



KLIWA
Klimaveränderung
und Wasserwirtschaft

**Kurzfassungen
der Vorträge**

6. Symposium

Risiko Klima – Herausforderungen managen

22. und 23. Mai 2017
im Kongresshaus in Baden-Baden



Baden-Württemberg

MINISTERIUM FÜR UMWELT, KLIMA UND ENERGIEWIRTSCHAFT

Landesanstalt für Umwelt,
Messungen und Naturschutz
Baden-Württemberg



Rheinland-Pfalz

MINISTERIUM FÜR UMWELT,
ENERGIE, ERNÄHRUNG
UND FORSTEN



Rheinland-Pfalz

LANDESAMT FÜR UMWELT

Bayerisches Staatsministerium für
Umwelt und Verbraucherschutz



Bayerisches Landesamt für
Umwelt



Deutscher Wetterdienst
Wetter und Klima aus einer Hand





Risiko Klima – Herausforderungen managen

6. KLIWA-Symposium am 22./23. Mai 2017 im Kongresshaus in Baden-Baden

(Moderation: Sven Plöger)

Montag, 22.05.2017

ab 8:00 Uhr **Anmeldung/Registrierung**

9:30 Uhr **Begrüßung**

Margareta Barth, Präsidentin der LUBW

Grußwort

Margret Mergen, Oberbürgermeisterin der Stadt Baden-Baden

Klimawandel – politische und gesellschaftliche Herausforderungen

10:00 Uhr **Klimawandel im Süden Deutschlands – Wo stehen wir?**

▪ **Klimawandel in Baden-Württemberg**

Franz Untersteller MdL, Minister für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft, Baden-Württemberg

▪ **Die Anpassungsstrategie in Bayern**

Ulrike Scharf MdL, Staatsministerin für Umwelt und Verbraucherschutz Bayern

▪ **Klimaschutz in Rheinland-Pfalz**

Dr. Thomas Griese, Staatssekretär im Ministerium für Umwelt, Energie, Ernährung und Forsten Rheinland-Pfalz

▪ **Unsicher sein und trotzdem handeln**

Dr. Paul Becker, Vizepräsident des DWD und Leiter des Geschäftsbereichs Klima und Umwelt

11:15 Uhr **Eröffnungsvortrag: Klimawandel – Welt im Wandel?**

Prof. Dr. Harald Lesch, Ludwig-Maximilians-Universität München

anschließend: Pressekonferenz (während der Mittagspause)

12:00 Uhr **M i t t a g s p a u s e**



Auswirkungen des Klimawandels – derzeitige Schwerpunkte in KLIWA

- 13:45 Uhr **Klima-Monitoring in KLIWA – Langzeitverhalten der hydrologischen und hydrometeorologischen Kenngrößen in Süddeutschland**
Dr. Monika Rauthe, DWD
- 14:15 Uhr **Auswirkungen des Klimawandels auf die Fließgewässerökosysteme in Süddeutschland**
Dr. Jochen Fischer, LfU RP Mainz
- 14:35 Uhr **Niedrigwasser und Trockenheit in der Vergangenheit, Gegenwart und Zukunft in Süddeutschland**
Christian Iber, LfU Rheinland-Pfalz
- 14:55 Uhr **Tendenzen, Trends und Entwicklungen des Grundwasserhaushalts 1951-2015 in Süddeutschland**
Thomas Gudera, LUBW Baden-Württemberg
- 15:15 Uhr **Diskussion**
- 15:35 Uhr **P a u s e**
- 16:05 Uhr **Räumlich hochaufgelöste Klimaprojektionen mit den neuen RCP-Szenarien**
Dr. Gerd Schädler, Inst. für Meteorologie und Klimaforschung, KIT Karlsruhe
- 16:25 Uhr **Abflusssimulationen mit den neuen RCP-Szenarien**
Holger Komischke, LfU Bayern
- 16:45 Uhr **Die Entwicklung eines Starkregenrisikomanagements**
Wolfgang Hennegriff, LUBW Baden-Württemberg
- 17:05 Uhr **Regionalisierung und Simulation der Wassertemperatur – Ergebnisse und Bewertungen**
Dr. Ingo Haag-Wanka, Ingenieurgesellschaft HYDRON Karlsruhe
- 17:25 Uhr **Diskussion**
- 17:45 Uhr **Abschluss 1. Tag**
- 19.00 Uhr **Ausklang im Kurhaus Baden-Baden**



Dienstag, 23.05.2017

Gewässer im Klimawandel

- 8:30 Uhr **Zu einer höheraufgelösten Kartierung des Starkregenrisikos mit Hilfe des Wetterraders**
Dr. Tanja Winterrath, DWD
- 8:45 Uhr **Starkregenrisikomanagement – Untersuchungen in Pilotgebieten**
Prof. Markus Weiler, Professur für Hydrologie der Universität Freiburg
- 9:05 Uhr **Hochaufgelöste Niederschlagssimulationen für die Erosionsmodellierung**
Dr. Hans Schipper, Süddeutsches Klimabüro, KIT Karlsruhe
- 9:20 Uhr **Klimawandel messen – der neue KLIWA-Index Makrozoobenthos**
Martin Halle, Umweltbüro Essen
- 9:40 Uhr **Auswirkungen des Klimawandels auf die Seeökosysteme in Süddeutschland**
Dr. Jochen Schaumburg, LfU Bayern
- 10:00 Uhr **Diskussion**
- 10:20 Uhr **P a u s e**

Anpassungsstrategien an den Klimawandel

- 10:45 Uhr **Auswirkungen extremer Niedrigwasserereignisse auf die Wasserbewirtschaftung**
Maria Foltyn, LfU Bayern
- 11:00 Uhr **Niedrigwassermanagement – Synthese und Auswirkungen aus den Pilotgebieten und resultierende Handlungsempfehlungen**
Dr. Michael Stölzle, Professur für Hydrologie der Universität Freiburg
- 11:15 Uhr **Vulnerabilität von Grundwassersystemen Süddeutschlands – Ergebnisse von Stresstestuntersuchungen**
Dr. Jörg Neumann, LfU Bayern
- 11:35 Uhr **Anpassung an den Klimawandel – Wasserversorgung und die Entwicklung des Dargebots in gering ergebigen Grundwasserleitern**
Dr. Benjamin Kopp, LfU Bayern
- 11:55 Uhr **Diskussion**
- 12:15 Uhr **M i t t a g s p a u s e**



Klimawandel in anderen Regionen

- 13:30 Uhr **Klimawandel in den Niederlanden – Hydrologische Auswirkungen und Anpassungsstrategien**
Hendrik Buiteveld, Rijkswaterstaat – Water, Verkeer en Leefomgeving
- 13:50 Uhr **Klimawandel in der Schweiz – Hydrologische Auswirkungen und Anpassungsstrategie**
Dr. Petra Schmocker-Fackel, BAFU – Bundesamt für Umwelt, Bern
- 14:10 Uhr **Auswirkungen des Klimawandels auf die hydrologischen Verhältnisse in Hessen – Zusammenschauende Bewertung der vorliegenden Untersuchungsergebnisse**
Dr. Gerhard Brahmer, HLNUG Hessen
- 14:30 Uhr **Projekt KlimEx „Klimawandel und Extreme“ – Untersuchungen in Quebec**
Prof. Dr. Ralf Ludwig, Ludwig-Maximilians-Universität München
- 14:50 Uhr **Die Temperatur als verbreitungsregulierender Faktor für Neozoen am Beispiel der Körbchenmuschel *Corbicula fluminea***
Dr. Franz Schöll, BfG – Bundesanstalt für Gewässerkunde, Koblenz
- 15:10 Uhr **Diskussion**
- 15:20 Uhr **Resümee und Schlusswort**
Jürgen Reich, Ministerium für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft, Baden-Württemberg
- 15.30 Uhr **Ende der Veranstaltung**

Klima-Monitoring in KLIWA – Langzeitverhalten der hydrologischen und hydrometeorologischen Kenngrößen in Süddeutschland

Monika Rauthe (DWD), Thomas Deutschländer (DWD), Holger Komischke (LfU Bayern), Alana Steinbauer (LfU Bayern), Christian Iber (LfU RP), Vassilis Kolokotronis (LUBW)

Klimamonitoring ist eine Kernaufgabe des Deutschen Wetterdienstes. Es ist eine wichtige Grundlage für die Beratung zum Schutz vor klimabedingten Risiken. Auf internationaler Ebene wurde die Bedeutung des Klimamonitorings durch die Verabschiedung des Globalen Rahmenwerks für Klimaservices der Weltorganisation für Meteorologie bekräftigt (GFCS, Global Framework for Climate Services). Gerade für die Bewertung von Klimaprojektionen ist der Vergleich mit Messdaten unverzichtbar. Langjährige meteorologische & hydrologische Messdaten sind Voraussetzung für Untersuchungen zum Klimawandel und deren Auswirkungen auf die Wasserwirtschaft. Nur so lassen sich zurückliegende Veränderungen von einschlägigen Kenngrößen wie Temperatur, Niederschlag und Abflussgrößen sicher feststellen. Damit legen sie die Grundlage für die weiteren Modellierungen der zukünftigen Entwicklungen.

Das Monitoring zum Klimawandel in Süddeutschland ist ein wichtiger Projektbereich der KLIWA-Kooperation. Seit nunmehr fast 20 Jahren werden relevante meteorologische & hydrologische Kenngrößen in regelmäßigen Abständen in ihrer zeitlichen Entwicklung untersucht, um die bereits messbaren Auswirkungen des Klimawandels zu verfolgen. Im aktuellen Klimamonitoringbericht 2016 sind die Veränderungen des regionalen Klimas und des Wasserhaushalts in den KLIWA-Bundesländern Baden-Württemberg, Bayern und Rheinland-Pfalz bis zum Jahre 2015 dokumentiert und bewertet. Die Kernaussagen zur Klimaentwicklung in Süddeutschland lassen sich für die einzelnen, den Wasserhaushalt beeinflussenden Kenngrößen, wie folgt zusammenfassen:

Lufttemperatur:

Extrem hohe Temperaturen und Hitzeperioden prägten den Zeitraum 2011-2015. Die Jahre 2011, 2014 und 2015 zählen zu den zehn wärmsten in Deutschland und den KLIWA-Ländern seit Beginn der Messungen 1881. Die Lufttemperatur ist in Süddeutschland weiter gestiegen. Im Zeitraum 1931-2015 hat die Durchschnittstemperatur bereits um ca. +1,3°C zugenommen.

Niederschlag:

In den KLIWA-Ländern gab es zwischen 2011 und 2015 viele, meist lokal begrenzte Starkregenereignisse. Das Jahr 2015 war extrem trocken: im Bundesgebiet fielen etwa 10%, in den KLIWA-Ländern sogar 23% weniger Niederschlag als im Mittel 1961-1990. Der mittlere Niederschlag zeigt einen zunehmenden Langzeittrend im Winterhalbjahr (+2 bis +22%). Im Sommerhalbjahr zeigt sich dagegen keine eindeutige Entwicklung. Beim Starkniederschlag (eintägige Maximalniederschläge) sind die Trends räumlich uneinheitlich. Im Winterhalbjahr gibt es jedoch regional klare positive Trends (bis +33%); dies kann zu mehr Hochwasser führen.

Abflüsse:

Der mittlere Abfluss ist eine statistische Größe, er gibt den langjährigen durchschnittlichen Abfluss an. Im Winterhalbjahr überwiegen in Süddeutschland für den Zeitraum 1932-2015 die Pegel mit steigenden mittleren Abflüssen (ca. 75% der Pegel), während im Sommerhalbjahr an 70% der Pegel mehrheitlich abnehmende Abflüsse zu beobachten sind. Von den ermittelten Veränderungen sind allerdings nur 40% eindeutig.



Die Untersuchungen der Hochwasserabflüsse zeigen in den KLIWA-Ländern für den Zeitraum 1932-2015 bei ca. 70% der Pegel steigende mittlere Hochwasserabflüsse, jedoch zum größeren Teil mit nicht statistisch signifikanten Zunahmen. In der jüngsten Vergangenheit war das Hochwasser im Mai/Juni 2013 besonders markant: Großräumiger Starkniederschlag verursachte extreme Überschwemmungen, die Wasserstände erreichten vielerorts neue Rekordhöhen.

Die jährlichen Niedrigwasserabflüsse zeigen insgesamt an ca. 60% der Pegel leicht zunehmende Trends für den Zeitraum 1951 bis 2015, die mehrheitlich nicht signifikant sind. Weitere Informationen hierzu stellt Herr Iber in seinem Vortrag „Niedrigwasser und Trockenheit in der Vergangenheit, Gegenwart und Zukunft in Süddeutschland“ vor.

Das Monitoring wird auch weiterhin ein wichtiger Bestandteil der Kooperation KLIWA bleiben. Des Weiteren gibt es noch verschiedene weitere Projekte, in denen Monitoringergebnisse wichtige Grundlagen für die weiteren Untersuchungen bilden. Ein Beispiel dafür ist das Expertennetzwerk des BMVI, in dem u.a. Anpassungsmaßnahmen für Verkehr und Infrastruktur an Klimawandel und extreme Wetterereignisse entwickelt werden sollen.

Auswirkungen des Klimawandels auf die Fließgewässerökosysteme in Süddeutschland

Jochen Fischer
Landesamt für Umwelt Rheinland-Pfalz

Das Wissen über die regionalen Auswirkungen des Klimawandels auf die ökologische Qualität der Fließgewässer ist gering. Während in den hydrologischen Disziplinen Langzeitmessreihen physikalischer Parameter differenzierte Projektionen erlauben, sind die komplexen ökologischen Wirkungsmechanismen auf der Ebene ganzer Lebensgemeinschaften erst ansatzweise untersucht und verstanden. Ein vorsorgendes wasserwirtschaftliches Handeln verlangt aber ein stringentes Prozessverständnis. Schließlich sind nach den allgemeinen Grundsätzen des Wasserhaushaltsgesetzes Gewässer u. a. mit dem Ziel zu bewirtschaften, möglichen Folgen des Klimawandels vorzubeugen.

Was heißt das konkret? Hierzu sind neben den Fragen nach den Wirkungsbeziehungen auch solche zur Vulnerabilität einzelner Gewässertypen zu beantworten. Welchen Einfluss hat der Klimawandel auf den ökologischen Zustand und die Referenzbedingungen? Wie lassen sich die Veränderungen messen und von anderen anthropogenen Trends abgrenzen; welche Indikatoren sind hierfür geeignet?

Zu diesen Fragen hat die KLIWA AG-Gewässerökologie in den vergangenen Jahren mehrere Studien in Auftrag gegeben und Konzepte entwickelt (s. hierzu auch Halle et. al. in diesem Bd.). Im Beitrag wird dargestellt, wie Änderungen im Temperaturhaushalt und im Abflussgeschehen grundlegende Lebensvorgänge im Gewässer beeinflussen und die Zusammensetzung der Biozönosen überformen. Die saisonale Varianz von Wassertemperatur und Abfluss einerseits und ihre Extreme andererseits (Dauer und Frequenz von Austrocknung oder bettgestaltenden Hochwässern) können als direkt vom Klimawandel beeinflusste Treiber im Wirkungsgeflecht identifiziert werden.

Schließlich werden generalisierte Thesen zur Betroffenheit von Organismen mit verschiedenen Lebensstrategien und für verschiedene Gewässerzonen abgeleitet.

Der Ausblick beleuchtet einige Grundgedanken für das qualifizierte gewässerökologische Klimafolgen-Monitoring im Rahmen bestehender Überwachungsprogramme der Länder.



Niedrigwasser und Trockenheit in der Vergangenheit, Gegenwart und Zukunft in Süddeutschland

Christian Iber (Landesamt für Umwelt Rheinland-Pfalz)
mit Maria Foltyn (Bay. LfU), Wolfgang Hennegriff (LUBW)

In den vergangenen Jahren sind in Süddeutschland gleich mehrere markante Niedrigwasserereignisse sowohl in den kleineren Einzugsgebieten als auch in großen Flüssen aufgetreten. Zuletzt sind die Ereignisse von 2015 und 2016 – durch verstärkte Präsenz in den Medien – noch bekannt, aber auch weiter in der Vergangenheit hat es eine Vielzahl an Trockenphasen gegeben. Eine statistische Auswertung der Entwicklung trockener Großwetterlagen erfolgte im KLIWA Heft 18 (2012) und zeigt, dass die Wahrscheinlichkeit des Auftretens trockener, heißer Sommer deutlich zugenommen hat. Im Langzeitverhalten 1951-2015 lassen sich Zunahmen der Niedrigwasserereignisse statistisch durch Trendanalysen langjähriger Messreihen nachweisen. Allerdings sind die ermittelten Änderungen an 30 untersuchten Pegeln in Süddeutschland mehrheitlich nicht signifikant. Die Auswertungen verschiedener Abflusskennwerten zeigen dabei insgesamt ähnliche Ergebnisse. Die Dauer von Niedrigwasserperioden ist dagegen bis heute abnehmend, wenngleich auch hier nur die Hälfte der ermittelten Trends signifikant ist. Die sensitiv reagierenden Niedrigwasserabflüsse können in stark wasserwirtschaftlich genutzten Gewässern beeinflusst werden. Diese Beeinflussungen können klimatisch bedingte Veränderungen überlagern und mögliche Aussagen erschweren.

Das Entstehen von Niedrigwassersituationen wird wesentlich durch ausgeprägte Trockenperioden gesteuert, die durch ausbleibende Niederschläge gekennzeichnet sind. So fiel im Jahr 2015 in den Ländern Baden-Württemberg, Bayern und Rheinland-Pfalz zwischen 20 und 25% weniger Niederschlag im Vergleich zur Referenzperiode, während deutschlandweit das Defizit etwa 10% betrug. Daher ist das Jahr 2015 vor allem für Süddeutschland als Extremjahr bedeutend.

Aktuell durchgeführte Studien und Analysen in den drei KLIWA-Ländern stellen auch weitere beobachtete besonders extreme Jahre, wie 1976 oder 2003, in den Kontext der Veränderungen. Neben Aussagen zu mittleren Änderungstendenzen ist, analog zum Hochwasser, auch eine Betrachtung der Niedrigwasserextreme sinnvoll, die folglich zur Ableitung von Handlungsempfehlungen dienen. Um auch für den Zeitraum der nahen Zukunft bis 2050 Aussagen zu erhalten, wurden die Ergebnisse von in KLIWA durchgeführten flächendeckenden Wasserhaushaltsmodellierungen ausgewertet. Verwendet wurden u.a. Projektionen aus der WETTREG-Familie und dem COSMO-CLM4.8-Ensemble. In der Anwendung von Modellen treten jedoch auch Unsicherheiten auf, beispielsweise bei den einflussreichen Parametern Globalstrahlung und Verdunstung.

Zeigten frühere Modellierungen oft deutliche Verschärfungen im Niedrigwasserbereich, so fallen diese Trends in neueren Projektionen in den KLIWA-Ländern uneinheitlich aus. In Baden-Württemberg wird die Verschärfung der Niedrigwasserentwicklung im Spätsommer und Herbst auch in neuen Projektionen bestätigt. Die Veränderungen im Winterhalbjahr bleiben insgesamt stärker ausgeprägt als im Sommerhalbjahr. Die Änderungen von Niedrigwasserkennwerten sind in Rheinland-Pfalz und Nordbayern grundsätzlich weniger eindeutig zu- oder abnehmend, haben sich also im Gegensatz zu früheren Aussagen abgeschwächt. Die aktuellen Ergebnisse deuten somit darauf hin, dass sich die ermittelten Änderungen der Vergangenheit in der Zukunft bis 2050 in Rheinland-Pfalz und Nordbayern nicht deutlich weiter verschärfen werden. Weitere Projektionen werden aber erforderlich sein, um die bestehenden Modellunsicherheiten zu klären. Unter der Annahme einer worst-case-Betrachtung früherer Projektionen sind generelle und deutliche Abnahmen im Niedrigwasser jedoch weiterhin möglich. Ausgeprägte extreme Trockenjahre werden auch weiterhin auftreten und markante Niedrigwasserereignisse auslösen.

Tendenzen, Trends und Entwicklungen des Grundwasserhaushalts 1951-2015 in Süddeutschland

Thomas Gudera

Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg (LUBW)

1. Zusammenfassung

In Süddeutschland wird der überwiegende Teil des Trinkwassers aus dem Grundwasser gewonnen. Einer nachhaltigen Bewirtschaftung der Grundwasserressourcen ist daher von großer Bedeutung. Die Kenntnis über mögliche langfristige Entwicklungen der regionalen Grundwasserverhältnisse ist deswegen von grundlegendem Interesse.

Im Rahmen des Kooperationsvorhabens KLIWA wurden daher mit dem Bodenwasserhaushaltsmodell GWN-BW für Baden-Württemberg, Bayern, Rheinland-Pfalz und Hessen gemeinsame flächendeckende Simulationen in hoher räumlicher und zeitlicher Auflösung für den Zeitraum 1951-2015 durchgeführt (KLIWA 2017). Anhand der Ergebnisse können bereits zu beobachtende Auswirkungen des Klimawandels auf den Bodenwasserhaushalt, die Grundwasserneubildung und damit den Grundwasserhaushalt quantifiziert werden.

Die signifikante Erwärmung seit Ende der 1980er Jahre führte zu einem spürbaren Anstieg der potentiellen Verdunstungsraten und somit zu einer engeren klimatischen Wasserbilanz. Insbesondere in der vergleichsweise trockenen jüngeren Vergangenheit seit dem Jahr 2003 wiesen daher die Wasserhaushaltskomponenten Gesamtabfluss- bzw. Sickerwasser- und Grundwasserneubildung tendenziell abnehmende Raten auf. Gleichzeitig erhöhte sich der Trockenheitsindex, welcher die Anzahl an Tagen mit Füllung des Bodenwasserspeichers <30% der nutzbaren Feldkapazität angibt, als Hinweis auf eine Zunahme von Trockenperioden.

Die vorliegenden Ergebnisse deuten in einem überregionalen Kontext auf bereits stattgefundene Änderungstendenzen innerhalb des Gesamtzeitraums 1951-2015 hin, welche vor allem in der jüngeren Vergangenheit deutlich werden. Sie erlauben eine großräumige Einschätzung der räumlichen und zeitlichen Veränderungen der Bodenwasserhaushaltskomponenten und somit der Grundwasserneubildung aus Niederschlag in Süddeutschland als tatsächliche Auswirkungen des Klimawandels.

Grundwasserstände und Quellschüttungen werden bereits seit mehreren Jahrzehnten, an einzelnen Messstellen sogar seit über 100 Jahren, beobachtet. Eine systematische Auswertung von Messzeitreihen aus den wichtigsten Grundwasserleitern hat gezeigt, dass an etwa 2/3 der untersuchten Messstellen sinkende Grundwasserstände bzw. abnehmende Quellschüttungen auftreten. Auch der Höchstwert im Jahresgang tritt, an der überwiegenden Anzahl der Messstellen, immer früher auf – ein Resultat wärmerer Winter und abnehmender Schneebedeckung.

Literatur

KLIWA (2017): Entwicklung von Bodenwasserhaushalt und Grundwasserneubildung in Baden-Württemberg, Bayern, Rheinland-Pfalz und Hessen (1951-2015). - KLIWA Berichte Heft 21.



Räumlich hochaufgelöste Klimaprojektionen mit den neuen RCP-Szenarien

Gerd Schädler, Hans-Jürgen Panitz, Natalie Laube
KIT – Institut für Meteorologie und Klimaforschung

Auswertungen des Instituts für Meteorologie und Klimaforschung, Department Troposphärenforschung (IMK-TRO) des KIT hochaufgelöster Simulationen mit dem regionalen Klimamodell COSMO-CLM in der räumlichen Auflösung von 0.025° (ca. 2.8 km) für das Einzugsgebiet des Neckar hatten 2015 gezeigt, dass die für den Antrieb hydrologischer Modelle benötigten Kenngrößen Temperatur, Niederschlag, relative Luftfeuchte und Globalstrahlung deutlich besser als in Simulationen mit gröberer Auflösung wiedergegeben werden.

Daher wurden für den gesamten „KLIWA-Untersuchungsraum“, also die relevanten Bereiche der Einzugsgebiete von Rhein, Donau und Mosel regionale Klimaprojektionen mit 2.8 km Auflösung unter Verwendung der neuen RCP-Szenarien erstellt. Es wurde ein Gebiet zwischen ca. 5° und 14° östlicher Länge und ca. 45° und 52° nördlicher Breite simuliert. Als Globalantrieb wurde MPI-ESM-LR (Atmosphärenmodell ECHAM 6), Realisierung 1, verwendet. Das zugrunde gelegte Emissionsszenario ist RCP 8.5. Es wurden drei Zeiträume simuliert: der Kontrollzeitraum 1971-2000, die nahe Zukunft 2021-2050 und die ferne Zukunft 2071-2100.

Die Validierung der Ergebnisse im Kontrollzeitraum erfolgte mit HYRAS-Daten, soweit vorhanden. Änderungssignale wurden für die nahe und die ferne Zukunft jeweils relativ zum Kontrollzeitraum berechnet. Ausgewertet wurden u.a. Mittelwerte von 2m-Temperatur, Niederschlag und Feuchte sowie – im Hinblick auf Extreme – Statistiken von temperatur- und niederschlagsbezogenen Schwellenwertüberschreitungen wie Trockenperioden und Starkniederschläge.

Im Vortrag werden zunächst einige grundsätzliche Aspekte der sehr hohen Auflösung besprochen und auf die neuen Emissionsszenarios kurz eingegangen. Anschließend wird eine kleine Auswahl von Ergebnissen, vor allem solche mit Relevanz für die hydrologische Modellierung, vorgestellt. Dabei stehen einerseits die Validierung und der Mehrwert, andererseits die Änderungssignale in der nahen und fernen Zukunft sowie ihre Einordnung im Mittelpunkt. Im abschließenden Ausblick wird auf die weiteren Perspektiven der sehr hoch auflösenden Modellierung, neuere Modellentwicklungen sowie die Erstellung von Ensembles in sehr hoher Auflösung eingegangen.

Abflusssimulationen mit den neuen RCP-Szenarien

Holger Komischke (LfU Bayern), Christian Iber (LfU RLP), Vassilis Kolokotronis (LUBW)

Um das zukünftige Verhalten des Wasserhaushalts und der Abflusssituation in Süddeutschland abzuschätzen, reicht es nicht, sich das Langzeitverhalten der Vergangenheit anzuschauen und die Entwicklungsrichtung linear in die Zukunft zu verlängern. Zu komplex ist das Zusammenwirken von Klimakenngrößen und weiteren Gegebenheiten wie Geologie, Boden oder Landnutzung, ganz abgesehen von einer unbekanntem zukünftigen sozio-ökonomischen Entwicklung. Hierfür werden in KLIWA Wasserhaushaltsmodelle, angetrieben von regionalen Klimaprojektionen, verwendet. Die Gesamtheit der daraus resultierenden Aussagen zu Abfluss und Wasserhaushalt bezeichnet man als Abflussprojektion.

Die bisher in KLIWA in der Wasserhaushaltsmodellierung verwendeten statistischen und dynamischen Verfahren der regionalen Klimamodellierung basieren auf den SRES-Emissionsszenarien B2 und A1B. Diesen Szenarien liegt je eine bestimmte zukünftige Entwicklung von Treibhausgasen zu Grunde. Daraus wurden für Süddeutschland gemeinsame Abflussprojektionen erstellt. Diese werden ergänzt durch weitere, länderspezifische Abflussprojektionen. Folgende zu erwartende Abflussveränderungen ergeben sich aus dieser Ensemblebetrachtung für den Zeitraum 2021-2050 für Süddeutschland:

Mittlere Abflüsse (MQ): Im hydrologischen Jahr (November bis Oktober) zeigt der Großteil der Projektionen eine Zunahme des MQ gegenüber der Referenzperiode (1971–2000). Insgesamt fallen diese Zunahmen größer aus als die Abnahmen und entstehen vorrangig durch erhöhte Abflüsse im hydrologischen Winterhalbjahr (November bis April). Im hydrologischen Sommerhalbjahr (Mai bis Oktober) nehmen die Abflüsse dagegen tendenziell ab.

Hochwasserabflüsse (MHQ): Im hydrologischen Winterhalbjahr nimmt der MHQ vorwiegend zu, regional treten vereinzelt aber auch nur geringe Veränderungen auf, insbesondere bei nival geprägten Pegeln, wie am Oberrhein. Im hydrologischen Sommerhalbjahr ist die zukünftige Entwicklungsrichtung weniger eindeutig. An den meisten Pegeln sind die Änderungssignale der Projektionen nur gering im Bereich von $\pm 10\%$ und zeigen dabei sowohl Zu- als auch Abnahmen. Etwa die Hälfte der Pegel tendiert allerdings zu leichten sommerlichen Rückgängen der Hochwasserabflüsse. Regional ist aber auch eine geringe Verschärfung im Sommer möglich, z.B. in Nordbayern oder im Neckareinzugsgebiet.

Niedrigwasserabflüsse (MNQ): In Regionen mit pluvial geprägtem Regime tritt das natürliche Abflussminimum häufig im Spätsommer/ Herbst ein. Sie sind daher von einer vermehrten sommerlichen Trockenheit besonders betroffen. Aus den Projektionen ergeben sich im Sommerhalbjahr regional unterschiedliche Entwicklungen der Niedrigwassersituation. Die Mehrzahl der Pegel tendiert zu geringen Abnahmen der sommerlichen Niedrigwasserabflüsse bis etwa 15%. Für Nordbayern und Rheinland-Pfalz wird allerdings bis Ende 2050 überwiegend eine Entspannung der Niedrigwassersituation im Sommerhalbjahr modelliert.

Seit 2014 sind neue Klimaprojektionen (RCP-Szenarien) verfügbar, die darauf beruhen den Strahlungsantrieb direkt vorzugeben anstatt die Treibhausgasemissionen wie bei den bisher benutzten SRES-Szenarien. Je höher der Wert des Szenarios, desto stärker wird das Klimasystem durch einen erhöhten Strahlungsantrieb zusätzlich erwärmt. Vor allem für das RCP4.5 und das RCP8.5 sind bereits regionale Klimaprojektionen verfügbar. Letztere sind Gegenstand aktueller Betrachtungen in KLIWA. Unter Nutzung von Bias-Korrektur und Downscaling werden erste Ergebnisse für Abflussprojektionen basierend auf dem RCP8.5 vorgestellt und mit den bisherigen Ergebnissen verglichen. Auch stellt sich die Frage, welche neuen Erkenntnisse diese neuen Abflussprojektionen liefern können und ob es möglich ist, bisherige Aussagen zu schärfen.



Die Entwicklung eines Starkregenrisikomanagements

Wolfgang Hennegriff

Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg (LUBW)

Konvektive Starkniederschläge mit hohen Niederschlägen und Niederschlagsintensitäten verursachen Schäden in der Größenordnung von 50% der Gesamtschäden, die durch Hochwasser in Baden-Württemberg im Mittel jährlich verursacht werden. Die Vorwarnzeiten und Reaktionszeiten für die Bürgerinnen und Bürger, kommunale Einrichtungen wie Feuerwehr sind extrem kurz und erschweren dadurch die Gefahrenabwehr. Häufig fehlt das Risikobewusstsein, wenn solche Überflutungen durch Starkregen abseits von Gewässern sich ereignen.

Grundsätzlich kann keine Region in Baden-Württemberg von diesen Naturgefahren ausgenommen werden. Die Gefährdungserkundung durch Starkregen und die Erstellung eines Konzeptes für ein Starkregenrisikomanagement ist eine Empfehlung im Rahmen der kommunalen Vorsorgeplanung. Die Erfahrungen zeigen, dass bauliche und nichtbauliche Maßnahmen der öffentlichen und privaten Träger nur auf einer Grundlage eines abgestimmten Gesamtkonzeptes die Risiken durch Starkregen wirkungsvoll und effizient reduziert oder vermieden werden können. Dagegen können sich unabgestimmte Einzelmaßnahmen gesamtschaulich oft gar als kontraproduktiv erweisen. Auf den Grundlagen von Starkregengefahrenkarten und der Risikoanalyse ist ein Handlungskonzept für die Teilbereiche Informationsvorsorge, kommunale Flächenvorsorge, Krisenmanagement und Konzeption kommunaler baulicher Maßnahmen zu entwickeln.

Für die Analyse der Gefahren durch den Abfluss der Niederschlagsmengen an der Geländeoberfläche wurde eigens ein neues hydrologisches Verfahren entwickelt, da bislang die Abflussbildung bei Starkregen auf der Geländeoberfläche nur mit entsprechenden Unsicherheiten abgeschätzt werden kann. Dies ist einerseits bedingt durch die sehr hohe räumliche und zeitliche Variabilität von Starkregenereignissen und andererseits von den sehr unterschiedlichen Beschaffenheiten und Eigenschaften der Geländeoberflächen und Bodenstandorten. Diese hydrologischen Abflussgrößen wurden für die Landesfläche Baden-Württemberg mit Hilfe des neu entwickelten bodenhydrologischen Modells RoGeR für alle Bodenstandorte für die zu untersuchenden Abflussszenarien berechnet und bilden die hydrologischen Grundlagen für die Ermittlung von Starkregengefahrenkarten.

Die Starkregengefahrenkarten werden für seltene, außergewöhnliche und extreme Oberflächenabflussereignisse erstellt. In diesen Karten sind für die drei Abflussszenarien die maximalen Überflutungsausdehnungen, Überflutungstiefen und Fließgeschwindigkeiten dargestellt. Starkregengefahrenkarten und die Risikoanalyse sind die wesentlichen Informationen, die kommunalen Einrichtungen, Bürgerinnen und Bürger, Vertretern von Wirtschaft und Gewerbe, Land- und Forstwirtschaft zur Verfügung gestellt und als Basis für das zu entwickelnde Handlungskonzept kommuniziert werden sollten. Dieses kommunale Handlungskonzept für ein Starkregenrisikomanagement erstreckt sich neben der Informationsvorsorge auf die Handlungsfelder der kommunalen Flächenvorsorge, des Krisenmanagements, insbesondere der kommunalen Hochwasseralarm- und Einsatzplanung sowie des Konzeptes baulicher Vorkehrungen für die Gefahrenabwehr infolge Überflutungen durch Starkregen. Bauliche Maßnahmen umfassen ein Bündel von Vorkehrungen, um beispielsweise die Retention von Oberflächenwasser in der Fläche zu fördern, Außengebietswasser von den Siedlungsbereichen fernzuhalten, die gezielte schadensfreie oder schadensarme Ableitung von Oberflächenwasser im Siedlungsbereich oder konkrete Objektschutzmaßnahmen zum Schutz besonders kritischer Einrichtungen wie Pflegeheimen, Kindergärten oder notwendiger Infrastruktureinrichtungen.

Regionalisierung und Simulation der Wassertemperatur – Ergebnisse und Bewertungen –

Ingo Haag-Wanka (HYDRON)

Mit steigender Wassertemperatur nimmt die Stoffwechselrate in aquatischen Systemen zu. Außerdem verstärkt sich die Toxizität zahlreicher Mikroschadstoffe mit zunehmender Wassertemperatur, wohingegen die Löslichkeit von Sauerstoff abnimmt. Folglich haben zum Beispiel Fisch- und Makrozoobenthosarten zumeist definierte Temperaturpräferenzbereiche, die ihre räumliche Ausbreitung mit bestimmen. Die Wassertemperatur ist somit einer der wichtigsten Gewässergüteparameter, der maßgeblichen Einfluss auf die Zusammensetzung der aquatischen Biozönose hat.

In Baden-Württemberg und Bayern wurde für die letzten Jahrzehnte ein deutlicher Anstieg der Jahresmitteltemperaturen der Fließgewässer beobachtet, der zumindest teilweise durch den Klimawandel bedingt ist. Aufgrund des voranschreitenden Klimawandels ist auch zukünftig mit einer weiteren Zunahme der Wassertemperaturen und entsprechenden ökologischen Auswirkungen zu rechnen. Um das Ausmaß dieser klimatisch bedingten Veränderung abschätzen zu können, wurden im Rahmen des KLIWA-Projekts für Baden-Württemberg und Bayern Modelle zur Simulation, Regionalisierung und Projektion von Wassertemperaturen erstellt und angewandt.

In Bayern wird ein statistischer Ansatz verwendet, bei dem die Abschätzung der Wassertemperatur auf dem Zusammenhang mit der Lufttemperatur als Prädiktor basiert. In Baden-Württemberg wurden die landesweit vorliegenden LARSIM-Wasserhaushaltsmodelle zu Wassertemperaturmodellen erweitert, die eine physikalisch basierte Simulation der Fließgewässertemperaturen ermöglichen. Da die physikalisch basierten Modelle Abfluss und Wassertemperatur parallel simulieren, erlauben sie auch Aussagen zur kombinierten Wirkung von zeitgleich auftretendem Niedrigwasser und erhöhten Wassertemperaturen.

Mit beiden Modellen werden der Ist-Zustand (1971-2000) der Fließgewässertemperatur und die raum-zeitliche Dynamik gut nachgebildet. Für Bayern wurden auf Grundlage des Änderungssignals für die Lufttemperatur drei unterschiedliche Klimaprojektionen ausgewählt, um die Bandbreite der zu erwartenden Änderung der Wassertemperatur abzuschätzen. Auf dieser Basis ist im räumlichen Mittel über Bayern für die nahe Zukunft (2021-2050) im Vergleich zum Ist-Zustand mit einer klimatisch bedingten Zunahme der Wassertemperatur um ca. 0,5°C bis 1,3°C zu rechnen. Dabei wird die mittlere Projektion mit einem Änderungssignal von ca. +0,6°C als wahrscheinlichstes Szenario eingestuft. Für Baden-Württemberg erhält man auf der Basis von zwei Klimaprojektionen ähnliche Ergebnisse. Die Auswertung weiterführender gewässerökologischer Kennwerte für Baden-Württemberg, die Abfluss und Wassertemperatur berücksichtigen, legt eine Häufung ökologisch kritischer Situationen und eine längszonale Verschiebung der aquatischen Lebensgemeinschaften zugunsten wärmeliebender Arten nahe.

Für die ferne Zukunft (2071-2100) liegt die Bandbreite der projizierten Zunahme der mittleren Wassertemperatur für die beiden Bundesländer zwischen ca. 1,5°C und 3°C. Am Beispiel des Neckar-Einzugsgebiets wird veranschaulicht, dass bei einer Zunahme um 3°C mit einer grundlegenden Verschärfung der gewässerökologischen Situation und einer deutlichen Reduktion des Lebensraums für kälteliebende Fisch- und Makrozoobenthosarten zu rechnen wäre.



Zu einer höher aufgelösten Starkregenkartierung mit Hilfe des Wetterraders

Tanja Winterrath, Christoph Brendel, Mario Hafer, Thomas Junghänel, Ewelina Walawender,
Elmar Weigl, Andreas Becker
Deutscher Wetterdienst, Abteilung Hydrometeorologie, Offenbach am Main

1. Einleitung

Im Rahmen des Projekts „Radarklimatologie“ der Strategischen Behördenallianz „Anpassung an den Klimawandel“, der neben dem DWD das BBK, das BBSR, das THW und das UBA angehören, wurden die Niederschlagsdaten des Boden- und Radarnetzwerkes des Deutschen Wetterdienstes zusammengeführt und für die klimatologische Nutzung aufbereitet und ausgewertet. Zum ersten Mal liegt somit eine flächendeckende, quantitative Niederschlagsanalyse in hoher räumlicher und zeitlicher Auflösung für Deutschland vor, die nahezu alle Starkniederschläge von 2001 bis 2016 beinhaltet und einen neuartigen Datensatz für die Kartierung von Starkregen darstellt.

2. Die Niederschlagsmessung

Der Deutsche Wetterdienst betreibt ein umfangreiches Bodenniederschlagsmessnetz. An gut 2000 Stationen deutschlandweit wird Niederschlag gesammelt und gemessen, wobei rund die Hälfte der Messsysteme automatisiert ist, deren Daten in Echtzeit verfügbar sind. Der Vorteil der Systeme besteht in der direkten Niederschlagsmessung, die allerdings nur punktwise erfolgt. An vielen Bodenstationen liegen langjährige Niederschlagszeitreihen vor, die statistisch ausgewertet werden, um die Häufigkeit von Starkregen zu bestimmen. Darüber hinaus wird die Atmosphäre kontinuierlich von 17 Radarsystemen abgetastet, die alle fünf Minuten ein flächendeckendes Bild der Niederschlagsverteilung für das Bundesgebiet liefern. Das Radarnetz erfasst somit alle Niederschlagsereignisse, auch solche, die sehr kleinräumig sind und durch das Bodenmessnetz nicht lückenlos erfasst werden können.

3. Was ist Starkregen?

Starkregen bezeichnet ein Niederschlagsereignis, das in seiner Charakteristik extrem ist und selten auftritt. Der Begriff „Starkregen“ umfasst dabei sowohl das kurzfristige, lokale Gewitter als auch den großräumigen Dauerregen. In diesem Beitrag liegt der Fokus insbesondere auf den kleinräumigen, konvektiven Niederschlagsereignissen, die unabhängig von größeren Gewässerläufen pluviale Sturzfluten auslösen können. In ihrer Größe, Andauer, Intensität und Zugrichtung können diese Niederschlagsereignisse speziell durch die flächendeckende Radarmessung umfassend detektiert werden.

4. Die Starkregenkartierung

Die radarbasierten Niederschlagsmessungen wurden für die Periode 2001 bis 2016 klimatologisch aufbereitet und mit Hilfe der Bodendaten unter Anwendung des RADOLAN-Verfahrens quantifiziert. Die Ergebnisse liegen auf einem Raster mit einer Gitterweite von 1 km x 1 km und einer zeitlichen Auflösung von bis zu fünf Minuten vor. Die Produktpalette umfasst neben den klassischen Niederschlagsstatistiken Ergebnisse extremwertstatistischer Auswertungen sowie abgeleitete Produkte wie z. B. den Erosivitätsfaktor zur Bestimmung des Bodenabtrags. Der Datensatz liefert damit erstmals statistische Häufigkeiten und räumliche Verteilungen kleinräumiger Extremereignisse sowie umfassende Informationen zum Niederschlagseintrag bei der Entstehung pluvialer Hochwasser und stellt eine neue Datengrundlage für Aufgaben der Raum- und Stadtplanung, des Katastrophen- und des vorbeugenden Hochwasserschutzes dar.



Starkregenrisikomanagement – Untersuchungen in Pilotgebieten

Markus Weiler
Professur für Hydrologie, Universität Freiburg



Hochaufgelöste Niederschlagssimulationen für die Erosionsmodellierung

Hans Schipper (KIT – Süddeutsches Klimabüro)

Verlässliche Aussagen über die Entwicklung der Bodenerosion im Klimawandel sind für die Planung von Anpassungsmaßnahmen in der Landwirtschaft wichtig. Da die Häufigkeit und Intensität von Starkniederschlägen das Bodenerosionsgeschehen entscheidend beeinflussen, wird infolge des Klimawandels in erosionsgefährdeten Gebieten eine Zunahme des Bodenerosionsrisikos und der damit verbundenen Gefährdung für Böden und andere Schutzgüter erwartet. Gerade in kleinen bis mittleren Einzugsgebieten wird die Höhe des Bodenabtrags vielfach von kurzen, lokal begrenzten, aber intensiven Niederschlägen (konvektive Niederschläge), die überwiegend im Sommer auftreten, bestimmt.

Im Rahmen des Projekts „Bodenabtrag durch Wassererosion in Folge von Klimaveränderungen“ wurde die Möglichkeit einer Kopplung von einem Klimamodell mit einem Erosionsmodell untersucht. Dafür wurden in einer vorgeschalteten „Konzept- und Machbarkeitsstudie“ verschiedene regionale Klimamodelle und Erosionsmodelle analysiert und hinsichtlich ihrer Kopplungsmöglichkeiten bewertet sowie Referenzeinzugsgebiete zur Plausibilisierung der Modellergebnisse ermittelt. Für die Niederschlagssimulationen wurde das regionale Klimamodell COSMO-CLM gewählt, für die Erosions- und Abflusssimulationen das Modell LISEM. In einer zweiten Projektphase wurden erste exemplarische Modellierungen für drei Referenzeinzugsgebiete sowie 15 Piloteinzugsgebiete in den Bundesländern Baden-Württemberg, Bayern und Rheinland-Pfalz durchgeführt. Für die Erosionsmodellierung wurde die horizontale Auflösung des Klimamodells schrittweise von 7 km auf 2,8 km und 1 km erhöht. Im Rahmen einer Sensitivitätsstudie wurden die hierfür optimale Modellkonfiguration und eine geeignete Gebietsgröße für das Nesting (Einbettung) der 2,8 km in die 7 km-Simulation bestimmt. Auf Grundlage von Langzeitsimulationen in einer räumlichen und zeitlichen Auflösung von 2,8 km und 1 h für eine Referenz- und eine Zukunftsperiode wurden ereignisbasierte Simulationen in einer räumlichen und zeitlichen Auflösung von 1 km und 15 min für ausgewählte Referenzeinzugsgebiete durchgeführt. In den Piloteinzugsgebieten wurden für die Erosionsmodellierung Niederschlagsereignisse aus den Klimasimulationen mit einer räumlichen und zeitlichen Auflösung von 7 km und 1 h ausgewählt. Die Abschaltung der Parametrisierung und damit die direkte Berechnung der hochreichenden Konvektion im Modell für die 2,8 km-Simulationen führte zu einer verbesserten Wiedergabe der Wahrscheinlichkeitsverteilung der stündlichen Niederschlagsintensitäten sowie des Tagesgangs der Niederschläge. Dies stellt eine Verbesserung für die Erosionsmodellierung dar und kann auch für die regionale Wasserhaushaltsmodellierung von Bedeutung sein. Im Rahmen von KLIWA werden daher die Niederschlagssimulationen in der räumlichen und zeitlichen Auflösung von 2,8 km und 1 h weiter ausgewertet. Neben einer extremwertstatistischen Auswertung (Antrieb ERA 40) für das Neckar-Einzugsgebiet, werden exemplarische Wasserhaushaltssimulationen durchgeführt (Antrieb ECHAM5/MPI-OM).

Die Kopplung der beiden Modelle COSMO-CLM und LISEM war insgesamt erfolgreich. Für die Schnittstellen der Modelle wurden Transferprogramme entwickelt, die einen (halb)auto-matischen Datenaustausch ermöglichen. Für Fallstudien im Sinne der in Projektphase II durchgeführten „worst-case“-Abschätzungen, d. h. Erosionsmodellierung auf Basis einzelner, ausgewählter Starkniederschläge mit möglichst hoher Intensität, ist die entwickelte Kette aus Klima- und Erosionsmodell anwendbar.

Klimawandel messen – der neue KLIWA-Index Makrozoobenthos

Martin Halle (umweltbüro essen)

Andreas Müller (chromgruen) & Andrea Sundermann (Senckenberg)

Der globale, vom Menschen verursachte Klimawandel lässt sich längst nicht mehr nur modellieren und für die Zukunft prognostizieren, sondern ist bereits in seinen vielfältigen Auswirkungen auf Umwelt- und Sozialsysteme messbar. Um die ökologischen Folgen veränderter Wassertemperaturen, Abfluss- und Fließverhältnisse von Fließgewässern unmittelbar für deren aquatische Wirbellosenfauna (Makrozoobenthos) nachweisen zu können, wurde innerhalb des KLIWA-Projekts „*Ableitung von Temperaturpräferenzen des Makrozoobenthos für die Entwicklung eines Verfahrens zur Indikation biozönotischer Wirkungen des Klimawandels in Fließgewässern*“ (KLIWA-Berichte Heft 20) der sog. KLIWA-Index_{MZB} entwickelt.

Grundlage des Indexes sind taxaspezifische Temperaturpräferenzspektren über elf Temperaturklassen, die auf Basis eines bundeweiten Datensatzes des operativen WRRL-Monitorings der Bundesländer abgeleitet wurden.

Die im Rahmen des Projektes durchgeführten statistischen Analysen belegen einen großen Einfluss der sommerlichen Wassertemperaturen (3-Monatsmittelwerte) auf das Makrozoobenthos aber auch eine starke Abhängigkeit dieser Beziehung von der Strömung. Temperatur und Strömung können sich in ihren biozönotischen Wirkungen bis zu einem gewissen Grad sowohl gegenseitig kompensieren als auch verstärken. In gewisser Hinsicht ist das mit der auf den Menschen bezogenen sog. „Gefühlten Temperatur“ bzw. der „Physiologisch äquivalenten Temperatur“ (PET), einem thermischen Index für Kältestress und Wärmebelastung, vergleichbar. Auch hier hat die Strömung des Umgebungsmediums - die Windgeschwindigkeit - einen maßgeblichen Einfluss auf die physiologische Wirkung der Temperatur. Während der PET-Index allerdings die Temperaturempfindung, bzw. körperliche Auskühlung oder Aufheizung beim Menschen kennzeichnet, bestimmen die sommerlichen Wassertemperaturen und Strömungsverhältnisse beim Makrozoobenthos vor allem die für das Vorkommen oder Fehlen einzelner Arten besonders maßgeblichen Atemhabitatbedingungen. Je höher die Temperatur steigt, desto stärker (und turbulenter) muss die Strömung sein, um die benötigte Sauerstoffverfügbarkeit und den erforderlichen Atemgasaustausch zu gewährleisten. Die jeder Art eigenen Toleranzgrenzen des Sauerstoffbedarfs einerseits und die morphologischen sowie verhaltensspezifischen Anpassungen an hydraulischen Stress andererseits, markieren die konkreten Spannweiten dieser Beziehung.

Der KLIWA-Index_{MZB} wurde daher nicht als reiner Temperatur-Index, sondern als „*bioindizierte Äquivalenttemperatur der sommerlichen Atemhabitat-Bedingungen des Makrozoobenthos [ausgedrückt in °C]*“ entwickelt und definiert.

Vorgestellt werden die wesentlichen Merkmale des KLIWA-Index_{MZB}, dessen Zusammenhang zur ökologischen Zustandsbewertung gemäß PERLODES sowie konkrete Anwendungsbeispiele u.a. auf Datensätze eines Langzeitbiomonitorings (Trendbiomonitoring in Fließgewässern Baden-Württembergs).



Auswirkungen des Klimawandels auf die Seeökosysteme in Süddeutschland

Jochen Schaumburg
Bayerisches Landesamt für Umwelt

Das Wissen über die regionalen Auswirkungen des Klimawandels auf die ökologische Qualität der Seen ist gering. Es existieren erst wenige Studien über klimabedingte Veränderungen der physikalischen Prozesse in Seen, woraus sich Auswirkungen auf die Seeökosysteme nur grob beschreiben lassen. Wie genau sich die stofflichen Prozesse in Seen ändern und wie die Biozönosen darauf reagieren werden, ist in vielerlei Hinsicht noch unklar.

Für ein auch weiterhin vorsorgendes wasserwirtschaftliches Handeln sind zusätzliche Erkenntnisse hinsichtlich des Klimawandels und seiner Auswirkungen auf Seeökosysteme erforderlich. Dazu hat die KLIWA AG-Gewässerökologie in den vergangenen Jahren eine Literaturstudie erarbeiten lassen, welche weitergehende Erkenntnisse und Wirkmechanismen offenlegt. Auf Basis dieser Studie und der darin ausgewerteten Literatur lassen sich nun weitere Planungsschritte unternehmen, um z.B. ein wasserwirtschaftliches Klimafolgenmonitoring in Seen zu konzipieren und Klima-Indikatoren für Seen zu entwickeln.

Im Beitrag wird dargestellt, welche Änderungen in den physikalischen Eigenschaften von Seen wie z.B. Temperaturhaushalt, Temperaturschichtung, Mixis und Trübung zu erwarten sind und wie stoffliche Eigenschaften und Biozönosen auf diese Veränderungen reagieren könnten.

Die Fragen, die sich aus den fachlichen Fakten für die ökologische Gewässerbewertung ergeben, sind dieselben, die im Vortrag von Jochen Fischer (s. Beitrag in diesem Heft) bereits formuliert wurden. Sie betreffen die Vulnerabilität einzelner Gewässertypen, den Einfluss des Klimawandels auf den ökologischen Zustand und die Referenzbedingungen, die Messbarkeit von Veränderungen, die Abgrenzbarkeit der Folgen des Klimawandels von anderen anthropogenen Trends und der Eignung zielführender Indikatoren.

Die ersten Überlegungen für das gewässerökologische Klimafolgen-Monitoring im Rahmen bestehender Überwachungsprogramme der Länder werden vorgestellt.

Auswirkungen extremer Niedrigwasserereignisse auf die Wasserbewirtschaftung

Maria Foltyn (Bayerisches Landesamt für Umwelt)
mit: Christian Iber (LfU RLP), Wolfgang Hennegriff (LUBW)

Niedrigwasser ist ein natürlicher Bestandteil unseres Wasserhaushalts und wird oft verursacht durch Trockenheit, also einen Niederschlagsmangel gepaart mit hoher Verdunstung. Wenn Trockenheit und Niedrigwasserphasen stärker, häufiger oder länger auftreten als unter den Bedingungen, an welche Gewässerökosysteme und die Wasserwirtschaft jeweils angepasst sind, werden sie ggf. beeinträchtigt. Die Entwicklung der jüngsten Vergangenheit, wie auch die in KLIWA vorliegenden Abflussprojektionen, lassen darauf schließen, dass sich die Niedrigwassersituation in Zukunft in einigen Regionen verschärfen wird.

Die wasserwirtschaftlichen Nutzungen und ökologischen Funktionen, die durch Niedrigwasser beeinträchtigt werden können, hängen in einem vielschichtigen Wirkgefüge zusammen. Nutzungskonflikte sind bei einer Niedrigwasserverschärfung zu erwarten. Neben der Änderung der Wasserquantität spielt dabei auch die Wasserqualität eine wichtige Rolle.

Um die Auswirkungen extremer Niedrigwasserereignisse in Süddeutschland genauer zu beleuchten, wurden im Rahmen von KLIWA Pilotstudien in den Ländern Baden-Württemberg, Bayern und Rheinland-Pfalz durchgeführt. Die Abbildung extremen Niedrigwassers in den jeweiligen Pilotgebieten geschah dabei über verschiedene Szenarienansätze sowohl mit Abflussprojektionen und Stresstests als auch über die Analyse vergangener Extremereignisse. Untersucht wurden sowohl die Auswirkungen von Trockenheit auf die Abflüsse in den jeweiligen Pilotgebieten als auch auf ausgewählte wasserwirtschaftliche Nutzungen. Je nach Pilotstudie wurden Folgen für die Gewässerqualität und -ökologie, die Fischerei und Teichwirtschaft, die Abwasserbeseitigung, die Wasserkraft, den Tourismus, die landwirtschaftliche Bewässerung, die Trink- und Brauchwasserversorgung oder die Speicherbewirtschaftung in unterschiedlicher Detailtiefe beleuchtet. Zur Bewertung der Auswirkungen dienten sowohl quantitativ ermittelte Kennwerte als auch die qualitative Einschätzung über Expertenbefragungen.

Die Ergebnisse zeigen, dass die betrachteten Einzugsgebiete bei Trockenheit unterschiedlich stark in der Ausprägung und Andauer von Niedrigwasserphasen reagieren. Ebenso sind die untersuchten Nutzungen nicht gleich schwer betroffen, wobei es hier auch Unterschiede zwischen den Pilotgebieten gibt. Eine Nutzung, die überall besonders beeinträchtigt wird, ließ sich nicht identifizieren. Vielmehr bestimmen zwei Aspekte die ermittelten Auswirkungen: Zum einen spielt eine Rolle, wie extrem die zur Abschätzung verwendeten Niedrigwasserszenarien bzw. historischen Extremereignisse ausfielen. Zum anderen bestimmen die regionale Empfindlichkeit und Nutzungsintensität eines wasserwirtschaftlichen Systems sowie etwaige Nutzungskonflikte, ob und wie stark sich Niedrigwasserphasen tatsächlich auswirken. Dabei bestätigt sich: Trockenheits- und Niedrigwasserereignisse führen insbesondere dort zu Problemen, wo die Ressource Wasser bereits jetzt intensiv genutzt wird.

Der Vortrag zeigt verschiedene Schlaglichter aus den einzelnen Fallstudien. Nähere Informationen gibt ein Synthesebericht, welcher die Ergebnisse aus den Pilotstudien aller drei Bundesländer zusammenfasst. Dieser befindet sich in Vorbereitung.



Niedrigwassermanagement – Synthese und Auswirkungen aus den Pilotgebieten und resultierende Handlungsempfehlungen

Dr. Michael Stölzle (Professur für Hydrologie, Universität Freiburg) mit Christian Iber
(LfU Rheinland-Pfalz), Maria Foltyn (LfU Bayern), Wolfgang Hennegriff (LUBW)

Klimamodelle und resultierende Abflussprojektionen zeigen auf, dass sich zukünftige sommerliche Niedrigwasserperioden in Süddeutschland verstärken können. Die möglichen Veränderungen beziehen sich dabei auf längere und intensivere Niedrigwasserperioden, aber auch auf potentielle Verschiebungen der bisherigen Niedrigwassersaison im Jahresverlauf. Diese Ergebnisse und die Untersuchungen aus verschiedenen Stresstestsimulationen zur Abbildung verschiedener Niedrigwasser-Lastfälle, welche in KLIWA entwickelt wurden, machen deutlich, dass zukünftig ein starkes, nachhaltiges und stetig angepasstes Niedrigwassermanagement nötig sein wird. Dabei sollten die Folgen des Klimawandels gemindert, gewässerökologische Zustände erhalten oder verbessert und bisherige Wassernutzungen weiterhin ermöglicht werden. Bisher wurde kein umfängliches Niedrigwassermanagement in den KLIWA-Bundesländern umgesetzt. Innerhalb KLIWA wurden seit 2015 verschiedene Niedrigwasser-Pilotstudien durchgeführt, welche es unter anderem zum Ziel hatten, Grundprinzipien, zukünftige Möglichkeiten und Hemmnisse eines Niedrigwassermanagements in verschiedenen Untersuchungsgebieten in Baden-Württemberg, Bayern und Rheinland-Pfalz zu untersuchen.

Ziel dieses Vortrags ist es daher, die verschiedenen Auswirkungen auf Niedrigwasserabflüsse auf Basis der verschiedenen KLIWA-Pilotstudien vorzustellen und für ein Gesamtbild in Süddeutschland in Kontext zu stellen. Neben den zu erwartenden Veränderungen der Niedrigwasserperioden zeigt sich, dass die Auswirkungen auf verschiedene Wassernutzungen stark unterschiedlich sind und räumlich deutlich variieren können. Entlang verschiedener Hauptwassernutzungen in den Pilotgebieten werden die Unterschiede in den Auswirkungen vorgestellt und bewertet. Darüberhinaus zeigen die Ergebnisse der Pilotstudien aktuelle und potentiell zukünftige Wassernutzungskonflikte auf, welche in einem umfänglichen Niedrigwassermanagement aufgegriffen oder zukünftig vorab identifiziert werden sollten. Mittels einer mehrstufigen Bewertung konnte eine Konkretisierung zukünftiger Maßnahmen für Niedrigwasserereignisse vorangetrieben werden. Beispielsweise werden verschiedene Ansätze zur Herleitung differenziert nach Akteursbeteiligung bewertet. Wissensbasierte Expertempfehlungen (*top-down-Ansatz*) stehen dabei zunächst als allgemeingültige Handlungsempfehlungen den lokalen, aus Erfahrung gewachsenen Stakeholder-Empfehlungen (*bottom-up-Ansatz*) gegenüber. Die Pilotstudien zeigen hier aber auch, dass die Zusammenführung unterschiedlicher Akteure (Experten und lokale Wassernutzer) starke Synergien hervorbringen, z.B. Lösungsstrategien für (potentielle) Wassernutzungskonflikte. Unterschiedliche Instrumente des Niedrigwassermanagements, wie etwa Stakeholder-Workshops, können einen Prozess des partizipativen Niedrigwassermanagements anstoßen. Es zeigt sich, dass für die Einordnung der Handlungsempfehlungen verschiedene Kriterien wie Allgemeingültigkeit, Hemmnisse und Durchsetzbarkeit auf verschiedenen Ebenen Relevanz haben.

Als Ergebnis der Synthese zeigt sich, dass Handlungsempfehlungen durch das Zusammenspiel der Expertise von Experten und die Erfahrung von lokalen Wasserakteuren konkretisiert werden können. Der Beitrag beleuchtet hierzu verschiedene Herangehensweisen aus den unterschiedlichen Pilotstudien. Als ein weiteres Ergebnis dieser Synthese wird eine Systematik zur Konkretisierung von Handlungsempfehlungen vorgestellt, welche Wassernutzungen, Ansätze zur Empfehlungsableitung, Konkretisierung durch Vor- und Nachteile der Empfehlung, Abschätzung der Allgemeingültigkeit sowie eine qualitative Bewertung des Aufwand zur Durchführung der Empfehlungen dargestellt. Der Beitrag zeigt auf, dass ein Niedrigwassermanagement zukünftig Maßnahmen zum operativen Umgang mit Niedrigwasserereignissen enthalten, vergangene Ereignisse aber auch analysieren und bewerten sollte, um Vorsorge- und Schutzmaßnahmen zu entwickeln, zu planen und umzusetzen.

Vulnerabilität von Grundwassersystemen Süddeutschlands – Ergebnisse von Stresstestuntersuchungen

Dr. Jörg Neumann
Bayerisches Landesamt für Umwelt

In Abhängigkeit von den hydrogeologischen Voraussetzungen, klimatischen Rahmenbedingungen und der jeweiligen Nutzungsbeanspruchung (z.B. durch die öffentliche Wasserversorgung) können Grundwassersysteme höchst unterschiedlich auf den Klimawandel reagieren. So zeigt allein die in der Vergangenheit beobachtete zeitliche Variabilität der Grundwasserneubildung in Süddeutschland bereits naturräumlich stark voneinander abweichende Größenordnungen. Je nach Speichervermögen des Untergrundes bzw. der Ergiebigkeit des Grundwasserleiters kann sich dies spürbar auf das nachhaltig nutzbare Dargebot vor Ort auswirken. Im Rahmen von Untersuchungen in verschiedenen Fallstudiengebieten wurde die Vulnerabilität bzw. die Anfälligkeit von Grundwassersystemen gegenüber nachteiligen Auswirkungen von Klimaänderungen näher betrachtet. Dabei kamen neben regionalen Klimaprojektionen für die Zukunft (vgl. Beitrag Kopp: Wasserversorgung und die Entwicklung des Dargebots in gering ergiebigen Grundwasserleitern) zusätzlich auch „Stresstestszenarien“ auf Basis gemessener Daten aus der Vergangenheit zum Einsatz.

In der jüngeren Vergangenheit waren vor allem die Jahre 2003 und zuletzt 2015 ausgeprägte Trockenjahre. In diesen Jahren kam es insbesondere in Bereichen mit gering ergiebigen Grundwasserleitern vereinzelt zu Versorgungsengpässen in der Bevölkerung. Immer wieder wurde in diesem Zusammenhang diskutiert, welche Folgen eine mehrjährige Abfolge bzw. „Wiederholung“ vergleichbarer Extremzustände für die Entwicklung des nutzbaren Dargebots und die darauf angewiesene öffentliche Wasserversorgung haben würde. Zur Beantwortung dieser Frage wurden für mehrere Fallstudiengebiete in Bayern sog. Stresstestszenarien konzipiert. Auf Basis von hydrologischen Halbjahren wurden dabei die für das Grundwasser maßgeblichen regionalen Extremzustände ausgewählt und mehrfach miteinander kombiniert. Berücksichtigt wurden auch das Jahr 2015 und der Extremwinter 2013/14 (Rekordminimum Grundwasserneubildung). In gleicher Weise wurde untersucht, wie schnell ein mehrjähriges Defizit durch nachgeschaltete „Normalzustände“ oder besonders niederschlagsreiche Zeitabschnitte kompensiert werden kann. Die Ergebnisse der Untersuchungen unterstreichen insgesamt die regional unterschiedliche Vulnerabilität verschiedener Grundwassersysteme. Sie bestätigen außerdem die Erfahrung der letzten Jahre, dass unter ungünstigen naturräumlichen Bedingungen mehrjährige Defizite bei der Grundwasserneubildung nicht durch zwischenzeitliche „Normaljahre“ ausgeglichen werden können.

Ergänzend zu Modellrechnungen mit regionalen Klimaprojektionen erlauben Stresstestuntersuchungen Abschätzungen zu möglichen Auswirkungen des Klimawandels auf regionaler Ebene. Für die betroffenen Nutzergruppen haben Sie häufig den Vorteil, dass Sie auf bereits erlebten Situationen aus der Vergangenheit beruhen und damit weniger abstrakt sind als „hypothetische“ Zukunftsszenarien. Sie erlauben es damit, eigene, nutzungsbezogene Erfahrungen aus der Vergangenheit in erforderliche Anpassungsmaßnahmen für die Zukunft einfließen zu lassen.



Wasserversorgung und die Entwicklung des Dargebots in gering ergiebigen Grundwasserleitern

Dr. Benjamin Kopp
Bayerisches Landesamt für Umwelt

Die öffentliche Wasserversorgung in den Ländern Baden-Württemberg, Bayern, Rheinland-Pfalz und Hessen wird insgesamt durch rund 4300 Wasserversorgungsunternehmen sichergestellt. Ihre Aufgabe ist es, der Bevölkerung Trinkwasser in ausreichender Menge und Qualität zur Verfügung zu stellen. Das gewonnene Trinkwasser stammt überwiegend aus natürlichen Grundwasservorkommen.

Im Hinblick auf die Auswirkungen des Klimawandels ist zu erwarten, dass insbesondere gering ergiebige Grundwasserleiter mit geringem Speichervermögen vulnerabel auf Änderungen des Klimageschehens reagieren. Davon sind besonders Mittelgebirgsregionen wie das Rheinische Schiefergebirge, der südliche Schwarzwald oder der gesamte ostbayerische Raum betroffen. Ähnliches gilt für Teile des süddeutschen Moränenlandes und der alpinen Festgesteinsbereiche. In allen genannten Regionen erfolgt die Wassergewinnung zu einem hohen Anteil über die Nutzung von Quellwasser. Bereits in den vergangenen Trockenjahren 2003 und 2015 kam es hier während der Sommer- und Herbstmonate, wenn gleichzeitig der Wasserbedarf der Bevölkerung am höchsten ist, vereinzelt zu Engpässen bei der Wasserversorgung.

Um Aussagen über die zukünftige Entwicklung in den oben genannten Problembereichen tätigen zu können, wurden bisher im Rahmen von KLIWA-Grundwasser sechs Fallstudien in Bayern durchgeführt. Für jede Fallstudie wurde ein räumlich hochaufgelöstes Wasserhaushaltsmodell (WHM) aufgestellt und Szenariosimulationen auf Basis regionaler Klimaprojektionen (WETTREG-2006 und WETTREG-2010, ECHAM5 A1B) gerechnet. Der Schwerpunkt bei der Auswertung der Ergebnisse lag dabei auf der Entwicklung der Quellschüttungen in der nahen Zukunft (2021-2050). Beispielsweise zeigt die Fallstudie „Oberpfälzer Wald“ im Bereich des Ostbayerischen Kristallin die deutlichsten Quellschüttungsabnahmen in den Monaten August bis November. Diese betragen im Gebietsmittel auf Basis der Projektion WETTREG-2006 (nahe Zukunft), im Vergleich zur Referenzperiode 1971-2000, -16%. Die zu erwartenden mittleren Rückgänge der übrigen Fallstudien variieren von -10% in den Bereichen der bayerischen Moränen und alpinen Festgesteine bis hin zu -21% im Nordostbayerischen Kristallin. Die Projektion WETTREG-2006 gilt dabei, auf Grund geringer ganzjähriger Temperaturzunahmen und leichter Abnahme der Sommerniederschläge als vergleichsweise moderate Klimaprojektion.

Die gewonnenen Erkenntnisse fließen in das LfU-Projekt „Erhebung und Bewertung der öffentlichen Wasserversorgung“ ein. So dienen die ermittelten zukünftigen Rückgänge der Quellschüttungen während Trockenperioden in den Sommer- und Herbstmonaten als Orientierungsgröße, anhand derer die Wasserversorger frühzeitig Anpassungsmaßnahmen zur Stärkung der Versorgungssicherheit (z.B. „zweites Standbein“) ergreifen sollen.

Klimawandel in den Niederlanden – hydrologische Auswirkungen und Anpassungsstrategien

Hendrik Buiteveld und Rita Lammersen
Rijkswaterstaat – Water, Verkeer en Leefomgeving, Niederlande

Zusammenfassung

Die Niederlande sind aufgrund der Tatsache, dass weite Teile des Landes unter dem Meeresspiegel liegen, anfällig für Überflutungen durch Meeres- und Flusswasser. Fast 60 % der Niederlande könnte überflutet werden. In diesem Gebiet befinden sich auch die größten Städte. Ein Teil dieses Gebiets ist das Wirtschaftszentrum der Niederlande. Ein guter Schutz vor Überflutungen ist deswegen sehr wichtig. Die Politik der Regierung zielt darauf ab, die Niederlande jetzt und in Zukunft vor Hochwasser zu schützen und eine ausreichende Wasserversorgung zu gewährleisten. Die dafür erforderlichen Pläne zur Anpassung an die Klimaänderung werden im Rahmen des Delta-Programms entwickelt.

Im Zuge des Delta-Programms wurde ein Vorschlag für die Einführung neuer Normen für den Entwurf von Hochwasserschutzanlagen unterbreitet, die Anfang 2017 in Kraft getreten sind. Die Herleitung der Normen beruht auf den Überflutungsrisiken, wobei das Überflutungsrisiko definiert ist aus dem Produkt der Wahrscheinlichkeit, dass eine Überflutung stattfindet, und den möglichen Folgen einer derartigen Überflutung. Dabei wird der Klimawandel berücksichtigt. Neben dem Hochwasserschutz werden auch der Wasserhaushalt und die Wasserversorgung vom Klimawandel beeinflusst.

Klima-Szenarien in Verbindung mit sozioökonomischen Szenarien bilden die Grundlage für die Analysen im Delta-Programm und damit auch für die Maßnahmen. Diese Klima-Szenarien werden in den Niederlanden vom Koninklijk Nederlands Meteorologisch Instituut (KNMI) erstellt. In den KNMI-Szenarien werden für die Niederlande künftig höhere Temperaturen, ein steigender Meeresspiegel, niederschlagsreichere Winter, eine Zunahme von Starkregenereignissen und eine höhere Wahrscheinlichkeit des Auftretens trockenerer Sommer berücksichtigt.

Im Mai 2014 hat das KNMI vier neue Szenarien veröffentlicht. Dabei wurden die Untersuchungsergebnisse für das weltweite Klima aus dem IPCC-Bericht (2013) auf die niederländische Situation übertragen. Diese KNMI'14-Szenarien beschreiben die Eckpunkte, innerhalb derer sich der Klimawandel in den Niederlanden nach den neuesten Erkenntnissen wahrscheinlich vollziehen wird. Sie zeigen die Veränderung etwa im Jahr 2050 und 2085 gegenüber dem Klima in dem Zeitraum 1981-2010 auf. Die vier KNMI'14-Szenarien unterscheiden sich in Bezug auf das Ausmaß, in dem die weltweite Temperatur steigt („gemäßigt“ und „warm“) und die mögliche Veränderung des Luftströmungsmusters („geringe Veränderung“ und „große Veränderung“).

Neben den Veränderungen, die in den Niederlanden selbst stattfinden werden, werden auch die Abflüsse der grenzüberschreitenden Wasserläufe, die aus anderen Ländern in die Niederlande fließen, von den künftigen Veränderungen beeinflusst. Aus diesem Grund wurden die KNMI'14-Szenarien in Temperatur- und Niederschlagsreihen für die Einzugsgebiete des Rheins und der Maas umgewandelt. Mit Hilfe eines stochastischen Niederschlagsgenerators wurden diese Reihen in lange Temperatur- und Niederschlagszeitreihen umgewandelt und anschließend mit hydrologischer und hydraulischer Modellierung in lange Abflussreihen umgesetzt. Dadurch können Aussagen über Abflüsse bei hohen Wiederholungszeiten entsprechend dem hohen Schutzgrad in den Niederlanden gemacht werden, die für die Prüfung und den Entwurf der Hochwasserschutzanlagen nach der neuen niederländischen Norm genutzt werden können.

Auf der Grundlage der KNMI'14-Klima-Szenarien lässt sich feststellen, dass die Abflüsse der niederländischen Abschnitte von Rhein und Maas im Winter zunehmen und im Sommer abnehmen werden. Darüber hinaus wird eine Zunahme der extremen Hochwasser berechnet.

<https://english.deltacommissaris.nl/>

http://www.climatescenarios.nl/scenarios_summary/index.html

<http://www.climatechange2013.org/>



Klimawandel in der Schweiz – Hydrologische Auswirkungen und Anpassungsstrategie

Petra Schmocker-Fackel, Samuel Zahner, Roland Hohmann, Fabia Hüsler
Bundesamt für Umwelt Schweiz, BAFU

Die Schweiz ist von der globalen Erwärmung stark betroffen. In den letzten 50 Jahren hat das Jahresmittel der Lufttemperatur um 1.9°C zugenommen. Damit war die Erwärmung in dieser Periode ungefähr dreimal grösser als der globale Wert von 0.64°C. Bei den Niederschlägen ist kein eindeutiger Trend zu beobachten.

In Zukunft werden die Temperaturen weiterhin überdurchschnittlich stark ansteigen. Bei den Niederschlägen wird im Sommer eine Abnahme und im Winter insbesondere im Süden eine Zunahme erwartet. Zudem dürften Extremereignisse (Starkniederschläge und Trockenheit) häufiger auftreten. Hydrologisch wird sich der Klimawandel vor allem auf die jahreszeitliche Verteilung der Abflüsse und die Gewässertemperaturen auswirken. Bis 2100 wird 90% des heutigen Gletschervolumens geschmolzen sein. Die Schneegrenze wird ansteigen und die in der Schneedecke gespeicherte Wassermenge wird um 2/3 abnehmen. Dies führt zu einer saisonalen Verschiebung der Abflüsse vom Sommer und Herbst in den Winter und Frühling. Gleichzeitig steigt der Wasserbedarf für die Bewässerung und der öffentlichen Wasserversorgung während heißen, trockenen Sommermonaten an und die Wassertemperaturen können für die aquatischen Ökosysteme kritische Werte erreichen. Als Folge kam es bereits in den letzten Jahren vermehrt zu Konflikten zwischen den verschiedenen Wassernutzern und dem Gewässerschutz, zu Versorgungsengpässen und gewässerökologischen Problemen.

2012 verabschiedet die Schweizer Regierung die Strategie zur Anpassung an den Klimawandel. Ziel ist es, die Chancen des Klimawandels zu nutzen, die Risiken des Klimawandels zu minimieren und die Anpassungsfähigkeit der Systeme zu steigern. Im Sektor Wasserwirtschaft wurden vier Bereiche mit Handlungsbedarf identifiziert: (1) die Grundlagen zu Wasserkreislauf und Wassernutzung verbessern, (2) die Wasserverfügbarkeit sicherstellen und die Wasserspeicher optimal bewirtschaften, (3) die Wasserqualität und Gewässerökologie gewährleisten und (4) Nutzung und Bewirtschaftung grenznaher Gewässer sicherstellen. Im Folgenden soll auf die Umsetzung von zwei Massnahmen aus Bereich (1) genauer eingegangen werden.

Die Massnahme wg2 fordert, dass die wissenschaftlichen Grundlagen über die hydrologischen Auswirkungen des Klimawandels in der Schweiz verbessert werden müssen. Zu diesem Zweck wurde vom BAFU das Projekt „Hydrologische Grundlagen zum Klimawandel Hydro-CH2018“ ins Leben gerufen. Im Rahmen von Hydro-CH2018 wird das Prozessverständnis, wie der Wasserhaushalt auf Klimaveränderungen reagiert, verbessert. Zudem werden die Auswirkungen gemäß den neuen CH2018 Klimaszenarien für die Schweiz auf den Wasserhaushalt, die Gewässertemperatur sowie hydrologische Extremereignisse abgeschätzt. Im Gegensatz zu früheren ähnlich ausgerichteten Projekten (z.B. das BAFU Projekt CCHydro), sollen bei Hydro-CH2018 auch der menschliche Handlungsspielraum z.B. in der Landwirtschaft oder bei der Speicherbewirtschaftung betrachtet werden. Damit werden weitere Massnahmen der Anpassungsstrategie direkt umgesetzt oder unterstützt.

Im Rahmen der Massnahme w1 hat das BAFU zusammen mit den Kantonen, Fachverbänden und den betroffenen Bundesämtern Praxisgrundlagen für ein regionales Wasserressourcenmanagement erarbeitet und bereits in einigen Regionen ausgetestet. Diese Grundlagen sehen ein mehrstufiges Vorgehen vor. Die Kantone sollen Risikogebiete von Wasserknappheit identifizieren und in den betroffenen Regionen die Wasserressourcen vorausschauend bewirtschaften. Daneben sind, wo noch nicht vorhanden, die nötigen Vorbereitungen für eine erfolgreiche kurzfristige Bewältigung von Ausnahmesituationen zu treffen.

Auswirkungen des Klimawandels auf die hydrologischen Verhältnisse in Hessen – Bewertung der vorliegenden Untersuchungsergebnisse

Gerhard Brahmer und Mario Hergesell
Hessisches Landesamt für Naturschutz, Umwelt und Geologie, Wiesbaden

Klimaänderung in Hessen

Zukünftige Klimaentwicklungen für Hessen können auf Basis einer Vielzahl vorliegender Klimaprojektionen abgeschätzt werden (Multi-Modell Auswertung) [1]. Grundsätzlich ergibt sich dadurch eine mögliche Veränderungsspanne, deren Variabilität u.a. auch durch die geographische Lage Hessens (und Deutschlands) in einem Übergangsbereich zwischen einem zukünftig deutlich feuchteren Klima in Nordeuropa und einem trockeneren Klima in Südeuropa begründet ist. Untersuchungen zu hydrologischen Folgewirkungen mittels Wasserhaushalts- oder Grundwasserneubildungsmodellen erfolgten aufgrund des hohen Bearbeitungsaufwandes auf Basis von ausgewählten Regionalmodellen (WETTREG 2003, WETTREG 2006, WETTREG 2010, STAR2, Cosmo-CLM4.8), die durch globale Klimamodelle angetrieben werden. Für den Projektionszeitraum 2021-2050 zeigen diese Regionalmodelle im Vergleich zum Referenzzeitraum 1971-2000 in Hessen eine Temperaturzunahme um etwa 1 Grad, eine Zunahme des Niederschlags im Winterhalbjahr in einem Bereich von 5 bis 15% und eine Veränderung im Sommerhalbjahr von -5 bis +5%. Für die fernere Zukunft bis Ende des Jahrhunderts ist neben weiter steigenden Temperaturen insbesondere mit einem deutlichen Rückgang der sommerlichen Niederschläge zu rechnen.

Auswirkungen auf die Abflussverhältnisse

Mittels Wasserhaushaltsmodellierung wurden die Auswirkungen der zukünftigen möglichen Klimaänderung auf die Abflussverhältnisse hessischer Oberflächengewässer untersucht. Aus den vorliegenden Ergebnissen lässt sich trotz unterschiedlicher Ergebnisse einzelner Projektionen eine deutliche Veränderung im Abflussverhalten hessischer Gewässer ableiten. Insbesondere ist eine Umverteilung hin zu Mehrabflüssen im Winterhalbjahr und verminderten Abflüssen im Sommerhalbjahr zu erkennen. So nehmen die mittleren monatlichen Abflüsse im Winterhalbjahr deutlich zu (+10 bis +30%), im Sommerhalbjahr zeigt sich eine Spanne von +5% bis - 15%. Ein ähnliches Bild zeigt sich auch für die mittleren monatlichen Hochwasserabflüsse. Die mittels extremwertstatistischer Analysen ermittelten Veränderungen der Hochwasserquantile zeigen beim Vergleich einzelner Modellruns eine große Bandbreite auf und sind aufgrund der 30-jährigen Zeitreihen nicht sehr belastbar. Erst die gemeinsame Analyse mehrerer Modellläufe oder Auswertungen längerer Zeitreihen aus statistischen Projektionen reduzieren die Streuung und zeigen bis auf wenige Ausnahmen einen Bereich von Zunahmen der Hochwasserkennwerte von 5 bis 20% auf. Über alle Abflusskennwerte hinweg treten die größten Abflusszunahmen in Südhessen auf, während geringere Zunahmen und größere Abnahmen beim Niedrigwasserabfluss in Nordhessen zu finden sind.

Auswirkung auf die Grundwasserneubildung

Hessen hat zusammen mit den KLIWA-Ländern den Bodenwasserhaushalt und die daraus resultierende Grundwasserneubildung für die Vergangenheit (1951-2015) auf der Basis von Messdaten flächendifferenziert simuliert. Die Simulation wurde länderübergreifend mit dem Bodenwasserhaushaltsmodell GWN-BW und einer nachgeschalteten Abflusseparation mittels Baseflow-Index (BFI) durchgeführt. Ebenso wie für den Jahresniederschlag zeigt sich



für die Grundwasserneubildung kein einheitlicher Trend. Seit dem Jahr 2003 ist aber ein deutlicher Rückgang der Winterniederschläge zu beobachten. Gleichzeitig hat die Verdunstung im hydrologischen Winterhalbjahr seit den 1990-er Jahren zugenommen. Beides wirkt sich reduzierend auf die Grundwasserneubildung aus. Auffällig ist die extreme Jahr zu Jahr Variabilität bis zum Jahr 2003. Nach dem Jahr 2003 hat die jährliche Variabilität deutlich abgenommen, die jährliche Grundwasserneubildung liegt bis auf das Jahr 2007 unterhalb des langjährigen Mittelwertes. Ausgeprägte Nassjahre, wie sie vor 2003 vorkamen, wurden in Hessen seitdem nicht mehr beobachtet. Besonders die letzte halbe Dekade zeichnet sich durch sehr niedrige Grundwasserneubildungsraten aus.

Die bisher vorliegenden Simulationsergebnisse für die Grundwasserneubildung in der Zukunft bewegen sich innerhalb der Schwankungsbreite der Beobachtung in der Vergangenheit. Auf Grundlage der bisher betrachteten Klimaprojektionen für Hessen ist bis zum Jahr 2050 kein eindeutiger Trend für die Grundwasserneubildung erkennbar. In der zweiten Hälfte des Jahrhunderts nimmt dabei die Ergebnisbandbreite deutlich zu.

Bewertung der vorliegenden Untersuchungsergebnisse

Aus den Ergebnissen zu den Oberflächengewässern lässt sich für Hessen i.d.R. eine Umverteilung mit Mehrabflüssen im Winter- und geringeren Abflüssen im Sommerhalbjahr ableiten. Eine Verschärfung der Hochwassersituation scheint wahrscheinlich, bedarf aber zur Quantifizierung weiterer Absicherungen. Hinsichtlich der Veränderungen im Niedrigwasserbereich sind je nach Klimaprojektion bis zur Mitte des Jahrhunderts geringe Zunahmen bis Abnahmen zu erwarten. Zum Ende des Jahrhunderts ist mit zurückgehenden Niedrigwasserabflüssen im Sommer und Herbst zu rechnen. Hinsichtlich möglicher Anpassungsmaßnahmen können auf Basis der vorliegenden Untersuchungen Veränderungskorridore abgeleitet werden.

Für die Grundwasserneubildung ist auf Grundlage der bisher betrachteten Klimaprojektionen für Hessen bis zum Jahr 2050 kein eindeutiger Trend erkennbar. Die bisher vorliegenden Modellergebnisse bewegen sich innerhalb der Schwankungsbreite der Beobachtungen in der Vergangenheit. In der zweiten Hälfte des Jahrhunderts nimmt die Ergebnisbandbreite deutlich zu.

Trotz vieler Unsicherheiten können Anpassungsmaßnahmen zur Begegnung der Auswirkungen des Klimawandels entwickelt und umgesetzt werden. In Hessen wurde im März 2017 der „Integrierte Klimaschutzplan Hessen 2025“ mit einem Bündel an Klimaschutz- und Klimaanpassungsmaßnahmen zu den unterschiedlichen Handlungsfeldern beschlossen [2]. Eine Überprüfung und ggf. Nachjustierung der möglichen Veränderungskorridore zu hydrologischen Fragestellungen ist dabei auf Basis breiterer Ensemble-Untersuchungen und der Heranziehung anderer globaler Antriebsmodelle anzustreben.

[1] HLNUG, FACHZENTRUM KLIMAWANDEL: ([HTTP://WWW.HLNUG.DE/THEMEN/FACHZENTRUM-KLIMAWANDEL/KLIMAWANDEL/KLIMAPROJEKTION-HESSEN.HTML](http://www.hlnug.de/themen/fachzentrum-klimawandel/klimawandel/klimaprojektion-hessen.html))

[2] HESSISCHES MINISTERIUM FÜR UMWELT, KLIMASCHUTZ, LANDWIRTSCHAFT UND VERBRAUCHERSCHUTZ_2017: https://umweltministerium.hessen.de/sites/default/files/media/hmuelv/integrierter_klimaschutzplan_web_barrierefrei.pdf

Projekt KlimEx „Klimawandel und Extreme“ – Untersuchungen in Quebec und Bayern –

Ralf Ludwig
Ludwig-Maximilians-Universität München (LMU)

Nicht zuletzt durch die z.T. dramatischen Folgen der Hochwasserereignisse (2013, 2005, 2002, 1999) oder der ausgedehnten Trockenperioden (Herbst 2011, Frühjahr 2007, Sommer 2003 und 2015) der jüngeren Vergangenheit in Bayern ist die Betrachtung hydrologischer Extremereignisse in den Fokus des Interesses gerückt. Veränderungen in Häufigkeit und Intensität solcher Extremereignisse werden im Zusammenhang mit dem Klimawandel zwar erwartet, können bisher aber nur unzureichend quantifiziert werden. Für die Anpassung der Wasserwirtschaft an begleitende Risiken ist ein verbessertes Verständnis der beteiligten Prozesse und Systemzusammenhänge allerdings eine wichtige Voraussetzung.

Das KlimEx Projekt untersucht Auftreten und Auswirkungen von extremen meteorologischen Ereignissen auf die Hydrologie in Bayern und Québec unter dem Einfluss des Klimawandels. Es liefert eine deutlich erweiterte Grundlage zur dynamischen Anpassung an Risiken für die Wasserwirtschaft und zur Ableitung von Empfehlungen für eine vorausschauende Bewirtschaftung der Wasserressourcen. Folgende Fragestellungen dabei stehen im Vordergrund:

- die Verbesserung des Verständnisses ob und inwieweit der Klimawandel zu einer Erhöhung der Magnitude und Frequenz von hydro-klimatologischen Extremereignissen beiträgt
- die Unterscheidung zwischen den Effekten der natürlichen Variabilität und einem klaren Klimaänderungssignal
- die Bereitstellung von übertragbaren Methoden für eine verbesserte Analysierbarkeit hydro-klimatologischer Extremereignisse
- die dynamische Anpassung des regionalen Risikomanagements

Die Einbindung des Hochleistungsrechners SuperMUC (LRZ) ermöglicht die innovative Verwendung von sehr großen Single-Modell-Ensembles regionaler Klimamodellläufe, die eine verbesserte Erfassung der natürlichen Klimavariabilität ermöglichen. In Verbindung mit dem Multi-Modell-Ensemble aus Euro-CORDEX werden die Ergebnisse dazu eingesetzt, die Unsicherheiten, die mit der Dynamik von Hochwasserereignissen unter dem Einfluss des Klimawandels verbunden sind, besser zu quantifizieren. Darauf basierend werden Vorbeugungs-, Mitigations- und Adaptationsstrategien getestet und hinsichtlich ihrer Belastbarkeit und Effizienz auf unterschiedlichen Raum- und Zeitskalen bewertet.

KlimEx setzt dabei insbesondere auf zwei in dieser Kombination neue methodische Aspekte:

- Ein Ensemble von 50 transienten Läufen des kanadischen globalen Klimamodells CanESM2 von 1950 bis 2100, wird mit dem kanadischen Regionalmodell CRCM5 für eine europäische Domäne dynamisch skaliert. Dadurch stehen insgesamt 7500 Jahre modelliertes Klima in hoher raum-zeitlicher Auflösung (12 km, 1-3 Stunden) zur Abbildung der natürlichen Variabilität des Klimasystems zur Verfügung.
- Ein physikalisch basiertes hydrologisches Modell (WaSiM) wird von diesem Klimadatensatz für das gesamte hydrologische Bayern in hoher zeitlicher (3 Stunden) und räumlicher (500m) Auflösung angetrieben um sowohl Einflüsse des Klimawandels als auch natürliche Variabilität zu untersuchen. Ein besonderer Fokus wird dabei auf Extremereignisse wie Hochwasser gelegt.

KlimEx stärkt durch die Intensivierung der bisherigen Kooperationen von Forschungsanstalten, Universitäten und öffentlichen Stellen die internationale Kooperation zwischen Bayern und Québec. Weitere Informationen zum Projekt unter www.climex-project.org.



Die Temperatur als verbreitungsregulierender Faktor für Neozoen am Beispiel der Körbchenmuschel *Corbicula fluminea*

Franz Schöll
Bundesanstalt für Gewässerkunde

Die Körbchenmuschel *Corbicula fluminea*, ursprünglich in australasiatischen Faunenregionen beheimatet, hat in den letzten Jahrzehnten insbesondere mit dem Schiffsverkehr ihr Areal in Amerika und Europa beträchtlich erweitert. Am Rhein fand die Ausbreitung just zum Zeitpunkt des Temperaturanstieges Mitte bis Ende der 80er Jahre statt die mit der anthropogen verursachten Klimaerwärmung in Zusammenhang gebracht wird.

Nach Osten scheint die Ausbreitung aber zu stagnieren. Als Ursache hierfür werden die niedrigen, für kontinental geprägtes Klima typischen Temperaturen im Winter angenommen in Anlehnung an Beobachtungen aus Nordamerika.

Um die Abhängigkeit der Körbchenmuschel von der Temperatur im Freiland zu prüfen, wurden Häufigkeit und Präsenz von *Corbicula* an verschiedenen Bundeswasserstraßen in Abhängigkeit von der vorherrschenden Wassertemperatur analysiert. Die Temperatur wurde nach Anzahl von Tagen ausgewertet, an welchen bestimmte Wassertemperaturen unterschritten wurden.

Die Annahme, dass für die Verbreitung von *Corbicula* die Minimaltemperatur des jeweiligen Gewässers eine entscheidende Rolle spielt, wird auch durch diese Untersuchung untermauert. Die Ergebnisse im Freiland lassen vermuten, dass für den Verbreitungserfolg von *Corbicula* nicht nur die erhöhte Mortalität nach kalten Winterperioden verantwortlich ist, sondern insbesondere die darauffolgende verringerte Reproduktion.

Übersicht Veröffentlichungen KLIWA

KLIWA-Hefte

- KLIWA Heft 1: Klimaveränderung und Konsequenzen für die Wasserwirtschaft, Fachvorträge beim KLIWA-Symposium am 29. und 30.11.2000 in Karlsruhe, 278 S., ISBN 3-88251-279-2, Karlsruhe 2001.
- KLIWA Heft 2: Langzeitverhalten der Hochwasserabflüsse in Baden-Württemberg und Bayern, 98 S., ISBN 978-3-88251-284-9, Karlsruhe 2002
- KLIWA Heft 3: Langzeitverhalten der mittleren Abflüsse in Baden-Württemberg und Bayern, 93 S., ISBN 978-3-8851-286-5, Karlsruhe 2003
- KLIWA Heft 4: Klimaveränderung und Konsequenzen für die Wasserwirtschaft, Fachvorträge beim 2. KLIWA-Symposium am 03. und 04.05.2004 in Würzburg, 249 S., ISBN 3-937911-16-2, München 2004
- KLIWA Heft 5: Langzeitverhalten der Lufttemperatur in Baden-Württemberg und Bayern, 76 S., ISBN 978-3-937911-17-0, München 2005
- KLIWA-Heft 6: Langzeitverhalten der Schneedecke in Baden-Württemberg und Bayern, 88 S., ISBN 978-3-937911-18-9, München 2005
- KLIWA-Heft 7: Langzeitverhalten des Gebietsniederschlages in Baden-Württemberg und Bayern, 160 S.; ISBN 978-3-937911-19-7, München 2005
- KLIWA-Heft 8: Langzeitverhalten der Starkniederschläge in Baden-Württemberg und Bayern, 93 S., ISBN 978-3-88148-412-4, Offenbach 2006
- KLIWA Heft 9: Regionale Klimaszenarien für Süddeutschland – Abschätzung der Auswirkungen auf den Wasserhaushalt, 100 S., ISBN 3-88251-305-5, Karlsruhe 2006
- KLIWA Heft 10: Klimaveränderung und Konsequenzen für die Wasserwirtschaft, Fachvorträge beim 3. KLIWA-Symposium am 25. und 26.10.2006 in Stuttgart, 256 S., ISBN 978-3-88251-325-7, Karlsruhe 2007
- KLIWA Heft 11: Zum Einfluss des Klimas auf den Bodensee, 99 S., ISBN 978-3-88251-326-4, Karlsruhe 2007
- KLIWA Heft 12: Langzeitverhalten von Sonnenscheindauer und Globalstrahlung sowie von Verdunstung und klimatischer Wasserbilanz in Baden-Württemberg und Bayern, 147 S., ISBN 978-3-88148-429-9, Offenbach 2008
- KLIWA Heft 13: Modellunterstützte Untersuchungen zum Einfluss des Klimas auf den Bodensee, 128 S., ISBN 978-3-88251-345-5, Karlsruhe 2009
- KLIWA Heft 14: Auswirkungen des Klimawandels auf Niedrigwasserverhältnisse in Baden-Württemberg, Bayern und Rheinland-Pfalz, 114 S., ISBN 978-3-88251-346-2, Karlsruhe 2009
- KLIWA Heft 15: Klimaveränderung und Konsequenzen für die Wasserwirtschaft, Fachvorträge beim 4. KLIWA-Symposium am 3. und 4. Dezember 2009 in Mainz, 312 S., ISBN 978-3-933123-20-6, Mainz 2010



-
- KLIWA Heft 16: Langzeitverhalten von Grundwasserständen, Quellschüttungen und grundwasserbürtigen Abflüssen in Baden-Württemberg, Bayern und Rheinland-Pfalz, 148 S., ISBN 978-3-88251-362-2, Karlsruhe 2011
- KLIWA Heft 17: Auswirkung des Klimawandels auf Bodenwasserhaushalt und Grundwasserneubildung in Baden-Württemberg, Bayern und Rheinland-Pfalz, 112 S., ISBN 978-3-88251-363-9, Karlsruhe 2012
- KLIWA Heft 18: Die Entwicklung von trockenen Großwetterlagen mit Auswirkungen auf den süddeutschen Raum, 154 S., Karlsruhe 2012
- KLIWA Heft 19: Klimaveränderung und Konsequenzen für die Wasserwirtschaft, Fachvorträge beim 5. KLIWA-Symposium am 06. und 07. Dezember 2012 in Würzburg, 258 S., Hof Dezember 2013.
- KLIWA Heft 20: Ableitung von Temperaturpräferenzen des Makrozoobenthos für die Entwicklung eines Verfahrens zur Indikation biozönotischer Wirkungen des Klimawandels in Fließgewässern, 145 S., ISBN 978-3-88251-389-9, Karlsruhe April 2016
- KLIWA Heft 21: Entwicklung von Bodenwasserhaushalt und Grundwasserneubildung in Baden-Württemberg, Bayern, Rheinland-Pfalz und Hessen (1951-2015), 102 S., ISBN 978-3-88251-395-0, Karlsruhe März 2017

