klimamodellen zeigen für diese Regionen häufig übereinstimmende Entwicklungen, auch wenn sich die prognostizierten Änderungen betragsmäßig unterscheiden und sie unterschiedliche räumliche Ausdehnungen haben. Dagegen ist die mögliche zukünftige Entwicklung in einem Übergangsbereich, insbesondere in den mittleren Breiten (z. B. in Mittel- und Osteuropa), offenbar mit deutlich größeren Unsicherheiten behaftet, was häufig zu widersprüchlichen Szenarien führt, je nachdem, welches Klimamodell von welchem Emissionsszenarium angetrieben wird. Dies wird auch bei der Betrachtung der beiden Teilgrafiken von Abbildung 3 deutlich, in denen Mitteleuropa jeweils in Bereichen vergleichsweise schwacher, saisonaler Niederschlagsänderungen liegt. Für Untersuchungen zu den zukünftigen Klimabedingungen und deren hydrologischen Konsequenzen in den Mittelbreiten ist es außerdem häufig erforderlich, die Auswertungen nach einzelnen Jahreszeiten zu verfeinern, da sich z. B. zwischen Winter- und Sommerhalbjahren durchaus sehr gegensätzliche Entwicklungen ergeben können (Abbildung 3). Das erhöht gleichzeitig die Unsicherheiten, genauso wie die Analyse möglicher Entwicklungen in Gebieten, die im Vergleich zur räumlichen Auflösung von Klimamodellen in ihrer Ausdehnung relativ eng umgrenzt sind (WERNER & GERSTENGARBE, 2007). Alle diese Einschränkungen erschweren Aussagen zu möglichen hydrologischen Konsequenzen einer Klimaänderung in Deutschland bzw. in einem einzelnen Bundesland oder Flußgebiet. Hinzu kommt, daß die derzeitigen und vermutlich auch die zukünftigen klimatischen Bedingungen innerhalb Deutschlands sehr unterschiedlich sind bzw. sein werden, so daß die Wiedergabe von Unterschieden in der regionalen, hydro-klimatischen Ausprägung nur mit Hilfe von regionalen Klimamodellen bzw. geeigneten Downscaling-Verfahren möglich ist. Diese zusätzliche Komplexitätsebene erhöht jedoch gleichzeitig die Unsicherheit der Aussagen (siehe Kapitel 2).

Die Ergebnisse mehrerer Studien zu künftigen Auswirkungen der Klimaänderung in Deutschland können wie folgt zusammengefaßt werden:

- Die weitere Temperaturzunahme erhöht die Wahrscheinlichkeit von Hitzewellen in ganz Deutschland, also Ereignissen, die bislang eine untergeordnete Rolle spielten
- Niedrigere Sommerniederschläge und das vermehrte Auftreten von Trockenperioden mit Wassermangel (landwirtschaftliche und hydrologische Dürre)
- Häufigeres Auftreten und längere Andauer winterlicher Westwetterlagen, verbunden mit deutlich höheren Winterniederschlägen und einer Zunahme der Sturmgefahr, insbesondere in den westlichen Gebieten Deutschlands
- Eine Zunahme intensiver Niederschläge (Abbildung 6) selbst in den Regionen und Zeiträumen, in denen von einem Rückgang der mittleren Niederschlagshöhen ausgegangen wird

- An Klimasimulationen gekoppelte, hydrologische Untersuchungen belegen, daß höhere Winterniederschläge und häufigeres Auftreten von Starkniederschlägen die Hochwassergefahr verstärken (MENZEL et al., 2006), auch wenn derartige Aussagen noch mit großen Unsicherheiten behaftet sind (siehe Kapitel 4)

Anhand zweier, repräsentativer Fallstudien sollen nun die möglichen hydrologischen Änderungen im Gefolge des Klimawandels für Deutschland dargestellt werden. Zunächst werden die Ergebnisse von Regionalstudien im Einzugsgebiet des Rheins vorgestellt. In der Abbildung 6 ist die Entwicklung winterlicher Starkniederschläge in einem Teil des Neckar-Einzugsgebietes dargestellt.

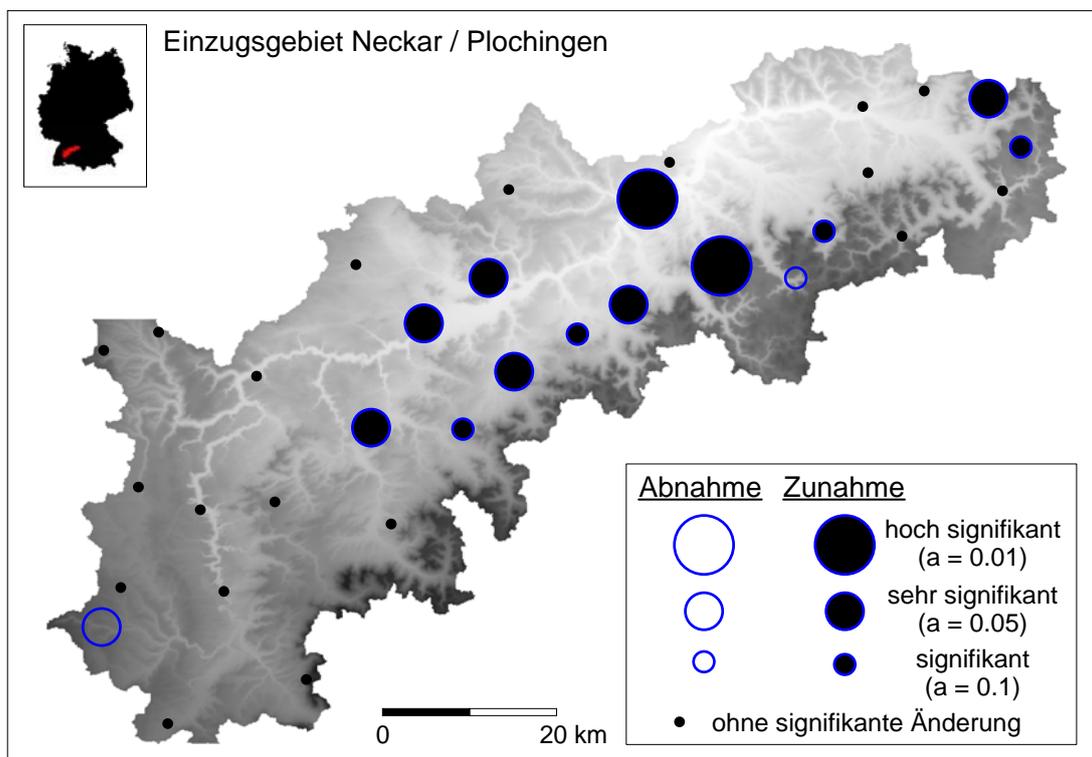


Abb. 6: Veränderungen in der Häufigkeit von Starkniederschlägen in den Winterhalbjahren der Periode 2021-2050 gegenüber den Winterhalbjahren des Bezugszeitraumes 1961-1990 für das Flußgebiet des Neckars bis zum Pegel Plochingen. Die stationsbezogenen Szenarien beruhen auf dem statistischen Downscaling-Ansatz STAR (ORLOWSKY et al., 2007), unter Verwendung des Temperatursignals aus dem Simulationslauf des Globalen Klimamodells ECHAM4 mit dem IPCC A1 Emissionsszenarium, wobei nur die „wahrscheinlichsten“ Realisierungen ausgewählt wurden. Die Untersuchungen zur statistischen Signifikanz der Änderungen erfolgten auf unterschiedlichen Signifikanzniveaus α . Für die Definition von Starkniederschlägen wurde das jeweilige Niederschlagsintervall ab dem 99. Perzentil festgelegt (MENZEL et al., 2003)

Dem Szenarium zufolge würden sich die Starkniederschläge in den nächsten Dekaden zumindest in Teilen des Untersuchungsgebietes deutlich erhöhen (MENZEL et al., 2003). Dies

bedeutete eine Fortsetzung bereits beobachteter Trends. Für weitere, mit der gleichen Methodik ausgewertete Flußgebiete Deutschlands ergeben sich vergleichbare Resultate. Für den westlichen Teil Deutschlands wird allgemein von einer (weiteren) Zunahme der Winterniederschlagssummen ausgegangen (MENZEL et al., 2003). In Abbildung 7 ist dies beispielhaft für das obere Neckar-Einzugsgebiet dargestellt. Gleichzeitig soll anhand dieser Abbildung gezeigt werden, daß die Bandbreite möglicher Szenarien groß und damit die Unsicherheit der Aussagen hoch ist. Sowohl die Zunahme der winterlichen Niederschlagssummen als auch die Erhöhung der Niederschlagsintensitäten hätten erhebliche Konsequenzen für die Abflußregimes der Flüsse und die Hochwasserhäufigkeiten.

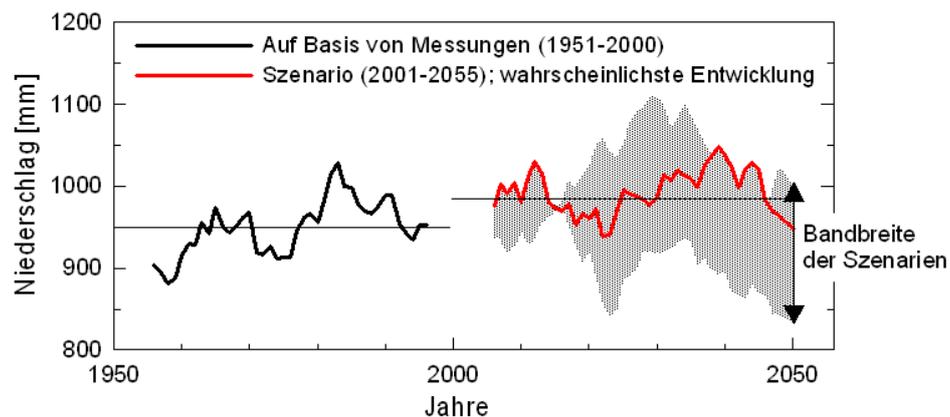


Abb. 7: Entwicklung jährlicher Gebietsniederschlags-Summen im Einzugsgebiet des Neckars bis zum Pegel Plochingen. Die schwarze Kurve basiert auf einzelnen Stationsmessungen im Zeitraum der Jahre 1951-2000, während die rote Kurve die (ebenfalls stationsbezogene) Realisierung des „wahrscheinlichsten“ Szenariums aus einem Ensemble von 100 Szenarienläufen darstellt. Die Kurven entstanden aus einer gleitenden Mittelung von jeweils 10 diskreten Jahreswerten. Die Bandbreite aller Szenarien-Realisierungen ist als grau hinterlegte Fläche dargestellt. Die beiden durchgezogenen, horizontalen Linien geben die Mittelwerte der Gebietsniederschläge über die beiden Auswerteperioden wieder. Die Szenarien-Analysen beruhen auf dem statistischen Downscaling-Verfahren STAR unter Verwendung des Temperatursignals aus dem Simulationslauf des Globalen Klimamodells ECHAM4 mit dem IPCC A1 Emissionsszenarium

In Abbildung 8 ist das Ergebnis einer Auswertung zu möglichen Entwicklungen mittlerer monatlicher Abflüsse MQ im Rhein (Pegel Köln) dargestellt. Die bereits angesprochenen Veränderungen im Niederschlag würden den Szenarien zufolge zu deutlich erhöhten MQ's führen, vor allem im Winter. Gleichzeitig wird deutlich, wie stark sich die Ergebnisse unterscheiden, wenn ein dynamisches Downscaling-Verfahren Daten von zwei unterschiedlichen Klimamodellen verwendet, selbst wenn diese vom gleichen Emissionsszenarium angetrieben werden. Wie MENZEL et al. (2006) zeigten, werden die Ergebnisse deutlich unsicherer, wenn Szenarien zum künftigen Auftreten von Hochwasser ausgewertet werden.

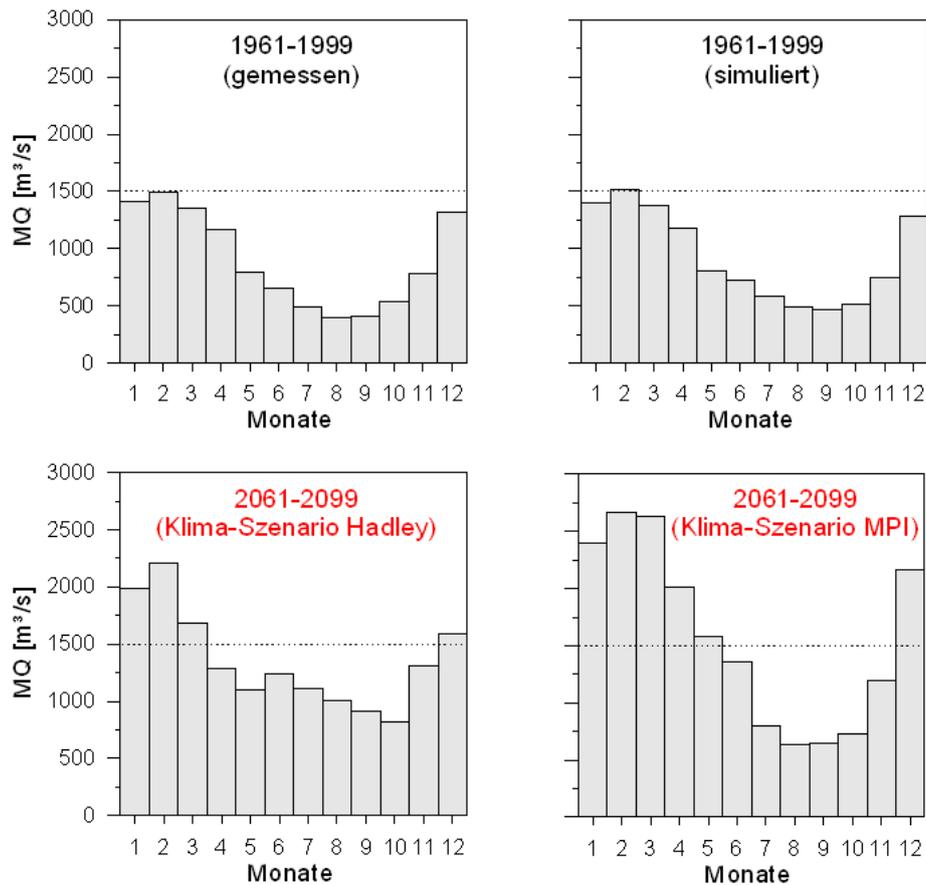


Abb. 8: Abflußregimes (mittlere monatliche Abflüsse) für den Rhein am Pegel Köln. Die obere Bildzeile gibt den Zustand für die Jahre 1961-1999 wieder, wobei die linke Teilgrafik auf gemessenen Abflüssen beruht. Die rechte Teilgrafik nutzt Daten aus der Simulation täglicher Abflüsse mit dem hydrologischen Modell HBV-D (MENZEL et al., 2006), das von täglichen Meßwerten des Niederschlages und der Temperatur (insgesamt ca. 600 Stationen) angetrieben wurde. Der Vergleich der beiden oberen Teilgrafiken soll in erster Linie die hohe Simulationsgüte des hydrologischen Modells für den Ist-Zustand verdeutlichen. Die untere Bildzeile zeigt Simulationen der Abflußregimes für den Szenarienzeitraum 2061-2099. Hier wurde HBV-D mit Klimaszenarien gerechnet, die mit dem Verfahren des Expanded Downscaling (BÜRGER, 2002) unter Verwendung der Daten zweier globaler Klimamodelle (HadCM3 – Hadley Center for Climate Prediction and Research sowie ECHAM4 – Max Planck-Institut für Meteorologie MPI) erzeugt wurden. Die globalen Klimamodelle wurden ihrerseits vom IPCC-Emissionsszenarium IS95a („business as usual“) angetrieben (siehe auch MENZEL et al., 2006)

Mehrere, voneinander unabhängige Szenarien-Studien deuten auf die hier skizzierte Entwicklung zu insgesamt feuchteren Bedingungen im Einzugsgebiet des Rheins hin, mit einer potentiellen Zunahme der Hochwassergefahr. Nicht eingegangen wurde auf die vermutete Zunahme sommerlicher Dürren infolge höherer Klimavariabilitäten und deutlich ansteigender Temperaturen (SCHÄR et al., 2004).

Im Gegensatz zu den westlichen Regionen dürften die bereits heute vergleichsweise trockenen Gebiete Mittel- und Ostdeutschlands künftig unter zunehmender Trockenheit zu leiden haben, was von einer Reihe unterschiedlicher Studien zum Klimawandel prognostiziert wird. Die möglichen, hydrologischen Auswirkungen sollen beispielhaft anhand der Weißen Elster im südlichen Teil des deutschen Elbe-Einzugsgebietes dargestellt werden. In der Abbildung 9 wird zunächst die Entwicklung der Schneedeckenandauer in diesem Mittelgebirgs-Einzugsgebiet dargestellt. Da die Zunahme der mittleren Lufttemperaturen in den kommenden Jahrzehnten als sicher gilt, dürften Szenarien zur Schneedeckenentwicklung in Deutschland belastbar sein.

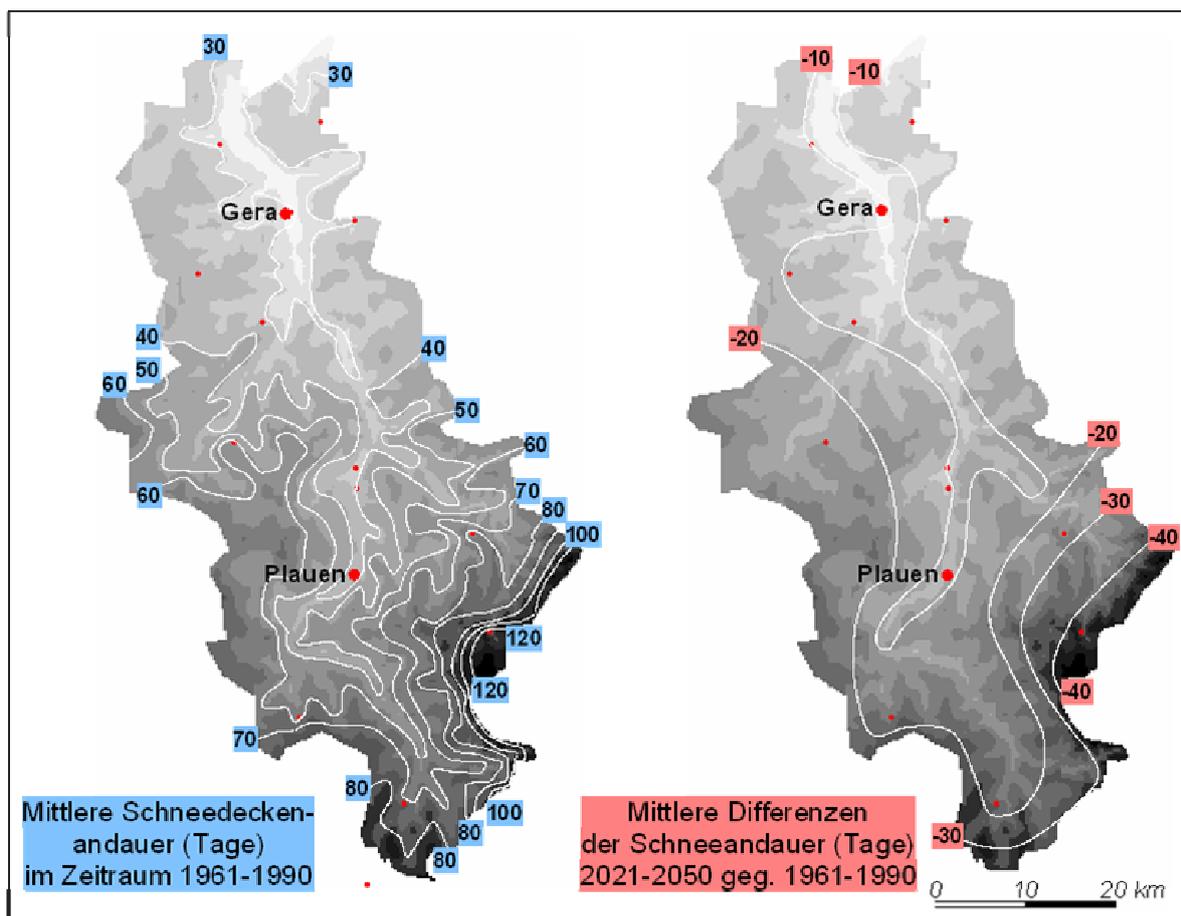


Abb. 9: Die linke Teilgrafik zeigt mittlere jährliche Schneedeckenandauern (in Tagen) im Einzugsgebiet der Weißen Elster bis zum Pegel Zeitz, dargestellt als Linien gleicher Andauern für den Bezugszeitraum 1961-1990. Auf der rechten Teilgrafik sind Linien mittlerer Differenzen der Schneedeckenandauern aus dem Vergleich zwischen den Perioden 2021-2050 und 1961-1990 eingezeichnet. Die Darstellung beruht auf einer Kombination aus dem statistischen Downscaling-Ansatz STAR und dem hydrologischen Modell TRAIN unter Verwendung des Temperatursignals aus dem Simulationslauf des Globalen Klimamodells ECHAM4 mit dem IPCC A1 Emissionsszenarium

Es wird deutlich, daß in den kommenden Dekaden mit einem deutlichen Rückgang der Schneedeckenandauern zu rechnen ist. Insgesamt geht dem Szenarium zufolge die mittlere

Andauer der Tage mit Schneebedeckung im Gebiet der Weißen Elster um etwa ein Drittel zurück. Für die unteren Mittelgebirgslagen dürfte das Auftreten einer Schneedecke daher künftig nur mehr einen episodischen Charakter haben. Lediglich in den höheren Lagen des Elstergebirges im Südosten des Gebietes scheinen künftig noch verlässliche Schneebedingungen zu herrschen, wobei auch hier die vermutete Zunahme der Klimavariabilität zu beachten ist, d.h., es ist durchaus möglich, daß auch in Zukunft in den Mittelgebirgen schneereiche, kalte Winter, jedoch zunehmend auch sehr milde Winter mit häufigen Wechseln zwischen Auf- und Abbau der Schneedecke bzw. mit völligem Fehlen von Schnee auftreten. Ein Vergleich dieser Ergebnisse mit Studien zur jüngsten Entwicklung der Schneedeckenandauern in Süddeutschland (KLIWA, 2005) zeigt, daß die hier skizzierten, zukünftigen Entwicklungen als Fortsetzung bereits beobachteter Trends angesehen werden können.

Welche Auswirkungen die für Mittel- und Ostdeutschland prognostizierte Erhöhung der Temperatur, die Verringerung der saisonalen und jährlichen Niederschlagssummen sowie die Abnahme der Schneespeicherung in den Mittelgebirgen auf die zukünftigen hydrologischen Gegebenheiten im Einzugsgebiet der Elbe haben werden, ist in Abbildung 10 beispielhaft für die Weiße Elster dargestellt. Es zeigt sich, daß dem Szenarium zufolge sowohl die mittleren jährlichen als auch die mittleren saisonalen Abflüsse zum Teil deutlich zurückgehen. Eine Studie von MENZEL & BÜRGER (2002) für das benachbarte Einzugsgebiet der Mulde zeigte vergleichbare Ergebnisse, auch wenn diese auf einem anderen Szenarien-Ansatz beruhen. Für die Mulde werteten MENZEL & BÜRGER (2002) auch Szenarien zum Auftreten künftiger Hochwässer aus und stellten im Szenarien-Zeitraum bis 2100 sowohl einen Rückgang der Hochwasser-Häufigkeiten als auch der Hochwasser-Scheitelabflüsse fest. Hier sei aber erneut auf die hohen Unsicherheiten von hydrologischen Extremwert-Szenarien hingewiesen.

Die Diskussion von Beispielen zu möglichen Konsequenzen eines Klimawandels für die hydrologischen und wasserwirtschaftlichen Bedingungen in Deutschland soll hier abgeschlossen werden. In der im Text zitierten Literatur finden sich eine ganze Reihe weiterer Beispiele, die zusammengenommen – trotz der zum Teil noch hohen Unsicherheiten – recht einheitliche Tendenzen bezüglich der zukünftigen Entwicklung der Niederschlagsverhältnisse und der Abflüsse aufzeigen. Es ist derzeit aber nach wie vor nicht möglich, allgemein belastbare Aussagen zur zukünftigen Entwicklung extremer Ereignisse in Deutschland zu treffen, auch wenn sich hier ebenfalls einzelne Tendenzen abzeichnen. Diese Aussage gilt besonders für das regionale Auftreten extremer Niederschläge bzw. Abflüsse.

8. Diskussion

Der globale Klimawandel führt wahrscheinlich zu negativen Folgeerscheinungen, die alle Bereiche des gesellschaftlichen Lebens betreffen, u. a. die Gesundheit (z. B. direkte Hitzeeinwirkung, Sommersmog, Verbreitung von Krankheitserregern), die Land- und Forstwirtschaft (z. B. Ertrags- und Qualitätsänderungen, Sturmwurf und Hagelschäden), die Wasser- und Energiewirtschaft (z. B. Wasser- und Energieversorgung, Betrieb von Wasserkraftwerken), die Schifffahrt (z. B. Befahrbarkeit der Wasserwege bei Hoch- und Niedrigwasser), den

Tourismus (z. B. Rückgang der Schneesicherheit selbst in mittleren Lagen der Alpen, Änderungen des Reiseverhaltens).

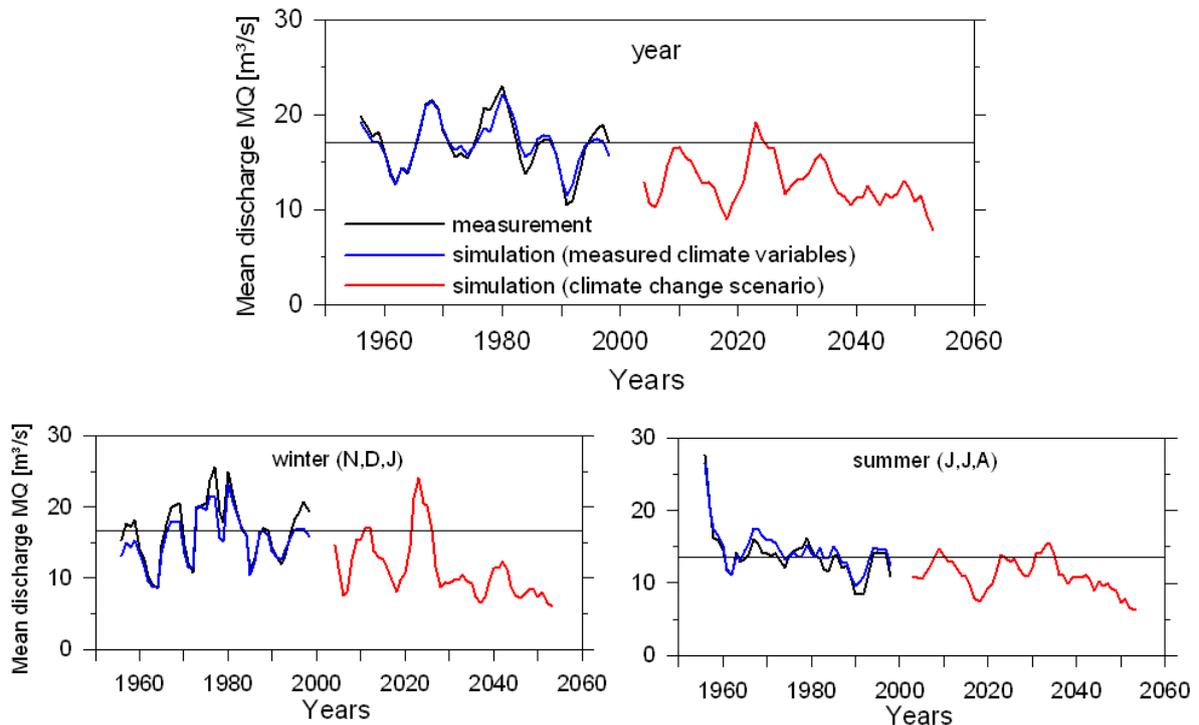


Abb. 10: Entwicklung jährlicher (obere Bildzeile) sowie saisonaler (untere Bildzeile) mittlerer Abflüsse MQ im Einzugsgebiet der Weißen Elster (Pegel Zeitz). Die jeweils schwarzen Kurven beruhen auf Messungen, die blauen Kurven stellen Simulationen mit dem hydrologischen Modell HBV-D auf Basis von gemessenen Klimagrößen dar. Die roten Kurven geben Simulationen mit HBV-D unter Verwendung von Daten eines Klimaszenariums wieder. Die durchgezogenen, schwarzen Linien repräsentieren die aus Meßwerten abgeleiteten, mittleren Jahres- bzw. Saisonwerte des Abflusses. Die Klimaszenarien entstammen der jeweils „wahrscheinlichsten“ Realisierung aus einem Ensemble von 100 Szenarienläufen auf Basis der statistischen Downscaling-Methode STAR

Dieser Beitrag behandelt die Auswirkungen des Klimawandels auf die hydrologischen Gegebenheiten aus globaler und regionaler Sicht. Worauf nicht eingegangen wurde sind Konsequenzen eines sich ändernden Klimas für die Wasserqualität. Es ist jedoch sicher, daß sich mit steigenden Lufttemperaturen auch die Wassertemperaturen der Gewässer erhöhen, so daß künftig wichtige chemische Umsetzungen, welche die Wasserqualität beeinflussen, mit unterschiedlichen Dynamiken ablaufen werden. Es ist auch denkbar, daß steigende Niederschlagsintensitäten die Zufuhr organischer und nicht-organischer Verbindungen aus diffusen Quellen und Direkteinleitungen in die Gewässer erhöhen. Höhere Verdünnungsraten bei steigenden Pegeln bzw. erhöhte Konzentrationen chemischer Stoffe bei häufigerem Vorkommen von Niedrigwasser werden die Wasserqualität ebenfalls beeinflussen.

Ein weiteres Problem wurde hier nicht erörtert: Infolge steigender Bevölkerungszahlen und wirtschaftlich-technischer Entwicklungen in Schwellen- und Entwicklungsländern wird der

Wasserbedarf in Haushalten, der Industrie sowie in der Landwirtschaft (Bewässerung) in den kommenden Jahrzehnten, z. B. in Afrika, erheblich steigen (ALCAMO et al., 2007; MENZEL et al., 2007b). Diesem ansteigenden Bedarf werden häufig verringerte Wasserverfügbarkeiten gegenüberstehen und/oder die vorhandenen Wasserressourcen sind aus qualitativer Sicht nicht nutzbar. Verschiedene Studien stimmen darin überein, daß die Zunahme der Weltbevölkerung Wasserversorgungsprobleme aufwerfen wird, die in ihrer Tragweite den hydrologischen Konsequenzen des anthropogenen Klimawandels in nichts nachstehen bzw. diese sogar übertreffen.

Literatur

- ALCAMO, J., M. FLÖRKE & M. MÄRKER (2007): Future long-term changes in global water resources driven by socio-economic and climate changes – *Hydrol. Sci. J.*, 52, S. 247-275
- BÜRGER, G. (2002): Selected precipitation scenarios across Europe. – *J. Hydrol.*, 262, S. 99-110
- GERSTENGARBE, F.-W. & P. C. WERNER (2007): Der rezente Klimawandel – In: ENDLICHER, W. & F.-W. GERSTENGARBE (Hrsg.): *Der Klimawandel - Einblicke, Rückblicke und Ausblicke*, S. 34-43, Berlin
- IPCC (2007): Summary for Policymakers – In: *Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press
- KLIWA (2005): *Langzeitverhalten der Schneedecke in Baden-Württemberg und Bayern – KLIWA-Berichte, Heft 6*, München
- KUNDZEWICZ, Z.W. et al. (2008): The implication of projected climate change for freshwater resources and their management. – *Hydrol. Sci. J.*, 53(1), S. 3-10
- LINACRE, E. T. (2004): Evaporation trends – *Theor. Appl. Climatol.*, 79, S. 11-21
- MENZEL, L. & G. BÜRGER (2002): Climate change scenarios and runoff response in the Mulde catchment (Southern Elbe, Germany) – *J. Hydrol.*, 267, S. 53-64
- MENZEL, L., F.-W. GERSTENGARBE & P. C. WERNER (2003): Regionale Unterschiede des Klimawandels und deren Einflüsse auf die hydrologischen Charakteristika in Deutschland – In: KLEEBERG, H.-B. (Hrsg.): *Klima-Wasser-Flußgebietsmanagement – im Lichte der Flut. Forum für Hydrologie und Wasserbewirtschaftung, Heft 04.03*, München, S. 19–26
- MENZEL, L. et al. (2006): Impact of climate change on the regional hydrology. Scenario based modelling studies in the German Rhine catchment. – *Natural Hazards*, 38, S. 45–61
- MENZEL, L., E. TEICHERT & M. WEISS (2007a): Climate change impact on the water resources of the semi-arid Jordan region. – In: HEINONEN, M. (Hrsg.): *Proc. 3rd International Conference on Climate and Water, Helsinki*, S. 320 – 325
- MENZEL, L. et al. (2007b): Impact of socio-economic development and climate change on water resources and water stress – In: *Proc. 1st Internat. Conf. on Adaptive and Integrative Water Management (CAIWA 2007)*, Basel (CD-ROM)

- MILLY, P.C.D, K.A. DUNNE & A.V. VECCHIA (2005): Global pattern of trends in streamflow and water availability in a changing climate. – Nature, 438, S. 347-350
- ORLOWSKY, B., F.-W. GERSTENGARBE & P. C. WERNER (2007): A resampling scheme for regional climate simulations and its performance compared to a dynamical RCM – Theor. Appl. Climatol., DOI: 10.1007/s00704-007-0352-y
- SCHÄR, C. et al. (2004): The role of increasing temperature variability in European summer heatwaves – Nature, 427, S. 332-336
- WERNER, P. C. & F.-W. GERSTENGARBE (1997): Proposal for the development of climate scenarios – Clim. Res., 8, S. 171-182
- WERNER, P. C. & F.-W. GERSTENGARBE (2007): Welche Klimaänderungen sind in Deutschland zu erwarten? – In: ENDLICHER, W. & F.-W. GERSTENGARBE (Hrsg.): Der Klimawandel - Einblicke, Rückblicke und Ausblicke, S. 56-59, Berlin
- ZIMMERMANN, L. et al. (2003): Langzeitverhalten von Starkniederschlägen in Süddeutschland. – In: DEUTSCHER WETTERDIENST (Hrsg.): Klimastatusbericht 2002, S. 152–165, Offenbach

Verfügbarkeit von Oberflächen und Grundwasser – Modellstudien

Helge Bormann

Zusammenfassung

Im Rahmen der präsentierten Studie werden die Auswirkungen zweier Klimaszenarien auf die Wasserbilanz von fünf Regionen in Deutschland untersucht, die sich durch eine große Grundwasserergiebigkeit auszeichnen und damit potentiell eine große Bedeutung für die Grundwassergewinnung haben. Dabei handelt es sich um Gebiete in Nordwestdeutschland, in Ostdeutschland, in der Westdeutschen Tieflandsbucht, am Oberrhein sowie im Alpenvorland. Für verschiedene, für Trinkwasserschutzgebiete typische Landnutzungen und das gesamte mögliche Spektrum von Bodeneigenschaften wurden basierend auf Klima-Szenarien des statistischen Downscaling-Ansatzes WETTREG die regionalen Reaktionen auf eine mögliche Realisation des Klimawandels quantifiziert. Während sich alle Szenarien durch feuchtere Winter und trockenere Sommer bei wärmeren Jahresmitteltemperaturen auszeichnen, sind die Auswirkungen auf die mit dem physikalisch basierten Standortmodell SIMULAT quantifizierten Wasserflüsse regional sehr unterschiedlich. Bis auf die Gebiete in Ostdeutschland und im Alpenvorland ist trotz steigender Jahresmitteltemperaturen von einer Zunahme der jährlichen Grundwasserneubildung sowie der gesamten Abflussbildung auszugehen, wobei die Gewinne vor allem im Winterhalbjahr erzielt werden. Aufgrund niedriger Niederschläge und höherer Temperaturen ist im Sommer von leicht (Rhein, Nordwestdeutschland) bis erheblich geringeren (Voralpenraum, Ostdeutschland) Grundwasserneubildungsraten und Abflüssen auszugehen. Aufgrund der Dominanz der Grundwasserneubildung im Verhältnis zu den schnellen Abflussbildungsmechanismen folgen die Jahrgänge der Abflussbildung allgemein denen der Grundwasserneubildung. Insgesamt zeigt sich deutlich, dass in Zukunft die Bedeutung regional angepasster Maßnahmen der Wasserwirtschaft hinsichtlich des Managements von Grund- und Oberflächenwasser noch steigen wird.

1 Einleitung

Von vielen Experten wird erwartet, dass sich das hydrologische Verhalten von Einzugsgebieten aufgrund des zu erwartenden Klimawandels verändern wird. Betroffen sind davon sowohl Oberflächengewässer (Flusssysteme, Stillgewässer) wie Grundwasserkörper, deren mittleres Verhalten sich ebenso verändern wird wie die Reaktion auf Extremereignisse. Schon in den vergangenen Jahrzehnten konnten aufgrund des Umweltwandels in vielen Einzugsgebieten Auswirkungen auf Abflussregime und Extremereignisse festgestellt werden. Viele Studien in Bezug auf den Klimawandel haben gezeigt, dass sich bereits innerhalb der letzten Jahrzehnte das Klima so schnell geändert hat wie nur selten zuvor in der Erdgeschichte. So waren die Temperaturen auf der Nordhalbkugel in den letzten 50 Jahren sehr wahrscheinlich wärmer als in anderen 50-Jahres-Perioden in den letzten 500 Jahren, und wahrscheinlich sogar wärmer als 50-Jahres-Perioden in den letzten 1300 Jahren (IPCC 2007). Beobachtet wurde neben Veränderungen der Lufttemperatur vor allem auch das Verhalten des Niederschlags. Sowohl Mittelwerte wie auch die Variabilität des Niederschlags hat sich verändert, und weitere zukünftige Änderungen sind wahrscheinlich (IPCC 2007; UBA 2007). Als Folge des veränderten Klimas, das den Wasserkreislauf antreibt, konnten in vielen Regionen der

Erde bereits hydrologische Veränderungen beobachtet werden. Hochwässer und Dürren scheinen häufiger aufzutreten, Extremereignisse scheinen zudem intensiver zu werden. Viele Studien haben sich in den letzten Jahren mit der Analyse historischer Messdaten (Wasserstände, Abflüsse) beschäftigt, und für viele Einzugsgebiete und Flusssysteme konnten signifikante Trends bzgl. der Hochwasserintensität identifiziert werden (PINTER et al. 2006). Für die Mehrzahl der Datensätze konnten allerdings keine statistisch signifikanten Trends bzgl. des Auftretens von Hochwasserereignissen gefunden werden (MUDELSEE et al. 2003; BORMANN et al. 2008). Eine Ursache dafür ist möglicherweise die schwierige Identifizierbarkeit von Trends in hydrologischen Zeitreihen (RADZIEJEWSKI & KUNDZEWICZ 2004). Eine andere Ursache ist die unterschiedliche regionale Ausprägung des Klimawandels, die regional unterschiedliche und unterschiedlich intensive Reaktionen des Einzugsgebietswasserhaushalts bedingt. BELZ et al. (2007) identifizierten eine Veränderung des Abflussregimes als Reaktion auf den Klimawandel im Rhein-Einzugsgebiet. Dabei ist die hinter dem mittleren Verhalten verborgene Variabilität zu berücksichtigen (PFAUNDLER et al. 2006).

Aufgrund der deutlich schlechteren Datenverfügbarkeit im Vergleich zu Oberflächengewässern ist es bei der Bilanzierung von Grundwasserkörpern deutlich schwieriger, die Auswirkungen des historischen Klimawandels auf den Grundwasserhaushalt zu quantifizieren. Manche Fließprozesse, wie z.B. die Grundwasserneubildung, die den bedeutsamsten Zueginn des Grundwasserkörpers darstellt, sind direkt nur schwer messbar, so dass Modellstudien benötigt werden, um die Auswirkungen des Klimawandels abschätzen zu können. Allerdings gibt es auch eine Reihe von kritischen Beiträgen, die die Frage aufwerfen, ob die Folgen eines Wandels der Umwelt überhaupt von Modellen realistisch wiedergegeben werden können (WAGENER 2007). Sind die verfügbaren Modelle ausreichend validiert, um die Auswirkungen veränderter Verhältnisse abbilden zu können? So haben JIANG et al. (2007) gezeigt, dass verschiedene Einzugsgebietsmodelle, die die Wasserflüsse historischer Zeiträume gleichermaßen realistisch abbilden konnten, nicht gleichermaßen sensitiv auf Klimaszenarien reagierten und deutlich unterschiedliche Reaktionen auf mögliche Klimaveränderungen prognostizierten. Auf der anderen Seite stellt sich die Frage, welche Alternativen es zu modellbasierten Szenarioanalysen gibt, um mögliche zukünftige hydrologische Veränderungen abzuschätzen. Aufgrund der regional unterschiedlichen Ausprägung des aktuellen und des zu erwartenden Klimawandels sowie der regional unterschiedlichen Einzugsgebietseigenschaften sind regional differenzierte Analysen zur Abschätzung des Einflusses des Klimawandels auf den Wasserhaushalt notwendig. Dabei sollte auf valide, in verschiedenen Regionen und Klimaten getestete Modelle zurückgegriffen werden.

In der Vergangenheit sind basierend auf regionalisierten Klimadaten viele Modellstudien durchgeführt worden, um den Einfluss des in Zukunft zu erwartenden Klimawandels auf den Wasserhaushalt abzuschätzen (z.B. FOWLER et al. 2007; KILSBY et al. 2007; THODSEN 2007; WILBY et al. 2006; MIDDELKOOP et al. 2001). Die meisten dieser Studien versuchen, durch die Quantifizierung von Szenarien mögliche zukünftige Entwicklungen vor allem des Abflusses von Flüssen bzw. Einzugsgebieten zu beschreiben. Mit zunehmender Rechenkapazität können hydrologische Auswirkungen von Klimaszenarien auch schon für Regionen berechnet werden. Szenariostudien zum Grundwasserhaushalt werden aufgrund des Aufwandes an Daten und Rechenzeit seltener durchgeführt, haben aber eine große Bedeutung

hinsichtlich der zukünftigen Bewirtschaftbarkeit der Aquifersysteme. Hinsichtlich der nachhaltigen Nutzung der Grundwasserressourcen steht die Grundwasserneubildung im Fokus des Interesses (HERRERA-PANTOJA & HISCOCK 2008).

Die Ergebnisse einer ähnlichen Studie werden hier für fünf Regionen mit einer bedeutenden Grundwasserergiebigkeit in Deutschland vorgestellt. Sie trägt der Bedeutung des Grundwassers für die Trinkwasserversorgung in Deutschland Rechnung, die zu ca. 60% aus dem Grundwasser erfolgt. Ziel dieser Studie ist, auf Basis frei verfügbarer Informationen die Auswirkungen möglicher zukünftiger Klimaverhältnisse auf den Abfluss und die Grundwasserneubildung abzuschätzen. Für Gebiete mit bedeutender Grundwasserergiebigkeit (HAD 2003) wurden exemplarische Wasserbilanzberechnungen durchgeführt, die auf dem aktuellen Klima sowie auf regionalisierten Klimaszenarien des WETTREG-Ansatzes (UBA 2007) für folgende Regionen beruhen: Nordwestdeutschland, Nordostdeutschland/Südostdeutsche Becken, Westdeutsche Tieflandsbucht, Oberrheingraben und Alpenvorland.

2 Material und Methoden

2.1 Verfügbare Datensätze

Zu Beschreibung des aktuellen Klimas wurden Klimastationsdaten von Stationen des Deutschen Wetterdienstes (DWD) verwendet, die das Klima der Jahre 1991-2007 beschreiben und im Internet frei verfügbar sind (www.dwd.de). Es wurden Stationen ausgewählt, die sich in den Zielregionen befinden, die sich laut dem Hydrologischen Atlas von Deutschland (HAD 2003) durch eine besonders hohe Grundwasserergiebigkeit auszeichnen (Tabelle 1). Die Stationen repräsentieren damit Gebiete in Nordwestdeutschland, in Nordostdeutschland und den Südostdeutschen Becken, in der Westdeutschen Tieflandsbucht, im Oberrheingraben und im Alpenvorland. Die Regionen Nordostdeutschland und Südostdeutsche Becken wurden zur Region „Ostdeutschland“ zusammengefasst. Diese identifizierten Regionen lassen sich gut mit den Klimaregionen in Deckung bringen, die basierend auf den Ergebnissen der UBA-Studie nach dem WETTREG-Ansatz erzielt wurden (Abbildung 1).

Tab. Lage der verwendeten Klimastationen des DWD

Klimastation	Höhe (m ü. NN)	Länge (°)	Breite (°)	Region
Augsburg	463	10:57	48:26	Alpenvorland
Kempton	705	10:20	47:43	
München	528	11:43	48:08	
Bremen	5	8:48	53:03	Nordwest-
Hamburg	11	9:59	53:38	deutschland
Schleswig	43	9:33	54:32	
Leipzig	141	12:14	51:26	Ostdeutschland
Magdeburg	76	11:35	52:06	
Potsdam	81	13:04	52:23	
Düsseldorf	37	6:46	51:18	Westdeutsche
Münster/Osnabrück	48	7:42	52:08	Tieflandsbucht
Frankfurt	113	8:36	50:03	Oberrheingraben
Karlsruhe	112	8:22	49:02	

Die ausgewählten DWD-Klimastationen repräsentieren damit auch die Klimaregionen. Zur Beschreibung möglicher zukünftiger Klimaentwicklungen wurde auf Ergebnisse des WETTREG-Ansatzes zurückgegriffen, auf den im folgenden Abschnitt genauer eingegangen wird. Die regionalisierten Klimaszenarien wurden im Rahmen einer vom Umweltbundesamt (UBA) beauftragten Studie erzielt (UBA 2007). Zur Untersuchung der regionenspezifischen Auswirkungen des Klimawandels auf die Wasserbilanz wurden schließlich die DWD-Stationsdaten des Zeitraums 1991-2007 mit den basierend auf WETTREG abgeleiteten systematischen regionenspezifischen Klimaränderungen überlagert und konnten damit als Modellantrieb verwendet werden.

2.3 Regionalisierte Klimaszenarien (WETTREG)

Für regional differenzierte Analysen zur Abschätzung der Folgen des Klimawandels ist es notwendig, die Klimaszenarien globaler Klimamodelle zu regionalisieren. Hierzu stehen verschiedene Downscaling-Ansätze zur Verfügung, das dynamische und das statistische Downscaling. Werden beim dynamischen Downscaling Klimamodelle verschiedener Auflösung genestet, um die Auflösung zu erhöhen, basieren statische Verfahren auf Transferfunktionen, Wettergeneratoren oder Wetterlagenthemata. Regionalisierte Klimaszenarien können dann als Eingabe regionaler hydrologischer Modelle verwendet werden. In dieser Studie wurden regionalisierte Klimaszenarien des WETTREG-Downscaling-Ansatzes verwendet. WETTREG (Wetterlagen-basierte Regionalisierungsmethode) ist ein statistisches Verfahren, das aus den Simulationen globaler Klimamodelle Wetterlagenhäufigkeiten bestimmt und anhand dieser Wetterlagenzeitreihe meteorologische Stations-Zeitreihen simuliert (BRONSTERT et al. 2006). Abbildung 1 zeigt Regionen ähnlicher Stations-spezifischer Klimareaktion, die im Rahmen der UBA-Studie (UBA 2007) ermittelt werden konnten.



Abb. 1: WETTREG-Klimaregionen (Quelle: UBA 2007).

Die charakteristischen Änderungen in den Klimaregionen bzgl. Temperatur und Niederschlag sind in Tabelle 2 zusammengefasst. Sie zeigen für alle Regionen einen vergleichbaren Anstieg der Jahresmitteltemperatur sowie eine winterliche Zunahme und sommerliche Abnahme der Niederschläge. Die Veränderungen in Bezug auf die Niederschläge unterscheiden sich erheblich in den unterschiedlichen Regionen. Hinsichtlich der Einschätzung der Repräsentativität der Klimaszenarien muss einschränkend bemerkt werden, dass in dieser Studie lediglich die Ergebnisse eines regionalen Klimamodells (WETTREG) verwendet werden, die auf den Simulationsläufen eines globalen Modells beruhen (ECHAM5/MPI-OM). Sie decken damit nicht die unterschiedlichen Realisationen der IPCC-Szenarien verschiedener GCMs ab und lassen demzufolge auch keine Prognose der zukünftigen hydrologischen Verhältnisse zu. Wohl aber ist eine Abschätzung der Sensitivität des verwendeten, validierten hydrologischen Modells und damit der hydrologischen Prozesse bzgl. der Veränderung bestimmter Klimacharakteristika möglich. Durch die Berechnung der Reaktion der lokalen Wasserbilanz für unterschiedliche Boden- und Landnutzungsverhältnisse in verschiedenen Klimaregionen bei variabler Grundwasserbeeinflussung auf zwei verschiedene Klimaszenarien wird ein Inventar an simulierten Standortbedingungen bereitgestellt, das die Abschätzung der Spannweite möglicher hydrologischer Folgen hinsichtlich des Klimawandels ermöglicht.

Eine vergleichende Untersuchung der Eignung von Regionaler Klimaszenarien für hydrologische Untersuchungen wurde von BRONSTRET et al. (2006) für Süddeutschland durchgeführt. Sie stellten fest, dass die Anwendung aller Downscaling-Verfahren zu besseren Ergebnissen als die Verwendung des GCM-Outputs führt. Statistische Verfahren wie WETTREG zeigen eine gute Eignung für die Analyse mittlerer Verhältnisse und der saisonalen Variabilität. WETTREG bildet zudem die Variabilität der Niederschläge gut ab und ist damit auch für die Analyse von Extremereignissen geeignet. Für die Berechnung der Grundwasserneubildung zeigen alle Regionalisierungsverfahren eine lediglich mäßige bis befriedigende Eignung, wobei WETTREG von allen Verfahren die besten Ergebnisse aufweist.

Tab. 2: Regionen-spezifische Änderung ausgewählter Klimaelemente (Temperatur, Niederschlag) in ausgewählten WETTREG-Regionen (UBA 2007).

Region	Szenario	Temperatur	Sommer-Niederschlag	Winter-Niederschlag
Küste	A1B	+2.1°C	-30%	+50%
	B1	+1.5°C	-15%	+30%
Nordwestdeutschland	A1B	+2.5°C	-20%	+25%
	B1	+2.0°C	-10%	+15%
Ostdeutschland	A1B	+2.5°C	-50%	+20%
	B1	+2.0°C	-30%	+10%
Westdeutsche Tieflandsbucht	A1B	+2.3°C	-10%	+50%
Oberrheingraben	B1	< +2.0°C (1.8°C)	-5%	+30%
	A1B	+2.3°C	-20%	+40%
Alpenvorland	B1	+1.5°C	-20%	+20%
	A1B	+2.0-2.5°C (2.25°C)	-25%	+35%
	B1	+1.5-2.2°C (1.85°C)	-15%	+20%

2.3 Das Standortmodell SIMULAT

Das hydrologische Modell SIMULAT (DIEKKRÜGER & ARNING 1995; BORMANN 2001) ist ein physikalisch basiertes Standortmodell, das für die kontinuierliche Simulation der Wasserflüsse landwirtschaftlich genutzter Standorte entwickelt wurde. SIMULAT fokussiert auf die Darstellung der vertikalen Wasserflüsse von Standorten, laterale Prozesse werden als Quellen bzw. Senken behandelt. Wesentliche von SIMULAT dargestellte Prozesse sind die Evapotranspiration nach Penman-Monteith sowie Infiltration und Bodenwasserfluss nach der Richards'-Gleichung. Über die untere Randbedingung kann der Grad der Grundwasserbeeinflussung variiert und definiert werden. Interflow wird nach dem Darcy-Ansatz berechnet, und die Abschätzung der Schneeschmelze erfolgt nach der Gradtag-Methode. SIMULAT verfügt über eine variable Zeitschrittsteuerung. Stark nichtlineare Prozesse wie Verdunstung oder Infiltration wurden im Rahmen dieser Studie mit stündlichem Zeitschritt, der Bodenwasserfluss mit täglichem Zeitschritt berechnet. Grundwassernahe und grundwasserferne Standorte wurden über die Wahl der unteren Randbedingung „freie Drainage“ (Definition eines festen Gradienten → keine Grundwasserbeeinflussung) sowie eines festen Grundwasserstandes in 3m Tiefe (→ Grundwasserbeeinflussung) unterschieden.

Eine Modellvalidierung fand im Rahmen dieser Studie nicht statt. SIMULAT konnte aber bereits im Rahmen verschiedener Studien auf der lokalen wie regionalen Skala erfolgreich validiert werden, ohne dass eine Kalibrierung durchgeführt werden musste. Sowohl beim Antrieb des Modells mit gemessenen Parametern (KUHN 1998; ADEN & DIEKKRÜGER 2000; GIERTZ et al. 2006) als auch beim Antrieb über mithilfe von Transferfunktionen von regional verfügbaren Datensätzen abgeleiteten Parametern (BORMANN 2001; STEPHAN 2003) konnte SIMULAT die Wasserflüsse an grundwassernahen wie grundwasserfernen Standorten sowie in Einzugsgebieten in der gemäßigten Zone wie in den Tropen gut abbilden. DIEKKRÜGER et al. (1995) stellten sogar im Rahmen eines Modellvergleichs von Standortmodellen fest, dass SIMULAT ohne eine Kalibrierung der Modellparameter die Bodenwasserdynamik mindestens so gut wie andere, kalibrierte Modelle abbilden kann. Insofern kann davon ausgegangen werden, dass SIMULAT die Wasserflüsse in den verschiedenen Grundwasserneubildungsregionen Deutschlands unter den Bedingungen des Klimawandels auf vertrauenswürdige Weise darstellen kann.

2.4 Konzept der Modellstudie

Da eine regionale Bilanzierung der Grundwasserleiter und Oberflächengewässer nur mit konzeptionellen Modellen möglich ist, wurde der Fokus dieser Studie auf die Grundwasserneubildung sowie die Abflussbildungsprozesse gelegt. Das Standortmodell SIMULAT wurde verwendet, um eine vergleichende Untersuchung des aktuellen Klimas (1991-2005) mit dem für den Zeitraum 2071-2100 nach zwei unterschiedlichen IPCC-Klimaszenarien (A1B, B1) projizierten Klima durchzuführen. Die Berechnung der Wasserbilanzen für die fünf Gebiete mit hoher Grundwasserergiebigkeit berücksichtigt sowohl potentiell unterschiedliche Bodenverhältnisse als auch unterschiedliche, in Trinkwasserschutzgebieten übliche Landnutzungen und einen variablen Einfluss des Grundwassers auf den Bodenwasserhaushalt.

Die Berücksichtigung der unterschiedlichen möglichen Bodenverhältnisse erfolgte über die Definition von Modellbodensäulen (BORMANN 2007) für alle Bodenartenklassen laut Bo-

denkundlicher Kartieranleitung (AD-HOC AG BODEN 2005). Zur Berücksichtigung der in Trinkwasserschutzgebieten üblichen Landnutzung wurden Simulationen für Mischwald, extensives Grünland und extensives Ackerland (Getreide mit Zwischenfruchtanbau) durchgeführt. Schließlich wurde durch unterschiedliche untere Randbedingungen der Einfluss des Grundwassers auf den Bodenwasserhaushalt variiert und damit sowohl grundwasserferne Bedingungen (Untere Randbedingung: freie Drainage) wie grundwassernahe Bedingungen (Untere Randbedingung: fester Grundwasserstand) berücksichtigt. Insgesamt wurden die Wasserbilanzen und Jahresgänge aller Kombinationen aus 31 Bodenartenklassen, drei Landnutzungen und zwei Randbedingungen für das derzeitige Klima und zwei Klimaszenarien berechnet. Durch die Berücksichtigung unterschiedlicher Gebietseigenschaften können die Ergebnisse je nach tatsächlichen Einzugsgebietseigenschaften regional interpretiert werden. Es ist allerdings zu berücksichtigen, dass es sich lediglich um Klimaszenarien eines globalen Modells und eines Regionalisierungsverfahrens handelt, das allerdings nach BRONSTERT et al. (2006) die regionalen Klimaverhältnisse in Vergangenheit und Gegenwart im Vergleich zu anderen Modellen am realistischsten abbildet. Trotzdem wird nicht die gesamte Spannweite möglicher zukünftiger Entwicklungen abgebildet, sondern nur die Auswirkungen zweier möglicher Realisationen analysiert und quantifiziert.

3 Ergebnisse

3.1 Simulierte Jahresbilanzen

Zunächst kann auf Basis der durchgeführten Wasserhaushaltssimulationen eine Einschätzung über die mittlere Reaktion der jeweiligen Klimaregionen auf mögliche Klimaveränderungen erfolgen. Dazu wurde für jede Region der Mittelwert der simulierten Wasserbilanzen für verschiedene Bodenverhältnisse (31 Bodenarten nach AD-HOC AG Boden (2005)) und Landnutzungen (Mischwald, extensives Grünland, extensives Ackerland) berechnet. In Tabelle 3 sind die Änderungen in Bezug auf Abfluss und Grundwasserneubildung unterscheiden nach dem Grundwassereinfluss aufgeführt.

Insgesamt zeigt sich, dass alle Regionen auf die Veränderungen des Klimas im A1B-Szenario sensibler reagieren als auf das B1-Szenario, was aufgrund der stärkeren Veränderungen in den Klimavariablen Temperatur und vor allem Niederschlag auch zu erwarten war. Besonders deutliche Veränderungen in der Wasserbilanz sind in den Regionen der Westdeutschen Tieflandsbucht („Niederrhein“) und des Oberrheingraben festzustellen. In beiden Regionen nehmen Abflussbildung und Grundwasserneubildung deutlich zu. Ursache dafür ist die ebenfalls deutliche Zunahme des winterlichen Niederschlags bei einer vergleichsweise geringen Abnahme des sommerlichen Niederschlags (Tabelle 2). Eine ebenfalls leicht positiv veränderte Wasserbilanz ist für Nordwestdeutschland festzustellen, wobei sich hier Niederschlagszu- und abnahmen in Sommer und Winter annähernd kompensieren.

Abnahmen in Bezug auf Abflussbildung und Grundwasserneubildung sind in den Regionen des Alpenvorlandes und in Nordostdeutschland sowie in den Südostdeutschen Becken („Ostdeutschland“) festzustellen. Hauptgrund in Ostdeutschland ist die nur geringe Zunahme der winterlichen Niederschläge im Vergleich zur deutlichen Abnahme im Sommer (Tabelle 2). In Alpenvorland liegen die Ursachen in den saisonalen Veränderungen (Sommer- vs. Winterhalbjahr) begründet, auf die im Detail in Abschnitt 3.2 eingegangen wird.

Tab. 3: Regionale Effekte des Klimawandels auf Wasserhaushaltsgrößen in Abhängigkeit des Grundwassereinflusses. ΔQ = Änderung des Abflusses; ΔGW = Änderung der Grundwasserneubildung. Gleiche Gewichtung der verschiedenen Landnutzungen und Bodenarten.

Szenario		grundwasserfern		grundwassernah	
		A1B [cm/a]	B1 [cm/a]	A1B [cm/a]	B1 [cm/a]
Alpenvorland	ΔQ	-0.14	-1.47	-0.81	-2.15
	ΔGW	-0.25	-1.34	-1.00	-2.05
Nordwestdeutschland	ΔQ	1.63	0.65	1.03	0.08
	ΔGW	1.29	0.49	0.60	-0.13
Nordostdeutschland	ΔQ	-1.68	-1.94	-2.80	-3.05
	ΔGW	-1.55	-1.80	-2.68	-2.90
Niederrhein	ΔQ	11.91	6.65	12.74	7.06
	ΔGW	10.15	5.70	10.74	5.99
Oberrhein	ΔQ	5.66	1.53	6.44	1.63
	ΔGW	4.98	1.31	5.61	1.33

3.1.1 Einfluss der Bodeneigenschaften

Im Rahmen dieser Modellstudie wurden Simulationen für alle 31 laut Bodenkundlicher Kartieranleitung (AD-HOC AG Boden 2005) ausgewiesenen Bodenarten durchgeführt. Es ist zu erwarten, dass die unterschiedlichen Böden aufgrund ihrer jeweiligen Speicherfähigkeit sowie unterschiedlicher leitender bzw. stauender Eigenschaften eine unterschiedliche Reaktion des Wasserhaushalts auf den projizierten Klimawandel zeigen. Um dies zu prüfen, wurde zwischen den vier Bodenarten-Hauptgruppen Sand, Schluff, Ton und Lehm differenziert. Die Simulationsergebnisse der Bodenarten der jeweiligen Bodenarten-Hauptgruppen wurden aggregiert und auf deren jeweilige Sensitivität in Bezug auf den Klimawandel hinsichtlich Abflussbildung und Grundwasserneubildung analysiert. Die Ergebnisse sind in Abbildung 2 hinsichtlich jährlicher Änderungen der Grundwasserneubildung und der Abflussbildung zusammengefasst. Im Rahmen der Analyse konnte festgestellt werden, dass die Bodenarten-Hauptgruppen zwar in Abhängigkeit von der Grundwasser-Nähe unterschiedlich starke Veränderungen zeigen, dass die Veränderungen der Bodenarten-Hauptgruppen sich hinsichtlich Abflussbildung und Grundwasserneubildung relativ zueinander aber sehr ähnlich verhielten. Aus diesem Grund werden hier nur die Veränderungen für grundwasserferne Standorte diskutiert.

Allen vier Bodenarten-Hauptgruppen ist zunächst gemein, dass im Falle von zunehmendem Abfluss bzw. Grundwasserneubildung diese „Gewinne“ beim Szenario A1B größer ausfallen als beim Szenario B1. Im Gegenzug fallen „Verluste“ beim Szenario B1 größer aus. Bis zu einem gewissen Grad sind aber bodenspezifische Reaktionen der Bodenarten-Hauptgruppen hinsichtlich Abflussbildung und Grundwasserneubildung auf veränderte Klimabedingungen zu erkennen. So führt in der Regel die größere Wasserspeicherfähigkeit der Schluffböden im Vergleich zu Sand, Ton- und Lehmböden dazu, dass Zunahmen hinsichtlich Abflussbildung geringer und Abnahmen größer sind. Die Unterschiede zwischen Sand-, Lehm- und Tonböden hingegen sind hinsichtlich des jährlichen Abflusses gering.

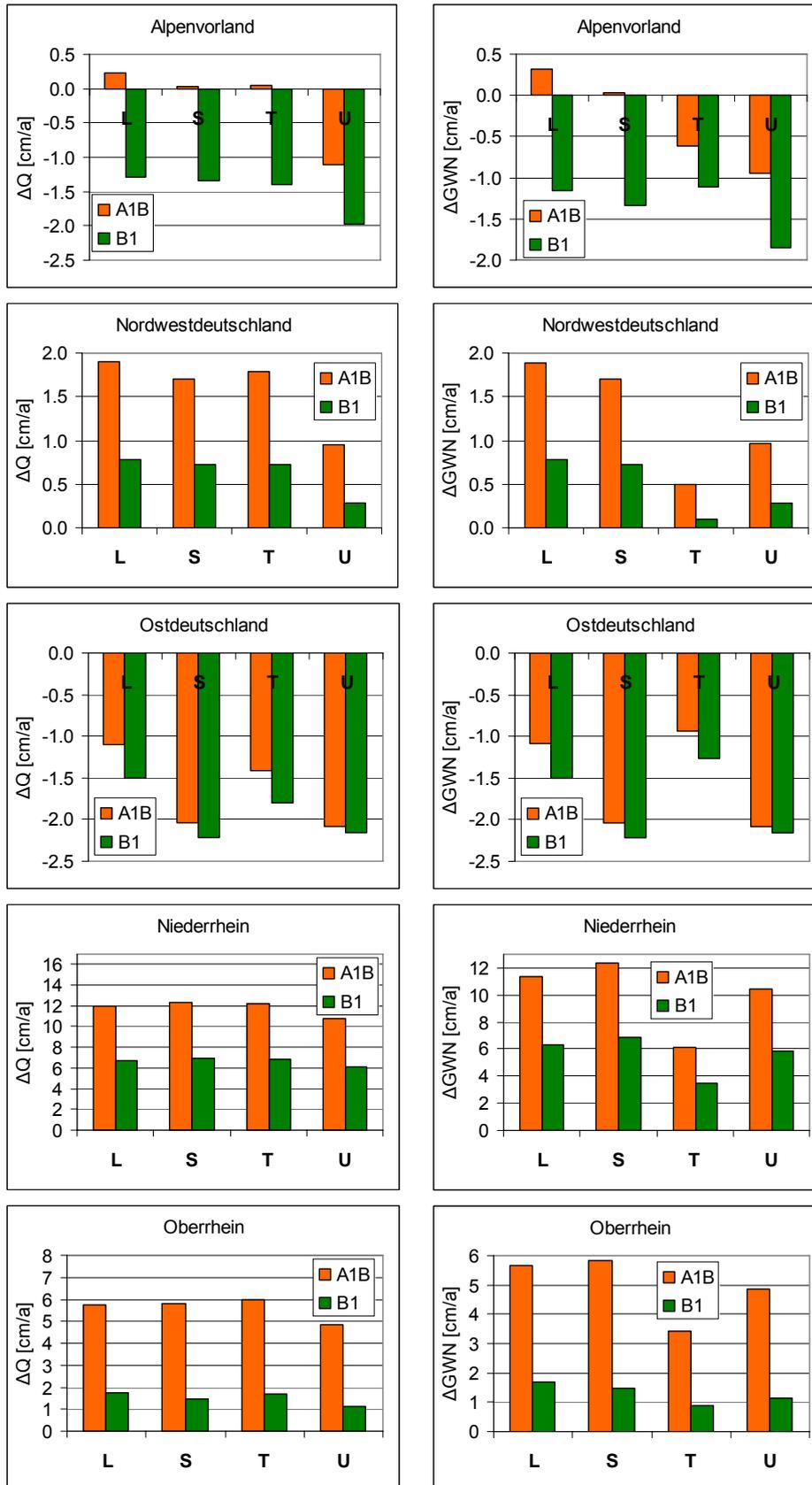


Abb. 2: Änderung der Jahresbilanzen von Abfluss (ΔQ) und Grundwasserneubildung (ΔGWN) in Abhängigkeit von der Bodenarten-Hauptgruppe und dem gewählten Klimaszenario (grundwasserferne Standorte); (L = Lehm, S = Sand, T = Ton, U = Schluff).

Hinsichtlich der Grundwasserneubildung reagieren vor allem Tonböden aufgrund der extrem geringen hydraulischen Wasserleitfähigkeit anders als die anderen Bodenarten-Hauptgruppen. Sie zeigen geringere Veränderungen der Grundwasserneubildung als die anderen Bodenarten-Hauptgruppen.

Insgesamt ist festzustellen, dass die verschiedenen Böden in Bezug auf Abflussbildung und Grundwasserneubildung zwar schon auf ähnliche Weise auf veränderte Klimaverhältnisse reagieren, dass sie aber in Bezug auf unterschiedliche hydrologische Prozesse durchaus unterschiedlich sensitiv sein können. Des Weiteren ist festzustellen, dass die Bodenarten-Hauptgruppen in unterschiedlichen Regionen aufgrund der regionalen Klimaverhältnisse durchaus eine Regionen-spezifische Sensitivität hinsichtlich des Klimawandels besitzen können. So ist die ostdeutsche Region aufgrund seiner trockenen Verhältnisse von einer anderen Systematik geprägt als die anderen vier betrachteten Regionen. Bei der Übertragung der Systematik der hier gefundenen Ergebnisse auf reale Einzugsgebiete sollten also die regionalen Bodenverhältnisse berücksichtigt werden.

3.1.2 Einfluss der Landnutzung / Vegetation

Neben unterschiedlichen Bodeneigenschaften wurden in diese Studie drei verschiedene Landnutzungen einbezogen, die in Wasserschutzgebieten anzutreffen sind: Mischwald, extensives Grünland und extensive Ackerbewirtschaftung (Sommergetreide + Zwischenfrucht). Zur Analyse der regional unterschiedlichen Sensitivität der Modellergebnisse hinsichtlich des Klimawandels in Abhängigkeit von der Landnutzung wurden für diese Auswertung die Mittelwerte der Simulationsergebnisse aller unterschiedlichen 31 Bodenarten für jede der drei Landnutzungen gebildet.

Im Vergleich zu den Unterschieden, die für die vier Bodenarten-Hauptgruppen gefunden wurden, sind deutlich unterschiedlichere Reaktionen des Wasserhaushalts auf den Klimawandel in Abhängigkeit von der jeweiligen Landnutzung festzustellen (Abbildung 3). Da die Abflussbildung im Wesentlichen von der Grundwasserneubildung dominiert wird, ist die Systematik der Ergebnisse für den Abfluss sehr ähnlich. Die größte Zunahme bzw. geringste Abnahme von Abfluss und Grundwasserneubildung ist nach den Simulationsergebnissen auf Ackerflächen zu erwarten. Insgesamt weisen die Effekte des Klimawandels auf die Wasserbilanz in Abhängigkeit von der Landnutzung entscheidende Regionen-spezifische Unterschiede auf. Je nach aktueller Wasserbilanz können sich Klimaänderungen unterschiedlich auswirken. So sind auf Waldflächen in den meisten Regionen aufgrund der geringeren Abflussbildung auch bei einem veränderten Klima nur geringe Veränderungen in den simulierten Wasserflüssen festzustellen. In Ostdeutschland ist die Veränderung sogar nahe Null, da dort aufgrund der bereits heute fast ganzjährig relativ trockenen Bedingungen Änderungen im mittleren Niederschlag kaum im Abflussgeschehen bemerkbar machen. Dies gilt natürlich nicht für Extremereignisse, die aber in dieser Studie nicht betrachtet wurden.

Aufgrund der hohen Niederschläge der Regionen Oberrhein und Westdeutsche Tieflandsbucht (Niederrhein) zeigen diesen beiden Regionen nur geringe Unterschiede in der Veränderung der Wasserflüsse von Acker und Grünlandflächen. Im Alpenvorland sowie in Nordwestdeutschland hingegen reagieren Grünland und Ackerflächen sehr unterschiedlich. Während die Grundwasserneubildung auf Ackerflächen zunimmt, nimmt sie unter Grünland ab.

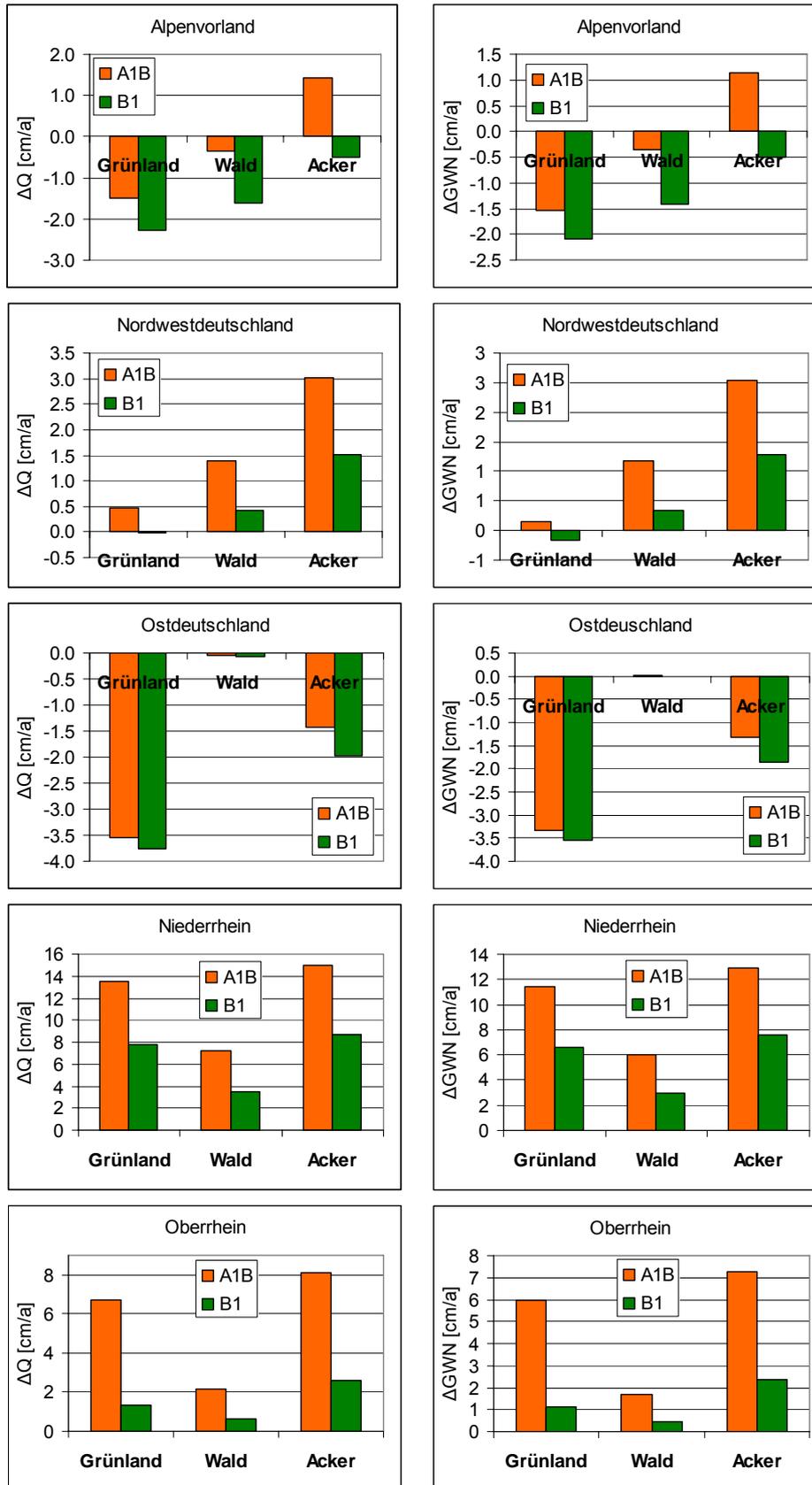


Abb. 3 Änderung der Jahresbilanzen von Abfluss (ΔQ) und Grundwasserneubildung (ΔGWN) in Abhängigkeit von der Vegetation und dem gewählten Klimaszenario (grundwasserferne Standorte).

Basierend auf den gezeigten Simulationsergebnissen kann also festgestellt werden, dass sich unter den Verhältnissen des Klimawandels die nutzbare Wassermenge in landwirtschaftlich genutzten Einzugsgebieten eher günstig entwickeln wird. Dies gilt sowohl für die Grundwasserneubildung als auch für die Summe langsamer und schneller Abflussbildungsprozesse. Einen erheblichen Einfluss auf die Systematik der landnutzungsspezifischen Sensitivität hat der Grundwassereinfluss. Ist der Einfluss des Grundwasserstandes bzgl. der Sensitivität der Bodeneigenschaften hinsichtlich des Klimawandels noch relativ gering, so reagieren Pflanzenbestände sehr sensitiv, sobald der durchwurzelte Bereich des Bodens in den Kapillarsaum hineinreicht. Das führt dazu, dass tief wurzelnde Pflanzen (Wald) mehr Wasser zur Verfügung haben und unter Bedingungen des Klimawandels, wie niederschlagsärmeren Sommern, ein größeres Wasserdefizit erzeugen. Demzufolge nimmt das simulierte Wasserdefizit in Ostdeutschland zu. Auf der anderen Seite kann sich die Wasserbilanz unter Waldflächen in niederschlagsreichen Gebieten durchaus positiv entwickeln, wie z.B. in der Westdeutschen Tieflandsbucht (Niederrhein).

3.2 Simulierte Jahresgänge: Regime

Nach der Analyse der Jahresbilanzen und der regional unterschiedlichen Sensitivität der Einflussfaktoren ist für eine wasserwirtschaftliche Planung vor allem die Analyse der Veränderung der jahreszeitlichen Verteilung der Wasserflüsse von großer Bedeutung. Nach den bisherigen Simulationsergebnissen ist zu vermuten, dass sich die Summe des neugebildeten und damit potentiell nutzbaren Grundwassers in der Mehrzahl der untersuchten Regionen vergrößern wird, ebenso wie die Gesamtmenge des Abflusses (Niederrhein, Oberrhein, Nordwestdeutschland). In anderen Regionen ist aber auch mit einer z.T. leichten Verringerung der nutzbaren Wasserressourcen zu rechnen (Alpenvorland, Ostdeutschland). Diese Aussagen haben natürlich nur in dem Fall eine konkrete Gültigkeit, in dem der tatsächliche Klimawandel in etwa den Annahmen eines der beiden Klimaszenarien entspricht.

Wie könnte sich also der Jahresgang der Abflussbildung und der Grundwasserneubildung unter den Bedingungen des Klimawandels in den verschiedenen Regionen verändern? Abschätzungen dazu können wiederum auf Basis der durchgeführten Modellrechnungen gemacht werden. Die Abbildungen 4 und 5 zeigen die Ergebnisse der Simulationen, die zum einen für die aktuellen Klimaverhältnisse und zum Vergleich für die beiden WETTREG-Klimaszenarien A1B und B1 durchgeführt wurden. Hinter jedem simulierten Jahresgang verbergen sich mit gleicher Gewichtung alle möglichen Kombinationen aus unterschiedlichen Landnutzungen (3 Varianten) und Bodeneigenschaften (31 Bodenarten), aus deren simulierten Wasserflüssen die mittleren Jahresgänge bestimmt wurden.

Die Ergebnisse zeigen, dass die Ergebnisse sehr stark von den regionalen Klimaverhältnissen und der regional unterschiedlichen Änderung des Klimas abhängen. Die verschiedenen Regionen zeichnen sich durch sehr unterschiedliche Jahresgänge von Abflussbildung und Grundwasserneubildung aus. So ist zum Beispiel der Jahresgang von Abflussbildung und Grundwasserneubildung im Voralpenraum unter den aktuellen Klimabedingungen nicht so deutlich ausgeprägt wie zum Beispiel an Niederrhein oder am Oberrhein. Auch ist Ostdeutschland ist die jahreszeitliche Variabilität von Abflussbildung und Grundwasserneubildung aufgrund der ganzjährig vergleichsweise trockenen Klimabedingungen relativ gering.

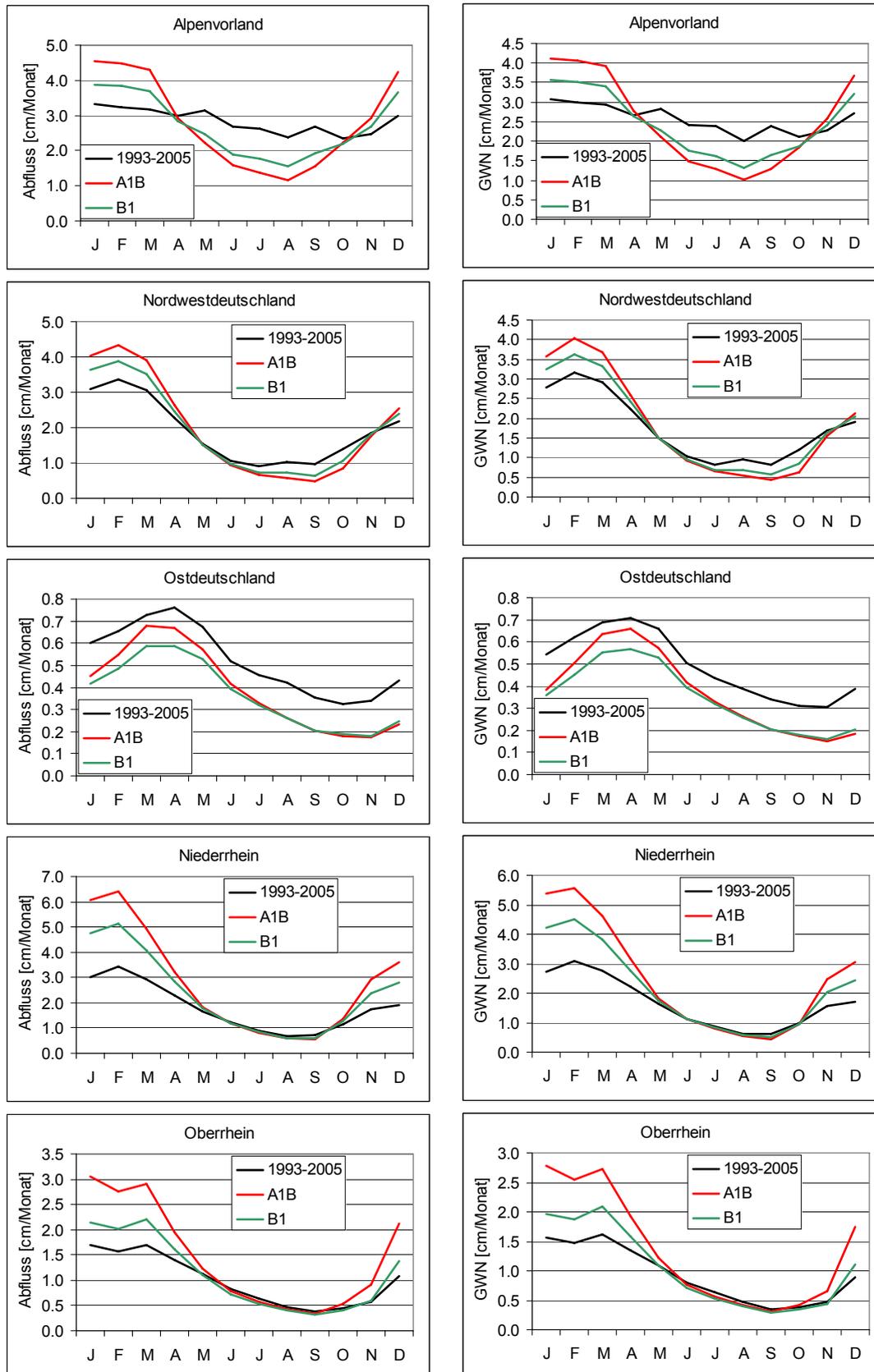


Abb. 4: Jahresbilanzen von Abfluss und Grundwasserneubildung (GWN) in Abhängigkeit vom gewählten WETTREG-Klimaszenario für grundwasserferne Standorte.

Generell kann festgestellt werden, dass sich die jahreszeitlichen hydrologischen Unterschiede in allen Regionen unter den Bedingungen des Klimawandels sehr wahrscheinlich verstärken werden. Damit steigt auch die jahreszeitliche Schwankung der Wasserverfügbarkeit. Die Veränderungen unter Annahme des A1B-Szenarios sind dabei in allen Regionen stärker als die Veränderungen unter Annahme des B1-Szenarios einzuschätzen.

Für alle Regionen lässt sich feststellen, dass unter den im Rahmen der Studie gemachten Annahmen die Jahregänge von Grundwasserneubildung und Abflussbildung sehr ähnlich verlaufen (Abbildungen 4 und 5), da die Grundwasserneubildung in allen betrachteten Regionen der dominante Abflussbildungsprozess ist. Des Weiteren kann festgestellt werden, dass eine zunehmende Grundwassernähe der simulierten Standorte den Jahrgang der berechneten Abflussbildungsprozesse zusätzlich betont (Abbildung 5). So wird in den meisten betrachteten Regionen bereits für das aktuelle Klima im Sommer ein Wasserdefizit eingegangen, das sich unter den Annahmen des Klimawandels deutlich verstärkt, während im Winterhalbjahr aufgrund der höheren Wassersättigung im Boden eine größere Abflussbildung sowohl durch schnelle als auch durch langsame Komponenten festzustellen ist. Mögliche, aufgrund des Klimawandels zu erwartende hydrologische Veränderungen in den einzelnen Regionen können auf Basis der durchgeführten Modellrechnungen wie folgt beschrieben werden:

Das Alpenvorland ist derzeit von einem verhältnismäßig schwach ausgeprägten Jahrgang der Abflussbildung geprägt. Dieser Jahrgang wird sich unter Annahme der WETTREG-Szenarios deutlich verstärken, da diese einen deutlich stärker ausgeprägten Jahrgang des Niederschlags annehmen. Abflussbildung und Grundwasserneubildung werden im Winter deutlich verstärkt und im Sommer deutlich reduziert sein. Diese Tendenz ist an grundwassernahen Standorten verstärkt zu erwarten (Abbildungen 4 und 5).

Im Vergleich zu Alpenvorland wird der Jahrgang der Abflussbildung und Grundwasserneubildung in Nordwestdeutschland unter Annahme der WETTREG-Szenarios deutlich weniger beeinflusst werden. Es ist mit einer Zunahme der Abflussbildungsprozesse im Winter (Dezember – März) und einer Abnahme vor allem im Spätsommer zu rechnen (Juli-Oktober). An grundwassernahen Standorten wird sich das sommerliche Wasserdefizit verstärken.

Der Nordosten Deutschlands und die Südostdeutsche Becken („Ostdeutschland“) sind die einzigen der betrachteten Regionen, die unter Annahme der WETTREG-Szenarios ganzjährig mit einer reduzierten Wasserverfügbarkeit zu rechnen haben. Die starke Abnahme der sommerlichen Niederschläge kann durch die geringe winterliche Zunahme nicht kompensiert werden, so dass sowohl Grundwasserneubildung als auch Abflussbildung ganzjährig zurückgehen. An grundwassernahen Standorten könnte das sommerliche Defizit so groß werden, dass mit einer ganzjährig negativen Wasserbilanz zu rechnen ist.

Die Regionen Westdeutsche Tieflandsbucht (Niederrhein) und Oberrhein nehmen schließlich eine Sonderstellung unter den untersuchten Regionen ein, da sie unter Annahme der WETTREG-Szenarios vor allem durch eine winterliche Zunahme von Grundwasserneubildung und Abflussbildung geprägt sind, während sich die Größenordnung der Abflussbildungsprozesse im Sommer kaum ändert. Der Jahrgang der Abflussbildung wird also deutlich ausgeprägter sein, wobei den winterlichen Zuwächsen nur geringe sommerliche Defizite an grundwassernahen Standorten gegenüberstehen.

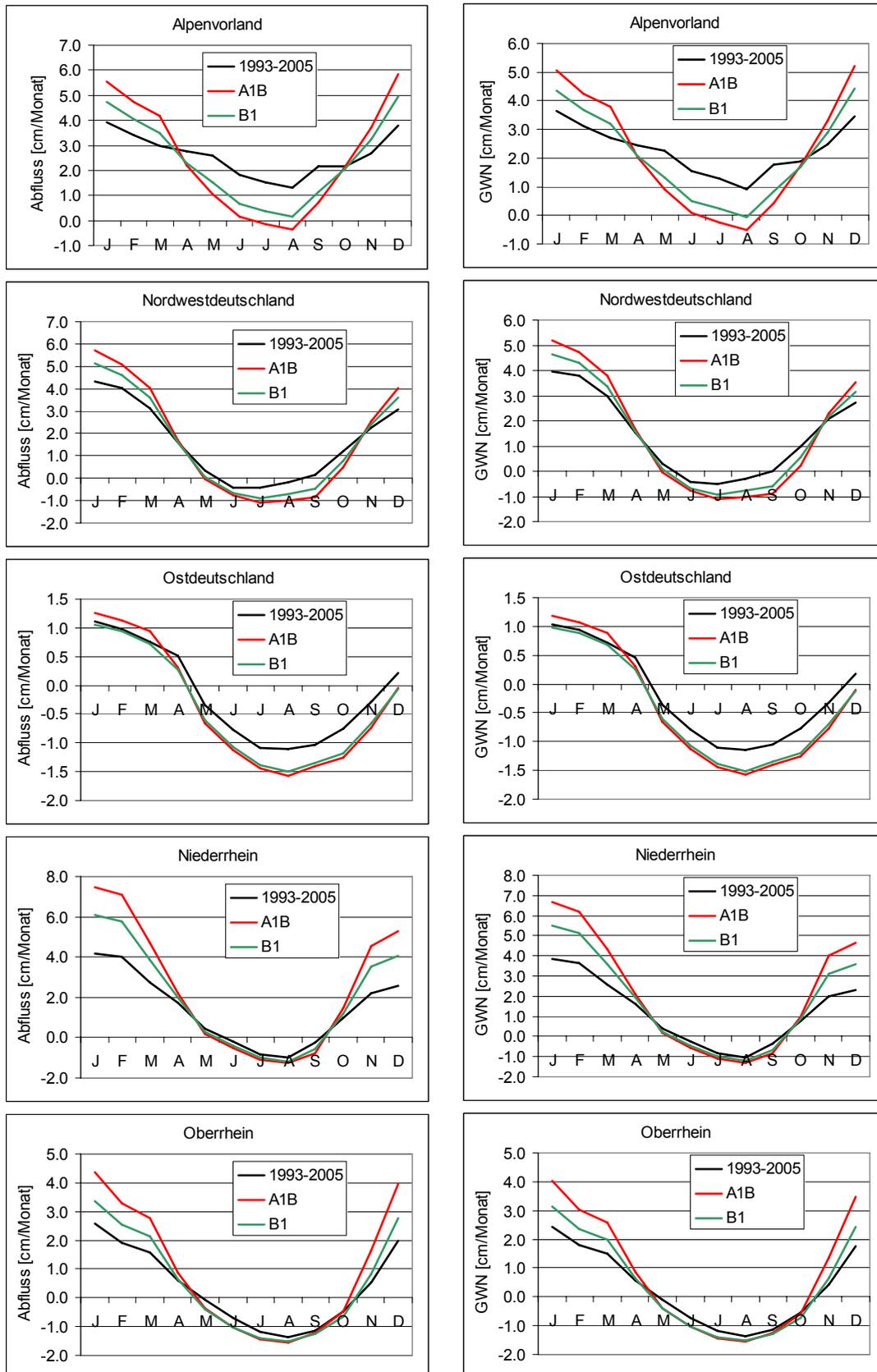


Abb. 5: Jahresbilanzen von Abfluss und Grundwasserneubildung (GWN) in Abhängigkeit vom gewählten WETTREG-Klimaszenario für grundwassernahe Standorte.

Es lässt sich also für alle untersuchten Klimaregionen feststellen, dass sich die jahreszeitlichen Schwankungen sehr wahrscheinlich verstärken werden. In allen untersuchten Regionen werden nach den Simulationsergebnissen die Sommer abflussärmer, bis auf Ostdeutschland die Winter abflussreicher. In den meisten Regionen nehmen bezogen auf Jahresbilanzen die verfügbaren Wasserressourcen zu, in allen Regionen werden aber die Unterschiede zwischen wasserreichen und wasserarmen Jahreszeiten größer, was die zunehmende Bedeutung und die Notwendigkeit des Wassermanagements und der Wasserspeicherung in der Zukunft unterstreicht.

4 Was kann die Wasserwirtschaft tun?

Die Ergebnisse der vorgestellten Modellstudie zeigen, dass ein physikalisch basiertes hydrologisches Modell, das für verschiedene Gebiete in unterschiedlichen Klimaten ohne Kalibrierung validiert werden konnte, sensitiv auf den Klimawandel, repräsentiert durch die WETTREG-Szenarien, reagiert. Die Veränderungen hängen einerseits von den in den WETTREG-Szenarien definierten Veränderungen der Klimavariablen, aber auch von den jeweiligen Gebietseigenschaften (Boden, Landnutzung, Grundwasserbeeinflussung) ab, wie im Rahmen der Sensitivitätsanalyse gezeigt wurde. Natürlich stellt sich auch in diesem Fall die Frage der Verlässlichkeit der Modellergebnisse. Bei den vorgestellten Ergebnissen handelt es sich nicht um Prognosen, sondern nur um Szenarien, die mögliche zukünftige Entwicklungen abbilden. Diese Szenarien wurden von einem Globalen Zirkulationsmodell (ECHAM5) berechnet und mithilfe eines Regionalisierungsverfahrens (WETTREG) regionalisiert, womit ein hydrologisches Modell (SIMULAT) angetrieben werden konnte, das die Auswirkungen auf die Wasserbilanz in verschiedenen Regionen quantifiziert. Wie bereits erwähnt wurde, unterscheiden sich die Szenariorechnungen verschiedener globaler Klimamodelle zum Teil genauso erheblich (IPCC 2007) wie die regionalisierten Klimaszenarien (BRONSTERT et al. 2006). Auch reagieren verschiedene, validierte Modelle teilweise sehr unterschiedlich auf veränderte Umweltbedingungen (JIANG et al. 2007), und die Parametrisierung hydrologischer Modelle für die Bedingungen des Klimawandels ist zum Teil mit einer großen Unsicherheit behaftet (WILBY 2005). Insofern ist es offensichtlich, dass die hier präsentierten Ergebnisse nicht den gesamten Strauß möglicher zukünftiger Entwicklungen der Abflussbildungsprozesse und der Wasserverfügbarkeit in den untersuchten Regionen abbilden können. Sie stellen vielmehr eine mögliche Zukunfts-Variante für zwei unterschiedliche Szenarien des IPCC dar. Des Weiteren stellt sich die Frage, ob es trotz des Wissens über die Grenzen und Einschränkungen der Anwendbarkeit der Simulationsmodelle Alternativen zu entsprechenden Modellstudien gibt, um mögliche Folgen des Klimawandels auf den Wasserhaushalt abzuschätzen. Die Messreihen in der Vergangenheit sind oft zu kurz, um umfassende Auswertungen hinsichtlich hydrologischer Trends und natürlicher Variabilität durchzuführen und dabei die verschiedenen Ursachen von Veränderungen sauber voneinander zu trennen. Auch in der Gegenwart gibt es in vielen Gebieten keine ausreichenden Messsysteme, um die raumzeitliche Variabilität der hydrologischen Prozesse hinreichend genau zu erfassen und damit räumlich verteilte Modelle validieren zu können.

Die klimatologischen Zukunftsszenarien lassen vermuten, dass sich der klimatologische und damit auch der hydrologische Wandel in Zukunft weiter beschleunigen werden. Darauf sollte

die Wasserwirtschaft vorbereitet sein. Es stellt sich also weniger die Frage, ob hydrologische Modellstudien verwendet werden können, um das zukünftige Verhalten abschätzen zu können, sondern eher, wie man mit den Modellergebnissen umgehen kann, wie sie interpretiert werden können. Sicherlich können Modellergebnisse einer Studie wie dieser nicht direkt als Planungsgrundlage für zukünftige wasserwirtschaftliche Anlagen verwendet werden. Aber sie geben Hinweise für hydrologische Veränderungen, die in Zukunft auftreten können. Alle regionalen Modellrechnungen ergaben veränderte jährliche Wasserbilanzen, wobei diese je nach Veränderung der Niederschlagsverhältnisse positiv oder negativ ausfielen. Die Veränderungen in der Verdunstung waren klein im Vergleich zu den Abflussbildungsprozessen. Insofern hängt die Güte der hydrologischen Modellrechnungen vor allem von der Güte der Niederschlagsszenarien ab. Für alle betrachteten Regionen ergeben sich unter Annahme der WETTREG-Szenarien deutlich veränderte Jahregänge. Winterliche Wasserüberschüsse scheinen genauso größer zu werden wie sommerliche Wasserdefizite. Vor allem dieses Ergebnis betont die Notwendigkeit der Anpassung der wasserwirtschaftlichen Strategien an den Klimawandel. In Zukunft muss Wasser noch besser und effizienter bewirtschaftet werden als schon bisher, um den Wasserbedarf auch in trockenen Zeiten zu decken, zumal der Wasserbedarf ausgewählter Branchen wie z.B. der Landwirtschaft bei zunehmender sommerlicher Trockenheit sehr wahrscheinlich zunehmen wird (EULENSTEIN et al. 2006). Die Bedeutung Bewirtschaftung hydrologischer Speicher - Grundwasserspeicher wie Oberflächenwasserspeicher - wird mit Sicherheit steigen. Um diese veränderten Anforderungen besser abschätzen und in eine weitsichtige Planung umsetzen zu können, können Modellrechnungen eine gute Hilfestellung bieten, wenn sie die Unsicherheiten der verschiedenen Bestandteile der Modellkette (GCM, Downscaling, hydrologisches Modell) berücksichtigen und quantifizieren, was zum Beispiel in Form von Multi-Modell-Ensembles geschehen kann (BORMANN et al. 2007). Dann können die Szenarien des hydrologischen Wandels eine Hilfestellung für die konkrete zukünftige wasserwirtschaftliche Planung geben.

5 Schlussfolgerungen

Mit dem vorgestellten Methodeninventar (Szenario – globales Klimamodell – Downscaling – hydrologisches Modell) können mögliche und typische Reaktionen des Wasserhaushalts auf den zukünftigen Klimawandel quantifiziert werden. Für verschiedene untersuchte Regionen wurden für die Bedingungen des Klimawandels deutliche hydrologische Veränderungen berechnet. Dabei handelt es sich nicht um Zukunftsprognosen, sondern um Szenarien, also mögliche zukünftige Entwicklungen der hydrologischen Verhältnisse. Die Ergebnisse dieser oder vergleichbarer anderer Modellstudien können natürlich nicht allein Grundlage einer langfristigen wasserwirtschaftlichen Planung sein. Sie geben aber Hinweise über mögliche oder sogar wahrscheinliche hydrologische Veränderungen in der Zukunft. Werden entsprechende Studien systematisch für verschiedene Werkzeuge (Klimamodelle, Downscaling-Verfahren, hydrologische Modelle) durchgeführt, dann können die Unsicherheiten und Schwankungsbreiten der Szenarien beschrieben und als Hilfestellung für die zukünftige wasserwirtschaftliche Planung verwendet werden. Wenn auch nicht prognostiziert werden kann, wie genau sich das hydrologische Verhalten ändern wird, so ist sicher, dass es sich ändern wird. Modell können Hinweise geben, in welche Richtung die Veränderungen gehen werden.

Danksagung

Der Dank des Autors gilt dem Deutschen Wetterdienst (DWD) und dem Umweltbundesamt (UBA) für die freie Verfügbarkeit der im Rahmen der Modellstudie verwendeten Daten.

Literatur

- ADEN, K. & B. DIEKKRÜGER (2000): Modeling pesticide dynamics of four different sites using the model system SIMULAT. – *Agricultural Water Management* 44, 337-355.
- AD-HOC AG BODEN (2005): *Bodenkundliche Kartieranleitung*. – 5. Aufl., 438 S, Hannover, Schweizerbart.
- BELZ, J.U. et al. (2007): Das Abflussregime des Rheins und seiner Nebenflüsse im 20. Jahrhundert. Analyse, Veränderungen, Trends. – *KHR-Bericht 1-22*, 376 S.
- BORMANN, H. (2007): Analysis of the suitability of the German soil texture classification for the regional scale application of physical based hydrological model. – *Advances in Geosciences* 11, 7-13.
- BORMANN, H. (2001): *Hochskalieren von prozessorientierten Wassertransportmodellen - Methoden und Grenzen*. – München, Herbert-Utz-Verlag - Wissenschaft (Reihe Geowissenschaften), 176 S.
- BORMANN, H. et al. (2008): Analyse der Ursachen der Verstärkung von Hochwasserereignissen an Deutschen Flüssen. – *Forum für Hydrologie und Wasserbewirtschaftung*. In Druck.
- BORMANN, H. et al. (2007): Reduction of predictive uncertainty by ensemble hydrological modelling of catchment processes and land use change effects. – *Proceedings of the 11th Conference of the Euromediterranean Network of Experimental and Representative Basins (ERB)*, Luxembourg, 20 – 22 September 2006. IHP-VI / Technical Documents in Hydrology 81, 133-139.
- BRONSTERT et al. (2006): Vergleich und hydrologische Wertung regionaler Klimaszenarien für Süddeutschland. – *Hydrologie und Wasserbewirtschaftung* 50(6), 270-287.
- DIEKKRÜGER, B. et al. (1995): Validity of agroecosystem models – A comparison of results of different models applied to the same data set. – *Ecological Modelling*, 81(1-3), 3-29.
- DIEKKRÜGER, B. & M. ARNING (1995): Simulation of water fluxes using different methods for estimating soil parameters. – *Ecological Modelling* 81(1-3): 83-95.
- EULENSTEIN, F. et al. (2006): Mögliche Auswirkungen der Klimaveränderungen auf den Wasserhaushalt von Agrarlandschaften in Nord-Mitteleuropa. – *Wasserwirtschaft* 96(9), 32-36.
- FOWLER, H.J. et al. (2007): Modelling the impacts of projected future climate change on water resources in north-west England. – *Hydrology and Earth System Sciences* 11(3), 1115-1126.
- GIERTZ, S. et al. (2006): Physically-based modelling of hydrological processes in a tropical headwater catchment in Benin (West Africa) - process representation and multi-criteria validation. – *Hydrology and Earth System Sciences* 10, 829-847.
- HAD (2003): *Hydrologischer Atlas von Deutschland*. – Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit. Bonn/Berlin.

- HERRERA-PANTOJA, M. & K.M. HISCOCK (2008): The effects of climate change on potential groundwater recharge in Great Britain. – *Hydrological Processes* 22, 73-86.
- IPCC (2007): *Climate Change 2007 - The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the IPCC.* – Cambridge University Press.
- JIANG et al. (2007): Comparison of hydrological impacts of climate change simulated by six hydrological models in the Dongjiang Basin, South China. – *Journal of Hydrology* 336, 316-333.
- KILSBY, C.G. et al. (2007): Hydrological impacts of climate change on the Tejo and Guadiana Rivers. – *Hydrology and Earth System Sciences* 11(3), 1175-1189.
- KUHN, M. (1998): Untersuchungen zur Auswirkung der Variabilität von Bodeneigenschaften auf die Wasserflüsse – Feldversuch und Simulation. – *Landschaftsökologie und Umweltforschung* 31, TU Braunschweig, 173 S.
- MIDDELKOOP, H. et al. (2001): Impact of climate change on hydrological regimes and water resources management in the Rhine basin. – *Climatic Change* 49, 105-128.
- MUDELSEE, M. et al. (2003): No upward trends in the occurrence of extreme floods in central Europe. – *Nature*, 425, 166-169.
- PFAUNDLER, M. et al. (2006): Versteckt hinter Mittelwerten – die Variabilität des Abflussregimes. – *Hydrologie und Wasserwirtschaft* 50(3), 116-123.
- PINTER, N. et al. (2006): Flood magnification of the River Rhine. – *Hydrological Processes*, 20, 147-164.
- RADZIEJEWSKI, M. & Z.W. KUNDZEWICZ (2004): Detectability of changes in hydrological records. – *Hydrological Sciences Journal*, 49(1), 39-51.
- STEPHAN, K. (2003): Möglichkeiten der Aggregation heterogener Eingangsdaten für eine prozessorientierte hydrologische Simulation der Wasserflüsse am Beispiel des Untersuchungsgebietes der Oberen Leine. – Dissertation, Math.-Nat. Fak. Univ. Bonn.
http://hss.ulb.uni-bonn.de/ulb_bonn/diss_online/math_nat_fak/2003/stephan_klaus/index.htm. (15.4.08).
- THODSEN, H. (2007): The influence of climate change on stream flow in Danish rivers. – *Journal of Hydrology* 333, 226-238.
- UBA (2007): Neuentwicklung von regional hoch aufgelösten Wetterlagen für Deutschland und Bereitstellung regionaler Klimaszenarios auf der Basis von globalen Klimasimulationen mit dem Regionalisierungsmodell WETTREG auf der Basis von globalen Klimasimulationen mit ECHAM5/MPI-OM T63L31 2010 bis 2100 für die SRES-Szenarios B1, A1B und A2. – Forschungsprojekt im Auftrag des Umweltbundesamtes FuE-Vorhaben Förderkennzeichen 204 41 138: A. SPEKAT et al. (Januar 2007).
- WAGENER, T. (2007): Can we model the hydrological impacts of environmental change? – *Hydrological Processes* 21, 3233-3236.
- WILBY, R.L. (2005): Uncertainty in water resource model parameters used for climate change impact assessment. – *Hydrological Processes* 19, 3201-3219.
- WILBY, R.L. et al. (2006): Integrated modelling of climate change impacts on water resources and quality in a lowland catchment: River Kennet, UK. – *Journal of Hydrology* 330, 204-220.

Hochwasserschutz und Bemessungsabflüsse

Bernd Katzenberger

Zusammenfassung

Die bisherigen Untersuchungen des Projekts KLIWA haben gezeigt, dass in Baden-Württemberg und Bayern Hochwasserereignisse in den letzten Jahrzehnten häufiger auftraten und dass aufgrund des Klimawandels eine Erhöhung der Hochwasserabflüsse zu erwarten ist.

Die vorliegenden Ergebnisse haben dazu geführt, dass aus Vorsorgegründen Anpassungsmaßnahmen im Hochwasserschutz ergriffen werden. In Baden-Württemberg wurde für die Planung neuer technischer Hochwasserschutzanlagen der „Lastfall Klimaänderung“ eingeführt. Weiterhin werden die Bereiche Hochwasservorsorge und Hochwasserflächenmanagement verstärkt angegangen.

Dabei ist man sich bewusst, dass die bislang gewonnenen Erkenntnisse auf Grund der zu treffenden Annahmen z.B. zur künftigen globalen Emissionsentwicklung der Treibhausgase Unsicherheiten beinhalten. Mit den Fortschritten der weltweiten Klimaforschung und der Verbesserung der Klimamodelle werden sich die Erkenntnisse zum Klimawandel weiter fortentwickeln müssen. Die Entwicklungen werden auch künftig zeitnah zu verfolgen und zu bewerten sein.

Letztlich bleibt es eine große Herausforderung, praxistaugliche Anpassungsstrategien für die vom Klimawandel betroffenen wasserwirtschaftlichen Handlungsfelder zu entwickeln und mit Augenmaß anzuwenden.

1. Anlass

Die Länder Baden-Württemberg und Bayern haben gemeinsam mit dem Deutschen Wetterdienst bereits 1999 das Kooperationsvorhaben „Klimaveränderung und Konsequenzen für die Wasserwirtschaft“ (KLIWA) begonnen (BARTELS et al. 2004). Das Projekt ist längerfristig angelegt. Seit 2007 ist auch das Land Rheinland-Pfalz Kooperationspartner.

Zielrichtung von KLIWA ist es, die möglichen Folgen der Klimaveränderung auf den Wasserhaushalt in den einzelnen Flussgebieten der Länder abzuschätzen, die Konsequenzen aufzuzeigen und Handlungsempfehlungen für die betroffenen Bereiche (Hochwasserschutz, Grundwassernutzung, Siedlungsentwässerung, Gewässernutzungen, Gewässerökologie etc.) im Sinne einer vorsorgenden Wasserwirtschaftspolitik zu entwickeln.

Bei der Gründung von KLIWA stand die konkrete Frage im Vordergrund, wie sich der Klimawandel in den nächsten 50 Jahren auf die Hochwasserabflüsse in Süddeutschland auswirken wird. Dabei galt es, die Häufung der Hochwasserereignisse seit den 1970er-Jahren hydrologisch zu bewerten und Lösungsansätze zu entwickeln, um die möglichen

Folgen der Klimaentwicklung auch regional abschätzen zu können und geeignete Anpassungsmaßnahmen zu entwickeln.

2. Klimaentwicklung im 20. Jahrhundert

Die Analyse langer Messreihen hydrometeorologischer u. hydrologischer Größen ist aus folgenden Gründen besonders wichtig:

- Sie gibt Aufschluss über die zeitliche Variabilität, d.h. über vorhandene natürliche Schwankungen und eventuelle systematische Veränderungen (Trends), ebenso über die räumliche Variabilität, d.h. über die spezifischen Verhältnisse in den einzelnen Teilräumen.
- Aus dem bisherigen Verhalten lassen sich Eckwerte und Randbedingungen für Szenarienrechnungen abschätzen. Künftige Entwicklungen können damit fundierter beurteilt werden.

Das Langzeitverhalten u.a. von Starkniederschlägen (KLIWA 2006), Lufttemperatur (KLIWA 2005), Schneedeckenparameter (KLIWA 2005) und Hochwasserabflüssen (KLIWA 2002) wurde auf der Grundlage einer großen Datenbasis im Rahmen von KLIWA flächendeckend in Baden-Württemberg und Bayern untersucht und dokumentiert.

Die klimatischen Bedingungen in Süddeutschland haben sich demnach in den letzten Jahrzehnten signifikant verändert. Dies zeigt sich z.B. bei der festgestellten Erhöhung der Lufttemperatur, der Zunahme von Starkniederschlägen im Winter sowie von Dauer und Häufigkeit von Westwetterlagen.

Bei den Trenduntersuchungen der Hochwasserabflüsse wurde festgestellt, dass an vielen Pegeln die Häufigkeit von Winterhochwasser seit den 1970er-Jahren zugenommen hat und dass die monatlichen Hochwasserabflüsse im hydrologischen Winterhalbjahr ab den 1970er-Jahren höher als in der Zeit davor waren. Betrachtet man die letzten 30 Jahre, zeigen auch die Höchstabflüsse bei vielen Pegeln zunehmende Trends (HENNEGRIFF & REICH 2007).

Die KLIWA-Ergebnisse zu den Veränderungen der Starkniederschläge waren Anlass, die für die wasserwirtschaftliche Bemessungspraxis bedeutsamen KOSTRA-Werte fortzuschreiben (DEUTSCHER WETTERDIENST 2005).

3. Prognosen für die künftige Klimaentwicklung

Antworten zur künftigen Klimaentwicklung auf regionaler Ebene können mit Hilfe von globalen Klimamodellen nicht gegeben werden, da diese sehr grobmaschig angelegt sind. Mit Gitterweiten von 250 km würde z.B. die Landesfläche von Baden-Württemberg gerade mit einer Gittermasche abgebildet werden. In globalen Klimamodellen kann demnach die Topographie einer Landesfläche wie diejenige von Baden-Württemberg nicht abgebildet werden. Deshalb mussten zunächst regionale Klimamodelle entwickelt werden. Da es für die Abschätzung der künftigen Klimaentwicklung auf regionalem Maßstab noch kein optimales

Verfahren gab, wurden im Rahmen von KLIWA drei verschiedene Institutionen beauftragt, regionale Klimaszenarien mit unterschiedlichen Verfahren zu erstellen, nämlich

- mit einem statistischen Downscaling-Verfahren mittels Clusteranalyse („STAR“), Potsdam Institut für Klimafolgenforschung,
- mit einer statistisch-dynamischen Downscaling mittels Wetterlagenklassifikation (WETTREG), Fa. Meteo-Research und
- mit einem regionalen dynamischen Klimamodell (REMO), Max-Planck-Institut für Meteorologie.

Um vergleichbare Ergebnisse zu bekommen, gaben die Partner von KLIWA weitgehend identische Randbedingungen vor: Messdaten 1951-2000, Verifikationszeitraum 1971-2000, Globalmodell ECHAM 4, IPCC-Emissionsszenario B2, Szenariozeitraum 2021-2050.

Bei den Ergebnissen zeigte sich erwartungsgemäß eine Bandbreite. Insgesamt aber ist für das Zieljahr 2050 zu erwarten, dass die Erwärmung weiter geht (bis 2050 um 1,7° C), die Winter feuchter (Abbildung 1) und die Sommer trockener werden (KLIWA 2006).

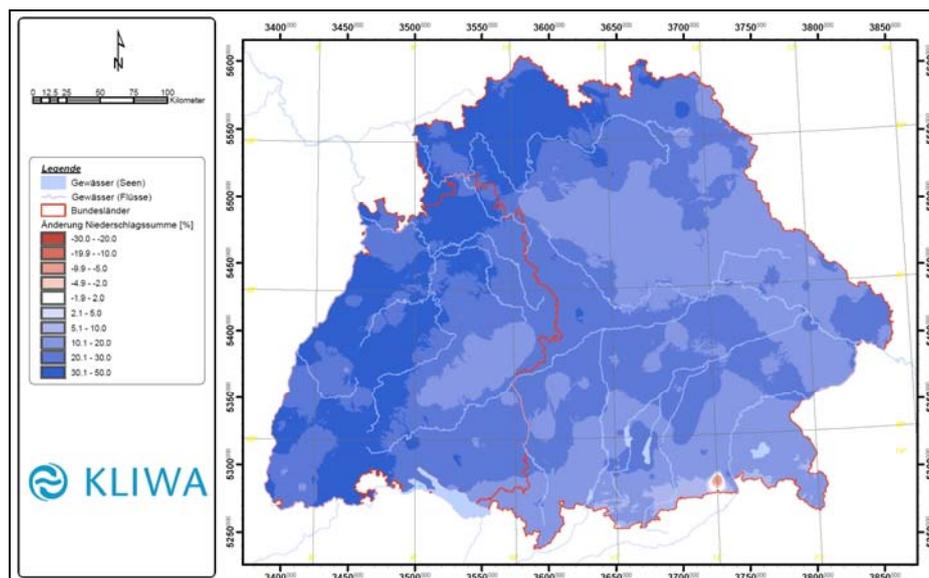


Abb. 1: Änderung der Niederschlagssumme (%) im hydrologischen Winterhalbjahr (Differenz Szenario (2021-2050) zu Ist-Zustand (1971-2000) nach WETTREG (B2, ECHAM 4)

Mit Hilfe der regionalen Klimamodelle wurde die zukünftige Entwicklung der Parameter Lufttemperatur, Niederschlag, relative Luftfeuchtigkeit, Windgeschwindigkeit, Globalstrahlung und Luftdruck für den Zeitraum 2021 bis 2050 simuliert. Mit den regionalen Klimamodellen lassen sich jedoch noch keine Prognosen für die zukünftige Entwicklung der hydrologischen Größen wie z.B. Hochwasserabflüsse ableiten. Ohne diese Prognosen wären auch keine Erkenntnisse für wasserwirtschaftliche Vorsorgeempfehlungen zu gewinnen.

Deshalb musste die Modellkette globale und regionale Klimamodelle durch Wasserhaushaltsmodelle fortgeführt werden. Die Ergebnisse aus den regionalen Klimamodellen werden demnach als Input für die Wasserhaushaltsmodelle verwendet.

4. Prognosen für den Wasserhaushalt

4.1 Wasserhaushaltsmodell LARSIM

Um die Auswirkungen von Klimaänderungen auf den Wasserhaushalt und das Hochwassergeschehen zu berechnen, sind detaillierte hydrologische Modelle erforderlich. Die Untersuchungen erfolgen auf der Basis von Simulationsrechnungen mit Wasserhaushaltsmodellen (WHM) für die einzelnen Flussgebiete. Als Input für die WHM werden die Ergebnisse aus regionalen Klimaszenarien verwendet.

Für alle baden-württembergischen Flussgebiete wurde das Wasserhaushaltsmodell LARSIM („Large Area Runoff Simulation Model) erstellt (Abbildung 2). LARSIM ermöglicht eine flächenhafte Simulation des terrestrischen Wasserkreislaufs in hoher zeitlicher Auflösung.

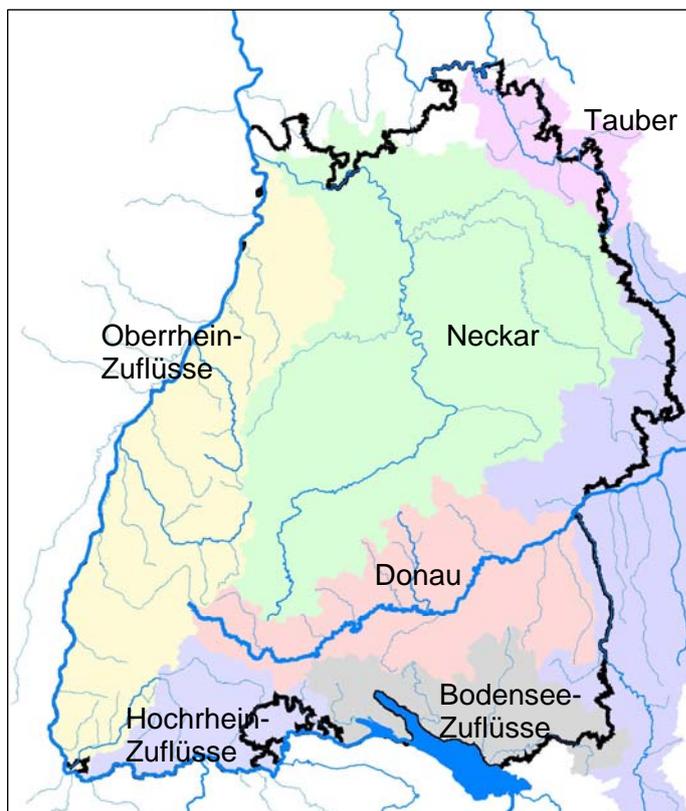


Abb. 2: Wasserhaushaltsmodelle in Baden-Württemberg

Die WHM weisen eine rasterbasierte Flächenauflösung von $1 \times 1 \text{ km}^2$ auf und bilden somit das natürliche Flussnetz sowie die topographischen Gebietseigenschaften detailliert nach (Abbildung 3). Innerhalb jeder einzelnen Rasterfläche berücksichtigt das Modell bis zu 16

unterschiedliche Landnutzungsklassen mit ihren spezifischen Verdunstungs- und Abflusseigenschaften.

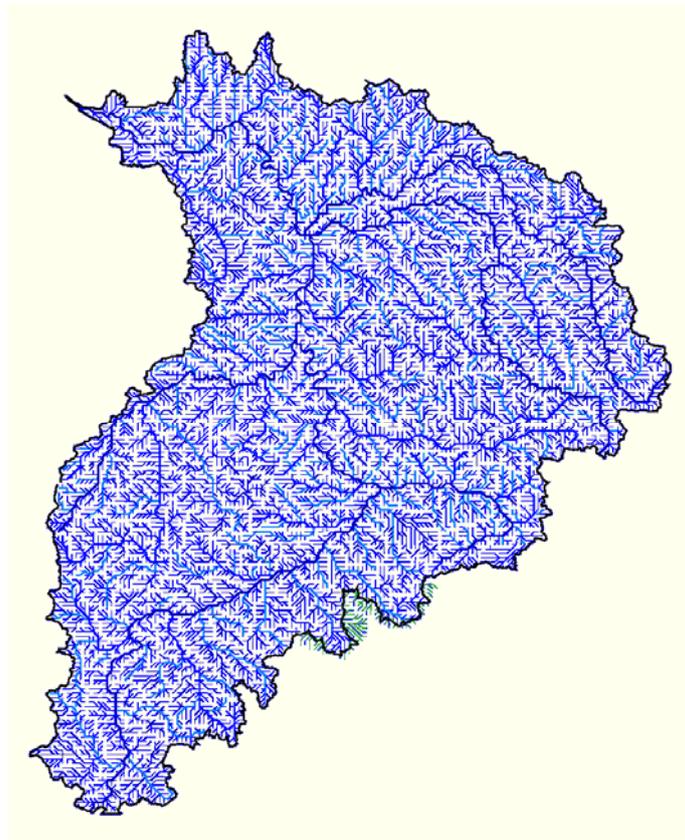


Abb. 3: Vernetzung der Rasterflächen im Wasserhaushaltsmodell Neckar

In den Wasserhaushaltsmodellen (WHM) werden folgende hydrologische Prozesse berechnet:

- Akkumulation, Metamorphose und Schmelze von Schnee
- Pflanzenverdunstung sowie Verdunstung von Boden- und Wasserflächen
- Bodenwasserhaushalt
- Grundwasserneubildung
- Wassertransport in der Fläche (Oberflächenabfluss, Interflow und Grundwasserabfluss)
- Translation und Retention im Gerinne

Eine schematische Darstellung der Modellkomponenten zeigt Abbildung 4. Eine detaillierte Beschreibung der verwendeten Berechnungsverfahren ist zusammengestellt bei (BREMICKER 2000) und (LUDWIG & BREMICKER 2006).

Meteorologische Eingangsdaten für die Modelle sind Zeitreihen für Niederschlag, Temperatur, Luftfeuchte, Globalstrahlung, Windgeschwindigkeit und Luftdruck. Berechnungsergebnisse der WHM sind Abflussganglinien für die rund 36.000 im

Modell erfassten Gewässerteilstrecken beziehungsweise Knoten in BW sowie Zeitreihen für die hydrologischen Prozesse.

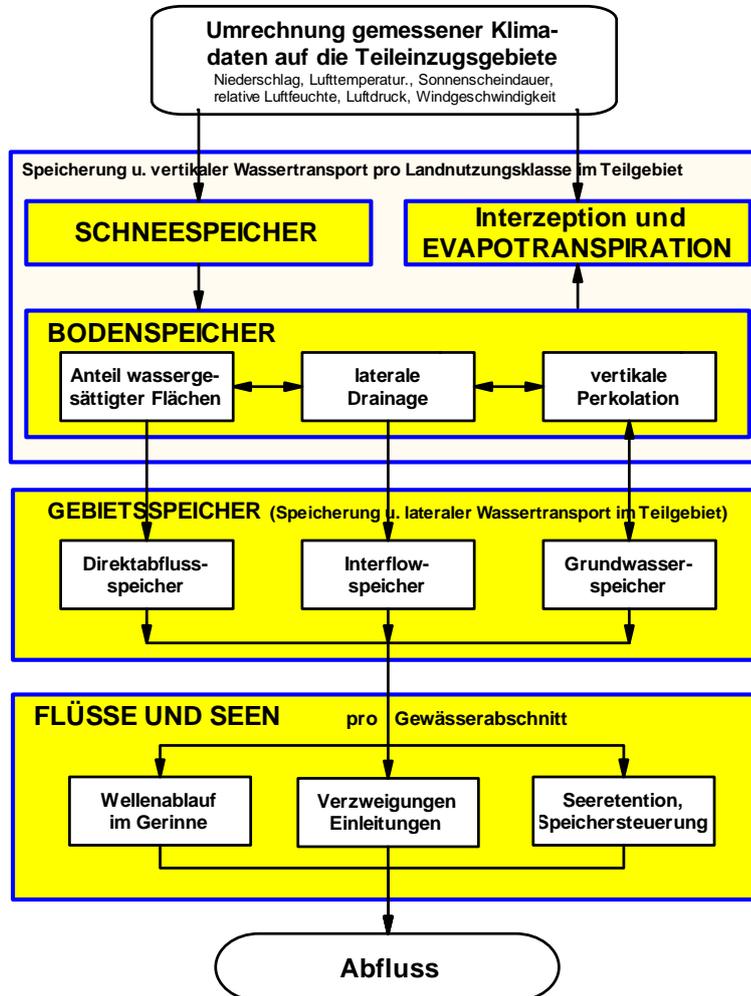


Abb. 4: Modellschema LARSIM

Die Wasserhaushaltsmodelle wurden anhand von hydrologischen Messwerten kalibriert und im Hinblick auf ihre Modellqualität verifiziert.

4.2. Prognosen für die Entwicklung der Hochwasserabflüsse

Es wurden jeweils 30 Jahre umfassende WHM-Berechnungsläufe für den Ist-Zustand des Klimas (Jahre 1971 bis 2000) sowie für regionale Klimaszenarien (Jahre 2021 bis 2050) auf Tageswertbasis durchgeführt (GERLINGER 2004). Als maßgebliches Klimaszenario für die Wasserhaushaltsuntersuchungen wurden nach umfangreichen Voruntersuchungen die Klimaszenarien von Meteo-Research (WETTREG) verwendet.

Die Berechnungsergebnisse der WHM zeigen für das Zukunftsszenario insbesondere in den Regionen obere Donau, Neckar und Südschwarzwald markante Erhöhungen der mittleren monatlichen Hochwasser, die in einzelnen Monaten des Winterhalbjahres teilweise über 60 % gegenüber dem Ist-Zustand betragen (Abbildung 5). Bei zunehmend größeren (und damit seltener auftretenden) Hochwasserereignissen sind die Erhöhungen gegenüber dem Ist-Zustand nicht mehr so groß.

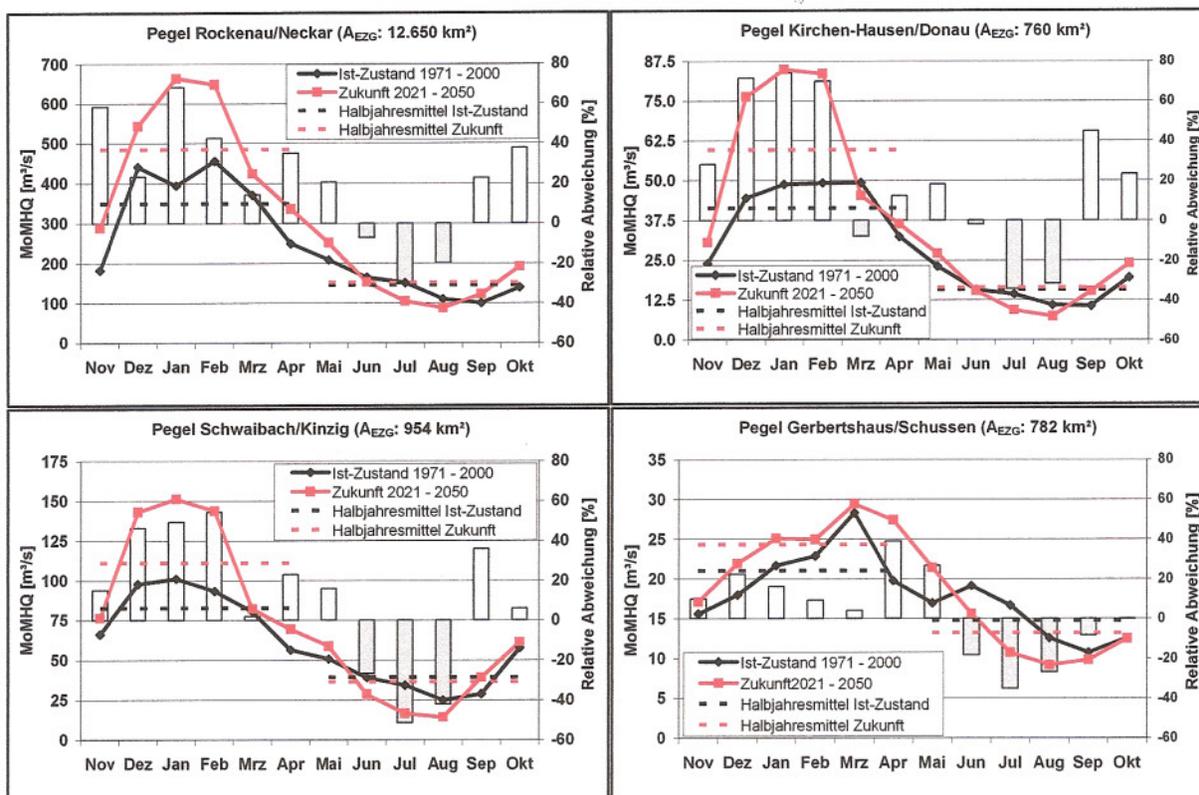


Abb. 5: Monatliche mittlere Hochwasserabflüsse (MoMHQ) für den Ist-Zustand und das Zukunftsszenario sowie relative Abweichungen für vier Pegel in Baden-Württemberg (BREMICKER 2006)

Die ermittelten Abflüsse aus der Wasserhaushaltsmodellierung wurden mit Methoden der Extremwertstatistik aufbereitet (IHRINGER 2004). Die Szenarien lassen eine deutliche Zunahme der mittleren Hochwasser (MHQ), aber auch der extremen Abflüsse erwarten.

Die Ergebnisse wurden für die jeweiligen Jährlichkeiten in Karten übertragen. Die Ergebnisse der einzelnen Karten wurden anschließend zu einer Gesamtkarte und einer Tabelle zusammengefasst. Damit ergeben sich für Baden-Württemberg die in Abbildung 6 dargestellten fünf Bereiche mit jeweils unterschiedlichen Klimaänderungsfaktoren.

Schema für Einsatz der WHM

1. **Verifikation** des WHM mit gemessenen Daten (z.B. 1961-2000)
2. **WHM-Referenzlauf** (WHM-Simulation auf Grundlage der Klimaszenarien für den Ist-Zustand, 1971-2000)
3. **WHM-Zukunftsszenario** (WHM-Simulation auf Grundlage der Klimaszenarien für die Zukunft, 2021-2050)
4. **Statistische Auswertung** (Änderung hydrologischer Parameter im Zukunftsszenario gegenüber Referenzlauf)

Durch räumliche Zuordnung zu einem der 5 Bereiche stehen somit Klimaänderungsfaktoren für alle Flüsse im Land (Ausnahme: Rhein, Untersuchungen noch nicht abgeschlossen) und für die jeweiligen Hochwasser-Jährlichkeiten zur Verfügung. Die entsprechenden Werte sind in Abbildung 6 zusammengestellt. Es können folgende Ergebnisse für die zukünftige Entwicklung der Hochwasserabflüsse festgehalten werden (HENNEGRIFF & KOLOKOTRONIS 2007):

- Insbesondere die kleineren und mittleren Hochwasserereignisse werden voraussichtlich landesweit zunehmen.
- Der Hochwasserkennwert für die Jährlichkeit 100 Jahre erhält einen Zuschlag von 15 % bzw. 25 %.
- Das Extremereignis HQ_{1000} ist für das Zukunftsszenario im Vergleich zu den gegenwärtigen Verhältnissen unverändert, da die Extremwertstatistik auf der vorhandenen Datenbasis eine Änderung dieses Kennwertes gegenwärtig nicht rechtfertigen würde.

Auf Grund der Unsicherheiten bei den Klimamodellen und den Modellannahmen ist eine mögliche Fortschreibung der angegebenen Klimaänderungsfaktoren zu gegebener Zeit vorgesehen. Derzeit besteht hierzu kein Anlass.

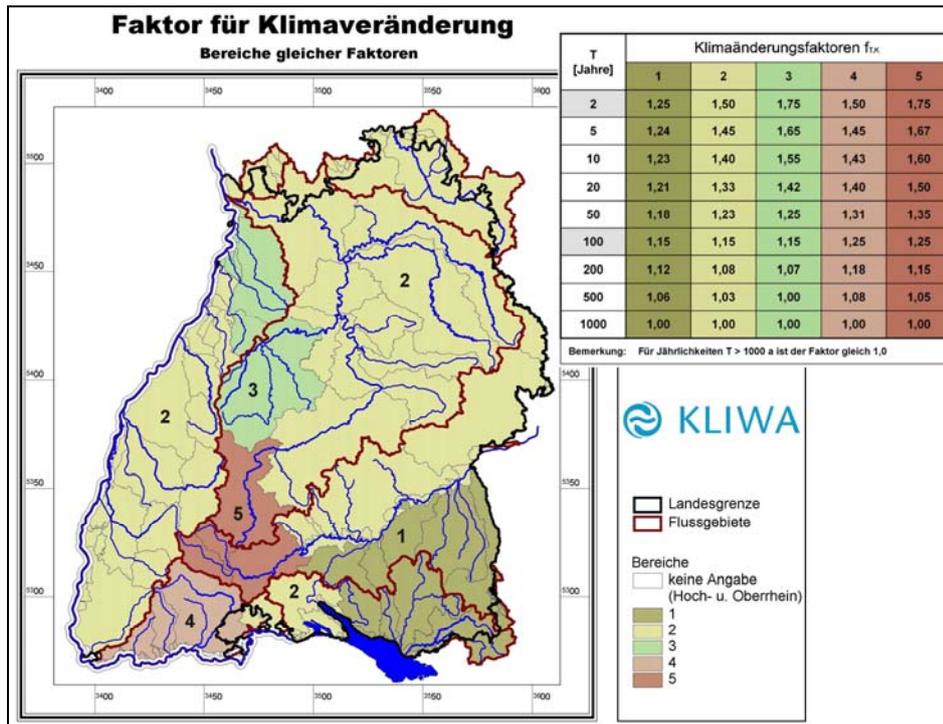


Abb. 6: Regionale Klimaänderungsfaktoren in Baden-Württemberg

5. Auswirkungen auf den Hochwasserschutz in Baden-Württemberg

5.1 Lastfall Klimaänderung

Die Ergebnisse aus den Messzeitreihen und den Modellierungen lassen eine Hochwasserverschärfung durch den Klimawandel erwarten.

Vor diesem Hintergrund gilt es aus Vorsorgegründen für den Bereich des Hochwasserschutzes eine Anpassungsstrategie zu entwickeln, die zwar die mögliche Entwicklung der nächsten Jahrzehnte berücksichtigt, aber auch den bestehenden Unsicherheiten Rechnung trägt (KATZENBERGER 2004). Festlegungen sollten daher als Kernpunkt enthalten, dass sie einerseits langfristig unschädlich und gleichzeitig bei Bedarf (z.B. bei neuen Erkenntnissen der Klimaforschung) anpassbar sind („flexible and no regret“-Strategie).

Die durchgeführten Auswertungen geben Anlass, den bisherigen Weg bei der Festlegung von Bemessungsabflüssen zu modifizieren und auf Grund des Klimawandels einen „Lastfall Klimaänderung“ zu berücksichtigen. Anhand von Fallbeispielen aus der Praxis wurde nachgewiesen, dass eine Berücksichtigung der Auswirkungen der Klimaänderung bei technischen Hochwasserschutzmaßnahmen in den meisten Fällen zu relativ moderaten Kostensteigerungen geführt hätte, wenn dieser Lastfall bereits bei der Planung berücksichtigt und beim Bau zumindest entsprechende Vorkehrungen für eine spätere Anpassung getroffen

worden wären. Nachträgliche Anpassungen sind hingegen meist mit sehr hohen Kosten verbunden.

Der Lastfall Klimaänderung wird deshalb bei Planungen von neuen Hochwasserschutzmaßnahmen in Baden-Württemberg mit untersucht. Dabei ist aufzuzeigen, welche Konsequenzen sich durch den Lastfall auf die Auslegung ergeben und welche Mehrkosten dadurch zu erwarten sind. Auf Grund der dann vorliegenden Erkenntnisse soll dann entschieden werden, inwieweit der Lastfall bereits bei der Planung berücksichtigt wird. Dabei sind auch Möglichkeiten für eine spätere Anpassung in Betracht zu ziehen.

5.2 Erhöhung der Bemessungsabflüsse

Für die Abflüsse beim Lastfall Klimaänderung ($HQ_{T,K}$) können die aus der Hochwasserregionalisierung oder hydrologischen Modellberechnung vorliegenden Abflüsse HQ_T direkt über Klimaänderungsfaktoren $f_{T,K}$ erhöht werden:

$$HQ_{T,K} = f_{T,K} \cdot HQ_T$$

Die Tabelle 1 enthält die entsprechenden Werte am Beispiel für den Pegel Schwaibach/Kinzig ($A_{E,0} = 954 \text{ km}^2$).

Tab.1: Abflusskennwerte (ohne/mit Lastfall Klimaänderung) Pegel Schwaibach/Kinzig

T (Jahre)	HQ_T (m^3/s)	$f_{T,K}$	$HQ_{T,K}$ (m^3/s)
2	255	1,5	383
5	409	1,45	593
10	533	1,40	746
20	669	1,33	890
50	874	1,23	1075
100	1049	1,15	1206
200	1174	1,08	1268
500	1364	1,03	1405
1000	1470	1,0	1470

Die Vorgehensweise beim Lastfall Klimaänderung bei neuen Hochwasserschutzplanungen ist in Baden-Württemberg in den Leitfaden „Festlegung des Bemessungshochwassers für Anlagen des technischen Hochwasserschutzes“ mit einer Sammlung von Beispielen aufgenommen worden (LfU BW 2005). Dieser Leitfaden wurde im Juli 2005 veröffentlicht.

Zusammen mit der Regionalisierung der Hochwasserkennwerte „Abflusskennwerte in Baden-Württemberg“, die flächendeckend für Baden-Württemberg vorliegt (LUBW 2007), ist damit die Berücksichtigung des Klimawandels bei den Auswirkungen auf die

Hochwasserabflüsse auf eine landeseinheitliche Basis, die in der Praxis leicht zu handhaben ist, gestellt worden (Bezugsquelle: bibliothek@lubw.bwl.de).

5.3 Beispiele

Die nachfolgend aufgeführten Beispiele sollen verdeutlichen, wie beim Lastfall Klimaänderung vorgegangen werden kann:

- Planung eines Hochwasserdammes: Der Damm wird nach derzeitigen Vorgaben gebaut, es werden jedoch zusätzliche Maßnahmen vorgenommen, die nach bisherigen Planungsgesichtspunkten nicht erforderlich wären. Zum Beispiel wird zusätzlich ein Geländestreifen auf der Luftseite beansprucht und freigehalten, der eine zukünftig ggf. notwendige Dammerhöhung ohne zusätzliche Probleme ermöglicht.
- Neue Bauobjekte, bei denen eine zukünftige Änderung und Anpassung nicht oder nur sehr aufwändig möglich ist (z.B. Brücken), sollten sofort auf zukünftig ggf. erhöhte Bemessungsgrößen beim Wasserstand ausgelegt werden.
- Neue Bauobjekte, bei denen eine zukünftige Anpassung weniger problematisch ist (z.B. Ufermauern), sollten hinsichtlich ihrer Konstruktionsmerkmale (z.B. der Statik) über den derzeitigen Bedarf hinaus so ausgelegt werden, dass eine ggf. später notwendig werdende Anpassung (Erhöhung durch feste oder mobile Elemente) kostengünstig möglich ist.
- Planung von Hochwasserrückhaltebecken: Eine spätere Anpassung eines Hochwasserrückhaltebeckens (HRB), das nicht auf die hydrologischen Änderungen infolge des Klimawandels ausgelegt ist, ist in der Regel sehr kostenträchtig, sofern eine Anpassung überhaupt technisch möglich ist. Es sind die technischen Einzelbauwerke und auch das notwendige Beckenspeichervolumen anzupassen.

6. Ausblick

Die bisherigen Erkenntnisse zu den Klimafolgen haben bereits zu konkreten Konsequenzen in Süddeutschland geführt. Bei der Bemessung von neuen Hochwasserschutzplanungen werden die erwarteten Folgen des Klimawandels bereits jetzt berücksichtigt.

Die durch den Klimawandel verschärfte Hochwasserproblematik zeigt aber auch, dass eine Hochwasserschutz-Strategie nicht nur auf der Säule des technischen Hochwasserschutzes gegründet sein kann, sondern dass die beiden anderen Säulen „Hochwasser-Flächenmanagement“ und „Hochwasser-Vorsorge“ verstärkt verfolgt werden müssen. Die derzeitige Erstellung von Hochwasser-Gefahrenkarten, die Einrichtung von Hochwasser-Partnerschaften sowie die 2007 erfolgte Einführung eines landesweiten Hochwasser-Frühwarnsystems für kleine Einzugsgebiete können hier exemplarisch als konkrete Maßnahmen in Baden-Württemberg genannt werden.

Die bislang gewonnenen Ergebnisse beinhalten noch Unsicherheiten. Mit den Fortschritten der weltweiten Klimaforschung werden sich die bisherigen Erkenntnisse zwangsläufig auch fortentwickeln müssen. Im Projekt KLIWA wird dies zeitnah verfolgt und bewertet werden.

Weitere Informationen und Ergebnisse sind unter www.kliwa.de abrufbar.

7. Literatur

- BARTELS, H. et al. (2004): Klimaveränderung und Wasserwirtschaft in Süddeutschland. - Wasserwirtschaft Heft 4/2004
- BREMICKER, M.(2000): Das Wasserhaushaltsmodell LARSIM–Modellgrundlagen und Anwendungsbeispiele. - Freiburger Schriften zur Hydrologie, Band 11, Institut für Hydrologie der Universität Freiburg
- BREMICKER, M. (2006): Simulation von Hochwasserereignissen in Baden-Württemberg. - In: KLIWA-Berichte Heft 10, Karlsruhe
- DEUTSCHER WETTERDIENST (2005): Grundlagenbericht und Fortschreibungsbericht zu KOSTRA-DWD-2000. - In: www.dwd.de/KOSTRA-DWD-2000
- GERLINGER, K. (2004): Simulation des Wasserhaushalts im Neckar unter Verwendung regionaler Klimaszenarien. - In: KLIWA-Berichte Heft 4, München
- HENNEGRIFF, W. & J. Reich (2007): Auswirkungen des Klimawandels auf den Hochwasserschutz in Baden-Württemberg. – BWGZ 2/2007
- HENNEGRIFF W. & V. Kolokotronis (2007): Methodik zur Ableitung von Klimaänderungsfaktoren für Hochwasserkennwerte in Baden-Württemberg. - Wasserwirtschaft. - Heft 9/2007
- IHRINGER, J. (2004): Ergebnisse von Klimaszenarien und Hochwasser-Statistik. - In: KLIWA-Berichte Heft 4, München
- KATZENBERGER, B. (2004): Bisherige Erkenntnisse aus KLIWA – Handlungsempfehlungen. - In: KLIWA-Berichte Heft 4, Karlsruhe
- KLIWA (2002): Langzeitverhalten der Hochwasserabflüsse in Baden-Württemberg und Bayern. - KLIWA-Berichte, Heft 2, Karlsruhe
- KLIWA (2005): Langzeitverhalten der Lufttemperatur in Baden-Württemberg und Bayern. – KLIWA-Berichte, Heft 5, München
- KLIWA (2005): Langzeitverhalten der Schneedecke in Baden-Württemberg und Bayern. - KLIWA-Berichte, Heft 6, München
- KLIWA (2006): Langzeitverhalten der Starkniederschläge in Baden-Württemberg und Bayern. - KLIWA-Berichte, Heft 8, Offenbach
- KLIWA (2006): Regionale Klimaszenarien für Süddeutschland. - KLIWA-Berichte, Heft 9, Karlsruhe
- LfU Baden-Württemberg (2005): Festlegung des Bemessungshochwassers für Anlagen des technischen Hochwasserschutzes. - Leitfaden, Karlsruhe

LUBW (2007): Abflusskennwerte in Baden-Württemberg. – DVD, Karlsruhe

LUDWIG K. & M. BREMICKER (2006): The Water Balance Model LARSIM – Design, Content and Applications. – Freiburger Schriften zur Hydrologie, Band 22

Hochwasserschutz-Strategie im Gebirgsland Schweiz

Bruno Schädler

Zusammenfassung

Die Schweiz ist nach einer längeren Periode ohne katastrophale Hochwasser seit 1977 wieder von mehreren großen Schadenhochwassern heimgesucht worden. Dies hat zu einem eigentlichen Paradigmenwechsel in der Hochwasserschutzstrategie geführt. Der heutige Hochwasserschutz orientiert sich am Grundsatz der Nachhaltigkeit. Ziel ist der Schutz von Menschenleben, der Erhalt der natürlichen Lebensgrundlagen und der Schutz großer Sachwerte mit einem ökonomisch vertretbaren Aufwand. Raumplanung und Unterhalt der Gewässer steht an erster Stelle beim Hochwasserschutz, erst dann sind bauliche Maßnahmen ins Auge zu fassen. Der Raumbedarf der Fliessgewässer zur Ableitung von Extremhochwasser ist zu sichern. Gefahrenkarten sind dazu vorgeschriebene Hilfsmittel. Zur Risikobeurteilung sind Fragen zentral wie: Was kann passieren? Was darf passieren? Wie können wir uns schützen? Wie lassen sich Restrisiken minimieren? Der Überlastfall, das heißt das Auftreten von Hochwasserspitzen über dem Dimensionierungshochwasser ist in jedem Projekt zu beurteilen und notwendige Maßnahmen zur Minimierung von Schäden sind mit zu planen.

Im Hinblick auf die zu erwartende zukünftige Klimaänderung kommt der Berücksichtigung des Überlastfalls bei der Planung und Realisierung von Maßnahmen eine besondere Bedeutung zu. Die mit der Klimaänderung auch in der Schweiz zu erwartende Veränderung im Hochwassergeschehen, insbesondere auch im Feststofftransport, sollte bei der Festlegung der Bemessungshochwasser besondere Berücksichtigung finden.

1. Einleitung

Nach einer Periode von über 60 Jahren ohne größere Hochwasser in der Schweiz wurden ab 1977 in relativ kurzer Folge verschiedene Regionen von verheerenden Hochwassern heimgesucht.

- 1987 war ein ausgesprochenes Katastrophenjahr. Fast die ganze Schweiz wurde von Unwettern getroffen. Nach ersten Hochwassern im Frühjahr, Juni und anfangs Juli begann die eigentliche Katastrophe des Jahres 1987 am 18./19. Juli. Sintflutartige Regenfälle verursachten große Verwüstungen, vor allem in den Kantonen Tessin und Graubünden. Eine vergleichbare Wetterlage führte dann am 24./25. August 1987 zu extremen Niederschlägen im Gotthardgebiet und zu verheerenden Schäden in den Kantonen Uri, Wallis, Tessin und Graubünden (LHG 1991a; LHG 1991b).
- Intensive, lang anhaltende Niederschläge vom 22. bis 24. September 1993 in den südlichen Seitentälern des Oberwallis und im Tessin waren der Auftakt zu einer Reihe von Hochwassern mit zum Teil verheerenden Schäden. Im Wallis waren vor allem die Stadt Brig und das Saastal betroffen. Mit weiteren ergiebigen Regenfällen bis Mitte Oktober wurden im Tessin die Siedlungen rund um den Lago Maggiore überflutet und in vielen Seitentälern, insbesondere im Bleniotal, wurden größere Schäden angerichtet (LHG 1994).
- Nach einem außerordentlichen und schneereichen Winter wurden Ende Februar Stimmen laut, die befürchteten, dass das Jahr 1999 große Hochwasser bringen könnte: der

Schnee von "gestern" ist der Abfluss von "morgen". Zwei Starkniederschläge im Mai, mitten in der Periode der stärksten Schneeschmelze, ließen die Befürchtungen Wirklichkeit werden (ASCHWANDEN & BÜRGI 2000; BWG 2000).

- Starke Regenfälle, die über mehrere Tage anhielten, haben im Oktober 2000 in den Kantonen Wallis und Tessin nicht nur zu Erdrutschen und Schlammlawinen geführt, sondern auch zu einer prekären Situation an den Wildbächen, Flüssen und Seen. 16 Todesopfer waren die traurige Bilanz dieses Ereignisses. Ein Drittel des Walliser Dorfes Gondo wurde durch Wasser, Erde und Geröll zerstört. Der Lago Maggiore übertraf den Hochstand von 1993 um 34 cm. (BWG 2002).
- Mit Gesamtschäden von rund 3 Mrd. Franken übertrifft das Hochwasser vom August 2005 deutlich alle anderen Naturereignisse seit 1972, dem Beginn der systematischen Erfassung der Unwetterschäden. Das Hochwasser forderte 6 Todesopfer und führte mancherorts zu einer Überforderung der lokalen Einsatzkräfte. In der Schweiz war der gesamte Alpennordhang betroffen. Nach Osten erstreckte sich das betroffene Gebiet bis in die Region Salzburg / Österreich hinein und nach Norden bis Südbayern / Deutschland (BEZZOLA & HEGG 2007).
- Das Hochwasser August 2007 stellt ein weiteres Großereignis dar, welches sich in die gehäuften Ereignisse der vergangenen zwei Jahrzehnte einreicht. Neue Rekordabflüsse wurden an der Emme, Aare und Birs gemessen. Der Bielersee erreichte seit der zweiten Juragewässerkorrektur einen neuen Rekordpegelstand.

Die entsprechenden Schäden haben in diesem Zeitabschnitt die kumulierte Summe von beinahe 13 Milliarden Schweizer Franken erreicht (Abbildung 1), da im Jahr 2007 auch noch Schäden von rund 710 Millionen zu verzeichnen waren (HILKER et al. 2008).

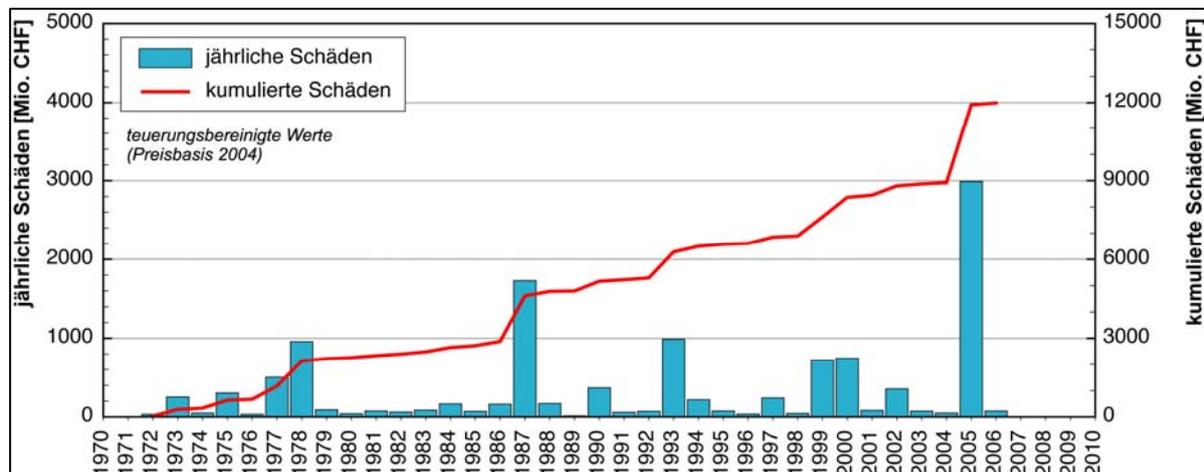


Abb. 1: Jährliche und kumulierte von Hochwassern verursachte Schäden in der Schweiz, teuerungsbereinigt (BEZZOLA & HEGG 2007).

Hochwasserschutz hat in der Schweiz eine lange Tradition. In den 20 Jahren vor dem Ereignis 1987 wurden jährlich etwa 90 Millionen, nach 1987 jährlich rund 150 Millionen Schweizer Franken in den Hochwasserschutz investiert. Die Ereignisse haben jedoch die Gültigkeit der

Hochwasserschutzphilosophie in Frage gestellt. Ursachenanalysen nach den großen Ereignissen sollten Klarheit über die Ereignisse selber und die Ursachen der Schäden feststellen.

2. Lehren und Erkenntnisse

Die umfangreiche Ursachenanalyse der Hochwasser 1987 (LHG 1991b) zeigte deutlich, dass im Hochwasserschutz Mängel bestehen:

- Häufig wurde in Gefahrengebieten – insbesondere in überschwemmungsgefährdeten Gebieten – gebaut, entsprechend haben die Schäden zugenommen;
- Einengungen und Kanalisierungen von Gewässern führten zu beschleunigten Abflüssen und dadurch zu einer Verschärfung der Hochwasserspitzen im Unterlauf;
- Für Extremereignisse steht zu wenig Platz zur Verfügung;
- Pflege und Unterhalt der Gewässer werden oft ungenügend ausgeführt.

Zu den Lehren, die aus den Ereignissen gezogen werden mussten, zählt, dass

- Hochwasserschutz integral zu planen ist;
- die Schäden nicht mehr allein durch Schutzbauten dauerhaft vermindert werden können, sondern eine der Gefahren angepasste Raumnutzung unabdingbar ist;
- eine größere Toleranz gegenüber Kleinschäden im Interesse einer Schadenminderung bei Extremereignissen anzustreben ist;

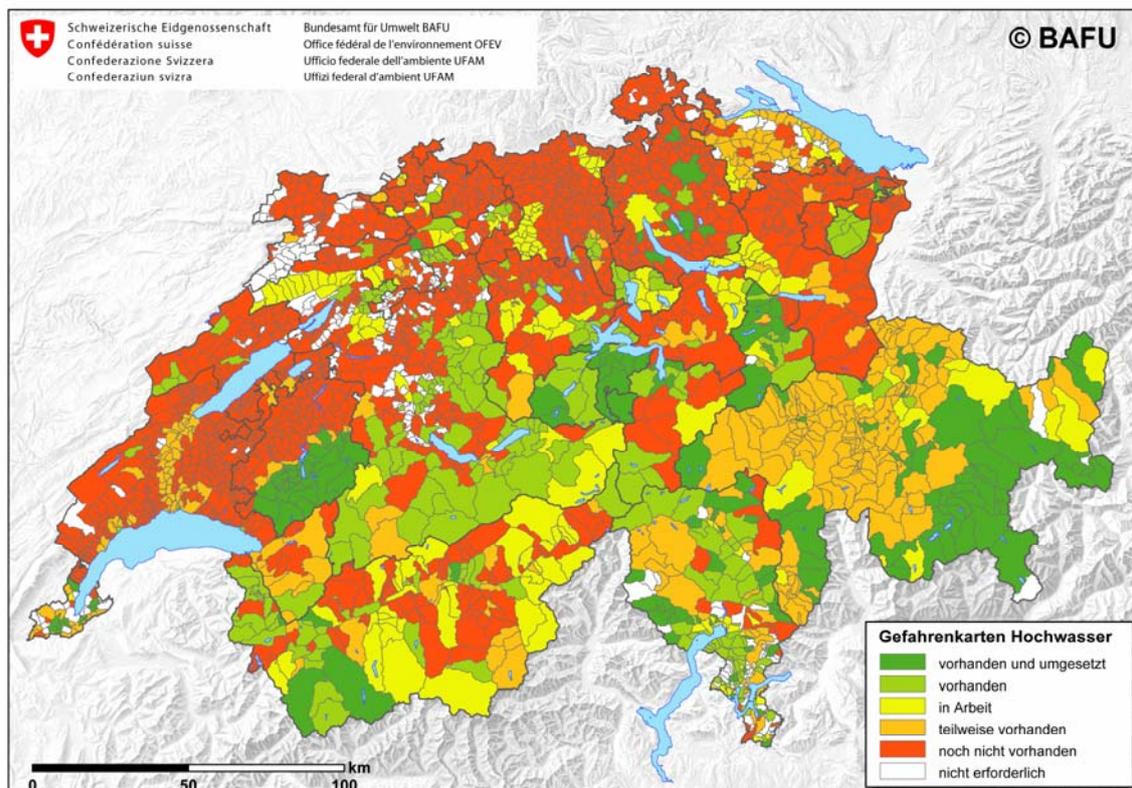


Abb. 2: Übersicht über den Stand 2006 der bereits erstellten Gefahrenkarten im Bereich Hochwasser.

- die Erstellung von Gefahrenkarten wichtige Voraussetzung für eine Minimierung technischer Maßnahmen und deren Ersatz durch raumplanerische Maßnahmen ist. Entsprechend sind die Kantone seit 1991 verpflichtet, Gefahrenkarten zu erstellen. Während in den besonders stark betroffenen Gebirgsräumen die Karten schon weitgehend erstellt sind, fehlen sie im Mittelland in weiten Teilen (Abbildung 2).

Nebst diesen, die Sicherheit betreffenden Aspekte, wurden auch Mängel in ökologischer Hinsicht festgestellt:

- Gewässer wurden häufig korrigiert und weisen monotone Strukturen auf;
- Erosionsschutzmassnahmen beschränken den Spielraum für Veränderungen;
- Nutzungen reichen bis an den Gewässerrand. Vielen Gewässern steht so nur der minimale Raum um Wasser abzuleiten zur Verfügung. Sie können deshalb ihre ökologischen Funktionen nur noch bedingt oder gar nicht mehr erfüllen.

2.1 Nachhaltige Schutzkonzepte

Diese Feststellungen und Lehren führten zu folgenden generellen Leitsätzen für Schutzkonzepte:

- Der Lebens- und Wirtschaftsraum soll angemessen geschützt werden;
- Mit umfassender Prävention soll verhindert werden, dass die Schadenssummen weiter ansteigen;
- Der Umgang mit den Unsicherheiten von Naturgefahren soll verbessert und in den Hochwasserschutzkonzepten berücksichtigt werden;
- Die Gewässer sollen als bedeutende und verbindende Teile von Natur und Landschaft respektiert werden.

Diese Leitsätze haben ihren Niederschlag im neuen Bundesgesetz über den Wasserbau von 1991 und in der entsprechenden Wegleitung (BWG 2001) gefunden, wobei dem richtigen Erkennen der Naturprozesse, der Differenzierung der Schutzziele, der umweltgerechten Maßnahmenplanung und der Begrenzung des verbleibenden Risikos eine zentrale Bedeutung beigemessen wird.

Das Gesetz legt das Schwergewicht im Hochwasserschutz auf eine umfassende Prävention. Dies bedeutet in erster Linie Unterhalt der bestehenden Schutzbauten und Berücksichtigung der Naturgefahren bei der Raumnutzung. Dort wo diese Maßnahmen nicht ausreichen, sind naturnahe bauliche Schutzmassnahmen auszuführen. Zur Minderung des verbleibenden Risikos sind zusätzliche Mittel vorzusehen (z.B. Schutz gefährdeter Objekte mittels temporären Schutzmassnahmen). Eine Notfallplanung (z.B. Evakuationspläne, Rettungsdienste usw.) hilft mit, Verluste von Menschenleben soweit möglich zu vermeiden.

Nachhaltige Schutzkonzepte setzen im Weiteren voraus, dass die Raumnutzung auf die Naturgefahren Rücksicht nimmt. Zu fördern ist eine Siedlungsentwicklung, welche die Naturgefahren ernst nimmt und die nötigen Freiräume für die Naturereignisse sichert. Durch das Meiden von Gefahrengebieten und den Erlass von Auflagen (z.B. Bauverbote in stark gefährdeten Gebieten, Objektschutzmassnahmen) kann die Zunahme des Schadenpotenzials begrenzt oder gar verhindert werden. Die Raumplanung hat die Aufgabe, die notwendigen Freiräume zu schaffen oder beizubehalten:

- Ausreichende Abflussquerschnitte sind eine Grundvoraussetzung, damit der Hochwasserschutz mit minimalen Eingriffen sichergestellt, der Geschiebehaushalt im Gleichgewicht gehalten und die Entwässerung gewährleistet werden kann;
- Gewässer können ihre vielfältigen ökologischen Funktionen nur dann erfüllen, wenn genügend Raum für eine natürliche Fließgewässerdynamik und eine standortgerechte Ufervegetation vorhanden ist;
- Natürliche Rückhalteräume können den Hochwasserabfluss verzögern und sollen wo immer möglich erhalten werden;
- Hochwasser soll nur dort durchgeleitet werden, wo dies unumgänglich ist.

Weil die Festlegung der Schutzziele und damit der Bemessungshochwasser von großer technischer und finanzieller Tragweite ist, ist diese für die Nachhaltigkeit von Schutzbauten von entscheidender Bedeutung. Der früher übliche generelle Ausbau auf ein Jahrhunderthochwasser hat heute keine generelle Gültigkeit mehr. Bei sehr hohen Sachwerten empfiehlt es sich, den Schutzgrad höher anzusetzen; bei landwirtschaftlich genutzten Flächen reicht ein reduzierter Schutzgrad und extensiv genutzte Flächen brauchen meist keinen besonderen Hochwasserschutz (Abbildung 3).

Objektkategorie	Hochwasserereignis			
	HQ20	HQ50	HQ100	EHQ
A Naturlandschaft	[Red]			
B Unbewohnte Gebäude Landw. Nutzung	[Green]	[Orange]	[Red]	
C Einzelgebäude, Stallungen lokale Infrastruktur	[Green]		[Orange]	[Red]
D Kantonsstrassen Schützenswerte Objekte	[Green]		[Orange]	[Red]
E Geschlossene Siedlung Industrie, Nationalstrasse	[Green]		[Orange]	[Red]
F Sonderobjekte Sonderrisiken	[Green]			[Red]

■ Vollständiger Schutz, keine Schäden zugelassen
■ Begrenzter Schutz, begrenzte Schäden zugelassen
■ Fehlender Schutz, grosse Schäden zugelassen
HQ100 Einmal pro 100 Jahre zu erwartendes Hochwasser
EHQ Extremhochwasser

Abb. 3 Abhängig von den zu schützenden Objekten ist die Schutzkategorie auszuwählen

3. Die zentrale Frage: Was kann passieren?

Hochwasserschäden entstehen durch Überschwemmung, Erosion, Ablagerung von Sedimenten, Murgänge und Verstopfung von Engrissen (z.B. Brücken und Durchlässe) durch Schwemmholz. Für den Hochwasserschutz ist es von Bedeutung, wie solche Prozesse durch den Klimawandel beeinflusst werden.

Am Anfang aller Überlegungen zum Hochwasserschutz ist die Frage, wie groß die Hochwasserspitze, das Hochwasservolumen, der Feststofftransport (Geschiebe, Holz etc.) und die Feststoffablagerung an einem bestimmten Ort (Brücke, Hochwasserentlastung, Hochwasserrückhaltebecken etc) oder auf einem bestimmten Flussabschnitt sein kann, jetzt und in Zukunft. Die Frage der Dimensionierung der Hochwasserschutzmassnahmen kommt erst an zweiter Stelle.

Üblicherweise wird diese erste Frage aufgrund von statistischen Auswertungen von Messreihen beantwortet. Mit dieser Auswertung und mit den Schlussfolgerungen, die daraus gezogen werden, sind mehrere Probleme verbunden:

- Die Hochwasserdaten sind nicht sehr genaue Messdaten, Spitzenabflüsse unterliegen Messfehlern von mehreren zehn Prozenten. Zudem sind die auszuwertenden Messreihen meist weder homogen noch konsistent, was jedoch eine Voraussetzung für die statistische Analyse wäre.
- Die anzupassende Verteilungsfunktion ist eine empirische Verteilungsfunktion. Wie der Name sagt, basiert sie auf der Erfahrung (Empirie). Und damit ist sie im Rahmen der langfristig fehlenden Stationarität des Hochwassergeschehens nicht in der Lage, verlässliche Aussagen zum Auftreten und zur Höhe zukünftiger Hochwasser zu machen. Die Anpassungstests prüfen die Güte der Beschreibung, nicht die Güte der Extrapolation. Die viel diskutierte Repräsentativität einer Messreihe gibt es also nicht – vor allem nicht mit Blick auf die Zukunft! Die verfügbaren Messreihen sind meist viel zu kurz, um eine verlässliche Aussage über selten auftretende Ereignisse machen zu können (Abbildung 4)
- Eine Verteilungsfunktion beschreibt eine Messreihe nicht mit vielen Zahlen sondern mit zwei bis drei Parametern. Zufallsanteil, Vertrauensgrenzen, Signifikanzniveau sind zentrale Elemente der Hochwasserstatistik. Deshalb wird der Aussagewert eines Hochwassers mit einer Wiederkehrperiode von beispielsweise 100 Jahren (ein so genanntes 100 jährliches Hochwasser) oft überschätzt. Abbildung 5 zeigt den Bereich der Unschärfe rein aufgrund von statistischen Gesetzmäßigkeiten. Zudem wird gerne vergessen, dass der Werte eines 100 jährlichen Hochwassers ein Wert ist, der statistisch gesehen im langjährigen Mittel alle 100 Jahre erreicht oder überschritten wird.

Wie wir gesehen haben kann nicht davon ausgehen, dass die Frage zur Höhe des zukünftigen seltenen Ereignisses nur aufgrund der Messungen in der Vergangenheit beantwortet werden kann – insbesondere nicht im Lichte der fortschreitenden und möglicherweise verstärkten Klimaänderung.

Ausgehend von den Ergebnissen des Europäischen Forschungsprojektes PRUDENCE gehen (FREI et al. 2006) davon aus, dass sich die Starkniederschlagsverteilung in Europa sehr differenziert verändern wird. Dies bedeutet für die Schweiz, dass ein heute 50 jährlicher 1-Tages Starkniederschlag im Frühjahr im Jahr 2050 alle 12 bis 30 Jahre auftreten könnte (vgl. Abbildung 6).

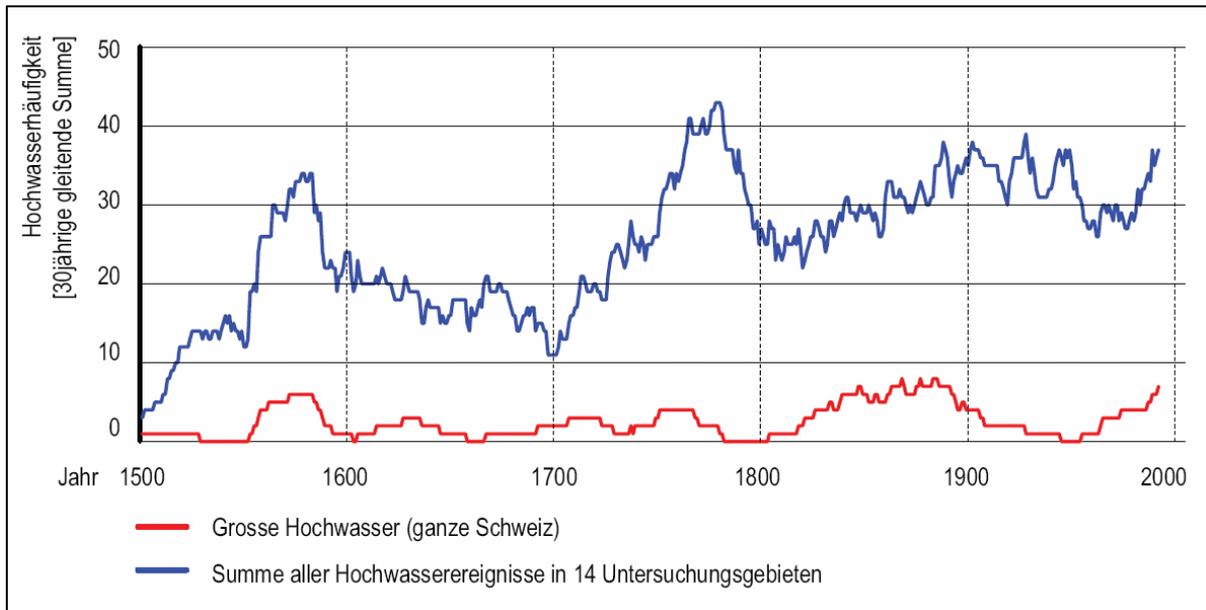


Abb. 4: Anzahl Hochwasser während der vergangenen 500 Jahre im schweizerischen Rheingebiet im Vergleich zum Auftreten großer Hochwasser in der ganzen Schweiz (NAEF et al. 2008)

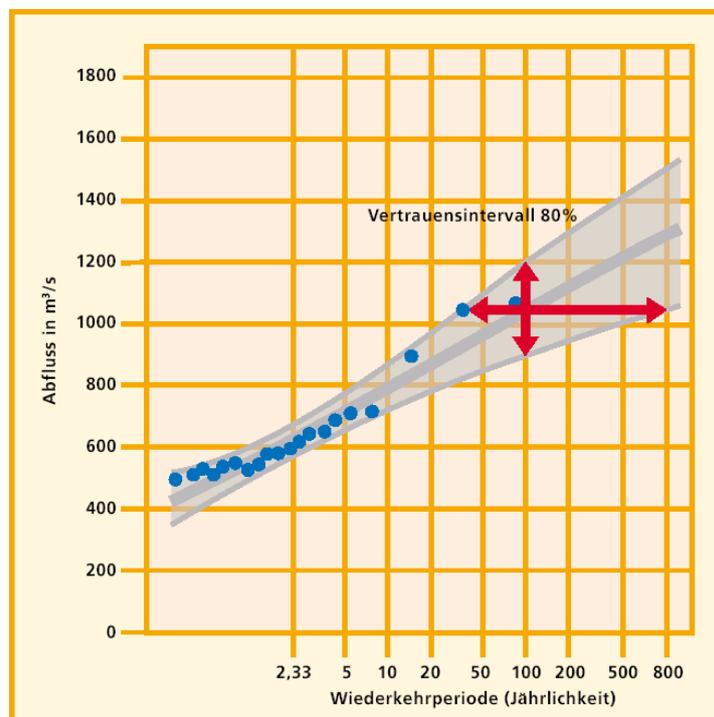


Abb. 5: Die statistische Analyse zeigt: mit 50% Wahrscheinlichkeit ist das 100 jährliche Hochwasser 1050 m³/s oder größer. Mit 80% Wahrscheinlichkeit ist das 100 jährliche Hochwasser zwischen 900 und 1200 m³/s oder größer (aus PETRASCHECK 2008).

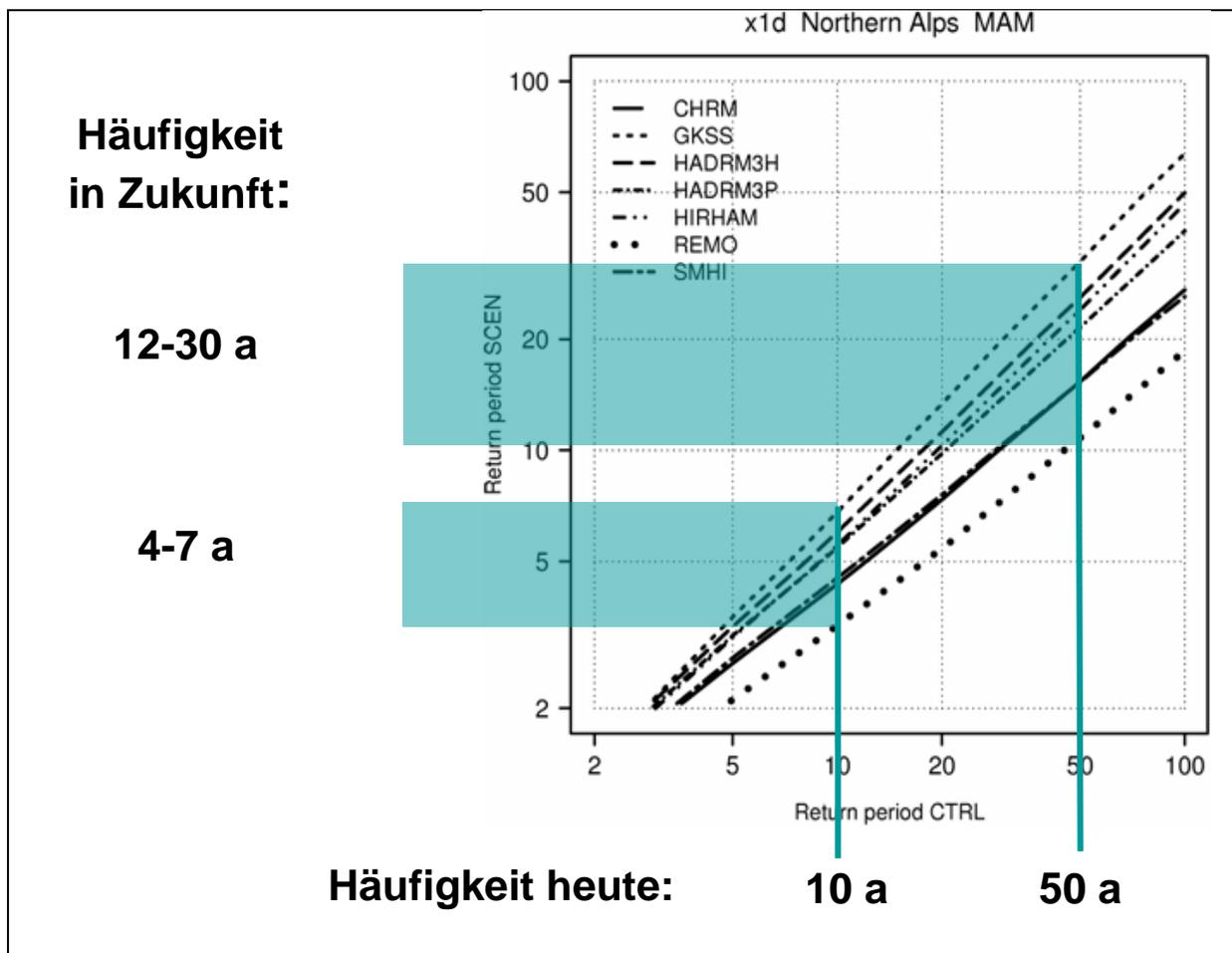


Abb. 6: Änderung der Häufigkeitsverteilung der 1-Tages Starkniederschläge im Frühjahr für den nördlichen schweizerischen Alpenraum. Vergleich der Gegenwart (CTRL) mit dem Szenario 2050 (SCEN) für verschiedene regionale Modelle. (FREI et al. 2006).

In der Schweiz gibt es kein behördlich vorgeschriebenes einheitliches Verfahren zur Hochwasserabschätzung. Allerdings wurde eine Praxishilfe zur Hochwasserabschätzung publiziert, welche den wissenschaftlichen Stand der Dinge erläutert (BWG 2003). Entsprechend werden heute als Grundlage für die Hochwasserabschätzung nicht nur Zeitreihenanalysen durchgeführt, sondern fallweise zusätzliche Informationen beschafft: Durch die Analyse von semi-quantitativen historischen Daten, mit Niederschlag-Abfluss-Modellierung aufgrund verschiedener Niederschlagsszenarien oder mittels Abflussprozessuntersuchungen, welche Einblicke in die Reaktionsweise von Einzugsgebieten bei extremen Niederschlägen erlauben und eine Extrapolation in Zustände, die bisher nicht aufgetreten sind, ermöglichen (SCHERRER 2007).

Insbesondere im Gebirgsraum ist nicht nur der Hochwasserabfluss sondern auch der Feststofftransport eine wichtige Bemessungsgröße für die Festlegung der Hochwasserschutzmassnahmen. Hier sind nur vereinzelt anerkannte Abschätzverfahren (SPREAFICO et al. 1997).

4. Was darf passieren?

Die Frage, was bei Hochwasser passieren darf, d.h. wo Schäden und welche Schäden in Kauf genommen werden können, wird mit Hilfe von Risikobewertungen unter Berücksichtigung gesellschaftspolitischer, ökologischer und ökonomischer Aspekte beantwortet. Eine Grundlage für die Bewertungen sind Hochwasser-Gefahrenkarten (Abbildung 2) und daraus abgeleitete Hochwasser-Risikokarten. Die schweizerische Hochwasserschutzpolitik geht dabei vom Konzept eines differenzierten Hochwasserschutzes aus (Abbildung 3). Nicht wie früher müssen alle Gewässerabschnitte mit einem Hochwasserschutz, der gegen ein hundert jährliches Ereignis ausgelegt ist, geschützt werden. Sondern es wird detailliert abgeklärt, wo welcher Schutzbedarf notwendig ist. Zudem ist es immer notwendig, aus verschiedenen Schätzungen des Bemessungshochwassers eine tragbare und finanzierbare Variante auszuwählen. Diese Festlegung bedingt auch immer eine politische Diskussion. In dieser Diskussion sollte die Unsicherheit in der Bemessung, die mit der Klimaänderung zusätzlich dazukommt, ein Grund sein, eher eine Lösung auf der sicheren Seite auszuwählen.

5. Wie können wir uns schützen?

Wie im Kapitel 2.1 dargelegt erfordert der Umgang mit den Naturgefahren ein integrales Risikomanagement. Dabei stützt man sich auf eine breite Palette von Maßnahmen ab. Dazu gehören:

- das Meiden von gefährdeten Gebieten durch raumplanerische Maßnahmen. Im Rahmen der Festlegung von Bauzonen muss von den Gemeinden die Konsequenzen aus den Gefahrenkarten gezogen werden;
- Wasser und Feststoffe zurückzuhalten wo möglich;
- Wasser durchzuleiten wo nötig;
- Restrisiken minimieren.

5.1 Wie lassen sich Restrisiken minimieren?

Ein vollständiger Schutz gegen Hochwasser ist nicht möglich. Seltene Großereignisse führen zu einer Überlastung der für ein bestimmtes Schutzziel ausgelegten technisch-präventiven Maßnahmen. Die damit verbundenen Restrisiken müssen erkannt und mit geeigneten Vorkehrungen minimiert werden. Alarmierung und Evakuation, Objektschutz sowie Versicherungen zur Deckung von Schäden sind zentrale Elemente im Umgang mit Restrisiken. In der Schweiz ist die Gebäudeversicherung in fast allen Kantonen obligatorisch und wird in den meisten Kantonen durch öffentlich-rechtliche Versicherungen, in den anderen Kantonen durch private Versicherungsgesellschaften sichergestellt. Für große Risiken besteht eine Rückversicherung beim Interkantonalen Rückversicherungsverband IRV. Zusätzlich haben die Kantone mit der Interkantonalen Risikogemeinschaft Elementar (IRG) ein zusätzliches Instrument zur Katastrophendeckung geschaffen.

Bauliche Hochwasserschutzmassnahmen müssen robust und überlastbar sein. Damit wird gewährleistet, dass sie nicht plötzlich versagen und die Schäden nicht schlagartig zunehmen. Dazu wird ihr Verhalten bei einer deutlichen Überbelastung im Rahmen der Projektierung beurteilt. Die Ermittlung der im Überlastfall betroffenen Gebiete ist zudem die Grundlage zur Beurteilung der Restrisiken.

6. Einige Beispiele aus der Schweiz

Schon ab den 90er Jahren wurde in der Schweiz konsequent darauf geachtet, die neue Hochwasserschutzpolitik umzusetzen. Die Kantone bzw. deren verantwortlichen Wasserbauingenieure, welche die für den Hochwasserschutz verantwortlichen Behörden sind, wurden vom Bund in jährlichen mehrtägigen Veranstaltungen mit der neuen Strategie vertraut gemacht und geschult. Seither gibt es zahlreiche innovative Beispiele von angepassten Hochwasserschutzmassnahmen.

6.1. Rückhalten wo möglich

Hochwasserrückhaltebecken sind in topographisch schwierigem Gelände sehr oft nicht in ausreichendem Volumen realisierbar. Und im flacheren Mittelland ist die Landnutzung derart intensiv, dass immer große Interessenkonflikte bestehen. Trotzdem gibt es eine größere Anzahl von kleineren und mittleren Hochwasserrückhaltebecken in der Schweiz.

Als große Rückhaltebecken bzw. Ausgleichsbecken wirken die großen Alpenrand- und Mittellandseen. Alle Seen in der Schweiz mit Ausnahme des Walensees und des Bodensees sind reguliert. Sie halten bei Hochwasser jeweils enorme Wasservolumen zurück. Nicht zu unterschätzen ist auch die Wirkung der rund 200 größeren und mittleren Talsperren, welche für die hydroelektrische Stromproduktion erstellt worden sind. Sie halten, wie in den verschiedenen berichten zur Ursachenanalyse der Hochwasser detailliert dargelegt wird, erhebliche Wasservolumina zurück und verkleinern dadurch die Hochwasserspitzen der untenliegenden Gewässer.

- Die 42 Meter hohe Bogenmauer Orden im oberen Bergell (Südschweiz) kann ein Volumen von 1.67 Millionen m³ zurück halten. Zusammen mit dem Stausee Albigna konnte sie beim Hochwasser 1987 die Hochwasserspitze in der Maira um 150 bis 200 m³/s vermindern.
- Der Stausee Mattmark im Wallis (120 m hoch, 101 Mio. m³ Volumen) wurde 2001 zu einem Mehrzweckspeicher ausgebaut und kann dadurch 3.6 Millionen m³ Wasser im Hochwasserfall zurückhalten. Diese Lösung erwies sich als kostengünstiger als der umfassende Hochwasserschutz entlang der untenliegenden Vispa.

Ganz besonders wichtig sind Rückhaltebecken für Geschiebe. Kleinere und mittlere steile Gerinne führen im Hochwasserfall sehr viel Geschiebe mit sich. Das Geschiebe belastet im unteren flacheren Teil die Gerinne erheblich und kann insbesondere bei Durchlässen unter Brücken zu Auflandungen und nachfolgender Ausuferung führen. In der Schweiz gibt es rund 100 bedeutendere Geschieberückhaltebecken

- Nach dem Hochwasser, welches 1997 das Dorf Sachseln verwüstete, wurde oberhalb des Dorfes ein Geschiebesammler mit 32'000 m³ Inhalt und einem Grobrechen für Schwemmholz von über 2.5 m Länge gebaut (Abbildung 7).
- Oberhalb Pontresina im Engadin liegt auf über 2600 m Höhe ein begrenztes Permafrostvorkommen. Bis 20 m mächtige Schuttschichten sind heute bei Temperaturen nahe dem Schmelzpunkt stabil, könnten aber mit zunehmender Klimaerwärmung instabil werden und als Murgang das Tourismuszentrum Pontresina bedrohen. Deshalb hat die Gemeinde in den letzten oberhalb des Dorfes Jahren einen riesigen kombinierten Murgang- und Lawinenauffangdamm gebaut. Der Damm ist 460 m lang, bis 13 m hoch, das

Auffangvolumen für Feststoffe beträgt 100'000 m³ und für Lawinen 240'000 m³ (Abbildung 8).



Abb. 7: Geschiebesammler mit Grobrechen für Schwemmholz von mehr als 2.5 m Länge im Oberlauf des Dorfbaches in Sachseln.

6.2 Durchleiten wo nötig

In sehr vielen Fällen ist nicht ausreichend Platz vorhanden, das Gerinne soweit auszubauen, dass das Dimensionierungshochwasser gefahrlos durch ein dicht besiedeltes Gebiet oder gar eine geschlossene Ortschaft durchgeleitet werden kann. Immer öfter werden deshalb Umleitungsstollen gebaut, welche die Hochwasserspitzen direkt in den nächsten Vorfluter leiten. In der Schweiz sind dies beispielsweise Stollen an der Langete bei Langenthal, Aare bei Thun und geplant bei Bern, dem Lyssbach bei Lyss und andere mehr.

- In Samedan wurde eine ganz andere Lösung gewählt: Weil sich auch dort ein Ausbau des Gerinnes des Inn durch das Dorf nicht realisieren ließ, wurde ein vollständig neues 4 km langes Gerinne für den Zubringer Flaz gebaut, um diesen erst unterhalb statt oberhalb des Dorfes in den Inn münden zu lassen. Entsprechend konnte dann ein Teil des kanalisierten Flaz und Inn zurückgebaut und weitgehend revitalisiert werden.
- In Brig verwüstete das Hochwasser 1993 die ganze Stadt. Das Flüsschen Saltina staute sich an der Brücke und das Wasser und insbesondere das Geschiebe ergoss sich in die ganze Stadt. Zum verbesserten Schutz wurde das Geschiebeauffangbecken oberhalb der Stadt vergrößert, das kanalisierte Gerinne durch die Stadt leicht erhöht und insbe-

sondere die Brücke in der Höhe verschiebbar gemacht. Damit kann bei Hochwassergefahr die Brücke (automatisch) angehoben werden und das Wasser durch den kanalisiertem Fluss abgeleitet werden (Abbildung 9).



Abb. 8: Kombiniertes Murgang- und Lawinenauffangdamm mit integrierter Murgangbremse oberhalb von Pontresina.

6.3 Überlastfall

Die schweizerische Hochwasserschutzstrategie sieht vor, dass bei jedem Projekt auch Maßnahmen geplant werden, um beim Überschreiten des Dimensionierungshochwassers die Schäden möglichst gering halten zu können. Das können lokale Objektschutzmassnahmen sein oder auch die Konstruktion von ungleich hohen Schutzdämmen, sodass diejenige Seite mit weniger hohem Schadenspotential zuerst überflutet wird.

- Die Reuss im Kanton Uri hat beim Hochwasser 1987 die ganze Talebene überschwemmt und große Schäden angerichtet. Heute wird die parallel zur Reuss liegende Gotthardautobahn, welche luftseitig mit einer Mauer versehen ist, als Hochwasserentlastungsgerinne verwendet. Ein überströmbarer Damm entlastet die Reuss in die Autobahn, welche natürlich vorher für den Verkehr gesperrt werden muss. Genügt auch deren Kapazität nicht mehr, kann die Mauer überströmt werden und ein Teil der Flussebene wird überflutet. Siedlungen und die Gotthardeisenbahnlinie sind vollständig geschützt, Einzelhöfe werden mit lokalen Maßnahmen geschützt.



Abb. 9: Die Hubbrücke an der Saltina in Brig. Mit Stahlseilen verbundene Wasserbehälter füllen sich bei Hochwasser mit Wasser und heben die Brücke automatisch an. Damit bleibt genügend Durchflussprofil für Hochwasserspitzen.

- Die Engelberger Aa fließt vor dem Zufluss in den Vierwaldstättersee durch dicht besiedeltes Gebiet. Die Abflusskapazität kann auf dieser Teilstrecke nicht gewährleistet werden. Deshalb kann oberhalb des Siedlungsbereiches über nicht gesteuerte Entlastungsanlagen ein Spitzenhochwasser auf eine Seite auf extensiv genutztes Gelände entlastet werden. Von dort kann das Wasser gefahrlos in den Vierwaldstättersee abfließen. Diese Anlage hat sich beim Hochwasser 2005 ihre Bewährungsprobe bestanden.

7. Schlusswort

Der frühere Glaube, dass durch Schutzbauten allein der Hochwasserschutz gewährleistet werden kann, erwies sich als Irrglaube. Ein Umdenken von der ausschließlichen Gefahrenabwehr (Verhütung der Überschwemmung) zum Leben mit dem Hochwasser (die Schäden auf ein erträgliches Maß begrenzen) ist notwendig. Dies erfordert ein zweistufiges Sicherheitskonzept. Erstens soll mit Rückhalt im Einzugsgebiet und durch Schutzbauten die Überschwemmung intensiv genutzter Räume so weit wie möglich vermieden werden. Zweitens müssen Existenz bedrohende Schäden verhindert werden, falls das Hochwasser doch größer ist, als wir dachten. Dies erfordert einen Verbund aller aufgezeigten Maßnahmenkategorien.

Die mit den Strategien zum Hochwasserschutz in der Schweiz betrauten Stellen sind davon überzeugt, dass mit diesem Bündel von Maßnahmen und dem Paradigmenwechsel im Umgang mit Naturgefahren „von der Gefahrenabwehr zur Risikokultur“ (PLANAT 2002) den Un-

sicherheiten bei der Bemessung von Hochwasser am besten begegnet werden kann. Und dass die Unsicherheiten, welche mit Klimaänderungen verbunden sind, mit denselben Maßnahmen aufgefangen werden können.

Speziell zum Thema Klimaänderung und Hochwasserschutz hat die Kommission Hochwasserschutz im Schweizerischen Wasserwirtschaftsverband, in der die wichtigen Akteure aus Behörden, Wissenschaft und privaten Unternehmungen vertreten sind, in ihrem Standortpapier (KOHS 2007) folgendes Fazit gezogen:

- Der Einfluss der Klimaänderung auf zukünftige Hochwasserereignisse kann heute erst als Trend vorausgesagt werden. Von den Experten wird erwartet, dass künftig vermehrt Hochwasser auftreten und die Extremwerte zunehmen werden.
- Die aktuellen Grundsätze für den Hochwasserschutz erweisen sich mit Blick auf die zu erwartenden Auswirkungen der Klimaänderung als weitsichtig. Sie behalten deshalb ihre Gültigkeit und müssen weiter konsequent umgesetzt werden.
- Die Dimensionierungsgrößen (Abflussmenge, Wasserfracht, Geschiebe) sind vorausschauend im oberen Entscheidungsbereich festzulegen.
- Die Schutzwirkung bestehender Anlagen ist periodisch zu überprüfen, das Schadenpotential zu beurteilen und allenfalls notwendige Verbesserungen auszuführen.
- Bei der Beurteilung bestehender und der Planung neuer Maßnahmen ist deren Verhalten im Überlastfall zu prüfen. Neue Projekte sind, falls noch nicht erfolgt, gemäß Überlastfall zu testen.
- Die Entscheidungsträger und beteiligten Akteure sind auf den Handlungsbedarf aufmerksam zu machen.
- Die erforderlichen Mittel sind bereitzustellen.

Literatur

- ASCHWANDEN, H. & Th. BÜRGI (2000): Hochwasser 1999. Analyse der Messdaten und statistische Einordnung. Hydrologische Mitteilungen Nr. 28, Landeshydrologie und – geologie, Bern, 112 S.
- BEZZOLA, G.R. & C. HEGG (Ed.) (2007): Ereignisanalyse Hochwasser 2005, Teil 1 – Prozesse, Schäden und erste Einordnung. Bundesamt für Umwelt BAFU, Umweltwissen Nr. 0707. 215 S.
- BWG (1999): Hochwasser 2000 – Analyse der Ereignisse. Studienbericht Nr. 10, Bundesamt für Wasser und Geologie, Bern, 166 S.
- BWG (2001): Hochwasserschutz an Fliessgewässern – Wegleitung. Bundesamt für Wasser und Geologie, Bern, 72 S.
- BWG (2002): Hochwasser 2000 – Ereignisanalyse/Fallbeispiele. Berichte des Bundesamtes für Wasser und Geologie Nr. 2, Bern, 248 S.
- BWG (2003): Hochwasserabschätzung in schweizerischen Einzugsgebieten Praxishilfe. Berichte des BWG, Serie Wasser, Nr. 4. Bern, 119 S.
- FREI, C., R. SCHÖLL, S. FUKUTOME, J. SCHMIDLI & P.L. VIDALE (2006): Future change of precipitation extremes in Europe: Intercomparison of scenarios from regional climate models. J. Geophys. Res., 111, D06105, doi:10.1029/2005JD005965.

- HILKER, N., A. BADOUX & Ch. HEGG (2008): Unwetterschäden in der Schweiz im Jahre 2007. Wasser-Energie-Luft, Baden (im Druck).
- LHG (1991a): Ursachenanalyse der Hochwasser 1987 – Ergebnisse der Untersuchungen. Mitteilung der Landeshydrologie und –geologie Nr. 14, Bern, 192 S.
- LHG (1991b): Ursachenanalyse der Hochwasser 1987 – Schlussbericht. Mitteilung der Landeshydrologie und –geologie Nr. 15, Bern, 48 S.
- LHG (1993): Die Hochwasser 1993 im Wallis und Tessin – Messdaten und ausgesuchte Auswertungen. Mitteilung der Landeshydrologie und –geologie Nr. 19, Bern, 84 S.
- PETRASCHECK, A. (2008): persönliche Mitteilung.
- PLANAT (2002): Sicherheit vor Naturgefahren, Visionen und Strategie. BWG, Bern, 42 S
- SCHERRER, S. (2007): Hochwasserabschätzung als Synthese von Statistik, Historie und Abflussprozessen. Wiener Mitteilungen Wasser-Abwasser-Gewässer. Band 206, S. 195-208.
- SPREAFICO, M., Ch. LEHMANN & O. NAEF (1996): Empfehlungen zur Abschätzung von Feststofffrachten in Wildbächen, Teil I Handbuch. Mitt. Nr. 4 der Arbeitsgruppe für operationelle Hydrologie, Landeshydrologie und -geologie, Bern.

Wasserkraftnutzung und Hochwasserschutz

Günter Moser

Zusammenfassung

Der Klimawandel beeinflusst die Wasserkraftnutzung in den Alpen in vielfältiger Weise. Einerseits verkleinert der Gletscherschwund die natürliche Retentionswirkung der Gletscher, andererseits bringt das nervösere Temperatur-, Wind- und Niederschlagsverhalten in ganz Europa zusätzliche Anforderungen an die Wasserkraftnutzung. Den großen Speichern kommt hierbei eine steigende Bedeutung zu.

Im öffentlichen Interesse steht neben der Versorgung mit regenerativer Spitzen- und Regelenenergie insbesondere die hochwasserdämpfende Wirkung.

Das Hochwasser am 22. und 23. August 2005 hat in Vorarlberg und in Tirol große Schäden verursacht. In enger Abstimmung mit den Strompartnern konnten durch einen dem Hochwasserereignis angepassten Betrieb der Kraftwerksanlagen in den Speichern der Vorarlberger Illwerke AG ca. 11 Mio m³ Wasser zurückgehalten und so die Hochwasserspitze in der Ill und im Rhein um rund 100 m³/s, im Inn- und Sanngebiet um 10 bis 20 m³/s gedämpft werden. Besonders im Montafon und Walgau wurden dadurch Schäden im großen Ausmaß verhindert.

1. Einleitung

Die Vorarlberger Illwerke AG betreibt im südlichen Vorarlberg mehrere Speicherkraftwerke, die vornehmlich Spitzen- und Regelenenergie für den deutschen Versorgungsbereich produzieren.

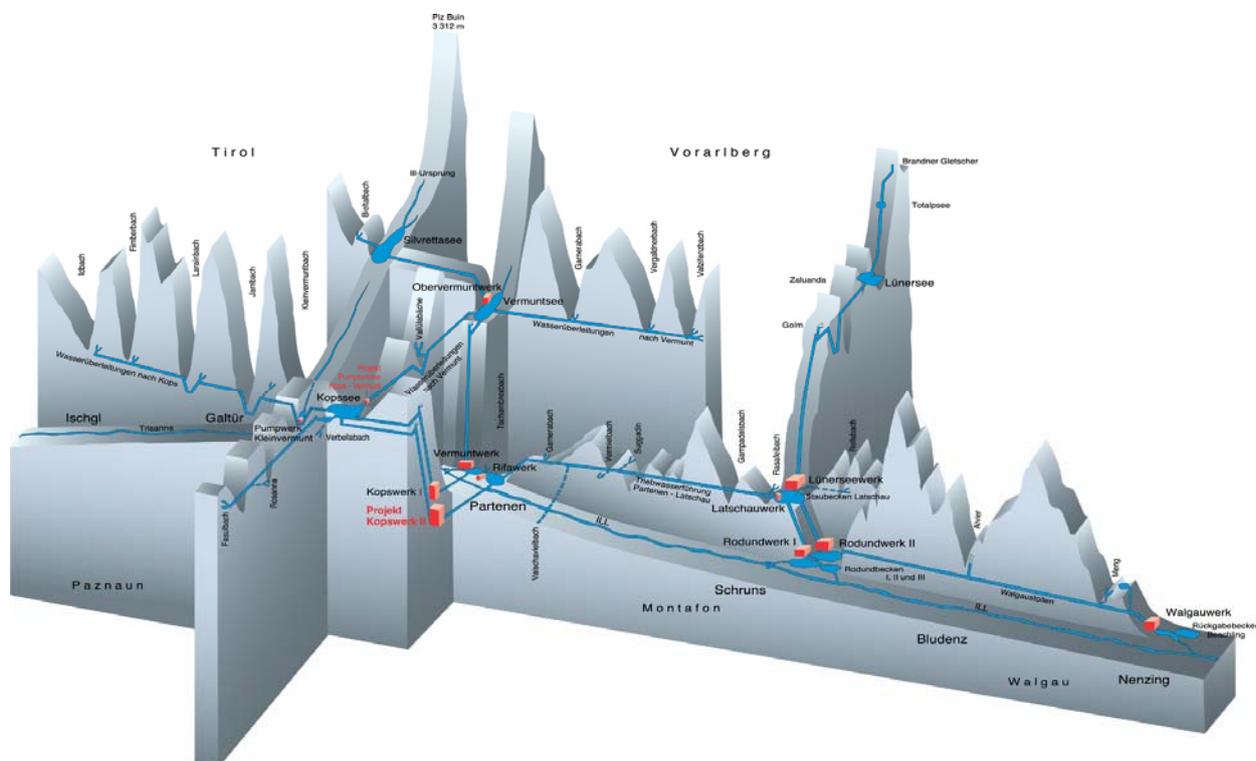


Abb. 1: Vorarlberger Illwerke, Anlagenschema

Die vier großen Speicher Silvretta, Vermunt, Kops und Lünensee mit einem gesamten Fassungsvermögen von ca. 164 Mio. m³ liegen im Silvretta- und Rhätikongebiet. Sie erfassen ein Einzugsgebiet von insgesamt ca. 130 km² im oberen Illgebiet (Rhein); 164 km² werden aus dem Inngebiet zugeleitet.

Weitere 450 km² sind über Beileitungen mit den im Tal gelegenen Ausgleichsbecken verbunden.



Abb. 2: Speicher Lünensee

Der Speicher Lünensee mit 78 Mio. m³ Inhalt befindet Fuß der Schesaplana.

Er wird wegen des kleinen Einzugsgebietes von nur 12,3 km², das den See nur alle 6 Jahre füllen würde, vor allem zur Jahrespumpspeicherung eingesetzt.

Die Gesamtleistung aller Kraftwerke beträgt 1698 MW im Turbinenbetrieb und 983 MW im Pumpbetrieb. Das größte Kraftwerk, das Kopswerk II mit 450 MW Turbinen- und 450 MW Pumpleistung steht knapp vor der Fertigstellung. Damit können die Leistungsschwankungen, die zunehmend durch den forcierten Ausbau der Windenergie in Deutschland hervorgerufen werden, ausgeglichen werden.

Die großen Speicher sind bei einem durch die vielfältigen meteorologischen Unwägbarkeiten und den sehr jahreszeitabhängigen Zuflüssen die Garanten einer jederzeit verfügbaren hohen Leistung zur Stabilisierung des sehr nervös schwankenden Bedarfes im deutschen und europäischen Netz.

2. Klimaentwicklung im Silvrettagebiet

In den vergangenen 65 Mio. Jahren war das Klima meist wesentlich wärmer als jetzt. Nur ca. 10 % der Erdgeschichte war durch so genannte Eiszeitalter wie derzeit geprägt.

Auf die letzte Eiszeit, wo der größte Teil Vorarlbergs mit über 1000 m Eis bedeckt war, folgte eine Warmperiode, die mit zyklischen Schwankungen bis heute anhält. Im Jahre 2005 aufgefundene Holzreste deutlich oberhalb der heutigen Waldgrenze im Klostertal oberhalb des Silvrettasees bestätigen beispielsweise Warmperioden vor rd. 5000 (Ötzezeit) sowie ca. 9500 Jahren.

Die letzte relative Warmperiode ist am Ende des 18. Jahrhunderts aufgetreten. In der Folge kühlten sich die Temperaturen wieder ab.

Die so genannte letzte „kleine Eiszeit“, wo der Ochsentalergletscher vereinigt mit dem Vermuntgletscher bis nahe dem Silvrettasee reichte, ging 1860 zu Ende. Seither zieht sich der Gletscher bei zunehmenden Temperaturen fast kontinuierlich, insgesamt um ca. 1900 m, zurück.

2.1 Temperatur

Die Station Vermunt auf ca. 1700 müA zeigt seit 1926 sowohl für das Sommerhalbjahr als auch für das Winterhalbjahr und somit für das Gesamtjahr einen relativ kontinuierlichen Anstieg von im Mittel:

- Sommer 0,018 °C pro Jahr bzw. insgesamt +1,4 °C
- Winter 0,025 °C pro Jahr bzw. insgesamt ca. +2°C
- Jahr 0,022 °C pro Jahr bzw. insgesamt +1,7 °C

Diese Entwicklung deckt sich mit den Ergebnissen aus der Langfriststudie ALPIMP-HISTALP. (<http://www.zamg.ac.at/ALP-IMP>)

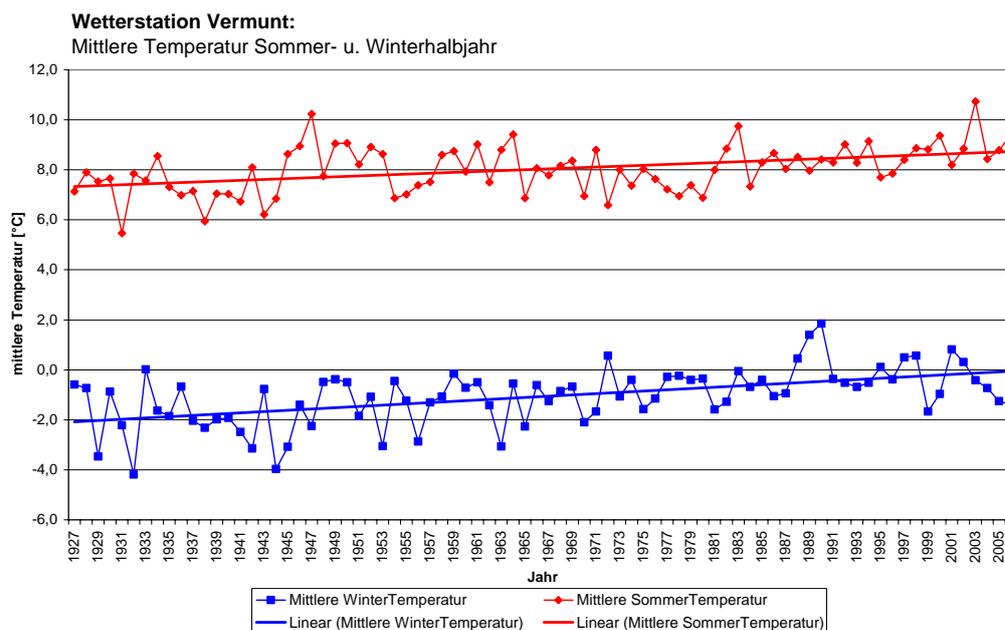


Abb. 3: Temperatur 1926 – 2007, Station Vermunt (VIW)

2.2 Niederschlag

Während der Sommerniederschlag in Vermunt (Abbildung 4) keinen signifikanten Trend aufweist, steigt der Winterniederschlag zwischen 1926 und 2007 relativ kontinuierlich von ca. 620 mm/a auf ca. 740 mm/a an. Der Jahresniederschlag nimmt in Folge dessen von ca. 1640 auf 1750 mm/a zu. Dies entspricht dem allgemeinen Trend in den Nordalpen.

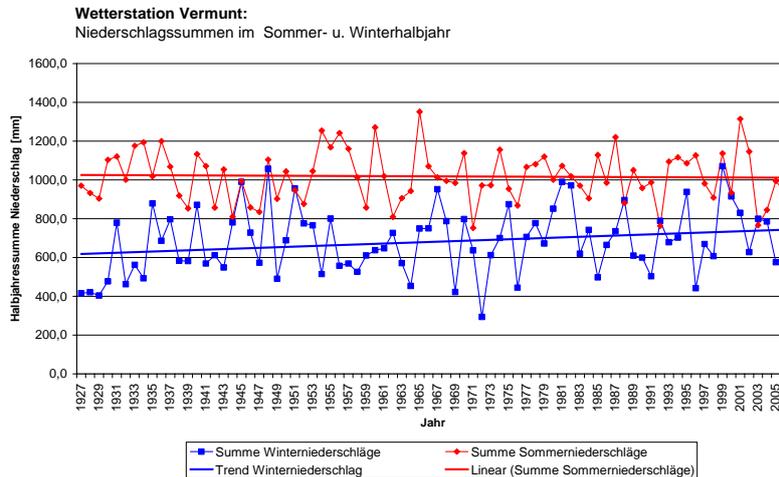


Abb. 4: Niederschlag 1926 – 2006, Vermunt

2.3 Schnee

Die Entwicklung der Winterniederschläge widerspiegelt auch die gefallenen Schneemengen, jedoch wird als Folge der ansteigenden Wintertemperatur der Schneeanteil tendenziell kleiner. Dies trifft vor allem für tiefere Lagen zu.

2.4 Schneeschmelze

Während im Jahre 1976 bei der Überleitung „Kops-Ost“ auf ca. 1800 m Seehöhe der erste Anstieg des Abflusses über $1,5 \text{ m}^3/\text{s}$ (= ca. Q_{220}) noch am 27.4 statistisch erwartet wurde, ist dies im Jahre 2007 bereits am 11.4., d.h. um 16 Tage früher.

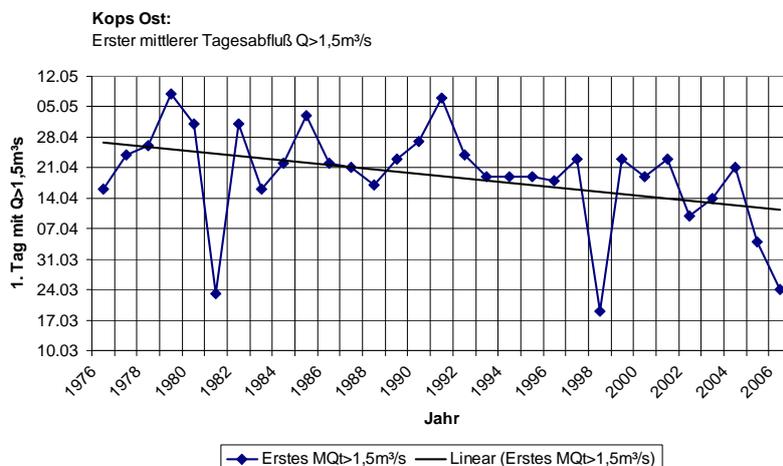


Abb. 5: Beginn der Schneeschmelze, Kops-Ost

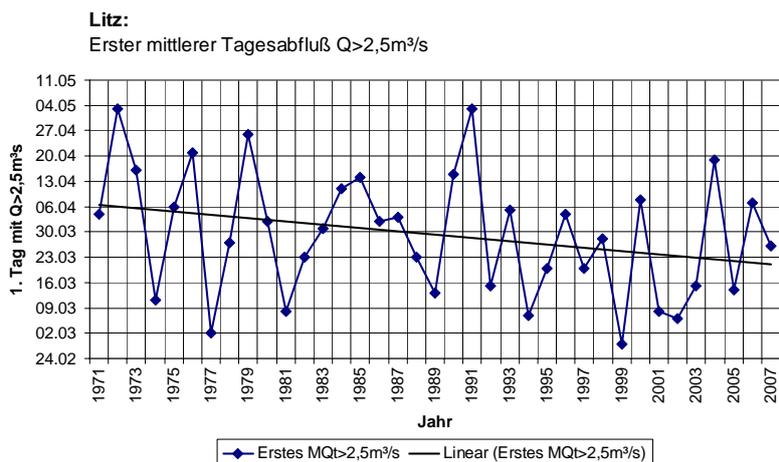
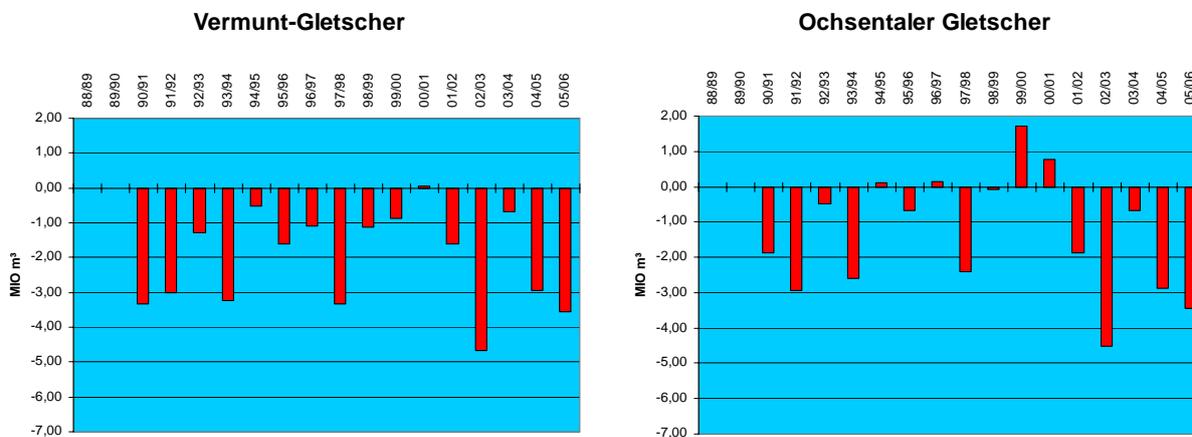


Abb. 6: Beginn der Schneeschmelze, Litz

Deutlich ausgeprägt ist das frühere Auftreten der Schneeschmelze auch in den Tallagen, wie beim Pegel Schruns – Litz.

2.5 Gletscher

Im Einzugsgebiet der Speicher der Illwerke befindet sich eine größere Anzahl von Gletschern mit einer ursprünglichen Gesamtfläche von ca. 47 km² (1850). 2003 betrug die Fläche nur noch ca. 22 km² bei einem Volumen von ca. 850 Mio. m³.

Abb. 7 und 8: Gletscherveränderung in Mio. m³

Aufgrund langjähriger Beobachtungen einiger Gletscher durch die Illwerke ergibt sich, umgelegt auf alle Gletscher im Einzugsgebiet der Illwerkeanlagen, ein jährlicher Schmelzverlust von im Schnitt 21 Mio. m³, im Extremjahr 2003 sogar ca. 50 Mio. m³. Ersteres entspricht rund 55 % des Fassungsvermögens des Silvrettaspeichers.

3. Abflussentwicklung

Das Abflussverhalten, jeweils getrennt für Sommer und Winter, ist in den folgenden Diagrammen (Abbildung 9 bis 12) dargestellt.

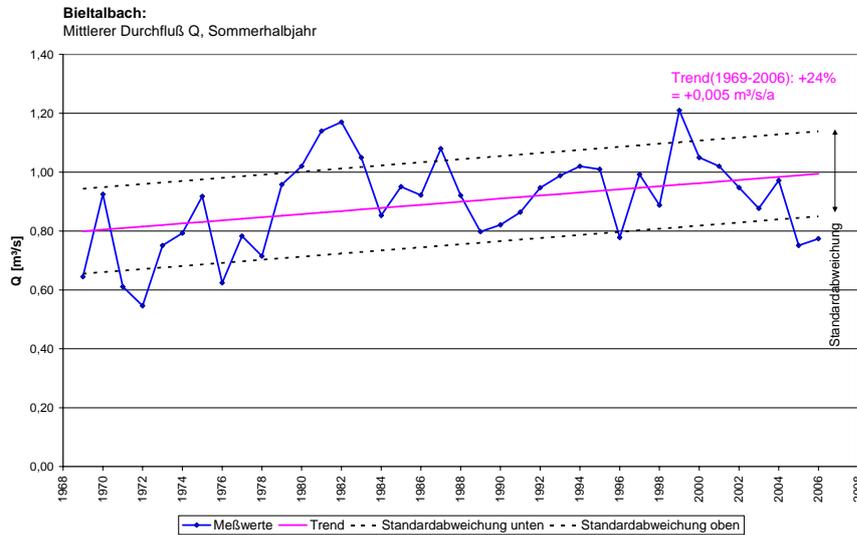


Abb. 9: Abflussentwicklung Bieltalbach, Sommer

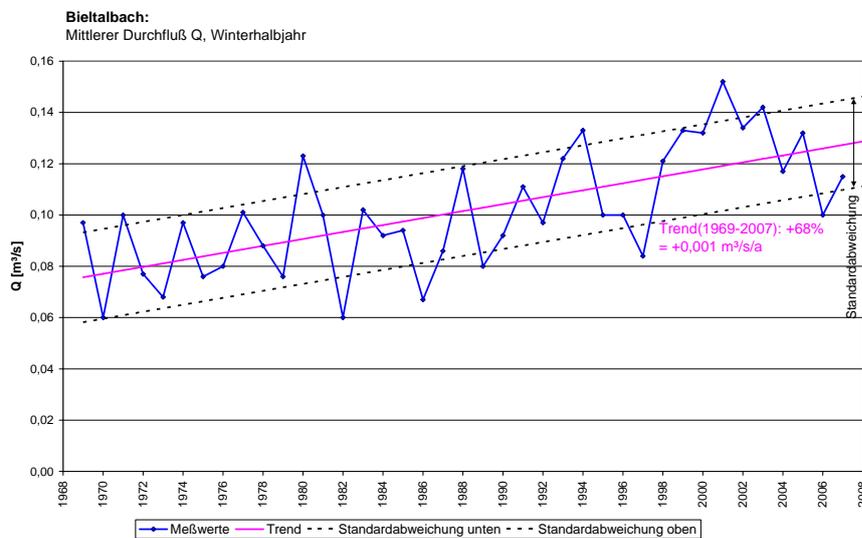


Abb. 10: Abflussentwicklung Bieltalbach, Winter

Die Ergebnisse zeigen je nach Höhenlage unterschiedliche Trends.

Der höchstgelegene Pegel „Beileitung Bieltalbach“ (2088 müA) repräsentiert ein gletscherbeeinflusstes Einzugsgebiet.

Der Winterabfluss im Zeitraum 1969 bis 2007 ist von 0,08 m³/s um 68 % auf ca. 0,13 m³/s gestiegen. Im Gegensatz zu Pegelstellen im Tal (z.B. Litz – Schruns, ca. 680 müA) ist der

Abfluss auch im Sommer als Folge der Gletscherabschmelze von $0,8 \text{ m}^3/\text{s}$ auf ca. $1 \text{ m}^3/\text{s}$, d.h. um 24 % angestiegen.

Auch die auf etwa ca. 1800 m gelegenen Pegel „Kops-Ost“ und „Zeinis – Schönverwallstollen“ zeigen einen klaren Anstieg im Winter. Dies ist in erster Linie auf den zunehmenden Winterniederschlag (Abbildung 4), die höheren Regenanteile, aber auch auf die früher einsetzende Schneeschmelze zurückzuführen.

Beim Sommerabfluss kompensiert die Gletscherabschmelze wegen des geringeren Gletscheranteils die durch die frühere Schneeschmelze und den geringeren Sommerniederschlag reduzierten Abflüsse gerade noch.

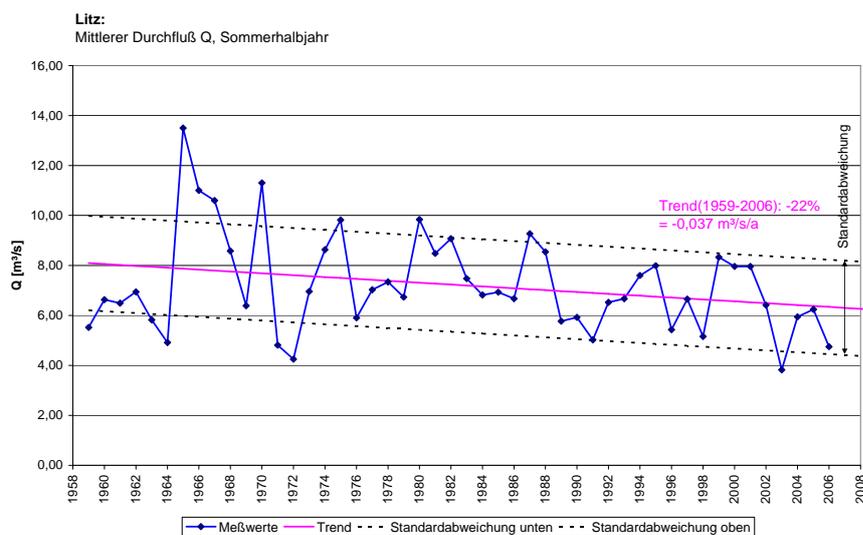


Abb. 11: Abflussentwicklung Litz, Sommer

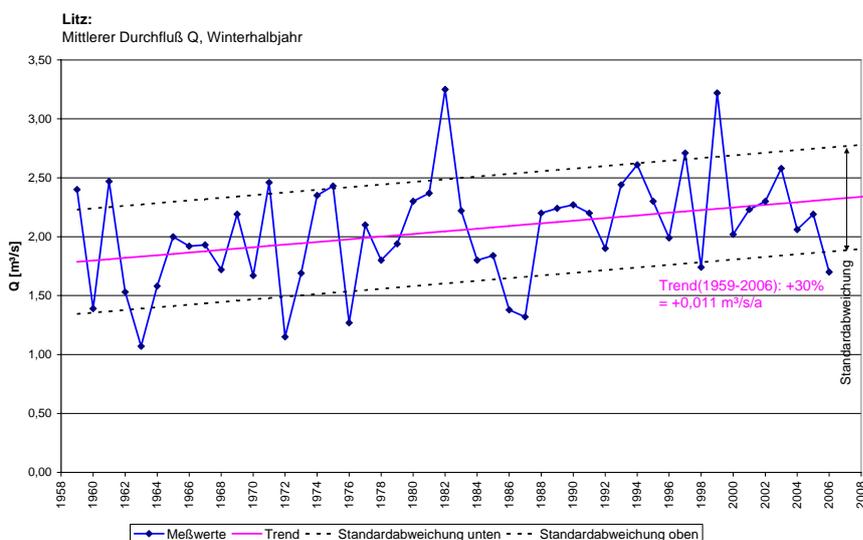


Abb. 12: Abflussentwicklung Litz, Winter

Die Sommerabflüsse in den Tallagen, beispielsweise der Litz (Abbildung 11 und 12), fallen wegen der teilweise in den Winter vorgezogenen Schneeschmelze, der höheren Temperaturen sowie des fehlenden Gletschereinflusses.

Analog zu dieser Entwicklung steigen in gletscherbeeinflussten Hochlagen (Abbildung 13) die Niedrigabflüsse, in tieferen Lagen dagegen fallen sie als Folge der wärmeren Trockenperioden (Abbildung 14).

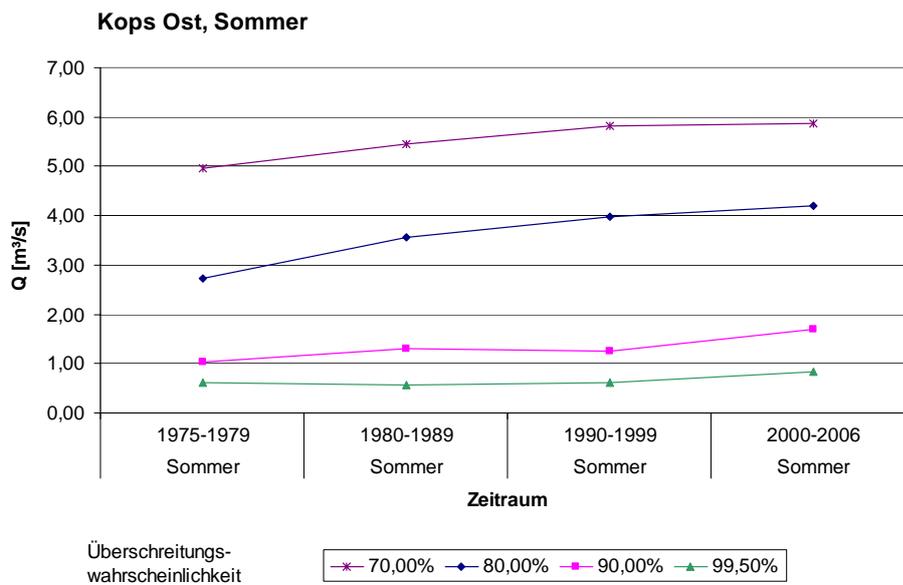


Abb. 13: Entwicklung der Abflüsse, die in der jeweiligen Periode mit einer bestimmten Wahrscheinlichkeit überschritten wurden, Kops Ost (gletscherbeeinflusst)

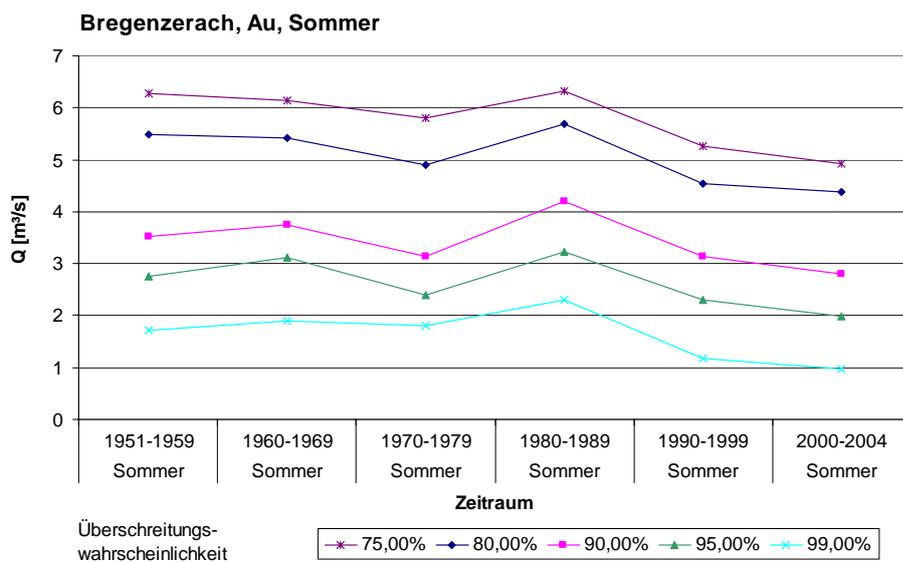


Abb. 14: Entwicklung der Abflüsse, die in der jeweiligen Periode mit einer bestimmten Wahrscheinlichkeit überschritten wurden, Bregenzerach

4. Geschiebe:

Das Zurückziehen der Gletscher legt zunehmend Moränen und Permafrostböden, die infolge des höheren Wärmeeintrages auftauen, frei. Infolgedessen steigen der Geschiebeanfall, der Spülaufwand und die Wasserverluste an den Fassungen. Die in der Grafik Abbildung 15 aufgetragenen Spülhäufigkeiten widerspiegeln die Entwicklung der Gletscher. Die Senke um die Jahre 1978 – 1985 entspricht einer eher kühlen, niederschlags- und schneereichen Periode, die auch zu einem kleinen Zwischenvorstoß der Gletscher führte. Diese Entwicklung zeigt sich analog in Abbildung 14 mit höheren Niedrigabflüssen in der Periode 1980-1989.

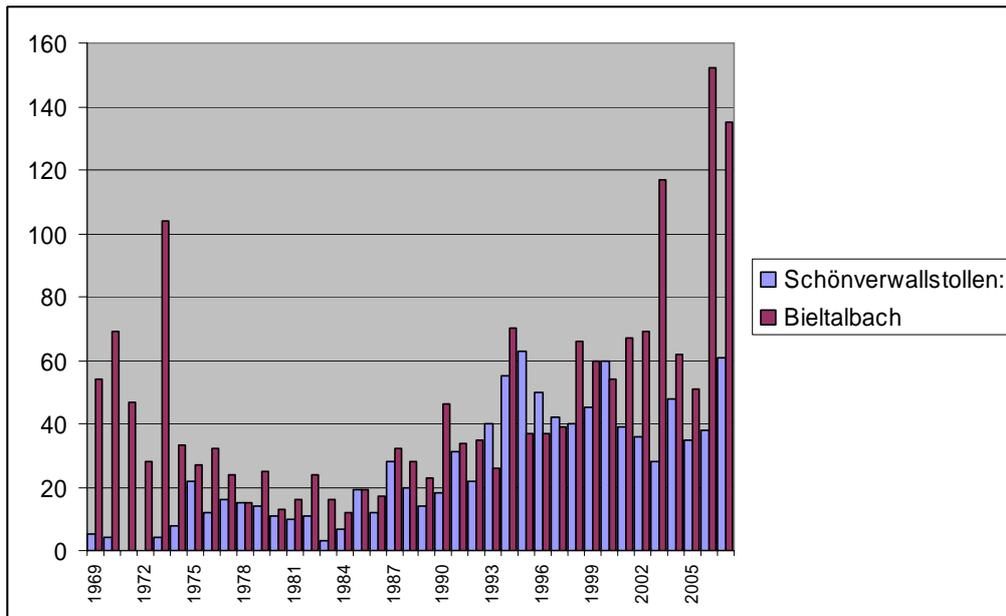


Abb. 15: Anzahl der Spülungen an gletscherbeeinflussten Fassungen

5. Auswirkungen auf die Wasserkraftnutzung

Die dargestellten Veränderungen haben zwangsläufig Auswirkungen auf die Wasserkraftnutzung. Dies betrifft vor allem folgende Schwerpunkte:

5.1 direkte Auswirkungen

- größere Fluktuation des Zuflusses
- Verlust der Retentionswirkung der Gletscher
- häufigere Extremhochwässer
- Schäden durch Muren etc.

5.2 indirekte Auswirkungen

- größere Bedarfsschwankungen durch vermehrten Einsatz von Klimaanlage und Kühlgeräten in Deutschland und Europa
- Leistungsausfälle als Folge von Dürre und Niederwasserführung bei
 - Wasserkraftwerken (Laufkraftwerken)
 - thermischen Kraftwerken (sowohl auf nuklearer als auch fossiler Basis) durch Kühlwassermangel

- Schäden an Hochspannungsleitungen durch Stürme etc.
- starke Zunahme des Spitzen- und Regelenergiebedarfs durch den forcierten Ausbau der Einspeisung von Öko-Strom in das Netz, vor allem der nicht bedarfsgerecht erzeugenden Windenergie

Den großen Speichern kommt, um diese Anforderungen bewältigen zu können, steigende Bedeutung zu.

6. Das Katastrophen-Hochwasser am 22. und 23. August 2005 im III- und Sannagebiet

Eine ganz wesentliche „Nebenaufgabe“ erfüllen die Speicher- und Spitzenkraftwerke seit eh und je, nämlich die Minderung der Hochwasserspitzen, wie am konkreten Beispiel gezeigt werden soll.

Im Montafon und im Walgau betreibt die Vorarlberger Illwerke AG seit vielen Jahrzehnten neben den Betriebsmessstellen 11 meteorologische Stationen und 17 Abflusspegel. Weitere meteorologische Stationen und Abflussmessstellen beobachten die hydrographischen Dienste Tirols und Vorarlbergs und die ZAMG.

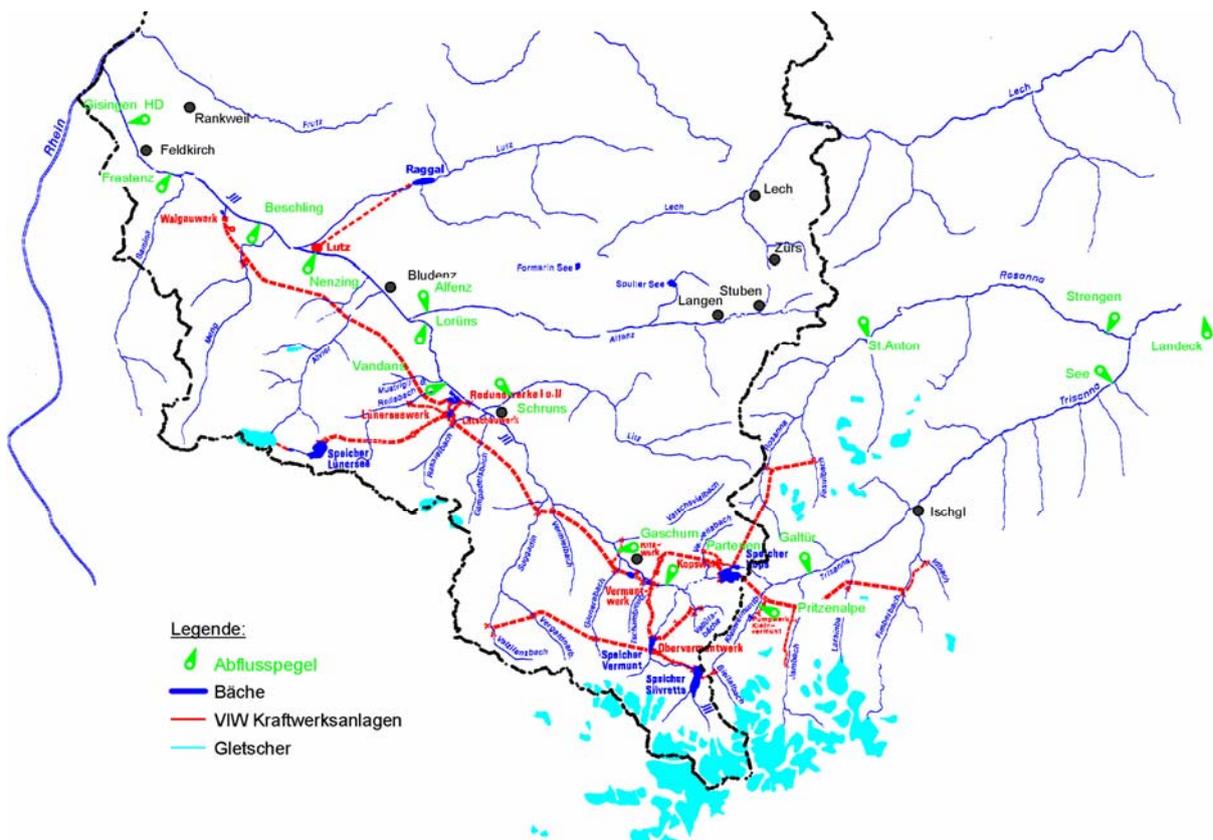


Abb. 16: „Ill- und Sannagebiet: Illwerke-Anlagen und Pegelstationen“

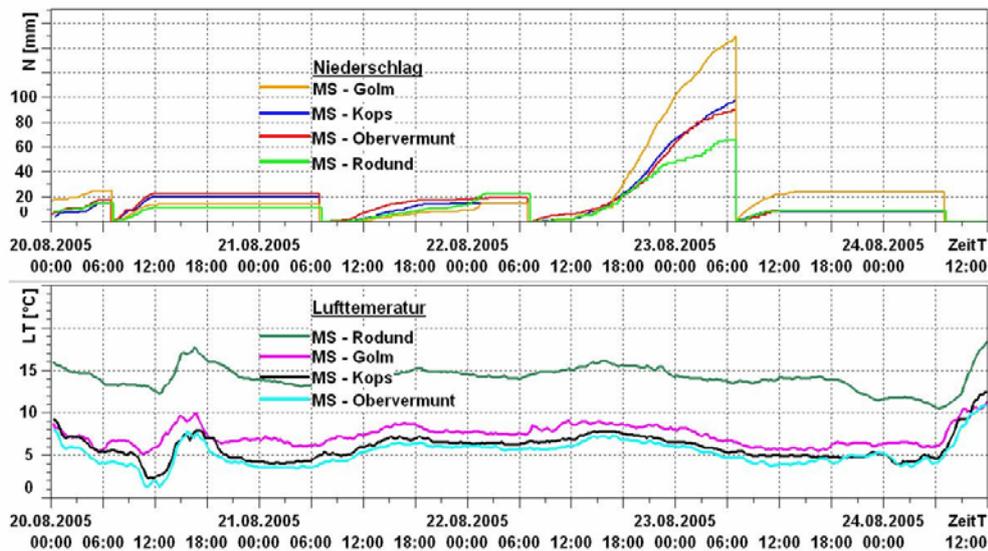


Abb. 18: „Niederschläge, Tagessummenlinien“

Infolge relativ hoher Temperaturen – das Minimum bei der Station Obervermunt wurde am 23.08.2005 um ca. 12.00 Uhr mit ca. 4 °C gemessen – blieb die Schneefallgrenze im Bereich der höchsten Bergspitzen.

6.2 Möglichkeiten der Dämpfung der Hochwasserwelle

Die großen Speicher können auf Grund ihrer exponierten Höhenlage im Wesentlichen nur das direkte, naturgemäß kleine Einzugsgebiet erfassen. Die max. Wirksamkeit der Speicher beschränkt sich somit auf den im jeweiligen Einzugsgebiet gefallenen Niederschlag, soweit es sich um Regen handelt. Der Schneeanteil bleibt – zumindest zum größten Teil– hochwasserunwirksam.

Die Beileitungen sind im Hochwasserfalle nur insoweit bedeutsam, als sie in Folge der jeweiligen Zufluss- und Geschiebesituation nicht verstopfen bzw. abgeleitet werden müssen. Die kleineren Becken, die im allgemeinen außerhalb der Fließgewässer liegen, können für die Zwischenspeicherung nur max. insoweit eingesetzt werden, als über noch intakte Beileitungen Wasser aus den Fließgewässern entnommen werden kann.

Als zusätzliche Komponente kommt allenfalls – sofern der dafür notwendige Pumpstrom im Netz aufgebracht werden kann – die Pumpspeicherung hinzu.

Beim Hochwasser 2005 konnten mit Ausnahme der nicht mehr funktionstüchtigen Fassungen alle Einrichtungen der Illwerke in enger Zusammenarbeit mit den Stromabnehmern, vor allem der EnBW, zur Dämpfung der Hochwasserwelle eingesetzt werden.

6.3 Auswirkungen des Hochwassers

Im Bereich der Rosanna und der Trisanna, in deren Einzugsgebiet mehrere Fassungen, jedoch keine Speicher liegen, konnte die Hochwasserspitze nur in bescheidenem Ausmaß von

etwa 10-20 m³/sec. gekappt werden. Die Schäden waren wie die Abbildungen 19 und 20 zeigen, großflächig katastrophal.

Anders ist die Situation im Montafon und Walgau. Hier konnte durch eine abgestimmte Betriebsführung eine sehr bedeutende Reduktion des Hochwassers, insbesondere des Spitzenabflusses erzielt werden.



Abb. 19: zerstörte Fassung „Gfäll-Trisanna“



Abb. 20: zerstörtes Haus an der Trisanna

6.3.1. Einfluss der Illwerke-Anlagen auf die Hochwasserwelle im Illgebiet

Sämtliche großen Speicher konnten sowohl die direkt zufließenden Wassermengen als auch die beigeleiteten Wassermengen aufnehmen. Durch den mit den Stromabnehmern koordinierten Einsatz der Kraftwerke kam es weder zu Überläufen noch zu Abgaben in die Ill während der Hochwasserwelle. Zusätzlich wurden insgesamt ca. 2 Mio. m³ in den Lünensee gepumpt.

Durch den Gesamtrückhalt aller Speicher wurde im Zeitraum 22.08. bis 24.08.07 die HW-Abflussfracht im Längsverlauf der Ill und des Rheines um ca. 11 Mio. m³, davon allein während des größten Abflusses im Zeitraum 22.8.2005, 18:00 Uhr bis 23.8.2005, 18:00 Uhr rd. 6,7 Mio. m³, vermindert.

Abbildung 21 zeigt für ausgewählte Pegelstellen den rekonstruierten natürlichen und den tatsächlichen Verlauf der Hochwasserwelle.

Von Partenen bis zur Mündung wurde durch die Retention in den Speichern der Illwerke die Hochwasserspitze fast durchwegs um rd. 100 m³/s gedämpft. Das bedeutet beispielsweise für das innere Montafon eine Reduktion von ca. 150 m³/s auf knapp 60 m³/s d.h. auf 1/3 der natürlichen Spitze.

Die Abbildung 22 zeigt die Wirkung der Illwerkeanlagen ganz besonders eindrücklich, insbesondere auch im Vergleich zu unbeeinflussten Zubringern (Lutz, Litz, Alfenz).

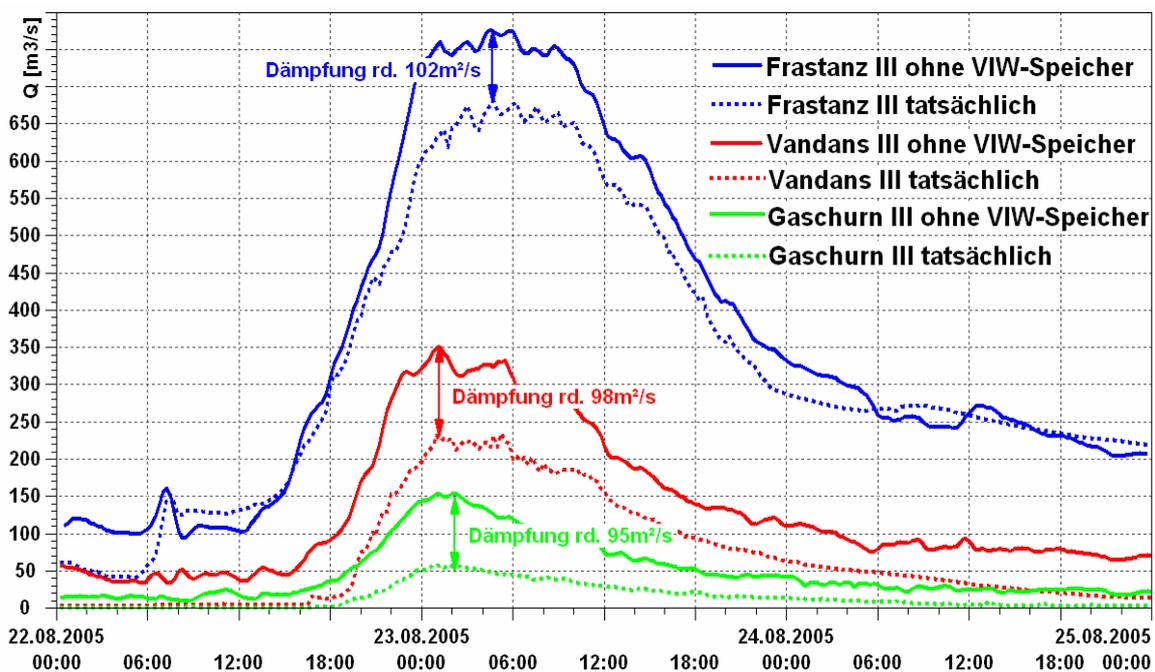


Abb. 21: Montafon und Walgau: Dämpfung der HW-Welle durch die Anlagen der Illwerke

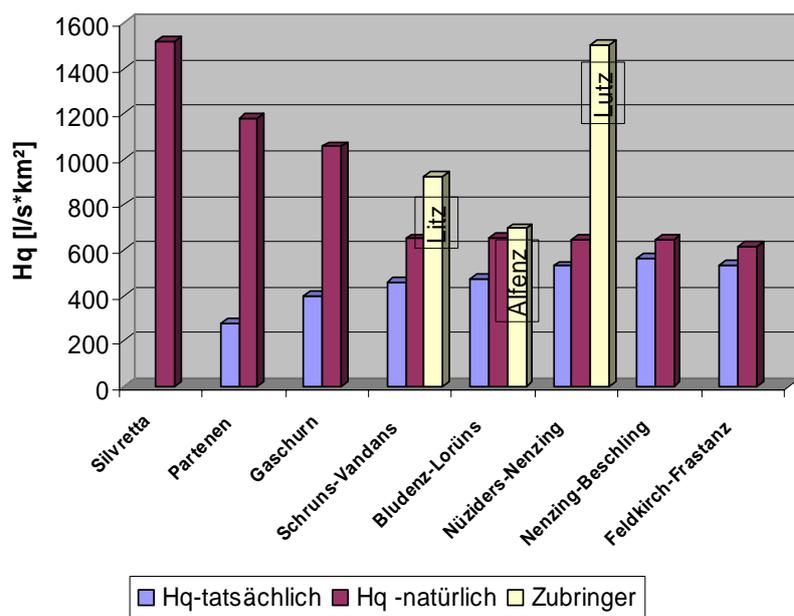


Abb. 22: Hochwasserspanden der Ill und Seitzenzubringer mit (Hq-tats) und ohne (Hq-nat) Illwerkeeinfluss



Abb. 23.: beschädigte Brücke „Galgenul“ (Innermontafon)



Abb. 24.: Ill-Nenzing (Walgau), beschädigte Autobahn und freigelegte Gasleitung

Im Gegensatz zu einigen Seitenzubringern, wie z.B. dem Suggadinbach oder dem Valschavielbach, die eine ungedämpfte Hochwasserwelle abführen mussten, sind die aufgetretenen Schäden im Illbereich oberhalb der Meng, besonders aber im Montafon, daher relativ gering. Es darf, wie die Abbildungen 23 bis 25 eindrücklich vermuten lassen, davon ausgegangen werden, dass durch den der Hochwassersituation angepassten Einsatz der Anlagen der Illwerke im gesamten Illverlauf noch größere Schäden in unvorstellbarem Ausmaß vermieden wurden.

Für die Stadt Feldkirch bedeutete die Dämpfung der Welle um rd. $100 \text{ m}^3/\text{s}$ nach einer Illwerke internen Hochwasserstatistik für den etwas flussaufwärts gelegenen Pegel Frastanz in etwa eine Reduktion von einem HQ_{100} auf ein HQ_{50} . Eine Überflutung im Stadtbereich wurde dadurch verhindert. (Abbildung 25)



Abb. 25: Hochwasserspitze in Feldkirch – Montfortbrücke

Literatur

- GMEINHART W. (1988): Die Hochgebirgsstauseen der Tauerkraftwerke AG als Hochwasserschutzbauten - ÖZE Jahrgang 41, Heft 8
- HOFER B. (2005): Dämpfende Auswirkungen der Speicherkraftwerksanlagen auf den Hochwasserabfluss am Inn - Geoforum Umhausen
- SCHÖBERL F. & HOFER B. (2006): Hochwasserrückhalt von Jahresspeichern in Abhängigkeit von der Füllungswahrscheinlichkeit – Verhaltensanalyse von Großspeicheranlagen in Tirol - Von der Tradition zur Moderne, Graz
- MOSER G. (2007): Das Hochwasser am 22. und 23. August 2005 im Ill- und Sannagebiet – Mitteilungsblatt des Hydrographischen Dienstes in Österreich, Nr. 84, S. 30 – 41
- MOSER G. (2003): Die Gletscher im Einzugsgebiet der Vorarlberger Illwerke – Ergebnisse der Messungen – Bericht, unveröffentlicht

Küstenschutz im Klimawandel: Herausforderungen und Anpassungsoptionen

Michael Schirmer und Bastian Schuchardt

Zusammenfassung

Festland und Inseln an der deutschen Nordseeküste müssen als hoch sensibel gegenüber den komplexen Wirkungen des Klimawandels bezeichnet werden. Die szenariobasierten Projektionen des IPCC wie auch die seit Mitte des zwanzigsten Jahrhunderts an der deutschen Nordseeküste zu beobachtende Beschleunigung des Meeresspiegelanstiegs zwingen zum Handeln. Die aktuellen Programme und Generalpläne der Küstenländer scheinen geeignet, einen weiteren Anstieg des Tidehochwassers um einen halben Meter und die entsprechende Zunahme der Sturmflutrisiken bis Mitte des 21. Jahrhunderts aufzufangen. Als zunehmend problematisch erweist sich der hohe Zeit-, Material- und Raumbedarf der heutigen Küstenschutzpraxis der Verteidigung der vorhandenen Linie. Mittel- bis langfristig muss jedoch damit gerechnet werden, dass der Meeresspiegelanstieg die konventionellen technischen Möglichkeiten überfordert. Die hier dargestellte kleine Auswahl anderer Anpassungsstrategien wie z.B. flächenbezogener Küstenschutz durch gestaffelte Deichlinien oder ein Sturmflutsperrwerk in der Außenweser zeigt, dass die dafür erforderlichen Entscheidungs- und Planungsprozesse bereits heute in Gang gesetzt werden müssen.

1. Klimawandel und Küste

Die Küstenregionen der Welt sind von nahezu allen direkten und indirekten Folgen des Klimawandels kumulativ betroffen. Das umfasst primär den Anstieg der Mittel- und Extremwerte der Lufttemperaturen, aber auch die Veränderungen in der Niederschlagsverteilung, der Abflüsse vom Festland, den Anstieg des Meeresspiegels, eine Zunahme von Stürmen und Erosion und ein beschleunigt steigendes Risiko durch Sturmfluten. Die Auswirkungen sind besonders ausgeprägt an flachen Küsten wie im Bereich der Deutschen Bucht, wo Inseln, Wattenmeer, Flussmündungen und die befestigte Küste mit ihrer städtischen, ländlichen und industriellen Besiedlung betroffen sind. Insbesondere die Ästuarie von Elbe, Weser, Ems und Eider werden unter diesen Einwirkungen ihre physischen und ökologischen Eigenschaften z.T. deutlich verändern und überdies den Anstieg des Meeresspiegels und die erhöhten Sturmflutgefahren bis weit ins Hinterland nach Bremen und Hamburg, immerhin gut 100 km von der Küste entfernt, transportieren. Infolge dieser Gegebenheiten muss auch die Deutsche Nordseeküste mit etwa 3,5 Mio. Einwohnern als hoch sensibel gegenüber dem Klimawandel bezeichnet werden, und nur durch unsere fast tausendjährige Tradition des Küstenschutzes, die gut entwickelte Infrastruktur und eine vorläufig ausreichende technische und finanzielle Ausstattung dürfen wir uns in Bezug auf die Verletzlichkeit unserer Küste niedriger einstufen als vergleichbare Küstenregionen in der 2. und 3. Welt.

2. Der Blick in die Zukunft

Den Stand des Wissens über den Klimawandel, seine Ursachen und Folgen hat das IPCC in 2007 in 3 Bänden zusammengefasst und publiziert (z.B. in IPCC 2007 die „Physikalischen Grundlagen“). Während die Wissenschaft das globale Klimasystem zunehmend besser versteht und ablaufende Prozesse modellieren kann, bleibt insbesondere die Unsicherheit über

die zukünftigen Emissionsraten von Treibhausgasen unausweichlich und kann nur durch Annahmen (Szenarien) in wenn-dann-Beziehungen übersetzt und handhabbar gemacht werden (SRES 2008). Die daraus resultierende Spannweite der möglichen Entwicklungen z.B. des weiteren Meeresspiegelanstiegs wird vergrößert durch zunehmende Unsicherheiten über das beschleunigte Abschmelzen der festländischen Eismassen und deren Folgen für Meeresspiegellage und Zirkulationssysteme. IPCC 2007 errechnet für den Anstieg des global gemittelten Meeresspiegels zum Ende dieses Jahrhunderts je nach Emissionsszenario Werte zwischen mindestens 0,18 m (B1-Szenario, low estimate) und bis zu 0,59 m für das A1FI-Szenario, high estimate. Ergänzt werden diese Aussagen allerdings durch den ausdrücklichen Hinweis darauf, dass es sich hierbei v.a. wegen der Unsicherheiten über das Verhalten der globalen Eismassen eher um Mindestwerte handelt und die oberen Schätzwerte keinesfalls als Obergrenzen des Meeresspiegelanstiegs verstanden werden dürfen (IPCC-AR4-SYR 2007). Zu weiteren ökologischen und wirtschaftlichen Folgen des Klimawandels für die Meere empfiehlt sich das Sondergutachten des Wissenschaftlichen Beirats der Bundesregierung Globale Umweltveränderungen (WBGU 2006): Die Zukunft der Meere – zu hoch, zu warm, zu sauer.

3. Beobachtungen und Prognosen der Meeresspiegellage an der Deutschen Nordseeküste

Deutschland verfügt mit Zeitreihen der Nordseeküstenpegel seit 1840 über eine hervorragende Dokumentation der hier herrschenden Verhältnisse. JENSEN & MUDERSBACH 2007 haben die wohl aktuellste Auswertung dieses Materials vorgelegt. Im hier betrachteten Zusammenhang sind vor allem 2 Parameter zu beachten: einerseits die tatsächlich eingetretenen Tidehoch- und –niedrigwasserstände wegen ihrer Relevanz für den Küstenschutz und andererseits der daraus errechnete Mittelwasserstand („Meeresspiegel“), der den Anschluss an Aussagen über globale Meeresspiegellagen erlaubt.

3.1 Mittlerer Meeresspiegel (MW, MTmw)

IPCC 2007 gibt für den bisherigen mittleren globalen Anstieg des Meeresspiegels für den Zeitraum 1961 bis 2003 1.8 ± 0.5 mm/Jahr an, mithin etwa 18 cm/Jhdt, mit einer deutlichen Beschleunigung im Zeitraum 1990 bis 2003 auf etwa 3 mm/Jahr entsprechend 30 cm/Jhdt (IPCC (2007) AR4 WG1 Ch5 S. 419). Die Nordsee folgt diesem Anstieg des Mittleren Wasserstandes (MW) mit Verzögerung. JENSEN & MUDERSBACH (2007) geben den Trend des Anstiegs des rechnerischen MTmw 1950 bis 2005 an ausgewählten Küsten- bzw. Inselpegeln mit 14,4 bzw. 18,5 cm/Jhdt an. Eine leichte Beschleunigung des Anstiegs seit den 1990er Jahren lässt sich zwar optisch aus den Daten interpretieren, jedoch liegen noch keine statistischen Analysen dazu vor (mdl. Mitt. Mudersbach). Die Nordsee weist jedoch durch die Gezeitenanregung vom Nordatlantik und 2 (bis 3) eigene Schwingungssysteme ein sehr komplexes Tideverhalten auf, sodass die beobachteten Phänomene noch nicht vollständig befriedigend erklärt werden können und z.T. kontrovers diskutiert werden. Im unmittelbaren Einflussbereich der Ästuare ist eine Auswirkung der Ausbauten nicht auszuschließen (s.u.), doch zeigen auch alle isoliert liegenden Pegel wie z.B. derjenige von Helgoland die z.T. dramatischen Veränderungen im Tidegeschehen seit den 1950er Jahren.

RAHMSTORF & RICHARDSON (2007) gehen von einem Anstieg des Meeresspiegels um etwa 3,4 mm/Jahr pro 1°C Temperaturerhöhung der Atmosphäre aus, was für das A1B-

Szenario ($\sim 3^\circ$ Anstieg bis 2100) schon 1 m, für das A1FI-Szenario mit $2,5^\circ$ bis 6° sogar bis zu 2,4 m bedeuten würde. In Zeiträumen von Jahrhunderten wird überdies das postglaziale Absinken der deutschen Nordseeküste von ca. 10 cm/Jhdt relevant, was zu den jeweiligen globalen Schätzungen addiert werden muss.

UKCIP (2008) (UK Climate Impacts Programme) kommt zu ähnlichen Größenordnungen des Meeresspiegelanstiegs bis 2050 und schätzt 30-50 cm für die Südhälfte der britischen Insel. Infolge des geringen Gefälles in den norddeutschen Ästuaren setzt sich ein weiterer Anstieg des küstennahen Meeresspiegels nahezu unverändert in die Ästuare hinein fort, wie GRABEMANN et al. 2007 zeigen.

3.2 Tidehub und Tidehochwasser (Thb, MThb; Thw, MThw)

Die an den Küsten auftretenden astronomischen Gezeiten werden im einfachsten Fall durch die mittleren Tidehoch- und -niedrigwasserstände beschrieben. Deren Lage relativ zu NN und der resultierende Tidehub hängen sowohl vom seeseitigen Gezeitenenergieeintrag ab als auch von der jeweiligen Wassertiefe und Morphologie im Pegelumfeld, die u.U. anthropogen beeinflusst sein können (z.B. durch die Ausbauten der Unterläufe von Elbe und Weser).

Der Tidehub ist aus Sicht des Küstenschutzes insofern von großer Bedeutung, als er u.a. ein Maß für die tiderhythmisch ausgetauschten Wassermengen und für die dabei auftretenden Strömungen sowie Erosions- und Sedimentationsprozesse verantwortlich ist.

Grundsätzlich ist davon auszugehen, dass die küstennahe Tidewelle mit zunehmender Wassertiefe weniger Energie durch Bodenreibung verliert, also mit größerer Energie in die Flachwasserzonen und Ästuare eindringt und dort einen größeren Tidehub erzeugt. Dieser Prozess ist z.B. bei allen neueren Vertiefungen von Unterelbe und -weser vorhergesagt worden und auch eingetreten: in beiden Unterläufen hat sich, vor allem infolge der Ausbauten, der Tidehub zwischen 1977 und 2008 um 50 bzw. 70 cm erhöht (Pegel Vegesack und St. Pauli; BSH 2008).

Die von JENSEN & MUDERSBACH 2007 veröffentlichten Analysen der Zeitreihen seit 1840 (Abbildung 1) belegen, dass sich der Trend der Zunahme des Tidehubs an der Deutschen Nordseeküste (6 Pegel) seit den 1960er Jahren erheblich beschleunigt hat: von 18,1 cm/Jhdt (1857-2005) auf 57,1 cm/Jhdt (1950-2005). Diese Zunahme beruht vor allem auf dem Anstieg des MThw um 22 cm seit 1950, während das MTnw in der gleichen Zeit um 9 cm abgesunken ist. Diesen Trend zeigt auch der außerhalb des unmittelbaren Küstenumfeldes liegende und somit kaum anthropogen beeinflusste Helgoländer Pegel: dessen MThb-Trend verdoppelte sich nahezu von 19,8 cm/Jhdt (1925-2001) auf 34,3 cm/Jhdt (1965-2001)(JENSEN & MUDERSBACH 2004).

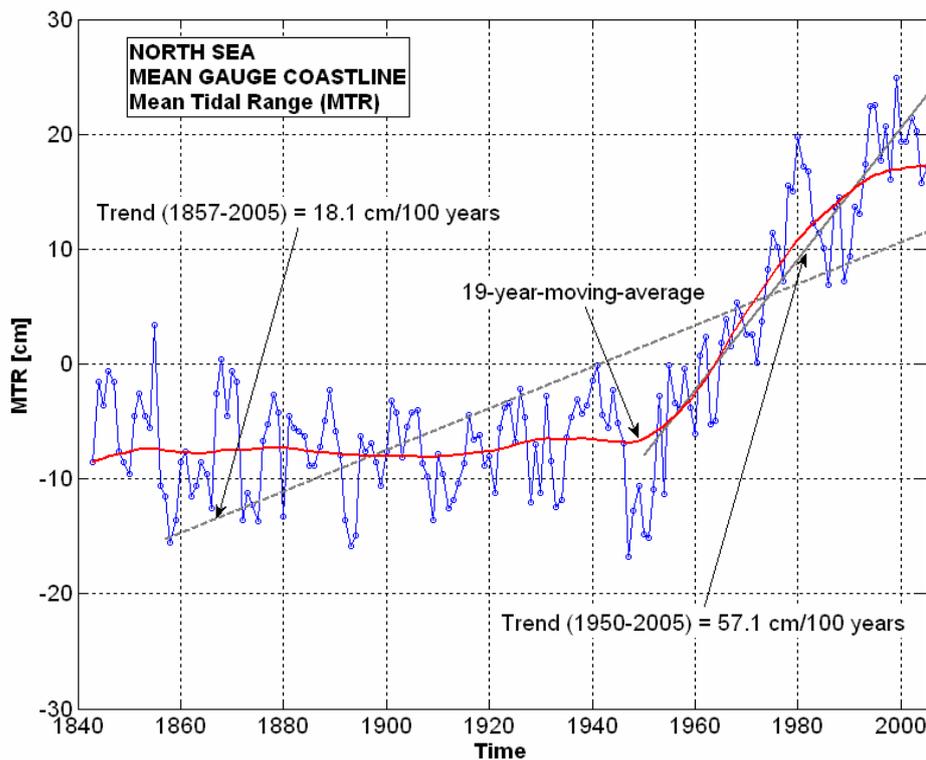


Abb. 1: Normierte mittlere MThb-Zeitreihe (6 Küstenpegel Deutsche Nordseeküste) mit Ausgleichsfunktionen (aus JENSEN & MUDERSBACH 2007)

Aus Sicht des Küstenschutzes ist die aktuelle und zukünftige Lage des Tidehochwassers v.a. als Ausgangsniveau für Sturmfluten von besonderer Bedeutung. Die aktuelle Lage des MThw über NN geht im sog. Einzelwertverfahren neben weiteren Größen unmittelbar in die Berechnung des Bemessungswasserstandes für die Ermittlung von Deichhöhen ein, während der zeitliche Trend des MThw als sog. Säkularer Anstieg mit der Funktion einer Zukunftsreserve ebenfalls in die Berechnungen eingeht. Für die Deutsche Nordseeküste legen JENSEN & MUDERSBACH 2007 die aktuellste Zeitreihenanalyse vor. Wie Abbildung 2 zeigt, erfolgte der über 6 Festlandspegel gemittelte Anstieg des Mittleren Tidehochwassers nach 1840 in 3 Phasen: bis 1920 mit etwa 20 cm/Jhdt, 1920 bis etwa 1950 deutlich langsamer, und seit 1950 mit doppelter Geschwindigkeit von über 40 cm/Jhdt. Der beschleunigte Anstieg des MThw beginnt zur gleichen Zeit wie die Vergrößerung des Tidehubs (s.o.). Diesen Trend zeigt auch die küstenfernere Nordsee am Pegel Helgoland mit einer Trendbeschleunigung für das MThw von 18,4 cm/Jhdt (1925-2001) auf 23,7 cm/Jhdt (1965-2001)(JENSEN & MUDERSBACH 2004).

Die ständigen Ausbauten der Ästuarie seit dem Ende des 19. Jahrhunderts haben nicht nur das Vordringen der küstentypischen Gezeitendynamik bis nach Hamburg und Bremen ausgelöst, sondern verstärken diese durch die Trichterform der Unterläufe und weitere hydrodynamische Prozesse. Diese regionale anthropogene Verstärkung der allgemeinen Entwicklung führte zu einem Anstieg des MThw zwischen 1977 und 2008 an den Pegeln Vegesack/Weser und St. Pauli/Elbe um 30 cm (BSH 2008).

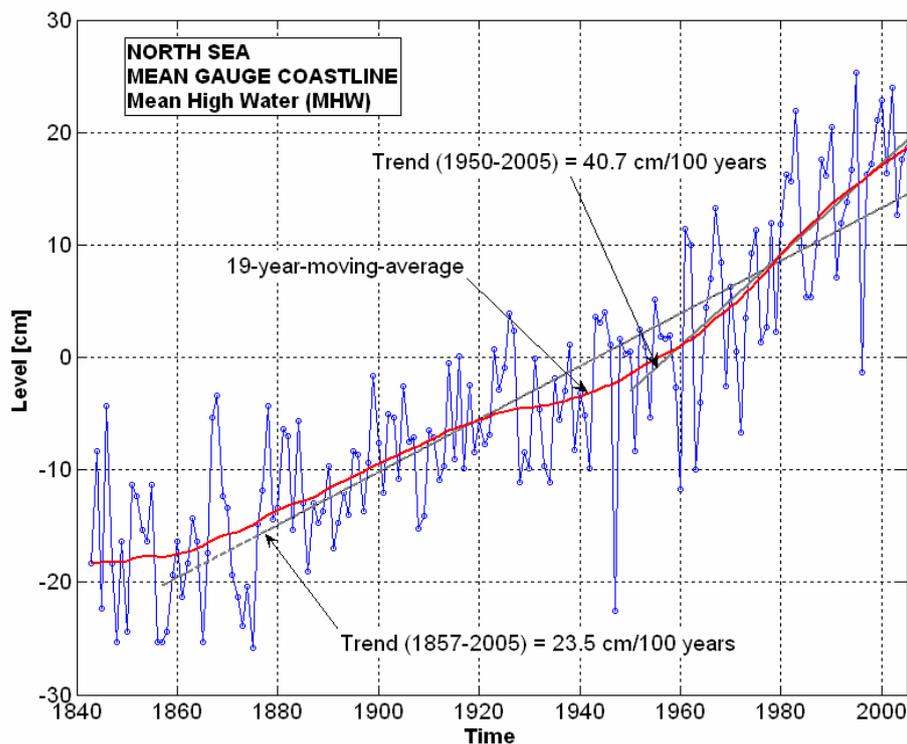


Abb. 2: Normierte mittlere MThw-Zeitreihe (6 Küstenpegel Deutsche Nordseeküste) mit Ausgleichsfunktionen (aus JENSEN & MUDERSBACH 2007)

3.3 Ausblick: Der zukünftige Anstieg des mittleren Wasserstandes und des Tidehochwassers

Der Betrachtungszeitraum des IPCC endet mit dem gegenwärtigen Jahrhundert, dazwischen liegende Zeitschnitte müssen i.d.R. geschätzt oder abgegriffen werden. 100 Jahre sind im Prinzip auch Bezugszeitraum für Küstenschutz und Deichbau (z.B. im bisherigen Säkularzuschlag von 25 cm), obwohl in der Praxis alle 25 bis 35 Jahre nachberechnet wird und ggfls. neue Deichhöhen festgesetzt und hergestellt werden. In der Tabelle 1 sind die Modellierungen des IPCC und Extrapolationen aus regionalen Zeitreihen zusammen gestellt. Sie bilden mögliche zukünftige Entwicklungen ab und zeigen die Große Spannweite, die sich aus der Abhängigkeit von den zukünftigen Treibhausgasemissionen, regionalen Besonderheiten und den noch immer bestehenden wissenschaftlichen Erkenntnisdefiziten ergeben.

Tab. 1: Zusammenstellung errechneter Werte (szenariobasiert) und extrapolierter Trends für den zukünftigen Anstieg des Meeresspiegels (MW) und des MThw bis 2050 und 2100

Quelle	Szenario/Datensatz	Kenngröße	Anstieg bis 2050 [m]	Anstieg bis 2100 [m]
IPCC 2007	B1 (global)	MW	$0,09 - 0,19 + x^*$	$0,18 - 0,38 + x^*$
Dies.	A1B (global)	MW	$0,11 - 0,24 + x^*$	$0,21 - 0,48 + x^*$
Dies.	A1FI (global)	MW	$0,13 - 0,30 + x^*$	$0,26 - 0,59 + x^*$
Dies.	Extrapolation aus 1990 - 2003	MW		0,3
UKCIP 2008	Regionalszenario (Süd-England)	MW	0,30 - 0,50	
RAHMSTORF & RICHARDSON 2007	3,4 mm/Jahr pro 1°C Temperaturerhöhung (global)	MW	B1: 0,19 - 0,50 A1B: 0,29 - 0,75 A1FI: 0,41 - 1,09	B1: 0,37 - 0,99 A1B: 0,58 - 1,50 A1FI: 0,82 - 2,18
JENSEN & MÜLLERSBACH 2007	Zeitreihe dt. Küstenpegel Nordsee (Extrapolation, Basis 1950-2005)	MW	0,07 - 0,10	0,14 - 0,19
Dies.	dito	MThw	0,21	0,41

* x = unbekannter Zuschlag für Gletscherschmelze

Die Tabelle demonstriert anschaulich die Unsicherheiten über den mittel- und längerfristigen Fortgang des Meeresspiegelanstiegs, seine Auswirkungen auf das Tidehochwasser im Bereich der Deutschen Bucht und die Wechselwirkungen mit anthropogenen Eingriffen. Es zeigt sich deutlich, dass es zu einer bereits beobachteten und/oder zu einer sehr wahrscheinlich zu erwartenden erheblichen Vergrößerung des im vergangenen Jahrhundert verwendeten „Säkularanstiegs“ von 25 cm/Jhdt gekommen ist. Verstärkt wird diese Beschleunigung durch die sich deutlich abzeichnende Erhöhung der Beiträge der globalen Gletscherschmelze zum Meeresspiegelanstieg und im Bereich der Ästuare durch weitere geplante Ausbauten.

4. Sturmfluten, Extremwerte

Die Aufgaben des Küstenschutzes beinhalten sowohl die Sicherung der Küstenlinie vor Erosion, insbesondere im Bereich der Inseln und exponierter Deichabschnitte, als auch den Schutz besiedelter und genutzter Landflächen vor der Überflutung durch Meer-, Brack- und Flusswasser. Letztere Funktion beschränkt sich heutzutage nicht mehr nur auf Hochwasser- oder Sturmflutsituationen, sondern ist eine permanente Aufgabe geworden. Die zu schützenden Flächen der Küsten- und Flussmarschen liegen heute infolge Jahrhunderte langer Eindeichung, Trockenlegung und Setzung bei gleichzeitig ansteigendem Meeresspiegel großflächig bis zu mehreren Metern unter dem mittleren Tidehochwasser, welches an der Küste im Bereich von +1,5 mNN und im Inneren der ausgebauten Ästuare bei +2 bis +2,5 mNN liegt. Neben dieser alltäglichen „Grundsicherung“ der norddeutschen Küsten- und Flussmarschen erfordert der Schutz der Gebiete vor Extremereignissen wie Sturmfluten eine entsprechende Bemessung der Schutzanlagen.

Wesentliche Grundlage der Berücksichtigung von Sturmfluten ist die Analyse historischer Ereignisse. Dies kann mittels probabilistischer Analyse von Wasserstand und Eintrittszeitpunkt geschehen oder deterministisch durch die Analyse des höchsten bis dato eingetrete-

nen Windstaus, also der durch Wind zusätzlich erzeugten Wasserstandserhöhung, die dann dem höchsten bekannten astronomischen Springtidehochwasser hinzuaddiert wird: $NN + MThw + \Delta HSpThw + \Delta Windstau + \Delta Säkularanstieg = Bemessungswasserstand$ (im Einzelwertverfahren). Für Flussdeiche wird die Bemessung wegen der Interaktion u.a. mit Flusshochwasser auf der Grundlage hydrodynamischer Modelle durchgeführt, ein aktuelles Beispiel für beide Verfahren bietet der „Generalplan Küstenschutz Niedersachsen/Bremen – Festland“ (NLWKN 2007).

Die zukünftige Entwicklung der Sturmfluten bezüglich der Häufigkeit bestimmter Wasserstände und der Höhe von Extremwerten ist nur sehr eingeschränkt abzuschätzen. Grundsätzlich ist davon auszugehen, dass ein gleich großer sturmfluterzeugender Impuls bei sich stetig erhöhendem Tidehochwasser (s.o.) entsprechend höhere Sturmflutwasserstände bewirkt. WITTIG et al. (2007) errechnen für das KRIM-Klimaszenario (in 2050: MThw Dt. Bucht +55 cm, Windgeschw. im Winter +6,6 %, Extremwerterhöhung +14,4 cm), dass eine Sturmflut, die das MThw um 2,5 m übersteigt, in Bremerhaven um den Faktor 2,6 bis 3,0 häufiger eintritt als heute. Der Anstieg des MThw an der Küste wird durch die Ästuarbauten stromaufwärts verstärkt, die Schließung der Sturmflutsperrwerke an den Nebenflüssen und die Verluste von Überschwemmungsflächen erhöhen die Wasserstände bei gleichen Randbedingungen zusätzlich. Es ist allerdings festzuhalten, dass es gegenwärtig zwar eine Tendenz zur Zunahme, aber noch keine statistisch abgesicherten Befunde im Bereich der Nordseeküste gibt. Allerdings nimmt die mittlere Wellenhöhe in der Nordsee stetig zu. GROSSMANN et al. (2007) erwarten erst ab Mitte dieses Jahrhunderts einen relevanten Sturmflut erhöhenden Klimaeffekt. Auf Basis der A2- und B2-Szenarien errechnen sie für 2030 eine Erhöhung der Sturmflutspitze z.B. in Hamburg-St. Pauli um 18 ± 5 cm und für 2080 um 63 cm (48 – 82). Es zeigt sich hier die weitere Beschleunigung des Meeresspiegelanstiegs und die ab Mitte des Jahrhunderts zu erwartende Erhöhung der Windgeschwindigkeiten.

Es sei angemerkt, dass für die Festlegung der herzustellenden Deichhöhen („Deichbestick“) ausgehend vom zukünftigen Bemessungswasserstand der bei Sturmfluten u.U. erhebliche Wellenauflauf errechnet und berücksichtigt wird, so dass die jeweiligen lokalen Besonderheiten (Vorlandeigenschaften, Exposition zur Windrichtung, Fetch/Wellenhöhe, Deich oder Spundwand etc.) zu unterschiedlichen Deichhöhen führen können. Bislang noch nahezu unberücksichtigt bleiben Unterschiede im geschützten Bestand, z.B. Stadt, Industrie, Grünland u.ä.. Eine Risikoabschätzung auf der Grundlage der Eintrittswahrscheinlichkeit eines Schadensereignisses und den potenziellen Schadenshöhen ist nicht Stand der Küstenschutztechnik in Deutschland. Ansätze sind u.a. von SCHUCHARDT & SCHIRMER 2005, 2007 publiziert worden.

Angesichts dieser sicher absehbaren, aber keineswegs quantifizierbaren zusätzlichen Erhöhung der Sturmfluten durch den Klimawandel kommt dem „Säkularanstieg“ bei der Bemessung der zukünftigen Deichhöhen eine weitaus bedeutendere Rolle zu als bisher.

5. Die Praxis

Die gegenwärtige Praxis des Küstenschutzes folgt dem Prinzip „Verteidigung der vorhandenen Linie“. Landgewinnung ist nicht mehr Bestandteil dieser Strategie, ebenso wenig wie Landaufgabe. Allerdings sind die Pflege, Erhaltung und ggfls. Neuentwicklung seegangsdämpfender Vorländer Bestandteile einer lokal und regional deutlich unterschiedlichen Umsetzung dieser Strategie.

Der Schutz von Inseln und Küsten ist nicht nur teuer, sondern auch aufwändig und insbesondere bei technischen Einrichtungen und in dicht besiedelten Bereichen kompliziert und langwierig. Insofern ist die bisher übliche Berücksichtigung des erkennbaren und aus Pegelaufzeichnungen berechenbaren Anstiegs des Meeresspiegels in Form des „Säkularanstiegs“ von 25 cm ein angemessener Versuch gewesen, mit dieser zusätzlichen Erhöhung restliche Unsicherheiten und Risiken abzudecken und die erwünschten Sicherheiten für einen längeren, theoretisch 100-jährigen Zeitraum zu gewährleisten. Angesichts des heutigen Kenntnisstandes über die Folgen des Klimawandels für den Schutz der Küsten ist ein Wert von 25 cm jedoch nicht mehr zeitgemäß. Diese Erkenntnis hat z.B. dazu geführt, dass nach einem längeren Diskussionsprozess für den Generalplan Küstenschutz Niedersachsen/Bremen eine Aufstockung des Säkularanstiegs um weitere 25 auf insgesamt 50 cm beschlossen wurde (NLWKN 2007a). Damit ist dem aktuellen, seit immerhin 50 Jahren anhaltenden Trend des Meeresspiegelanstiegs in Übereinstimmung mit den bisherigen Bemessungsmethoden Rechnung getragen. Angesichts der üblichen Überprüfungs- und Anpassungsrhythmen für den Küstenschutz von etwa 30 Jahren dürfte dieser Zuschlag zunächst bis zur Mitte dieses Jahrhunderts ausreichend Sicherheit bieten: wie Tabelle 1 zeigt, schätzt IPCC global für das worst-case-Szenario A1FI bis zu 30+x cm bis 2050 und für Südengland schätzt UKCIP bis zu 50 cm, während allerdings RAHMSTORF & RICHARDSON 2007 für alle Emissionsszenarien 50 cm und auch deutlich mehr für möglich halten.

Auf Grundlage des Generalplans Küstenschutz Niedersachsen/Bremen werden diese beiden Küstenländer ihre Deiche und alle Schutzeinrichtungen, die der Abwehr von Sturmfluten dienen, im Laufe der kommenden ca. 10 Jahre entsprechend erhöhen und verstärken. Das wird auf der weit überwiegenden Strecke (125 km in Niedersachsen, 55 km in Bremen und Bremerhaven) durch die Ertüchtigung der vorhandenen Infrastruktur im Wesentlichen auf der gegenwärtigen Linie geschehen, einschließlich der Anpassung einiger Sturmflutsperrwerke an den Nebenflüssen von Elbe und Weser. Der sich aus den Neubemessungen einschließlich neuer Berechnungen des Wellenauflaufes ergebende Erhebungsbedarf beträgt z.B. in der Stadt Bremen auf dem rechten Weserufer wegen der dort bei Sturmflut und Nordwestwind höher auflaufenden Wellen durchschnittlich 1 bis 1,3 Meter gegenüber den jetzigen Höhen von etwa +7 mNN, die aus den 1960er Jahren stammen. Der Mittelbedarf für das Land Bremen wird auf mindestens 135 Mio € geschätzt.

Hamburg ist gegenwärtig dabei, seinen Sturmflutschutzplan (102 km, durchschnittliche Erhöhung um 1 m auf 8 bis 8,5 m Kronenhöhe; Gesamtkosten rd. 600 Mio €) abzuschließen (FHH 2007). Doch bereits jetzt, deutlich vor Abschluss der Arbeiten, beginnen in Hamburg die Vorgespräche für die nächste Erhöhungsrunde, in der Klimawandel und Meeresspiegelanstieg mit Sicherheit eine bedeutende Rolle spielen werden.

Schleswig-Holstein besitzt an seiner Nordseeküste etwa 300 km Festlandsdeiche, die im Rahmen des gültigen Generalplans Küstenschutz von 2001 hergestellt bzw. ertüchtigt werden (S.-H. 2001). In der schleswig-holsteinischen Bemessungspraxis sind der Säkularanstieg und ein klimawandelbedingter Meeresspiegelanstieg mit insgesamt 50 cm berücksichtigt worden.

In Hamburg und Bremen/Niedersachsen ist ein zusätzliches Element der Nachhaltigkeit und Vorsorge in die Berechnungen eingeflossen: in beiden Planwerken ist festgelegt, dass bei der Berechnung von Gründungen, Fundamenten, technischen Gewerken u.ä. vor allem in den städtischen Bereichen von vornherein die Möglichkeit einer späteren, weiteren Erhöhung

des Bauwerks um ca. einen Meter einzuplanen ist. In Bremen spielt das z.B. aktuell eine Rolle bei der Planung der Verstärkung (Erhöhung und Verbreiterung) der grünen Deiche in Bremen-Farge, vor allem unter eingeeengten Verhältnissen, wie auch in den Bereichen der gerade entstehenden Überseestadt in den ehemaligen Hafenuartieren.

Für die Nord- und Ostfriesischen Inseln wird ebenfalls eine Strategie der Sicherung der Inselkörper in ihrer gegenwärtigen Form verfolgt. Maßnahmen dazu sind vor allem die Befestigung erosionsgefährdeter Inselküsten und die regelmäßige Wiederaufspülung verloren gegangenen Sandes.

6. Die Zukunft

Die Szenarien und Prognosen des IPCC zeigen, dass selbst bei einer Verstetigung der Emissionsraten von Klimagasen der Anstieg des Meeresspiegels fortschreiten wird, weil die betroffenen Systeme der Ozeane und Gletschermassen deutlich träger reagieren als die Atmosphäre und mindestens 100 Jahre zur Erreichung eines Gleichgewichtszustandes brauchen. Diese Aussicht und die neuen, höchst beunruhigenden Erkenntnisse über die Beschleunigung der Gletscherschmelze weltweit machen es dringend erforderlich, über Anpassungsstrategien und Möglichkeiten des Küstenschutzes nachzudenken, mit denen auf deutlich mehr als 1 Meter Meeresspiegelanstieg reagiert werden kann. Die damit verbundene überproportionale Erhöhung der Extremwasserstände und Sturmfluten kann sehr wohl dazu führen, dass die heutige Strategie der Verteidigung einer - der aktuellen - Schutzlinie nicht durchzuhalten ist. Gründe dafür können mangelnde Tragfähigkeit des Deichuntergrundes sein, fehlender Platz für Verbreiterungen, schlechte Kosten-/Nutzenrelation, negative morphodynamische Veränderungen wie Erosion der Deichvorländer u.v.m.. Den dazu bislang vorliegenden wenigen Studien für die Deutsche Nordseeküste ist gemeinsam, dass sie (noch) nicht von einer Aufgabe bisher geschützter Flächen ausgehen, sondern zunächst Versuche aufzeigen, mit denen die steigenden Risiken auf technisch-strategischer Ebene kompensiert werden können. Die folgenden Beispiele entstammen im Wesentlichen dem Forschungsvorhaben KRIM („Klimawandel und präventives Risiko- und Küstenschutzmanagement an der Deutschen Nordseeküste“), dessen Ergebnisse zusammengefasst von SCHUCHARDT & SCHIRMER 2007 publiziert wurden.

6.1 „Verteidigung“: Erhöhung und überproportionale Stabilisierung der Deiche

Die heutige Bemessung der Deichhöhen beinhaltet das Zulassen einer relativ geringen Überlaufmenge von 2 Liter/sec pro lfd. Meter beim Erreichen des Bemessungswasserstandes. Vor allem die Binnenböschung der Seedeiche muss dieser Belastung Stand halten (fast alle Deichbrüche bei der Katastrophenflut am 16./17. Februar 1962 sind durch Wellenüberlauf und Rückseitenerosion entstanden). Hier liegt eine erste Möglichkeit der Anpassung der vorhandenen Küstenschutz-Infrastruktur: wenn die weitere Erhöhung der Deichkrone nicht möglich oder gewollt ist („Stabilität statt Höhe“), steigt die bei Erreichen des Bemessungswasserstandes überlaufende Wassermenge und muss im Hinterland bewältigt werden. Voraussetzung für eine solche „kontrollierte“ Überströmung der Deichkrone ist jedoch die Herstellung einer entsprechend flachen und erosionsstabilen Böschung (der Deich muss „unkaputtbar“ stabil sein), was entsprechenden Raum- und Materialbedarf erzeugt. Die statistische Verringerung der Wiederkehrzeiten für ein solches Ereignis steigert zwangsläufig das Risiko

(bei gleich bleibendem oder steigendem Schadenspotenzial im Hinterland). Entsprechende technische Maßnahmen zur Kontrolle des eindringenden Wassers, u.U. Objektschutz im potenziellen Ausbreitungsbereich und evtl. eine zusätzliche Versicherung gegen Sturmflutschäden wären Bestandteile einer solchen Strategie.

6.2 „Anpassung“: Zweite und weitere Deichlinien

In Ergänzung zu einer erzwungenen oder kalkulierten Erhöhung der Überlaufwahrscheinlichkeit kann bzw. sollte der davon betroffene Bereich durch eine zweite oder dritte dahinter liegende Deichlinie gestaffelt abgesichert werden. Damit entwickelt sich der linienhafte Küstenschutz zu einem flächenbezogenen. Die Strategie gestaffelter Deichlinien wird z.B. in den Niederlanden aktiv verfolgt, dort insbesondere wegen der Bedrohung der tief liegenden Areale sowohl durch Rhein-Hochwässer als auch durch Sturmfluten. Auch Schleswig-Holstein besitzt auf großen Flächen eine solche Infrastruktur in Form alter Deichlinien („Schlafdeiche“), die erhalten blieben und heute als funktionstüchtige Bestandteile des Küstenschutzsystems eventuell eindringendes Wasser auffangen. In Niedersachsen sind Altdeiche selten, einer befindet sich im Land Wursten, müsste aber ebenfalls hergerichtet und aktiviert werden. Abbildung 3 zeigt eine Konzeptstudie für den Bereich Weserästuar (SCHIRMER et al. 2007). Die vorhandene Deichlinie ist in der Abbildung nicht hervorgehoben, sie verläuft im Wesentlichen entlang der erkennbaren Küsten- bzw. Uferlinie.

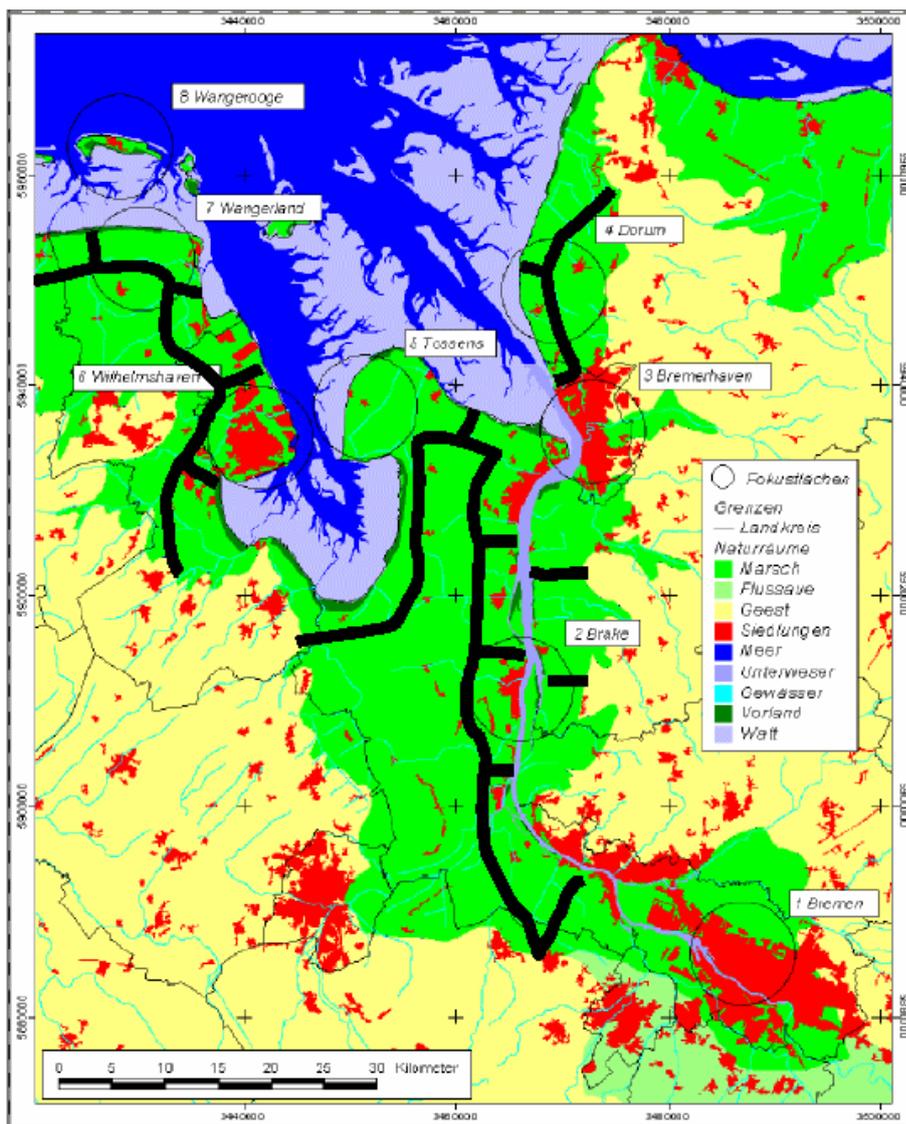


Abb. 3: Fokusflächen des FV KRIM und mögliche Anordnung zweiter Deichlinien in der Jade/Wesermarsch. Vorhandene, bleibende Hauptdeichlinie nicht dargestellt. Nach MAI et al. 2004

Wie MAI et al. 2004 an umfangreichen Fallbeispielen aus dem Bereich der Weser-Jadeküsten zeigen konnten, können durch 2. Deichlinien Überflutungsschäden im Hinterland u.U. erheblich gesenkt werden, insbesondere in dichter besiedelten Gebieten. Zu berücksichtigen ist dabei, dass die Errichtung neuer Zweiter Deichlinien, auch wenn sie nur 3-4 m Höhe haben müssen, in der mittlerweile sehr dicht besiedelten und mit Infrastruktur durchsetzten Landschaft erhebliche Kosten verursacht und es zudem in der Fläche hinter dem Hauptdeich durch Rückstau zu höheren Schäden kommt als ohne zweite Deichlinie.

Ein noch weiter differenziertes Konzept für einen raumbezogenen Küstenschutz legte KUNZ 2004 vor. Es beinhaltet gestaffelte Deichlinien, ggfls. „Objektschutz“ für Siedlungen und andere stationäre Infrastruktur und eine Anpassung der Landnutzung an gestaffelte Risiken.

Eine Variante zur Strategie der Zweiten Deichlinie ist die Anlage von Sturmflutentlastungspoldern im Bereich der inneren Ästuare, die sich bei Erreichen eines bestimmten Sturmflutwasserstandes durch Deichüberlauf füllen. Wie VON LIEBERMAN et al. (2005) zeigen,

könnte damit bei entsprechender Auslegung eine schwere Bemessungssturmflut in Bremen um bis zu 70 cm abgesenkt werden. Die wesentlichen Probleme bilden der Raumbedarf, die Kosten und die schnelle Entleerung der Polder im Falle einer Kettentide.

6.3 „Vordringen“: Mündungssperrwerke

Langfristig kann eine Situation eintreten, in der die Strategien der Verteidigung und der Anpassung auch im Bereich der Mündungen von Elbe und Weser aus Gründen physischer und/oder technischer Restriktionen oder aus Kosten-/Nutzenerwägungen nicht weiter verfolgt werden können. In diesem Falle kann die Küstenschutzvariante „Vordringen“ an Bedeutung gewinnen. Der Bau von Flussmündungssperrwerken entspricht einer „Vorwärtsverteidigung“, weil in großen Abschnitten der Küste deren Schutz weiterhin auf der vorhandenen Linie geschieht, jedoch durch eine Verkürzung der Deichlinie quer durch die Mündung z.B. der Weser die dahinter liegende Deichlinie entlastet und diese quasi zur zweiten Deichlinie wird. Im Forschungsvorhaben KRIM (SCHUCHARDT & SCHIRMER 2007) haben SCHIRMER et al. 2007, aufbauend auf die Ergebnisse von MAI et al. 2004, diese Variante näher betrachtet. Ähnlich den Mündungssperrwerken in der Ems, der Themse und im Rhein oder den vielen Sperrwerken im Bereich der Nebenflüsse von Unterelbe und –weser wäre eine Struktur zu schaffen, die bei normalen Wasserständen den Oberwasserabfluss und die Gezeiten nicht behindert, sondern erst bei Überschreitung festgelegter Wasserstände geschlossen wird und damit die dahinter liegenden Flussdeiche entlastet. Ein solches Bauwerk darf natürlich den Schiffsbetrieb außer im Schließungsfall nicht behindern und muss daher mit einer entsprechend großen Durchfahrtsöffnung oder Schleuse versehen sein (mind. Post-Panmax-fähig für die großen Containerschiffe). Ein derartiges Sperrwerk müsste die Stadt Bremerhaven in seinen Schutz einbeziehen und wäre somit quer durch die Außenweser zu planen. Ein solches Bauwerk würde gegenwärtig zwischen 2 und 4 Milliarden € kosten, zuzüglich der Kosten für die zusätzlich erforderlich werdende Erhöhung der Seedeiche im Jade-Weser-Dreieck, die infolge von Reflektion und Rückstau der Sturmfluten nochmals bis zu 1 Meter beträgt. Überdies liegt es nahe, die z.T. sehr schwierige Situation der Deiche am Jadebusen durch ein weiteres Sperrwerk in der Zufahrt bei Wilhelmshaven abzufangen.

Festzuhalten bleibt, dass diese Lösung zu einer Umverteilung von Risiken aus dem Bereich der geschützten Flussmündung in den offenen Küsten- und Inselbereich führt und andere Strategien der flexiblen Anpassung langfristig blockiert.

7. Chancen wahren, Zukunft sichern

Angesichts der hohen Komplexität der gesamtgesellschaftlichen Aufgabe „Küstenschutz“, der steigenden Kosten und Risiken, der Unsicherheit der Klimaentwicklung und der langen Realisierungszeiträume ist die Zeit zum Handeln gekommen. Die aktuellen Anpassungsmaßnahmen in den Küstenländern und der Generalplan Küstenschutz Niedersachsen/Bremen sind Schritte in die richtige Richtung. Sie scheinen geeignet, für einen überschaubaren Zeitraum die gewohnten Sicherheiten zu bewahren, jedoch fehlen ihnen noch die strategischen, langfristigen Komponenten. Die technischen Möglichkeiten, aber auch die Gesellschaft und die sozio-ökonomischen Bedingungen entwickeln sich weiter und müssen vorsorgend und generationenübergreifend genutzt und gesteuert werden. Die oben genannten Beispiele dürften deutlich machen, dass der eines u.U. nicht gar so fernen Tages notwendige Umstieg vom linien- zum raumbezogenen Küstenschutz neue Instrumente der Pla-

nung, komplexere Entscheidungsabläufe, längere Vorlaufzeiten und letztlich ein neues Bewusstsein von Küstenschutz und dem Umgang mit Risiko erzwingt. Dieses ist notwendig auch in einer Zeit der Unsicherheit über die Entwicklung der Klimafolgen und der sozio-ökonomischen Verhältnisse bei stetig wachsender Bedeutung der Seehäfen für die nationale Ökonomie. Aber noch immer orientieren sich Landesplanung, Raumordnung und Raumnutzung ausschließlich am linienhaften Küstenschutz und berücksichtigen viel zu wenig die langen Vorlaufzeiten, die jeglicher Strategiewandel zwingend erfordert.

Klimawandel und beschleunigter Anstieg des Meeresspiegels erfordern ab heute eine kontinuierliche gesellschaftliche Auseinandersetzung mit dieser Problematik und die Sicherung zukünftiger Anpassungsoptionen. Die Komplexität der Aufgabe und des Raums, seine sozio-ökonomische und naturschutzfachliche Bedeutung und die stetig voranschreitende Entwicklung erfordern dringend die Etablierung tragender Strukturen des Integrierten Küstenzonenmanagements (IKZM), wie sie z.B. in den von der Bundesregierung veröffentlichten Leitlinien empfohlen wird (BMU 2006). Die Bundesregierung unterstützt darüber hinaus mit der Bildung des „Kompetenzzentrums Klimafolgen und Anpassung“ (KomPass) (UBA 2008) die Entwicklung regionaler Anpassungsstrategien u.a. methodisch und durch die Bereitstellung spezifischer Klimadaten und –prognosen. Spätestens in der nächsten Generation wird der Klimawandel die Bedeutung des Küstenschutzes als gesamtgesellschaftliche Aufgabe deutlich in den Vordergrund rücken. Deshalb und auch wegen der nicht auszuschließenden Möglichkeit eines deutlich schnelleren Meeresspiegelanstiegs ist es geboten, diese Problematik und auch die unvermeidlichen Restrisiken aktiv öffentlich zu kommunizieren.

Literatur

- BMU (2006): Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit: Integriertes Küstenzonenmanagement für Deutschland.- (<http://www.ikzm-strategie.de/>)(03/2008)
- BSH (2008): Gezeitenkalender.- Ausgaben 1977 bis 2008; Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie, Hamburg
- FHH (2007): Hochwasserschutz in Hamburg, Bauprogramm 2007.- Hrsg. Freie und Hansestadt Hamburg (<http://fhh.hamburg.de/stadt/Aktuell/behoerden/stadtentwicklung-umwelt/bauen-wohnen/hochwasserschutz/zz-stammdaten/download/hochwasserschutz-in-hh-broschure-pdf,property=source.pdf>) (03/2008)
- GRABEMANN, H.-J., GRABEMANN, I. & A. MÜLLER (2005): Die Auswirkungen eines Klimawandels auf Hydrographie und Gewässergüte in der Unterweser.- in: SCHUCHARDT & SCHIRMER (2005):59-77
- GROSSMANN, I., K. WOTH & H. von STORCH (2007): Localization of global climate change: Storm surge scenarios for Hamburg in 2030 and 2085.- Die Küste 71:169-182
- IPCC (2007): Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Solomon, S., D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M. Tignor and H.L. Miller (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 996 pp. (<http://www.ipcc.ch/ipccreports/ar4-wg1.htm>)(03/2008)
- IPCC-AR4-SYR (2007): Intergovernmental Panel on Climate Change. Fourth Assessment Report Climate Change 2007: Synthesis Report Summary for Policymakers

- (www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar4/syr/ar4_syr_spm.pdf)(zuletzt aufgerufen 03/2008)
- JENSEN, J. & C. MUDERSBACH (2007): Zeitliche Änderungen in den Wasserstandszeitreihen an den Deutschen Küsten.- Ber. z. dt. Landeskunde Bd. 81 H. 2 S. 99-112
- JENSEN, J. & C. MUDERSBACH (2004): Zeitliche Änderungen in den Wasserstandszeitreihen an den Deutschen Küsten.- in: GÖNNERT, G., H. GRAßL, D. KELLETAT, H. KUNZ, B. PROBST, H. von STORCH & J. SÜNDERMANN: Klimaänderung und Küstenschutz.- Tagungsband der Tagung „Klimaänderung und Küstenschutz“, 29./30.11.2004, Hamburg:115-128
- KUNZ, H. (2004): Sicherheitsphilosophie für den Küstenschutz.- Jb. HTG 54:253-287
- MAI, S., ELSNER, A., MEYER, V. & C. ZIMMERMANN (2004): Klimaänderung und Küstenschutz.- Abschlussbericht des Teilprojekts II im Forschungsvorhaben KRIM (<http://www.krim.uni-bremen.de/>)(03/2008)
- NLWKN (2007): Generalplan Küstenschutz Niedersachsen/Bremen – Festland.- Niedersächsischer Landesbetrieb für Wasserwirtschaft, Küsten- und Naturschutz (Hrsg.), Norden; 41 S. + Anl.
(http://www.umwelt.bremen.de/buisy05/sixcms/media.php/13/C36180448_L20.pdf)(03/2008)
- NLWKN (2007a): Niedersachsens Küstendeiche werden ab sofort höher gebaut als bisher.- (http://www.nlwkn.niedersachsen.de/master/C22398955_N22398616_L20_D0_I5231158.html)(03/2008)
- RAHMSTORF, S. & K. RICHARDSON (2007): Wie bedroht sind die Ozeane? S. Fischer Verlag, Frankfurt; 224 S.
- SCHIRMER, M. et al. (2007): Reaktionsvarianten des Küstenschutzes zur Anpassung an den Klimawandel.- in: SCHUCHARDT & SCHIRMER (2007): 167-192
- SCHUCHARDT, B. & M. SCHIRMER (Hrsg.) (2005): Klimawandel und Küste: Die Zukunft der Unterweserregion.- Springer Berlin; 341 S.
- SCHUCHARDT, B. & M. SCHIRMER (Hrsg.) (2007): Land unter? Klimawandel, Küstenschutz und Risikomanagement in Nordwestdeutschland: die Perspektive 2050.- oekom verlag; 243 S.
- S.-H. (2001): Ministerium für Landwirtschaft, Umwelt und ländliche Räume Schleswig-Holstein: Generalplan Küstenschutz: integriertes Küstenschutzmanagement in Schleswig-Holstein.- http://www.schleswig-holstein.de/MLUR/DE/WasserMeerKueste/03__HochwasserKuestenschutzHaefen/02__Kuestenschutz/01__Generalplan/Kuestenschutz__Generalplan.html__nnn=true (03/2008)
- SRES (2008): <http://www.ipcc.ch/ipccreports/sres/emission/index.htm> (03/2008)
- UBA (2008): Kompetenzzentrum Klimafolgen und Anpassung KomPass
(http://www.anpassung.net/cln_047/DE/Home/homepage__node.html?__nnn=true)(03/2008)
- UKCIP(2008):
http://www.ukcip.org.uk/scenarios/ukcip02_extras/images/UKCIP02Extras_SLC_map_final.gif (03/2008)
- VON LIEBERMAN, N., GRABEMANN, I., MÜLLER, A. & S. OSTERKAMP (2005): Vergleichende Abschätzung von Effektivität und Nebenwirkungen verschiedener Reaktions-

varianten des Küstenschutzes an der Unterweser gegenüber einer Klimaänderung.-
in: SCHUCHARDT & SCHIRMER (2005): 243-254
WBGU (2006): Die Zukunft der Meere – zu hoch, zu warm, zu sauer.- Wissenschaftlicher
Beirat der Bundesregierung Globale Umweltveränderungen; Sondergutachten 2006;
Berlin; 114 S. (http://www.wbgu.de/wbgu_sn2006.html)(03/2008)

Wasserstraßen - Handlungsoptionen für Wirtschaft und Binnenschifffahrt

Hans Moser, Peter Krahe, Thomas Maurer, Enno Nilson, Benno Rothstein und Anja Scholten

Zusammenfassung

Es mehren sich die Anzeichen, die auf eine langfristige Klimaänderung hindeuten. Die Auswirkungen eines Klimawandels sind vielschichtig und betreffen auch unterschiedliche Bereiche der Binnenschifffahrt einschließlich der Lagerwirtschaft sowie jene Industrien, die auf einen kostengünstigen Transport von Massengütern angewiesen sind. Es ergibt sich damit eine Wirkungskette, die durch veränderte klimatische Bedingungen beziehungsweise die Zunahme von Extremwetterlagen/-perioden in Gang gesetzt wird. Diese könnten über veränderte Fahrwasserverhältnisse für die Binnenschifffahrt die Kostengunst und Zuverlässigkeit der wasserstraßengebundenen Transporte beeinträchtigen und sich damit negativ auf die Wettbewerbsfähigkeit insbesondere von massengutaffinen Branchen auswirken. Es gilt deshalb rechtzeitig über Maßnahmen nachzudenken, die die Schiffbarkeit der Wasserstraßen auch unter geänderten Klimabedingungen erlauben. Der wichtigste Faktor, der die Nutzung des Verkehrsträgers Wasserstraße beeinflusst, ist das Wasserdargebot, da von seiner Höhe und saisonalen Verteilung die von der Schifffahrt nutzbare Wassertiefe abhängt. Insofern ist der Abfluss die zentrale Größe, dessen Entwicklung und Variation es zu prognostizieren bzw. dessen langfristige Entwicklung es in Form von Szenarien für verkehrswasserwirtschaftliche Fragestellungen bereitzustellen gilt. Dies geschieht im Projekt "KLIWAS – Auswirkungen des Klimawandels auf die Wasserstraßen und Handlungsoptionen für Wirtschaft und Binnenschifffahrt". Neben Abflussszenarien für den Rhein als wichtigster Bundeswasserstraße werden Systemanalysen im Hinblick auf die Anfälligkeit aber auch auf die Anpassungskapazitäten der Binnenschifffahrt einschließlich der Transportsysteme und der verladenden Wirtschaft durchgeführt. Grundlegende methodische Fragen und Lösungsansätze werden diskutiert.

1. Einführung

Gemäß der aktuellen Prognose des Bundesverkehrswegeplans 2003 (MANN et al. 2001) wird als Folge der wirtschaftlichen und gesellschaftlichen Entwicklung Deutschlands und Europas, der Osterweiterung der EU sowie der Globalisierung der Märkte die Nachfrage nach Verkehrsleistungen bis zum Jahr 2015 von 1997 bis 2015 im Güterverkehr insgesamt um 64% auf rd. 600 Mrd. tkm und in der Binnenschifffahrt um 43% auf rd. 90 Mrd. tkm steigen. Beim Transportaufkommen der Binnenschifffahrt wird eine Steigerung um 27% auf rd. 300 Mio. t erwartet. Der Verkehrsträger Binnenschiff ist damit ein unverzichtbarer Bestandteil des deutschen und des europäischen Verkehrssystems.

Das System Binnenschifffahrt setzt sich aus verschiedenen Kompartimenten zusammen. Die wichtigsten sind die Wasserstraße mit ihren verkehrstechnischen Anlagen, das Binnenschiff, die Häfen mit Lager- und Anschlussinfrastruktur zu anderen Verkehrsträgern sowie den Wirtschaftsunternehmen, die auf den günstigen Verkehrsträger Binnenschiff als Massenguttransporter angewiesen sind. Darüber hinaus werden die großen Flüsse Deutschlands in

ihrer Funktion als Wasserstraße noch für den Tourismus in Form der Fahrgastschifffahrt, für den Fährbetrieb sowie von der breiten Öffentlichkeit für Freizeitaktivitäten (Sportschifffahrt) genutzt. Es besteht eine gegenseitige Abhängigkeit der Komponenten voneinander, so dass ein komplexes Wirkungsgefüge das System kennzeichnet.

Die Bundeswasserstraßen, d.h. die frei fließenden und stauregulierten Flussabschnitte und Kanäle unterliegen darüber hinaus vielen, teilweise konkurrierenden Nutzungen, von denen die Nutzung für die Schifffahrt nur eine darstellt. Die Erfüllung dieser Funktion setzt verlässliche Bedingungen voraus, die einen sicheren, leichten und gleichzeitig wirtschaftlichen Betrieb gewährleisten. Aus Sicht der Wasserstraße sind u.a. möglichst lagestabile Fahrrinnen von ausreichender Tiefe und Breite sowie moderate Fließgeschwindigkeiten erforderlich. Diese Randbedingungen unterliegen neben einer Beeinflussung durch wasserwirtschaftliche Maßnahmen, einer natürlichen Variabilität. Diese konnte zu einem großen Anteil auf die langperiodischen Schwankungen hydrometeorologischer Größen zurückgeführt werden (BELZ et al. 2007).

Das Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) schließt in seinem 4. Sachstandsbericht (IPCC 2007) nun nicht mehr aus, dass der in Folge der Emission der sogenannten Treibhausgase angeregte globale Klimawandel bereits jetzt in den Klimamessreihen insbesondere in einem Anstieg der globalen Luft- und Meerestemperaturen zu sehen ist, und dass der Klimawandel in den kommenden hundert Jahren zu einer weiteren deutlichen Zunahme der bodennahen Lufttemperatur und zu Veränderungen wichtiger Größen des Wasserhaushaltes führen wird (IPCC 2007).

Die bisher durchgeführten Studien deuten darauf hin, dass auch auf regionaler Ebene eine Intensivierung des Wasserkreislaufes stattfinden könnte. Neben einer Veränderung des mittleren Wasserdargebotes ist auch eine Zunahme der Hoch- und Niedrigwasserereignisse zu erwarten. Weiterhin ist mit einem Anstieg der Gewässertemperatur zu rechnen und in Folge einer geänderten Wasserführung der Flüsse erscheinen auch Änderungen des Feststofftransportes möglich.

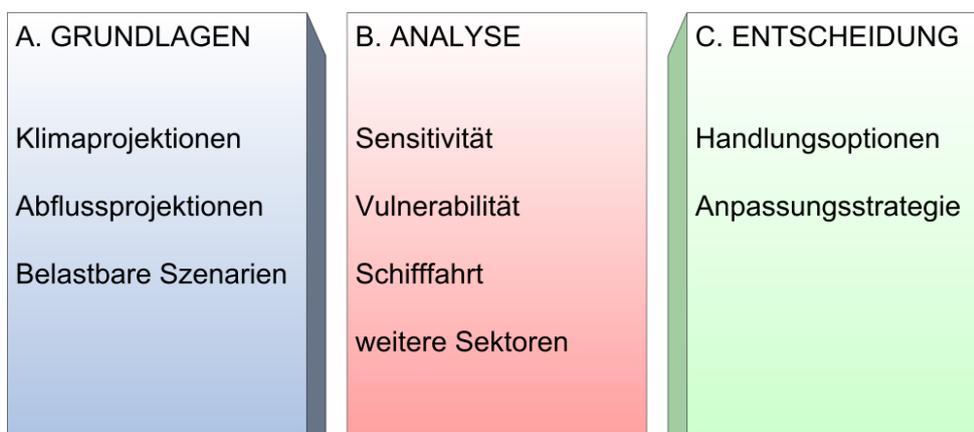


Abb. 1: Schema der "Drei Säulen der Entscheidungsfindung" zu einer Anpassungsstrategie.

Zur Beantwortung der Frage, welche Folgen die angenommene zukünftige Klimaentwicklung für die Binnenschifffahrt und aus Sicht der Wasserstraßenverwaltung insbesondere auf Betrieb, Unterhaltung, Ausbau und Nutzung der Binnenwasserstraßen haben könnte, sind die

wichtigsten Glieder der Wirkungskette zu analysieren. Dabei müssen zunächst die zukünftig zu erwartenden Veränderungen der Randbedingungen, die die Verkehrswasserwirtschaft beeinflussen, projiziert (Abbildung 1, A. Grundlagen) und in problembezogene Szenarien überführt werden. Ferner ist die Sensitivität und die Anfälligkeit z.B. anhand von Schadenspotentialen seitens der Nutzer zu bestimmen (Abbildung 1, B. Analyse). Schließlich sind Handlungsoptionen zur Minimierung möglicher negativer Auswirkungen aufzuzeigen und im Rahmen von Kosten-Nutzen-Analysen zu bewerten (Abbildung 1, C. Entscheidung). Auf dieser Basis sind kohärente Anpassungsstrategien im Einvernehmen aller Beteiligten zu entwickeln und umzusetzen.



Abb. 2: Übersicht von Arbeitspaketen und Nachbarprojekten des Projektes "KLIWAS – Auswirkungen des Klimawandels auf die Wasserstraßen und Handlungsoptionen für Wirtschaft und Binnenschifffahrt".

Bezogen auf die See- und Binnenschifffahrt wird derzeit ein umfassendes Forschungsprogramm entworfen (BUNDESMINISTERIUM FÜR VERKEHR, BAU UND STADTENTWICKLUNG 2007), das diese Entscheidungsgrundlagen in einem konsistenten flussgebietsübergreifenden Ansatz liefern soll. Zwei Pilotprojekte aus diesem Programm sind bereits angelaufen. Das Projekt "ARGO - Array for Real-time Geostrophic Oceanography" befasst sich mit

den Veränderungen des Meeres und ihren Auswirkungen auf die Seeschifffahrt. Vor dem Hintergrund der jüngsten Erfahrungen der nachteiligen Auswirkungen längerer Phasen mit Niedrigwasserständen auf die Binnenschifffahrt, wurde das Projekt "KLIWAS – Auswirkungen des Klimawandels auf die Wasserstraßen und Handlungsoptionen für Wirtschaft und Binnenschifffahrt" initiiert (Abbildung 2). Das Projekt gliedert sich in die laufenden Projekte und Prozesse zur Erarbeitung nationaler und europäischer Anpassungsstrategien ein (KOMMISSION DER EUROPÄISCHEN GEMEINSCHAFTEN 2007).

Das Projekt KLIWAS ist so strukturiert, dass es wesentliche Komponenten des Wirkungsgefüges Binnenschifffahrt in seinen Arbeitspaketen aufgreift und entsprechend den Anforderungen, die Wechselbeziehungen, die zwischen den Komponenten bestehen, berücksichtigt. Einige der grundlegenden methodischen Fragen und Lösungsansätze bezüglich der zu erarbeitenden Klima- und Abflussszenarien, zur Analyse der Betroffenheit und des Anpassungspotentials der Binnenschifffahrt sowie der vom Transport massengutaffiner Güter abhängigen Wirtschaft werden im Folgenden erläutert.

2. Methodische Grundlagen

Um Aussagen über die vom globalen Klimawandel induzierten möglichen Veränderungen der für die Binnenwasserstraßen entscheidenden quantitativen Größe Abfluss machen zu können, müssen flussgebietsweit einheitliche Abflussszenarien erstellt werden. Dazu fließen die Modellergebnisse der globalen und regionalen Klimaprojektionen in Wasserhaushalts- bzw. komplexe Flussgebietsmodelle ein (Abbildung 3). Deren Ergebnisse bilden die Grundlage für morphodynamische Modelle des Geschiebe-, Sediment- und Schwebstoffhaushalts. Zur Berücksichtigung des Einflusses von Klimaänderungen auf die aquatische und terrestrische (hier: Flussaue) Umwelt sind Wasserqualitätsmodelle sowie ökologische Modelle der Vegetation und Fauna mit einzubeziehen. In Einzugsgebieten, in denen bereits heute ein hoher Wasserbedarf einem relativ geringem natürlichen Wasserdargebot gegenübersteht, wie beispielsweise im Elbegebiet, müssen die Einflussmöglichkeiten der Wasserbewirtschaftung in der in Abbildung 3 dargestellten Modellkette berücksichtigt sein.

Die Auswirkungen auf die Kosten bzw. die Anpassungskapazitäten der Binnenschifffahrt werden bezogen auf die Struktur der eingesetzten Schiffsflotte und bei Vorgabe von Änderungen der Wasserführung unter Verwendung von sogenannten Kostenstrukturmodellen beleuchtet. Neben den Fahrwasserverhältnissen werden hierbei auch Faktoren wie Treibstoffpreise und Personalkosten berücksichtigt. Die sich hieran anschließenden betriebswirtschaftlichen Betrachtungen der verladenden Wirtschaft und der von der Binnenschifffahrt profitierenden Wirtschaft sowie die gesamtwirtschaftlichen Betrachtungen der zum Unterhalt und zur Pflege der Wasserstraßen notwendigen Maßnahmen sowie alternativer Verkehrsträger vervollständigen die Modellkette.

Auf jeder Ebene der Modellkette kommen verschiedenste Modellansätze und Daten unterschiedlicher räumlicher und zeitlicher Bezugsräume zum Einsatz. Im Hinblick auf die absoluten Zahlenwerte dieser Projektionen und Szenarien, deren zeitliche und räumliche Differenzierung sowie deren Eintretenswahrscheinlichkeiten resultieren hieraus hohe Ungenauigkeiten und/oder Unsicherheiten, die sich mit zunehmender Komplexität der Modellkette fort-

pflanzen und ggf. akkumulieren (Abbildung 4). Bezieht man noch den Zeitaspekt, d.h. die in der Regel angestrebten langfristigen Zeitspannen des Prognosehorizontes, in die Überlegungen mit ein, so ist zu erkennen, dass einfache quantitative Prognosemethoden, d.h. die Verfolgung nur eines Entwicklungspfades innerhalb der Modellkette (Abbildung 4) und die Nichtbeachtung von Modellunsicherheiten, versagen. Hier hilft die Szenariotechnik weiter (STRÄTER, 1988), bei der realistische Entwicklungsmöglichkeiten bzw. -korridore in vergleichsweise ferner Zukunft und bei relativ großer Unsicherheit in Abhängigkeit von bestimmten Rahmenbedingungen aufgezeigt werden.

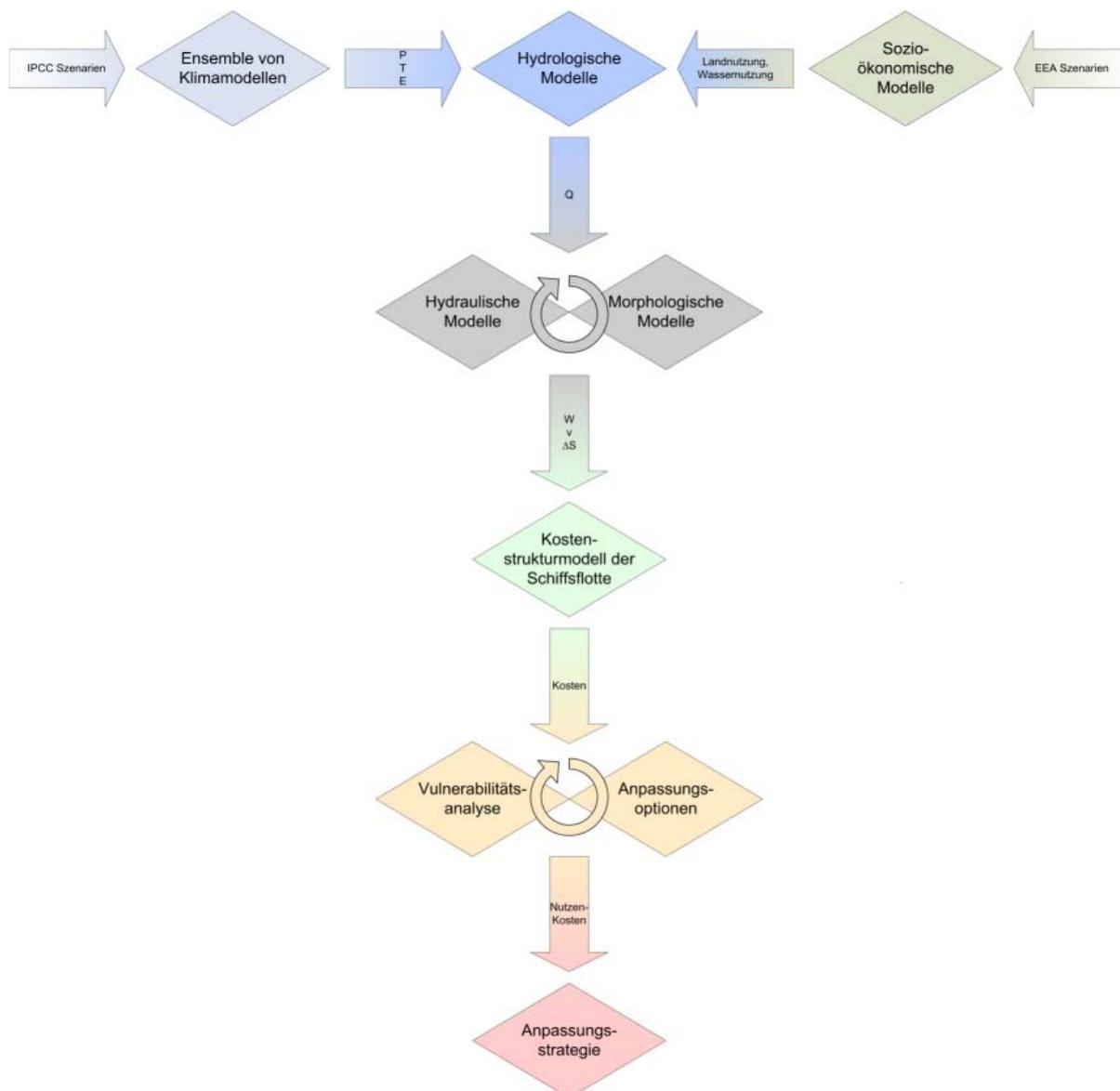


Abb. 3: Schema einer Modellkette zur verkehrswasserwirtschaftlichen Klimafolgenforschung.

Bezogen auf das System Binnenschifffahrt gilt es, eine problembezogene Spannweite möglicher Entwicklungen aufzuzeigen, um basierend auf diesen eine umfassende Systemanalyse durchführen zu können. Aus praktischen Gründen ist man hierbei darauf angewiesen eine begrenzte Anzahl von Entwicklungspfaden und Zukunftsbildern herauszugreifen.

Gegenwärtig werden die generelle Vorgehensweise und die Kriterien zur Auswahl der Szenarien erstellt. Gemäß den Grundsätzen der Szenariotechnik, ist ein Szenario-Trichter zu erstellen, der neben dem sogenannten Trendszenario, das auf einer Zeitachse aufgespannt wird und das die zukünftige Entwicklung unter der Annahme stabiler Randbedingungen darstellt, mindestens eine positive (niedrige Systembelastung) und eine negative Entwicklungsmöglichkeit (hohe Systembelastung) berücksichtigt. Um effektiv mit den Szenarien arbeiten zu können, ist es andererseits sinnvoll, die Anzahl auf vier bis acht Szenarien zu begrenzen (vgl. STRÄTER 1988).

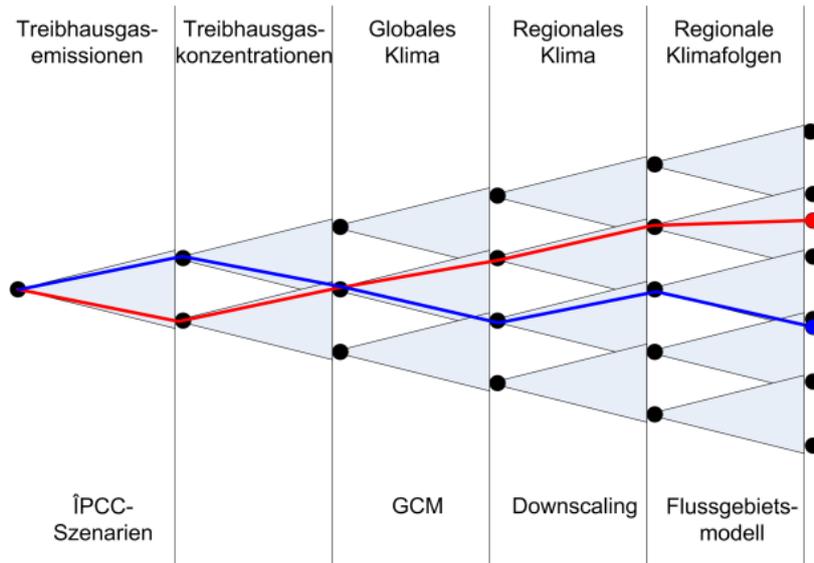


Abb. 4: Schema von Unsicherheiten und Entscheidungspfaden in einer Modellkette (nach VINER (2002) verändert und ergänzt).

Zur Erstellung verkehrswasserwirtschaftlich relevanter Szenarien ist die aufgezeigte Modellkette (Abbildung 3) in geeigneter Weise zu durchlaufen und die Modellunsicherheiten sind entsprechend zu berücksichtigen.

In der Diskussion um die Folgen und die Anpassung an den Klimawandel werden die Begriffe „Projektion“ und „Szenario“ oft vertauscht. Sie sind beim IPCC klar definiert (IPCC DDC 2007). Demnach ist eine Projektion eine [...] durch Klimamodelle abgeleitete Abschätzung des zukünftigen Klimas. Es handelt sich also zunächst einmal um die Ergebnisse der Klimamodelle bzw. im erweiterten Sinne auch um die Ergebnisse der Folgemodelle innerhalb einer Modellkette. Ein Szenario umfasst dagegen mehr. Es ist eine kohärente, intern konsistente und plausible Beschreibung eines zukünftigen Zustandes eines Systems. Die Entscheidung für ein Szenario muss bewusst und wissenschaftlich bzw. fachlich begründet erfolgen. Projektionen fließen dabei auf der Basis einer umfassenden Bewertung in die Szenariodefinition ein.

An welcher Stelle innerhalb der Modellkette diese Bewertung und Auswahl zu erfolgen hat, wird durch eine Vielzahl verschiedenster Rahmenbedingungen bestimmt. Im Sinne der Szenariotechnik sind dies einerseits die Güte bzw. Verlässlichkeit des betrachteten Modells und andererseits der Rang der Modellergebnisse im Szenariokorridor. Es bietet sich die Möglichkeit an, den Szenariohorizont beim Übergang von einem Modell zum nächsten dadurch einzuschränken, dass man z.B. eine Projektion als nicht verlässlich einstuft und damit für die

weiteren Betrachtungen ausschließt. Auch erlaubt die Auswertung und Interpretation der Ergebnisse verschiedener Modelle im Sinne der Ensembletechnik Modellunsicherheiten in die Betrachtungen mit einzubeziehen und den Szenariotrichter, z.B. durch Bildung eines Ensemblemittels, nicht unnötig aufzuweiten. Diese Vorgehensweise gilt für alle Modelle der Modellkette. Es ändern sich aber die Kriterien, die die Prognosefähigkeit eines bestimmten Modelltyps bestimmen.

Neben den Emissionsszenarien der Treibhausgase ist der Szenariokorridor um weitere Annahmen zu den das System beeinflussenden Faktoren zu erweitern. Diese sind zum einen die Maßnahmen und Prozesse, die den Wasserhaushalt und damit das Wasserdargebot beeinflussen. Hierzu zählen beispielsweise denkbare Änderungen in der Landnutzung in Folge geänderter politischer Rahmenbedingungen (EU-Agrarpolitik), oder sonstige sozio-ökonomische Entwicklungen (z.B. Bevölkerungswachstum), die den Wasserbedarf und -verbrauch bzw. insgesamt das wasserwirtschaftliche Handeln (z.B. Hochwasserschutz) beeinflussen.

Neben diesen Entwicklungen sind auch die Eintretenswahrscheinlichkeiten bestimmter Rahmenbedingungen seitens der vom System Binnenschifffahrt betroffenen Akteure und Nutzer weitgehend unbekannt. Daher müssen hier ebenfalls Annahmen in Form von Szenarien getroffen werden.

Als weitere Gruppe werden auch die zu untersuchenden Anpassungsoptionen formal als Szenario behandelt. Die Entscheidung über die tatsächliche Auswahl von Anpassungsoptionen wird im Hinblick auf endliche verfügbare Ressourcen (d.h. i.d.R. Steuermittel, die konkurrierenden Nutzungsansprüchen unterliegen) üblicherweise auf Basis eines Abwägungsprozesses, z.B. im Sinne einer Kosten-Nutzen Betrachtung, erfolgen. Dazu ist für verschiedene Szenarien von gewählten Anpassungsoptionen das Schadensrisiko zu ermitteln, d.h. das Produkt der Schadenspotenziale und ihrer Eintretenswahrscheinlichkeit integriert über alle möglichen kritischen Zustände. Das jeweilige Schadensrisiko ist dann den Kosten für die jeweils gewählten Anpassungsmaßnahmen gegenüberzustellen und deren Summe in geeigneter Weise zu minimieren.

Der Katalog der durchzurechnenden Szenarien und eine Matrix, die den Zusammenhang zwischen den verschiedenen Elementen des Szenariokorridors aufzeigt, werden derzeit erstellt. Einige ausgewählte Gesichtspunkte, die dabei zu berücksichtigen sind, werden im Folgenden erläutert.

3. Binnenschifffahrtsbezogene Klimaszenarien

3.1 Globale und regionale Klimamodellierung

Die Prognose der wahrscheinlich durch menschliche Aktivitäten hervorgerufenen globalen Klimaerwärmung (IPCC 2007) basiert auf einer Hierarchie von Klimamodellen, angefangen von einfachen Energiebilanz-Modellen bis hin zu dreidimensionalen gekoppelten Atmosphäre-Ozean-Modellen (AOGCM's), mit denen sich auch die geographischen Verteilungen der Klimaänderungen darstellen lassen. Aufgrund dieser unterschiedlichen Modellansätze und der Vorgabe von insgesamt sieben sehr unterschiedlichen Emissionsszenarien für das 21. Jahrhundert sagte der dritte IPCC-Bericht von 2001 (IPCC 2001) eine mittlere globale Erwärmung zwischen 1.4 und 5.8°C bis zum Jahr 2100 voraus. Den vierten Sachstandsbericht

(IPCC 2007) zeichnet ein beispielloser Fortschritt in der Modellierung aus. Dies gilt für die Modelle selbst, für die Zahl der beteiligten Institutionen (weltweit 15 inklusive des Max-Planck-Instituts für Meteorologie in Hamburg) sowie insbesondere auch für den Umfang der durchgeführten und ausgewerteten Modellrechnungen. Die im Rahmen des IPCC-Prozesses entwickelten Zukunftsszenarien für den Zeitraum 2001 bis 2100 basieren auf unterschiedlichen Annahmen über den demographischen, gesellschaftlichen, wirtschaftlichen und technologischen Wandel. Dem 4. Sachstandsbericht des IPCC wurden die drei aktualisierten Emissionsszenarien A2, A1B und B1 zugrunde gelegt (Abbildung 5).

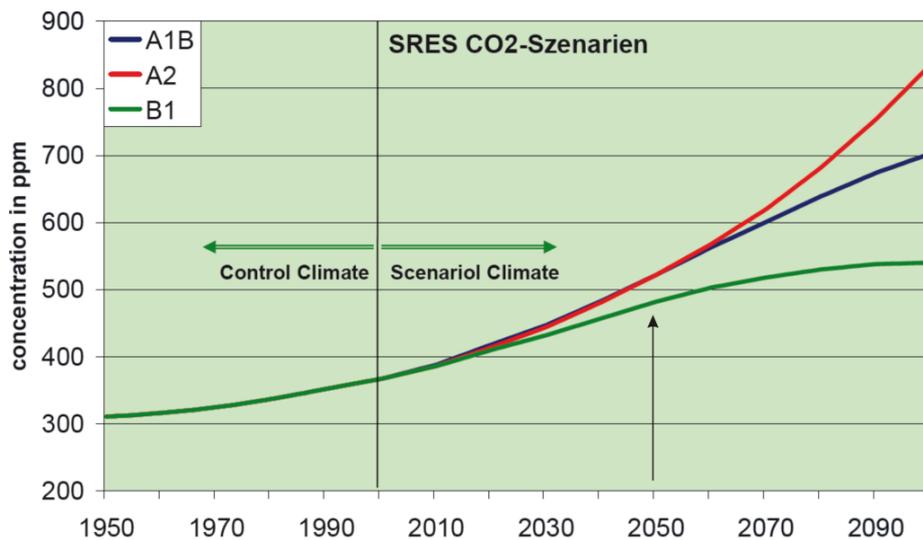


Abb. 5: Vergleich von drei gängigen Emissionsszenarien des 4. IPCC-Sachstandsberichtes (IPCC 2007).

Die räumliche Auflösung der aktuellen globalen Modelle reicht mit ca. 200 km x 200 km für die Ermittlung regionaler Aussagen zu den Folgen des Klimawandels jedoch nicht aus. Hierzu ist eine Regionalisierung der globalen Projektionen mit Hilfe von Regionalisierungsverfahren erforderlich. Derzeit können je nach gewähltem Ansatz regionale Projektionen für Rasterelemente von bis zu 10 km x 10 km oder auch standortbezogen (z. B. auf die Standorte der Klimastationen) umgerechnet werden (sog. „Downscaling“ auf die regionale Skala). Derzeit gibt es jedoch noch kein optimales Verfahren, weder aus der Kategorie der dynamischen Klimamodelle noch bei den statistischen Modellen. Dies belegen die abgeschlossenen EU-Projekte STARDEX (STARDEX PARTNER 2005) und PRUDENCE (CHRISTENSEN et al. 2007). Jede Modellkategorie und jedes Modell hat seine spezifischen Fehler und weist individuelle Stärken und Schwächen bezogen auf die zu modellierende meteorologische Größe und deren statistische Kennwerte auf (FOWLER et al. 2007). Es kann kein Klimamodell alleine gegenüber allen anderen Modellen als überlegen dargestellt werden. Die Mittelung der Modellergebnisse ("Multi-Modell-Mittel") bildet Beobachtungsdaten besser ab als jedes einzelne Modell und sollte deshalb auch zur Ermittlung des Klimaänderungssignals verwendet werden.

3.2 Vorgehensweise zur Ermittlung hydrometeorologischer Belastungsszenarien

Unabhängig von der Wahl eines bestimmten Regionalisierungsverfahrens sind zur Festlegung der zu definierenden Klimaszenarien einige generelle Gesichtspunkte zu beachten.

Tab. 1: Katalog statistischer Kennzahlen zur Analyse hydrometeorologischer Größen. Die Auswertungen erfolgen für Wasserhaushaltsjahre (ab April), hydrologische Winterhalbjahre (Nov-Apr) und Sommerhalbjahre (Mai-Okt), meteorologische Jahreszeiten (DJF, MAM, JJA, SON) und einzelne Monate (Jahresgang) bezogen auf abgestimmte Modellgitter und Flussgebiete.

Variable [Einheit]	Kriterium
Gebiets-Niederschlagshöhe [mm]	95%-Quantile, Standardabweichungen und Mittelwerte der Niederschlagshöhen
Gebiets-Niederschlagsintensität [mm/Niederschlagstag]	Monatliche Niederschlagssumme/Anzahl der Tage mit Niederschlag (>1 mm)
Niederschlagstage [Anz. Tage]	Vieljährige mittlere Anzahl der Niederschlagstage (1 mm)
Trockentage [Anz. Tage]	Vieljährige mittlere Anzahl der Trockentage (Niederschlag < 1 mm)
Trockenperioden [Dauer Tage]	Vieljährige max. Periode von ununterbrochen aufeinanderfolgenden Trockentagen
Starkniederschlagstage [Anz. Tage]	Vieljährige mittlere Anzahl extrem niederschlagsreicher Tage (Niederschlag > 10 mm)
Mehrtagesummen des Niederschlags [mm]	Vieljähriges Mittel der größten Mehrtagesummen des Niederschlags (1, 2, 3, 5, 10, 15 und 30 Tage) der Jahreszeiten. Häufigkeitsverteilungen der Mehrtagesummen (gleitende Mittel über 1, 2, 3, 5, 10, 15 und 30 Tage) der Niederschläge der meteorologischen Jahreszeiten (Klassengrenzen: 0,1, 1, 2, 3, 5, 7,10, 15, 20, 30, 50, 70,100,150, 500, 700 und 1000 mm).
Niederschlagsmuster	Vieljähriger mittlerer Niederschlagsverteilung Größter Niederschlag je Zelle (Vieljährig)
Niederschlagsanomalie	Akkumulierte Niederschlagsanomalie
Gebietstemperaturen [°C]	5%, 95%-Quantile, Standardabweichungen und Mittelwerte der Lufttemperatur
Temperaturmuster	Vieljährige mittlere Temperaturverteilung je Zelle und Monat. Größte und kleinste Temperatur (Vieljährig)

Da die Wasserstraßen der verschiedenen Flussgebiete Mitteleuropas miteinander vernetzt sind, ist es notwendig für dieses Gebiet auch Klima- und Abflussszenarien nach einer einheitlichen Vorgehensweise zu ermitteln. Dies schließt jedoch nicht aus, dass man für die großen Ströme Mitteleuropas flussgebietsspezifische Szenarien erstellt. Die abgeleiteten Klimaszenarien bilden die Basis für die Generierung meteorologischer Zeitreihen, die für die Anwendung der Klimawirkungsmodelle, wie z.B. einem Flussgebietsmodell oder auch einem Gewässergütemodell, benötigt werden. Die Szenarienerstellung erfolgt auf einer Bewertung und Auswahl der verfügbaren globalen und regionalen Ergebnisse der Klimamodelle. Als ein erster Schritt hierzu sind zunächst die Klimaänderungssignale zu quantifizieren. Die Güte der

globalen Klimamodelle wird dabei darüber bewertet, inwieweit sie die großräumige atmosphärische Strömung über dem europäisch-atlantischen Sektor sowie über Mitteleuropa im Kontrollklima („Ist-Klima“) wiedergeben. Derzeit werden hierzu Verfahren von VAN ULDEN & VAN OLDENBORGH (2006) und von BISSOLLI & DITTMANN (2001) getestet.

Regionale Klimamodelle, von denen zunächst die dynamischen Modelle vorrangig analysiert werden, werden hinsichtlich der in Tabelle 1 aufgelisteten Klimagrößen und statistischen Merkmale validiert. Es gilt zu bewerten, inwieweit die Modelle befähigt sind, das Klimaänderungssignal zu berechnen. Auf Basis der Validierungsergebnisse und einer modellspezifischen Quantifizierung der Unsicherheit, werden die Szenarien in Form von Klimamittelwerten definiert.

Die einfachste Form zur Festlegung von Zeitreihen, die als Eingang für die hydrologischen und gewässerkundlichen Wirkmodelle dienen, wäre, aus den verfügbaren regionalen Klimaprojektionen diejenigen auszuwählen, die bzgl. ihrer statistischen Merkmale am besten mit den festgelegten Klimaszenarien übereinstimmen. Es ist jedoch auf Grundlage der Ergebnisse der Validierung bekannt, dass die Absolutwerte der dynamischen regionalen Klimamodelle hohe systematische und zu dem von der Jahreszeit abhängige Fehler („bias“) aufweisen. Die regionalen Klimaprojektionen, deren Zeitreihen für die Flussgebietsmodellierung verwendet werden sollen, sind deshalb mit entsprechenden Verfahren zu korrigieren. Mit der Entwicklung derartiger Verfahren wurde begonnen.

Eine weitere Möglichkeit, Zeitreihen für die Flussgebietsmodellierung zu gewinnen, bietet sich über den Einsatz von Wettergeneratoren (DE WIT & BUISSAND 2007) an. Damit können auch Schwachpunkte der bestehenden globalen Klimamodelle zumindest teilweise überwunden werden. Derzeit wird evaluiert, welche Verfahren es erlauben, für große Flussgebiete die erforderlichen Zeitreihen zu generieren.

Das Klimaänderungssignal wird in der Regel durch den Vergleich zwischen beobachtetem Klima („Ist-Klima“ oder auch Kontrollklima) und dem Klima der Zukunftsprojektion ermittelt. Dabei werden gemäß der Vorgabe der World Meteorological Organization (WMO) jeweils 30-Jahresintervalle verwendet. Im Rahmen der IPCC Studien wird zum Aufzeigen der Klimaänderung die Zeitreihe 2071 bis 2100 dem Kontrollklima gegenübergestellt und vergleichend analysiert. Für Anpassungsstrategien werden aber die möglichen Änderungen der kommenden Jahrzehnte bis ca. 2050 gefordert, da für viele Nutzungen von Wasserstraßen ein Zeitraum von 50 Jahren als planungsrelevant gilt. Dies hängt mit der Lebenserwartung von Schiffen und den Grundlagen für die Dimensionierung der Verkehrsinfrastruktur insgesamt zusammen (ICKERT et al. 2007).

Dabei gilt es auch zu beachten, dass Ungenauigkeiten bzw. Unsicherheiten der Klimaprojektionen sich auch in einem früheren oder späteren Eintreffen einer ansonsten richtig prognostizierten Änderung äußern können. Bei der Definition eines Szenarios „Klima2050“ ergeben sich verschiedene Klimaänderungssignale allein durch die Wahl des Kontroll- bzw. Szenariozeitraumes (Abbildung 6). Es ist deshalb sinnvoll, für dieses Szenario beispielsweise die Perioden 2021/50, 2031/60, 2041/70 sowie 2051/80 heranzuziehen. Die statistischen Kennwerte dieser Perioden sind über ein eventuell auch gewichtetes Mittel im Sinne einer „optimalen“ Schätzung zu einem Szenario zusammenzufassen. Alternativ hierzu könnte man auch den Szenariohorizont um vier Szenarien entsprechend der vier genannten Perioden erweitern.

Bei der Wahl des Kontrollzeitraumes ebenso wie bei der Wahl der für einen Projektionshorizont auszuwertenden Zeiträume ist auch die dem Klima eigene dekadische Variabilität bzw. allgemein das system-interne nicht-lineare Verhalten zu beachten. Letzteres äußert sich dadurch, dass bei ein und demselben Klimamodell mit leicht geänderten Anfangsbedingungen unterschiedliche, aber gleichwahrscheinliche Realisationen möglich sind. Dies wird bereits bei der Analyse der mit dem Klimamodell ECHAM5-OM für jedes Emissionsszenario durchgeführten drei Modellläufe ("runs") deutlich.

Die Bedeutung der Unterschiede, die einzig aus der Wahl unterschiedlicher Bezugszeiträume (Abbildung 6) resultieren, muss quantifiziert und in den Szenarienkatalog aufgenommen werden.

Dekade ab Jahr	Sequenz 1	Sequenz 2	Sequenz 3
1951	(1a)	(2a)	3a
1961	1b	2b	3b
1971			
1981	1c	2c	3c
1991			
2001			
2011	1d	2d	3d
2021			
2031	1e	2e	3e
2041			
2051	(1f)	(2f)	
2061			
2071			
2081			
2091			

Abb. 6: Vergleich möglicher Sequenzen von Referenzperioden zwischen 1951 und 2100.

Die aktuellen Aussagen zu regionalen Klimafolgen in Deutschland basieren bisher im wesentlichen auf den vier in Tabelle 2 aufgeführten Regionalisierungsverfahren. Es wird deutlich, dass alle Verfahren auf den Daten des Hamburger globalen Klimamodells MPI-ECHAM5-OM basieren. Dieses AOGCM prägt den genannten Regionalisierungsverfahren seine spezifischen Eigenschaften auf. Andere globale Klimamodelle, die die Zirkulation und mittlere Klimatologie über Europa ebenfalls in geeigneter Weise widerspiegeln, aber beispielsweise andere Niederschlagsänderungsmuster aufweisen, wurden bisher weniger berücksichtigt.

Im EU-FP6-Projekt "ENSEMBLES" werden derzeit mit 10 weiteren dynamischen Regionalisierungsmodellen regionale Klimaprojektionen bereitgestellt, die auch durch andere AOGCM's angetrieben werden (ENSEMBLES PARTNER, 2008). Die Analyse dieser Projektionen wird es erlauben, die Bandbreite regionaler Klimaprojektionen aufzuzeigen. Erste Auswertungen von Seiten der EU-Ensemble Projektpartner werden für Herbst 2008 erwartet. Weitere Auswertungen sind im Rahmen von KLIWAS vorgesehen.

Tab. 2: Übersicht gängiger Regionalisierungsverfahren in der deutschen Klimafolgenforschung.

Verfahren/Modell	Antrieb	Konzept	durchgeführt durch	im Auftrag von	Jahr
REMO	MPI-ECHAM5-MPI-OM (run 1)	dynamisch	Max-Planck-Institut für Meteorologie, Hamburg	Umweltbundesamt, Dessau	2006
CosmoLM	MPI-ECHAM5-MPI-OM (run 1, 2, 3)	dynamisch	Max-Planck-Institut für Meteorologie (M&D), Hamburg	Bundesministeriums für Bildung und Forschung	2007
WETTREG	MPI-ECHAM5-MPI-OM (run 1)	statistisch	MeteoResearch	Umweltbundesamt, Dessau	2006
STAR	(MPI-ECHAM5-MPI-OM)	statistisch	Potsdam Institut für Klima- folgenforschung	Potsdam Institut für Klima- folgenforschung	2003

Sowohl die globalen als auch die regionalen Klimaänderungssignale weisen bzgl. der verschiedenen IPCC-Emissionsszenarien bis ca. 2050 keine großen Abweichungen untereinander bezüglich der Temperatur auf. Es bietet sich deshalb an, die vorliegenden Klimaprojektionen für den Szenariohorizont 2050 im Sinne der Ensembletechnik auszuwerten. Damit bietet sich eine weitere Möglichkeit die systeminternen Unsicherheiten zu bestimmen.

4. Handlungsoptionen

Der Verkehrsträger Wasserstrasse ist in den Handlungsfeldern zahlreicher Akteure relevant (Abbildung 7). Entsprechend zahlreich sind die Optionen zur Anpassung des Handelns an Änderungen der natürlichen und nicht-natürlichen Rahmenbedingungen des Verkehrs auf Wasserstraßen. Exemplarisch werden potentielle Anpassungsmaßnahmen in den Bereichen "Binnenschifffahrt", "Verladende Wirtschaft" und "Verkehrsweg" im Rahmen des Projektes untersucht. Ebenso wird der Einsatz und die Wirkung von saisonalen Wasserstands- und Abflussvorhersagen im Hinblick auf eine Optimierung der Lager- und Transportlogistik insbesondere bei lang anhaltenden Niedrigwasserereignissen analysiert.

In einem weiteren Schritt müssen die Wirkungen der möglichen Anpassungsmaßnahmen im Sinne eines Szenarios bei der Bewertung möglicher Risiken negativer Konsequenzen des Klimawandels für den jeweiligen Akteur abgeschätzt werden.



Abb. 7: Schematische Darstellung des Wirkungsgefüges Binnenwasserstraße.

4.1 Binnenschifffahrt

Änderungen der Fahrwasserverhältnisse, die als mögliche Konsequenz des Klimawandels diskutiert werden, können sich auf die Kosten des Transportes auf Binnenwasserstraßen auswirken. Dieser Effekt kann anhand sog. Kostenstrukturmodelle, die neben projizierten zukünftigen Fahrwassereigenschaften auch weitere Kosten (z.B. Schiffsbetriebskosten) berücksichtigen, quantifiziert werden.

Derzeit existieren noch keine belastbaren Aussagen zur Höhe des Transportkosteneffekts mit Blick auf die Binnenschifffahrt. Diese werden im Rahmen des aktuellen Projektes erarbeitet. Sollte sich aus diesen Erkenntnissen ein Handlungsbedarf abzeichnen, stehen verschiedene Optionen zur Auswahl. Welche Maßnahmen bzw. Maßnahmenkombinationen notwendig und geeignet sind um verschiedenen Änderungsszenarien zu genügen, kann derzeit noch nicht entschieden werden. Da der mit den Maßnahmen verbundene Aufwand sehr hoch wäre, müssen die Szenarien mit großer Sorgfalt entwickelt werden.

Tab. 3: Übersicht potentieller Anpassungsmaßnahmen des Bereichs Binnenschifffahrt und Transportsysteme

Investive Maßnahmen	Operative Maßnahmen
Reduktion des Tiefganges durch höherfeste oder leichtere Materialien	Anpassung der Betriebsform (z.B. Continuebetrieb statt Tagesbetrieb)
Reduktion des Tiefganges durch Gewichtseinsparung bei der Konstruktion	Verzicht auf Kleinwasserzuschläge und Umlage auf normale Fracht
Reduktion des Tiefganges durch Gewichtseinsparung bei der Ausrüstung	Versorgungs- statt Transportauftrag (z.B. Übernahme der Lagerhaltung für Kraftwerke durch Logistiker)
Vorhaltung zusätzlichen Schiffsraums	Zusammenarbeit mit anderen Verkehrsträgern

4.2 Verladende Wirtschaft

Eine Reihe von massengutaffinen Branchen (z. B. Chemische Industrie, Elektrizitätswirtschaft) nutzen große Binnenwasserstraßen wie etwa den Rhein als preisgünstigen Verkehrsträger für den Transport von Massengütern (z. B. Steinkohle). Tabelle 4 zeigt, am Beispiel der Elektrizitätswirtschaft, einige konkrete Anpassungsmaßnahmen der Branche, die den Kraftwerksbetrieb im Falle eingeschränkter Schifftransportmöglichkeiten für Steinkohle kontinuierlich und zuverlässig gewährleisten. Die meisten Maßnahmen wären sicherlich auch ohne möglicherweise klimawandelbedingte Einschränkungen der Binnenschifffahrt ökonomisch sinnvoll. Ab wann solche Maßnahmen zur Verbesserung der Brennstofflogistik als reine Anpassung an Klimawandel zu sehen sind oder etwa der Verbesserung der Wettbewerbsfähigkeit in einem liberalisierten Strommarkt dienen, kann nicht eindeutig beantwortet werden (ROTHSTEIN 2007).

Tab. 4: Übersicht von Anpassungsoptionen der Elektrizitätswirtschaft in Bezug auf eingeschränkte Kohletransportmöglichkeiten der Binnenschifffahrt (verändert nach ROTHSTEIN 2007).

Anpassungsoptionen	Praxisbeispiel (falls vorhanden)
Vergrößerung der Kohlelagermengen (Haldenkapazität) am (Stein-) Kohlekraftwerksstandort	Rheinhafen-Dampfkraftwerk Karlsruhe (Rhein)
Einrichtung von Pufferlagern an Kraftwerksstandorten für benachbarte Kraftwerke	Kohlehalde des Kohlekraftwerks Gaisburg dient als Puffer für Kraftwerk Münster (Neckar)
Einrichtung von Außenlagern für Steinkohle, die sich durch gute Kohletransportmöglichkeiten per Binnenschiff auszeichnen (inklusive Verlademöglichkeit von Schiff auf Zug)	Außenlager in Duisburg-Orsoy (Rhein)
Einführung von gestaffelten Kleinwasserzuschlägen auf der Basis neuer Binnenschiffe (anstatt einer Stufe auf Basis alter Schiffe), um Transportanreize zu schaffen	
Abschließen von mehrjährigen (anstatt einjährigen) Verträgen	

mit Reedereien, um beiderseitige (Reederei und Elektrizitätsunternehmen) Planungssicherheit zu erhöhen	
Gleichzeitiger Gleis- und Hafenanchluss am Kraftwerksstandort, um Steinkohle per Bahn und Binnenschiff angeliefert bekommen zu können	Rheinhafen-Dampfkraftwerk Karlsruhe (Rhein)
Abschließen von mehrjährigen Verträgen über Kohletransportkontingente zu festen Bezugskonditionen mit der Bahn (anstelle kurzfristiger Transportaufträge)	
Anschaffen von eigenen Waggons und Ausschreibung von Transportaufträgen für Lokomotiven	
Gemeinsamer Bau und Betrieb eines Kraftwerks an solchen Standorten, welche sich durch vergleichsweise bessere Kohletransportmöglichkeiten per Binnenschiff auszeichnen (Vermeidung von aufwändigem Transport von Kohle)	Kohlekraftwerk Walsum bei Duisburg (Rhein) (Kooperation zwischen STEAG und EnBW)

4.3 Verkehrsweg

Die Fahrwasserverhältnisse sind einem ständigen Wandel unterworfen. Schon in der Vergangenheit wurde nachteiligen Entwicklungen mit verschiedenen flussbaulichen Maßnahmen begegnet.

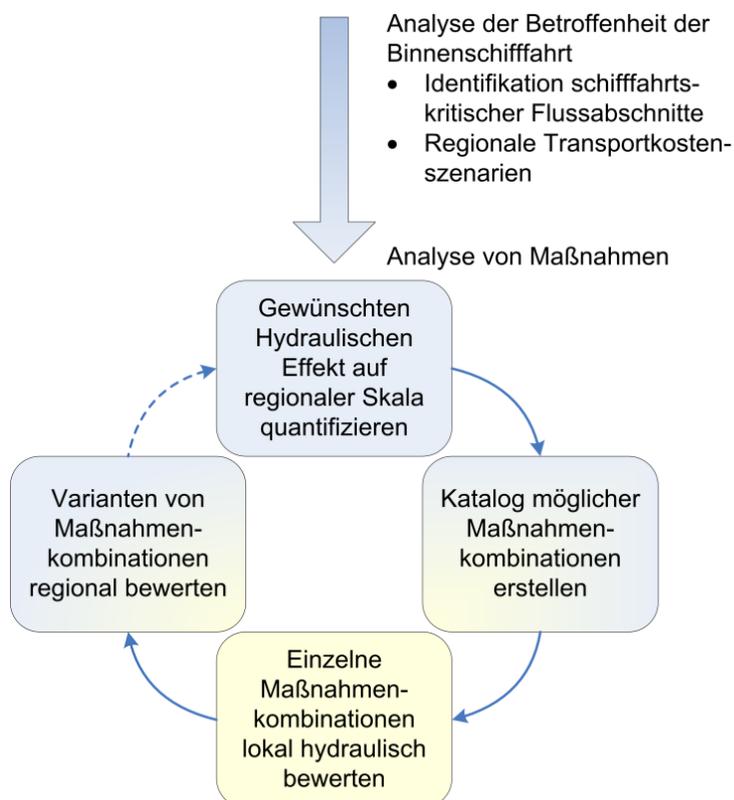


Abb. 8: Schematische Darstellung des Vorgehens bei der Bewertung hypothetischer flussbaulicher Anpassungsmaßnahmen.

Diese Instrumentarium steht prinzipiell auch zur Verfügung, um mögliche durch Klimawandel hervorgerufene niedrigwasserbedingte Engpässe innerhalb der Wasserstraßen abzufangen. Im Rahmen des Projektes KLIWAS wird einerseits das Ziel verfolgt, die daraus resultierenden Kosteneffekte für die Binnenschifffahrt durch Kostenstrukturmodelle zu quantifizieren; andererseits werden aber auch hydraulische Zielvorgaben für potentiell kritische Flussabschnitte formuliert, mit denen die Sicherheit und Verfügbarkeit der Wasserstrasse auch unter geänderten hydrologischen Rahmenbedingungen zu gewährleisten ist (Abbildung 8). Dabei werden anhand von Modellen verschiedene Maßnahmenkombinationen zusammengestellt, mit denen die Vorgaben erreicht werden können. Im Rahmen weiterer Projekte des Bundesministeriums für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung (BMVBS) folgt eine hydraulische Bewertung der Maßnahmen auf lokaler Ebene. Die aus dieser Sicht "optimale" Maßnahmenkombination muss dann auf überregionaler (flussabschnitts- bis flussgebietsbezogener) Ebene sowohl monetär als auch im Kontext mit ökologischen Aspekten und möglichen Nutzungskonflikten bewertet werden.

4.4 Vorhersagesysteme

Im Rahmen von KLIWAS wird untersucht, inwieweit mit Hilfe von saisonalen Wasserstands- und Abflussvorhersagen insbesondere in Trockenperioden wirtschaftliche Folgen extremer Abflussereignisse und Wasserstände gemildert werden könnten. Gängige Wetter- bzw. Hoch- und Niedrigwasservorhersagesysteme haben einen Vorhersagezeitraum von einigen Tagen. Die bestehenden längerfristig (Wochen/Monate) ausgerichteten meteorologischen Vorhersagesysteme sind derzeit noch mit großen Unsicherheiten behaftet und befinden sich überwiegend im experimentellen Stadium.

Ausgehend von mehrmonatigen Vorhersagen des Europäischen Zentrums für mittelfristige Wettervorhersage (EZMW), bietet der Deutsche Wetterdienst (DWD) seit Anfang 2008 eine operative "Jahreszeitenvorhersage" für Deutschland an (DEUTSCHER WETTERDIENST 2008). Die räumliche Auflösung und der Detaillierungsgrad ist derzeit noch zu grob, um mit diesen oder ähnlichen Produkten weitere Modelle antreiben und z.B. saisonale Wasserstandsvorhersagen wagen zu können. Jedoch sind Konzepte denkbar, die diese Lücke schließen könnten. So könnten z.B. die aus der Klimamodellierung bekannten Downscaling Verfahren (z.B. REMO) modifiziert und für operative Vorhersagen verwendet werden. Ein alternativer Weg ist der Einsatz der genannten "Wettergeneratoren" (vgl. DE WIT & BUISSHAND 2007).

Ziel einer "saisonalen Vorhersage" sind letztlich probabilistische Aussagen zu Wasserständen, die als Grundlage zur Entscheidungsfindung über die Kapazitäten von Transport- und Lagersystemen herangezogen werden können. Eine mögliche Darstellungsform gibt Abbildung 9 wieder.

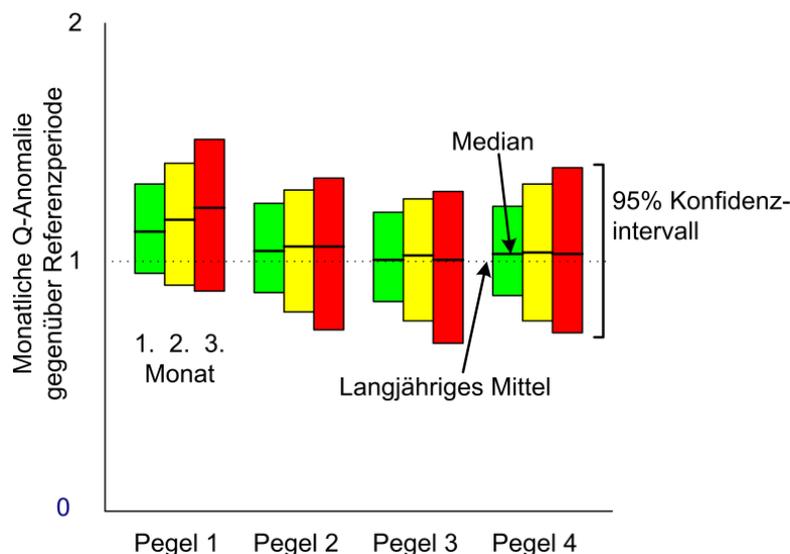


Abb. 9: Mögliche Darstellungsform einer dreimonatigen Wasserstandsvorhersage.

5. Schlussfolgerungen und Ausblick

Die hydrometeorologischen und hydrologischen Größen Mitteleuropas weisen hinsichtlich ihrer Mittel- und Extremwerte bereits unabhängig vom derzeit diskutierten Klimawandel eine hohe langperiodische Variabilität auf. Es besteht deshalb von jeher die Notwendigkeit, sich auf diese starke Variabilität einzustellen, weshalb unsere Systeme mit dem Ziel der Minderung des Schadens infolge extremer Zustände bewirtschaftet wurden und werden. Dabei ist es im Hinblick auf endliche Ressourcen schon immer gängige Praxis, den Grad der Bewirtschaftung im Sinne einer Kosten-Nutzen Betrachtung festzulegen. Es ist im Grunde ein Optimierungsproblem unter Restriktionen zu lösen. Dabei ist es eine häufig kontrovers diskutierte Frage, den Nutzen verschiedener Komponenten des bewirtschafteten Systems bzw. auch des Schadens an den Komponenten zu quantifizieren. Es ist letztlich eine Frage der gesellschaftlichen Akzeptanz, welche Güter mit welcher Bewertung und welchem Gewicht in eine derartige Optimierung (Anpassungskapazität) eingehen.

Der nun neu hinzukommende Aspekt des Klimawandels ändert somit nicht die grundsätzliche Notwendigkeit und Richtigkeit dieses Vorgehens. Weiterhin gilt es, das Optimierungsproblem zu lösen, allerdings unter veränderten Bedingungen, wozu seine Komponenten erneut bewertet bzw. quantifiziert werden müssen. Erschwerend kommt allerdings hinzu, dass bei den Aussagen zu den erwartenden Klimaänderungen insbesondere auf der regionalen Ebene noch große Unsicherheiten bestehen. Diese Unsicherheiten, die teilweise modellbedingt andererseits aber auch systembedingt sind, nehmen naturgemäß mit zunehmenden zeitlichen Szenariohorizont zu. Neben dem Klimasignal selbst sind deshalb auch die Unsicherheiten zu quantifizieren. Diese gilt es geeignet in die Anpassungsstrategien einzubeziehen.

Das zuvor gesagte gilt insbesondere auch für das System Binnenschifffahrt. Per Definition ist verantwortliches wasserwirtschaftliches Planen und Handeln von jeher bestrebt, zur Gewährleistung der Versorgung und der Sicherheit die Schwankungen des Wasserdargebots durch geeignete Maßnahmen auszugleichen bzw. zu kontrollieren. Neben dem Abfluss sind der

Feststoffhaushalt und der Zustand des Gewässerbetts für die Schiffbarkeit der Wasserstraßen entscheidend. Zeitlich und räumlich großskalige Veränderungen haben Einfluss auf die Fahrrinntiefen und den für ihre Gewährleistung notwendigen Unterhaltungsaufwand. Demzufolge ist auch das bestehende Sedimentmanagement den geänderten Rahmenbedingungen anzupassen.

Generell steht zunächst die vordringliche Aufgabe an, auf der Basis des gegenwärtigen Wissensstandes, die möglichen Auswirkungen des Klimawandels für die Schifffahrt einschließlich aller seiner Kompartimente und zu ermitteln. Darauf aufbauend sind Anpassungsstrategien zu entwickeln, die jedoch die genannten Unsicherheiten zu berücksichtigen haben.

Literatur

- BISSOLLI, P. & E. DITTMANN (2001): The objective weather types classification of the German Weather Service and its possibilities of application to environmental and meteorological investigations. *Met. Zeitschr.* Vol. 10, No. 4, S. 253-260.
- BELZ, J. et al. (2007): Das Abflussregime des Rheins und seiner Nebenflüsse im 20. Jahrhundert. Analyse, Veränderungen, Trends. Bericht Nr. I-22 der KHR. 377 S.
- BUNDESMINISTERIUM FÜR VERKEHR, BAU UND STADTENTWICKLUNG (2007): Schifffahrt und Wasserstraßen in Deutschland. Zukunft gestalten im Zeichen des Klimawandels. Bestandsaufnahme. 56 S.
- CHRISTENSEN, J.H. et al. (2007): Prediction of Regional Scenarios and Uncertainties for Defining European Climate Change Risks and Effects: The PRUDENCE Project. *Climatic Change* 81, Supplement 1.
- DEUTSCHER WETTERDIENST (2008): Die Jahreszeitenvorhersage. http://www.dwd.de/bvbw/generator/Sites/DWDWWW/Content/Oeffentlichkeit/KU/KUPK/Wir_ueber_uns/Broschueren/Jahreszeitenvorhersage.templateld=raw,property=publicationFile.pdf/Jahreszeitenvorhersage.pdf
- DE WIT, M. & T.A. BUIHAND (2007): Generator of rainfall and discharge extremes (GRADE) for the Rhine and Meuse basins. Report RWS RIZA 2007.027. KNMI-Publication 218. 76 S.
- ENSEMBLES PARTNER (2008): The ENSEMBLES project. <http://ensembles-eu.metoffice.com/>
- FOWLER, H.J. et al. (2007): Linking climate change modelling to impacts studies: recent advances in downscaling techniques for hydrological modelling. *International Journal of Climatology* 27, S. 1547-1578.
- ICKERT L. et al. (2007): Abschätzung der langfristigen Entwicklung des Güterverkehrs in Deutschland bis 2050. Projekt im Auftrag des BMVBS. 140 S.
- IPCC (2001): *Climate Change 2001. Synthesis Report.* 408 S.
- IPCC (2007): *Climate Change 2007. Synthesis Report.* 73 S.
- IPCC DDC (2007): Definition of Terms Used Within the Data Distribution Centre (DDC) Pages. http://www.ipcc-data.org/ddc_definitions.html.
- KOMMISSION DER EUROPÄISCHEN GEMEINSCHAFTEN (2007) Anpassung an den Kli-

- mawandel in Europa – Optionen für Maßnahmen der EU. Grünbuch der Kommission an den Rat, das Europäische Parlament, den Europäischen Wirtschafts- und Sozialausschuss und den Ausschuss der Regionen. KOM(2007) 354 endgültig, Brüssel, 29.6.2007. http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/site/de/com/2007/com2007_0354de01.pdf.
- LANG, J. et al. (2007): Analyse der ECHAM5-OM Klimamodellerggebnisse im Alpenraum unter Verwendung einer objektiven Wetterlagenklassifikation. Bericht erstellt im Auftrag der Bundesanstalt für Gewässerkunde. 23 S.
- MANN, H.-J. et al. (2001): Verkehrsprognose 2015 für die Bundesverkehrswegeplanung. http://www.bmvbs.de/Anlage/original_5914/Deckblatt-und-Inhaltsverzeichnis.pdf
- ROTHSTEIN, B. (2007): Elektrizitätswirtschaft als Betroffene des Klimawandels – Eine Identifikation von Betroffenheiten und Ansätze zur Anpassung an den Klimawandel dargestellt am Beispiel der Energieunternehmen EnBW und EDF. – Habilitation (Verfahren noch nicht abgeschlossen). Universität Würzburg, 398 S. (unveröffentlicht)
- STARDEX PARTNER (2005): STARDEX - downscaling climate extremes. Final Report. http://www.cru.uea.ac.uk/projects/stardex/reports/STARDEX_FINAL_REPORT.pdf
- STRÄTER, D. (1988): Szenarien als Instrument der Vorausschau in der räumlichen Planung. In: Akademie für Raumforschung und Landesplanung (Hrsg.): Regionalprognosen. Methoden und ihre Anwendung, S. 417-440
- VAN ULDEN, A.P. & G.J. VAN OLDENBORGH (2006): Large-scale atmospheric circulation biases and changes in global climate model simulations and their importance for climate change in Central Europe, Atmos. Chem. Phys., 6, S. 863-881.
- VINER, D. (2002): A qualitative assessment of the sources of uncertainty in climate change impacts assessment studies. In: Beniston, M. (Hrsg.): Climatic Change. Implications for the Hydrological Cycle and for Water Management. S. 139-149.

Konsequenzen für die wasserwirtschaftliche Infrastruktur

Albert Göttle

1. Einleitung

Der im November 2007 veröffentlichte Synthese-Report zum vierten Sachstandsbericht des Weltklimarates (IPPC) bekräftigt die bisherigen Aussagen der Klimaforschung, dass der Klimawandel weltweit bereits Realität ist (IPCC 2007).

Die Wasserwirtschaft wird sich dabei vor allem mit einer Zunahme von Extremereignissen wie Starkniederschläge oder Dürreperioden, dem Problem der (Trink-)Wasserversorgung, häufigeren und größeren Hochwässern sowie in Küstenbereichen mit dem Anstieg des Meeresspiegels auseinandersetzen müssen. Welche Konsequenzen dies für die wasserwirtschaftliche Infrastruktur Bayerns voraussichtlich haben wird, darüber informiert der vorliegende Beitrag.

2. Klimabedingte Änderung wichtiger Wasserhaushaltsgrößen

Im Rahmen des KLIWA-Projekts (KLIWA 2006) untersuchen bereits seit 1998 die Bundesländer Bayern, Baden-Württemberg sowie der Deutsche Wetterdienst die möglichen Auswirkungen der Klimaveränderungen auf die Wasserwirtschaft in Süddeutschland. Dabei zeigte z.B. die retrospektive Analyse vorliegender Niederschlagsmessreihen, dass die Starkniederschläge für das hydrologische Winterhalbjahr bereits um 20-30% zugenommen haben und ursächlich der Zunahme von Großwetterlagen mit zonalen Zirkulationsformen (z.B. Vb-Wetterlage) zugeordnet werden können.

Die auf der Basis von Regionalmodellen ermittelten Klimaprojektionen zeigen für Bayern eine Verstärkung der bisherigen Trends. Im Vergleich zum Referenzzeitraum 1970-2000, wird eine Zunahme der Niederschläge im Jahresmittel von ca. + 8% für den Zeitraum 2021-2050 prognostiziert. Die Sommer werden dabei trockener (- 4 %), die Winter wesentlich feuchter (+ 22%).

Für das Main Einzugsgebiet wurde eine erste Prognose für die Veränderung der Grundwasserneubildung (B2-Emissionsszenario, Globalmodell ECHAM4, Regionalmodell ENKE) für den Zeitraum 2021-2050 berechnet und dem o.g. Referenzzeitraum gegenübergestellt. Die Prognosen gehen von einer Erhöhung der Grundwasserneubildung im Main Einzugsgebiet von ca. 25% aus, lassen jedoch einen deutlich ausgeprägten West-Ost-Gradienten erkennen. Prognosen zum mittleren Hochwasserabfluss der Fränkischen Saale am Pegel Bad Kissingen lassen im Vergleich zum Istzustand/Referenzszenario eine Abflusserhöhung in 2021-2050 um ca. 30% erwarten (KLIWA 2007).

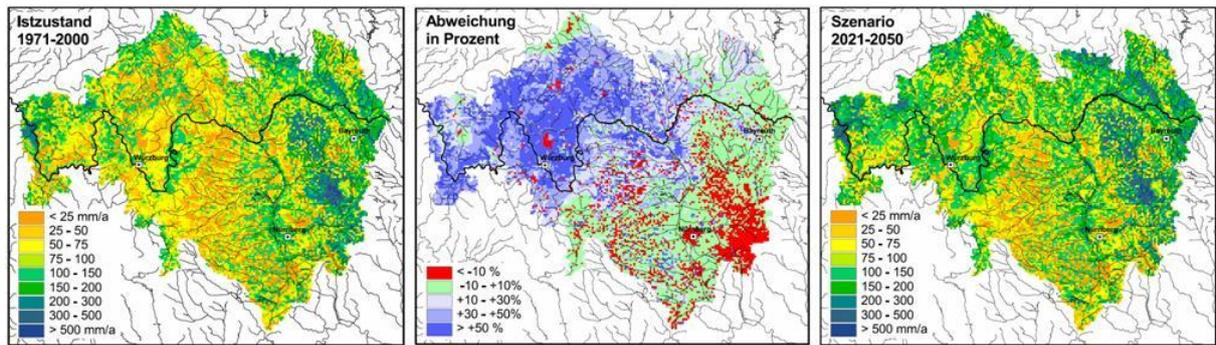


Abb. 1: Prognose für die Veränderung der Grundwasserneubildung im Main Einzugsgebiet für den Zeitraum 2021-2050 (Datengrundlage: B2 Emissionsszenario, Globalmodell ECHAM4, Regionalmodell ENKE)
Quelle: KLIWA-Symposium 2006

Die prognostizierten Änderungen von Wasserhaushaltsgrößen erfordern eine Anpassung der wasserwirtschaftlichen Infrastruktur an die zu erwartenden neuen Gegebenheiten.

3. Konsequenzen für das Hochwassermanagement

Die zunehmende Gefahr für Hochwasserereignisse wird in Bayern besonders den Alpenraum und die Auenbereiche der Flüsse betreffen. Die bisherigen Maßnahmen zum Hochwasserschutz müssen daher den sich wandelnden Rahmenbedingungen angepasst werden. Das Programm "Nachhaltiger Hochwasserschutz in Bayern - Aktionsprogramm 2020 für Donau- und Maingebiet" leistet dazu beispielsweise einen entscheidenden Beitrag (vgl. Lazik 2007). Dieses Aktionsprogramm fußt auf den drei Handlungsfeldern technischer Hochwasserschutz, natürlicher Rückhalt und Hochwasservorsorge, die miteinander vernetzt sind. Nur der richtige Maßnahmen-Mix ermöglicht bestmöglichen Hochwasserschutz.

Der technische Hochwasserschutz zielt zum einen auf die Schaffung von Rückhaltebecken und Flutpoldern zur wirksamen Dämpfung/Erniedrigung von Hochwasserspitzen. Zum anderen wird schon jetzt bei der Bemessung von Deichen und Mauern der Lastfall „Klimawandel“ mit einem 15% Aufschlag auf den HQ100 als Bemessungsgrundlage berücksichtigt. Die Handlungsempfehlungen für den technischen Hochwasserschutz sind in diesem Sinne so weiter zu entwickeln, dass sie zwar den möglichen Klimaveränderungen der nächsten Jahrzehnte Rechnung tragen, aber auch die Unsicherheiten bereits heute berücksichtigen („flexible and no regret“-Strategie) (LfU Bayern 2005).

Die Anpassung des Wassermanagements von Talsperren z.B. durch Vergrößerung des Hochwasserschutzraumes leistet einen wesentlichen Beitrag zur Minderung von Hochwasserabflüssen. Die Suche nach möglichen weiteren Talsperren- und Rückhaltebeckenstandor-

ten wird rechtzeitig zu beginnen und die Realisierung geeigneter Standorte schwierig, aber dennoch unverzichtbar sein.

Die Verbesserung des natürlichen Rückhalts wird durch die Reaktivierung ehemals natürlicher Überschwemmungsgebiete, durch die Renaturierung der Gewässer sowie die Reaktivierung ehemaliger Auwaldbereichen erreicht. Maßnahmen wie die Förderung der Regenwasserversickerung vor Ort und des Wasserrückhalts auf land- und forstwirtschaftlich genutzten Flächen ergänzen diese.

Die Hochwasservorsorge versucht das Schadensrisiko zu minimieren. Die Wasserwirtschaftsverwaltung in Bayern ermittelt dazu die Überschwemmungsgebiete an allen größeren Flüssen. Diese werden anschließend den Landratsämtern zur Festsetzung von Überschwemmungsgebieten zugeleitet. Seit 2004 können die bereits ermittelten Gebiete im "Informationsdienst überschwemmungsgefährdete Gebiete" (IÜG) (LfU Bayern 2008) eingesehen werden.

Ergänzend dazu betreibt die bayerische Wasserwirtschaftsverwaltung ein modernes System der Hochwasservorhersage und –warnung, den Hochwassernachrichtendienst Bayern (<http://www.hnd.bayern.de/>). Die jeweils aktuellen Hochwasserlageberichte werden über Internet, Radio, Fernsehen, Presse, Videotext und per Telefonansage der Öffentlichkeit zur Verfügung gestellt.

4. Konsequenzen für Niedrigwassermanagement und Gewässerschutz

Lang anhaltenden Trockenperioden wie in 2003 und 2006 führen lokal zu Problemen bei verschiedenen Wassernutzungen sowie bei der Wasserqualität in den Gewässern. Mit entsprechenden Situationen ist aufgrund des Klimawandels in Zukunft häufiger zu rechnen.

Wärmebelastung der Fließgewässer

Thermische Kraftwerke sind auf Kühlwasser aus Fließgewässern angewiesen. Die Zunahme von Trockenperioden und die damit verbundene Verknappung der Ressource „Kühlwasser“ hat Auswirkungen auf das Niedrigwassermanagement (Stauhaltungen – Niedrigwasseraufhöhung) und die Stromerzeugung selbst.

Die Wasserwirtschaft wird sich daher verstärkt mit der Aktualisierung der Wärmelastplanung und der Anpassung des Niedrigwassermanagement an die sich wandelnden Rahmenbedingungen auseinandersetzen müssen. Im Fokus stehen dabei neben der Feststellung des benutzergeprägten Einflusses auf den Wärmehaushalt und den ökologischen Zustand des Gewässers vor allem die Wärmelastrechnungen unter Berücksichtigung verschiedener Lastfälle für maßgebliche Niedrigwasserabflüsse, die Entwicklungsmöglichkeiten für bestehende Standorte sowie erforderlicher Steuerungs- und Bewirtschaftungsmaßnahmen insbesondere auf Seiten der Anlagenbetreiber.

Ergänzend dazu müssen die Möglichkeiten der Abwärmennutzung (z.B. Nah-, Fernwärmenetz, Kraft-Wärme-Kopplung) von den Anlagenbetreibern besser ausgeschöpft werden, um den Abwärmestrom zu reduzieren. In aktuell in Bayern geplanten Neu- und Erweiterungsbauten von Kraftwerken stellt sich die Frage nach der thermischen Belastbarkeit der Gewässer, was wiederum langfristige Annahmen zu den künftigen Abfluss- und Temperaturverhältnissen unter Berücksichtigung der Klimaänderungen erfordert.

Gewässerschutz - Sicherung der Gewässergüte

Die Abnahme der Pegelstände bei lang anhaltenden Trockenwetterlagen hat in der Vergangenheit bereits zu Problemen geführt, die sich ggf. in Zukunft noch verstärken dürften. Die Auswirkungen beschränken sich dabei nicht allein auf die Gewässergüte sondern sind auch mit der Nutzung der Gewässer als Verkehrswege bzw. zur Energiegewinnung (Wasserkraftwerke) verknüpft. Neben der Abnahme der Gewässergüte durch erhöhte Wassertemperaturen und stark verringerten Abfluss, sowie einer erhöhten Stoffbelastung infolge verringerte Verdünnung von Abwassereinleitungen muss sich die Wasserwirtschaft in Zukunft auch verstärkt mit der Verfügbarkeit von ausreichenden Restwasserabfluss und der Änderung des Mischungsverhaltens von Seen (IGKB 2007) auseinandersetzen.

Dabei liefern die Gewässergütemessnetze der Wasserwirtschaft die Beurteilungsgrundlagen für schnelles wasserwirtschaftliches Handeln im Bedarfsfall, um gezielt Abhilfemaßnahmen wie z.B. Niedrigwasseraufhöhung durch Wasserabgabe aus staatlichen Speichern, aber auch Betriebseinschränkungen bei Kraftwerken und Industriebetrieben zur Reduzierung eingeleiteter Stofffrachten zu untermauern bzw. die Nachrüstung von Kläranlagen für eine weitergehende Abwasserreinigung begründen zu können.

Bei verstärkter und ggf. intensivierter Nutzung landwirtschaftlicher Flächen für den Anbau nachwachsender Rohstoffe sind die ökologischen Auswirkungen auf die Umwelt, insbesondere auf den Gewässer- und Grundwasserschutz zu beachten (TU München 2007). Dies betrifft insbesondere die Vermeidung von Stoffeinträgen infolge von Bodenerosion nach Starkregenereignissen. Entsprechende Handlungsempfehlungen für Bayern wurden mit Blick auf die geänderten klimatischen wie ackerbaulichen Rahmenbedingungen (Sortenwahl, Fruchtfolge, Düngung) in Zusammenarbeit von Umwelt- und Landwirtschaftsressort bereits entwickelt und demnächst veröffentlicht.

5. Konsequenzen für den Betrieb von Wasserkraftanlagen

Über die Hälfte des in Deutschland produzierten Wasserkraftstroms kommt aus Bayern in dem rund 4.250 Wasserkraftanlagen betrieben werden. Sie haben einen Anteil von 16-18% an der bayerischen Gesamtstromerzeugung mit einem Steigerungspotential von maximal 10%. Dieses Potential kann vor allem durch die Modernisierung der bestehenden Anlagen aber auch durch einen behutsamen und ökologisch vertretbaren Ausbau der Wasserkraft an geeigneten Standorten realisiert werden.

Die hydrologischen Rahmenbedingungen für den Betrieb von Wasserkraftanlagen werden sich infolge des Klimawandels ändern. Einem höheren Abfluss vor allem im hydrologischen Winterhalbjahr, steht eine Abflussverringerung im Sommerhalbjahr gegenüber. Der Betrieb der Wasserkraftanlagen, aber auch der Speicherbetrieb von Talsperren muss diesen Veränderung des Abflussgeschehens anpasst werden. Erschwerend tritt dabei hinzu, dass das Auftreten von Extremereignissen (Starkregen, Schneeschmelze gekoppelt mit Starkregen) zusätzlich zu berücksichtigen ist.

Darüber hinaus können im Bereich der Bewirtschaftung von Talsperren in Einzelfällen auch technische Maßnahmen wie Dammerhöhung oder zusätzliche Hochwasserentlastung, wie sie am Sylvensteinspeicher realisiert wurden, notwendig werden.



Abb. 2: Berücksichtigung des Lastfalles "Klimawandel" am Beispiel Sylvensteinspeicher
Quelle: LfU Bayern, Ref. 81, 2007

6. Konsequenzen für die Wasserversorgung

Der Klimawandel wird zur saisonalen Umverteilung der Niederschläge im Sommer- (Abnahme) und im Winterhalbjahr (Zunahme), zu länger andauernden Trockenperioden und steigenden Temperaturen sowie zu häufigeren und intensiveren Starkniederschlägen führen. Dies wird regional z.T. sehr unterschiedliche Auswirkung haben, mit denen sich die Wasserwirtschaft auseinandersetzen muss.

- Gebietsweise geringere, für die Wasserversorgung nutzbare Grundwasserneubildung, Verringerung des Grundwasserdargebots
- Zeitweiser Rückgang von Quellschüttungen die für öffentliche Wassergewinnungsanlagen genutzt werden
- Erhöhung des Wasserbedarfs (Tagesspitzenbedarf) in trockenen, heißen Sommermonaten und damit Versorgungsprobleme bei dezentralen Wasserversorgern mit kleinen, oberflächennahen Gewinnungsanlagen, insbesondere in den (nordostbayerischen) Mittelgebirgen
- Erhöhter Bewässerungsbedarf in der Landwirtschaft (z.B. Gemüse-, Weinbau) und Inanspruchnahme von Grundwasser, Flüssen und Bächen
- Verschärfung des Problems "mangelhafte Bodenfilterwirkung" infolge Bodenaustrocknung mit Rissbildung bei Trockenperioden im Sommer und anschließende Starkniederschläge
- Zunahme der Wassertemperatur mit erhöhtem Verkeimungsrisiko bei Uferfiltrat und Oberflächenwasserentnahmen sowie bei oberflächennah verlegten Rohrleitungen

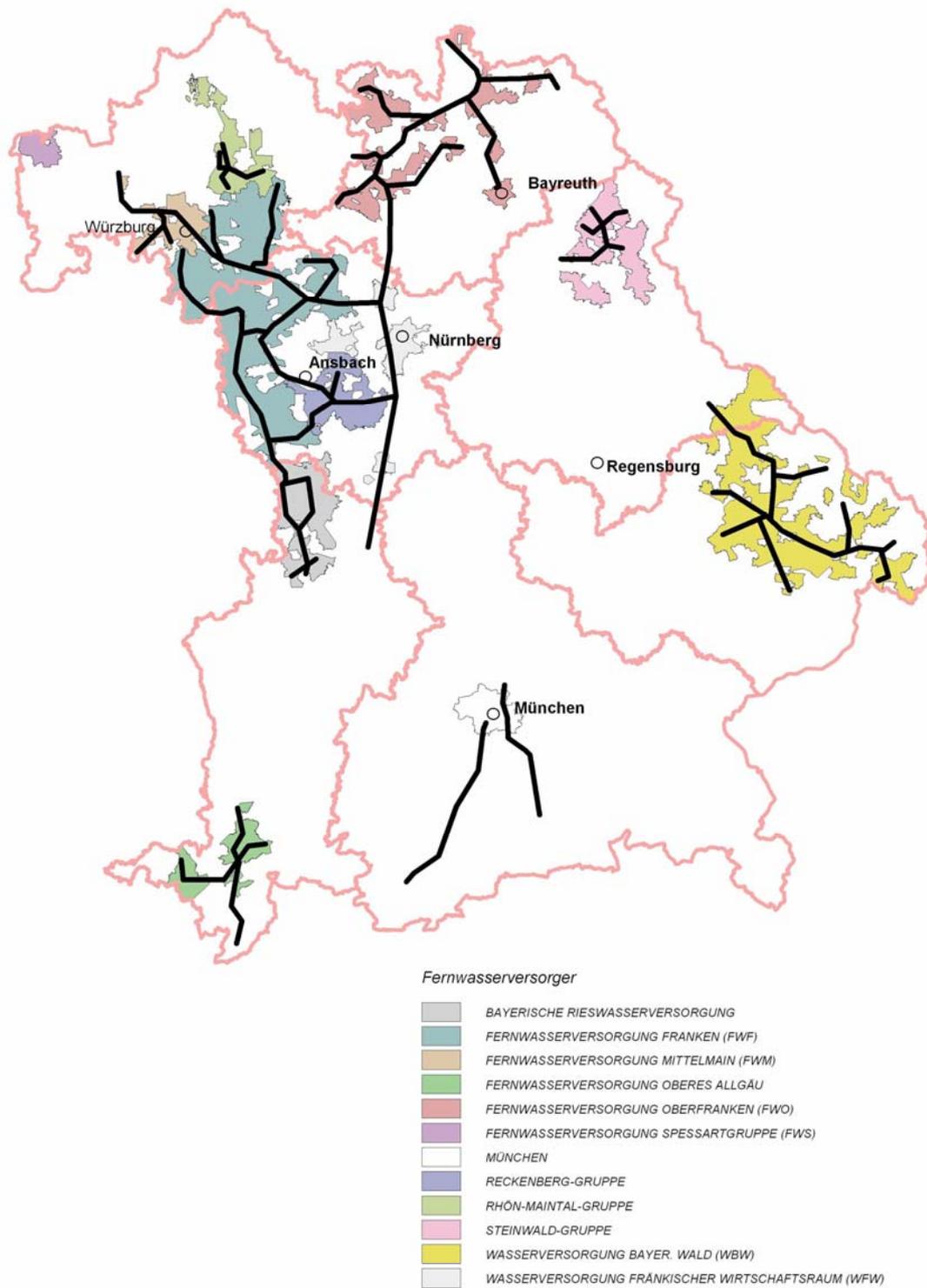


Abb. 3: Fernwasserversorgung in Bayern
Quelle: LfU Bayern, Ref. 94, 2007

Wasserwirtschaftlich gefordert sind in diesem Zusammenhang der Auf- bzw. Ausbau überregionale Ausgleichs- und Verbundlösungen, die Erschließung von Gewinnungsalternativen und die Sicherung vorhandener und erkundeter Wasservorkommen durch z.B. Ausweitung von Wasserschutzgebieten und dem Schutz von Tiefengrundwasservorräten. Unbestritten sollten in diesem Zusammenhang die Priorität der öffentlichen Wasserversorgung bei der Grundwassernutzung sowie die Belange der Gewässerökologie in der Bewirtschaftung der Oberflächengewässer sein.

Für den Fall der Beregnung landwirtschaftlicher Nutzflächen muss die Wasserwirtschaftsverwaltung vor allem in Wassermangelgebieten bei der Bewirtschaftung der Grundwasserressourcen klare Vorgaben machen. So ist der Einsatz von qualitativ hochwertigem Trinkwasser für Beregnungsmaßnahmen möglichst einzuschränken. Bei der Begutachtung von Entnahmeanträgen ist an den Wasserwirtschaftsämtern verstärktes Gewicht auf nachprüfbar sparsame Wasserverwendung wie Beregnungszeit (z. B. möglichst zu verdunstungsarmen Tageszeiten) und Technik (z. B. Tröpfchenbewässerung) zu legen. Ferner sind in Zusammenarbeit mit der Landwirtschaftsverwaltung an die regionalen Verhältnisse angepasste Wasser sparende Bewässerungstechnologien weiter zu entwickeln und mittels einer kompetenten Bewässerungsberatung und ggf. Förderung umzusetzen.

7. Ausblick

Der Klimawandel ist für die Wasserwirtschaft und ihre Verwaltung eine der größten Herausforderungen dieses Jahrhunderts. Welche drängenden Aufgaben auf die Wasserwirtschaft zu kommen, lässt sich trotz bestehender Unsicherheiten bereits jetzt gut erkennen.

So investiert die Bayerische Staatsregierung bis 2020 mehr als 2,3 Milliarden Euro in die Anpassung des Hochwasserschutzes an die sich verändernden hydrologischen Rahmenbedingungen sowie in Hochwasservorsorgemaßnahmen.

Weiterhin gilt es die regionale Trinkwasserversorgung gerade vor dem Hintergrund des Klimawandels und dem sich abzeichnenden demografischen Wandel nachhaltig sicherzustellen. Dazu hat das Bayerische Landesamt für Umwelt eine Bestandaufnahme der Trinkwasserversorgung in Bayern initiiert, auf deren Basis, gemeinsam mit den Wasserversorgern notwendige Maßnahmen diskutiert und ggf. behördliche Empfehlungen abgeleitet werden. Erste Ergebnisse dazu werden in 2009 vorliegen.

Ferner wird sich die wasserwirtschaftliche Inanspruchnahme der oberirdischen Gewässer (z.B. durch Wärmeeinleitung und Wasserentzug) im Zuge des Klimawandels regional sehr stark ändern. Vor diesem Hintergrund müssen, für verschiedenen Lastfälle (z.B. maßgebliche Niedrigwasserabflüsse für Sommer, Herbst und Winter), die Wärmelastrechnungen bzw. daran anknüpfend die Wärmelastpläne aktualisiert werden. Derzeit werden die Wärmelastpläne der Donau überarbeitet und dürften bis Anfang 2009 vorliegen. In einem weiteren Schritt ist geplant, die Wärmelastpläne von Isar, Inn und Salzach bis voraussichtlich 2010 zu aktualisieren, gefolgt vom Main ab 2011.

Zudem stehen mit dem Klimaprogramm Bayern 2020 zur Bearbeitung offener Fragen zusätzliche Mittel auch für die Wasserwirtschaft zur Verfügung, unter anderem für Vorsorgemaß-

nahmen im Bodenschutz zur Erhaltung der Filter- und Pufferfunktion der Böden und zum Schutz vor Schadstoffeinträgen in das Grundwasser.

Rechtzeitiges und überlegtes Handeln und die gemeinsame Erarbeitung erweiterungsfähiger Konzepte, trotz bestehender Unsicherheiten, ist das Gebot der Stunde nicht nur für die Wasserwirtschaft.

Literatur

IGKB (Hrsg.): Informationen rund um den Bodensee. Seespiegel, Nr. 26, e. kurz + co., 4 S., Stuttgart, 2007;

IPCC, Intergovernmental Panel on Climate Change: Fourth Assessment Report. Climate Change 2007: Synthesis Report. IPCC, Schweiz, 2007;

<http://www.ipcc.ch/ipccreports/ar4-syr.htm>

KLIWA: Klimaveränderungen und Konsequenzen für die Wasserwirtschaft. Unser Klima Verändert sich. Folgen – Ausmaß – Strategien. LUBW Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg, Bayerisches Landesamt für Umwelt (LfU) (Hrsg.), 18 S., Karlsruhe/München, 2006.

<http://www.kliwa.de/download/KLIWA.pdf>

http://www.lfu.bayern.de/wasser/forschung_und_projekte/index.htm

KLIWA: 3. KLIWA-Symposium am 25. und 26.10.2006 in Stuttgart - Fachvorträge: Klimaveränderungen und Konsequenzen für die Wasserwirtschaft.

Arbeitskreis KLIWA (Hrsg.), 260 S., Karlsruhe, 2007.

<http://www.kliwa.de/download/KLIWAHeft10.pdf>

Lazik, W.: Hochwasser- und Klimaschutz in Bayern. WasserWirtschaft, 10, S. 8-9, 2007.

LfUBayern, Bayerisches Landesamt für Umwelt (Hrsg.): Sonderthema: Klimaänderungsfaktoren bei Planungen für den Hochwasserschutz. Gewässerkundlicher Jahresbericht für Bayern, 5 S. 2005.

http://www.wasser.lfu.bayern.de/daten/mengen_qualitaet/jb/welcome.htm

LfU Bayern, Bayerisches Landesamt für Umwelt: Informationsdienst Überschwemmungsgefährdete Gebiete (IÜG), 2008;

<http://www.lfu.bayern.de/wasser/fachinformationen/iueg/index.htm>

TU München, Technische Universität München: Empfehlungen zum Anbau und zur Verwertung von Biomasse für die Energieerzeugung in Bayern aus naturschutzfachlicher und wasserwirtschaftlicher Sicht. Lehrstuhl für Strategie und Management der Landschaftsentwicklung, 19 S., München, 2007;

Wasser für die Land(wirt)schaft

Axel Bronstert, Fred F. Hattermann

Zusammenfassung

Die Folgen des rezenten Klimawandels für die Landwirtschaft und die Wasserwirtschaft können je nach Region und Sektor schwerwiegend sein und sollten im Sinne eines nachhaltigen Managements in der Ressourcenplanung berücksichtigt werden. Die Diskussion der Klimavariablen konzentriert sich zu Recht auf die möglichen Änderungen des Niederschlags, sowohl hinsichtlich dessen Menge, Intensität als auch Saisonalität. Hinzu kommt, dass in vielen Regionen, insbesondere in den semi-ariden und kontinentalen Gebieten, Änderungen in der Verdunstung einen ähnlich starken Einfluss auf den Landschaftswasserhaushalt haben. Diese können durch Änderungen im regionalen Energiehaushalt, also Änderungen in der Temperatur und der Strahlung, hervorgerufen werden. Während die Angaben über die zu erwartenden Änderungen für den Niederschlag für regionale Anwendungen noch relativ unsicher sind, sind die Angaben über die Temperatur robust.

Daraus lassen sich für den Landschaftswasserhaushalt wichtige Folgerungen ableiten:

- Durch die steigenden Temperaturen unter Szenarienbedingungen wird die Evapotranspiration stimuliert, und zwar weniger durch den direkten Energieinput als vielmehr durch die gesteigerte Vegetationsaktivität.
- Auch in Gebieten, in denen insgesamt der Niederschlag nicht abnimmt oder sogar leicht zunimmt, kann dadurch trotzdem das Wasserdargebot sinken.
- Wichtig sind saisonale Trends, insbesondere im Sommer kann aufgrund der verstärkten Transpiration Wasserknappheit auftreten.

1. Einführung

Im Rahmen des BMBF Förderschwerpunktes "Globaler Wandel des Wasserkreislaufes" befasst sich das Projekt GLOWA-Elbe dabei mit den Auswirkungen auf den Wasserhaushalt im Einzugsgebiet der Elbe (WECHSUNG 2005). Die Region ist von besonderem Interesse, da sie sich im Übergangsbereich von maritimen zu kontinentalen Klimaten befindet. Außerdem hat die Elbe von den großen Flusseinzugsgebieten Europas das zweitniedrigste Wasserdargebot pro Kopf (ca. 680 m³ Gebietsabfluss pro Kopf und Jahr, siehe Stanners & Bourdeau 1995).

2. Methoden

Es müssen verschiedene Randbedingungen berücksichtigt werden, um die regionale Verdunstung unter den Bedingungen des globalen Wandels abschätzen zu können. Die wichtigste ist naturgemäß das Klima. Daneben spielen aber auch Änderungen in der Landnutzung eine Rolle, insbesondere, wenn es um großmaßstäbliche Eingriffe geht. Beispiele sind hier der staatlich geförderte Waldumbau und der großflächige Anbau von Biokraftstoffen wie Mais und Raps. Dieses System wird dann durch geeignete und an die regionalen Bedingungen angepasste Computermodelle abstrahiert und damit simuliert.

Das Modellsystem SWIM ist ein zeitlich kontinuierlich arbeitendes, räumlich gegliedertes Einzugsgebietsmodell für die regionale Skala (KRYSAKOVA et al. 1998). Die Flächendisaggregation erfolgt in drei Ebenen (der in ihren geografischen Eigenschaften homogenen Hydrotopenebene, der aus den Hydrotopen zusammengesetzten Teileinzugsgebietsebene und der alles integrierenden Einzugsgebiete). Die unterste Ebene, die Hydrotopenebene, entsteht aus der Verschneidung verschiedener räumlicher Informationen (digitales Geländemodell, Teileinzugsgebiete, Bodenkarte, Landnutzung, Grundwasserflurabstand etc.). Sie spiegelt die in der Landschaft (oder den Daten) vorhandene Heterogenität flächenscharf wider. Die auf der Hydrotopenebene errechneten vertikalen und lateralen Wasser- und Stoffflüsse werden auf der Teileinzugsgebietsebene aggregiert und durch das Flusssystem zum Gebietsauslass des Einzugsgebietes weiterverschoben. Das hydrologische Modul in SWIM (Abbildung 1) umfasst vier Teilsysteme: die Bodenoberfläche, die Wurzelzone, den oberen und den unteren Grundwasserleiter und das Wasser im Vorfluter.

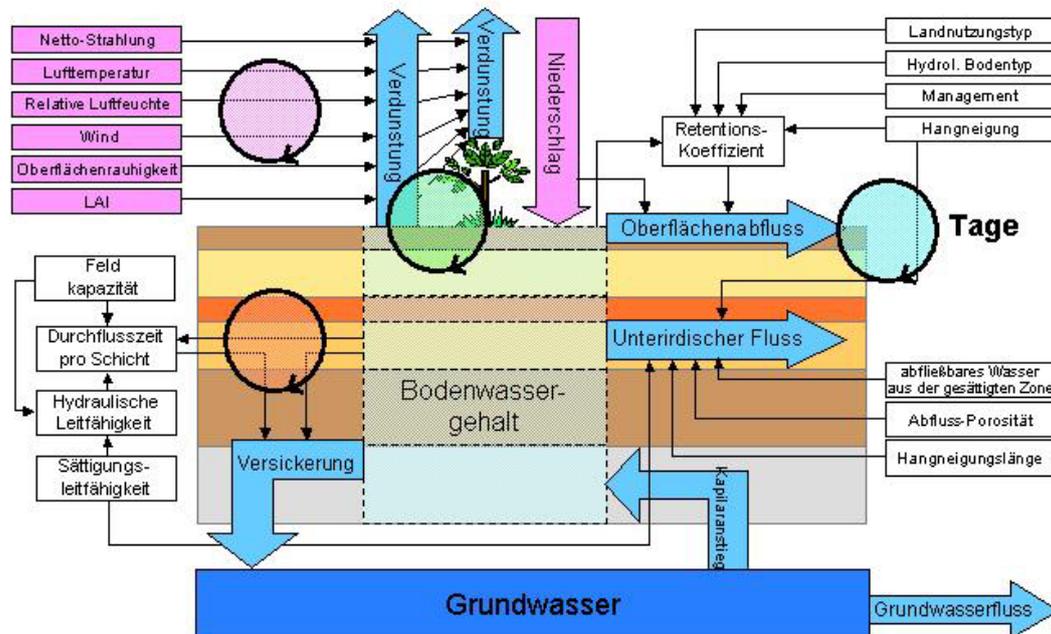


Abb. 1: Schematische Darstellung der in SWIM abgebildeten hydrologischen Prozesse.

Das Pflanzenwachstum wird auf der Basis eines vereinfachten EPIC-Ansatzes (Abbildung 2) berechnet (WILLIAMS et al. 1984). Dabei wird eine für die Region parametrisierte landwirtschaftliche Datenbasis benutzt, mit deren Hilfe verschiedene Kulturarten (Weizen, Gerste, Mais, Kartoffeln, Raps usw.) sowie auch natürliche Vegetationsbestände (Wald, Grasland) dynamisch auf Tagesbasis modelliert werden können. SWIM berechnet die Auswirkungen von Klima- und Landnutzungsänderungen (z.B. Kulturart, Bodenbearbeitungstechnologie) auf Evapotranspiration, Abfluss und Grundwasserneubildung sowie die Nährstoffsalden und -einträge in die Gewässer (KRYSAKOVA et al. 1998). Zur Verdunstungsberechnung stehen verschiedene Verfahren zur Verfügung, z.B. nach Penman-Monteith oder Turc-Ivanov. Zur der künftigen Klimabedingungen wurde mit dem empirisch-statistischen Klima-Downscaling-Verfahren STAR (GERSTENGARBE & WERNER 2005) für das Elbegebiet 100 Realisationen des regionalen Klimawandels die (meteorologische Randbedingung) erzeugt.

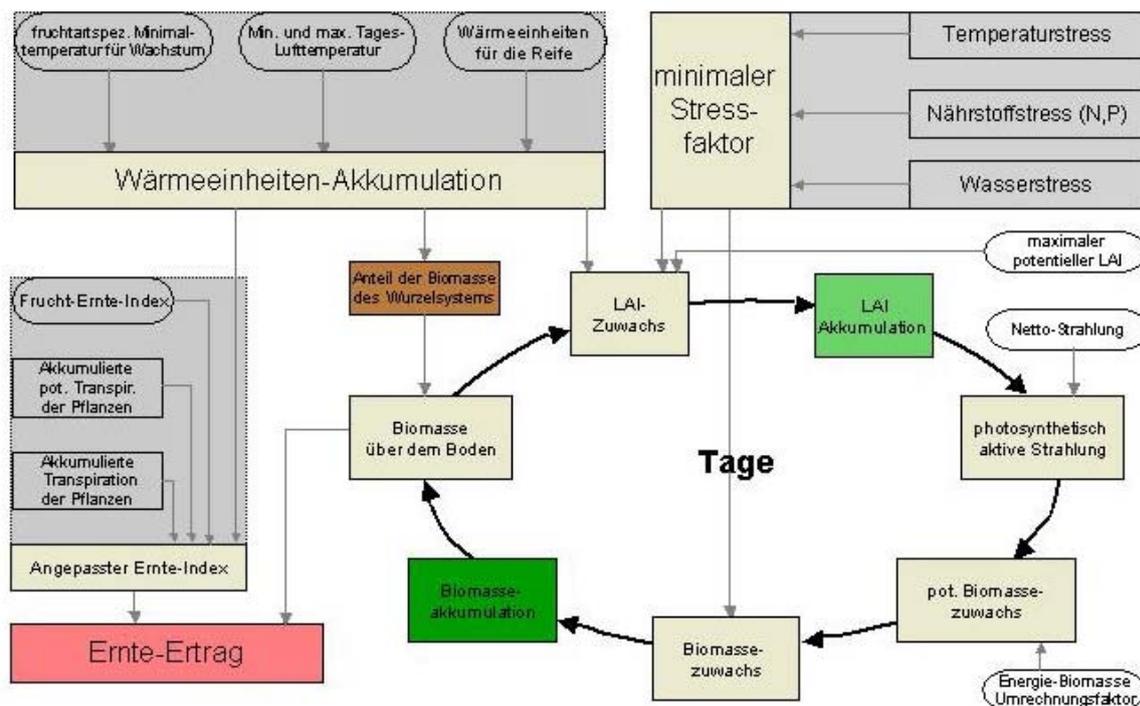


Abb. 2: Darstellung der in SWIM abgebildeten Pflanzenwachstumsprozesse.

3. Das Elbegebiet – Gebietsbeschreibung und Datenaufbereitung

Die langjährigen mittleren Niederschläge liegen für das Gesamtgebiet der Elbe bei ca. 715 mm, der deutsche Teil liegt mit ca. 687 mm etwas darunter. Die langjährigen mittleren Gesamtabflüsse der Elbe liegen bei 877 m³/s mit einem mittleren Zufluss aus dem tschechischen Teilgebiet von ca. 315 m³/s am Pegel Schöna. Hochwasserereignisse treten in der Elbe und ihren Hauptnebenflüssen zumeist im Winter und Frühjahr zur Zeit der Schneeschmelze auf (Regen-Schnee-Typ), Niedrigwasserabflüsse in den späten Sommermonaten (ATV-DVWK 2000). Die natürliche Abflusscharakteristik der Elbe und ihrer Nebenflüsse wird durch 273 Rückhaltebecken zum Hochwasserschutz und zur Trinkwassergewinnung reguliert. Insbesondere die östlichen Tieflandteileinzugsgebiete (Schwarze Elster, Spree und Havel) haben durch Maßnahmen zur Wasserstandsregulierung ihre natürliche Abflusscharakteristik fast vollständig verloren.

Alle räumlichen Daten (Landnutzungs- und Bodeninformationen, Grundwasserflurabstände und Teileinzugsgebietsgrenzen, das digitale Geländemodell etc.) wurden in ein einheitliches Rasterformat mit einer Zellengröße von 250 m überführt und dienen damit als Grundlage zur Abbildung der räumlichen Heterogenität in SWIM. Für die Modellierung des Ist-Zustandes standen meteorologische Daten aus insgesamt 91 Klimastationen und 740 Niederschlagsstationen zur Verfügung. Die geringe Anzahl an Klimastationen bedeutet, dass für die Berechnung der Verdunstung wichtige Parameter wie die Temperatur und die Strahlung nur in relativ geringer räumlicher Dichte vorhanden waren.

4. Ergebnisse

4.1 Modellkalibrierung und -validierung

SWIM wurde in einem ersten Schritt für 12 möglichst durch den Menschen unbeeinflussten Teilgebiete kalibriert, anschließend erfolgte die Modelleinstellung für das Gesamtgebiet und die Simulation der Abflussdynamik für den letzten tideunbeeinflussten Pegel der Elbe. Die Ergebnisse (Abb. 3) zeigen klar, dass die Abflüsse eine Saisonalität aufweisen, die durch die Temperaturbedingungen (und Strahlung) bewirkt wird nicht etwa durch den Niederschlag.

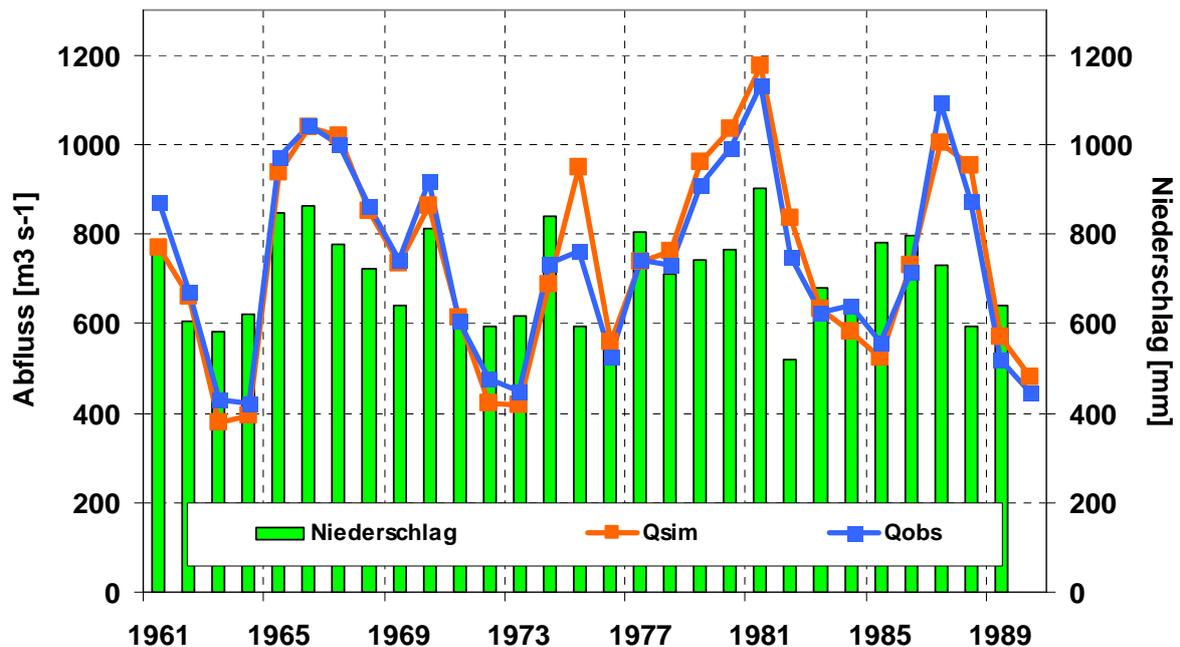


Abb. 3: Jährlicher mittlerer Niederschlag im Elbeinzugsgebiet (Pegel Neu Darchau) und der simulierte und beobachtete mittlere tägliche Abfluss pro Jahr.

4.2 Szenarienergebnisse

Abbildung 4 zeigt den mittleren jährlichen Szenarienniederschlag und dessen Streuung integral für das Einzugsgebiet der Elbe für 100 Realisationen der regionalen künftigen Klimabedingungen. Diese Szenarien projektieren demnach für den Niederschlag insgesamt nur einen geringen Rückgang über die Szenarienperiode. Abbildung 5 zeigt dagegen den Trend im Abfluss als Vergleich des täglichen mittleren Abflusses während der Referenzperiode 1961–90 und der hundert Realisationen für die Szenarienperiode 2044–53. Man erkennt deutlich, dass im Sommer praktisch alle simulierten Szenarienabflüsse unter dem Referenzabfluss liegen. Außerdem verschiebt sich der Spitzenabfluss mehr in den Winter, da der Schneespeicher aufgrund der höheren Temperaturen abnimmt.

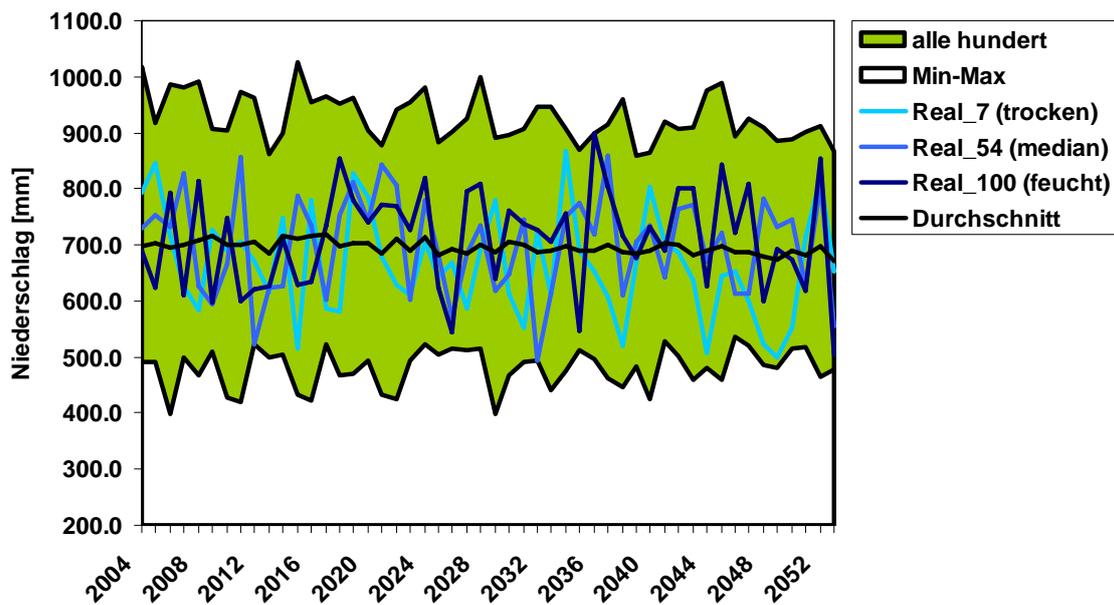


Abb. 4: Szenarientrend des mittleren jährlichen Niederschlages im Einzugsgebiet der Elbe.

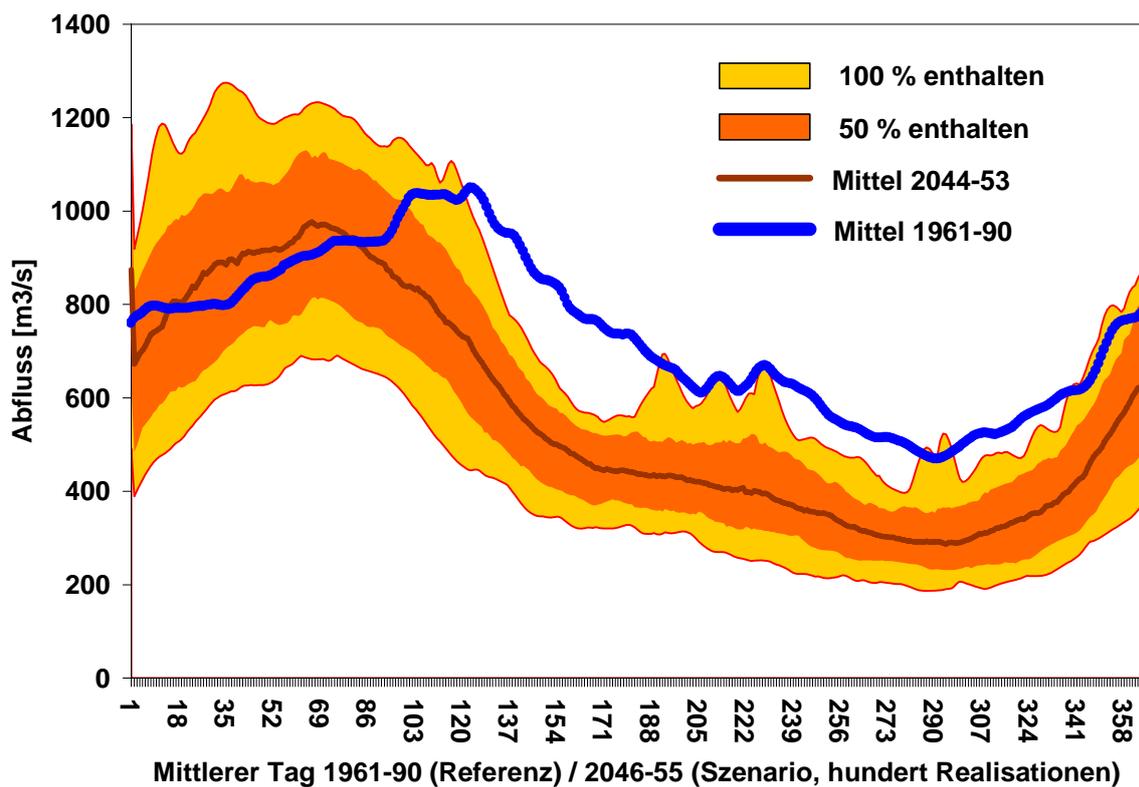


Abb.5: Mittlerer täglicher Abfluss der Referenzperiode für die 100 Szenarienrealisationen.

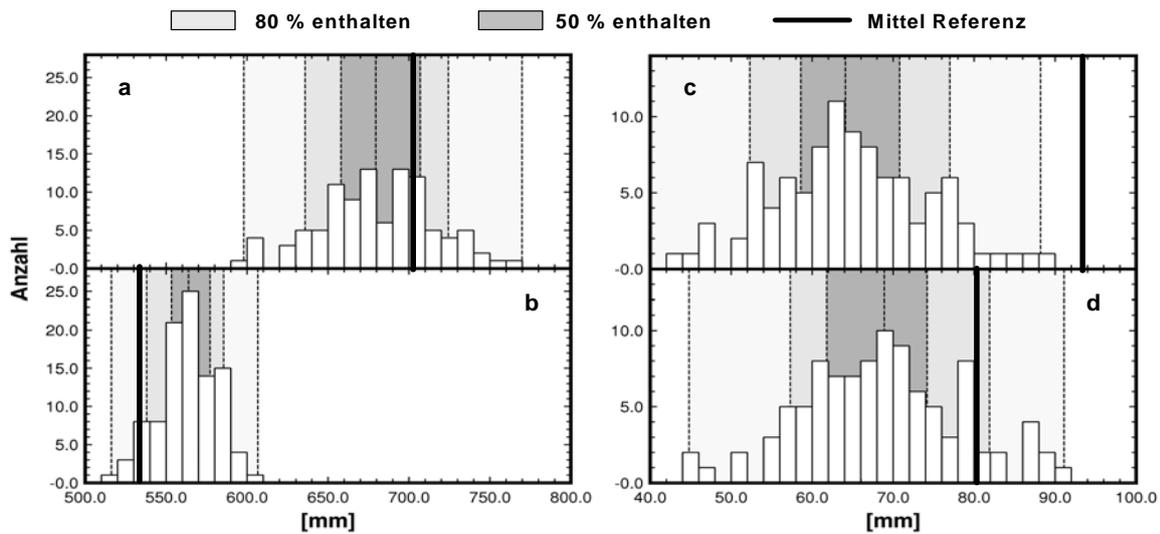


Abb. 6: Mittl. jährlicher Niederschlag (a), mittl. jährliche Verdunstung (b), mittl. jährliche Grundwasserneubildung (c) und mittl. jährlicher direkter Abfluss (d) während der Referenzperiode (dicke Linie) und bei Szenarienbedingungen (Histogramme der 100 Realisationen).

Der Grund für die relativ starke Änderung im Abfluss wird deutlich, wenn man in Abbildung 6 und Tabelle 1 den Trend der hydrologischen Größen betrachtet: Während der Niederschlag nur gering zurückgeht (im Mittel der hundert Realisationen um 20.9 mm), steigt die Verdunstung relativ stark an (im Mittel der hundert Realisationen um 23.7 mm). Dadurch kommt es zu einem relativ ausgeprägten Rückgang der Grundwasserneubildung und einem ebenfalls relativ starken Rückgang des direkten Abflusses (Oberflächen- und Zwischenabfluss).

Tab. 1: Mittlerer jährlicher Niederschlag, mittlere jährliche Verdunstung, mittlere jährliche Grundwasserneubildung und mittlerer jährlicher direkter Abfluss während der Referenzperiode (1961–90) und unter Szenarienbedingungen (Mittelwert der 100 Realisationen, 2044–53).

	Referenz	Szenario	Differenz
Niederschlag	701.5 mm	680.6 mm	20.9 mm
Aktuelle Evapotranspiration	539.4 mm	563.1 mm	-23.7 mm
Grundwasserneubildung	93.8 mm	64.5 mm	29.3 mm
Direktabfluss	81.7 mm	68.5 mm	13.2 mm

Wie wichtig die Berücksichtigung der Verdunstung zeigt auch Abbildung 7. Dargestellt sind die simulierten Auswirkungen eines Landnutzungsszenarios auf die Gebietsverdunstung und Abflussbildung für das Elbeinzugsgebiet. Die grundlegende Annahme des Szenarios ist es, dass unter Liberalisierung der Agrarpreise große Flächen des Elbeinzugsgebietes nicht mehr kostendeckend für Marktfruchtanbau genutzt werden können. Diese Gebiete werden allerdings im Szenario weiter extensiv landwirtschaftlich genutzt, so dass aufgrund des weniger intensiven Anbaus die Gesamtverdunstung besonders im Sommer sinkt. Würde man allerdings diese Flächen aufforsten, würde sich ein anderes Bild zeigen, die Verdunstung eventuell sogar steigen. Die Auswirkungen können modellbasiert für den Waldumbau gezeigt

werden: Der Anstieg des Anteiles von Laubwald auf Kosten des Nadelwaldanteiles erniedrigt die Interzeption im Winter, und die Grundwasserneubildung kann erhöht werden. Nicht berücksichtigt in dieser Analyse sind allerdings Rückkopplungseffekte auf das regionale Klima.

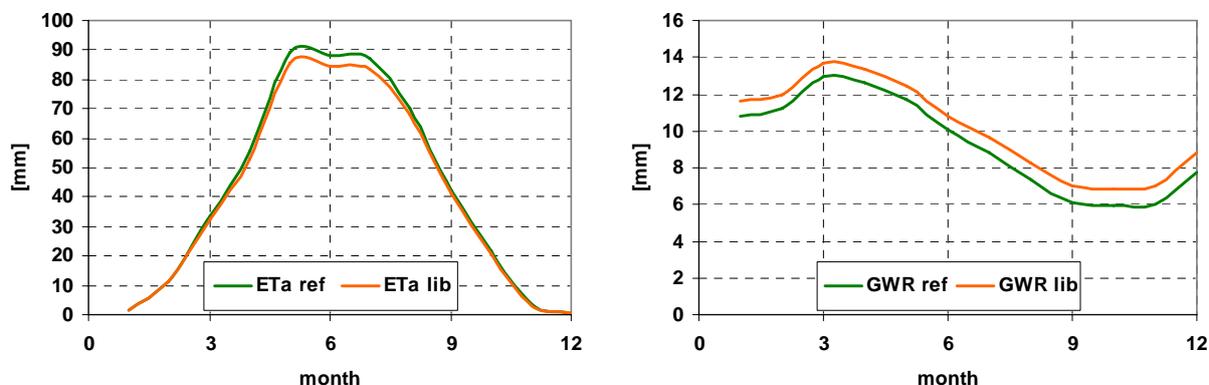


Abb. 7: Verdunstung und Grundwasserneubildung als Ergebnis von Landnutzungsszenarien (Liberalisierung des Agrarmarktes bzw. Anstieg der Brachflächen im Elbeinzugsgebiet).

5. Fazit

Sowohl für die wasserwirtschaftliche Bewirtschaftung von Flusseingebieten als auch für die Landwirtschaftliche Planung sollten sich ändernde klimatische Randbedingungen berücksichtigt werden. Dabei zeigt sich, dass insbesondere in eher trockenen Regionen nicht nur Änderungen in den Niederschlägen von Bedeutung sind, sondern insbesondere auch Änderungen in der Verdunstung und den Grundwasserverhältnissen (siehe z.B. BRONSTERT et al. 2003, HATTERMANN et al. 2006). Im Falle des Elbegebietes zeigen die Simulationen, dass Trends in der Verdunstung sogar der dominierende Einfluss sein können. Um auch den Einfluss der zu erwartenden Änderungen des Niederschlags beurteilen zu können, sind unbedingt auf dem neustens Stand der Wissenschaft befindliche und für die konkrete Fragestellung nutzbare regionale Klimaszenarien erforderlich (BRONSTERT et al, 2007).

Obwohl die Informationen über die zu erwartenden Niederschlagsbedingungen noch recht unsicher sind, können doch heute schon wichtige Rückschlüsse auf die mittlere und saisonale Wasserbilanz unter geänderten klimatischen Bedingungen gezogen werden. Dies ist insbesondere darauf zurückzuführen, weil die Informationen über die künftigen Temperaturbedingungen recht verlässlich sind, und sich davon recht robust Simulationsergebnisse über die zu erwartenden Verdunstungsraten simulieren lassen. Bei einem im Mitteleuropa m Jahresverlauf eher gleichverteiltem Niederschlagsregime wird die saisonale Schwankung der Wasserverfügbarkeit hauptsächlich durch die Temperaturbedingungen verursacht. Die zu erwartenden Klimaänderungen haben daher auch einen besonders wichtigen Effekt für Bedingungen unter Wasserknappheit. Dies gilt sowohl für Wassermangel im Raum (dies sind in Deutschland z.B. die Niederschlagsarmen Gebiete im Leipziger Becken, im Oderbruch, Sachsen-Anhalt, oder in der Oberrheinebene) als auch für Wassermangel in der Zeit (also im Sommer und/oder während langer Trockenperioden). Besonders kritische Verhältnisse sind bei einer möglichen Überlagerung des Wassermangels in Raum- und Zeit zu erwarten.

Wie kann nun zu diesen verschärften Wasserhaushaltbedingungen eine Anpassung erfolgen?

- Die Landwirtschaft könnte sicherlich in Regionen gehäuft auftretenden Wassermangels vermehrt auf Bewässerungsmöglichkeiten zurückgreifen. Dies bedeutet aber, dass sich der „Wettbewerb“ um die Wasserressourcen, z.B. mit dem Bedarf für Erholungszwecke, Schifffahrt, oder natürliche Feuchtgebiete erhöhen wird. Zudem ist darauf zu achten, dass Bewässerung einen beachtlichen Investitionsaufwand bedeutet und dass die allseits gewünschten Wasser sparenden Techniken hier besonders teuer sind.
- Die Wasserwirtschaft wird sich darauf einzustellen haben, dass besonders in Trockenregionen die Versorgungssicherheit von Stauanlagen für verschiedene Zwecke (z.B. Trinkwasser, Bewässerung, Wasserkraft) sich reduziert (siehe Mimikou et al, 1991). Dies kann bedeuten, dass man die verminderte Sicherheit akzeptiert und damit häufiger mit Versorgungsengpässen oder gar –ausfällen zu rechnen ist. Oder es wird die Reduktion bestimmter Versorgungsaspekte angestrebt, bzw. das „Wassersparen“ in einzelnen Sektoren der Wasserwirtschaft zur Leitlinie erhoben. Auch dies ist aber nur mittels höherer Ausgaben zu erreichen.
- Die Binnenschifffahrt wird sich in Regionen und Jahreszeiten der Wasserknappheit auf häufigere Trockenwetterabflussbedingungen einstellen müssen. Sei es durch geringere Tauchtiefen der Schiffe oder durch andere Alternativen.

Literatur

- ATV-DVWK Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft (2000): Die Elbe und ihre Nebenflüsse. Belastung und Trends, Bewertung, Perspektiven. Hennef,
- BRONSTERT, A., KOLOKOTRONIS, V., SCHWANDT, D. & STRAUB, H. (2007): Comparison and evaluation of regional climate scenarios for hydrological impact analysis: General scheme and application example. *Int. J. of Climatology*, 27(12), 1579-1594.
- BRONSTERT, A., W. LAHMER & V. KRYSANOVA, (2003): Klimaänderung in Brandenburg und Folgen für den Wasserhaushalt. *Naturschutz und Landschaftspflege in Brandenburg* 12, H. 3, S. 72-79,
- GERSTENGARBE, F.W. & P.C. WERNER (2005): Simulationsergebnisse des regionalen Klimamodells STAR. In: WECHSUNG F, BECKER A & GRÄFE, P (Editoren) (2005): Integrierte Analyse der Auswirkungen des globalen Wandels auf Wasser, Umwelt und Gesellschaft im Elbegebiet, PIK-Report 95.
- HATTERMANN, F.F., V. KRYSANOVA, A. HABECK and A. BRONSTERT (2006): Integrating wetlands and riparian zones in river basin modelling. *Ecological Modelling* 199, H. 4, S. 379-392,
- KRYSANOVA, V., D.-I. MÜLLER-WOHLFEIL & A. BECKER (1998): Development and test of a spatially distributed hydrological/water quality model for mesoscale watersheds. *Ecological Modelling* 106, H. 2-3, S. 261–289.
- MIMIKOU, M., P.S. HADJISAVVA, Y.S. KOUVOPOULOS, & H. AFRATEOS (1991): Regional Climate Change Impacts II. Impacts on Water Management Works. *Hydrological Sciences Journal*, Vol. 36, pp. 259-270.

- STANNERS, D. & P. Bourdeau (1995): Europe's Environment: the Dobris Assessment. Technical report, European Environment Agency, Office for Official Publications of the European Communities,
- WECHSUNG, F. (2005): Herausforderungen des globalen Wandels für die Elbe-Region. In: WECHSUNG, F. et al (Editoren) (2005): Auswirkungen des globalen Wandels auf Wasser, Umwelt und Gesellschaft im Elbegebiet. Weißensee Verlag Ökologie.
- WILLIAMS, J.R., K.G. RENARD & P.T. DYKE (1984): EPIC - a new model for assessing erosion's effect on soil productivity. Journal of Soil and Water Conservation 38, H. 5, S. 381-383,

Auswirkungen des Klimawandels auf die Trinkwasserversorgung

Frieder Haakh

Zusammenfassung

Der Klimawandel wird gerade auch für die Anforderungen einer weiterhin sicheren Wasserversorgung belastbare Prognosen zur Dargebotsabschätzung erfordern. Eine Vernetzung der Datenbestände der Akteure ist sinnvoll. Für die Versorgungssysteme sind im Hinblick auf steigende Spitzenfaktoren die Reserven zu ermitteln. Ebenfalls werden Prognosen zur Veränderung der Rohwasserqualität zu erarbeiten sein. Für die quantitativ sichere Wasserversorgung müssen die Wasserrechte für die Spitzenabdeckung und der Vorrang der öffentlichen Trinkwasserversorgung gegenüber konkurrierenden Nutzungen gesichert werden. Der energieeffizientesten Wasserversorgung der ortsnahen Wasserversorgung ist Vorrang einzuräumen. Weiterhin sind Modelle zur Bewirtschaftung der Rohwasserressourcen notwendig. Zum besseren Ressourcenschutz müssen für die Landwirtschaft insbesondere in Wasserschutzgebieten trockenresistentere Sorten für die Hauptkulturen aber auch angepasste Fruchtfolgen entwickelt werden. Besonderes Augenmerk erfordert die sichere Stromversorgung zur Spitzenbereitstellung. Von technischer Seite sind Betriebskonzepte für höhere Rohwassertemperaturen zu entwickeln. Besonderes Augenmerk gilt den steigenden Spitzenfaktoren und der Versorgungssicherheit. Diese ist durch eine weitere Vernetzung durch Verbund statt Insellösungen und häuslicher Grauwassernutzung zu erhöhen.

1. Einleitung

Klimawandel ist nichts Neues. Seit je her waren Anpassungsstrategien an den Klimawandel notwendig. Spätestens jedoch seit dem Jahrhundertsommer 2003 ist jedem klar geworden, dass unser Klima aus den Fugen geraten ist und eine Folge davon war, dass die Sicherheit und Zuverlässigkeit der öffentlichen Trinkwasserversorgung wieder ins Bewusstsein der Bevölkerung gerückt ist.

Im folgenden Beitrag soll darauf eingegangen werden, wo bei der Trinkwasserversorgung die Knackpunkte beim Klimawandel, gerade auch im Fokus Wasserdargebot, Wasserqualität und Versorgungssicherheit, zu sehen sind. Dies soll exemplarisch am Beispiel der Landeswasserversorgung, einem der großen Fernwasserversorger in Deutschland aufgearbeitet werden.

Die Landeswasserversorgung ist die älteste Fernversorgung in Deutschland, sie schöpft aus 5 voneinander unabhängigen Ressourcen etwa 90 – 100 Millionen m³ Rohwasser zur Versorgung von etwa 2,7 Millionen Einwohnern im Verbandsgebiet. Eine unmittelbare Betroffenheit durch den Klimawandel ist bereits heute erkennbar und auf mehreren Ebenen gegeben. Bereits seit Jahrzehnten ist die trendbehaftete Entwicklung zu höheren Temperaturen und Winterniederschlägen zu beobachten.

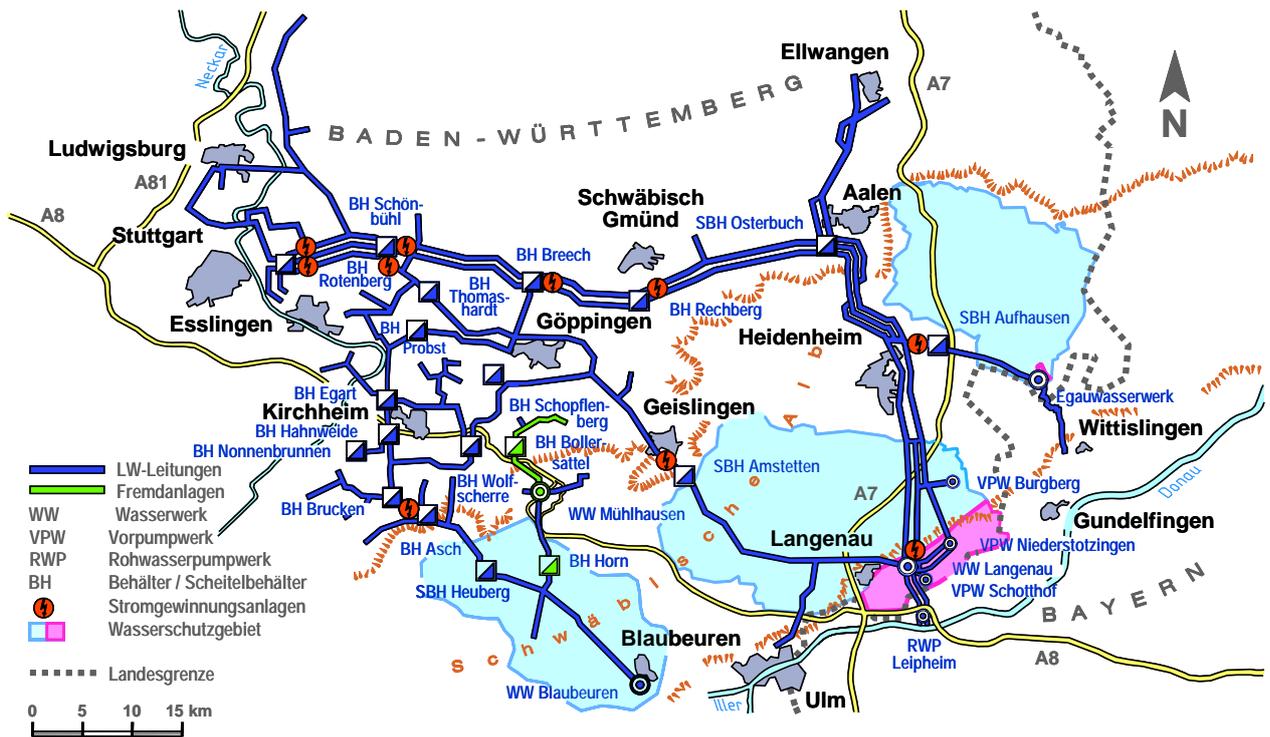


Abb. 1: Die Anlagen und Wasserschutzgebiete der Landeswasserversorgung

2. Klimawandel – Was ändert sich?

Prognosen zum Klimawandel für Baden-Württemberg ergeben, dass die Summe des Jahresniederschlags konstant bleibt, es aber zu einer Verschiebung hin zu höheren Winterniederschlägen und abnehmenden Sommerniederschlägen kommt.

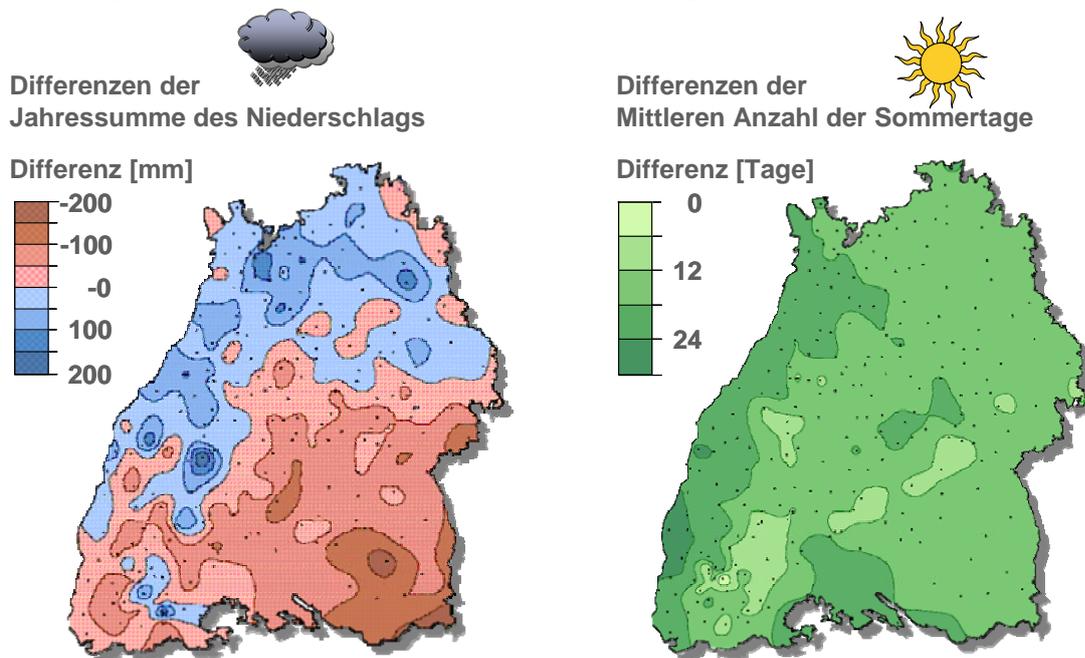


Abb. 2: Auswirkungen des Klimawandels in Baden-Württemberg- Vergleich der Perioden 2046/2055 und 1951/2000

Einhergehend wird die Anzahl der Sommertage (Tage mit mehr als 25° Temperatur) um etwa 20 zunehmen, die Zahl der heißen Tage soll sich verdoppeln. Allerdings ist von einer räumlich differenzierten Änderung der für die Trinkwasserversorgung relevanten Größe, der Grundwasserneubildung, auszugehen.

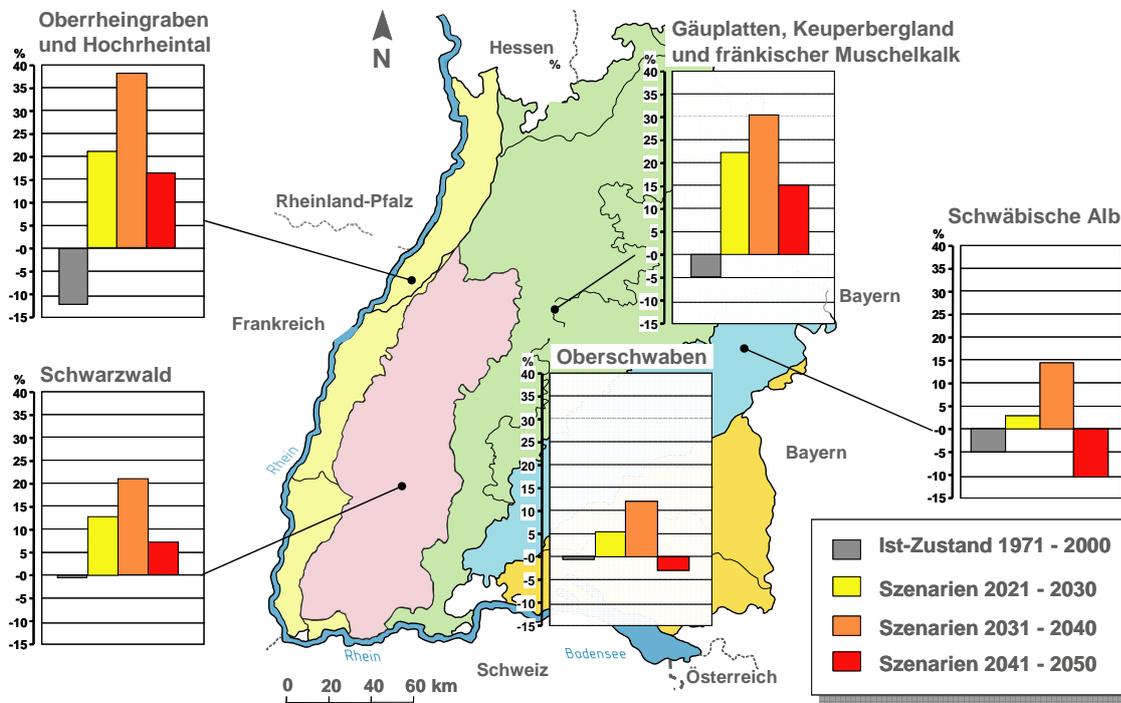


Abb. 3: Änderung der regionenspezifischen Grundwasserneubildung gegenüber dem Ist-Zustand

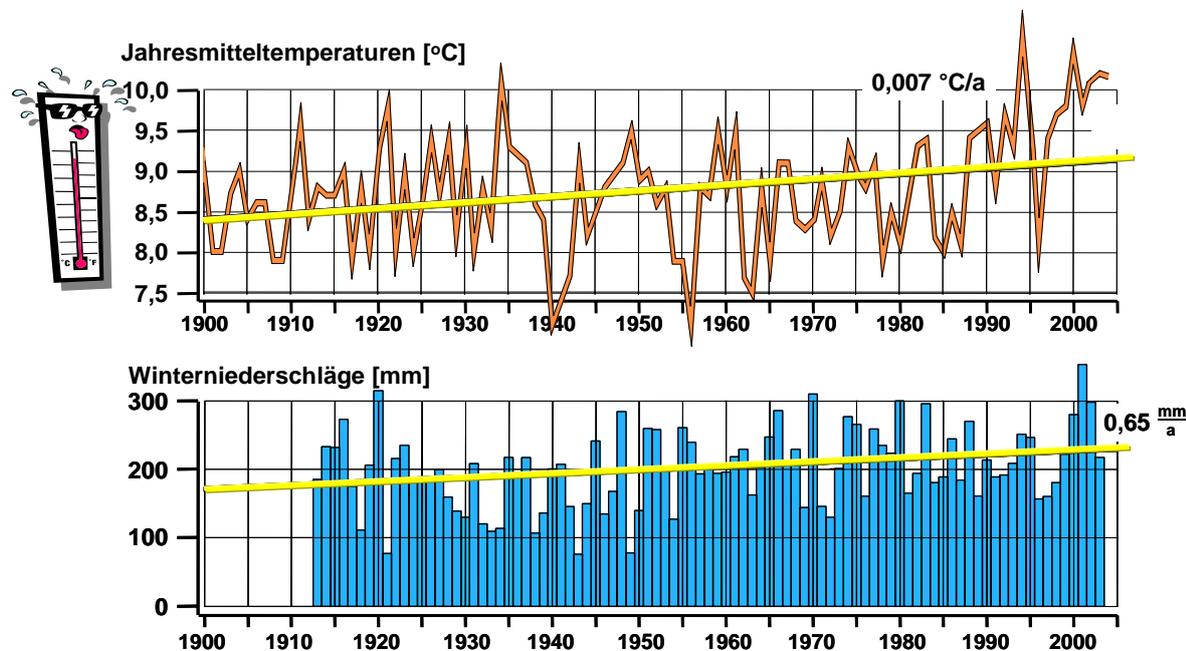


Abb. 4: Entwicklung der Jahresmitteltemperaturen Echterdingen und der Winterniederschläge Niederstötzingen

Hinsichtlich der klimatischen Entwicklungen im Versorgungsgebiet der Landeswasserversorgung ist insbesondere davon auszugehen, dass durch den Klimawandel:

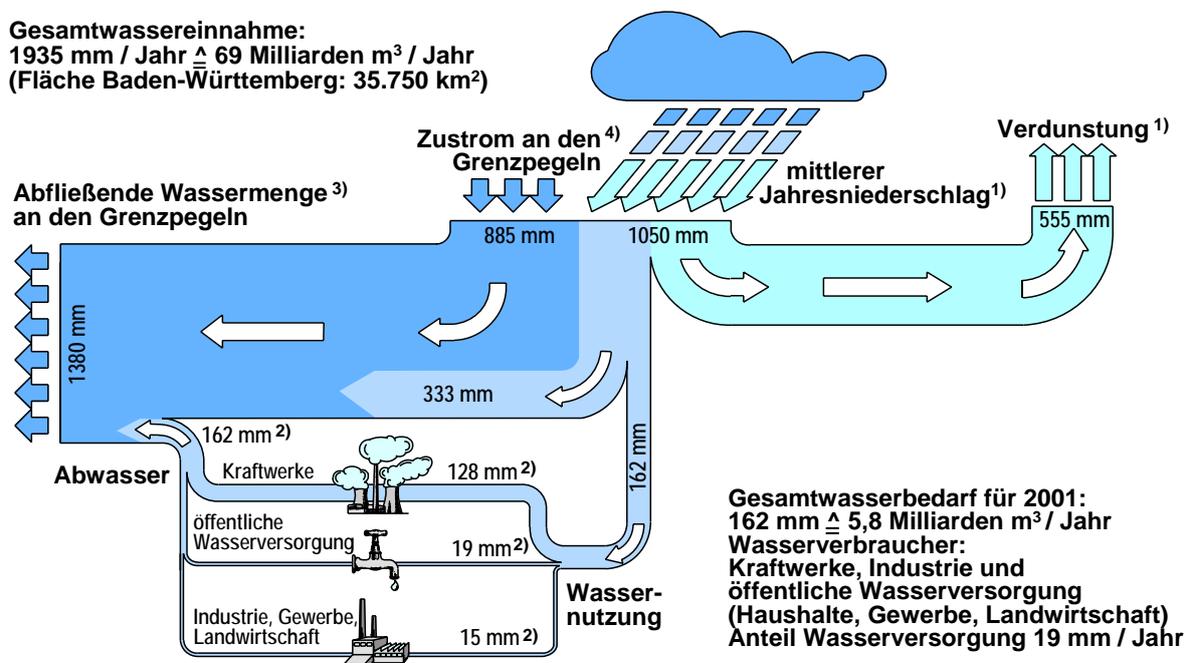
- Frequenz und Intensität von meteorologischen Extremereignissen zunehmen,
- sich die sommerliche Wachstumsperiode ausdehnt,
- bis zu 25 Sommertage mehr auftreten und sich die Zahl der heißen Tage verdoppelt,
- die Jahresniederschläge konstant sind, die Winterniederschläge jedoch zunehmen.

Ein kurzes Zwischen-Fazit zum Zahlengerüst stellt sich wie folgt dar: Die Frequenz und Intensität von Extremereignissen wird zunehmen. Das bedeutet auch eine Verlängerung der sommerlichen Wachstumsperiode. Es kommt zum erwähnten Anstieg der Jahrestemperatur, wohingegen die Jahresniederschläge konstant sind, aber mit der Verschiebung zu mehr Winterniederschlägen und einer Abnahme der Sommerniederschläge, was Auswirkungen auf die Grundwasserneubildung hat.

3. Auswirkungen auf das Dargebot

In Baden-Württemberg wird, bezogen auf die Gesamtbilanz, nur 1 % des Gesamtdargebots (1.935 mm) für die öffentliche Trinkwasserversorgung genutzt (19 mm).

Etwa 70 % des Trinkwassers wird aus Grundwasser gewonnen. Das Grundwasserdargebot ist natürlichen Schwankungen der Neubildung unterworfen, die durch den Klimawandel, insbesondere bei Jahren mit negativer klimatischer Wasserbilanz wesentlich verschärft werden.



1) Wasser- und Bodenatlas 2004 2) Statistisches Landesamt 2001 3) Gewässerkundliches Jahrbuch 4) Differenzberechnung

Abb. 5: Wasserbilanz von Baden-Württemberg

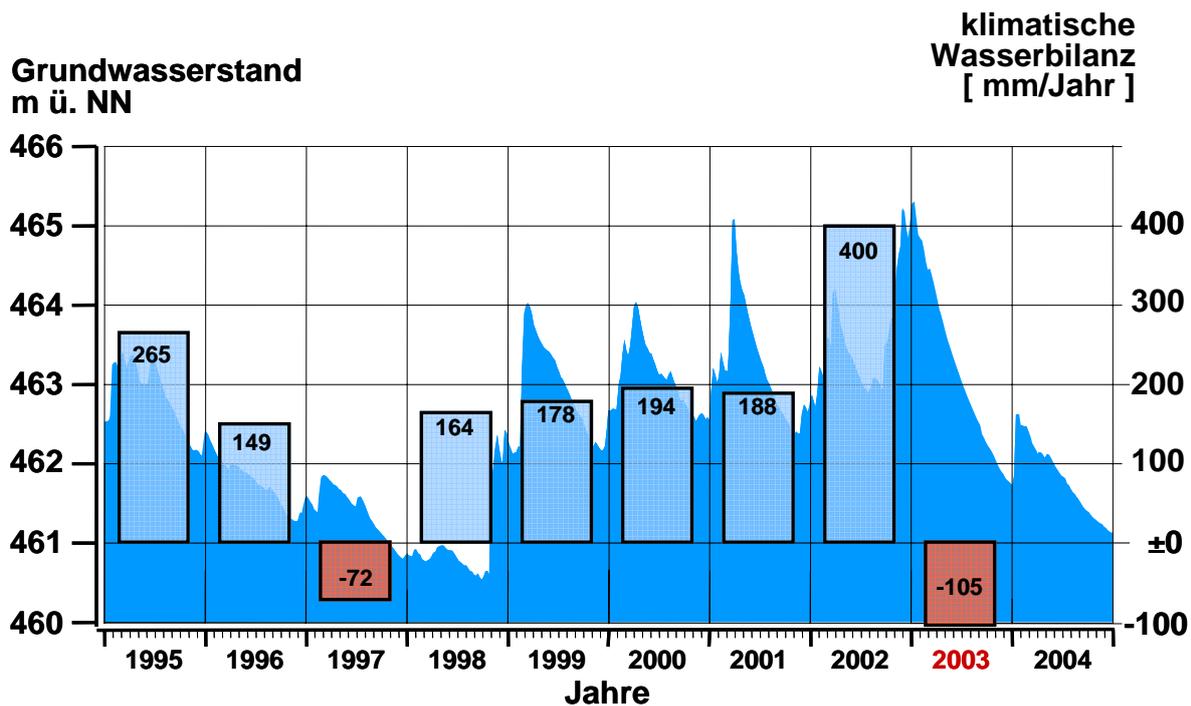


Abb. 6: Klimatische Wasserbilanz und Karstgrundwasserganglinie Langenau-Simontal 1995 - 2004

So haben sich die Grundwasservorräte während des Extremjahres 2003 aufgrund der negativen klimatischen Wasserbilanz des Jahres von überwiegend überdurchschnittlichen zu deutlich unterdurchschnittlichen Werten entwickelt.

Aber nicht nur Niedrigwasserverhältnisse kennzeichnen die Auswirkungen auf das Dargebot der öffentlichen Trinkwasserversorgung, auch die zunehmende Häufung von Hochwässern beeinflusst das qualitätsabhängige Rohwasserdargebot. Insbesondere bei Wassergewinnungsanlagen aus Oberflächengewässern kann dies zu zusätzlichen Problemen führen.

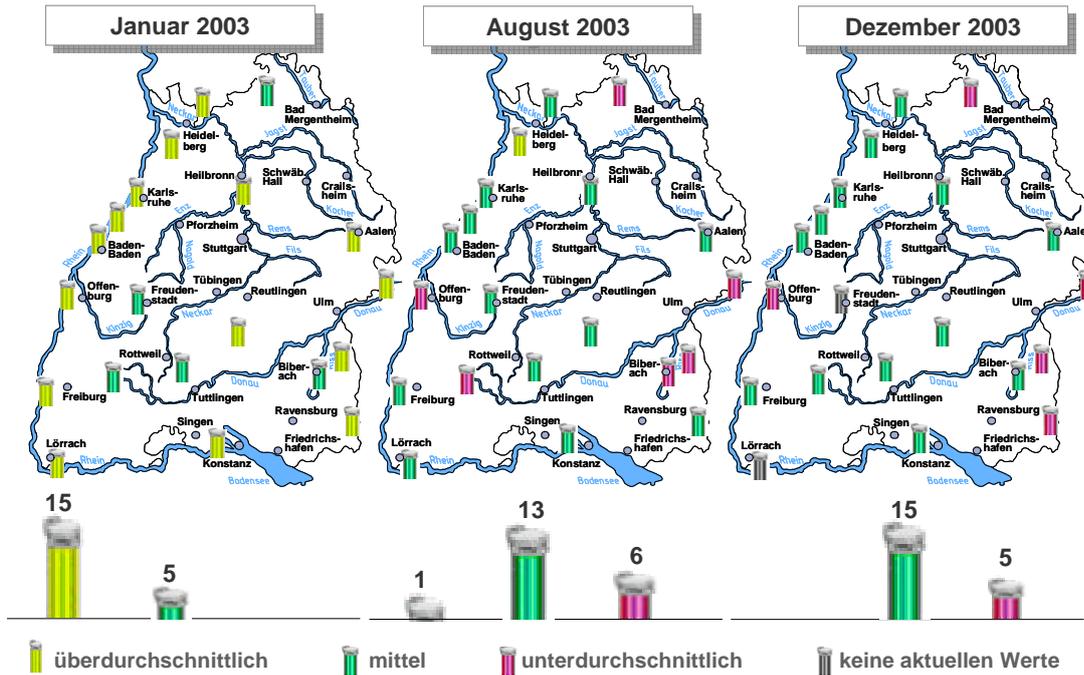


Abb. 7: Veränderung der Grundwasserstände in Baden-Württemberg im Jahr 2003 [Quelle: LUBW 2006]

Dargebotsseitig führt der Klimawandel somit bereits heute zur Häufung von Jahren mit negativer klimatischer Wasserbilanz, stärkeren Schwankungen der Grundwasserstände, die längere Erholungsphasen benötigen, steileren Gradienten der hydrologischen Größen und bei den Fließgewässern (Donau, Egau) damit zusammenhängend zur qualitätsbedingten eingeschränkten Verfügbarkeit.

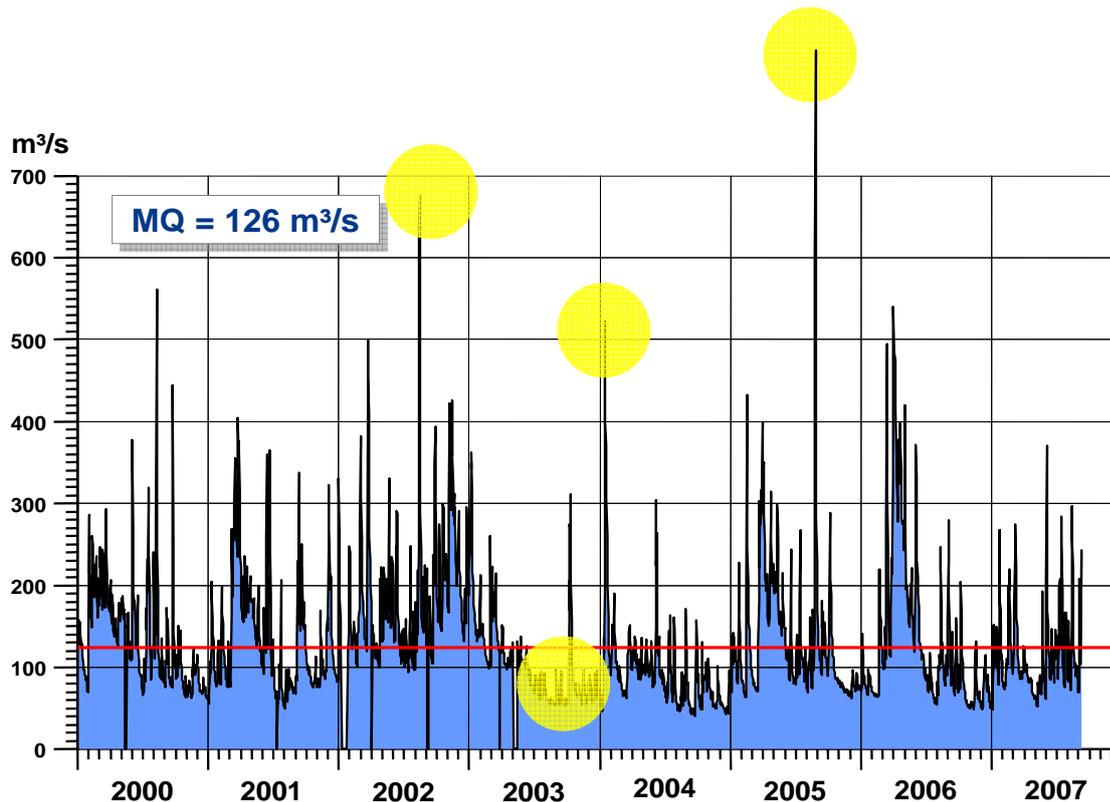


Abb. 8: Donauabfluss am Pegel Neu-Ulm Bad Held 2000 – 2007: - zunehmende Extremereignisse

4. Auswirkungen auf die Trinkwasserversorgung

Während der Hitzeperioden rückt das Thema der Trinkwasserversorgung regelmäßig in den Fokus des öffentlichen Interesses. Es wird „Wasserknappheit“ befürchtet und medial als Wort geredet.

Hinsichtlich der Versorgung sind in diesem Zusammenhang nun zwei gegenläufige Entwicklungen zu unterscheiden. Zum einen die langfristige durchschnittliche Versorgung, zum anderen die Spitzenversorgung. Weiterhin ist die Versorgungsstruktur von Bedeutung. In Baden-Württemberg erfüllen hier die 4 großen Fernwasserzweckverbände die wichtige Aufgabe des überregionalen Ausgleichs. Es muss an dieser Stelle ganz klar hervorgehoben werden, dass die gut funktionierende Wasserversorgung in Baden-Württemberg nur durch die überregionale Wasserversorgung gewährleistet werden kann.



Abb. 9: Der „Jahrhundertsommer“ 2003 im Pressespiegel

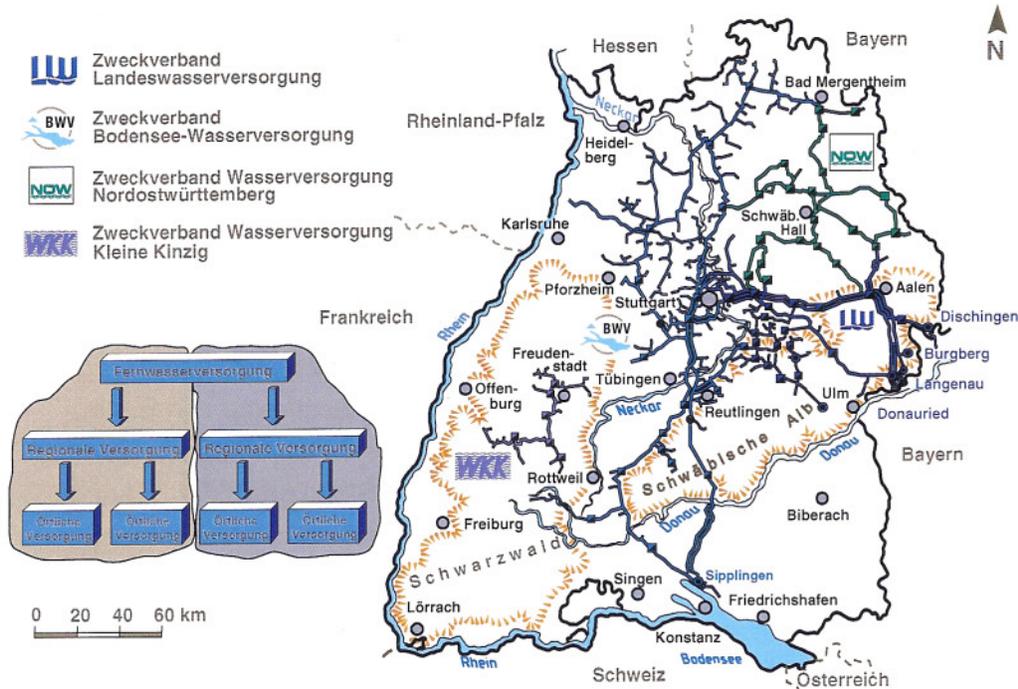


Abb. 10: Fernwasserversorgungssysteme in Baden-Württemberg

Gerade aus diesem Grund ist die Verbundstruktur gut ausgebaut, es gibt allerdings noch Gemeinden, die nur über Eigenwasser ohne Verbundmöglichkeiten verfügen. Hier haben sich auch im Jahr 2003 vereinzelt Versorgungsprobleme aufgetan.

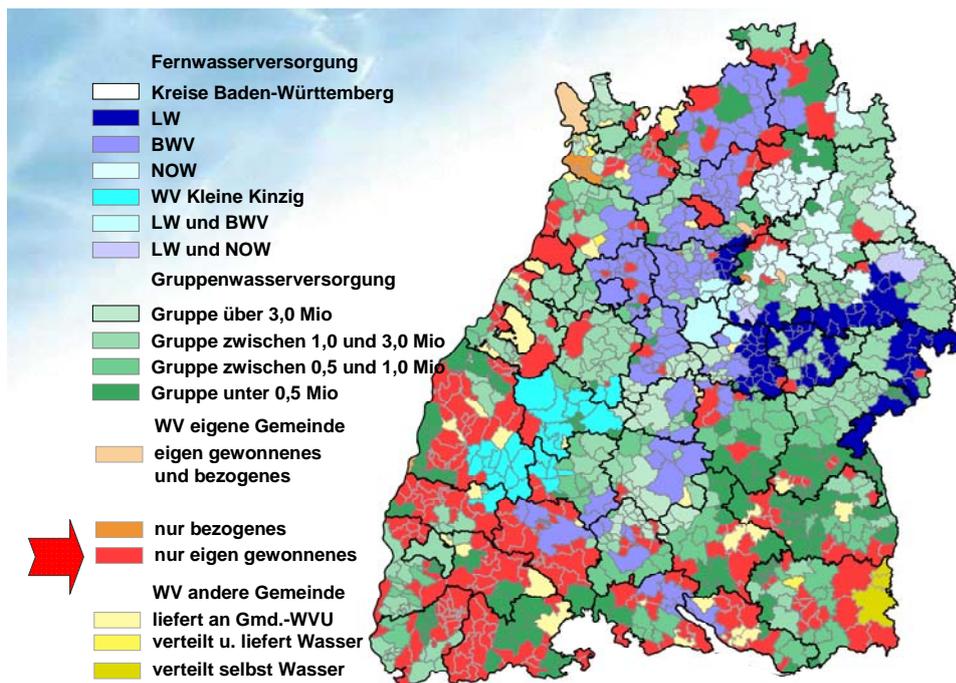


Abb. 11: Wasserbereitstellungsstruktur für Städte und Gemeinden in Baden-Württemberg [Quelle: Statistisches Landesamt Baden-Württemberg]

Die Auswirkungen extremer Hitzeperioden auf die Trinkwasserbereitstellung können exemplarisch anhand der Daten des Jahres 2003 nachvollzogen werden. Bei der Landeswasserversorgung wurde im August ein Spitzenfaktor von 1,47 und mit 413.081 Tageskubikmetern der absolute Spitzenwert in der über 90-jährigen Unternehmensgeschichte erreicht.

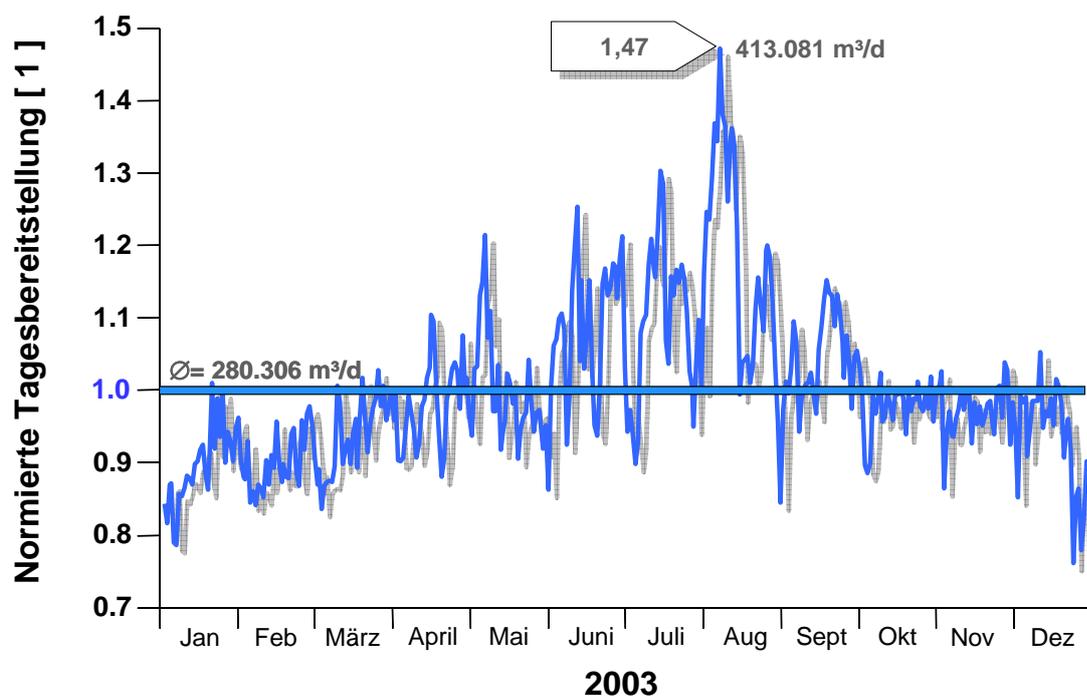


Abb. 12: Normierte Tagesbereitstellung der Landeswasserversorgung im Jahr 2003

Bemerkenswert ist, dass nach der Hitzeperiode die Bereitstellung auf einem höheren Niveau verbleibt. Dies ist ein sicheres Indiz, dass örtliche Vorkommen nach der Stressperiode erschöpft waren und innerhalb des Verbundes auf die Fernversorgung umgeschichtet wurde.

Bemerkenswert ist auch, dass dezentrale Grauwassernutzungsanlagen bei längeren Hitzeperioden keinen Beitrag zur Minderung des Spitzenbedarfs zu leisten vermögen. In diesem Zusammenhang wird der ökonomische und ökologische Unsinn dezentraler „Grauwasseranlagen“ besonders deutlich (BDEW 2007).

Tendenziell ist somit eine Verschärfung bei der Spitzenbereitstellung bei gleichzeitig rückläufiger durchschnittlicher Bereitstellung im Versorgungsgebiet der Landeswasserversorgung feststellbar. Dies gilt sowohl für die relativen Zahlen (z. B. Spitzenfaktor) als auch für die absoluten Zahlen (z. B. Tagesbereitstellung).

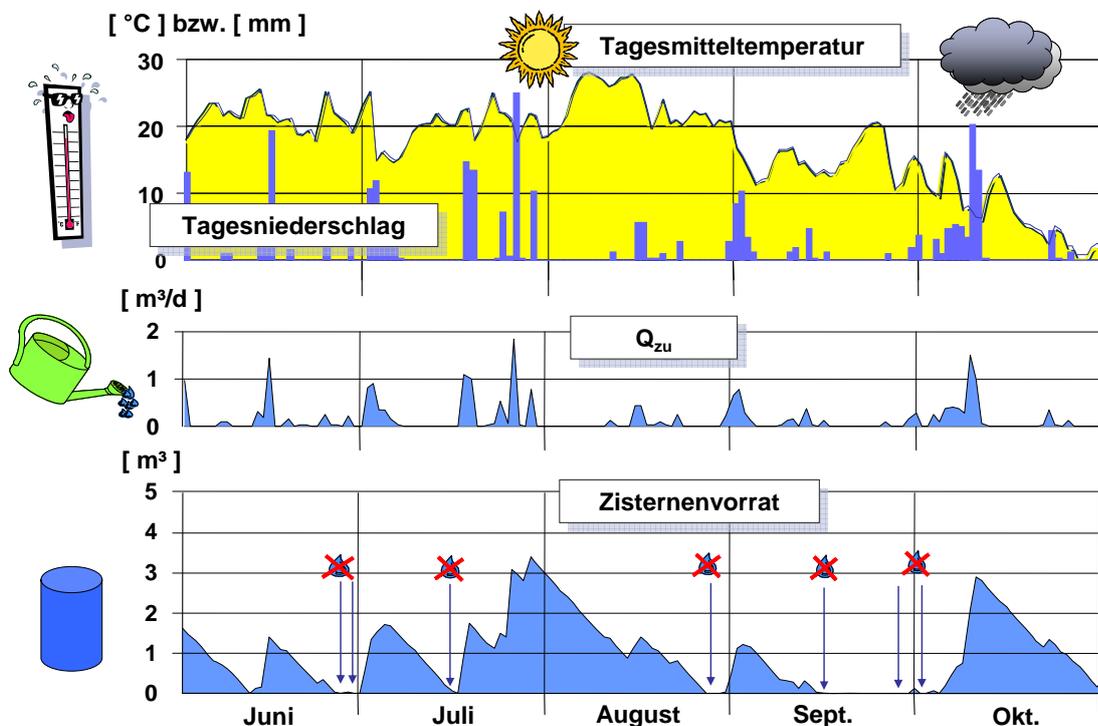


Abb. 13: Verfügbarkeit von Zisternenwasser im Sommer 2003

Nun ist davon auszugehen, dass dies nicht nur die LW betrifft. Daher ist es somit dringend notwendig, die Reserven der jeweiligen Versorgungssysteme zu ermitteln. Dem weiteren Ausbau des Verbundes ist Vorrang vor der dezentralen, örtlichen Versorgung einzuräumen. Die sichere Trinkwasserbereitstellung muss auch rechtlich durch ausreichende Wasserrechte abgesichert sein. Deshalb sind die dargebotsseitig wirksamen konkurrierenden Nutzungen (z. B. landwirtschaftliche Bewässerung) dem Primat der sicheren öffentlichen Trinkwasserversorgung unterzuordnen. („Wollen wir Mais als Bewässerungskultur oder eine sichere Trinkwasserversorgung?“)

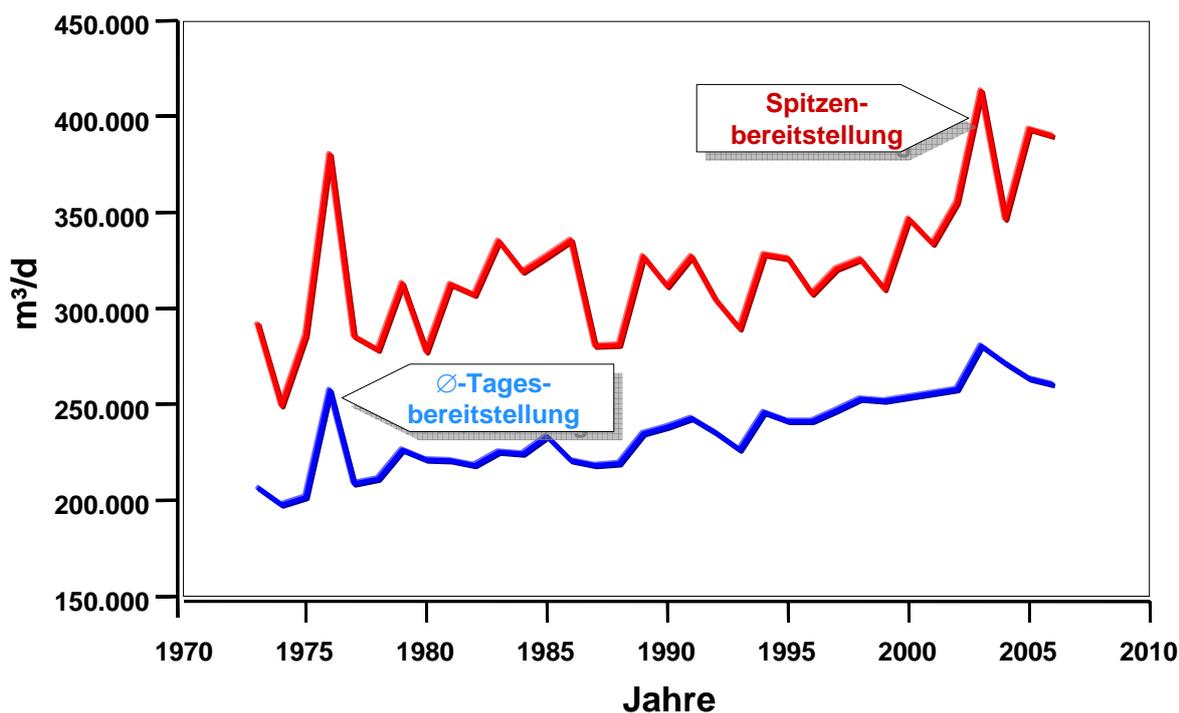


Abb. 14: Entwicklung von durchschnittlicher und maximaler Tagesbereitstellung bei der LW

5. Auswirkungen auf die Rohwasserqualität

Der Klimawandel nimmt bereits heute direkt und indirekt Einfluss auf die Rohwasserqualität in den Wasserschutzgebieten der LW. Feststellbar sind höhere Nitratfrachten nach Trockenperioden oder intensiver Grundwasserneubildung.

Die N_{\min} -Werte korrelieren in hohem Maß ($r = 0,863$) mit der Grundwasserneubildung ab der Ernte der Hauptfrüchte (trockenheiße Nacherntezeit \Rightarrow hohe N_{\min} -Werte).

Nach dem „Jahrhundertssommer“ 2003 hat sich dadurch der seit 1994 landesweit rückläufige Trend der Nitratkonzentration gedreht. In Trockenperioden bauen sich durch die verstärkte Mineralisation Stickstoffdepots auf, die in extremen Nassjahren dann nahezu vollständig ins Grundwasser ausgewaschen werden.

Die Ursache liegt weiterhin in den Ertragsausfällen. In der Landwirtschaft werden daher trockenresistentere Sorten und an den Klimawandel angepasste Fruchtfolgen benötigt. Auch ist zu befürchten, dass durch milde Winter der Schädlingsdruck zunimmt, was das Spritzmittelproblem deutlich verschärft und sich darüber hinaus eingeschleppte Schädlinge rascher ausbreiten (z. B. Maiswurzelbohrer).

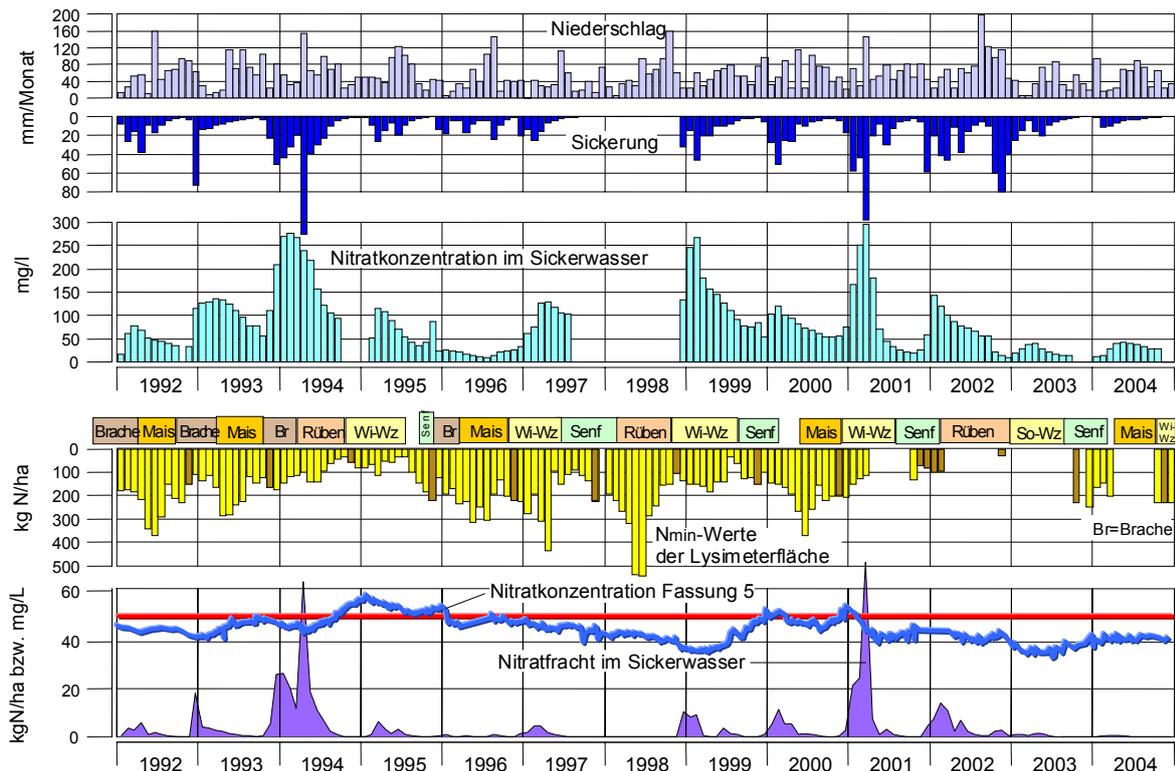
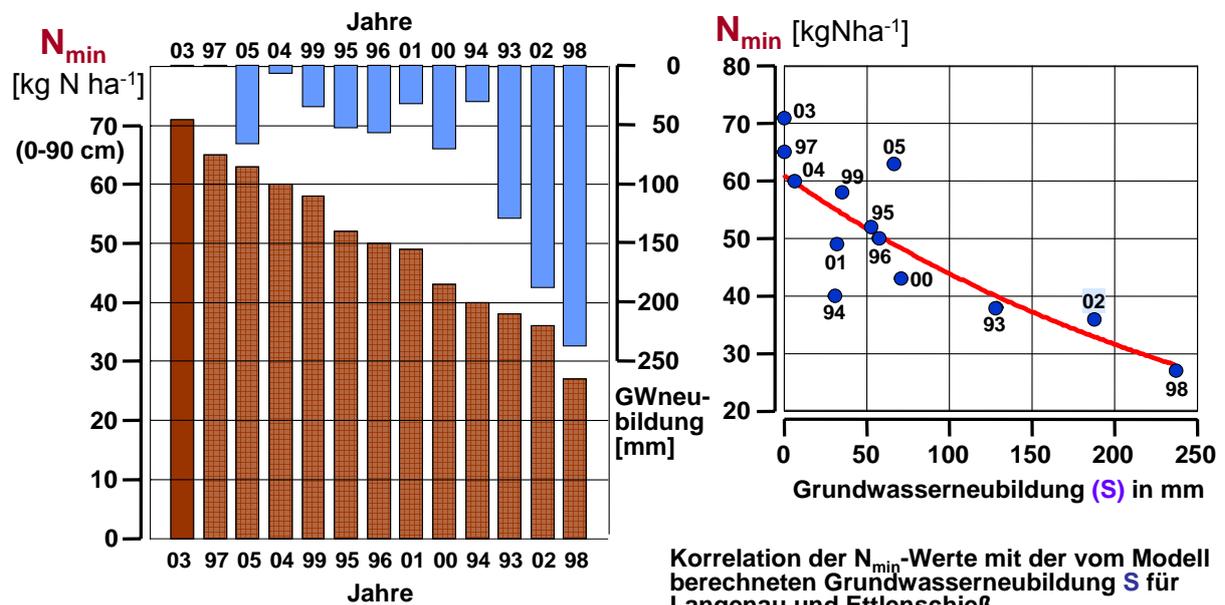


Abb. 15: Extreme Witterung führt zu Nitratanstiegen im Grundwasser



Korrelation der N_{min} -Werte mit der vom Modell berechneten Grundwasserneubildung S für Langenau und Ettlenschieß

Funktion: $N_{min} = 61 \times e^{-S/300}$

Korrelationskoeffizient: $r = 0,863$

Abb. 16: N_{min} -Werte und Grundwasserneubildung ab der Ernte bis zur N_{min} -Beprobung

Nicht übersehen werden dürfen mögliche Auswirkungen auf die Mikrobiologie. Auch wenn Experten bislang sagen, dass die Auswirkungen kaum einen Einfluss auf die Zusammensetzung der Bakterienflora im Wasser haben werden, sind dennoch aufgrund von häufiger auf-

tretenen, extremen Wetterereignissen auch mikrobiologische Problemen in der Aufbereitung zu erwarten. Besonders kritisch zu sehen ist hierbei eine mögliche Verschiebung des Artenspektrums von Krankheitserregern allgemein, z. B. Auftreten von Malaria o. ä.

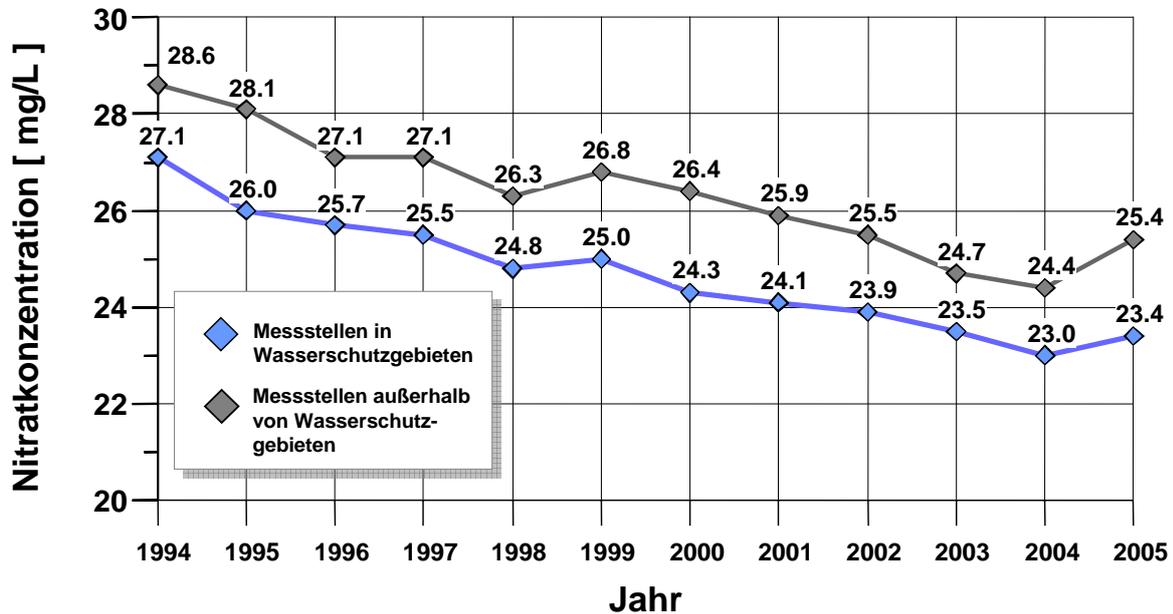


Abb. 17: Nitratwerte landesweit in Baden-Württemberg (LUBW 2006)

Probleme können auch dort entstehen, wo Grundwässer unterschiedlicher Mineralisierung und damit unterschiedlicher Dichte aufeinander treffen. So kann es beispielsweise zu Salzwasseraufstiegen aus prätertiären Schichten durch verminderte Druckgradienten infolge geringerer Grundwasserneubildung kommen. In Küstennähe ist bei sinkenden Grundwasserspiegeln mit Salzwasserintrusionen in zu rechnen. Die Trinkwasservorkommen versalzen. Aber auch Talsperrenwässer sind betroffen: Bedeutende Veränderungen der Temperaturprofile in Talsperren führen zu veränderten Sauerstoffgehalten und damit ggf. zu einer unerwünschten Phosphorrücklösung.

Die insgesamt höheren Wassertemperaturen verschlechtern bei Oberflächengewässern die mikrobiologischen Rohwassereigenschaften. Extremabflüsse mindern durch die einhergehenden hohen Schadstoffkonzentrationen ebenso die Rohwasserqualität der zur Trinkwasserversorgung genutzten Oberflächengewässer wie die zunehmende Entlastungshäufigkeit von Regenüberlaufbecken.

Technische Probleme ergeben sich auch mit zunehmender Rohwassertemperatur durch die abnehmende Viskosität, beispielsweise beim Filterspülbetrieb. Steigt die Rohwassertemperatur von 10 auf 20°C, so sinkt die kinematische Viskosität um 24 %, d. h die Spülgeschwindigkeiten müssen um 30 % zunehmen.

6. Auswirkungen auf die Versorgungssicherheit

In dargebotsschwachen Regionen kann Versorgungssicherheit nur durch Verbundlösungen hergestellt werden. In diesem Zusammenhang muss auch der antiquierte „Vorrang der orts-nahen Wasserversorgung“ (§ 43 WG) auf den Prüfstand. Er sollte ersetzt werden durch den „Vorrang der energieeffizientesten Wasserversorgung“ (beispielsweise gemessen in kWh/m³), da diese Forderung auch den Aspekt von Minimierungsstrategien gegenüber den Ursachen des Klimawandels impliziert. Der orts-nahen Wasserversorgung sind hier klare Grenzen gesetzt. Die Versorgungssicherheit hängt aber auch entscheidend an einer sicheren Stromversorgung. In Niedrigwasserperioden erfordern die Wärmelastpläne eine verminderte Kühlwasserentnahme aus den Flüssen, die Kraftwerksleistungen müssen zurückgefahren werden. Dies hat 2003 den Betrieb des europäischen Verbundnetzes destabilisiert, was letztlich steigende Strompreise nach sich zog.

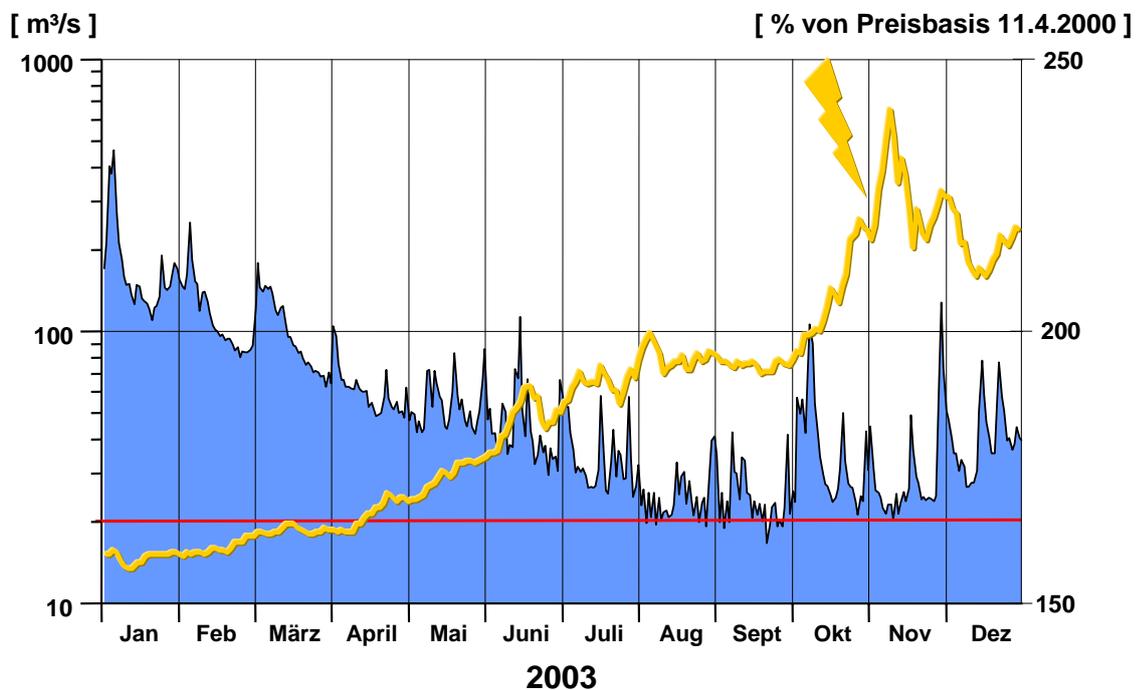


Abb. 18: Abfluss des Neckars bei Lauffen 2003 und Strompreise ($\frac{1}{3}$ peak-load, $\frac{2}{3}$ base-load auf Preisbasis vom 11.04.2000)

Auch können extreme Hochwasserereignisse Wasserversorgungsanlagen gefährden, so wie beispielsweise das seit 1998 zweite 1000-jährliche Hochwasser der Donau im August 2005. Es wurde hier vorsorglich das Rohwasserpumpwerk in Leipheim an der Donau mit Sandsäcken gesichert.

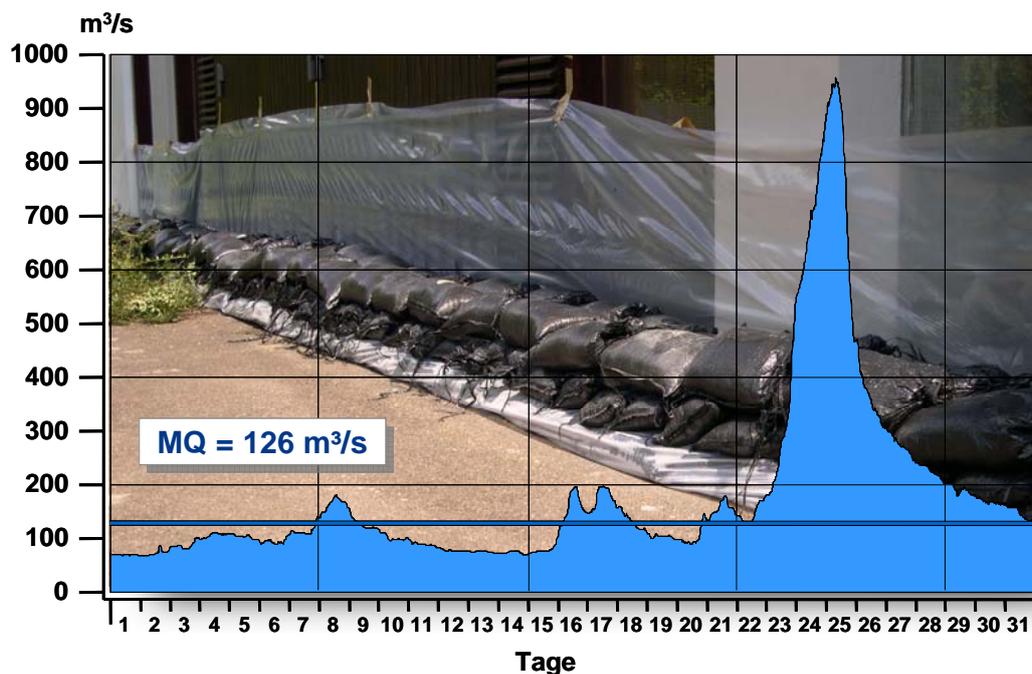


Abb. 19: Donauabfluss am Pegel Neu-Ulm Bad Held im August 2005, Hintergrund: Sandsacksicherung für das Rohwasserpumpwerk Leipheim am 24.08.2005

Aber auch extreme Niedrigwasserverhältnisse führen zu Problemen, wenn die Kavitationsgrenze bei Pumpen erreicht wird oder Heberleitungssysteme Luft einziehen.

Auch führen extreme Trockenheiten zum verstärkten Auftreten von Rohrbrüchen. Ältere Rohre, deren statische Tragfähigkeit durch Korrosionsangriffe (z. B. Spongiose bei GG-Rohren) bereits eingeschränkt ist, sind z. B. durch die dann zusätzlich ungünstig wirkenden Erdlasten infolge Schwindrisse besonders gefährdet. Die Landeswasserversorgung hat hier im Sommer 2003 mehrere derartige Schadensfälle festgestellt.

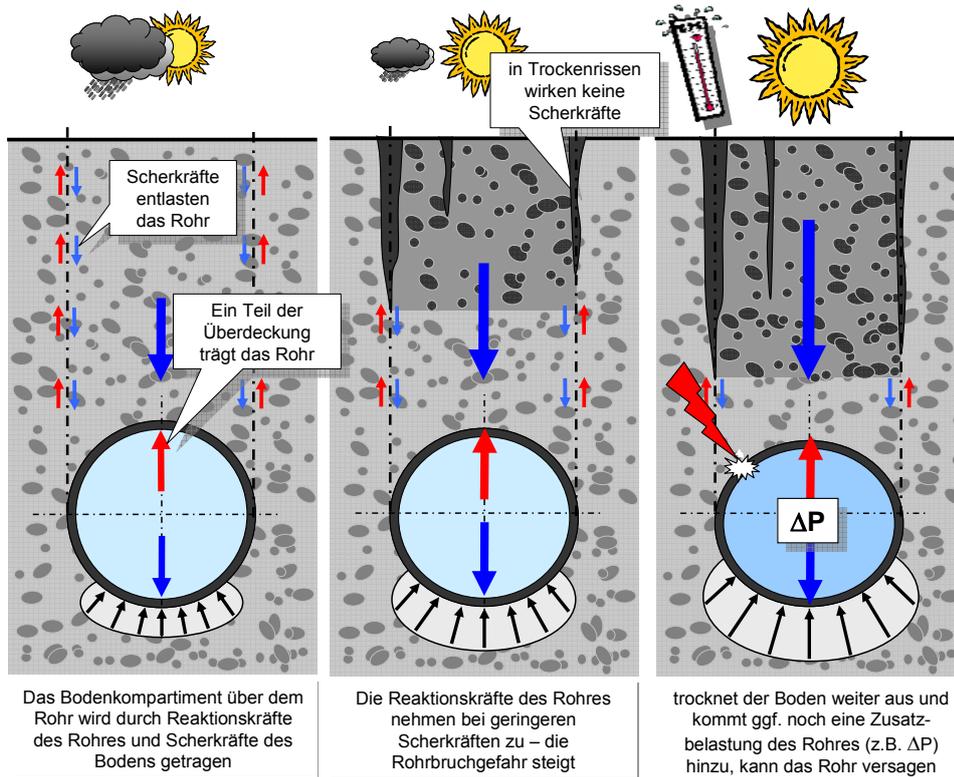


Abb. 20: Mechanismus des trockenheitsbedingten Rohrschadens



Abb. 21: Rohrschaden einer GG-Leitung DN 900 mit Vorschädigung durch Spongiose (Bildausschnitt)

Fazit

Zusammenfassend ergibt sich aus dem heutigen Kenntnisstand im Hinblick auf den Klimawandel folgender Handlungsbedarf für die Wasserversorgung:

- Prognosen zur Dargebotsabschätzung sind notwendig
- Vernetzen der Datenbestände der Akteure und Stakeholder
- Reserven der Versorgungssysteme sind zu ermitteln
- Prognosen zur Veränderung der Rohwasserqualität
- Sichern der Wasserrechte für die Spitzenabdeckung, Vorrang der öffentlichen Trinkwasserversorgung vor Bewässerung etc.
- Vorrang der energieeffizientesten Wasserversorgung
- Modelle zur Bewirtschaftung der Rohwasserressourcen
- trockenresistentere Sorten für die Hauptkulturen der Landwirtschaft, Anpassen der Fruchtfolgen
- Vernetzung durch Verbund statt Insellösungen und häuslicher Grauwassernutzung
- sichere Stromversorgung zur Spitzenbereitstellung
- Betriebskonzept „höhere Rohwassertemperatur“ (z. B. Filterspülen)

Literatur

- BDEW (November 2007): Entwurf Stellungnahme des Bundesverbandes der Energie- und Wasserwirtschaft zum Grünbuch der Kommission an den Rat, das Europäische Parlament, den Wirtschafts- und Sozialausschuss und den Ausschuss der Regionen zur Anpassung an den Klimawandel in Europa – Optionen für Maßnahmen der EU
- Castell-Exner, C. (12/2007): Trinkwasser – Klimawandel und Wasserversorgung, Energie Wasser-Praxis, 8-10
- Haakh, F. (2006): „Jahrhundertsommer“ als Vorboten des Klimawandels – Wie sicher ist die Wasserversorgung in Baden-Württemberg?, Schriftenreihe des Zweckverbandes Landeswasserversorgung, Heft 25, 42-56
- Haakh, F., Wendel, M. (2005): Regenwasser- und Grauwassernutzung im privaten Haushalt – sinnvoll oder teures Hobby?, Schriftenreihe des Zweckverbandes Landeswasserversorgung, Heft 24, 58-72
- Kommission der Europäischen Gemeinschaften (Juni 2007): Grünbuch der Kommission an den Rat, das Europäische Parlament, den Wirtschafts- und Sozialausschuss und den Ausschuss der Regionen zur Anpassung an den Klimawandel in Europa – Optionen für Maßnahmen der EU
- LUBW Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg (August 2006, 1. Auflage): Grundwasser-Überwachungsprogramm – Ergebnisse der Beprobung 2005
- Marx, W. (Dezember 2003): Statische Überprüfung von gusseisernen Muffenrohren der ersten LW-Hauptleitung, LW-Bericht 2004-11 des Zweckverbandes Landeswasserversorgung

Zebisch, M., Grothmann, T., Schröter, D., Hasse, C., Fritsch, U., Cramer, W. (August 2005):
Klimawandel in Deutschland – Vulnerabilität und Anpassungsstrategien klimasensitiver Systeme, Umweltbundesamt Dessau (Hrsg.)

Auswirkungen des Klimawandels auf die Elektrizitätsproduktion unter besonderer Berücksichtigung des Aspekts Wasser

Benno Rothstein, Ulrike Müller, Stefanie Greis, Anja Scholten, Jeannette Schulz
und Enno Nilson

Zusammenfassung

Der rezente Klimawandel äußert sich u.a. in der Verschiebung langjähriger Mittelwerte von Lufttemperatur und Niederschlag. Dies wiederum beeinflusst die Gewässerparameter Wassertemperatur und Abflussmenge, welche eine große Bedeutung für die Elektrizitätswirtschaft haben. Kraftwerksstandorte befinden sich zumeist in oder entlang von Gewässern, da diese Wasser für die Kraftwerkskühlung (thermische Kraftwerke) sowie für den Antrieb von Turbinen (Laufwasserkraftwerke) bereitstellen und zudem als Verkehrsträger für den Brennstoff Steinkohle dienen. Daraus ergeben sich ein direkter Einfluss von hohen Wassertemperaturen, Hoch- und Niedrigwasserabflüssen sowie ein indirekter Einfluss durch eingeschränkte Steinkohlelieferungen per Binnenschiff. Hohe Wassertemperaturen können Leistungseinschränkungen aufgrund der Überschreitung gesetzlich festgelegter Grenzwerte, Wirkungsgradverringerungen sowie höhere Instandhaltungskosten bei thermischen Kraftwerken hervorrufen. Niedrig- und Hochwasserereignisse können die Binnenschifffahrt sowie die Leistung thermischer und Laufwasserkraftwerke einschränken. Gegen Niedrigwasserereignisse kann, abgesehen von einer Stauung des Gewässers, kein Schutz eingerichtet werden, allerdings sind gegen Hochwasser Schutzmaßnahmen für Kraftwerksstandorte notwendig, um den Betrieb weitestgehend zu gewährleisten. Folglich steht die Elektrizitätswirtschaft vor der Herausforderung, auf die Veränderungen der meteorologischen Parameter möglichst konstruktiv zu reagieren und in Zukunft zu agieren.

1. Einleitung

Die Existenz des globalen Klimawandels gilt inzwischen als wissenschaftlich gesichert (IPCC 2007). Der lineare Trend der globalen oberflächennahen Lufttemperatur ist innerhalb der letzten 50 Jahre (+0,13°C/Dekade) etwa doppelt so hoch wie der der vergangenen 100 Jahre. Des Weiteren hat die Häufigkeit einiger extremer Wetterereignisse innerhalb der letzten 50 Jahre zugenommen. Nach IPCC (2007) gilt dies u.a. für Hitzewellen und Starkniederschläge.

Von diesen Änderungen werden zahlreiche Wirtschaftssektoren beeinflusst, so auch die Elektrizitätswirtschaft. Vor allem extreme Wetterereignisse können sowohl Sach- als auch finanzielle Schäden für diesen Wirtschaftszweig zur Folge haben: Beispielsweise verursachte das Hochwasser im August 2002 der ostdeutschen Strombranche Schäden von mehr als 50 Mio. € (ENBW 2003). Die durch den Hitzesommer 2003 entstandenen unerwarteten Ertragsausfälle bezifferte die EnBW Energie Baden-Württemberg AG auf 18,5 Mio. € (HARTKOPF 2004). Diese waren, neben einer gestiegenen Nachfrage nach Elektrizität, vor allem durch Niedrigwasserbedingungen und hohe Wassertemperaturen verursacht (ROTHSTEIN 2007).

Während sich die Elektrizitätswirtschaft auf Hochwasserereignisse bereits in der Vergangenheit häufiger einstellen musste, sind hohe Wassertemperaturen und Niedrigwasserabflüsse erst in den letzten Jahren gehäuft und verstärkt aufgetreten. Inwieweit die Häufung von

Extremereignissen und die Verschiebung langjähriger Mittelwerte in Deutschland tatsächlich durch einen anthropogenen Beitrag zum Klimawandel verursacht werden, bleibt hier allerdings unbeantwortet.

Im Folgenden wird auf die Bedeutung des Wassers für die Elektrizitätswirtschaft näher eingegangen. Anschließend werden zum einen für den Parameter Wassertemperatur sowie für Hoch- und Niedrigwasserereignisse Trends und Extrema aufgezeigt. Zum anderen werden die daraus resultierenden Folgen für die Elektrizitätserzeugung beschrieben. Hierfür werden nach Möglichkeit konkrete Beispiele aufgeführt. Im Ausblick wird kurz auf den Forschungsbedarf dieser Themen eingegangen, welche als Grundlage für die weitere Planung und Durchführung von Anpassungsmaßnahmen erforderlich sind.

2. Die Bedeutung des Wassers für die Elektrizitätswirtschaft

Thermische Kraftwerke und Laufwasserkraftwerke werden häufig entlang von bzw. immer in Fließgewässern gebaut. Bei thermischen Kraftwerken liegt dies darin begründet, dass bei der Elektrizitätsproduktion meist Flusswasser als Kühlmedium verwendet wird. Für Steinkohlekraftwerke, als ein Kraftwerkstyp thermischer Kraftwerke, stellt zudem die Anbindung an die Binnenschifffahrt die kostengünstigste Transportmöglichkeit von Steinkohle dar. In Laufwasserkraftwerken werden durch die Fließbewegung des Wassers Turbinen zur Elektrizitätserzeugung angetrieben. Aufgrund des Standortes entlang von bzw. in Fließgewässern können sowohl thermische als auch Laufwasserkraftwerke durch Änderungen der Gewässerparameter Wassertemperatur und Abfluss beeinflusst werden. Im Folgenden werden die Gründe hierfür aufgezeigt.

2.1 Wasser als Kühlmedium

Besonders bedeutend ist Wasser bei der Kühlung von thermischen Kraftwerken. In solchen Kraftwerken wird durch Verbrennen eines Energieträgers (Kohle, Öl, Gas, Biomasse) oder durch Kernspaltung thermische Energie erzeugt. Mit Hilfe dieser wird entweder direkt eine Turbine angetrieben (Gasturbine) oder Wasserdampf erzeugt, der eine Dampfturbine antreibt (Dampfkraftwerke). In einem an die Turbinen angeschlossenen Generator wird schließlich die mechanische in elektrische Energie umgewandelt. Wird der Wasserdampf nicht zur Nah- oder Fernwärmeversorgung abgeführt, so muss dieser (bzw. die heißen Gase) nach der Turbine auf ein möglichst niedriges Temperaturniveau abgekühlt werden, um den Wirkungsgrad zu erhöhen. Die thermische Energie wird dabei an ein Kühlmedium abgeführt (KALIDE 2005).

Prinzipiell existieren dazu zwei Möglichkeiten: die Luft- und die Wasserkühlung. Die Luftkühlung spielt bei thermischen Kraftwerken eine untergeordnete Rolle und wird allenfalls bei einer Kraftwerksleistung von bis zu 900 Megawatt (thermisch) (MW_{th}) eingesetzt. Große thermische Kraftwerke werden meist wassergekühlt (EUROPEAN COMMISSION 2001; SAUER 1984). Dabei wird der Wasserdampf in einen Kondensator geleitet. In diesem wird die Wärmeenergie an einen zweiten Wasserkreislauf abgegeben. Das im Kondensator um ca. 10 Kelvin (K) erwärmte Kühlwasser kann dann entweder direkt in einen Vorfluter eingeleitet (Durchlauf-/Frischwasserkühlung) oder in einem Kühlturm rückgekühlt werden (KALIDE 2005). Hierbei stehen drei Möglichkeiten des Kühlturbetriebs zur Verfügung: Kreislaufkühlung, Rück-/Ablaufkühlung oder Mischbetrieb. Die Kühlverfahren unterscheiden sich in

der Höhe des Wasserbedarfs, des Wärmeeintrags in den Vorfluter sowie des Verdunstungsverlustes (vgl. Tabelle 1) (SAUER 1984).

Bei kühlturmbetriebenen Kraftwerken wird der Wärmeeintrag in den Fluss zwar deutlich verringert (Abwärme in MJ/s pro 100 MW_{el} Kraftwerksleistung: Durchlaufkühlung: 145-210, Rücklaufkühlung: 84-125, Kreislaufkühlung: 8-15), dafür entstehen jedoch Verdunstungsverluste, die je nach Lufttemperatur, -feuchtigkeit und -druck bis zu 5 % des Kühlwasserumsatzes betragen. Diese müssen durch Wasserentnahme aus dem Vorfluter ausgeglichen werden. Trotz dieser wesentlich geringeren Wasserentnahmemenge im Vergleich zur Durchlaufkühlung kann der Kühlturmbetrieb eine eventuelle Niedrigwassersituation des Vorfluters verschärfen (vgl. Kapitel 3.2.3) (KOBUS & BÜRKLE 1996; MANIAK 2005). Zudem ist der Einsatz von Kühltürmen mit einer Wirkungsgradverringerung der Kraftwerke verbunden. Diese ergibt sich aus dem höheren Eigenbedarf an Elektrizität durch den Einsatz von z.B. Wasserpumpen und Ventilatoren. Dabei wird der Wirkungsgrad der Kraftwerke um etwa 2-3 % reduziert (WAGNER 2003). Beim Kernkraftwerk Philippsburg z.B. benötigen die Wasserpumpen insgesamt etwa 6 MW bei Block I und 8 MW bei Block II. Beim Steinkohlekraftwerk Altbach/Deizisau benötigen alleine die 30 Ventilatoren des Kühlturms bereits 3 MW, was 1 % der erzeugten Energie entspricht (ENBW 2006; ENBW 2007).

Tab. 1: Benötigte Wassermengen (Kühl- und Brauchwasser) eines thermischen Kraftwerks für die Elektrizitätserzeugung. Quelle: WAGNER 2003; KOBUS & BÜRKLE 1996; EFFERTZ & FICHTE 1984

Verfahren	Wasserbedarf pro 1.000 MW Kraftwerksleistung	Verwendungszweck	Anmerkung
Wasser-Dampf-Kreisläufe	Einmalig: 1.000 bis 2.000 m ³ Wasser; Laufender Verbrauch: 4 bis 10 m ³ /h Speisewasser	Füllung der Kessel bzw. des Kühlkreislaufs incl. der für Notfälle gespeicherten Mengen Ausgleich von Wasser- und Dampfverluste	Verwendung von entsalztem Wasser, hohe Reinheitsanforderungen; ständige Reinigung während des Betriebs erforderlich.
Durchlaufkühlung	50 m ³ /s (bzw. 180.000 m ³ /h)	Übertragung der Kondensationswärme im Kondensator auf das Kühlwasser	Geringere Qualitätsanforderungen als an das Speisewasser; dieses Verfahren gestattet höchste energetische Ausnutzung der zur Stromerzeugung eingesetzten Brennstoffe.
Kühlturm	0,3 bis 0,6 m ³ /s (bzw. 1080 bis 2160 m ³ /h); Zusätzlich ggf. noch Ergänzungswasser: ca. 0,3 m ³ /s (bzw. 1080 m ³ /h); Wasserbedarf insges. also 0,3 bis 0,9 m ³ /s (bzw. 1080 bis 3240 m ³ /h)	Übertragung der Kondensationswärme im Kondensator auf das Kühlwasser; Ergänzungswasser wird benötigt, damit sich die in den Gewässern mitgeführten Schwebstoffe und Salze im Kühlwasserkreislauf nicht zu stark anreichern.	Die Menge des Wassers, die durch den Kühlturm entweicht, hängt direkt von der momentanen Leistung des Kraftwerks ab (proportional).

Tabelle 1 zeigt den hohen Kühlwasserbedarf der Elektrizitätswirtschaft, welcher diese zum mit Abstand größten Wasserverbraucher macht. Beispielsweise lag ihr Kühlwasserbedarf im Jahre 2001 in Baden-Württemberg bei fast 4,6 Mrd. m³, was 79 % des gesamten Wasserverbrauchs in Baden-Württemberg entspricht (KRENTZKE 2004).

Ist ein Kraftwerk mit einem Kühlturm ausgestattet, besteht in Deutschland die Möglichkeit, zwischen den verschiedenen Kühlverfahren zu wählen. Ohne Kühlturm ist ein Kraftwerk auf die Durchlaufkühlung angewiesen. Je nach Kraftwerksstandort und Gewässertyp bestehen für die Kühlverfahren gesetzlich festgelegte Grenzwerte bezüglich der Kühlwasserentnahme und -einleitung (vgl. Tabelle 2 und 3). Diese basieren auf Empfehlungen der Länderarbeitsgemeinschaft Wasser (LAWA). Werden diese Grenzwerte erreicht, muss die Kraftwerksleistung reduziert werden, um den Verdunstungsverlust bzw. den Wärmeeintrag in den Vorfluter zu senken (LAWA 1991; MANIAK 2005).

Tab. 2: Grenzwerte bezüglich des Kühlwassers (Klammerwerte in Ausnahmefällen). Quelle: verändert nach MANIAK 2005

Kühlwasser	Durchlaufkühlung	Ablaufkühlung	Kreislaufkühlung
Wiedereinleittemperatur	30 °C (33 °C)	33 °C	35 °C
Aufwärmspanne	10 K (15 K)	10 K (15 K)	15 K

Tab. 3: Grenzwerte bezüglich des Vorfluters (Klammerwerte in Ausnahmefällen). Quelle: verändert nach MANIAK 2005

Flusswasser	Sommerwarme Gewässer	Sommerkühle Gewässer	Salmonide Gewässer
Flusswassertemperatur (rechnerisch ermittelt)	28 °C	25 °C	18 °C
Aufwärmspanne	5 K (7 K)	3 K (5 K)	3 K

Neben thermischen Kraftwerken benötigen auch Wasserkraftwerke Kühlwasser für ihren Betrieb. Diese entnehmen dem Fluss allerdings im Vergleich zu thermischen Kraftwerken nur geringe Wassermengen, so dass keine relevanten Umwelteinflüsse auftreten (ROTHSTEIN 2007).

2.2 Wasser als Verkehrsträger

Eine weitere wichtige Rolle des Wassers bei der Elektrizitätsproduktion ergibt sich durch die Nutzung von Flüssen als leistungsfähige und preiswerte Transportwege. Die massengutaffine Branche der Elektrizitätswirtschaft kann Kohlekraftwerke nur dann wirtschaftlich betreiben, wenn ihr Standort entweder in unmittelbarer Nähe zum Kohleabbaugebiet liegt (wie etwa die Braunkohlekraftwerke im Rheinischen Braunkohlerevier) oder die Versorgung von (Stein-) Kohlekraftwerken mit dem Massengut (Stein-) Kohle kostengünstig per Schiff erfolgen kann. So werden beispielsweise über die Wasserstraße Rhein jährlich etwa 3 Mio. t Kohle zu den verschiedenen Kraftwerken nach Baden-Württemberg transportiert (HÖNEMANN 2005).

Beim Transport der Kohle per Binnenschiff zeichnet sich das vergleichsweise weit von den Seehäfen entfernt liegende Bundesland Baden-Württemberg durch einen gravierenden Standortnachteil aus. Dieser resultiert aus den relativ höheren Transportkosten (z.B. im Vergleich zum Ruhrgebiet) für Kohle (WM 2004; vgl. Kapitel 3.2). Zu diesen relativ höheren

Transportkosten kommt das Risiko von Extremwasserständen hinzu, die die Zuverlässigkeit und Sicherheit des Verkehrsträgers Binnenschiff beeinträchtigen.

2.3 Hochwasserereignisse und Hochwasserschutzmaßnahmen

Neben der Bedeutung des Wassers als Kühl- und Transportmedium können auch Hochwasserstände die Elektrizitätsproduktion direkt beeinflussen. Hochwasserschutzmaßnahmen seitens der Elektrizitätswirtschaft betreffen, neben Umspannwerken in hochwassergefährdeten Gebieten, insbesondere Anlagen zur Elektrizitätserzeugung.

Bei thermischen Kraftwerken führt ein Hochwasserereignis zunächst zu einer verbesserten Versorgung des Kraftwerks mit Kühlwasser, wobei das Kraftwerk die Kühlwassermenge regulieren kann. Es können keine generellen Aussagen getroffen werden, wann thermische Kraftwerke im Falle eines Hochwasserereignisses eine Einschränkung der Elektrizitätsproduktion erfahren, da dies sowohl vom Kraftwerkstyp als auch sehr stark vom Standort abhängig ist.

Die Lage von Kraftwerksstandorten in Gewässernähe führt zu der Notwendigkeit, Hochwasserschutzmaßnahmen einzurichten, die Anlagenteile und Gebäude vor Beschädigungen schützen. Diese Beschädigungen können durch Überflutungen, Strömungswiderstand, Geschiebeanlandungen oder -auflandungen entstehen (RITZ et al. 2005). Für den Hochwasserschutz von Kraftwerken ist zu unterscheiden zwischen Maßnahmen, die generell dem Hochwasserschutz dienen und durch das Bundesland eingerichtet und unterhalten werden und solchen, die kraftwerksspezifisch wirken. So ist das Land beispielsweise zuständig für die flächenbezogene Vorsorge, die durch Renaturierungen oder die Einschränkung von Baumaßnahmen in Auen erfolgt sowie die Einrichtung von Hochwasserrückhaltemaßnahmen, welche Deiche, Polder, mobile Wände und Retentionsräume umfasst (UM BADEN-WÜRTTEMBERG 2002). Kraftwerksspezifische bzw. standortspezifische Maßnahmen können z.B. die Aufschüttung des Geländes auf ein Niveau über dem sogenannten Bemessungshochwasserstand oder mobile Wände sein, die Gebäudeeingänge schützen. Das Bemessungshochwasser liefert hierfür einen Richtwert. Es ist ein aus ökologischer und ökonomischer Sicht errechneter Wasserstand einer bestimmten Eintrittswahrscheinlichkeit, an dem sich der Bau und Schutzgrad eines Kraftwerks orientieren (DIN 19712 1997). Für Industriestandorte (z.B. Kohlekraftwerke) gilt für gewöhnlich ein Bemessungswasserstand eines 100-jährlichen Hochwasserereignisses (VDI 6004-1 2006), für Kernkraftwerke liegt dieser bei einem 10.000-jährlichen Ereignis (KTA 2207 2004).

Laufwasserkraftwerke werden an den Abfluss des Vorfluters angepasst, in den sie integriert werden. Ihre Leistung ist abhängig vom Wasserdargebot und der Fallhöhe des Wassers (ZAHORANSKY 2007). Bei Laufwasserkraftwerken spielt die Anpassung der Turbinen an die jahreszeitliche Wasserführung eine entscheidende Rolle. Die Fallhöhe, also die Differenz zwischen Ober- und Unterwasser, muss für die meisten Turbinen mindestens zwei Meter betragen. Während eines Hochwasserereignisses nimmt diese Differenz durch das Ansteigen des Unterwasserspiegels meist so weit ab, dass die Turbinen ihren Betrieb einstellen müssen. Ist dies der Fall, werden die Wehre abgesenkt, so dass ein Ausgleich zwischen Ober- und Unterwasserspiegel erreicht wird (RWE POWER 2004).

Im Folgenden wird nun erläutert, wie sich eine Verschiebung langjähriger Mittelwerte und Extremwerte von Klimaparametern auf die oben dargestellten Bereiche der Elektrizitätswirtschaft auswirken könnte.

3. Auswirkungen des Klimawandels auf Wassertemperaturen und Abflussverhalten und deren Folgen für die Elektrizitätsproduktion

Sich verändernde Lufttemperatur- und Niederschlagsverhältnisse beeinflussen u.a. die für die Elektrizitätswirtschaft bedeutenden Gewässerparameter Wassertemperatur und Abflussverhalten (Niedrig- und Hochwasser) (vgl. Kapitel 2). Im Folgenden werden jeweils Verschiebungen der langjährigen Mittelwerte und Extremereignisse dieser Gewässerparameter dargestellt. Anschließend wird aufgezeigt, inwieweit diese Veränderungen konkrete Auswirkungen auf die Elektrizitätswirtschaft haben. Dabei nimmt der Themenkomplex Wassertemperatur aufgrund der hohen potenziellen Produktions- und Einnahmeausfälle für die Elektrizitätswirtschaft einen Schwerpunkt ein.

3.1 Wassertemperaturen – Trends und Extreme sowie Auswirkungen auf die Elektrizitätswirtschaft

Zwischen der Luft- und der Wassertemperatur von Fließgewässern besteht ein entscheidender Zusammenhang. Die beobachteten rezenten Trends der Lufttemperaturen in Deutschland lassen auch einen Anstieg der mittleren Wassertemperaturen vermuten. Hohe Wassertemperaturen, insbesondere Extremwerte wirken sich direkt auf die Kraftwerksleistung thermischer Kraftwerke sowie indirekt auf den Wirkungsgrad und Instandhaltungskosten aus. Im Folgenden werden erste Ergebnisse von Wassertemperaturanalysen ausgewählter deutscher Flüsse vorgestellt. Im Anschluss daran folgt ein kurzer Überblick über Leistungseinschränkungen thermischer Kraftwerke aufgrund wasserrechtlicher Bestimmungen zwischen 1976 und 2007 und deren konkrete Folgen am Beispiel des Hitzesommers 2003. Des Weiteren wird der Einfluss hoher Wassertemperaturen auf den Wirkungsgrad sowie auf Instandhaltungskosten dargestellt.

3.1.1 Statistische Auswertung der Wassertemperaturen ausgewählter Flüsse in Deutschland

Untersuchungen zu möglichen Auswirkungen des Klimawandels auf Flusswassertemperaturen und deren Entwicklung wurden u.a. für verschiedene Flüsse in den USA und Österreich durchgeführt (COOTER & COOTER 1990; SINOKROT et al. 1995; WEBB & NOBILIS 1994, 2007). Für große Flüsse mit Kraftwerksstandorten in Deutschland existierten bislang allerdings noch keine Analysen von Wassertemperaturzeitreihen. Wie in Kapitel 2.1 dargestellt, ist es jedoch gerade für die kühlwassernutzende Elektrizitätswirtschaft von Interesse, ob sich die Wassertemperaturen und Extremwerthäufigkeiten (bezogen auf Grenzwerte) bereits verändert haben und wie sich diese zukünftig ändern könnten. Daher wurden in einer ersten Studie Wassertemperaturzeitreihen von 19 Messstellen an den Flüssen Weser, Elbe, Rhein, Main, Donau, Neckar und Isar hinsichtlich Trends und Extremwerten analysiert. Als Datengrundlage dienten Zeitreihen der Wassertemperatur (Tagesmittel), die einen Zeitraum von 14 bis 32 Jahre je nach Station umfassen. Zunächst wurde mit einer Trendanalyse festgestellt, ob sich die Wassertemperaturen der ausgewählten Flüsse bereits verändert haben. Hierzu wurden Trends der Monatsmittelwerte, der Mittelwerte der Jahres-

zeiten sowie der Extremwerte berechnet. Des Weiteren wurden die empirischen Überschreitungswahrscheinlichkeiten verschiedener Schwellenwerte (auf Basis der gesetzlichen Grenzwerte) zeitlich gleitend berechnet. Außerdem wurden Korrelationsanalysen mit Lufttemperaturdaten angrenzender Klimastationen des Deutschen Wetterdienstes (DWD) durchgeführt (GREIS 2007).

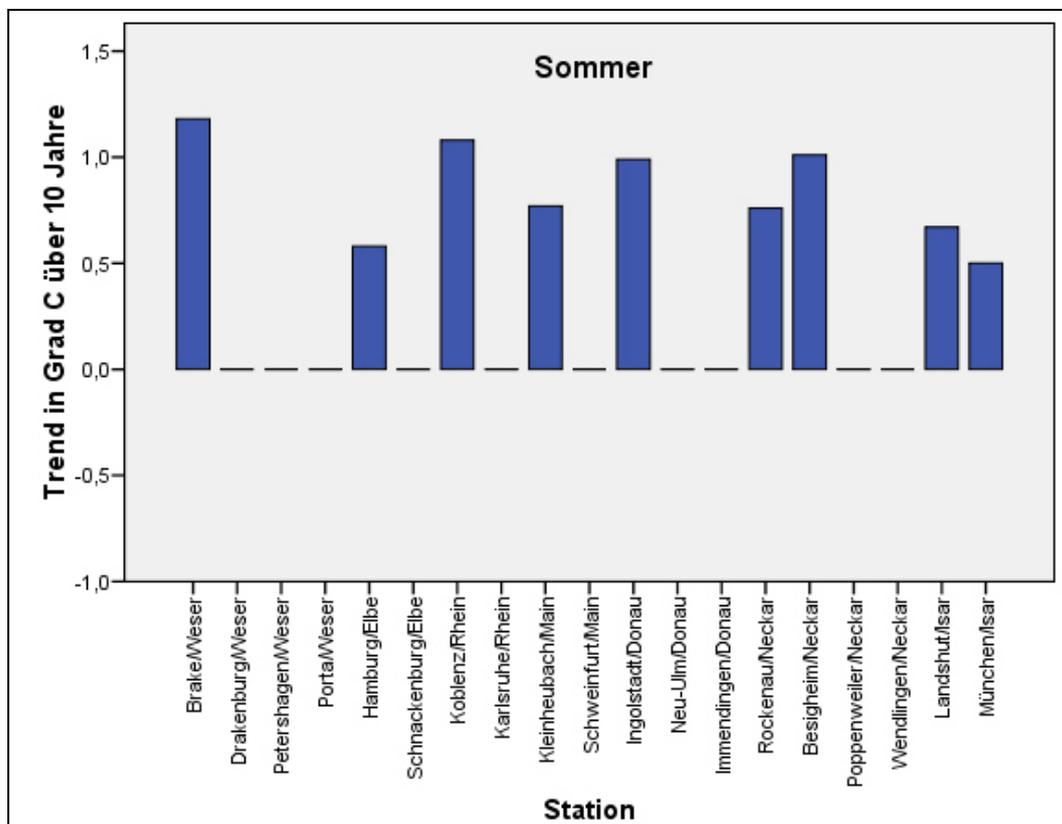


Abb. 1: Überblick über signifikante (>90 %) Trends im Sommer (Juni, Juli, August). Quelle: GREIS 2007

Die Ergebnisse dieser Analysen zeigen positive Trends der Wassertemperaturen an allen Messpunkten in den Frühjahr- und Sommermonaten (vgl. Abbildung 1). Im Herbst und Winter sind dagegen zum Teil (an Weser, Neckar) negative Trends zu verzeichnen.

Auch bei den Häufigkeiten von Extremwerten liegen für alle Flüsse positive Trends vor. Aus einer Betrachtung der empirischen Wahrscheinlichkeiten für das Erreichen verschiedener Schwellenwerte ergibt sich ein ähnliches Bild: Die zeitlich gleitende Berechnung zeigt eine Zunahme der Extremwertwahrscheinlichkeiten für die meisten Flüsse (Ausnahmen: Elbe, Main; vgl. Abbildung 2) (GREIS 2007).

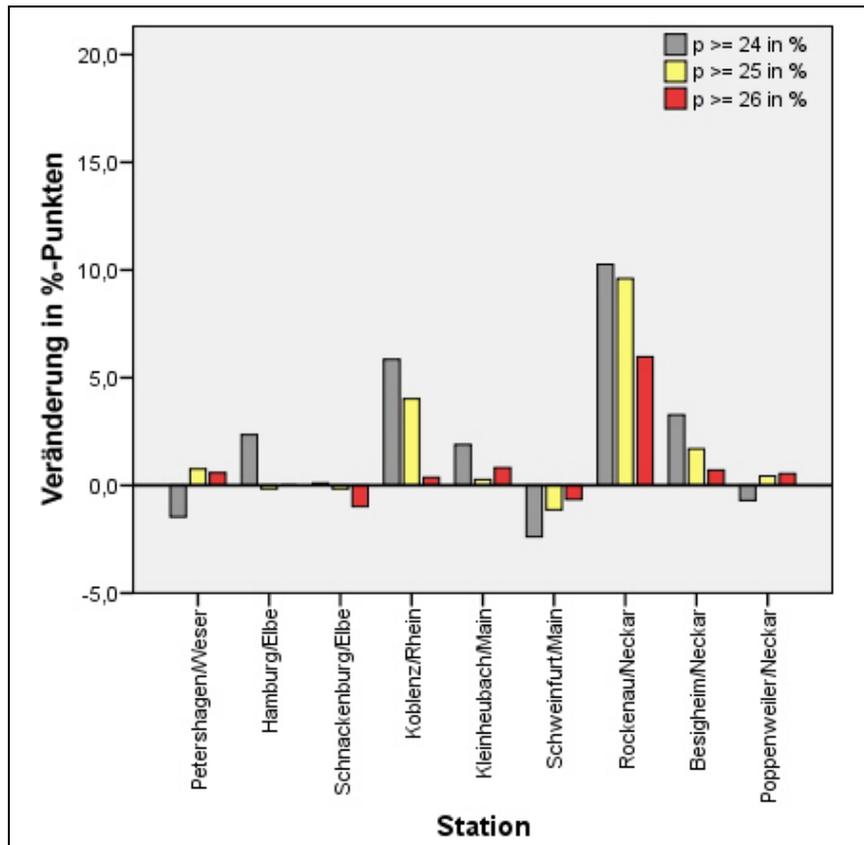


Abb. 2: Veränderung der Wahrscheinlichkeiten, dass extreme Wassertemperaturen erreicht werden, bei Vergleich der Zeiträume 1995-2005 und 1985-1995. Quelle: GREIS 2007

Die Trends zeigen sowohl eine rezente Zunahme der Wassertemperaturen im Mittel als auch eine höhere Wahrscheinlichkeit für das Erreichen wasserrechtlicher Grenzwerte. Dass diese deutschlandweit in der Vergangenheit bereits erreicht wurden, zeigt zudem das folgende Kapitel. In diesem werden die dadurch entstandenen Auswirkungen auf die Elektrizitätserzeugung thermischer Kraftwerke auf Basis einer Medienanalyse dargestellt.

3.1.2 Leistungseinschränkungen thermischer Kraftwerke aufgrund gesetzlich festgelegter Grenzwerte

In der Vergangenheit traten bereits bei verschiedenen thermischen Kraftwerken in Deutschland Leistungseinschränkungen aufgrund wasserrechtlicher Bestimmungen auf. Seit der Liberalisierung des Strommarktes gelten jedoch diesbezügliche Daten als wettbewerbsrelevant und sind daher öffentlich nicht zugänglich (SCHEIDT 2002). Um dennoch einen detaillierten Einblick zu erhalten, wurde eine Medienanalyse durchgeführt. In dieser wurde untersucht, in welchen Jahren bei wie vielen Kraftwerken Leistungsreduktionen in welcher Höhe auftraten (MÜLLER et al. 2007, 2008).

Die Medienanalyse basiert auf einer umfassenden systematischen Archivrecherche diverser deutscher Zeitschriften und nationaler sowie regionaler Wochen- und Tageszeitungen. Nach einer systematischen Auswahl nach themenrelevanten Suchbegriffen standen 157 Artikel zur Auswertung zu Verfügung. In insgesamt neun Jahren von 1976 bis 2007 führten in Deutschland Hitze- und Trockenperioden verbunden mit hohen Wassertemperaturen zu Leistungseinschränkungen thermischer Kraftwerke aufgrund wasserrechtlicher Bestimmungen (vgl. Abbildung 3) (MÜLLER et al. 2007, 2008).

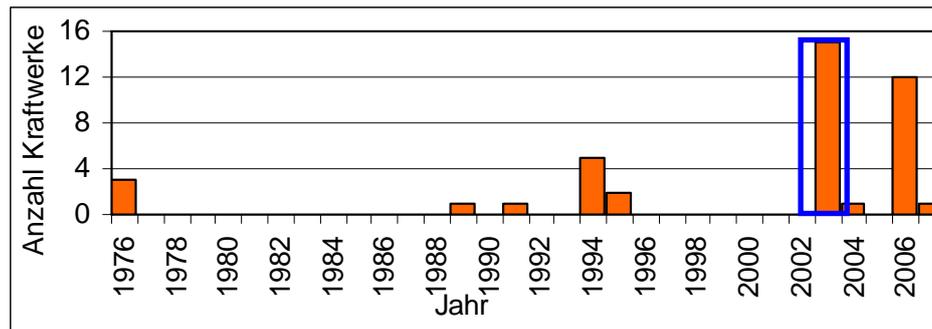


Abb. 3: Leistungseinschränkungen thermischer Kraftwerke in Deutschland aufgrund wasserrechtlicher Bestimmungen. Quelle: verändert nach MÜLLER et al. 2008

Vor allem während des Hitzesommers 2003 (in Abbildung 3 blau markiert) waren alleine in Deutschland bis zu 15 thermische Kraftwerke zu einer Leistungsreduktion aufgrund hoher Wassertemperaturen oder Niedrigwasser gezwungen. Da die vorherrschende Großwetterlage die Stabilität der Stromversorgung europaweit gefährdete, war die Situation bei den deutschen Stromerzeugern extrem angespannt (VDEW 2003). Welchen Umfang die Leistungseinschränkungen im Einzelnen hatten und bei welchen Kraftwerken Ausnahmegenehmigungen erteilt wurden zeigt Tabelle 4.

Tab. 4: Auswirkungen der Hitze im Sommer 2003 auf den Kraftwerksbetrieb in Deutschland. Verschiedene Quellen nach ROTHSTEIN 2007

Kernkraftwerk Obrigheim/Neckar (Baden-Württemberg)

- Zeitweilige (Zwangs-)Abschaltung aufgrund von Problemen mit Kühlwasser (AP 2003; FAZ 2003; HILBERT 2003; HEILIG 2003; SWR 2003)
- Routinemäßige Jahresprüfung um zehn Tage vorgezogen (FAZ 2003; HILBERT 2003; SWR 2003)

Kernkraftwerk Neckarwestheim/Neckar (Baden-Württemberg)

- Auf Anordnung des Umweltministeriums wurde Leistung auf 80 % reduziert (FAZ 2003; FTD 2003; HILBERT 2003; SCHULTE 2003; SWR 2003)
- Landesregierung erließ Ausnahmeregelung für Einleitung von Kühlwasser; hierdurch durfte der Neckar durch Einleiten von Kühlwasser auf 30 °C statt auf höchstens 28 °C erwärmt werden (FTD 2003; HILBERT 2003)
- Ein Wärmekraftwerk flussaufwärts wurde abgeschaltet; dadurch konnte Temperatur des Neckars wieder sinken (FAZ 2003; SWR 2003)

Kernkraftwerk Philippsburg/Rhein (Baden-Württemberg)

- Auf Anordnung des Umweltministeriums wurde die Leistung auf 80 % reduziert (FAZ 2003; FTD 2003; HILBERT 2003; STUTTGARTER ZEITUNG 2003; SWR 2003)
- EnBW wies nach, dass Block II auch bei höheren Rheinwassertemperaturen sicher betrieben werden kann; diesen TÜV-geprüften Nachweis wollte EnBW auch für Block I vorlegen; bis 19.08.2003 durfte das Wasser des Rheins zum Kühlen höchstens 25 °C warm sein (STUTTGARTER ZEITUNG 2003)
- Landesregierung erließ Ausnahmeregelung für die Einleitung von Kühlwasser; hierdurch durfte Rhein durch Einleiten von Kühlwasser auf 30 °C statt auf höchstens 28 °C erwärmt werden (FTD 2003; HILBERT 2003)

Kernkraftwerk Krümmel/Elbe (Schleswig-Holstein)

- Anfang August 2003 wurde das Kraftwerk wegen der Hitze nachmittags nur zu 60 % ausgelastet, da nur 30 °C warmes Kühlwasser eingeleitet werden durfte (FAZ 2003; HEILIG 2003)

Fortsetzung Tabelle: siehe nächste Seite

Kernkraftwerk Brunsbüttel/Elbe (Schleswig-Holstein)

- Nutzte seine Kapazität zeitweise nur zu 86 % aus, da nur 33 °C warmes Kühlwasser eingeleitet werden darf (FAZ 2003; HEILIG 2003)

Kernkraftwerk Stade/Elbe (Niedersachsen)

- Stundenweise Reduktion der Kraftwerksleistung um 10-15 % (FAZ 2003); Grund war nicht die starke Erwärmung des Flusses durch den Reaktor, sondern die Temperatur des in das Kraftwerk strömenden Kühlwassers (überschritt bereits Grenze von 25 °C) (AP 2003)
- Zulässige Wärmeleistung des Kraftwerks wurde um 15 % reduziert (entspricht einer Verringerung der Stromproduktion um 100 MW) (HEILIG 2003)
- In Niedersachsen wurde bis zum 08.08.2003 kein Kraftwerk wegen Hitze abgeschaltet (FAZ 2003)

Kernkraftwerk Brokdorf/Elbe (Schleswig-Holstein)

- Bis zum 08.08.2003 hatte das Kraftwerk keine Probleme und konnte unter voller Last weiter laufen (FAZ 2003); Anmerkung: Kernkraftwerk Brokdorf bezieht phasenweise Kühlwasser aus dem Wattenmeer (AFP 2003)

Kernkraftwerk Unterweser/Weser (Niedersachsen)

- Kraftwerksleistung wurde gedrosselt wegen Kühlwasserproblem; je nach Tageszeit und Wassertemperatur bewegte sich die Leistung zwischen 30 und 56 % (AP 2003; FAZ 2003; HEILIG 2003)
- Bei einer Wassertemperatur der Weser von 26 °C hätte das Kraftwerk vom Netz gehen müssen; unterhalb des Reaktors wurde eine Maximaltemperatur der Weser von 25,8 °C gemessen (AP 2003)
- In Niedersachsen wurde bis zum 08.08.2003 kein Kraftwerk wegen Hitze abgeschaltet (FAZ 2003)

Kernkraftwerk Isar 1 und 2/Isar (Bayern)

- Kraftwerksleistung wurde auf 60 % gedrosselt, da kein Kühlturm vorhanden (FAZ 2003; HEILIG 2003; HILBERT 2003; SZ 2003)
- Sondergenehmigung zur Einleitung von Kühlwasser in die Isar wurde erteilt; hierdurch darf die Isar durch Einleiten von Kühlwasser auf 27 °C statt auf höchstens 25 °C erwärmt werden (FTD 2003; HILBERT 2003; SZ 2003); nach Ende der Hitzewelle gilt wieder der alte Grenzwert (HILBERT 2003)
- In Bayern wurde bis zum 08.08.2003 ein Abschalten der fünf Kernkraftwerke nicht erwogen (FAZ 2003; FTD 2003)

Kernkraftwerk Biblis/Rhein (Hessen)

- Zusätzliche Kühltürme am Block B mehrere Wochen in Betrieb, um Wärmebelastung des Rheins zu reduzieren (FAZ 2003)
- Am 07.08.2003 wurden zusätzlich die Kühltürme des zu dieser Zeit stillgelegten Blocks A aktiviert, um einer zu starken Wärmebelastung des Rheins vorzubeugen (FAZ 2003)
- Vorsorgliche Erteilung einer Ausnahmegenehmigung (AFP 2003)

Kernkraftwerke Grohnde/Weser und Emsland/Ems (Lingen II) (Niedersachsen)

- Bis zum 10.08.2003 waren keine Leistungsabsenkungen erforderlich, da die Kraftwerke über eigene Kühltürme verfügen (HEILIG 2003)

Kohlekraftwerke Voerde/Rhein und Walsum/Rhein (Nordrhein-Westfalen)

- Gedrosselte Leistung (AFP 2003; SCHULTE 2003)

Dampfkraftwerke Karlsruhe/Rhein und Heilbronn/Neckar (Baden-Württemberg)

- Erteilung von Sondergenehmigungen für die Überschreitung der in den Wasserrechten der Kraftwerke festgelegten Einleitungsbedingungen (AFP 2003)
- Gleichzeitige Überwachung der ökologischen Belastung des Rheins und des Neckars durch Landesanstalt für Umwelt (AFP 2003)

3.1.3 Wirkungsgradverringering thermischer Kraftwerke durch hohe Wassertemperaturen

Thermische Kraftwerke können dann einen möglichst hohen Wirkungsgrad erreichen, wenn die Temperatur- und damit auch die Druckdifferenz zwischen der Dampf-Eintritts- und der Dampf-Austritts-Temperatur vor und nach der Turbine möglichst hoch sind. Um dieses zu erreichen, wird der Abdampf nach den Turbinen soweit wie möglich abgekühlt. Maximal durchführbar ist dies bei kühlwassernutzenden thermischen Kraftwerken bis in die Nähe der Temperatur des verwendeten Kühlmediums Wasser. Hohe Gewässertemperaturen, wie sie im Sommer häufig vorkommen, vermindern die nutzbare Temperaturspanne des Dampfes im Kraftwerksprozess. Dies resultiert in einem geringeren Wirkungsgrad der Kraftwerke (WAGNER 2002, 2003, 2004). Wird nun von einem weiter positiven Trend der Wassertemperatur von Vorflutern ausgegangen (vgl. Kapitel 3.1.1), hätte dies in Zukunft eine geringere Leistungsabgabe thermischer Kraftwerke zur Folge. Allerdings sind diese klimawandelbedingten Auswirkungen auf den Wirkungsgrad nur als marginal zu beurteilen. Der Einfluss der veränderten Wassertemperaturspanne zwischen Sommer und Winter ist dagegen deutlich höher (ROTHSTEIN 2007).

3.1.4 Höhere Instandhaltungskosten durch vermehrte Biofilmbildung

Höhere Wassertemperaturen können neben Leistungseinschränkungen oder Wirkungsgradverlusten auch höhere Kosten für die Instandhaltung verursachen. Grund hierfür kann die Biofilmbildung in Leitungssystemen des Kraftwerks sowie auf den Lamellen in Kühltürmen sein. Biofilme bestehen aus Mikroorganismen (z.B. Bakterien, Algen, Pilze), die sich auf einer Oberfläche (z.B. Rohrleitung) angesiedelt haben. Ist das von Kraftwerken genutzte Wasser in Zukunft wärmer, so ist davon auszugehen, dass sich die Lebensbedingungen für Mikroorganismen verbessern. Hierdurch kommt es zu einem Zuwachs des Biofilms in den Leitungssystemen sowie auf den Lamellen des Kühlturms (Packing). Die Ausscheidungen der Biofilmorganismen können die Korrosion ihrer Unterlage beschleunigen (Biokorrosion). Außerdem können Probleme mit der Wasserhygiene (z.B. Vermehrung von Legionellen) entstehen, die allerdings durch Chlorzugabe und UV-Strahlenbehandlung des Wassers gelöst werden können (ROTHSTEIN 2007).

3.2 Niedrigwasserereignisse – Trends und Extreme sowie Auswirkungen auf die Elektrizitätswirtschaft

Während hohe Wassertemperaturen gewöhnlich nur in den Sommermonaten auftreten, können Niedrigwassersituationen in Fließgewässern zu allen Jahreszeiten vorkommen. Diese schränken zum einen die Binnenschifffahrt und somit die Kohletransportmöglichkeiten zu Steinkohlekraftwerken ein. Zum anderen können sie die Elektrizitätsproduktion von thermischen und Laufwasserkraftwerken beeinträchtigen.

3.2.1 Mögliche Niedrigwasserentwicklung

Einige globale Klimamodelle prognostizieren für Deutschland eine Abnahme der Niederschläge im Sommer und eine Zunahme im Winter. Als mögliche Konsequenz könnte den Flüssen im Sommer weniger Wasser zur Verfügung stehen. ZEBISCH et al. (2005) schätzen, dass die relative Veränderung im Sommerabfluss (Juni bis August) in Deutschland bis 2080 (gegenüber 1990) bei $-43\% \pm 5\%$ liegt (vgl. Abbildung 4).

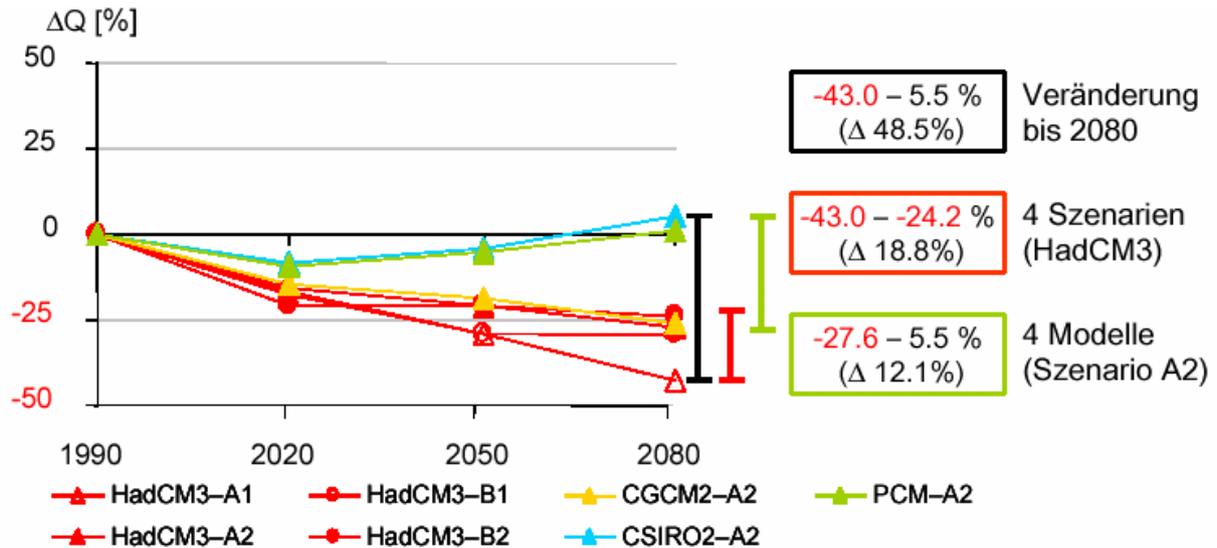


Abb. 4: Relative Veränderung [%] im Sommerabfluss (Juni, Juli, August) in Deutschland gegenüber 1990 für sieben ATEAM-Szenarien bis 2080. Quelle: ZEBISCH et al. 2005

Da globale Modelle jedoch gegenwärtig Daten in einer horizontalen Auflösung von lediglich etwa 200 x 200 km zur Verfügung stellen können (UBA 2007), werden vermehrt regionale Klimamodelle (z.B. WETTREG, REMO, STAR) verwendet, um detailliertere Informationen zu erhalten. Dabei gibt es verschiedene Vorgehensweisen, um regionale Daten zu erhalten. Der Hauptunterschied besteht darin, ob es sich bei dem Ansatz um einen statistischen oder dynamischen handelt. Die Ergebnisse dieser regionalen Klimamodelle variieren insbesondere im Bezug auf den Niederschlag sowohl in der (jahres-)zeitlichen als auch in der räumlichen Entwicklung zum Teil deutlich. Sowohl WETTREG als auch REMO projizieren für dieses Jahrhundert einen (je nach Region) deutlichen Rückgang der Niederschläge im Sommer und eine Zunahme im Winter. Dabei ist der Rückgang der Niederschläge im Sommer insbesondere im Norden (bei REMO auch im Süden) Deutschlands zu beobachten, während im Winter vor allem in den Gebirgen eine Zunahme des Niederschlags berechnet wird. Das statistische Modell STAR geht von einem Rückgang der Jahresniederschläge in den meisten Gebieten Deutschlands aus, wodurch sich, in Kombination mit steigenden Temperaturen, ein negativer Einfluss auf die Wasserbilanz errechnen würde (UBA 2007, HAGEMANN & JACOB 2006, WERNER & GERSTENGABE 2007).

Quantitative, regional differenzierte und damit planungsrelevante Einschätzungen der zukünftigen Klimaentwicklung und Klimafolgen sind derzeit nur mit großen Unsicherheiten möglich. So lässt sich bislang noch nicht belastbar abschätzen, in welchem Umfang sich die projizierten Änderungen der annualen Niederschlagsverteilung auf die Anzahl, Intensität und Dauer von Niedrigwasserperioden an wichtigen Binnenwasserstraßen wie dem Rhein auswirken. Lediglich für die Entwicklung in der Vergangenheit sind inzwischen erste Aussagen möglich.

Abbildung 5 veranschaulicht die Unterschreitungsdauern eines schiffahrtsrelevanten Grenzwertes (GIQ) am Mittelrhein (Pegel Kaub) für 30-Jahreszeiträume in der Zeitspanne 1900-1990 bzw. für den Zeitraum 1991-2006. Es wird deutlich, dass sowohl die Anzahl als auch die Dauer der Unterschreitungsperioden in weiten Grenzen schwanken und somit der

Elektrizitätswirtschaft schon immer eine gewisse Flexibilität bei der Brennstofflogistik abverlangt haben. Die Frage, ob und in welchem Maße sich beobachtete klimatische Trends hier durchpausen, ist derzeit noch nicht zu beurteilen. Die erforderlichen Datengrundlagen (200-Jährige Zeitreihen) werden aktuell durch die Bundesanstalt für Gewässerkunde (BfG) erarbeitet und ausgewertet.

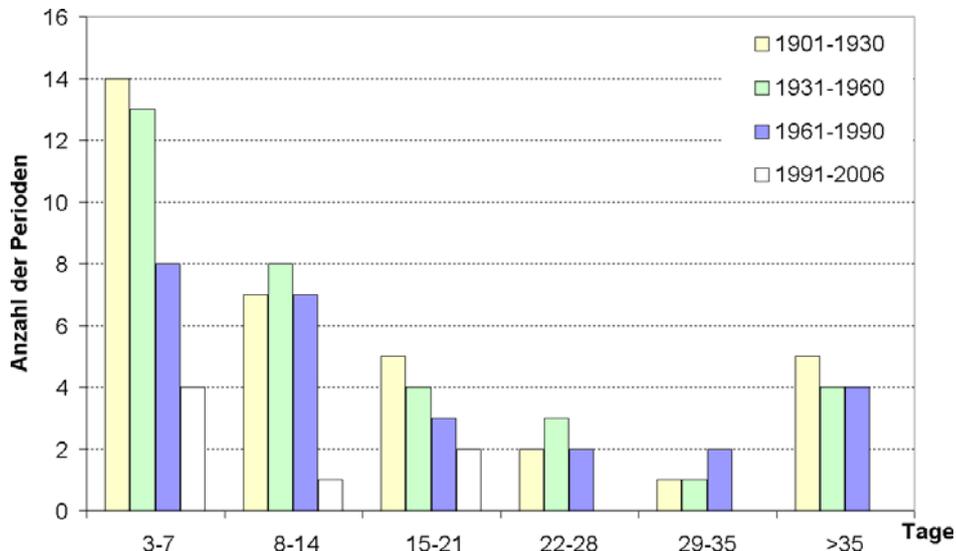


Abb. 5: Unterschreitungsdauer des GIQ ($759\text{m}^3/\text{s}$) im Zeitraum 1900-2006 am Pegel Kaub, Rhein. Quelle: BfG, unveröffentlicht

Qualitative Aussagen zum zukünftigen Abflussgeschehen werden derzeit diskutiert: Nach SCHABALOVA & BUIHAND (2002) nimmt die Frequenz von niedrigen und sehr niedrigen Abflüssen des Rheins in Zukunft zu. KRAHE (2000) geht von einer Verschärfung der Niedrigwassersituation im Sommer aus.

Extremszenarien entwirft das Potsdam Institut für Klimafolgenforschung (PIK). Demnach ist die zukünftige Schiffbarkeit des Neckars nicht eindeutig bestimmbar – im ungünstigsten Fall ist jedoch mit einer Zunahme der Einschränkungen von sechs auf 15 Tagen pro Jahr zu rechnen (PIK 2005).

3.2.2 Schiffstransport von Kohle bei Niedrigwasser

Während bei Hochwasser ein allgemeines Fahrverbot besteht (vgl. Kapitel 3.3.2), existiert dieses bei Niedrigwasser (Kleinwasser) nicht. Die Schiffsführer müssen in Eigenverantwortung beurteilen, ob für ihr Schiff noch genügend Wassertiefe in der Fahrrinne zur Verfügung steht. Der hierfür maßgebliche Tiefgang des Schiffes kann wiederum über dessen Ladung reguliert werden.

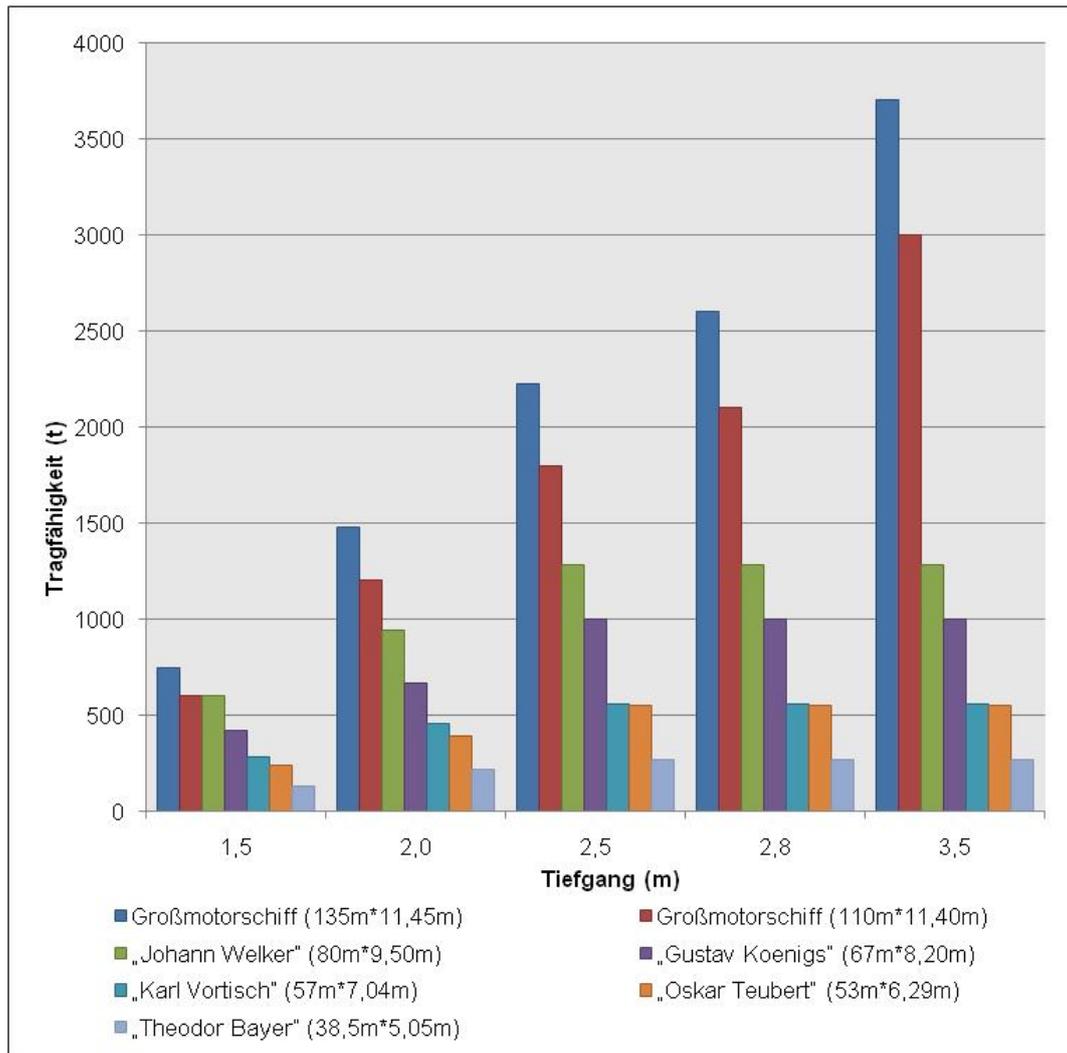


Abb. 6: Tragfähigkeit exemplarischer Binnenschiffe nach Tiefgang. Quelle: eigene Darstellung nach WESKA 2006

Abbildung 6 zeigt, wie sich für exemplarische Rheinschiffstypen die Tragfähigkeit in Abhängigkeit zur Wassertiefe verhält. Dabei ist zu beachten, dass sich diese für die kleineren Schiffe ab einem Tiefgang von 2,50 m nicht mehr ändert, da diese dann ihre maximale Tragfähigkeit erreicht haben. Je weniger Ladung ein Schiff transportieren kann, desto teurer wird der Transport pro Tonne, da der Preis pro Fahrt weitgehend konstant bleibt (JONKEREN et al. 2007).

Während des Sommers 2003 beispielsweise mussten auf dem Rheinabschnitt zwischen Duisburg und Karlsruhe kleine Schiffe ein Drittel ihres Frachtraums unbeladen lassen, große Verbände sogar zwei Drittel. Grund hierfür waren die historischen Tiefststände, die der Pegel Kaub am Mittelrhein erreichte. Zeitweise wurden nur noch 35 cm gemessen, 7 cm tiefer als die bisherige Rekordmarke aus dem Trockensommer 1947. Dies bedeutete, dass nur noch Schiffe mit einem Tiefgang von maximal 1,45 m in der Fahrrinne verkehren konnten. Südlich von Karlsruhe ist der Rhein dagegen so stark kanalisiert, dass das Niedrigwasser nur geringe Folgen hatte (BUWAL et al. 2004; SEIDEL 2003).

Durch die sogenannten „Kleinwasserzuschläge“ beeinflusst die verfügbare Wasser- bzw. Abladetiefe maßgeblich die Transportkosten. Im Jahre 2003 verteuerten sich die Frachtpreise pro Tonne während der Niedrigwasserperioden um bis zu 100 %, verglichen mit

„normalen“ Pegelständen. Diese Verteuerung verursachte etwa 172 Mio. € Wohlfahrtsverluste für die Volkswirtschaft (JONKEREN et al. 2005).

Für den Fall einer Zunahme von Extremereignissen wie langanhaltende Dürre oder Starkregen könnte es häufiger zu eingeschränkten Fahrwasserverhältnissen für die Binnenschifffahrt kommen. Hierdurch würden die Kostengunst und Zuverlässigkeit der wasserstraßengebundenen Transporte beeinträchtigt. Letztendlich würde sich dies negativ auf die Wettbewerbsfähigkeit – insbesondere von massengutaffinen Branchen – auswirken. Der Transport einer Tonne Kohle ist derzeit per Bahn etwa doppelt so teuer wie per Schiff. Diese Transportmehrkosten haben jedoch einen relativ geringeren Stellenwert im Vergleich zur Gefahr von Einnahmeverlusten, wenn ein Kraftwerk aufgrund von Kohletransportengpässen stillsteht bzw. gedrosselt werden muss (ROTHSTEIN 2007).

Nach STEAG (2006) wird auch in Zukunft die Kohle als Energieträger für die Stromproduktion nicht zu ersetzen sein. Gründe hierfür sind u.a. die großen Reserven, der gefahrlose Transport sowie die einfachen Transport- und Lagerungsmöglichkeiten (STEAG 2006). Gleichzeitig wird die Abhängigkeit von importierter Steinkohle weiter steigen. Es wird erwartet, dass für Europa die Importquote von derzeit etwa 30 % bis zum Jahr 2030 auf über 60 % zunehmen wird (EC 2004). Hierdurch wird auch die Frage des Transports von Kohle immer wichtiger.

3.2.3 Leistungseinschränkungen thermischer Kraftwerke aufgrund von Niedrigwasser

Bezüglich der Kühlung thermischer Kraftwerke existieren durch die wasserrechtliche Genehmigung Auflagen für die Kraftwerksbetreiber (vgl. Kapitel 2.1). Bei Kühlturbetrieb gelten standortspezifische Grenzwerte für die Wasserentnahme aufgrund der Verdunstungsverluste. Beim Erreichen der Grenzwerte muss die Kraftwerksleistung entsprechend reduziert werden (ROTHSTEIN 2007). Die Grenzwerte zur Wasserentnahme werden insbesondere bei kleineren Flüssen (z.B. Neckar) jeweils standortbezogen festgelegt, um den Fluss bei Niedrigwasser vor weiteren Verdunstungsverlusten zu schützen. An größeren Flüssen, wie beispielsweise am Rhein, sind solche Regelungen nicht erforderlich, da aufgrund des großen Wasserdargebots selbst bei Niedrigwasser keine negativen Auswirkungen auf die ökologischen Verhältnisse zu befürchten sind (LFU 2004).

3.2.4 Leistungseinschränkungen von Laufwasserkraftwerken aufgrund von Niedrigwasser

Die Leistung einer Laufwasserkraftanlage ist von der Menge des Durchflusses sowie von der Fallhöhe abhängig (vgl. Kapitel 2.3). Die Fallhöhe hängt insbesondere von der Höhe des Unterwasserspiegels ab, da der Oberwasserspiegel nahezu konstant gehalten wird (KALTSCHMITT et al. 2003). Mit sinkendem Abfluss geht – trotz steigender Fallhöhe bei geringerem Unterwasserspiegel – die Stromerzeugung aufgrund der verringerten Durchflussmenge zurück. Bei starkem Niedrigwasser muss die Anlage unter Umständen abgeschaltet werden, da die Turbinen erst bei einem gewissen Mindestdurchfluss betrieben werden können. Wann der Betrieb eines Laufwasserkraftwerks nicht mehr möglich ist, ist vom jeweiligen Kraftwerk bzw. Flussabschnitt abhängig. Daher gibt es hierzu keine einheitlichen Schwellenwerte. Für kleine Wasserkraftanlagen (bis 1.000 kW) wird die Ermittlung des

Mindestabflusses beispielsweise in Baden-Württemberg durch den so genannten „Wasserkrafterlass“ seit 1993 geregelt (LFU 2005a).

3.3 Hochwasserereignisse – Trends und Extreme sowie Auswirkungen auf die Elektrizitätswirtschaft

Die Hochwasserereignisse an Elbe (2002 und 2006), Oder (1997) und Rhein (1993, 1995 und 1999) zeigten, dass kritische Infrastrukturen, zu denen auch die Elektrizitätswirtschaft zählt, besonders von Hochwassern betroffen sein können. Um Kraftwerksstandorte auch im Zuge eines sich verändernden Klimas an die Situation anzupassen, sind Szenarien und Maßnahmen zum Hochwasserschutz unumgänglich.

3.3.1 Hochwasser in Vergangenheit und Zukunft

Eine Untersuchung von insgesamt 158 Pegeln in Bayern und Baden-Württemberg zeigt, dass die meisten Pegel bisher keine signifikanten Änderungen in Bezug auf die Hochwasserabflüsse erfahren haben. In den letzten 30 bis 40 Jahren wurde allerdings ein Anstieg der Hochwasserhäufigkeiten im Winter festgestellt. Dies könnte durch die saisonale Verschiebung der Starkniederschläge erklärt werden (AK KLIWA 2002).

Am Beispiel des Rheins soll nun erläutert werden, welche Auswirkungen eine Klimaänderung auf Hochwasserereignisse hat. Berechnungen zeigen, dass der Abfluss des Rheins im Jahresmittel leicht zunimmt: Im Winterhalbjahr ist eine Zunahme von ca. 10 % zu verzeichnen, im Sommerhalbjahr hingegen eine Abnahme um ca. 5 % (MOSER 2006). Dies lässt sich auch für weitere Flusspegel innerhalb Baden-Württembergs bestätigen (LUBW 2006). Ein Grund für die Steigerung im Winter könnte die Zunahme von Niederschlägen in Form von Regen sein. Der Wasserspeicher Schnee entfällt dagegen.

Ausgehend von vorliegenden Klimaprojektionen und daraus abgeleiteten Veränderungen im Abflussverhalten der Flüsse wurde durch den Länderarbeitskreis KLIWA die Einführung eines regional unterschiedlichen Klimaänderungsfaktors vorgeschlagen (AK KLIWA 2006), der in den damaligen Mitgliedsländern Bayern und Baden-Württemberg bei der Bewertung bestehender und Planungen neuer Anlagen zu berücksichtigen ist. Dabei wird davon ausgegangen, dass durch den Klimawandel vor allem die Niederschläge im Winter zunehmen werden und damit die Gefahr steigt, dass mittlere Hochwasserereignisse zukünftig häufiger werden. Wird der Klimaänderungsfaktor beispielsweise auf Bemessungswasserstände angewandt, so ergibt sich für gewisse Wiederkehrwahrscheinlichkeiten ein erhöhter Abfluss (LUBW 2006, Tab. 5).

Für ein Hochwasserereignis mit einer 100-jährlichen Eintrittswahrscheinlichkeit muss, je nach regionaler Einteilung, der Hochwasserabfluss mit 1,15 bzw. 1,25 multipliziert werden. Die bei einigen thermischen Kraftwerken vorgeschriebenen Schutzgrade gegen ein 1000- bis 10.000-jährliches Ereignis sind von den Klimaänderungsfaktoren, wie aus Tabelle 5 ersichtlich, nicht betroffen.

Tab. 5: Überblick der Klimaänderungsfaktoren in Baden-Württemberg. Blau hervorgehoben sind die in der Wasserwirtschaft relevantesten Eintrittswahrscheinlichkeiten von HQ2 und HQ100. Quelle: verändert nach LFU 2005b

T [Jahre]	Klimaänderungsfaktoren $f_{T,K}$				
	1	2	3	4	5
2	1,25	1,50	1,75	1,50	1,75
5	1,24	1,45	1,65	1,45	1,67
10	1,23	1,40	1,55	1,43	1,60
20	1,21	1,33	1,42	1,40	1,50
50	1,18	1,23	1,25	1,31	1,35
100	1,15	1,15	1,15	1,25	1,25
200	1,12	1,08	1,07	1,18	1,15
500	1,06	1,03	1,00	1,08	1,05
1000	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00

Für alle Jährlichkeiten $T > 1000$ Jahre gilt der Änderungsfaktor 1,00

3.3.2 Hochwasserschutzmaßnahmen von Kraftwerken im Zuge einer Klimaänderung

Da thermische Kraftwerke auf unterschiedlichen Geländeniveaus gebaut wurden und werden, kann für den Schutz von Kraftwerken gegen Hochwasser kein einheitlicher Bemessungswasserstand angegeben werden. Studien zeigen, dass sich der Bemessungswasserstand in der Folge einer Klimaänderung vor allem im Winter verändern könnte (CASPARY 2004). Aus diesem Grunde orientieren sich Hochwasserschutzmaßnahmen an der Angabe der sich ändernden Jährlichkeit des Eintretens eines Hochwassers. So wird beispielsweise die Deichhöhe durch Berechnungen aus Bemessungshochwasserstand und dem sogenannten Freibord, dem vertikalen Abstand zwischen Bemessungshochwasser und Deichkrone, ermittelt (DIN 19712 1997).

Die Internationale Kommission zum Schutz des Rheins (IKSR) erstellte den sogenannten Aktionsplan Hochwasser, der eine Reduzierung der Hochwasserscheitel im Rhein am Pegel Maxau um 31 cm und am Pegel Worms um 29 cm bis zum Jahr 2005 und maximal 70 cm bis zum Jahr 2020 vorsieht (IKSR 2006). Zusammen mit standortspezifischen Maßnahmen kann so ein Schutz von Kraftwerken gegen Hochwasserereignisse erreicht werden.

Eine weitere, mögliche langfristige Anpassungsmaßnahme ist es, Umspannwerke in hochwassergefährdeten Gebieten auf weniger exponierte Standorte zu verlegen. Bislang wurden allerdings selbst stark hochwassergefährdete Anlagen (z.B. Umspannwerke Niederwartha, Freital, Rosenberg) nicht verlegt, weil dies mit hohen Kosten verbunden und oftmals kein geeigneter alternativer Standort vorhanden gewesen wäre (ROTHSTEIN 2007).

3.3.3 Schiffstransport von Kohle bei Hochwasser

Bei Hochwasser gibt es einen „höchsten schiffbaren Wasserstand“ (HSW), bei dessen Überschreitung alle Schiffe vor Anker gehen müssen (Hochwasserstufe 2). Diese Grenze liegt z.B. in Karlsruhe-Maxau bei 7,50 m. Während bei Hochwasser auf dem Rhein mit einer durchschnittlichen Einschränkung der Schifffahrt von drei bis vier Tagen zu rechnen ist, beträgt diese am Neckar bis zu einer Woche. Gründe für diese längere Dauer sind zum einen, dass der Hochwasserabfluss am Neckar aufgrund der 27 Staustufen verzögert ist. Zum anderen muss die Fahrrinne nach einem Hochwasser erneut ausgebagert werden (ROTHSTEIN 2007).

Festzuhalten bleibt, dass die Binnenschifffahrt und somit indirekt auch die (Kohle-) Kraftwerksbetreiber in zweifacher Hinsicht vom Klimawandel betroffen sind: zunehmende

Höchstabflüsse im Winter sorgen für Schiffbarkeitsprobleme, Niedrigwasser im Sommer sind dagegen problematisch für Navigationstiefe und Beladungskapazitäten (vgl. Kapitel 3.2.1) (MIDDELKOOP & KWADIJK 2000; HÖNEMANN 2006). Süddeutschland ist bei der Erzeugung von Elektrizität durch Steinkohlekraftwerke bereits ohnehin durch den höheren Transportaufwand benachteiligt. Diese Standortnachteile können durch den Klimawandel weiter verstärkt werden (ROTHSTEIN 2007).

3.3.4 Elektrizitätserzeugung unter Hochwasserbedingungen

Durch entsprechende wasserbauliche Schutzanlagen (vgl. Kapitel 3.3.2) können thermische Kraftwerke oftmals auch bei Hochwasserereignissen ohne größere Probleme gefahren werden (STEININGER et al. 2003). Selbst eine Überflutung der Kühlturmtasse führt daher nicht zwangsweise zu einer Abschaltung des Kraftwerks, wenn das Kraftwerk alternativ im Durchlaufbetrieb gefahren werden kann (ROTHSTEIN 2007).

Die Leistung von Laufwasserkraftwerken steigt bei zunehmendem Abfluss bis das Schluckvermögen der Turbine erreicht ist. Abflüsse darüber führen zu einer geringeren Stromerzeugung, da die Fallhöhe durch den höheren Unterwasserspiegel sinkt. Im Extremfall muss die Stromerzeugung eingestellt werden, wenn der Höhenunterschied zwischen Ober- und Unterwasser zu gering wird (vgl. Kapitel 2.3; KALTSCHMITT et al. 2003; BUWAL et al. 2004). Für diesen Fall gibt es ebenso keine einheitliche Grenze, ab wann der Betrieb eines Laufwasserkraftwerks (und somit die Stromproduktion) wegen Hochwassers nicht mehr möglich ist. Darüber hinaus kommt Kraftwerken die zusätzliche Aufgabe zu, Hochwasserwellen durch eine entsprechende Steuerung des Wehrs zu regulieren (ENBW 2005).

4. Ausblick

Die Elektrizitätswirtschaft ist von zahlreichen meteorologischen und hydrologischen Parametern sowohl direkt als auch indirekt abhängig. Die bereits eingetretenen und zukünftig weiterhin möglichen Veränderungen dieser Parameter (Verschiebung von Mittelwerten, Häufung von Extremereignissen) lassen Anpassungsmaßnahmen seitens der Elektrizitätswirtschaft wahrscheinlich auch in Zukunft erforderlich werden.

Für viele der genannten Aspekte liegt auf der einen Seite bislang nur eine mangelhafte Datenbasis vor. Auf der anderen Seite sind insbesondere Aussagen zur zukünftigen Entwicklung von Extremwerten bei dem gegenwärtigen Stand der Forschung mit Unsicherheiten behaftet. Daraus ergibt sich ein weiterer Forschungsbedarf vor allem für einzelne Kraftwerksstandorte bezüglich Leistungseinschränkungen aufgrund von wasserrechtlichen Genehmigungen, (Kohle-)Transportmöglichkeiten bei Niedrig- und Hochwasserereignissen sowie der Anpassung von Hochwasserschutzmaßnahmen.

Neben der Notwendigkeit die Auswirkungen des Klimawandels näher zu identifizieren und quantifizieren, ist die Planung und Durchführung von Anpassungsmaßnahmen unumgänglich. Eine erfolgreiche Anpassung der Elektrizitätswirtschaft an den Klimawandel trägt wesentlich zur Gesamtanpassungsfähigkeit einer Gesellschaft bei, da viele Wirtschaftszweige sehr stark von einer ausreichend verfügbaren und zuverlässigen Energieversorgung abhängig sind.

Literatur

- ARBEITSKREIS KLIWA (AK KLIWA) (Hrsg.) (2002): Langzeitverhalten der Hochwasserabflüsse in Baden-Württemberg und Bayern. - KLIWA-Berichte, H. 2. Karlsruhe, 98 S.
- ARBEITSKREIS KLIWA (AK KLIWA) (Hrsg.) (2006): Unser Klima verändert sich. Folgen – Ausmaß – Strategien. - Broschüre. 17 S. - In: <http://www.kliwa.de/download/KLIWA.pdf> (18.04.2008).
- BUNDESAMT FÜR UMWELT, WALD UND LANDSCHAFT (BUWAL) et al. (Hrsg.) (2004): Auswirkungen des Hitzesommers 2003 auf die Gewässer. - Schriftenreihe Umwelt, Nr. 369. Bern, 174 S.
- CASPARY, H. J. (2004): Zunahme „kritischer“ Wetterlagen als Ursache für die Entstehung extremer Hochwasser in Südwestdeutschland. - In: KLIWA-Symposium 2004, S. 170-186.
- COOTER, E. J. & W.S. COOTER (1990): Impacts of greenhouse warming on water temperature and water quality in the southern United States. - In: Climate Research 1, S. 1-12.
- DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG E.V. (DIN) (1997): DIN 19712. Flußdeiche. Ausgabe 1997-11. Berlin, 32 S.
- EFFERTZ, P.-H. & W. FICHTE (1984): Kondensationsanlagen. - In: Allianz VersicherungsAG (Hrsg.): Allianz-Handbuch der Schadenverhütung. 3. Aufl. Berlin, München, S. 315-348.
- ENERGIE BADEN-WÜRTTEMBERG AG (ENBW) (2003): Jahrhundertflut – große Schäden für die Strombranche. - In: EnBW Energie Impulse, Ausgabe 1/2003, S. 2
- ENERGIE BADEN-WÜRTTEMBERG AG (ENBW) (2005): Wasser ist Energie – Wasserkraft bei der EnBW. Karlsruhe, 91 S.
- ENERGIE BADEN-WÜRTTEMBERG AG (ENBW) (2006): Fossile Energie. Die konventionellen Kraftwerke der EnBW. Ettlingen, 92 S.
- ENERGIE BADEN-WÜRTTEMBERG AG (ENBW) (2007): Uran ist Energie. Die Kernkraftwerke der EnBW. Karlsruhe, 86 S.
- EUROPEAN COMMISSION (2001): Integrated Pollution Prevention and Control (IPPC). Reference Document on the application of Best Available Techniques to Industrial Cooling Systems. 313 S. - In: <http://eippcb.jrc.es/pages/FActivities.htm> (02.04.2008).
- EUROPEAN COMMUNITIES (EC) (2004): European Energy and Transport Scenarios on Key Drivers. 266 S. - In: www.eu.int/comm/dgs/energy_transport/figures/scenarios/doc/2005_flyer_scenarios_on_key_drivers.pdf (09.05.2006).
- GREIS, S. (2007): Gewässertemperaturentwicklung und industrieller Kühlwasserbedarf. Eine statistische Analyse der Wassertemperaturentwicklung ausgewählter deutscher Flüsse im Zuge rezenter Klimatrends und deren Bedeutung für den industriellen Kühlwasserbedarf. - Diplomarbeit. Universität Würzburg, 146 S. (unveröffentlicht).
- HAGEMANN, S. & JACOB, D (2006): Regionale Auswirkungen des Klimawandels über Deutschland und dem Rhein-Einzugsgebiet. 12 S. - In: www.zukunft-statt-braunkohle.de/documents/hagemann_pulheim.pdf (21.04.2008).
- HARTKOPF, T. (2004): Jahresbericht 2003. - Rede zur Jahreshauptversammlung in Karlsruhe am 29. April 2004.

- HÖNEMANN, W. (2005): Klimaschutz und Klimawirkung als Herausforderung für Unternehmen der Binnenschifffahrt. - Vortrag zur BMBF-Fachkonferenz „Rheinklima“ in Bonn am 15.04.2005.
- HÖNEMANN, W. (2006): Climate Protection and Climate Change as a Challenge for Companies in the Inland Shipping Industry. - In: Climate Change – Consequences for Water Resources Management. Internationales DWA-Symposium zur Wasserwirtschaft, S. 101-104.
- INTERNATIONALE KOMMISSION ZUM SCHUTZ DES RHEINS (IKSR) (2006): Umsetzung des Aktionsplans Hochwasser. - Bericht 2005, Bezugsjahr 1995. PLEN-CC 17-06d. IKSR-Bericht Nr. 156d, 57 S.
- INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE (IPCC) (2007): Climate Change 2007: The Physical Science Basis. - Summary for Policymakers. Genf, 21 S.
- JONKEREN, O. et al. (2005): Welfare Effects of Water Level Variation on the Rhine through the Inland Waterway Transport Market. - 13 S. (unveröffentlicht).
- JONKEREN, O. et al. (2007): Climate Change an Inland Waterway Transport - Welfare Effects of Low Water Level on the river Rhine. - In: Journal of Transport Economics and Policy 41, H. 3, S. 387-411.
- KALIDE, W. (2005): Energieumwandlung in Kraft- und Arbeitsmaschinen. Kolbenmaschinen - Strömungsmaschinen - Kraftwerke. - München, Wien, 413 S.
- KALTSCHMITT, M. et al. (Hrsg.) (2003): Erneuerbare Energien. Systemtechnik, Wirtschaftlichkeit, Umweltaspekte. Berlin, Heidelberg, New York, 692 S.
- KERNTSCHNISCHE AUSSCHUSS (KTA) (2004): Sicherheitstechnische Regel KTA 2207. Schutz von Kernkraftwerken gegen Hochwasser. Salzgitter, 7 S.
- KOBUS, H. & F. BÜRKLE (1996): Konkurrierende Ansprüche an ein Fließgewässer – das Beispiel Neckar. - In: LEHN, H. et al. (Hrsg.): Wasser – die elementare Ressource. Berlin, Heidelberg, New York, S. 86-113.
- KRAHE, P. (2000): EU-Projekte zu Auswirkungen von Klimaveränderungen. - In: KLIWA-Symposium 2000, S. 236-249.
- KRENZKE, S. (2004): Die Wasserwirtschaft in Baden-Württemberg – Wasserbedarf, Abwasserbehandlung und Ableitung von Abwasser in Baden-Württemberg. - CD-Rom. Stuttgart.
- LÄNDERARBEITSGEMEINSCHAFT WASSER (LAWA) (Hrsg.) (1991): Grundlagen für die Beurteilung von Kühlwassereinleitungen in Gewässer. Berlin, 109 S.
- LANDESANSTALT FÜR UMWELT, MESSUNGEN UND NATURSCHUTZ BADEN-WÜRTTEMBERG (LUBW) (Hrsg.) (2006): Regionale Klimaszenarien für Süddeutschland. Abschätzung der Auswirkungen auf den Wasserhaushalt. - KLIWA-Berichte, H. 9, Karlsruhe, 102 S.
- LANDESANSTALT FÜR UMWELTSCHUTZ BADEN-WÜRTTEMBERG (LFU) (2004): Das Niedrigwasserjahr 2003. - In: Oberirdische Gewässer und Ökologie 85. Karlsruhe, 46 S.
- LANDESANSTALT FÜR UMWELTSCHUTZ BADEN-WÜRTTEMBERG (LFU) (2005a): Mindestabflüsse in Ausleitungsstrecken. Grundlagen, Ermittlung und Beispiele. Karlsruhe, 187 S.

- LANDESANSTALT FÜR UMWELTSCHUTZ BADEN-WÜRTTEMBERG (LFU) (2005b): Festlegung des Bemessungshochwassers für Anlagen des technischen Hochwasserschutzes. - Leitfaden. Karlsruhe, 91 S.
- MANIAK, U. (2005): Hydrologie und Wasserwirtschaft. Eine Einführung für Ingenieure. Berlin, Heidelberg, New York, 666 S.
- MIDDELKOOP, H. & J. KWADIJK (2000): Towards integrated assessment of the implication of global change for Water management – The Rhine Experience. - In: Physical, Chemical and Earth Sciences Research Reports 26, Nr. 7, S. 553-560.
- MINISTERIUM FÜR UMWELT UND VERKEHR BADEN-WÜRTTEMBERG (UM BADEN-WÜRTTEMBERG) (2002): Hochwasserschutz in Baden-Württemberg – Bilanz und Ausblick. Stuttgart, 26 S.
- MOSER, H. (2006): Einfluss der Klimaveränderungen auf den Wasserhaushalt des Rheins. - Präsentation im Rahmen der Veranstaltung regionale 2010 – Rheinkonferenz 2006, 14. November 2006, 25 S. - In: http://www.regionale2010.de/fileadmin/user_shares/2010_bildwelten/Rheinkonferenz_2005/Rheinkonferenz_Vortraege/hochwasser/Dr.Moser.pdf (10.04.2008).
- MÜLLER, U. et al. (2007): Impacts on Water Temperatures of Selected German Rivers and on Electricity Production of Thermal Power Plants due to Climate Change. - Poster-Veröffentlichung 8. Forum DKKV/CEDIM: Disaster Reduction in Climate Change. 15.-16.10.2007. Karlsruhe, 4 S.
- MÜLLER, U. et al. (2008): Möglicher Einfluss des Klimawandels auf Flusswassertemperaturen und Elektrizitätserzeugung thermischer Kraftwerke. - Posterveröffentlichung Tag der Hydrologie 2008. 27.03.-28.03.2008. Hannover.
- POTSDAM-INSTITUT FÜR KLIMAFOLGENFORSCHUNG E. V. (PIK) (2005): Verbundvorhaben Klimawandel – Auswirkungen, Risiken, Anpassung (KLARA). Analyse spezifischer Verwundbarkeiten und Handlungsoptionen. - Abschlussbericht zum Werkvertrag 50047467/23. PIK-Report 99. Potsdam, 222 S.
- RITZ, CH. et al. (Hrsg.) (2005): Extreme Wetterereignisse und ihre wirtschaftlichen Folgen. Anpassung, Auswege und politische Forderungen aus betroffenen Wirtschaftsbereichen. Berlin, Heidelberg, New York, 246 S.
- ROTHSTEIN, B. (2007): Elektrizitätswirtschaft als Betroffene des Klimawandels – Eine Identifikation von Betroffenheiten und Ansätze zur Anpassung an den Klimawandel dargestellt am Beispiel der Energieunternehmen EnBW und EDF. - Habilitation (Verfahren noch nicht abgeschlossen). Universität Würzburg, 398 S. (unveröffentlicht)
- RWE POWER (2004): Die Moselkraftwerke. Dauerläufer der Stromversorgung. Essen, Köln, 8 S.
- SAUER, E. (1984): Abwärmetechnik. Kühlsysteme, Umweltprobleme, Abwärmenutzung. Köln, 188 S.
- SCHABALOVA, M. & T. BUIHAND (2002): Project SWURVE. Interim annual report 2002. 12 S. - In: <http://www.ncl.ac.uk/swurve/downloads/2002team2knmi.pdf> (14.12. 2006).
- SCHEIDT, M. (2002): Ein Modell zur Mikrosimulation des Spothandels von Strom auf der Basis eines Multi-Agenten-Systems. Aachen, 211 S.
- SEIDEL, H. (2003): Binnenschifffahrt leidet unter Niedrigwasser. - In: Die Welt vom 23.07. 2003, S. 1.

- SINOKROT B.A. et al. (1995): Modelling of climate change effects on stream temperatures and fish habitats below dams and near groundwater inputs. - In: *Climate Change* 30, S. 181–200.
- STEININGER, K. et al. (2003): Adaptionstrategien der von extremen Wetterereignissen betroffenen Wirtschaftssektoren: ökonomische Bewertung und die Rolle der Politik. Wien, 45 S.
- STEINKOHL AG (STEAG) (2006): Antwort zum Fragebogen Nachhaltige Entwicklung AG „Kohle“. 22 S. - In: http://www.nachhaltigkeitsrat.de/service/download/pdf/Antworten_auf_Fragenliste__STEAG.doc (10.04.2006).
- UBA (2007): Neue Ergebnisse zu regionalen Klimaänderungen – Das statistische Regionalisierungsmodell WETTREG. - Hintergrundpapier. Dessau, 27 S.
- VEREIN DEUTSCHER INGENIEURE (VDI) (2006): Richtlinie 6004-1 „Schutz der Technisches Gebäudeausrüstung. Hochwasser. Gebäude, Anlagen, Einrichtungen“. Berlin, 64 S.
- VERBAND DER ELEKTRIZITÄTSWIRTSCHAFT E. V. (VDEW) (2003): Stromwirtschaft sichert Versorgung. VDEW zur anhaltenden Hitzewelle. - Pressemitteilung vom 09.08.2003, 2 S. - In: www.vdew.de (12.08.2003).
- WAGNER, E. (2002): Abwärme: Kann man das Kühlwasser von Kraftwerken nutzen?. 3 S. - In: <http://www.energie-fakten.de/html/kuehlwasser.html> (12.09.2005).
- WAGNER, E. (2003): Kühlwasser – warum benötigen Wärmekraftwerke das?. 4 S. - In: http://www.energie-fakten.de/PDF/kuehlwasser_2.pdf (06.09.2005).
- WAGNER, E. (2004): Warum ist der elektrische Wirkungsgrad von Kernkraftwerken in der Regel niedriger als der von Kohlekraftwerken?. 3 S. - In: <http://www.energie-fakten.de/html/wirkungsgrad-kohle-kkw.html> (14.09.2005).
- WEBB, B.W. & F. NOBILIS (1994): Water temperature behaviour in the River Danube during the twentieth century. - In: *Hydrobiologia* 291, S. 105-113.
- WEBB, B.W. & F. NOBILIS (2007): Long-term changes in river temperature and the influence of climatic and hydrological factors. - In: *Hydrological Sciences Journal* 52, S. 74-84.
- WESKA (2006): Europäischer Schifffahrts- und Hafenkalendar. - 73. Jahrgang, Verein für europäische Binnenschifffahrt und Wasserstraßen e.V.. Duisburg, 1448 S.
- WERNER, P. & GERSTENGARBE, F.-W. (2007): Welche Klimaänderungen sind in Deutschland zu erwarten?. - In: ENDLICHER, W. & F.-W. GERSTENGARBE (Hrsg.): *Der Klimawandel- Einblicke, Rückblicke und Ausblicke*. Potsdam, 134 S.
- WIRTSCHAFTSMINISTERIUM BADEN-WÜRTTEMBERG (WM) (2004): Energiebericht 2004. Stuttgart, 72 S.
- ZAHORANSKY, R. A. (2007): *Energietechnik. Systeme zur Energieumwandlung*. Wiesbaden, 360 S.
- ZEBISCH, M. et al. (2005): *Klimawandel in Deutschland. Vulnerabilität und Anpassungsstrategien klimasensitiver Systeme*. - UBA-Forschungsbericht 2014/253. Dessau, 203 S.

Der Quellennachweis zu Tabelle 2 (Auswirkungen der Hitze im Sommer 2003 auf den Kraftwerksbetrieb in Deutschland) kann bei den Autoren erfragt werden.

Klimawandel – Folgen und Möglichkeiten der Forstwirtschaft

Wolfgang Sailer

Der Klimawandel wird sich auf unsere Wälder und die Forstwirtschaft gravierend auswirken. Heißere und trockenere Sommer erhöhen den Trockenstress vor allem für ältere Bäume und Verjüngungen. Das Risiko für Stürme und Waldbrände wird zunehmen, die Gefahr für Schädlingsbefall deutlich wachsen. Besonders betroffen durch den Klimawandel sind die Baumarten Fichte und Kiefer. Akuter Handlungsbedarf besteht auf rund 260 000 Hektar Fichten- und Fichten-Kiefern-Bestände in privaten und kommunalen Wäldern sowie rund 60 000 Hektar im Staatswald in den trocken-warmen Regionen Bayerns. Ertrags- und Substanzverluste führen durch unkalkulierbare Mengen- und Preisausschläge aufgrund von Schadholzanfällen zu massiven wirtschaftlichen Einbußen und Arbeitsplätze sind vor allem im ländlichen Raum gefährdet. Der Schutz vor Naturgefahren und die Erholungsmöglichkeiten im Wald werden beeinträchtigt.

Der Klimawandel erfordert deshalb rechtzeitige und konsequente Anpassungsmaßnahmen in unseren Wäldern. Klimatolerantere Baumarten wie Buche, Eiche und andere Laubbaumarten werden an Bedeutung gewinnen. Dies gilt auch für Baumarten mit hoher Massenleistung wie Tanne aber auch Douglasie. Der notwendige Waldumbau soll auf den akut gefährdeten Waldflächen in einem Zeitraum von drei Jahrzehnten durch die Waldbesitzer erreicht werden. Forschung, fachliche Grundlagen für die forstliche Beratung und Bewusstseinsbildung bei den Waldbesitzern werden auf dieses Ziel ausgerichtet. Mit dem Klimaprogramm 2020 der Bayerischen Staatsregierung wurde die strategische und finanzielle Grundlage für das Waldumbauprogramm politisch verankert. Der Erfolg der Anpassungsstrategie ist aber nur dann sichergestellt, wenn es gelingt, den Menschen verursachten Klimawandel in moderaten Grenzen zu halten.

Wälder im Klimawandel

Klimaveränderungen sind für Wälder nichts Unbekanntes. So ist das natürliche Waldkleid Europas das Ergebnis einer Jahrtausende währenden Anpassung an die herrschenden Klimabedingungen. Die Abfolge der natürlichen Vegetationsgürtel von den borealen Fichtenwäldern im Norden über die Buchenwälder der gemäßigten Breiten bis hin zu den Eichenwäldern des Mittelmeerraumes entspricht dabei den Gradienten der von Norden nach Süden im Mittel zunehmenden Temperaturen. In jedem Klima stellt sich eine charakteristische Waldzusammensetzung mit den entsprechenden Baumarten als Gleichgewicht ein. Ändern sich die Klimabedingungen, wandeln sich in einer spontanen Anpassungsreaktion auch die Baumartenzusammensetzung der Wälder (KÖLLING 2007).

Auch die einzelnen Baumarten zeigen charakteristische Anpassungen an das Klima. So kommt die Fichte im kühl-trockenen Klima des Nordens und im kühl-feuchten Klima der Hochgebirge vor. Die Buche bevorzugt demgegenüber ein gemäßigtes mitteleuropäisches Klima. Jahrestemperatur und Jahresniederschlag bestimmen wesentlich diese sogenannten

„Wohlfühlbereiche“ der Baumarten, die ein wichtiger Bestandteil ihrer natürlichen Verbreitung und ökologischen Nischen sind (KÖLLING & ZIMMERMANN & WALENTOWSKI 2007). Daneben gibt es selbstverständlich weitere Einflussgrößen, die das Gedeihen von Baumarten bestimmen z. B. Bodeneigenschaften, Frostgefährdung oder Exposition.

Während sich der frühere Wechsel zwischen Warm- und Eiszeiten vergleichsweise langsam vollzog, verläuft der gegenwärtig stattfindende Klimawandel in völlig anderen Bahnen. Zum einen findet er in einem Tempo statt, das um ein Vielfaches schneller als die Erwärmung nach der letzten Eiszeit ist. Zum anderen hat der Mensch die natürliche Baumartenzusammensetzung der Wälder stark verändert. Weiterhin ist der Waldflächenanteil gegenüber früher deutlich verringert und die Waldflächen selber stärker fragmentiert. Eine spontane Waldanpassung nach dem Vorbild früherer Klimaveränderungen ist damit sehr erschwert, da die Möglichkeit der Aus- und Zuwanderung von Baumarten praktisch fehlt. Damit würde ein beträchtlicher Teil der Wälder nach und nach in ungünstige Umweltbedingungen hineinwachsen. Großflächige instabile und leistungsgeschwächte Wälder wären die Folge.

Folgen für Wald und Forstwirtschaft

Der laufende Klimawandel wird sich daher auf unsere Wälder und die Forstwirtschaft gravierend auswirken. Jeder Baum wird bei dem beschleunigten Klimawandel, d. h. bei fehlender stringenter und global koordinierter Klimapolitik, in seinem Leben mindestens zeitweise unangepasst und somit gefährdet sein, weil die anthropogene Klimaänderung etwa die hundertfache Geschwindigkeit gegenüber natürlichen Klimaänderungen hat (GRAßL 2007). Erwartete heißere und trockenere Sommer sowie nassere und mildere Winter bleiben nicht ohne Wirkung auf die Wasserversorgung der Waldböden. Die unmittelbaren Folgen sind erhöhter Trockenstress vor allem für ältere Bäume und Verjüngungen.

Zugleich wird das Risiko für Stürme zunehmen. Auch werden wir mit einem höheren Waldbrandrisiko leben müssen. Besonders stark werden die Auswirkungen des Klimawandels in den Alpen vor allem in den alpinen Schutzwaldlagen spürbar sein. Die Schäden der Orkane Kyrill 2007 und Emma 2008 zeigen, welche Folgekosten auf die Forstwirtschaft zukommen werden. Andererseits wird es in unseren Breiten weiterhin kalte Winter, Spät- und Frühfröste sowie Temperaturstürze geben – Bedingungen mit denen unsere Baumarten ganz speziell in der Verjüngungsphase zurecht kommen müssen. Durch die höheren Temperaturen und die Schwächung der Bäume durch Trockenstress wird die Befallgefahr durch Schädlinge zunehmen. Das Problem kann alle Baumarten betreffen. Besonders augenfällig ist es aber bei der Fichte. Vergleichsweise mildere Winter und ein trockenes Frühjahr verbessern die Umweltbedingungen für die zur Massenvermehrung neigenden Borkenkäfer insbesondere des Buchdruckers. Seit Jahren ist dieses Phänomen feststellbar. Die Folge sind große Mengen an Zwangseinschlägen, da der Buchdrucker nur auf diese Weise wirksam bekämpft werden kann. Entsprechend hoch sind die wirtschaftlichen Einbussen aufgrund sinkender Holzpreise.

Nicht alle Baumarten sind gleich anfällig gegenüber den Wirkungen des Klimawandel. Besonders gefährdet ist die Baumart Fichte. Mit einem Anteil von 44 % und über 1 Mio. Hektar Fläche ist sie die wichtigste und wirtschaftlich bedeutendste Baumart in Bayern. Ähnlich anfällig sind aber auch Kiefer und Lärche auf Standorten, die nicht ihren kühlen natürlichen Arealen entsprechen. Erhöhtes Risiko ergibt sich daraus für rund 260 000 Hektar Fichten- und Fichten-Kiefern-Bestände in privaten und kommunalen Wäldern sowie rund 60 000 Hektar in Staatswäldern in den trocken-warmen Regionen Bayerns.

Viele einheimische Baumarten mit Anpassung an den mitteleuropäischen Klimatyp erweisen sich hingegen als deutlich weniger anfällig. Hierzu zählt die Buche, die auch mit den erwarteten Veränderungen hinsichtlich Temperatur und Niederschlagsverhältnissen aller Voraussicht nach zurecht kommt. Zahlreiche andere mitteleuropäische Baumarten wie Stiel- und Traubeneiche, Esche oder Bergahorn verhalten sich ähnlich. Mit dem Klimawandel werden sich daher unsere Wälder im Aussehen, aber auch hinsichtlich ihrer ökonomischen, ökologischen und sozialen Leistungsfähigkeit verändern.

Für die Forstwirtschaft wird der Klimawandel aller Voraussicht nach zu Ertrags- und Substanzverlusten durch unkalkulierbare Mengen- und Preisausschläge aufgrund von Schadholzanfällen führen. Dies bleibt längerfristig nicht ohne Auswirkungen auf die Rohstoffversorgung für nachgelagerte Holzbe- und verarbeitende Gewerbebetriebe und Industrien. Der Verlust von Arbeitsplätzen steht zu befürchten und dies überwiegend im ländlichen Raum. Der Klimawandel hat damit nicht nur Auswirkungen auf die Forstwirtschaft allein, sondern auf den gesamten Cluster Forst und Holz mit einem Umsatz von 31 Mrd. Euro pro Jahr und Arbeitseinkommen für rund 170 000 Menschen in Bayern.

Von instabilen und weniger leistungsfähigen Wäldern wird aber auch die gesamte Bevölkerung betroffen sein. Nur intakte und gesunde Wälder schützen vor Naturgefahren wie Lawinen und Überschwemmungen, gewährleisten sauberes Trinkwasser und bieten genussvolle Erholung wie auch ein hohes Maß an biologischer Vielfalt in den Wäldern.

Möglichkeiten der Forstwirtschaft

Als Reaktion auf den Klimawandel hat sich die Forstwirtschaft in Bayern wie auch in anderen Ländern auf eine Anpassungsstrategie festgelegt. Unter dem Motto „Wälder fit machen für den Klimawandel“ wurde bereits 2004 im Staatswald ein Waldumbauprogramm für 60 000 Hektar akut betroffene Fichten und Fichten-Kiefern-Wälder begonnen. 2007 folgte im Rahmen des Klimaprogramms 2020 der Bayerischen Staatsregierung ein großflächiges Waldumbauprogramm für private und kommunale Wälder sowie ein Paket an besonderen Schutzmaßnahmen im Bergwald. Scherpunkte der Anpassungsstrategie sind die Schadensbegrenzung in den verschiedenen Produktionsbereichen, der Aufbau eines zukunftsfähigen Waldes, der Schutz der biologischen Vielfalt und eine schonende Nutzung der Ressourcen Wasser und Boden.

Von den insgesamt 260 000 Hektar akut gefährdeten Privat- und Körperschaftswaldbeständen sollen im Rahmen des Klimaprogramms bis 2020 rund 100 000 Hektar in klimatolerante Mischwälder umgebaut werden. Regionale Schwerpunkte des Waldumbaus liegen im westlichen Mittelfranken, in Niederbayern, Teilen von Oberfranken, in Südostoberbayern und Nordschwaben. Für die erfolgreiche Umsetzung der notwendigen Anpassungsmaßnahmen gilt es langfristig jährlich etwa 20 000 Waldbesitzer zu erreichen, zu überzeugen und zu bewegen. Diese müssen bei der Bewältigung des Waldumbaus aber auch von den rund 140 bestehenden forstwirtschaftlichen Zusammenschlüssen und sonstigen Unternehmen der Forstbranche mit ihren Dienstleistungen bei der Vorbereitung der Umbaubestände, der Pflanzungen und Saaten, der Versorgung mit herkunftsgesicherten Pflanz- und Saatgut sowie den notwendigen Pflege- und Sicherungsarbeiten zuverlässig unterstützt werden. Mit den für 2008 bereits zur Verfügung stehenden Mitteln aus dem forstlichen Förderprogramm und dem Klimaprogramm können so rund 5 000 bis 6 000 Hektar zukunftsfähige Mischbestände neu begründet werden.

Entscheidend für den Erfolg des Waldumbauprogramms wird die richtige Wahl der künftigen Baumarten sein. Nach derzeitigen Kenntnisstand kommen die meisten Baumarten der natürlichen Waldgesellschaften und besonders die Buche gut mit den veränderten Klimabedingungen zurecht. Deshalb ist auch unter den Aspekten des Klimawandels die naturnahe Waldbewirtschaftung mit einer möglichst hohen Beteiligung der Baumarten der natürlichen Waldgesellschaft der beste Weg zum Erfolg. Dabei wird den Waldbesitzern ein möglichst breites Spektrum an wirtschaftlich interessanten Baumarten angeboten, um das Risiko breit zu streuen. Baumarten mit einer hohen Massenleistung wie Tanne, aber auch die Douglasie werden dabei an Bedeutung gewinnen. Auch die positiven Erfahrungen mit Gastbaumarten müssen genutzt werden. Über weitere Anbauversuche wollen wir das Baumartenspektrum noch erweitern. Die Fichte wird dabei zukünftig nicht aus unseren Wäldern verschwinden. Zum einen verjüngt sie sich weiterhin natürlich, zum anderen wird sie auch künftig auf nicht unerheblicher Fläche mit kalkulierbarem Risiko insbesondere in feucht-kalten Bereichen gesund, stabil und leistungsfähig sein können.

Wegen der langen Produktionszeiträumen in der Forstwirtschaft sind wissenschaftlich abgesicherte Entscheidungsgrundlagen zum notwendigen Umbau der Wälder für die Waldbesitzer unabdingbar. Wir haben die Veränderungen der Standortbedingungen daher analysiert und darauf aufbauend Baumarten identifiziert, die mit diesen Verhältnissen langfristig zurecht kommen. Gleichwohl besteht weiterer Forschungs- und Entwicklungsbedarf. Aktuell ist dazu Folgendes konzipiert:

- Erstellung aktualisierter Klimakarten und Entwicklung regionaler Szenarien
- Baumartenempfehlungen unter geänderten Klimabedingungen
- Anbauversuche mit klimatoleranten Gastbaumarten und Versuche mit unterschiedlichen geografischen Herkünften heimischer Baumarten

Bei der Beurteilung der Resilienz der Baumarten müssen auch Risikoaspekte wie verstärktes Auftreten bekannter Schädlinge, erhöhte Waldbrandgefahr oder Erscheinen invasiver Arten berücksichtigt werden. Auch dies erfordert eine Weiterentwicklung bisheriger Vorsorge- und Bekämpfungsstrategien. Dazu ist vorgesehen:

- Aufbau eines Monitorings relevanter Forstschädlinge und Pathogene einschließlich Informationstransfer
- Anpassung der Strategien von Vorsorge- und Bekämpfungsverfahren für Forstschädlinge
- Verbreitung und Populationsdynamik wärmeliebender einheimischer und neuer Schädlinge
- Klimafolgen und pilzliche Schaderreger
- Weiterentwicklung biotechnischer Bekämpfungsverfahren
- Abschätzung der bisherigen und zukünftigen Waldbrandgefährdung

Nicht alle Wälder werden in den nächsten zwei bis drei Jahrzehnten umgebaut. Daher müssen auch für jüngere und mittelalte Wälder die bisherigen Bewirtschaftungs- und Pflegekonzepte zur Prävention und Schadensbewältigung an die sich ändernden Klimabedingungen angepasst werden. Insbesondere bedarf es neuer Waldbaukonzepte für Risikogebiete. Dabei stellen sich Fragen z. B. nach der Stärke von Pflegeeingriffen oder der Vorratshaltung.

Der Klimawandel und der damit einhergehende Waldumbau werden langfristig die Produktionsfläche von Nadelholz und Laubholz verschieben. Dies wird Auswirkungen auf die Sortimentsstruktur der Sägeindustrie haben. Gerade deshalb ist mit Blick auf eine kontinuierliche Rohstoffversorgung ein aktiver Waldumbau für die Wettbewerbsfähigkeit der Holz- und Papierwirtschaft überlebenswichtig. Nur so lässt sich verhindern, dass künftig die Holznutzung und damit die Rohholzversorgung verstärkt durch Katastrophen bestimmt wird.

Auch der Holzuwachs wird von den Veränderungen in unseren Wäldern betroffen sein. Aufgrund der zahlreichen Unsicherheitsfaktoren sind jedoch Prognosen über die Höhe des künftigen Zuwachses derzeit nur schwer zu treffen. Teil der Umbaustrategie ist es aber, das Zuwachsniveau möglichst hoch zu halten. Die Beteiligung von bewährten Gastbaumarten wie der Douglasie darf daher kein Tabu sein. Schließlich senken im Inland produzierte Rohstoffe Transportkosten und liefern damit zusätzlich einen positiven Beitrag zum Klimaschutz.

Da sich der Waldumbau über mehrere Jahrzehnte hinziehen wird, ist es für die Holzindustrie möglich, sich rechtzeitig auf veränderte Angebotsstrukturen einzustellen. Veränderungen in den Nutzungspotentialen werden zudem auch durch Vorhersagemodelle wie die Holzaufkommensprognose für Bayern auf Grundlage der Bundeswaldinventur kalkulierbar. Es ist daher für den gesamten Cluster Forst und Holz entscheidend, dass dem Klimawandel nicht tatenlos zugesehen wird, sondern ihm durch die Anpassungsstrategie der Forstwirtschaft aktiv begegnet wird. So lässt sich heute mit vergleichsweise geringen Mitteln viel erreichen.

Fazit

Bereits ein moderater Klimawandel mit nur im Durchschnitt 2 Grad Celsius Temperaturerhöhung bis zum Jahr 2050 stellt die Forstwirtschaft vor eine große Herausforderung. Die anfälligsten Baumarten werden in vielen Regionen Bayerns bereits mit dieser gering erscheinenden Erhöhung Probleme haben. Für die weniger anfälligen Baumarten hingegen bestehen gute Chancen, dass sie mit einer moderaten Temperaturerhöhung auf Dauer zurecht kommen werden. Die Herausforderung an die Forstwirtschaft ist dennoch so groß, dass es selbst unter günstigen Rahmenbedingungen gewaltiger Anstrengungen bedarf, die Wälder in einem annehmbaren Zustand in das nächste Jahrhundert zu übergeben (BOLTE & IBISCH 2007).

Jedes weitere Grad Erwärmung verschärft die Situation in einer nicht-linearen Weise. Bei einer Erhöhung um 3 oder gar 4 Grad Celsius entstehen in Deutschland viele nicht analoge Klimatypen, d. h. Klimakombinationen die es bislang in Deutschland noch nicht gab. Wie die Forstwirtschaft mit derartigen Klimasprüngen umzugehen hätte, ist nur schwer abschätzbar. Um so wichtiger ist vor diesem Hintergrund ein Beharren auf durchgreifende klimapolitische Maßnahmen, damit der Klimawandel auf ein für die Forstwirtschaft erträgliches Maß beschränkt bleibt. Nur dann werden die Grenzen der Anpassungsfähigkeit nicht überschritten und der klimatolerante Waldumbau kann mit einer Erfolgsaussicht zu einem guten Ende geführt werden (KÖLLING 2007).

Literatur

- BOLTE, A. & IBISCH, P. L. (2007): Neun Thesen zum Klimawandel, Waldbau und Waldnaturschutz. Allg. Forstz. – Der Wald 62
- GRAßL, H. (2007): Globaler Klimawandel: Was kommt auf uns zu? Tagung des BayStMLF in Nürnberg am 12.04.2008
- KÖLLING, C. (2007): Wälder im Klimawandel: Die Forstwirtschaft muss sich anpassen. Allg. Forstz. – Der Wald 62
- KÖLLING, C., L. ZIMMERMANN & H. WALENTOWSKI (2007): Klimawandel: Was geschieht mit Buche und Fichte? Entscheidungshilfen für den klimagerechten Waldumbau in Bayern. Allg. Forstz. – Der Wald 62

Die wirtschaftlichen Folgen des Klimawandels und extremer Wetterereignisse

Karl. W. Steininger

1. Wirtschaft im Klimawandel

Die Wirtschaft ist ein Überlebens-Sicherungssystem. Sie war dies in den Zeiten der Jäger und Sammler, wie auch heute. Es gilt die (Grund-)Bedürfnisse der Behausung, Nahrung und des Zugangs (Mobilität) zu decken. Bei weiter erhöhten Treibhausgaskonzentrationen bestehen folgende Schwierigkeiten in der Anpassung:

1.1 Übergangseffekte (Nach-Hink-Effekte)

Wir erwarten eine neue Art und Stärke klimatischer Einwirkungen, Verschiebungen im Trend und damit auch in der Frequenz von extremen Wetterereignissen.

Die wirtschaftlichen Folgen davon sind zB:

- erwartete Renditen von Investitionsprojekten werden verfehlt
- Produktionsausfälle durch extreme Wetterereignisse

Eine Anpassung ist möglich (wie Umsiedlung, neu angebotene Versicherungsdienstleistungen), die Frage ist primär eine nach der Geschwindigkeit der klimatischen Änderung.

1.2 Dauer-Sicherungseffekte

Es steigen die Aufwendungen zur Abwehr schädlicher Wirkungen. Insgesamt wird die gesellschaftliche Gesamtressourcenleistung wieder stärker zur Absicherung der Grundbedürfnisse (Nahrung, Wohnen, Mobilität, ...) eingesetzt werden (etwa Mehraufwendungen für Schutzbauten, Versicherungssysteme, ...).

Was wir im Übergang von der Agrar- zur Industrie- und Dienstleistungsgesellschaft an Ressourcen frei bekommen haben aus der Grundbedürfnisabdeckung, wird nunmehr verstärkt wieder dafür eingesetzt werden müssen (und nicht mehr für die Bereitstellung anderer Wohlfahrtsdienstleistungen zur Verfügung stehen). Wie stark, ist eine Frage der Anpassungsplanung und ihrer Rechtzeitigkeit.

2. Klimapolitik in Raum und Zeit

Die beiden wesentlichen Ansätze in der Klimapolitik, Emissionsminderung und Anpassung, haben ihre Kosten und Nutzen auf unterschiedlichen geographischen und zeitlichen Skalen. Für die Anpassung sind die konkreten Anreize jetzt und hier etwas zu tun höher, weil auch die erwarteten Nutzen primär in der gleichen Region und zumindest auch in naher Zukunft anfallen (Abbildung 1).

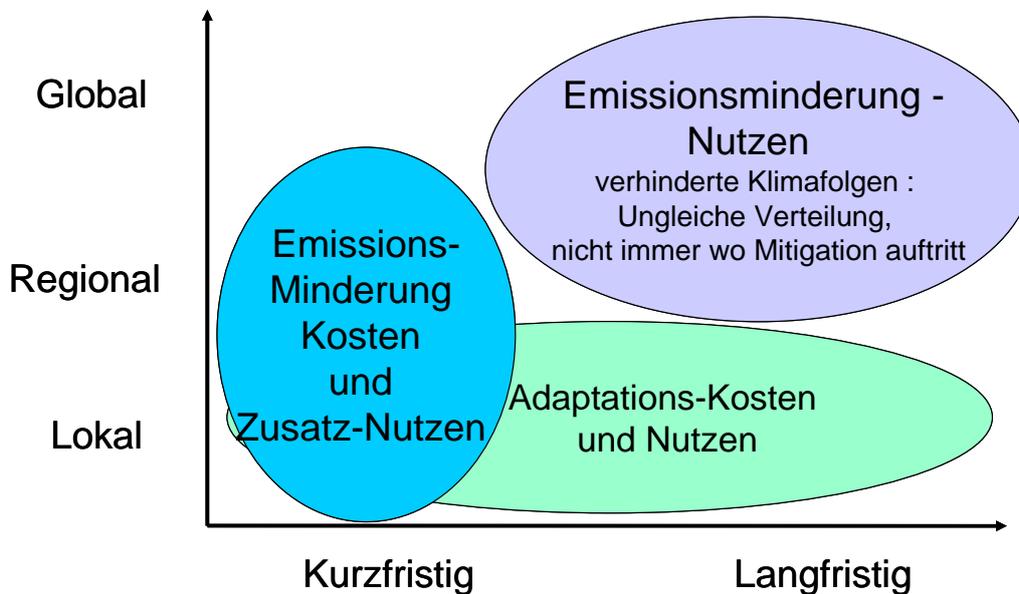


Abb. 1: Nutzen und Kosten von Klimapolitik in Raum und Zeit

Quelle: nach Morlot and Agrawala, 2004

3. Anpassung

Die Interventionen sollen sich von bisher primär reaktiv und ad hoc (vgl. Abbildung 2) verschieben zu antizipatorisch und gezielt. In diesem Sinn wird das Risikomanagement der Klimasensitivität durch Emissionsminderung ergänzt durch Risikomanagement durch Anpassung, das die Schäden vermindert. Das Risikomanagement durch Anpassung erhöht auch die letztliche Aufnahmekapazität der Erdatmosphäre an treibhauswirksamen Gasen ohne hohe Schadensauswirkungen.

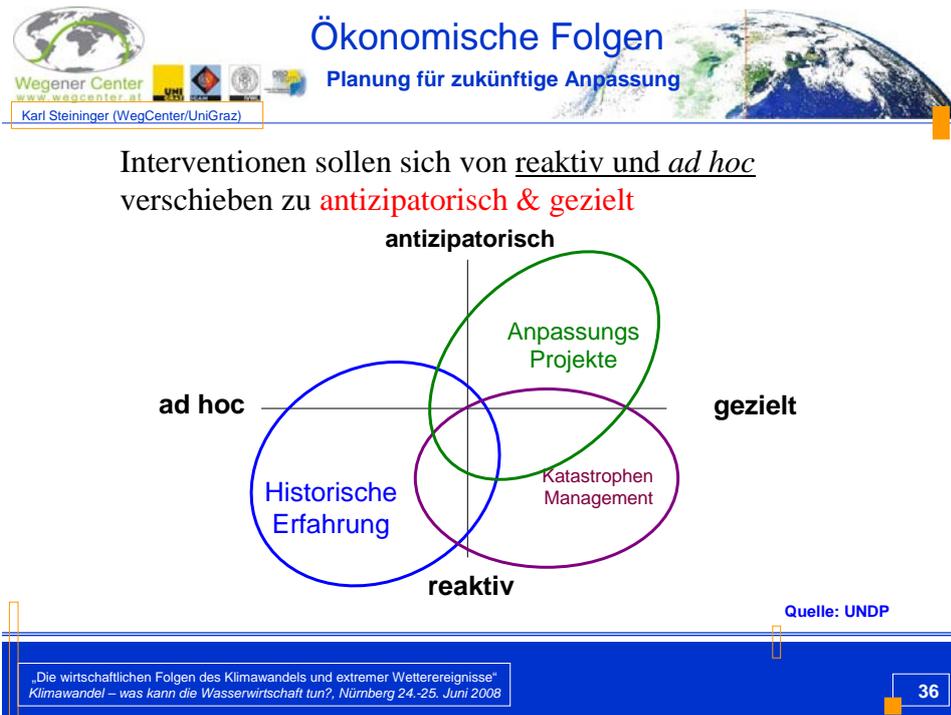


Abb. 2: Planung für zukünftige Anpassung an den Klimawandel

4. Institutionelle Anpassung am Beispiel von Wetterderivaten

Die Etablierung von Wetterderivaten ist ein besonders geeignetes Beispiel einer institutionellen Anpassung an den Klimawandel. Das Instrument des Wetterderivats und seine Stellung relativ zu Versicherungen und anderen Absicherungsstrategien soll im Folgenden anhand der Ausführungen des diesbezüglichen Wegener Zentrums Report (Töglhofer, 2007) dargestellt werden:

Wetterderivate sind derivative Finanzinstrumente, die eingesetzt werden, um Unternehmen wettersensibler Wirtschaftsbranchen gegen ungünstige Wetterbedingungen abzusichern. Während bei den meisten derivativen Instrumenten auf Finanz- oder Gütermärkten gehandelte Basisvariablen verwendet werden, liegen Wetterderivaten meteorologische Daten zugrunde, wie Temperatur, Windgeschwindigkeit, Niederschlag oder Sonnenstunden. Diese Wettervariablen haben keinen Preis, stellen keine physischen Assets dar und können dementsprechend weder gehandelt, noch gelagert werden. Es handelt sich bei Wetterderivaten also um reine Finanztransaktionen.

Des Weiteren unterscheiden sich Wetterderivate von anderen derivativen Instrumenten dadurch, dass diese nicht auf eine Absicherung des Preisrisikos, sondern des Mengenrisikos abzielen. Eine vollständige Absicherung von Umsatz- bzw. Cash-Flow-Schwankungen erfordert somit neben dem Einsatz von Wetterderivaten zur Mengenabsicherung auch den Einsatz von herkömmlichen Commodity-Derivaten zur Preisabsicherung. [...]

Wichtig ist dabei, zu unterscheiden, ob Wettereinflüsse nachfrage- oder angebotswirksam sind. Bei nachfragewirksamen Wettereinflüssen sinken mit der Nachfrage auch die Preise, das Unternehmen ist also einem doppelten Wetterexposure ausgesetzt. Bei angebotswirksamen Wettereinflüssen kommt es hingegen bei geringerem Angebot zu höheren Preisen. Das Volumenrisiko wird folglich durch die höheren Preise vermindert beziehungsweise je nach Preiselastizität des Angebots sogar ausgeglichen oder

überkompensiert. Dieser Effekt kann beispielsweise sehr gut anhand der skandinavischen Strompreise beobachtet werden. Bedingt durch den hohen Wasserkraftanteil sind diese in Trockenjahren höher als in niederschlagsreichen Jahren.

Abgrenzung gegenüber Versicherungen

Wetterderivate zielen, wie auch konventionelle Versicherungen, auf eine Vermeidung beziehungsweise Verringerung von Wetterrisiken ab, weisen jedoch gegenüber diesen folgende Vorteile auf:

- Versicherungen werden meist nur zur Absicherung selten auftretender, katastrophenähnlicher Wetterereignisse verwendet. Bei Wetterderivaten können auch weniger drastische Ereignisse, die dafür mit höherer Frequenz auftreten, abgesichert werden.
- Bei Wetterderivaten erfolgen Zahlungen, sobald ein objektiv messbarer Wetterindex über- oder unterschritten wird. Diese hängen nicht von der Höhe des tatsächlich eingetretenen Schadens ab. Ein Nachweis des Schadens ist für die Auszahlung daher im Gegensatz zu Versicherungen nicht erforderlich.
- Durch die Verwendung unabhängiger Wetterdaten wird ‚Moral Hazard‘ vermieden, indem grundsätzlich keine Informationsasymmetrien zwischen Käufer und Verkäufer von Wetterderivaten vorliegen.
- In einem funktionierenden Wetterderivatemarkt ist das Spektrum an Marktteilnehmern wesentlich größer, weil nicht nur Versicherungsgesellschaften, sondern eine Vielzahl an Unternehmen als Anbieter von Wetterderivaten auftreten kann. Besonders sinnvoll scheint der Einsatz bei Unternehmen, die mit entgegengesetzten Konsequenzen aus bestimmten Wetterverhältnissen rechnen können, denn diese können Risiken gegenseitig hedgen. So wurden beispielsweise auch die ersten Wetterderivate zwischen US-Energieversorgungsunternehmen abgeschlossen, die sich gegenseitig gegen Temperaturrisiken absicherten, während viele Versicherungen lange Zeit an der Absicherung moderater Wettervariabilitäten nicht interessiert schienen.

Literatur

- Steininger, K. W., C. Steinreiber and C. Ritz (Hrsg.), *Extreme Wetterereignisse und ihre wirtschaftlichen Folgen*, Springer, Berlin-Heidelberg-New York, 2005, 246 S.
- Töglhofer, C. (2007), Einsatzpotentiale von Wetterderivaten im Bereich Erneuerbarer Energien, *Wissenschaftlicher Bericht* Nr. 14-2007, Wegener Zentrum, April 2007, Wegener Center Verlag Graz, ISBN 978-3-9502308-2-6

Zunehmende Wetterschäden: Was kostet das die Versicherungswirtschaft?

Wolfgang Kron und Tobias Ellenrieder

Zusammenfassung

Schäden aus Naturereignissen haben in den letzten Jahrzehnten überall dramatisch zugenommen. In West- und Mitteleuropa sind es vor allem wetterbedingte Ereignisse, die Volkswirtschaften und Versicherungen zunehmend belasten, nicht zuletzt auch durch die Kosten für Schutzmaßnahmen. Die Versicherungswirtschaft weist seit langem auf steigende Trends insbesondere bei Wetterkatastrophen (Stürme, Hagelschläge, Starkregen, Überschwemmungen, Massenbewegungen, Hitze- und Frostperioden, Schneedruck, Trockenheit etc.) hin. Die Hauptgründe dafür sind in der vermehrten Besiedlung exponierter Gebiete, der Ansammlung von immer empfindlicheren Werten in ihnen sowie in der bereits signifikanten Änderung von Klima und Umwelt zu suchen. Bei der Marktdurchdringung von Versicherungsprodukten in den verschiedenen Ländern gibt es sowohl in Bezug auf die versicherte Naturgefahr als auch bei den versicherten Sachen große Unterschiede. Während Sturm- und Hagelschäden an Privatgebäuden fast überall nahezu vollständig gedeckt sind, bewegt sich die Versicherungsdichte für andere Elementargefahren je nach Land zwischen unter 10 und annähernd 100 %. Neben den reinen Sachschäden sind aber oft auch Betriebsunterbrechung, Ernte-, Produktions- und Veranstaltungsausfall versichert. Wetterkatastrophen bergen große Kumulschadenpotenziale, für die sich Versicherungsunternehmen wappnen müssen. Dies geschieht unter anderem mithilfe neuer versicherungstechnischer Lösungen zur Risikostreuung, zum Beispiel Cat-Bonds. Ein erfolgreiches, effizientes Risikomanagement für die Gesamtgesellschaft ist nur durch das Zusammenwirken von Staat, Betroffenen und Versicherungswirtschaft in Form einer Risikopartnerschaft erreichbar.

1 Einleitung: eine Bestandsaufnahme

In den letzten Jahren haben hauptsächlich die Hurrikanereignisse im Nordwestatlantik die internationalen Schlagzeilen zu Wetterextremen bestimmt. Hurrikan Katrina im August 2005 an der US-Golfküste war bisher das absolut teuerste Schadenereignis und hatte dramatische humanitäre Auswirkungen. Aber auch in West- und Mitteleuropa gab es im neuen Jahrtausend bereits eine ungewöhnlich hohe Zahl wetterbedingter Katastrophen und besorgniserregende neue Entwicklungen: Die Elbeflut 2002, die bisher teuerste Naturkatastrophe in Deutschland; das 450-Jahre-Ereignis „Hitzesommer 2003“ mit mehr als 70 000 Hitzetoten in Europa; die Überschwemmungen im August 2005 in den Alpen, die für die Schweiz zur teuersten Naturkatastrophe wurden; die Schneekatastrophe in Bayern und Österreich im Frühjahr 2006; der Wintersturm Kyrill im Januar 2007, der für Deutschland teuerste und Europa zweitteuerste Wintersturm; die lang anhaltenden Überschwemmungen in Großbritannien im Sommer 2007 – das teuerste Naturereignis aller Zeiten für das Land. Diese und weitere herausragende wetterbedingte Ereignisse der letzten 10 Jahre in West- und Mitteleuropa sind in Tabelle 1 zusammengestellt.

Tab. 1: Die teuersten und tödlichsten Wetterkatastrophen seit 1997 in West- und Mitteleuropa (in nicht inflationsbereinigten Originalwerten)

Monat	Jahr	Ereignisart ¹	betroffene Länder ²	Tote	Schäden in Mio. € gesamt versich.	
7-8	1997	Ü Oder	CZ,SK,PL,D,A	118	5 400	730
11-12	1998	Kältewelle	F,D,PL,H,I	220	0	0
1-3	1999	Lawinen	F,CH,A,D,I	108	800	185
5	1999	Ü Nordalpen	CH,D,A	13	760	290
12	1999	WS Anatol	DK,D,PL,S	20	3 000	2 350
12	1999	WS Lothar	F,B,D,A,CH,I	114	11 500	5 900
12	1999	WS Martin	F	30	4 000	2 450
10	2000	Ü Südalpen	CH,I,F	38	10 000	560
10-11	2000	Ü	GB	10	1700	1 270
7	2001	Ü Weichsel	PL,SK	26	800	35
8	2002	Ü Elbe, Donau	CZ,D,A,I,CH,SK,H	51	22 000	3 470
10	2002	WS Jeanett	GB,F,B,NL,D,A,CZ,PL	37	2 600	1 720
6-8	2003	Hitze, Dürre	alle Länder	35 000	10 750	20
12	2004	WS Dagmar	F,D,CH	17	900	440
1	2005	WS Erwin	GB,DK,D,N.S	18	4 150	1 900
7	2006	Hitze, Dürre	NL,B,F,D	2 070	630	0
8	2005	Ü Nordalpen	F,CH,A,D,SLO,H	11	2 700	1 430
2	2006	Schnee, Kälte	D,A,CZ,PL	80	840	440
1	2007	WS Kyrill	GB,F,B,NL,DK,D,A,CH,CZ,SLO,H	49	7 700	4 470
6-7	2007	Ü	GB	6	5 850	4 390
3	2008	WS Emma	GB,D,A,CH,CZ,PL,SK	14	1 260	950

¹ Ü = Überschwemmungen, WS = Wintersturm

² Es werden die folgenden Länder einbezogen: Großbritannien (GB), nördliche Hälfte Frankreichs (F), Belgien (B), Niederlande (NL), Luxemburg (LUX), Deutschland (D), Dänemark (DK), Süd-Norwegen(N), Süd-Schweden (S), Schweiz (CH), Österreich (A), Nord-Italien (I), Slowenien (SLO), Tschechien (CZ), Slowakei (SK), Ungarn (H), Polen (PL)

Analysen der Daten aus der NatCatSERVICE-Datenbank der Münchener Rück belegen, dass sich die Anzahl wetterbedingter Naturkatastrophen in Europa seit 1980 mehr als verdoppelt hat. Absolut gesehen sind die in West- und Mitteleuropa auftretenden Naturereignisse nicht so intensiv wie in anderen Teilen der Welt: Windgeschwindigkeiten in Winterstürmen erreichen ca. zwei Drittel der Werte in Hurrikanen und Taifunen – betreffen allerdings ein wesentlich größeres Gebiet; der Rekord des Tagesniederschlags von 345 mm (Nova Louka, CZ) beträgt gerade einmal 18 % des Weltrekords (1870 mm in Réunion); Abflüsse in Strömen wie Yangtze und Mississippi sind eine Größenordnung höher als in Rhein und Donau;

die bei Hochwasserkatastrophen überfluteten Gebiete werden anderswo in Quadratkilometern – nicht in Hektar – angegeben; Erdbebengebiete sind vergleichsweise dünn gesät, Beben treten selten und wenn, dann mit moderaten Magnituden auf; aktive Vulkane sind nicht vorhanden; geomorphologisch instabile Gebiete bereiten nur lokal Probleme. Vor allem aber gilt: wir sind gegen die Gewalten der Natur besser geschützt als die Menschen in ärmeren Ländern.

Das Ausmaß einer Naturkatastrophe wird nicht allein durch die Größe der natürlichen Belastung bestimmt, sondern in erster Linie dadurch, wie eine betroffene Region mit dieser umgehen beziehungsweise ihr widerstehen kann. Da spielen die vorhandenen Werte (Besiedlungsdichte) und ihre physische Anfälligkeit eine Rolle sowie die verschiedenen Schutzmechanismen struktureller (HW-Schutz, Baucodes etc.) und organisatorischer Art (Warnsysteme, Katastrophenhilfe, Versicherung). Dies alles kann sogar verhindern, dass es überhaupt zu einer Katastrophe kommt. Schutzmaßnahmen aller Art haben bewirkt, dass die Zahl der Todesopfer bei Naturkatastrophen in Europa in aller Regel klein bleibt, mit Ausnahme derer aufgrund von Hitze- und Kältewellen. Die Größe einer Naturkatastrophe wird in unseren Breiten daher meist in Euro definiert, weniger durch die Anzahl von Toten oder Betroffenen. Schutzmaßnahmen tragen aber paradoxerweise mit dazu bei, dass Naturgefahren immer kostspieliger werden. Zum einen ist es nicht billig, sie bereit zu stellen, zum anderen bewirken sie, dass sich die Menschen sicherer (häufig sogar sicher) fühlen – und teilweise immense Werte anhäufen, die sie dem Risiko aussetzen.

Dazu kommt: Der Klimawandel findet statt. Das hat der vierte Bericht des Intergovernmental Panel on Climate Change 2007 ohne Wenn und Aber bestätigt (IPCC 2007). Die Mitteltemperatur hat in den vergangenen 100 Jahren zugenommen, in Europa um 0,95 °C. Das führt zu mehr und stärkeren Wetterextremen. Einzelne Ereignisse wie die großen Überschwemmungen im August 2002, der Hitzesommer 2003 und der Orkan Kyrill sind zwar nicht direkt auf den Klimawandel zurückzuführen; die steigenden Frequenzen und Intensitäten der Ereignisse deuten jedoch auf einen solchen Einfluss hin.

Nicht nur die Zahl wetterbedingter Katastrophen, auch die durch sie verursachten Schäden sind für die Volkswirtschaften Europas und die Versicherungswirtschaft in den letzten Jahrzehnten deutlich gestiegen, wobei Wetterextreme hier nahezu 100 % aller Naturkatastrophen auslösten. In Deutschland trat seit den frühen 1990er Jahren fast jährlich ein Hochwasser auf, das zu Millionenschäden führte (vgl. Tabelle 2). Abbildung 1 zeigt exemplarisch die Jahresschäden aus Überschwemmungsereignissen in Europa seit 1980, wobei die zugrunde gelegten Schadenjahre vom 1.4.- 31.3. definiert sind (dies erklärt zum Beispiel den hohen Wert des Jahres 1994, bei dem sich das Hochwasser in den Südalpen im November 1994 mit volkswirtschaftlichen Schäden von über 10 Milliarden € und die 2,5 Milliarden € aus dem Rheinhochwasser im Januar 1995 – jeweils inflationsbereinigt – addieren).

Tab. 2: Die teuersten Überschwemmungskatastrophen seit 1990 in Deutschland
(in Originalwerten und inflationsbereinigt in Werten von 2007)

Monat	Jahr	betroffene Gebiete	Schäden (in Millionen €)			
			gesamt		versichert	
			original	(Wert 2007)	original	(Wert 2007)
12	1993	Rhein	530	(770)	160	(230)
4	1994	Saale, Unstrut	155	(220)	55	(80)
1-2	1995	Rhein	245	(340)	105	(145)
8	1997	Oder	330	(430)	30	(40)
10-11	1998	ganz Deutschland	ca.100	(ca.130)	?	?
5	1999	Rhein, Donau	410	(515)	72	(90)
6	2002	westliches Bayern	100	(120)	50	(60)
8	2002	Elbe, Donau	11 600	(13 600)	1 800	(2 100)
8	2005	Bayern	172	(185)	40	(43)
3	2006	Elbe	120	(125)	15	(16)
7	2007	Mittelfranken (Baiersdorf)	90	(90)	?	?

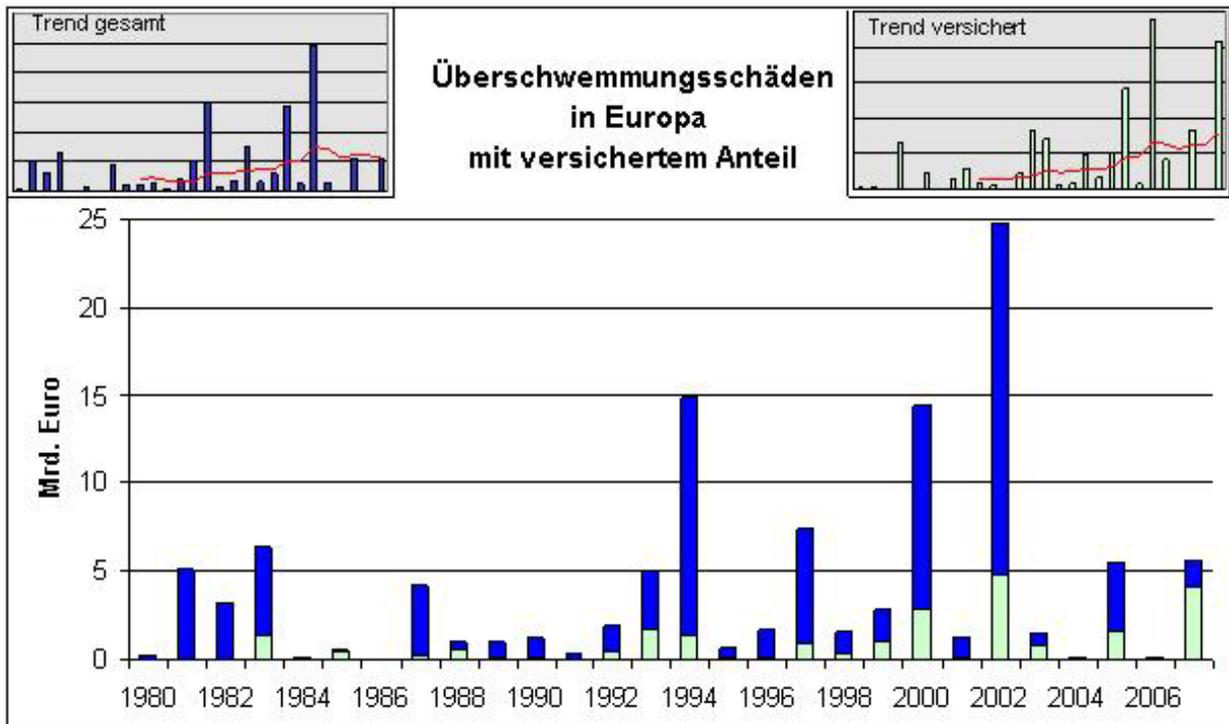


Abb. 1: Überschwemmungsschäden in Europa 1980-2007 mit versichertem Anteil

Anm.: 1. Die Werte sind inflationsbereinigt (bezogen auf 2007)

2. Die Schäden für das Jahr J beziehen sich auf den Zeitraum 1. April J bis 31. März J+1

3. Die Trendkurven geben das gleitende Mittel aus 10 Jahren wieder.

Bei Betrachtung von Abbildung 1 sowie den Tabellen 1 und 2 wird eines klar: Überschwemmungen belasten in erster Linie die Gesellschaft eines betroffenen Landes als Ganzes, Sturmschäden werden dagegen weitgehend von der Versicherungswirtschaft getragen. Die Gründe: Zum einen ist die Versicherung gegen Überschwemmungsschäden in den meisten Ländern wenig verbreitet, zum andern tritt ein Großteil der Hochwasserschäden an öffentlichem Eigentum wie Straßen, Deichen, Brücken, öffentlichen Gebäuden usw. auf, also an Objekten, die im Allgemeinen nicht versichert werden.

2 Wettergefahren und ihre Bedeutung für die Versicherungswirtschaft

2.1 Stürme und Unwetter

Für die Versicherungswirtschaft sind Stürme die mit Abstand wichtigsten Naturschadenergebnisse, da die Marktdurchdringung der Sturmversicherung in fast allen Ländern im Verhältnis zu den anderen Gefahren hoch ist. In Deutschland hat sich nach den großen Winterstürmen Anfang 1990 (u.a. Daria, Herta, Vivian, Wiebke) die Versicherung gegen Sturm flächendeckend etabliert, sowohl im privaten als auch im gewerblichen und industriellen Bereich. Zwei Sturmtypen haben hohe Schadenpotenziale in Mitteleuropa, speziell auch für die Versicherungswirtschaft: Winterstürme und lokale Unwetter (Sommergewitter, Tornados).

Winterstürme – meteorologisch als außertropische Stürme bezeichnet – entstehen von Oktober bis April. Ein einziges Wintersturmereignis kann Europa vom Norden Großbritanniens bis südlich der Alpen und vom Atlantik bis tief hinein in die Länder Osteuropas erfassen. Wegen der geographischen Ausdehnung dieses Sturmtyps sind mehrere Millionen Einzelschäden und Schäden für die Assekuranz im mittleren bis hohen zweistelligen Milliarden-Euro-Bereich möglich.

Lokale Unwetter entstehen ganzjährig, am häufigsten jedoch im Sommer. Obwohl sie räumlich begrenzt auftreten, können auch diese Ereignisse aufgrund ihrer vielfältigen Ausprägungen (Sturmböen, Starkniederschlag, Hagel, Blitzschlag, etc.) zu versicherten Kumulschäden von mehreren Milliarden € führen. Einzelzellengewitter (sommerliche Wärmegewitter) erzeugen nur selten Unwetter; sie bestehen meist nur knapp eine Stunde. Multizellengewittern haben eine deutlich längere Lebensdauer, sie treten in Gruppen (Clustern) oder entlang einer Kaltfront auf. Mit zunehmender Windgeschwindigkeit können Superzellen entstehen, die deutlich größer, organisierter und langlebiger sind und in etwa 30 % der Fälle extreme Niederschläge, Hagel, Fallböen und Tornados mit sich bringen.

Tornados sind auch in Europa durchaus keine Seltenheit, die mittlere Zahl der jährlichen Beobachtungen liegt bei 170, allein in Deutschland bei ca. 20 (wobei man davon ausgehen kann, dass kaum die Hälfte aller Tornados erfasst wird). Ihr Durchmesser kann am Boden von wenigen Zehnermetern bis zu mehreren hundert Metern reichen, ja sogar bis über einen Kilometer. Die Wirbel haben eine Lebensdauer von meist nur wenigen Minuten bis maximal einer Stunde. Ihre Zuggeschwindigkeit beträgt in der Regel 50-100 km/h, die höchste Windgeschwindigkeit im Wirbel kann aber über 500 km/h erreichen. Tornados treten allerdings nur kleinräumig auf und haben Zugbahnlängen von selten mehr als 10 km. Die meisten sind

von geringer bis mittlerer Intensität, jedoch gab es auch in Deutschland seit 1891 schon acht F4-Tornados (zweithöchste Kategorie, Windgeschwindigkeit 330-420 km/h), u.a. in Pforzheim 1968. Weitere Tornados der F4- und F5-Kategorie sind aus Nordfrankreich, den Beneluxstaaten und Norditalien bekannt. Folgen von Tornados gehen von leichten Sachschäden bis hin zu völliger Zerstörung, verursacht von Winddruck und umher fliegenden Trümmerteilen.

Eine für die Versicherungswirtschaft sehr wichtige Begleiterscheinung kräftiger Gewitter ist Hagel. Die Aufschlaggeschwindigkeit von Hagelkörnern steigt mit der Quadratwurzel ihrer Durchmesser an: Bei einem 1-cm-Korn liegt sie bei etwa 50 km/h, beim 14-cm-Korn (größtes bisher in Europa gefundenes) bereits bei 170 km/h. Hagelkörner dieser Größe sind für Menschen und viele Tierarten tödliche Geschosse und können zu riesigen Schäden auf kleinstem Raum führen. Der Münchener Hagel vom 12. Juli 1984 war lange das teuerste Ereignis in Europa. Er kostete die Versicherungen damals umgerechnet 300 Millionen €, die inflationsbereinigt heute ungefähr den doppelten Betrag ausmachten. Ein gleich hoher versicherter Hagel-Schaden fiel wieder Ende Juni 2006 im Schwarzwald (bei Villingen-Schwenningen) an.

2.2 Überschwemmungen

Fast jeder beliebige Ort in Mitteleuropa kann überschwemmt werden. Für Gebäude und Anlagen in der Nähe von Gewässern besteht diese Bedrohung regelmäßig, aber auch Bereiche weitab von Wasserläufen und Seen sind nicht vor Überschwemmungen sicher. Ursachen und Verlauf können dabei unterschiedlich sein – von der allmählichen Überflutung durch einen ansteigenden See- oder Grundwasserspiegel bis zur reißenden Mure in einem Wildbach.

Flussüberschwemmungen entstehen nach ausgiebigen Niederschlägen über einem großen Gebiet oder bei Schneeschmelze. Der Boden wird gesättigt und kann kein Wasser mehr aufnehmen, der Niederschlag fließt direkt in die Gewässer. Flussüberschwemmungen dauern in der Regel mehrere Tage bis hin zu mehreren Wochen. Die betroffene Fläche kann sehr groß sein, wenn das Flusstal flach und breit ist und genügend Wasser zur Verfügung steht. Diese Art der Überschwemmung ist versicherungstechnisch problematisch, denn es ist nur ein relativ geringer Teil des gesamten Gebäudebestands, der durch das Hochwasser gefährdet ist und für den Versicherungsschutz nachgefragt wird. In Deutschland liegen – gemäß dem Zonierungssystem ZÜRS der Versicherungswirtschaft für das (Fluss-)Überschwemmungsrisiko – weniger als 14 % der besiedelten Fläche innerhalb des 200-jährlichen Hochwasserbereichs, und davon zwei Drittel außerhalb der 50-Jahre-Zone. Nur für 3,2 % der Fläche gilt die höchste Gefährdungskategorie, die häufig, manchmal sogar regelmäßig betroffen ist (Überschwemmungswahrscheinlichkeit >10 %) und die damit nicht ohne Weiteres versicherbar ist. Eine Abgrenzung der gefährdeten Bereiche ist oft schwierig und die Wahrscheinlichkeit eines Schadens an einem bestimmten Punkt kaum angebar, insbesondere wenn Hochwasserschutzmaßnahmen vorhanden sind, die einerseits über die Bemessungsauslegung hinaus wirksam sein, andererseits aber auch schon bei geringerer Belastung versagen können.

Der Überschwemmungstyp Sturzflut kann überall auftreten; daher ist praktisch jeder potenziell gefährdet. Sturzfluten entstehen durch intensiven, in der Regel kurzzeitigen Niederschlag in einem oft sehr kleinen Gebiet, typischerweise in Verbindung mit Gewittern. Das Wasser konzentriert sich sehr schnell in den Vorflutern, wo Abflüsse und Wasserstände rasch ansteigen. Insbesondere Wildbäche können sich in wenigen Minuten vom plätschenden Rinnsal in einen reißenden Fluss verwandeln und Abhänge und Gerinne erodieren. Mit dem Wasser fließen Felsbrocken, Kies, Sand und Erde ab. Überschreiten diese Feststoffe ca. 30 % des Abflusses, spricht man von Muren. Unter den Begriff Sturzflut fällt aber auch ein Wolkenbruch in einem ebenen Gelände, bei dem es zu Überschwemmungen kommt, weil das Wasser nicht schnell genug abfließen kann. Eine Versicherung gegen Sturzfluten, die nicht gewässergebunden sind, ist unproblematisch, da der nötige geographische und zeitliche Risikoausgleich voll gegeben ist. Voraussetzung für eine starke Marktdurchdringung ist allerdings auch ein ausreichendes Risikobewusstsein in weiten Teilen der Bevölkerung im Hinblick auf diese Art der Gefährdung – und daran mangelt es.

Eine hierzulande recht häufige Ursache von Problemen mit Wasser ist ein örtlich hoher Grundwasserstand. Er kann mitunter durch den hohen Wasserstand in einem nahe gelegenen Gewässer verursacht sein. Diese Art einer Überschwemmung ist für die Betroffenen besonders lästig, da sie sich über lange Zeit hinziehen kann und in der Regel zwar weniger Sachschäden, dafür aber oft hohe Kosten verursacht, wenn monatelang rund um die Uhr Wasser abgepumpt werden muss, um etwa einen Keller trocken zu halten. In den Versicherungsverträgen werden Schäden durch Grundwasser in der Regel ausgeschlossen, weil man davon ausgeht, dass ein Baumangel die Ursache ist. Oberflächlich eindringendes Grundwasser dürfte aber meist gedeckt sein.

Sturmfluten ereignen sich an den Küsten von Meeren und großen Seen. Sie entstehen bei orkanartigem Sturm, der das Wasser auf die Küste zutreibt. Niederschläge spielen keine Rolle. Der zunehmende Meeresspiegelanstieg wird an allen Küsten der Welt das Sturmflut- und Küstenerosionsrisiko weiter erhöhen – eine der gravierendsten Folgen der globalen Erwärmung.

Eine Unterscheidung der Typen von Überschwemmungen ist aus versicherungstechnischer Sicht wegen des Phänomens der Antiselektion von großer Bedeutung. Das Prinzip einer Versicherung beruht darauf, dass eine große Anzahl von Versicherungsnehmern über eine lange Zeit geringe Beträge einzahlt, damit die kleine Zahl der Geschädigten bei den wenigen Schadenfällen über diesen Zeitraum hohe Schadenzahlungen erhalten kann. Die Gesamtsumme der Beiträge muss also die Gesamtschadensumme über einen längeren Zeitraum sowie die Kosten für den Verwaltungsaufwand abdecken. Bei der Überschwemmungsversicherung ist typisch, dass nur diejenigen Interesse an einem Versicherungsschutz haben, die sehr häufig von Hochwasser betroffen sind. Genau diese Tatsache führt jedoch dazu, dass sie nur schwer versicherbar sind. Es gehört nämlich ebenfalls zu den Prinzipien der Versicherung, dass ein Schutz nur gegen unvorhersehbare, plötzliche Ereignisse gewährt werden

kann, denn nur so ist ein Risikoausgleich in der Zeit möglich. Diese Voraussetzung ist bei vielen Flussüberschwemmungen nicht gegeben. Oft ist es nur eine Frage der Zeit, wann es zur nächsten Überflutung kommt. Andererseits glauben jene, die nicht an einem Gewässer wohnen, vor Überschwemmungen sicher zu sein, und lehnen Offerten seitens der Versicherungen ab. Die Folge ist, dass die Versichertengemeinschaft relativ klein bleibt und zudem aus Leuten besteht, die einem hohen Risiko unterliegen. Diesen Effekt nennt man Antiselektion.

2.3 Gebirgsgefahren und Massenbewegungen

Naturgefahren in Gebirgsgebieten sind im Wesentlichen Massenbewegungen, also Muren, Hangrutsche, Felsstürze, Hangkriechen, Gletscherabbrüche, Gletscherseeausbrüche und natürlich Lawinen. Sie sind zwar zum Teil geologisch bedingt, werden aber meist durch Wetterereignisse ausgelöst. Massenbewegungen besitzen ein enormes Zerstörungspotenzial, treten aber nur lokal auf und richten daher nur in einem begrenzten Gebiet Schäden an. Deswegen haben sie für die Versicherungswirtschaft meist keine herausragende Bedeutung. Schäden können außerdem weitgehend vermieden werden, wenn man die Gefahrenzonen beachtet, die in den meisten Ländern ausgewiesen oder zumindest bekannt sind. Tut man das nicht, wird ein Versicherungsschutz auch kaum gewährt werden. Einige spektakuläre Ereignisse im Sommer 2006 in der Schweiz (Felssturz am St. Gotthard, Felsabbruch am Eiger, Gletscherwasserausbruch in Samedan) lenkten die Aufmerksamkeit verstärkt auf die Auswirkungen der Klimaänderung in den Bergen, in denen sich in einem wärmeren Klima die Gletscher noch schneller zurückziehen und Permafrostgebiete auftauen. Hänge werden somit tendenziell destabilisiert und mehr Lockermaterial entsteht, das bei Starkniederschlägen durch Hangrutschungen und Muren zu Tal transportiert wird.

Eine völlig andere Bedeutung für die Versicherungen haben Bodensetzungen, die nach langen relativen Trockenperioden entstehen, wenn der Untergrund aus bestimmten tonigen Böden besteht, die bei Wasserentzug schrumpfen. Solche Vorgänge bergen immense Schadenpotenziale. Allein in Großbritannien wurden seit 1976 von den Versicherungen über 8 Milliarden € für Setzungsschäden ausgezahlt, davon allein im Spitzenjahr 1991 ca. 800 Millionen. Glücklicherweise kommen die spezifisch dafür anfälligen Tone nur in Südengland und in Teilen Frankreichs in nennenswertem Umfang vor, so dass sich das Problem im restlichen West- und Mitteleuropa nicht so dramatisch darstellt.

2.4 Wintergefahren: Frost, Eis, Schnee, Lawinen

Schneesturm, Frost und Eisregen sind Gefahren mit möglichen immensen Folgen, die viele bislang unterschätzen. Bei der Krisenmanagementübung LÜKEX 2004 des Bundesamtes für Bevölkerungsschutz und Katastrophenhilfe simulierten Behörden und Energieversorgungsunternehmen das folgende Szenario in Süddeutschland: Ein Schneesturm mit Eisregen und anschließender Frostperiode führt in 75 % der Stadt- und Landkreise Bayerns und Baden-Württembergs zu einem 10-tägigen Stromausfall. Die Folgen: Licht, Heizung, Kühlung, Belüftung, öffentliche Transportsysteme, Telekommunikationssysteme, Arbeitsmittel (Maschinen, Computer) werden nahezu überall lahmgelegt. Das öffentliche Leben kommt zum Erliegen.

Selbst die Kommunikationsmittel der Bundeswehr sind nicht mehr flächendeckend aufrechterhalten. In der Simulation verenden hunderttausende Tiere, da Belüftung und Heizung in den Ställen ausfallen. Menschen in Krankenhäusern und Altenheimen sterben, weil lebenserhaltende Apparaturen, zum Beispiel Dialysegeräte, und die Heizung nicht mehr funktionieren. Die Schäden aus derartigen Wetterereignissen im Winter können auch für die Versicherungswirtschaft enorm sein, da viele der sekundären schadenträchtigen Effekte (Dominoeffekte im Produktions- und Dienstleistungsbereich) möglicherweise in Verträgen nicht explizit ausgeschlossen sind. Sie könnten beispielsweise in Betriebsunterbrechungs- oder Haftpflichtpolice anfallen.

Nach einigen relativ schneearmen Jahren in der jüngeren Vergangenheit zeigten die Winter 2004/2005 und 2005/2006, dass die Gefahr von Schneedruck keineswegs der Vergangenheit angehört. Mitte November 2005 begann es in Österreich – und später auch in Bayern – ausgiebig zu schneien. Bis in den Januar hinein kam es immer wieder zu starken Schneefällen. Die massive Schneelast verursachte Schäden nicht nur in Wäldern, sondern auch an Gebäuden. In fast allen Bundesländern Österreichs brachen Dächer ein. Schulen, Einkaufszentren, Betriebe, Sporthallen und Hotels wurden evakuiert und Kirchen gesperrt. In einigen Orten Niederösterreichs sowie der Obersteiermark wurde der Katastrophenfall ausgerufen. Der Schnee kam dem Land teuer zu stehen. Volkswirtschaftlich dürfte der Schaden bei 500 Millionen € liegen, der versicherte Marktschaden betrug rund die Hälfte, da in Österreich Schneedruckschäden an Wohngebäuden unter der Sturmpolice gedeckt sind. Die Marktdurchdringung der Schneedruckdeckung liegt damit bei über 90 %, während in Deutschland, wo besonders das östliche Bayern ähnlich spektakulär betroffen war, diese Gefahr unter der erweiterten Elementargefahrenpolice versichert ist, die weniger als 10 % der Hausbesitzer abgeschlossen haben. Große Schneemengen können weitere Folgen haben: Als es gegen Ende März 2006 zu regnen begann, ging die Schneedruckgefahr nahtlos in ein rasant steigendes Hochwasser über, das zum Glück keine katastrophalen Ausmaße annahm.

Die von Lawinen ausgehende Gefahr und die Folgen für die Versicherungswirtschaft ist mit der von schnellen Massenbewegungen vergleichbar. Der extreme Lawinenwinter 1998/1999 forderte im gesamten Alpenraum 79 Menschenleben. Trotz dieser damals als außerordentlich empfundenen Katastrophe (was zu einem wesentlichen Teil auch durch die umfangreiche mediale Berichterstattung über einige spektakuläre Fälle – Stichwort Galtür – verursacht wurde), entstanden insgesamt „nur“ volkswirtschaftliche Schäden von gut 800 Millionen €. Der Lawinenwinter rangiert daher lediglich auf den hinteren Rängen in Tabelle 1. Der weitestgehend größte Teil der versicherten Schäden entfiel auf die Schweiz, wo private Lawinenschäden weitgehend versichert sind; hier kosteten die Ereignisse die Versicherungswirtschaft knapp 200 Millionen €.

Bei allen genannten Gebirgsgefahren ist der finanzielle Aufwand für Schutzmaßnahmen im Vergleich zu den Schadenkosten wohl noch größer als bei Überschwemmungen – zumindest in Mitteleuropa. Das liegt vor allem daran, dass diese Schadenereignisse meist plötzlich und unvorhersehbar auftreten und daher für Menschen sehr gefährlich sind. Menschliches Leben

zu schützen erfordert zu Recht aufwendigere Maßnahmen als lediglich Sachschäden zu verhindern. Allein die Schweiz investierte seit dem schlimmen Lawinenwinter von 1951 über 1 Milliarde € in Schutzbauten gegen Lawinen.

2.5 Sommergefahren: Hitzewellen, Trockenperioden und Dürre

Die durchschnittlichen Lufttemperaturen sind im letzten Jahrhundert in Mitteleuropa um ca. 1 °C gestiegen und damit weit stärker als im globalen Mittel. Aber nicht nur der Mittelwert hat zugenommen, sondern auch die Varianz. Ausgeprägte Hitze- und Dürreperioden in den Sommermonaten sind die Folge. In Mitteleuropa spricht man in der Regel von einer Hitzewelle, wenn die Tagesmaxima der Lufttemperaturen über mehrere Tage hinweg 30 °C überschreiten. Hitzewellen beeinflussen den Menschen direkt – insbesondere den älteren Teil der Bevölkerung: Sie belasten das Herz-Kreislauf-System und erhöhen damit Morbidität sowie Mortalität. Daneben können sie die Lebensmittelsicherheit gefährden, da sie beispielsweise ideale Bedingungen für die Ausbreitung von Salmonellen schaffen.

Der meteorologische Sommer 2003 war in weiten Teilen Europas ein besonders ausgeprägtes Extremereignis: Zwischen Juni und August übertrafen die Temperaturen im Mittel über ganz Deutschland die klimatologischen Durchschnittswerte des Zeitraums 1961-1990 um 3,4 °C. Dies entspricht auf der Basis der bisherigen Klimastatistiken einer Eintrittswahrscheinlichkeit von einmal in rund 450 Jahren. Dabei sind die ebenfalls zu warmen Monate Mai und September noch gar nicht berücksichtigt. Die Hitzewelle erfasste nicht nur Deutschland, sondern auch große Gebiete Mittel-, West- und Südeuropas. Sie forderte über 70 000 Menschenleben (zusätzlich zur normalen Sterberate) und war damit eine der größten humanitären Naturkatastrophen der letzten Jahrhunderte in Europa.

Nur drei Jahre später brach der Sommer 2006 in weiten Teilen Europas wieder Rekorde: So war der Juli in Deutschland der wärmste Monat seit Beginn der Aufzeichnungen. In den Niederlanden und Belgien, wo ebenfalls Hitzerekorde gebrochen wurden, starben jeweils rund 1 000 Menschen. Die negativen Folgen der Hitzewelle blieben wegen der Fußball-WM in Deutschland in den Medien jedoch weitgehend unbeachtet. Die Wahrscheinlichkeit für einen Hitzesommer wie 2003 ist allein in den beiden vergangenen Jahrzehnten bereits um das Zwanzigfache gestiegen, und Klimamodelle lassen erwarten, dass sich dieser Trend künftig noch verstärken wird. Nach statistischen Analysen Schweizer Klimatologen wird solch ein Sommer im letzten Drittel dieses Jahrhunderts jedes zweite Jahr zu erwarten sein, also zum Normalfall werden.

Meist unmittelbar verbunden mit einer Hitzeperiode sind Trockenheit und Dürre. Beides sind relative Begriffe, die eine im Vergleich zum langjährigen Mittelwert verminderte Wasserverfügbarkeit in einer bestimmten Region und über einen bestimmten Zeitraum beziehungsweise deren Auswirkungen kennzeichnen. Das Problem der Dürre im Gegensatz zur permanenten Aridität besteht darin, dass sich die Natur (Pflanzen und Tiere) sowie der Mensch nicht an diese Bedingungen angepasst haben und daher eine hohe Vulnerabilität besteht. Dürre wird durch erhöhte Verdunstung oder verminderten Niederschlag verursacht, meist jedoch

durch beide Faktoren gemeinsam. Da sie in der Regel durch großskalige länger anhaltende Wetterlagen hervorgerufen werden, betreffen sie meist auch größere Gebiete. Auch der vermehrte Wasserverbrauch von Landwirtschaft, Industrie und Bevölkerung kann Dürren verursachen oder sie zumindest verstärken.

Hitzewellen und Trockenperioden hinterlassen in der Volkswirtschaft ihre Spuren: Das Unfallaufkommen steigt, die Produktivität der Arbeitnehmer sinkt. Zudem beeinträchtigen sie die Agrar- und Forstwirtschaft, die dadurch Ernteauffälle erleidet. Die Waldbrandgefahr erhöht sich und damit das Risiko, dass große Werte vernichtet werden. Wenn die Wasserpegel in den Flüssen sinken, büßen Schifffahrt, Energiewirtschaft und viele Industriebetriebe Einnahmen ein. Ist die Wassertiefe zu gering oder die Fahrrinne zu schmal oder liegen ökologische Gefahren durch das Aufwühlen von Sedimenten und die Beeinträchtigung der Fischpopulation vor, muss nicht nur die Frachtschifffahrt eingestellt – oder zumindest eingeschränkt – werden, auch das stark zunehmende Geschäft der Tourismusbranche mit Flusskreuzfahrten gerät ins Stocken. Zahlreiche Touren wurden 2003 abgesagt oder größere Teilstrecken per Bus überbrückt, was die betroffenen Gäste nicht gerade erfreute und viele zur Absage ihrer Reise veranlasste. Eine weitreichende Unterbrechung der Schifffahrt führt recht bald auch zu Unterbrechungen bei den Rohstoff-, Energiestoff- und Warenflüssen und in der Folge zur Betriebsunterbrechung in Industriebetrieben. So stand der Frankfurter Flughafen im August 2003 kurz vor tief greifenden Einschränkungen, weil der – überwiegend per Schiff angelieferte – Kerosinnachschub ausblieb. Zudem müssen Kraftwerke aufgrund mangelnden – und zudem zu warmen – Kühlwassers ihre Leistung reduzieren und eventuell sogar abgeschaltet werden. Bei Wasserkraftwerken wirkt sich der geringe Abfluss direkt auf die generierte Leistung aus. In einigen Fällen mag auch der Mangel an Wasser, das anderweitig als zur Kühlung für einen Produktionsprozess benötigt wird, eine Rolle spielen.

Die Assekuranz ist somit von Hitze und Trockenheit nicht nur in den Sparten Leben und Gesundheit betroffen, sondern auch in diversen Sach- und Betriebsunterbrechungsversicherungen. Binnenschiffer können sich versichern, doch sehen die Verträge in der Regel Selbstbehalte von mindestens 14 Tagen Betriebsunterbrechung vor. Erst danach erfolgt ein Schadenersatz auf Tagessatzbasis. Diese Tagessätze summieren sich im Sommer 2003 insbesondere bei Kreuzfahrtunternehmen durch die langen forcierten Liegezeiten teilweise zu Millionenbeträgen. Noch nicht sehr verbreitet, aber mit Sicherheit im Kommen, sind Haftpflichtversicherungen für Wasser- und Energieversorger, die bei Trockenheit und Hitze den Verpflichtungen gegenüber ihren Kunden nicht mehr vertragsgemäß nachkommen können.

3 Schadenaspekte

3.1 Direkte Schäden aus Sach-, Kasko- und Agrarversicherungen

Aufgrund der in Mitteleuropa vorherrschenden Massivbauweise sind strukturelle Sturmschäden an Gebäuden auch bei hohen Windgeschwindigkeiten die Ausnahme. Gleiches gilt für die Auswirkungen von Blitz- und Hagelschlägen. Überwiegend dominieren Schäden an den Gebäudehüllen, also Dächern, Fenstern und peripheren Installationen. Besonders anfällig sind temporär installierte Objekte an Baustellen oder für Messen und ähnliche Großveranstaltungen.

staltungen (Rohbauten, Gerüste, Kräne, provisorische Hallen, Zelte, Tribünen etc.). Herumfliegende Gegenstände – inkl. Hagelkörner – können empfindlichen Objekten wie Gewächshäusern und Verkehrsmitteln enorme Schäden zufügen. Am häufigsten und für Menschen am gefährlichsten sind Schäden durch umfallende Masten und Bäume sowie durch herabbrechende Äste. Versicherte Objekte sind gegenüber Sturm- und Unwetterereignissen in den vergangenen Jahren in den europäischen Ländern, aus denen detaillierte Schadeninformationen von Großereignissen vorliegen, tendenziell anfälliger geworden, das heißt, das Verhältnis von Schaden zu Versicherungssumme ist gestiegen. Gründe sind unter anderem bauliche Veränderungen (Anbauten, Detailausführung und Wartungszustand von Dächern und Fenstern), neue Baumaterialien (Metall-, Glas- und Kunststofffassaden, Wärmedämmung), Art, Alter, Höhe und Zustand des Baumbestands in der Umgebung von Gebäuden und Ausweitung des Deckungsumfangs (z. B. Einschluss von Schäden an Zäunen und Gartenanlagen, Aufräumkosten).

Die Zunahme von Überschwemmungsschäden ist in erster Linie auf die zunehmende Erschließung gewässernaher Bereiche zurückzuführen. Für die Menschen ist es attraktiv, in der Nähe von Gewässern zu wohnen. Die Gefahr, die vom Fluss ausgeht, nehmen viele zunächst bewusst in Kauf. Sie gerät aber schon bald in Vergessenheit, wenn nichts passiert. Auch das zuweilen trügerische Gefühl der Sicherheit, das Schutzeinrichtungen (z. B. Warnsysteme, Hochwasserdeiche, Katastrophenschutzorganisationen) den Menschen vermitteln, sorgt dafür, dass Werte in exponierten Gebieten stark ansteigen. Außerdem: Noch nie zuvor hatten die Menschen so großen, wertvollen und verwundbaren Besitz wie heute. Vor allem die Heizanlagen und die dazugehörigen Öltanks sind problematisch. In größeren Wohnanlagen oder gewerblichen Gebäuden befinden sich zudem im Untergeschoss oft Steuerungscentren von Aufzugs- und Klimaanlage, Warenlager und mitunter sogar Rechenzentren. In der Bau- und Landnutzungsplanung wurden und werden regelmäßig Fehler gemacht. Abhilfe könnte geschaffen werden, indem die Verantwortung für die Landnutzung von der örtlichen auf eine übergeordnete Ebene verlagert wird. Wer bauen will, sollte obligatorisch auf die aktuelle Gefährdungssituation hingewiesen werden, also auch darauf, dass Objekte auf einem bestimmten Grundstück möglicherweise nicht versicherbar sind. Motivationsinstrumente zur Hochwasservorsorge sind verfügbar: Durch geeignete Vorkehrungen oder durch einen ausreichenden Selbstbehalt lässt sich ein für Objekt an einem Ort, an dem es eigentlich nicht versicherbar wäre, nachträglich möglicherweise eine Deckung erhalten. Diese Maßnahmen sollten aber nicht als generelle Planungsvorgabe (die nur allzu häufig dann doch nicht in vollem Umfang umgesetzt wird) verwendet werden, sondern nur für eine Nachrüstung bestehender, nicht versicherbarer Gebäude oder als Mittel, eine reduzierte Versicherungsprämie zu erreichen. Die Versicherungswirtschaft sollte darüber nachdenken, ob nicht ähnlich wie bei der privaten Krankenversicherung eine teilweise Beitragsrückerstattung bei nicht eingetretenem Schaden innerhalb eines vorgegebenen Zeitraums (z. B. nach 3 oder 5 Jahren) erfolgen kann, um einen Anreiz zur Vorsorge zu bieten.

In den meisten Ländern Mitteleuropas sind Versicherungen von Schäden in der Landwirtschaft nur wenig verbreitet. Eine Ausnahme bildet die Hagelversicherung. Auf Windwurf-,

Starkniederschlags-, Hochwasser-, Nässe-, Hitze-, Frost-, Kälte- und Dürreschäden bleiben die Bauern meist sitzen, sofern sie nicht staatliche Hilfen erhalten, die aber in der Regel nur bei extremen Bedingungen bereit gestellt werden. Gegenwärtig wird allerdings in mehreren Ländern intensiv eine Mehrgefahrenversicherung diskutiert.

3.2 Indirekte Schäden: Betriebsunterbrechungs- und Rückwirkungsschäden

Die in der Industrie weit verbreitete Produktionsphilosophie „Just-in-time“ birgt die Gefahr, dass auch kleine Störungen in der Kette von der Anlieferung von Rohstoffen und Teilkomponenten, der Energie- und sonstigen Betriebsmittelversorgung, dem eigentlichen Herstellungsprozess eines Produkts oder dessen Auslieferung zur Unterbrechung der gesamten Produktion führen können. Um Betriebsunterbrechung (BU) handelt es sich dann, wenn die Störung innerhalb des vom (versicherten) Unternehmen kontrollierten Teils der Kette eintritt (Beispiel: eine Montagehalle steht unter Wasser). Die meisten Unternehmen haben diesen Fall eine Betriebsunterbrechungsversicherung, die allerdings üblicherweise einen substantiellen Selbstbehalt (gemessen in Tagen bis Wochen) einschließt.

Können jedoch aufgrund der Überschwemmung lediglich die Mitarbeiter ihr eigentlich voll funktionsfähiges Werk nicht erreichen, ist das Stromnetz zusammengebrochen, oder kann oder will niemand mehr das Produkt abnehmen, so spricht man von indirekter Betriebsunterbrechung oder von Rückwirkungsschäden (CBI von engl. Contingent Business Interruption). Rückwirkungsschäden können für die Versicherungswirtschaft exorbitante und modelltechnisch kaum nachzubildende Summen ergeben. So reichten zum Beispiel nach dem Hurrikan Katrina (US-Golfküste 2005) weitab vom betroffenen Gebiet residierende Kreditkarten- und Kabelfernsehgesellschaften – rechtmäßige – Forderungen von mehreren hundert Millionen US\$ auf der Basis von CBI-Policen ein, denn Hunderttausende ihrer Kunden sowie Touristen im Katastrophengebiet konnten nicht mehr einkaufen und fernsehen. Eine CBI-Versicherung ist im Allgemeinen nicht in der BU-Police enthalten, sie muss gesondert abgeschlossen werden.

3.3 Versicherte Schadenanteile und Großschadenpotenziale

Großschadenpotenziale kommen in erster Linie aus dem Sachschadenbereich. Allerdings liefern andere Versicherungssparten wie Transport, Agro, Technik (Baustellen), Assistance (Reiseversicherungen) und insbesondere Kasko (Autos, Flugzeuge) mitunter wesentliche Schadenbeiträge. Spezielle kritische Punkte sind Lager bei Automobilherstellern oder in Häfen. Hier lagern zum Teil Werte von mehreren hundert Millionen € auf einem Quadratkilometer Fläche – Werte, die außerdem hoch empfindlich gegen zum Beispiel Hagel und Überflutung sind.

Die Sachversicherung von Wettergefahren teilt sich im wesentlichen in zwei Deckungsformen auf: Sturmversicherung und Elementargefahrenversicherung. Dabei wird in der Regel getrennt zwischen Gebäude und Inhalt einerseits sowie zwischen Privat, Gewerbe und Industrie andererseits. Die Sturmversicherung umfasst typischerweise die Einwirkung von Wind und Hagel, kann aber – wie zum Beispiel in Österreich – auch Schneedruck einschlie-

ßen. Häufig ist sie sogar schon in der Feuerepolice enthalten. Versicherte Elementargefahren sind üblicherweise Erdbeben, Überschwemmung, Hangrutsch, Bodensetzung, Vulkanismus, Schneedruck. Details dazu sind ausführlich in Münchener Rück (2007) beschrieben.

Die Versicherungsdichte bei Sturm/Hagel liegt in den west- und mitteleuropäischen Ländern im Privatkundenbereich zwischen 80 und 100 %, bei Überschwemmungsrisiken meist deutlich niedriger. In der Schweiz besteht eine generelle Pflichtversicherung gegen Naturrisiken (außer Erdbeben), sodass hier eine Versicherungsdichte für Wetterrisiken von nahezu 100 % vorliegt. Schon ein einziges Großereignis kann in West- und Mitteleuropa versicherte Schäden bis zu einem zweistelligen Milliarden-Euro-Betrag verursachen (vergleiche auch Tabelle 1). Nicht zu unterschätzen sind aber auch lokale Unwetterereignisse. Hagelszenarien für Großstädte liefern versicherte Schäden in Milliardenhöhe.

Bei Überschwemmungen ist wegen der restriktiven Zeichnungspolitik der Anteil versicherter Schäden meist noch gering. Außerdem tritt ein Großteil der Schäden an nicht versicherten öffentlichen Einrichtungen wie Straßen, Deichen, Gewässerbetten und Brücken sowie anderen Infrastruktureinrichtungen (z. B. Wasserversorgung und -entsorgung) auf. In Deutschland betragen die Schäden an Privateigentum beim Pfingsthochwasser 1999 in Bayern etwa 60 % von insgesamt 350 Millionen €, bei der Elbeflut 2002 in Sachsen etwa 43 % von 8,6 Milliarden €, bei der Oderüberschwemmung 1997 waren es in Brandenburg gerade einmal 15 % von 330 Millionen €. Die Schadenpotenziale nehmen hier allerdings zu und länderübergreifende Szenarien lassen Schäden von mehreren Milliarden € erwarten.

Das größte Überschwemmungsschadenpotenzial in Deutschland – sowohl was Gesamt- als auch versicherte Schäden betrifft – ist zweifellos im Einzugsgebiet und entlang des Rheins zu finden, wo die vorhandenen Werte beträchtlich höher als die im 2002 betroffenen Elbegebiet sind. Andererseits ist aber auch die hydrologische Charakteristik des Rheins anders, sodass sich das 2002er-Szenario nicht ohne Weiteres auf ihn übertragen lässt. Dennoch ist davon auszugehen, dass bei einem Extremereignis hier volkswirtschaftliche Schäden von deutlich über den 11,6 Milliarden € möglich sind, die 2002 im Elbe- und Donaugebiet angefallen sind. Studien für die Strecke von Iffezheim bis Bingen (IKSR 1997) und für den nordrhein-westfälischen Abschnitt (MURL 2000) haben ergeben, dass hier Sachschadenpotenziale von über 6 Milliarden € beziehungsweise 13 Milliarden € für ein 200-jährliches Ereignis vorliegen. Allein für die Stadt Köln wird mit 3,5 Milliarden € gerechnet (STADT KÖLN 1996). Mittlerweile sind seit Veröffentlichung dieser Ergebnisse bereits 8-12 Jahre vergangen; man darf also davon ausgehen, dass die genannten Zahlen heute noch beträchtlich höher liegen. Auch der versicherte Schaden kann – trotz der geringeren Verbreitung der Überschwemmungsdeckung im Privatbereich in Westdeutschland – aufgrund der hohen Industriewerte im Rheingebiet – 5 Milliarden € deutlich übersteigen.

Auch in den Nachbarländern Deutschlands sind Überschwemmungen in der Lage, Gesamtschäden in Höhe von mehreren Milliarden € zu erzeugen. Ein Niederschlagsereignis im österreichischen Donaugebiet wie 2002 (über 400 Millionen € versicherter Schaden) mit einem

etwas südlicher gelegenen Zentrum könnte an der Donau verheerende Überschwemmungen auslösen. Zu den Schäden an kleinen Gewässern kämen große Schadenpotenziale in Städten wie Linz und vielleicht sogar Wien (obgleich dort die Wahrscheinlichkeit einer Überflutung im Stadtbereich wegen der Auslegung des Hochwasserschutzes auf einen 1000-jährlichen Abfluss sehr gering ist). Dabei sind versicherte Schäden von über 1 Milliarde € möglich. Die Schweiz hat 2005 im Zentrum des Landes die katastrophalsten Überschwemmungen ihrer Geschichte erlebt mit Gesamtkosten von fast 2 Milliarden €, von denen ein Großteil versichert war (1,3 Milliarden € = 67 %). Ein noch höherer Schaden in der Größenordnung von mehreren Milliarden € ist vorstellbar, wenn die stärker industrialisierten Gebiete im Großraum Zürich-Basel getroffen würden.

In der gleichen Größenordnung wie in der Schweiz liegt die Versicherungsdichte gegen Überschwemmungen in Großbritannien, wo die Versicherung gegen Naturgefahren auch standardmäßig in Gebäudepolicen eingeschlossen ist. Hier wurden bei den Juni- und Juli-Ereignissen 2007 4,4 der insgesamt 6 Milliarden € Schäden von Versicherungen bezahlt – das waren neben den Überschwemmungen 2002 in Mitteleuropa (3,4 Milliarden € versichert) somit die bislang teuersten Flutereignisse in Europa für die Versicherungswirtschaft.

3.4 Wetterdeckungen

Staatliche Unterstützung ist vor allem bei Ertragsausfällen in der Landwirtschaft von großer Bedeutung. In Mitteleuropa bietet Österreich eines der umfassendsten Deckungskonzepte: Neben Hagel sind auch Frost, Sturm, Überschwemmung, Trockenheit und Dauerregen während der Ernte sowie andere Risiken gedeckt; der Staat subventioniert die Prämien mit 50 %. Eine solche flächendeckende staatlich subventionierte Erntemehrgefahrenpolice setzt eine Risikopartnerschaft zwischen Landwirtschaft, Versicherungswirtschaft und Staat voraus.

Eine weitere Möglichkeit, wetterbedingte Schadenereignisse, Einnahmeeinbußen oder Zusatzkosten abzudecken, sind sogenannte Wetterdeckungen; der Markt hierfür entwickelt sich seit etwa einem Jahrzehnt mit zunehmendem Tempo. Sie wurden ursprünglich für die Energiebranche konzipiert, die den Launen des Wetters besonders ausgesetzt ist, da in milden Wintern weniger geheizt, in kühlen Sommern weniger gekühlt und damit jeweils unterdurchschnittlich viel Energie verbraucht wird. Energieunternehmen sind außerdem nicht nur auf der Abnehmerseite wetterfühlig, sondern teilweise auch bei der Produktion (siehe 2.5). Auch die Tourismusbranche sichert sich immer mehr gegen für sie widrige Wetterbedingungen ab, die hohe Einnahmeeinbußen nach sich ziehen. Ein solches Beispiel war der extrem schneearme Winter 2006/2007 für die Skigebiete in den Alpen.

Bei der Strukturierung von Wetterdeckungen sind der Kreativität kaum Grenzen gesetzt. So können Höchst- oder Mindestwerte von Temperatur, Niederschlag (Regen/Schnee), Sonnenscheindauer, Wind oder eine Kombination verschiedener Werte als Grundlage dienen, die an unabhängigen, offiziellen Wetterstationen gemessen werden. Der Risikotransfer kann auf der Grundlage kumulierter Werte über die gesamte betrachtete Periode stattfinden oder indem die Tage gezählt werden, die ein bestimmtes Kriterium erfüllen, beispielsweise eine

Temperatur von 31 °C und mehr. Die im Vorfeld definierte Auszahlung erfolgt dann entweder komplett, sobald der Trigger erreicht wurde, oder graduell, zum Beispiel pro zusätzlichem Tag mit einer maximalen Temperatur von über 31 °C.

Schon seit geraumer Zeit werden Sport-, Musik- und ähnliche Veranstaltungen nicht nur gegen den Ausfall aufgrund von extremen Naturereignissen, sondern auch explizit gegen widriges Wetter versichert. Gerade Klassik-Open-Air-Konzerte sind sehr regen anfällig, da Streichinstrumente keinesfalls nass werden dürfen. Tennisturniere werden bei anhaltendem Regen unterbrochen, sodass die wichtigen Finalspiele unter Umständen nicht wie geplant an den lukrativeren Wochenenden stattfinden können. Skispringen und Skirennen müssen bei Sturm, Nebel, starkem Schneefall, Regen oder hohen Temperaturen abgesagt oder verschoben werden. In den Veranstaltungsausfallpolicen wird daher oft die Option gewählt, die hierdurch entstandenen Kosten beziehungsweise verringerten Einnahmen zu erstatten, sofern zum Beispiel ein in Millimeter definierter Niederschlagstrigger überschritten wird.

4 Der Klimawandel und das sich ändernde Risiko

Bereits 1973 hatte die Münchener Rück als erster Mahner aus der Wirtschaft in einer Publikation zu Flusshochwassern (Münchener Rück 1973) darauf hingewiesen, dass der von Menschen gemachte Klimawandel ein möglicher Treiber für zunehmende Schäden ist. Der vierte Bericht des IPCC (2007) bestätigt unsere Warnungen und Aussagen in den vergangenen drei Jahrzehnten. Die Klimaänderung wird uns mehr extreme Wetterereignisse bringen und damit mehr kosten. Klimamodelle prognostizieren einhellig wärmere, feuchtere Winter in Mitteleuropa mit deutlich weniger Schnee. Der höhere Wasserdampfgehalt der Atmosphäre wird nicht nur die Niederschlagsmengen generell steigen lassen, sondern in regionalen und lokalen Unwettersituationen außerdem zu extremeren Regenintensitäten führen. Die Variabilität der Niederschlagsereignisse steigt, Extremwetterlagen häufen sich. Vor allem die hochwasserträchtigen Westwetterlagen und Vb-Tiefs nehmen zu. Sie führten bereits zu einem Anstieg der Niederschläge im Westen und Süden Deutschlands um 20-30 %. Die Tendenz zu trockeneren Sommern in bestimmten Regionen bedeutet nicht notwendigerweise eine Entspannung bei sommerlichen Starkniederschlägen: Sie werden sich auf wenige Tage konzentrieren und hohe Intensitäten aufweisen. Folge: mehr Sturzflutereignisse. Die Temperatur wird in den Sommerhalbjahren bis zum Ende des 21. Jahrhunderts weiter steigen, Hitzewellen werden zunehmen.

Diese Trends werden natürlich auch in der Preiskalkulation der Versicherungen berücksichtigt mit dem Ergebnis: Wenn die Gefährdung zunimmt, muss auch der Versicherungsschutz teurer werden. Ein potenziell positiver Effekt besteht darin, dass die Versicherungsnehmer versuchen werden, durch präventive Maßnahmen ihre Risiken – und damit auch wieder ihre Prämienkosten – zu reduzieren. Auch Planer müssen bei ihren Bemessungsannahmen berücksichtigen, dass sich zum Beispiel ein 100-jährlicher Abfluss in Zukunft erhöhen wird. Dieser Anpassungsprozess hat bereits begonnen: Die Bundesländer Baden-Württemberg und Bayern haben beschlossen, für neu zu planende Hochwasserschutzanlagen einen Last-

fall Klima anzusetzen beziehungsweise den Bemessungsabfluss um 15 % zu erhöhen, um den Klimawandel zu berücksichtigen (HENNEGRUFF et al. 2006).

Mit den gesamtwirtschaftlichen Folgen des Klimawandels hat sich der Report „Die Ökonomie des Klimawandels“ von Sir Nicholas Stern auseinandergesetzt, der im Oktober 2006 veröffentlicht wurde. Bis Mitte dieses Jahrhunderts prognostiziert die Studie einen jährlichen Verlust von über 5 % des weltweiten Bruttoinlandprodukts, dies entspricht heutigen 2 200 Milliarden US\$. Stern geht davon aus, dass sich die Kosten auf lediglich 1 % des weltweiten Bruttoinlandsprodukts pro Jahr (445 Milliarden US\$) belaufen, wenn frühzeitig gehandelt wird. Entscheidend ist zudem, die Anpassung an jene Klimawandelfolgen zu finanzieren, die nicht mehr zu verhindern sind. Die Versicherungswirtschaft hat hier eine zentrale Rolle, denn sie stellt Lösungen zur Verfügung, um die monetären Schäden abzufedern.

Auch in der Vergangenheit gab es schon einzelne Extremereignisse. Deshalb lassen sich außergewöhnliche Wetterereignisse alleine nicht als Beweis für eine Klimaänderung anführen. Nur die Summe ihres – vermehrten – Auftretens kann als Beleg dienen. Generell müssen sich Staat, Katastrophenschutz, Bevölkerung und Versicherungswirtschaft aber darauf einstellen, dass es zu häufigeren und katastrophaleren Ereignissen mit insgesamt höheren Schäden kommt.

5 Die Risikopartnerschaft zwischen Staat, Betroffenen und Versicherungen

Schadenreduktion und Schadenminimierung können nur in einer integrierten Vorgehensweise angegangen werden – insbesondere beim von Hochwasser ausgehenden Risiko. Gleichzeitig muss das Überschwemmungsrisiko auf mehrere Schultern verteilt werden. Dies hat schon die Länderarbeitsgemeinschaft Wasser in ihren „Leitlinien für einen zukunftsweisen Hochwasserschutz“ (LAWA 1995) sehr deutlich herausgestellt. Im Wesentlichen basiert die Vorsorge auf drei Komponenten:

- (1) dem „Staat“, womit alle öffentlichen Stellen wie staatliche und kommunale Verwaltungen einschließlich Verbänden, aber auch staatliche und nicht-staatliche Hilfsorganisationen wie Feuerwehr, THW, Rotes Kreuz usw. gemeint sein sollen;
- (2) den Betroffenen, die sowohl Privatpersonen als auch Firmen umfassen und – im Hinblick auf Schäden an Straßen, Deichen und öffentlichen Gebäuden – auch wieder den Staat;
- (3) der Versicherungswirtschaft, bestehend aus Erst- und Rückversicherungsgesellschaften.

Nur wenn alle drei Partner in einem abgestimmten Verhältnis miteinander im Sinne einer Risikopartnerschaft kooperieren, ist ein effizienter Katastrophenschutz möglich. Versicherungen sind hauptsächlich dazu da, solche finanziellen Schäden zu ersetzen, welche die Versicherten substantiell treffen oder gar ruinieren. Sie sind daher zwar keine sozialen Einrichtungen (im Sinne von karitativ) aber unabdingbare Einrichtungen im Sozialsystem, denn sie verteilen die Belastung Einzelner um auf die gesamte Versichertengemeinschaft, die sich im Idealfall so zusammensetzen muss, dass es jeden – wenn auch mit unterschiedlicher Wahrscheinlichkeit – treffen kann.

6 Umgang mit Großschäden

6.1 Kumulkontrolle

Naturkatastrophen sind potenziell existenzbedrohende Ereignisse für Unternehmen der Versicherungswirtschaft. Sie können – bei mangelhafter Risikokontrolle – zum Ruin einer Gesellschaft führen. Das Kumulrisiko, das heißt die Gefahr, dass ein sehr hoher Anteil der Policen gleichzeitig betroffen ist, muss begrenzt werden, sodass die Rückstellungen für Schadenzahlungen ausreichen und nicht die finanzielle Basis eines Unternehmens angegriffen wird. Dies geschieht einerseits durch einen geographischen Ausgleich innerhalb des Portefeuilles, andererseits durch eine Begrenzung der übernommenen Haftungssumme. Die dritte Komponente ist die – teilweise – Weitergabe des Risikos an andere Risikoträger (z. B. Rückversicherer).

Versicherungsunternehmen sind gehalten, die Übersicht über ihre gezeichneten Haftungen zu bewahren und ständige Kumulkontrollen vorzunehmen. Unter Kumulkontrolle versteht man die genaue Analyse der Haftungsverteilung unter Berücksichtigung von Haftungsanhäufungen, die im Falle von Naturkatastrophen zu großen Schadenbelastungen führen können. Jeder zusätzliche Versicherungsvertrag kann einerseits zwar den Risikoausgleich verbessern, aber andererseits unter Umständen die Gefahr eines hohen Kumulschadens steigern. Für den Erstversicherer ist die Kumulkontrolle notwendig, damit er seine Haftungen kennt und im Griff behält. Rückversicherer bilden auf der Grundlage von Kumulanalysen ihre Reserven. Das wichtigste Ziel der Kumulanalyse ist es, den sog. „Probable Maximum Loss“ (PML, wahrscheinlicher Höchstschaden) zu ermitteln. Dies erfolgt mithilfe von – meist stochastischen – Modellen zur Kumulschadenermittlung. Nachdem derartige Modelle für Sturm und Erdbeben seit Jahren vorlagen, hat die nationale Versicherungswirtschaft in Deutschland, Österreich und Italien jeweils zusammen mit einigen großen Rückversicherern und mit staatlichen Stellen Kumulmodelle auch für die Gefahr Überschwemmung entwickelt, die wesentlich detailgetreuer und komplizierter konzipiert sein müssen. Sie stehen ab 2008 in vollem Umfang zur Verfügung.

Das Hauptziel solcher Kumulmodelle ist das Erkennen und Modellieren möglichen Katastrophenszenarien, die Schäden von bisher nicht gekannten Ausmaßen verursachen. Hierzu ist es notwendig, dazugehörige (Überschwemmungs-)Ereignisse zu simulieren, die selbstverständlich auch aus wissenschaftlicher Sicht plausibel sein müssen. Eine mögliche Vorgehensweise ist dabei, historische Ereignisse zu analysieren und aus deren hydrologischen und statistischen Charakteristika Varianten zu generieren – und zwar auch solche, die deutlich intensiver und großflächiger ausfallen und damit zu höheren Schäden führen als die beobachteten.

In Deutschland wurde im Gefolge der Erstellung der ZÜRS-Überschwemmungszonen der deutschen Versicherungswirtschaft (FALKENHAGEN 2005) vom Institut für Angewandte Wasserwirtschaft und Geoinformatik in Ottobrunn im Rahmen des Projekts HQ-Kumul ein Ereignisset von synthetischen Überschwemmungsereignissen erstellt (WILLEMS 2005). Die

Grundlage hierfür bildeten Pegelaufzeichnungen (Tagesmittelwerte) über einen Zeitraum von gut 40 Jahren an 131 Pegeln in Deutschland. Aus den Pegeldaten wurden mittels multipler partieller Serienbildung die 100 größten Hochwasserereignisse für den Zeitraum 1960-2002 ausgewählt. Für diese 100 Ereignisse wurden die statistischen Zusammenhänge zwischen den einzelnen Pegeln analysiert. Ergebnis war eine multivariate Wahrscheinlichkeitsverteilung über alle Pegeldaten sowie eine Varianz-Kovarianz-Matrix, welche insbesondere das gleichzeitige Auftreten von extremen Hochwasserabflüssen beschreibt. Darauf basierend wurden mittels Monte-Carlo-Simulation 10 000 Hochwasserereignisse generiert, welche die Charakteristika der historischen Überschwemmungen abbilden und Varianten dieser Ereignisse beinhalten. Das Ereignisset enthält für jedes Ereignis die für die einzelnen Flussabschnitte regionalisierte Intensität des Hochwassers, ausgedrückt durch die Wiederkehrperiode des Abflusses. Damit ist es nun möglich, Schäden mit geringer Eintrittswahrscheinlichkeit beziehungsweise hoher Wiederkehrperiode (> 100 Jahre) zu simulieren.

Die Berechnung der Schäden und die Ermittlung der sogenannten PML-Kurve (probable maximum loss), die den Zusammenhang zwischen Schadenwahrscheinlichkeit und Schadenhöhe beschreibt, erfolgt im Wesentlichen in fünf Schritten:

1. Zunächst werden die Haftungsdaten des Versicherungsportefeuilles – entweder für jedes Objekt einzeln oder zum Beispiel auf fünfstellige Postleitzahlen aggregiert – in das Modell eingelesen.
2. Mit Hilfe der oben beschriebenen, aus HQ-Kumul erhaltenen lokalen Abflusswiederkehrperioden und von Gefährdungskarten (z. B. ZÜRS) wird die lokale Ausdehnung der Überschwemmungsfläche sowie Überschwemmungsintensität für jedes Objekt/jedes Postleitzahlengebiet ermittelt.
3. Nun kann der wahrscheinliche Schaden für jedes Einzelrisiko oder für die aggregierte Versicherungssumme jeder Postleitzahl berechnet werden. Dazu verwendet man Schadenfunktionen, die entweder ingenieurtechnisch erstellt wurden (Wasserstands-Schaden-Beziehungen) oder auf empirischen Daten vergangener Schadenereignisse basieren. Dabei wird in der Regel zwischen privaten, gewerblichen und industriellen Gebäuden und Inhalten unterschieden.
4. Für jedes einzelne Ereignis werden die Schäden aller Objekte/aus allen Postleitzonen zum Gesamtereignisschaden aufsummiert.
5. Die Gesamtereignisschäden werden nun der Größe nach sortiert und ergeben eine empirische Verteilungsfunktion. Diese Funktion, das Abtragen von Schadenhöhen gegen Überschreitungswahrscheinlichkeiten beziehungsweise Wiederkehrperioden, ist die PML-Kurve (Abbildung 2).

Aus der PML-Kurve lassen sich nun einerseits die Schadenhöhen für vorgegebene Wiederkehrperioden (z. B. 100 oder 1000 Jahre) ermitteln, andererseits lässt sich aber auch die Wiederkehrperiode eines historischen Schadenereignisses mit bekannter Schadenhöhe (z. B. Elbe 2002) ablesen. Die erstgenannte Möglichkeit wird in erster Linie bei der Preisfindung für Rückversicherungsdeckungen gebraucht, gewinnt aber auch im Zusammenhang mit Solvency II immer mehr an Bedeutung, wo verlangt wird, dass Versicherungsunterneh-

men ihre Exponierung und die zu erwartenden Schäden für bestimmte Wahrscheinlichkeitsniveaus feststellen.

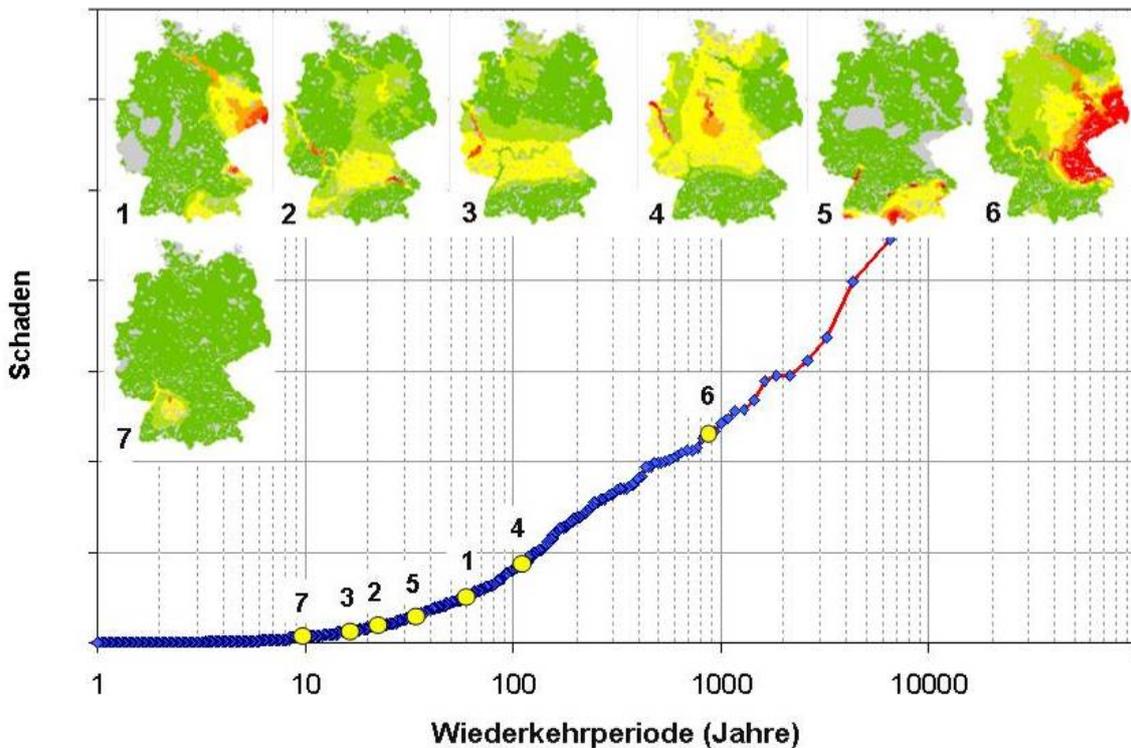


Abb. 2: Ermittlung einer PML-Kurve (probable maximum loss) auf der Basis einer Vielzahl stochastisch simulierter Schadenereignisse (beispielhaft sind sieben generierte Ereignisse dargestellt)

6.2 Katastrophenanleihen (Cat-Bonds)

Bei der herkömmlichen Art der Risikoaufteilung reicht ein (Erst-)Versicherungsunternehmen einen Teil des übernommenen Risikos an den Rückversicherungsmarkt weiter. Das Gefahrenpotenzial wetterbedingter Naturkatastrophen hat im Hinblick auf die Schadenhöhe inzwischen einen kritischen Punkt erreicht. Die Versicherungswirtschaft steht damit vor neuen Herausforderungen. Weltweit tätige und führende Rückversicherer wie die Münchener Rück sind großen Schadenpotenzialen besonders ausgesetzt und müssen ihre Risiken bestmöglich diversifizieren. Daher wurden Methoden des alternativen Risikotransfers entwickelt, bei denen die nahezu unerschöpfliche Kapazität der internationalen Kapitalmärkte, solche Risiken aufzunehmen, ausgenutzt wird.

In den letzten Jahren, insbesondere nach Hurrikan Katrina, hat diese neue Form der Risikoträgerschaft, die Verbriefung und der Transfer von Katastrophenrisiken über Versicherungsrisikoranleihen – bekannter unter den Namen „Katastrophenanleihen“ und „Cat-Bonds“ – auf den Kapitalmarkt rasant zugenommen. Im Jahre 2007 waren bereits 15 Milliarden US\$ an Katastrophenrisiken verbrieft, nach knapp 5 Milliarden US\$ in 2006 und etwa 2 Milliarden US\$ in 2005. Auch wenn 15 Milliarden US\$ absolut gesehen noch keinen bedeutenden An-

teil am für Naturkatastrophen zur Verfügung gestellten Gesamtrisikokapital darstellen: Experten gehen davon aus, dass mittelfristig bis zu 20 % der Kapazität für Katastrophenrisiken auf dem Kapitalmarkt platziert werden können.

Durch einen Cat-Bond wird ein spezifiziertes Risiko (z. B. der Schaden aus einem Orkan in Europa) von einem Risikoträger (sog. Sponsor) auf Investoren übertragen. Der Sponsor ist normalerweise ein Rückversicherer, kann aber auch ein großes Unternehmen sein (wie z. B. ein nationaler Bahnbetreiber). Der Investor kauft Anteile des Bonds. Wenn das Katastrophenereignis, für das der Bond herausgegeben wurde, während seiner Laufzeit nicht eintritt, geht das investierte Kapital zuzüglich Zinsen an den Investor zurück. Wenn es eintritt, verliert der Investor seine Einlage oder einen Teil davon und die Zinsen entfallen. Die Definition des Eintretens, das heißt der Auslöser der Schadenzahlung, kann auf verschiedene Weise vereinbart werden: a) durch den tatsächlichen finanziellen Verlust des Sponsors (Indemnity-Trigger), b) durch den gemeldeten – oder auch modellierten – versicherten Gesamtschaden (Marktschadenttrigger), oder c) wenn bestimmte physikalische Schwellenwerte (z. B. Windgeschwindigkeiten an bestimmten Punkten oder Abflüsse) oder ein aus mehreren solchen Parametern gebildeter Index überschritten werden (parametrischer Trigger).

Cat-Bonds sind hoch verzinst, aber auch mit hohem Risiko behaftete Anleihen und werden weit überwiegend durch professionelle Anleger erworben. Sie bevorzugen solche Anlagen, weil der Schadeneintritt weitgehend unkorreliert ist mit eventuellen Verlusten aus anderen Investitionen und daher zur Diversifizierung beiträgt. Bisher ist weltweit nur ein einziger Cat-Bond ausgelöst worden (durch Hurrikan Katrina), weil die Trigger in der Vergangenheit sehr hoch angesetzt waren. Mit zunehmender Erfahrung mit Cat-Bonds wird sich dies in den nächsten Jahren sicherlich ändern.

7 Fazit und Ausblick

Beim Schutz gegen extreme Naturereignisse, insbesondere auch im Rahmen einer Strategie zur Anpassung an den Klimawandel, spielen Versicherungen eine wichtige Rolle. Über sie wird nicht nur ein Teil des Risikos auf mehrere Schultern verteilt, sondern über sie kann auch der entscheidende Schritt gelingen, die Bürger und den sonstigen privaten Bereich zur Hochwasservorsorge zu animieren und zu motivieren beziehungsweise sogar in die Pflicht zu nehmen. Jedem Hausbesitzer oder Firmeninhaber ist klar, dass es ihm selbst obliegt, sich gegen Sturm zu schützen. Er kann damit seinen persönlichen Anteil am Risiko einigermaßen abschätzen und sich um eine geeignete Vorsorge in Form einer Mischung aus baulichen, organisatorischen (Unwetterwarnung) und finanziellen (Versicherung) Maßnahmen kümmern. Dagegen wird die Verantwortung für das Hochwasserrisiko gerne auf den Staat geschoben. Dass auch jeder einen Anteil am persönlichen Hochwasserrisiko selbst zu tragen hat, ist vielen nicht einmal bewusst.

Klar ist: Vorsorge zahlt sich aus. Jeder Euro, in eine Hochwasserschutzmaßnahme gesteckt, kann Schäden in vielfacher Höhe verhindern. Aus staatlicher Sicht stellen sich jedoch die Fragen: Welche Vorsorgemaßnahmen sind richtig? Welche sind am effizientesten? Welche

sind machbar? Und: Ist ein flächenhafter Hochwasserschutz überhaupt erreichbar und bezahlbar? Der Basisschutz: ja. Der Schutz gegen Extremereignisse: nein. Gegen diese hilft nur ein ausgeprägtes Risikobewusstsein in allen Teilen der Gesellschaft. Die wirkungsvollste SchADVorsorge ist, gewässernahe Bereiche von Bebauung frei zu halten. Gemeinden müssen darauf verzichten, neues Bauland im Gefahrenbereich zu erschließen. Das deutsche Hochwasserschutz-Gesetz von 2005 erschwert dieses Streben zwar, kann es aber nicht ganz verhindern. Es darf einfach nicht sein, dass der Einzelne oder die Gemeinde davon profitieren, im Risikogebiet zu bauen, die Schäden nach einer Katastrophe aber von der Allgemeinheit bezahlt werden.

Richtige staatliche Vorsorge beinhaltet aber auch, die Betroffenen mit ins Boot zu holen. Den ersten Schritt stellt hier eine adäquate bauliche Anpassung an die Risikosituation dar. Das bedeutet nicht, in Neubaugebieten angepasst bauen zu lassen und sich damit ein Schlupfloch zur Nutzung von der Überschwemmungsgefahr her nicht geeigneter Flächen zu öffnen. Vielmehr geht es hierbei um die Nachrüstung bestehender Gebäude und um die Sanierung und das Bauen innerhalb bereits bestehender Siedlungen. Zweitens muss bei der staatlichen Unterstützung nach Flutkatastrophen die Eigenvorsorge der Betroffenen berücksichtigt werden – und das muss allen klar sein oder gemacht werden. Natürlich muss der Staat in bestimmten Fällen helfen. Aber der Vorsorgegedanke wird untergraben, wenn diejenigen, welche Geld in Vorsorge gesteckt haben, hinterher gleich viel erhalten wie jene, welche sich bequem auf den Staat verlassen.

Und schließlich müssen sich die Betroffenen richtig verhalten. Ein Hausbesitzer muss sich überlegen, ob die Heizungsanlage und der Öltank im Keller sinnvoll sind, und ob er wirklich unbedingt einen Partykeller mit Teppichboden braucht. Er muss wissen, was er im Katastrophenfall tun muss und sich in „trockenen“ Zeiten schon entscheiden, ob er mit einem eventuellen Schaden – ohne staatliche Unterstützung – klar kommt, oder ob er nicht doch eine Versicherung abschließen sollte.

Gerade fernab von Gewässern wird das Überschwemmungsrisiko fast immer unterschätzt. Nur wenige kommen überhaupt auf den Gedanken, dass ein lokaler Starkniederschlag ihnen einen Überschwemmungsschaden von einigen tausend oder gar zehntausend € bescheren kann, obwohl der nächste Wasserlauf kilometerweit weg ist. Das beste Beispiel dafür lieferte die Überflutung in Baiersdorf/Mittelfranken im Juni 2007, und auch die Überschwemmungen in Großbritannien im gleichen Sommer gingen nur zu einem kleinen Teil von Gewässern aus. Und die Hausbesitzer wissen oft auch nicht, dass sich dieser Fall gegen eine geringe Jahresprämie von einigen Dutzend € versichern lässt. Diese Erkenntnis muss auch von anderer Seite als nur von der Versicherungswirtschaft, die ja schnell im Verdacht steht, Geschäfte machen zu wollen, flächendeckend verbreitet werden. Wenn sie sich durchsetzt und mit dem gestiegenen Risikobewusstsein auch die Verbreitung der Elementarschadenversicherung, würde sich möglicherweise die nach jedem größeren Hochwasserereignis – wie 2002 an Elbe und Donau oder 2007 in Mittelfranken – entflammende Diskussion über eine Pflichtversicherung gegen solche Schäden erübrigen. Bei einer breiten versicherten Basis können

auch solche, die wegen ihrer hohen Exponierung nicht oder kaum versicherbar sind, zum Teil durch die Versichertengemeinschaft mitgetragen werden, oder der Staat könnte seine finanzielle Hilfe auf diesen Betroffenenkreis fokussieren. Diese Situation wäre sicherlich für alle akzeptabler als die übliche, oft von (wahl-)politischen Erwägungen dominierte Diskussion über Entschädigungen und Wiederaufbauhilfen nach Naturkatastrophen.

Literatur

- FALKENHAGEN, B. (2005): ZÜRS – Das Zonierungssystem der deutschen Versicherungswirtschaft zur Einschätzung der Überschwemmungsgefährdung. In: H.-B. Kleeberg (Hrsg.) Hochwasser-Gefahrenkarten, Beiträge zum Workshop Gefahrenkarten am 21. November 2004 in Potsdam, Forum für Hydrologie und Wasserbewirtschaftung, Heft 08/05, Hennef, ATV-DVWK 2005, S. 85-91
- HENNEGRIFF, W. et al. (2006): Klimawandel und Hochwasser – Erkenntnisse und Anpassungsstrategien beim Hochwasserschutz. KA – Abwasser, Abfall 2006 (53) Nr.8, S. 770-779
- IKSR (1997): Hochwasserschutz am Rhein – Bestandsaufnahme. Internationale Kommission zum Schutze des Rheins, 62 S., Koblenz
- IPCC (2007): Climate Change 2007: Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (http://www.ipcc-data.org/ddc_ar4pubs.html)
- LAWA (1995): Leitlinien für einen zukunftsweisenden Hochwasserschutz, Länderarbeitsgemeinschaft Wasser, 24 S., Stuttgart
- MÜNCHENER RÜCK (1973): Hochwasser – Überschwemmung. Münchener Rückversicherungs-Gesellschaft, 22 S., München
- MÜNCHENER RÜCK (2007): Zwischen Hoch und Tief – Wetterrisiken in Mitteleuropa. Edition Wissen, Münchener Rückversicherungs-Gesellschaft, 56 S., München
- MÜNCHENER RÜCK (2008): Topics Geo Jahresrückblick Naturkatastrophen 2007, Münchener Rückversicherungs-Gesellschaft, 50 S., München
- MURL (2000): Potentielle Hochwasserschäden am Rhein in NRW. Ministerium für Umwelt, Raumordnung und Landwirtschaft des Landes Nordrhein-Westfalen, 32 S., Düsseldorf
- STADT KÖLN (1996): Hochwasserschutzkonzept Köln. Ermittlung der Hochwasserschadenspotenziale in den überflutungsgefährdeten Gebieten der Stadt Köln. Hochwasserschutzzentrale, Amt für Stadtentwässerung der Stadt Köln (unveröffentlicht)

WILLEMS, W. (2005): 10 000 Hochwasserereignisse - synthetisch generiert. Versicherungs-
Wirtschaft 60. Jahrgang, 1. Mai 2005, Heft 9, S. 683-684

Anschriften der Autoren

Bormann, Helge, Juniorprof. Dr., Carl von Ossietzky Universität Oldenburg, Institut für Biologie und Umweltwissenschaften, Uhlhornsweg 84, 26111 Oldenburg, Tel.: 0441 798 4459, Fax: 0441 798 3769, mail: helge.bormann@uni-oldenburg.de

Bornstert, Axel, Prof. Dr.-Ing., Universität Potsdam, Institut für Geoökologie, Karl-Liebnecht-Str. 24-25, 14476 Potsdam-Golm, Tel.: 0331 977 2548, Fax: 0331 977 2068, mail: axelbron@uni-potsdam.de und Potsdam Institut für Klimafolgenforschung, Telegrafenberg A62, 14478 Potsdam, Tel.: 0331 288 2531, Fax: 0331 288 2695, mail: bronstert@pik-potsdam.de

Ellenrieder, Tobias, GeoRisikoForschung, Münchener Rückversicherungs-Gesellschaft, Königinstraße 107, 80791 München, Tel.: 089 3891 4839, Fax: 089 3891 74839, mail: tellenrieder@munichre.com

Göttel, Holger, Max-Planck-Institut für Meteorologie, Bundesstrasse 53, 20146 Hamburg

Göttle, Albert, Prof. Dr.-Ing., Präsident, Bayerisches Landesamt für Umwelt, Bürgermeister-Ulrich-Straße 160, 86179 Augsburg, Tel.: 0821 90 71 0, Fax: 0821 90 71 55 56

Greis, Stefanie, Europäisches Institut für Energieforschung, Emmy-Noether-Straße 11, 76131 Karlsruhe, Tel.: 0721 6105 1413, Fax: 0721 6105 1332, mail: greis@eifer.uka.de

Grünewald, Uwe, Prof. Dr., Brandenburgische Technische Universität Cottbus, Lehrstuhl Hydrologie und Wasserwirtschaft, Postfach 101344, 03013 Cottbus, Tel.: 0355 694234, Fax: 0355 694235, mail: Uwe.Gruenewald@tu-cottbus.de

Haakh, Frieder, Dr.-Ing., Technischer Geschäftsführer, Zweckverband Landeswasserversorgung, Schützenstraße 4, 70182 Stuttgart, Tel.: 0711 2175 210, Fax: 0711 2175 202, mail: Haakh@lw-online.de

Hattermann, Fred Fokko, Dr., Potsdam Institut für Klimafolgenforschung, Telegrafenberg A62, 14478 Potsdam, Tel.: 0331 288 2649, Fax.: 0331 288 2695, mail: hattermann@pik-potsdam.de

Jacob, Daniela, Dr., Max-Planck-Institut für Meteorologie, Bundesstrasse 53, 20146 Hamburg, Tel.: 040 41173313, Fax: 040 41173357, mail: daniela.jacob@zmaw.de

Katzenberger, Bernd, Dipl.-Ing., Baudirektor, Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg (LUBW), Griesbachstr.1, 76185 Karlsruhe, Tel.: 0721 5600 1457, Fax: 0721 5600 1456, mail: Bernd.Katzenberger@lubw.bwl.de

Kotlarski, Sven, Max-Planck-Institut für Meteorologie, Bundesstrasse 53, 20146 Hamburg

Krahe, Peter, Bundesanstalt für Gewässerkunde (Referat Wasserhaushalt, Vorhersagen und Prognosen, Am Mainzer Tor 1, 56068 Koblenz, Tel.: 0261 1306 5234, Fax: 0261 1306 5280, mail: krahe@bafg.de

Kron, Dr.-Ing. Wolfgang, GeoRisikoForschung, Münchener Rückversicherungs-Gesellschaft, Königinstraße 107, 80791 München, Tel.: 089 3891 5260, Fax: 089 3891 75260, mail: wkron@munichre.com

Lorenz, Philip, Max-Planck-Institut für Meteorologie, Bundesstrasse 53, 20146 Hamburg

Maurer, Thomas, Dr. Ing., Bundesanstalt für Gewässerkunde (Referat Wasserhaushalt, Vorhersagen und Prognosen, Am Mainzer Tor 1, 56068 Koblenz, Tel.: 0261 1306 5224, Fax: 0261 1306 5280, mail: Thomas.Maurer@bafg.de

Menzel, Lucas, Dr., Wissenschaftliches Zentrum für Umweltsystemforschung, Universität Kassel, Kurt-Wolters-Straße 3, 34125 Kassel, Tel.: 0561 804 2284, Fax: 0561 804 3176, mail: menzel@usf.uni-kassel.de

Moser, Günter, Dipl.-Ing., Vorarlberger Illwerke AG, Batloggstraße 36, A-6780 Schruns, Tel.: 0043 5556 701 86290, Fax: 0043 5556 701 86237, mail: guenter.moser@illwerke.at

Moser, Hans, Dr. Ing., Bundesanstalt für Gewässerkunde (Abteilung Wassermenge, Am Mainzer Tor 1, 56068 Koblenz, Tel.: 0261 1306 5303, Fax: 0261 1306 5280, mail: moser@bafg.de

Müller, Ulrike, Europäisches Institut für Energieforschung, Emmy-Noether-Straße 11, 76131 Karlsruhe, Tel.: 0721 6105 1314, Fax: 0721 6105 1332, mail: mueller@eifer.uka.de

Nilson, Enno, Dr. rer. nat., Bundesanstalt für Gewässerkunde (Referat Wasserhaushalt, Vorhersagen und Prognosen; Projekt KLIWAS), Am Mainzer Tor 1, 56068 Koblenz, Tel.: 0261 1306 5325, Fax: 0261 1306 5280, mail: nilson@bafg.de

Reichholf, Josef H., Prof. Dr., Zoologische Staatssammlung & Technische Universität München München, Münchhausenstr. 21, D – 81247 München. mail: Reichholf.Ornithologie@zsm.mwn.de

Rothstein, Prof. Dr. rer. nat., Benno, Hochschule für Forstwirtschaft Rottenburg, Schadenweilerhof, D-72108 Rottenburg am Neckar, Tel.: 07472 951249, Fax: 07472 951 200, mail: rothstein@hs-rottenburg.de

Sailer, Wolfgang, Ministerialrat, Bayerisches Staatsministerium für Landwirtschaft und Forsten, Ludwigstraße 2, 80539 München, Tel.: 089 21822298, Fax: 089 218217485, mail: wolfgang.sailer@stmlf.bayern.de

Schädler, Bruno Dr., Bundesamt für Umwelt, Postfach, CH-3003 Bern, Te.: 0041 31 324 76 66, Fax: 0041 31 324 76 81, mail: bruno.schaedler@bafu.admin.ch

Schirmer, Dr. Michael, Universität Bremen, Borgfelder Landstraße 40, 28357 Bremen, Tel.&Fax: 0421 270702, mail: schi@uni-bremen.de

Scholten, Anja, Geographisches Institut, Physische Geographie, Universität Würzburg, Am Hubland, D-97074 Würzburg, Tel.: 0931 888 5435, Fax: 0931 888 5544, mail: anja.scholten@uni-wuerzburg.de

Schuchardt, Dr. Bastian, BioConsult Schuchardt & Scholle GbR, Reeder-Bischoff-Str. 54, 28757 Bremen, Tel.: 0421 6207108, Fax: 0421 6207109, mail: schuchardt@bioconsult.de

Schulz, Jeannette, Europäisches Institut für Energieforschung, Emmy-Noether-Straße 11, 76131 Karlsruhe, Tel.: 0721 6105 1370, Fax: 0721 6105 1332, mail: schulz@eifer.uka.de

Steininger, Prof. Dr. Karl.W., Wegener Zentrum für Klima und Globalen Wandel und Institut für Volkswirtschaftslehre, Universität Graz, Leechgasse 25, A-8010 Graz, Österreich

Schriftenreihe Forum für Hydrologie und Wasserbewirtschaftung

Bisher erschienene Hefte

- Heft 01.02 Wechselwirkungen zwischen Grundwasserleitern und Oberflächengewässern
Beiträge zum Tag der Hydrologie 2002 am 20./21. März 2002 in Suderburg
Herausgeber: Hartmut Wittenberg und Matthias Schöniger
210 Seiten, 63 Abbildungen, Format A4
ISBN: 3-936514-22-4 vergriffen
- Heft 02.02 Hochwassermanagement – Gefährdungspotenziale und Risiko der Flächennutzung
Beiträge zum Seminar am 7./8. November 2002 in Koblenz
Herausgeber: Hans-B. Kleeberg und Günter Meon
201 Seiten, 43 Abbildungen, Format A4
ISBN 3-936514-26-7 vergriffen
Aktualisierte Neuauflage erschienen als Heft 02.03
Beiträge zum Seminar am 12./13. Juni 2003 in Weimar
Herausgeber: Hans-B. Kleeberg und Günter Meon
200 Seiten, 65 Abbildungen, Format A4
ISBN 3-924063-58-3 vergriffen
- Heft 03.03 Numerische Simulationsmodelle für Fließgewässer
Beiträge zum Seminar am 12./13. Mai 2003 in Stein bei Nürnberg
Herausgeber: Siegfried Bloß und Hans-B. Kleeberg
185 Seiten, 32 Abbildungen, Format A4
ISBN 3-924063-57-5 vergriffen
Aktualisierte Neuauflage erscheinen als Heft 03.05
Beiträge zum Seminar am 15. März 2005 in Dortmund
Herausgeber: Siegfried Bloß und Hans-B. Kleeberg
185 Seiten, 65 Abbildungen, Format A4
ISBN 3-924063-57-5 35 EUR
- Heft 04.03 Klima – Wasser – Flussgebietsmanagement – im Lichte der Flut
Beiträge zum Tag der Hydrologie 2003 am 20./21. März 2003 in Freiburg i.Br.
Herausgeber: Hans-B. Kleeberg
Band1 Vorträge, 270 Seiten, 144 Abbildungen, Format A4
Band 2 Poster, 194 Seiten 105 Abbildungen, Format A4
ISBN 3-924063-59-1 35 EUR
- Heft 05.04 Wasser- und Stofftransport in heterogenen Einzugsgebieten
Beiträge zum Tag der Hydrologie 2004 am 22./23. März 2004 in Potsdam
Herausgeber: Axel Bronstert, Annegret Thieken, Bruno Merz,
Michael Rode, Lucas Menzel
Band1 Vorträge, 221 Seiten, 88 Abbildungen, Format A4
Band 2 Poster, 315 Seiten, 144 Abbildungen, Format A4
ISBN 3-937758-18-6 beide Bände zusammen 45 EUR
- Heft 06.04 Hochwassermanagement – Gefährdungspotenziale und Risiko der Flächennutzung
Neuauflage
Beiträge zum Seminar am 17./18. Juni 2004 in Münster
Herausgeber: Hans-B. Kleeberg und Günter Meon
172 Seiten, 61 Abbildungen, Format A4
ISBN 3-937758-19-4 35 EUR

- Heft 07.04 Niedrigwassermanagement
Beiträge zum Seminar am 11./12. November 2004 in Koblenz
Herausgeber: Hans-B. Kleeberg und Gero Koehler
172 Seiten, 82 Abbildungen, Format A4
ISBN 3-937758-47-X vergriffen
- Heft 08.05 Hochwasser-Gefahrenkarten
Teil 1: Erarbeitung und Nutzung von Hochwassergefahrenkarten
Beiträge zum Erfahrungsaustausch am 24. November 2004 in Erfurt
Teil 2: Zonierungssystem und Risikomodellierung in der Versicherungswirtschaft
Herausgeber: Hans-B. Kleeberg
140 Seiten, 34 Abbildungen, Format A4
ISBN 3-937758-48-8 vergriffen
- Heft 03.05 Numerische Simulationsmodelle für Fließgewässer
Beiträge zum Seminar am 15. März 2005 in Dortmund
Aktualisierte Neuauflage von Heft 03.03
Herausgeber: Siegfried Bloß und Hans-B. Kleeberg
185 Seiten, 65 Abbildungen, Format A4
ISBN 3-924063-57-5 35 EUR
- Heft 09.05 Niederschlag – Input für hydrologische Berechnungen
Beiträge zum Seminar am 12./13. April 2005 in Koblenz
Herausgeber: Hans-B. Kleeberg
159 Seiten, 44 Abbildungen, Format A4
ISBN 3-937758-67-4 vergriffen
- Heft 10.05 Entscheidungsunterstützung in der Wasserwirtschaft –
von der Theorie zum Anwendungsfall
Beiträge zum Tag der Hydrologie 2005 am 22./23. März 2005 in Aachen
Herausgeber: Heribert Nacken, Sabine Bartussek, Hani Sewilam
314 Seiten, 131 Abbildungen, 25 Tabellen, Format A4
ISBN 3-937758-68-2 42 EUR
- Heft 11.05 Hochwasser – Vorsorge und Schutzkonzepte
Beiträge zum Seminar am 2./3. Juni 2005 in Braunschweig
Herausgeber: Hans-B. Kleeberg und Günter Meon
200 Seiten, 75 Abbildungen, Format A4
ISBN 3-937758-80-1 vergriffen
- Heft 12.05 Akustische Doppler Geräte (ADCPs) in der Hydrometrie:
Möglichkeiten und Perspektiven einer innovativen Technik
Beiträge zum Seminar am 28./29. September 2005 in Koblenz
Herausgeber: Matthias Adler und Hans-B. Kleeberg
172 Seiten, 120 Abbildungen, 8 Tabellen, Format A4
ISBN 3-937758-90-9 38 EUR
- Heft 13.05 Abflussbildung – Prozessbeschreibung und Fallbeispiele
Herausgeber: Axel Bronstert
Monographie
148 Seiten, 81 Abbildungen, 12 Tabellen, Format A4
ISBN 3-937758-91-7 38 EUR

- Heft 14.06 Niederschlag – Input für hydrologische Berechnungen
Aktualisierte Neuauflage
Beiträge zum Seminar am 12./13. April 2005 in Koblenz
Herausgeber: Hans-B. Kleeberg
205 Seiten, Format A4
ISBN-10: 3-939057-30-4
ISBN-13: 978-3-939057-30-7 38 EUR
- Heft 15.06 Risikomanagement extremer hydrologischer Ereignisse
Beiträge zum Tag der Hydrologie 2006 am 22./23. März 2006
an der Universität der Bundeswehr München
Herausgeber: Markus Disse, Karin Guckenberger, Sabine Pakosch,
Alpaslan Yörük, Astrid Zimmermann
Band 1 Vorträge 1, 278 Seiten
Band 2 Vorträge 2, 338 Seiten beide Vortragsbände zusammen 50 EUR
Band 3 Poster, 280 Seiten Posterband zusätzlich/alleine 15 EUR
ISBN-10: 3 939057-31-2
ISBN-13: 978-3-939057-31-4
- Heft 16.06 Niederschlag-Abfluss-Modellierung
Beiträge zum Workshop am 10./11. April 2006 in Trier
Herausgeber: Markus Casper und Marcus Herbst
195 Seiten, Format A4
ISBN-10: 3-939057-55-X
ISBN-13: 978-3-939057-55-0 vergriffen
- Heft 17.06 Dezentraler Hochwasserschutz
Beiträge zum Seminar am 16./17. Oktober 2006 in Koblenz
Herausgeber: Klaus Röttcher, Gero Koehler, Hans-B. Kleeberg
188 Seiten, Format A4
ISBN-10: 3-939057-56-8
ISBN-13: 978-3-939057-56-7 vergriffen
- Heft 18.06 Hochwasser – Vorsorge und Schutzkonzept
Beiträge zum Seminar am 6./7. November 2006 in Stein bei Nürnberg
Herausgeber: Hans-B. Kleeberg, Heribert Nacken
232 Seiten, Format A4
ISBN-10: 3-939057-57-6
ISBN-13: 978-3-939057-57-4 vergriffen
- Heft 19.07 Dezentraler Hochwasserschutz
Beiträge zum Seminar am 4./5. Juni 2007 in Leipzig
Herausgeber: Klaus Röttcher, Gero Koehler, Hans-B. Kleeberg
196 Seiten, Format A4
ISBN-13: 978-3-940173-03-4 48 EUR

- Heft 20.07 Einfluss von Bewirtschaftung und Klima auf Wasser- und Stoffhaushalt von Gewässern
Beiträge zum Tag der Hydrologie 2007 am 22./23. März 2007
an der Universität Rostock
Herausgeber: Konrad Miegel, Ellen-Rose Trübger, Hans-B. Kleeberg
Band 1 Vorträge, 276 Seiten
Band 2 Poster, 17 Seiten beide Bände zusammen 60 EUR
ISBN: 978-3-940173-04-1
- Heft 21.07 Verdunstung
Beiträge zum Seminar am 10./11. Oktober 2007 in Potsdam
Herausgeber: Konrad Miegel, Hans-B. Kleeberg
252 Seiten, Format A4
ISBN: 978-3-940173-05-8 48 EUR
- Heft 22.07 EU-Hochwasserrichtlinie
Wohin geht die Reise beim Europäischen Hochwasserschutz
Beiträge zum Seminar am 19./20. November 2007 in Koblenz
Herausgeber: Heribert Nacken
126 Seiten, Format A4
ISBN: 978-3-940173-44-7 48 EUR
- Heft 23.08 Hochwasser, Wassermangel, Gewässerverschmutzung
– Problemlösung mit modernen hydrologischen Methoden
Beiträge zum Tag der Hydrologie 2008 am 27./28. März 2008
an der Leibniz Universität Hannover in Vorbereitung
ISBN: 978-3-940173-96-6
- Heft 24.06 Klimawandel – Was kann die Wasserwirtschaft tun?
Beiträge zum Symposium am 24./25 Juni 2008 in Nürnberg
Herausgeber: Hans-B. Kleeberg
256 Seiten, Format A4
ISBN: 978-3-940173-97-3 48 EUR

Ab Heft 10 sind alle Hefte (auch bereits vergriffene) ebenfalls auf CD erhältlich.

Mitglieder der Fachgemeinschaft Hydrologische Wissenschaften erhalten auf den Preis einen Nachlass von 30 %