LUBW

Bayerisches Landesamt für Umwelt

RheinlandPfalz
LANDESAMT FÜR UMWELT

Deutscher Wetterdienst
Wetter und Klima aus einer Hand

DWD

6. KLIWA-Symposium

am 22. und 23. Mai 2017 in Baden-Baden

Fachvorträge

Risiko Klima – Herausforderungen managen

KLIWA-Berichte

Heft 22

KLIWA
Klimaveränderung
und Wasserwirtschaft

LUBW Bayerisches Landesamt für Umwelt RheinlandPfalz LANDESAMT FÜR UMWELT Deutscher Wetterdienst Wetter und Klima aus einer Hand DWD

6. KLIWA-Symposium

am 22. und 23. Mai 2017 in Baden-Baden

Fachvorträge

Risiko Klima – Herausforderungen managen

KLIWA-Berichte

Heft 22

KLIWA
Klimaveränderung
und Wasserwirtschaft

IMPRESSUM

Herausgeber	Arbeitskreis KLIWA Landesanstalt für Umwelt Baden-Württemberg (LUBW) Bayerisches Landesamt für Umwelt (LfU Bayern) Landesamt für Umwelt Rheinland-Pfalz (LfU Rheinland-Pfalz) Deutscher Wetterdienst (DWD) www.kliwa.de
Herausgabedatum	Januar 2018
ISBN	978-3-88251-398-1
Redaktionelle Bearbeitung	Landesanstalt für Umwelt Baden-Württemberg (LUBW) Bernd Katzenberger (LUBW) Gabriel Fink (LUBW) Manuela Nied (LUBW) Alana Steinbauer (LfU Bayern) Weitere Unterstützungsleistung: UDATA GmbH Hindenburgstr. 1, 67433 Neustadt/Weinstr. www.udata.de
Druck	SCHMID Druck+Medien GmbH
Umwelthinweis	Gedruckt auf fsc-zertifiziertem Recy®SatinPapier aus 100 % Altpapier
Bezug über	Landesanstalt für Umwelt Baden-Württemberg (LUBW) Griesbachstr. 1 76185 Karlsruhe Bayerisches Landesamt für Umwelt Bürgermeister-Ulrich-Straße 160 86179 Augsburg Landesamt für Umwelt Rheinland-Pfalz Kaiser-Friedrich-Straße 7 55116 Mainz

Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung *6*

Begrüßung
Margareta Barth, Präsidentin der LUBW *12*

Klimawandel – politische und gesellschaftliche Herausforderungen

Klimawandel in Baden-Württemberg
Franz Untersteller MdL, Minister für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft, Baden-Württemberg *15*

Die Anpassungsstrategie in Bayern
Ulrike Scharf MdL, Staatsministerin für Umwelt und Verbraucherschutz Bayern *18*

Klimaschutz in Rheinland-Pfalz
Dr. Thomas Griese, Staatssekretär im Ministerium für Umwelt, Energie, Ernährung und Forsten Rheinland-Pfalz *22*

Unsicher sein und trotzdem handeln
Dr. Paul Becker, Vizepräsident des DWD und Leiter des Geschäftsbereichs Klima und Umwelt *26*

Eröffnungsvortrag: Klimawandel – Welt im Wandel?
Prof. Dr. Harald Lesch, Ludwig-Maximilians-Universität München *29*

Auswirkungen des Klimawandels – derzeitige Schwerpunkte in KLIWA

Klima-Monitoring in KLIWA – Langzeitverhalten der hydrologischen und hydrometeorologischen Kenngrößen in Süddeutschland
Dr. Monika Rauthe et. al., DWD *39*

Auswirkungen des Klimawandels auf die Fließgewässerökosysteme in Süddeutschland
Dr. Jochen Fischer, LfU Rheinland-Pfalz *49*

Niedrigwasser und Trockenheit in der Vergangenheit, Gegenwart und Zukunft in Süddeutschland
Christian Iber et. al., LfU Rheinland-Pfalz *55*

Tendenzen, Trends und Entwicklungen des Grundwasserhaushalts 1951-2015 in Süddeutschland
Thomas Gudera, LUBW *64*

Räumlich hochaufgelöste Klimaprojektionen mit den neuen RCP-Szenarien
Dr. Gerd Schädler et. al., Institut für Meteorologie und Klimaforschung, KIT Karlsruhe *80*

Abflusssimulationen mit den neuen RCP-Szenarien
Holger Komischke et. al., LfU Bayern *92*

Die Entwicklung eines Starkregenrisikomanagements
Wolfgang Hennegriff, LUBW *109*

Regionalisierung und Simulation der Wassertemperatur – Ergebnisse und Bewertungen
Dr. Ingo Haag-Wanka, Ingenieurgesellschaft HYDRON, Karlsruhe *120*

Gewässer im Klimawandel

Zu einer höheraufgelösten Kartierung des Starkregenrisikos mit Hilfe des Wetterradars
Dr. Tanja Winterrath et. al., DWD *133*

Starkregenrisikomanagement – Untersuchungen in Pilotgebieten
Prof. Dr. Markus Weiler et. al., Professur für Hydrologie der Universität Freiburg *141*

Hochaufgelöste Niederschlagssimulationen für die Erosionsmodellierung
Dr. Hans Schipper et. al., Süddeutsches Klimabüro, KIT Karlsruhe *151*

Klimawandel messen – der neue KLIWA-Index Makrozoobenthos
Martin Halle et. al., Umweltbüro Essen *162*

Auswirkungen des Klimawandels auf die Seeökosysteme in Süddeutschland
Dr. Jochen Schaumburg, LfU Bayern *185*

Anpassungsstrategien an den Klimawandel

Auswirkungen extremer Niedrigwasserereignisse auf die Wasserbewirtschaftung
Maria Foltyn et. al., LfU Bayern *192*

Niedrigwassermanagement – Synthese und Auswirkungen aus den
Pilotgebieten und resultierende Handlungsempfehlungen
Dr. Michael Stölzle et. al., Professur für Hydrologie der Universität Freiburg *204*

Vulnerabilität von Grundwassersystemen Süddeutschlands – Ergebnisse
von Stresstestuntersuchungen
Dr. Jörg Neumann, LfU Bayern *211*

Anpassung an den Klimawandel – Wasserversorgung und die
Entwicklung des Dargebots in gering ergiebigen Grundwasserleitern
Dr. Benjamin Kopp, LfU Bayern *219*

Klimawandel in anderen Regionen

Klimawandel in den Niederlanden – Hydrologische Auswirkungen
und Anpassungsstrategien
Hendrik Buiteveld und Rita Lammersen,
Rijkswaterstaat – Water, Verkeer en Leefomgeving *232*

Klimawandel in der Schweiz – Hydrologische Auswirkungen und Anpassungsstrategie
Dr. Petra Schmocker-Fackel et. al., BAFU – Bundesamt für Umwelt, Bern 241

Auswirkungen des Klimawandels auf die hydrologischen Verhältnisse in Hessen – Zusammenschauende Bewertung der vorliegenden Untersuchungsergebnisse
Dr. Gerhard Brahmer und Mario Hergesell, HLNUG Hessen 254

Projekt KlimEx „Klimawandel und Extreme“ – Untersuchungen in Quebec
Prof. Dr. Ralf Ludwig, Ludwig-Maximilians-Universität München..... 264

Die Temperatur als verbreitungsregulierender Faktor für Neozoen am Beispiel der Körbchenmuschel Corbicula fluminea
Dr. Franz Schöll, BfG – Bundesanstalt für Gewässerkunde, Koblenz 265

Resümee und Schlusswort
Jürgen Reich - Ministerium für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft Baden-Württemberg 272

Verzeichnis der Referenten..... 275

Bisher erschienene KLIWA-Berichte..... 277

Zusammenfassung

Es wird erwartet, dass der Klimawandel für die Wasserwirtschaft in Süddeutschland viele Herausforderungen bringt: Niedrigwasser, Starkregenereignisse, Trockenperioden, sinkende Grundwasserstände, nachteilige gewässerökologische Entwicklungen. Was kann man tun, um mit den Herausforderungen des Klimawandels für die Wasserwirtschaft umzugehen? Wie kann man diese managen? Auf dem 6. KLIWA Symposium am 22./23. Mai 2017 in Baden-Baden wurde sich diesen Problemen unter dem Thema „Risiko Klima – Herausforderungen managen“ gestellt und versucht, gemeinsam Antworten und Strategien für die Wasserwirtschaft zu finden.

Die Klimaforschung geht aktuell davon aus, dass der „Treibhauseffekt“ das Klima nachhaltig beeinflusst und die mittlere globale Lufttemperatur bis zum Jahre 2100 um bis zu 5,4 °C (5. AR IPCC 2013) erhöhen kann. Eine solche Klimaveränderung hat erhebliche Auswirkungen auf den Wasserhaushalt und somit auch auf alle Bereiche der Wasserwirtschaft. Im Sinne des Vorsorgeprinzips hat die Wasserwirtschaft die Aufgabe, die Grundlagen zu schaffen

- um Kenntnisse über den Wasserhaushalt und seine künftig zu erwartende Entwicklung zu erhalten,
- um die vertretbaren Wassernutzungen und mögliche Gefahren und Beeinträchtigungen zu bewerten und
- um nachhaltige wasserwirtschaftliche Handlungs- und Anpassungsstrategien zu entwickeln.

Mittlerweile ist es weltweit anerkannt, dass wir derzeit einen spürbaren anthropogen verursachten Klimawandel erleben, der sich in Zukunft noch verstärken wird. Die Aussagen der Klimaforschung über die bisherigen und künftigen Klimaveränderungen und ihre Folgen beziehen sich zumeist auf große Skalen. Zur Beantwortung wasserwirtschaftlicher Fragestellungen sind vor allem quantitative Angaben, also Daten und Fakten über Veränderungen von relevanten Kenngrößen im regionalen Maßstab, erforderlich.

Um die Auswirkungen des Klimawandels auf die Wasserwirtschaft in Süddeutschland wissenschaftlich zu erforschen, arbeiten Baden-Württemberg, Bayern und Rheinland-Pfalz seit vielen Jahren gemeinsam mit dem Deutschen Wetterdienst in der Kooperation "KLIWA – Klimaveränderung und Konsequenzen für die Wasserwirtschaft" zusammen. Im Rahmen von KLIWA erstellen Experten Szenarien zu möglichen Veränderungen des Wasserhaushalts in den Flussgebieten und Grundwasserlandschaften in Süddeutschland und leiten hieraus wasserwirtschaftliche Handlungsempfehlungen ab. Zusammenfassende fachliche Präsentationen zum Ergebnisstand der Kooperation finden im Rahmen von Fachsymposien statt.

Auf dem 6. KLIWA Symposium standen die Themen Niedrigwasser, Starkregen, Grundwasser und Gewässerökologie im Mittelpunkt. Neben den Auswirkungen des Klimawandels nahm die Ableitung von Handlungsempfehlungen und die Anpassung an den Klimawandel eine zentrale Rolle ein. Die Betrachtung der Erkenntnisse für Süddeutschland wurde mit einem Blick in andere deutsche und europäische Regionen abgerundet.

Die Bedeutung der Kooperation KLIWA wurde in den Statements der politischen Vertreter der KLIWA-Partner hervorgehoben. Um die Folgen der Klimaveränderung bewältigen zu können, ist ein enger Schulterschluss der Länder und des Bundes erforderlich. Hierbei wurden vor allem konsequente Klimaschutzgesetze gefordert. Bei weiterer Inaktivität werden deutlich höhere Kosten für die Anpassung an den Klimawandel erwartet. Eine erfolgreiche Anpassung an den Klimawandel sei auch immer gleichzeitig Zukunftssicherung. Zudem wurde der offizielle Startschuss für ein neues gewässerökologisches Klimafolgen-Monitoring in allen KLIWA-Bundesländern gegeben.

Der Einführungsvortrag von Professor Lesch führte eindrücklich vor Augen, dass der Klimawandel Realität ist und darauf reagiert werden muss. Sehr plakativ formulierte er, dass Klimawandel „leichten bis mittleren Terrorismus für die Atmosphäre“ darstellt. Dies scheint jedoch in der Bevölkerung immer noch nicht angekommen zu sein. Gemäß einer Umfrage glauben etwa 16 % der Deutschen nicht an die Existenz des anthropogenen Klimawandels. Daher ist Kommunikation und Öffentlichkeitsarbeit besonders wichtig.

Die weiteren Fachbeiträge der Veranstaltung widmeten sich einer zusammenfassenden fachlichen Bestandsaufnahme von KLIWA. Besondere Bedeutung hatte die Ableitung von Handlungsempfehlungen als Grundlage für die Erarbeitung von Anpassungs- sowie Managementstrategien.

Klimawandel in Süddeutschland – Monitoring und Klimamodellierung

Langjährige meteorologische und hydrologische Messdaten sind Voraussetzung für Untersuchungen zum Klimawandel und deren Auswirkungen auf die Wasserwirtschaft. Nur so lassen sich bereits stattfindende Veränderungen von Kenngrößen wie Temperatur, Niederschlag und Abflussgrößen sicher feststellen.

Das Monitoring zum Klimawandel in Süddeutschland ist ein Schwerpunkt der KLIWA-Kooperation. Im aktuellen Monitoringbericht 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. Der Bericht zeigt, dass sich die Auswirkungen des Klimawandels bereits heute in der regionalen Hydrosphäre zeigen. Die Ausprägungen können jedoch regional sehr unterschiedlich sein.

Neben den Untersuchungen des bereits messbaren Klimawandels wird in KLIWA auch die zukünftige Entwicklung des Klimas mithilfe regionaler Klimaprojektionen betrachtet. Damit können die Folgen des Klimawandels für den Wasserhaushalt abgeleitet und bewertet werden. Hierfür werden Wasserhaushaltsmodelle verwendet, die mit Daten aus regionalen Klimaprojektionen angetrieben werden.

Die vorgestellten Ergebnisse der Veränderungen für Hochwasser, Niedrigwasser und mittlere Abflüsse basieren auf den SRES Emissionsszenarien B2 und A1B. Die Ergebnisse werden 2018 in einem KLIWA-Kurzbericht unter www.kliwa.de veröffentlicht. Im aktuellen 5. IPCC Bericht (2014) wurden die SRES-Szenarien durch neue RCP-Szenarien, die sogenannten „repräsentativen Konzentrationspfade“, ergänzt. Daher stellt sich die Frage: Neue RCP-Szenarien als Antrieb für Klimaprojektionen – braucht KLIWA nun auch neue Abflussprojektionen? Die bisherigen Untersuchungen ergeben, dass die neuen Szenarien für die nahe Zukunft bisher ähnliche Ergebnisse wie SRES A1B zeigen, sie ergänzen und schärfen damit die bisherigen Aussagen. Die Auswertungen bis 2100 zeigen jedoch, dass in der zweiten Jahrhunderthälfte deutliche Unterschiede zu dem SRES A1B-Szenario auftreten. Hier besteht weiterer Untersuchungsbedarf.

Eine Verbesserung in der Wiedergabe der klimatischen Kenngrößen erwartet sich KLIWA von der Nutzung zeitlich und räumlich hochaufgelöster regionaler Klimamodelle als Antrieb hydrologischer Modelle. Daher wurde eine erste, pilothafte regionale Klimaprojektion mit sehr hoher Auflösung von 2,8 km unter Verwendung der neuen RCP-Szenarien und dem Klimamodell CCLM5.0 für Süddeutschland erstellt. Ausgewertet werden unter anderem Mittelwerte von Temperatur, Niederschlag und Feuchte sowie – im Hinblick auf Extreme – Statistiken von temperatur- und niederschlagsbezogenen Schwellenwertüberschreitungen wie Trockenperioden und Starkniederschläge.

Starkregenrisikomanagement

Im Rahmen des Projekts „Radarklimatologie“ wurden die Niederschlagsdaten des Boden- und Radarnetzwerkes des Deutschen Wetterdienstes zusammengeführt und für die klimatologische Nutzung aufbereitet. Zum ersten Mal liegt damit eine flächendeckende, quantitative Niederschlagsanalyse in hoher räumlicher und zeitlicher Auflösung für Deutschland vor, die nahezu alle Starkniederschläge von 2001 bis 2016 erfasst und damit einen neuen Datensatz für die Analyse von Starkregen darstellt. Der Datensatz liefert erstmals statistische Häufigkeiten und räumliche Verteilungen kleinräumiger Extremereignisse sowie umfassende Informationen zum Niederschlagseintrag bei der Entstehung pluvialer Hochwasser. Klimatologische Aussagen sind aufgrund der Kürze des Datensatzes derzeit nur eingeschränkt möglich.

Aufgrund der Starkregenereignisse der letzten Jahre nimmt das Thema Starkregen auch in KLIWA an Bedeutung zu. Häufig fehlt das Risikobewusstsein, da sich die durch Starkregen ausgelösten Überflutungen oftmals abseits von Gewässern ereignen. In Baden-Württemberg wurde ein Leitfaden für das kommunale Starkregenrisikomanagement entwickelt. Er beinhaltet die drei Bausteine: Analyse der Überflutungsgefährdung, Risikoanalyse und Handlungskonzept. Starkregengefahrenkarten werden hierbei für seltene, außergewöhnliche und extreme Oberflächenabflussereignisse erstellt.

Da das Bodenerosionsgeschehen durch die Häufigkeit und Intensität von Starkniederschlägen entscheidend beeinflusst wird, ist infolge des Klimawandels in erosionsgefährdeten Gebieten eine Zunahme des Bodenerosionsrisikos und der damit verbundenen Gefährdung für Böden und andere Schutzgüter möglich. Gerade in kleinen bis mittleren Einzugsgebieten wird die Höhe des Bodenabtrags vielfach von kurzen, lokal begrenzten, aber intensiven Niederschlägen bestimmt. Im Rahmen des Projekts „Bodenabtrag durch Wassererosion in Folge von Klimaveränderungen“ wurde ein Klimamodell mit einem Erosionsmodell gekoppelt.

Grundwasser

In Süddeutschland wird der überwiegende Teil des Trinkwassers aus dem Grundwasser gewonnen. Eine nachhaltige Bewirtschaftung der Grundwasserressourcen ist daher unerlässlich. Dafür ist die Kenntnis über mögliche langfristige Entwicklungen der regionalen Grundwasserverhältnisse von grundlegender Bedeutung. Ein spürbarer Anstieg der potenziellen Verdunstungsraten aufgrund der signifikanten Erwärmung seit Ende der 1980er Jahre führte zu einer engeren klimatischen Wasserbilanz. Das Ausbleiben nasser Jahre in der vergleichsweise trockenen, jüngeren Vergangenheit seit dem Jahr 2003 macht sich allgemein bei den Wasserhaushaltskomponenten und insbesondere der Grundwasserneubildung bemerkbar. So wurde in Süddeutschland seit 2003 die mittlere Grundwasserneubildung der Periode 1951 bis 2010 mehrfach deutlich unterschritten. Die Untersuchungsergebnisse sind im KLIWA-Heft 21 dargestellt.

In Regionen ohne großräumig zusammenhängende und ergiebige Grundwasservorkommen wurde im Rahmen von Fallstudien die Vulnerabilität bzw. die Anfälligkeit von Grundwassersystemen gegenüber nachteiligen Auswirkungen von Klimaänderungen näher untersucht. Die ermittelten zukünftigen Rückgänge der Quellschüttungen während Trockenperioden in den Sommer- und Herbstmonaten dienen als Orientierungsgröße, anhand derer die Wasserversorger frühzeitig Anpassungsmaßnahmen zur Stärkung der Versorgungssicherheit (z. B. „zweites Standbein“) ergreifen sollen.

Neben regionalen Klimaprojektionen wurden auch „Stresstestszenarien“ auf Basis gemessener Daten aus der Vergangenheit genutzt. Mit der Methode des Stresstests kann die Reaktion eines Systems auf eine erhöhte Beanspruchung untersucht werden. Beispielsweise kann so die Frage untersucht werden, welche Folgen eine mehrjährige Abfolge des Trockenjahrs 2003 oder 2015 für die Entwicklung des nutzbaren Dargebots und die darauf angewiesene

öffentliche Wasserversorgung hat. Stresstestergebnisse sind für viele Nutzer weniger abstrakt als Aussagen auf Basis von Projektionen. Die gewonnenen Ergebnisse zeigen, dass bereits trockene Einzeljahre zu erheblichen Defiziten im Grundwasserangebot führen können.

Niedrigwasserentwicklung und -management

In den vergangenen Jahren sind in Süddeutschland gleich mehrere markante Niedrigwasserereignisse sowohl regional als auch an großen Flüssen aufgetreten. Der Bereich Niedrigwasser war in den letzten Jahren einen thematischen Schwerpunkt der KLIWA-Kooperation. Die Ableitung von Handlungsoptionen als Grundlage für ein noch zu erarbeitendes Niedrigwassermanagement stand dabei im Vordergrund. Ein Niedrigwassermanagement soll die Vorsorge und den optimalen Umgang mit konkreten Niedrigwasserereignissen unter Berücksichtigung der bestehenden Wassernutzungen gewährleisten.

Entsprechend einer statistischen Auswertung der Entwicklung trockener Großwetterlagen seit Ende des 19. Jahrhunderts hat die Wahrscheinlichkeit des Auftretens trockener, heißer Sommer zugenommen. Im Vergleich dazu sind die mittleren jährlichen Niedrigwasserabflussmengen zwischen 1951 bis 2015 mehrheitlich jedoch eher gestiegen. Allerdings sind die betrachteten Niedrigwasserabflüsse häufig wasserwirtschaftlich überprägt, was bei der Interpretation der Aussagen beachtet werden muss. Bei einer Analyse ab Mitte der 1970er Jahre zeigen sich vermehrt Abnahmen der Niedrigwasserabflussmengen.

Bei der Betrachtung modellierter zukünftiger Abflüsse zeigen frühere Modellierungen oft deutliche Verschärfungen im Niedrigwasserbereich. Dagegen fallen diese Trends in neueren Abflussprojektionen in den KLIWA-Ländern uneinheitlich aus. Vor allem in Rheinland-Pfalz und Nordbayern sind die Änderungen von Niedrigwasserkennwerten grundsätzlich weniger eindeutig. Weitere Untersuchungen werden erforderlich sein, um die bestehenden Unsicherheiten bei der Modellierung der Verdunstung zu verringern.

Die wasserwirtschaftlichen Nutzungen und ökologischen Funktionen, die durch Niedrigwasser beeinträchtigt werden können, hängen in einem vielschichtigen Wirkungsgefüge zusammen. Um die Auswirkungen extremer Niedrigwasserereignisse in Süddeutschland genauer zu betrachten und konkrete Handlungsempfehlungen abzuleiten, wurden im Rahmen von KLIWA Pilotstudien in ausgewählten Flussgebieten durchgeführt. Für bestimmte Nutzungsbereiche wurden Stresstests angewendet, wie z. B. für die Speicherbewirtschaftung. Die tatsächlichen Auswirkungen sind dabei abhängig vom Klimasignal und der Sensitivität der betrachteten Nutzung sowie etwaigen Nutzungskonflikten. Es zeigte sich, dass Trockenheits- und Niedrigwasserereignisse insbesondere dort zu Problemen führen, wo die Ressource Wasser bereits heute intensiv genutzt wird. Als ein Ergebnis der Pilotstudien bedarf es der Berücksichtigung und Identifizierung aktueller und potenziell zukünftiger Wassernutzungskonflikte in einem umfänglichen Niedrigwassermanagement. Ein weiteres Ergebnis ist die Entwicklung einer Systematik zur Konkretisierung von Handlungsempfehlungen mittels einer mehrstufigen Bewertung.

Durch die Zusammenführung unterschiedlicher Akteure (Experten und lokale Wassernutzer) können starke Synergien erzeugt werden, z. B. für Lösungsstrategien für (potenzielle) Wassernutzungskonflikte. Unterschiedliche Instrumente zur Analyse von Nutzungskonflikten, wie etwa Stakeholder-Workshops, können den wichtigen, partizipativen Prozess für die Entwicklung eines Niedrigwassermanagements anstoßen. Nähere Informationen gibt ein für 2018 geplantes KLIWA-Heft, welches die Ergebnisse aus den Pilotstudien für das Niedrigwasser der drei KLIWA-Bundesländer zusammenführt.

Gewässerökologie und Wassertemperatur

Das Wissen über die regionalen Auswirkungen des Klimawandels auf die ökologische Qualität der Fließgewässer und Seen ist noch gering. Die komplexen ökologischen Wirkungsmechanismen auf der Ebene von Lebensgemeinschaften sind erst ansatzweise untersucht und verstanden. Ein vorsorgendes wasserwirtschaftliches Handeln verlangt aber ein tiefes Prozessverständnis.

Gewässerökologie spielt eine zunehmend wichtige Rolle in KLIWA. Die Arbeitsgruppe Gewässerökologie hat in den vergangenen Jahren Literaturstudien zu Auswirkungen des Klimawandels auf Flüsse und Seen erarbeiten lassen, welche wichtige Erkenntnisse und Wirkmechanismen zusammenstellen. Mit dem Start eines gewässerökologischen Klimafolgen-Monitorings für Fließgewässer wurde ein wichtiger Meilenstein gesetzt. Für Seen wird ein solches Monitoring zurzeit erarbeitet.

Änderungen im Temperaturhaushalt und im Abfluss beeinflussen Stoffkreisläufe im Gewässer und verändern die Zusammensetzung der Biozönosen bis hin zur erleichterten Ausbreitung von gebietsfremden Arten. Die verringerte Verlässlichkeit bestimmter Wassertemperatur- und Abflussbedingungen und die Zunahme der Extreme sind auf den Klimawandel zurück zu führen. Gleiches gilt für die temperaturabhängigen Veränderungen von Schichtungs- und Durchmischungsphasen in Seen und als Folge negative Veränderungen im Nährstoff- und Sauerstoffhaushalt. Um die ökologischen Folgen veränderter Wassertemperaturen und Abflussverhältnisse von Fließgewässern unmittelbar für deren aquatische Wirbellosenfauna (Makrozoobenthos) nachweisen zu können, wurde der KLIWA-Index MZB entwickelt. Der Index ist eine aus der Artenzusammensetzung errechnete Kenngröße. An anthropogen wenig beeinträchtigten Gewässern kann die spezifische Veränderung der Artenzusammensetzung als eine Folge des Klimawandels interpretiert werden. Nähere Informationen können im KLIWA-Heft 20 nachgelesen werden.

Die Wassertemperatur ist einer der wichtigsten Gewässergüteparameter, der maßgeblichen Einfluss auf die Zusammensetzung der aquatischen Biozönose hat. Um das Ausmaß klimatisch bedingter Veränderung abschätzen zu können, wurden für Baden-Württemberg und Bayern Simulationen und Projektionen der Wassertemperaturen erarbeitet. Im räumlichen Mittel über Bayern ist für die nahe Zukunft mit einer klimatisch bedingten Zunahme der Wassertemperatur um ca. 0,5 bis 1,3 °C zu rechnen. Für Baden-Württemberg gelten ähnliche Größenordnungen. 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.

Klimawandel in anderen Regionen

Der alleinige Blick auf Süddeutschland birgt das Risiko, wichtige Erkenntnisse aus anderen Regionen in Deutschland oder Europa zu übersehen. Daher wird bei den KLIWA-Symposien auch immer der Blick auf benachbarte (Bundes-)Länder gerichtet. Im diesem KLIWA-Symposium wurde über Klimaanpassungsstrategien in den Niederlanden und der Schweiz, die Klimawandelauswirkungen auf die hydrologischen Verhältnisse im KLIWA-Gastland Hessen, sowie auf die bayerisch-kanadische Zusammenarbeit zu Klimawandel und Extremen im Projekt ClimEx berichtet.

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 Landesfläche könnten überflutet werden. Die Politik zielt darauf ab, die Niederlande heute und in Zukunft vor Hochwasser zu schützen und eine ausreichende Wasserversorgung zu gewährleisten.

Im Jahr 2012 verabschiedete 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.

Die zukünftige Klimaentwicklung für Hessen kann auf Basis einer Vielzahl von Klimaprojektionen abgeschätzt werden. Dadurch ergibt sich eine mögliche Veränderungsspanne, deren Variabilität u. a. 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. 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.

Das Projekt *‚Climate Change and hydrological extreme events – Risks and perspectives for water management in Bavaria and Québec (ClimEx)‘* untersucht Auftreten und Auswirkungen von extremen meteorologischen Ereignissen auf die Hydrologie in Bayern und Québec unter dem Einfluss des Klimawandels. Es soll eine deutlich erweiterte Grundlage zur dynamischen Anpassung an Risiken für die Wasserwirtschaft und zur Ableitung von Empfehlungen für eine vorausschauende Bewirtschaftung der Wasserressourcen liefern.

Fazit und Ausblick

In KLIWA haben in den letzten Jahren die Themen Starkregen, Niedrigwasser, Grundwasser und vor allem Gewässerökologie eine zentrale Rolle eingenommen. Die bereits sichtbaren und möglichen zukünftigen Auswirkungen des Klimawandels sind in KLIWA bereits gut dokumentiert. Es ist wichtig, daraus jetzt die richtigen Handlungsstrategien abzuleiten und umzusetzen. Es gilt die Herausforderungen durch den Klimawandel in der Wasserwirtschaft zu managen. Dies ist möglich, verschiedene Ansätze dazu wurden auf dem 6. KLIWA-Symposium vorgestellt. Die Erarbeitung von Handlungsmaßnahmen und Anpassungsstrategien wird bei der Kooperation KLIWA daher auch in Zukunft im Fokus stehen.

Aktuelle Informationen zu der Kooperation KLIWA sind im Internet unter www.kliwa.de verfügbar.

Begrüßung

Margareta Barth
Präsidentin der LUBW

Meine sehr geehrten Damen und Herren,

ich darf Sie alle sehr herzlich zu unserem 6. KLIWA-Symposium hier in Baden-Baden begrüßen. Ich freue mich, dass Sie so zahlreich gekommen sind.

Es ist bereits das 3. KLIWA-Symposium, das in Baden-Württemberg stattfindet und das von meinem Haus, der LUBW, der Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg[1], organisiert wird.

Besonders willkommen heißen möchte ich den Minister für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft Baden Württemberg, Herrn Franz Untersteller. Begrüßen darf ich Frau Ulrike Scharf, Staatsministerin für Umwelt und Verbraucherschutz Bayern und Herrn Dr. Thomas Griese, Staatssekretär des Ministeriums für Umwelt, Energie, Ernährung und Forsten Rheinland-Pfalz. Ich danke Ihnen, dass unser Symposium noch einen Platz in ihrem vollen Terminkalender gefunden hat und freue mich, dass Sie nachher über den Klimawandel, die Anpassungsstrategie und den Klimaschutz in ihren Ländern sprechen werden.
Ein herzliches Willkommen möchte ich an Frau Oberbürgermeisterin Margret Mergen richten. Sie wird heute für die Stadt Baden-Baden ein Grußwort sprechen.

Es ist mir eine ganz besondere Freude, Herrn Professor Harald Lesch zu begrüßen. Er ist Astrophysiker an der Ludwig-Maximilians-Universität München. Ich danke Ihnen, dass Sie heute den Eröffnungsvortrag auf unserem Symposium halten werden.

Vom Deutschen Wetterdienst möchte ich den Vizepräsidenten, Herrn Dr. Paul Becker herzlich begrüßen. Auch Ihnen, Herr Becker, und dem Deutschen Wetterdienst ein herzliches Dankeschön für die gute Zusammenarbeit in unserer KLIWA-Kooperation.

Ganz besonders begrüßen möchte ich natürlich alle Referentinnen und Referenten des heutigen und morgigen Kongresstages und mich für Ihr Kommen sehr herzlich bedanken.

Ich freue mich, dass so viele Mitarbeiter und Mitarbeiterinnen von Behörden, aus der Wissenschaft und von Ingenieurbüros den Weg hierher nach Baden-Baden gefunden haben. Herzlich willkommen!

Das Projekt KLIWA, meine Damen und Herren, ist aus meiner Sicht ein herausragendes Beispiel für länder- und institutionenübergreifende Zusammenarbeit und das seit fast 20 Jahren! In Süddeutschland sind in den 1990er Jahren mehrere außergewöhnliche Hochwasser auf-getreten, z. B. 1993 und 1994 im Rhein- und Neckargebiet, aber auch 1998 hier in Baden-Baden an der Oos. Ich denke, die Baden-Badener erinnern sich mit Schrecken daran. Als mögliche Ursache wurde damals der Klimawandel diskutiert. Das war letztlich auch der Anlass für das Kooperationsvorhaben KLIWA.

Hier und heute beginnt nun das mittlerweile 6. Symposium im Rahmen des KLIWA-Projektes. Es ist das 3. Symposium in Baden-Württemberg und als Präsidentin der LUBW

[1] Neuer Name ab 01.12.2017: Landesanstalt für Umwelt Baden-Württemberg (LUBW)

begleite ich das Projekt von Anfang an und möchte kurz die vorausgegangenen Symposien in Erinnerung rufen:

Beim 1. KLIWA-Symposium im November 2000 in Karlsruhe fand eine Bestandsaufnahme statt. Im Rückblick möchte ich zwei Punkte aufgreifen, die damals im Vordergrund standen:
Es war zum einen die Frage: Gibt es den durch Menschen verursachten Klimawandel überhaupt? Ich denke, wir können heute klar feststellen: Die überwältigende Mehrheit aller seriöser Klimaforscher weltweit hat keinen Zweifel daran, dass die globale Erwärmung stattfindet und vor allem eine Folge des zusätzlichen Treibhauseffektes durch CO_2-Emissionen und damit menschengemacht ist.

Zum anderen stellte sich damals die Frage: Was sind geeignete Methoden und Instrumente, um die möglichen Auswirkungen des Klimawandels auf die Wasserwirtschaft quantitativ und regional differenziert abschätzen zu können? Hier möchte ich unsere Wasserhaushaltsmodelle hervorheben, die flächendeckend für die Landesfläche im 1x1-km-Raster erstellt wurden. Mit diesen Modellen, die am Ende der Kette „Globale Klimamodelle – Regionale Klimamodelle – Wasserhaushaltsmodelle“ stehen, können die Auswirkungen der Klimaprojektionen auf den Wasserhaushalt sowie auf die Hoch- und Niedrigwasserabflüsse unserer Gewässer ermittelt werden. Ich hebe die Wasserhaushaltsmodelle deshalb so hervor, weil damit erhebliche Synergieeffekte erzielt werden. Die Wasserhaushaltsmodelle auf Basis von LARSIM wurden sukzessive erweitert und auch angepasst für den operationellen Betrieb zur Hochwasservorhersage. Sie werden mittlerweile genutzt und gemeinsam auch weiterentwickelt von unserer LUBW-Hochwasservorhersagezentrale (HVZ) und von den Vorhersagezentralen der angrenzenden Länder Rheinland-Pfalz, Bayern, Hessen, der Schweiz und auch Vorarlberg. Auch in diesem Bereich ist eine vorbildliche länder- und staatenübergreifende Zusammenarbeit entstanden, zu der auch noch weitere Partner hinzukommen.

Beim 2. KLIWA-Symposium im Mai 2004 in Würzburg wurde klar und deutlich festgehalten, die Klimaveränderung ist bereits da und sie wird sich in den kommenden Jahren noch verstärken. Als erste konkrete Anpassungsmaßnahme wurde damals der Lastfall Klimaänderung bei der Bemessung von technischen Hochwasserschutzanlagen eingeführt. Zwischenzeitliche Untersuchungen und Ergebnisse zum Klimawandel in Baden-Württemberg und Bayern wurden beim 3. KLIWA-Symposium im Oktober 2006 in Stuttgart der interessierten Fachwelt vorgestellt. Beim 4. KLIWA-Symposium im Dezember 2009 in Mainz konnten erstmals aktuelle Ergebnisse für drei Bundesländer im Süden Deutschlands präsentiert werden. Beim 5. KLIWA-Symposium im Dezember 2012 in Würzburg wurden erstmals Ergebnisse für den Rhein sowie die Untersuchungsschwerpunkte Niedrigwasser und Grundwasser vorgestellt.

Heute, meine Damen und Herren, beim 6. KLIWA-Symposium stehen unter dem Titel „Risiko Klima – Herausforderungen managen“ die neu gewonnenen Ergebnisse und Schlussfolgerungen der letzten Jahre im Vordergrund. Wie bei allen bisherigen Symposien werden wir auch hier in Baden-Baden am morgigen Nachmittag über den Tellerrand hinausschauen. Dies ermöglichen uns verschiedene Damen und Herren:

Frau Dr. Petra Schmocker-Fackel vom Bundesamt für Umwelt in Bern,
Herr Hendrik Buitefeld von Rijkswaterstaat, aus den Niederlanden,
Herr Dr. Gerhard Brahmer vom Hessischen Landesamt für Naturschutz, Umwelt und Geologie in Wiesbaden,
Herr Prof. Ralf Ludwig, Ludwig-Maximilians-Universität München und
Herr Dr. Franz Schöll, Bundesanstalt für Gewässerkunde in Koblenz.

Wir werden aktuelle Ergebnisse und Kenntnisse zum Umgang mit dem Klimawandel in anderen Regionen vorgestellt bekommen.

Sie haben alle, meine Damen und Herren, Damen und Herren Referenten und Referentinnen, Kongressteilnehmerinnen und Kongressteilnehmer, ein straffes und gut gefülltes Programm vor sich, heute und morgen. Das wird Ihnen Herr Sven Plöger, der die Moderation übernommen hat, später auch noch im Einzelnen vorstellen.

Ich wünsche Ihnen zwei interessante und anregende Tage!

Klimawandel in Baden-Württemberg

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

Liebe Kollegin Scharf,
sehr verehrter Herr Staatssekretär Dr. Griese,
sehr geehrter Herr Dr. Becker,
sehr geehrte Frau Oberbürgermeisterin Mergen,
sehr geehrte Frau Präsidentin Barth,
sehr verehrter Herr Prof. Lesch,
meine sehr geehrten Damen und Herren!

Ich freue mich sehr, dass Sie heute zum 6. KLIWA-Symposium „Risiko Klima – Herausforderungen managen“ so zahlreich erschienen sind. Denn wir widmen uns einem sehr wichtigen Thema. Klimaveränderung und Klimawandel betrifft uns alle!

Der Klimawandel findet bereits statt und ist auch bei uns in Baden-Württemberg angekommen. Das können wir an verschiedenen Entwicklungen festmachen. Schauen wir die Temperaturentwicklung ab dem Punkt an, an dem regelmäßige Temperaturaufzeichnungen begannen, nämlich ab 1881, dann stellt man fest, dass sich die Durchschnittstemperatur in Baden-Württemberg bis 2015 um 1,3 Grad erhöht hat. Das ist mehr als die durchschnittliche globale Temperaturerhöhung von ca. 0,85 Grad im gleichen Zeitraum.

Bezeichnend ist, dass vor allem die Temperaturextreme zugenommen haben. Zum Beispiel ist die Anzahl der Hitzetage, also die Tage bei denen die Temperatur über 30 Grad steigt, landesweit im Schnitt von fünf auf neun Tage gestiegen. Sie haben sich fast verdoppelt in einem Zeitraum von fünf Jahrzehnten und entsprechend der Prognosen der Fachleute wird dieser Trend weiter zunehmen. Schaut man sich einzelne Regionen an, beispielsweise die Oberrheinebene oder den Rhein-Neckar-Raum, fällt der Trend noch extremer aus. Im Raum Karlsruhe werden durchschnittlich 16 Hitzetage pro Jahr gezählt. Im berühmten Jahrhundertsommer 2003 hatte Karlsruhe 51 Hitzetage. Die Prognosen besagen, dass Karlsruhe bis zur Mitte des Jahrhunderts durchschnittlich 35 Hitzetage haben wird, bis Ende des Jahrhunderts aller Voraussicht nach sogar 50 Hitzetage. Das heißt, der Extremsommer 2003 wird dann kein Extremsommer in Karlsruhe mehr sein, sondern ein normaler durchschnittlicher Sommer. Der Temperaturanstieg wird dabei auch zu einer Abnahme der Frosttage führen, wenn auch nicht zu einem Verschwinden der Frosttage. Dies durften wir in diesem Frühjahr beobachten.

Ein anderes Phänomen - ich durfte mir das vor zwei Jahren gemeinsam mit Frau Barth im Murgtal anschauen - ist der Beginn der Apfelblüte. Die LUBW beobachtet dieses Phänomen mit anderen Fachleuten zusammen seit rund fünf Jahrzehnten. Dabei wurde festgestellt, dass sich in den vergangenen 25 Jahren der Beginn der Apfelblüte im Schnitt um 13 Tage nach vorne verschoben hat. Bei dieser zeitiger einsetzenden Vegetationsperiode in Folge des Klimawandels können Frosttage einen wesentlich höheren Schaden anrichten. Das haben wir ganz aktuell in diesem Jahr im April erfahren müssen. Das Schadensausmaß für die Landwirtschaft, insbesondere beim Obst- und Weinbau, ist durch die starken Spätfröste so hoch, dass man in diesem Fall von einer Naturkatastrophe sprechen muss. Aber so richtig wird man das Ausmaß der Schäden erst dann feststellen können, wenn wir die Ernte eingefahren haben. Wir rechnen in diesem Jahr mit einer Schadenssumme von einem höheren zweistelligen Millionenbetrag in der Landwirtschaft.

Die Temperaturveränderungen bringen aber noch andere Extremereignisse mit sich. Jeder von uns hat in der Schule in Physik folgendes gelernt: Wenn sich Luftmassen erwärmen, dann können sie mehr Feuchtigkeit aufnehmen. Die Wissenschaft geht deshalb davon aus, dass wir aufgrund dieses Zusammenhangs mit einer Zunahme von Starkregenereignissen in den nächsten Jahren und Jahrzehnten rechnen müssen. Uns allen sind noch die Bilder der Unwetter aus dem letzten Jahr, Ende Mai/Anfang Juni 2016, in Erinnerung. Dramatische Szenen haben sich beispielsweise in den Orten Braunsbach, Schwäbisch Gmünd und in Simbach im benachbarten Bayern, abgespielt. Während in Braunsbach glücklicherweise niemand zu Schaden kam, gab es in Schwäbisch Gmünd bei diesem Sommerhochwasser drei Tote.

Entsprechendes gilt auch für extreme Sturm- und Hagelereignisse, die im Zuge fortschreitenden Klimawandels häufiger und heftiger auftreten können. Ein Beispiel dafür ist das Hagelereignis 2013, das vor allem den Landkreis Reutlingen getroffen hat. Die Sparkassenversicherung schätzte den Gesamtschaden des Ereignisses auf mehr als 1,25 Milliarden Euro. Meine Damen und Herren, die Zunahme solcher Extremereignisse hat ganz erhebliche Folgen für uns Menschen, für die Umwelt sowie für unsere Wirtschaft.

Die Länder Baden-Württemberg und Bayern sowie der Deutsche Wetterdienst kamen bereits 1999 darin überein, dass globale und großräumige Aussagen der Klimaforschung keine ausreichende Grundlage für die Lösung lokaler wasserwirtschaftlicher Probleme bilden. Daher wurde seinerzeit das gemeinsame Vorhaben „Klimaveränderung und Konsequenzen für die Wasserwirtschaft“, kurz KLIWA, aufgesetzt und gestartet. Einige Jahre später, 2007, trat dann Rheinland-Pfalz als vierter Kooperationspartner diesem Vorhaben bei. Seit 18 Jahren besteht dieser erste überregionale und interdisziplinäre Forschungsverbund. Die wichtigsten Arbeitsfelder der Kooperation KLIWA möchte ich kurz nennen:

- Die Auswertung und Analyse von Klimadaten.
- Die Berechnung und Bewertung möglicher Klimaentwicklungen für alle Bereiche des Wasserhaushalts.
- Die Erarbeitung zukunftsorientierter und nachhaltiger wasserwirtschaftlicher Handlungsstrategien und -konzepte.

Es ist gut, dass es KLIWA gibt und ich möchte mich an dieser Stelle bei allen Beteiligten für ihre engagierte Arbeit bedanken. Die Arbeit, die seit vielen Jahren in der KLIWA-Kooperation geleistet wird, befähigt uns, konkrete regionale Handlungskonzepte aufzustellen. An dieser Stelle möchte ich insbesondere die Strategie zur Anpassung an den Klimawandel in Baden-Württemberg erwähnen, die 2015 im Kabinett beraten und beschlossen und von meinem Haus herausgegeben wurde.

Meine Damen und Herren, um die nationalen und internationalen Klimaschutzziele zu erreichen, müssen wir konsequent handeln. In Baden-Württemberg haben wir 2013 das Klimaschutzgesetz verabschiedet, das verbindliche Ziele zur Treibhausgasminimierung festlegt. Darauf aufbauend wurde 2014 das integrierte Energie- und Klimaschutzkonzept entwickelt mit über 100 Maßnahmen, um die Ziele die wir dem Klimaschutzgesetz gesetzt haben auch tatsächlich erreichen zu können.

Allerdings müssen wir auch sehen, dass der Klimawandel, wie eingangs bereits dargestellt, heute bereits Fakt ist. Selbst wenn wir die Klimaerwärmung deutlich unter 2 Grad halten könnten, wie das ja in Paris als Ziel beschlossen wurde, bedeutet das nicht, dass es keinen Klimawandel geben wird. Ich persönlich bin skeptisch, ob wir das 2 °C-Ziel erreichen werden. Vor allem vor dem Hintergrund, dass wir heute schon eine Erhöhung der Jahresdurchschnittstemperatur von 1,35 Grad in Baden-Württemberg messen. Wenn es uns dennoch gelingen sollte, das 2 °C-Ziel zu erreichen, wäre das ein sehr großer Erfolg. Und Zielerrei-

chung bedeutet, dass die Veränderungen, die aus dem Klimawandel resultieren, einigermaßen beherrschbar bleiben. Erreichen wir das Ziel nicht, wird es etwas schwieriger. Deshalb müssen wir uns mit den Folgen des Klimawandels auseinandersetzen. Nur so können wir die Verwundbarkeit des Landes mindern und mögliche Klimafolgekosten in Grenzen halten bzw. senken.

Wir nehmen die Anpassung an den Klimawandel in Baden-Württemberg sehr ernst. In den vergangenen sechs Jahren, um ein Beispiel herauszugreifen, haben wir die Haushaltsansätze für Hochwasserschutz und Gewässerökologie im Landeshaushalt von rund 25 Mio. € auf über 50 Mio. € angehoben. Den Mittelansatz werden wir auf diesem hohen Niveau auch in den kommenden Jahren halten. Investitionen in den Hochwasserschutz sind ein Beispiel für die Anpassung an den Klimawandel.

Meine Damen und Herren, Klimawandel und Anpassung gehören zwingend zusammen. Es wird z. B. weitere Veränderungen in den Oberflächengewässern geben, beispielsweise hinsichtlich Temperatur, Nährstoff- und Sedimenteinträge durch häufigere, extreme Niederschläge. Das wirkt sich letztlich auch auf die Lebensgemeinschaften in den Gewässern aus: Manche Arten können seltener werden oder verschwinden, weil sie sich an die verändernden Bedingungen nicht anpassen können oder weil sie durch einwandernde Arten verdrängt werden. Auch dafür gibt es in Baden-Württemberg erste Beispiele. Die Wirkungszusammenhänge beeinflussen sich gegenseitig und sind so vielschichtig, dass sie sich auf absehbare Zeit nicht modellieren oder vorhersagen lassen. Außerdem fehlen bisher langfristige Untersuchungen und belastbare Daten. Daher haben sich die KLIWA-Partner zusammen mit dem Land Hessen dazu entschlossen, künftig ein gemeinsames gewässerökologisches Monitoring durchzuführen zu dem ich heute den Startschuss geben darf. Das gewässerökologische Monitoring der KLIWA-Länder ist eine neue richtungsweisende Aufgabe mit dem Ziel, die Auswirkungen des Klimawandels aufzuzeigen und um die Zusammenhänge besser zu verstehen.

Ich habe am Anfang meiner Rede erwähnt, dass der Klimawandel Extremwetterlagen wie Hoch- und Niedrigwasser, Starkregen und Hagelschlag begünstigt. Mit Hoch- und Niedrigwasser sowie den dazugehörigen Vorsorgekonzepten beschäftigen wir uns in Baden-Württemberg schon seit vielen Jahren. Das Thema Starkregen ist mit den Ereignissen in Braunsbach im Mai 2016 wieder verstärkt in den Blick gerückt. Bereits im Sommer 2016 haben wir einen Leitfaden veröffentlicht, der den Kommunen aufzeigt und hilft, das Risiko in ihrer Kommune zu beurteilen und Vorsorgemaßnahmen zu entwickeln.

Dass wir vom Klimawandel in vielfältiger Weise betroffen sind, haben die Reden heute bereits deutlich gemacht. Der Wandel verlangt uns sowohl Flexibilität als auch ein ständiges Nachsteuern ab. Die Vielfalt der zu bearbeitenden Themen zeigt sich auch im Veranstaltungsprogramm des Symposiums. Wir dürfen uns auch auf viel fachlichen Input freuen aber auch auf zwei Gäste, die wir sonst vor allem aus dem Fernsehen kennen. Harald Lesch und Sven Plöger darf ich an der Stelle ganz herzlich begrüßen.

Herzlichen Dank für Ihre Aufmerksamkeit.

Die Anpassungsstrategie in Bayern

Ulrike Scharf MdL
Bayerische Staatsministerin für Umwelt und Verbraucherschutz

Herzlichen Dank lieber Herr Plöger für die Anmoderation. Offensichtlich sind wir im selben Jahr geboren. Auch ich habe jetzt bald ein halbes Jahrhundert auf dem Rücken. Ich habe in der Schule gelernt, dass München rund 1,1 Mio. Einwohner hat. Wir wissen in der Zwischenzeit, dass es nun 1,5 Mio. sind und dass wir auf weitere 300.000 bis zum Jahr 2030 zusteuern. Also Sie haben sich die Weltbevölkerung gemerkt und sehen ja die Veränderungen. Ich projiziere es auf München. Wir wissen alle, was damit an Herausforderungen verbunden ist.

Sehr geehrter Herr Staatssekretär, Herr Dr. Griese, ich freue mich, dass wir uns hier so schnell wieder sehen. Wir waren erst kürzlich bei der Umweltministerkonferenz in Brandenburg gemeinsam unterwegs. Sehr geehrte Frau Oberbürgermeisterin Mergen, sehr geehrte Frau Präsidentin Barth, Herr Plöger, sehr geehrter Herr Lesch, meine Damen und Herren, Expertinnen und Experten.

Ich freue mich wirklich sehr, dass ich heute dabei sein kann beim nun mehr 6. KLIWA-Symposium. Unsere gemeinsamen länderübergreifenden Fachtagungen zum Thema Klimawandel und dessen Auswirkungen auf die Wasserwirtschaft sind für mich sehr wichtig. Nicht umsonst nimmt man da eine lange Anreise auf sich. Aber mir sind Erkenntnisse und wissenschaftliche Diskussionen unglaublich wichtig. Auf der einen Seite, was Sie wissenschaftlich erforschen, aber auch auf der anderen Seite, wie man diese Erkenntnisse herunterbrechen kann, wie man sie der Politik vermitteln kann. Für mich sind es immer die Grundlagen für politische Entscheidungen und deswegen bin ich heute gerne bei Ihnen.

Wir wissen, dass Klimaschutz und nachhaltige Wasserinfrastruktur seit langem die zentralen Fragen für die Zukunftssicherung unseres Landes sind. Wir spüren zunehmend in Bayern den Druck weiter zu handeln. Wenn wir in manche Regionen der Welt schauen, wissen wir, dass der Druck enorm hoch geworden ist. Ich hatte in diesem Jahr kurz hintereinander zweimal die Gelegenheit, in die Welt zu reisen, in sehr unterschiedliche Länder mit sehr kritischen Situationen, um den Umgang damit kennen zu lernen. Ich war in Israel und in Indien. Auch in diesen Ländern steht das Motto unseres Symposiums ganz oben auf der Agenda, nämlich das Risiko, Klima-Herausforderungen zu managen.

Auch diese Länder müssen sich auf verschiedene Weise damit beschäftigen und sie sind auf einem sehr unterschiedlichen Sachstand. Während man in Indien gerade dabei ist, Klimafolgenabschätzungen in den einzelnen klimatischen Regionen durchzuführen - und Sie wissen, wie groß dieses Land ist und Sie wissen auch, dass es bald das bevölkerungsreichste Land sein wird. Indien wird China überholen. Wenn man auf der anderen Seite aber Israel betrachtet, das mit einem ganzen Bündel an Maßnahmen die Trendwende vom Wassermangel zu einer nachhaltigen und gesicherten Wasserversorgung schon recht gut geschafft hat; das ganz im Sinne unseres heutigen Tagungsmottos auch diese Herausforderungen angenommen und erfolgreich gemanagt hat. An mancher Stelle können wir hier etwas lernen.

Meine Damen und Herren, der Klimawandel nimmt weiter Fahrt auf, das wissen wir. 2016 war das heißeste Jahr seit Beginn der Wetteraufzeichnungen und ich pflege gerne zu sagen, ein heißes Jahr macht noch keinen Klimawandel. Aber wenn wir uns anschauen, dass wir nun 16 der 17 wärmsten Jahre seit der Wetteraufzeichnungen im 21. Jahrhundert verzeichnen und dabei bereits seit 1880 Wetterdaten aufzeichnen. Ich glaube, man muss die Fakten wahrnehmen und nicht von chinesischen Erfindungen sprechen, so wie das mancher Präsident auf der anderen Seite der Erde tut. Wir in Bayern sind zwar auf der Insel der Seligen,

wie Sie wissen, aber auch hier, was den Klimawandel betrifft, sind wir betroffen. Dürreperioden in Unterfranken – dort treten Situationen auf, Frau Oberbürgermeisterin, wie Sie sie auch beschreiben. Gerade mit Blick auf die Winzer und die Landwirtschaft, die ja wirklich Sorge haben, in Zukunft ihre Produkte noch produzieren zu können.

Und wir haben auf der anderen Seite Hochwasserkatastrophen wie in Simbach 2016, die uns ganz drastisch vor Augen geführt wurden. Die Vorboten des Klimawandels haben sich hier bemerkbar gemacht. Erst vor wenigen Wochen hatten wir in der Nähe von Aschaffenburg, also ganz nah an Frankfurt, wieder ein Starkregenereignis mit dramatischen Verwüstungen; Gott sei Dank ohne Personenschäden.

In den vorliegenden Daten sehen wir auch eine ganz deutliche Sprache. Wir verzeichnen eine deutliche Zunahme der Lufttemperatur – jetzt für Bayern gesprochen. Im Jahresmittel seit 1931 haben wir eine Zunahme von 1,3 Grad und seit 2000 sehen wir eine Verstärkung des Trends mit neun Jahren unter den zehn wärmsten seit 1931. Die Trockenheit in den Sommermonaten spüren wir vor allen Dingen da, wo wir sowieso schon Schwierigkeiten damit haben, nämlich im Fränkischen.

Und wir haben ja unseren bayerischen Klimareport Ende 2015 vorgestellt – Herr Dr. Becker, Sie waren auch intensiv an diesem Klimareport beteiligt – der uns für die einzelnen Regionen aufzeigt, wie sich das Klima in Bayern verändert. Wir sehen ganz klar diesen Trend: Die Sommer werden trockener werden und wir werden mehr Trocken- und mehr Niedrigwasserperioden haben. Sie werden häufiger auftreten, sie werden aber auch extremer auftreten.

Und bereits deutlich messbar – und auch das ist ein Alarmzeichen – ist die Temperaturzunahme unserer Gewässer. Sie werden auch weiter steigen. Bis zum Ende des Jahrhunderts rechnen wir mit bis zu drei Grad. Besonders besorgniserregend ist, wenn wir zum zweiten Mal in Folge einen Winter verzeichnen, in dem nicht genug Grundwasser für den Sommer gebildet werden konnte, also auch hier eine Folge dieser negativen Bilanz. Die Grundwassermessstellen zeigen für uns an einigen, nicht allen, Gott sei Dank, historisch niedrige Stände an. Nach dem Trockenjahr 2015 ist das wirklich keine gute Nachricht.

Insgesamt hat es den Anschein, als würden die Extremereignisse zunehmen. Sie kommen öfter, sie kommen häufiger. Und das bedeutet für uns, wir müssen uns einstellen. Wir müssen uns darauf einstellen, wir müssen uns anpassen. Je schneller wir das schaffen, desto besser wird es sicherlich sein und dazu brauchen wir aus meiner Sicht ein strategisches Vorgehen. Wir haben deshalb 2016 die bayerische Klimaanpassungsstrategie von 2009 aktualisiert. Sie liegt im Übrigen draußen aus, habe ich gesehen. Also wer Interesse hat, kann sich gerne bedienen.

Und es ist meine Überzeugung, meine Damen und Herren, dass die Wasserwirtschaft den Anstoß für die Anpassung geben muss. Sie muss mit gutem Beispiel vorangehen, vernetzt mit allen Lebensbereichen, dem Wissen dass sie selbst ein Teil unseres gesamten Systems ist. Aber hier sind viele dann gefragt, sich auch weiterhin anzupassen und nachzuziehen.

Das Beispiel Indien hat mir gezeigt, wichtig für die Versorgung der Bevölkerung ist unser wichtigstes Nahrungsmittel, das Trinkwasser. Das müssen wir sicherstellen. Wir haben dazu für uns in Bayern eine Wasserversorgungsbilanz 2016 flächendeckend erstellt. Und untersucht wurde, ob unsere Wasserversorgung bis 2025 unter Berücksichtigung der Auswirkungen des Klimawandels und natürlich auch der demographischen Entwicklung noch sicher ist. Und hier kann ich Ihnen eine gute Nachricht melden: Die Versorgung der Bevölkerung mit Trinkwasser ist sicher. Die Reserven decken den Bedarf der Zukunft, aber sie wissen selbst, wie fragil dieser Zustand sein kann.

Meine Damen und Herren, wir haben in der Klimaanpassungsstrategie für die Wasserwirtschaft drei wesentliche Schwerpunkte identifiziert, die uns als wichtig erscheinen und dafür eine Reihe von Einzelmaßnahmen aufgelistet.

Der erste Schwerpunkt liegt im Bereich des Niedrigwassers. Besonders betroffen, ich habe es vorher schon erwähnt, ist bei uns in Bayern Unterfranken. Nicht nur die Wasserversorger sind hier besorgt, sondern Sie wissen selbst, woher die Interessen kommen. Dort wo Wasser ohnehin knapp ist, steigt dann auch noch der Bedarf der Landwirtschaft für die Bewässerung. Wir haben glücklicherweise ein Wasserüberleitungssystem, das uns seit vielen Jahrzehnten hilft. Wenn im Norden Bayerns das Wasser zu wenig wird, pumpen wir Millionen von m³ Wasser jedes Jahr im Sommer nach Norden. Das hilft für die Grundversorgung. Aber wir haben aufgrund der Situation drei Pilotregionen ausgewählt in Unterfranken, in denen wir ein Projekt zum Thema Niedrigwassermanagement durchführen. Damit die Nutzungskonflikte rechtzeitig erkannt, zusammengeführt und Steuerungsstrategien entwickelt werden, um kurz- und langfristige Lösungen aus diesen Pilotversuchen zu erarbeiten.

Ein zweiter Schwerpunkt betrifft genau das Gegenteil, nämlich den Schutz vor dem Hochwasser. Ich bin schon stolz, dass wir unser Hochwasserschutzaktionsprogramm 2020+ aufgelegt haben. Weil wir seit 1999 ein Förderprogramm haben und das immer wieder fortgeschrieben haben, auch mit den Erkenntnissen der Ereignisse aus 2013, aber auch aus 2016. Stolz deswegen, weil wir insgesamt 3,4 Mrd. € dafür in die Hand nehmen und das größte wasserbauliche Infrastrukturprogramm, das wir jemals gesehen haben, auf den Weg gebracht haben. Es hat drei Schwerpunkte, drei Säulen: zum einen ist es der Hochwasserrückhalt, der natürliche Hochwasserschutz, zum zweiten der technische Hochwasserschutz und zum dritten auch die Hochwasservorsorge. Und da kommen natürlich die Wetterexperten mit ins Boot für die Vorhersage. Und wir wissen, wie schwer wir uns tun mit den Starkregenereignissen und den vielen hunderten von kleinen Gewitterzellen, die man nicht einfach so erfassen kann. Aber genau hier wollen wir in der Vorsorge auch so gut werden, um die Menschen zu warnen für den Fall, dass Sie mit einem Starkregen oder Hochwasser zu rechnen haben. Weil wir wissen, dass auch kein Gewässer dem anderen gleicht, brauchen wir für jedes Hochwasser, für jeden Fluss eine maßgeschneiderte Lösung. Wir haben uns zunächst mal für den technischen Hochwasserschutz die 300 km bayerische Donau ins Auge genommen und wollen dort Flutpolder bauen und ausweisen, die uns bei Extremhochwasser helfen, schwere Überschwemmungen die wir von Bildern 2013 aus Passau, Deggendorf, Fischerdorf kennen, zu vermeiden. Ganz aktuell auf das Jahr 2016 blickend und die lokalen Sturzfluten: Wir haben die Thematik Sturzfluten in dieses Aktionsprogramm mit aufgenommen, unmittelbar nach dem Ereignis. Ich konnte dafür 30 neue Stellen gewinnen für unsere Wasserwirtschaft. Es ist ganz entscheidend, denn wir wollen in mehreren Projekten die Aspekte der extremen Starkregenereignisse und deren zukünftige Entwicklung beleuchten.

Der dritte Schwerpunkt liegt im Bereich der Gewässerökologie und ganz konkret: Wir wollen die Resilienz der Gewässer stärken. Und dazu müssen wir die Ökosysteme und Flüsse und Seen in ein stabiles Gleichgewicht bringen und halten. Ganz nach dem Tenor der Europäischen Wasserrahmenrichtlinie müssen wir kurz- und mittelfristig den guten ökologischen und chemischen Zustand erreichen. Wir investieren hier auch sehr viel Geld, beispielsweise 33 Mio. € für die Durchgängigkeit des Gewässernetzes für Wasserlebewesen, um diese wieder herstellen zu können. Den Kommunen stellen wir bis 2021 Mittel in Höhe von rund 50 Mio. € für die Umsetzung der Maßnahmen zur Renaturierung von kleineren Gewässern zur Verfügung. Schließlich stellen wir für die nächsten fünf Jahre Fördermittel für die Bewirtschaftungsperiode in Höhe von rund 750 Mio. € für Maßnahmen zur Vermeidung bzw. Verminderung der Einträge von schädlichen und unerwünschten Stoffen aus den Abwasseranlagen und aus der landwirtschaftlichen Nutzung bereit. Hinzu kommt ein Förderprogramm der Wasserwirtschaft und der Landwirtschaft, welches mit entsprechenden Mitteln ausgestattet ist. Ich finde, es ist schon eigenartig, dass man immer solche „Reparationsleistungen“ mit sehr viel Geld anstoßen muss; nichtsdestotrotz müssen wir diesen Zustand einfach feststel-

len. Ich habe mich oft auch schon gefragt, warum man wohl vor rund 100 Jahren unsere Flüsse begradigt hat, welche Ideen dahinter gesteckt haben. Jetzt machen wir das alles wieder umgekehrt, reparieren wir wieder. Aber so ist die Geschichte nun mal, die kann man nicht zurückdrehen, sondern man kann sie nur korrigieren. Und in diesem Bereich sind wir gut beraten, auch entsprechend Geld in die Hand zu nehmen. Ja, mit mancher dieser Maßnahmen und Investitionen setzen wir dem Klimawandel die Stabilität des Ökosystems Gewässer wirklich entgegen und machen unsere Gewässer fit für die Zukunft.

Es ist ganz entscheidend, es ist eine Mammutaufgabe für die Theorie, für die Forschung aber auch für die Praxis und die Umsetzung ist es nicht einfach und deswegen bin ich froh, dass wir bei solchen Anstrengungen nicht alleine unterwegs sind und dass unser Gemeinschaftsprojekt KLIWA hier wirklich hervorragende Arbeit leistet, interdisziplinär aber auch länderübergreifend. Und da sage ich allen Beteiligten herzlichen Dank. Ihnen Frau Präsidentin auch danke für diesen schönen Rückblick, der mich nochmals beeindruckt hat, wie lange und intensiv man in dieser Gemeinschaft zusammenarbeitet. Das ist ganz wichtig, für diese großen Zukunftsaufgaben. Meine Damen und Herren, das Tagungsprogramm des Symposiums bildet alle unsere Schwerpunkte und Herausforderungen hervorragend ab. Es bietet einen zusätzlichen Blick über unsere Grenzen hinaus, etwa auch in die Niederlande und die Schweiz. Und so muss es gehen: dass wir voneinander lernen, dass wir schnell unterwegs sind und dass wir die Anpassungen an den Klimawandel gemeinsam finden. Diese Maßnahmen sind ganz dringend notwendig, denn der Klimawandel ist nicht aufzuhalten, das wissen wir. Die einzige Chance, die wir haben, ist uns anzupassen. Ich wünsche der Tagung einen erfolgreichen Verlauf und gute Erkenntnisse, auch verbunden mit dem Wunsch, dass die Kenntnisse, die Sie aus Ihrer Fachlichkeit und aus Ihren wissenschaftlichen Ansätzen heraus gewinnen, übersetzbar sind in die Politik, dass der Austausch intensiv stattfindet, dass sie uns Grundlagen für politische Entscheidungen liefern können. Herzlichen Dank und eine erfolgreiche Tagung.

Klimaschutz in Rheinland-Pfalz

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

Sehr geehrte Frau Präsidentin Barth,
sehr geehrte Frau Oberbürgermeisterin Mergen,
liebe Frau Ministerin Ulrike Scharf,
sehr geehrter Herr Dr. Becker,
sehr geehrter Herr Plöger,
meine sehr verehrten Damen und Herren,

herzlichen Dank dafür, dass ich auf dem 6. KLIWA-Symposium für Rheinland-Pfalz einen Beitrag leisten darf. Ich freue mich sehr, heute hier in Baden-Baden zu sein. Ich darf vorab unsere Ministerin Ulrike Höfken entschuldigen, die gerne selbst gekommen wäre, heute aber auf einer Ministerratsklausurtagung gefordert ist. Sie bedauert es sehr, nicht hier sein zu können. Zugleich gibt mir das die Gelegenheit, sie hier zu vertreten. Ich freue mich auch deshalb, bei diesem 6. Symposium dabei zu sein, weil ich von dem 5. Symposium in Würzburg noch weiß, wie exzellent im KLIWA-Vorhaben gearbeitet wird, welche Erkenntnisfortschritte wir gewonnen haben und seither gemeinsam in die Praxis umsetzen.

Es ist schon gesagt worden, ich will es nur nochmal bekräftigen: Der Klimawandel ist keine Erfindung, nicht aus China und auch nicht aus sonstigen Gefilden des Planeten, er ist Realität. Er ist dramatische Realität. Wir haben uns, und das ist richtig, mit der Tatsache auseinander zusetzen, dass es nach wie vor, möglicherweise sogar zunehmend Leute gibt, die das verleugnen. Das leider nicht nur in Übersee, sondern auch bei uns. Wir haben also entsprechende Vertreter – jedenfalls gilt das für Rheinland-Pfalz, leider auch für Baden-Württemberg, für Bayern Gott sei Dank noch nicht – auch in den Landtagen sitzen, die genau das versuchen uns zu erzählen. Aber es ist falsch und unsere erste und wichtigste Aufgabe ist, die wissenschaftlichen Fakten zu transportieren, deutlich zu machen und zu unterstreichen, dass der Klimawandel keine Legende oder gar eine Lüge, sondern Realität ist.

Das möchte ich Ihnen auch für Rheinland-Pfalz verdeutlichen. Seit Beginn der regelmäßigen Wetteraufzeichnung 1881 stieg die Temperatur im Jahresmittel um 1,5 °C an. Damit liegen wir zusammen mit Bayern und dem Saarland über dem Bundesdurchschnitt, der bei 1,4 °C liegt. Die vergangenen drei Jahre haben in Rheinland-Pfalz zu den wärmsten Jahren seit Beginn der Wetteraufzeichnung gezählt. Mit der Veränderung des Klimas verändert sich auch der Wasserhaushalt. Die Winter werden wärmer und feuchter, die Niederschläge im Sommerhalbjahr zeigen eine leicht fallende Tendenz. Außerdem beobachten wir vermehrt lokal und regional jeweils extrem ausfallende Wetterereignisse, insbesondere Sturm, Hagel und Starkregen. Ausgelöst von Bächen, deren Namen man vorher auch als Landesbewohner nie gehört hat.

Ich will Ihnen ein Beispiel nennen: Stromberg, eine Gemeinde im Hunsrück, die ich letztes Jahr im Juni, einen Tag nachdem dort ein Starkregenereignis stattgefunden hat, besucht habe. Dort ist lokal begrenzt in einer Stunde so viel Niederschlag gefallen wie sonst durchschnittlich in einem Monat. Begünstigt durch die trichterförmige Tallage Strombergs haben diese Regenmassen eine unglaubliche Verwüstung im Ort angerichtet. Gott sei Dank sind keine Menschenleben zu beklagen gewesen, aber schlimme Schäden. Und das ist nur eines von vielen Ereignissen, das deutlich macht, dass wir dramatische Veränderungen vor uns haben. Wir hatten allein im September 2014 14 Gemeinden in der Nordpfalz, in denen Starkregenereignisse stattgefunden haben mit insgesamt über 10 Mio. € Schäden. Dass auch überregionale Hochwasserereignisse uns zu schaffen machen, muss ich hier nicht be-

sonders betonen. Ich will nur an die dicht hintereinander liegenden Rheinhochwasser 1988, 1993 und 1995 erinnern, aber auch an die jüngsten Hochwasser im Juni 2013 am Rhein oder im Mai/Juni 2016 an einzelnen Nebenflüssen des Rheins, der Mosel und der Nahe, wo die Flüsse in einer Kategorie von 30 bis 100jährlichen Hochwasser über die Ufer getreten sind.

Auf der anderen Seite haben wir lang anhaltende Trockenperioden. Davon war schon vorhin die Rede, ich will es hier nicht nochmal wiederholen, nur deutlich machen, dass auch das dramatische Folgen für die Wasserwirtschaft hat.

Der Klimawandel hat aber auch negative Auswirkungen auf unsere Wirtschaftsbereiche. Ich bin aus Rheinland-Pfalz, wir sind das Weinbauland Nr. 1. Und auch im Weinbau ist jetzt schon der Klimawandel dramatisch zu spüren. Erstes Beispiel: Wir haben seit zwei oder drei Jahren mit der Kirschessigfliege zu kämpfen. Ein Schädling, der im Weinbau riesige Schäden anrichtet, gegen den wir kein Mittel haben und der ein Klimafolgeschädling ist. Die Kirschessigfliege hatte hier so lange keine Überlebenschance und konnte deshalb auch keine Schäden anrichten, so lange es Winter mit längeren Frostperioden gab. Diese haben wir aber nicht mehr oder jedenfalls nicht mehr in dem Ausmaß und deswegen kann sich die Kirschessigfliege hier ungehemmt ausbreiten und riesige Schäden verursachen. Das führt dann dazu, dass in einem Art Notbehelf die Winzer mit der Weinlese früher anfangen müssen und versuchen, den Schäden durch die Kirschessigfliege zuvor zu kommen. Vielen nützt das auch nichts, es bringt im Übrigen auch den ganzen Zeitplan durcheinander, weil die Weinlese oft schon im August beginnt. Das passt übrigens auch gar nicht mehr zu den ganzen Weinfesten, aber das sind nur die Nebenauswirkungen. Der Hauptpunkt ist, dass wir in eine richtig schwierige Situation geraten.

Oder zweites Beispiel: Eines der Exportprodukte der rheinland-pfälzischen Weinwirtschaft, weltweit beliebt und nachgefragt: der Eiswein als spezielles Qualitätsprodukt. Ein einmaliges Naturprodukt, das es eben ermöglicht, aus einem natürlichen Prozess eine Süße zu produzieren, die man sonst nicht erreichen kann. Der Eisweinmarkt ist nicht mehr belieferbar. Wir haben so milde Winter, dass wir keinen Eiswein mehr produzieren können. Sie wissen, man braucht dafür mehrere Tage lang -7 °C, sonst ist Eiswein nicht zu produzieren. Wir haben den ganzen Markt verloren bzw. sind dabei ihn zu verlieren. Restbestände sind natürlich noch da. Also wenn Sie die Gelegenheit haben, Eiswein zu kaufen, sollten Sie das tun und ihn gut aufheben, weil das nicht mehr lange der Fall sein wird.

Das unterstreicht, dass der Klimawandel nicht nur etwas ist, was mit Wetteränderung zu tun hat und uns dazu auffordert, uns über das Wetter und die daraus folgenden Wetterkapriolen Gedanken zu machen. Der Klimawandel hat auch tiefgreifende wirtschaftliche Auswirkungen. Das ist der Punkt. Es greift tief ein in Landwirtschaft und Weinbau, aber auch in viele andere Wirtschaftsbereiche. Wir haben in unserem Land eine Menge gemacht, um dem Klimawandel entgegen zu wirken und sind dabei das in verschiedenen Bereichen auszubauen.

Ich will hier mit dem anfangen, was Frau Ministerin Scharf eben auch schon als Fehler der Vergangenheit bezeichnet hat, die wir wieder ausbügeln müssen: Nämlich unsere Gewässer wieder in einen natürlichen Zustand zu versetzen, sie zu renaturieren. Dazu beizutragen, dass durch größere Retentionsräume, durch eine höhere ökologische Qualität eben auch einen besserer Hochwasserschutz erreicht wird. Wir haben dazu im Land das Gewässerschutzprogramm „Aktion Blau Plus“ aufgelegt, mit welchem wir in den letzten Jahren auf einer Länge von rund 900 km Gewässerrenaturierungen vorgenommen haben und dafür über 330 Mio. Euro investiert haben. Damit sind wir ein gutes Stück vorangekommen. Daneben planen wir zwei Reserveräume für Extremhochwasser am Rhein mit über 60 Mio. m^3 Rückhaltevolumen, die in den nächsten Jahren realisiert werden sollen. Auch das muss man tun im Sinne des vorsorgenden Hochwasserschutzes. Außerdem unterstützen wir die Kommu-

nen bei der Bewältigung bzw. dem vorausschauenden Management von Starkregenereignissen und Hochwasser, von denen ich eben auch gesprochen habe. Wir haben dazu zusammen mit den baden-württembergischen Kollegen einen Leitfaden Starkregen herausgegeben, der eine erste Handreichung dafür geben soll, wie wir mit dem Problem gemeinsam umgehen sollen.

Dass wir uns anpassen an den Klimawandel, ist allerdings nur eine Seite der Medaille. Gleichzeitig ist es genauso wichtig, vorgreifend alles zu tun, um die Ursachen des Klimawandels zu bekämpfen und den Temperaturanstieg möglichst zu begrenzen. Wir sehen uns da auch in der Verpflichtung des Klimaabkommens von Paris, was im Dezember 2015 verabschiedet wurde. Denn das verpflichtet ja alle Staaten der Erde, die es ratifiziert haben und damit auch uns, als Teil der Bundesrepublik, unseren Beitrag zu leisten, damit die Ursachen des Klimawandels bekämpft werden. Mit der Verabschiedung des rheinland-pfälzischen Klimaschutzgesetzes 2014 kommen wir dieser Aufgabe nach. Wir gehören damit zu den ersten Bundesländern, die den Klimaschutz auf eine gesetzliche Grundlage gestellt haben. Mit unserem Klimaschutzgesetz haben wir nicht nur ambitionierte Ziele festgelegt, sondern auch geregelt, dass die Maßnahmen zur Bekämpfung des Klimawandels in einem Klimaschutzkonzept festgehalten werden. Auch dieses Klimaschutzkonzept ist inzwischen verabschiedet. Es benennt knapp 100 konkrete Maßnahmen aus acht verschiedenen Handlungsfeldern. Das sind die Handlungsfelder Gewerbe, Handel, Dienstleistung und Verbraucher; private Haushalte; Industrie, prozessbezogene Emissionen; Strom- und Wärmeerzeugung; der ganze Bereich der öffentlichen Hand; Abfall und Wasser; Verkehr sowie Landnutzung.

Ich will Ihnen jetzt nicht alle 100 Maßnahmen aufzählen, das würde, glaube ich, das Auditorium hier zu sehr langweilen. Stattdessen möchte ich zwei Beispiele herausgreifen und deutlich machen, dass es viele Tätigkeitsfelder gibt, die wir erfolgreich bearbeiten können, um den Klimaschutz voranzubringen.

Das eine betrifft das Handlungsfeld Landnutzung, wo wir zum Beispiel ein Programm zum Erhalt und der Renaturierung der Moore aufgelegt haben. Nun werden Sie sich vielleicht fragen, was macht denn Rheinland-Pfalz mit Mooren. Dass der Schutz und die Wiederherstellung von Mooren Sinn macht, glaube ich, leuchtet unmittelbar ein. Die Moore sind ein ganz wesentlicher CO_2-Speicher und deshalb auch in jedem Fall schützenswert. Aber was hat Rheinland-Pfalz damit zu tun? Auch wenn unser Land nicht gerade bekannt für seine Moore ist, haben wir ungefähr 7 000 ha ehemalige und bestehende Moorflächen und die gilt es zu erhalten und zu renaturieren. Und das tun wir. Beispielsweise haben wir ein großes Projekt in unserem Nationalpark Hunsrück-Hochwald gestartet, das übrigens durch zwei LIFE-Projekte unterstützt wird. Aber auch außerhalb des Nationalparks wollen wir die Moorrenaturierung durch Förderangebote und Unterstützungsangebote voranbringen. Ich möchte noch einen Schritt weiter gehen. Es geht am Ende natürlich nicht nur um Moore, es geht insgesamt um Grünland. Wir wissen, dass Grünland ein großer CO_2-Speicher ist. Also müssen wir alles tun, um Grünland zu erhalten und um Grünlandflächen wieder zu gewinnen. Grünland ist ideal um eine entsprechende Speicherung von CO_2 zu erreichen.

Das zweite Handlungsfeld, das ich exemplarisch mit einem Beispiel unterlegen will, ist der Bereich Wasserwirtschaft. Wir fördern mit erheblichen Mitteln die Kommunen dabei, in ihren Kläranlagen den Klärschlamm so zu nutzen, dass dieser die Abwasserbehandlung auf einem hohen Niveau sicherstellt und aus ihm im Nachgang zudem Biogas produziert wird. Die Biogaserzeugung ist ein einfaches und eingeübtes technisches Verfahren. Aus Klärschlamm kann man, wie aus Gülle und aus allen anderen biogenen Reststoffen, Biogas erzeugen. Das machen wir deshalb, weil wir damit die Energiewende voranbringen. So haben wir mit dem Biogas einen erneuerbaren Energieträger, der in der Lage ist, flexibel eingesetzt zu werden und damit auch ein Stück als Regel- und Ausgangsenergie für die schwankende Windkraft- und Photovoltaikerzeugung zur Verfügung zu stehen. Wir sind inzwischen so weit, dass es sich in aller Regel schon ab einer Kläranlagengröße von 10 000 Einwohnern lohnt,

die Kläranlage für die Biogasnutzung zu ertüchtigen. Ursprünglich ist das nur für die ganz großen Kläranlagen gemacht worden. Unser Ziel ist es, dass es auch für Kläranlagengrößen ab 6 000 bis 7 000 Einwohner in der Zukunft rentabel ist, Biogas zu produzieren und das energetisch zu nutzen und damit natürlich die fossile Energieerzeugung zu begrenzen. Die Dinge sind soweit gediehen, dass wir inzwischen in Rheinland-Pfalz die ersten Kläranlagen haben, die nicht nur ihre eigene Energie damit erzeugen, sondern die mit dem Überschuss als Regel- und Speicherenergielieferant zur Verfügung stehen. Die Kläranlage Kaiserslautern nimmt als erste Kläranlage am Regelenergiemarkt teil. Die Kläranlagen Kaiserslautern und Trier haben im Jahr 2016 die Energieneutralität erreicht. Mittlerweile sind sie über das Jahr betrachtet sogar energiepositiv. Weitere Kläranlagen werden folgen. Wir haben inzwischen 85 Kläranlagen, die auf diese Art und Weise Biogas erzeugen und nutzen. Das deckt ungefähr 60 % des gesamten in Rheinland-Pfalz anfallenden Klärschlamms ab. Wir wollen dahin kommen, dass in den nächsten Jahren bis zu 50 weitere Kläranlagen auf diese Technik umgerüstet werden, so dass wir dann bei wahrscheinlich 80 % bis 90 % des insgesamt anfallenden Klärschlamms liegen. Ein Beispiel dafür, was die Wasserwirtschaft leisten kann, um den Klimawandel zu bekämpfen und zugleich ein Stück zur Energiewende beizutragen.

Ich denke, dass damit auch deutlich wird, dass es bei der Ursachenbekämpfung darauf ankommt, konkret voranzugehen und nicht darauf zu warten, was andere tun. Dass es eben auch nicht reicht, nur die Symptome zu behandeln, sondern die Ursachen anzugehen. Wichtig ist, das muss man auch vielen sagen, die immer noch skeptisch sind: Natürlich kostet die Bekämpfung des Klimawandels und die Anpassung an den Klimawandel Geld. Aber das Abwarten und das Nichtstun kostet noch viel mehr Geld. Das ist eine Erkenntnis, die uns hier einigen sollte und in diesem Sinne hoffe ich auf neue, interessante Erkenntnisse und guten Fortschritt bei dem Symposium heute in Baden-Baden.

Herzlichen Dank für Ihre Aufmerksamkeit.

„Unsicher sein und trotzdem handeln“

Dr. Paul Becker
Vizepräsident des Deutschen Wetterdienstes

Sehr geehrte Frau Staatsministerin Scharf,
sehr geehrter Herr Minister Untersteller,
sehr geehrter Herr Staatssekretär Dr. Griese
meine Damen und Herren,

es ist nun schon bald 30 Jahre her, seitdem der erste IPCC-Bericht erschienen ist. KLIWA gibt es seit mehr als 15 Jahren und KLIWAS, die Bundes-Schwester von KLIWA, arbeitete von 2009 bis 2013. Darüber hinaus gab und gibt es noch zahlreiche Forschungsarbeiten zum Thema Wasser im Kontext Klimawandel. Die Frage, die vermutlich nicht nur ich mir stelle, ist: Wo stehen wir bei der Anpassung gerade auch im Bereich des Sektors Wasser? Haben wir genug gelernt? Sind wir genügend vernetzt? Können wir auf der Basis des vorhandenen Wissens handeln? Tun wir genug?

Den Stand des Wissens und der Vernetzung, so wie ich ihn als Angehöriger einer Bundesoberbehörde, des Deutschen Wetterdienstes sehe, möchte ich im Lutherjahr in Thesen formulieren, aber keine Sorge, bei mir werden es heute fünf und nicht 95 sein!

These 1: Die Abhängigkeit der Temperatur von CO_2 ist gut verstanden und gut projizierbar.

Bevor ich mich mit dem Thema Wasser beschäftige, möchte ich doch noch drei Sätze zur Temperatur sagen. Ich will da ganz ehrlich sein. Die Temperatur sichert einem Meteorologen immer ein Erfolgserlebnis. Und tatsächlich, sowohl bei der Beobachtung als auch bei der Projektion hat sich die Temperatur ganz ähnlich wie bei der Wettervorhersage als gutmütiger Parameter herausgestellt. Der langfristige Trend ist vergleichsweise gut und belastbar bestimmbar. Zwar kam die Klimaforschung angesichts der vermeintlichen Erwärmungspause kurzfristig in Erklärungsnot. Aber nachdem klar geworden war, dass die größten Auswirkungen der Erwärmung in den Ozeanen stattfinden, sind wir uns bezüglich des Trends zur Erwärmung recht sicher und glauben, diese auch für Regionen in Deutschland – zumindest bis zur Mitte des Jahrhunderts – relativ gut abschätzen zu können, bevor die Unterschiede der Treibhausszenarien zum Tragen kommen. Wenn man die Szenarien RSP2.6 und 8.5 als Maßstab nimmt, wird die Erwärmung bis dahin zwischen 1 und 2 °C liegen.

These 2: Die Abschätzung der zukünftigen Entwicklung von Niederschlags- und Trockenperioden ist durchaus noch nicht vollständig bestimmbar. Und nicht nur das! Eine mindestens gleich große Herausforderung stellen die in jüngster Zeit häufiger aufgetretenen punktuellen Starkniederschläge dar. Sie können fast überall auftreten. Aber – Und das ist wichtig! – die Wahrscheinlichkeit dafür dürfte nicht überall gleich sein.

Während die Trends aus Beobachtungen und Klimaprojektionen für die Temperatur ziemlich eindeutige Ergebnisse liefern, zeigt sich der Niederschlag als wesentliche Komponente des Wasserkreislaufs in vielerlei Hinsicht launisch. Hohe räumliche und zeitliche Variabilität sind die charakteristischen Eigenschaften. Trotzdem wurde einiges erreicht. In KLIWA wurden die Erkenntnisse zu Hochwasser durch den KLIWA-Anpassungsfaktor zum Teil auch bereits in konkretes Handeln umgesetzt. KLIWAS brachte z. B. in Bezug auf die Schifffahrt am Rhein

die Erkenntnis, dass noch Zeit besteht, um sich fundiert und angemessen auf längerfristig möglicherweise veränderte Abflussverhältnisse am Rhein einzustellen.

Besondere Kopfschmerzen bereiten mir im Moment aber die sehr kleinräumigen, punktuellen Starkniederschläge. Sie haben ein ähnliches Schadenspotential wie ein Flusshochwasser, wie wir leider in den letzten Jahren feststellen mussten. Namen wie Simbach und Braunsbach haben sich in unser aller Gedächtnis eingebrannt. Bei der Frage: Wie geht es weiter? reden die Meteorologen immer gerne von der „Clausius-Clapeyron-Gleichung". Das heißt nicht viel mehr, als dass wärmere Luft mehr Wasserdampf aufnehmen kann als kältere Luft. Das heißt aber nichts anderes, als dass diese Gefahren mit dem Klimawandel in der Zukunft größer werden. Auch wenn bei der Niederschlagsbildung eine ganze Reihe weiterer Faktoren eine Rolle spielen, wie z. B. die vorherrschende Wetterlage. Mit der fortschreitenden Erwärmung steigt das Potenzial für höhere Niederschlagsmengen. Hier besteht auf jeden Fall Handlungsbedarf. **Prävention, Kommunikation, bessere Vorhersagen und Eigenvorsorge** sind die Stichworte. Denkbare präventive Maßnahmen gibt es natürlich viele. Ein Baustein zur Vorbeugung sollte aus meiner Sicht eine neue bundesweite Kartierung der Starkregen- und Sturzflutgefahr aufgrund des relief-gesteuerten Abflussgeschehens sein. Die bundesweite Kartierung solcher potentieller Hotspots böte eine erste Übersicht und gäbe Hinweise für mögliche weiterführende und verfeinerte Untersuchungen.
Starkregen wie wir ihn z. B. am 12. August 2002 in Zinnwald-Georgenfeld mit der Rekordniederschlagshöhe von 352,7 mm in 24 Stunden gemessen haben, kann im Prinzip fast überall in Deutschland auftreten. Eine offene Frage ist dennoch, ob man die regionalen Unterschiede in der Häufigkeit und der Intensität solcher kleinräumigen, kurzeitigen Extremereignisse kartieren kann.
Man sieht nicht nur an diesen Maßnahmen, dass Prävention für die Anpassung an die Überflutungsproblematik von essentieller Bedeutung ist. Hier ist derzeit eine große Dynamik vorhanden und wir sind guter Hoffnung, dass wir bei der Vorhersage kleinräumiger Starkregenereignisse besser werden. Aber es gibt Grenzen der Vorhersagbarkeit und die perfekte Vorhersage wird uns nicht immer gelingen.

Aber alle Maßnahmen wie Gefahrenhinweiskarten, verbesserte Vorhersagen, optimierte Fließwege für Starkregen und andere ingenieurtechnische Maßnahmen können unsere Mitbürger und Infrastruktureinrichtungen nicht zu 100 % schützen. Daher ist die Vorsorge der Bürgerinnen und Bürger ebenfalls ein wichtiger Aspekt in der Kette der Handelnden. Potenzielle Gefahren bewusst machen und Eigenvorsorge anregen, dies ist ein wichtiger Aspekt im Rahmen des Starkrisikomanagements.

Lassen Sie mich zum Abschluss der These 2 über die Wasserkomponente im Klimawandel noch ein paar Worte zum Meeresspiegelanstieg verlieren. Er steigt und er steigt auch an den deutschen Meeresküsten. Nach dem letzten IPCC-Bericht lag der weltweite Anstieg im „Weiter-wie-bisher-Szenario" zwischen 52 und 98 cm. Inzwischen geht die Diskussion aufgrund neuer Erkenntnis weiter. Die bei Klimaprojektionsrechnungen eingesetzten Modelle sind besser geworden. Sie erfassen aktuell einerseits noch nicht alle relevanten Komponenten für den Meeresspiegelanstieg und sie sind anderseits noch sehr vereinfacht. Dieses führt zu einer hohen Bandbreite der Ergebnisse. Ein Unsicherheitsfaktor ist der zukünftige Eintrag von Süßwasser bzw. Eis aus Gebirgsgletschern und von Eisschilden. Wir werden die weitere Entwicklung sehr genau beobachten müssen. Sie könnten nun sagen, dass das für die KLIWA-Länder nicht von Relevanz ist und auch wenn Sie sich in der Zukunft sicher nicht um das Thema Küstenschutz kümmern müssen und ein Meeresstrand vor dem Casino in Baden-Baden noch nicht in Sicht ist, glauben Sie aber bitte trotzdem nicht, dass dies keinen Einfluss auf uns alle haben wird. Wie immer werden die Kosten alle tragen.

These 3: Bund und Länder haben die Zusammenarbeit im Bereich der Klimaanpassung deutlich verbessert

Wetter und Klima kennen keine administrativen Grenzen. Daher ist es natürlich bei allen Maßnahmen wichtig, dass die Bundesländer untereinander, aber auch die Bundesländer und der Bund, eng zusammenarbeiten. Und hier ist in den letzten Jahren viel Gutes und Richtiges passiert. Zunächst das Formale. Zwischen allen Bundesländern und dem DWD wurden z. B. Verwaltungsvereinbarungen abgeschlossen mit dem Ziel im Bereich der Anpassung an den Klimawandel zusammenzuarbeiten. Das funktioniert auch in der Praxis. Ein Beispiel ist der gemeinsame Ansatz von mehreren Bundesländern und dem Bund zur Kartierung der Sturzflutgefahr aufgrund des relief-gesteuerten Abflussgeschehens. Auch bei der Bestimmung der Wahrscheinlichkeit des Auftretens von Starkniederschlägen arbeiten die Bundesländer und der DWD eng zusammen. Der DWD hat mit seinen Radardaten einen Datenschatz, der eine wichtige Grundlage für diese Arbeiten darstellt. Darüber hinaus konnten beim Datenaustausch beträchtliche Fortschritte erzielt werden. Mit dem Climate Data Center stellen wir alle klimatologischen Informationen den Ländern auf moderne Weise zur Verfügung. Mein Fazit: Länder und DWD ziehen bei Klimaschutz und Anpassung an einem Strang und zwar gemeinsam und in dieselbe Richtung!

These 4: Die Fähigkeit die wissenschaftlichen Ergebnisse so aufzubereiten, dass sie für die politischen Entscheidungsträger sowie für die Öffentlichkeit nutzbar sind, hat deutlich zugenommen

Die Wissenschaft stellt heutzutage für nahezu alle Sektoren der Deutschen Anpassungsstrategie und den damit verbundenen Fragestellungen quantitative meteorologische Informationen bereit. Das gilt auch für den Sektor Wasser. Allerdings, und das ist typisch für die Klimaforschung, sind alle Informationen in Bandbreiten formuliert. Zwischen den Extremszenarien „Weiter-so-wie-bisher“ und „funktionierender Klimaschutz“ können wir durchaus noch andere Politikoptionen mit Informationen bedienen. Was mir allerdings Sorge macht: 16 Prozent der Deutschen sind nach einer Studie unter Leitung von Wissenschaftlern der Universität Cardiff nicht von der Existenz des von Menschen verursachten Klimawandels überzeugt. Damit ist der Anteil der sogenannten Klimaskeptiker in Deutschland höher als in den Vergleichsländern Großbritannien (zwölf Prozent), Frankreich (sechs Prozent) und Norwegen (vier Prozent). Ich finde, hierüber müssen wir nachdenken aber auch kommunikativ etwas tun.

These 5: Die Gesetzgebung im Hinblick auf die Anpassung hat noch nicht den Stellenwert erreicht wie der Klimaschutz

Für den Klimaschutz gibt es in vielen Bundesländern Gesetze, die klare Regelungen beinhalten. Im Bereich der Klimaanpassung verfügen wir zwar sowohl im Bund als auch in den meisten Bundesländern über Anpassungsstrategien. Gesetze hingegen fehlen überwiegend. Hier besteht aus meiner Sicht noch Handlungsbedarf!

Aber, wenn man einen Summenstrich zieht, erkennt man deutlich, dass trotz einiger verbliebener Unsicherheiten in der Regel doch genügend Informationen vorhanden sind, um schon jetzt zu handeln und das ist das Erfreuliche: In vielen Bereichen geschieht das auch.

Lassen Sie mich mit den Worten von Wolfgang Goethe schließen, der wie so oft viele Sachverhalte so treffend beschrieben hat: „Das Wasser ist ein freundliches Element für den, der damit bekannt ist und es zu behandeln weiß.“

Herzlichen Dank!

Klimawandel – Welt im Wandel?

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

Ich bin eigentlich gar nicht hier als Kommunikator. Ich bin Professor für theoretische Physik und ich unterrichte Philosophie, beide Themen zusammen und nebeneinander auf ausdrücklichen Wunsch der Fachschaft Physik, inzwischen sogar eine Vorlesung Philosophie für Physiker und Physikerinnen.

Und da gibt es nun also komplexe Systeme. Hier ein Beispiel: Ich möchte, dass Sie sich für einen winzigen Moment vorstellen, hier wäre ein Rohr und aus diesem Rohr käme Sand. Sie würden sehen, wie sich allmählich ein Sandhügel bildet. Sehen Sie den Sand? Der Sand häuft sich hier auf und das Interessante ist nun, dass der Sandhügel nach einer gewissen Zeit, wenn genügend Sand zusammengekommen ist, eine ganz bestimmte Neigung haben wird und die wird er nicht überschreiten. Es wird nicht flacher und nicht spitzer, er wird irgendwann 22 Grad Neigung erreichen. Wenn jetzt weiterhin Sand weiter herunterfließt, dann werden viele kleine Sandlawinen und ab und zu auch mal eine größere und ganz selten eine ganz große Lawine auftreten, wodurch sich der Sandhügel des überschüssigen Sandes entledigt und Form trotz allem beibehält. Dieses Phänomen nennt man selbstorganisierte Kritikalität und wird heute als das Prinzip der Komplexität verstanden.

Komplex meint also vielschichtig, nicht einseitig, einfach oder kompliziert. Komplexe Systeme sind vernetzt, das Paradebeispiel für ein solches System in der Natur ist das Klima. Komplexität oder komplexe Systeme konfrontieren uns mit einem großen Problem, nämlich dem Ende der präzisen Vorhersagbarkeit. Wir können bis zu einem gewissen Moment etwas vorhersagen und danach wissen wir nicht, was passiert; kommen viele kleine Lawinen oder kommt eine große? Ich finde ja, ganz ehrlich, – das Thema Kommunikation ist ja angesprochen worden – Komplexität ist nicht die Kapitulationsurkunde der Wissenschaft, aber sie zwingt uns zu mehr Ehrlichkeit. Sie zwingt uns dazu, aus dem Elfenbeinturm der Idealwissenschaft herauszugehen, die immer alles ganz genau prognostizieren können so wie allgemeine Relativitätstheorie oder Quantenmechanik. Experimente die jetzt ablaufen messen zum Beispiel, wie ich immer sage, mit hirnerweichender Präzision, die Wirkung von Gravitationswellen auf eine Längenveränderung von ein Tausendstel Protonenradius. Das sind ein Trillionstel Meter. Aber sie wurden ausgelöst durch die Verschmelzung von zwei schwarzen Löchern in 1,3 Mrd. Lichtjahren Entfernung, das sind 1 000 Trillionen Meter. Wir überbrücken bei einem solchen Experiment 39 Größenordnungen in der Längenmessung. Das ist Präzision. Aber das geht eben nur im Universum und da vor allem bei schwarzen Löchern, da ist alles ganz einfach, höchstens kompliziert. Bei der Klimaforschung kann man diese Einfachheit und Präzision eben leider nicht anbieten, denn da reden wir über die Wirklichkeit, über die wirkliche Wirklichkeit, mit ihren tausend von möglichen Einflüssen.

Die Naturwissenschaft, namentlich die Physik, ist nur deswegen so unglaublich erfolgreich geworden, weil sie damit begonnen hat, die Objekte und Bewegungen am im Himmel zu beobachten, zu berechnen und zu erklären. Dort oben im Himmel, also im Weltraum – ich weiß nicht, ob Ihnen das schon mal aufgefallen ist – dort oben im Himmel ist nichts, fast gar nichts. Wenn da nennenswert etwas wäre, würden Sie die Sterne nicht sehen. Da draußen gibt es keine Reibung, so gut wie keine. Aus diesem Umstand ergab sich die große Entdeckung, dass man die Bewegungen der Planeten um die Sonne fast perfekt berechnen und deshalb vorhersagen konnte. Und aus diesem Berechnungserfolg der himmlischen Bewegungen, hat sich das zentrale Narrativ des Abendlandes ergeben: Mache Dir die Erde untertan, indem Du sie berechnest und somit kontrollierst! Und wenn Du die Natur kontrollieren kannst, dann kannst Du sie auch nach Deinen Vorstellungen manipulieren und zwar mit

Technologie. Technik allerdings verlangt, dass das immerwährend Gleiche, dass das absolut Selbe immer passiert, Technik verlangt in diesem Sinne fast absolute Stabilität! Die Natur hingegen, und auch das Klima, sind hingegen geprägt durch Entwicklung und zwar von selbst, ohne das Eingreifen von Menschen. Die Natur entwickelt sich ständig weiter, es gibt pausenlos neue Eigenschaften, neue Phänomene und neue Arten. Dafür muss die Natur aber inhärent instabil sein, nur so kann es etwas Neues geben. Wir stehen also einer im tiefsten Inneren ständig sich verwandelnden Natur gegenüber, die wir aber seit Jahrhunderten meinen, mittels immer ausgefeilteren Technologien kontrollieren zu können und inzwischen sogar zu unseren Ungunsten verändert haben.

Ich hoffe, Ihnen ist klar, was das für eine Herausforderung ist. Das, was Sie machen, ist der Versuch, ein großes komplexes Gebilde zu managen. Sie machen Klimamanagement, also Mikromanagement der Anpassung und Folgen des lokalen und globalen Klimawandels. Sie managen Sandhügel, auf die ständig weiter Sand strömt und wo Sie sich unentwegt vielen kleinen und hin und wieder, inzwischen aber immer häufigen auch großen Lawinen gegenüberstehen. Und Sie versuchen, das irgendwie zusammen zu halten. Meinen Dank dafür! Aber seien Sie sich darüber im Klaren, dass der „Sand“, der auf das Klima strömt, der Energie entspricht, die wir ins Klimasystem pumpen. Und dann brauchen wir keine Detailgenauigkeit mehr darüber, was im Einzelnen passieren könnte, dann wird es zur Katastrophe kommen. Extreme Ausschläge des globalen Klimasystems, die früher ganz selten waren, werden in der Zukunft zum Normalfall, weil sich das komplexe System Klima entlädt, das Klima wird völlig instabil. Das passiert nicht auf einmal, sondern hintereinander, dann aber immer schneller und immer extremer: Je mehr Längen- und Zeitskalen in dem System betroffen sind, je kleiner die Katastrophe ist und je häufiger solche kleinen Katastrophen stattfinden, umso schlimmer. Je häufiger das passiert, umso mehr muss man befürchten, dass es bald zum „Klimaflimmern“ oder gar zum „Klimainfarkt“ kommt.

Denn das Interessante ist tatsächlich, dass Zeitreihenanalysen solcher komplexen Systeme alle gleich aussehen. Das System ist eine ganze Weile ruhig und dann fängt es an zu oszillieren und dann auf einmal – Zack – gibt es eine sprungartige, nicht mehr rückgängig zu machende Veränderung, eine sogenannte Bifurkation. Eine Krise entlädt sich drastisch. Übertragen auf unseren Kongress hier: je länger die Öffentlichkeit ignoriert oder verdrängt, was wir bereits jetzt alles an Maßnahmen ergreifen müssen, um mit dem bereits veränderten Klima klar zu kommen, umso schlimmer wird das Erwachen. Und deswegen glaube ich, dass so eine Veranstaltung wie die hier – gerade um zu zeigen, was alles getan wird – eigentlich aus dem Kongresszentrum heraus muss und auf dem Platz vor dem Konferenzzentrum stattfinden sollte, um den Menschen ganz deutlich zu zeigen: Was stellen wir alles in Deutschland an, um dem Klimawandel zu begegnen, uns anzupassen und uns möglicherweise davor zu schützen? Die Verbindungen darstellen! Warum zum Beispiel Energiewende? Erklären Sie bitte den Menschen warum! Und erklären Sie es ihnen so, dass sie es verstehen! Und zwar auch so lange, bis sie es verstehen. Wir müssen die Erklärungshoheit zurückerobern in Zeiten des Internets in dem sich wirklich jede Form von Schwachsinn herumtreibt. Es gibt im 21. Jahrhundert in Deutschland nach über 200 Jahren Schulunterricht, Aufklärung etc. Menschen, die fest davon überzeugt sind, dass die Erde eine Scheibe ist. Die bezeichnen mich als Erdkugelfaschisten. Ja, so weit ist es.
Ich möchte deshalb was Klimawandel und Energiewende betrifft, dazu aufrufen, mit den Themen viel offensiver umzugehen. Keine Rückzüge mehr vor grundlosen, falschen Behauptungen. Gehen Sie nach vorne! Es ist stark, was wir machen, die Erfolge der Maßnahmen müssen viel stärker herausgestellt werden. Vor allem auch die Alternativlosigkeit. Bei Sachthemen wie Energie und Klima zählt nicht die Meinung, sondern Sachkenntnis, also Ahnung. Wir sollten unseren Weg nicht zunörgeln, was alles noch gemacht werden muss, wie sehr unsere Effizienz sich noch steigern muss. Das reicht aber nicht hin, denn mit Effizienzsteigerung meinen wir ja zumeist, und übrigens auch in der Politik, Zeitkompression, also immer mehr Tätigkeiten in immer kürzeren Zeiteinheiten. Termindruck führt aber

zwangsläufig zur Oberflächlichkeit. Kenntnis, die zu Wissen und zu Handlung führen soll, gibt es nicht im Express-Tempo, dafür braucht es Zeit und Muße.

Nun, also in Wirklichkeit ist es ja so, dass Klimawandel nur eine von den ganz großen Herausforderungen ist, vor denen wir stehen. Das will ich gar nicht in allen Einzelheiten erläutern. Ich möchte Ihnen folgendes zitieren: Würde man alle Menschen, also knapp 7,5 Milliarden an einem Ort versammeln, so würde sie einen Raum von ca. 1 km³ einnehmen. Diese Spezies auf diesem Quadratkilometer zusammengepfercht hat den Planeten Erde verwandelt und wie: Pro m² Erdoberfläche haben wir 50 kg Technologie auf die Welt verteilt. Auf jedem Quadratmeter Erde ein Zentner Technik, das sind wir! Die Vielfalt der von Menschen gemachten Objekte übertrifft bereits die heutige biologische Artenvielfalt. Kein Wunder, die biologische Artenvielfalt geht ja auch runter.

In Wirklichkeit ist es eben tatsächlich so, dass die globalen Eingriffe des Menschen teilweise stärker, zumindest aber vergleichbar sind mit den Kräften in der Natur. Man könnte uns auch als einen sozialen Meteoriteneinschlag bezeichnen. Man spricht ja bereits vom Anthropozän. Vom Erdzeitalter, das durch den Menschen gemacht ist. In Wirklichkeit ist es das Kapitalozän, nämlich das Erdzeitalter, das durch das Geld gemacht ist. Zeit wird zu Geld gemacht: Wir sind dabei, alle Zeiten zur Gegenwart und damit zu Kapital zu machen. Alles! Wenn wir fossile Brennstoffe aus dem Boden rausholen, dann nehmen wir etwas aus einer Zeit heraus. Das ist hunderte von Millionen Jahre her. Und wir setzen es schlagartig frei. Es ist wie ein Jurassic-Park-Experiment, nur mit Molekülen. Ich kann Ihnen versichern, wir wissen ganz genau, was Infrarotstrahlung mit Molekülen macht. Also sollte es hier irgendwelche Zweiflerinnen oder Zweifler geben – ich habe das Gefühl, ich predige hier vor der Gemeinde – aber diese 16 %, die der Meinung sind, es gäbe keinen vom Menschen gemachten Klimawandel, die sollten bitte dann auch keine Computer anwenden. Denn es ist die gleiche Physik, die erklärt, wie Licht, also infrarotes Licht, mit Molekülen wechselwirkt, die dafür sorgt, dass es diesen Computer gibt. Die gesamte digitale Elektronik basiert auf einem Modell von der Welt, das nennt man Quantenmechanik. Die sollten mir dann auch keine Beschwerdebriefe schreiben, nicht mit dem Computer, sondern wenigstens mit der Hand. Und das Ganze auch nicht durch eine E-Mail verschicken oder sonst irgendetwas, sondern durch einen reitenden Boten. Also bitte, lassen Sie die Finger davon und bitte benutzen Sie nicht die Tastatur, nicht dass sie Sie in Biomatsch verwandelt. Denn wer an so was glaubt, wer den Klimawandel bestreitet, der hat wirklich keine Ahnung. Der hat nur Meinung, das ist der große Unterschied.

Wir machen mit unseren fossilen Ressourcen Vergangenheit zur Gegenwart, und zwar wirklich tiefste Vergangenheit. Und zugleich sind unsere Spekulationen, die mit allen möglichen ökonomischen Handlungen verbunden sind, der Vorgang, dass Zukunft zur Gegenwart gemacht wird. Je näher der Return of Invest kommt, umso näher kommt die Zukunft unserer Gegenwart. D. h. wir zerstören momentan alle Spielräume, die zukünftige Generationen noch haben können dadurch, dass wir eben nicht schnell genug transformieren und nicht schnell genug vorwärts gehen und genau das nämlich tun, was wir schon längst tun hätten können. Wenn man sich heute darüber wundert – Sie merken schon, es wird ernst: Warum haben die eigentlich damals die Flüsse begradigt, warum haben die die Hecken vernichtet? Flurbereinigung nannte man das, aus rein ökonomischen Gründen. Alle Warner wurden als Fortschrittsverweigerer ausgelacht. Und heute? Heute wissen wir, dass selbst die Pessimisten dieser Landschaftsmanipulation noch viel zu optimistisch waren. Wie konnten wir unsere Landwirtschaft so zur Industrie verkommen lassen? Sie produziert doch Lebensmittel und keine Finanzmittel. Über uns wird man später auch mal sprechen. Das hätten die doch wissen müssen? Mein Gott, die hatten doch alles, werden unsere Enkel sagen. Die hatten eine wissenschaftliche Infrastruktur, die ihnen von allen Kanälen seit Jahrzehnten immer und immer wieder das Gleiche gesagt hat. Und doch immer nur Geld, Geld, Geld.

Aber man hat lieber nicht auf die Wissenschaftler gehört. Komisch, und warum? Weil wir den Irrtum nicht zur Methode erhoben haben. Wir können uns nicht vorstellen, wie wichtig es ist, sich zu irren und aus diesen Irrtümern zu lernen. Die gesamten empirischen Wissenschaften, d. h. die Naturwissenschaften, irren sich empor. Deswegen ist Physik, und in dieser Anwendung eben auch Klimaforschung, so unglaublich gut. Weil der Zweifel eine Methode ist, aber keine Haltung. In der politischen Auseinandersetzung scheint es eher eine Haltung zu sein – auf keinen Fall Fehler machen. Das ist ein großer Fehler, wenn man keine Fehler machen will. Das ist ein ganz großer Fehler. Da macht man nämlich gar nichts.

Diese Art von Beschleunigung, die wir da erzeugen, die ist ziemlich dramatisch, denn im Grunde genommen sind alle Reden über das – wenn es um das Klima geht – was wir wirklich tun: Wir haben Zeit komprimiert. Sie kennen ja den berühmten Satz von Benjamin Franklin: „Zeit ist Geld“. Die Formierung des Kapitals durch die ökonomischen Prozesse ist ein reiner Versuch, eben Zeit zu einer Ressource zu machen. Sie merken es alle im Saal: Sie sind ständig in Zeitnot oder viele von Ihnen sind ständig in Zeitnot, weil sich eben sehr, sehr viele Dinge hintereinander gestellt haben. Und es ist nicht besser geworden. Es ist leider Gottes in den letzten Jahrzehnten, obwohl wir viel, viel mehr darüber wissen, wie wichtig es wäre, unserer Entscheiderin oder unseren Entscheider relaxt zu lassen, entspannt zu lassen, pressen wir sie in Zeitkorsette ein und zwar auf allen Ebenen. Weil offenbar unsere Gesellschaft auch in ihrer Struktur so komplex geworden ist, dass sie darauf gar nicht mehr verzichten kann. D. h. das wirkliche Thema ist ein ganz anderes. Das wirkliche Thema ist nämlich, wie der Mensch, wie die menschlichen Strukturen mit der Natursphäre, also mit dem natürlichen System in Wechselwirkung steht. Das ist das, was wir Menschen so machen mit uns und mit der Natur. Und in der Natur da gelten offensichtlich Gesetzmäßigkeiten. Und zwar Gesetze besonderer Art, die gelten nämlich überall im Universum. Jawohl, das ist die zentrale Annahme aller Wissenschaft, die sich bis heute, nach über 400 Jahren, noch nicht einmal als falsch erwiesen hat. Mit anderen Worten, wenn ich einen Außerirdischen treffen würde, dann würde ich ihn nicht danach fragen, welche Naturgesetze gelten. Es sind die gleichen wie bei uns. Ich würde ihn fragen: Welche Musik macht Ihr, welche Bilder malt Ihr? An welche Götter glaubt Ihr? Welche Geschichten erzählt Ihr euren Kindern? Was ist eure Kultur? Die Biosphäre funktioniert bei denen ganz genauso wie bei uns, die Hydrosphäre auch, die Kryosphäre usw. Diese Zusammenhänge sind uns bekannt. Aber das hier. Was für eine Technik habt Ihr entwickelt, aus dem was Ihr da über die Natur erfahren habt? Wie sieht Eure Arbeitssphäre aus?

Die Natur kennt offenbar Gesetze und zwar in sehr scharfer Form, ist auch ein sehr strenger Gerichtshof, aber es gibt keine Verhandlung, kein „in dubio pro reo“. Es gibt keine Staatsanwälte, keine Absprachen, keine Kronzeugenregelung, gar nichts! Wir sind ein winziger Teil in der Natur, in einem riesigen gewaltigen Naturablauf. Und wenn wir Pech haben, dann kommt die Geschichte mit den beiden Planeten und da sind wir eine vorübergehende Erscheinung, außerordentlich vorübergehend übrigens. Das geht ganz schnell – zack weg! Weil wir nicht verstanden haben, dass die Natur genau wie –, Sie haben es schon vergessen, dieser Sandhaufen – die ganze Zeit läuft der Sand hier runter. Sie haben gedacht, ich will Ihnen Sand in die Augen streuen.

Es gibt Kipppunkte, die das ganze System nämlich dann dramatisch verändern. Auch da glauben immer alle, das wird doch nicht so schlimm werden. Doch, es wird so schlimm werden und vielleicht sogar noch viel schlimmer! Wir können noch nicht einmal sagen, wie schlimm es wird. Wir wissen nur, dass es möglich ist, dass riesige und gewaltige Veränderungen stattfinden, sobald der Energieinhalt der Atmosphäre zu groß wird. Wenn ein System zu heiß wird, dann hat es einfach zu viel Energie. Wie sich das dann verteilt, werden wir gleich noch sehen. Wir wissen jetzt schon, wenn gewisse Dinge passieren, dann wird danach nichts mehr passieren. Wenn es tatsächlich dazu kommen sollte, dass große Eisschilde aus der Antarktis z. B. ins Meer abrutschen, ja dann gute Nacht, Freunde. Also entweder wir schaffen das, es noch einigermaßen in der Zone zu halten oder aber wir werden uns

aufmachen müssen und wir werden noch mit ganz anderen Szenarien zu kämpfen haben, als wie das heute der Fall ist.

Es ist völlig klar, was Sache ist, was passiert ist, von 1850 bis heute, die allmähliche Erwärmung unseres Planeten. Es wird immer wärmer und wärmer und wärmer. Wer das bestreitet – da weiß ich auch nicht, was ich dazu sagen soll. Der soll ein spirituelles Getränk zu sich nehmen. Das ist vielleicht das einfachste. Trink‘ die Flasche leer und lass‘ mich in Ruhe! Vielleicht ist das wirklich am Ende die einzige Möglichkeit, 16 % der Bevölkerung in unserem Lande davon zu überzeugen und nicht irgendwelchen Unsinn zu reden, denn es ist ja alles klar.

Und stellen wir uns mal vor, wir hätten tatsächlich in Europa mehrere nationalpopulistische Regierungen. Was würde denn dann passieren mit Klimaanpassungsmaßnahmen? Was würde denn dann passieren mit der Vorstellung, wir könnten dem eine Energiewende entgegen halten? Beide großen Problemkreise leben davon, dass man zusammenarbeitet. Die leben von dem „inter“, dem dazwischen. Und man stelle sich mal vor, wir hätten ein Europa wie vor dem 1. Weltkrieg Nationalstaaten hier und alle machen ihr eigenes Ding. Das wäre für das Klima eine Katastrophe, für die Energiewende eine Katastrophe, für den Kontinent eine Katastrophe. Wir können das nicht wollen, auf keinen Fall. Also in diesem Sinne ist Europa nicht nur eine nette Idee, sondern sie ist unsere einzige Chance. Ich glaube, Genscher hat das schon mal gesagt. Wir kriegen keine andere. Wir sind mitten in Europa und jede Frage zum Klimawandel, zur Energiewende – stellen Sie sich immer vor, die Anderen würden da nicht mitmachen. Ich bin froh, wenn wir Gäste hier haben aus dem Ausland, die uns mitteilen, wie es da zugeht, ob wir irgendwie helfen können. Wir haben eine unglaubliche Verantwortung als eines der reichsten Länder der Welt, nämlich auszuprobieren, wie Energiewende, Klimaschutz und Klimaanpassung zusammengehen. Und dabei werden Fehlentwicklungen auftreten und die müssen wir für alle anderen Länder mitmachen. Wir in Deutschland werden die Fehlerscouts werden müssen. Es wird unsere Aufgabe sein, als hochtechnisiertes Land mit viel Geld, genau das anzupacken. Und hinterher wird man vielleicht sagen: „Ja, die Deutschen haben damit angefangen und die haben da wichtige Fehlerquellen identifiziert“. Das ist wichtig, wirklich wichtig, glauben Sie mir.

Indem wir Argumente ernst genommen haben wissen wir inzwischen ganz genau, welchen Anteil die verschiedenen irdischen, also natürlichen, Quellen beim Klimawandel haben und wie groß der Anteil ist, den wir selber beitragen, vor allem bei den Treibhausgasen. Und wir wissen jetzt inzwischen auch, dass selbst die schlimmsten Szenarien viel zu optimistisch gewesen sind. Es wird immer schlimmer, es ist grauenhaft.

Nun, in der Zeitreihe geht es nach oben, wir sind bei über 400 ppm Kohlendioxidgehalt in der Atmosphäre. Wir hatten mal vor der Industrialisierung 280 ppm, und jetzt ist es weit über 400. Und es steigt und steigt und steigt. Also es scheint gerade so zu sein, das alle kleinen Früchte, die man irgendwie so hat ernten können, das schlägt sich überhaupt nicht nieder. Daran sieht man das Problem, dass die Balance nicht stimmt zwischen den ökologisch sinnlosen und den ökologisch sinnvollen Handlungen. Im Grunde ist es ganz einfach: Das ökologisch Gute muss gefördert werden und zwar viel, viel stärker als das ökologisch Schlechte. Nur ein Stichwort: Kohlesubventionen in der Höhe von Milliarden Euro. Kohleverbrennung ist falsch und schlecht. Mehr Kohlenstoff in der Atmosphäre lädt sie weiter auf und sie wird deshalb immer extremer in ihren Reaktionen: hier ein Beispiel: Anfang Dezember 2016 gießt es in Spitzbergen, das ist auch wo ganz anders, aber ich fand es so irre, weil Anfang Dezember sollte es in Spitzbergen nicht regnen. Ja ich meine Spitzbergen, Sie wissen schon. Wenn Sie sich das heute-journal angucken, dann ist Spitzbergen oben, immer ganz oben. Also das ist wirklich weit oben, da sollte, nein da muss es im Dezember schneien und wie, aber nicht regnen wie im indischen Monsun.

Es ist so warm gewesen, dort oben in der Arktis. Bis Mitte Dezember 2016 ist der Eisschild in der Arktis noch geschrumpft. Überhaupt 2016: Hitzerekorde bis 54 Grad, nicht schlecht, also immerhin in Kuwait, das ist ganz in der Nähe von Katar. Da müssen wir aufpassen, wenn 2022 die deutschen Jungs da spielen. Na ja, mal kucken. Ich glaube, die haben so viel Geld da, die machen so eine landesweite Klimaanlage, Open Air. Ja, ich traue denen das zu.

Was passiert eigentlich, wenn die Temperaturunterschiede zwischen Arktis und Umgebung durch die Erwärmung am Nordpol immer geringer werden? Dann werden Strömungen in der Hochatmosphäre, sogenannte Jetstreams, langsamer. Und langsame Strömungen sind einfach instabiler. Und instabile Strömungen sind ganz schlecht. Instabile Strömungen führen zu extremen Wettersituationen. Der Klimawandel fördert das Aufschaukeln von solchen instabilen, wellenförmigen Luftbewegungen, die zu Starkregenereignissen, Stürmen, Gewitterzellen etc. führen. Dann können wir natürlich hinterher wieder sagen, ja es war ein einzelnes Wetterereignis, das man nicht einfach dem Klimawandel zuordnen darf. Das ist dann so wie mit den berühmten Einzeltätern. Ganze Legionen von Einzeltätern sind immer noch Einzeltäter? Natürlich ist jedes Ereignis ein Einzelereignis, sonst würde man es nicht Ereignis nennen. Aber Klimawandel und die einzelne Katastrophe zuzuordnen, einzuordnen und zusammenzubringen scheint mir heute wichtiger denn je. Die Ergebnisse der Klimaforschung sind da nämlich eindeutig: Klar, die seltenen ganz großen Katastrophen bleiben selten, aber sie werden häufiger. Bei mehr Kohlenstoff in der Atmosphäre gibt es viel mehr Extremwetterereignisse und das muss unbedingt in die Öffentlichkeit. Das wäre wichtiger als jede Börsennachricht.

In bin nicht ganz einverstanden, Sven, mit dem was du vorhin gesagt hast, dass das Wissen sich so vergrößert. Was sich vergrößert sind Informationen. Die Informationsmenge wächst. Aber das Gerät, in dem Informationen zu Wissen werden, sind Sie. Sie nehmen Informationen auf und korrelieren das mit dem, was Sie schon wissen. Also Sie sind diejenigen, die Wissen machen. Jeder von uns ist ein Erfahrungsinstrument. Und diese ganzen Mengen an Informationen sind unter Umständen gar nicht notwendig, um gewisses grundlegendes Wissen zu besitzen. Man braucht kein Physikstudium um zu verstehen, dass wärmeres Wasser eine höhere Verdunstungsrate hat als kaltes Wasser. Und wenn mehr Wasser in der Atmosphäre ist, dann ist sie geladen mit Energie, denn Wasser kann Energie speichern und kann sie schlagartig wieder loswerden. Und tatsächlich, die Industrialisierung mit ihren hohen Verbrennungswerten fossiler Ressourcen ist eindeutig das Schlüsselereignis für instabile Jetstreams, mit anderen Worten: menschengemachter Klimawandel.

Aber es geht weiter, leider Gottes. 2016 ist lange vorbei und es geht immer weiter. Wir also haben drei anomale Hitzewellen in den letzten Jahren, in diesem Winter schon in der Arktis. Die USA haben Wärmerekorde erlebt. Und das hier: Die Antarktis wird grüner. Ja, Sie wissen schon: Arktis ist oben, Antarktis ist unten. Südpol ist der südlichste Punkt auf einer Kugel. Sie können gerne fragen, was ist noch südlicher als der Südpol. Aber das verweist nur auf die Fähigkeit von uns Fragen zu stellen, die sinnlos sind. Bei dem Zusammenhang mit Klimawandel habe ich den Eindruck, dass häufig solche sinnlosen Fragen gestellt werden, um den Redner oder die Rednerin irgendwie aus dem Gleichgewicht zu bringen.

Sie wissen natürlich was passiert, wenn weiße Flächen verschwinden und dafür dunkle Flächen auf einmal entstehen. Was das für eine wahnsinnige Veränderung im Energiehaushalt dieses Planeten bedeutet. Ein halbes Grad pro Jahrzehnt sind die Temperaturen in der Antarktis gestiegen. Nicht schlecht, das kann man ausrechnen. D. h. die Antarktis wird in Zukunft ein deutlich grünerer Ort werden. Und was bedeutet das für das das Rückstrahlvermögen, die Albedo? Das Eis in der Antarktis wird verschwinden, der Meeresspiegelanstieg um bis zu 60 m, je nachdem wie stark das sein kann, ist schon am werden. Die Gletscher sind im Rutschen. Amerikanische Forscher, bevor der blonde Lord – der, dessen Name nicht mehr genannt werden muss, Sie wissen schon – bevor der angefangen hat, seinen Leuten zu verbieten, Umweltdaten zu veröffentlichen, da waren die noch dabei und haben gezeigt,

was los ist in der Antarktis. Wie die Gletscher über Land losgehen und es gibt einen Point of no Return, das war am 14.09.2015 im Science erschienen. Dass es einen Point of no Return gibt, für weite Teile des antarktischen Eises, und die Welt könnte dann so aussehen. Ja, Sie sehen, welche Bereiche überflutet würden. Baden-Württemberg, Bayern aber auch Rheinland-Pfalz sind nicht direkt davon betroffen.

Wir haben es ja schon in den Reden gehört: es wird global immer wärmer. Und wo geht diese zusätzliche Energie hin? Nicht nur die Luft wird wärmer, auch das Wasser der Ozeane. Und dann kommt die Thermodynamik ins Spiel, es werden durch die zusätzliche Wärme immer mehr Möglichkeiten im System besetzt. Wenn das Meer dann eine kritische Temperatur überschritten hat, dann werden Strömungen instabil. Und zugleich werden die Ozeane auch immer saurer und zwar durch mehr gelöstes Kohlendioxid im Meer. Zu warmes Wasser kann aber immer weniger Kohlendioxid speichern und es verbleibt zunehmend in der Atmosphäre. Der Treibhauseffekt wächst, es wird immer wärmer, jetzt aber ohne die Wärmespeicher der Ozeane. Da die Sonne jeden Tag scheint, wird die Atmosphäre mit immer mehr Energie angeregt. Immer mehr Teile der Atmosphäre geraten in Schwingungen, pendeln hin und her. Das eine Pendel gerät mit anderen Pendeln in Resonanz, d. h. das System wird immer instabiler und instabiler. Die Pendelausschläge werden immer größer und größer. Dann brauchen wir auch keine Wettervorhersagen mehr, dann sind wir durch.

Das Wahnsinnige ist ja, wir wissen das alles. Es ist ja nicht so, dass ich Ihnen hier etwas Neues erzähle. Wir haben einen riesigen wissenschaftlichen Komplex, der uns seit Jahren, wenn nicht Jahrzehnten mit all diesen Informationen versorgt. Aber wir sind nicht in der Lage, diese Informationen in Wissen und später in politische Entscheidungen so umzusetzen, dass wir das haben verhindern können. Was hat man nicht schon alles erlebt. Ich sage allen denjenigen, die am Klimawandel zweifeln: Fahren Sie doch mal in die Alpen, oder reden sie vor allen Dingen mit Landwirten und Winzern, sprechen sie mit all diejenigen, die davon leben, dass was aus dem Boden rauskommt. Die können Ihnen sagen, wie sich das Klima in den letzten Jahrzehnten verändert hat.

Wenn man so einen Vortrag halten kann, das ist eine schöne Situation. Da kann man aber auch was sagen, was man normalerweise eher in so einem privaten Umfeld sagt, ich sag‘ das unter uns: Ich habe den starken Verdacht, dass diejenigen, die den Klimawandel bestreiten, in weiten Teilen der bundesrepublikanischen Industriegeschichte aktiv gewesen sind. Die meisten Klimaskeptiker, die ich kenne, sind pensionierte Ingenieure. Ich glaube, sogar ziemlich sicher, dass sie ihre Lebensleistung kritisiert sehen dadurch, dass man ihnen sagt: Was habt Ihr mit diesem Land, mit diesem Planeten gemacht? Ähnliches gilt übrigens auch für Geowissenschaftler, also Paläontologen z. B., oder Geologen – ja komm‘, früher gab es doch noch viel mehr Kohlendioxid in der Atmosphäre. Ja früher, also ganz viel früher.
Weil ich glaube, dass die intuitiv wissen, ohne ihre Wissenschaften, ohne die Explorationsverfahren der Geologie, Petrologie, Mineralogie und Geophysik, wären wir gar nicht in der Lage gewesen, an die Rohstoffvorkommen ranzukommen, die sich im Boden verstecken. Weite Teile der geowissenschaftlichen Ausbildung ist eigentlich nur dafür da, dass die Männer und Frauen bei Konzernen anfangen, um Rohstoffe aus dem Boden zu holen und vor allen Dingen natürlich auch Öl, Gas und Kohle. D. h. also bei den Skeptikern haben wir auch sowas wie eine psychologische Situation, die nicht ganz einfach ist. Wie ich überhaupt auch sagen muss, wenn wir über Klimawandel sprechen, nutzt es gar nicht, nur Informationen zu präsentieren. Wir sehen es ja, dass Informationen allein nicht reichen, sondern man muss an die Identität derjenigen denken, mit denen man spricht. Was für innere Überzeugungen haben die?

Und deswegen komme ich auf die psychologischen Momente. Wenn man darüber spricht, muss man die Leute tatsächlich, wie Frau Ministerin Scharf vorhin schon gesagt hat, da abholen wo sie sind. Auch wenn es einem nicht gefällt, dass sie da sind wo sie sind.

Wir müssen die Natur endlich ernst nehmen. Es kommt darauf an, tatsächlich eine absolute Grenze anzuerkennen, die Gesetzgebung in der Natur. Das fällt uns nicht leicht. In einer durch und durch säkularisierten Gesellschaft fällt es uns eher schwer, auf einmal wieder anerkennen zu müssen, dass es absolute Grenzen gibt. Gesetze sind für uns Menschen immer zu interpretieren, selbst bei unserem Grundgesetz ist es so, dass die Artikel immer noch irgendwie gedeutet werden müssen. Man denke nur an den 1. Artikel: Die Würde des Menschen ist unantastbar. Als das formuliert wurde, 1949, gab es zwei Seiten Kommentare. Heute im 21. Jahrhundert haben wir 160 Seiten Kommentar. Wo beginnt denn die Würde des Menschen, wann beginnt der Mensch und wann endet er? Aber bei den Naturgesetzen gibt es kein Wenn und Aber. Die Naturgesetze werden durch Experimente überprüft und sie sind so scharf wie eine Guillotine. Und hier wird nichts interpretiert. Da ist wirklich nichts zu interpretieren. Selbst in der Komplexität gelten im gleichen Maße die Naturgesetze wie überall. Es ist nicht so, dass wir diese Naturgesetze, sozusagen „ja es könnte doch noch alles ganz anders sein", „kann man es denn wirklich so", „glauben Sie denn nicht, Herr Lesch" …Nein, Sie können es gerne ausprobieren.

Es gibt keine kleinere Wirkung als das Planck'sche Wirkungsquantum. Es gibt keine größere Wirkungstransportgeschwindigkeit auf der Welt als die Lichtgeschwindigkeit. Und damit haben Sie schon zwei wesentliche Technologien eingeschränkt. Nämlich die elektromagnetische, eine wesentliche Technologie, nämlich über die Lichtgeschwindigkeit und das andere ist die digitale, nämlich die Quantenmechanik. Damit wird fast ein Drittel des Bruttosozialprodukts auf der Welt erwirtschaftet, wenn es um Technologie geht. D. h., wir kennen genau unsere Grenzen, wir wissen genau, was der Fall ist. Und glauben Sie mir, eine Wissenschaft, die in der Lage ist, ein Tausendstel Protonenradius zu messen von der Gravitationswelle, die von zwei verschmelzenden Schwarzen Löchern in 1,3 Mrd. Lichtjahren kommt, kennt die Wechselwirkung von Molekülen mit Infrarotstrahlung extrem gut. Moleküle sind im Vergleich zu einem Proton ja Riesen. Wäre ein Proton ein Reiskorn, wäre München das Kohlendioxidmolekül. Die Physik der Moleküle ist deshalb wirklich sehr genau bekannt, da gibt es keine unbekannten Wechselwirkungen mehr.

Und es ist leider ein Drama, dass wir es bis heute nicht geschafft haben, die genaue Kenntnis dieser Vorgänge nicht gesellschaftlich so verankert zu haben, dass es zur Allgemeinbildung gehört zu wissen, wie der Treibhauseffekt funktioniert und wer dafür verantwortlich ist. Stattdessen wird darüber debattiert und zwar schon viel zu lange. Deswegen sind wir zu spät und es wird deshalb immer teurer und es wird unser Leben richtig verändern. Das ist die heutige Lage. Wir müssen weg von der fossilen Industriegesellschaft, mit ihrem Wachstumsimperativ. Da kriege ich als Physiker so meine Zweifel an der intellektuellen Redlichkeit der Politik und Ökonomie, denn es gibt eine logistische Gleichung. Sie beschreibt Handlungen bei endlichen Ressourcen. Und das gilt ja für eine durch fossile Ressourcen bestimmte Industriegesellschaft ganz sicher, denn die Ressourcen Öl, Kohle, Gas kommen nicht wieder. Wachstum in solchen Systemen steigt und dann wird es sich irgendwie stabilisieren – wenn es gut läuft. Wenn es katastrophal läuft, gibt es zwischendurch Sprünge nach oben und nach unten, eben kritische, nicht rückgängig zu machende Systemsprünge. Aber in den Wirtschaftsprognosen gibt es immer nur Wachstumskurven ohne Sättigung. Im Silicon Valley ist sogar von exponentiellem Wachstum die Rede. In medizinischen Zusammenhängen spricht man von Krebs im fortgeschrittenen Stadium, wenn die Zellen exponentiell wachsen. Sie bombardieren uns ja momentan mit ihren wunderbaren Vorstellungen davon, wie sie die Welt verändern werden. Ungebrochene Wachstumsdynamik – das wird nicht so gehen.

Wir werden unsere Zukunft ganz anders gestalten müssen. Und dazu gehört natürlich ein Management des Klimawandels. Dazu gehört natürlich die Energiewende, es wird uns überhaupt nichts anderes übrig bleiben. Das ist die einzige Chance, die wir haben. Eine europäische Energiewende. Eine Zusammenarbeit über alle Grenzen hinweg. Denn wie wir schon gehört haben, das Klima – ich glaube es war ein alter Lateiner – die Sonne scheint für alle. Der Himmel über uns ist unser Himmel. Der europäische Himmel ist ein Teil des Himmels

über die gesamte Menschheit. Und wir Europäer können nur versuchen, es so gut wie möglich zusammen zu tun. Wir sind der reichste Teil der Welt. Kein Wunder, dass so viele Menschen aus aller Welt zu uns kommen wollen. Die Geologie bei uns ist sehr freundlich, wir haben so gut wie keine Erdbeben, wir haben keine Hurrikans, noch nicht. Es gibt kaum einen angenehmeren Teil der Welt zu leben, einen ungefährlicheren Teil, als Europa. Also wir haben wirklich da eine ganz große Verantwortung. Und solche Initiativen wie die hier, die sind beispielhaft dafür, was wir können, wenn wir wollen. Also diesen Strukturwandel, an dem ja hier viel gearbeitet wird, das ist der einzige Weg, um da hin zu kommen, um uns zu erhalten. Und das Problem dabei ist: Wie kommen wir von dem Status quo zu dem Status, wo wir hin wollen?

Wir wissen ja, wo wir hin wollen. Das ist ja das interessante. Wir könnten uns ja tatsächlich mal wieder was leisten, was Helmut Schmidt, Gott hab ihn selig, ja für den Arztbesuch empfohlen hat: Eine Vision. Wie soll es sein? Und das würde uns die Möglichkeit geben, einen ganz neuen Imperativ in die Welt zu setzen. Nämlich einen Handlungsimperativ nach dem Motto: **Handle so, dass deine Handlungen zu einem gedeihlichen, echten gedeihlichen Weiterleben aller Menschen führen würde.**

Und da muss man sich mal angucken, wie Menschen in so einer Gruppe verschieden motiviert sind. Typischerweise ist es so, dass bei solchen starken Veränderungsprozessen 15 % Treiber sind und 15 % sind Verweigerer. Interessant. 35 % sind abwartend und 35 % sind bereitwillige Zuschauer. Sie sind gar nicht so negativ eingestellt. Für die gilt der wunderbare österreichische Satz: Ich bin eigentlich ganz anders, aber ich komme so selten dazu. Und denen muss man über die Barriere helfen. Wie kriegen wir diejenigen, die positiv eingestellt sind dazu, dass es wirklich eine Massenbewegung wird, dass es zu einer Geschichte wird, wo man in Deutschland sich darüber erzählt, wo Kinder in den Schulen und an den Universitäten - wo es ganz klar ist, es gibt ein Narrativ, das dieses Land trägt. Eine große Geschichte, und es ist nicht mehr das Wirtschaftswunderland Deutschland, sondern es ist das Land der Energiewende. Das Land, das Methoden zur Verfügung stellt, um dem Klimawandel wirklich entgegenzutreten. Vernünftige Methoden.

D. h., wir müssen uns überlegen, wenn wir hier die Leute haben, die tatsächlich dabei sind was voranzutreiben – dann müssen wir sie unterstützen, fast feiern. Hitparade der besten Ideen im Bereich der Erneuerbaren! Und bei den Abwartenden hier, denen muss man die Möglichkeit geben, die eigene Position darzustellen, hinzuhören, das Interesse zu zeigen auch für deren Ängste. Aber dann immer wieder antreiben, „komm ein bisschen, mach mit, mach weiter“. Und bei den anderen 35 % Zuschauern hoffen, dass die neuen Ideen ebenso erfolgreich ankommen – es gibt nichts was mehr sexy ist als Erfolg, die kommen dann schon. Wenn die Alten nicht kommen, dann kommen die Jungen. Und die 15 % hier, das sind die interessanten Leute, die sich immer noch verweigern, die sollte man als Advocatus Diaboli nutzen. Denn wenn ich Philosophie unterrichte, Erkenntnistheorie, dann sage ich meinen Studenten immer: Holt euch die schärfsten Kritiker ins Haus! Die schärfsten, um eure eigenen Argumente zu schärfen. Holt euch die Leute rein. Es kann sein, dass Sie sie nicht überzeugen. Für euch muss klar sein, dass eure Argumente stehen. Wenn jemand beginnt, von der Argumentation in so eine Meinungsdebatte reinzugehen, dann hat man schon gewonnen. Das weiß der Andere dann auch. Aber wenn es um Sachargumente geht, dann solltet ihr euch die schärfsten Kritiker ins Haus holen und es wirklich auseinander nehmen und sich Zeit dazu nehmen. Das ist natürlich das Problem, denn wir haben eigentlich keine.

Also der Klimawandel ist eine Angelegenheit, die uns eigentlich gar keine Zeit lässt. Aber es wird uns gar nichts anderes übrig bleiben. Wenn wir unser politisches System nicht hin zu einem Zentralstaat machen wollen wie in China, sondern wenn wir weiterhin eine Konsensgesellschaft bleiben wollen, wo es eben länger dauert - aber dann sind eben auch alle überzeugt und es ist ein friedliches Zusammensein – dann sollten wir dabei bleiben. Also wenn

wir nicht wollen, dass niemand so ein Buch liest, dann sollten wir uns einfach dran machen. Ich finde, dass so eine Initiative wie die hier großen Mut macht. Ich würde mich freuen, wenn es viel mehr in die Öffentlichkeit dränge – ein schöner Konjunktiv – wenn dieser Konjunktiv zum Indikativ wird. Trauen Sie sich, reden Sie darüber, was Sie hier machen. Und reden Sie so darüber, dass den anderen klar ist, dass das gemacht werden muss, dass es wichtig ist. Es ist ganz egal, wer in diesem Land regiert – die Natur wird immer da sein und sie wird immer auf das reagieren, was wir mit ihr machen. Wir sollen endlich aufhören zu glauben, wenn hier die ganze Zeit Sand runter läuft, dass nicht schon längst hier ein gewaltiger Sandhaufen wäre. Wenn wir die Natur verändern, dann verändert sich die Natur und wir verändern uns mit ihr. Man stelle sich vor, wir hätten tatsächlich noch diese katastrophalen Umweltbedingungen wie in den 50er und 60er Jahren. Da sind wir schon viel besser geworden. Aber leider scheint es irgendwie hinten und vorne nicht zu funktionieren. Wir müssen andere Länder überzeugen, dass sie mitmachen. Nehmen sie das Prinzip Verantwortung ernst. Hans Jonas hat es zu dem Imperativ zusammengefasst „Handle so, dass deine Handlung zu einem gedeihlichen Weiterleben führt“.

Benutzen Sie das Wort Gedeihlichkeit, es hat etwas Organisches. Nicht nachhaltig. Nachhaltig ist schon fast ein bisschen zu viel buchhalterisch. Das klingt so nach, ja – es geht da rein und da wieder raus. Gedeihlich – Ihre Kinder wachsen und gedeihen. Ihre Blumen wachsen und gedeihen. Und vielleicht denken Sie mal, wenn Sie an die Umwelt denken, demnächst mit dem Wort Mitwelt daran. Sie nennen schließlich die menschlichen Bewohner, mit denen Sie in einem Haus wohnen, auch nicht Bewohner, sondern Mitbewohner. Unsere Sprache verrät viel darüber, dass wir noch viel zu lernen haben darüber, wie wir mit dieser Welt umgehen. Sie ist uns ja nur für die Zeit unseres Lebens in die Hand gegeben. Wie hat Heidegger gesagt: „Wir sind Gäste des Lebens“. Und ein guter Gast hinterlässt das Zimmer besser und sauberer als er es vorgefunden hat. Daran sollten wir denken.

Ich danke Ihnen.

Klima-Monitoring in KLIWA – Langzeitverhalten der hydrologischen und hydrometeorologischen Kenngrößen in Süddeutschland Klimawandel und Wetterextreme – was wissen wir?

Dr. Monika Rauthe (DWD), Dr. Thomas Deutschländer (DWD), Holger Komischke (LfU Bayern), Alana Steinbauer (LfU Bayern), Christian Iber (LfU Rheinland-Pfalz), Vassilios Kolokotronis (LUBW)

1. Einleitung

„Die Menschen führen momentan ein großangelegtes geophysikalisches Experiment aus, das so weder in der Vergangenheit hätte passieren können noch in der Zukunft wiederholt werden kann." sagte Roger Revelle (Ozeanograph und Klimatologe, 1909–1991) in der New York Times im Jahr 1957. Dass wir einen tiefgreifenden und zu großen Teilen durch den Menschen verursachten Klimawandel haben, ist inzwischen in der Fachwelt kaum noch umstritten. Um die Vergangenheit und die Gegenwart zu verstehen ist das Monitoring der Klimas wichtig. KLIWA führt dieses Monitoring hydrometeorologischer Größen für Süddeutschland seit fast 20 Jahren durch.

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 und hydrologische Messdaten aus dem Bundesmessnetz des DWD und den Landesmessnetzen der Bundesländer 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 Modellierung der zukünftigen Entwicklungen und die deutsche Anpassungsstrategie (DAS).

Das Monitoring zum Klimawandel in Süddeutschland ist ein wichtiger Projektbereich der KLIWA-Kooperation. Relevante meteorologische und hydrologische Kenngrößen werden in regelmäßigen Abständen in ihrer zeitlichen Entwicklung untersucht, um die bereits messbaren Auswirkungen des Klimawandels zu verfolgen. Im aktuellen KLIWA-Monitoringbericht 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. Im Folgenden werden einige ausgewählte Ergebnisse daraus vorgestellt und in Beziehung zu den Wettereignissen aus den letzten Jahren gesetzt. Für Details zu den Auswertemethoden im Monitoringbericht sei auf den Bericht, der unter www.kliwa.de veröffentlicht ist, verwiesen.

2. Monitoring Temperatur

Im Monitoringbericht 2016 wurden bereits die folgenden Kernaussagen zur Temperaturentwicklung in Süddeutschland, basierend auf der Annahme eines linearen Trends in der jeweils betrachteten Zeitreihe, getroffen:

- In den Jahren 2011 bis 2015 hat sich der Anstieg der Lufttemperatur im Jahresmittel in Süddeutschland weiter fortgesetzt. Für den Zeitraum 1931 bis 2015 ist eine Zunahme des Gesamttrends auf durchschnittlich ca. +1,3 °C sowie eine Verstärkung der Trendsignifikanz festzustellen.

- Im Vergleich zwischen Winter- und Sommerhalbjahr setzt sich das schon in den letzten Monitoringberichten beschriebene Verhalten weiter fort: Die Erwärmungszunahme fällt in den letzten ca. 15 Jahren im Sommer- stärker aus als im Winterhalbjahr. Dennoch ist der Gesamttrend seit 1931 (Beginn der Auswertung) im Winterhalbjahr bisher immer noch stärker ausgeprägt als im Sommerhalbjahr (Winterhalbjahr: +1,3 bis +1,6 °C/85 a; Sommerhalbjahr: +0,8 bis +1,2 °C/85 a) (siehe Abbildung 1). Insgesamt sind die regionalen Unterschiede aber sehr gering.

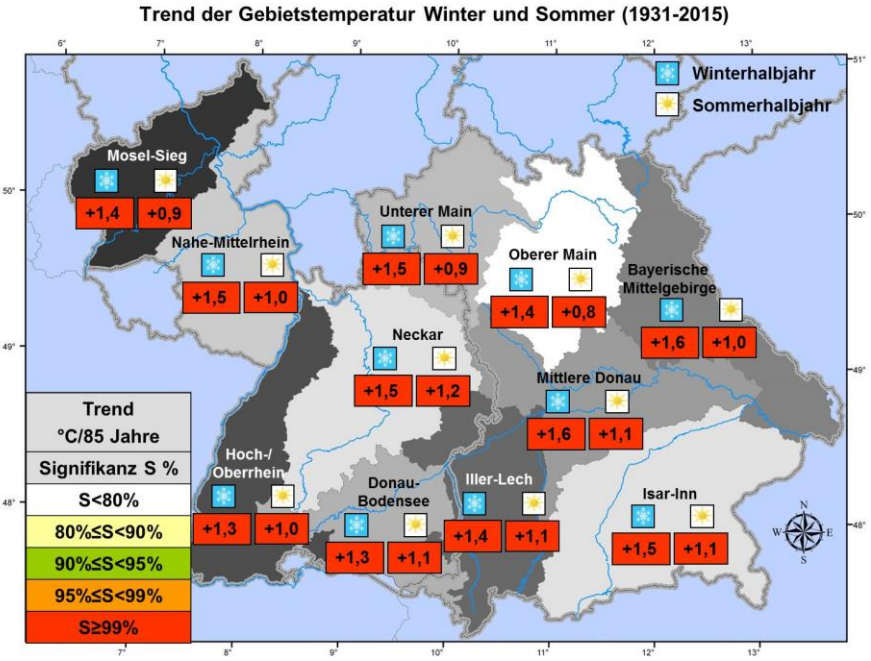


Abbildung 1. Entwicklung der mittleren Lufttemperatur in den hydrologischen Halbjahren, Trend in °C/85 Jahre im Zeitraum 1931-2015.

Die beschriebene Erwärmung zeigt sich auch in der Anzahl der heißen Tage pro Jahr. Wie in Abbildung 2 zu sehen ist, gibt es zwar deutliche dekadische Schwankungen, vor allem aber auch eine klare Zunahme der heißen Tage, die sich in vielen Regionen Deutschland in einer Verdopplung in den letzten 60 Jahren ausdrückt.

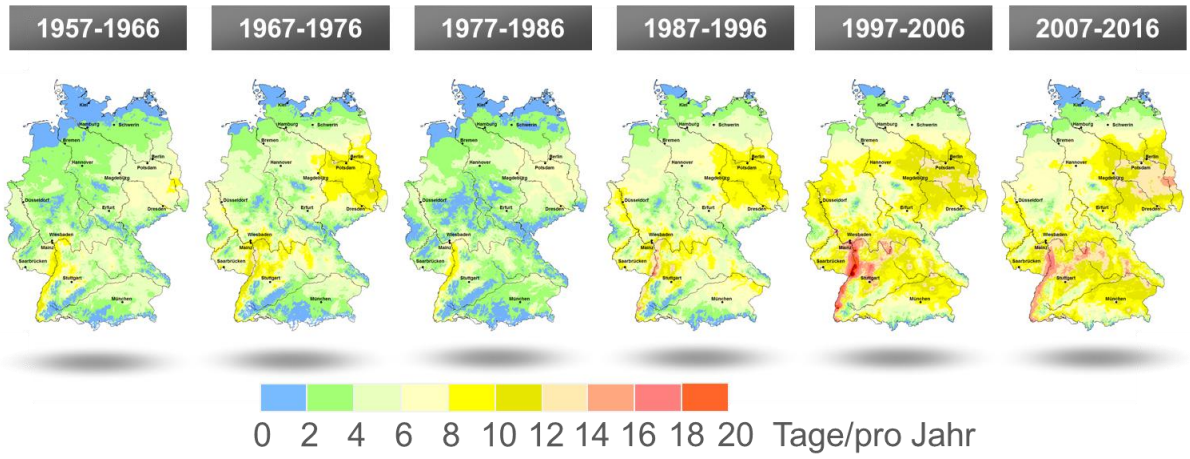


Abbildung 2. Anzahl an heißen Tagen pro Jahr dargestellt jeweils als dekadisches Mittel von 1957-2016 in Deutschland.

Betrachtet man nur die letzten fünf Jahre 2011-2015 des Monitoringzeitraums, so lässt sich feststellen:

- Es gab eine vermehrte Anzahl an warmen Jahren inklusive Hitzeperioden und extrem hoher Temperaturen.
- Drei der letzten fünf Jahre (2011, 2014 und 2015) gehören zu den zehn wärmsten Jahren in Deutschland und in den KLIWA-Bundesländern seit 1881.

3. Monitoring Niederschlag

Im Gegensatz zur Temperatur ist der Niederschlag von einer wesentlich höheren Variabilität in Raum und Zeit geprägt. Die zeitliche Variabilität macht es besonders schwer verlässliche Trends zu detektieren und die Signale des Klimawandels eindeutig von der natürlichen Variabilität zu unterscheiden. In Abbildung 3 ist dies deutlich nachvollziehbar. In beiden hydrologischen Halbjahren sind deutliche Unterschiede in den Niederschlagswerten von Jahr zu Jahr zu sehen. Dies ist unabhängig von der betrachteten Region im gesamten KLIWA-Gebiet zu finden. Auch die detektierten Trends mit Zunahmen im Winter, die sich aber durch die letzten trockenen Jahre deutlich abgeschwächt haben, sind für ganz Süddeutschland repräsentativ. Im Sommerhalbjahr sind im gesamten KLIWA-Gebiet keine eindeutigen Entwicklungen zu erkennen.

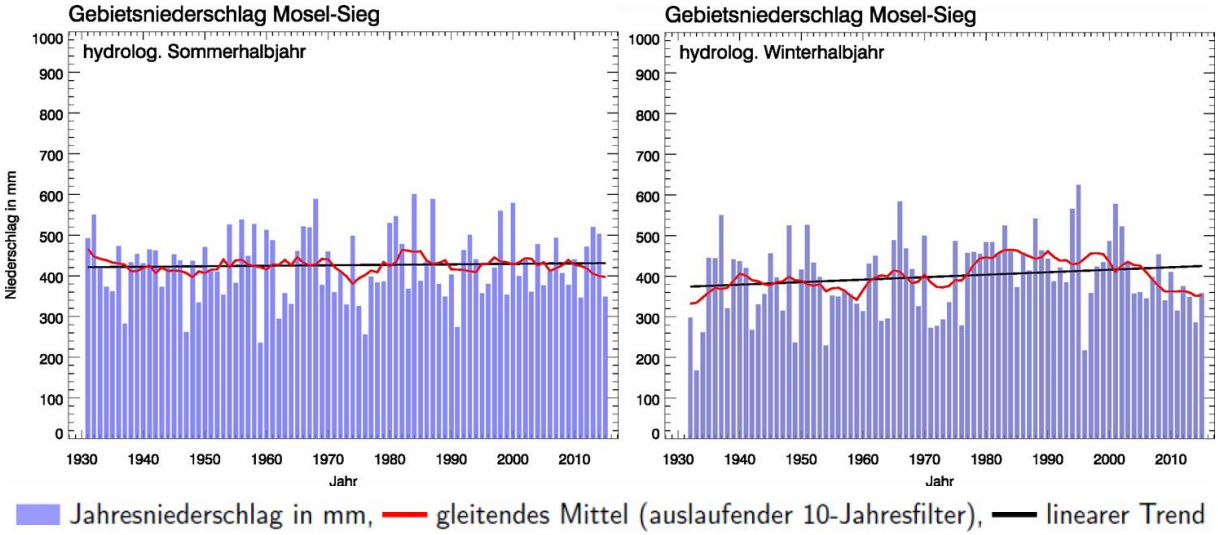


Abbildung 3. Beispielhafte Darstellung für die Höhe und den Trend der Gebietsniederschläge in einer der KLIWA-Regionen, hier Mosel-Sieg für die hydrologischen Halbjahre im Zeitraum 1931-2015.

3.1 Langzeitveränderungen der mittleren Größen

Im Monitoringbericht 2016 wurden bereits die folgenden Kernaussagen zur Niederschlagsentwicklung in Süddeutschland, basierend auf der Annahme eines linearen Trends in der jeweils betrachteten Zeitreihe, getroffen:

- Die Trends (1931 bis 2015) der mittleren Gebietsniederschlagshöhe sind insgesamt schwächer und weniger signifikant als im letzten ausgewerteten Zeitraum (1931 bis 2010), wobei es generell positive Trends im Winterhalbjahr (+2 % bis +22 %) und keine eindeutige Entwicklung im Sommerhalbjahr (-13 % bis +4 %) gibt. In den letzten 15 Jahren ist eine Zunahme der positiven Trends im Sommerhalbjahr, sowohl in ihrer Häufigkeit als auch in ihrer Intensität, und eine Abschwächung der positiven Trends im Winterhalbjahr zu beobachten (siehe Abb. 4 und 5).

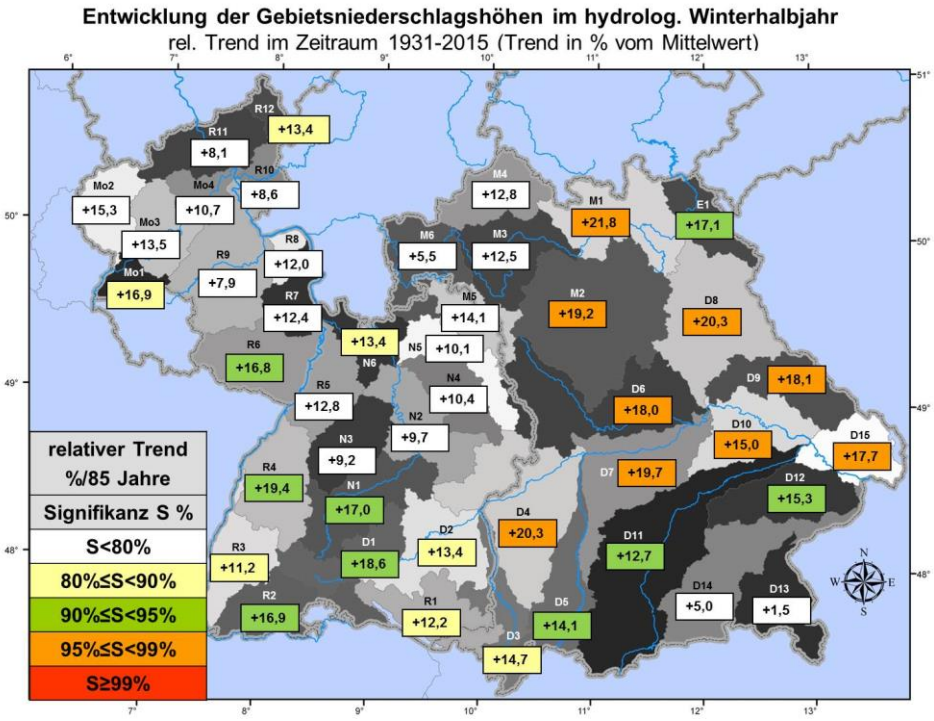


Abbildung 4. Entwicklung des mittleren Gebietsniederschlags im hydrologischen Winterhalbjahr, relativer Trend (Änderung in Prozent vom Mittelwert 1931-2015).

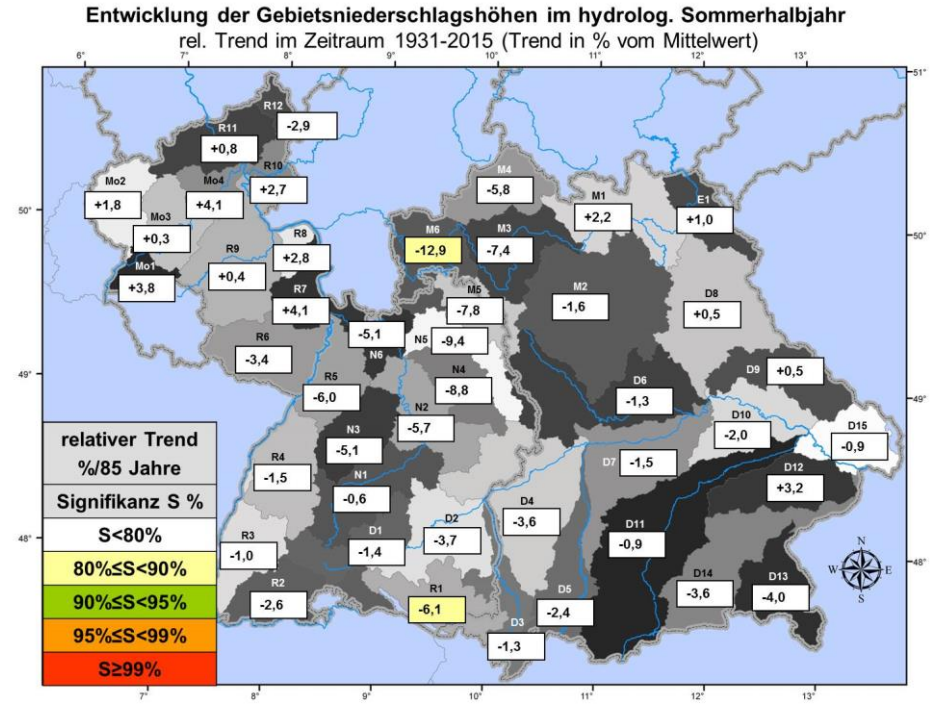


Abbildung 5. Entwicklung des mittleren Gebietsniederschlags im hydrologischen Sommerhalbjahr, relativer Trend (Änderung in Prozent vom Mittelwert 1931-2015).

- Die Trends im Starkniederschlag (Maximalwerte für die Dauer=24 h) sind uneinheitlicher als im Gebietsniederschlag (nicht dargestellt). Hier gibt es weiterhin regional klare positive Trends im Winterhalbjahr (bis +33 % im Norden Bayerns), eine Voraussetzung für eine Zunahme der winterlichen Hochwasserlagen. Im Sommerhalbjahr sind die Trends regional uneinheitlich ohne eindeutige Entwicklung, aber häufig stärker ausgeprägt als beim Gebietsniederschlag.

3.2 Extreme

In Bezug auf besondere Niederschlagsereignisse gibt es zwei zu betrachtende Seiten: ein Zuviel und ein Zuwenig. Diesen Aspekten wird sich in den folgenden Abschnitten genähert. Denn Trockenheit, aber auch kleinräumige Starkniederschläge können zu hohen wirtschaftlichen Schäden führen.

3.2.1 Trockentage und Trockenjahr 2015

Schaut man sich die Trockentage (= Anzahl Tage mit < 1 mm Niederschlag) in Deutschland über einen längeren Zeitraum an, zeigt sich eine hohe Variabilität mit großen dekadischen Schwankungen (siehe Abbildung 6). Es sind aber keine eindeutigen Trends, weder im Sommer noch im Winter (letzteres nicht dargestellt), zu erkennen. Grundsätzlich gibt es im Sommer etwa ein Drittel mehr Tage ohne Niederschlag. Es gibt auch große regionale Unterschiede: besonders auffällig die relative Trockenheit Ostdeutschlands.

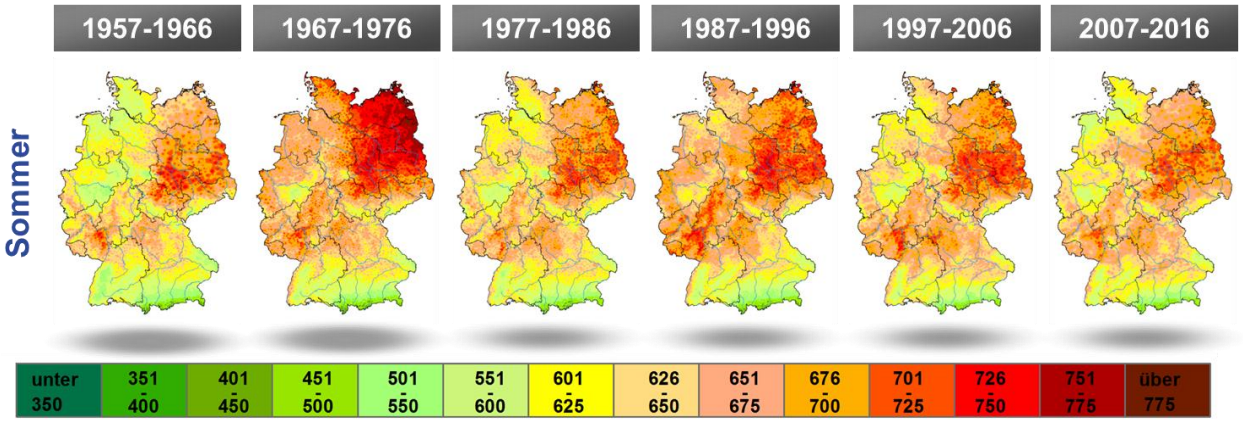


Abbildung 6. Anzahl der Trockentage mit < 1 mm Niederschlag pro Dekade zwischen 1957-2016 in Deutschland.

Betrachtet man nun wiederum die letzten fünf Jahre des Monitoringzeitraums (2011–2015), war das Jahr 2015, neben der großen Wärme, durch viele Monate mit unterdurchschnittlichen Niederschlägen geprägt. Dies galt für ganz Deutschland sowie auch die KLIWA-Länder (siehe Abbildung 7). Im Deutschlandmittel fielen im Jahr 2015 etwa 10 % zu wenig Niederschlag im Vergleich zur Referenzperiode 1961 bis 1990. In den KLIWA-Bundesländern war das Niederschlagsdefizit im Durchschnitt noch größer mit ca. 23 % (Baden-Württemberg -25 %, Bayern -21 %, Rheinland-Pfalz -24 %).

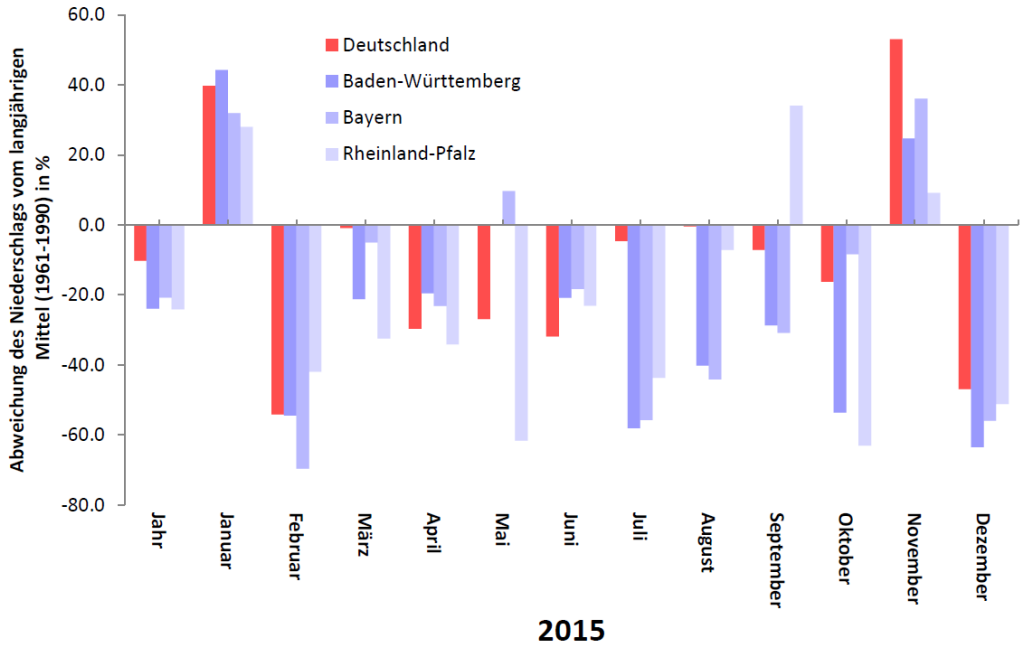


Abbildung 7. Prozentuale Abweichung des Niederschlags im Jahr 2015 vom langjährigen Mittel der Referenzperiode 1961-1990 für Deutschland und die KLIWA-Bundesländer Baden-Württemberg, Bayern und Rheinland-Pfalz.

Dies hat sich auch 2016 und bis Mai 2017 fortgesetzt: Die Niederschläge waren in den vielen Monaten unterdurchschnittlich mit großen Folgen u. a. für die Grundwasserspeicher.

3.2.2 Starkniederschläge Frühsommer 2016

Eine große Ausnahme bzgl. der zuvor beschriebenen Trockenheit in den letzten Jahren bildete der Frühsommer 2016, insbesondere der Juni. Mit rund 115 mm Niederschlag erreichte der Juni 2016 140 % des vieljährigen Mittels in Deutschland und war damit deutlich zu nass. Langsam ziehende Gewitter, oft mit Starkregen und Hagel, brachten innerhalb kurzer Zeit enorme Niederschlagsmengen an einem Ort und verursachten schwere Schäden. Besonders betroffen waren der Westen und Süden Deutschlands. Alle KLIWA-Bundesländer zeigten deutlich zu hohe Niederschläge, vor allem in Rheinland-Pfalz wurde das vieljährige Mittel um 85 % (Baden-Württemberg 45 %, Bayern 20 %) übertroffen. Die Niederschlagsschwerpunkte fielen dabei lokal sehr extrem aus und führten zu Hochwassern mit schweren Überschwemmungen.

Für die drei KLIWA-Bundesländer seien drei Ereignisse beispielhaft genannt:

- 27. Mai 2016: Hangrutsch und entgleister Zug zwischen Moselkern und Hatzenport mit mehr als 45 mm in 24 h
- 30. Mai 2016: Sturzfluten in Braunsbach mit mehr als 90 mm in 1 h
- 1./2.Juni 2016: Sturzfluten in Simbach mit mehr als 180 mm in 48 h

Vergleicht man dies mit den KOSTRA-DWD 2010-Werten, so sind insbesondere die letzten zwei Ereignisse als Extrem anzusehen, da die Wiederkehrzeiten über 100 Jahre liegen. In Abbildung 8 sind die Andauer und die Niederschlagsmenge von verschiedensten Ereignissen an unterschiedlichen Orten auf der ganzen Welt und in Deutschland zusammenfassend dargestellt, dabei wurde eine Einordnung der verschiedenen gemessenen Niederschlagssummen im Frühsommer 2016 in das sogenannte Matsumoto-Diagramm vorgenommen. Es zeigt sich, dass die beobachteten Niederschlagswerte in 2016 noch unterhalb der jemals an einem Ort in Deutschland gemessenen Maximalwerte liegen.

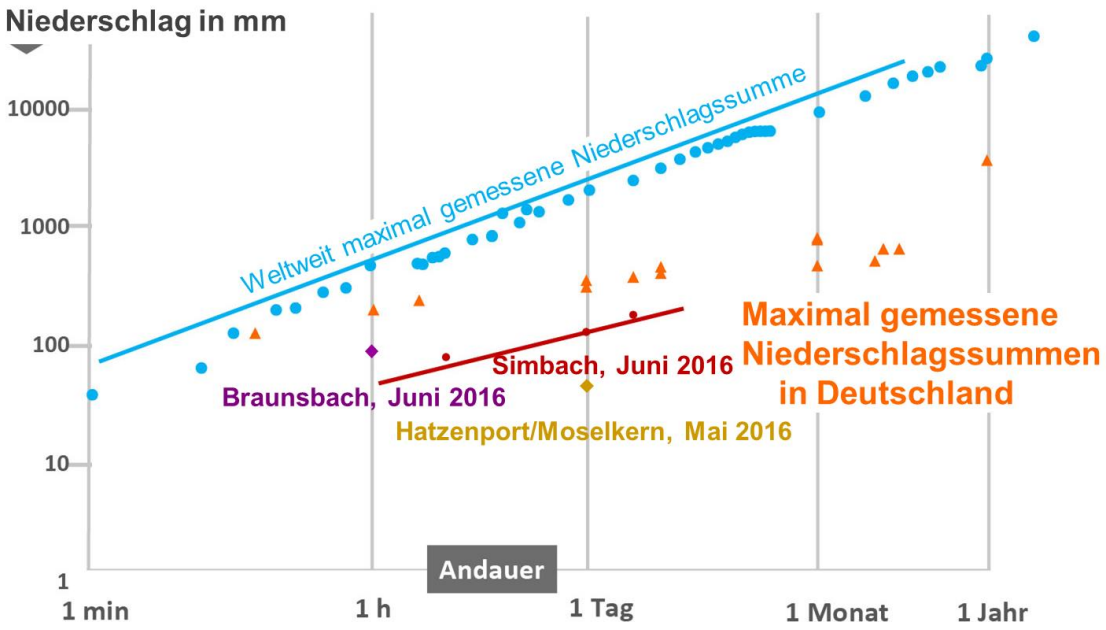


Abbildung 8. Zusammenfassende Darstellung von Niederschlagsereignissen: Vergleich der Andauer und Niederschlagsmenge, beides logarithmisch aufgetragen. Blau weltweite und orange deutschlandweite Extremereignisse, weitere Farben ausgewählte Extremereignisse aus Süddeutschland im Frühsommer 2016. Die rote Line zeigt für das Ereignis in Simbach die für diesen Ort geltenden KOSTRA DWD 2010-Werte für die 100-jährige Wiederkehrzeit (Abbildung nach Matsumoto, J. (1993): Global Distribution of Daily Maximum Precipitation. Japanese Progress in Climatology 25, 1-6).

Generell ist anzumerken, dass das Potential der Atmosphäre zur Bildung von Starkregen sehr groß ist, wie man es auch in den weltweit gemessenen maximalen Starkregenereignissen (blau) sehen kann. Bisher waren 312 mm in 24 Stunden in Zinnwald/Erzgebirge am 13.08.2002 der höchste gemessene Wert in Deutschland. Schaut man nicht auf die üblichen Messzeitraum 06 UTC bis 06 UTC, wurden in 24 Stunden bei leicht verschobenem Bezugsintervall 03 UTC bis 03 UTC dort sogar 353 mm gemessen. Damit und mit den ansonsten in mittleren Breiten schon gemessenen Maximalwerten zeigt sich, dass die als maximierter Gebietsniederschlag für Deutschland abgeschätzten 400 Liter an einem Tag nicht nur ein theoretischer Wert sind, sondern auch real auftreten können. Die Starkregengefährdung kann sich im Rahmen des Klimawandels also sowohl durch ein häufigeres Auftreten bekannter Extremniederschläge als auch durch die höhere Intensität jedes dieser Ereignisse ausdrücken. Aufgrund der Seltenheit der Ereignisse sind aber klimatologische Aussagen und auch die Ursache-Wirkungsanalyse im Kontext des Klimawandels äußerst schwierig. Hier besteht weiterhin großer Forschungsbedarf.

4. Monitoring hydrologischer Kenngrößen

Wie wirken sich nun die Niederschläge in den hydrologischen Größen aus? Im Monitoringbericht 2016 wurden zu den hydrologischen Kenngrößen u. a. bereits die folgenden Kernaussagen zur Klimaentwicklung in Süddeutschland, basierend auf der Annahme eines linearen Trends, herausgearbeitet:

- 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 (im Winterhalbjahr etwas mehr, im Sommerhalbjahr etwas weniger) steigende mittlere Hochwasserabflüsse, jedoch zum größeren Teil mit nicht statistisch signifikanten Zunahmen.
- Die jährlichen Niedrigstwasserabflüsse zeigen insgesamt an ca. 60 % der Pegel leicht zunehmende Trends für den Zeitraum 1951 bis 2015, die mehrheitlich nicht signifikant sind.

Um eine Vergleichbarkeit mit dem Niederschlag herzustellen, wurden die verschiedenen linearen Trends als prozentualer Anteil an der Gesamtzahl der untersuchten Trends berechnet (siehe Abbildung 9). Beim Niederschlag basiert dies auf den 44 KLIWA-Untersuchungsgebieten und bei den hydrologischen Kennwerten auf Untersuchungen an ausgewählten Pegeln.

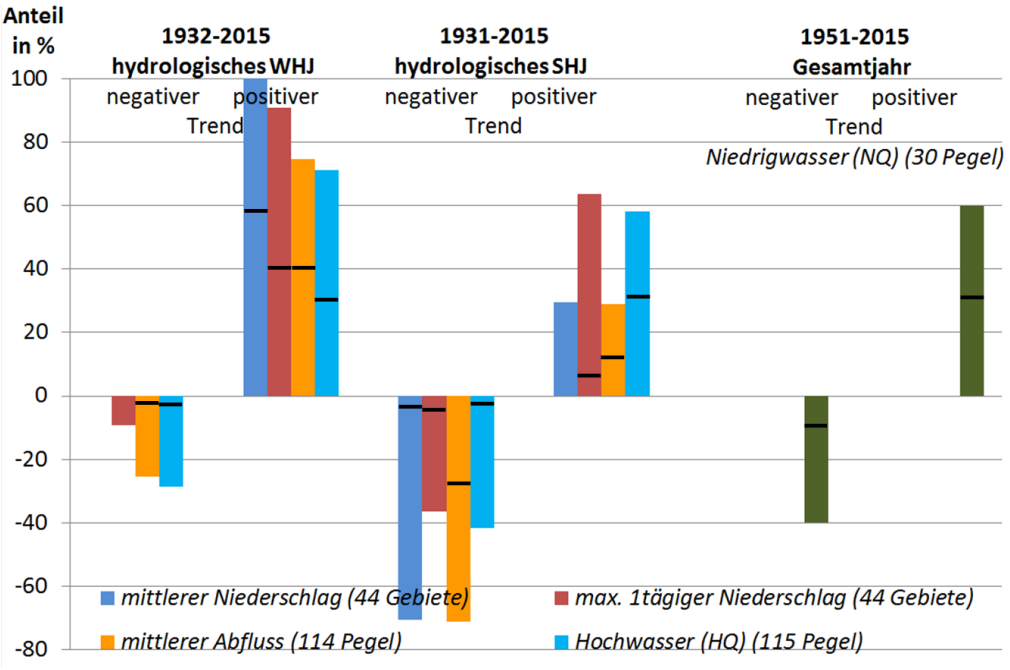


Abbildung 9. Vergleich der linearen Trends von Niederschlagskenngrößen und hydrologischen Kennwerten. Die schwarzen Striche stellen den signifikanten Anteil an Trends dar. Erläuterung der einzelnen Farben finden sich in der Abbildungslegende wieder. Bis auf Niedrigwasser erfolgt die Betrachtung nach hydrologischen Halbjahren getrennt. Es sind die unterschiedlichen Auswertezeiträume und Anzahl an Pegeln zu beachten.

Vergleicht man nun die Trends des mittleren und des eintägigen maximalen Niederschlags, so fällt sofort auf, dass die Anzahl der signifikanten Ergebnisse für die extremen Werte deutlich abnimmt. Für die Trends beider Größen lässt sich nur für das hydrologische Winterhalbjahr eine nachweisbare Zunahme zwischen 1931 und 2015 feststellen. Die Ergebnisse der Abflussgrößen passen grundsätzlich gut zu denen der Niederschlagsgrößen: Mehrheitlich positive Trends im mittleren Abfluss und beim Hochwasser im hydrologischen Winterhalbjahr. Des Weiteren sind Abnahmen im mittleren Abfluss im hydrologischen Sommerhalbjahr zu erkennen, was auf eine Tendenz zu trockeneren Sommern hinweist. Beim Niedrigwasser wurde eine Auswahl von 30 Pegeln in einer Jahresauswertung seit 1951 untersucht. Hier zeigen sich kaum signifikante Trends, aber eher eine Tendenz zu Zunahmen, was zu den mittleren Abflüssen im hydrologischen Sommerhalbjahr passt. Insgesamt lässt sich bilanzieren, dass die Entwicklung der meteorologischen und hydrologischen Kennwerte ein stimmiges Bild ergibt, aber durch die anderweitige Beeinflussung der hydrologischen Kennwerte

sich auch durchaus leicht abweichende Entwicklungen zeigen, insbesondere in dem Anteil an signifikanten Trends.

Betrachtet man nur die letzten fünf Jahre 2011–2015 des Monitoringzeitraums, so lässt sich feststellen:

- Neben einer Vielzahl an kleinen Hochwasserereignissen ist das Hochwasserereignis im Mai/Juni 2013 besonders markant. Zum Ende des Monats Mai setzte großräumig Starkniederschlag ein, der zu extremen Hochwasserabflüssen und Überschwemmungen führte. Insbesondere im Zeitraum vom 30. Mai bis 5. Juni erreichten die Wasserstände vielerorts neue Rekordstände.
- Niedrigwasserperioden traten vor allem im November 2011 und Sommer 2015 als Folge von extremer Trockenheit auf. Besonders betroffen waren die KLIWA-Bundesländer Bayern und Baden-Württemberg, in denen auf Grund des Niederschlagdefizits neue Niedrigstwerte bei den Abflüssen auftraten.

5. Zusammenfassung und Ausblick

Die wichtigsten Erkenntnisse aus dem Monitoring bei KLIWA lassen sich wie folgt zusammenfassen:

- Die Auswirkungen des Klimawandels zeigen sich deutlich in der regionalen Hydrosphäre.
- Es sind regionale Unterschiede auch innerhalb von (Süd)Deutschland zu finden.
- Wichtigste Erkenntnisse für Süddeutschland (seit 1931):
    - mittlere Temperatur seit 1931 um ca. 1,3 °C angestiegen
    - klare Zunahme der heißen Tage
    - keine deutlichen Trends bei den Trockentagen
    - Zunahmen des mittleren und maximalen Niederschlags im hydrologischen Winterhalbjahr, keine Veränderungen im Sommerhalbjahr
    - mittlerer Abfluss: steigende Pegel im hydrologischen Winterhalbjahr, fallende im Sommerhalbjahr, etwa 50 % davon signifikant
    - Hochwasser: Zunahmen in beiden Halbjahren, zum Teil aber nicht signifikant
    - Niedrigwasser: Mehrheit der Trends (seit 1951) in den Jahreswerten leicht zunehmend, aber größtenteils nicht signifikant
- Monitoring des Klimas ist und bleibt eine wichtige Grundlage für das Verständnis und die Beurteilung zukünftiger Klimaentwicklungen.
- KLIWA ist ein wichtiger Baustein für die regionale Klimaanpassung in Süddeutschland.

Das Monitoring wird auch weiterhin ein wichtiger Bestandteil der Kooperation KLIWA bleiben. Darüber hinaus gibt es noch verschiedene andere Projekte, in denen Monitoringergebnisse wichtige Grundlagen für die weiteren Untersuchungen bilden. Die neusten Ergebnisse aus KLIWA sowie auch der Monitoringbericht 2016 (1931–2015) sind unter www.kliwa.de zu finden. Der Monitoringbericht wird alle fünf Jahre aktualisiert.

Ein Beispiel dafür ist das Expertennetzwerk des BMVI (Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur), in dem u. a. Anpassungsmaßnahmen für Verkehr und Infrastruktur an Klimawandel und extreme Wetterereignisse entwickelt werden sollen. Ziel des Ressortforschungsprogramms, in dem sich die Behörden Deutscher Wetterdienst, Bundesanstalt für Gewässerkunde, Bundesanstalt für Wasserbau, Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie, Bundesanstalt für Straßenwesen und das Eisenbahnbundesamt zusammengeschlossen haben, ist es drängende Verkehrsfragen der Zukunft für Wasserstraße, Schiene und Straße durch Innovationen in den Bereichen Klimaanpassung, Umweltschutz und Risikomanagement aufzugreifen. Die Laufzeit des Programms ist 2016–2019. In Themenfeld 1

von insgesamt fünf Themenfeldern soll erarbeitet werden, wie der Verkehr und die Verkehrsinfrastruktur des Bundes gegenüber dem Klimawandel und extremen Wetterereignissen resilient gemacht werden können. Dabei geht es darum das Wissen zu Klimaentwicklungen in Atmosphäre und Ozean mit praxisbezogenem Wissen zu den drei Verkehrsträgern Wasserstraßen, Straße und Schiene zu vernetzen. Das Programm baut auf Vorläuferprojekten wie KLIWAS (www.kliwas.de) und AdSVIS (www.adsvis.de) auf und liefert Grundlagen für die Umsetzung der Deutschen Anpassungsstrategie (DAS). Weitere Informationen sind unter http://www.bmvi-expertennetzwerk.de zu finden.

Auswirkungen des Klimawandels auf die Fließgewässerökosysteme in Süddeutschland

Dr. Jochen Fischer, LfU Rheinland-Pfalz

1. Einführung

1.1 Worum es geht – die Verletzlichkeit von Süßwasserökosystemen

Mit einem Anteil von 0,3 % nehmen Süßwasserökosysteme nur einen kleinen Bruchteil der Erdoberfläche ein. Wenig bekannt und erstaunlich ist, dass diese Lebensräume mehr als 10 % aller bekannten Tierarten bzw. 20 % aller Wirbeltierarten beherbergen (Gessner, 2010). Dies ist zu einem großen Teil den artenreichen tropischen Flusssystemen geschuldet. Aber auch bei uns dürfte die Artendichte aquatischer Ökosysteme um ein bis zwei Größenordnungen über denen im marinen und im terrestrischen Bereich liegen. Von den geschätzt 65 000 Tier- und Pflanzenspezies in Deutschland haben mehr als 10 000 eine Bindung an Süßwasser (vgl. „Taxaliste der Gewässerorganismen Deutschlands“, Bayerisches Landesamt für Wasserwirtschaft 2003). Diese Vielfalt drängt sich auf kleinstem Raum. Auswertungen der Flächennutzungsdaten in Rheinland-Pfalz zeigen, dass Bäche, Flüsse und Seen zusammen einen Anteil von 0,86 % an der Landesfläche haben.
Aus ihrer Kleinräumigkeit, ihrer hohen Artendichte und den vielfältigen Nutzungsanforderungen resultiert die besondere Verletzlichkeit dieser Lebensräume. So sind 42 % aller geschützten Tierarten der FFH-Richtlinie an Fließ- und Stillgewässer gebunden (Schlumprecht et al. 2014). Binnengewässer sind damit bereits heute hochgradig gefährdete Zentren der Artenvielfalt. Durch die Folgen des Klimawandels werden diese Ökosysteme noch stärker unter Druck gesetzt.

1.2 Was ist zu tun – der gesetzliche Auftrag

Das Wasserhaushaltsgesetz fordert u. a.:

- die Funktionsfähigkeit der Gewässer als Bestandteil des Naturhaushalts und als Lebensraum für Tiere und Pflanzen zu erhalten und zu verbessern
- Beeinträchtigungen von Gewässern abhängenden Landökosystemen und Feuchtgebieten zu vermeiden und
- möglichen Folgen des Klimawandels vorzubeugen.

Doch wie lässt sich vorbeugen, wenn die Wirkungsmechanismen kaum bekannt sind? Die KLIWA-AG Gewässerökologie hat sich in den letzten Jahren dazu mit folgenden Fragen beschäftigt (siehe: http://www.kliwa.de/gewaesseroekologie.htm):

- Welche direkten und indirekten Folgen des Klimawandels sind entscheidend für die Gewässer und welche Wirkungsbeziehungen bestehen?
- Welche Gewässertypen sind am stärksten betroffen?
- Welche Veränderungen sind für die aquatischen Lebensgemeinschaften und den ökologischen Zustand zu erwarten?
- Wie lassen sich diese ökologischen Veränderungen messen und welche Indikatoren sind hierfür geeignet (Klimafolgen-Monitoring)?

Der Beitrag beleuchtet die Auswirkungen der durch den Klimawandel angetriebenen Temperatur- und Abflussänderungen auf die Lebensgemeinschaften. Darauf aufbauend werden generalisierte Thesen zur Betroffenheit einzelner Gewässerzonen abgeleitet sowie vorbeu-

gende Maßnahmen beschrieben. Doch zunächst einige grundsätzliche Gedanken zu den Folgen des Klimawandels auf die Gewässerökologie.

2. Gradueller Wandel und Extremereignisse

Der Klimawandel wirkt auf zwei grundsätzlich verschiedene Arten auf die Umwelt: (1) Flächendeckend als gradueller Wandel oder (2) räumlich begrenzt durch eine höhere Frequenz und Verschärfung von Extremereignissen. Letztere wirken akut und unmittelbar (z. B. bettbildende Hochwässer, Austrocknungen). Bei den graduellen Veränderungen sind wiederum zwei unterschiedliche Mechanismen zu differenzieren: Mittelwertverschiebungen gewässerökologisch bedeutsamer Parameter (z. B. der Wassertemperatur) einerseits und die Zunahme ihrer saisonalen Variabilität anderseits. Letzteres bedeutet, dass bestimmte Wertebereiche abiotischer Faktoren saisonal mit einer verringerten Verlässlichkeit auftreten (Beierkuhnlein et al. 2014). Solche Veränderungen können für die Ökologie folgenschwer sein: Viele Lebensvorgänge in Gewässern sind temperatur- oder abflussgesteuert (s. u.). Kommt es hier zu ungewöhnlichen Über- oder Unterschreitungen saisonaltypischer Werte, kann dies zu einer Desynchronisation darauf abgestimmter Entwicklungsprozesse oder in Nahrungsnetzen führen (Hari et al. 2006, Grant et al. 2014). Auch können sich verlängerte Trockenphasen oder verminderte Kältestimuli im Winter nachteilig auf das Überleben oder den Fortpflanzungserfolg von Organismen auswirken (s. u.). Ein aktuelles Beispiel für verschobene Saisonalität aus der terrestrischen Umwelt liefern die großen landwirtschaftlichen Schäden durch die Spätfröste im April 2017. Nach einem sehr milden März waren viele Wein- und Obstgehölze früh im Jahr entwickelt, sodass die jungen Triebe den starken Spätfrösten vor allem in der Nacht vom 19. auf den 20.04.2017 ungeschützt ausgesetzt waren und erfroren.

3. Temperatur und Abfluss als Umweltfaktoren

3.1 Die Abhängigkeit wechselwarmer Organismen von der Umgebungstemperatur

Die allermeisten Gewässerorganismen sind wechselwarm (poikilotherm), d. h. sie verfügen nicht über die Fähigkeit der Thermoregulation. Dies ist Vögeln und Säugetieren vorbehalten (gleichwarme oder homoiotherme Tiere). Abgesehen von Akklimatisationseffekten sind wechselwarme Tiere daher in ihrer Aktivität in starkem Maße von der Außentemperatur abhängig. Sie können ihre Körpertemperatur nur durch ihr Verhalten regulieren, indem sie z. B. kühlere Gewässerbereiche aktiv aufsuchen. Während ein Fischotter als gleichwarmer Organismus seine volle Leistungsfähigkeit über eine weite Temperaturspanne abrufen kann, hat die Bachforelle ein eng begrenztes Temperaturoptimum, das sich saisonal und im Laufe ihrer Individualentwicklung verändert. Außerhalb dieses Optimums nimmt die Leistungsfähigkeit ab. Aus diesem Grund sind wechselwarme Organismen physiologisch viel stärker von Temperaturänderungen betroffen als gleichwarme.
Die biochemische Grundlage für dieses Phänomen ist die Reaktionsgeschwindigkeit-Temperatur-Regel (RGT-Regel, Q_{10}-Regel). Sie besagt, dass sich bei einer Erhöhung der Temperatur um 10 °C der Energieumsatz eines Organismus verdoppelt bis vervierfacht. Für den Stoffwechsel eines Organismus bedeutet dies einen entsprechend höheren Sauerstoffbedarf. Zugleich steigen aber auch die Wachstumsraten von Algen sowie die Sauerstoffzehrungsraten organischer Substanzen abbauender Bakterien an.

3.2 Szenario: Sommerliche Hitzewelle

Was passiert vor diesem Hintergrund bei einer sommerlichen Hitzewelle mit sinkenden Abflüssen und steigenden Wassertemperaturen im Gewässer? Sinkt der Abfluss, verringert sich der benetzte Gewässerquerschnitt, d. h. der Lebensraum und die Ausweichmöglichkeiten der Organismen werden eingeschränkt. Beschattete Uferpartien fallen trocken, die Längsdurchgängigkeit ist durch die niedrigen Wasserstände eingeschränkt. Gleichzeitig steigen der Abwasseranteil und die Schadstoffkonzentrationen aufgrund der geringeren Verdünnung an. Mit zunehmender Temperatur sinkt die Löslichkeit von Sauerstoff im Wasser und die Toxizität mancher Schadstoffe verstärkt sich (Beispiel: Ammoniaktoxizität). Gleichzeitig nimmt die Sauerstoffzehrung im Gewässer zu. Für die wechselwarmen Gewässerorganismen beginnt nun ein „Teufelskreislauf“: Sie haben einen gesteigerten Energie- bzw. Sauerstoffbedarf bei gleichzeitig sinkendem O_2-Angebot im Wasser und sich verschärfender Lebensbedingungen. Bei hohen Temperaturen arbeitet der Stoffwechsel so schnell, dass die Tiere nicht mehr genügend Nahrung finden und beginnen ihre Fettreserven aufzuzehren, um den Körper mit Energie zu versorgen. Bei Fischen verbraucht die erhöhte Aktivität zusätzliche Energie (Reinartz, 2007). Hält diese Situation länger an, sterben die Tiere oder geraten in Dauerstress. Dabei steigt die Anfälligkeit für Krankheiten wie der „Proliferativen Nierenkrankheit“, einer Parasitose bei Salmoniden oder der „Aalrotseuche“, eine Infektionskrankheit, die im Hitzesommer 2003 regional ausbrach.

3.3 Szenario: Milder Winter

Wie sieht das Szenario „milder Winter“ mit dem Ausfall von Kältereizen aus? Temperaturstimuli sind neben der Tageslänge für viele Wirbellose und Fische physiologische Impulsgeber etwa für Reifungs- und hormonell gesteuerter Entwicklungsprozosse. So findet die Fortpflanzung der Bachforelle im Winterhalbjahr bei Temperaturen zwischen 1 bis 10 °C statt (Winterlaicher). Bei der anschließenden Eientwicklung steigen die Mortalitätsraten bei Unterschreiten von 7 °C bzw. Überschreiten von 12 °C Wassertemperatur rasch an (Reinartz 2007). Für eine optimale Bestandsentwicklung ist also nur ein enges saisonales Temperaturfenster gegeben. Niedrige Temperaturen lösen aber auch eine Form der „Winterruhe“ bei karpfenartigen Fischen aus. Wird diese gestört, wirkt sich das auf deren Vitalität aus.
Aus diesen Gründen sind in der Oberflächengewässerverordnung des Bundes auch Regelungen für winterliche Temperaturschwellenwerte ergriffen worden.
Schließlich können niedrige winterliche Temperaturen auch Barrieren für die Etablierung und Ausbreitung gebietsfremder Arten sein (Neobiota). Hier besteht insbesondere die Gefahr der Einwanderung wärmeliebender invasiver Arten aus den Schifffahrtsstraßen in die einmündenden kleinen bis mittleren Flüsse. Diese weisen heute deutlich niedrigere, winterliche Wassertemperaturen auf als die großen Ströme mit ihren Wärmeeinleitungen.

4. Abschätzung der gewässertypspezifischen Vulnerabilität

4.1 These Bach

Effekt: Erwärmung und Austrocknung: Der prognostizierte Anstieg der Lufttemperatur und der damit verbundenen höheren Verdunstungsraten, kann in Quellen und Bachoberläufen zu einer Erwärmung und ggf. zu Austrocknungen führen.

Kritische Parameter: Wassertemperatur und Abfluss: Als kritische Parameter können damit die Wassertemperatur und der Abfluss identifiziert werden. In alpinen und montanen Gewässern kommt hinzu, dass sich durch die angenommene Verkürzung der Zeiten mit Schneelagen, das Abfluss- und Temperaturregime der Gewässer ändert. Die Sauerstoffversorgung dieser Gewässer wird nur im Fall sehr niedriger Abflüsse kritisch, da in den steilen Kerbtälern

das Wasser i. d. R. turbulent fließt und dabei ein stetiger, physikalischer Sauerstoffeintrag erfolgt.

Betroffene Organismen: Wirbellose und Fische: In Quellen, Bergbächen und kleinen alpinen Gewässern ist der Anteil kälteadaptierter (mitunter endemischer Arten) unter den Wirbellosen besonders hoch. Daher spielt die Wassertemperatur als verbreitungsregulierender Faktor in dieser Gewässerzone eine große Rolle (Haidekker & Hering 2008). Aufwärts gerichtete Ausweichbewegungen sind diesen Bewohnern verwehrt oder nur begrenzt möglich („Gipfelfalle“). Eine schleichende Abnahme der Abundanzen dieser Arten oder gar ihr Ersatz durch wärmebedürftigere Vertreter führt letztlich zu einem Umbau der Lebensgemeinschaften. In Fließgewässern der Schweiz wurden solche zonalen Verschiebungen für die Bachforelle bereits nachgewiesen (Hari et al. 2006). Dadurch könnte sich auch das heutige Leitbild für die ökologische Zustandsbewertung langfristig ändern. In den Oberläufen gelten daher sowohl die Wirbellosen als auch die Fische als die am stärksten vom Klimawandel betroffenen Organismen.

4.2 These Fluss

Effekt: Zunehmende Eutrophierung: Mit zunehmender Größe des Gewässers wird der Beschattungsgrad durch Ufergehölze geringer. Die Folge ist, dass Algen und Wasserpflanzen als photoautotrophe Organismen natürlicherweise an Bedeutung gewinnen. Neben dem „Lichtgenuss“ ist dabei der Phosphor als essentieller Pflanzennährstoff der regulative Wachstumsfaktor. Als Folge des Klimawandels werden Starkregenereignisse mit erosiver Wirkung zunehmen, die auch zu einer Erhöhung diffuser Nährstoffeinträge führen können. Ferner zeigen Abflussprojektionen zumindest regional Tendenzen zu einer Verringerung der sommerlichen Abflüsse und zu verschärften Niedrigwassersituationen. Dies kann bei gleichbleibendem Abwasseraufkommen zu einer Aufkonzentrierung abwasserbürtiger Nährstoffe führen. Als dritter Wirkungspfad könnten Änderungen der Landnutzung, beispielsweise durch den verstärkten Anbau von Energiepflanzen (z. B. Maisanbau), zu mehr Nährstoffeinträgen aus landwirtschaftlichen Flächen führen.

Kritische Parameter: Sauerstoffgehalt, pH-Wert, Wassertemperatur: Eine höhere Nährstoffbelastung in den Mittelläufen verstärkt die Eutrophierungseffekte: Gesteigertes Algenwachstum mit Auswirkungen auf den Sauerstoffhaushalt und den pH-Wert des Gewässers sind die Folgen. Die typischen tagesperiodischen Schwankungen dieser Parameter verstärken sich: Hohe Sauerstoffübersättigungen am Tage (Photosynthese) folgen Untersättigungen in der Nacht (Dunkelatmung); die pH-Werte steigen in den Nachmittagsstunden mitunter auf physiologisch kritische Werte an, da die Pflanzen dem Wasser CO_2 (bzw. Kohlensäure) entziehen.

Betroffene Organismen: Wasserpflanzen und Algen, Fische, Neobiota: Erwärmung und zunehmende Eutrophierung beeinflussen v. a. die Wasserpflanzen- und Algenentwicklung. Die oben beschriebenen Reaktionen auf den Stoffhaushalt können insbesondere negative Auswirkungen auf die Fischfauna haben. Fischökologische Modelle sagen in dieser Gewässerzone eine Veränderung der Artenzusammensetzung zu Gunsten wärmetoleranterer, karpfenartiger Fische sowie eine aufwärtsgerichtete Verschiebung der Fischregionen voraus. Insbesondere für die an kühlere Wassertemperaturen angepasste Äsche, die hier lebt, könnte sich der Lebensraum dadurch einengen. Andere Quellen diskutieren die weitere Ausbreitung wärmetoleranter Neobiota in diese Gewässerzone hinein und bezeichnen sie als „Profiteure des Klimawandels“.

4.3 These Strom

Effekt: Unklar: Aufgrund der vielfältigen Nutzungen von Strömen sind die Wirkungsbeziehungen komplex und sowohl in ihrer Effektstärke als auch in ihrer Richtung uneinheitlich. Da Ströme in Deutschland bis auf wenige Abschnitte als Schifffahrtsstraßen ausgebaut sind,

weisen ihre Lebensgemeinschaften i. d. R. hohe Anteile an gebietsfremden Arten auf. Dies gilt v. a. für die Wirbellosen und Fische. Dabei ist das zunehmend globalisierte Transportgeschehen und die Verbindung von Flussgebieten über Kanäle ein übergeordneter Ausbreitungsfaktor. Starke Populationsschwankungen und biologische Umbauprozesse kennzeichnen daher die Biozönosen unserer Wasserstraßen seit langem und maskieren klimabedingte Trends.

Kritische Parameter: Sauerstoffgehalt in staugeregelten Abschnitten: In staugeregelten Wasserstraßen ist von einer zunehmenden Gefahr durch Sauerstoffmangel insbesondere bei Hitzewellen und Niedrigwasser auszugehen. Im diesem Kontext spielt auch die Phytoplankton-Entwicklung eine wichtige Rolle. Neben dem Nährstoffgehalt des Flusses haben v. a. das Abflussgeschehen und (damit oft gekoppelt) die Lichtverhältnisse (Trübung) sowie der Fraßdruck durch Zooplankton-Organismen und Filtrierer eine regulierende Funktion. Da sich das Abflussverhalten insbesondere der Gletscher gespeisten Flüsse wie dem Rhein im Zuge des Klimawandels verändern wird, sind auch Auswirkungen auf die Phytoplankton-Entwicklung zu erwarten. Diese sind aufgrund des komplexen Zusammenwirkens von abiotischen und biotischen Faktoren aber nur schwer prognostizierbar (Hardenbicker et al. 2014).
Betroffene Organismen: Unklar: Unabhängig von den Ausbreitungsvektoren dürften wärmeliebende Neobiota von der bereits heute nachweisbaren Erwärmung der Ströme profitieren.

5. Vorbeugende Maßnahmen

Grundsätzlich können all jene Maßnahmen als vorbeugend verstanden werden, die die Gewässer von heutigen Stressoren befreien. Dadurch können die Wirkungen des Klimawandels vom Gewässer selbst durch die ökosystemeigene Widerstandsfähigkeit (Resilienz) besser abgepuffert werden. Diese Maßnahmen werden als No-regret-Maßnahmen bezeichnet (Jähnig et al. 2010).

Eine einfache und wirksame Maßnahme, die den oben beschriebenen Folgen des Klimawandels direkt entgegenwirkt und die zugleich zur Verbesserung des ökologischen Zustands in vielen Gewässern angezeigt wäre, ist die Förderung bzw. der Bestandsschutz einer bachbegleitenden gewässertypischen Gehölzflur. Ein Gehölzsaum hat nicht nur eine Pufferwirkung vor diffusen Schad- und Nährstoffeinträgen, sondern beschattet kleinere Gewässer auch effektiv. Die Unterschiede in der Wassertemperatur zwischen beschatteten und unbeschatteten Abschnitten von Bächen können im Sommer bis zu 6 °C betragen (Hering 2013). Modellbetrachtungen an einem Gewässer in der Schweiz zeigen, dass bereits eine abschnittsweise Beschattung insbesondere bei Niedrigwasser große Effekte auf die Temperatur eines Gewässers haben kann (Moosmann et al. 2005). Selbst an Flüssen, die für eine vollständige Abschattung bereits zu breit sind, hat die Ufervegetation noch einen deutlichen Einfluss auf die Temperatur, wie eine Studie an zwei österreichischen Flusssystemen zeigt (Melcher et al. 2016).

Neben fehlender Beschattung sind die häufig in Oberläufen anzutreffenden Teiche im Hauptschluss kontraproduktiv, da sie zu einer zusätzlichen Aufwärmung der Gewässer sowie zu Verdunstungsverlusten führen, die den Abfluss schwächen. Gleiches gilt für andere Aufstauungen. Sie fragmentieren darüber hinaus die Gewässer und schränken die Ausweichmöglichkeiten in kühlere und/oder beschattete Gewässerzonen für Fische ein. Auch müssen Kühlwassereinleitungen insbesondere in kleinere Gewässer zukünftig stärker unter Berücksichtigung steigender Wassertemperaturen in Folge des Klimawandels betrachtet werden. Eine naturnahe Gewässermorphologie trägt ebenfalls zur Abmilderung von Klimafolgewirkungen bei. So bieten Bäche mit hoher Tiefenvarianz und Kolken eine gewisse „thermische Trägheit“ sowie Schutz vor kritischen Sohlschubspannungen bei Hochwasserereignissen. Darüber hinaus fördert eine hohe Substrat- und Strömungsdiversität der Sohle den physikali-

schen Sauerstoffeintrag in die Gewässer und puffert damit die temperaturbedingten Sauerstofflöslichkeitsdefizite ab.
Als vorbeugende Maßnahme kann auch die weitere Verminderung von Nährstoffeinträgen verstanden werden, da sich in den Mittelläufen Eutrophierungstendenzen durch den Klimawandel verstärken können.
Um den Wirkungen des Klimawandels auf die Gewässer und ihre Lebensgemeinschaften effektiv entgegentreten zu können, sind auch gezielte Forschungs- und Monitoring-Aktivitäten, wie sie im Rahme der KLIWA-Kooperation betrieben werden, wichtig. Z. B. kann eine bessere Identifizierung besonders vulnerabler Gewässertypen bzw. betroffener Regionen eine stärkere räumliche Differenzierung bei der Maßnahmenplanung bedeuten. Hier sind insbesondere die Arbeiten zur Niedrigwasserproblematik und in Bezug auf die Modellierung zukünftiger Wassertemperaturentwicklungen unserer Gewässer wichtig (s. Beiträge von Iber und Haag-Wanka in diesem Band).

6. Literatur

Bayerisches Landesamt für Wasserwirtschaft (2003): Taxaliste der Gewässerorganismen Deutschlands. Informationsberichte Heft 1/03, 388 S.

Beierkuhnlein C., A. Jentsch, J. Jäger und G. Ellwanger (2014): Naturschutz in Zeiten des Klimawandels: Herausforderungen und Konsequenzen. Naturschutz und Biologische Vielfalt (BfN) (137), S. 417-432.

Gessner, M. O. (2010): Vergessene Vielfalt im Wasser? Biodiversität – Fakten, Mythen, Perspektiven. Eawag News 69d, S. 4-7.

Grant K., R. Hein, E. Gellesch, L. Nagy, H. Schlumprecht, C. Beierkuhnlein (2014): Biotische Interaktionen im Klimawandel. Naturschutz und Biologische Vielfalt (BfN) (137), S. 212-273.

Haidekker A. and D. Hering (2008): Relationship between benthic insects (Ephemeroptera, Plecoptera, Coleoptera, Trichoptera) and temperature in small and medium-sized streams in Germany: A multivariate study. Aquatic Ecology (42), S. 463-481.

Hardenbicker P., S. Rolinski, M. Weitere, H. Fischer (2014): Contrasting long-term trends and shifts in phytoplankton dynamics in two large rivers. International Review of Hydrobiology (99), S. 287–299.

Hari R. E., D. M. Livingstone, R. Siber, P. Burkhardt-Holm, H. Güttinger (2006): Consequences of climatic change for water temperature and brown trout populations in Alpine rivers and streams. Global Change Biology (12), S. 10–26.

Hering, D. (2013): Ufergehölze und Wassertemperatur. – NUA Seminarbericht (13), S. 99-102.

Jähnig S., P. Haase und D. Hering (2010): Einfluss des Klimawandels auf die Fließgewässerqualität – Literaturauswertung und erste Vulnerabilitätseinschätzung. Auftrag im Rahmen des Kooperationsvorhaben KLIWA, 103 S.

Moosmann L., M. Schmid, und A. Wüest (2005): Einfluss der Beschattung auf das Temperaturregime der Orbe. EAWAG-Publikation. 27 S.: http://www.eawag.ch/fileadmin/Domain1/Beratung/Beratung_Wissenstransfer/Partner_Projekte_CH/Einfluss_der_Beschattung_auf_das_Temperaturregime_der_Orbe_2005_einfluss.pdf.

Melcher, A., F. Dossi, W. Graf, F. Plettenbauer, K. Schaufler, G. Kalny, H. P. Rauch, H. Formayer, H. Trimmel und P. Weihs (2016): Der Einfluss der Ufervegetation auf die Wassertemperatur unter gewässertypspezifischer Berücksichtigung von Fischen und benthischen Evertebraten am Beispiel von Lafnitz und Pinka. Österreichische Wasser und Abfallwirtschaft (68), S. 308-323.

Reinartz, R. (2007): Auswirkungen der Gewässererwärmung auf die Physiologie und Ökologie der Süßwasserfische Bayerns. – Literaturstudie im Auftrag des Bayerischen Landesamtes für Umwelt, Referat 57 / Gewässerökologie, 122 S.

Schlumprecht H., A. Gohlke, C. Beierkuhnlein (2014): Klimaanpassung für FFH-Arten und Lebensräume. Naturschutz und Biologische Vielfalt (BfN) (137), S. 400-416.

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

Christian Iber (LfURheinland-Pfalz), Maria Foltyn (LfU Bayern), Wolfgang Hennegriff (LUBW)

1. Einleitung

Klimabedingte Veränderungen auf die Wasserwirtschaft in Süddeutschland zeigen sich in allen Abflussbereichen vom Hochwasser bis ins Grundwasser. Ausgeprägte Trocken- und Hitzephasen und oft darauf folgende Niedrigwasserphasen der letzten Jahre, insbesondere 2015, rufen auch das Niedrigwasser wieder ins Bewusstsein. Niedrigwasserabflüsse haben einen erheblichen Einfluss auf viele Sektoren und bergen ein nicht zu unterschätzendes Schadenspotential, das mitunter gleichbedeutend mit dem von Hochwasser sein kann.

In KLIWA erfolgen die Untersuchungen der Abflüsse in zwei Stufen. Die Vergangenheit wird durch die Auswertung und Analyse langjähriger Messreihen in einem umfassenden Monitoring erfasst. Näheres ist Kapitel 2 zu entnehmen. Für den zweiten Schritt, die Abschätzung möglicher Änderungen in der Zukunft, werden Klimaprojektionen herangezogen und in Wasserhaushaltmodellierungen angewendet. Deren ausgewertete Ergebnisse werden für Aussagen relativer Änderungstendenzen genutzt und in die Bandbreite eingeordnet.

Das Themenfeld Niedrigwassermanagement ist ein Schwerpunkt des 6. KLIWA-Symposiums. Neben den hier aufgezeigten Grundlagen der bisherigen Entwicklungen und möglichen Änderungen in der Zukunft sind weitergehende Ergebnisse zu aktuellen Aktivitäten im Vorhaben KLIWA in den Zusammenfassungen von Frau Maria Foltyn und Herrn Dr. Michael Stölzle zu finden.

2. Langzeitverhalten der Vergangenheit und Gegenwart

Das Monitoring, also der Blick zurück in die Vergangenheit, ist ein wichtiger Projektbereich im Vorhaben KLIWA. Es besteht aus einem langfristig angelegten und einheitlichen Vorgehen zur Auswertung der relevanten Kenngrößen in ihrer zeitlichen Entwicklung. In regelmäßigen Abständen erfolgen Aktualisierungen und Veröffentlichung in Form von Monitoringberichten (KLIWA 2016, KLIWA 2011). Dem aktuellen Monitoringbericht liegt eine von KLIWA beauftragte Studie zur statistischen Auswertung der benötigten hydrologischen Kenngrößen zugrunde, welche vom Karlsruher Institut für Technologie (KIT) durchgeführt wurde. Die Auswertungen der meteorologischen Kennwerte erfolgten durch den Deutschen Wetterdienst (DWD).

Der Auswertungszeitraum des aktuellen Monitoringberichts 2016 liegt zwischen 1931 und 2015. Im Gegensatz zum vorigen Monitoringbericht wurde der Zeitraum somit um fünf Jahre verlängert, im Folgenden auch als Zeitreihenverlängerung bezeichnet.

<u>Entwicklung von Lufttemperatur, Niederschlag und Wetterlagen</u>

Für den untersuchten Zeitraum von 1931 bis 2015 hat sich die Lufttemperatur in Süddeutschland bereits um durchschnittlich 1,3 °C erhöht und eine Verstärkung der Trendsignifikanz wurde festgestellt. Durch die Zeitreihenverlängerung bis 2015 ergab sich, dass sich dieser Trend weiter fortgesetzt hat. Für nahezu alle Monate zeigen sich zudem ebenfalls Zunahmen der mittleren Lufttemperatur.

Für den Kennwert Niederschlag sind gegenüber der Lufttemperatur überwiegend keine eindeutigen Änderungstrends zu beobachten. Die Trends der mittleren Gebietsniederschlagshöhen haben sich in ihrer Trendsignifikanz gegenüber dem letzten Monitoringbericht 2011 abgeschwächt. Positive Trends sind für das Winterhalbjahr vorhanden, im Sommerhalbjahr gibt es jedoch keine eindeutige Entwicklung. In den letzten 15 Jahren ist eine gegenläufige Entwicklung zu beobachten. Die Verschiebungen im Sommerhalbjahr sind auch durch vermehrt auftretende sommerliche Starkniederschläge zurückzuführen.

Eine statistische Auswertung der Entwicklung trockener Großwetterlagen erfolgt in KLIWA Heft 18 (KLIWA 2012). Es zeigt sich, dass in den vergangenen Jahrzehnten Trockenperioden und Hitzeperioden, die Niedrigwasserabflüsse stark begünstigen, häufig durch eine Kombination weniger Großwetterlagen verursacht wurden. Ein Anstieg im Auftreten dieser auslösenden Großwetterlagen ist gegeben und signifikant.

Langzeitverhalten der Niedrigwasserabflüsse

Nachdem die Niedrigwasserabflüsse und -kennwerte im Monitoringbericht 2011 (KLIWA 2011) erstmals analysiert wurden, wurde im aktuellen Monitoringbericht 2016 (KLIWA 2016) durch die Zeitreihenverlängerung ein Vergleich möglich. Die Untersuchung des Langzeitverhaltens der Niedrigwasserabflüsse erfolgte an 30 ausgewählten Pegeln, je zehn Pegel pro Land. Der Auswertungszeitraum ist 1951-2015. Zum Vergleich früherer und aktueller Änderungen werden neben der Gesamtreihe zwei Teilzeitreihen, eine bis 1973 und die andere ab 1973, betrachtet.

Um sicher zu gehen, dass die Kennwerte über die gesamte Niedrigwasserperiode erfasst werden, beginnt das Jahr für alpine Pegel im Oktober und für pluviale Pegel im Juni. Es handelt sich in den Auswertungen also nicht um die Betrachtung von hydrologischen (Halb-) Jahren. Dieses Vorgehen wurde im vorigen Monitoringbericht ebenfalls angewendet.

Zur Veranschaulichung der Aussagen sind drei Pegel exemplarisch dargestellt:

- Pegel Bad Rotenfels/Murg, Mittelgebirgsfluss aus dem nördlichen Schwarzwald mit einem Einzugsgebiet von ca. 470 km^2,
- Pegel Martinstein/Nahe, Mittelgebirgsfluss aus dem Hunsrück und Nordpfälzer Bergland mit einem Einzugsgebiet von ca. 580 km^2 und
- Pegel Kempten/Iller, alpin geprägter Abfluss aus dem Voralpenraum, nicht durch Überleitungen beeinflusst, mit einem Einzugsgebiet von ca. 950 km^2.

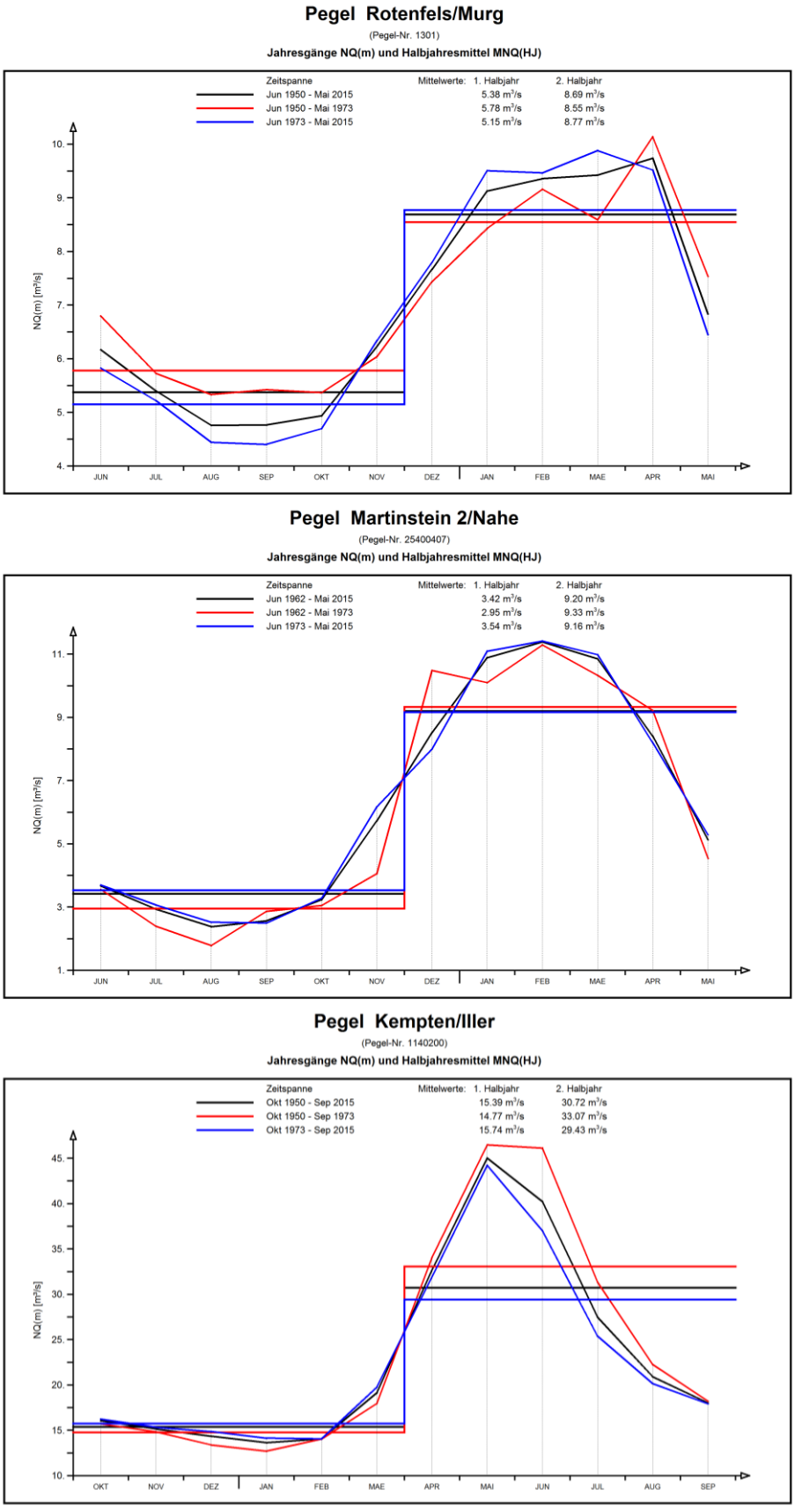


Abbildung 1. Jahresgang der mittleren monatlichen Niedrigwasserabflüsse und Halbjahresmittel am Beispiel der Pegel Bad Rotenfels, Martinstein und Kempten für die gesamte Zeitreihe und die beiden Teilzeitreihen 1950-1973 und 1973-2015.

Am Pegel Bad Rotenfels/Murg treten die niedrigsten Abflüsse im Sommerhalbjahr, insbesondere August und September, auf. Der Vergleich der Jahresgänge und Halbjahresmittel der drei Zeiträume ist in Abbildung 1 dargestellt. Es zeigt sich, dass im Winterhalbjahr eine Zunahme der mittleren monatlichen Niedrigwasserabflüsse stattgefunden hat, während im Sommerhalbjahr eine Abnahme der Abflüsse zu beobachten ist. Die Änderungen im Sommerhalbjahr hin zu niedrigeren Abflüssen sind deutlicher, als die Zunahmen im Winterhalbjahr.

Am Pegel Martinstein/Nahe ist eine andere Entwicklung feststellbar (Abb. 1) als an der Murg. Während das Halbjahresmittel im Winterhalbjahr eine geringe Abnahme bis fast gleichbleibende Entwicklung zeigt, kommt es im Sommerhalbjahr zu Zunahmen. In den abflussärmsten Monaten des Sommerhalbjahres ist in Martinstein demnach eine Entspannung zu beobachten.

Am bayerischen Pegel Kempten/Iller beginnt die Darstellung in Abbildung 1 mit dem Winterhalbjahr, da es sich um einen nival geprägten Pegel handelt, an dem die niedrigsten Abflüsse im Winterhalbjahr zwischen November und Februar auftreten. Hier ist eine Zunahme der mittleren monatlichen Niedrigwasserabflüsse zu beobachten. Im Sommerhalbjahr kommt es dagegen zu deutlichen Abnahmen.

Die Ergebnisse der Trenduntersuchungen für alle 30 Pegel sind in Tabelle 1 für die betrachteten Niedrigwasserkennwerte zusammengefasst. Insgesamt zeigt sich für NQ(J) und NM7Q(J), dass eine geringe Mehrheit von zunehmenden Trends für den Zeitraum 1951 bis 2015 zu erkennen ist. Eine deutliche Tendenz ist jedoch nicht abzulesen. Die ermittelten Veränderungen sind jedoch mehrheitlich nicht signifikant. Pegel mit zunehmenden Trends sind insgesamt deutlich häufiger vertreten.

Tabelle 1. Überblick über das Trendverhalten der Niedrigwasserabflüsse NQ(J) (niedrigster Jahreswert) und NM7Q(J) (niedrigster 7-tägiger Mittelwert) an den 30 untersuchten Pegeln in Baden-Württemberg, Bayern und Rheinland-Pfalz im Vergleich.

Tendenzen	**Untersuchungszeitraum von**		
	1951–2000*	**1951–2010***	**1951–2015***
NQ(J) / Hydrologisches Gesamtjahr			
↘ Pegel mit abnehmendem Trend / **signifikant**	11 / **2**	12 / **2**	12 / **3**
↗ Pegel mit zunehmendem Trend / **signifikant**	19 / **9**	18 / **11**	18 / **10**
NM7Q(J) / Hydrologisches Gesamtjahr			
↘ Pegel mit abnehmendem Trend / **signifikant**	14 / **4**	14 / **4**	13 / **3**
↗ Pegel mit zunehmendem Trend / **signifikant**	16 / **5**	16 / **8**	17 / **8**

* Gesamtzahl Pegel mit vorliegendem Trend / **Anzahl Pegel mit signifikanten Trend $\alpha \geq 80$ %**

Die einzelnen Bundesländer weisen dabei Unterschiede auf. Während in Baden-Württemberg und Bayern an 70 % bzw. 90 % der Pegel zunehmende Niedrigwasserabflüsse vorhanden sind, ist der Anteil in Rheinland-Pfalz mit ca. 30 % deutlich geringer. Die Mehrzahl der Pegel in Rheinland-Pfalz tendiert somit zu einer Abnahme im Niedrigwasserbereich. In Bayern zeigt sich zudem eine unterschiedliche Entwicklung des Eintrittszeitpunkts von Niedrigwasserphasen zwischen den Mittelgebirgsabflüssen in Nordbayern und den alpin geprägten Abflüssen in Südbayern. So wurden in gesonderten Untersuchungen (Willems 2011; Willems & Stricker, 2017) mit 71 Pegeln deutlich mehr bayerische Pegel untersucht. Es zeigt sich, dass in Nordbayern, wo Niedrigwasserabflüsse eher im Sommerhalbjahr auftre-

ten, die Tendenz hin zu einem späteren Eintritt von Niedrigwasserphasen besteht. In Südbayern, wo die Niedrigwasserabflüsse eher im Winterhalbjahr typisch sind, verfrüht sich der Eintritt (LfU 2016).

Gegenwärtige Entwicklung der Niedrigwasserabflüsse

Seit der Jahrtausendwende, insbesondere aber im laufenden Jahrzehnt, zeigt sich eine Zunahme an überdurchschnittlich warmen Jahren und Hitzeperioden. Allein die drei Jahre 2011, 2014 und 2015 liegen unter den zehn wärmsten je gemessenen Jahren in Deutschland. Im saisonalen Vergleich fällt in den letzten 15 Jahren die Erwärmung im Sommerhalbjahr stärker aus als im Winterhalbjahr. Im langjährigen Monitoring der Lufttemperatur ist jedoch nach wie vor die Erwärmung im Winterhalbjahr größer.

Im Kapitel „Klima-Monitoring in KLIWA“ von Frau Dr. Rauthe ist in Abbildung 7 das Extremjahr 2015 als Vergleich der drei KLIWA-Länder mit dem Bundesdurchschnitt abgebildet. Die in 2015 stattgefundene Trockenheit hat die süddeutschen Bundesländer deutlich überdurchschnittlich getroffen. Während im Bundesdurchschnitt etwa 10 % weniger Niederschlag im Vergleich zum langjährigen Mittel (1961-1990) fiel, so war das Defizit der drei KLIWA-Länder mit -23 % deutlich ausgeprägter. Diese starke Abweichung vom Bundesdurchschnitt entstand insbesondere durch ausbleibende Niederschläge in den Sommermonaten von Juli bis September.

3. Wie ändert sich die Niedrigwassersituation bis 2050?

Grundlagen der Erfassung möglicher zukünftiger Änderungen

Kann der Blick in die Vergangenheit mit der Analyse von langjährigen Messreihen relativ einfach zu belastbaren Änderungstendenzen führen, so erfordert der Blick in die Zukunft mehr Spielraum in seiner Interpretation. In KLIWA werden Abflussprojektionen erstellt, um eine Bandbreite der zukünftigen Entwicklung aufzeigen zu können. In diesem Prozess sind inzwischen alle KLIWA-Länder flächendeckend modelliert. Ein wichtiger Bestandteil ist hierbei die Wahl des Regionalmodells. Die Schnittmenge an gemeinsamen Projektionen für die drei Länder besteht aus dem statistischen WETTREG-Modell und dem dynamischen Regionalmodell COSMO-CLM und ihren jeweiligen unterschiedlichen Läufen.

In Baden-Württemberg erfolgten Abflussprojektionen mit verschiedenen Versionen der WETTREG-Familie (2003, 2006 und 2009) sowie des COSMO-CLM-Modells (Versionen 4.2, 4.8 und 5.0). Zudem wurde ein Lauf des *Rossby Centre regional atmospheric model* (RCA4) gewählt, ein schwedisches Modell aus dem CORDEX-Ensemble (SMHI 2014).

In Bayern kommt ein Ensemble aus elf plausibilitätsgeprüften Projektionen zum Einsatz. Dieses Ensemble schließt unter anderem das WETTREG2010-Modell („worst case“) sowie das COSMO-CLM-Modell ein.

In Rheinland-Pfalz sind Abflussprojektionen mit dem Modell WETTREG2006 sowie mit dem Modell COSMO-CLM (Versionen 4.2 und 4.8) vorhanden.

Ergebnisse der Abflussprojektionen für die nahe Zukunft bis 2050

Für die Lufttemperatur ergibt sich für die meisten Szenarien eine relativ eindeutige Zunahme der mittleren Lufttemperatur. Die genaue Ausprägung richtet sich nach der verwendeten Projektion. Die möglichen Veränderungen des Niederschlagsregimes sind regional unterschiedlich und nicht eindeutig. Ein Grund ist eine hohe räumliche und zeitliche Variabilität der

Kenngröße Niederschlag. Tendenziell ist jedoch zu erwarten, dass es im Winterhalbjahr zu mehr Niederschlag kommt und im Sommerhalbjahr zu weniger Niederschlag. In der Zukunft steigt die Wahrscheinlichkeit im Auftreten von Wetterlagen, die Trocken- und Hitzephasen begünstigen, deutlich an (KLIWA 2012). Davon könnte Bayern stärker betroffen sein als Baden-Württemberg und Rheinland-Pfalz.

Nachfolgend sind Ergebnisse der mittleren monatlichen Niedrigwasserabflüsse für die drei Pegel Kempten/Iller, Martinstein/Nahe und Bad Rotenfels/Murg gezeigt. Die Darstellung erfolgte nach jeweiligen Vorgaben der Länder und unterscheidet sich daher geringfügig.

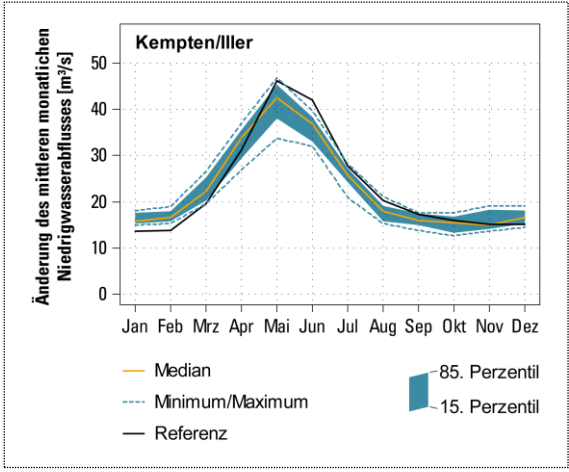


Abbildung 2. Mittlere monatliche Niedrigwasserabflüsse am Pegel Kempten / Iller für den Zeitraum 2021 - 2050 (Ensemble aus elf Projektionen) und der Referenz (LfU 2016)).

Für den Pegel Kempten (Abb. 2) wurde ein Ensemble aus elf Projektionen als Grundlage für die dargestellte Bandbreite genutzt und zeigt das relative Änderungssignal der Projektionen bezogen auf die Referenz. In diese Bandbreite wird neben dem Median auch das 85. bzw. 15. Perzentil ermittelt. Das nival geprägte Regime mit den niedrigsten Abflüsse in den Monaten vom August bis Februar gibt das Ensemble gut wieder. Zwischen August und Dezember ändern sich die Niedrigwasserabflussmengen im Median des Ensembles kaum, von Januar bis April zeigen sich allerdings deutliche Zunahmen. Im Vergleich mit Abb. 1, die das Langzeitverhalten aufzeigt, ist hierbei auch ein früherer Eintritt der Niedrigwasserperioden in der Zukunft erkennbar, so wie dies in Studien aus Bayern aus dem Monitoring bereits identifiziert wurde (Willems & Stricker 2017). Mit einer Abnahme der Niedrigwasserabflüsse ist in den Monaten Mai bis August zu rechnen. Die Abnahmen in den Sommermonaten mit höherem Abfluss können dennoch zu Problemen führen, wenn die wasserwirtschaftliche Nutzung und die Ökologie an diese höheren Abflüsse angepasst sind. Niedrigwasser in den Wintermonaten ist derzeit nicht als problematisch identifiziert, eine Entspannung zwischen Dezember und Februar ist zudem wahrscheinlich.
Mit Blick auf Gesamtbayern zeigen sich im Median des Ensembles in der nahen Zukunft im Winterhalbjahr meist keine Änderungen oder leichte Zunahmen der Niedrigwasserabflüsse (LfU 2016). Dagegen ergibt sich im Sommerhalbjahr eine Zweiteilung in der Entwicklungsrichtung mit einer leichten Entspannung der Niedrigwasserabflüsse nördlich und einer leichten Verschärfung südlich der Donau. Im weiteren Verlauf des 21. Jahrhunderts ist allerdings flächendeckend mit einer Abnahme der Abflüsse zu rechnen.

Die Bandbreite der möglichen Änderungen der mittleren monatlichen Niedrigwasserabflüsse am Pegel Martinstein/Nahe sind in Abbildung 3 dargestellt. Grundlage sind flächendeckende Abflussprojektionen mit dem regionalen Klimamodell COSMO-CLM4.8, welches drei unterschiedliche aber jeweils gleich wahrscheinliche Läufe beinhaltet. Die Bandbreite ist als relatives Änderungssignal aus den Simulationsläufen erfasst und wurde prozentual auf die Messwerte aufgeschlagen. Der Vergleich zeigt eine Zunahme der mittleren monatlichen Niedrigwasserabflüsse im Winterhalbjahr. Für das Sommerhalbjahr sind eher leichte Abnahmen bis gleichbleibende Tendenzen möglich. Die Änderungen im Winterhalbjahr sind stärker ausgeprägt, als im Sommerhalbjahr.
In Rheinland-Pfalz sind die Ergebnisse insgesamt nicht eindeutig durch zu- oder abnehmende Niedrigwasserabflüsse gekennzeichnet. Im Sommerhalbjahr zeigen sich in einigen Regi-

onen, z. B. der Vorderpfalz, geringe Zunahmen der Niedrigwasserabflüsse, also eine Entspannung.

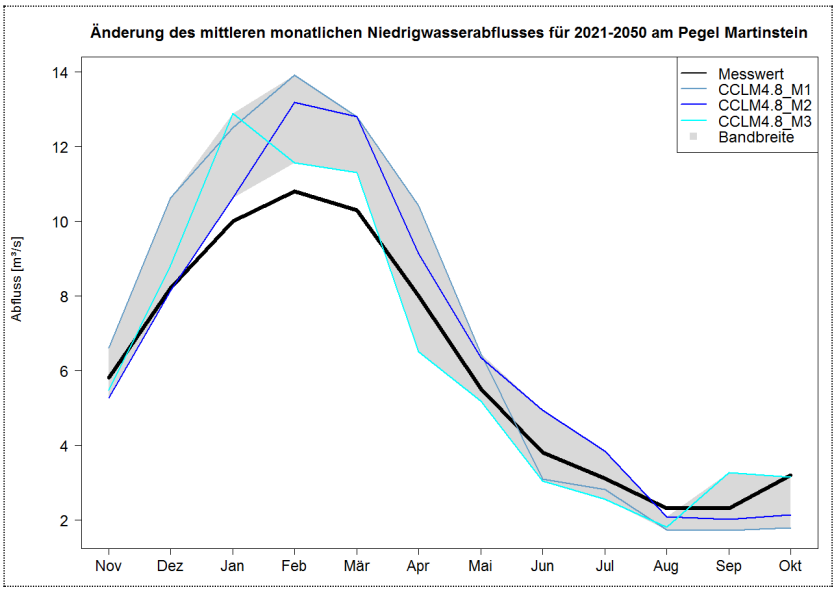


Abbildung 3. Mittlere monatliche Niedrigwasserabflüsse am Pegel Martinstein/Nahe für den Zeitraum 2021-2050 (COSMO-CLM4.8-Ensemble) und Messwerte.

Für den Pegel Bad Rotenfels/Murg liegen bereits Ergebnisse der neuen Version 5.0 des regionalen Klimamodells COSMO-CLM vor (Abb. 4). Diese zunächst nur aus einem Lauf bestehende Projektion wurde für das Land Baden-Württemberg flächendeckend in einer Abflussprojektion angewendet. COSMO-CLM5.0 besitzt einen globalen Antrieb in Form des MPI-ESM-LR-Modells und als Basis das RCP8.5-Emissionsszenario.

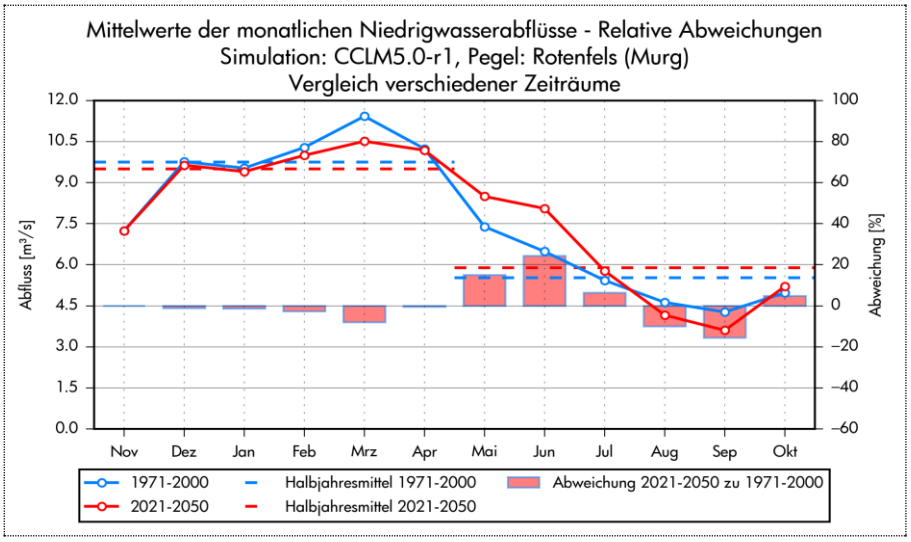


Abbildung 4. Mittlere monatliche Niedrigwasserabflüsse und Halbjahresmittel am Pegel Bad Rotenfels/Murg für den Zeitraum 2021-2050 (COSMO-CLM5.0) im Vergleich zum Simulationszeitraum 1971-2000.

Näheres zu RCP-Szenarien finden Sie in den Formulierungen von Holger Komischke später im Heft. Am Pegel Bad Rotenfels bestätigen sich bereits durch frühere Abflussprojektionen mit COSMO-CLM erlangte Erkenntnisse, dass es in den Spätsommermonaten August und September zu Abnahmen der mittleren monatlichen Niedrigwasserabflüsse kommen wird.

Eine zusätzliche Auswertung der Jahresminima der Kalenderjahre von Niedrigwasserabflüssen hat ergeben, dass diese sowohl in der Projektion COSMO-CLM5.0 als auch dem RCA4-Lauf in der nahen Zukunft abnehmen. Deutliche Abnahmen im Median und im Maximum der Abflüsse deuten darauf hin, dass die Intensität jährlicher Niedrigwasser zunehmen wird.

In Abbildung 5 sind für eine Auswahl an Pegeln in Süddeutschland bisherige Ergebnisse von Abflussprojektionen und deren Bandbreite bezogen auf den MNQ abgebildet. Die Ergebnisse zeigen für das hydrologische Sommerhalbjahr von Mai bis Oktober für die nahe Zukunft im Vergleich zur Referenz mehrheitlich geringe bis teils deutliche mögliche Abnahmen der mittleren Niedrigwasserabflüsse. Aber auch hier zeigt sich das nicht immer eindeutige Bild der Änderungen: Auch Pegel mit überwiegenden Zunahmen – was eine Entspannung bedeuten würde – liegen im Rahmen der Bandbreite. Mit den Pegeln Maxau und Kaub sind auch zwei Pegel am Rhein enthalten, deren abnehmende Tendenz Stressphasen erwarten lassen. Bei beiden Pegeln vergrößert sich die Bandbreite vom eher nival geprägten Pegel Maxau bis zum pluvialen Pegel Kaub.

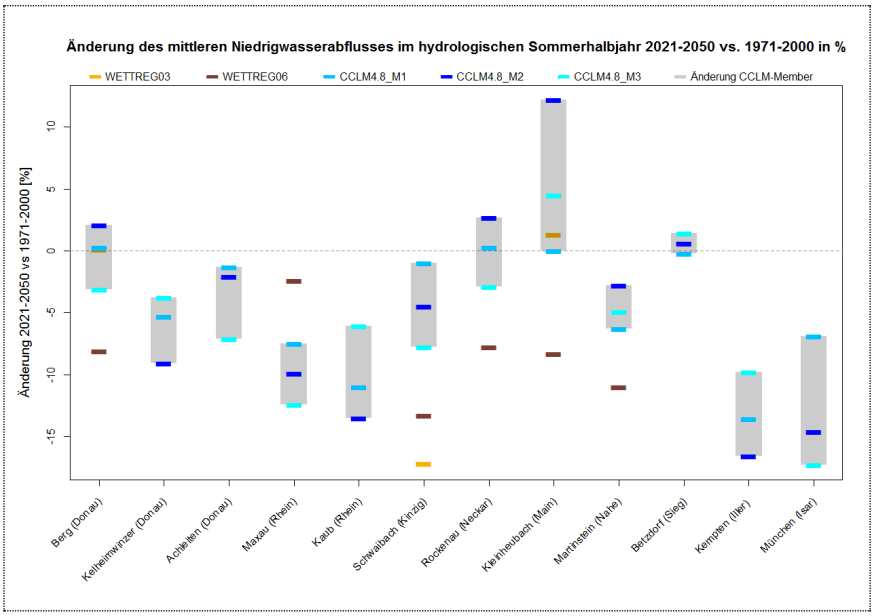


Abbildung 5. Änderung des mittleren Niedrigwasserabflusses MNQ im hydrologischen Sommerhalbjahr (Mai bis Oktober) im Vergleich der nahen Zukunft (2021-2050) zur Referenz (1971-2000). Dargestellt sind ausgewählte Pegel in Baden-Württemberg, Bayern und Rheinland-Pfalz.

4. Fazit und Ausblick

Die Analyse des Langzeitverhaltens der Niedrigwasserabflüsse ist geeignet, die Änderungstendenzen der Vergangenheit aufzuzeigen und vergleichbar zu machen. Der Qualität der Messwerte kommt dabei eine wichtige Bedeutung zu. Eine Optimierung von Abflusskurven im Niedrigwasserbereich führt zu belastbareren Aussagen. Die Niedrigwasserwerte können durch Entnahmen oder Ableitungen, durch Kläranlagenzuflüsse und Speicherbewirtschaftungen beeinflusst sein. Teilweise erfolgt eine gezielte Niedrigwasseraufhöhung aus Talsperren oder Überleitungen, beispielsweise im Überleitungssystem Donau-Main in Bayern. Bei der Interpretation der Kennwerte ist dies unbedingt zu beachten. Aus diesem Grund ist eine Verbesserung der Qualität von Abflusskurven im Niedrigwasserbereich vorzunehmen, um Aussagen belastbarer zu machen.

Weitere Projektionen sind notwendig, um die vorhandene Bandbreite möglicher Veränderungen zu festigen. Dies kann mit neuen Projektionen und neuen Zeiträumen, wie einer mittle-

ren oder fernen Zukunft, erfolgen. Bedacht werden muss auch hier, dass Klimaprojektionen Unsicherheiten mit sich bringen, die bei der Einordnung der jeweiligen Ergebnisse zu beachten sind.

Die Ergebnisse der zu erwartenden Veränderungen der Zukunft werden in einem KLIWA-Kurzbericht im Jahr 2018 veröffentlicht werden.

5. Literatur

Ihringer, Jürgen (2016): Langzeitverhalten von Abfluss-Kennwerten an ausgewählten Pegeln in Baden-Württemberg, Bayern und Rheinland-Pfalz.

KLIWA, Klimaveränderung und Wasserwirtschaft (2011): Klimawandel in Süddeutschland - Veränderungen von meteorologischen und hydrologischen Kenngrößen. Monitoringbericht 2011. veröffentlicht auf www.kliwa.de.

KLIWA, Klimaveränderung und Wasserwirtschaft (2012): Die Entwicklung von trockenen Großwetterlagen mit Auswirkungen auf den süddeutschen Raum. KLIWA-Berichte, Heft 18, 155 S. veröffentlicht auf www.kliwa.de.

KLIWA, Klimaveränderung und Wasserwirtschaft (2016): Klimawandel in Süddeutschland - Veränderungen von meteorologischen und hydrologischen Kenngrößen. Monitoringbericht 2016. veröffentlicht auf www.kliwa.de.

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

Swedish Meteorological and Hydrological Institute (2014): CORDEX scenarios for Europe from the Rossby Centre regional climate model RCA4.

Willems, Winfried; Stricker, Konstantin (2017): Langzeitverhalten von Niedrigwasserabflüssen und Wassertemperaturen in Bayern sowie Wassertemperaturen in Baden-Württemberg, Fortschreibung und Erweiterung. Endbericht im Auftrag des bayerischen Landesamtes für Umwelt (LfU) sowie der Landesanstalt für Umwelt Baden-Württemberg (LUBW). [unveröffentlicht], Ottobrunn, 210 S.

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

Thomas Gudera, LUBW

1. Einleitung und Zielsetzung

In Süddeutschland wird der überwiegende Teil des Trinkwassers aus dem Grundwasser gewonnen. Eine nachhaltige Bewirtschaftung der Grundwasserressourcen ist daher von großer Bedeutung und die Kenntnis über mögliche langfristige Entwicklungen der regionalen Grundwasserverhältnisse ist deswegen von grundlegendem Interesse. Im Rahmen des Kooperationsvorhabens KLIWA wurden mit dem Bodenwasserhaushaltsmodell GWN-BW (Gudera & Morhard 2015) 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).

Die vorliegenden Simulationsergebnisse stellen die grundwasserrelevanten Wasserhaushaltskomponenten in den vier beteiligten Ländern in einheitlicher Form bereit. Zunächst wurde die sechzigjährige Periode von 1951 bis 2010 betrachtet, es zeichnete sich dann noch während der laufenden Bearbeitung ab, dass sich das Jahr 2015 zu einem außergewöhnlichen Trockenjahr entwickelt, weshalb die Langzeitsimulation zu Bodenwasserhaushalt und Grundwasserneubildung um die Periode von 2011 bis 2015 erweitert wurde. Damit kann nun eine Entwicklung in den vergangenen 6½ Dekaden beschrieben werden und der Frage nachgegangen werden, ob bereits ein Klimatrend feststellbar ist.

Grundwassersysteme reagieren oft erst mit großer zeitlicher Verzögerung auf Änderungen der sie beeinflussenden Randbedingungen wie z. B. der Grundwasserneubildung aus dem Niederschlag (GwN). Aus diesem Grund wurde die dekadische und dreißigjährige Variabilität der GwN in den einzelnen Ländern und in den verschiedenen Naturräumen betrachtet. Damit wurden erste regionale und überregionale Vulnerabilitätsbetrachtungen angestellt. Darüber hinaus steht mit den vorliegenden Ergebnissen auch eine breitere Grundlage für die Interpretation von Simulationsergebnissen bereit, die auf Basis von regionalen Klimaprojektionen ermittelt werden.

2. Untersuchungsgebiet und Berechnungsgrößen

Das Untersuchungsgebiet umfasst mit einer Fläche von 147 286 km² den gesamten süddeutschen Raum und wird im Modell durch 401 728 Grundflächen aufgelöst. Die durchschnittlichen, auf Grundflächen bezogenen, Geländehöhen reichen von 50 m NN bis 2 638 m NN (Abbildung 1). Die hoch aufgelösten Simulationsergebnisse wurden räumlich auf die beiden Darstellungsebenen von vier Bundesländern und 30 Naturräumen (naturräumlich-hydrogeologische Einheiten) aggregiert (Abbildung 2). Sämtliche Auswertungen zu den neun Wasserbilanz- und Zustandsgrößen Lufttemperatur, Niederschlag, Tatsächliche Verdunstung, Potenzielle Verdunstung, Gesamtabfluss, Sickerwasserrate, Grundwasserneubildung, Trockenheitsindex und Schneedecke wurden für beide Darstellungsebenen vorgenommen.

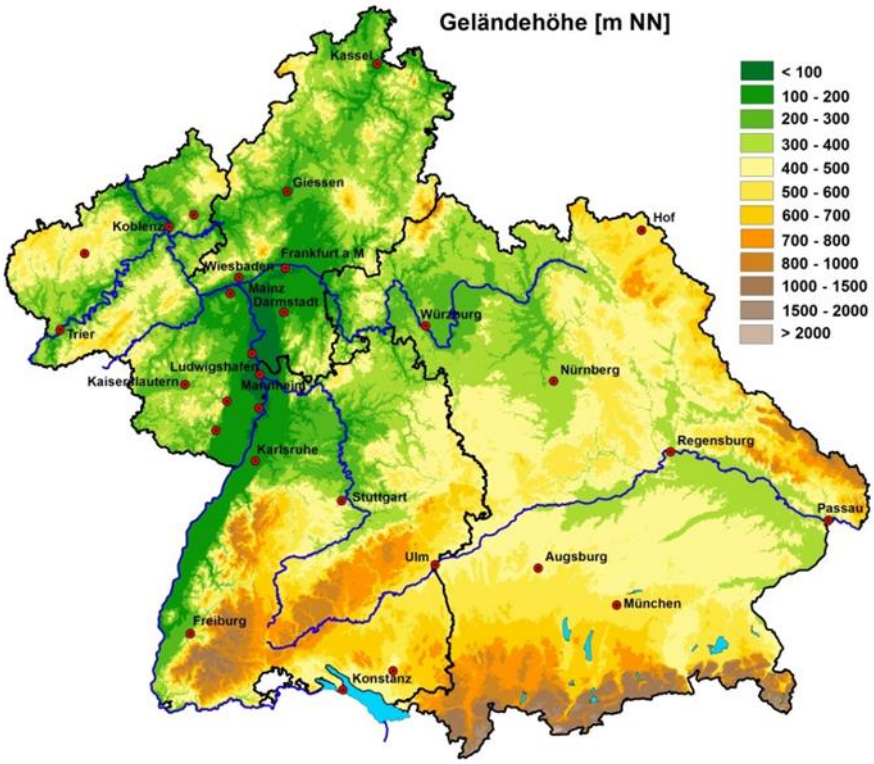


Abbildung 1. Untersuchungsgebiet bestehend aus den Ländern Baden-Württemberg, Bayern, Rheinland-Pfalz und Hessen mit Verteilung der durchschnittlichen auf Grundflächen bezogenen Geländehöhen im Untersuchungsgebiet, Angabe in m NN (KLIWA, 2017).

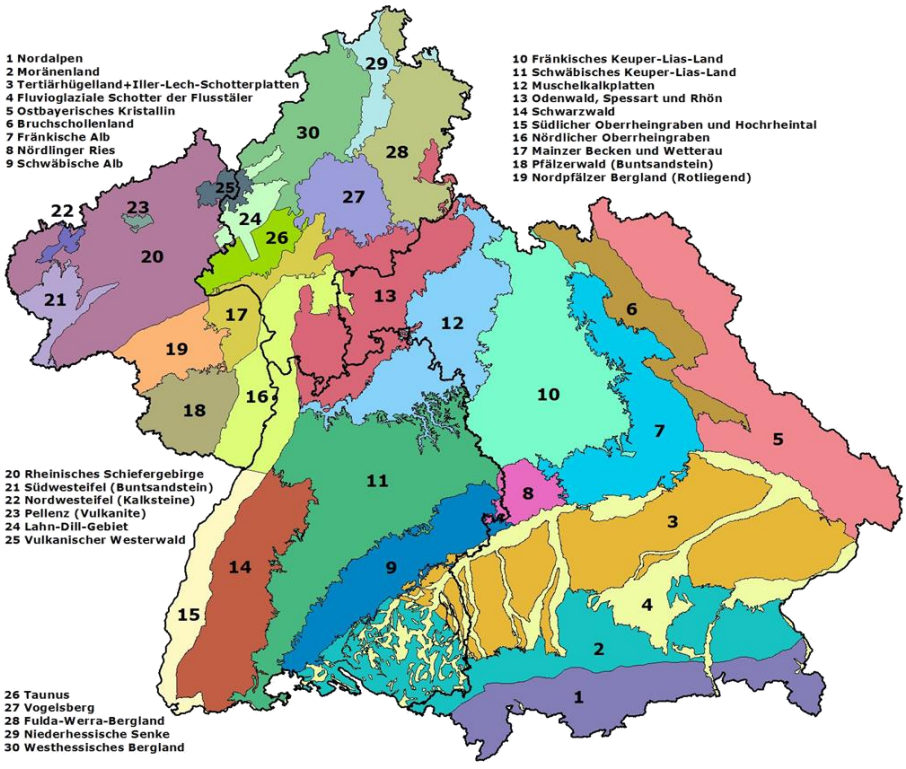


Abbildung 2. Darstellungsebenen naturräumlich-hydrogeologische Einheiten (n=30) und Länder (n=4) für die räumliche Auswertung der GWN-BW-Simulationsergebnisse (KLIWA, 2017).

3. Ausgewählte Ergebnisse

3.1 Lufttemperatur und potentielle Verdunstung

Die Lufttemperatur ist für den Bodenwasserhaushalt und die Grundwasserneubildung eine wesentliche Größe, die maßgeblich den Anteil des Niederschlags bestimmt, der regional für Gesamtabfluss, Sickerwasserrate und der daraus mit Hilfe des Baseflow-Index (BFI) (KLIWA 2012) abgeleiteten Grundwasserneubildung zur Verfügung steht.

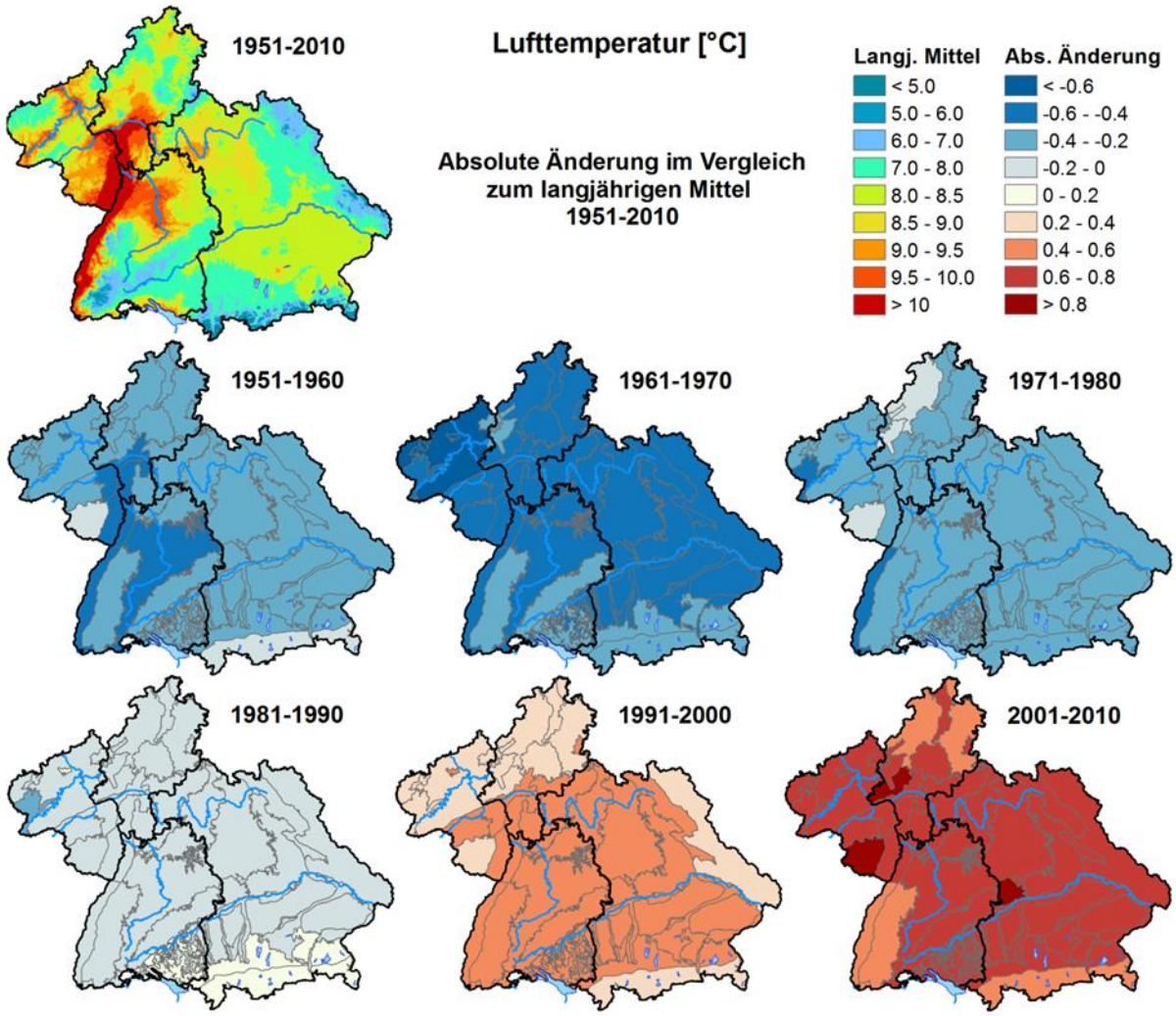


Abbildung 3. Mittlere jährliche Lufttemperatur und absolute Änderungen innerhalb der Dekaden im Vergleich zum vieljährigen Mittel 1951-2010. Angaben in °C (KLIWA, 2017).

Die mittlere Lufttemperatur im Zeitraum 1951-2010 liegt gemittelt für Süddeutschland bei 8.2 °C. Im Vergleich hierzu war die 30-jährige Periode 1951-1980 mit -0.4 °C durch kühlere Temperaturen geprägt. Mit Beginn der 1990er-Jahre zeigt sich eine signifikante und räumlich einheitliche Erwärmung, in der Dekade 2001-2010 lagen die mittleren Temperaturen schließlich um 0.7 °C über dem vieljährigen Mittel (Abbildung 3 und 5 linke Seite). Im Zeitraum 2011-2015 lag die mittlere Temperatur um 1.1 °C über dem vieljährigen Mittel (Abbildung 5). Die signifikante Erwärmung seit Ende der 1980er Jahre führte auch zu einem spürbaren Anstieg der potentiellen Verdunstungsraten und somit zu einer engeren klimatischen Wasserbilanz (Abbildung 4 und 5 rechte Seite).

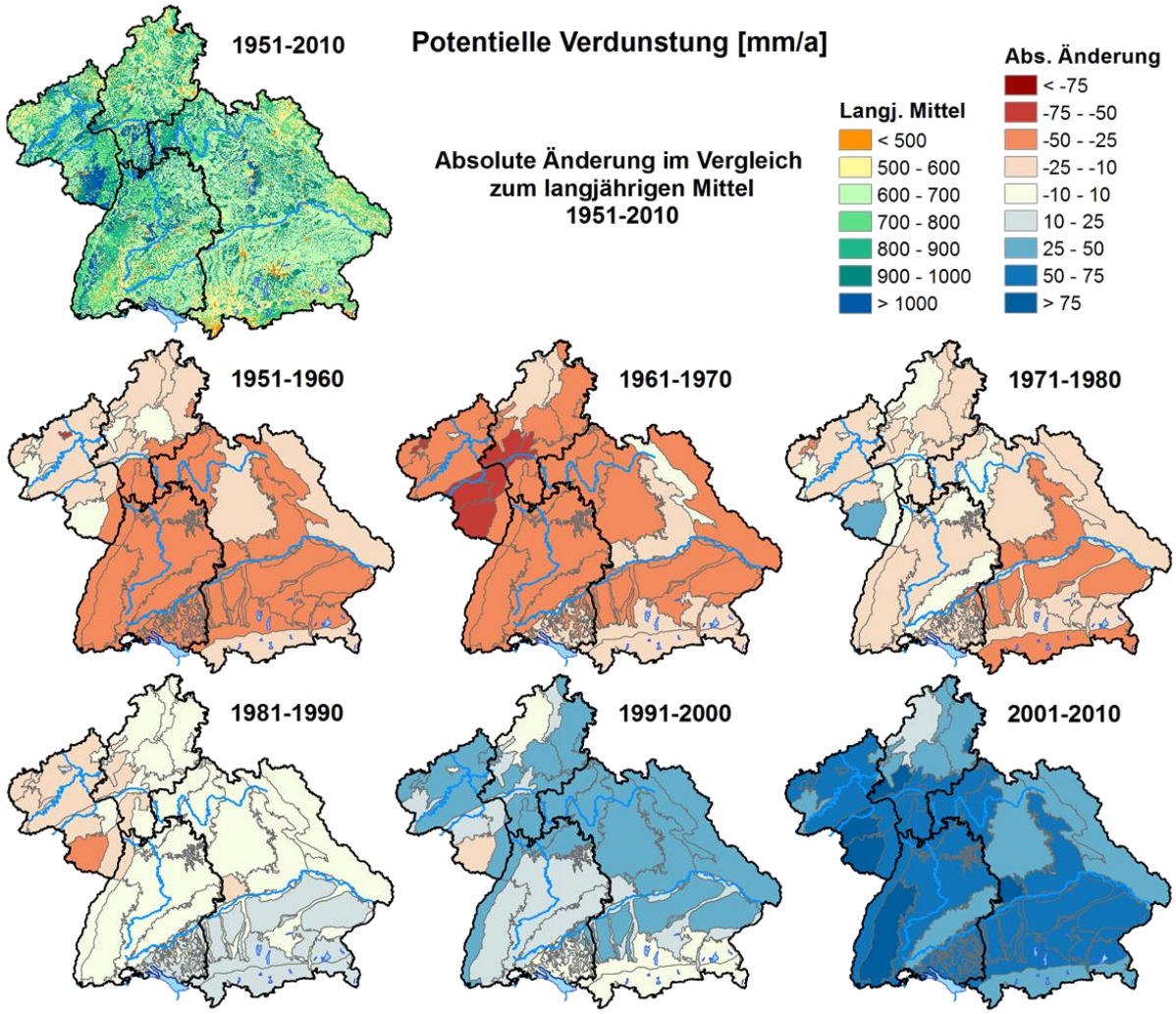


Abbildung 4. Mittlere jährliche potentielle Verdunstungshöhe und absolute Änderungen innerhalb der Dekaden im Vergleich zum vieljährigen Mittel 1951-2010. Angaben in mm/a (KLIWA, 2017).

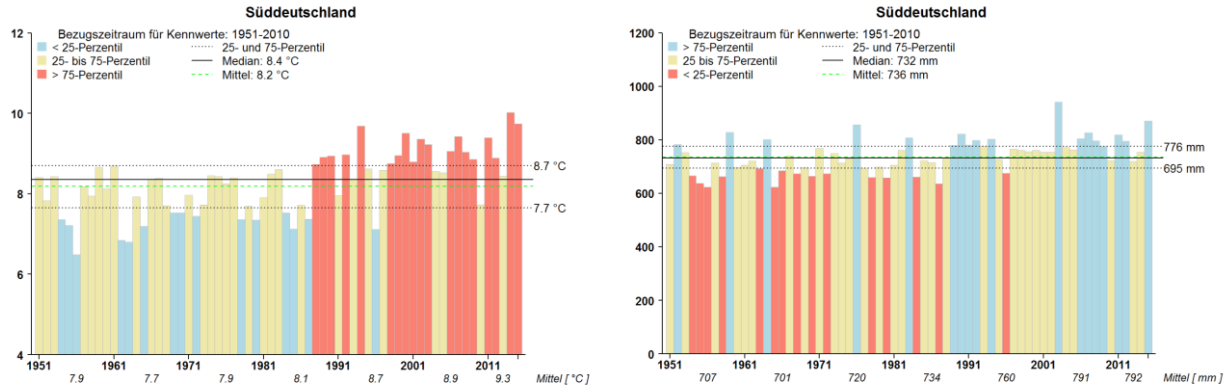


Abbildung 5. Entwicklung der jährlichen Lufttemperatur (linke Seite) und der potentiellen Verdunstung (rechte Seite) auf der Fläche von Süddeutschland über den Gesamtzeitraum 1951-2015. Angaben in °C und mm/a.

3.2 Niederschlag

Die jährliche Niederschlagsmenge im Zeitraum 1951-2010 liegt gemittelt für Süddeutschland bei etwa 900 mm/a. Das vieljährige Niederschlagsmittel reicht dabei von rd. 780 mm/a in Rheinland-Pfalz und Hessen über rd. 940 mm/a in Bayern bis zu rd. 970 mm/a in Baden-Württemberg. Auf Jahresbasis zeigt der Niederschlag keine eindeutige Entwicklung. Vielmehr kam es zu deutlichen temporären Schwankungen der jährlichen Niederschlagsmengen (Abbildung 7). Es wechselten sich mehrfach Nass- und Trockenperioden über Zeiträume von rd. sechs bis zehn Jahren ab mit trockenen Dekaden von 1951-1960, 1971-1980 (Abbildung 6) und 2006-2015.

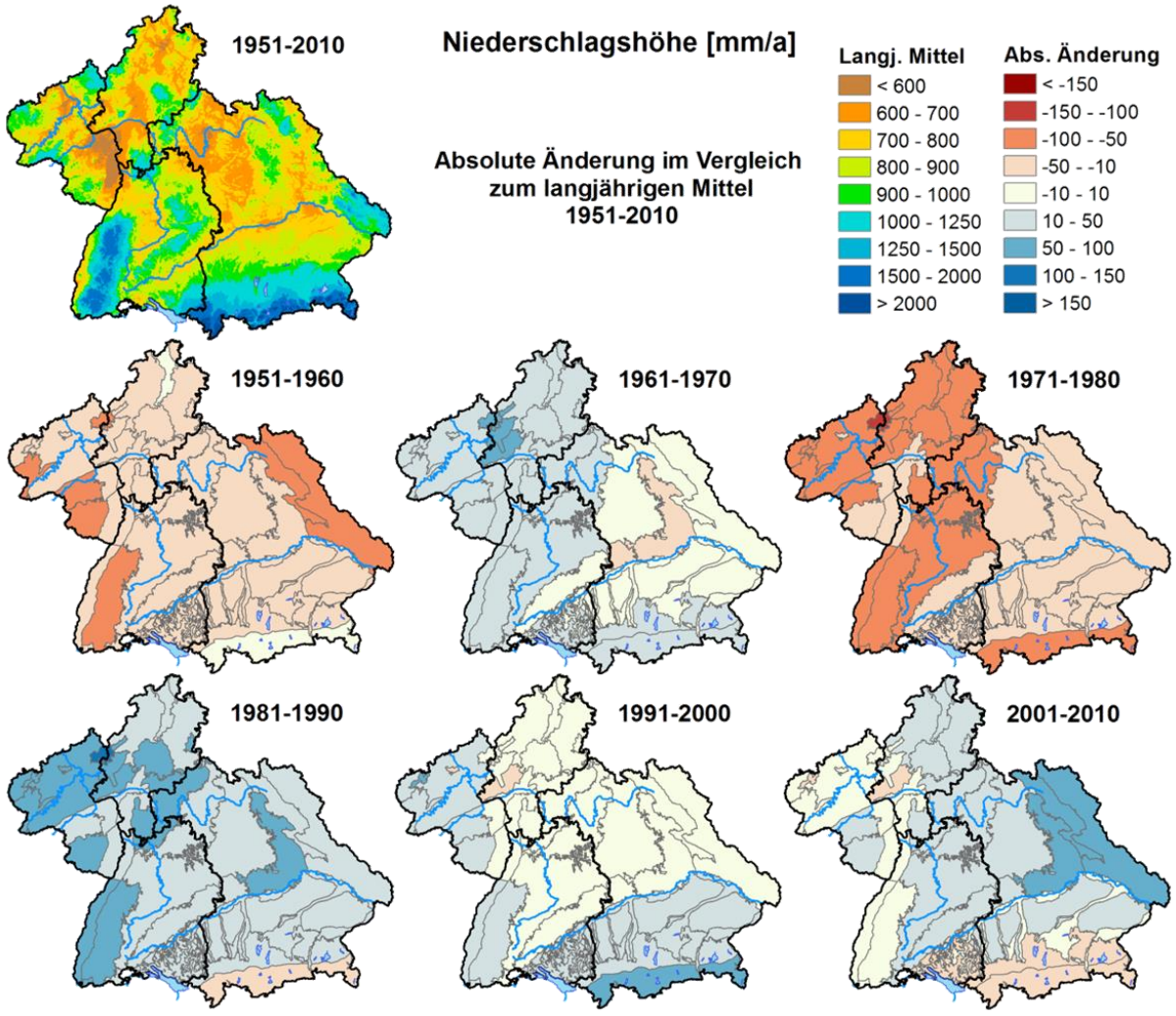


Abbildung 6. Mittlere jährliche Niederschlagshöhe und absolute Änderungen innerhalb der Dekaden im Vergleich zum vieljährigen Mittel 1951-2010. Angaben in mm/a (KLIWA, 2017).

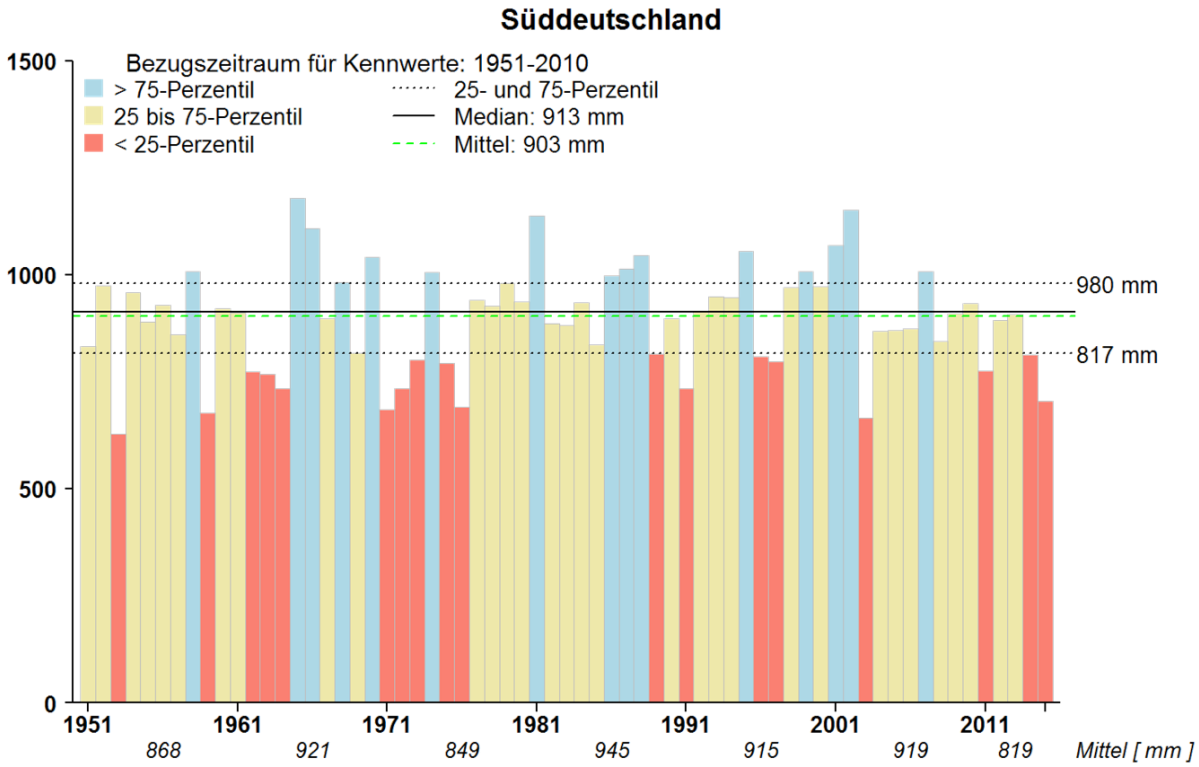


Abbildung 7. Entwicklung des jährlichen Niederschlags auf der Fläche von Süddeutschland über den Gesamtzeitraum 1951-2015. Angaben in mm/a.

3.3 Grundwasserneubildung

Die Grundwasserneubildung ist wasserwirtschaftlich von großer Bedeutung und ein wichtiges Maß für die „natürliche Regenerationsfähigkeit“ der Grundwasserressourcen. Als meist kleinste Bilanzgröße reagiert die Grundwasserneubildung aus Niederschlag besonders empfindlich auf Änderungen aller weiteren Wasserbilanzgrößen. Im vorliegenden Fall wurde auf Grundlage der mit GWN-BW simulierten Sickerwasserrate (bzw. des Gesamtabflusses) die Grundwasserneubildung aus Niederschlag berechnet. Hierbei dient der regionalisierte BFI (Baseflow-Index) zur Berücksichtigung der schnellen lateralen Abflusskomponenten (KLIWA 2012). Aus methodischen Gründen kann die Grundwasserneubildung damit streng genommen nur in Bezug auf vieljährige Mittelwerte ausgewertet werden. Da in der vorliegenden Kurzdarstellung von Ergebnissen aus KLIWA (2017) die Komponenten Gesamtabfluss und Sickerwasserrate nicht behandelt sind, wurde dennoch, methodische Unschärfen in Kauf nehmend, eine Auswertung von Jahressummenwerten der Grundwasserneubildung für Süddeutschland vorgenommen (Abbildung 9).

Die jährliche Grundwasserneubildung im Zeitraum 1951-2010 liegt gemittelt für Süddeutschland bei 174 mm. Analog zum Verhalten der Bilanzgrößen Gesamtabflusshöhe bzw. Sickerwasserrate weist die Grundwasserneubildung niedrigere Raten während der trockenen Dekaden 1951-1960 und 1971-1980 sowie in der von steigenden Verdunstungsraten geprägten Dekade 2001-2010 auf (Abbildung 8). Bei Betrachtung der Kalenderjahre im Gesamtzeitraum zeigt sich keine einheitliche Entwicklung der Grundwasserneubildungsraten. Auffallend ist jedoch die seit dem Jahr 2003 anhaltende Periode von inzwischen zwölf Jahren ohne neubildungsreiche Jahre. Im Zeitraum 2011-2015 treten im Vergleich zum vieljährigen Mittel in Süddeutschland deutlich geringere Grundwasserneubildungsraten auf, mit einer Variation in den Bundesländern zwischen -14 % in Baden-Württemberg und -31 % in Hessen.

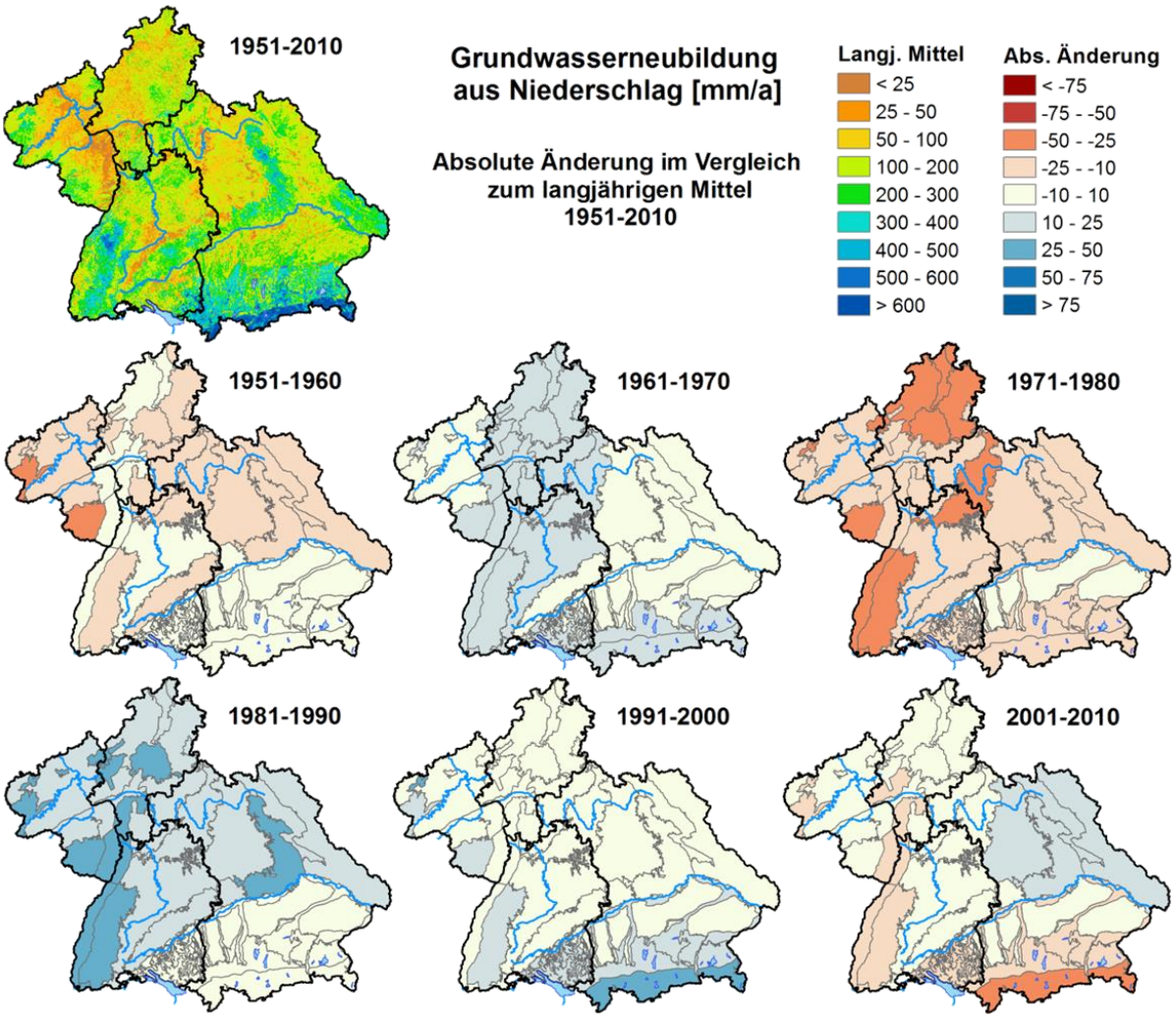


Abbildung 8. Mittlere jährliche Grundwasserneubildung und absolute Änderungen innerhalb der Dekaden im Vergleich zum vieljährigen Mittel 1951-2010. Angaben in mm/a (KLIWA, 2017).

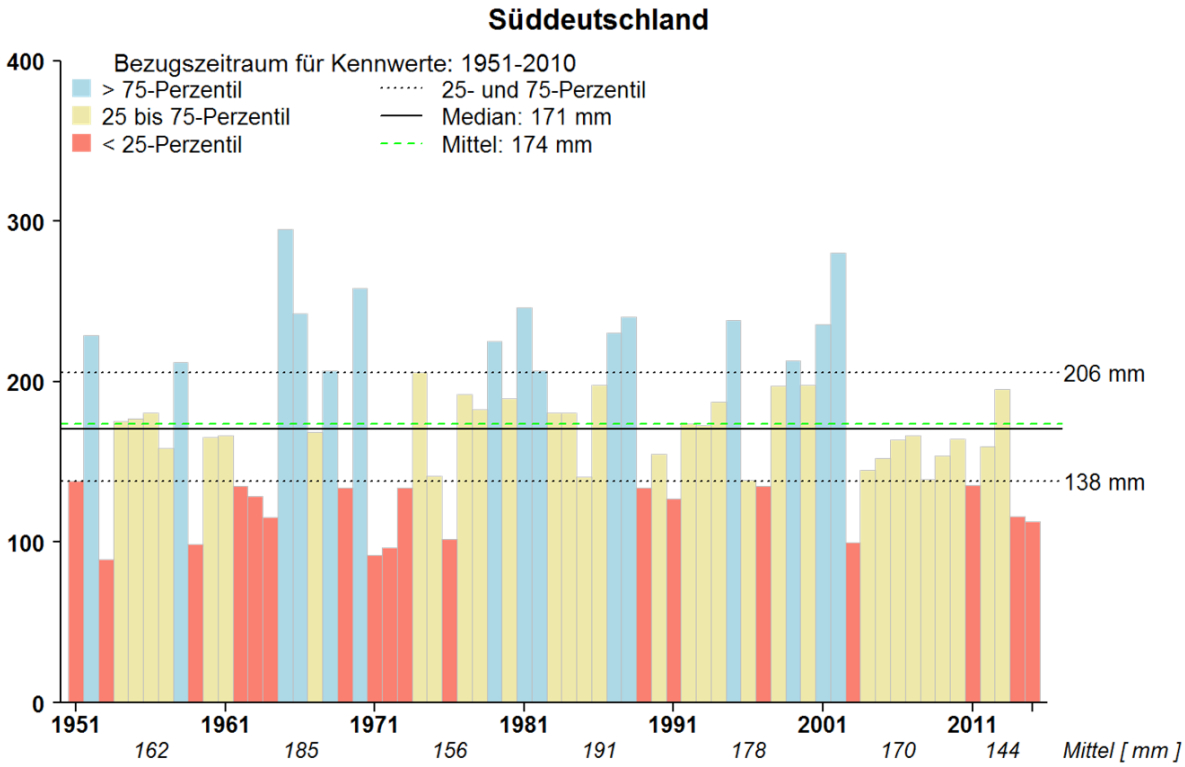


Abbildung 9. Entwicklung der jährlichen Grundwasserneubildung auf der Fläche von Süddeutschland über den Gesamtzeitraum 1951-2015. Angaben in mm/a.

3.4 Trockenheitsindex

Der Trockenheitsindex nach WaBoA (2007) ist definiert als die Anzahl von Tagen mit geringer Füllung des Bodenwasserspeichers (< 30 % der nutzbaren Feldkapazität). Der jährliche Trockenheitsindex im Zeitraum 1951-2010 liegt gemittelt für Süddeutschland bei 52 Tagen (Abbildung 11). Während im Lockergesteinsbereich südlich der Donau sowie im Schwarzwald und im Bayerischen Wald der Trockenheitsindex an nur wenigen Tagen im Jahr unterschritten wird, weichen viele Naturräume in den mittleren sowie nordwestlichen Bereichen des Untersuchungsgebietes mit Überschreitungen von > 70 Tagen/a deutlich davon ab (Abbildung 10). Der mittlere Trockenheitsindex lag in allen Bundesländern im Zeitraum 1951-1970 unter dem vieljährigen Mittel. Von 1971 bis 1990 gibt es keine einheitliche Entwicklung. Mit Beginn der 1990er Jahre erfolgte in allen Bundesländern eine Zunahme des Trockenheitsindex gegenüber dem vieljährigen Mittel. Im Zeitraum 2011-2015 stieg der Trockenheitsindex zwischen sieben Tagen in Hessen bis 18 Tagen in Rheinland-Pfalz gegenüber dem vieljährigen Mittel 1951-2010. Während der überwiegende Teil des Anstiegs im Sommerhalbjahr zu verzeichnen war, zeigt sich auf Grund der verlängerten Vegetationsperiode ebenfalls eine leichte Zunahme im November und April.

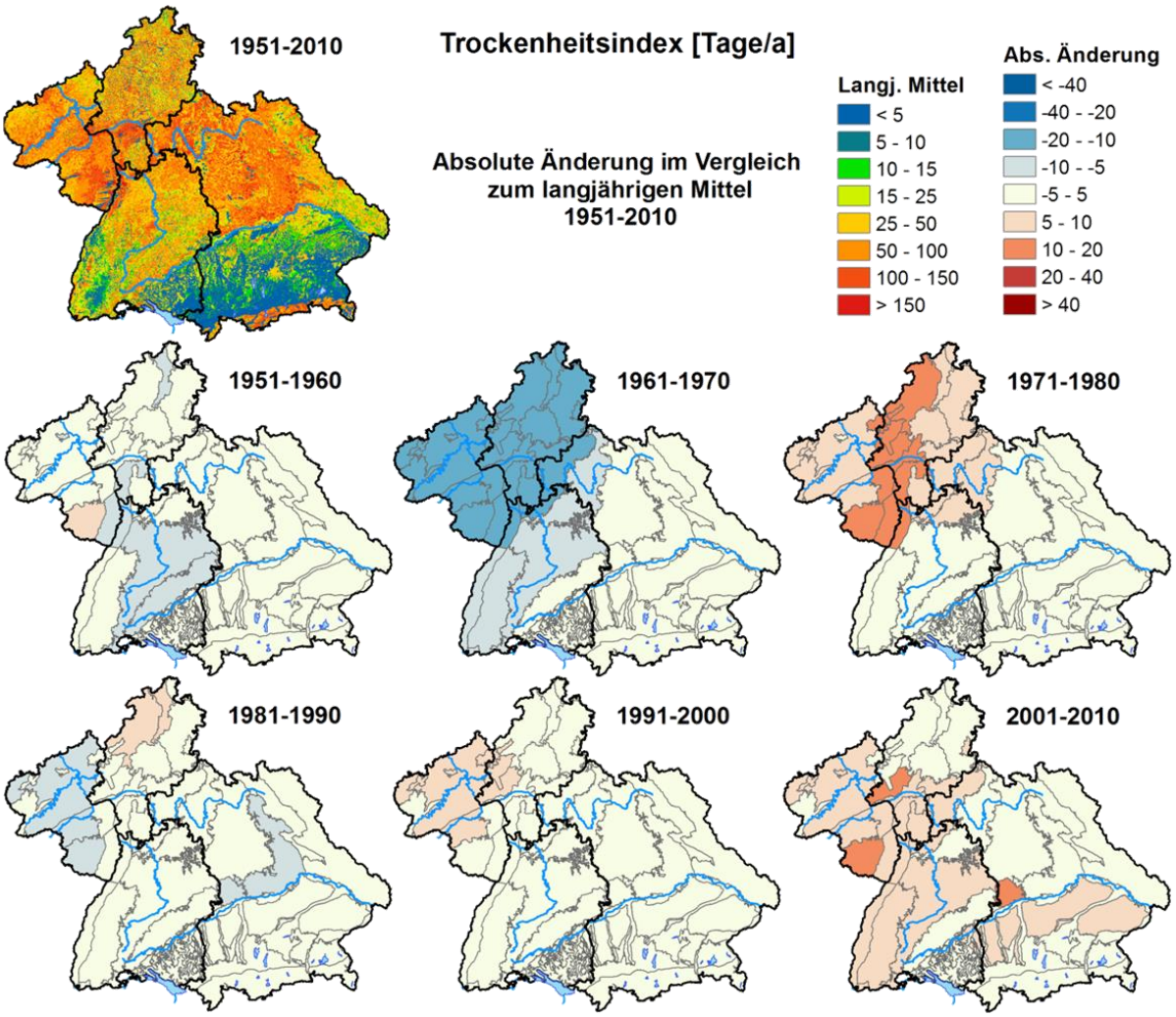


Abbildung 10. Mittlere jährlicher Trockenheitsindex und absolute Änderungen innerhalb der Dekaden im Vergleich zum vieljährigen Mittel 1951-2010. Angaben in mm/a (KLIWA, 2017).

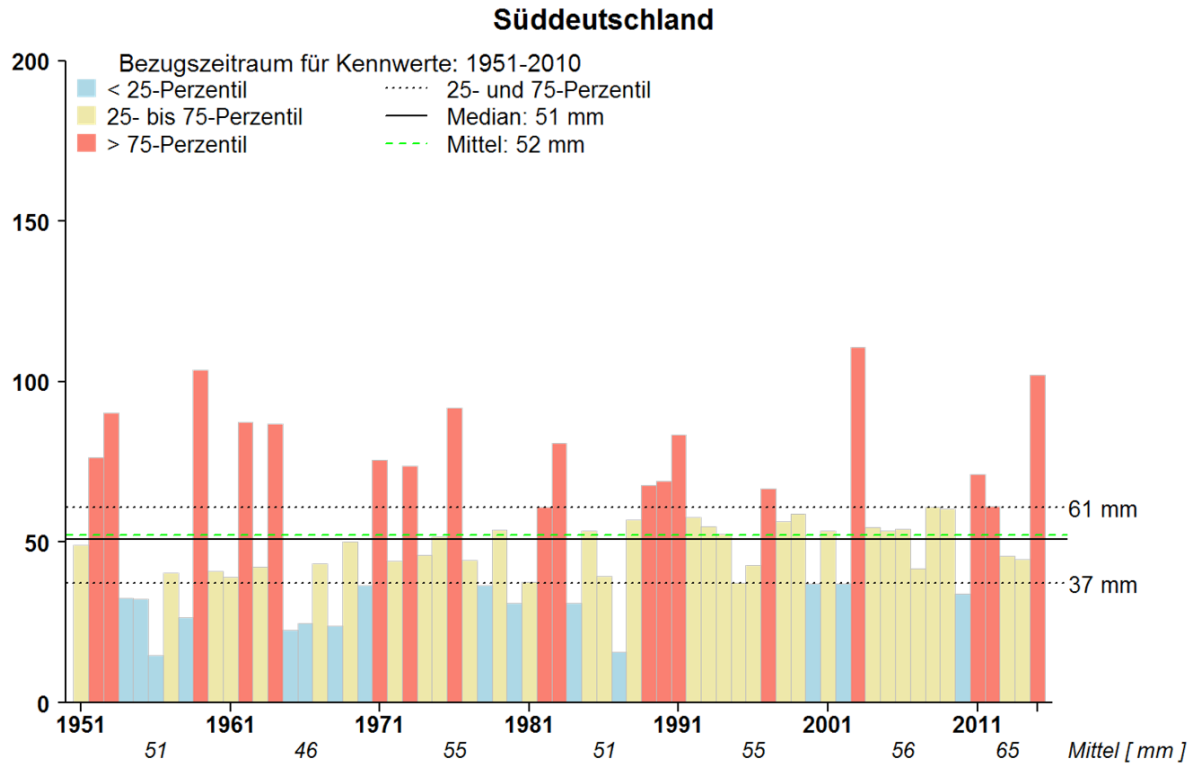


Abbildung 11. Entwicklung des jährlichen Trockenheitsindex auf der Fläche von Süddeutschland über den Gesamtzeitraum 1951-2015. Angaben in Tage/a.

4. Trockendekaden

Im Laufe des 65-jährigen Zeitraums von 1951 bis 2015 lagen naturgemäß, auch über größere Zeitfenster hinweg, keine einheitlichen meteorologischen Bedingungen in den vier KLIWA-Ländern Baden-Württemberg, Bayern, Hessen und Rheinland-Pfalz vor. Neben der beobachteten Temperaturzunahme seit Beginn der 1990er Jahre waren Schwankungen der jährlichen und mehrjährlichen Niederschlagsmengen zu beobachten. So wechselten sich mehrfach Nass- und Trockenperioden über Zeiträume von rd. sechs bis zehn Jahren ab mit weitreichenden Auswirkungen auf die Wasserbilanz, insbesondere auf den empfindlich reagierenden Wasserbilanzrest der Grundwasserneubildung aus Niederschlag. Dies führt letztlich zu einem stark variablen und schwankenden Verlauf von Quellschüttungs- und Grundwasserstandsganglinien über den 65-jährigen Gesamtzeitraum, was sich auch an der Langzeitentwicklung von vier ausgewählten Messstellen (Grundwasserstände, Quellschüttungen) nachvollziehen lässt (Abbildung 12).

Auf Basis der Länder und fester Dekaden weisen die Dekaden 1951-1960 und 1971-1980 unterdurchschnittliche Niederschlagsmengen auf und können als Trockendekaden eingestuft werden (Tab. 1). Insbesondere die Dekade 1971-1980 unterschreitet mit durchschnittlich -6.1 % für Süddeutschland das vieljährige Mittel des Niederschlags vergleichsweise deutlich. Die erste Hälfte der aktuellen Dekade weist mit einem Niederschlagsdefizit von -9.3 % für Süddeutschland eine noch deutlichere Unterschreitung des vieljährigen Mittelwertes für 1951-2010 auf (Tab. 1).

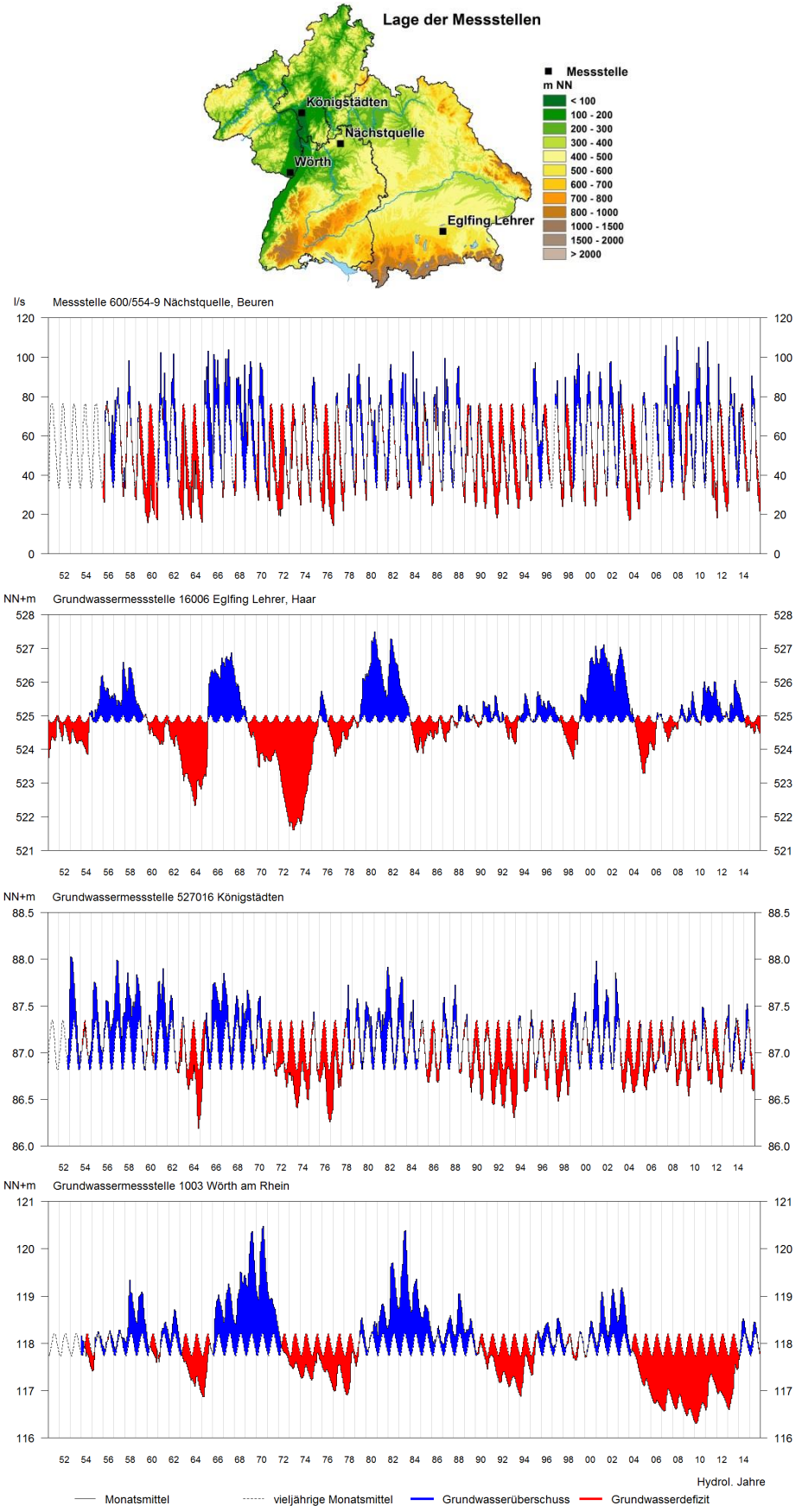


Abbildung 12. Grundwasserstandsganglinien und Quellschüttungsganglinie im Zeitraum 1951-2015 mit Darstellung der Jahre mit Grundwasserüberschuss (blau) und Grundwasserdefizit (rot) für vier ausgewählte Messstellen in den vier Bundesländern (KLIWA, 2017).

Die daraus resultierenden Defizite bei der Grundwasserneubildung sind naturgemäß noch ausgeprägter. So unterschreitet die Dekade 1971-1980 mit durchschnittlich -11.4 % für Süddeutschland das vieljährige Mittel vergleichsweise deutlich. Die erste Hälfte der aktuellen Dekade weist mit einem Grundwasserneubildungsdefizit von -18.4 % für Süddeutschland eine noch deutlich stärkere Unterschreitung des Mittelwertes für 1951-2010 auf. In Baden-Württemberg und Bayern beträgt das Defizit -14 % und -16 %, in Rheinland-Pfalz und Hessen sogar -22 % und -30 % (Tab. 2).

Tabelle 1. Mittlere Niederschlagshöhe in der 60-Jahresperiode 1951-2010 sowie ihre zeitliche Entwicklung (absolute und relative Änderung) über die betrachteten Dekaden und die letzten fünf Jahre. Angaben in mm/a und % (KLIWA, 2017).

	Niederschlagshöhe [mm/a]				
Zeitraum	**Süddeutschland**	**Baden-Württemberg**	**Bayern**	**Hessen**	**Rheinland-Pfalz**
1951-2010	**903**	**969**	**938**	**779**	**788**
Absolute [mm/a] / Relative [%] Änderung der betrachteten Dekade gegenüber der Periode 1951-2010					
1951-1960	-35 / -3.9	-38 / -3.9	-33 / -3.5	-27 / -3.5	-46 / -5.8
1961-1970	19 / 2.2	23 / 2.3	7 / 0.7	46 / 5.9	23 / 2.9
1971-1980	-54 / -6.1	-56 / -5.7	-45 / -4.7	-76 / -9.7	-60 / -7.6
1981-1990	42 / 4.7	49 / 5.1	29 / 3.0	52 / 6.7	64 / 8.1
1991-2000	12 / 1.3	13 / 1.3	17 / 1.8	-6 / -0.7	16 / 2.0
2001-2010	16 / 1.8	10 / 1.0	25 / 2.7	10 / 1.3	4 / 0.4
2011-2015	-84 / -9.3	-88 / -9.1	-86 / -9.2	-77 / -9.9	-76 / -9.6

Tabelle 2. Mittlere Grundwasserneubildungshöhe in der 60-Jahresperiode 1951-2010 sowie ihre zeitliche Entwicklung (absolute und relative Änderung) über die betrachteten Dekaden und die letzten fünf Jahre. Angaben in mm/a und % (KLIWA, 2017).

	Grundwasserneubildung aus Niederschlag [mm/a]				
Zeitraum	**Süddeutschland**	**Baden-Württemberg**	**Bayern**	**Hessen**	**Rheinland-Pfalz**
1951-2010	**174**	**187**	**206**	**109**	**104**
Absolute [mm/a] / Relative [%] Änderung der betrachteten Dekade gegenüber der Periode 1951-2010					
1951-1960	-12 / -7.3	-12 / -6.4	-11 / -5.2	-9 / -8.2	-17 / -15.9
1961-1970	11 / 7.3	13 / 6.9	8 / 3.8	20 / 18.6	10 / 9.3
1971-1980	-18 / -11.4	-20 / -10.7	-14 / -7.0	-26 / -23.8	-17 / -15.9
1981-1990	17 / 11.5	23 / 12.5	11 / 5.5	22 / 20.5	23 / 22.5
1991-2000	4 / 2.5	4 / 1.9	6 / 2.9	-2 / -2.0	8 / 7.3
2001-2010	-4 / -3	-8 / -4.2	0 / 0.0	-6 / -5.1	-7 / -7.1
2011-2015	-30 / -18.4	-26 / -13.9	-33 / -16.0	-33 / -30.3	-23 / -22.1

5. Variabilität der Grundwasserneubildung

Ausgedehnte Grundwasservorkommen sind in aller Regel träge Systeme, die meist sehr gedämpft und langanhaltend auf Änderungen der Zuflussrandbedingungen reagieren. Großräumig stellt die Grundwasserneubildung aus Niederschlag die wichtigste Zuflusskomponente in der Wasserbilanz dar, kleinräumig bzw. lokal kann auch Uferfiltrat aus Gewässern eine bedeutende Rolle spielen. Füllung und insbesondere Entleerung von Grundwasserspeichern sind oft Prozesse die sich über längere Zeiträume vollziehen. Der kurzfristigen Variabilität von Niederschlagsmenge und daraus resultierender Grundwasserneubildung kommt daher eine untergeordnete Bedeutung in Bezug auf die Abschätzung des nutzbaren Grundwasserdargebots zu. Die langfristige, mehrjährige Variabilität der Grundwasserneubildung hat dagegen eine hohe Bedeutung für die planvolle Bewirtschaftung von Grundwasserressourcen insbesondere während langanhaltender Trockenperioden. Trockenheit ist häufig ein

großräumiges und langanhaltendes Ereignis und damit als Grundlage für Vulnerabilitätsbetrachtungen von Grundwasservorkommen geeignet.

Tabelle 3. Variabilität der Grundwasserneubildung innerhalb der KLIWA-Naturräume (Nassdekade, Trockendekade, Trockenjahre) und Klassifizierung auf Basis der jeweiligen Trockendekade. Bezugszeitraum: 1951-2010 (KLIWA, 2017).

Klasseneinteilung für den Vergleich Trockendekade mit vieljährigem Mittel 1951-2010			GWN (%) Nassdekade im Vergleich zu 1951-2010	GWN (%) Trockendekade im Vergleich zu 1951-2010	Trockendekade	GWN (%) Trockenjahr 2003 im Vergleich zu 1951-2010	GWN (%) Trockenjahr 2015 im Vergleich zu 1951-2010
Klasse		Naturraum					
1	bis -15%	1	110	89	2003-2012	67	78
1	bis -15%	9	116	87	1953-1962	59	61
1	bis -15%	5	116	86	1955-1964	64	64
1	bis -15%	7	118	85	1955-1964	68	69
2	bis -25%	14	121	84	2003-2012	54	63
2	bis -25%	11	122	84	2003-2012	57	61
2	bis -25%	13	124	83	2006-2015	57	62
2	bis -25%	8	117	83	2006-2015	54	60
2	bis -25%	25	128	82	1969-1978	70	76
2	bis -25%	6	120	81	1955-1964	64	67
2	bis -25%	2	116	81	2003-2012	54	70
2	bis -25%	3	118	81	2003-2012	50	69
2	bis -25%	20	128	81	2003-2012	70	72
2	bis -25%	23	133	80	2003-2012	70	84
2	bis -25%	10	120	80	1955-1964	63	63
2	bis -25%	12	119	80	1971-1980	62	59
2	bis -25%	22	120	80	2003-2012	64	75
2	bis -25%	4	117	79	2003-2012	36	64
2	bis -25%	21	125	78	1953-1962	78	75
2	bis -25%	28	125	78	1971-1980	57	56
2	bis -25%	15	128	77	2003-2012	35	45
2	bis -25%	27	128	77	2006-2015	52	49
2	bis -25%	19	126	76	1953-1962	67	52
3	< -25%	18	134	71	1953-1962	67	45
3	< -25%	30	122	71	1969-1978	58	51
3	< -25%	24	136	70	2006-2015	58	53
3	< -25%	29	123	68	1971-1980	61	49
3	< -25%	26	142	59	2003-2012	41	39
3	< -25%	17	137	53	2003-2012	64	41
3	< -25%	16	150	47	2003-2012	31	21
Bayern			114	88	2003-2012	59	68
Baden-Württemberg			120	84	2003-2012	53	65
Rheinland-Pfalz			131	77	2003-2012	67	61
Hessen			128	76	2003-2012	54	51

Daher wurde auf Basis der vorliegenden Simulationsergebnisse die dekadische Variabilität der Grundwasserneubildung aus Niederschlag betrachtet und zwar gleitend über den Gesamtzeitraum von 1951-2015. In allen vier Ländern ist dabei die Dekade 2003-2012 die Zeitspanne mit der geringsten Grundwasserneubildung (Tab. 3), wobei die Unterschiede zur Dekade 1971-1980 gering sind. Die Defizite reichen von rd. -12 % in Bayern bis zu rd. -24 % in Rheinland-Pfalz und Hessen. Die teilräumliche Variabilität ist erheblich größer, so werden auf Basis der 30 vorliegenden Naturräume Defizite zwischen -11 % (Nordalpen) und -53 % (Nördlicher Oberrheingraben) erreicht. Die Trockendekaden sind dabei nicht überall dieselben, die Dekade 2003-2012 ist jedoch auch hier häufig vertreten. Daneben wird die Dekade 2006-2015 in vier Naturräumen als Trockendekade ausgewiesen. Damit ist die jüngere Vergangenheit sehr prominent in den verschiedenen Trockendekaden des Gesamtzeitraums von 1951 bis 2015 vertreten, so dass sich die Verlängerung der ursprünglich auf 60 Jahre angelegten Langzeitbetrachtung um die Jahre 2011-2015 als sehr wertvoll erwiesen hat und den damit verbundenen zusätzlichen Arbeitsaufwand gerechtfertigt hat.

6. Innerjährliche Veränderungen

Die Grundwasserneubildung aus Niederschlag erfolgt überwiegend im hydrologischen Winterhalbjahr, da die Höhe der tatsächlichen Verdunstung erheblich niedriger ist als im Sommerhalbjahr und somit mehr Wasser für die unterschiedlichen Abflussprozesse zur Verfügung steht. Aufgrund dieser gravierenden innerjährlichen Unterschiede bei der Grundwasserneubildung lohnt auch eine kurze Betrachtung von innerjährlichen Veränderungen der Niederschlagsmengen. Während im Zeitraum 1991-2010 praktisch keine innerjährliche Veränderung zu erkennen ist (Abbildung 13), ist für die Zeitspanne 2011-2015 ein deutlicher Rückgang der Niederschlagsmenge im Winterhalbjahr festzustellen (Abbildung 14). Dies hatte zur Folge, dass die Themen Trockenheit, Niedrigwasser bzw. niedrige Grundwasserstände und stark verminderte Quellschüttungen durch Anfragen von Presse und Bürgern zuletzt häufig auf der Tagesordnung standen, da sich auch ab Dezember 2016 bis in den April 2017 wieder eine längere Phase mit stark unterdurchschnittlichem Winterniederschlag anschloss. Es bleibt abzuwarten wie sich die verbleibenden drei Jahre der aktuellen Dekade entwickeln, eine Umverteilungstendenz hin zu mehr Niederschlag im Winter, wie durch eine Reihe von regionalen Klimaprojektionen unterstellt, ist bislang nicht zu erkennen.

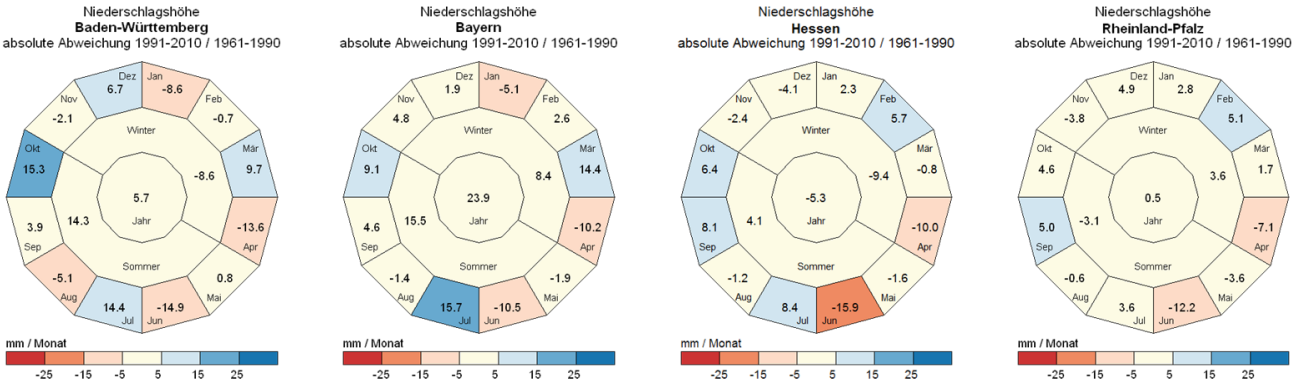


Abbildung 13. Mittlere innerjährliche absolute Änderung der Niederschlagshöhe in den vier Bundesländern. Vergleich des Zeitraums 1991-2010 mit dem dreißigjährigen Mittel 1961-1990. Angaben als Summen (mm) über den jeweiligen Zeitraum, die Farben entsprechen stets den mittleren Monatssummen (KLIWA, 2017).

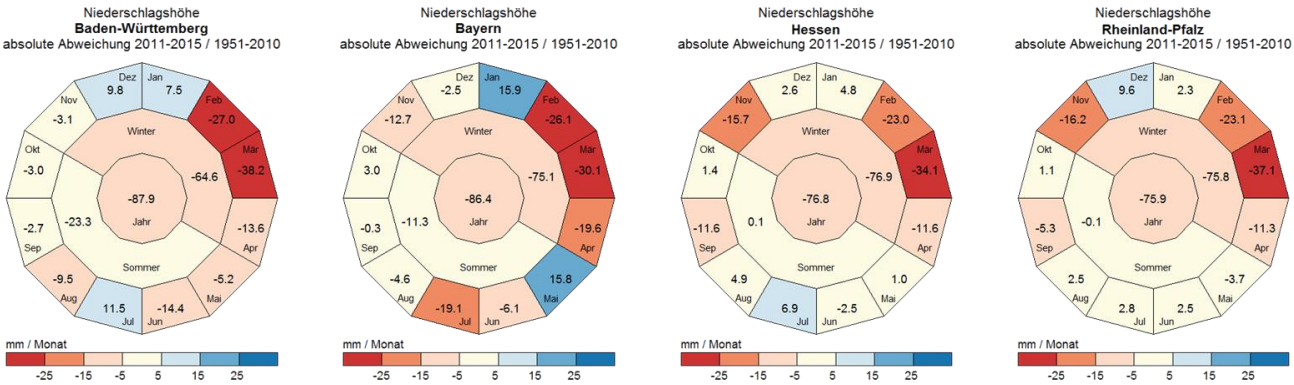


Abbildung 14. Mittlere innerjährliche absolute Änderung der Niederschlagshöhe in den vier Bundesländern. Vergleich des Zeitraums 2011-2015 mit dem vieljährigen Mittel 1951-2010. Angaben als Summen (mm) über den jeweiligen Zeitraum, die Farben entsprechen stets den mittleren Monatssummen (KLIWA, 2017).

7. Zusammenfassung und Schlussfolgerungen

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.

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. Sickerwasserrate und Grundwasserneubildung tendenziell abnehmende Raten auf.

Auf Basis der Länder und fester Dekaden wiesen die Dekaden 1951-1960 und 1971-1980 unterdurchschnittliche Niederschlagsmengen auf. Die erste Hälfte der aktuellen Dekade weist ein noch deutlicheres Niederschlagsdefizit bezogen auf den vieljährigen Mittelwert für 1951-2010 auf. Die daraus resultierenden Defizite bei der Sickerwasserrate bzw. Grundwasserneubildung als Restglied des Bodenwasserhaushalts sind dabei am stärksten ausgeprägt.

Trockenheit und die damit verbundene starke Reduktion der natürlichen Grundwassererneuerung als ein oft großräumiges und langanhaltendes Ereignis hat eine hohe Bedeutung für die planvolle Bewirtschaftung von Grundwasserressourcen. Als Grundlage für Vulnerabilitätsbetrachtungen von Grundwasservorkommen wurde daher die dekadische Variabilität der Grundwasserneubildung aus Niederschlag gleitend über den Gesamtzeitraum von 1951-2015 betrachtet. Auf Basis der Länder ist dabei die Dekade 2003-2012 die Zeitspanne mit der geringsten Grundwasserneubildung. Auch auf Basis der 30 definierten Naturräume dominieren die Dekaden in der jüngeren Vergangenheit von 2003-2015. Es werden Defizite zwischen -11 % (Nordalpen) und -53 % (Nördlicher Oberrheingraben) erreicht.

Die sehr unterschiedliche Variabilität der Grundwasserneubildung über die Naturräume hinweg erklärt auch die unterschiedliche Betroffenheit durch Defizite. Betroffen ist die Entwicklung der Niedrigwasserverhältnisse allgemein in den Gewässern während sommerlicher Trockenperioden, da Gewässer in solchen Phasen wesentlich aus dem Grundwasser gespeist werden. Betroffen sind häufig wenig ergiebige Aquifere, die über Quellen entwässert werden und die dort vorhandenen Wasserversorgungen bzw. Nutzungen. Ergiebige Aquifersysteme, wie z. B. der Oberrheingraben, befinden sich bevorzugt in klimatischen Gunsträumen, in welchen eine intensive landwirtschaftliche Nutzung angesiedelt ist. Der Wasserbedarf der Landwirtschaft ist in den Defizitphasen in der Regel deutlich erhöht, sodass ggf. Nutzungskonflikte entstehen, da die Deckung des Beregnungsbedarfs aus dem Grundwasser erfolgen muss, weil oberirdische Gewässer in diesen Phasen oft eine nicht ausreichende Wasserführung aufweisen. Daraus ergibt sich eine Betroffenheit sowohl bei der Landwirtschaft als auch bei allen weiteren Nutzungen der Grundwasserressource, welche durch Betrachtungen zum nutzbaren Dargebot unter ungünstigen Randbedingungen zu regeln ist.

Eine innerjährliche Umverteilungstendenz bei der Niederschlagsmenge hin zu mehr Niederschlag im Winter, wie durch eine Reihe von regionalen Klimaprojektionen bislang projiziert, ist durch die vorliegenden Auswertungen in allen vier Ländern nicht zu erkennen. Nachdem im Zeitraum 1991-2010 keine innerjährliche Veränderung zu erkennen ist, war für die Zeitspanne 2011-2015 ein deutlicher Rückgang der Niederschlagsmenge im Winterhalbjahr zu beobachten. Da sich auch jüngst ab Dezember 2016 bis in den April 2017 wieder eine längere Phase mit sehr unterdurchschnittlichen Winterniederschlägen einstellte, kann für die gesamte Dekade von 2011-2020 eher von einem Rückgang der Niederschlagsmenge im Winterhalbjahr ausgegangen werden.

8. Literatur

Gudera, T. und A. Morhard (2015): Hoch aufgelöste Modellierung des Bodenwasserhaushalts und der Grundwasserneubildung mit GWN-BW. – Hydrologie und Wasserbewirtschaftung 59 (5), 205-216; DOI: 10.5675/HyWa_2015,5_1.

KLIWA (2012): Auswirkungen des Klimawandels auf Bodenwasserhaushalt und Grundwasserneubildung in Baden-Württemberg, Bayern und Rheinland-Pfalz. Untersuchungen auf Grundlage von WETTREG2003- und WETTREG2006-Klimaszenarien. KLIWA-Berichte Heft 17, Karlsruhe, Hof, Mainz.

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

WaBoA (2007): Wasser- und Bodenatlas Baden-Württemberg, 3. Auflage, Umweltministerium Baden-Württemberg, Stuttgart.

Räumlich hochaufgelöste Klimaprojektionen mit den neuen RCP-Szenarien

Dr. Gerd Schädler, Dr. Hans-Jürgen Panitz, Natalie Laube
Institut für Meteorologie und Klimaforschung am Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Department Troposphärenforschung (IMK-TRO)

1. Einleitung

Vom Institut für Meteorologie und Klimaforschung, Department Troposphärenforschung (IMK-TRO) des KIT wurden für die „KLIWA-relevanten“ Einzugsgebiete von Rhein, Donau, Salzach, Weser und Mosel (siehe Abb. 3.) 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. Hiermit liegt sowohl hinsichtlich des simulierten Gebietes als auch der Länge des simulierten Zeitraums ein wohl weltweit einzigartiger Datensatz vor, der neben der geplanten hydrologischen Anwendung auch für viele weitere Fragestellungen zu Mitigation und Adaptation verwendet werden kann.

Im Folgenden werden zunächst einige grundsätzliche Aspekte der sehr hohen Auflösung besprochen und auf das verwendete Emissionsszenario 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 gegenüber gröberen Auflösungen, andererseits die Änderungssignale in der nahen und fernen Zukunft im Mittelpunkt. Hier kann nur ein kurzer Überblick gegeben werden, weitere Informationen sind im Abschlussbericht des Projektes zu finden.

Anmerkung: Abweichend vom Vortrag werden hier die Auswertungen der vollständigen dreißigjährigen Simulationen, welche in der Zwischenzeit fertiggestellt werden konnten, vorgestellt.

2. Wozu sehr hohe Auflösung?

Von einer sehr hohen Auflösung bei numerischen Modellen mit kartesischem Modellgitter spricht man bei einer (horizontalen) Maschenweite des Gitters (Auflösung) kleiner als etwa 5 km. Solche Auflösungen werden auch konvektionsauflösend genannt, da bei dieser Auflösung die hochreichende Konvektion in der Atmosphäre, welche eine horizontale Skala von etwa 10 km hat, vom Modell „gesehen“ wird (bei kartesischen Gittern „sieht“ ein Modell keine Phänomene, deren Abmessungen unterhalb der doppelten Maschenweite liegen). Dadurch entfällt die Parametrisierung der hochreichenden Konvektion. Die sogenannte flache Konvektion in der Grenzschicht, deren Skala im Kilometerbereich liegt, muss jedoch weiterhin parametrisiert werden. Von einer Auflösung im Kilometerbereich kann man folgende Vorteile im Vergleich zu gröberen Auflösungen erwarten:

- Bessere Wiedergabe von Orographie- und Landnutzungsdetails, dadurch realistischere Werte der höhen- und landnutzungsabhängigen Temperatur und des Auslösens von konvektivem und Hebungsniederschlag, Erfassung der Leitwirkung der Orographie (Beispiel Kanalisierung im Rheintal, s. Abb. 1.) und von Berg-Talwindsystemen, welche für die lokalen Windverhältnisse von Bedeutung sind.

- Neben Temperatur und Niederschlag, bessere Erfassung weiterer hydrologisch relevanter Größen wie Feuchte, Ein- und Ausstrahlung, Bewölkung, Energieflüsse und ih-

rer Variabilität.

- Bessere Erfassung von Extremen durch realistischer Erfassung der räumlichen und zeitlichen Variabilität: Abb. 2 zeigt, wie sich bei Erhöhung der Auflösung die simulierte Verteilungsdichte des Niederschlags an die beobachtete annähert.
- Vermeidung von Parametrisierungen, hier der hochreichenden Konvektion.

Allerdings erhöhen sich bei einer Halbierung der Maschenweite die Rechenzeit um etwa das Achtfache und der Speicherbedarf um das Vierfache. Wegen dieses hohen Aufwands sind Simulationen in dieser Auflösung im Klimabereich noch selten, werden aber zunehmend in Betracht gezogen. An einer entsprechenden CORDEX-Initiative ist das IMK-TRO beteiligt.

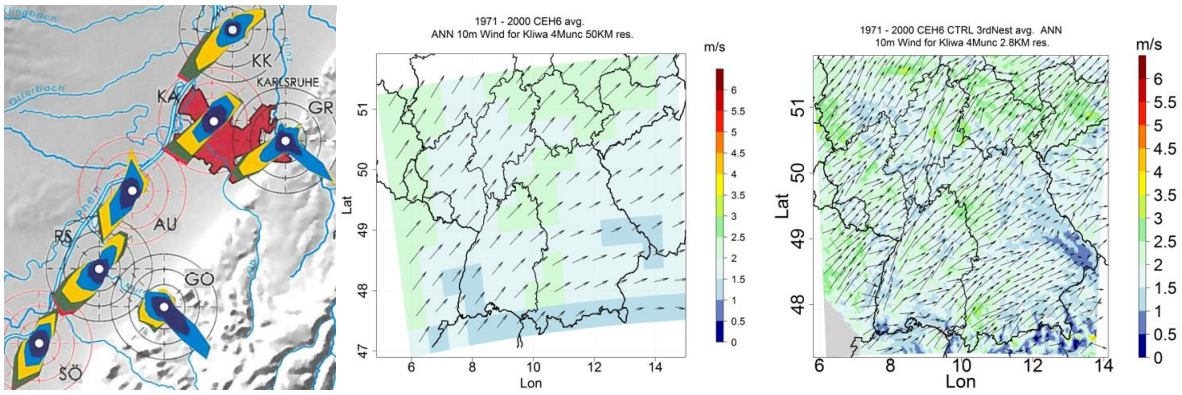


Abbildung 1. Kanalisierung im Rheintal (hier südlich von Karlsruhe) und Einfluss der Orographie auf das Windfeld: links Beobachtungen, Mitte: Auflösung 50 km, rechts Auflösung 2.8 km.

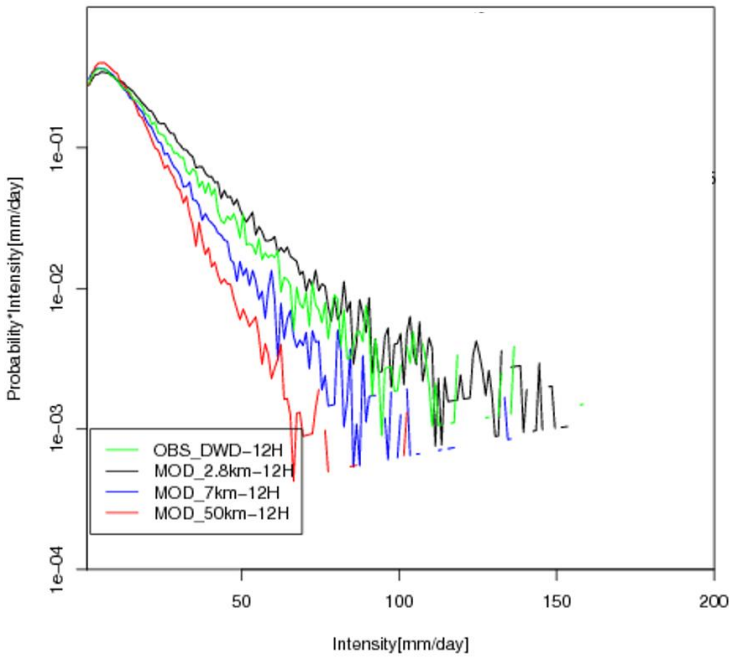


Abbildung 2. Bessere Erfassung von Niederschlagsextremen durch höhere Auflösung: grün: Beobachtung, rot: Auflösung 50 km, blau: Auflösung 7 km, schwarz: Auflösung 2.8 km.

3. Details der Modellierung

Die Simulationen wurden mit dem Regionalmodell COSMO-CLM (Modellversion cosmo_5.0_clm3a) auf der CRAY XC40 des Höchstleistungsrechenzentrums Stuttgart durchgeführt. Details zum Modell sind z. B. unter www.cosmo-model.org zu finden. Es wurden drei jeweils dreißigjährige Zeiträume simuliert: der Kontrollzeitraum 1971-2000, die nahe Zukunft 2021-2050 sowie die ferne Zukunft 2071-2100. Der Kontrollzeitraum dient sowohl als Referenz für den Vergleich mit den zukünftigen Klimaten als auch als Validierungszeitraum für den Vergleich der Modellergebnisse mit Beobachtungen. Als globaler Antriebsdatensatz wurde die Realisierung 1 des Globalmodells MPI-ESM (Erdsystemmodell des Max-Planck-Instituts für Meteorologie) mit dem Atmosphärenmodell ECHAM 6 verwendet, für eine zusätzliche Validierung wurde das Regionalmodell mit ERA40-Reanalysen (Kallberg et al. 2004) angetrieben. Um von der groben Auflösung der Antriebsdaten (Größenordnung 1°, also etwa 100 km) zur gewünschten sehr hohen Auflösung von 0.025° (etwa 2.8 km) zu gelangen, wurde das sogenannte dynamische Downscaling in Verbindung mit dem Nesting verwendet. Beim dynamischen Downscaling wird dem Regionalmodell an seinen atmosphärischen Rändern in regelmäßigen Zeitintervallen (z. B. alle drei Stunden) meteorologische Information des Globalmodells übergeben (Erdboden und Landoberflächen werden nur zu Beginn der Simulation initialisiert). Aus numerischen und physikalischen Gründen kann der Schritt von der Auflösung der globalen Antriebsdaten zur gewünschten Auflösung nicht „in einem Rutsch“ gemacht werden, vielmehr werden Zwischenstufen (Nester) eingeschaltet. Im vorliegenden Fall waren zwei Nestingstufen zwischengeschaltet: die erste Nestingstufe hatte eine Auflösung von 0.44° (etwa 50 km), die zweite 0.0625° (etwa 7 km), wobei die gröbere Nestingstufe die jeweils nächstfeinere antrieb. Die Rechnungen für die beiden Zwischenstufen wurden transient, d. h. durchgängig von 1968 bis 2100 durchgeführt (der Zeitraum 1968-1971 ist ein Einschwingzeitraum, der nicht ausgewertet wird). In diese transienten Simulationen wurden dann die 0.025°-Simulationen mit einer Einschwingzeit von drei Jahren „eingehängt“.

Das Simulationsgebiet enthält in der höchsten Auflösung einschließlich der nicht in die Auswertungen eingehenden Randzone 322 x 328 horizontale und 49 vertikale Gitterpunkte. Außer dem Niederschlag, welche in 5-Minuten-Intervallen ausgeschrieben wurde, wurden alle ausgewerteten Daten stündlich ausgeschrieben. Die für dieses Projekt ausgewerteten Variablen sind die 2m-Temperatur, der Niederschlag, die relative Feuchte in 2 m, die Globalstrahlung und die Windgeschwindigkeit. Es wurden Mittelwerte bzw. Summen (Jahr, hydrologisches Sommerhalbjahr (Mai-Oktober), hydrologisches Winterhalbjahr (November-April), mittlere Jahresgänge sowie Klimaindizes und Extreme (Anzahl von trockenen Tagen, mittlere und maximale Trockenperiodenlänge, die Anzahl der Trockenperioden länger als elf Tage, die Anzahl der Tage mit Niederschlägen größer als 25 mm/Tag, die Anzahl der Stunden mit Niederschlägen größer als 10 mm/Stunde sowie die Niederschlagsmengen der Jährlichkeiten 1, 10 und 100 Jahre und Dauerstufen 1, 12, 24 Stunden berechnet. Zur Berechnung der Niederschlagsmengen wurde die peak-over-threshold Methode mit dem 95ten Perzentil als Schwellenwert benutzt (Früh et al. 2010).

Das Auswertegebiet (ohne Randzone) zeigt Abb. 3. Anschaulich ausgedrückt bedeutet eine Auflösung von 2.8 km: wenn man irgendwo im Simulationsgebiet zu Fuß startet, kommt man nach spätestens 30 Minuten in die nächste Modellmasche, von Ligurien bis in die Niederlande und von Burgund bis in die Tschechische Republik. Der Rechenaufwand betrug mehrere Monate, der Speicherplatzbedarf liegt im Terabyte-Bereich.

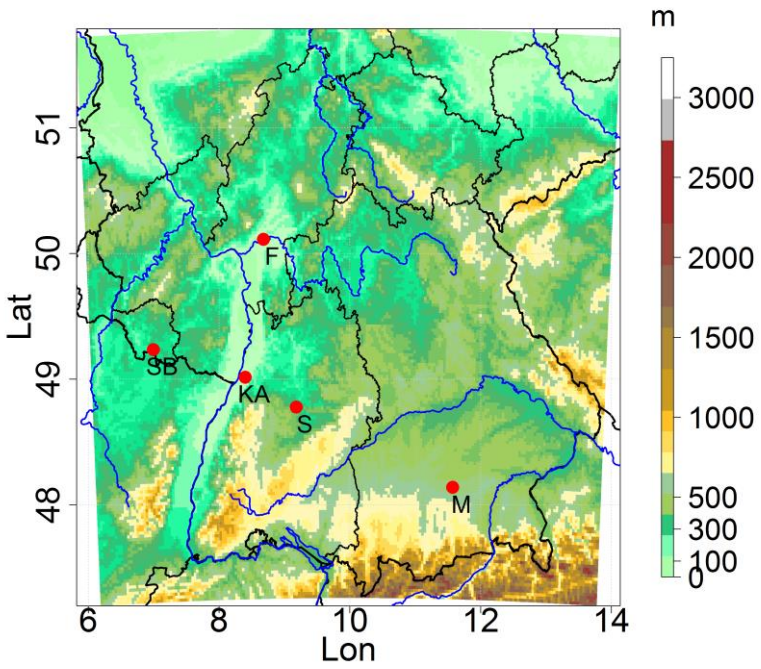


Abbildung 3. Das Auswertegebiet für die hier diskutierten Klimasimulationen.

4. Das verwendete Emissionsszenario

Für die Simulationen wurde das RCP 8.5-Szenario verwendet (siehe Abb. 4.). Ausgangspunkt der RCPs (representative concentration pathways) ist die Erkenntnis, dass verschiedene Kombinationen von Annahmen zur demographischen, ökonomischen, technischen und politischen Entwicklung durchaus zu ähnlichen Emissions- und damit Treibhausgaskonzentrationsentwicklungen führen können, welche sich in wenige typische (repräsentative) Emissionszeitreihen (concentration pathways) zusammenfassen und über den von ihnen verur-

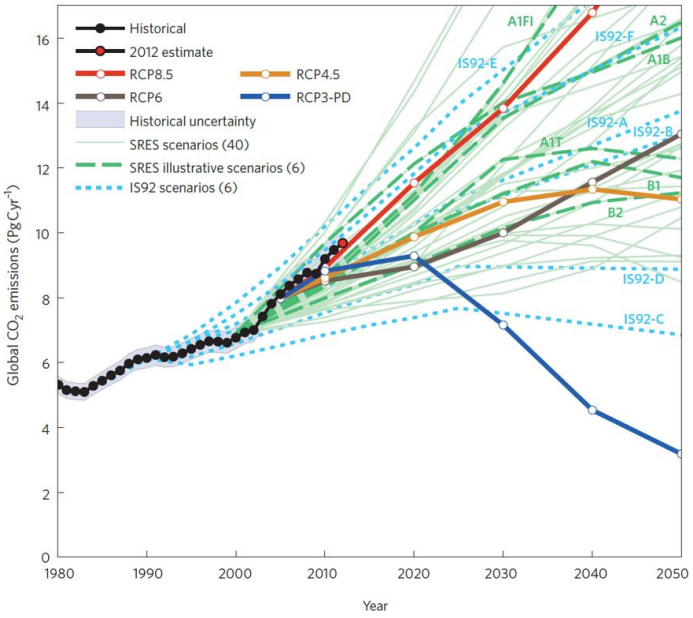


Abbildung 4. Emissionszeitreihen der RPC-Szenarios und der SRES-Szenarios (nach van Vuuren et al. 2011).

sachten Strahlungsantrieb charakterisieren lassen (siehe z. B. van Vuuren et al. 2011). Dies unterscheidet sie von den früheren SRES-Szenarios, welche Zeitreihen der Treibhausgasgasemissionen für eine gegebene demographische, ökonomische und politische zeitliche Entwicklung lieferten und dadurch weniger flexibel gegenüber Änderungen der Annahmen zu diesen Entwicklungen waren. Die Flexibilität der RCP-Szenarios wird durch Unterszenarios (sogenannte narratives) weiter erhöht. Im hier beschriebenen Projekt wurde als Emissionsszenario das RCP8.5-Szenario verwendet, welches die bisherige Entwicklung der Treibhausgasemissionen realistisch wiedergibt und in den nächsten Dekaden mit dem früheren A1B-Szenario vergleichbar ist. In der Literatur werden häufig keine großen Unterschiede zwischen den RPC-Szenarios und den SRES-Szenarios festgestellt (IMPACT2C-Bericht). Die Emissionsdaten für die verschiedenen RCPs (die „Hauptlinien" sind RCP8.5, RCP6, RCP4.5 und RCP2.6) sind in einer Auflösung von 0.5 x 0.5° verfügbar.

5. Modellvalidierung und Mehrwert gegenüber gröberer Auflösung

Die Validierung der Ergebnisse im Kontrollzeitraum erfolgte bis auf die (in HYRAS fehlende) Globalstrahlung mit HYRAS-Daten (Abb. 5). 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.
Die Modellvalidierung erfolgte anhand der Simulationen mit MPI-ESM/ECHAM6-Antrieb für den Kontrollzeitraum 1971-2000. Zusätzlich wurde eine Validierung anhand von Simulationen mit ERA40-Antrieb durchgeführt. Auf letztere wird hier nicht näher eingegangen; einen exemplarischen Vergleich der Gebietsmittel zeigt Tabelle 1. Im Allgemeinen sind die Fehler bei den mit ERA angetriebenen Simulationen etwas geringer als bei den mit ECHAM angetriebenen.

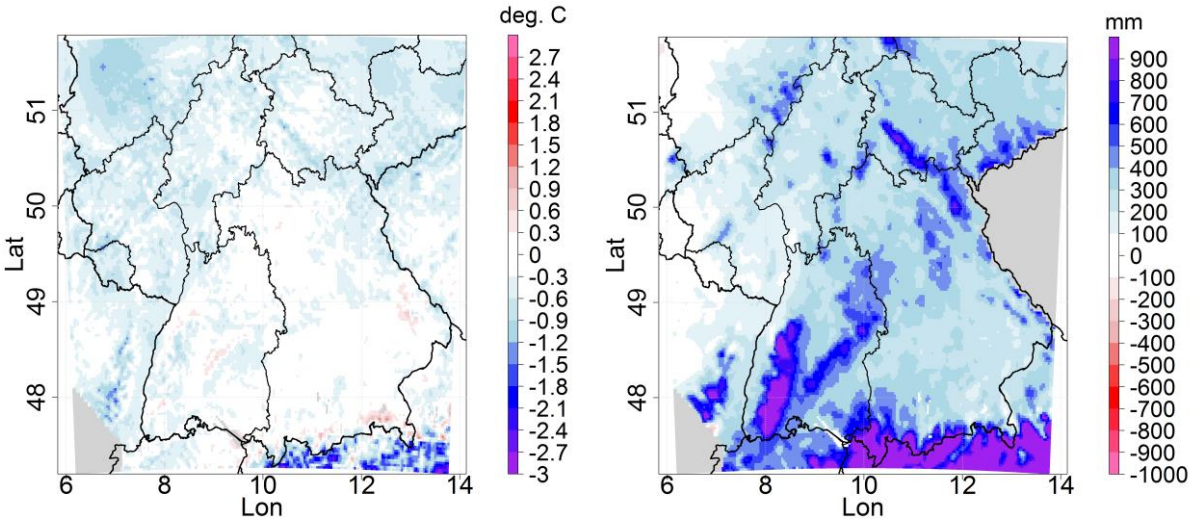


Abbildung 5. Abweichung der CCLM-Simulationen mit ECHAM-Antrieb von den HYRAS-Beobachtungsdaten: links Temperatur, rechts Niederschlag.

Für das Jahresmittel der 2m-Temperatur ergibt sich eine gute Übereinstimmung von Beobachtung und Simulation mit leichter Unterschätzung, vor allem im Norden des Gebiets und stärker im Bereich der Alpen. Im Gebietsmittel beträgt die Unterschätzung etwa 0.4°C (siehe Tabelle 1). Bei der jährlichen Niederschlagssumme findet man im westlichen Gebiet gute Übereinstimmung und sonst in den tieferen und mittleren Höhenlagen Überschätzungen in Höhe von etwa 200 mm. Große Unterschiede zwischen Beobachtung und Simulation finden sich in höheren Bergregionen wie Schwarzwald und Alpen. Die Ursachen dieser Überschätzung sind noch nicht geklärt. Obwohl bereits Verbesserungen im Vergleich zu früheren Si-

mulationen erreicht wurden, sind noch weitere Untersuchungen notwendig, z. B. der Einfluss spezifischer Wetterlagen, aber auch eine Analyse der Niederschlagsbeobachtungen, welche im Vergleich zu anderen Variablen insbesondere in Höhenlagen mit größerer Unsicherheit behaftet sind, was sich auch an den Unterschieden zwischen HYRAS und E-Obs-Daten zeigt.
In der folgenden Tabelle sind für einige Klimavariablen Beobachtungen und Simulation verglichen. Die Tabelle zeigt, dass außer beim Niederschlag, bedingt durch die Überschätzung in höheren Lagen, eine gute Übereinstimmung herrscht.

Tabelle 1. Vergleich der Gebietsmittel im Kontrollzeitraum zwischen HYRAS und CLM-Simulationen mit ERA- und ECHAM-Antrieb.

	HYRAS	CLM-ERA 40	CLM-ECHAM6
2m-Temperatur (°C)	8.2	8	7.8
Relative Feuchte (%)	78.5	81.7	82.2
Niederschlag (mm)	889	1128	1241
Globalstrahlung (W/m²)	1140	1022	1010

Exemplarisch für eine Klimastatistik zeigt Abb. 6 den Vergleich von beobachteter und modellierter jährlicher Anzahl von Trockenperioden (mindestens elf aufeinanderfolgende Tage mit Niederschlag unter 1 mm) im Kontrollzeitraum. Sowohl mit ERA-Antrieb als auch stärker mit ECHAM-Antrieb wird die Anzahl der Trockenperioden unterschätzt, wobei die Abweichung nach Osten hin zunimmt.

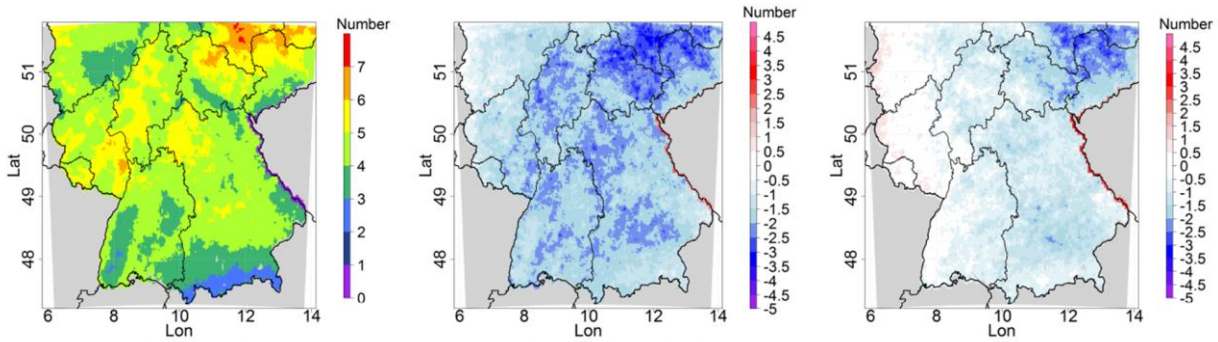


Abbildung 6. Beobachtete (links) und Abweichung der modellierten jährlichen Anzahl von Trockenperioden im Kontrollzeitraum; Mitte: ECHAM-Antrieb, rechts: ERA-Antrieb,.

Interessant ist die Frage, welchen Mehrwert man durch die höhere Auflösung im Vergleich zu gröberen Auflösungen erhält. Dies wird z. B. in Hackenbruch et al. (2016) in einem Vergleich 7 km zu 2.8 km untersucht, mit dem Ergebnis, dass höhere Auflösung oft eine signifikante Verbesserung bringt und dies vor allem im Sommer. Eine Untersuchung anhand der Daten dieses Projekts kommt zu ähnlichen Ergebnissen. Abb. 7 zeigt hierzu exemplarisch die mittleren Abweichungen der 7 km-Simulationen (jeweils oben im Diagramm) und die mittleren Abweichungen der 2.8 km-Simulationen (jeweils unten im Diagramm) gegenüber HYRAS für Temperatur, Feuchte und Niederschlag. Rot bedeutet, dass die 2.8 km-Simulationen signifikant besser sind als die 7 km-Simulationen, blau bedeutet das Gegenteil. Für Temperatur und Feuchte ergibt sich eine signifikante Verbesserung, für den Niederschlag eine Verschlechterung. Differenziert man jedoch beim Niederschlag weiter nach Höhenlage und Jahreszeit, so findet man sowohl für Sommer als auch für Winter eine signifikante Verbesserung in Höhen unterhalb 400 m (hier nicht gezeigt), so dass die Verschlechterung ausschließlich auf die bereits angesprochene starke Überschätzung in größeren Höhen zurückzuführen ist.

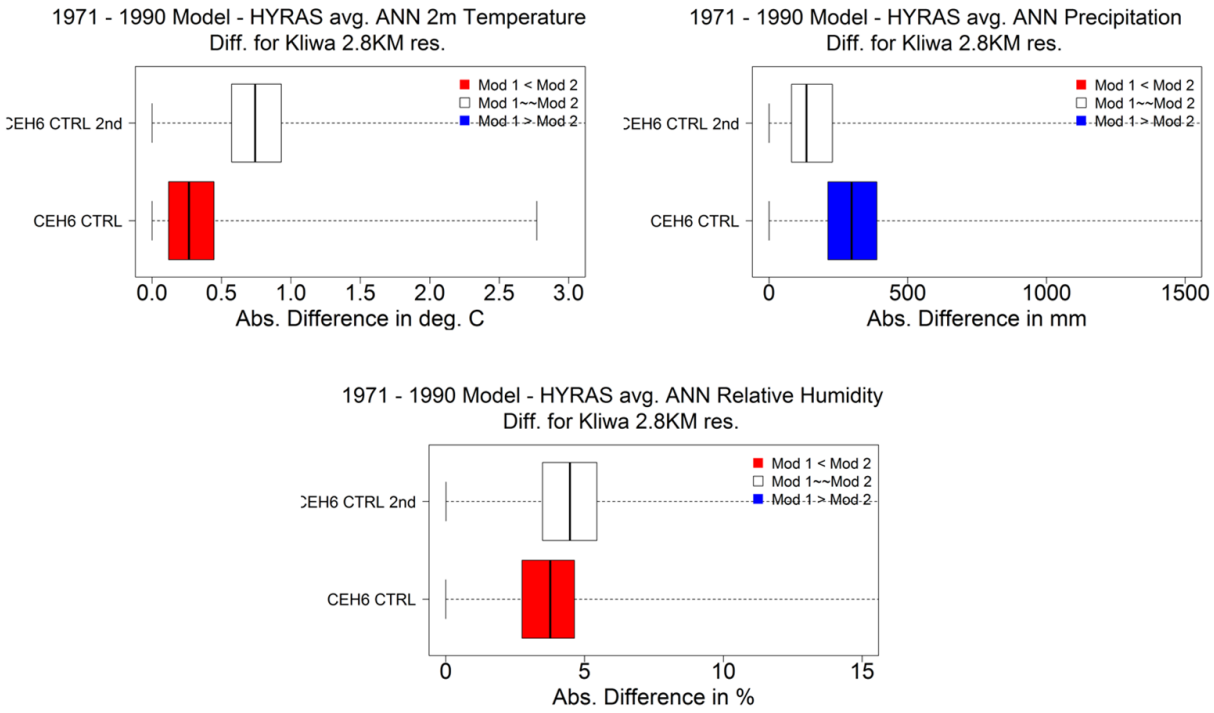


Abbildung 7. Mehrwert der höheren Auflösung. Erläuterungen siehe Text.

6. Zukünftige Entwicklung

Entwicklung gemäß MPI-ESM

Einen Überblick über die Temperatur und Niederschlagsentwicklung im KLIWA-Gebiet bis zum Ende dieses Jahrhunderts aus der Sicht von MPI-ESM/ECHAM6 RCP8.5 gibt Abb. 8 Dargestellt sind drei Realisierungen sowie für den Kontrollzeitraum die E-Obs-Daten. Trotz unterschiedlicher Jahr-zu-Jahr-Variabilität sind die Tendenzen bei allen Realisierungen eindeutig: bis zur Mitte des Jahrhunderts wird die Mitteltemperatur um deutlich mehr als 2°C, bis zum Ende des Jahrhunderts und um deutlich mehr als 4°C gegenüber dem vorindustriellen Wert angestiegen sein. Bei den Niederschlagssummen dagegen ist keine Tendenz auszumachen. Der Vergleich mit den E-Obs-Daten zeigt auch, dass im Ensemblemittel die Temperatur in Wert und Verlauf gut getroffen wird und dass alle ECHAM-Realisierungen den Niederschlag überschätzen, was bereits weiter oben festgestellt wurde.

Entwicklung gemäß der Regionalisierung

Einen Überblick über die Entwicklung der Gebietsmittel verschiedener Klimagrößen gibt Tabelle 2. Die Änderungen beziehen sich immer auf den Kontrollzeitraum 1971-2000. Sowohl in der nahen als auch in der fernen Zukunft nimmt die Temperatur im Sommerhalbjahr stärker zu als im Winterhalbjahr, wobei sich die Zunahme, wie schon der Verlauf des Emissionsszenarios vermuten lässt, zum Ende des Jahrhunderts intensiviert. Im Gegensatz dazu zeigt der Niederschlag im Gebietsmittel nur geringfügige Änderungen, was sich bereits in den Daten des Globalmodells angedeutet hat. Absolut gesehen ist auch die Änderung der Anzahl der Trockenperioden sowohl in der nahen als auch in der fernen Zukunft gering, wobei bei einer Anzahl von drei Trockenperioden pro Jahr die relative Änderung in der fernen Zukunft bei 33 % liegt. Wegen der geringen Fallzahl sind solche Aussagen allerdings recht unsicher. Weitere Auswertungen für andere Klimavariablen sind im Bericht zu finden.

Tabelle 2. Änderung einiger Klimavariablen (Gebietsmittel). Mitte nahe Zukunft, rechts ferne Zukunft.

Temperatur (°C)		
Jahr	0.8	3.1
SH	1	3.2
WH	0.6	2.8
Niederschlag (mm)		
Jahr	-5	-19
SH	-1	-88
WH	-5	71
Anzahl Trockenperioden	0	1

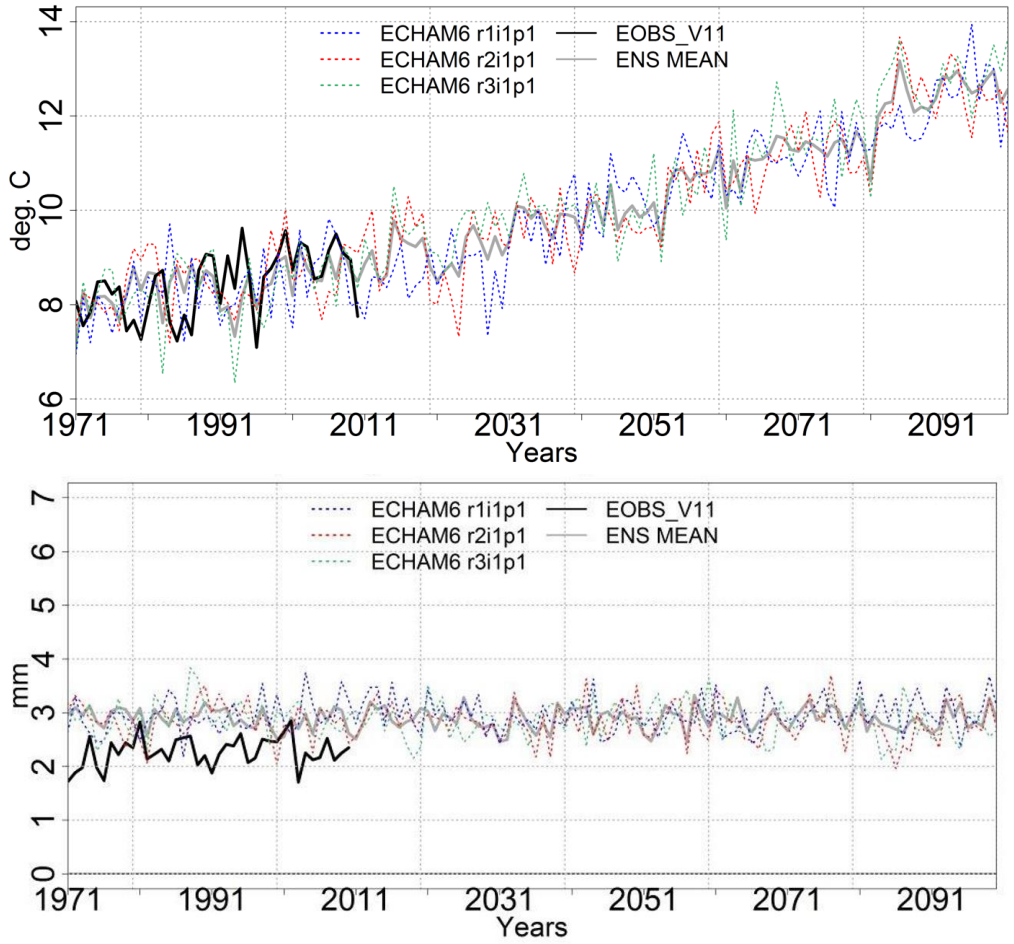


Abbildung 8. Entwicklung von Temperatur (oben) Niederschlag (unten) bei den ECHAM6-Realisierungen 1, 2 und 3.

Hinter geringen Änderungen im Gebietsmittel kann sich eine deutliche räumliche Variabilität der Änderungen verbergen, welche bei der hohen Auflösung deutlich hervortritt. Dieses zeigen Abb. 9 und 10 am Beispiel der Änderung des Niederschlags und der Anzahl der Trockenperioden. Neben der räumlichen Variabilität erkennt man im Vergleich der Abb. 9 und 10 die Tendenz zur Zunahme der Extreme (hier Niederschlag und Trockenheit).

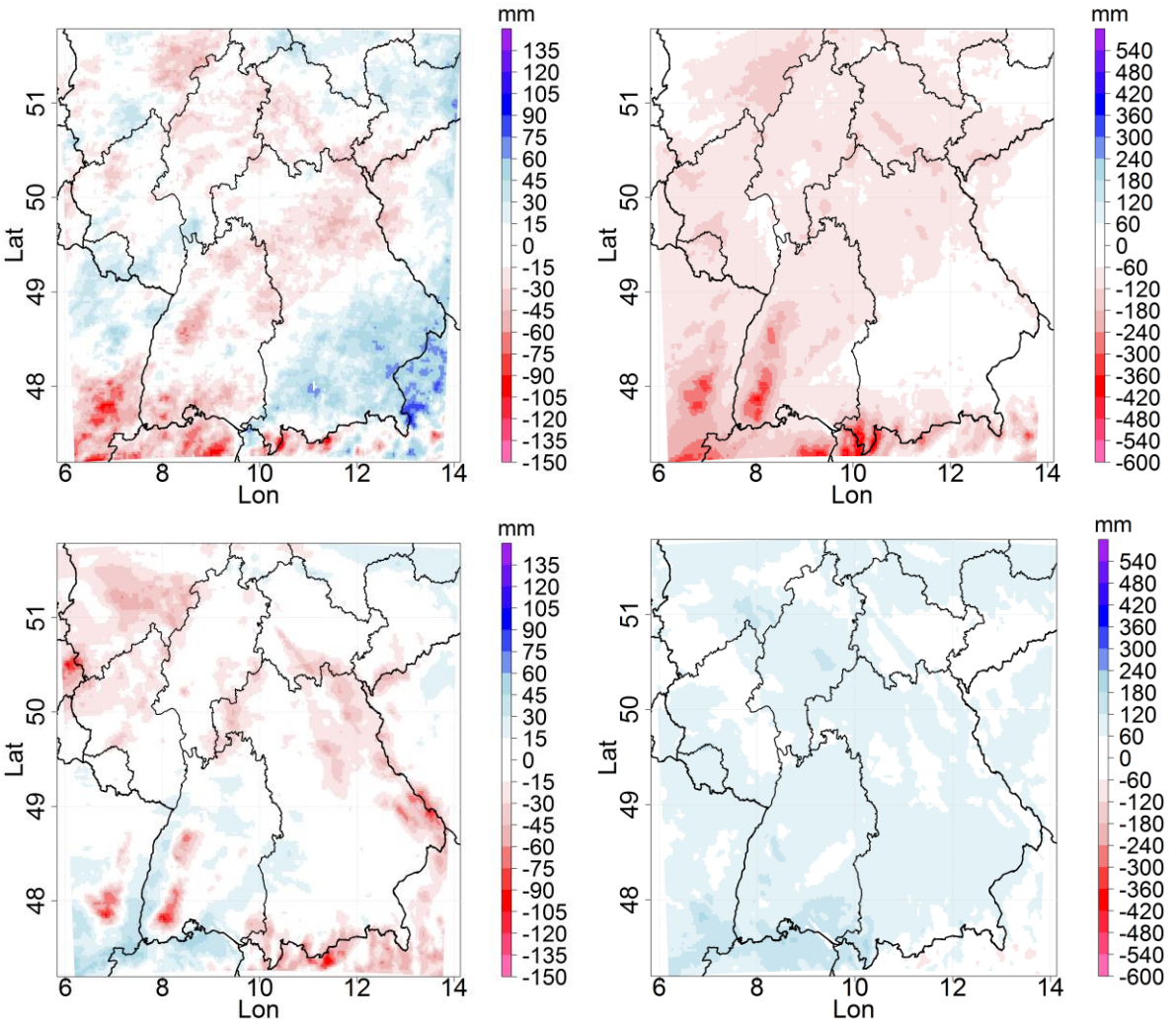


Abbildung 9. Änderung der Niederschlagssummen: nahe (linke Spalte) und ferne (rechte Spalte) Zukunft relativ zum 1971-2000 Kontrollzeitraum (oben: Sommer, unten: Winter). Man beachte die unterschiedlichen Skalen.

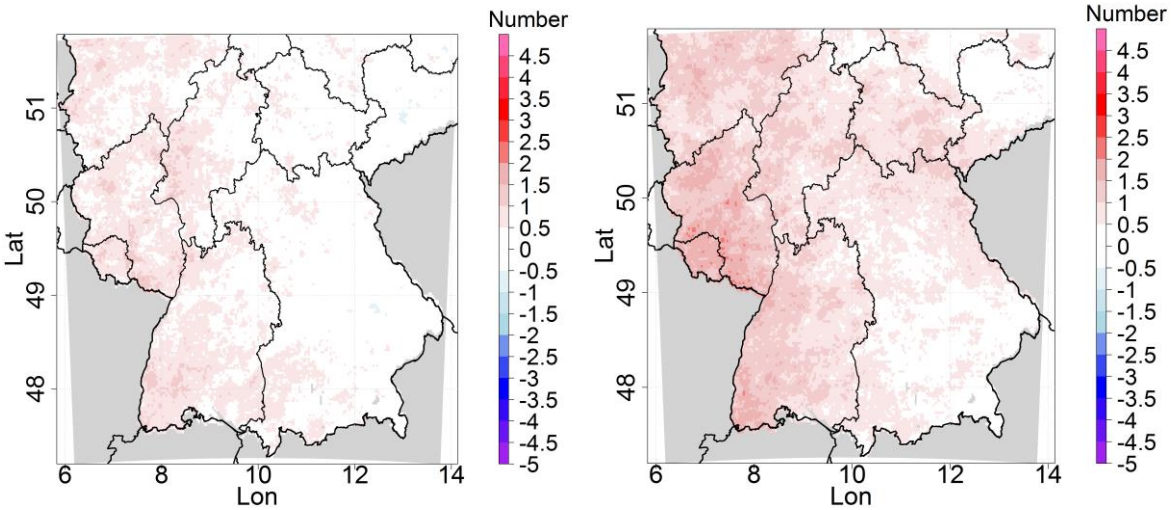


Abbildung 10. Änderung der Anzahl der Trockenperioden in der nahen (links) und fernen (rechts) Zukunft relativ zum 1971-2000 Kontrollzeitraum.

Interessante Einsichten ergeben sich bei den Änderungssignalen für die Niederschlagsmengen verschiedener Dauerstufen und Jährlichkeiten, besonders bei den zehn- und hundertjährlichen Werten, wobei die einhundertjährlichen Werte wegen der Extrapolation von 30 auf 100 Jahre nur als Approximationen betrachtet werden sollten. Abb. 11 zeigt als Beispiel die Änderung der Niederschlagsmengen für die Dauerstufe 24 Stunden und die Jährlichkeit 10 Jahre in der nahen und fernen Zukunft. Man erkennt die Intensivierung der Muster, d. h. die Zunahme des Änderungssignals von der nahen zur fernen Zukunft hin, oft unter Beibehaltung der Strukturen, und die große räumliche Variabilität des Änderungssignals auf kleinen Entfernungen. Es können durchaus auch Abnahmen der Niederschlagsmengen auftreten. Interessant ist das Auftreten südwest-nordost-orientierter Strukturen im Sommer und eher zonaler Strukturen im Winter. Inwieweit dies mit der Änderung der starkniederschlagsrelevanten Wetterlagen und/oder der entsprechenden Luftmasseneigenschaften zusammenhängt, ist noch offen.

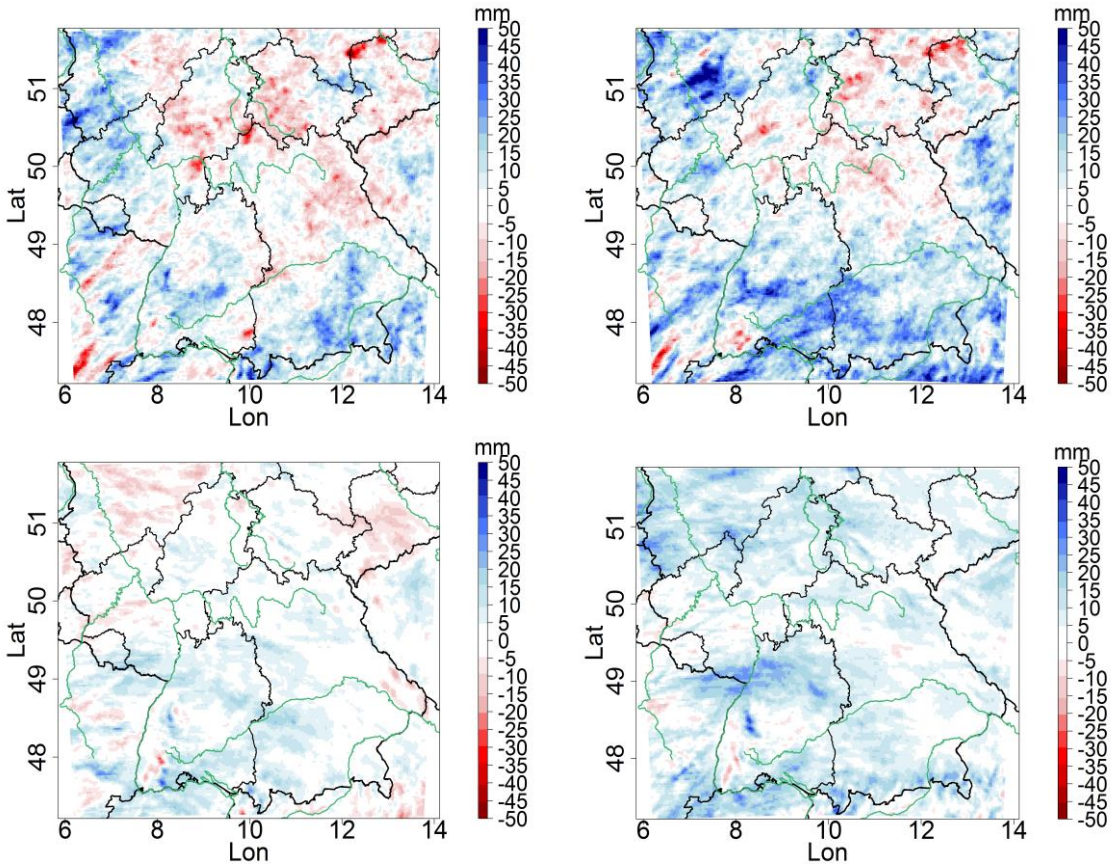


Abbildung 11. Änderung der Niederschlagsmengen für die Dauerstufe 24 Stunden und die Jährlichkeit 10 Jahre in der nahen (linke Spalte) und fernen (rechte Spalte) Zukunft relativ zum 1971-2000 Kontrollzeitraum (oben: Sommer, unten: Winter).

7. Zusammenfassung

Aus dieser Studie können folgende wesentliche Ergebnisse abgeleitet werden:

- Durch die höhere Auflösung können Orographie- und Landnutzungsdetails sowie kleinskalige Einflüsse und Prozesse besser erfasst werden. Dadurch wird bei der Validierung eine bessere Übereinstimmung mit Beobachtungen als mit gröberer Auflösung erreicht.

- Während beim Niederschlag in Höhen bis etwa 400 m über NN ebenfalls eine Verbesserung erzielt wird, wird der Niederschlag in höheren Lagen zurzeit noch überschätzt.
- Deutliche Änderungssignale treten vor allem in der fernen Zukunft auf. Dabei werden die Tendenzen der nahen Zukunft fortgesetzt und räumliche Strukturen intensiviert.
- Die räumliche und zeitliche Variabilität, welche starken Einfluss auf das Auftreten und die Intensität von Extremen hat, erhöht sich geringfügig in der nahen Zukunft und deutlich in der fernen Zukunft.
- Bis jetzt liegt nur eine Simulation vor – diese Stichprobe muss durch Ensemblesimulationen weiter abgesichert werden.

8. Ausblick

Durch die Zunahme der verfügbaren Rechenleistung und den erkennbaren Mehrwert sehr hoch auflösender Klimasimulationen, werden sich solche Simulationen besonders im Zusammenhang mit anwendungsorientierten Fragestellungen (Hydrologie, Stadtklima, …) in Zukunft immer mehr durchsetzen, obwohl noch eine Reihe von offenen Fragen zu klären ist (z. B. Nestingstrategie, Niederschlagsproblem, Gebietsauswahl, Numerik). Es wurde zu diesem Thema auch eine CORDEX-Initiative ins Leben gerufen, an welcher das IMK-TRO beteiligt ist.
Die Ergebnisse regionaler Klimasimulationen hängen stark von den Daten des antreibenden Globalmodells ab. Letztere - und damit auch die Änderungssignale - weisen zum Teil recht große Streuungen auf, wie Abb. 12 und 13 am Beispiel des Niederschlags zeigen.

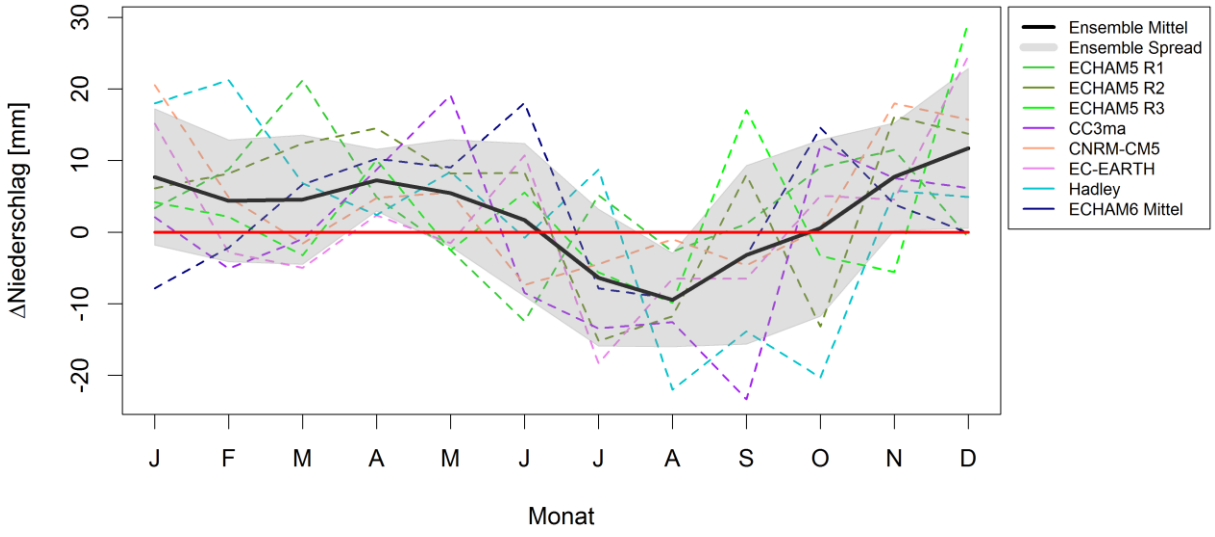


Abbildung 12. Änderung des Jahresgangs des Niederschlages zwischen 1971-2000 und 2021-2050 für verschiedene globale Antriebe, Gebietsmittel Baden-Württemberg. Schattiert: ± eine Standardabweichung.

Insbesondere übertragen sich Tendenzen zur Über- oder Unterschätzung von Klimavariablen auf die regionalen Simulationen, zum Teil gedämpft durch hohe Auflösung und Jahreszeit. Das bedeutet, dass die Ergebnisse einer einzigen Simulation als Stichprobe zur ersten Orientierung betrachtet werden sollte. Erst durch die Kombination mehrerer Klimasimulationen, d. h. Ensemblebildung, können belastbarere Aussagen und Unsicherheitsabschätzungen gemacht werden. Auch der Austausch einzelner Komponenten des Regionalmodells wie z. B. des verwendeten Landoberflächenmodells beeinflusst das Ergebnis und kann zum Ensemble beitragen.

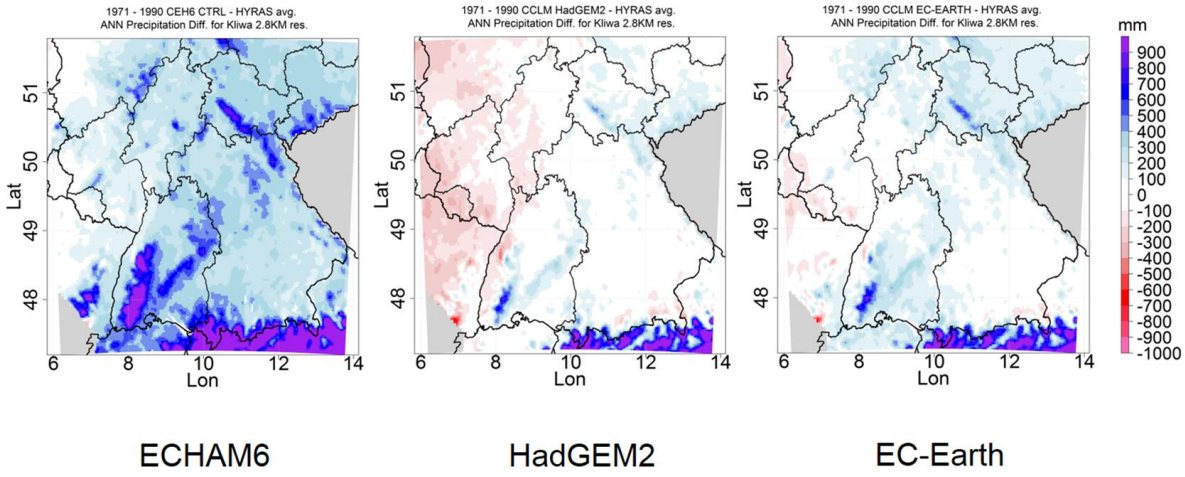


Abbildung 13. Abweichung der mit COSMO-CLM mit 2.8 km Auflösung simulierten Jahressummen des Niederschlags im Kontrollzeitraum von den HYRAS-Werten für verschiedene globale Antriebe: links ECHAM6, Mitte HadGEM2, rechts: EC-Earth.

9. Literatur

Früh B., Feldmann H., Panitz H.-J., Schädler G., Jacob D., Lorenz P., Keuler K. (2010): Determination of precipitation return values in complex terrain and their evaluation, Journal of Climate 23(9) pp. 257-2274.

Hackenbruch J., Schädler G., Schipper J.W. (2016): Added Value of High-Resolution Regional Climate Simulations for Regional Impact Studies, Meteorologische Zeitschrift 25(3) pp. 291-304.

Haylock M., Hofstra N., Klein-Tank A., Klok E., Jones P., New M. (2008): A European daily high-resolution gridded dataset of surface temperature and precipitation, Journal of Geophysical Research 113(D20119).

Kallberg P., Simmons A., Uppala S., Fuentes M. (2004): The ERA-40 archive (revised October 2007). Shinfield Park, Reading.

Rauthe M., Steiner H., Riediger U., Mazurkiewicz A., Gratzki A. (2013): A Central European precipitation climatology part i: Generation and validation of a high-resolution gridded daily data set (HYRAS), Meteorologische Zeitschrift 22(3) pp. 235-256.

van Vuuren D.P., Edmonds J., Kainuma M., Riahi K., Thomson A., Hibbard K., Hurtt G.C., Kram T., Krey V., Lamarque J.-F., Masui T., Meinshausen M., Nakicenovic N., Smith S.J., Rose S.K. (2011): The representative concentration pathways: an overview, Climatic Change 109(1-2), pp. 5-31.

10. Danksagung

Wir danken dem Höchstleistungsrechenzentrum Stuttgart für die Bereitstellung von Rechenleistung und fachliche Unterstützung.

Abflusssimulationen mit den neuen RCP-Szenarien

Holger Komischke (LfU Bayern), Christian Iber (LfU Rheinland-Pfalz), Vassilios Kolokotronis (LUBW), Dr. Monika Rauthe (DWD)

1. Einleitung

Die Kooperation KLIWA nutzt Klimaprojektionen, um die Auswirkungen des Klimawandels auf den Wasserhaushalt und die Abflüsse in Süddeutschland zu ermitteln. Seit 2014 sind hierfür neue Klimaprojektionen verfügbar, die auf direkten Vorgaben des Strahlungsantriebs beruhen (RCP-Szenarien). Bisher nutzte KLIWA die SRES-Szenarien B2 und A1B basierend auf Treibhausgasemissionen. Vor allem für das RCP4.5- und das RCP8.5-Szenario sind bereits regionale Klimaprojektionen nutzbar. Im Umgang mit den neuen Szenarien stellen sich dabei die folgenden Fragen in KLIWA:

- Es liegen neue Szenarien (RCPs) als Antrieb für Klimaprojektionen vor – brauchen wir nun auch neue Abflussprojektionen?
- Was sind die Unterschiede oder auch Gemeinsamkeiten der zwei Szenarien-Familien (SRES/RCP)?
- Welche zusätzlichen Erkenntnisse können diese neuen Klima- und Abflussprojektionen (RCP) liefern und ist es möglich, bisherige Aussagen dadurch zu schärfen?

Aktuell ist das RCP8.5-Szenario Gegenstand der Betrachtungen in KLIWA, erste Auswertungen für Klimaprojektionen mit diesem Szenario liegen für Süddeutschland vor. Unter Nutzung von Bias-Korrektur und Downscaling werden darauf aufbauend erste Ergebnisse für Abflussprojektionen basierend auf dem RCP8.5 vorgestellt. Die Ergebnisse werden mit den bisherigen Erkenntnissen für die Klima- und Abflussentwicklung in KLIWA verglichen.

2. Methodik

Die Abschätzung der langfristigen Entwicklung des Erdklimas ist eine sehr komplexe Aufgabe, da sich viele Parameter und Größen gegenseitig beeinflussen und nicht alle Prozesse hinreichend bekannt sind. Die Klimaforschung nutzt dafür eine Kombination von Modellannahmen, die auf den komplexen Prozessen in unserer Atmosphäre beruhen. Dieses Vorgehen nennt man „Modellkette“ (Abbildung 1). Das Endergebnis der Betrachtungskette bezogen auf das Klima ist die „Regionale Klimaprojektion“. Ein darauf aufbauender Schritt ist die Wirkungsmodellierung, z. B. mit einem Wasserhaushaltsmodell. Die Unsicherheit der Aussage und damit deren Bandbreite erhöht sich mit jedem Kettenglied.

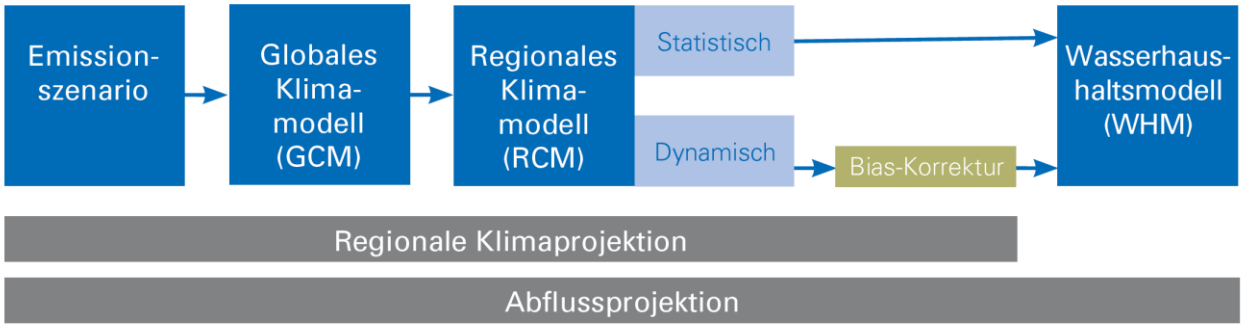
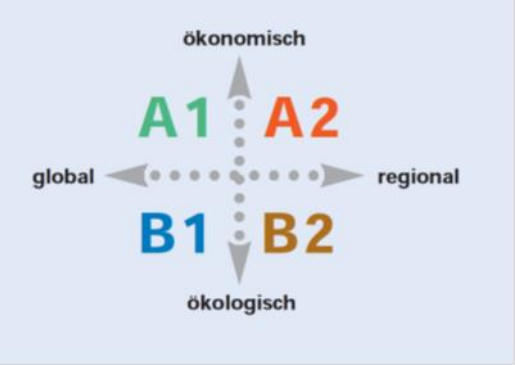


Abbildung 1. Modellkette für Untersuchungen zum regionalen Klimawandel.

Mit Hilfe von globalen Klimamodellen (GCM) wird das Klima der gesamten Erde simuliert, nur so lassen sich die vielen Zusammenhänge, die das Klima weltweit beeinflussen, erfassen. Globale Klimamodelle basieren meist auf einem atmosphärischen Modell, das durch ein Ozean-, ein Schnee- und Eis- sowie ein Vegetationsmodell ergänzt wird. Die anthropogenen Einflüsse (der „Faktor Mensch") werden dabei durch die verschiedenen Annahmen zur Freisetzung von Treibhausgasen (SRES-Szenarien) bzw. in der neusten Klimamodellgeneration seit 2014 durch zusätzliche Strahlungsantriebe (RCP-Szenarien) berücksichtigt. Emissionsszenarien für Treibhausgase sind somit das erste Glied der Modellkette zur Abschätzung der zukünftigen Klimawandelfolgen und werden vom sogenannten Weltklimarat, dem Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) veröffentlicht.

Die **SRES-Emissionszenarien** ("Special Report on Emission Scenarios", IPCC 2000) gründen jeweils auf sogenannten Modellgeschichten zur weiteren Entwicklung der Menschheit, in die z. T. sehr unterschiedliche Annahmen zu ökonomischen, sozialen und politischen Entwicklungen einfließen (Abbildung 2). Aus den Modellgeschichten wurden darauf folgend Emissionen von CO_2, Methan und anderen Treibhausgasen abgeleitet. Insgesamt wurden 40 Szenarien gebildet, die sich, entsprechend ihrer grundlegenden klimapolitischen Ausrichtung, zu sogenannten Szenarien-Familien gruppieren lassen. Nahezu alle bisher in KLIWA betrachteten Klimaprojektionen basieren auf dem Emissionsszenario A1B. Dieses Szenario liegt innerhalb der Szenarienfamilie A1 mit sehr raschem Wirtschaftswachstum, einer Mitte des 21. Jahrhunderts kulminierenden und danach rückläufigen Weltbevölkerung sowie einer raschen Einführung neuer und effizienterer Technologien. Der Schwerpunkt des Szenarios A1B liegt auf einer zukünftig weltweit ausgeglichenen Nutzung von fossilen und nicht-fossilen Brennstoffen. Bis 2050 spiegelt dieses Emissionsszenario eine eher mittlere Entwicklung der Emissionen gegenüber den zusätzlich verfügbaren Szenarien A2 und B1 wieder.



A1 Eine Welt mit schnellem Wirtschaftswachstum und schneller Einführung neuer Technologien.
A2 Eine heterogene Welt mit einem Schwerpunkt auf traditionellen Werten
B1 Eine sich vom Materialismus abwendende Welt und die Einführung sauberer Technologien.
B2 Eine Welt mit Schwerpunkt auf lokalen Lösungen für ökonomische und ökologische Nachhaltigkeit.

Abbildung 2. SRES-Szenario-Familien und deren sozioökonomische Grundannahmen.

Der Nachteil der SRES-Szenarien besteht darin, dass die zugrundeliegenden sozioökonomischen Annahmen nur schwer oder überhaupt nicht vorhersagbar sind. Die neu entwickelten **RCP-Szenarien** ("Representative concentration pathway", van Vuuren et al. 2011) gehen daher nicht mehr von einer vermutlichen Menschheitsentwicklung und deren Emissionen aus. Stattdessen definieren sie direkt mehrere festgelegte abgestufte Energiezunahmen (zusätzlicher Strahlungsantrieb), welche auf Grund der Verstärkung des Treibhauseffekts in der Atmosphäre verbleiben (Tabelle 1).

Tabelle 1. Übersicht über RCP-Szenarien (verändert nach van Vuuren et al. 2011).

Szenario	Beschreibung
RCP2.6	steigender Strahlungsantrieb bis etwa 3 W/m^2 (etwa 490 ppm CO_2eq) vor 2100 und dann ein Sinken bis 2,6 W/m^2 bis 2100
RCP4.5	steigender Strahlungsantrieb bis zu 4,5 W/m^2 (etwa 650 ppm CO_2eq) und eine Stabilisierung nach 2100
RCP6.0	steigender Strahlungsantrieb bis zu 6 W/m^2 (etwa 850 ppm CO_2eq) und eine Stabilisierung nach 2100
RCP8.5	steigender Strahlungsantrieb bis zu 8,5 W/m^2 (etwa 1.370 ppm CO_2eq) bis 2100

Je höher der Wert des jeweiligen RCP-Szenarios, desto stärker wird das Klimasystem durch einen erhöhten zusätzlichen Strahlungsantrieb erwärmt. Der Strahlungsantrieb ist damit ein Maß für die zusätzliche Erwärmung, die durch verschiedene Faktoren, wie z. B. CO_2-Emissionen, zum natürlichen Wärmehaushalt der Erde hinzukommt. Einen Vergleich der Strahlungsantriebe der RCP- und SRES-Szenarien bis 2100 gibt Abbildung 3. KLIWA hat sich entschieden, aktuell von den verfügbaren RCP-Szenarien nur das RCP8.5 zu verwenden. Für das RCP6.0 sind keine regionalen Klimaprojektionen in ausreichender Anzahl modelliert worden (Ensemblegedanke), die Betrachtung der moderaten bzw. sehr moderaten RCP-Szenarien 4.5 und 2.6 wurde in KLIWA vorerst ausgeklammert.

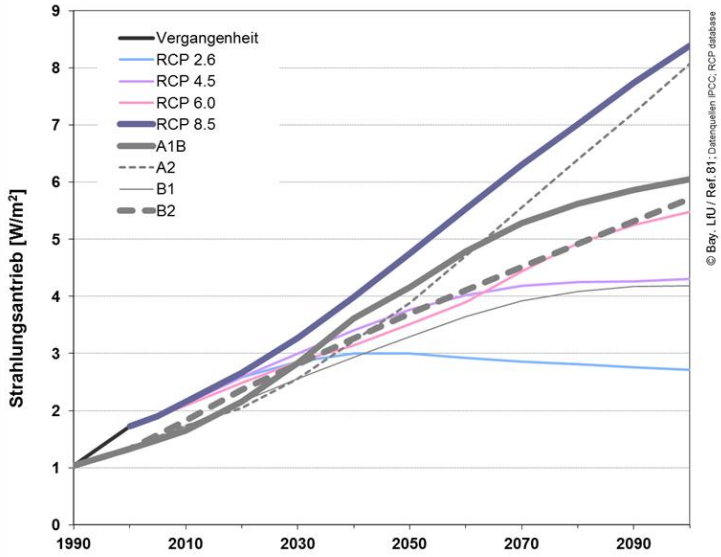


Abbildung 3. Entwicklung des zukünftigen Strahlungshaushalts in der Atmosphäre auf Grundlage von SRES- und RCP-Szenarien. Zum Vergleich wurde hier die Treibhausgasentwicklung der SRES-Szenarien in den Strahlungsantrieb umgerechnet.

Die Rasterweite eines globalen Klimamodells (~200 km) ist für eine regionale Klimaabschätzung, wie sie in KLIWA getroffen wird, viel zu grob. Regionale Strukturen wie Gebirgszüge, wie zum Beispiel der Schwarzwald oder auch Flusstäler sind nur durch regionale Klimamodelle (RCMs; bis ca. 10 km) zu erfassen (Abbildung 1. Durch eine Betrachtung mehrerer RCMs (Ensembleansatz) ergibt sich eine Bandbreite des möglichen zukünftigen Klimas für Süddeutschland. Der Ensembleansatz erlaubt, die Variabilität und die vorhandene Unsicherheiten des zukünftigen Klimas besser zu beurteilen. Dies ist für die SRES-Szenarien inzwischen ziemlich genau untersucht. Bei den neuen RCP-Szenarien beginnen die Auswertungen derzeit und werden Aufgabe der nächsten Jahre in KLIWA sein. Es handelt sich hierbei um die bis Januar 2017 veröffentlichten 16 Projektionen aus dem EURO-CORDEX-Ensemble (www.euro-cordex.net). Daneben ist in KLIWA die Benutzung noch höher aufgelöster Klimaprojektionen (CCLM 5.0 ~2,8 km) in Bearbeitung, um z. B. konvektive Niederschlagsereignisse und deren Auswirkungen besser zu erfassen.

Als letztes Glied der in KLIWA betrachteten Modellkette (Abbildung 1) schließt sich die Wasserhaushaltsmodellierung an die regionalen Klimaprojektionen an. Ziel ist es, das zukünftige Verhalten des Wasserhaushalts und der Abflusssituation in Süddeutschland zu ermitteln. Die Ergebnisse aus den regionalen Klimaprojektionen zur Entwicklung der Klimagrößen in Süddeutschland bilden die klimatischen Eingangsgrößen des Wasserhaushaltsmodells. Mit Wasserhaushaltsmodellen ist es möglich, die räumliche und zeitliche Verteilung wesentlicher Komponenten des Wasserhaushaltes wie Verdunstung, Versickerung, Wasserspeicherung und Abfluss zu berechnen. Mit ihrer Hilfe können die Auswirkungen von Veränderungen auf das Gesamtsystem „Wasserhaushalt" dargestellt und bewertet werden.

Nicht immer sind die Eingangsgrößen aus einer regionalen Klimaprojektion absolut plausibel, zuweilen müssen sie vor der Verwendung im Wasserhaushaltsmodell korrigiert werden. Dieses Verfahren, das auch in KLIWA angewendet wird, nennt sich „Bias-Korrektur“ oder „Bias-Adjustierung“. Die Gesamtheit der aus einer Modellkette resultierenden Aussagen (Emissionsszenario – GCM – RCM sowie Wasserhaushaltsmodell) zu der zukünftigen Entwicklung der Abflüsse und des Wasserhaushalts bezeichnet man als Abflussprojektion. Analog der Betrachtung und Auswertung von Klimaprojektionen wird in KLIWA ein Ensemble von Abflussprojektionen ausgewertet. Als Ergebnis ergibt sich an den betrachteten Pegeln eine Bandbreite für die Veränderungen der mittleren Abflüsse sowie der Hoch- und Niedrigwasserabflüsse. Neben den Klimaprojektionen selbst sind diese Aussagen in KLIWA eine wichtige Grundlage für die Entwicklung von Anpassungsoptionen und Handlungsempfehlungen.

Für die Darstellung der Klimaänderungssignale in KLIWA wurde länderspezifisch ein unterschiedliches Ensemble von verfügbaren Klimaprojektionen für SRES-A1B genutzt, um die Bandbreite möglichst gut wiederzugeben. Für das RCP-8.5 wurden alle bisher verfügbaren 17 Klimaprojektionen einheitlich für Süddeutschland ausgewertet.

Nicht alle Klimaprojektionen können aufgrund des damit verbundenen Aufwands in der Wasserhaushaltsmodellierung genutzt werden. Daher ist die Anzahl der gemeinsam in KLIWA betrachteten Abflussprojektionen geringer. Das Ensemble von Abflussprojektionen, das in KLIWA basierend auf SRES gemeinsam ausgewertet wurde, besteht aus den folgenden fünf regionalen Klimamodellen und verschiedenen Versionen des Globalmodells ECHAM:

- WETTREG2003 (statistisch) / ECHAM4 / B2
- WETTREG2006 (statistisch) / ECHAM5 Lauf 1 / A1B
- CCLM4.8 (dynamisch) / ECHAM5 Lauf 1 / A1B
- CCLM4.8 (dynamisch) / ECHAM5 Lauf 2 / A1B
- CCLM4.8 (dynamisch) / ECHAM5 Lauf 3 / A1B

Mit Ausnahme des Modelllaufs mit WETTREG2003 (KLIWA 2006, dort ENKE), der Emissionsszenario B2 nutzt, liegt somit allen Modellläufen das Emissionsszenario A1B zugrunde. Die Ergebnisse der Modellläufe mit CCLM4.8 wurden vor der Weiterverwendung biaskorrigiert (Methoden: linear scaling bzw. quantile mapping in Bayern). Für einzelne Pegel stehen nur gemeinsame Abflussprojektionen von CCLM4.8 zur Verfügung.

In Baden-Württemberg wurden die beiden dynamischen Klimaprojektionen CCLM5.0-MPI-ESM-LR-r1 (CCLM5.0) und RCA4-EC-EARTH-r12 (RCA4) für eine erste flächendeckende Wasserhaushaltsmodellierung basierend auf dem RCP8.5 Szenario genutzt. Ebenso erfolgte in Bayern eine erste Nutzung und Auswertung von zwölf der insgesamt 17 verfügbaren dynamischen Klimaprojektionen aus RCP8.5 (vgl. Tabelle 2) pilothaft in einzelnen Einzugsgebieten (Iller, Naab, Tauber und Fränkische Saale).

In den einzelnen Bundesländern existieren weitere länderspezifische Auswertungen von unterschiedlichen Klimaprojektionsensembles (z. B. Klimaatlas Baden-Württemberg, BayKLAS

Bayern, …), die eine weiterführende Einordnung der hier für KLIWA gemeinsam betrachteten Klimaprojektionen erlauben. Neben den in KLIWA ausgewerteten Abflussprojektionen liegen ebenfalls länderspezifisch in den einzelnen Bundesländern weitere Modellierungen und Auswertungen von Abflussprojektionen vor. Die daraus resultierende Bandbreite wird exemplarisch in diesem Beitrag für einzelne Pegel dargestellt. Auf eine generelle Darstellung dieser Ergebnisse wird aus Gründen der Vergleichbarkeit innerhalb von KLIWA verzichtet. Im Fokus dieser Auswertungen stehen die gemeinsam in KLIWA genutzten Projektionen. Für länderspezifische Auswertungen wird auf die einzelnen Bundesländer verwiesen.

Tabelle 2. Übersicht über die in Bayern bisher für die Wasserhaushaltsmodellierung betrachteten Klimaprojektionen für RCP8.5.

GCM \ RCM	ALADIN53	CCLM4-8-17	CCLM5.0	HIRHAM5	RACMO22E	RCA4	REMO2009	WRF331F
CNRM-CERFACS-CNRM-CM5	1	1				1		
ICHEC-EC-EARTH		1		1		1		
IPSL-IPSL-CM5A-MR						1		1
MOHC-HadGEM2-ES								
MPI-M-MPI-ESM-LR		1				1	2*	

X	Anzahl der genutzten Rechenläufe (Auflösung 12 km)
	Zusätzlich bisher verfügbar

3. Ergebnisse

3.1 Klima

Grundlage für die Wasserhaushaltsmodellierung sind regionale Klimaprojektionen. Daher ist es von entscheidender Bedeutung, welche Änderungssignale sich in der Zukunft für die verschiedenen Kenngrößen ergeben. Besonders relevant für den zukünftigen Wasserhaushalt sind dabei die Klimavariablen Lufttemperatur und Niederschlag. Diese werden daher nachfolgend dargestellt. In der Wasserhaushaltsmodellierung werden zusätzliche klimatische Randbedingungen wie die relative Luftfeuchte, Globalstrahlung, Windgeschwindigkeit sowie abhängig vom Wasserhaushaltsmodell Luftdruck genutzt. Auf die Darstellung der Veränderung dieser Klimakenngrößen wird hier verzichtet.

Lufttemperatur

Die Lufttemperatur spielt im Wasserkreislauf eine besondere Rolle, da sie maßgeblich die Verdunstung und damit auch das Abflussgeschehen beeinflusst. Auch die Wassertemperaturen und folglich die Gewässerökologie reagieren auf eine Änderung der Lufttemperatur. Deshalb ist die zukünftige Entwicklung aus wasserwirtschaftlicher Sicht von besonderem Interesse. Abbildung 4 zeigt die Änderung der Lufttemperatur im Vergleich der beiden Perioden 2021 bis 2050 zu 1971 bis 2000, jeweils im hydrologischen Winter- (November bis April) und Sommerhalbjahr (Mai bis Oktober). Die Spannweite der abgebildeten Änderungen ist anhand von Ensembleauswertungen abgeleitet. Es handelt sich dabei jeweils um Mittelwerte über das gesamte Bundesland. Die orangefarbenen Zahlenangaben in der Karte stellen die bisherige Grundlage in KLIWA zur Untersuchung von Veränderungen dar, basierend auf Klimaprojektionen mit dem Emissionsszenario SRES-A1B. Die blauen Zahlen geben die

Entwicklung auf Grundlage der neueren Generation von Klimaprojektionen mit dem Emissionsszenario RCP8.5 wieder (15. und 85. Perzentil).

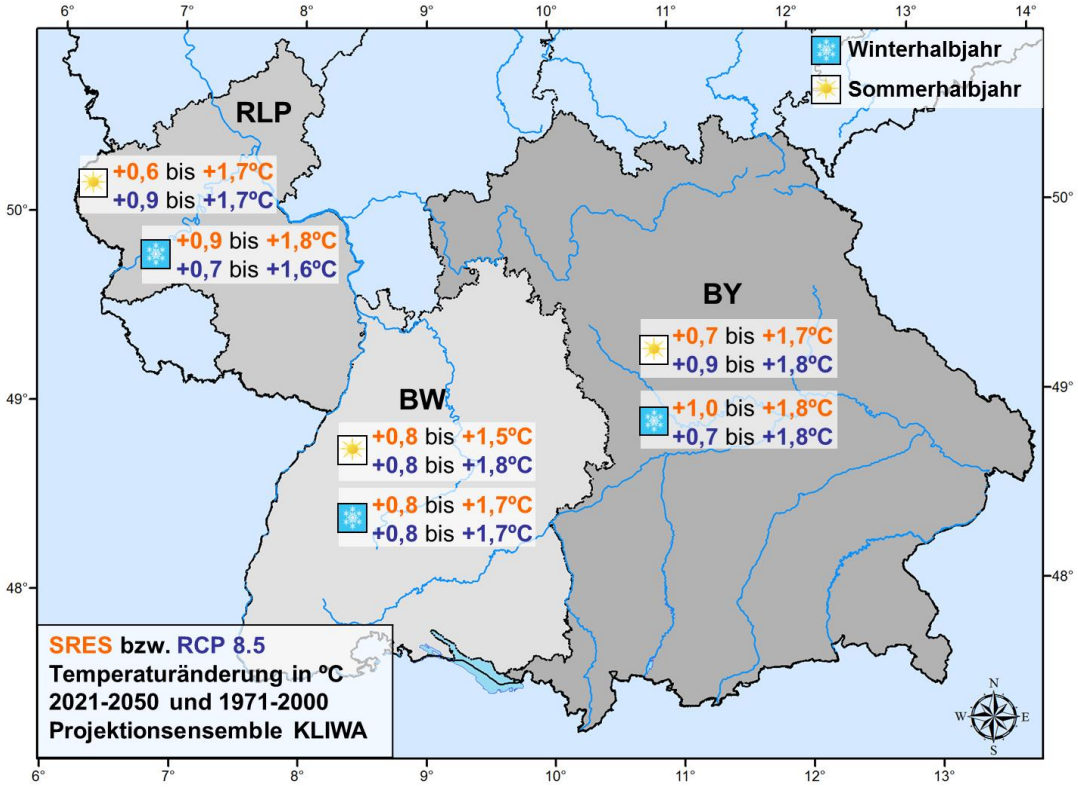


Abbildung 4. Entwicklung der Lufttemperatur im hydrologischen Sommer- und Winterhalbjahr (2021–2050 vs. 1971–2000), SRES vs. RCP8.5 (15. und 85. Perzentil).

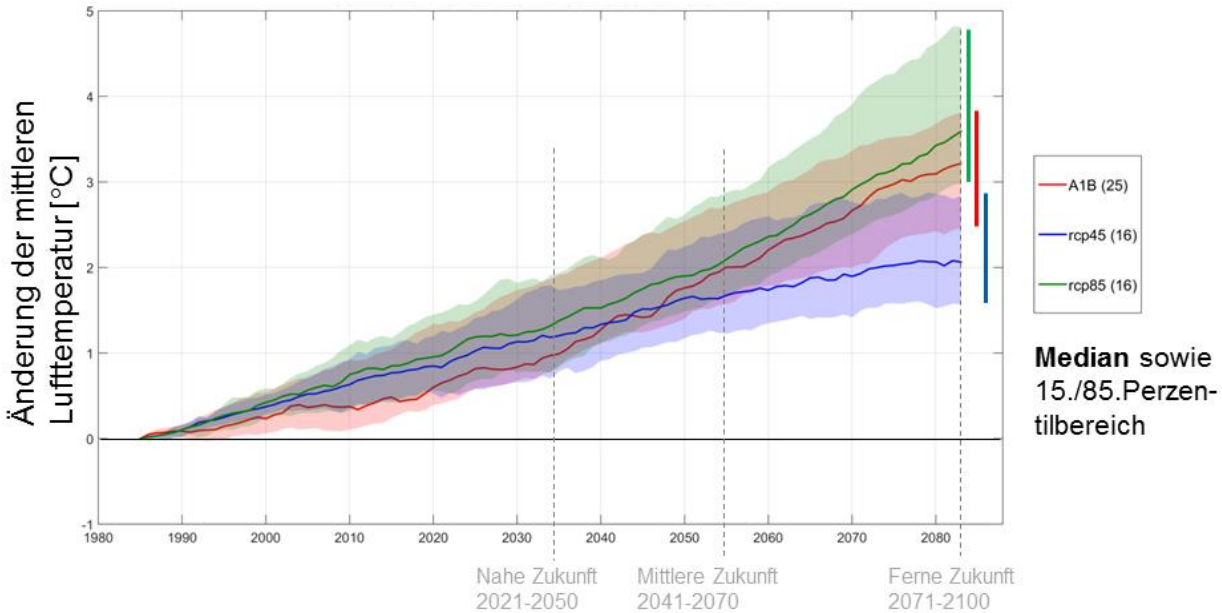


Abbildung 5. Veränderung des Jahresmittels der Lufttemperatur bis 2100 basierend auf SRES-A1B sowie RCP4.5 und 8.5 beispielhaft für Bayern (30-jähriger gleitender Mittelwert im Vergleich zu 1971-2000; in Klammern: Anzahl Klimaprojektionen).

Die Ergebnisse zeigen für beide hydrologischen Halbjahre Zunahmen der Temperatur. Diese Zunahmen liegen zwischen 0,6 und 1,8 °C. Die Änderungen können regional aber auch stär-

ker oder schwächer ausfallen. Die Temperaturzunahmen der SRES-Daten sind im Winter etwas höher als im Sommer. Im Vergleich dazu ist bei den RCP-Daten, dem neueren Projektionsensemble, das Gegenteil der Fall. Dennoch liegen die Temperaturzunahmen in beiden Halbjahren in einer sehr ähnlichen Größenordnung.

Die Abbildung 5 zeigt exemplarisch für Bayern den Verlauf der jährlichen Lufttemperaturänderungen bis 2100 als 30-jähriges gleitendes Mittel im Vergleich zu 1971-2000. Auch hier wird für die nahe Zukunft (2021-2050) deutlich, dass analog der Abbildung 4 keine großen Unterschiede zwischen den RCPs 4.5 und 8.5 sowie SRES-A1B erkennbar sind. Allerdings entwickeln sich die Szenarien im weiteren Verlauf bis zur fernen Zukunft (2071-2100) unterschiedlich: Das Änderungssignal vom RCP8.5 ist erwartungsgemäß höher, aufgrund des höheren Strahlungsantriebs (siehe Abbildung), als bei SRES-A1B und RCP4.5. Auch die Bandbreite der dargestellten Veränderungen nimmt gegen Ende des Jahrhunderts weiter zu. Erste Unterschiede in den betrachteten Szenarien ergeben sich ungefähr ab der mittleren Zukunft (2041-2070). Weiterführende Auswertungen hierzu auf Basis der Globalmodellläufe finden Sie zum Beispiel in LfU (2014).

Niederschlag

Bei der Betrachtung der Klimaentwicklung im 20. und 21. Jahrhundert ist der Niederschlag eine der wichtigsten Größen. Er bestimmt maßgeblich den lokalen Wasserhaushalt und ist sowohl räumlich als auch zeitlich stark variabel. Der Klimawandel wird sowohl die Verteilung als auch die Menge des Niederschlags beeinflussen. Dies wird auch Auswirkungen auf den natürlichen Wasserhaushalt nach sich ziehen und kann neben den Hochwasserabflüssen auch Trocken– und Niedrigwasserperioden betreffen. Die Abbildung 6 zeigt die Änderung des Niederschlags der Periode 2021 bis 2050 im Vergleich zum Zeitraum 1971 bis 2000, jeweils im hydrologischen Winter- (November bis April) und Sommerhalbjahr (Mai bis Oktober). Das Vorgehen ist dabei analog der Lufttemperatur, Abbildung 4. Die dargestellten Änderungen können regional auch wesentlich stärker oder schwächer ausfallen.

Im hydrologischen Winterhalbjahr reichen die Ergebnisse in beiden Projektionsensembles in allen drei Bundesländern von nahezu keinen Änderungen bis zu einer Zunahme von maximal 15 Prozent. Eine Zunahme der Winterniederschläge erscheint somit wahrscheinlich. Im hydrologischen Sommerhalbjahr lassen die Ergebnisse nur geringe Änderungen vermuten. Einerseits deuten sich in allen Bundesländern leichte Niederschlagsabnahmen bis zu -7 Prozent an, andererseits sind auch geringfügig höhere Niederschlagsmengen bis zu +15 Prozent möglich. Beide Projektionsensembles treffen eine ähnliche Aussage. Das Ensemble mit RCP-Projektionen zeigt lediglich eine etwas größere Spannbreite der Niederschlagsänderungen.

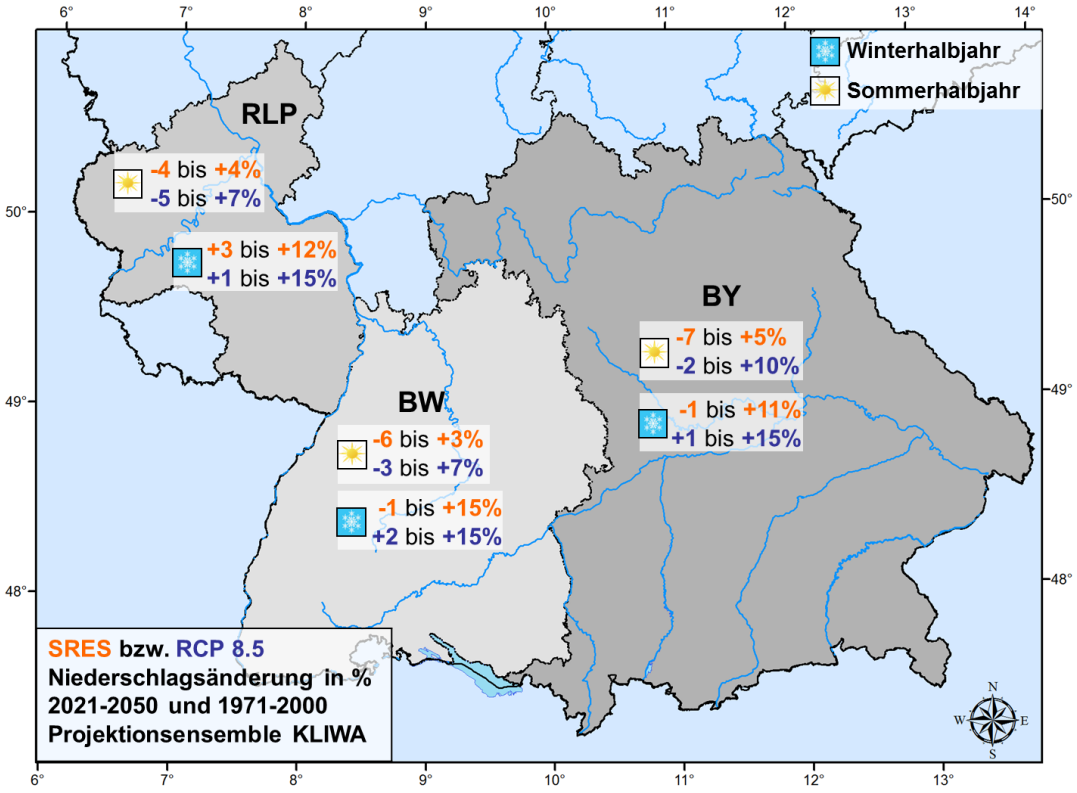


Abbildung 6. Entwicklung der Gebietsniederschläge im hydrologischen Sommer- und Winterhalbjahr (2021–2050 vs. 1971–2000), SRES vs. RCP8.5 (15. und 85. Perzentil).

Auf eine Darstellung der Veränderungen des Niederschlags bis zum Ende des Jahrhunderts gemäß der Lufttemperatur wird verzichtet. Der Niederschlag ist sehr viel variabler und es zeigt sich damit in den Klimaprojektionen kein eindeutiger Verlauf wie bei der Lufttemperatur. Die interpretierbaren Unterschiede der Szenarienensembles SRES und RCP sind somit für die Niederschlagsveränderungen geringer. Es ist jedoch klar zu erkennen, dass sich auch für den Niederschlag die Szenarienensembles erst nach der nahen Zukunft 2021-2050 deutlich unterscheiden.

3.2 Abflussprojektionen mit SRES

Die bisher in der Wasserhaushaltsmodellierung in KLIWA verwendeten statistischen und dynamischen Verfahren der regionalen Klimamodellierung basieren auf den SRES-Emissionsszenarien B2 und A1B. Daraus wurden für Süddeutschland gemeinsame Abfluss-projektionen erstellt. Diese werden ergänzt durch weitere, länderspezifische Abflussprojekti-onen. Folgende Abflussveränderungen ergeben sich aus dieser Ensemblebetrachtung für den Zeitraum der nahen Zukunft (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) (Abbildung 7), an einzelnen Pegel treten aber auch nur Abnahmen auf. Insgesamt fallen die 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.

Mittlere Hochwasserabflüsse (MHQ): Im hydrologischen Winterhalbjahr nimmt der MHQ vor-wiegend zu. Regional treten vereinzelt aber auch nur geringe Veränderungen auf, insbeson-dere bei nival geprägten Pegeln wie am Oberrhein (Abbildung 8). Im hydrologischen Som-merhalbjahr ist die zukünftige Entwicklungsrichtung weniger eindeutig. An den meisten Pe-geln sind die Änderungssignale der Projektionen nur gering (im Bereich von ±10 %) und zei-

gen 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.

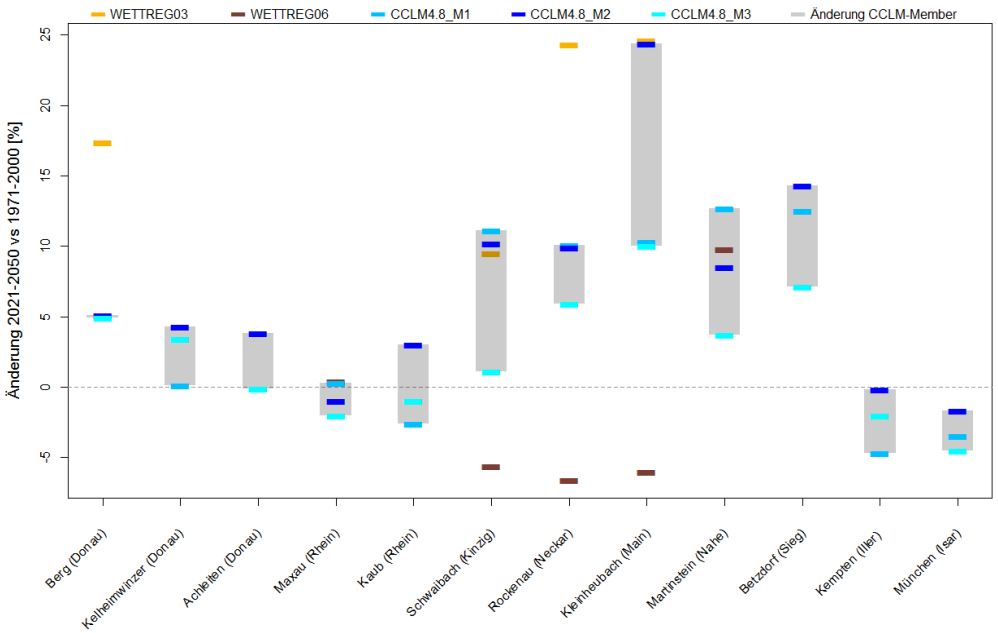


Abbildung 7. Änderung des mittleren Abflusses im hydrologischen Jahr 2021-2050 vs. 1971-2000 in Prozent beispielhaft an zwölf ausgewählten Pegeln in Süddeutschland (SRES-Szenarien).

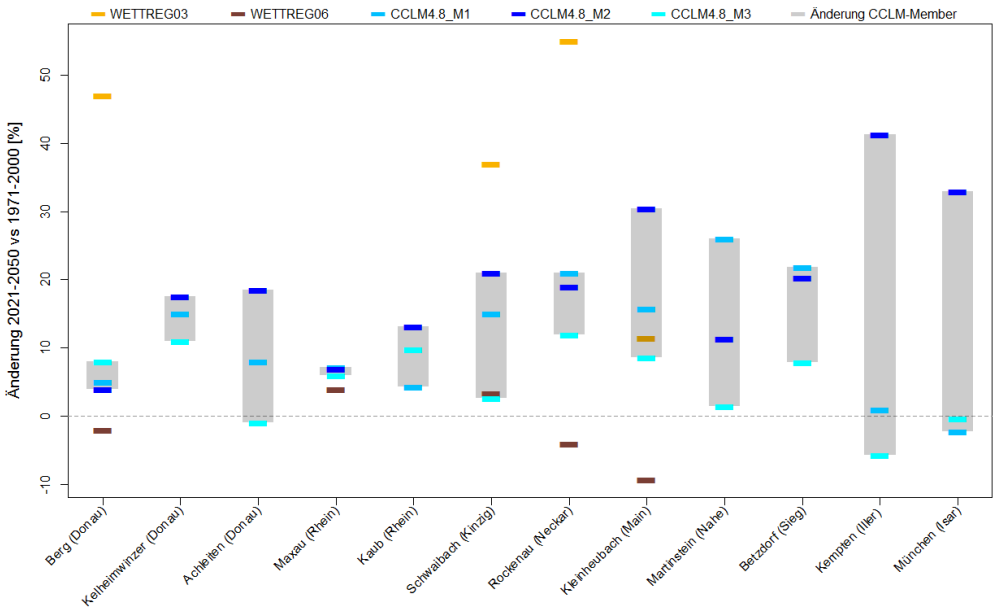


Abbildung 8. Änderung des mittleren Hochwasserabflusses im hydrologischen Winterhalbjahr 2021-2050 vs. 1971-2000 in Prozent beispielhaft an zwölf ausgewählten Pegeln in Süddeutschland (SRES-Szenarien).

In Abbildung 9 ist beispielhaft für den Pegel Rockenau/Neckar ein größeres, länderspezifisches Ensemble von Abflussprojektionen dargestellt. Für die mittleren monatlichen Hochwasserabflüsse zeigt sich für den Zeitraum 2021-2050, dass die fünf in KLIWA gemeinsam

betrachteten Klimaprojektionen meist die Bandbreite der modellierten Veränderungen aufspannen. Im Vergleich von Abbildung 8 und Abbildung 9 lässt sich zum Beispiel die deutliche MHQ-Zunahme bei WETTREG2003 im Winterhalbjahr bzw. Dezember bis Februar wiederfinden. Im Gegensatz dazu stellt WETTREG2006 in Abbildung 9, außer im Januar und Februar, eine Projektion mit Abnahmen dar.

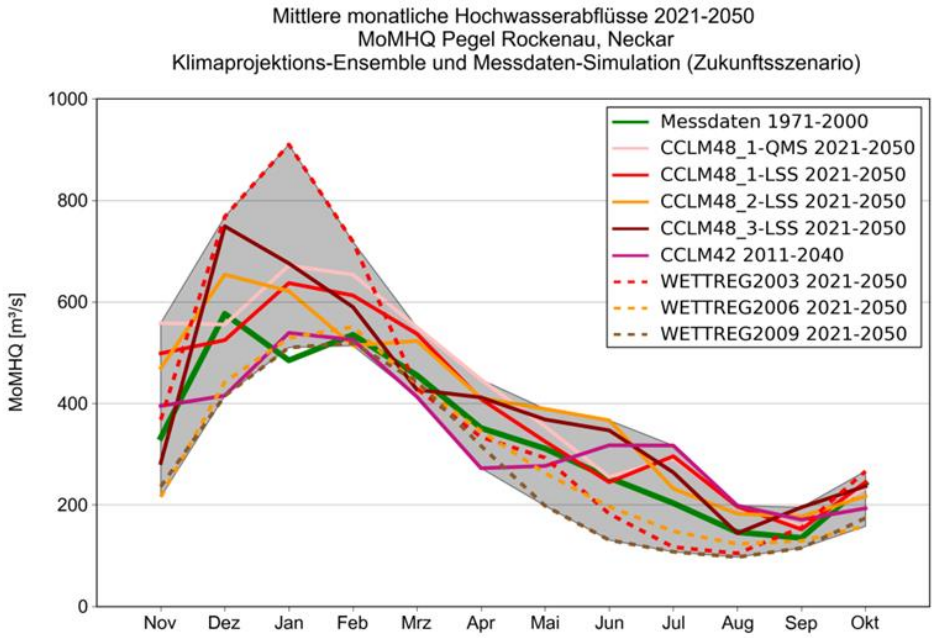


Abbildung 9. Mittlere monatliche Hochwasserabflüsse 2021-2020 (MoMHQ) am Pegel Rockenau, Neckar; Klimaprojektionsensemble und als Vergleich Messdatensimulation für 1971-2000.

Mittlere 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 Prozent. Für Nordbayern und Rheinland-Pfalz wird allerdings bis Ende 2050 überwiegend eine Entspannung der Niedrigwassersituation im Sommerhalbjahr modelliert.

Neben Baden-Württemberg wurden auch in Bayern zusätzlich Abflussprojektionen erstellt und ausgewertet. Abbildung 10 zeigt einen Vergleich der Ergebnisse der drei CCLM4.8-Abflussprojektionen (links) gegenüber einem Ensemble von elf Abflussprojektionen, inklusive der drei CCLM-Läufe (rechts) für das Abflussregime des mittleren monatlichen Niedrigwasserabflusses am Pegel Kelheimwinzer (Donau). Die acht zusätzlichen Abflussprojektionen wurden nicht gemeinsam in KLIWA genutzt. Für die Ermittlung der Veränderungen des Abflussregimes wurden die monatlichen, prozentualen Änderungssignale, die sich aus den einzelnen Abflussprojektionen ergeben, auf die Messwerte an diesen Pegeln aufgeschlagen. So ergeben sich die zukünftigen monatlichen Abflusswerte, die mit dem bisherigen Abflussregime (Messwert) verglichen werden können.
Es ist klar erkennbar, dass die Bandbreite der Veränderungen der insgesamt elf Abflussprojektionen deutlich größer ist. Bei beiden Ensembles für die nahe Zukunft 2021-2050 ist im Mittel von Zunahmen im hydrologischen Winterhalbjahr und eher von geringen Veränderungen bis Abnahmen im hydrologischen Sommerhalbjahr auszugehen. Aber bei der Betrachtung mit elf Klimaprojektionen (rechts) sind auch gegenteilige Entwicklungen nicht auszuschließen. Es ist daher wichtig, ein ausreichend großes Ensemble von Klimaprojektionen zu betrachten, um die zukünftigen Veränderungen hinreichend wiedergeben und bewerten zu

können. Auffällig ist, dass die Änderungen von CCLM4.8 (links) sich ähnlich dem Median (rechts) verhalten.

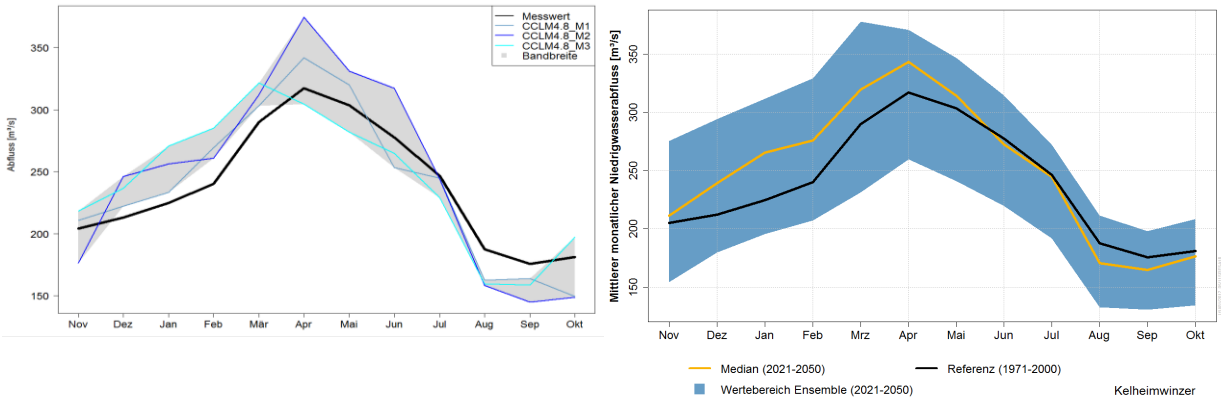


Abbildung 10. Änderung des mittleren monatlichen Niedrigwasserabflusses für 2021-2050 am Pegel Kelheimwinzer/Donau; links für die fünf in KLIWA gemeinsam betrachteten Klimaprojektionen, rechts das in Bayern länderspezifsch verfügbare Ensemble von elf Klimaprojektionen.

Für einen Überblick und weitergehende Untersuchungen zur zukünftigen Entwicklung der Niedrigwasserabflüsse wird auf den Beitrag von Herrn Iber verwiesen. Weitere Auswertungen von KLIWA zu den Ergebnissen der in diesem Beitrag betrachteten Abflussprojektionen basierend auf SRES finden Sie zudem für die verschiedenen Abflusskenngrößen in einem Kurzbericht (KLIWA 2018) auf der Internetseite von KLIWA 2018 verfügbar (www.kliwa.de).

3.3 Abflussprojektionen mit RCP

Für die Betrachtung der Veränderungen von Wasserhaushalt und Abflüssen mit dem Szenario RCP8.5 liegen in KLIWA erste Untersuchungen aus Baden-Württemberg und Bayern vor. Für Rheinland-Pfalz sind Untersuchungen geplant. Während in Baden-Württemberg eine flächendeckende Wasserhaushaltsmodellierung erfolgte, wurden in Bayern pilothaft einzelne Einzugsgebiete (Iller, Naab, Tauber und Fränkische Saale) betrachtet.

Erste Ergebnisse für Baden-Württemberg

Baden-Württemberg hat für eine flächendeckende Abflussmodellierung zwei Klimaprojektionen genutzt. Die Ergebnisse sind in Abbildung 11 exemplarisch für den Pegel Rockenau (Neckar) dargestellt. Durch die Darstellung mit Boxplots aller Tagesabflüsse ist hier das gesamte Abflussverhalten in der nahen Zukunft 2021-2050 und der Referenzperiode 1971-2000 erkennbar. Der Median beschreibt dabei den mittleren Abfluss, die Perzentile (5. bis 95. Perzentil) die Niedrig- bzw. Hochwasserabflüsse. Es sind ähnliche Tendenzen (Zunahmen Hochwasserabflüsse im November/Dezember) erkennbar, aber auch ein eher gegenläufiges Verhalten der Änderungen im Bereich Niedrigwasser.

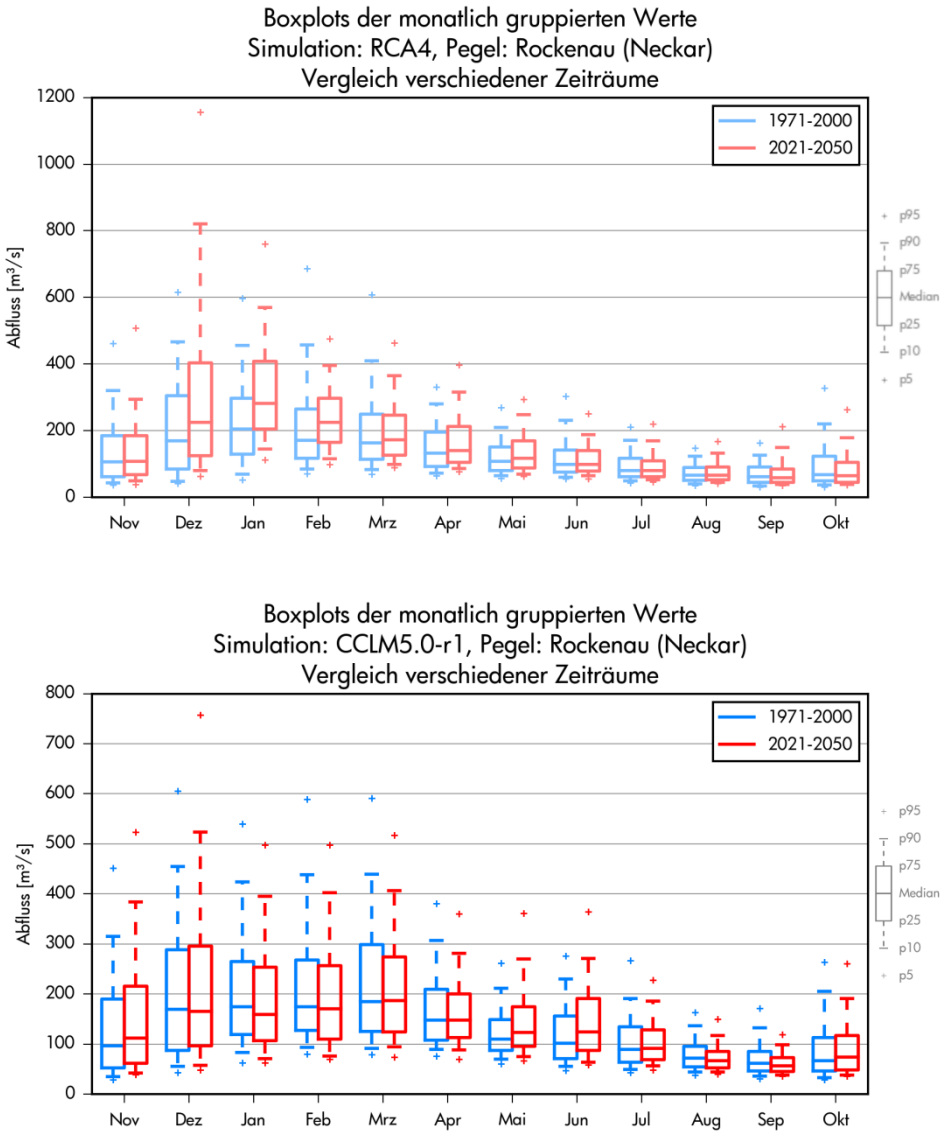


Abbildung 11. Boxplot aller Tagesabflüsse, die an dem Pegel Rockenau in diesem Monat auftreten; oben: Abflussprojektion RCA4, unten: CCLM5.0 (unterschiedliche Skala).

Die Einzelbetrachtung eines Pegels gibt natürlich nur ein lokales Bild der Veränderungen wieder. Die Abbildung 12 fasst die Veränderungen an den in Baden-Württemberg ausgewerteten 23 Pegeln (19 pluvial / 4 nival) für den mittleren monatlichen Abfluss (MoMQ), Hochwasserabfluss (MoMHQ) und Niedrigwasserabfluss (MoMNQ) in einer gemeinsamen Betrachtung der beiden Abflussprojektionen zusammen. Die Änderungen an den einzelnen Pegeln werden dazu Klassen zugeordnet. Man erkennt in Abbildung 12 Monate mit einem ähnlichen Verhalten bei allen Pegeln (z. B. nivale Pegel Juli bis Oktober), aber auch Monate, an denen über alle Pegel ein sehr unterschiedliches Verhalten auftritt (z. B. MoMQ April bis Juni). Diese unterschiedlichen Veränderungen spiegeln dabei die regionalen Unterschiede in den zukünftigen klimatischen Veränderungen in Baden-Württemberg wieder, wie sie von den betrachteten Klimaprojektionen modelliert werden. Es ist zu beachten, dass aktuell nur zwei Klimaprojektionen modelliert und ausgewertet wurden.

Insgesamt ergibt sich für das nivale Abflussregime (vier Pegel) über alle Abflussbereiche ein ähnliches Bild mit überwiegenden Abnahmen von Juli bis Oktober. Ab Dezember treten im-

mer mehr Zunahmen in den Abflussbereichen auf, die meist bis Mai überwiegen. Bei den pluvialen Abflussregimen (19 Pegel) ergibt sich durch die höhere Anzahl der betrachteten Pegel ein heterogeneres Bild der Veränderungen. Dennoch zeigt sich, dass zwei Jahresabschnitte mit einem überwiegenden Anteil von Abnahmen und starken Abnahmen bei MoMQ und MoMHQ auftreten: Februar/März und Juli bis September. Im Gegensatz dazu stehen in den Monaten November/Dezember sowie April bis Juni Zunahmen im Vordergrund. Bei MoMNQ sind die Veränderungen an den Pegeln generell weniger ausgeprägt. Die besonders relevanten Abnahmen des Niedrigwasserabflusses überwiegen aber immer noch für den Zeitraum August bis Oktober. Zunahmen wurden für MoMNQ besonders in den Monaten Dezember bis Februar und Mai/ Juni modelliert.

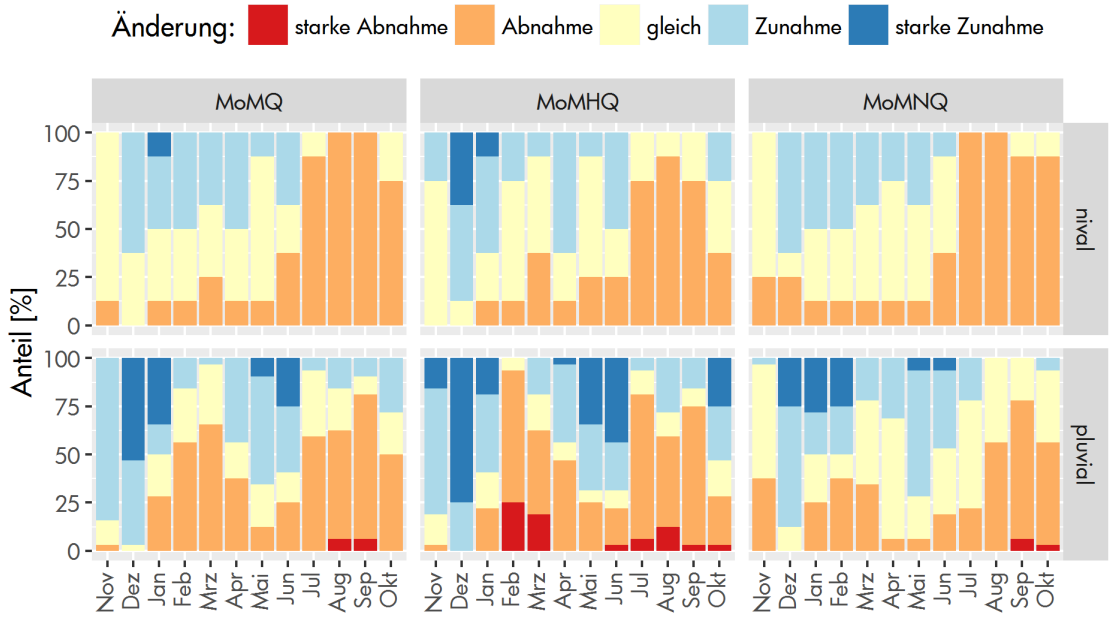


Abbildung 12. Ensembleanalyse an 23 Pegeln in BW (19 pluvial/4 nival) für den mittleren monatlichen Abfluss (MoMQ), Hochwasserabfluss (MoMHQ) und Niedrigwasserabfluss (MoMNQ) für CCLM5.0 und RCA4 RCP8.5 gemeinsam (Prozentualer Anteil der Abflussänderungen in der nahen Zukunft gegenüber dem Ist-Zustand in den Änderungsklassen starke Abnahme (<-30 %), Abnahme (-30 % bis -5 %), gleich (-5 % bis +5 %), Zunahme (+5 % bis +30 %), starke Zunahme (> +30 %)) (Seibert et al, 2017).

Erste Ergebnisse für Bayern:
In Bayern erfolgte eine Anwendung und Auswertung von zwölf der insgesamt 17 verfügbaren Klimaprojektionen aus RCP8.5 pilothaft für die Abflüsse von einzelnen Einzugsgebieten (Iller, Naab, Tauber, Fränkische Saale). Diese wurden mit den Ergebnissen der Wasserhaushaltsmodellierung mit elf Klimaprojektionen basierend auf SRES-A1B verglichen. Beispielhaft werden hier die Ergebnisse für den Pegel Wiblingen an der Iller dargestellt. Die Bezeichnung „Wiblingen/Iller mit Kanal“ bedeutet, dass die Modellierung am Pegel Wiblingen ohne Berücksichtigung des Illerkanals erfolgte. Sämtlicher Abfluss der Iller fließt in der Modellierung somit am Pegel Wiblingen vorbei. Für die Ermittlung der generellen zukünftigen Abflussveränderungen ist eine Betrachtung des Illerkanals in einem ersten Schritt nicht relevant. Bei Bedarf kann dies in einem zweiten Schritt erfolgen.

In der Abbildung 13 sind die ermittelten Veränderungen der halbjährlichen Kennwerte der beiden Ensembles von SRES-A1B und RCP8.5 für die verschiedenen Abflussbereiche dargestellt. Für die nahe Zukunft (2021-2050) ergeben sich meist ähnliche Änderungssignale (Bandbreite und Mediane). Nur einzeln ist die Bandbreite der modellierten Abflussveränderungen verschoben oder bei SRES-A1B größer (vgl. MQ(SHJ) bzw. MHQ(SHJ)).

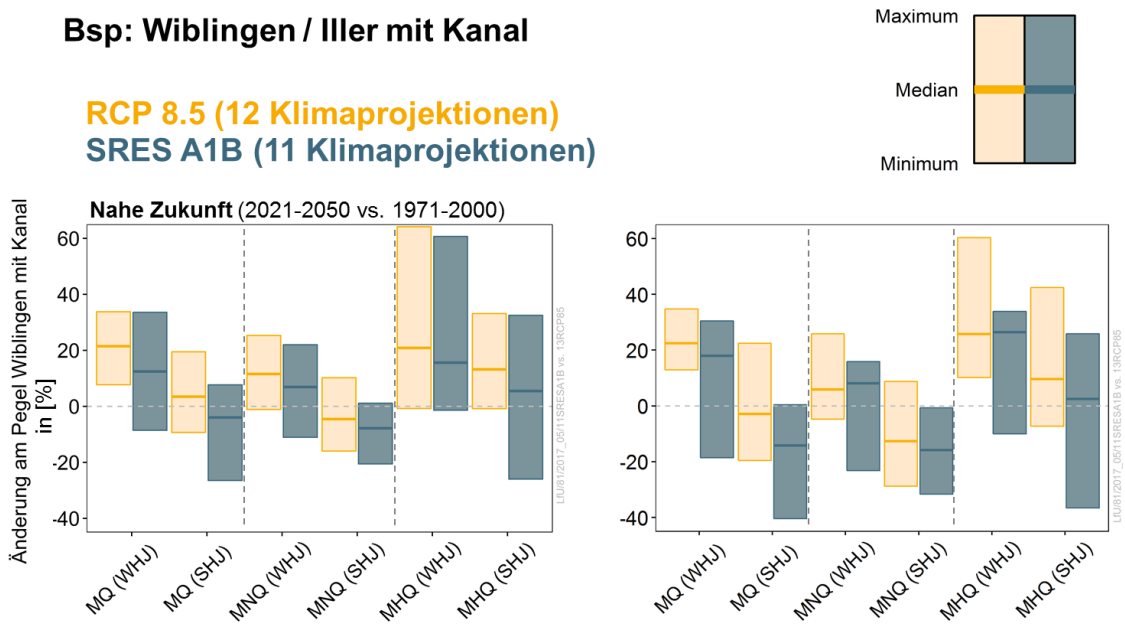


Abbildung 13. Änderung der halbjährlichen Kennwerte für den mittleren Abfluss (MQ), den mittleren Niedrigwasserabfluss (MNQ) und mittleren Hochwasserabfluss (MHQ) am Pegel Wiblingen (Iller mit Kanal) für die nahe und mittlere Zukunft der Ensembles gegenüber 1971-2000.

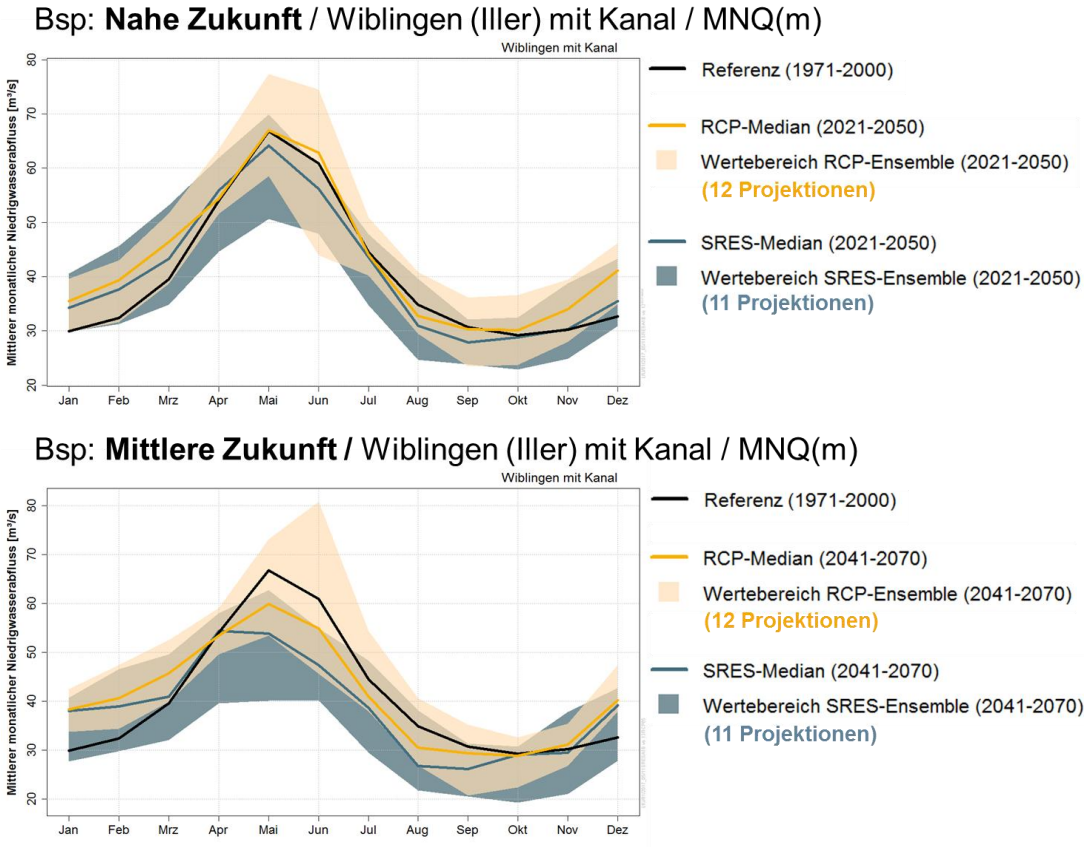


Abbildung 14. Jahresgang langjährig gemittelter monatlicher Niedrigwasserabflüsse (MoMNQ) am Pegel Wiblingen/Iller mit Kanal für die Zeiträume nahe Zukunft (oben) und mittlere Zukunft (unten). Schwarz: Mittelwert der Referenz (Messwert 1971–2000); Orange und Blau: jeweils Median und

Bandbreite zukünftiger Abflüsse als Produkt aus dem Änderungssignal der Abflussprojektionen und der Referenz für SRES-A1B und RCP8.5.
Für die mittlere Zukunft (2041-2070) erhöht sich meist die Bandbreite der Veränderungen im Abfluss. Zwischen den beiden Ensembles bestehen zudem größere Unterschiede vor allem in den Bandbreiten der Abflussveränderungen. Gegenüber RCP8.5 ergeben sich bei SRES-A1B deutlich mehr Abnahmen bzw. geringere Zunahmen. Bei der Interpretation der Ergebnisse ist zu beachten, dass bei beiden Abflussensembles nicht die gesamte Anzahl verfügbarer Klimaprojektionen genutzt werden konnte. Eine andere Wahl von Klimaprojektionen kann die Ergebnisse des Ensembles (Median/Bandbreite) beeinflussen.

Neben der Betrachtung der Abflussveränderung der halbjährlichen Kennwerte sind in Abbildung 14 auch die Veränderungen monatlicher Abflüsse am Pegel Wiblingen dargestellt. Auch hier werden die Ähnlichkeiten bzw. Unterschiede zwischen den beiden Ensembles SRES-A1B und RCP8.5. ersichtlich. Während in der nahen Zukunft (2021-2050) die Veränderungen im Niedrigwasserabfluss noch sehr ähnlich sind, werden diese in der mittleren Zukunft (2041-2070) deutlicher. Die Mediane der beiden Ensembles liegen in der mittleren Zukunft weiter auseinander, die Bandbreite der zukünftigen Abflüsse ist zwar ähnlich groß, die Wertebereiche sind aber ebenfalls deutlich unterschiedlich. Besonders ist dies zum Beispiel in den Monaten Mai und Juni zu beobachten.

4. Fazit

Die Kooperation KLIWA hat bisher gemeinsam Abflussprojektionen basierend auf den Emissionsszenarien von SRES erstellt und ausgewertet. Diese liefern bereits ein Bild von den zukünftigen Veränderungen für die nahe Zukunft (2021-2050) im Klima und im Wasserhaushalt. Die Ergebnisse für die verschiedenen Abflussbereiche wurden vorgestellt, weitere Informationen zu den zukünftigen Veränderungen im Abfluss für Süddeutschland sind einem Kurzbericht KLIWA (KLIWA 2018) zu entnehmen. Hinzu kommen länderspezifische Modellierungen, die diese Ergebnisse ergänzen.

Bei der gesamtheitlichen Betrachtung der bisherigen Ergebnisse ist festzuhalten, dass die in Baden-Württemberg und Bayern festgelegten Klimaänderungsfaktoren bis auf weiteres ihre Gültigkeit behalten. Die Gültigkeit der festgelegten Klimaänderungsfaktoren wird auch bei den künftigen Untersuchungen laufend überprüft.

Für die neu verfügbaren Klimaprojektionen basierend auf den RCP8.5-Szenarien liegen erste Anwendungen und Auswertungen von KLIWA für die Klimavariablen aber auch der Abflüsse vor. Diese ermöglichen einen ersten Vergleich mit den bisherigen Ergebnissen von KLIWA und die Beantwortung der eingangs gestellten Fragen.

Was sind die Unterschiede oder auch Gemeinsamkeiten der zwei Szenarienfamilien (SRES / RCP)?
Für die nahe Zukunft (2021-2050) zeigt sich für die bisher ausgewerteten Klima- und Abflussprojektionen, dass sich die Änderungen in einem ähnlichen Rahmen wie für das SRES-A1B bewegen. Erste Auswertungen der Klimaprojektionen bis 2100 ergeben aber, dass deutlichere Unterschiede in der zweiten Jahrhunderthälfte zwischen RCP8.5 zu SRES-A1B auftreten können. Dies ist auch bereits in den Ergebnissen der Abflussprojektionsensembles für die mittlere Zukunft (2041-2070) zu erkennen. Für einen endgültigen Vergleich ist zu beachten, dass die zukünftigen Veränderungen stark davon abhängig sind, welche Projektionsanzahl und welche Projektionen betrachtet werden. Aktuell sind noch nicht alle angekündigten RCP8.5-Klimaprojektionen verfügbar. Es bleibt zum Beispiel abzuwarten, wie sich die zusätzlichen Klimaprojektionen für RCP8.5 aus dem Projekt ReKliEs-De (www.reklies.hlnug.de) in das Bild einfügen.

Es liegen neue Szenarien (RCPs) als Antrieb für Klimaprojektionen vor, brauchen wir nun auch neue Abflussprojektionen?
Sollte nur eine Betrachtung der nahen Zukunft (2021-2050) im Fokus stehen, ist sicherlich zu prüfen, ob die Berücksichtigung der neuen RCP Klimaprojektionen einen sinnvollen Mehrwert ergibt, da die Änderungssignale in diesem Zeitraum sehr ähnlich sind. Darüber hinaus erscheint aber für die Betrachtung späterer Zeiträume die Nutzung der RCP-Klimaprojektionen aufgrund der sich unterschiedlich entwickelnden Klimaänderungssignale auch für aktuelle Abflussprojektionen durchaus sinnvoll. Bei den Überlegungen ist zudem zu beachten, dass die bereits verfügbaren RCP-Projektionen in vielen aktuellen Projekten verwendet werden, eine gemeinsame Basis der künftigen Klimaveränderungen bilden und somit eine gewisse Vergleichbarkeit ermöglichen. Gerade im Hinblick auf die Anpassung an den Klimawandel ist eine aktuelle und gemeinsam genutzte Grundlage von Vorteil.

Welche zusätzlichen Erkenntnisse können diese neuen Klima- und Abflussprojektionen (RCP) liefern und ist es möglich, bisherige Aussagen dadurch zu schärfen?
Es ist generell wünschenswert, möglichst viele Projektionen innerhalb eines Ensembles zu betrachten. Auch wenn sich für die nahe Zukunft (2021-2050) ähnliche Änderungssignale ergeben, so können die neuen RCP-Klimaprojektionen die bereits ermittelten Aussagen basierend auf SRES aus Sicht von KLIWA ergänzen und schärfen. Dabei werden die SRES-basierten Projektionen nicht plötzlich falsch oder obsolet. Vielmehr bietet sich eine gemeinsame Betrachtung aller bisherigen Ergebnisse ergänzt um die neuen RCP-Klima- und Abflussprojektionen an. Für die Betrachtung der zweiten Jahrhunderthälfte kann dies aber bedeuten, dass sich eine größere Bandbreite ergibt, da sich die Ensembles in ihren modellierten Veränderungen stärker unterscheiden. Welches differenzierte Vorgehen bei der Auswertung des gesamten Ensembles aller verfügbaren Projektionen SRES-A1B und RCP8.5 sinnvoll ist und welche Herausforderungen hierbei im Umgang bezüglich Kommunikation und Anpassung noch zu bewältigen sind, ist aktuell und zukünftig auch Gegenstand in KLIWA.

Aus Sicht von KLIWA sind die ersten Untersuchungen zu RCP8.5 noch nicht komplett, die Auswertungen hierzu haben in KLIWA erst begonnen. Darauf aufbauend wird sich KLIWA weiter mit der Nutzung der RCP8.5-Klimaprojektionen beschäftigen und voraussichtlich aus dem verfügbaren Ensemble auch eine Auswahl für die Erstellung von Abflussprojektionen nutzen. Generell wird in KLIWA angestrebt, das Vorgehen bei der Ermittlung von Klimaänderungen, deren Wirkungen sowie die Anpassung konstant weiterzuentwickeln, um die Aussagen für Handlungsempfehlungen zu festigen.

5. Literatur

IPCC (2000): Special Report on Emission Scenarios, Working Group III, Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom.

KLIWA (2006): Regionale Klimaszenarien für Süddeutschland bis Abschätzung der Auswirkungen auf den Wasserhaushalt, Arbeitskreis KLIWA, KLIWA-Berichte 9, 102 Seiten.

KLIWA (2018): KLIWA-Kurzbericht / Ergebnisse gemeinsamer Abflussprojektionen für KLIWA und Hessen basierend auf SRES A1B, Arbeitstitel; Publikation in Arbeit, Veröffentlichung auf www.kliwa.de.

LfU (2014): Vergleichende Analyse Globaler Klimamodellsimulationen für Bayern (Süddeutschland) und umliegende Gebiete, Augsburg, 244 Seiten.

Seibert M., Schweppe R., Preuß P., Haag I., Gerlinger K. (2017): Simulationen des Wasserhaushalts und der Wassertemperatur für die Einzugsgebiete in Baden-Württemberg sowie für das Einzugsgebiet des Rheins (bis Pegel Maxau) mit den beiden Klimaprojektionen COSMO-CLM-5.0 run1 und RCA4 run12 (Emissionsszenario RCP8.5), HYDRON GmbH im Auftrag der LUBW (unveröffentlicht).

Van Vuuren, D.P et al (2011): Representative Concentration Pathways: An overview. Climatic Change (2011) 109:5–31.

Die Entwicklung eines Starkregenrisikomanagements

Wolfgang Hennegriff, LUBW

1. Einleitung und Ausgangslage

In den Monaten Mai, Juni und Juli 2016 wurden in Deutschland zahlreiche extreme Starkregenereignisse beobachtet. Aber auch in den vergangenen Jahren davor haben durch Starkniederschläge verursachte Überschwemmungen wiederholt zu erheblichen Sachschäden geführt. Bei diesen Ereignissen wurden auch Menschenleben gefordert. Quantitative Aussagen zur Entwicklung konvektiver Starkregenereignisse im Sommerhalbjahr können derzeit mit Hilfe von Klimamodellen nur mit entsprechenden Unsicherheiten getroffen werden, da zum Verständnis der atmosphärenphysikalischen Prozesse, die zu extremen konvektiven Starkregenereignissen führen, noch erheblicher wissenschaftlicher Forschungsbedarf besteht. Auf der qualitativen Betrachtungsebene kann jedoch davon ausgegangen werden, dass die Gefährdung sich in Folge des Klimawandels sehr wahrscheinlich verschärfen wird. Mit der Erwärmung der Atmosphäre nimmt die Feuchtigkeitsaufnahmekapazität der Luft zu. Nach der Clausius-Clapeyron-Gleichung erhöht sich das Feuchtigkeitsaufnahmevermögen der Luft bei einer mittleren Erwärmung um 1 °C um 7 %. Ein weiterer wesentlicher meteorologischer Aspekt, der mit der Klimaerwärmung verbunden ist, ist die Abschwächung des Jet-Streams. Da die nördliche Polregion sich deutlich schneller als die Tropen erwärmt, wird der Jet-Stream sehr wahrscheinlich durch die Verminderung der Temperaturpotentiale zwischen Nordpol und Tropen abgeschwächt. Durch diese Abschwächung ziehen die Zyklone langsamer oder verharren über den Regionen mit der Folge, dass die Niederschlagsgebiete sich als stationäre Lage ausbilden.

Die Landesregierung Baden-Württemberg hat bei der Novellierung der Richtlinien des Umweltministeriums für die Förderung wasserwirtschaftlicher Vorhaben (Förderrichtlinien Wasserwirtschaft 2015 – FrWw2015) das Ziel gesetzt, Untersuchungen und Konzepte zum wasserwirtschaftlichen Management von Starkregenereignissen zu fördern. Wie diese Untersuchungen und die Erstellung von Konzepten durchzuführen sind, sollte ein Leitfaden „Kommunales Starkregenrisikomanagement in Baden-Württemberg“ beschreiben. Für die Erstellung dieses Leitfadens wurde eine Arbeitsgruppe Starkregenrisikomanagement mit Vertretern von unteren Wasserbehörden, Regierungspräsidien, der WBW Fortbildungsgesellschaft mbH, des Umweltministeriums und der LUBW gegründet.

Bei der Entwicklung eines Starkregenrisikomanagements ist die Arbeitsgruppe von folgender Analyse ausgegangen:
Starkregenereignisse können plötzliche Gefahren auslösen und erhebliche Schäden verursachen. Diese treten mit hohen Fließgeschwindigkeiten auf geneigten Geländeoberflächen auf. Dabei werden mit dem Oberflächenabfluss Feststoffe oft in erheblichem Maße transportiert und Oberboden erodiert. In der Ebene oder in Senken werden bei Starkregenereignissen häufig Überschwemmungen mit großen Wassertiefen beobachtet.



Abbildung 1. Feststofftransport in Braunsbach.



Abbildung 2. Erosion und Verschlämmung von Böden im Einzugsgebiet des Orlacher Baches.

Laut Angaben der Versicherungswirtschaft verursachen Oberflächenabflüsse, aufgrund von lokalen Starkregenereignissen, Schäden in vergleichbarer Höhe, wie Hochwasser infolge ausufernder Gewässer.

Oberflächenabflüsse können überall auch abseits von oberirdischen Gewässerläufen auftreten und haben keine oder nur äußerst kurze Warnzeiten, die in der Regel die erforderlichen Rüstzeiten für den Einsatzfall von Hilfskräften unterschreiten.

Es gibt ohne spezielle Untersuchungen wenig Kenntnis über potenzielle Gefährdungsbereiche und Risiken von Sturzfluten. Dies gilt insbesondere für Ortslagen, die bislang von Starkregenereignissen der Vergangenheit verschont worden sind.

Die Statistik von konvektiven Starkregenereignissen ist schwierig zu beschreiben bzw. ist mit hohen Unsicherheiten behaftet. Die Niederschlagspeaks in den Zentren der kleinen konvektiven Niederschlagsgebiete, in denen hohe Niederschläge in kurzer Zeit abregnen, werden aufgrund der Weitmaschigkeit der Niederschlagsmessstationen, die solche Niederschlagsereignisse in zeitlich hoher Auflösung erfassen können, selten korrekt erfasst. Nur in der Kombination von zeitlich hoch auflösenden Niederschlagsbeobachtungsstationen und Radarmessungen können konvektive Niederschlagsereignisse mit hinreichender Genauigkeit für hydrologische Simulationen beschrieben werden. Diese Kombination von Niederschlagsbeobachtung ist derzeit in der Entwicklung.

Die Abflussbildung auf der Geländeoberfläche ist noch Gegenstand von Forschung und Wissenschaft. Aufgrund fehlender Daten zur Abflussbeobachtung in kleinen Einzugsgebieten ist eine Validierung von Simulationen von Abflüssen im Gelände nur im Fall der Nachsimulation von abgelaufenen Ereignissen möglich.

Aufgrund dieser Ausgangslage mussten zunächst weitere Datengrundlagen geschaffen werden bzw. Annahmen und Festlegungen getroffen werden.

2. Annahmen, Festlegungen und Definitionen für Starkregenuntersuchungen

Für Starkregenuntersuchungen wurden aus Gründen der Vereinfachung zunächst folgende Festlegungen getroffen:

Um den aus einem Starkregenereignis resultierenden Oberflächenabfluss bestimmen zu können, werden spezielle Kombinationen aus Niederschlag, Vorfeuchte, Bodeneigenschaften und Bodennutzung betrachtet. Als Starkregenereignisse werden hierfür die Niederschlagshöhen gewählt, die der Dauerstufe 1 Stunde entsprechen und die sich an den Auftretenswahrscheinlichkeiten von 30 und 100 Jahren sowie einem festgelegten extremen Ereignis orientieren.

Die Starkregenuntersuchungen sollen also für die definierten folgenden drei Szenarien gemäß festgelegter Kombinationen aus Niederschlagsdauer, Jährlichkeit und den jeweiligen Vor-Ort-Bedingungen der Bodenverhältnisse und Landnutzung durchgeführt werden:

- Für das seltene Oberflächenabfluss-Szenario, welches durch ein statistisches Niederschlagsereignis der Dauerstufe 1 Stunde mit einer Jährlichkeit von 30 Jahren generiert und anhand der konkreten jeweiligen bodenspezifischen Vor-Ort-Verhältnissen berechnet wird. Bei diesem Szenario ist davon auszugehen, dass Anlagen der Stadtentwässerung i. d. R. überlastet sind und Überflutungen in der Fläche auftreten.

- Für das außergewöhnliche Oberflächenabfluss-Szenario, welches durch ein statistisches Niederschlagsereignis der Dauerstufe 1 Stunde mit einer Jährlichkeit von 100 Jahren generiert und anhand der konkreten jeweiligen bodenspezifischen Vor-Ort-Verhältnissen berechnet wird. Bei diesem Szenario ist davon auszugehen, dass Entwässerungsanlagen stark überlastet sind, Einläufe zu Entwässerungssystemen und Verdolungen verlegt sind und Überflutungen in der Fläche auftreten.

- Für das extreme Oberflächenabfluss-Szenario, welches durch ein extremes Niederschlagsereignis (128 mm in einer Stunde als einheitliche Niederschlagshöhe über der gesamten Landesfläche von Baden-Württemberg) generiert und anhand der konkreten jeweiligen bodenspezifischen Vor-Ort-Verhältnissen berechnet wird. Bei diesem

Szenario ist davon auszugehen, dass extreme Überflutungen mit hohen Schäden in der Fläche auftreten.

Zunächst galt es, Niederschlagsereignisse kurzer Zeitdauer statistisch aufzuarbeiten. Dabei sollte untersucht werden, wie sich die räumliche Verteilung dieser Niederschlagsverhältnisse in der Landesfläche Baden-Württembergs darstellen.

2.1 Statistische Beschreibung der Niederschläge kurzer Zeitdauer

Zunächst wurden die der LUBW verfügbaren Datengrundlagen zu zeitlich hoch aufgelösten Niederschlagsbeobachtungen in Baden-Württemberg und den angrenzenden Flächen der benachbarten Länder Schweiz und der Bundesländer Rheinland-Pfalz, Hessen und Bayern zusammengetragen und gesichtet. Dies sind die Datensätze von 211 DWD-Stationen, 72 Stationen des Verdichtungsmessnetzes der LUBW jeweils in der zeitlichen Auflösung von einer Minute, sowie 234 Zeitreihen des NIEDSIM-Satzes in der zeitlichen Auflösung von fünf Minuten. Nach einer Plausibilitätsprüfung dieser Daten sind 346 Niederschlagsstationen für die nachfolgenden statistischen Auswertungen verblieben. Die Länge dieser Zeitreihen ist sehr unterschiedlich. Die Mehrheit dieser Zeitreihen weist eine Länge von ca. 10 bis 18 Beobachtungsjahren auf, die sich mit der Verfügbarkeit dieser Niederschlagsmesssysteme begründen lässt.

Die Auswertungen dieser Zeitreihen beschränken sich auf sommerliche Niederschlagsereignisse im Zeitraum von April bis Oktober. Die Zeitreihenlängen dieser 346 Stationen wurden auf 100 Stationsjahre nach dem Mutter-Tochter-Konzept aufgefüllt. Die Niederschlagshöhen für jede Grid-Zelle (1km-Raster) wurde durch Interpolation der Parameter mit Hilfe von zwölf Nachbarstationen mit einem multiplem linearen Modellansatz und einem Wichtungsansatz nach der horizontalen Distanz ermittelt.

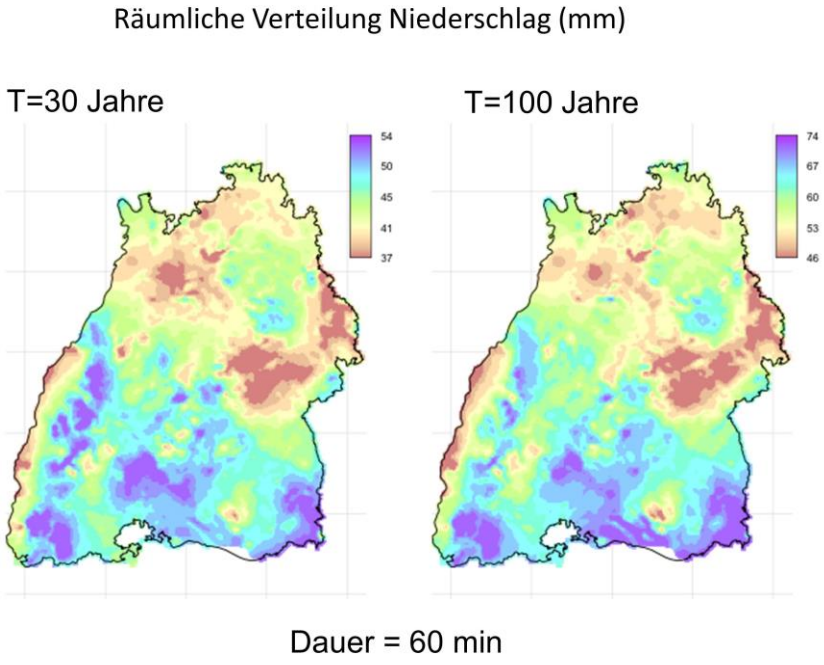


Abbildung 3. Verteilung der N-Höhen der Jährlichkeit 30 Jahre und 100 Jahre für die Niederschlagsdauerstufe 1 Stunde.

Der Extremwert für die Niederschlagsdauerstufe von einer Stunde wurde aus einer Regression von beobachteten Extremereignissen mit einem Unsicherheitsfaktor von 1,3 zu 128 mm als Niederschlagshöhe für diese Dauerstufe festgelegt.

2.2 Berechnung der Oberflächenabflusskennwerte

Die Oberflächenabflüsse für die Szenarien selten, außergewöhnlich und extrem wurden mit Hilfe des bodenhydrologischen Modells RoGeR berechnet. RoGeR ist ein Niederschlag-Abfluss-Modell, das im Auftrag der LUBW von der Professur für Hydrologie der Universität Freiburg weiterentwickelt wurde. Die Modellparameter wurden mit Hilfe neuer Geoinformationen wie den Bodenkarten im Maßstab 1:50 000 (BK 50), der Hydrogeologischen Karten im Maßstab 1:50 000 (HGK 50), dem Versiegelungsgrad der Landoberfläche, der Laser-Scan-Daten im 1m-Raster sowie der CORINE-Land-cover (Bodenbedeckungsdaten für Deutschland) abgeleitet. RoGeR berücksichtigt die vorherrschenden Bodenvorfeuchteverhältnisse als wesentliche Bodenkenngröße in der Berechnung der Oberflächenabflüsse. Als Bodenvorfeuchte wurde die Feuchtigkeitsgehalte bei 50 % Unterschreitungswahrscheinlichkeit vorgegeben. Die Vorfeuchtebedingungen wurden auf der Grundlage der Bodenwassergehalte, die mit dem Grundwasserneubildungsmodell GWN-BW für den Zeitraum 1971 bis 2013 als simulierte Werte vorliegen, statistisch ermittelt. Die Oberflächenabflüsse wurden für die definierten Szenarien selten, außergewöhnlich und extrem für die gesamte Landesfläche Baden-Württembergs in einer räumlichen Auflösung eines 5m-Rasters für die Niederschlagsdauerstufe 1 Stunde berechnet. Die beiden Szenarien selten und außergewöhnlich wurden nochmals in die beiden Fälle unverschlämmte und verschlämmte Oberböden unterschieden. Die Resultate dieser Berechnungen werden daher zukünftig für diese Szenarien als Oberflächenabflusskennwerte bezeichnet. Die LUBW stellt die Oberflächenkennwerte für die Szenarien selten/unverschlämmt, selten verschlämmt, außergewöhnlich unverschlämmt, außergewöhnlich verschlämmt und extrem verschlämmt für die Landesfläche den Kommunen für Starkregenuntersuchungen zur Verfügung. Diese Kenngrößen sind die hydrologischen Berechnungsannahmen für die oben genannten Szenarien, die der anschließenden zweidimensionalen Oberflächenhydraulik zugrunde gelegt werden.

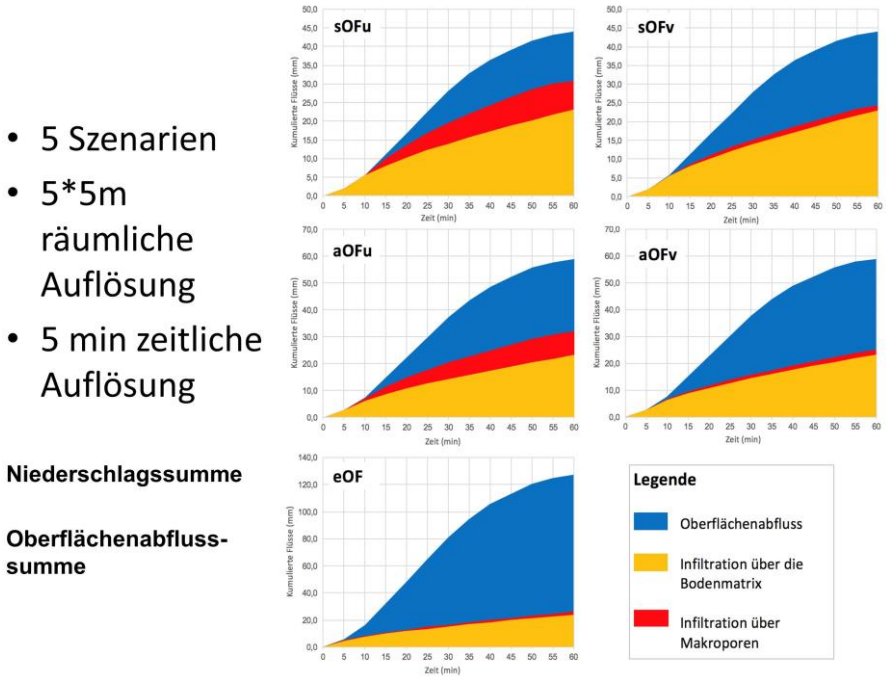


Abbildung 4. Oberflächenabflusskennwerte für fünf Szenarien, Komponentenanteile.

Standort Löss Kraichgau

Rechtswert						
Hochwert						
Jährlichkeit Niederschlag	30	100	extrem	30	100	extrem
Szenario	Sommer / feucht Acker nicht verschlämmt			Sommer / feucht Acker verschlämmt		
Niederschlagsdauer (h)	1	1		1	1	1
Niederschlagssumme (mm)	44	59		44	59	128
spezifische Abflusssumme (mm)	13.13	26.81		19.7	34.05	99.22
Abfluss (mm) von 0-5min	0.00	0.00		0.00	0.00	0.00
Abfluss (mm) von 5-10min	0.06	0.54		0.12	1.12	6.64
Abfluss (mm) von 10-15min	1.18	2.95		2.46	4.66	9.45
Abfluss (mm) von 15-20min	1.86	4.12		3.16	5.17	11.83
Abfluss (mm) von 20-25min	2.45	4.50		3.39	5.34	12.90
Abfluss (mm) von 25-30min	2.88	4.90		3.64	5.61	13.20
Abfluss (mm) von 30-35min	2.24	3.93		2.89	4.54	12.55
Abfluss (mm) von 35-40min	1.45	2.80		2.02	3.34	11.74
Abfluss (mm) von 40-45min	0.50	1.45		1.01	1.93	9.64
Abfluss (mm) von 45-50min	0.46	1.36		0.91	1.79	5.40
Abfluss (mm) von 50-55min	0.05	0.26		0.10	0.55	4.56
Abfluss (mm) von 55-60min	0.00	0.00		0.00	0.00	1.31

Abbildung 5. Oberflächenabflusskennwerte für Bodenstandort Lössboden.

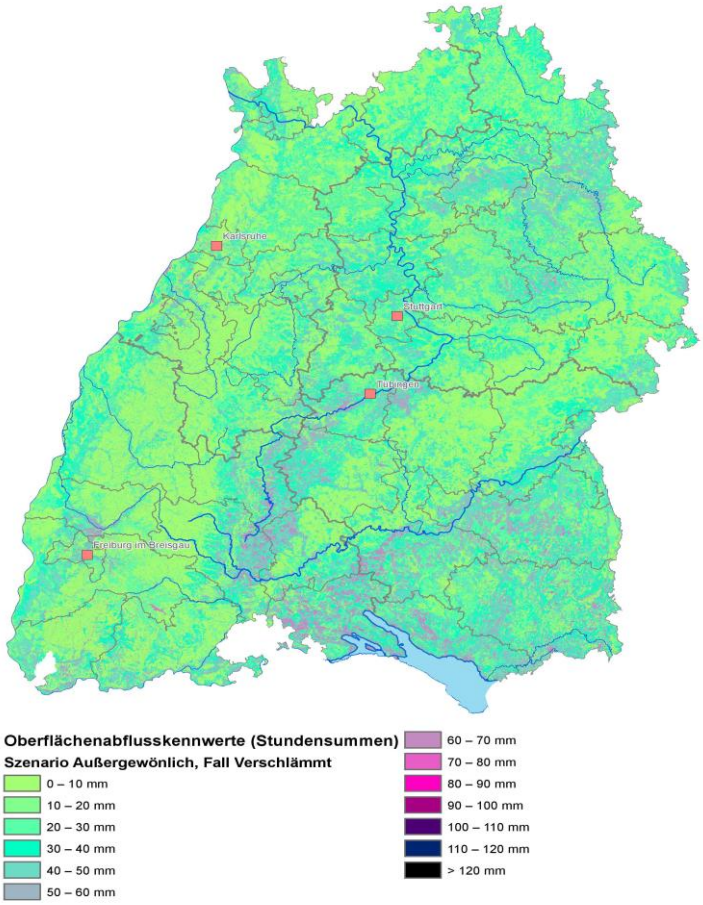


Abbildung 6. Verteilung der Oberflächenabflusskennwerte für das außergewöhnliche Szenario mit verschlämmten Oberböden in Baden-Württemberg.



Abbildung 7. Landnutzung im Basisgebiet Riedgraben.



Abbildung 8. Oberflächenabflusskennwerte zu dem außergewöhnlichen Szenario im Basisgebiet Riedgraben.

Ziel dieser ersten Phase sind für festgelegte kleinräumige Niederschlagsereignisse mit einer Jährlichkeit von 30, 100 und 1 000 Jahren und einer Niederschlagsdauer von einer Stunde die Abflussprozesse und die daraus resultierenden Abflussbeiwerte, die durch die Bodeneigenschaften, Landnutzung und Vorfeuchte beeinflusst werden, zu bestimmen. Dieser Ermittlungsansatz beruht auf Arbeiten des Wasser-Boden-Atlasses Baden-Württemberg und des Modells RoGeR der Universität Freiburg. Mit Abschluss der ersten Phase sollen landesweit einheitliche hydrologische Grundlagendaten zur Verfügung stehen, mit denen Überflutungen auf der Geländeoberfläche für die drei festgelegten Oberflächenabflussszenarien selten, außergewöhnlich und extrem berechnet und somit die Starkregengefahrenkarten für diese drei Szenarien erstellt werden können.

In der konzipierten zweiten Phase wird die Anwendung der Methode erweitert, indem für seltene, außergewöhnliche und extreme Ereignisse der potenziell maximale lokale Abfluss für alle möglichen Kombinationen von Niederschlagseigenschaften (Dauer und Intensität) und Bodenvorfeuchtebedingungen bestimmt werden. Der Mehrwert der erweiterten Methode liegt darin, dass keine Niederschlagsdauer festgelegt werden muss, für die der Abfluss bestimmt werden wird.

Mit Hilfe von zweidimensionalen, hydrodynamischen numerischen (2D-HN) Modellen, können die Strömungsverhältnisse und Überflutungen für die oben genannten Szenarien berechnet werden. Die Geländeoberfläche des Untersuchungsgebietes wird durch den topographischen Datensatz HydTERRAIN im 1m-Raster abgebildet. Im hydraulischen Modell sind die Rauigkeiten der Geländeoberfläche für die örtlichen Verhältnisse entsprechend den vorhandenen Oberflächenbeschaffenheiten und -strukturen so anzusetzen, dass realistische Überflutungstiefen und Fließgeschwindigkeiten erzielt werden. Erfahrungswerte quantitativer Art müssen erst noch gesammelt und ausgewertet werden. Die 2D-HN-Modelle erlauben jedoch, die Simulation der zeitlichen Entwicklung der Überflutungstiefen und Fließgeschwindigkeiten sowie die Überprüfung der Wirkung von baulichen Vorsorgemaßnahmen.
Für das außergewöhnliche und extreme Szenario sollten die Annahmen, dass der Oberboden verschlämmt ist und dass die Einläufe in Verdolungen verlegt sind, getroffen werden. Im Rahmen der hydraulischen Berechnung werden für die gewählten Abflussszenarien in einem iterativen Prozess die Ergebnisse plausibilisiert und überprüft. In abflussrelevanten Bereichen sind gegebenenfalls die örtlichen hydraulisch wirksamen Strukturen durch zusätzliche Geländeaufnahmen in einer detaillierten Bearbeitung zu verfeinern.
Beim Szenario eines seltenen Starkregenereignisses, welches oberhalb der Bemessungsgrenzen der Siedlungsentwässerung angesetzt ist, kann die Kanalisation in Abhängigkeit der lokalen Gegebenheiten noch eine Rolle spielen. Hier kann die Wirkung leistungsfähiger Kanäle als Senke und Quelle abgeschätzt oder pauschal näherungsweise berücksichtigt werden. Eine gekoppelte Simulation von Kanal- und Gewässernetz in ländlichen und kleinstädtischen Untersuchungsgebieten und topographisch stark gegliederten Verhältnissen wird in der Regel nicht erwartet. Für das außergewöhnliche und extreme Szenario sind die Abflussmengen erwartungsgemäß so hoch, dass die Kanalisation keine Rolle spielt. Das Modell berechnet instationär die Wasserspiegellage (m+NN) und die tiefengemittelte Fließgeschwindigkeit (m/s) an den Modellknoten für das jeweilige Oberflächenszenario. Die Ergebnisse der hydraulischen Berechnung werden mit Hilfe von geografischen Informationssystemen mit der Geländeoberfläche zu den Starkregengefahrenkarten verschnitten. Die Starkregengefahrenkarten zeigen die aus den verschiedenen Starkregenszenarien entstehenden flächigen Ausdehnungen und Tiefen der Überflutungen sowie die tiefengemittelten Fließgeschwindigkeiten. Weiter sollte der zeitliche Verlauf für das außergewöhnliche und extreme Szenario als Ergebnis der instationären Simulation visualisiert werden, um die Entstehung und die weitere Entwicklung der Überflutungen analysieren zu können.

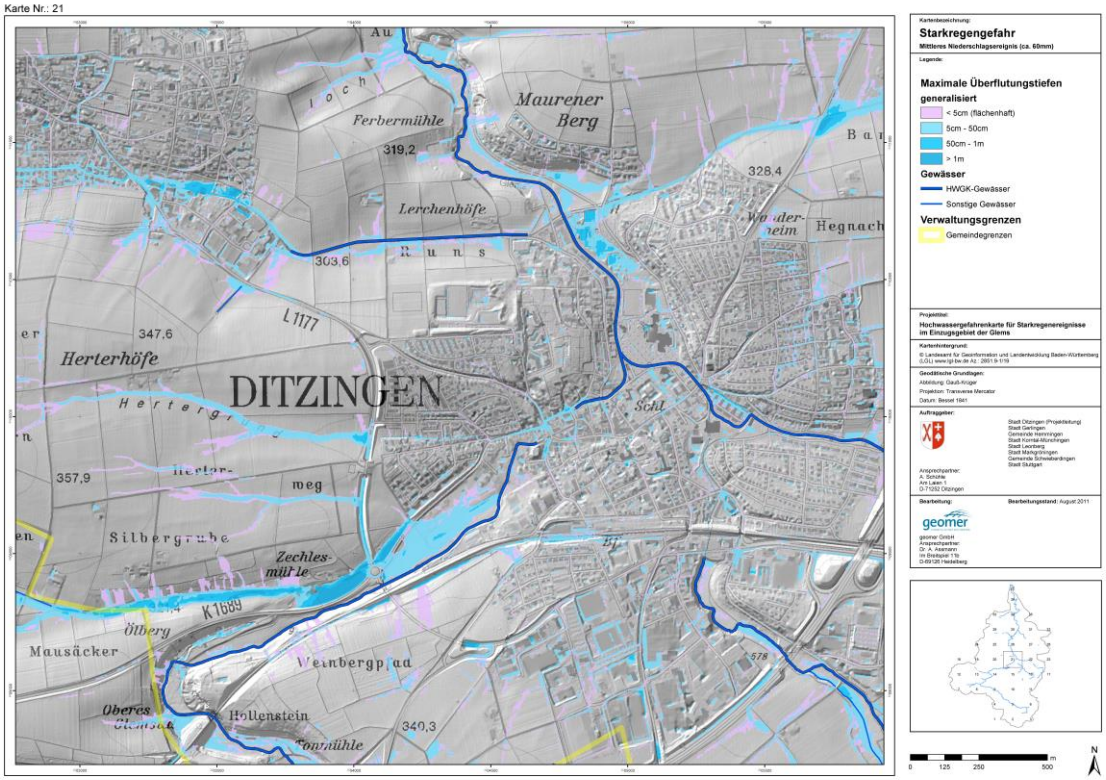


Abbildung 9. Beispiel für eine Starkregengefahrenkarte.

2.3 Risikoanalyse

Die Risikoanalyse beim Starkregenrisikomanagement lehnt sich methodisch an die Risikoanalyse zum Hochwasserrisikomanagement an. Beim Starkregenrisikomanagement gestaltet sich die Risikoanalyse einfacher als beim Hochwasserrisikomanagement, da für die Überflutungsszenarien infolge Starkregen keine Jährlichkeiten angegeben werden können. Ziel der Risikoanalyse ist die Gewinnung von Aussagen zum potenziellen Ausmaß von Gefahren für Leib und Leben sowie Schäden an öffentlichen Gebäuden und Infrastruktureinrichtungen.

Die kommunale Risikoanalyse ist eine Gemeinschaftsaufgabe, bei der alle wesentlichen Akteure in der Kommune eingebunden sein sollten. Dies betrifft insbesondere die Tiefbauabteilung, die Stadtplanung, die Feuerwehr, das Ordnungsamt und die kommunalpolitischen Gremien.

Die Risikoanalyse gliedert sich im Wesentlichen in drei Schritten:

1. Analyse der Starkregengefahrenkarte, insbesondere der Bereiche, die im Gemeindegebiet beim seltenen, außergewöhnlichen oder extremen Szenario überflutet werden und durch hohe Überflutungstiefen, große Überflutungsausdehnung und/oder hohe Fleißgeschwindigkeiten gekennzeichnet sind und wo ggf. die Gefahr durch Erosion bzw. Geröllltransport besteht. Im privaten und gewerblichen Bereich liegt die Verantwortung der Risikoanalyse bei den privaten bzw. gewerblichen Eigentümern. Daher entscheiden diese über die Art und Höhe der Risiken. Die Risikoanalyse kann sich v.a. an Leitfragen orientieren wie:
    - Wo ist das Überflutungsrisiko am höchsten?
    - Welche Infrastruktur- und Versorgungsobjekte sind notwendig und dürfen nicht ausfallen?

- Welche möglichen Zugangs- und Rettungswege bestehen für Einsatzkräfte bei den verschiedenen Szenarien?
- Welche Infrastrukturelemente sind bereits gegen Überflutungen geschützt und bedürfen daher keiner besonderen Berücksichtigung?

2. Identifikation kritischer Objekte und Bereiche: Monetäre Schäden können v.a. auftreten an Gebäuden und Inventar, an gewerblichen und industriellen Anlagen, durch Störungen oder Ausfall von Produktions- und Dienstleistungsprozessen, in der Land- und Forstwirtschaft, an der Infrastruktur sowie an Gewässern und wasserbaulichen Anlagen.
3. Risikoermittlung und Bewertung mit einer verbalen Risikobeschreibung in Form von Risikosteckbriefen für kritische Objekte und Bereiche.

2.4 Handlungskonzept

Die Starkregengefahrenkarten und die daraus abgeleitete Risikoanalyse bilden die Grundlage für die Erstellung eines Handlungskonzeptes zur Vermeidung oder zur Verminderung von Schäden infolge von Starkregenereignissen. Die Erstellung eines Handlungskonzeptes erfordert als kommunale Querschnittsaufgabe eine intensive und breite Beteiligung aller Akteure und Entscheidungsträger wie die Vertreter der kommunalpolitischen Entscheidungsgremien, des Tiefbaus, des Planungsamtes, des Ordnungsamtes und des Katastrophenschutzes, von Land- und Forstwirtschaft und der Feuerwehr. Ein wesentliches Element ist die Informationsvorsorge für die Zielgruppen Bürger und Bürgerinnen sowie Grundstückseigentümer und Eigentümerinnen, Gewerbe- und Industriebetriebe, sowie Landwirte und Eigentümer forstlich genutzter Flächen. In der Flächenvorsorge wird in Bezug auf die Minderung von Risiken infolge von Starkregen mit das größte Potenzial gesehen. Die Kommunen können über die Bauleitplanung lenkend eingreifen und durch die Freihaltung von Flächen oder durch entsprechende planerischer und gestalterischer Vorgaben in Gefahrenbereichen die Risiken mindern.
Ein wesentlicher Bestandteil des Handlungskonzeptes ist das Krisenmanagement mit den Teilaufgaben der Vorsorge, der Vorbereitung, Bewältigung und der Nachsorge. Um Schäden zu vermeiden, muss der kurze Zeitraum zwischen der ersten Warnung und dem Beginn einer kritischen Situation für mögliche Abwehrmaßnahmen optimal genutzt werden. Diese Möglichkeiten müssen bereits im Vorfeld im Detail ausgearbeitet sein. Im kommunalen Hochwasseralarm- und Einsatzplan werden die Gefahrenlagen bei Hochwasser und Starkregenereignissen analysiert und entsprechende Handlungen ereignisabhängig abgeleitet und festgelegt. Das Konzept kommunaler baulicher Maßnahmen umfasst die bauliche Vorsorge Schutz- und Unterhaltungsmaßnahmen gegen Überflutungen durch Starkregenereignisse. Es verfolgt im Wesentlichen die Ziele der Fernhaltung des Außengebietswassers vom Siedlungskörper, der Freihaltung von bevorzugten Fließwegen des Oberflächenabflusses in der Siedlungsfläche, der gezielten Ableitung von Oberflächenwasser in schadensfreie und schadensarme Freiflächen oder Abflusswege und Risikobereiche mit Gefahr für Menschenleben und Objekte der kritischen Infrastruktur besonders zu schützen.

3. Zusammenfassung

Verschiedene meteorologische Entwicklungen deuten auf eine Zunahme von konvektiven Starkregenereignissen hin. Die Überflutungen infolge solcher Starkregenereignisse sind einerseits lokal ausgeprägt aber andererseits für die betroffenen Ortslagen oft mit hohen Schäden und Verwüstungen verbunden. Von daher ist die Notwendigkeit gegeben, ein Starkregenrisikomanagement für die Kommunen zu entwickeln. Das kommunale Starkregenrisikomanagement soll in Baden-Württemberg zukünftig nach der Methodik des Leitfadens „Kommunales Starkregenrisikomanagement in Baden-Württemberg“ durchgeführt werden. Die Vorgehensweise und die einzelnen Bearbeitungsschritte von der Überflutungsanalyse

bis zur Erstellung des Handlungskonzeptes sind dort methodisch beschrieben. Weiter wird darin geregelt, welche Daten zu verwenden sind. Ziel ist ein landesweit einheitliches und qualitätsgesichertes Vorgehen, welches auch die Basis für eine Förderung nach der Förderrichtlinie Wasserwirtschaft (FRWw 2015) in Baden-Württemberg ist. Als Kooperationsprojekt von benachbarten Kommunen kann die Durchführung entsprechender Untersuchungen Kostenvorteile bringen.

4. Literatur

LUBW (2016): Leitfaden „Kommunales Starkregenrisikomanagement in Baden-Württemberg“, ISBN 978-3-88251-391-2.

Umweltministerium Baden-Württemberg (2015): Richtlinien des Umweltministeriums für die Förderung wasserwirtschaftlicher Vorhaben (Förderrichtlinien Wasserwirtschaft 2015 – FrWw 2015, Gesetzblatt Baden-Württemberg 2015, S. 784 ff.

Koch, M., Hennegriff, W. (2017): Kommunales Starkregenrisikomanagement in Baden-Württemberg, Die Gemeinde, BWGZ 10/2017, S. 410 ff.

Regionalisierung und Simulation der Wassertemperatur – Ergebnisse und Bewertungen

Dr. Ingo Haag
HYDRON, Ingenieurgesellschaft für Umwelt und Wasserwirtschaft mbH, Karlsruhe

1. Einleitung

Die Wassertemperatur beeinflusst die physikalisch-chemische und biologische Beschaffenheit von Gewässern auf vielfältige Weise und ist daher einer der wichtigsten Parameter zur Beurteilung des ökologischen Zustands von Fließgewässern (z. B. LAWA, 1991; Crisp, 1996; Haag, 2003; Caissie, 2006; Halle, 2017). In zahlreichen, zumeist größeren mitteleuropäischen Flüssen wurde für die letzten Jahrzehnte ein deutlicher Anstieg der Wassertemperaturen festgestellt, der größtenteils auf den Klimawandel zurückgeführt werden kann (vgl. Haag, 2009). In Baden-Württemberg und Bayern konnten entsprechende Trends auch für mittlere und kleinere Fließgewässer nachgewiesen werden (Willems und Stricker, 2017). Als Folge des voranschreitenden Klimawandels ist auch zukünftig mit einer weiteren Zunahme der Wassertemperaturen zu rechnen (vgl. Haag, 2009).

Der bereits beobachtete und zukünftig zu erwartende weitere Anstieg der Fließgewässertemperaturen hat voraussichtlich spürbare Folgen auf die aquatischen Ökosysteme. So kann die Zunahme sommerlicher Maximaltemperaturen zur Verschärfung bzw. Häufung ökologisch kritischer Situationen führen. Dies ist unter anderem dadurch bedingt, dass bei hohen Wassertemperaturen die Löslichkeit von Sauerstoff abnimmt, während sauerstoffzehrende Prozesse wie die Respiration, die Nitrifikation und der mikrobielle Abbau von Zehrstoffen intensiviert werden. Folglich können erhöhte Wassertemperaturen dazu beitragen, dass kritische Sauerstoffdepressionen zukünftig verstärkt werden (vgl. Sand-Jensen und Pedersen, 2005; Haag, 2006). Besonders kritisch ist das zeitgleiche Auftreten von Niedrigwasser und hohen Wassertemperaturen zu sehen, wenn neben einer erhöhten Respirationsrate und schlechten Sauerstoffversorgung auch die abwasserbürtigen Schadstoffe nur wenig verdünnt werden und die Ausweichmöglichkeiten für die aquatischen Organismen durch den niedrigen Wasserstand eingeschränkt sind (z. B. Koehler et al., 2007). Neben den sommerlichen Maximaltemperaturen kann auch die Erhöhung winterlicher Minimaltemperaturen signifikante gewässerökologische Auswirkungen haben. So könnten sich viele gebietsfremde Arten (Neobiota) stärker verbreiten, wenn ihre Ausbreitung nicht mehr durch die Unterschreitung von Temperaturschwellen (meist 2 bis 3 °C) gehemmt wird. Umgekehrt hängt der Laicherfolg kälteliebender Fischarten unter anderem davon ab, dass physiologisch wirksame Temperaturschwellen ausreichend lange unterschritten werden (Kältestimuli). Aus diesen Zusammenhängen folgt, dass Fische aber auch zahlreiche Organismen anderer trophischer Stufen recht klare Temperaturpräferenzbereiche haben. Eine Erhöhung der Wassertemperatur würde also die Zusammensetzung der Biozönosen verändern bzw. ihre Verbreitung verschieben (z. B. Caissie, 2006; Daufresne et al., 2007; Reinartz, 2007).

Vor diesem Hintergrund erscheint es wichtig, das Ausmaß der zukünftig zu erwartenden klimatisch bedingten Veränderungen der Fließgewässertemperaturen in ihrer zeitlichen und räumlichen Dynamik abzuschätzen. Daher wurden im Rahmen der Kooperation KLIWA für Baden-Württemberg und Bayern Modelle zur Simulation, Regionalisierung und Projektion von Wassertemperaturen der Fließgewässer erstellt und angewandt. Für Rheinland-Pfalz werden derzeit entsprechende Modelle aufgebaut. Im vorliegenden Beitrag werden die verwendeten Modelle kurz skizziert, Berechnungsergebnisse unter Nutzung ausgewählter Klimaprojektionen erläutert sowie erste Ansätze für eine weitergehende Bewertung dieser Ergebnisse vorgestellt.

2. Theoretische Grundlagen und verwendete Modelle

2.1 Maßgebliche Prozesse für die natürliche Fließgewässertemperatur

In der vorliegenden Studie wird die Auswirkung des Klimawandels auf die natürliche Temperatur von Fließgewässern untersucht. Daher werden direkte anthropogene Einflüsse wie die Einleitung von Kühlwasser oder die Ableitung von kaltem Tiefenwasser aus Talsperren nicht betrachtet.

An seiner Quelle hat ein Fließgewässer zunächst die Temperatur des Grundwassers, die häufig in etwa das langjährige Mittel der Lufttemperatur widerspiegelt. Diese Ausgangstemperatur wird jedoch bereits nach kurzer Fließstrecke durch die in Abb. 1 aufgeführten Prozesse überprägt. Dabei entspricht die Stärke der Pfeile in Abb. 1 in etwa der mittleren Bedeutung der jeweiligen Wärmeaustauschprozesse (vgl. Webb und Zhang, 1997; Haag, 2009). Die natürliche Fließgewässertemperatur resultiert folglich vor allem aus der Energiebilanz der beteiligten Prozesse und der Wärmekapazität des Wasserkörpers. Die Wärmekapazität verhält sich dabei proportional zur verfügbaren Wassermenge und somit zum Abfluss. Bei geringeren Abflüssen kann die Temperatur des Fließgewässers durch dieselbe Energiebilanz folglich stärker beeinflusst werden. So können geringere Abflüsse zu höheren sommerlichen Maximaltemperaturen mit beitragen. Die Wassertemperatur wird also indirekt auch von Veränderungen des Abflusses beeinflusst (Webb und Nobilis, 2007).

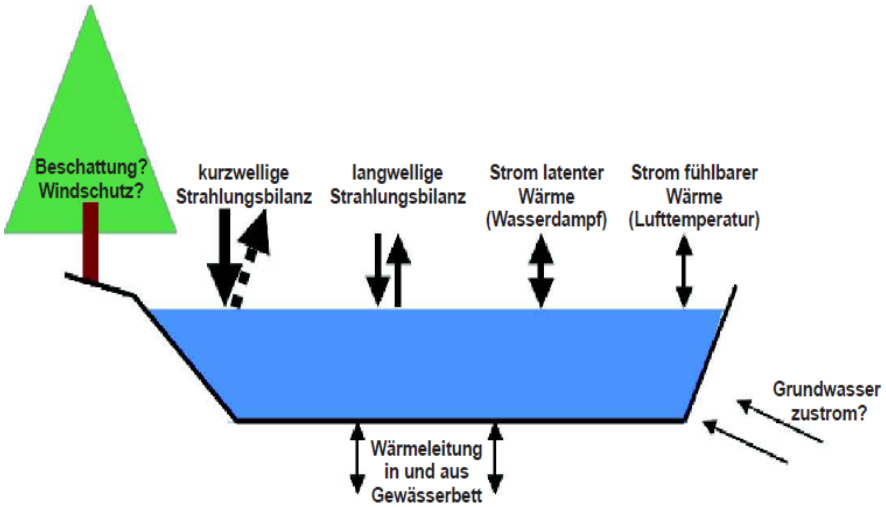


Abbildung 1. Für die Wassertemperatur maßgebliche natürliche Wärmeaustauschprozesse (aus Haag, 2009).

2.2 Verwendete Wassertemperaturmodelle

Der Klimawandel wirkt sich in erster Linie über die mögliche Veränderung der oben skizzierten Energiebilanzterme sowie in geringerem Maße und indirekt über Abflussänderungen auf die Wassertemperaturen der Fließgewässer aus. Um die mögliche Wirkung des Klimawandels auf die Fließgewässertemperaturen abschätzen zu können, sind daher Modelle erforderlich, die diese Wirkungspfade nachbilden. Da jedoch nicht nur punktuelle Aussagen für Messstellen gemacht werden sollen, müssen diese Modelle auch eine Regionalisierung der Wassertemperaturen auf Fließgewässerabschnitte ermöglichen, für die keine Messungen vorliegen. Für die Prozessbeschreibung und die Regionalisierung wurden in Bayern und Baden-Württemberg unterschiedliche Ansätze verfolgt.

Für Bayern wurde im Auftrag des LfU durch das Ingenieurbüro IAWG (Dr. W. Willems) ein mehrstufiges statistisches Modell abgeleitet, das hier nur stark vereinfacht skizziert werden

kann. In dem statistischen Modell wird die Lufttemperatur als Prädiktor für das Tagesmaximum der Wassertemperatur verwendet. Unter mehreren Modellansätzen wurde ein „Distributed Lag Model“ als am besten geeignetes statistisches Modell identifiziert, um die punktuell gemessenen Wassertemperaturen mithilfe der Lufttemperaturen nachzubilden. Die Parameterwerte des Distributed Lag Models wurden zunächst für die vorliegenden punktuellen Messungen ermittelt. In einem zweiten Schritt wurden die Parameterwerte dann mithilfe eines PSBI-Kriging (PSBI = Physiographical Space-Based Interpolation; Chokmani und Ouarda (2004)) auf Abschnitte der Gewässer I. und II. Ordnung im gesamten Land übertragen. Der Abstand der sogenannten „Regionalisierungsknoten“ beträgt 5 km, in gewässerökologisch besonders relevanten Gewässern 2 km. Mit dem mehrstufigen statistischen Modell ist es also möglich, räumlich differenziert Zeitreihen der modellierten Tagesminima und -maxima der Wassertemperatur bereitzustellen. Genauere Angaben zu den verwendeten Modellansätzen können den Berichten des Büros IAWG entnommen werden (Willems und Stricker, 2013; 2014).

Für Baden-Württemberg wurden im Auftrag der LUBW durch das Ingenieurbüro HYDRON die landesweit bestehenden LARSIM-Wasserhaushaltsmodelle (WHM) zu Wasserhaushalts- und Wärmemodellen (LARSIM-WWM) erweitert. Im vorliegenden Fall wurden diese Modelle mit der Rechenschrittweite von einem Tag verwendet, so dass die Berechnungsergebnisse jeweils als Tagesmittelwerte des Abflusses und der Wassertemperatur zu interpretieren sind. Die physikalisch basierte Simulation der Wassertemperatur in LARSIM-WWM berücksichtigt die in Abb. 1 skizzierten Prozesse des Wärmeaustauschs mit der Atmosphäre und dem Gewässerbett. Der Transport des Wärmeinhalts in den Fließgewässern wird mit einem eindimensionalen Advektions-Dispersions-Ansatz simuliert. Modelltechnisch analoge LARSIM-WWM werden seit 2004 für die operationelle Simulation und Vorhersage der Wassertemperatur am Neckar, dem Ober- und Mittelrhein sowie in Südhessen genutzt und wurden für Neckar und Rhein auch bereits erfolgreich für die Projektion der durch den Klimawandel zu erwartenden Wassertemperaturänderungen angewandt (Haag et al., 2005; Haag und Luce, 2005; Kremer und Brahmer, 2013; Badde et al., 2014). Eine ausführliche Beschreibung der Modellstruktur findet sich in Haag und Luce (2008). Details zu den landesweiten Modellen für Baden-Württemberg sind in Aigner und Haag (2017) dargestellt.

Mit den LARSIM-WWM wird in einem Modelllauf parallel sowohl der Wasserhaushalt und der resultierende Abfluss als auch die Wassertemperatur in den Fließgewässern räumlich differenziert berechnet. Die Modelle können also gleichzeitig zur Simulation und Regionalisierung des Abflusses und der Wassertemperatur verwendet werden. Dadurch wird zum einen die indirekte Wirkung veränderter Abflüsse auf die Wassertemperatur berücksichtigt und zum anderen können auch Aussagen zur kombinierten Wirkung von zeitgleich auftretendem Niedrigwasser und erhöhten Wassertemperaturen abgeleitet werden.

3. Vorgehensweise

Ziel der vorliegenden Arbeit war es, das Ausmaß der in Folge des Klimawandels zu erwartenden Änderung der natürlichen Fließgewässertemperaturen (Klimasignal) räumlich und jahreszeitlich differenziert abzuschätzen. Um das gesuchte Klimasignal zu erhalten, wurde wie in Abb. 2 skizziert vorgegangen. Zunächst wurden die oben vorgestellten Wassertemperaturmodelle soweit erforderlich kalibriert und anhand eines Vergleichs zwischen simulierten und gemessenen Wassertemperaturen validiert. Hierfür wurden meteorologische Messdaten als Modellantrieb verwendet (Messdaten-Simulation). Sowohl mit dem statistischen Modell für Bayern als auch mit dem physikalisch basierten Modell für Baden-Württemberg konnte die zeitliche Dynamik punktuell gemessener Wassertemperaturen (auch in unabhängigen Validierungszeiträumen) gut bis sehr gut nachgebildet werden. Zudem ergab sich eine plau-

sible räumliche Struktur der Fließgewässertemperatur, die für Baden-Württemberg auch gut mit der kartierten Verbreitung der Fischgemeinschaften korrespondiert. Für Baden-Württemberg konnte zudem gezeigt werden, dass beobachtete langjährige Trends der Wassertemperaturen mit dem Modell nachgebildet werden können. Somit erscheinen beide Modelle geeignet, um die durch den Klimawandel zukünftig zu erwartenden Veränderungen der Wassertemperaturen abzuschätzen (vgl. Willems und Stricker, 2013; Aigner und Haag, 2017).

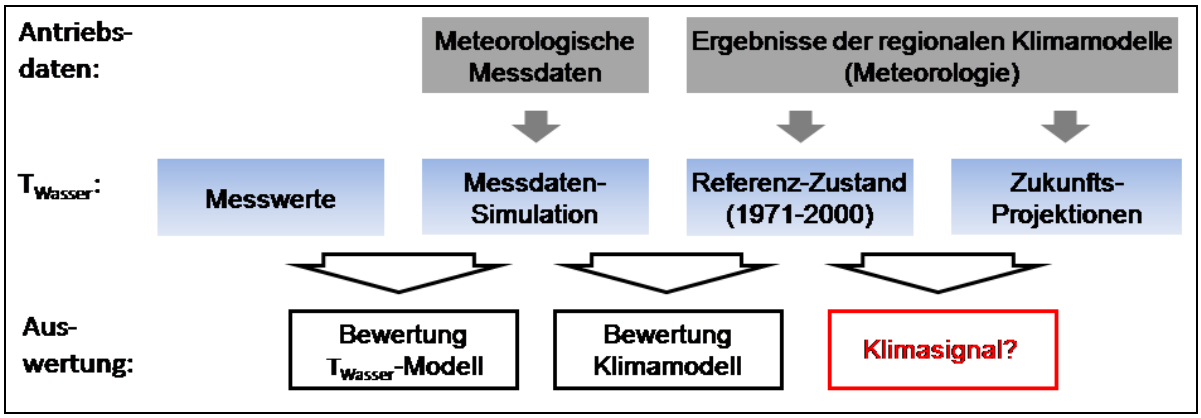


Abbildung 2. Grundsätzliches Vorgehen zur Abschätzung des Klimasignals für natürliche Fließgewässertemperaturen.

Für die nachfolgenden Arbeitsschritte zur Simulation des Referenz-Zustands und der Zukunfts-Projektionen wurden Ergebnisse regionaler Klimamodelle als meteorologische Antriebsdaten verwendet. Für Baden-Württemberg wurden die auf dem RCP8.5-Szenario basierenden regionalen Klimamodelle RCA4 (run 12) und COSMO CLM 5.0 (run 1) herangezogen. Für Bayern wurden die Berechnungen bereits 2014 durchgeführt. Daher wurden regionale Klimamodelle auf Basis des SRES-Szenario A1B verwendet. Auf Grundlage der Lufttemperatur als Kriterium für die Bandbreite der Zukunftsprojektionen, wurden die folgenden regionalen Klimamodelle ausgewählt, um die Bandbreite der zu erwartenden Änderungen abzuschätzen (Willems und Stricker, 2014):

- HIRHAM (HIRHAM5-DMI-ECHAM5-25km-A1B): Geringes Klimasignal
- REMO (REM-MPI-ECM5-M3-25k-A1B): Mittleres Klimasignal
- HADLEY (METO-HCRM3Q0-HADCM3Q0-25k-A1B): Starkes Klimasignal

Die statistischen Eigenschaften der Fließgewässertemperaturen des Referenzzeitraums (1971-2000) konnten mit beiden Wassertemperaturmodellen unter Verwendung des meteorologischen Antriebs aus den jeweiligen regionalen Klimamodellen insgesamt gut nachgebildet werden. Daher ist davon auszugehen, dass auch die ausgewählten regionalen Klimamodelle geeignet sind, das zu erwartende Klimasignal der Fließgewässertemperaturen abzuschätzen (vgl. Willems und Stricker, 2014; Seibert et al., 2017).

Im letzten Schritt wurde das Klimasignal der Fließgewässertemperaturen aus der Differenz zwischen den Simulationsergebnissen für die Zukunftsprojektion und den jeweiligen Referenz-Zustand ermittelt. Hierbei wurde sowohl die nahe Zukunft (2021-2050) als auch die ferne Zukunft (2071-2100) betrachtet. Einige ausgewählte Ergebnisse hieraus werden nachfolgend dargestellt.

4. Ergebnisse und Diskussion

4.1 Klimasignal der Fließgewässertemperatur in Bayern und Baden-Württemberg

Sowohl für Bayern wie auch für Baden-Württemberg wurde das Klimasignal der Fließgewässertemperaturen räumlich differenziert berechnet und ausgewertet. Für Bayern beziehen sich die Auswertungen dabei auf die Tagesmaxima der Wassertemperaturen, in Baden-Württemberg auf die Tagesmittelwerte. Abb. 3 zeigt die projizierten Änderungen der Jahresmittel (der Tagesmaxima) der Fließgewässertemperaturen für Bayern. Zur leichteren Einordnung sind die über Bayern gemittelten Werte zusätzlich in Tab. 1 dargestellt. Die Auswahl der drei unterschiedlichen regionalen Klimamodelle für Bayern ermöglicht eine Einschätzung der zu erwartenden Bandbreite des Klimasignals. Demnach ist für die nahe Zukunft im Mittel über Bayern mit einer Zunahme der Tagesmaxima der Fließgewässertemperaturen um +0,5 bis +1,3 °C zu rechnen, wobei die mittlere Projektion (REMO) mit einem Wert von +0,6 °C als realistischstes Szenario angesehen werden kann.

Tabelle 1. Im Mittel für Bayern projizierte Zunahmen der Jahresmittelwerte der Tagesmaxima der Fließgewässertemperaturen (Klimasignal) für unterschiedliche Klimaprojektionen (Quelle: Willems und Stricker, 2014).

	HIRHAM	**REMO**	**HADLEY**
Nahe Zukunft (Bayern)	+0,5 °C	+0,6 °C	+1,3 °C
Ferne Zukunft (Bayern)	+1,3 °C	+1,8 °C	+2,6 °C

Für Baden-Württemberg sind die projizierten Änderungen der Jahresmittel (der Tagesmittelwerte) in analoger Weise in Abb. 4 und Tab. 2 dargestellt. Auf Grund der großen Unsicherheit für die ferne Zukunft, die mit dem langen Projektionshorizont einhergeht, wurde für die ferne Zukunft lediglich das regionale Klimamodell RCA4 (run 12) verwendet und nur für das Neckareinzugsgebiet Auswertungen erstellt.

Für die nahe Zukunft ergeben sich im Mittel über die Landesfläche von Baden-Württemberg ähnliche Ergebnisse wie für Bayern. Dabei sind mehrere Unterschiede zu beachten. Für Bayern basieren die meteorologischen Projektionen auf dem SRES-Szenario A1B und für Baden-Württemberg auf dem aktuelleren RCP8.5-Szenario. In Bayern wurde ein statistisches und in Baden-Württemberg ein physikalisch basiertes Modell zur Simulation und Projektion der Fließgewässertemperaturen verwendet. Außerdem wurden für Bayern Tagesmaxima und für Baden-Württemberg Tagesmittel ausgewertet. Dass trotz dieser Unterschiede in der Herangehensweise ähnliche Ergebnisse erzielt werden, unterstreicht die Validität der ermittelten Bandbreite des mittleren Klimasignals für die nahe Zukunft. Für beide Bundesländer scheint für die nahe Zukunft im räumlichen und jahreszeitlichen Mittel eine Zunahme der Fließgewässertemperaturen um ca. 0,5 bis 1,3 °C also sehr wahrscheinlich.

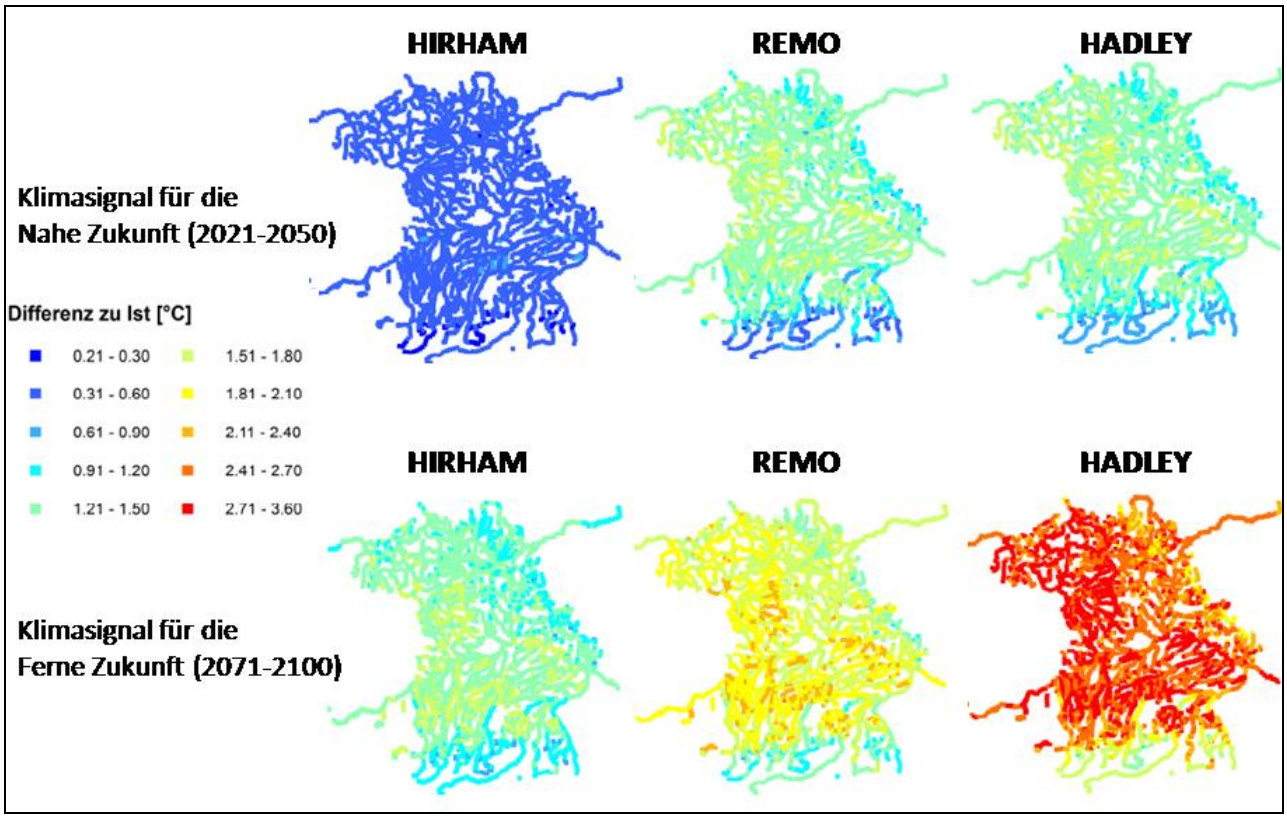


Abbildung 3. Bandbreite der für Bayern projizierten Zunahme des Jahresmittels der Tagesmaxima der Fließgewässertemperaturen (Zusammengestellt aus Willems und Stricker, 2014).

Tabelle 2. Im Mittel für Baden-Württemberg bzw. das Neckareinzugsgebiet projizierte Zunahmen der Jahresmittelwerte der Tagesmittel der Fließgewässertemperaturen (Klimasignal) für unterschiedliche Klimaprojektionen sowie räumliche Variation des Klimasignals.

	CCLM5.0-r1		**RCA4-r12**	
	Mittel	**Räuml. Variation**	**Mittel**	**Räuml. Variation**
Nahe Zukunft (Baden-Württemberg)	+0,5 °C	+0,3 … +0,6 °C	+1,1 °C	+0,6 … +1,3 °C
Ferne Zukunft (Neckareinzugsgebiet			+2,8 °C	+2,1 … +3,0 °C

Für die ferne Zukunft liegt die Bandbreite des Klimasignals im Mittel über Bayern zwischen +1,3 und +2,6 °C. Auf Basis von RCA4 (run 12) ergibt sich im Mittel über das Neckareinzugsgebiet ein Klimasignal von +2,8 °C. Diese Projektionen für die ferne Zukunft sind naturgemäß mit erheblichen Unsicherheiten behaftet, geben aber ungefähre Anhaltspunkte mit welcher Entwicklung zu rechnen ist.

Neben der Bandbreite des Klimasignals, das sich aus den unterschiedlichen regionalen Klimamodellen ergibt, zeigen die Abb. 3 und 4, dass es auch deutliche räumliche Unterschiede in der projizierten Zunahme der Fließgewässertemperaturen gibt. Die räumliche Variation, die sich für Baden-Württemberg hieraus ergibt, ist in Tab. 2 mit aufgeführt. Es wird deutlich, dass die für die nahe Zukunft projizierten räumlichen Unterschiede in der gleichen Größenordnung liegen wie die Bandbreite aus den unterschiedlichen regionalen Klimamodellen. Daher erscheint es wichtig und zielführend diese räumlichen Unterschiede aufzulösen und bei der Interpretation der Ergebnisse mit zu berücksichtigen.

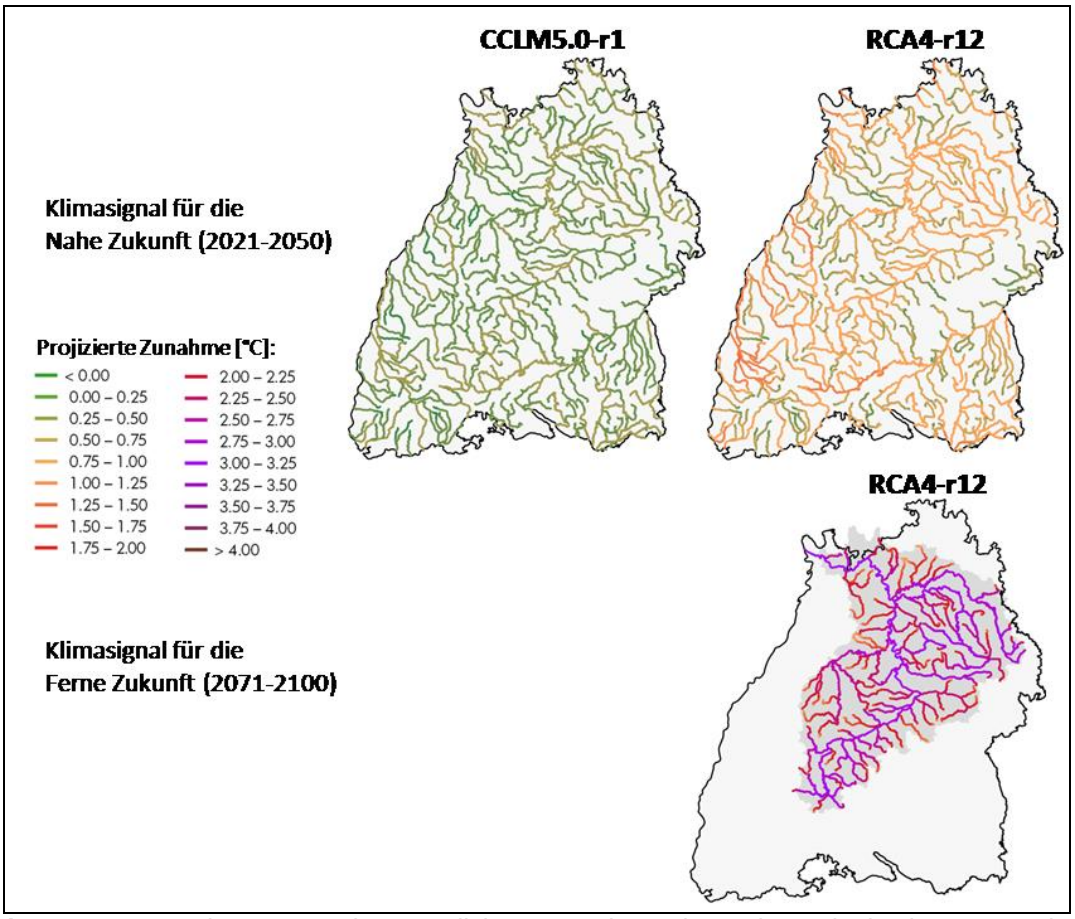


Abbildung 4. Für Baden-Württemberg projizierte Zunahme des Jahresmittels der Tagesmittel der Fließgewässertemperaturen.

In Bayern ergeben sich beispielsweise für die alpinen (südlichen) Zuflüsse der Donau geringere Klimasignale als in den anderen Landesteilen (Abb. 3). Für Baden-Württemberg zeigen sich insbesondere für die Zuflüsse von der Ostalb zur Donau unterdurchschnittliche Klimasignale, während für Gewässer in der Oberrheinebene häufig überdurchschnittliche Klimasignale projiziert werden (Abb. 4). Die Ursachen hierfür liegen zum einen sicher bereits in räumlichen Unterschieden der meteorologischen Eingangsdaten und somit in den Ergebnissen der regionalen Klimamodelle begründet. Zum anderen bedingen aber wohl auch strukturelle Unterschiede der Gewässer wie z. B. die Fließlänge, das Breiten-Tiefen-Verhältnis, die Beschattung oder das Abflussvolumen und die daraus resultierende unterschiedliche Wirksamkeit der veränderten Klimafaktoren, die räumlichen Unterschiede im Klimasignal. Beim Detaillierungsgrad der räumlichen Struktur ist jedoch zu beachten, dass es sich um landesweite Modelle handelt, die sicher wertvolle Hinweise hinsichtlich der zu erwartenden räumlichen Struktur des Klimasignals der Fließgewässertemperaturen geben, aber keine punktgenaue Aussage für jeden Gewässerabschnitt zulassen. Für ortsscharfe Aussagen an einzelnen Gewässern scheint eine lokale Überprüfung und ggf. eine Verfeinerung des jeweiligen Modells sinnvoll.

Die hier dargestellten Ergebnisse beziehen sich auf Jahresmittelwerte der maximalen bzw. mittleren Tageswerte der Fließgewässertemperaturen. Diese Jahresmittelwerte basieren auf simulierten Tageszeitreihen, die sowohl für Bayern wie auch für Baden-Württemberg auch hinsichtlich anderer statistischer Maßzahlen ausgewertet wurden (Willems und Stricker, 2014; Seibert et al., 2017). So können z. B. auch Veränderungen der Jahresminima bzw. -maxima oder des mittleren jahreszeitlichen Verlaufs (Regimekurven) analysiert werden. Jahreszeitlich differenzierte Auswertungen für Baden-Württemberg deuten darauf hin, dass die Fließgewässertemperaturen in den Sommermonaten etwas stärker zunehmen könnten

als im Winter. Hieraus ergibt sich auch eine etwas stärkere Zunahme bei den Jahresmaxima der Fließgewässertemperaturen als bei den Jahresmittelwerten und den Jahresminima. Allerdings hängen die projizierten jahreszeitlichen Unterschiede auch vom verwendeten regionalen Klimamodell ab, weshalb sie mit Vorsicht interpretiert werden sollten.

4.2 Hinweise auf mögliche ökologische Folgen am Beispiel Baden-Württemberg

Die flächendifferenziert vorliegenden Zeitreihen der berechneten Fließgewässertemperaturen können auch verwendet werden, um Kennwerte zu ermitteln, die als Indikatoren für mögliche ökologische Konsequenzen herangezogen werden. Als solche Indikatoren gelten insbesondere die Häufigkeit und Dauer, mit der die Fließgewässertemperatur bestimmte (ökologisch relevante) Schwellenwerte über- bzw. unterschreitet. Entsprechende Häufigkeits- und Dauerkennwerte und ihre mögliche Veränderung in Folge des Klimawandels, wurden für Bayern und Baden-Württemberg auf Basis der vorliegenden Simulationsergebnisse ermittelt. Für Baden-Württemberg wurden zudem auch Kennwerte für das zeitgleiche Auftreten von geringem Abfluss und hoher Wassertemperatur abgeleitet (Willems und Stricker, 2014; Seibert et al., 2017). Nachfolgend werden ausgewählte Ergebnisse für Baden-Württemberg dargestellt und es wird exemplarisch aufgezeigt, wie diese interpretiert werden können.

Als Grundlage für fischökologische Kennwerte wurden die fischgemeinschaftspezifischen maximalen Sommer- und Wintertemperaturen aus der Verordnung zum Schutz der Oberflächengewässer als Schwellenwerte herangezogen (Tmax [°C] Sommer und Tmax [°C] Winter aus der Anforderung an den guten ökologischen Zustand der OGewV, 2016) (Tab. 3). Für Baden-Württemberg liegt die Verbreitung der Fischgemeinschaften als digitale Karte vor (Abb. 5, links), so dass jedem Gewässerabschnitt die Schwellenwerte der dort vorherrschenden Fischgemeinschaft zugeordnet werden konnten. Auf Grundlage der Wassertemperatur-Simulationen wurde dann ermittelt, ob die Schwellenwerte der im Abschnitt vorherrschenden Fischgemeinschaft überschritten werden. Hieraus wurden Kennwerte zur mittleren Häufigkeit und Dauer der Schwellenwertüberschreitung im Sommer (April bis November) und Winter (Dezember bis März) berechnet.

Tabelle 3. Fischgemeinschaftspezifische Anforderungen an den guten ökologischen Zustand aus der OGewV (2016, Anlage 6), die als Überschreitungs-Schwellenwerte für fischökologische Kennwerte verwendet wurden.

	Fischgemeinschaft					
	salmoniden-geprägtes Epirhithral	**salmoniden-geprägtes Meta-rhithral**	**salmoniden-geprägtes Hypo-rhithral**	**cyprinidengeprägtes Rhithral**	**Epipotamal**	**potamal geprägt**
T_{max} Sommer (April- Nov.)	20,0 °C	20,0 °C	21,5 °C	23,0 °C	25,0 °C	28,0 °C
T_{max} Winter (Dez.-März)	8,0 °C	10,0 °C	10,0 °C	10,0 °C	10,0 °C	10,0 °C

Abb. 5 zeigt links die Verbreitung der Fischgemeinschaften in Baden-Württemberg. Als Beispiel für einen fischökologischen Kennwert ist rechts dargestellt, wie viele Tage im Jahr der fischgemeinschaftspezifische Winter-Schwellenwert unter Anwendung des RCA4 (run 12)-Szenarios in der nahen Zukunft überschritten würde. Dabei ist zu beachten, dass die Ergebnisdarstellung rechts aus der Kombination der projizierten Wassertemperaturen und den Anforderungen der im jeweiligen Gewässerabschnitt vorherrschenden Fischgemeinschaft hervor geht. Die Auswertung gibt also Hinweise darauf, wo sich die projizierten Veränderungen der winterlichen Wassertemperaturen besonders stark auf die heute vorherrschende Fischgemeinschaft auswirken könnte. Als Hotspots, bei denen zukünftig besonders häufig mit einer Überschreitung des Winter-Schwellenwerts zu rechnen ist, können hier vor allem die

Oberläufe der Gewässer im Kraichgau und der Tauberzuflüsse identifiziert werden (rote Abschnitte in Abb. 5, rechte Karte). Aus der linken Karte geht hervor, dass es sich bei diesen am stärksten betroffenen Abschnitten um salmonidengeprägte Gewässer des Epirhithrals (obere Forellenregion), also um die kälteliebendste Fischgemeinschaft in der Nomenklatur der OGewV (2016) handelt. Die Ergebnisse deuten also darauf hin, dass die derzeit in den genannten Abschnitten vorherrschende Fischgemeinschaft bereits in der nahen Zukunft durch weniger kälteliebende Arten des Meta- oder Hyporhithrals verdrängt werden könnte.

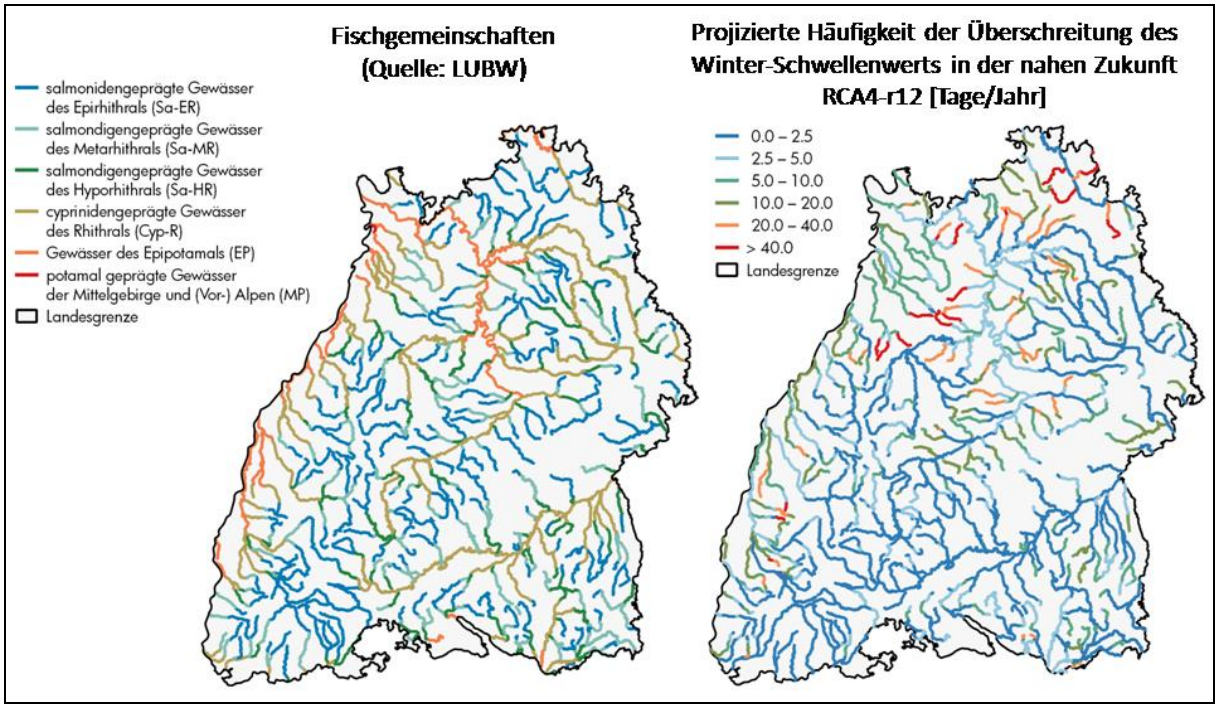


Abbildung 5. Aktuelle Verbreitung der Fischgemeinschaften gemäß OGewV in Baden-Württemberg (links) und auf der Basis von RCA4-r12 projizierte Häufigkeit der Winter-Schwellenwert-Überschreitung in der nahen Zukunft (rechts).

Das Beispiel verdeutlicht, wie mit Hilfe der fischökologischen Kennwerte mögliche Hotspots identifiziert werden können, bei denen eine Veränderung der Fischgemeinschaften in Folge der durch den Klimawandel erhöhten Wassertemperaturen besonders wahrscheinlich ist. Die Auswertung weiterer fischökologischer Kennwerte für die nahe Zukunft bestätigt die Ergebnisse aus Abb. 5. Insgesamt legen diese Auswertungen nahe, dass bereits in der nahen Zukunft eine längszonale Verschiebung der Fischgemeinschaften zugunsten von wärmeliebenden Arten und Ubiquisten wahrscheinlich ist. Ähnliches dürfte auch für das Makrozoobenthos und die gesamte aquatische Lebensgemeinschaft gelten. Für die ferne Zukunft wäre auf Grundlage der (recht unsicheren) Ergebnisse und der daraus für das Neckareinzugsgebiet abgeleiteten Kennwerte, mit einer weiteren deutlichen Verstärkung des beschriebenen Effekts zu rechnen.

In Ergänzung zu den reinen Wassertemperatur-Kennwerten, wurde auch das zeitgleiche Auftreten von hohen Wassertemperaturen und geringen Abflüssen analysiert, was als gewässerökologisch besonders kritisch einzustufen ist. Dies ist für Baden-Württemberg problemlos möglich, da die LARSIM-Modelle Abfluss und Wassertemperatur mit demselben Simulationslauf berechnen. Im vorliegenden Fall wurde ausgewertet, wie häufig der fischgemeinschaftspezifische Sommer-Schwellenwert überschritten und zeitgleich der MNQ unterschritten wird. Im Referenzzeitraum tritt dieser Zustand in den meisten Gewässerabschnitten gar nicht oder nur sehr selten auf. Für die nahe Zukunft wird mit beiden regionalen Klimamodellen eine spürbare Zunahme des Kennwerts projiziert. Demnach ist also bereits in der nahen Zukunft mit einer Zunahme dieser gewässerökologisch kritischen Situation zu rechnen.

Für die ferne Zukunft ergibt die Projektion, dass in über 50 % der Gewässerabschnitte des Neckareinzugsgebiets die kritische Situation durchschnittlich an zehn Tagen im Jahr oder häufiger auftritt. Bei der Interpretation ist zu beachten, dass fischgemeinschaftspezifische Sommer-Schwellenwerte für den kombinierten Kennwert verwendet wurden. Die für die Zukunft projizierte Zunahme des Kennwerts deutet also im Einklang mit den bereits oben besprochenen reinen Wassertemperatur-Kennwerten zusätzlich auch auf ein längszonale Verschiebung der Fischgemeinschaften (und der gesamten Biozönose) zugunsten wärmeliebender Arten hin.

Auf Basis der Simulationsergebnisse wurde auch ausgewertet, wie häufig mit einer Unterschreitung der Wassertemperatur von 2 °C zu rechnen ist, da ein Schwellenwert von ca. 2 bis 3 °C als Hemmnis für die Ausbreitung vieler gebietsfremder Arten (Neobiota) gilt. Abb. 6 zeigt die auf Basis der Simulationsläufe mit RCA4 (run 12) projizierten Absolutwerte dieses Kennwerts für die ferne Zukunft (links) sowie die Veränderung gegenüber dem Referenzzeitraum (Klimasignal, rechts). Hieraus wird deutlich, dass bei diesem Szenario in der fernen Zukunft die Häufigkeit von Tagen mit Wassertemperaturen unter 2 °C im gesamten Neckareinzugsgebiet deutlich abnehmen und so tiefe Temperaturen nur noch selten bzw. überhaupt nicht mehr auftreten würden. Demnach wäre die Ausbreitung vieler Neobiota in der fernen Zukunft kaum noch durch tiefe Wassertemperaturen gehemmt. Die Ergebnisse für die ferne Zukunft sind allerdings unsicher und geben nur Hinweise auf mögliche Entwicklungen. Die Ergebnisse für die nahe Zukunft sind nicht dargestellt. Hier ergeben sich deutliche Unterschiede für die beiden Klimamodelle: Während mit CCLM5.0 (run 1) für die nahe Zukunft kaum eine Veränderung hinsichtlich der Unterschreitung von 2°C projiziert wird, projizieren die Ergebnisse auf Basis von RCA4 (run 12) bereits für die nahe Zukunft eine merkliche Reduktion von Tagen mit Wassertemperaturen unter 2 °C. Somit müssen auch die Ergebnisse für die nahe Zukunft hinsichtlich dieses Kennwerts als unsicher eingestuft werden. Allerdings lässt sich auch für die nahe Zukunft nicht ausschließen, dass die Ausbreitung vieler Neobiota nicht mehr so stark durch niedrige Wintertemperaturen gehemmt wird.

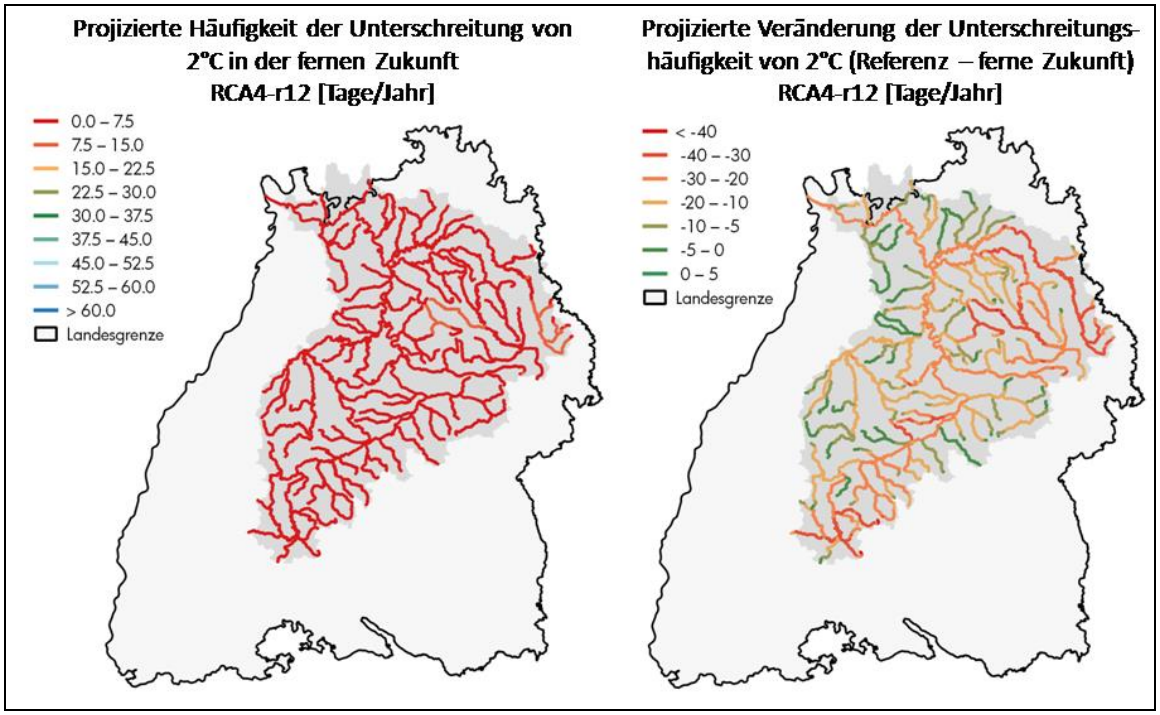


Abbildung 6. Auf der Basis von RCA4-r12 projizierte Häufigkeit der Unterschreitung von 2 °C in der fernen Zukunft (links) und im Vergleich zum Referenz-Zustand projizierte Veränderung der Unterschreitungshäufigkeit von 2 °C (rechts, Klimasignal).

Auch für Bayern wurden auf Grundlage der vorliegenden Wassertemperatur-Projektionen bereits ähnliche Auswertungen z. B. im Rahmen der Fallstudien Niedrigwasser für die Naab und die Sächsische Saale durchgeführt. Diese Studien, die im vorliegenden Rahmen nicht weiter ausgeführt werden können, dienen als weitere Beispiele für die Nutzung und weitergehende Bewertung der Wassertemperatur-Projektionen (LfU Bayern, 2017).

Selbstverständlich können die hier besprochenen Kennwerte die komplexen Auswirkungen des Klimawandels auf die Gewässerökologie nicht umfänglich erfassen. Dennoch geben sie wertvolle erste Hinweise auf mögliche Konsequenzen und besonders stark betroffene Gewässerabschnitte. Zweifellos ist es wichtig, die erzielten Ergebnisse gemeinsam mit Fachleuten aus der Gewässerökologie kritisch zu bewerten und zu nutzen. Hierzu ist es vermutlich sinnvoll, die bestehenden Kennwerte in Zusammenarbeit mit der Gewässerökologie weiter zu entwickeln bzw. zu verfeinern, um somit ihre Aussagekraft zu erhöhen. Zudem können die aus den Simulationen vorliegenden räumlich differenzierten Zeitreihen der Wassertemperaturen (und des Abflusses) auch für weitergehende ökologische Betrachtungen oder Modellrechnungen herangezogen werden, wobei jedoch stets die Unsicherheit der Ergebnisse mit berücksichtigt werden sollte.

5. Zusammenfassung und Ausblick

Die Wassertemperatur ist einer der wichtigsten Gewässergüteparameter, der maßgeblichen Einfluss auf den ökologischen Zustand von Fließgewässern hat. Daher wurden im Rahmen des KLIWA-Projekts für Baden-Württemberg und Bayern Modelle erstellt, mit denen abgeschätzt werden kann, wie sich die Fließgewässertemperaturen als Folge des Klimawandels zukünftig verändern könnten. In Bayern wird ein statistischer Ansatz verwendet, der auf dem Zusammenhang der Wassertemperatur mit der Lufttemperatur als Prädiktor basiert. In Baden-Württemberg wurden die landesweit vorliegenden LARSIM-Wasserhaushaltsmodelle zu Wassertemperaturmodellen (LARSIM-WWM) erweitert, die eine physikalisch basierte Simulation der Fließgewässertemperaturen ermöglichen. Da die LARSIM-WWM Abfluss und Wassertemperatur parallel simulieren, erlauben sie auch Aussagen zur kombinierten Wirkung von zeitgleich auftretendem Niedrigwasser und hohen Wassertemperaturen.

Mit beiden Modellen werden der Referenzzustand (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 Referenzzustand mit einer klimatisch bedingten Zunahme der Wassertemperatur um ca. 0,5 bis 1,3 °C zu rechnen. Dabei wird die mittlere Projektion mit einem Änderungssignal von ca. +0,6 °C als realistischstes 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 bereits für die nahe Zukunft 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 ca. 3 °C mit einer grundlegenden Verschärfung der gewässerökologischen Situation und einer deutlichen Reduktion des Lebensraums für kälteliebende Fisch- und Makrozoobenthosarten zu rechnen wäre.

Über die hier vorgestellten exemplarischen Auswertungen hinaus bilden die nun vorliegenden Simulationsergebnisse für die Fließgewässertemperaturen eine wichtige Grundlage für weitere Auswertungen. Insbesondere erscheint es sinnvoll, die räumlich differenzierten Zeitreihen der Wassertemperaturen (und des Abflusses) zu nutzen, um in Zusammenarbeit mit der Gewässerökologie weiterführende Aussagen hinsichtlich der möglichen ökologischen Folgen des Klimawandels für die Fließgewässer abzuleiten.

Mit den Wassertemperaturmodellen liegen für Bayern und Baden-Württemberg sowie in Bälde auch für Rheinland-Pfalz zudem wichtige Planungswerkzeuge vor, die auch die Basis für die Bearbeitung weiterer, spezifischer Fragestellungen bilden. Mit den LARSIM-WWM können z. B. auch Aufgaben im Rahmen der Genehmigung oder Überwachung anthropogener Wärmeeinleitungen bearbeitet werden. Zudem können die Modelle auch zur prognostischen Maßnahmenplanung genutzt werden. So kann mit den physikalisch basierten LARSIM-WWM beispielsweise die Wirkung von Klima-Anpassungsmaßnahmen wie der verstärkten Uferbepflanzung und Abschattung kleinerer Gewässer abgeschätzt werden.

6. Literatur

Aigner D., Haag I. (2017): Landesweites Primärmodell zur Simulation und Regionalisierung von Wassertemperaturen mit LARSIM, HYDRON GmbH im Auftrag der LUBW (Entwurf, unveröffentlicht).

Badde U., Bergfeld-Wiedemann T., Boderie P., Brahmer G., Demuth N., Haag I., Krahe P. (2014): Estimation of the effects of climate change scenarios on future Rhine water temperature development - Extensive Version. IKSR Report No. 214 en.

Caissie D. (2006): The thermal regime of rivers: a review, Freshwater Biology, 51, pp. 1389-1406

Chokmani K., Ouarda T. B. M. J. (2004): Physiographical space-based kriging for regional flood frequency estimation at ungauged sites, Water Resources Research, 40 (12), W12514 DOI: 10.1029/2003WR002983.

Crisp D. T. (1996): Environmental requirements of common riverrine European salmonid fish species in fresh water with particular reference to physical and chemical aspects, Hydrobiologia, 323, pp. 201-221.

Daufresne M., Bady P., Fruget J. F. (2007): Impacts of global change and extreme hydroclimatic events on macroinvertebrate community structures in the French Rhone River, Oecologia, 151, pp. 544-559.

Haag I. (2003): Der Sauerstoffhaushalt staugeregelter Flüsse am Beispiel des Neckars – Analysen, Experimente, Simulationen. Mitteilungen des Instituts für Wasserbau, Universität Stuttgart, Heft 122, 251 pp.

Haag I., Luce A. (2005): Untersuchungen zu Auswirkungen des Klimawandels auf Wassertemperaturen im mittleren Neckar, Ingenieurbüro Dr. Ludwig im Auftrag der LfU Baden-Württemberg (unveröffentlicht).

Haag I., Luce A., Badde, U. (2005): Ein operationelles Vorhersagemodell für die Wassertemperatur im Neckar, Wasserwirtschaft, 95(7/8), pp. 45-51.

Haag I. (2006): A basic water quality model for the River Neckar: Part 2 – model-based analysis and scenarios, Acta Hydrochimica et Hydrobiologica 34, pp. 549-559.

Haag I., Luce A. (2008): The integrated water balance and water temperature model LARSIM-WT, Hydrological Processes, 22, pp. 1046-1056.

Haag I. (2009): The potential impact of Climate Change on stream water temperatures. Report published by the WWF Germany, Frankfurt am Main.

Halle M. (2017): Klimawandel messen – der neue KLIWA-Index Makrozoobenthos, dieser Band.

Koehler G., Schwab M., Finke W., Belz J. (2007): Überblick zur Niedrigwasserperiode 2003 in Deutschland. Ursachen, Wirkungen, Folgen, Hydrologie und Wasserbewirtschaftung 51 (3), pp. 118-129.

Kremer M., Brahmer G. (2013): Simulation und Vorhersage von Wassertemperaturen an hessischen Fließgewässern. Jahresbericht 2012 des Hessischen Landesamtes für Umwelt und Geologie, Wiesbaden, pp. 31-38.

LAWA (1991): Grundlagen für die Beurteilung von Kühlwassereinleitungen in Gewässer, 3. Aufl., Erich Schmid Verlag.

LfU Bayern (2017): Vorhaben KLIWA – Klimawandel und Auswirkungen auf die Wasserwirtschaft: Fallstudien Niedrigwasser Naab und Sächsische Saale. HYDRON GmbH im Auftrag des LfU Bayern, Bericht des LfU Bayern (im Druck).

OGewV (2016): Oberflächengewässerverordnung vom 20. Juni 2016 (BGBl. I S. 1373).

Reinartz R. (2007): Auswirkungen der Gewässererwärmung auf die Physiologie und Ökologie der Süßwasserfische Bayerns. Bericht im Auftrag des LfU Bayern Referat 57 - Gewässerökologie (unveröffentlicht).

Sand-Jensen K., Pedersen N. L. (2005): Differences in temperature, organic carbon and oxygen consumption among lowland streams, Freshwater Biology, 50, pp. 1927-1937.

Seibert M., Schweppe R., Preuß P., Haag I., Gerlinger K. (2017): Simulationen des Wasserhaushalts und der Wassertemperatur für die Einzugsgebiete in Baden-Württemberg sowie für das Einzugsgebiet des Rheins (bis Pegel Maxau) mit den beiden Klimaprojektionen COSMO-CLM-5.0 run1 und RCA4 run12 (Emissionsszenario RCP8.5), HYDRON GmbH im Auftrag der LUBW (unveröffentlicht).

Webb B. W., Nobilis F. (2007): Long-term changes in river temperature and the influence of climatic and hydrological factors, Hydrological Sciences-Journal-des Sciences Hydrologiques, 52, pp. 74-85.

Webb B. W., Zhang Y. (1997): Spatial and seasonal variability in the components of the river heat budget, Hydrological Processes, 11, pp. 79-101.

Willems W., Stricker K. (2013): Erstellung eines Wassertemperatur-Regionalmodells zur Ermittlung von Wassertemperaturen für bayerische Gewässer. IAWG im Auftrag des LfU Bayern (unveröffentlicht).

Willems W., Stricker K. (2014): Wassertemperatur-Projektionen für bayerische Fließgewässer. IAWG im Auftrag des LfU Bayern (unveröffentlicht).

Willems W., Stricker K. (2017): Langzeitverhalten von Niedrigwasserabflüssen und Wassertemperaturen in Bayern sowie Wassertemperaturen in Baden-Württemberg, Fortschreibung und Erweiterung. IAWG im Auftrag des LfU Bayern und der LUBW (unveröffentlicht).

Zu einer höher aufgelösten Starkregenkartierung mit Hilfe des Wetterradars

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

1. Einleitung

Radarsysteme sind ein elementarer Bestandteil der Wetterbeobachtung und des Monitorings extremer Niederschlagsereignisse. Im Vergleich zu Stationsdaten detektieren sie aufgrund der flächendeckenden Messung auch kleinräumige Niederschlagsereignisse wie einzelne Konvektionszellen, die aufgrund ihres lokalen Auftretens vom klassischen Stationsnetz unter Umständen nicht erfasst werden.

Mittlerweile stehen die hoch aufgelösten und flächendeckenden Niederschlagsdaten auf der Basis des deutschlandweiten Radarmessnetzes für einen Zeitraum zur Verfügung, der erste Schritte in Richtung einer klimatologischen Analyse der Daten erlaubt.

Um das Starkregenrisiko in Deutschland besser zu verstehen und den gesellschaftlichen Umgang damit – von der langfristigen strategischen Planung bis hin zu kurzfristigen operativen Maßnahmen – zu verbessern, hat die Strategische Behördenallianz „Anpassung an den Klimawandel“ zwischen 2014 und 2017 das Projekt „Radarklimatologie“ durchgeführt, das im Kontext der Deutschen Anpassungsstrategie an den Klimawandel (DAS) und des Aktionsplanes Anpassung der Deutschen Anpassungsstrategie an den Klimawandel (APA) steht.

Zentraler Bestandteil des Projekts war eine erste klimatologische Aufbereitung der radarbasierten Niederschlagsdaten für Deutschland zur Erfassung und statistischen Auswertung des Auftretens von Starkregen.

2. Das Projekt „Radarklimatologie“ der Strategischen Behördenallianz

In der Strategischen Behördenallianz arbeiten aktuell die folgenden Behörden auf der Basis einer Kooperationsvereinbarung zusammen:

- Bundesamt für Bevölkerungsschutz und Katastrophenhilfe
- Bundesanstalt Technisches Hilfswerk
- Deutscher Wetterdienst
- Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung
- Umweltbundesamt

Die Partner führen ihre Expertise zusammen, um fachübergreifend Strategien zur Verringerung der Verwundbarkeit gegenüber Klimaänderungen bzw. zur Steigerung der Anpassungsfähigkeit zu entwickeln. Voraussetzung hierfür ist ein genaues Verständnis von den Klimaänderungen und deren Folgen für Aufgaben des Bevölkerungsschutzes bzw. der räumlichen Planung. Die Strategische Behördenallianz „Anpassung an den Klimawandel“ führt gemeinsam Forschungsprojekte durch, deren Ergebnisse der Öffentlichkeit zugänglich gemacht werden.

Im Sommer 2017 wurde das Projekt „Erstellung einer dekadischen radargestützten hochauflösenden Niederschlagsklimatologie für Deutschland zur Auswertung der rezenten Änderung des Extremverhaltens von Niederschlag (Kurztitel: Radarklimatologie)“ erfolgreich abgeschlossen (Winterrath et al., 2017). Im Rahmen der Projektarbeiten wurden die Niederschlagsdaten des Boden- und Radarnetzwerkes des Deutschen Wetterdienstes für die Peri-

ode 2001 bis 2016 unter Anwendung des RADOLAN-Verfahrens zusammengeführt und für die klimatologische Nutzung aufbereitet und ausgewertet. 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. Zum ersten Mal existiert eine flächendeckende, quantitative Niederschlagsanalyse in hoher räumlicher und zeitlicher Auflösung für Deutschland, die nahezu alle Extremniederschläge von 2001 bis 2016 beinhaltet und einen neuartigen Datenschatz für die Kartierung von Starkregen darstellt. 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.

3. Die Niederschlagsanalyse

Zur Messung des Niederschlags betreibt der Deutsche Wetterdienst im Wesentlichen zwei Messnetze: ein Stationsmessnetz für quantitative Punktmessungen sowie ein deutschlandweites Radarmessnetz für die qualitative flächendeckende Messung der Niederschlagsreflektivität. Die Vorteile beider Messmethoden werden im RADOLAN-Verfahren (Weigl und Winterrath, 2010; Winterrath et al, 2012) ausgenutzt, um einen optimierten, quantitativen, flächendeckenden Niederschlagsdatensatz für Deutschland zu generieren. Hierbei werden die radarbasierten Niederschlagsmessungen mit den Stationsmessungen zu einem quantitativen flächenhaften Produkt verschnitten. Das RADOLAN-Verfahren, das in der operationellen Echtzeitanwendung stündlich angeeichte Niederschlagsprodukte erstellt und für den Hochwasserschutz bereitstellt, ist die Basis für die Auswertung der Daten ab 2001 im Rahmen der Radarklimatologie.

Der Deutsche Wetterdienst betreibt ein Radarnetz aus 17 C-Band-Doppler-Radargeräten (Abb. 1). Bis auf das Radar Emden wurden alle Standorte in den letzten Jahren auf moderne Dual-Pol-Technologie umgerüstet. Die Atmosphäre wird kontinuierlich in verschiedenen Höhen abgetastet, so dass alle fünf Minuten ein flächendeckendes Bild der Niederschlagsverteilung für das Bundesgebiet entsteht. Das Radarnetz erfasst somit alle Niederschlagsereignisse, auch solche, die sehr kleinräumig sind und durch das Bodenmessnetz nicht lückenlos erfasst werden können. Im Rahmen der Radarklimatologie wurden die Reflektivitätsmessungen des bodennahen Niederschlagsscans verwendet.

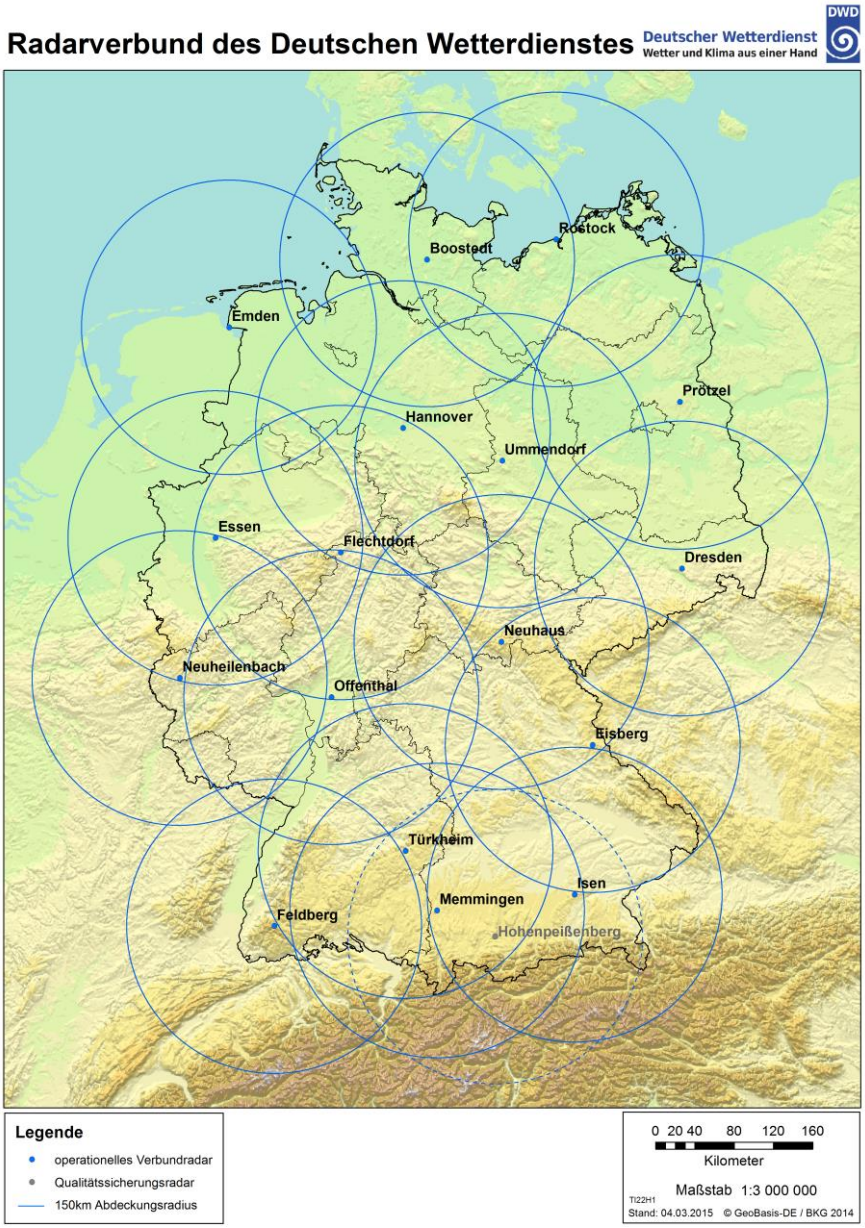


Abbildung 1. Radarverbund des Deutschen Wetterdienstes.

Das umfangreiche Bodenniederschlagsmessnetz umfasst aktuell gut 2 000 Stationen deutschlandweit, an denen Niederschlag gemessen wird, wobei rund die Hälfte der Messsysteme automatisiert ist, sodass die Daten in Echtzeit zur Verfügung stehen. Der Vorteil der Systeme besteht in der direkten Niederschlagsmessung, die allerdings nur punktweise erfolgt. Da die Automatisierung des Stationsmessnetzes im Verlauf des betrachteten Zeitraums erfolgte, lagen zu Beginn des Reanalysezeitraums nur Daten von ca. 150 Stationen in stündlicher Auflösung vor. Im Gegensatz dazu lag die Anzahl der Tageswertstationen bei ungefähr 4 000. Aus diesem Grund wurden die Tageswerte des Niederschlags im Rahmen der Radarklimatologie über einen Disaggregierungsansatz in die Aneichung eingebracht. Abbildung 2 zeigt alle DWD-Stationen, an denen im Zeitraum von 2001 bis 2016 Niederschlagsmessungen erfolgten. Die Berücksichtigung der Daten führte zu einer deutlichen Qualitätsverbesserung der RADOLAN-Analyse, insbesondere in den ersten Jahren des Reanalysezeitraums.

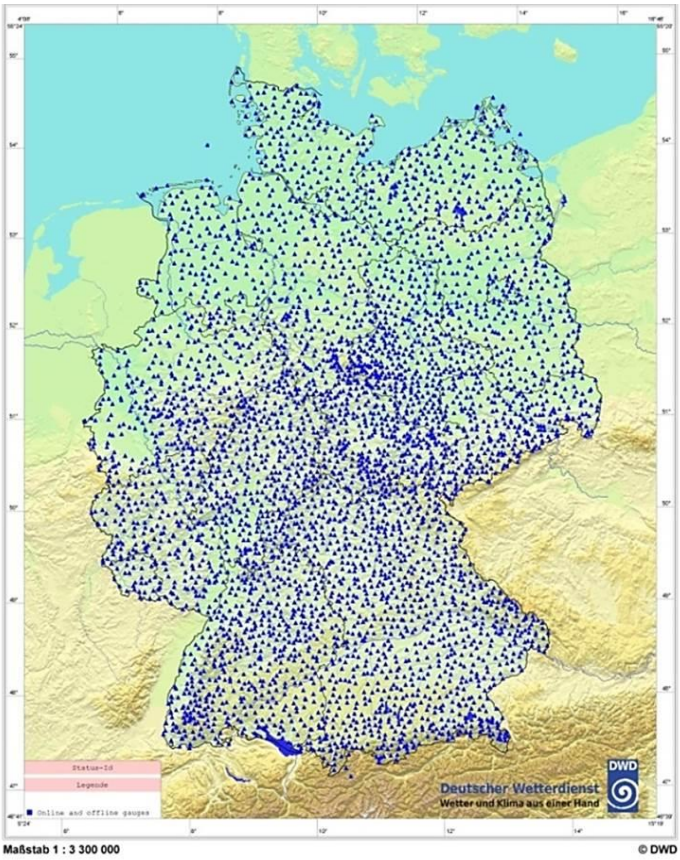


Abbildung 2. DWD-Niederschlagsmessnetz für die Zeit von 2001 bis 2016.

4. Die Anwendungen

Mit der radarbasierten Reanalyse der Niederschlagsdaten seit 2001 liegt nunmehr zum ersten Mal ein klimatologischer Datensatz vor, der deutschlandweit alle extremen, auch lokalen und kurzfristigen, Niederschläge umfasst. Wichtige Anwendungen der radarbasierten Niederschlagsanalyse sind die extremwertstatistische Auswertung der Niederschlagszeitreihen sowie die retrospektive Auswertung extremer Niederschlagsereignisse sowie deren Einordnung in den klimatologischen Kontext.

4.1 Statistische Niederschläge

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. Der Fokus der Radarklimatologie liegt 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.

Um die Starkniederschläge im Zeitraum der Radarklimatologie statistisch zu erfassen, wurde eine extremwertstatistische Auswertung entsprechend DWA-A 531 (DWA, 2012) durchgeführt. Die verwendete Methode entspricht somit im Großen und Ganzen dem Verfahren in KOSTRA-DWD (Malitz und Ertel, 2015) und erlaubt einen qualitativen Vergleich der Ergebnisse auf der Basis der verschiedenen Datensätze. Aufgrund der unterschiedlichen Messme-

thoden und der unterschiedlichen betrachteten Zeitspannen (1951-2010 für KOSTRA-DWD 2010 sowie 2001-2016 für die Radarklimatologie) sind Unterschiede in den Daten zu erwarten. Ein Vergleich zeigt aber schon jetzt interessante Fragestellungen für zukünftige Untersuchungen auf.

Abbildungen 3 und 4 zeigen die statistischen Niederschläge für eine Dauerstufe von 24 Stunden und einer Wiederkehrzeit von einem Jahr. Die räumlichen Muster der Ergebnisse sind in diesem Fall sehr ähnlich und stark durch die Orographie geprägt. Vergleicht man hingegen die statistischen Niederschläge für die Dauerstufe von einer Stunde und einer Wiederkehrzeit von 20 Jahren, so zeigen sich sehr unterschiedliche Muster (Abb. 5 und 6). Die Ergebnisse der radarbasierten Daten sind deutlich heterogener. Während im Fall der stationsbasierten Analyse auch die Maxima für die kurzfristigen, seltenen Ereignisse stark an die Orographie gebunden sind, ist dies basierend auf den Radardaten nicht mehr gegeben.

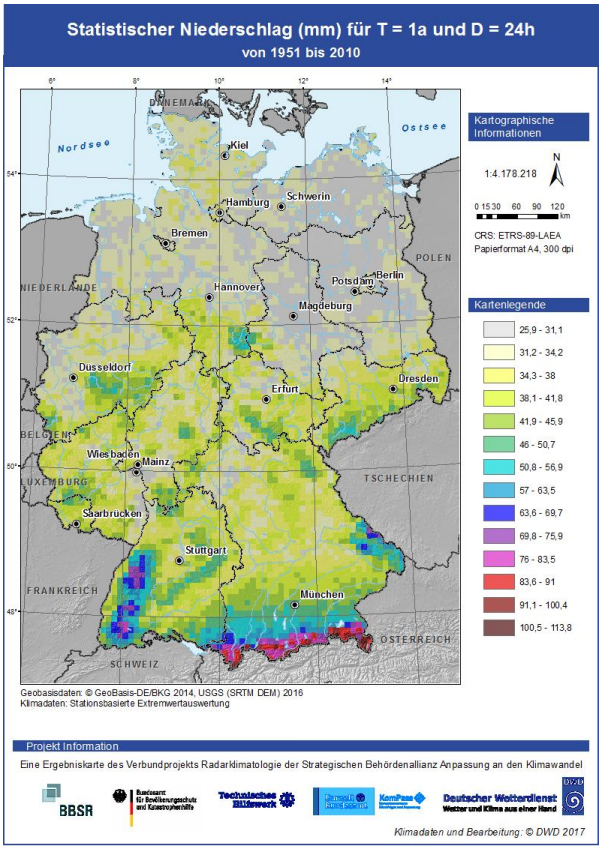


Abbildung 3. Statistischer Niederschlag auf Basis langjähriger Stationszeitreihen von 1951 bis 2010, Dauerstufe = 24 h, Wiederkehrzeit = 1 a.

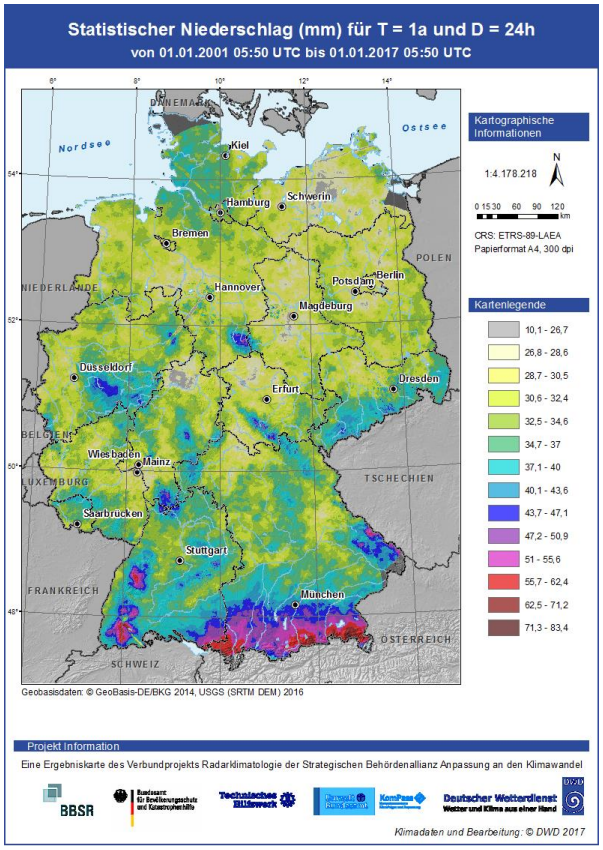


Abbildung 4. Statistischer Niederschlag auf Basis der Radarklimatologie von 2001 bis 2016, Dauerstufe = 24 h, Wiederkehrzeit = 1 a.

Ursächlich für die unterschiedlichen Ergebnisse könnte sein, dass die räumliche Verteilung der lokal begrenzten Extremereignisse durch das Stationsmessnetz nur unzureichend erfasst werden kann und die räumliche Interpolation im Falle kleinräumiger Starkregen den Einfluss der Orographie zu stark betont. Eine weitere mögliche Ursache für die Diskrepanz liegt aber auch in der noch sehr kurzen Zeitreihe der radarbasierten Auswertung, die insbesondere für die seltenen Ereignisse keine statistisch belastbaren Ergebnisse erlaubt. Hierzu sind weiterführende Untersuchungen der Daten notwendig.

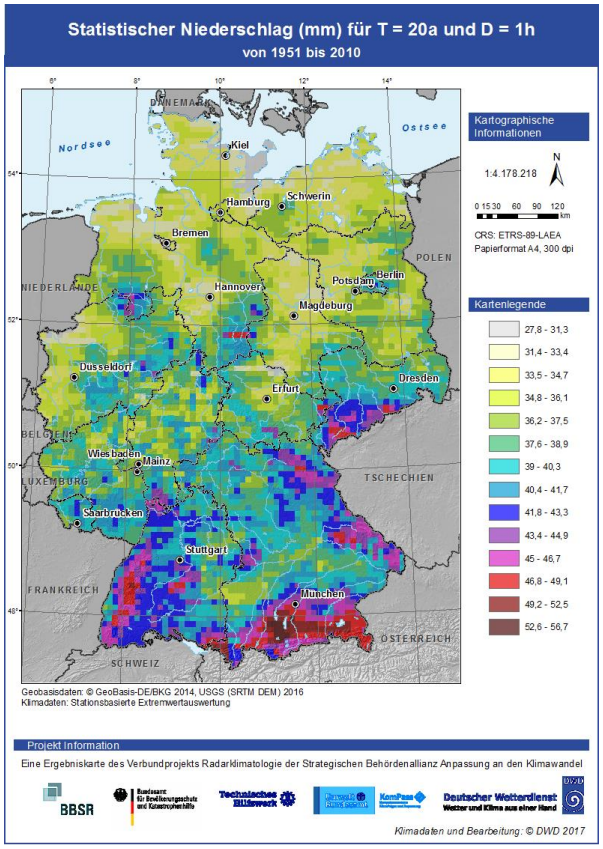


Abbildung 5. Statistischer Niederschlag auf Basis langjähriger Stationszeitreihen von 1951 bis 2010, Dauerstufe = 1 h, Wiederkehrzeit = 20 a.

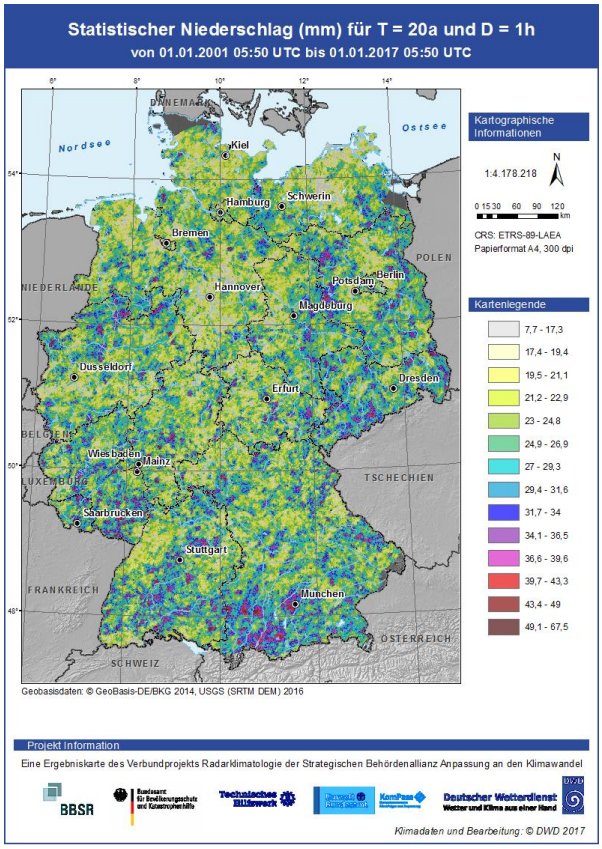


Abbildung 6. Statistischer Niederschlag auf Basis der Radarklimatologie von 2001 bis 2016, Dauerstufe = 1 h, Wiederkehrzeit = 20 a.

4.2 Ereignisanalyse

Abbildung 7 zeigt die Analyse des extremen Niederschlagsereignisses vom 31. Mai und 01. Juni 2016 im Raum Simbach, das zu katastrophalen Überschwemmungen geführt hat. Die zweitägigen Niederschlagsmengen übertrafen in weiten Teilen der Region den KOSTRA-DWD-Wert für ein 100-jährliches Ereignis. Das andauernde Niederschlagsereignis wurde dabei noch durch eine kurzfristige Intensivierung der Niederschlagsintensität verstärkt, was zu einem sprunghaften Anstieg des Pegels Simbach führte. Ausgelöst durch den extremen Niederschlag kam es zu starken Erosionsschäden. Abbildung 8 zeigt die zugehörigen Erosivitäten des Niederschlags (R-Faktor) für Bayern im Jahr 2016. Die extremen Werte der Niederschlagserosivität im Bereich Simbach sind deutlich erkennbar. Im Zeitraum Mai/Juni 2016 kam es in Bayern verbreitet zu extremen Niederschlagsereignissen mit Erosivitätswerten in der Größenordnung mittlerer Jahreswerte (Brandhuber et al., 2017).

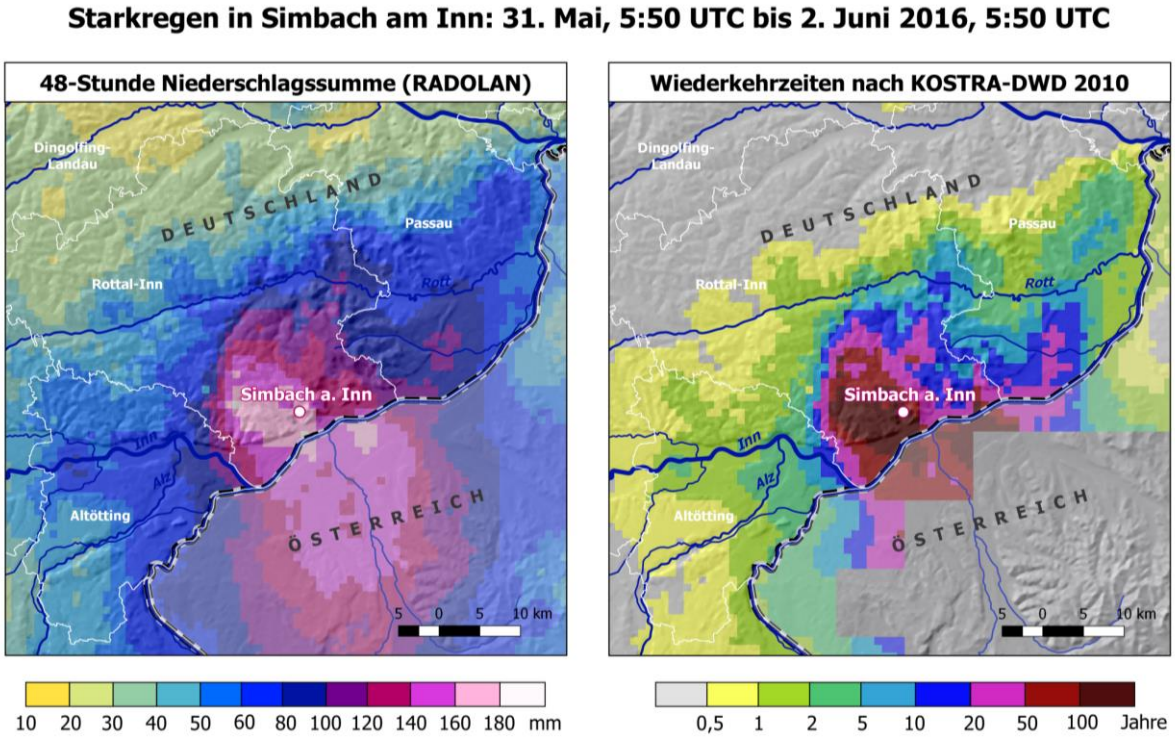


Abbildung 7. Radarbasierte Niederschlagsauswertung für das Niederschlagsereignis in Simbach am 31. Mai und 01. Juni 2016; links: 48-Stunden-Niederschlagssumme; rechts: Wiederkehrzeiten der radarbasierten Niederschlagsmengen nach KOSTRA-DWD 2010.

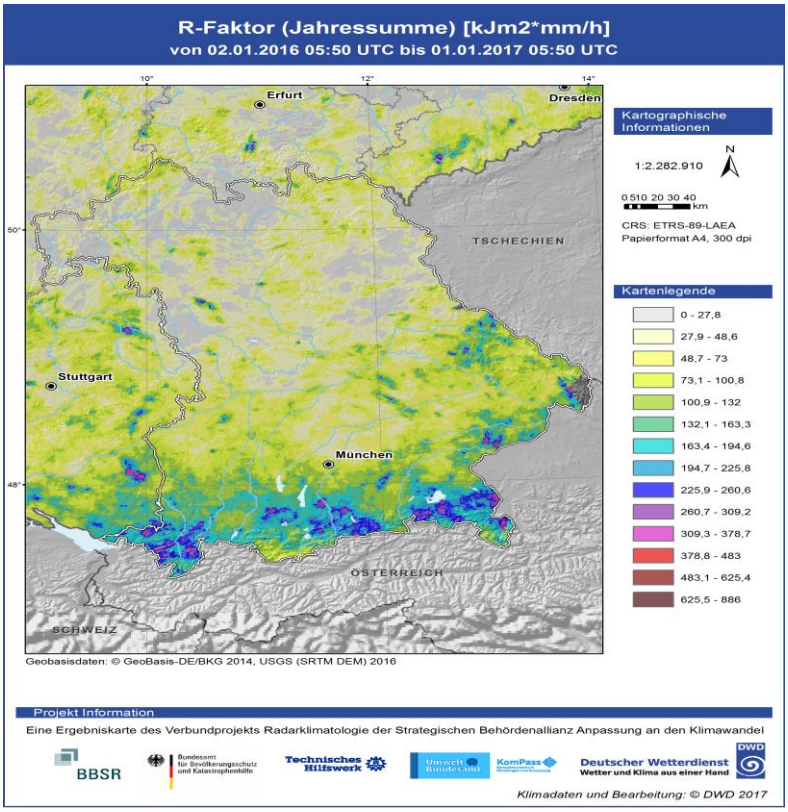


Abbildung 8. Summe der Regenerosivitäten aus radarbasierten Niederschlagsanalysen für Bayern für den Zeitraum Mai und Juni 2016.

5. Zusammenfassung

Im Rahmen des Projekts „Radarklimatologie“ der Strategischen Behördenallianz „Anpassung an den Klimawandel“ erfolgte eine Reprozessierung der deutschlandweiten, radarbasierten Niederschlagsmessungen unter Verwendung des RADOLAN-Verfahrens. Zum ersten Mal liegt damit eine flächendeckende, quantitative Niederschlagsanalyse in hoher räumlicher und zeitlicher Auflösung für Deutschland vor, die nahezu alle Starkniederschläge von 2001 bis 2016 beinhaltet. Der Datensatz schafft die Grundlage für vorbereitende Maßnahmen im Bevölkerungsschutz, unterstützt eine „wassersensible“ Raumgestaltung in der Landschafts- und Stadtplanung und als Instrument des vorbeugenden Hochwasserschutzes und dient der Erosionsüberwachung in der Landwirtschaft.

6. Literatur

Brandhuber R., Treisch M., Fischer F., Kistler M., Maier H., Auerswald K. (2017): Starkregen, Bodenerosion, Sturzfluten - Beobachtungen und Analysen im Mai/Juni 2016; Schriftenreihe der Bayerischen Landesanstalt für Landwirtschaft.

DWA (2012): Starkregen in Abhängigkeit von Wiederkehrzeit und Dauer, Arbeitsblatt DWA-A 531.

Malitz G., Ertel H. (2015): KOSTRA-DWD-2010, Starkniederschlagshöhen für Deutschland (Bezugszeitraum 1951 bis 2010). Deutscher Wetterdienst, Offenbach am Main.

Weigl E., Winterrath T. (2010): Radargestützte Niederschlagsanalyse und –vorhersage (RADOLAN, RADVOR-OP) promet, Jahrg. 35, Nr. 1/2, pp. 78-86.

Winterrath T., Brendel C., Junghänel T., Klameth A., Walawender E., Hafer M., Weigl E. (2017): Erstellung einer radargestützten Niederschlagsklimatologie (Volltitel: Erstellung einer dekadischen radargestützten hoch-auflösenden Niederschlagsklimatologie für Deutschland zur Auswertung der rezenten Änderung des Extremverhaltens von Niederschlag) - Ein Projekt der Strategischen Behördenallianz „Anpassung an den Klimawandel“ von UBA, THW, BBK, BBSR und DWD, Abschlussbericht. 72 Seiten.

Winterrath T., Rosenow W., Weigl E. (2012): On the DWD quantitative precipitation analysis and nowcasting system for real-time application in German flood risk management, IAHS Publ. 351, pp. 323-329.

Starkregenrisikomanagement – Untersuchungen in Pilotgebieten

Prof. Dr. Markus Weiler, Dr. Stefan Pohl, Dipl. Hyd. Andreas Steinbrich
Universität Freiburg

1. Einleitung

Starkniederschläge haben in den letzten Jahren an vielen Orten zu erheblichen Schäden geführt. Bisher ist es sehr schwierig, für solche lokalen Ereignisse eine Risikoabschätzung durchzuführen, da schon die Abschätzung des Oberflächenabflusses, der bei solchen Ereignissen generiert wird, sehr komplex ist. Ein Hauptgrund dafür ist, dass es fast keine Beobachtungen solcher Ereignisse vorliegen, da diese Ereignisse häufig in kleinen Gerinnen, die nicht kontinuierlich beobachtet werden, oder an Hängen, wo keine permanenten Gerinne vorkommen, stattfinden. Somit muss ein anderer Ansatz gewählt werden, um für solche Ereignisse die Gefährdung zu bestimmen.

Die Universität Freiburg hat in Zusammenarbeit mit der LUBW ein neues Verfahren entwickelt, aus dem konsistente Oberflächenabflusskennwerte für ganz Baden-Württemberg erstellt wurden (https://www.lubw.baden-wuerttemberg.de/wasser/starkregen). Diese Daten bilden somit die Grundlage für weitere detailliertere hydraulische Modellierungen des Oberflächenabflusses, um zum Beispiel Fließgeschwindigkeit oder Wassertiefe zu ermitteln und damit dann eine zielführende Risikoabschätzung durchzuführen. In diesem Beitrag werden Ergebnisse von zwei Fallbeispielen vorgestellt – Bonndorf und Bretten – wo vor zwei Jahren Starkniederschläge niedergingen. Außerdem werden nochmal die wichtigsten Grundlagen und das Modell RoGeR eingeführt, die Relevanz von Radar- und Stationsdaten für die Niederschlagsbeobachtungen diskutiert und insgesamt an den Fallbeispielen das Problemfeld Starkregenrisikomanagement diskutiert.

2. Starkregenmodellierung mit RoGeR

Als Grundlage für die Ermittlung der Oberflächenabflusskennwerte dient das Model RoGeR (Runoff Generation Research Model). RoGeR ist ein ereignisbasiertes Niederschlag-Abflussmodell, das anhand von Erkenntnissen aus der internationalen Abflussforschung unter Nutzung hoch aufgelöster digitaler räumlicher Daten die Abflussbildungsprozesse in der Fläche quantifiziert. RoGeR berücksichtigt alle für die Abflussbildung relevanten Prozesse (Bild 1) und bildet diese in hoher räumlicher (bis zu 1*1 m²) und zeitlicher (bis zu 1 Minute) Auflösung ab.

Die Parametrisierung von RoGeR erfolgt aufgrund von digitalen, räumlich verteilten Daten wie:

- Bodenkarte 1:50.000 (BK50),
- Hydrogeologischen Karte 1:50.000 (HGK50)
- Versiegelungsgrad der Landoberfläche 1*1 m²
- Laser Scan Daten 1*1 m²
- CORINE Bodenbedeckungsdaten für Deutschland.

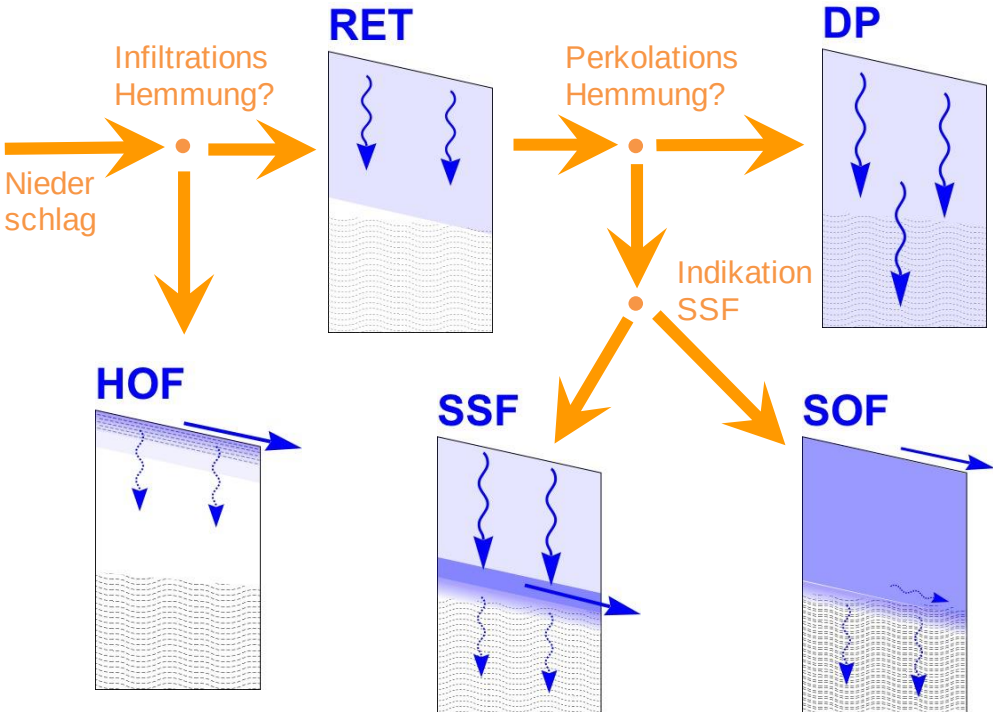


Abbildung 1. Abflussbildungsprozesse, die in RoGeR implementiert sind basierend auf den Grundlagen des neuen DWA Merkblattes „Bodenhydrologische Kartierung und Modellierung“.

RoGeR ist außerdem in der Lage, räumlich verteilte Informationen zur Bodenfeuchte und somit die herrschenden Vorfeuchtebedingungen zu berücksichtigen. Damit wird der Infiltrationsprozess zeitlich dynamisch in Abhängigkeit vom beobachteten Niederschlagsgeschehen oder von statistisch ermittelten Extremwertereignissen abgebildet. Außerdem kann RoGeR den Einfluss der Bodenverschlämmung, sowie die Dynamik von Trockenrissen implizit modellieren.

Aufgrund der räumlich verteilten Parametrisierung ist RoGeR in ganz Baden-Württemberg für beliebig große Gebiete (von einzelnen Hängen und Kleinsteinzugsgebieten bis zum Flussgebiet) einsetzbar ohne dass eine Kalibrierung des Modells erforderlich ist. Die Eignung von RoGeR extreme Abflussereignisse abzubilden wurde anhand von 33 beobachteten Hochwasserereignissen in 13 Testeinzugsgebieten (3-170 km²) in Baden-Württemberg getestet (Steinbrich et al. 2016). Die Tests haben gezeigt, dass das Modell die Abflussreaktion in den großen Pegeleinzugsgebieten gut vorhersagen kann, ohne dass RoGeR lokal kalibriert werden muss.

Zusammen mit der LUBW haben wir im letzten Jahr ein Konzept entwickelt, um Beregnungsversuche durchzuführen, um das Modell für diese extremen Bedingungen zu validieren. Man könnte sagen: Beregnungsversuche, das hat man schon vor 30 Jahren gemacht, was lernen wir da Neues? Aber wir haben die Beregnungsversuche entsprechend konzipiert um direkt zu messen, wie sich eine Fläche von 100 m^2 bei solchen Starkregenereignissen verhält.

Die Beregnungsversuche wurden entweder auf einer Wiese oder auf einem Acker durchgeführt. Dazu beregnen wir im Grunde eine Fläche von etwa 300 m^2, verwenden aber nur die inneren 100 m^2, um den resultierenden Oberflächenabfluss oder Zwischenabfluss zu messen so dass Randeffekte keine große Rolle spielen können. Wir messen außerdem die Bodenfeuchte, den Grundwasserspiegel, Erosion, Nährstoffaustrag und können verschiedenste Arten von Niederschlagsintensitäten (ca. 30 bis 160 mm/h) und -dauern applizieren für verschiedene Vorfeuchten. Aus einer Reihe von Standorten, die wir in 2016 beregnet haben,

wurden zwei Standorte ausgewählt: eine Wiese am Schönberg, in der Nähe von Freiburg, ein Pelosol im Unterjura und ein Acker bei Freiamt, ein Braunerde-Pseudogley im unteren Muschelkalk. In Abbildung 2 sind die Ergebnisse an den beiden Standorten für 100 jährliche 1-Stunden-Ereignisse und zwei unterschiedliche Vorfeuchtebedingungen dargestellt. Auf dem Acker in Freiamt wird relativ schnell Oberflächenabfluss produziert, auf der Wiese in Schönberg nicht. Unter feuchten Vorbedingungen sieht es recht ähnlich aus, trotz sehr tonigen Böden am Schönberg konnten wir kaum Oberflächenabfluss messen. Der Boden konnte aufgrund seiner Strukturbildung und seiner Schwundrisse relativ viel Niederschlag aufnehmend. Am Standort Freiamt hingegen traten schnell sehr hohe Oberflächenabflüsse auf, mit Abflusskoeffizienten von etwa 80 bis 90 %. RoGeR simulierte die Abflussbildung mit den Parametern, die wir vor Ort erhoben haben. Generell reproduziert das Modell die beobachteten Abflüsse sehr zufriedenstellend, auch die extremen Unterschiede bei der Abflussbildung und den Einfluss von Schwundrissen und Makroporen.

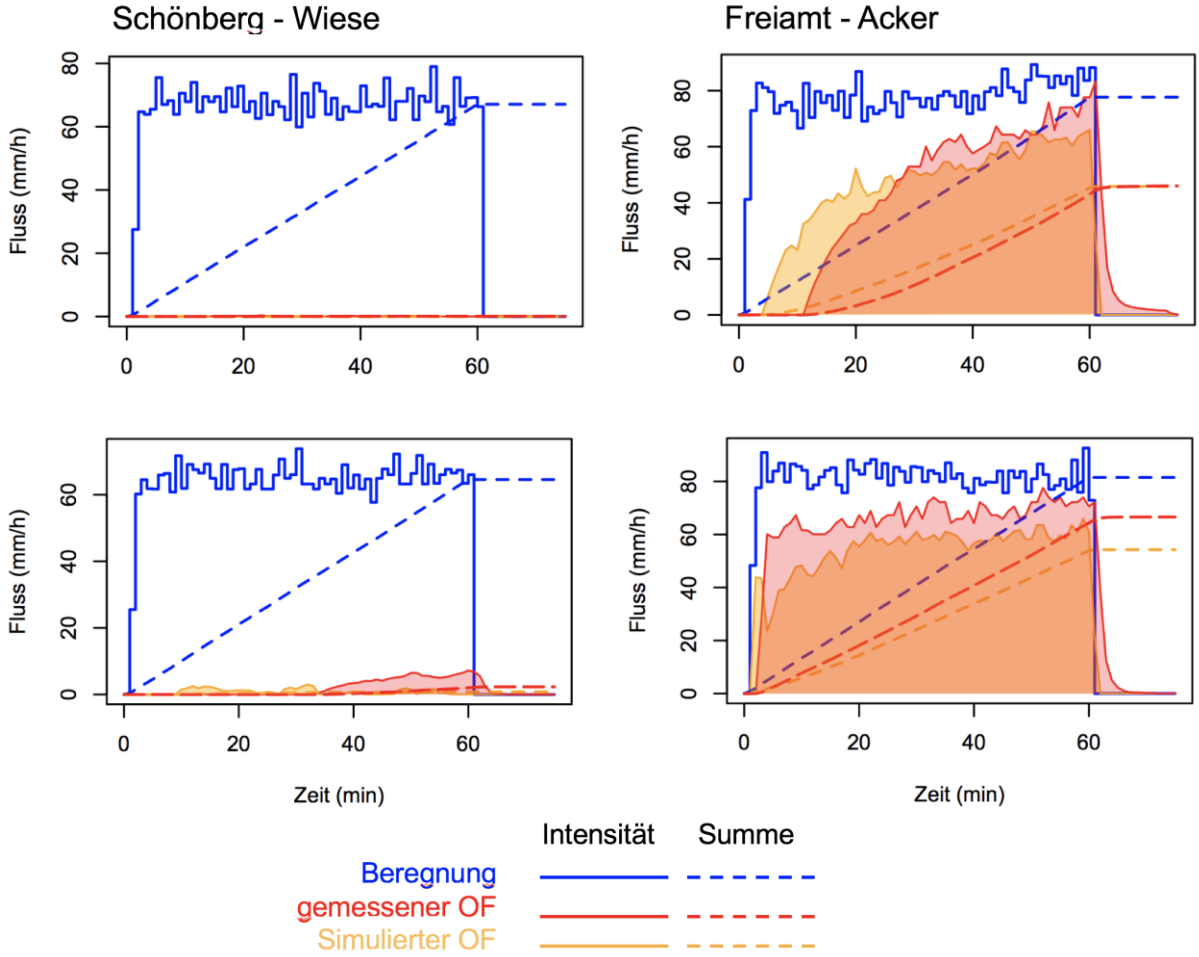


Abbildung 2. Gemessener und mit RoGeR simulierter Oberflächenabfluss an zwei Standorten für ein 100-jähriges Niederschlagsereignis der Dauer 1 h für trockene Vorbedingungen (oben) und feuchte Vorbedingungen (unten).

Dadurch und aufgrund seiner universellen Einsetzbarkeit in den unterschiedlichen Naturräumen in Baden-Württemberg ist RoGeR prädestiniert, die Abflussbildung bei extremen Starkniederschlägen für verschiedene Vorbedingungen (Bodenfeuchte, Rissbildung, saisonale Ausstattung wie Bodenbearbeitungstand von Ackerböden und Belaubungsgrad von Bäumen) zu quantifizieren.

Zur Ermittlung der flächenhaften Oberflächenabflusswerte in Baden-Württemberg (B-W) wurden im ersten Schritt für festgelegte, extreme lokale Niederschlagsereignisse einer Dauer

von einer Stunde mit Wiederkehrintervallen von 30 und 100 Jahren (selten, außergewöhnlich) sowie einem „Extrem“-Szenario die daraus lokal in der Fläche gebildeten Abflüsse modelliert. Da zu Beginn der Studien die neuen KOSTRA-Daten noch nicht vorlagen, und da diese für sehr kurze Dauern Unsicherheiten in der räumlichen Struktur zeigen, wurde an der Professur für Hydrologie eigens ein neues Verfahren entwickelt, um für verschiedene Dauerstufen und Jährlichkeiten Bemessungsniederschläge für Starkregen flächendeckend für B-W zu bestimmen. Die räumliche Datengrundlage dafür ist sehr gut, da ca. 350 Niederschlagsstationsdatensätzen mit einer zeitlichen Auflösung von <5 min zur Verfügung standen. Da jedoch erhebliche Unterschiede in Bezug auf die Länge der Zeitreihen bestehen, wurde ein „Mutter-Tochter-Konzept“ entwickelt, um Niederschlagsereignisse innerhalb von ähnlichen Naturräumen auf andere Stationen zu übertragen und somit längere Zeitreihen zu erhalten. Durch die Zeitreihenverlängerung konnte eine konsistentere Extremwertstatistik für alle Stationen mit einer gepoolten Zeitreihendauer von 100 Jahren durchgeführt werden. Die Paretoverteilung zeigte im Vergleich zur üblicherweise verwendeten Exponentialverteilung größere Flexibilität in der Anpassung an die Daten und kleinere Abweichungen hinsichtlich der größten beobachteten Ereignisse. Auch räumlich ist bei der Paretoverteilung daher von einer differenzierteren Regionalisierung der Niederschlagsmengen auszugehen. Daher wurde für Wiederkehrintervalle von 100 Jahren und kleiner die Paretoverteilung verwendet. Bild 3 zeigt für unterschiedliche Dauerstufen und 100-jährlichen Ereignisse die räumlichen Muster der Starkniederschläge in B-W.

Es wurden dann verschiedene Szenarien definiert, um die Oberflächenabflüsse für unterschiedliche Niederschlagsereignisse, Vorfeuchtebedingungen und Bedeckungen der Ackerflächen (mit und ohne Vegetation und die daraus resultierende mögliche Verschlämmung der Böden) zu realisieren.

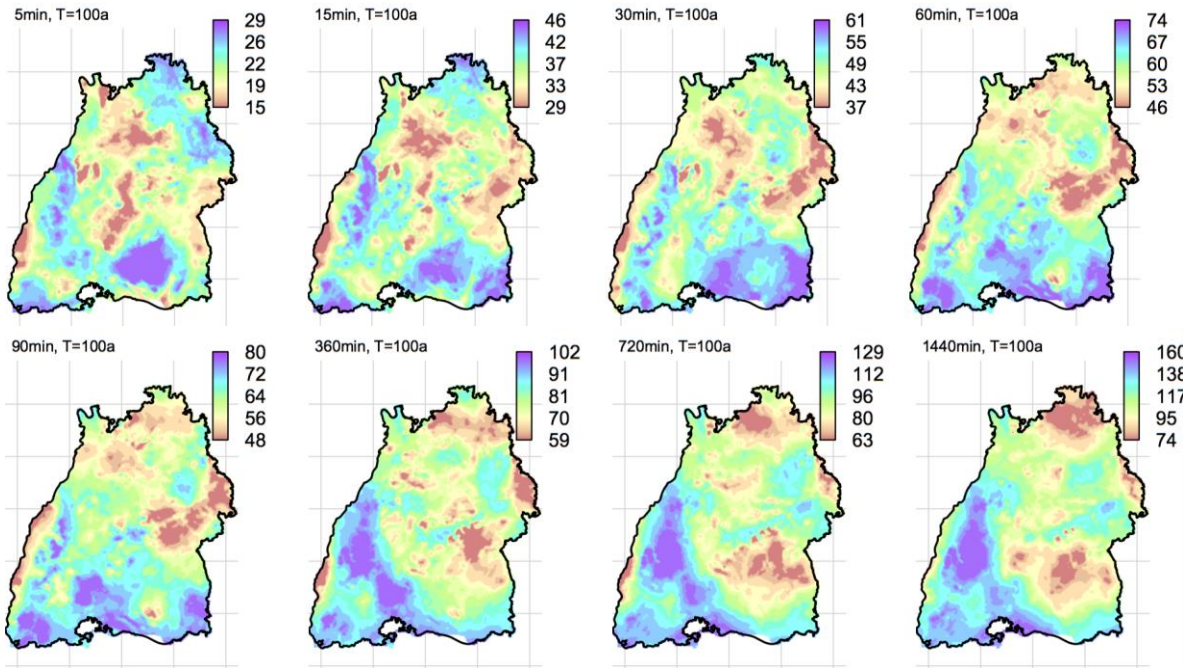
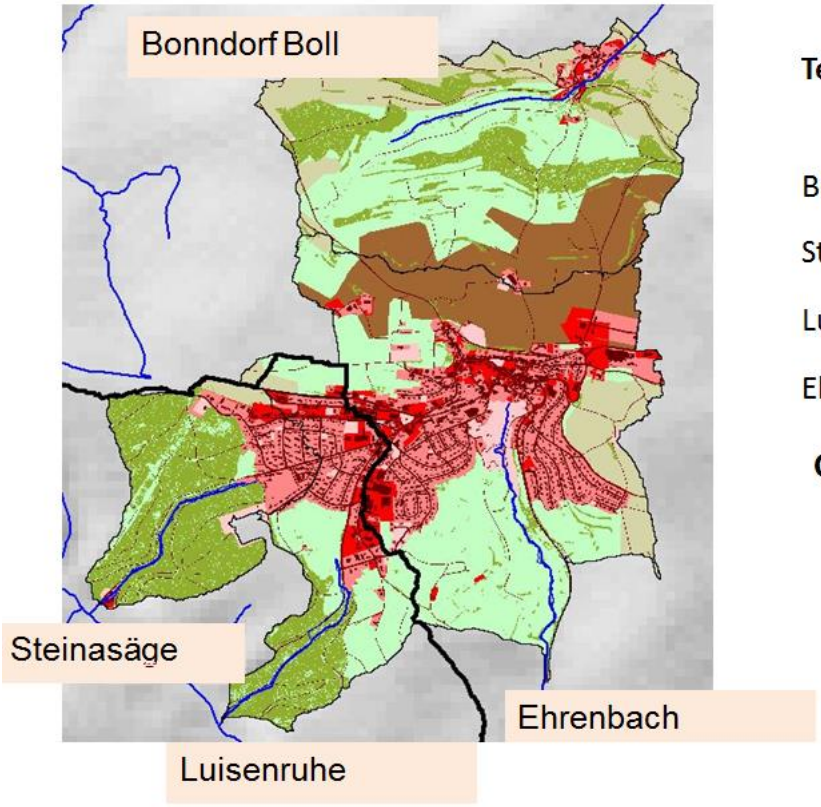


Abbildung 3. Räumliche Verteilung der Bemessungsniederschläge (mm) für die Jährlichkeit T=100 Jahre für B-W und für verschiedene Dauerstufen.

3. Ergebnisse der Fallstudien

3.1 Bonndorf

Bonndorf liegt im südlichen Schwarzwald auf einem Höhenrücken. Da die nächsten Flüsse Wutach und Steina relativ weit entfernt sind, werden im Stadtbereich keine Flächen der Hochwassergefahrenkartierung ausgewiesen. Abbildung 4 zeigt die vier Einzugsgebiete, die vom Höhenrücken in West-Ost Ausdehnung nach Norden und Süden drainieren.



Teilgebiete	Fläche [km²]
Boll	2.61
Steinsäge	1.07
Luisenruhe	0.98
Ehrenbach	3.14

Gesamtfläche: 7,8 km²

Abbildung 4. Einzugsgebiete im Bereich der Stadt Bonndorf, die bei der Starkregenmodellierung berücksichtigt wurden.

Die beobachteten maximalen Niederschlagsmengen am 14.6.2015 für die unterschiedlichen Dauerstufen zeigen einen großen Unterschied zwischen Stationsbeobachtungen und Radardaten (Abbildung 5 links), wobei für eine Dauer von 30 Minuten das Ereignis als ein 100-jährliches Ereignis einzustufen ist und bezüglich der kürzeren Dauern als extrem zu beurteilen ist. Zusätzlich hat dieses Ereignis Bonndorf zentral mit den höchsten Intensitäten im Stadtgebiet getroffen. Die Analyse zeigt außerdem, dass Stundensummeninformationen bei Starkregen oft wenig aussagekräftig sind um das Ereignis adäquat zu charakterisieren, weil sie die hohe zeitliche Variation nicht abbilden. Da einerseits die 5-Minuten-Radardaten nicht geeicht sind und an Ombrometerdaten geeichte Radardaten nur als Stundensummen verfügbar sind, haben wir ein Verfahren entwickelt, bei dem eine Boltzmannverteilung an die korrigierten 1h-RADOLAN-Daten angepasst wird um 5-minütige Radarprodukte zu erzeugen (siehe auch Steinbrich und Weiler, 2016). Diese Methode war für das Ereignis vom 14.6.2015 in Bonndorf sehr erfolgreich, um den Intensitätsverlauf darzustellen.

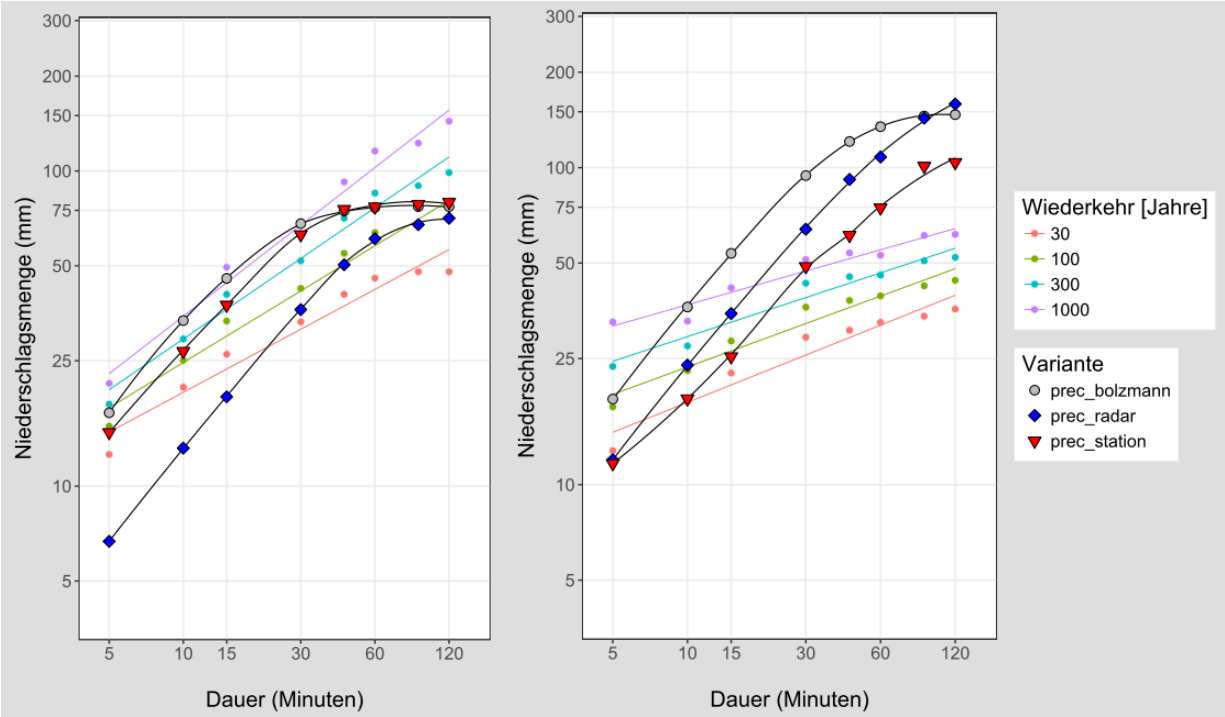


Abbildung 5. Vergleich der beobachteten Niederschlagsintensitäten und Dauern (basierend auf Radardaten (prec-bolzmann, prec-radar) und Stationsdaten (prec_station)) und den entsprechenden berechneten Niederschlagsmengen-Dauer-Beziehungen für unterschiedliche Widerkehrperioden für Bonndorf (links) und Bretten (rechts).

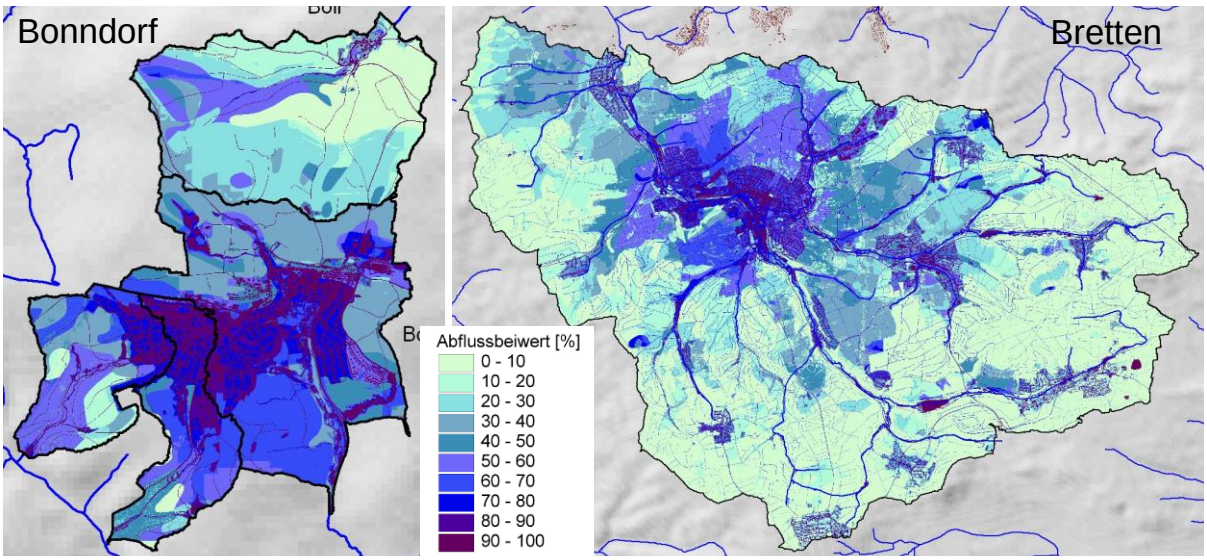


Abbildung 6. Simulierte Abflussbeiwerte für Bonndorf (links) und Bretten (rechts) für das beobachtete Ereignis.

Die simulierten Abflussbeiwerte (Abbildung 6) zeigen die extrem hohe räumliche Variabilität. Es gibt Gebiete, wo das Wasser trotz der extremen Niederschlagsintensitäten noch relativ gut infiltrieren kann. In anderen, insbesondere in den urbanen Gebieten sind die Abflusskoeffizienten sehr hoch. Diese Ergebnisse wurden plausibilisiert anhand von Beobachtungen an Brücken und Dolen. Wir hatten zum Beispiel Informationen, dass ein Brückenquerschnitt fast vollständig gefüllt war, konnten daraus den maximalen Abfluss anhand eines einfachen hyd-

raulischen Ansatzes bestimmen und diesen mit den simulierten Abflussspitzen vergleichen. Wir haben auch Schadensinformationen der Feuerwehr mit simulierten Überflutungsbereichen verglichen und konnten generell hohe Übereinstimmungen beobachten. Diese Informationen werden in Zukunft verwendet, um mit einem zweidimensionalen hydraulischen Modell direkt die Wasserspiegellage und die entsprechende Rückstaueffekte etc. zu simulieren. Auf diese Weise können gemessene Wasserspiegellagen, z. B. Hochwassermarken direkt mit den Simulationen verglichen werden.

Schließlich haben wir das Ereignis der Ereignismodellierungen für Bonndorf mit den Oberflächenkennwerten für seltene, außergewöhnliche und extreme Ereignisse verglichen, die für den Leitfaden Kommunales Starkregenrisikomanagement in Baden-Württemberg (LUBW, 2016) modelliert wurden (Abbildung 7). Für diese landesweiten Szenarien wurde eine konstante Überregnung des Gebietes angenommen, was in der Realität bei so einem Einzelereignis nicht der Fall ist, da solche Ereignisse in der Regel von lokalen Gewitterzellen ausgehen mit einer Abnahme der Niederschlagsintensitäten vom Zentrum der Zelle zu den Rändern. Die Vorfeuchte am 14.6.2015 war geringfügig höher als für die Szenarien angenommen. Die für das aufgetretene Ereignis modellierten Abflussganglinien liegen in allen vier Teileinzugsgebieten von Bonndorf zwischen dem außergewöhnlichen und extremen Ereignis.

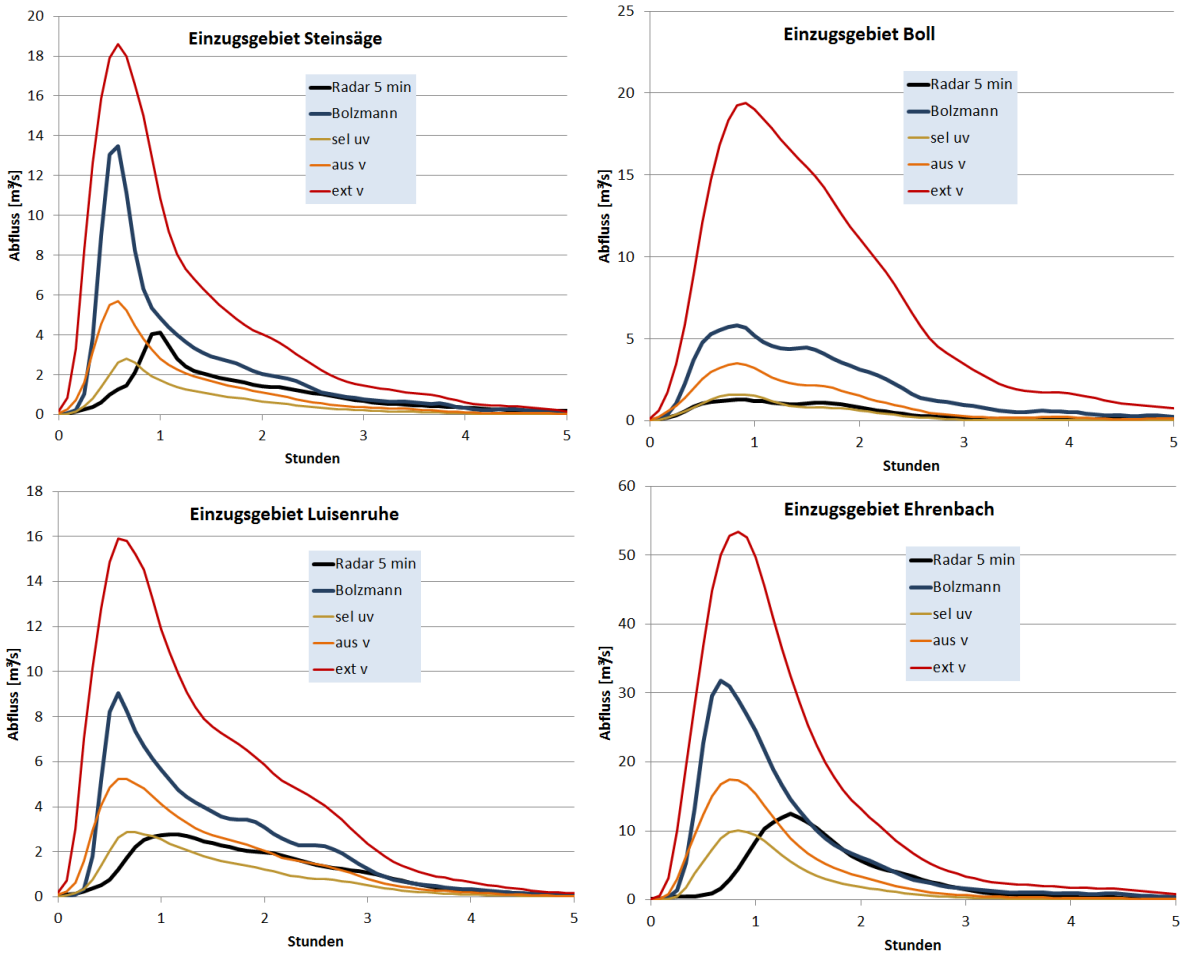


Abbildung 7. Simulierte Abflussganglinien für die vier EZG von Bonndorf für das beobachtete Ereignis am 14.6.2015 ((Radar, Bolzmann) und die Ganglinien für die drei Szenarien selten (sel), außergewöhnliche (aus) und extreme (ext) Ereignisse.

3.2 Bretten

Die beobachteten maximalen Niederschlagsmengen am 6.6.2015 für die unterschiedlichen Dauerstufen zeigen auch in Bretten einen großen Unterschied zwischen Stationsbeobachtungen und Radardaten (Bild 5 rechts), wobei hier die Stationsdaten die geringsten maximalen Intensitäten zeigen. In Bretten sind besonders die längeren Dauerstufen als sehr extrem einzustufen mit Wiederkehrperioden für Dauerstufen über 30 Minuten von über 1000 Jahren.

In Bild 6 rechts sind die Abflusskoeffizienten für Bretten dargestellt. Hier zeigen sich besonders im Stadtgebiet sehr hohe Abflusskoeffizienten, da dieser Bereich auch direkt von der Starkregenzelle betroffen war. Diese Gebiete zeigen im Vergleich zu den Szenarien auch sehr hohe Abflusswerte, die zum Teil schon fast an das extreme Szenario heranreichen (ohne Abbildung).

Wir benutzen auch in Bretten Daten um die Modellierungen zu plausibilisieren. In Bild 8 zeigen die Modellierungen für alle Dolen, die in diesem Teilgebiet betrachtet wurden, höhere Spitzenabflüsse als die Kapazität der Dolen. An allen Dolen wurden auch Überlastungen festgestellt. Außerdem stimmen die daraus resultierenden Schadensmeldungen auch sehr gut mit den simulierten Abflussbereichen übereiben, wobei für eine genaue Analyse noch die Ergebnisse der 2D hydraulischen Modelle notwendig sind.

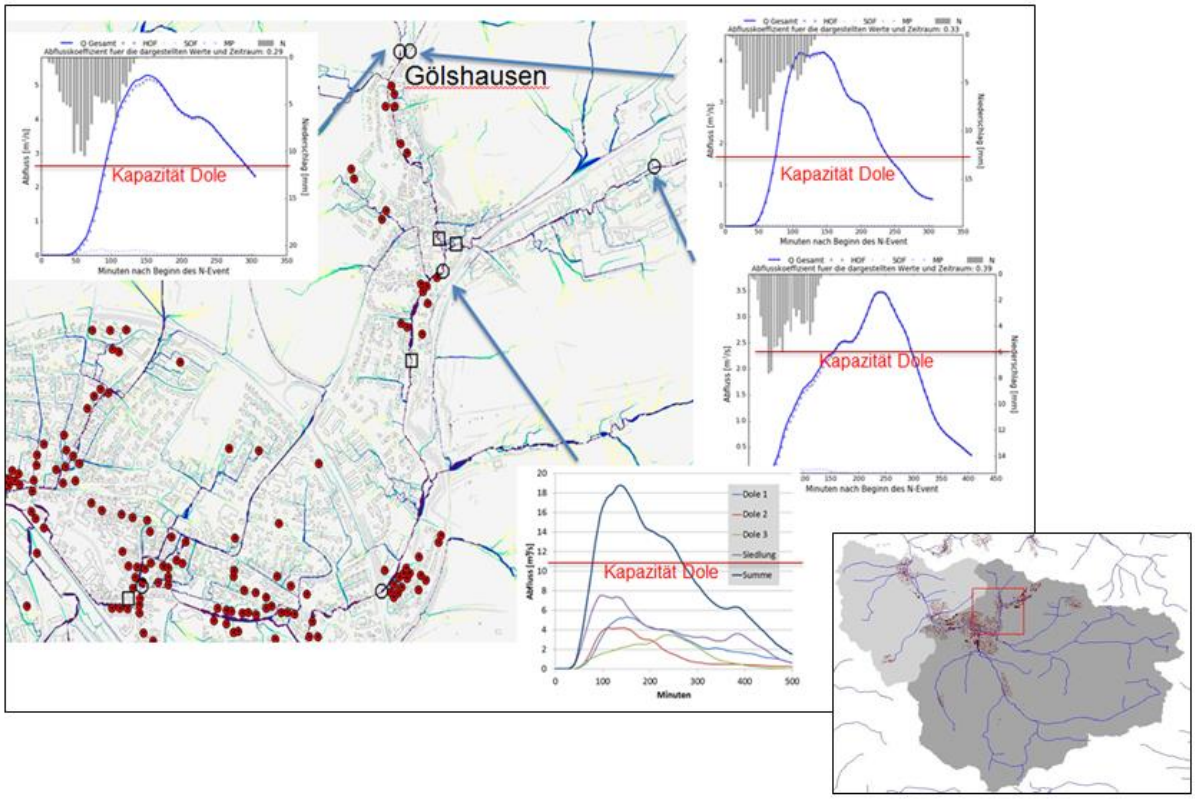


Abbildung 8. Vergleich der Schadensmeldungen in Bretten und der simulierten Abflussganglinien an mehreren Dolen, deren Kapazität nicht ausreicht um beim Ereignis die Abflüsse abzuleiten.

4. Warum sind extreme Starkregenereignisse so häufig?

Zum Abschluss noch ein Gedankenspiel: Wir stellen fest, dass solche Starkregenereignisse immer wieder auftreten, obwohl die Wiederkehrperioden der einzelnen Ereignisse (siehe Bonndorf und Bretten) extrem hoch sind und meist grösser als ein 1 000 jährliches Ereignis.

Warum sind dennoch solche Ereignisse, zum Beispiel in einem Gebiet wie Baden-Württemberg recht häufig? Dazu müssen wir davon ausgehen, dass jedes dieser Gewitter oder Starkregen ein unabhängiges Ereignis ist, also ein unabhängiger Prozess und somit ist auch jedes Ereignis statistisch unabhängig. Wenn wir jetzt von einer bestimmten Fläche ausgehen, auf der solch ein unabhängiges Ereignis auftritt, zum Beispiel 10 oder 100 km², dann können wir die Eintrittswahrscheinlichkeit für eine ganze Region bestimmen. Diese Analyse ist in Bild 9 illustriert. Dabei wurde von einer Eintrittswahrscheinlichkeit von 10 000 Jahren an einer Station (repräsentativ für die entsprechende Fläche) ausgegangen. Wenn wir eine Zeitspanne von zehn Jahren und eine Fläche von 100 km^2 annehmen, dann besteht eine Wahrscheinlichkeit von fast 30 %, dass ein solch extremes Ereignis irgendwo in Baden-Württemberg zu beobachten ist. Bei einer kleineren Fläche von 10 km^2 ist die Eintrittswahrscheinlichkeit sogar fast 97 %. Im Vergleich dazu liegt die Wahrscheinlichkeit bei 9,5 %, dass an einem Pegel eines Flusses ein 100-jährliches Ereignis innerhalb von zehn Jahren aufritt, ein 10 000-jährliches Ereignis würde bei nur knapp 0.01 % liegen.

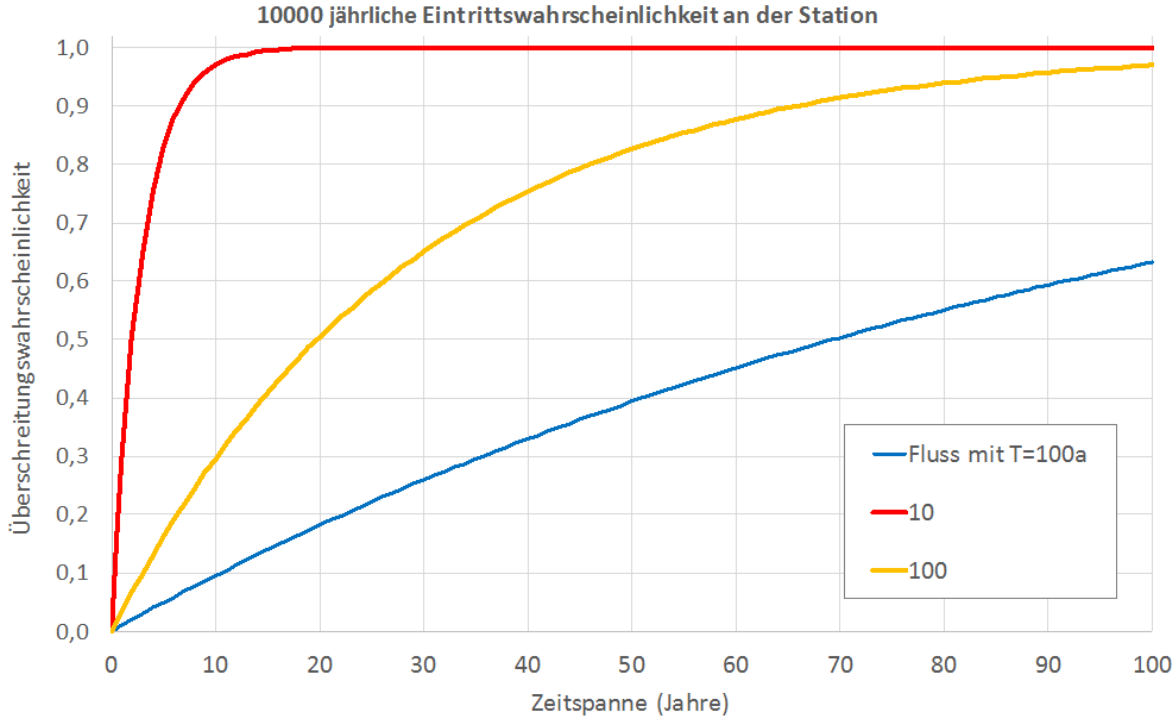


Abbildung 9. Überschreitungswahrscheinlichkeit für das Eintreten von Starkregenereignissen in Baden-Württemberg für die Annahme einer Eintrittswahrscheinlichkeit von 10 000 Jahren an einer Station und einer unabhängigen Fläche von 10 und 100 km^2.

Somit ist es nicht verwunderlich, dass wir so häufig solch extreme Ereignisse beobachten, besonders heutzutage, wenn die Kommunikation und die Mitteilung solcher Ereignisse sehr gut sind. Zusammenfassend können wir sagen, dass extreme, lokale Starkregenereignisse immer wieder auftreten werden, wobei der Ort zufällig ist und somit müssen entsprechende Maßnahmen getroffen werden, um sich für solch ein Ereignis zu wappnen. Die vorgestellten Analysen an den zwei Fallbeispielen zeigen dabei einerseits die hohe Relevanz des Niederschlages, deren zeitlicher und räumlicher Verteilung, aber auch insbesondere der bodenhydrologischen Prozesse. Auch bei solch extremen Ereignissen sind viele Bereiche im Einzugsgebiet nicht abflusswirksam und solche Gebiete sind relevant, wenn es darum geht die Gefährdung von Starkregen zu bestimmen.

5. Literatur

LUBW Landesanstalt für Umwelt Baden-Württemberg (2016): Leitfaden Kommunales Starkregenrisikomanagement in Baden-Württemberg.

Steinbrich A., Weiler M. (2016): Ableitung zeitlich hoch aufgelöster Niederschlagszeitreihen aus RADOLAN-Niederschlagsdaten. In: Forum für Hydrologie und Wasserbewirtschaftung. Heft 37.16, Wasserressourcen - Wissen in Flussgebieten vernetzen. Beiträge zum Tag der Hydrologie am 17./18. März 2016 in Koblenz, S. 107-117. Gabriele Wernecke, Anna-Dorothea Ebner von Eschenbach, Yvonne Strunck, Lothar Kirschbauer, André Müller (Herausgeber), Hochschule Koblenz und der Bundesanstalt für Gewässerkunde, Koblenz 2016.

Steinbrich A., Leistert H., Weiler M. (2016): Model-based quantification of runoff generation processes at high spatial and temporal resolution. Environmental Earth Sciences (2016) 75:1423. doi:10.1007/s12665-016-6234-9.

Hochaufgelöste Niederschlagssimulationen für die Erosionsmodellierung

Dr. Hans Schipper[1], Dr. Giorgia Fosser[1,*], Dr. Gerd Schädler[1], Jessica Kempf[2], Dr. André Assmann[2], Dr. Norbert Billen[3]
[1] Institut für Meteorologie und Klimaforschung, Karlsruher Institut für Technologie, [2] geomer GmbH, [3] terra fusca ing. PartG (ehem. bodengut), * derzeit: Met Office Hadley Centre, United Kingdom

1. Hintergrund und Ziele

Der Klimawandel wird in vielerlei Hinsicht Einfluss auf Mensch und Umwelt haben. Einerseits sollte deswegen versucht werden den Klimawandel zu bremsen, indem Klimaschutzmaßnahmen ergriffen werden. Vor allem sollte der Ausstoß von klimaschädlichen Treibhausgasen reduziert werden. Andererseits wird der Klimawandel trotz vieler Klimaschutzmaßnahmen in den nächsten Jahrzehnten zu Änderungen in unserer Umwelt führen. Aus diesem Grund sollten parallel Klimaanpassungsmaßnahmen getroffen werden, um die Schäden durch den Klimawandel so gering wie möglich zu halten.
Bezüglich des Niederschlags sind auch in Süddeutschland Veränderungen in der Häufigkeit, Intensität sowie in der räumlichen und zeitlichen Verteilung zu erwarten. So stellt zum einen ein häufigeres Auftreten von sommerlichen Starkniederschlagsereignissen die Landwirtschaft vor große Herausforderungen (z. B. KLIWA 2009). Zum anderen führen erhöhte Abflüsse von der Landoberfläche zu vermehrten Hochwasserereignissen und somit zusätzlichen Schäden in Siedlungen und an der Infrastruktur.
Es wurden an den drei Referenzstandorten Mertesdorf (ca. 2 km²) in Rheinland-Pfalz, Scheyern (ca. 10 km²) in Bayern und Weiherbach (6,3 km²) in Baden-Württemberg Untersuchungen durchgeführt. An weiteren 15 Vergleichsstandorten wurden die Praxistauglichkeit der Modellierungen sowie die Übertragbarkeit der Methodik in andere Regionen des Untersuchungsraumes überprüft.
Um zu den Veränderungen konkretisierte Aussagen zu erhalten wurde in einer vorhergehenden Konzeptstudie festgestellt, dass für die Ziele im vorliegenden Projekt das regionale Klimamodell COSMO-CLM (Rockel et al., 2008) und das Erosionsmodell LISEM (Jetten 2002) am besten geeignet waren. Im Folgenden wurde deshalb eine Kopplung der beiden Modelle untersucht. Daraus ergaben sich drei Projektziele. Zum einen wurde die Weiterentwicklung der regionalen Klimamodellierung mit COSMO-CLM betrachtet. Dazu simulierte das Modell Niederschlagsereignisse mit verschiedenen räumlichen und zeitlichen Auflösungen, um eine verbesserte Anwendbarkeit des Klimamodells für erosionsrelevante Fragestellungen zu erreichen. Zweitens wurde die Anwendbarkeit und Plausibilität des Erosionsmodells LISEM untersucht. Diese Untersuchung wurde sowohl mit Realereignissen als auch mit gitterpunktbasierten Ergebnissen (= „virtuelle Niederschlagsstationen“) aus dem COSMO-CLM durchgeführt. Drittens wurden die Vergleichsstandorte herangezogen, um die Übertragbarkeit der Methodik auf andere Regionen mit unterschiedlichen Bodensubstraten zu untersuchen.

2. Methodik

Mit dem aus 13 regionalen Klimamodellen ausgewählten COSMO-CLM und dem aus 17 Erosionsmodellen ausgewählten LISEM (Phase I) wurden Klima- und Erosionsmodellierungen an den drei Referenzstandorten durchgeführt (Assmann et al. 2009). Die Klimamodellierungen für die Vergangenheit (1971-2000) wurden mit gemessenen Daten verglichen, um die Qualität des Modells zu überprüfen. Sobald mögliche systematische Abweichungen bekannt waren, wurde erneut die Vergangenheit gerechnet sowie Zukunftssimulationen (2021-2050) durchgeführt. Die Klimamodellierungen basierten auf dem mittleren Szenario

A1B[2] des IPCC (Nakicenovic und Swart, 2000). Da Bodenerosionsprozesse auf kleinräumigen Skalen stattfinden, wurden mit dem Nesting-Verfahren hoch aufgelöste Niederschlagsdaten projiziert. Bei diesem Verfahren dienten zunächst Modellergebnisse aus dem globalen Klimamodell ECHAM5 (Roeckner et al., 2003) als Randbedingungen für Simulationen, die mit einer Auflösung von 50 km durchgeführt wurden. Diese wiederum trieben Simulationen mit einer Auflösung von 7 km und schließlich 2,8 und 1 km an. Das 7 km-Raster wurde flächendeckend für das gesamte KLIWA-Gebiet sowohl für die Retrospektive (1971-2000) als auch für die Zukunft (2021-2050) gerechnet. Die Ergebnisse dienten danach als Basis der 2,8 km-Simulationen, aus denen schließlich drei Episoden mit erosionsrelevanten Niederschlagsereignissen auf den drei Referenzstandorten identifiziert und die anschließend erneut mit einer räumlichen Auflösung von 1 km simuliert wurden. Es wurden zwei Simulationsgebiete mit einer 2,8 km-Auflösung gerechnet. Das erste enthielt die Referenzstandorte Mertesdorf und Weiherbach (ab jetzt S4 genannt). Der Referenzstandort Scheyern lag im zweiten Simulationsgebiet (genannt Scheyern), in dem aus Zeitgründen für die Vergangenheit nur die Periode 1990-1995 und für die Zukunft nur 2044-2049 berechnet werden konnte. Für die 15 Vergleichsstandorte wurden jeweils ein vergangenes und ein zukünftiges Starkniederschlagsereignis mit geringer Auflösung (7 km-Raster, 60 min-Intervalle) ausgewählt. Es wurden kleinere Transferprogramme entwickelt, die einen (halb)automatischen Ablauf der Modellkette erlaubten.
Die Daten der Klimamodellierung (Niederschlag, Bodenfeuchten) dienten als Eingangswerte für die Erosionsmodellierung mit LISEM. Außerdem dienten Bodenkarten, digitale Geländemodelle, Landnutzungskarten sowie weitere Pflanzen- und Bodenparameter nach deren Aufbereitung als Eingangsdaten (s.u.: Abschnitt „Datengrundlage und Aufbereitung“). Durch die Kombination verschiedener Eingangsdaten wurden insgesamt 123 LISEM-Simulationen durchgeführt (siehe Abb. 1). Für die Ergebnisauswertung der Erosionsmodellierung dienten die 114 Simulationsläufe an den Referenz- und Vergleichsstandorten.

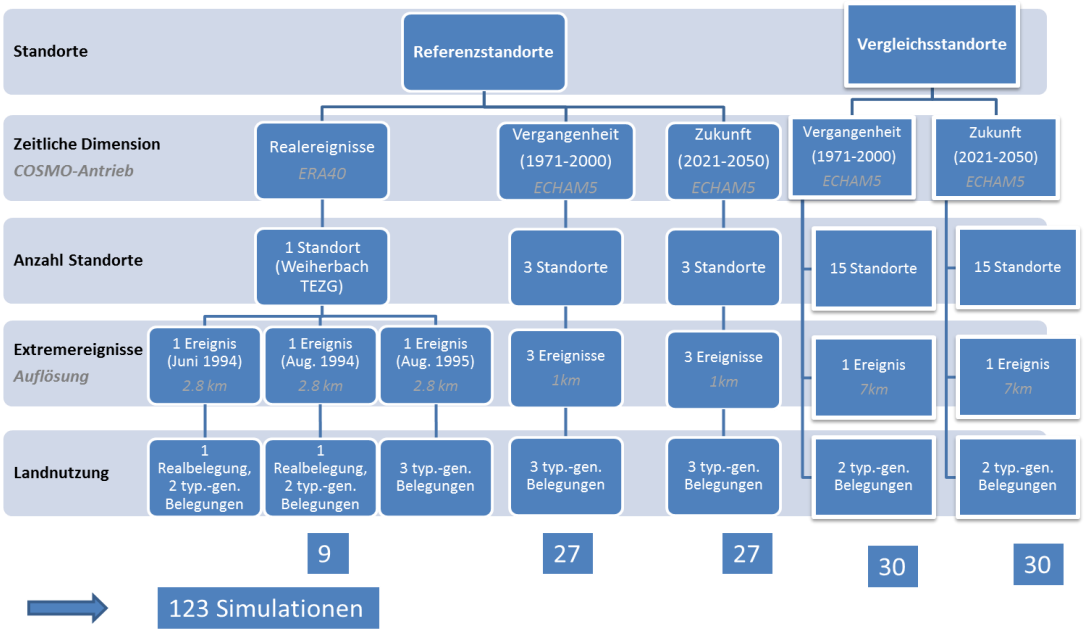


Abbildung 1. Anzahl der LISEM-Erosionssimulationen in Abhängigkeit von Quelle der Niederschlagsdaten, Zeitfenster, Anzahl simulierter Starkniederschlagsereignisse sowie Variation der Landnutzungs- und Feldfruchtverteilung (9 Simulationen von Realereignissen am Referenzstandort Weiherbach, insg. 114 Simulationen für die Ergebnisauswertung der Bodenerosionsmodellierung).

[2] Zu den A1B-Szenarien wurden in den letzten Jahren sogenannten RCP-Szenarien („Representative Concentration Pathway“) entwickelt. Trotz dieser neuen RCP-Szenarien behalten die A1B-Szenarien ihre Gültigkeit.

3. Validierung und Plausibilisierung

Bei den Klimamodellierungen mit COSMO-CLM wurde als Rechenbasis für die Validierung einzelner Ereignisse der ERA40-Datensatz verwendet, der an Beobachtungsdaten angeglichen wurde. Aufgrund der im ERA40-Datensatz verwendeten Beobachtungen konnten keine Simulationen für die Zukunft gerechnet werden. Als Antrieb für die Zukunft wurde deswegen der ECHAM5-Datensatz verwendet, der allein auf Simulationsdaten basierte. Für den direkten Vergleich von Vergangenheit und Zukunft wurde dann ebenfalls der ECHAM5-Datensatz für die Vergangenheit verwendet, sodass die Datenbasis und die daraus resultierenden Ergebnisse vergleichbar sind. Die Validierung bestand dann u. a. in dem Vergleich von Beobachtungen des HYRAS-Datensatzes mit den Simulationsergebnissen des 2,8 km-Rasters von COSMO-CLM auf Tages- und Stundenbasis (siehe Abbildung 2. Dabei ergab sich eine gute Wiedergabe vor allem im Klimamodellierungsgebiet „Mertesdorf/Weiherbach (S4)“ (in „Scheyern“ gab es eine Überschätzung der Niederschlagsintensitäten über 4 mm/Tag). Da das COSMO-CLM häufig eine Intensität von 0,1 mm/Stunde aufweist, kann es im Sommer während Kurzzeitniederschlagsereignissen zu einer Überschätzung kommen.

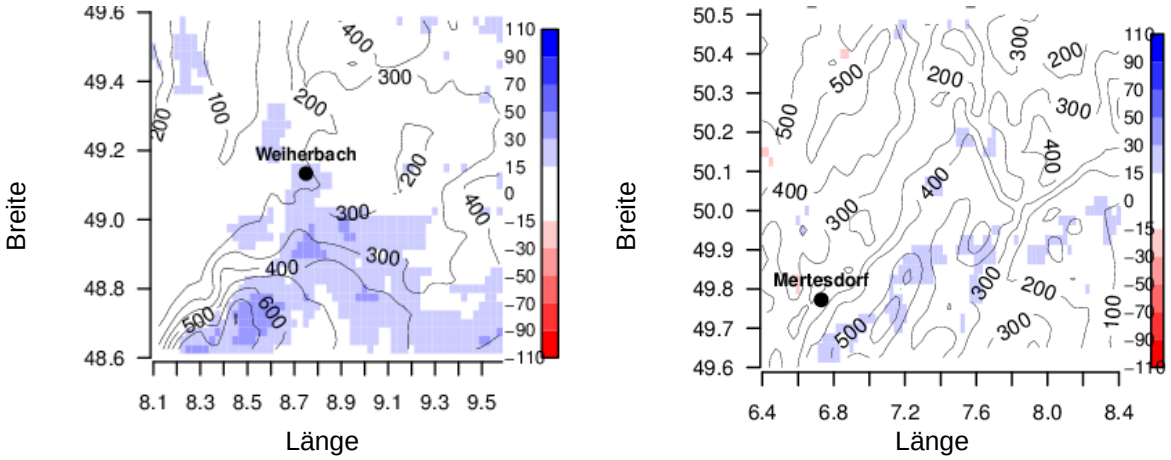


Abbildung 2. Räumliche Verteilung der Abweichungen des mittleren Tagesniederschlags zwischen Modell (Simulationsgebiet S4-Mertesdorf/Weiherbach) und dem HYRAS-Datensatz für den hydrologischen Sommer 1980-1984 (in Prozent) unter Berücksichtigung der Tage mit Niederschlag (Blautöne = Überschätzung, Rottöne = Unterschätzung des simulierten mittleren Tagesniederschlags).

Für die Plausibilisierung und Konfiguration des LISEM-Erosionsmodells wurden vom Institut für Wasser und Gewässerentwicklung des KIT Karlsruhe Niederschlags-, Abfluss- und Landnutzungsdaten für den Referenzstandort Weiherbach zur Verfügung gestellt. Damit konnten von drei Terminen die Realereignisse simuliert werden. Der Vergleich der Simulationsergebnisse mit dem realen Gebietsabfluss ergab für einen Tag eine gute Übereinstimmung und für zwei weitere Tage Unterschätzungen (Abbildung 3). Die Unterschätzungen resultierten u. a. aus einem schneller abklingenden Abfluss bei den Simulationen gegenüber den Beobachtungen (Abbildung 4). Die für die Bodenerosion bedeutsamen Abflussspitzen wurden jedoch zufriedenstellend simuliert. Aufgrund der unvorhersehbaren Lücken hinsichtlich Vergleichsdaten von den anderen Referenzstandorten konnte keine Modellvalidierung durchgeführt werden.

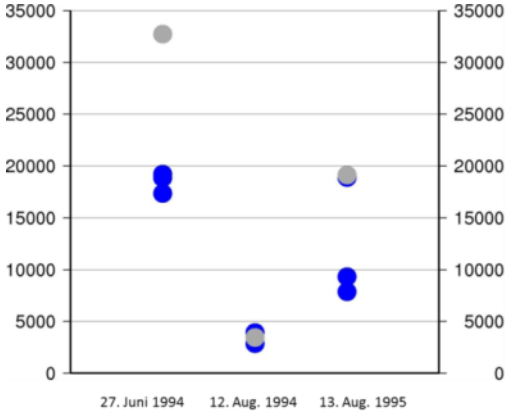


Abbildung 3. Gemessene (graue Punkte) und mit Realwerten simulierte (blaue Punkte) Abflussvolumina [m^3] bei unterschiedlicher Feldfruchtverteilung.

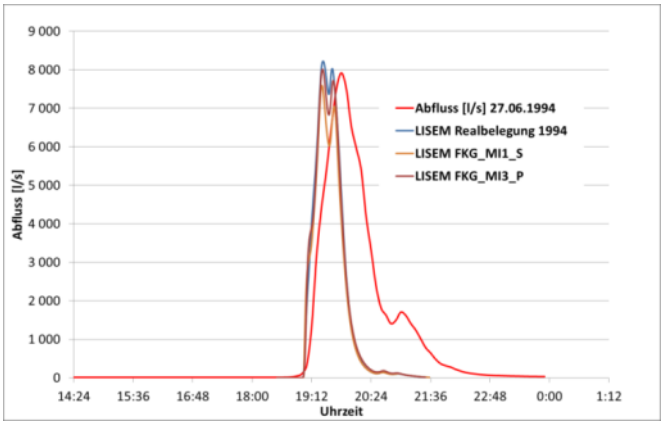


Abbildung 4. Ganglinien gemessener und mit Realniederschlag simulierter Abflüsse am 27.06.1994 beim Referenzstandort Weiherbach.

4. Datengrundlage und Aufbereitung

Mit der projektvorbereitenden Konzeptstudie (Assmann et al. 2009) wurden Gebietskulissen für die drei Referenzstandorte Mertesdorf (RLP), Scheyern (BY) und Weiherbach (BW) aus einer Vorschlagsliste mit 25 Standorten ausgewählt. In den Gebieten wurden bereits in der Vergangenheit unterschiedlich intensive Untersuchungen zu Bodenerosion und Wasserabfluss durchgeführt, sodass zugehörige Berichte, Publikationen und Datenbestände bei der Kalibrierung und Plausibilitätsprüfung des LISEM-Modells eingesetzt werden konnten. Neben den drei Referenzstandorten sollten auf 15 Vergleichsstandorten vereinfachte Erosionsmodellierungen durchgeführt werden, d. h. jeweils ein Extremereignis im 5m-Raster aus den 7km-Läufen des COSMO-CLM mit einer Auflösung von einer Stunde sowie einer Landnutzungs- und Feldfruchtverteilungs-Variante simuliert werden. Dabei sollten die Vergleichsstandorte aktuell ein hohes Erosionsrisiko und zukünftig ein zunehmendes Starkniederschlagsrisiko aufweisen, die wichtigsten Bodensubstrate der einzelnen Bundesländer abbilden sowie Oberlauf-Einzugsgebiete für mittel- bis großmaßstäbige Maßnahmenplanungen repräsentieren (Abbildung 5).

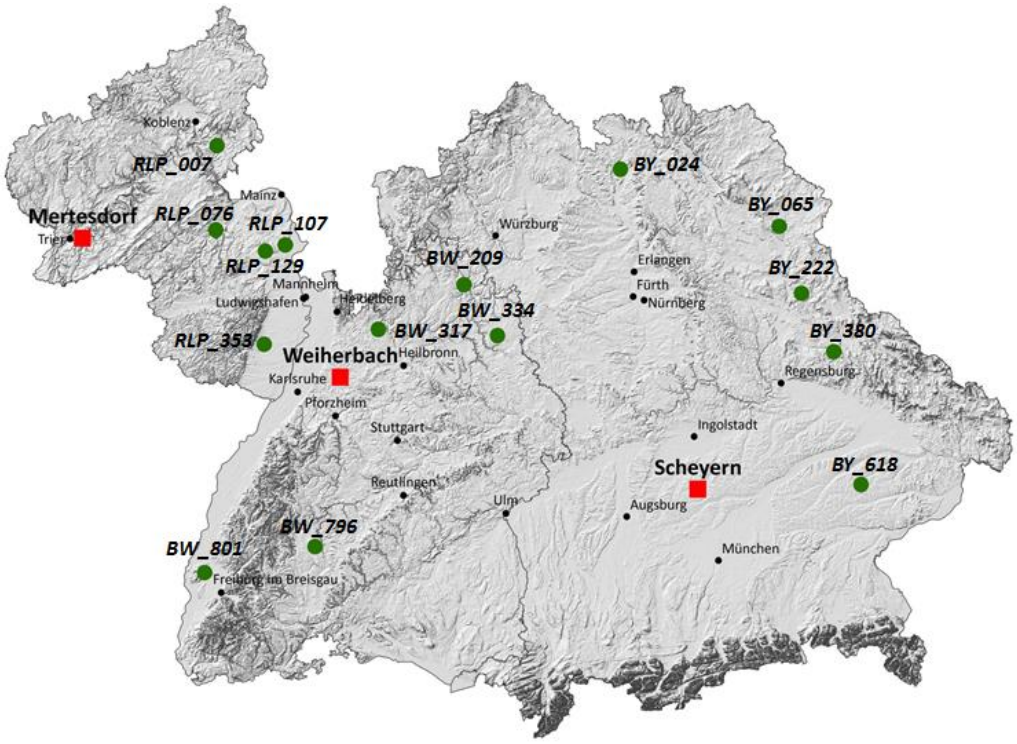


Abbildung 5. Die Lage der drei Referenzstandorte (rote Markierung) und 15 Vergleichsstandorte (grüne Markierung) für die Erosions- und Abflussmodellierung von Wassereinzugsgebieten.

Für die Erosionsmodellierung mit LISEM wurden zum einen digitale Grundlagendaten wie Geländemodell, Bodenkarte und Landnutzung, zum anderen verschiedene Boden- und Landnutzungsparameter wie z. B. Blattflächenindex, Bodenbedeckungsgrad und Aggregatstabilität aufbereitet und bereitgestellt. Die raumbezogenen Grundlagendaten wurden in ArcGIS aufbereitet, in einer Datenbank verwaltet und mittels eines neu entwickelten Konverters in das erforderliche PCRaster-Format umgewandelt. Das digitale Geländemodell diente zur Berechnung der Fließrichtung und Hangneigung. Mit den Bodenkarten wurde das räumliche Verteilungsmuster von Bodentypen dargestellt und mit den zugehörigen Attributtabellen die vertikalen Eigenschaften von Leitböden ausgewiesen. Beim Ausweisen der Schichtung und Tiefen der Leitböden wurde die Bodendiskretisierung für alle Leitprofile vereinheitlicht (20 Bodenschichten, 250 cm Tiefe). Die weitere Transformation und Parametrisierung der Bodenprofilkennwerte wie Bodenart und Lagerungsdichte dienten dann schließlich zur Berechnung der Wasserleitfähigkeit und des Matrixpotenzials mittels des RETC-Programms, das auf den bodenphysikalischen van Genuchten-Gleichungen basiert. Die initialen Bodenwasserspannungen als sensitive Eingangsgröße für die Erosions- und Abflusssimulationen mit LISEM sind aus den Bodenwasservorräten berechnet worden, die von dem Terra-ML Modul im COSMO-CLM-Modell übernommen wurden. Im Mittel aller Modellstandorte ergaben sich dabei zwei Tage vor den ausgewählten Starkniederschlagsereignissen im Vergleich zur Vergangenheit, für die Zukunft ähnlich feuchte oder trockenere Böden und kaum feuchtere.

Die allgemeinen Landnutzungstypen (Wald, Grünland, Siedlung, Straße, Ackerfläche usw.) wurden auf Grundlage von ATKIS oder ALK bzw. Basis-DLM ermittelt. Die Feldfruchtverteilung auf den Ackerflächen mit den erosionsbeeinflussenden Feldfrüchten wurde bei entsprechender Verfügbarkeit aus Dokumentationen zu einzelnen Standorten genommen, anderenfalls aus der Agrarstatistik auf Gemeindeebene abgeleitet. Demnach belegten die erosionskritischen Feldfrüchte auf allen Modellstandorten ca. 2-30 % des jeweiligen Einzugsgebietes. Die höheren Anteile wurden dabei vorrangig in Bayern und Baden-Württemberg erreicht. Die gesamten Ackerflächen inclusive den z. T. ebenfalls erosionskritischen Obst- und Weinbau-

flächen umfassten ca. 25-90 % der Einzugsgebiete. Hier wurde der höhere Anteil vornehmlich in Rheinland-Pfalz angetroffen und ein niedrigerer in Baden-Württemberg.
Weitere Parameter zu Boden- und Pflanzeneigenschaften wie z. B. Blattflächenindex, Vegetationshöhe, Rauigkeitsbeiwert, Bodenbedeckungsgrad und Aggregatstabilität wurden durch ergänzende Literatur- und Datenbankrecherchen gewonnen.

Die Auswahl der Niederschlagsereignisse, mit denen die Erosionssimulationen an den Modellstandorten durchgeführt wurden, erfolgte bei den drei Referenzstandorten auf Basis der 2,8 km und bei den Vergleichsstandorten auf Basis der 7 km-COSMO-CLM-Daten. Hohe Extremereignisse (> 60 mm/h) kamen bei der 2,8 km-Auflösung in geringer Anzahl und bei der 7 km-Auflösung bei allen Modellstandorten gar nicht vor. Die meisten Ereignisse erreichten Niederschlagsintensitäten zwischen 20 und 30 mm/h. Es wurden schließlich die Ereignisse gewählt, die die größten Niederschlagsintensitäten aufwiesen. Es wurden LISEM-Simulationen von Niederschlagsereignissen von April bis September durchgeführt.

5. Ergebnisse

Die Klimatologie des Niederschlages zeigt für Deutschland, dass sich zwar die mittlere sommerliche Niederschlagsmenge nicht viel ändert, die Starkniederschläge aber zunehmen werden. Die schwachen und mittleren Niederschlagsereignisse nehmen dafür ab. Bei der Verwendung von hohen räumlichen Auflösungen (unter 3 km) können Wolken explizit berechnet werden, was bei einer gröberen Auflösung nicht der Fall ist. Es wird erwartet, dass Starkniederschlagsereignisse somit auch in Zukunft besser wiedergegeben werden können.
Aus den **Klima-Simulationen** mit COSMO-CLM mit einer 2,8 km-Auflösung geht hervor, dass höhere Niederschlagsintensitäten und eine Zunahme der trockenen Tage im Sommer erwartet werden (Tabelle 1). Das Untersuchungsgebiet um Mertesdorf, schon jetzt das Trockenste, wird noch trockener werden. Gleiches gilt für die Dauer und Häufigkeit der Trockenperioden. Ähnliches trifft auch Weiherbach und in geringeren Maßen Scheyern.

Tabelle 1. Entwicklung der mittleren Tagesniederschläge im Sommer (Juni, Juli, August) bei Berücksichtigung der Tage mit > 1 mm/Tag und Veränderung von Niederschlagsklassen im Sommer (jüngere Vergangenheit: 1971-2000; nahe Zukunft: 2021-2050).

Untersuchungsgebiete	Weiherbach	Mertesdorf	Scheyern*
Vergangenheit [mm/Tag]	7,1-17,7 Mittel 8,9	6,6-9,8 Mittel 7,7	7-13,2 Mittel 9,6
Zukunft [mm/Tag]	7-18,4 Mittel 9,2	6,6-9,7 Mittel 7,7	7,6-12 Mittel 9,7
künftige Zunahme [mm/Tag]	4-30	---	6-50
künftige Abnahme [mm/Tag]	1-4 >30	---	1-2 >50
künftige Zunahme [mm/Stunde]	0,5-2	---	<0,7 1,7-3
künftige Abnahme [mm/Stunde]	5-17	---	0,7-1,7 >3

* jüngere Vergangenheit: 1990-1995; nahe Zukunft: 2045-2049

Eine ereignisbasierte Analyse für das Untersuchungsgebiet um Weiherbach zeigt, dass die Intensitäten des stündlichen Niederschlags zwar nicht höher werden, dafür aber die Struktur der Niederschlagsereignisse sich in naher Zukunft ändern wird. Es wird zudem erwartet, dass die Anzahl der Ereignisse länger als einen Tag abnehmen werden (Abbildung 6). Die

Analysen zeigen darüber hinaus eine starke Abnahme von 14 % der Gesamtzahl der Niederschlagsereignisse in naher Zukunft, während sich die Gesamtniederschlagsmenge kaum ändert. Daraus folgt, dass es in Zukunft im Untersuchungsgebiet um Weiherbach weniger oft Niederschlag geben wird, die Ereignisse kürzer werden und dafür eine höhere Intensität aufweisen.

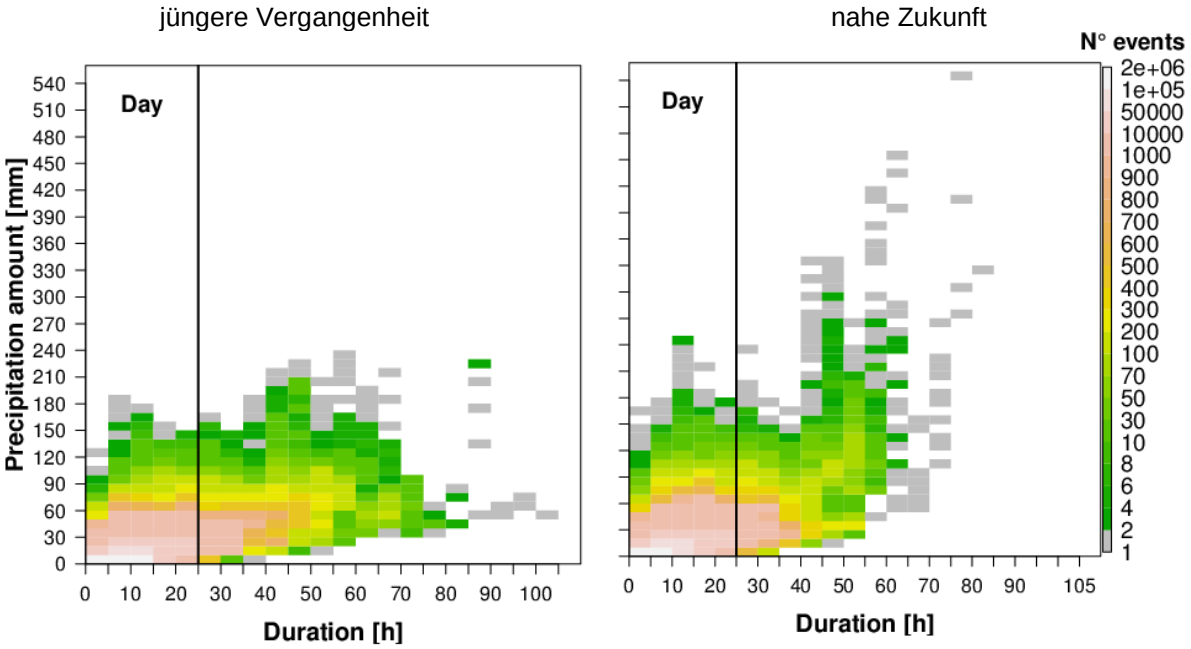


Abbildung 6. Häufigkeit der Niederschlagssumme und -dauer aller simulierten Niederschlagsereignisse der 2,8 km-Simulation in der jüngeren Vergangenheit und nahen Zukunft.

Ein Vergleich zwischen Simulationen mit einer 1 km-Auflösung und einer 2,8 km-Auflösung zeigt, dass die Ergebnisse sehr gut miteinander übereinstimmen, vor allem in Bezug auf das zeitliche Auftreten der Niederschlagsereignisse (Abbildung 7). Dennoch neigen die Ergebnisse in der 1 km-Simulationen dazu, die höheren Niederschlagsintensitäten auf Stundenbasis im Vergleich zu den 2,8 km-Simulationen zu unterschätzen, was letztendlich zu einer Unterschätzung der Bodenerosion führen kann.

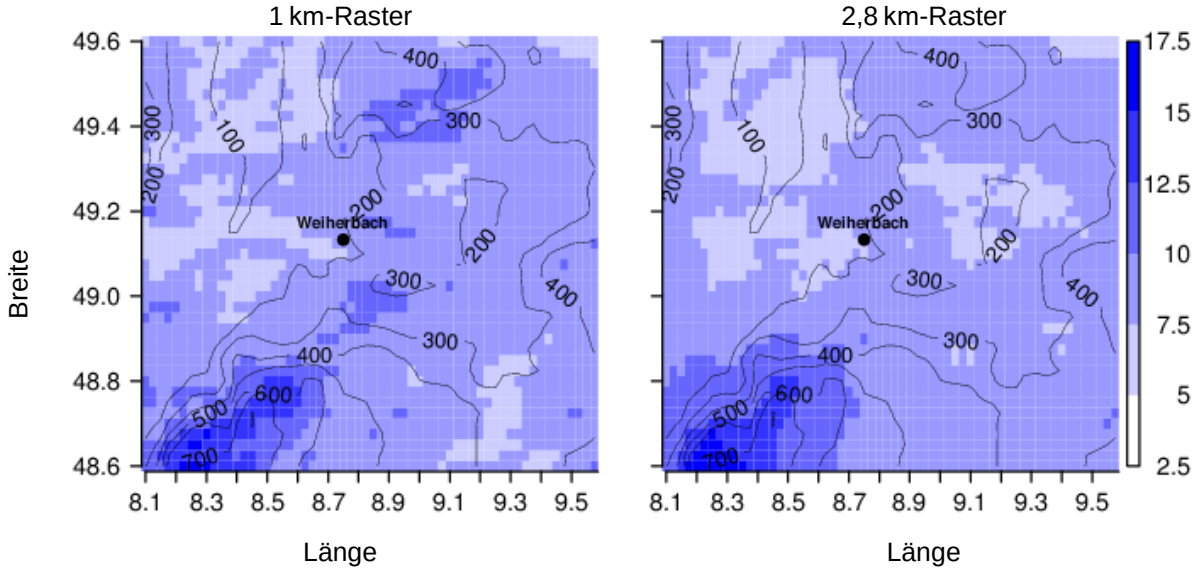


Abbildung 7. Räumliche Verteilung der mittleren Tagesniederschläge von allen Tagen mit >1 mm/Tag beim 1 km- und 2,8 km-Raster am Beispiel des Untersuchungsraumes Weiherbach.

Mit der Anwendung des COSMO-CLM in der Modellkette konnte ein breiteres Verständnis über regionale Klimasimulationen gewonnen werden. Die Vergleiche zwischen den verschiedenen räumlichen Auflösungen zeigen zudem, dass die regionale Klimamodellierung im Allgemeinen weiterentwickelt wurde, indem die Stärken und Schwächen einer solch hohen Auflösung untersucht wurden.

Es wurden 114 **Erosions- und Abfluss-Simulationen** mit LISEM für die Einzugsgebiete der drei Referenz- und der 15 Vergleichsstandorte durchgeführt. Im Mittel über alle Standorte nimmt die Bodenerosion um 2,0 t/ha zu bei einer mittleren Zunahme der Niederschlagsumme um 4 mm. Dabei nimmt tendenziell die Bodenerosion künftig mit zunehmender Niederschlagssumme je Ereignis zu, aber auch abnehmende Bodenerosion bei abnehmender Niederschlagssumme wurden simuliert. Werden die Bodenabträge in Klassen nach DIN 19708 (2005) eingeordnet, dominiert in der Vergangenheit eine Gruppe von 27 Simulationen mit sehr geringer Erosionsgefährdung (kleiner 0,2 t/ha, davon acht Simulationen ohne Erosion). In der Zukunft ist eine Gruppe von 20 Simulationen mit sehr hoher Erosionsgefährdung (≥ 6 t/ha) dominant, knapp gefolgt von einer Simulationsgruppe mit sehr geringer Erosionsgefährdung (davon zwölf ohne Erosion, siehe Abbildung 8). Die Anzahl der Simulationen mit mittlerer Erosionsgefährdung (2,0-<3,0 t/ha) ist gering und sowohl im Referenz- als auch im Projektionszeitraum vergleichbar hoch. Ein Vergleich der aufsummierten Erosionswerte in t/ha von allen Standorten, getrennt nach Vergangenheit und Zukunft, ergibt eine künftige Erosionszunahme von 67 %. Für das aufsummierte Abflussvolumen ergibt sich sogar eine Zunahme von 93 %. Bei den genannten Zunahmen tragen einzelne Ereignisse überproportional zur Gesamtsumme bei, die jedoch nicht auf bestimmte Standorte begrenzt sind. Dabei ist zu beobachten, dass die unterschiedliche Feldfruchtverteilung nur einen vernachlässigbaren Einfluss auf das Erosionsgeschehen hat. Die Bodenerosion wird vielmehr durch unterschiedliche Niederschlagscharakteristik bestimmt.

Da sich außerdem die Niederschlagsintensitäten der hier durchgeführten Simulationen in ihrer Auftrittswahrscheinlichkeit in Vergangenheit und Zukunft sowohl an den Referenz- als auch an den Vergleichsstandorten kaum unterschieden, kann die Ergebnissicherheit nicht verbessert werden. Letztlich ist aufgrund der Simulation von nicht repräsentativen Niederschlagsereignissen ein direkter Vergleich von Vergangenheit und Zukunft auf einzelnen Standorten höchstens unter Vorbehalt möglich.

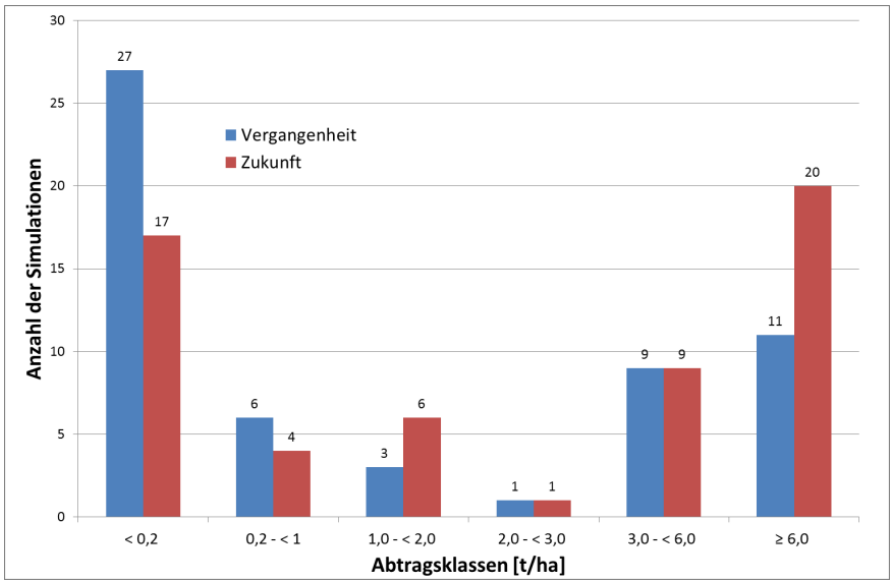


Abbildung 8. Einordnung der Bodenabträge in Klassen nach DIN 19708 in Vergangenheit und Zukunft.

Neben Niederschlagsintensität, -summe und -dauer haben auch Bodenvorfeuchte, Bodenart, Reliefdynamik, Flächenanteilanteil erosionskritischer Landnutzung (Acker, Wein) oder Vegetationsentwicklung (Jahreszeit) Einfluss auf das Ausmaß der Bodenerosion und des Wasserabflusses (z. B. Routschek 2012). Das Ausmaß der künftigen Veränderung (kartografisches Beispiel siehe Abbildung 9) ist letztendlich von der standortspezifischen Ausprägung der Faktoren abhängig, sodass aufgrund der geringen Standortzahl über alle Simulationsläufe hinweg bis auf die o.g. Niederschlagssumme keine direkte Abhängigkeit erkennbar wird. Dies gilt auch für den Einfluss der erosionskritischen Landnutzung (Art der Feldfrüchte, Weinanbau). Bei den LISEM-Simulationen variieren die Feldfrüchte jedoch nur in der räumlichen Verteilung und nicht im Flächenanteil, da aufgrund agrarstatistischer Mittelwerte keine unterschiedlichen Flächenanteile in unterschiedlichen Jahren berücksichtigt wurden.

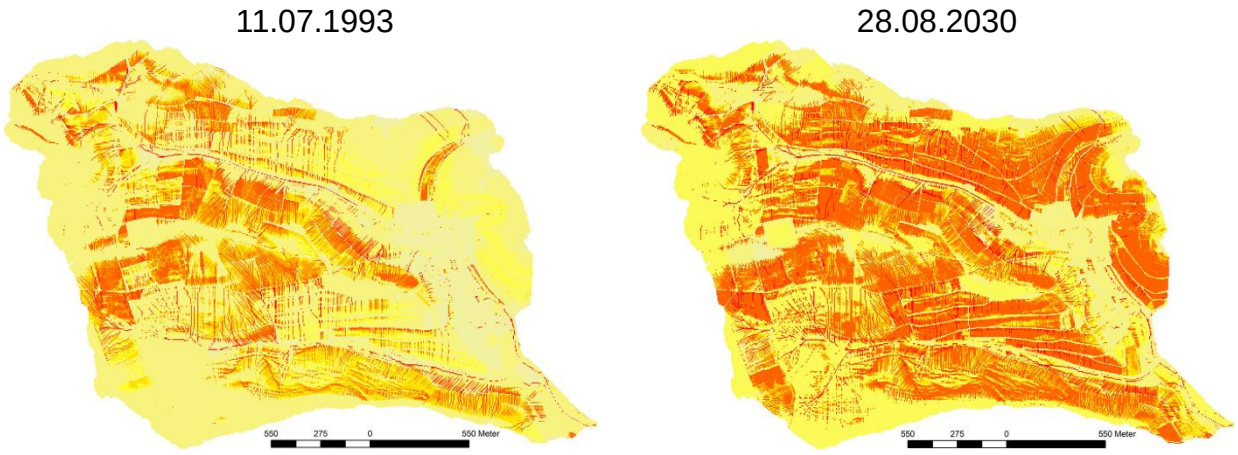


Abbildung 9. Beispiel für Veränderung des Bodenabtrags im Einzugsgebiet des Vergleichsstandortes BW209 (Becksteiner Graben bei Bad Mergentheim) mit einem Flächenanteil des Weinanbaus von 10 % bei einem Starkniederschlagsereignis in der Vergangenheit (Summe = 39 mm) und der Zukunft (Summe = 59 mm) Aufgrund der Simulation von Einzelereignissen ist der höhere Niederschlag in der Zukunft nicht gesichert.

Durch die Kopplung an COSMO-CLM wird die Anwendbarkeit des LISEM-Modells gezeigt. Zum einen gelingt dies durch die (halb)automatische Verarbeitung von COSMO-CLM-Ergebnissen mittels eines eigens für dieses Projekt entwickelten Werkzeugs. Zum anderen zeigt das Erosionsmodell plausible Ergebnisse mit Niederschlagsdaten aus COSMO-CLM. Eine Plausibilisierung von LISEM wird durch die Modellierung von Realereignissen und dem Vergleich der simulierten Abflussergebnisse mit Beobachtungsdaten am Referenzstandort Weiherbach durchgeführt. Drittens bestand durch die unterschiedliche Niederschlagsstatistik und Substrate zwar die Möglichkeit, 114 Simulationen, die für die Ergebnisauswertung verwendet wurden, durchzuführen. Aufgrund der Vielzahl weiterer Abhängigkeitsfaktoren wie Bodenvorfeuchte, Reliefdynamik oder Vegetationsentwicklung war die Anzahl der Simulationsläufe jedoch zu gering, um statistische Aussagen über ein Klimawandelsignal im Erosionsverhalten zu treffen. Die Verwendbarkeit des Gesamtsystems COSMO-CLM – LISEM ergibt sich jedoch daraus, dass sich eine veränderte Niederschlagscharakteristik innerhalb der Modellkette in einem veränderten Bodenabtrag und Wasserabfluss widerspiegelt.

6. Diskussion und Ausblick

Die Niederschlagssimulationen mit dem COSMO-CLM-Modell ergibt eine gute Übereinstimmung der 1 km- mit der 2,8 km-Auflösung, vor allem beim zeitlichen Auftreten der Niederschlagsereignisse. Dennoch neigen die Ergebnisse der 1 km-Simulationen dazu, die höheren Niederschlagsintensitäten auf Stundenbasis im Vergleich zu den 2,8 km-Simulationen zu unterschätzen. Das kann in der Folge auch zu einer Unterschätzung der Bodenerosion und

des Wasserabflusses führen, sodass bis zur abgesicherten Verwendung der 1 km-Ergebnisse noch weitere Studien erforderlich sind. Obwohl das COSMO-CLM intern mit Zeitschritten weit unter einer Minute rechnet, ist bisher eine zeitliche Ausgabe der Ergebnisse auf eine Stunde beschränkt gewesen. Ob und inwiefern die hier verwendete 15 Minuten-Ausgabe ebenfalls einen Einfluss auf die Ergebnisse hat, kann im Rahmen dieses Projekt nicht geklärt werden.

Für die prozessorientierte Erosionsmodellierung sind vielfältige Eingabedaten erforderlich wie digitales Geländemodell, Bodenkarten mit Leitbodenprofilen, Bodenfeuchten, Landnutzungskarten sowie Feldfruchtanteile und -verteilung. Damit verbunden ist ein relativ hoher Aufwand an Parametrisierung der Eingabedaten, der sich nochmals vergrößert aufgrund der heterogenen Datensituation der drei beteiligten Bundesländer. So sind für Geodaten wie Bodenverbreitung, COSMO-CLM-Daten wie Niederschlagswerte oder Pflanzenparameter wie jahreszeitabhängiger Blattflächenindex zwar Konvertierungsprogramme entwickelt worden, aber für weitere Eingangsdaten wie Bodenfeuchten fehlen derartige Werkzeuge noch. Weiterer Entwicklungsbedarf besteht bei LISEM hinsichtlich der begrenzten Wahlfreiheit von wählbaren Simulationszeitschritten, da diese aufgrund der Programmkapazitäten für jeden Standort angepasst werden mussten.

Die Erosionsmodellierung von insgesamt 18 Modellstandorten hat die Tendenz einer Zunahme von Bodenerosion und Wasserabfluss aufgezeigt. Allerdings ist die simulierte Anzahl für eine statistische Absicherung zu gering, zumal mit den durchgeführten Klimasimulationen keine extremen Starkniederschlagsereignisse an den Modellstandorten vorlagen und diese nahezu ähnliche Auftrittswahrscheinlichkeiten auf Stundenbasis in der Vergangenheit und Zukunft aufwiesen. Deshalb sind zusätzliche Simulationen mit höheren Intensitäten und unterschiedlichen Auftrittswahrscheinlichkeiten erforderlich. Aufgrund besserer Vergleichbarkeit sollten dann alle LISEM-Simulationen mit einheitlicher Niederschlagsauflösung (z. B. 2,8 km, 15 min) durchgeführt werden. Weiterhin könnte sich die Auswahl von zusätzlichen Einzugsgebieten auch am Auftreten von Starkniederschlagsereignissen orientieren, sodass das Spektrum der Niederschläge besser berücksichtigt wird. Letztlich unberücksichtigt bleibt bisher aufgrund der Untersuchung einer mittleren Feldfruchtverteilung die tatsächliche Variabilität der Feldfrüchte im Einzugsgebiet, sowie in der Agrarstatistik erfasst, und mögliche Verschiebungen der Vegetationszeiten sowie erosionsmindernde Maßnahmen, um Anpassungsstrategien an den Klimawandel zu entwickeln.

Insgesamt wurde eine erfolgreiche Kopplung der beiden Modelle erreicht. So wurden für die Schnittstellen Transferprogramme entwickelt, die einen (halb)automatischen Datenaustausch ermöglichen. Damit liegt nun ein Prognoseinstrument für kleinere und mittlere Einzugsgebiete vor. Da darüber hinaus für die Übernahme von Basisdaten in das LISEM-Modell auch Aufbereitungsschritte automatisiert wurden, erscheint eine praxistaugliche und großflächige Anwendung realisierbar.

7. Danksagung

Für das formlose Bereitstellen zahlreicher Informations-, Mess- und Raumdaten in digitaler Form zu den Referenzstandorten bedanken wir uns für die umfangreiche Unterstützung der zuständigen Institutionen. Für den Standort Weiherbach gilt der Dank besonders U. Scherer und E. Zehe vom Institut für Wasser und Gewässerentwicklung – Fachbereich Hydrologie am Karlsruher Institut für Technologie. Für den Standort Scheyern bedanken wir uns ausdrücklich bei G. Gerl vom Helmholtz-Versuchsgut Scheyern und bei J. Munch vom Helmholtz-Zentrum München – Institut für Bodenökologie ebenso wie für den Standort Mertesdorf bei J.B. Ries vom Fachbereich VI Geographie/Geowissenschaften – Physische Geographie der Universität Trier.

8. Literatur

Assmann, A., Kempf, J. Billen, N., Schipper, H., Engelhardt, M. (2009): Bodenabtrag durch Wassererosion in Folge von Klimaveränderungen – Konzeptstudie. – Im Auftrag des Kooperationsvorhabens Klimaveränderung und Konsequenzen für die Wasserwirtschaft (KLIWA) [Bayerisches Staatsministerium für Umwelt und Gesundheit, Ministerium für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft Baden-Württemberg, Ministerium für Wirtschaft, Klimaschutz, Energie und Landesplanung Rheinland-Pfalz], 100 S.

DIN 19708 (2005): Bodenbeschaffenheit – Ermittlung der Erosionsgefährdung von Böden durch Wasser mit Hilfe der ABAG.

Jetten, V. (2002): LISEM – Limburg Soil Erosion Model. Windows Version 2.x. User manual. Utrecht.

KLIWA (2009): Regionale Klimaszenarien und Wasserhaushaltsmodellierung. Zusammenfassender Kurzbericht, Bayerisches Landesamt für Umwelt. Karlsruhe.

Nakicenovic, N., Swart, R. (Eds.) (2000): Emissions Scenarios, Cambridge University Press, UK. pp. 570.

Roeckner, E., Bäuml, G., Bonaventura, L., Brokopf, R., Esch, M., Giorgetta, M. et al. (2003): The atmospheric general circulation model ECHAM 5. PART I: Model description Report / MPI für Meteorologie 349, pp 140.

Rockel, B., Will, A., Hense, A. (2008): The Regional Climate Model COSMO-CLM (CCLM), Meteor. Z. 17, pp. 347-348.

Routschek, A. (2012): Auswirkungen des Klimawandels auf die Bodenerosion durch Wasser. Schriftenreihe des LfULG, Heft 29/2012, Freiberg.

Klimawandel messen – der neue KLIWA-Index Makrozoobenthos

Martin Halle (umweltbüro essen), Dr. Andreas Müller (chromgruen), Dr. Andrea Sundermann (Senckenberg Gesellschaft für Naturforschung)

1. Einleitung

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 die 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 waren taxaspezifische Temperaturpräferenzspektren über elf Temperaturklassen, die auf Basis eines bundeweiten Datensatzes des operativen WRRL-Monitorings der Bundesländer abgeleitet und anschließend mittels entsprechender Literaturdaten verifiziert worden sind.

Vorausgegangen waren zwei Teilprojekte des KLIWA-Themenfeldes „Auswirkungen des Klimawandels auf die Gewässerökologie in der KLIWA-Region“ mit folgenden Inhalten

- „Einfluss des Klimawandels auf die Fließgewässerqualität – Literaturauswertung und erste Vulnerabilitätseinschätzung“ und
- „Anforderungen an ein gewässerökologisches Klimamonitoring“.

Beide Teilprojekte waren übereinstimmend zu dem Schluss gekommen, dass Auswertungsmöglichkeiten, insbesondere zur indexbasierten Abschätzung des Einflusses der Wassertemperatur auf die Biozönose (Lebensgemeinschaft) entweder gänzlich fehlten (Biokomponenten Fische, Makrophyten und Phytobenthos) oder aber deren Entwicklung bisher nur auf wenige Artengruppen (Makrozoobenthos: Eintagsfliegen, Steinfliegen, Köcherfliegen [Schmidt-Kloiber & Hering 2008 und 2009a]) beschränkt sei.

Das zentrale Produkt des vom Projektteam ube - chromgruen - senckenberg bearbeiteten Projektes, der KLIWA-Index$_{MZB}$ (KI$_{MZB}$), wurde aufgrund theoretischer Vorüberlegungen und deren Bestätigung im Zuge der weiteren Bearbeitung, nicht als reiner Temperatur-Index des Makrozoobenthos entwickelt, sondern als „bioindizierte Äquivalenttemperatur der sommerlichen Atemhabitatbedingungen (3-Monatsmittel: Jul-Aug-Sep) des Makrozoobenthos“ [ausgedrückt in °C] definiert.

Zur weitergehenden Verifizierung des KLIWA-Index$_{MZB}$ wurde das Projektteam ube - chromgruen - senckenberg im Herbst 2016 mit dem Folgeprojekt „Verifizierungen und Praxistest zum KLIWA-Index$_{MZB}$“ beauftragt.

2. Theoretische Grundlagen

Um ein temperaturbezogenes Indikationsverfahren für das Makrozoobenthos auf der Basis vorliegender Beprobungsdaten statistisch abzuleitender Präferenzspektren für bestimmte Wassertemperaturbereiche zu entwickeln, galt es zunächst denjenigen jahreszeitlichen

Kennwert der Wassertemperatur zu ermitteln, der den stärksten Zusammenhang zum Vorkommen bzw. zur Abundanz der Makrozoobenthos-Taxa erwarten lässt.

Zur Beschreibung der Wassertemperaturverhältnisse von Fließgewässern kommen prinzipiell eine ganze Reihe unterschiedlicher Jahreskennwerte in Betracht:

- Jahreszeitliches Minimum: niedrigster Einzelmesswert der Wassertemperatur für jeweils eine der vier Jahreszeiten (oder für eines der beiden Halbjahre) pro Jahr
- Jahreszeitliches Maximum: höchster Einzelmesswert der Wassertemperatur für jeweils eine der vier Jahreszeiten (oder für eines der beiden Halbjahre) pro Jahr
- Jahreszeitlicher Mittelwert: Mittelwert der Einzelmesswerte der Wassertemperatur für jeweils eine der vier Jahreszeiten (oder für eines der beiden Halbjahre) pro Jahr
- Jahreszeitliche Schwellenwerte: spezifische Schwellenwerte der Einzelmesswerte der Wassertemperatur für jeweils eine der vier Jahreszeiten (oder für eines der beiden Halbjahre) pro Jahr
- Jahresmittelwert: arithmetischer Mittelwert aller Einzelmesswerte der Wassertemperatur pro Jahr
- Temperatursummen: aufsummierte Einzelmesswerte der Wassertemperatur eines bestimmten Zeitfensters pro Jahr (z. B. basierend auf Tagesmaxima)

Für die Auswahl des am besten geeigneten Temperaturkennwertes wurden zunächst grundsätzliche, theoretische Überlegungen zu den jahreszeitspezifischen Temperaturwirkungen auf das Makrozoobenthos von Fließgewässern angestellt und zu den nachfolgenden Hypothesen verdichtet, um anschließend die für die Kennwertwahl relevanten Schlussfolgerungen ziehen zu können.

1. „Die maßgeblichen biozönotisch relevanten Wirkungen der Wassertemperatur in Fließgewässern liegen zum einen in ihrem Steuerungseinfluss auf den Metabolismus und die damit verbundene Wachstums- und Entwicklungsgeschwindigkeit der Organismen und zum anderen in ihrer Bedeutung für die Atmungsbedingungen (Sauerstoffzehrung, Sauerstoffbedarf und Sauerstoffkonzentration).
2. Im Winter ist i. d. R. nicht mit einer atmungslimitierenden Wirkung der Wassertemperatur zu rechnen. Zu dieser Zeit dürfte die Wassertemperatur vor allem die Wachstums- und Entwicklungsgeschwindigkeit der Organismen besonders stark beeinflussen und z. B. auch als Trigger für die Dauer bestimmter Ruhestadien wirken. Die Zahl der Generationen pro Jahr (Voltinismus) kann somit von der Wassertemperatur insbesondere im Winterhalbjahr beeinflusst sein (zitiert in Senckenberg Gesellschaft für Naturforschung 2010: Mehlig & Rosenbaum-Mertens 2008, Fischer 2003, Ladewig 2004, Braune et al. 2008).
3. Im Sommer können die zu dieser Zeit hohen Wassertemperaturen dagegen vor allem zum limitierenden Faktor für die Atmungsbedingungen der Fließgewässerorganismen werden und damit die Arten- und Abundanzzusammensetzung maßgeblich bestimmen. Der Einfluss auf die Wachstums- und Entwicklungsgeschwindigkeit der Organismen dürfte in dem Zeitraum dagegen eher nachrangig sein.
4. Eine Klimawandel bedingte Temperaturerhöhung im Winter sollte daher tendenziell die Abundanzanteile von Arten mit höheren winterlichen Mindesttemperaturanforderungen (vor allem krenale, litorale und profundale Arten) gegenüber winterkältetoleranteren Arten (vor allem rhithrale Arten) erhöhen.

5. Im Sommer kann der Klimawandel vor allem durch erhöhte Wassertemperaturen und verminderte Fließgeschwindigkeiten eine Verschlechterung der Atmungsbedingungen besonders sauerstoffbedürftiger rheotypischer (d. h. meist rhithraler) Arten und eine Verbesserung der Strömungshabitatbedingungen weniger sauerstoffbedürftiger strömungsmeidender oder strömungsindifferenter Arten (d. h. überwiegend potamale, litorale oder profundale Arten) bewirken, so dass sich die Abundanzanteile zu letzteren verschieben dürften.
6. Bei einer ganzjährlichen Erhöhung der Wassertemperaturen in Kombination mit einer Verringerung der Niedrig- und Mittelwasserabflüsse ist vor allem eine Abnahme der Abundanzanteile rheotypischer, rhithraler Taxa zu erwarten."

Dass die Wassertemperatur vornehmlich in der warmen Jahreszeit einen relevanten Einfluss auf die Atmungsbedingungen in Fließgewässern hat, rührt sowohl aus der mit zunehmender Wassertemperatur abnehmenden Sauerstofflöslichkeit, als auch aus den positiv mit der Wassertemperatur korrelierten sauerstoffzehrenden (aeroben) Abbauraten für organische Substanzen sowie aus dem mit steigender Wassertemperatur erhöhten metabolischen Sauerstoffbedarf der aquatischen Organismen selbst.

In welchem Ursachen-Wirkungszusammenhang die Wassertemperatur und die Makrozoobenthoszönose unter sommerlichen Bedingungen zueinander stehen und welche anderen Habitatparameter hierbei noch eine wesentliche Rolle spielen, ist im nachfolgend abgebildeten Fließschema (Abbildung 1) dargestellt.

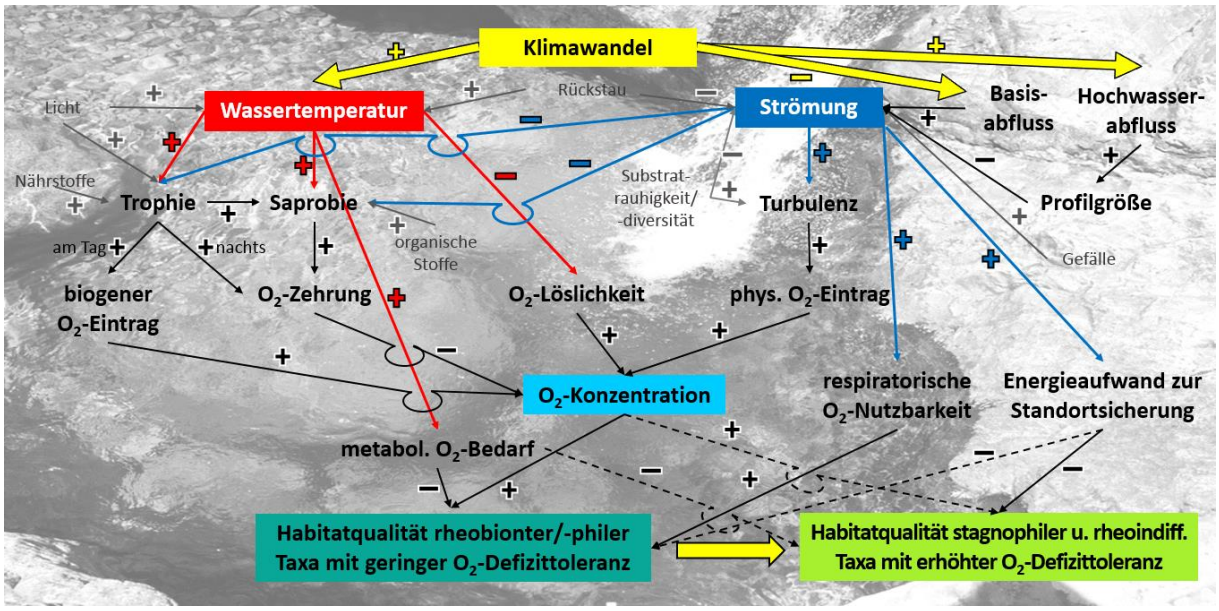


Abbildung 1. Im Projekt entwickeltes Fließschema zu den Wirkungen des Klimawandels auf den Antagonismus von Wassertemperatur und Strömung in Fließgewässern im Hinblick auf die sommerliche Atemhabitatqualität des Makrozoobenthos. Pfeile mit „+" oder „-" = verstärkende oder hemmende Wirkung; durchgezogene oder gestrichelte Pfeile = starker oder untergeordneter Einfluss; gelbe Pfeile = Hauptwirkungen des Klimawandels.

Das Fließschema (Abbildung 1) verdeutlicht, dass Temperatur und Strömung antagonistisch im Hinblick auf die Atembedingungen des Makrozoobenthos wirken und dass davon auszugehen ist, dass der Klimawandel beide Faktoren so beeinflusst, dass die strömungsangepassten Arten mit geringerer Sauerstoffdefizittoleranz eine Verschlechterung und die strömungsmeidenden oder strömungsindifferenten und hinsichtlich der Sauerstoffversorgung anspruchsloseren Taxa eine Verbesserung ihrer Habitatbedingungen erfahren werden.

Mit Bezug auf die in Abbildung 1 dargestellten Ursache-Wirkungsbeziehungen wird die folgende Hypothese abgeleitet:

> „Die Taxa des Makrozoobenthos sind nicht direkt an bestimmte sommerliche Temperaturverhältnisse, sondern an Atmungshabitatverhältnisse angepasst, die aus den Temperatur- und Strömungs-/Turbulenzbedingungen in Kombination mit den saprobiellen und trophischen Gewässerverhältnissen resultieren."

Hier drängt sich ein Vergleich mit dem Unterschied zwischen der Lufttemperatur und der für den Menschen definierten „Gefühlten Temperatur" (GT) (Jendritzky et al. 2000) oder der „Physiologisch Äquivalenten Temperatur" (PET) (Höppe 1999) auf, die thermische Maßzahlen für den physiologisch relevanten Kälte- und Wärmestress darstellen und in Abhängigkeit von Nebenbedingungen wie Luftgeschwindigkeit und Luftfeuchtigkeit von der messbaren Lufttemperatur abweichen.

Somit entspricht der über die Schwerpunkttemperaturen des Makrozoobenthos indizierbare Temperaturwert einem thermischen Äquivalent für die Qualität der sommerlichen Atmungsbedingungen (respiratorisch äquivalente Sommerwassertemperatur). Eine rein temperaturbezogene Charakterisierung einer Art z. B. als „kalt-stenotherm" [griech. „stenos" = „eng" und griech. „thermos" = warm, d. h. auf einen engen Temperaturbereich spezialisiert] ist vor diesem Hintergrund also zu hinterfragen. Ist ihr Vorkommen tatsächlich durch eine obere Temperaturschwelle limitiert? Es dürften eher die Atmungsbedingungen insgesamt sein, die ihr auch bei höheren Temperaturen hinreichende Lebensbedingungen bieten, sofern die Strömungs-/Turbulenz- und Saprobie-/Trophieverhältnisse besonders günstig für die Art ausfallen. Dann ist die Art nicht zwingend auf niedrige Wassertemperaturen angewiesen, sondern auf Habitatbedingungen, die sich durch ein möglichst niedriges Verhältnis von Sauerstoffbedarf zu Sauerstoffverfügbarkeit auszeichnen.

Da der Klimawandel sowohl die Wassertemperatur, als auch die anderen atmungsrelevanten (insbesondere die abflussabhängigen) Habitatparameter von Fließgewässern beeinflusst, ist dieser Umstand jedoch kein Nach-, sondern ein Vorteil für die Bioindikation der Gesamtwirkung des Klimawandels auf die Makrozoobenthoszönose von Fließgewässern.

3. Herleitung der taxaspezifischen Temperaturpräferenzen und des KLIWA-Index$_{MZB}$

Für die durchzuführenden Untersuchungen lagen insgesamt 4.913 Makrozoobenthos-Proben vor, die an 3.485 Untersuchungsstellen im Zeitraum zwischen 2004 und 2013 genommen wurden. Daten mit kontinuierlichen Temperatur-Messungen lagen zu 104 Messstellen sowie zu 2.730 Messstellen mit monatlichen Messungen jeweils aus dem Zeitraum von 2000 bis 2013 vor. Abbildung 2 zeigt beispielhaft die Verteilung der Messstellen mit monatlichen Messungen auf die Gewässertypen nach LAWA (logarithmische Skalierung).

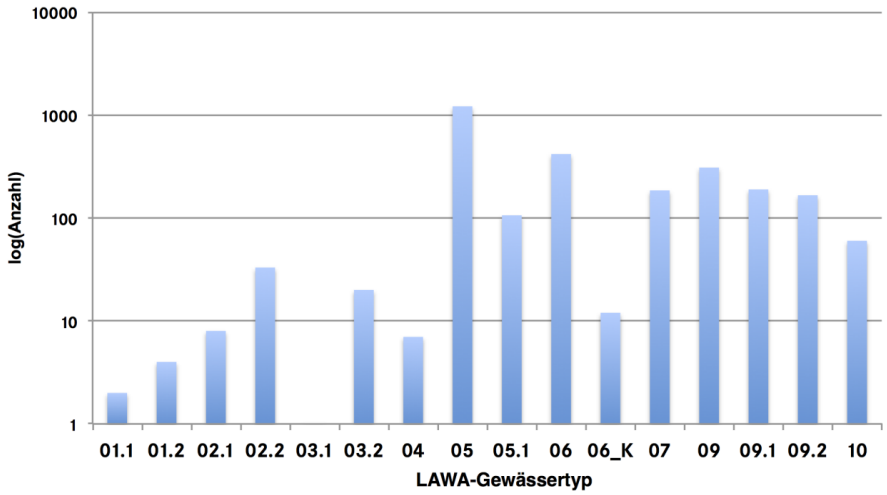


Abbildung 2. Typologische Verteilung der Temperaturmessstellen mit monatlicher Messung.

Für die gemäß obiger theoretischer Überlegungen gewählte Temperatur-Kenngröße des sommerlichen Jul-Aug-Sep-Wassertemperaturmittelwerte (JAS) konnte zudem der Nachweis erbracht werden, dass der Unterschied zwischen kontinuierlich erhobenen Messwerten und Monatsmessungen gerade hier besonders gering ist (Abbildung 3).

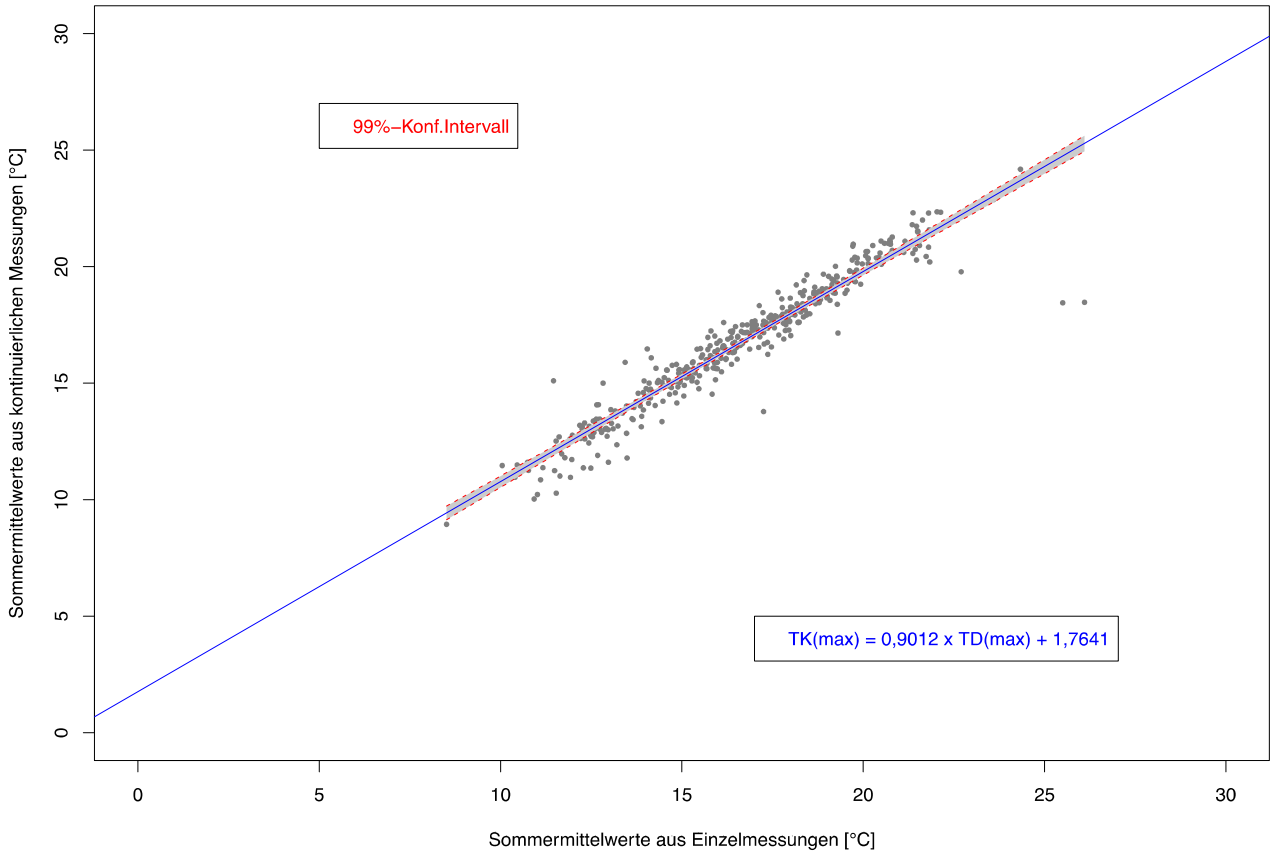


Abbildung 3. Lineare Regression zwischen Sommermittelwerten aus kontinuierlichen und diskret erhobenen Temperaturmesswerten, N = 422, R^2 =0,92.

Um taxaspezifische Präferenzspektren des Makrozoobenthos für die sommerlichen Temperaturkennwerte (JAS) zu ermitteln, wurden die gesamten Abundanznachweise jedes Taxons (Summe der 7-stufigen Abundanzklassen aller ausgewerteten Probestellen) gem. seiner jeweiligen Abundanz in unterschiedlichen Temperaturbereichen auf elf Temperaturklassen des gesamten Spektrums der mittleren Sommerwassertemperaturen aufgeteilt. Zur Vermeidung

einer Ergebnisverzerrung in Folge unterschiedlicher Anzahlen ausgewerteter Proben- bzw. Messwerte je Temperaturklasse, wurden die Abundanzklassensummen der Temperaturklassen durch die Zahl aller den jeweiligen Temperaturklassen zuzurechnenden Proben- und Messwertpaare geteilt und anschließend daraus die relativen Anteile der einzelnen Taxa an jeder Temperaturklasse bestimmt.

Auf dieser Grundlage konnte für jedes Taxon eine sog. Schwerpunkttemperatur (SWP-T) bestimmt werden, indem die relativen Anteile aller elf Temperaturklassen als Faktoren für eine gewichtete Mittelwertbildung der mittleren Klassentemperaturen verrechnet wurden. Damit entspricht die SWP-T derjenigen sommerlichen Wassertemperatur (JAS), oberhalb und unterhalb derer die Summen der relativen Abundanzen des Taxons annähernd gleich groß sind.

Insgesamt konnten so Temperaturpräferenzspektren und SWP-T von 547 MZB-Taxa[3] ermittelt und zugewiesen werden.

Beispielhaft für abgeleitete Temperaturpräferenzspektren von Arten im Niedrig-, Mittel- und Hochtemperaturbereich zeigen Abbildung 4, Abbildung 5 und Abbildung 6 die Verteilungen der relativen Abundanzen [%] zweier Köcherfliegenarten und einer Eintagsfliegenart auf die elf gebildeten Temperaturklassen (dargestellt für deren Klassenmittelwerte in °C).

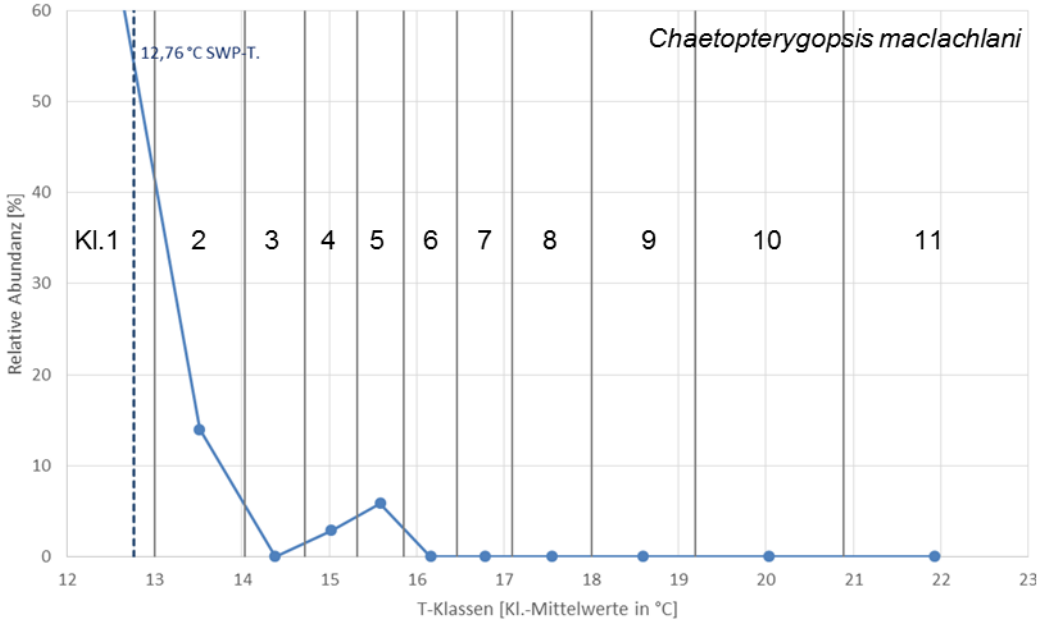


Abbildung 4. Relative Abundanzen von Chaetopterygopsis maclachlani (Trichoptera) in Abhängigkeit von den mittleren Temperaturen der Temperaturklassen; graue Senkrechte = Temperaturklassengrenzen; blau gestrichelte Senkrechte = SWP-T.

[3] Bereinigte Taxaliste, in der nur noch jeweils die differenziertesten taxonomischen Niveaus enthalten sind, so dass nicht eine Art mehrfach mit unterschiedlichen Einstufungen auftritt

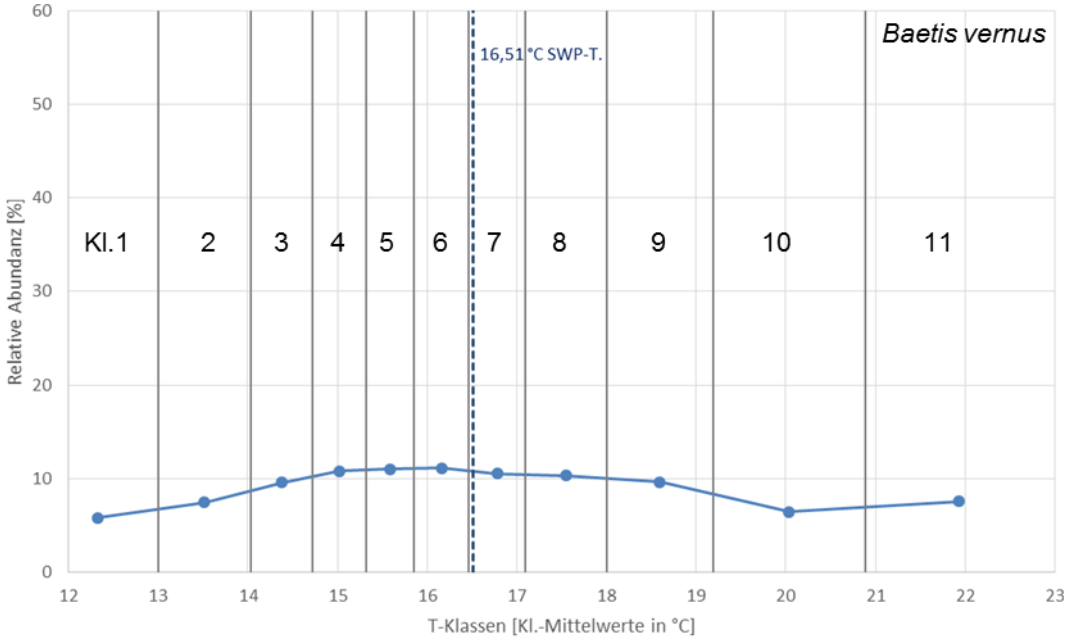


Abbildung 5. Relative Abundanzen von Baetis vernus (Ephemeroptera) in Abhängigkeit von den mittleren Temperaturen der Temperaturklassen; graue Senkrechte = Temperaturklassengrenzen; blau gestrichelte Senkrechte = SWP-T.

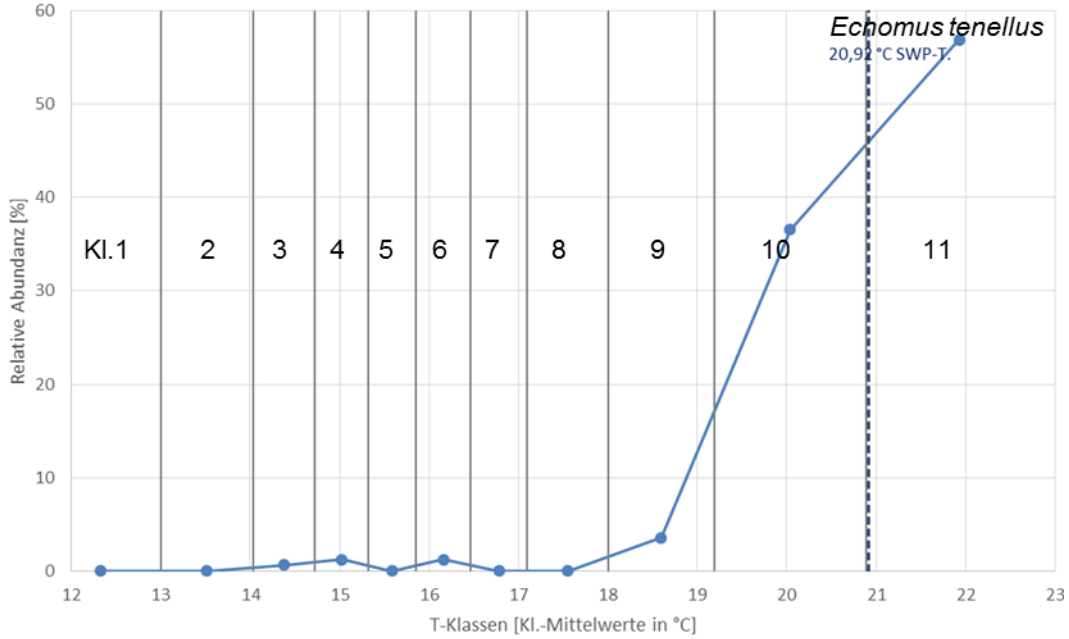


Abbildung 6. Relative Abundanzen von Ecnomus tenellus (Ephemeroptera) in Abhängigkeit von den mittleren Temperaturen der Temperaturklassen; graue Senkrechte = Temperaturklassengrenzen; blau gestrichelte Senkrechte = SWP-T.

In Fließgewässern mit besonders hohen sommerlichen Wassertemperaturen sind häufig auch die Fließgeschwindigkeiten besonders gering und die Belastungen durch Nährstoffe und organische Substanzen deutlich erhöht. Dies hat bezogen auf den reinen Temperatureinfluss überproportional schlechte Atmungsbedingungen zur Folge. Bei Fließgewässern mit sehr geringen sommerlichen Wassertemperaturen führen die ko-korrelierten Parameter demgemäß dagegen oft zu überproportional guten respiratorischen Verhältnissen. Dadurch verschieben sich die abgeleiteten Temperaturpräferenzspektren tendenziell von den Randbereichen hin zu mittleren Werten. Im Sinne einer Normierung auf die sommerliche Wassertemperatur wurde daher eine Korrekturfunktion für die SWP-T abgeleitet.

Der KLIWA-Index$_{MZB}$ einer Makrozoobenthos-Probe wird seinerseits als Abundanzklassen-gewichteter Mittelwert der korrigierten SWP-T aller zugeordneten Taxa der Probe berechnet.

Um den KLIWA-Index$_{MZB}$ sowohl mit Wassertemperaturkennwerten aus kontinuierlich als auch diskontinuierlich, d. h. stichprobenhaft ermittelten Sommertemperaturmesswerten vergleichen zu können, wurden zwei entsprechende Indexvarianten entwickelt, die auf einer Transformation mittels einer abgeleiteten Regressionsfunktion der stark miteinander korrelierten sommerlichen JAS-Wassertemperaturkennwerte beider Messwertarten basiert:

unkorrigierter KLIWA-Index$_{MZB}$: Index ist auf JAS-Wassertemperaturkennwerte aus diskontinuierlich erhobenen Messwerten ausgelegt, die in der Regel unter denjenigen tatsächlichen Wassertemperaturen liegen, die sich aus kontinuierlichen Messungen berechnen lassen.

KLIWA-Index$_{MZB(Kont-Korr)}$: Index ist auf JAS-Wassertemperaturkennwerte aus kontinuierlich erhobenen Messwerten ausgelegt.

Um den KLIWA-Index$_{MZB}$ trotz der gewässertypspezifischen bzw. typgruppenspezifischen Unterschiede der sonstigen Atemhabitatbedingungen (z. B. höhere Fließgeschwindigkeiten in Gebirgs- als in Tieflandfließgewässertypen) auf die jeweiligen typologischen Durchschnittsverhältnisse zu normieren, wurden je Gewässertyp oder Typgruppe die linearen Regressionen zwischen dem KLIWA-Index$_{MZB}$ und dem Mittelwert aus den gemittelten sommerlichen Wassertemperaturen (JAS) des Probenahmejahres und des Vorjahres (smw2j) typspezifische Korrekturfunktionen abgeleitet. Damit wurden die KI$_{MZB}$-Werte eines LAWA-Typs so transformiert, dass ihre Regressionsgerade ein 1:1-Verhältnis zwischen KI$_{MZB}$- und smw2j-Werten aufweist.
Als Beispiel dafür ist in Abbildung 7 und in Abbildung 8 dargestellt, wie sich die berechneten und die mit der typspezifischen Korrekturfunktion für den LAWA-Typ 5 (KI$_{MZB_T5}$ = 1,14698108983787 * KI$_{MZB}$ + 0,524998101129185) transformierten KI$_{MZB}$-Werte zu den smw2j-Werten verhalten.

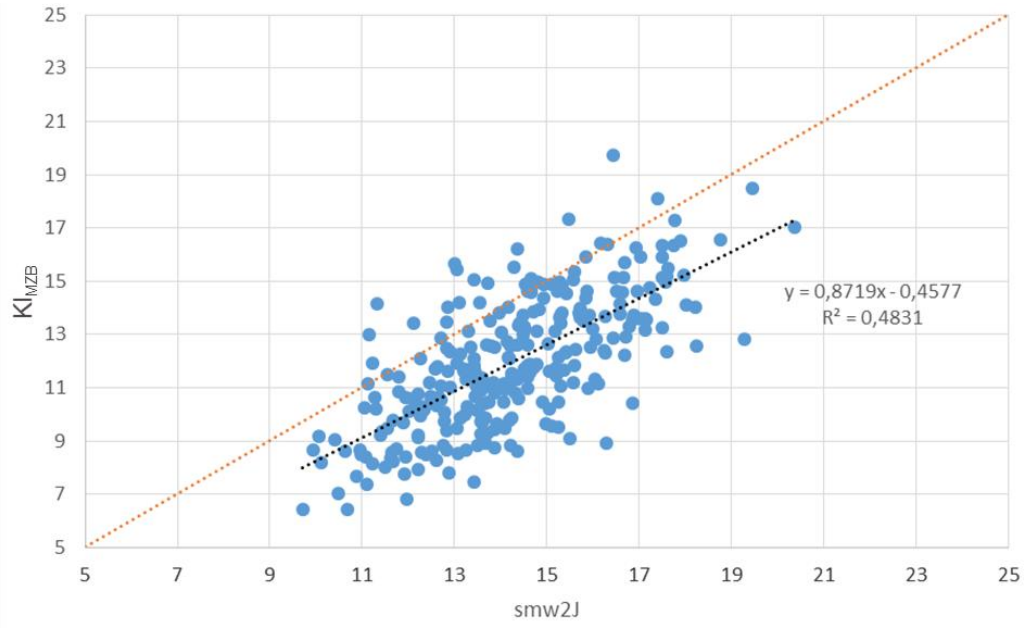


Abbildung 7. KLIWA-Index$_{MZB}$ (KI$_{MZB}$) von 283 Proben des LAWA-Typ 5 in Abhängigkeit vom Mittelwert aus den gemittelten sommerlichen Wassertemperaturen (Juli, August und September) des Probenahmejahres und des Vorjahres (smw2j); die orange gepunktete Linie kennzeichnet ein 1:1-Verhältnis zwischen KI$_{MZB}$- und smw2j-Werten.

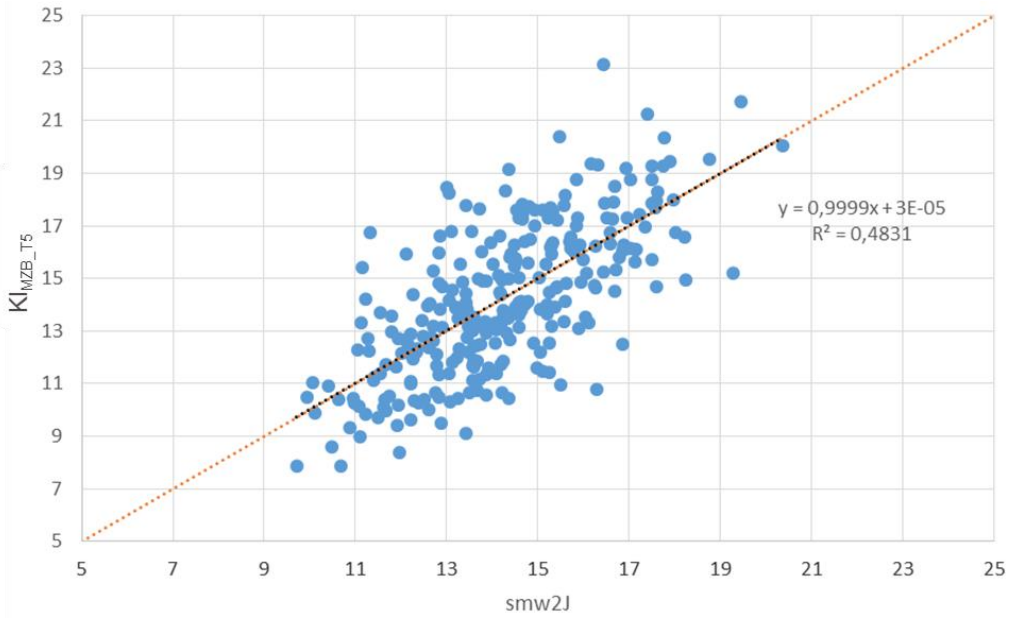


Abbildung 8. Typspezifisch für den LAWA-Typ 5 transformierter KLIWA-Index$_{MZB}$ (KI$_{MZB_T5}$) von 283 Proben des LAWA-Typ 5 in Abhängigkeit vom Mittelwert aus den gemittelten sommerlichen Wassertemperaturen (Juli, August und September) des Probenahmejahres und des Vorjahres (smw2j); die orange gepunktete Linie kennzeichnet ein 1:1-Verhältnis zwischen KI$_{MZB}$- und smw2j-Werten.

Der auf diese Weise transformierte KLIWA-Index$_{MZB}$ (oder KLIWA-Index$_{MZB(Typ/Kont-Korr)}$) stimmt somit jeweils dann mit den wie oben beschrieben ermittelten mittleren Sommerwassertemperaturen überein, wenn die sonstigen respiratorischen Rahmenbedingungen den durchschnittlichen Ausprägungen der Fließgewässer des betreffenden Typs bzw. der Typgruppe (und nicht mehr aller untersuchter Fließgewässertypen Deutschlands) entsprechen.

Als Hilfsmittel für eine nutzerfreundliche Berechnung des KLIWA-Index$_{MZB}$ wurde ein Programm implementiert, welches für gegebene Taxalisten von Makrozoobenthosproben den jeweiligen KLIWA-Index$_{MZB}$ (KI$_{MZB}$) der Proben berechnet. Das Programm verwendet das gleiche Eingabeformat wie die für die Makrozoobenthos-Bewertung nach PERLODES verwendete Standardsoftware ASTERICS der Universität Duisburg-Essen damit es für einen breiten Anwenderkreis nutzbar ist.

4. Literaturauswertung

Zur Validierung der datenbasiert abgeleiteten Temperaturpräferenzen des Makrozoobenthos wurden die in der nationalen und internationalen Fachliteratur publizierten Informationen zum Temperaturanspruch der einzelnen Makrozoobenthostaxa ermittelt und in übersichtlicher Form aufbereitet. Informationen zum Temperaturanspruch wurden nach einem vorgegebenen System von Suchbegriffen im Web of Science und weiteren verfügbaren Datenbanken (z. B. SCOPUS, Google Scholar etc.) ermittelt.

Als Suchbegriffe wurden hierbei die in Tabelle 1 gelisteten Begriffe in Kombination mit taxonomischen Einheiten (z. B. Ephemeroptera, Trichoptera) verwendet.

Tabelle 1. Liste der verwendeten Suchbegriffe, in deutscher und englischer Version.

Deutsch	Englisch
Temperatur Präferenz	Thermal/temperature preference
Temperatur Präferendum	Thermal/temperature preferendum
Temperatur Optimum	Thermal/temperature optimum
Temperatur Toleranz	Thermal/temperature tolerance
Wassertemperatur	Water temperature
Gewässertemperatur	Stream temperature
Kaltstenotherm	Cold stenotherm
Warmstenotherm	Warm stenotherm
Eurytherm	Eurytherm

Im Rahmen der Literaturrecherche wurden, anhand der in Tabelle gelisteten Suchbegriffe, 672 Quellen (u. a. Artikel, Berichte, Abschlussarbeiten) als potenziell interessant identifiziert. Alle 672 Quellen wurden gesichtet und auf für das Projekt verwertbare Informationen überprüft. Insgesamt enthielten 181 der 672 Quellen verwertbare Informationen, die für die Zusammenstellung berücksichtigt werden konnten.

Um einen visuellen Eindruck von den Ergebnissen zu bekommen, wurden im Folgenden die Ergebnisse für vier ausgewählte Taxa dargestellt (Abbildung 9). In den Grafiken wurde die relative Abundanz des Taxons für jede der 11, im Projekt gebildeten, Temperaturklassen abgebildet. Farbige senkrechte Linien entsprechen denen in der Literatur angegebenen Temperatureinstufungen. Der Farbcode gibt hierbei Auskunft über den zeitlichen Bezug der Temperaturangabe. Die Darstellungen zeigen, dass es für ein Taxon unter Umständen mehrere Angaben für bspw. das obere Ende der Temperaturtoleranz geben kann, und dass diese Angaben durchaus mehrere °C auseinander liegen können (z. B. bei Leptophlebia vespertina). Für die weitere Auswertung der Daten gingen in einem solchen Fall beide Angaben als Einzelmesswerte in die Analysen ein. Darüber hinaus wird aus der Darstellung in Abbildung 9 deutlich, dass die Reihenfolge der Temperaturangaben nicht immer einer logischen Reihenfolge entspricht: So kann es durchaus vorkommen, dass der Wert für das obere Ende der Temperaturtoleranz nicht höher liegt als der Wert für das obere Ende des Temperaturoptimums (z. B. bei Brachyptera risi und Calopteryx splendens).

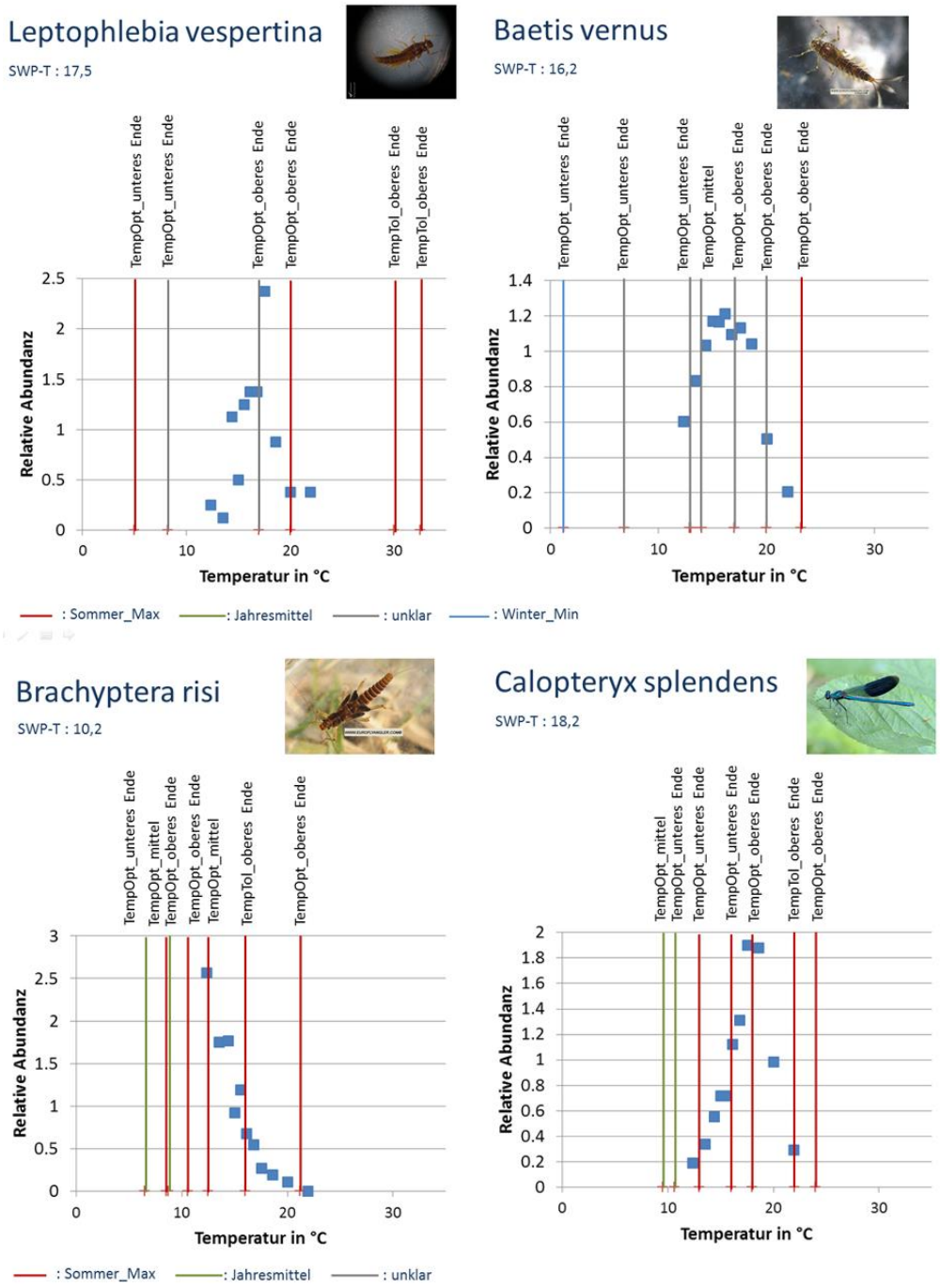


Abbildung 9. Ergebnisdarstellung für vier ausgewählte Taxa. Blaue Vierecke: Relative Abundanz (y-Achse) des Taxons in jeder der elf Temperaturklassen x-Achse. Farbige senkrechte Linien: Temperaturangaben aus der Literatur. Der Farbcode gibt Auskunft über den zeitlichen Bezug der Temperaturangabe (siehe Grafik). SWP-T: Schwerpunkttemperatur.

Insgesamt wird deutlich, dass die derzeit in der Literatur verfügbaren Informationen zu taxonspezifischen Temperaturansprüchen hinsichtlich der Herkunft der Daten und den Bezugsgrößen der Informationen sehr heterogen sind. Wie mit dieser heterogenen Datengrundlage umgegangen wurde, wird im folgenden Kapitel dargestellt.

Die folgenden Grafiken (Abb. 10) veranschaulichen die Ergebnisse aus dem Abgleich zwischen berechneter Schwerpunkttemperatur und Literaturangaben. Es wurden Grafiken für die Teildatensätze erstellt, die eine einheitliche zeitliche Bezugsgröße aufwiesen und für Teildatensätze, die eine hoch signifikante Korrelation mit rho ≥ 0,50 aufweisen.

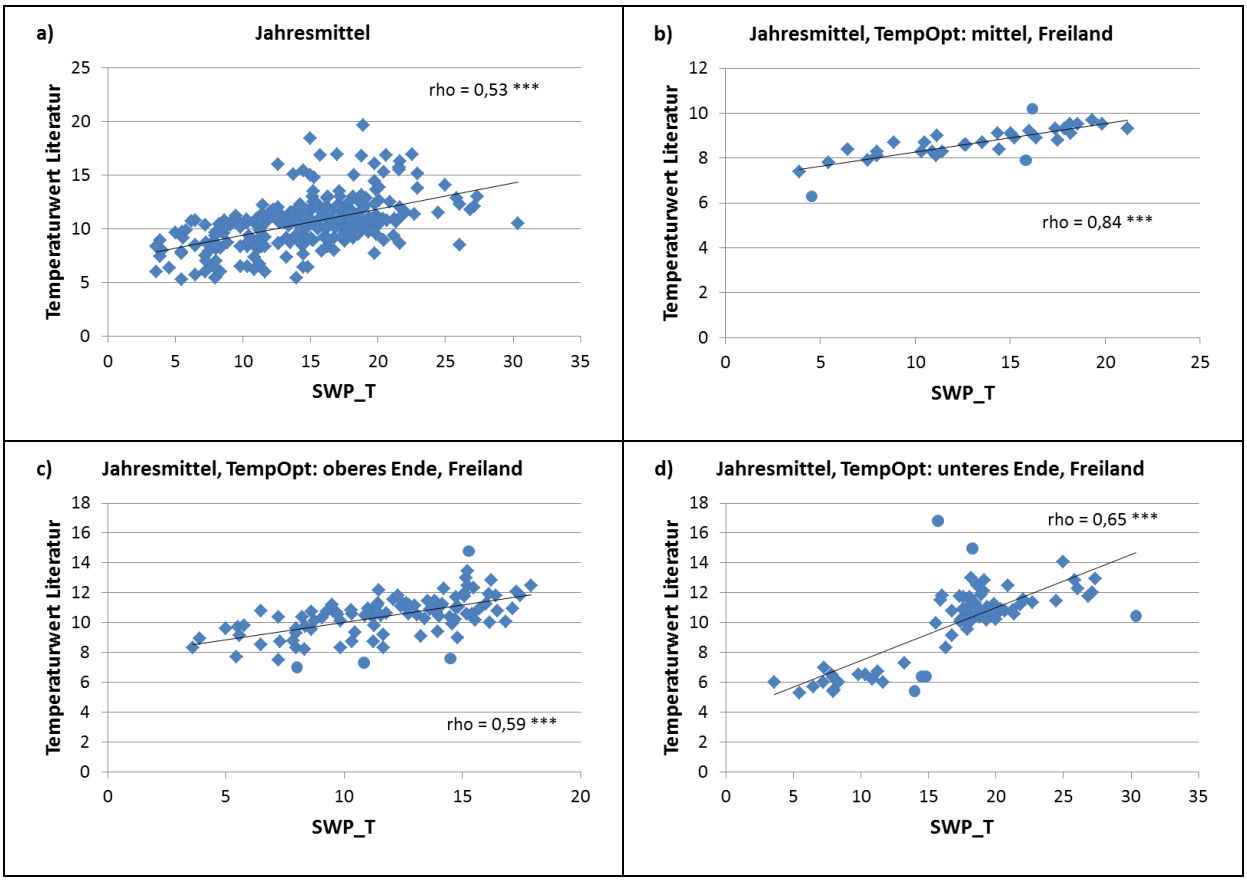


Abbildung 10. Streudiagramme für Teildatensätze, deren Literaturangaben sich auf Jahresmittelwerte beziehen. Die Diagrammüberschrift indiziert, um welchen Teildatensatz es sich handelt. Runde Symbole: Datenpunkte werden im Folgenden einer Einzelfallbetrachtung unterzogen. (SWP_T = Schwerpunkttemperatur).

Insgesamt zeigte sich, dass die Ergebnisse der Korrelationen besser werden, je homogener der (Teil-)Datensatz ist. Darüber hinaus wird deutlich, dass die berechneten Schwerpunkttemperaturen insgesamt – unter Berücksichtigung der Heterogenität der Literaturangaben – gut mit den Literaturangaben korrelieren und somit plausibel sind.
Vermeintliche Unstimmigkeiten zwischen Literaturangeben und berechneter Schwerpunkttemperatur traten nur bei einer geringen Anzahl (N = 38 von 389) von Fällen auf. Von diesen einer genaueren Einzelfallprüfung unterzogenen Taxa zeichneten sich 31 Taxa dadurch aus, dass die Schwerpunkttemperatur durchaus als plausibler anzusehen ist. Es ergaben sich in diesen Fällen zwar Widersprüchlichkeiten im Abgleich zwischen der Schwerpunkttemperatur und einzelnen Literaturangaben, im Vergleich mit weiteren Literaturangaben zeigt jedoch eine gute Übereinstimmung mit der berechneten Schwerpunkttemperatur.
Als Beispiel soll hier Dugesia tigrina genannt werden. Diese Art wurde in der Literatur mit 16,0 °C (Sommer_Maximum, Temperaturoptimum: oberes Ende) ein vergleichsweise niedriges Temperaturoptimum zugewiesen. Mit 22,7°C liegt die SWP-T vergleichsweise viel höher. In der Literaturrecherche konnten für Dugesia tigrina jedoch acht weitere Temperaturwerte, mit unterschiedlichen Bezugsgrößen, ermittelt werden; alle korrelieren recht gut mir der Schwerpunkttemperatur, so dass die Schwerpunkttemperatur plausibel erscheint.
In anderen Beispielen passten bei einem direkten Abgleich, Literaturangaben und Schwerpunkttemperatur recht gut zueinander auch wenn die Messpunkte in der Grafik außerhalb der Punktwolke lagen. Dies war zum Beispiel bei Rhyacophila evoluta der Fall. Zu dieser Art ist in der Literatur folgendes zu lesen: „Die Art tolerierte im Untersuchungsgebiet Gewässer mit sommerlichen Höchsttemperaturen von bis zu 15,2 °C und wurde wiederholt an Probestellen nachgewiesen, mit Wassertemperaturen im Sommer von 14-15 °C.“ Die berechnete

Schwerpunkttemperatur von 15,4 °C passt sehr gut zu den Literaturangaben, auch wenn der Messpunkt in der Grafik geringfügig außerhalb der Punktwolke lag.
In sieben der insgesamt 38 Fälle passten Literaturangaben und berechnete SWP-T nicht gut zu-einander und es konnte, basierend auf der Datengrundlage nicht, ausgemacht werden, welche Angabe plausibler ist.
Hinsichtlich des Abgleichs zwischen der SWP-T und den Einstufungen auf www.freshwaterecology.info fielen für insgesamt zehn Taxa größere Abweichungen auf. In den meisten Fällen waren dies jedoch Taxa, deren Datengrundlage für die Berechnung der Schwerpunkttemperaturen nicht hinreichend gut war (wenig Fundpunkte oder unplausible Verteilung der Funddaten auf die elf Temperaturklassen). In zwei Fällen, für Kageronia fuscogrisea und Rhithrogena hercynia, konnte allerdings nicht geklärt werden, welche der beiden Einstufungen (www.freshwaterecology.info oder Schwerpunkttemperatur) plausibler ist.

5. Verifizierungen und Praxistest zum KLIWA-Index$_{MZB}$

Übergeordnetes Ziel des Anschlussprojektes „Verifizierungen und Praxistest zum KLIWA-Index$_{MZB}$“ war es, den KLIWA-Index$_{MZB}$ vor allem anhand unabhängiger Daten von Beispielgewässern auf Plausibilität zu überprüfen und daraus Rückschlüsse auf ggf.

- noch nicht hinreichend berücksichtigte Einflussfaktoren (insbesondere Neozoen und Saprobie) sowie
- erforderliche Hinweise zur Anwendung und Optimierung des KLIWA-Index$_{MZB}$

ableiten zu können. In diesem Sinne wurden als wichtige noch nicht im Vorgängerprojekt berücksichtigte Datengrundlagen die Makrozoobenthos- und Wassertemperaturdaten der beiden nachfolgend genannten Projekte ausgewählt, da in einem Fall sehr detaillierte langjährige Datenreihen mit hoher zeitlicher Dichte für einzelne Messstellen und im anderen Fall mehrere Messstellen im Längsverlauf einzelner Fließgewässer mit aufeinander beziehbaren Makrozoobenthos- und Wassertemperaturdaten vorliegen:

Marten, M. et al. (ausgew. Zeitraum 1995 bis 2013) „Trendbiomonitoring –Biozönotisches Langzeit-Monitoring in Fließgewässern Baden-Württembergs“ (TBM) der Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg LUBW Referat Medienübergreifende Umweltbeobachtung, Klimawandel, (LUBW (Hrsg.),

Korte, T. und M. Sommerhäuser (2011): „Untersuchung zur Verbreitung von wärmeliebenden Neozoen und deren Einfluss auf die Bewertung nach EG-Wasserrahmenrichtlinie“ erstellt im Rahmen des BMBF-Projekts „Auswirkungen des Klimawandels auf die Lebensgemeinschaften in großen Flüssen (dynaklim)“.

Dank der freundlichen und konstruktiven Bereitschaft der Autoren beider Studien, die jeweiligen abiotischen und biotischen Ursprungsdaten für den vorliegend dokumentierten Praxistest des KLIWA-Index$_{MZB}$ zur Verfügung zu stellen, konnten nicht nur beide Hypothesen durch eigene Auswertungen überprüft werden, sondern auch wesentliche Erkenntnisse zu weiteren praktischen Anwendungsfragen des KLIWA-Index$_{MZB}$ aus den Auswertungen der Projektdaten gewonnen werden. Die bereits im Vorgängerprojekt verwendeten Datengrundlagen sowie neue, über die Universität Duisburg-Essen bereitgestellte bundesweite Makrozoobenthos-Monitoringdaten der Bundesländer (auch die Nicht-KLIWA-Bundesländer erteilten hierzu die Verwendungsberechtigungen) wurden zudem hinzugezogen.

Basierend auf Auswertungen der umfangreichen Datensätze des Trendbiomonitorings (TBM), des BMBF-Projekts dynaklim sowie der Monitoringdaten der Bundesländer konnten eine Reihe anwendungsrelevanter Fragen beantwortet werden. Dabei ging es neben Fragen der zeitlichen und räumlichen Indikationsqualität und -sensitivität des Indexes auch darum,

ob durch Neozoen und die verschiedenen Korrekturfunktionen der Index ggf. verfälscht werden könnte. Außerdem wurden die Zusammenhänge zwischen dem KLIWA-Index$_{MZB}$ und den PERLODES-Bewertungsmodulen ermittelt und darauf basierend exemplarische Prognosen für die Verschiebung der relativen Anteile unterschiedlicher ökologischer Bewertungsklassen einer exemplarischen Grundgesamtheit von Probestellen einzelner Fließgewässertypen in Folge einer Erhöhung des KLIWA-Index$_{MZB}$ um 1 bzw. 2 Grad ermittelt.

Auswertungen des Trendbiomonitorings (TBM)
Die TBM-Daten wurden in einem ersten Schritt gesichtet und anschließend diejenigen Probestellen herausgefiltert, die folgende Kriterien erfüllen:

- Vierteljährliche Makrozoobenthos-Beprobungen über den überwiegenden oder gesamten Zeitraum
- Mindestens monatliche Einzelmesswerte der Wassertemperatur über den überwiegenden oder gesamten Zeitraum
- Lage der Temperatur-Messstellen maximal ca. 1 km von der Beprobungsstelle des Makrozoobenthos entfernt

Insgesamt konnten so die langjährigen Datensätze von sechs Probestellen des Makrozoobenthos aus vier Fließgewässern für den Praxistest ausgewählt werden. Abbildung 11 zeigt die verorteten Probestellen des TBM (Zeitraum 1995 bis 2013), die die obigen Voraussetzungen erfüllen.

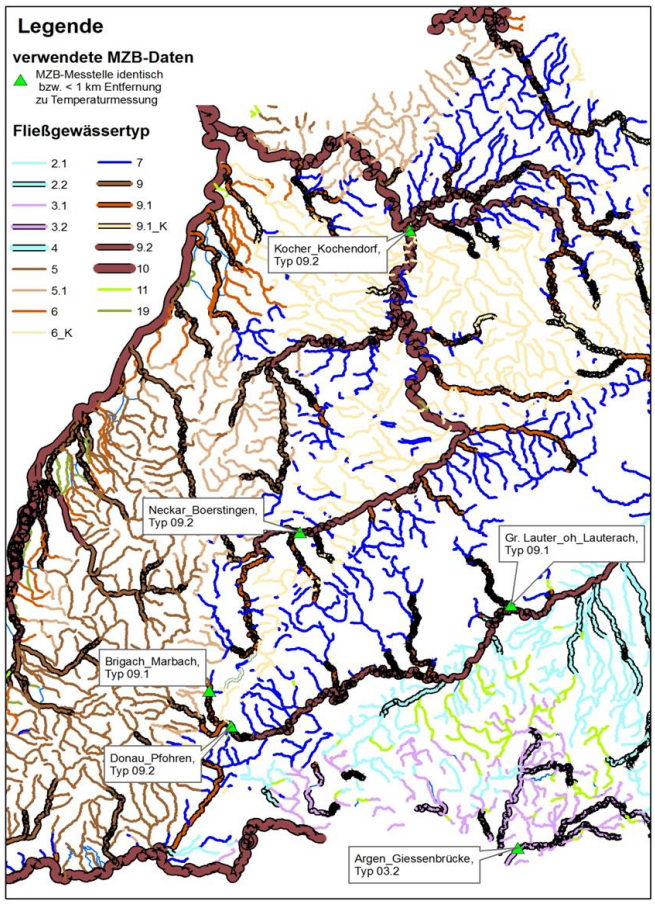


Abbildung 11. Übersichtskarte zu den für den Praxistest ausgewählten TBM-Probestellen.

Im Einzelnen wurden folgende Kenngrößen für den Abgleich zwischen den sommerlichen Wassertemperaturen und dem KLIWA-Index$_{MZB}$ berücksichtigt:

Probestelle	Stelle der Makrozoobenthosbeprobung
Kategorie	Berechnungskategorie des KLIWA-Index$_{MZB}$ im Hinblick auf Neozoen: Berechnung des Indexes entweder mit oder ohne Berücksichtigung der jeweils nachgewiesenen Neozoentaxa
Kombination	Kombination zueinander in Bezug gesetzter zeitlicher Aggregationsvarianten der jährlichen Wassertemperaturkennwerte (TW) und der KLIWA-Index$_{MZB}$-Werte: KI$_{MZB}$ versus TW (KI$_{MZB}$ vs TW); KI$_{MZB}$ versus 3-Jahresmittelwert der TW (KI$_{MZB}$ vs 3JMW TW); 3-Jahresmittelwert der KI$_{MZB}$ versus 3-Jahresmittelwert der TW (3JMW KI$_{MZB}$ vs 3JMW TW); in allen Fällen besteht jeweils ein einjährlicher Versatz zwischen den Index- und den TW-Kennwerten, wobei Letztere zeitlich vorausgegangen sind, d. h. deren Messjahr dem MZB-Beprobungsjahr minus 1 entspricht, bzw. bei den 3-jährigen TW- und/oder KI$_{MZB}$-Mittelwerten das jeweils mittlere der drei Jahre anstelle des Messjahres verwendet wird
KI$_{MZB}$-Typ	Verwendete Berechnungstypen des KLIWA-Index$_{MZB}$: entweder nur mit Wertekorrektur für den Bezug von diskreten Temperaturdatengrundlagen zu kontinuierlich erhobenen Temperaturdaten = KI_MZB (Kont-Korr) oder zusätzlich auch mit Transformationen zur Anpassung an die gewässertypgruppenspezifischen Verhältnisse = KI_MZB (Typ/Kont-Korr)
TW-Typ	Typen der Wassertemperaturkennwerte, die entweder direkt auf den Wassertemperaturmesswerten (gemessen) oder auf den von diesen interpolierten Werten (interpoliert) für die jeweiligen Monate beruhen, deren Kürzel nachfolgend erläutert sind: JAS = Mittelwert der Monate Juli, August und September; JJA = Mittelwert der Monate Juni, Juli und August; JA = Mittelwert der Monate Juli und August; Max = Maximalwert
Serie	1., 2., 3. oder 4. MZB-Beprobung pro Jahr
MW(KI$_{MZB}$-TW)	Mittelwert der Differenzen zwischen den KLIWA-Index$_{MZB}$-Werten und den zugeordneten Wassertemperaturkennwerten TW
$\lvert$MW(KI$_{MZB}$-TW)$\rvert$	Absolutbetrag des Mittelwerts der Differenzen zwischen den KLIWA-Index$_{MZB}$-Werten und den zugeordneten Wassertemperaturkennwerten TW
MW$\lvert$(KI$_{MZB}$-TW)$\rvert$	Mittelwert der Absolutbeträge der Differenzen zwischen den KLIWA-Index$_{MZB}$-Werten und den zugeordneten Wassertemperaturkennwerten TW
Stabw(KI$_{MZB}$-TW)	Standardabweichung der Differenzen zwischen den KLIWA-Index$_{MZB}$-Werten und den zugeordneten Wassertemperaturkennwerten TW
Stabw$\lvert$(KI$_{MZB}$-TW)$\rvert$	Standardabweichung der Absolutbeträge der Differenzen zwischen den KLIWA-Index$_{MZB}$-Werten und den zugeordneten Wassertemperaturkennwerten TW
R^2-Wert	Bestimmtheitsmaß (0-1)
p-Wert	Signifikanzmaß
Stng	Steigung der Regression zwischen den KLIWA-Index$_{MZB}$-Werten und den zugeordneten Wassertemperaturkennwerten TW
Stng-1	Abweichung der Steigung der Regression zwischen den KLIWA-Index$_{MZB}$-Werten und den zugeordneten Wassertemperaturkennwerten TW von 1
$\lvert$Stng-1$\rvert$	Absolutbetrag der Abweichung der Steigung der Regression zwischen den KLIWA-Index$_{MZB}$-Werten und den zugeordneten Wassertemperaturkennwerten TW von 1
Schntpkt	Schnittpunkt der Regression zwischen den KLIWA-Index$_{MZB}$-Werten und den zugeordneten Wassertemperaturkennwerten TW

Die Auswahl der je TBM-Messstelle belastbarsten Kombination aus KLIWA-Index$_{MZB}$ und sommerlicher Wassertemperatur TW wurde gemäß folgenden Kriterien vorgenommen (Kennzeichnung in den Tabellen mittels blauer Schrift; nur für diese Kombinationen sind Diagramme im Berichtsteil als Abbildungen dargestellt):

TW-Typ	Verwendung von JAS, weil die Präferenzspektren der Indextaxa des KLIWA-Index$_{MZB}$ auf diese Sommertemperaturen ausgelegt sind und weil JAS überwiegend die besten Beziehungen zwischen dem KLIWA-Index$_{MZB}$ und den zugeordneten Wassertemperaturkennwerten TW aufweist. Fast ebenso gut korreliert JJA.
p-Wert	<0,05 als Mindestsignifikanzanforderung
R^2-Wert	Möglichst hoher Wert
|Stng-1|	Möglichst kleiner Absolutbetrag der Abweichung der Steigung der Regression zwischen den KLIWA-Index$_{MZB}$ und den zugeordneten Wassertemperaturkennwerten TW von 1
|MW(KI$_{MZB}$-TW)|	Möglichst kleiner Absolutbetrag des Mittelwerts der Differenzen zwischen den KLIWA-Index$_{MZB}$ und den zugeordneten Wassertemperaturkennwerten TW
MW|(KI$_{MZB}$-TW)|	Möglichst kleiner Mittelwert der Absolutbeträge der Differenzen zwischen den KLIWA-Index$_{MZB}$ und den zugeordneten Wassertemperaturkennwerten TW
Stabw(KI$_{MZB}$-TW)	Möglichst kleine Standardabweichung der Differenzen zwischen den KLIWA-Index$_{MZB}$ und den zugeordneten Wassertemperaturkennwerten TW
Stabw|(KI$_{MZB}$-TW)|	Möglichst kleine Standardabweichung der Absolutbeträge der Differenzen zwischen den KLIWA-Index$_{MZB}$ und den zugeordneten Wassertemperaturkennwerten TW
Serie	Auswahl derjenigen Serie (1, 2, 3 oder 4), die für die beiden Kombinationen KI$_{MZB}$ vs. 3JMW TW und 3JMW KI$_{MZB}$ vs. 3JMW TW gemäß obiger Kriterien insgesamt die besten Beziehungen zwischen dem KLIWA-Index$_{MZB}$ und den zugeordneten Wassertemperaturkennwerten TW aufweist und Anwendung auf alle drei Kombinationen (also auch auf KI$_{MZB}$ vs. TW); alle Kennwerte der ausgewählten Serie sind jeweils in blauer Schrift kenntlich gemacht

In nachfolgender Tabelle (Tabelle 2) sind die Auswertungsergebnisse exemplarisch für eine der Probestellen (Donau_Pfohren) dargestellt. Um hierbei einen unmittelbaren Eindruck von der Güte der gemäß oben genannter Kriterien bewerteten Beziehungen zwischen dem KLIWA-Index$_{MZB}$ und der sommerlichen Wassertemperatur zu vermitteln, wurden die einzelnen bewertungsrelevanten Spalten automatisiert zwischen rot (schlecht) und grün (gut) mit relativen Farbintensitäten eingefärbt und zudem die Kennwerte der danach ausgewählten aussagekräftigsten Beprobungsserie in blauer Schrift kenntlich gemacht.

Tabelle 2. Donau_Pfohren: Auswertungsergebnisse der Beziehungen zwischen den sommerlichen Wassertemperaturen (TW) und dem KLIWA-Index$_{MZB}$ für verschiedene Kombinationsvarianten unter Verwendung des KI$_{MZB}$(Kont-Korr) mit Neozoen sowie der interpolierten TW-Werte.

Donau_Pfohren, Typ 09.2: KI$_{MZB}$(Kont-Korr) / TW interpoliert														
			mit Neozoen											
Kombination	TW-Typ	Serie	MW (KI$_{MZB}$-TW)	| MW (KI$_{MZB}$-TW) |	MW | (KI$_{MZB}$-TW) |	Stabw (KI$_{MZB}$-TW)	Stabw | (KI$_{MZB}$-TW) |	r^2-Wert	p-Wert	Stng	| Stng-1 |	Schntpkt
KI$_{MZB}$ vs TW	JAS	1	-1,085	1,085	1,265	1,019	0,770	**0,232**	0,04304	0,7392	0,2608	2,8065
		2	0,106	0,106	1,022	1,248	0,680	**0,044**	0,40516	0,3286	0,6714	10,1250
		3	**0,371**	**0,371**	**0,676**	**0,812**	**0,567**	**0,252**	**0,03372**	**0,5863**	**0,4137**	**6,5436**
		4	1,023	1,023	1,178	1,055	0,866	**0,008**	0,72368	0,0985	0,9015	14,4750
	JJA	1	-1,816	1,816	1,819	0,949	0,944	**0,334**	0,01206	0,7861	0,2139	1,5320
		2	-0,625	0,625	1,085	1,274	0,888	**0,052**	0,36186	0,3184	0,6816	10,0440
		3	-0,360	0,360	0,782	0,855	0,470	**0,249**	0,03488	0,5170	0,4831	7,2012
		4	0,292	0,292	0,854	1,034	0,622	**0,049**	0,37722	0,2159	0,7841	12,5660
	JA	1	-2,065	2,065	2,065	0,979	0,979	**0,302**	0,01806	0,7391	0,2609	2,0837
		2	-0,874	0,874	1,214	1,281	0,943	**0,051**	0,36675	0,3114	0,6887	10,0780
		3	-0,609	0,609	0,886	0,875	0,571	**0,232**	0,04278	0,4928	0,5072	7,4564
		4	0,043	0,043	0,901	1,093	0,581	**0,020**	0,57650	0,1359	0,8641	13,7850
	Max	1	-2,465	2,465	2,465	0,987	0,987	**0,325**	0,01352	0,6790	0,3210	2,7685
		2	-1,273	1,273	1,465	1,326	1,096	**0,056**	0,34661	0,2874	0,7126	10,3430
		3	-1,009	1,009	1,202	0,961	0,686	**0,203**	0,06053	0,4084	0,5916	8,6363
		4	-0,356	0,356	1,008	1,140	0,598	**0,034**	0,46506	0,1570	0,8431	13,3870
KI$_{MZB}$ vs 3JMW TW	JAS	1	-1,139	1,139	1,225	0,967	0,848	**0,531**	0,00137	2,4023	1,4023	-22,0950
		2	0,109	0,109	0,818	1,034	0,607	**0,441**	0,00501	2,2634	1,2634	-18,7710
		3	**0,415**	**0,415**	**0,659**	**0,760**	**0,545**	**0,309**	**0,02550**	**1,3735**	**0,3735**	**-5,1672**
		4	1,065	1,065	1,128	0,876	0,787	**0,018**	0,62508	0,3082	0,6918	11,4040
	JJA	1	-1,868	1,868	1,868	0,891	0,891	**0,558**	0,00088	1,8009	0,8009	-14,4190
		2	-0,620	0,620	0,834	0,976	0,787	**0,454**	0,00423	1,6782	0,6782	-11,2490
		3	-0,314	0,314	0,651	0,751	0,467	**0,301**	0,02763	0,9926	0,0074	-0,1971
		4	0,337	0,337	0,709	0,929	0,669	**0,014**	0,66020	0,2029	0,7971	12,8300
	JA	1	-2,114	2,114	2,114	0,904	0,904	**0,547**	0,00106	1,8465	0,8465	-15,5900
		2	-0,866	0,866	0,970	0,982	0,872	**0,453**	0,00426	1,7369	0,7369	-12,5970
		3	-0,560	0,560	0,793	0,762	0,496	**0,281**	0,03455	0,9930	0,0071	-0,4482
		4	0,090	0,090	0,722	0,940	0,580	**0,006**	0,77558	0,1365	0,8635	13,8360
	Max	1	-2,513	2,513	2,513	0,861	0,861	**0,559**	0,00087	1,5770	0,5770	-11,9300
		2	-1,265	1,265	1,302	0,953	0,899	**0,454**	0,00421	1,4693	0,4693	-8,9242
		3	-0,960	0,960	1,065	0,776	0,612	**0,267**	0,04025	0,8182	0,1818	2,0074
		4	-0,309	0,309	0,848	0,986	0,554	**0,005**	0,79556	0,1049	0,8951	14,2980
3JMW KI$_{MZB}$ vs 3JMW TW	JAS	1	-1,119	1,119	1,119	0,711	0,711	**0,598**	0,00044	2,0283	1,0283	-16,4850
		2	0,081	0,081	0,687	0,821	0,422	**0,483**	0,00279	1,9726	0,9726	-14,4540
		3	**0,438**	**0,438**	**0,438**	**0,335**	**0,335**	**0,652**	**0,00016**	**1,2237**	**0,2237**	**-2,9053**
		4	1,017	1,017	1,017	0,531	0,531	**0,086**	0,26993	0,4104	0,5896	9,8273
	JJA	1	-1,847	1,847	1,847	0,637	0,637	**0,626**	0,00026	1,5172	0,5172	-9,9532
		2	-0,647	0,647	0,700	0,784	0,733	**0,462**	0,00377	1,4102	0,4102	-7,0756
		3	-0,291	0,291	0,419	0,352	0,164	**0,607**	0,00037	0,8636	0,1364	1,8472
		4	0,288	0,288	0,510	0,588	0,396	**0,101**	0,23068	0,3247	0,6753	10,8720
	JA	1	-2,094	2,094	2,094	0,640	0,640	**0,637**	0,00021	1,5843	0,5843	-11,3950
		2	-0,894	0,894	0,919	0,787	0,755	**0,465**	0,00361	1,4651	0,4651	-8,2973
		3	-0,538	0,538	0,578	0,355	0,280	**0,594**	0,00048	0,8843	0,1157	1,3044
		4	0,042	0,042	0,474	0,601	0,351	**0,068**	0,32830	0,2767	0,7234	11,5570
	Max	1	-2,493	2,493	2,493	0,597	0,597	**0,653**	0,00015	1,3560	0,3560	-8,3032
		2	-1,293	1,293	1,293	0,769	0,769	**0,460**	0,00386	1,2319	0,2319	-5,0770
		3	-0,937	0,937	0,937	0,398	0,398	**0,558**	0,00088	0,7246	0,2754	3,5565
		4	-0,358	0,358	0,583	0,657	0,454	**0,067**	0,33327	0,2315	0,7685	12,1830

Die anschließenden Abbildungen (Abbildung 12, Abbildung 13 und Abbildung 14) zeigen die in der Tabelle selektierten belastbarsten Beziehungen (blaue Schrift) zwischen dem KLIWA-Index$_{MZB}$ und der sommerlichen Wassertemperatur noch einmal als Diagramme.

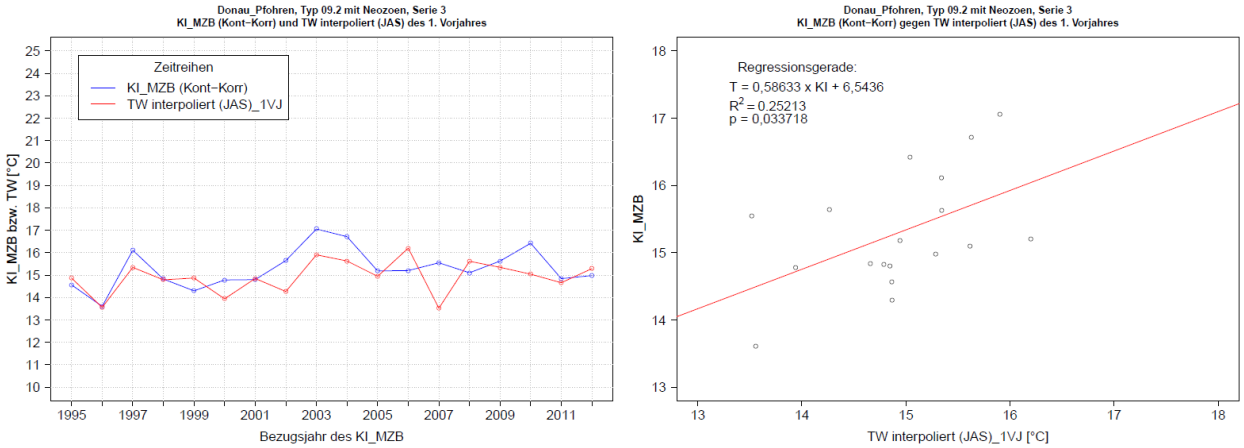


Abbildung 12. Donau_Pfohren: KI_{MZB}(Kont-Korr) mit Neozoen, Serie 3 vs. TW (JAS); links: Entwicklung der JAS-TW (rot) und KLIWA-$Index_{MZB}$-Werte im zeitlichen Verlauf; rechts: Scatterplot der Beziehung zwischen beiden Größen.

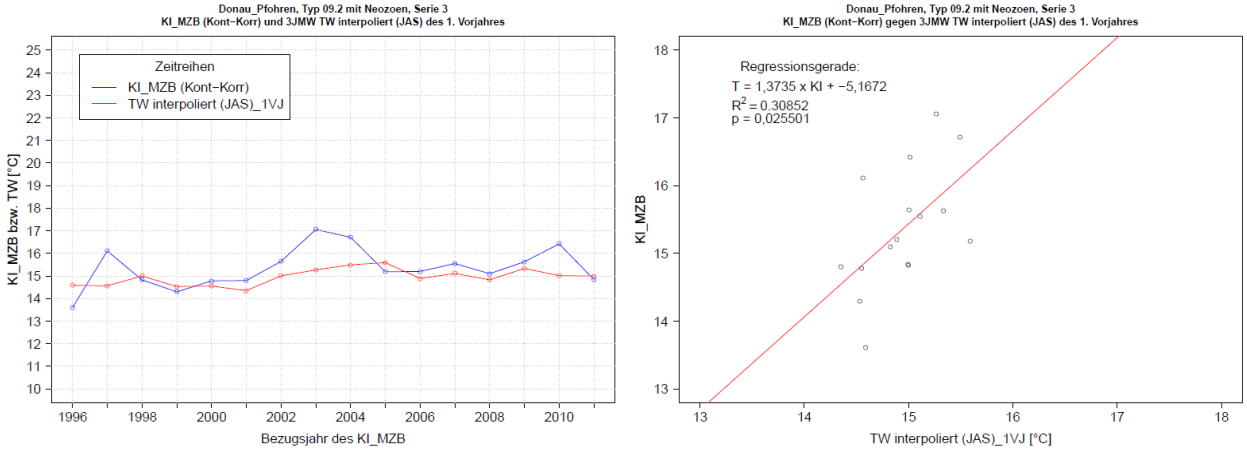


Abbildung 13. Donau_Pfohren: KI_{MZB}(Kont-Korr) mit Neozoen, Serie 3 vs. 3JMW TW (JAS); links: Entwicklung der JAS-TW (rot) und KLIWA-$Index_{MZB}$-Werte im zeitlichen Verlauf; rechts: Scatterplot der Beziehung zwischen beiden Größen.

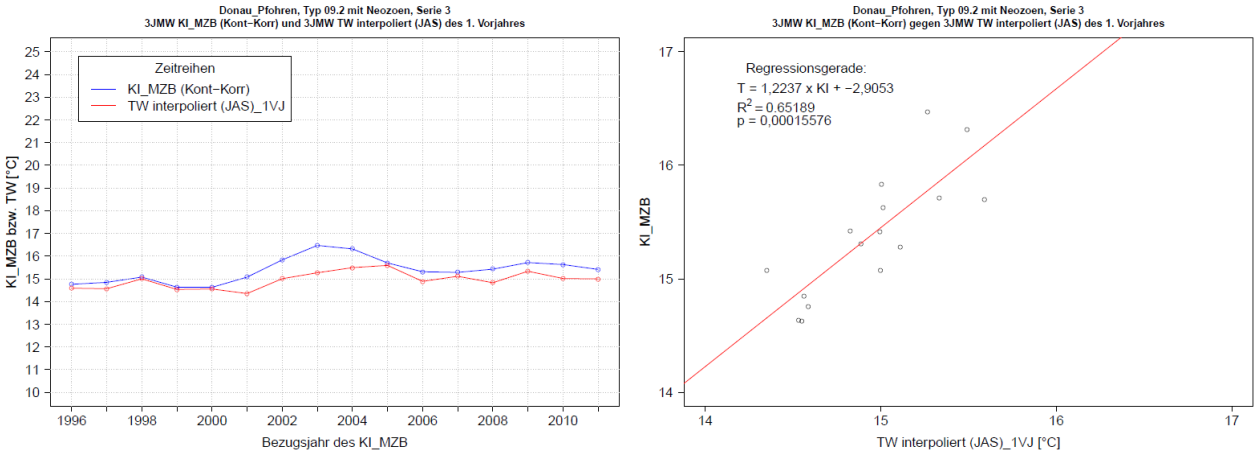


Abbildung 14. Donau_Pfohren: 3JMW KI_{MZB}(Kont-Korr) mit Neozoen, Serie 3 vs. 3JMW TW (JAS); links: Entwicklung der JAS-TW (rot) und KLIWA-$Index_{MZB}$-Werte im zeitlichen Verlauf; rechts: Scatterplot der Beziehung zwischen beiden Größen.

Die umfangreichen Auswertungsergebnisse für die sechs untersuchten TBM-Stellen zeigen sehr deutlich, dass der KLIWA-$Index_{MZB}$ nachweislich auf die Entwicklung der sommerlichen Wassertemperaturen an einer Probestelle reagiert.

Wichtig für eine belastbare Indikation der sommerlichen Wassertemperaturentwicklung ist,

- dass das Verhältnis von Temperatur- zu Abflussgeschehen an der Probestelle nicht allzu stark von den durchschnittlichen Standardausprägungen des Gewässertyps abweicht (kann z. B. bei Kühlwassereinleitungen oder Ausleitungsstrecken der kleinen Wasserkraft deutlich verändert sein),
- dass der richtige Beprobungszeitraum im Jahr gewählt wird – hier zeigen die Auswertungen der drei am besten belastbaren TBM-Stellen, dass entweder die Juni-Beprobung der Serie 2 (Argen_Giessen, LAWA-Typ 03.2) oder die August-Beprobung der Serie 3 (Brigach_Marbach, LAWA-Typ 09.1 und Donau_Pfohren, LAWA-Typ 09.2) die besten Ergebnisse erbrachten – und daher für Flüsse vermutlich Juli am besten für die MZB-Probenahme geeignet ist und
- dass die richtigen Zeitbezüge zwischen den Temperatur- und Index-Werten gewählt werden, da nicht die aktuellen Wassertemperaturen zum Zeitpunkt der MZB-Beprobung, sondern die sommerlichen Wassertemperaturen der vorausgegangenen Jahre die Besiedlungsverhältnisse maßgeblich beeinflussen, aus denen der KLIWA-Index$_{MZB}$ berechnet wird.

Auswertungen des bundesweiten Makrozoobenthos-Datensatzes

Der bundesweite Makrozoobenthos-Datensatzes aus den Jahren 1999-2013 mit insgesamt 13.312 Proben des operativen Monitorings der Bundesländer sowie die Bewertungen der PERLODES-Module Allgemeine Degradation und Saprobie wurde seitens der Universität Duisburg-Essen/Fakultät für Biologie/Aquatische Ökologie zur Verfügung gestellt. Im Einzelnen wurden folgende Daten übergeben:

- MZB-Daten als Ind/m² mit der aktuellen Fließgewässertypzuweisung.
- Bewertungsergebnisse des Multimetrischen Indexes (MMI) sowie der Bewertungseinstufungen des Moduls Allgemeine Degradation (Asterics/Perlodes Version 4.0.4).
- Bewertungsergebnisse des neu entwickelten MMI(neu) sowie der neuen darauf basierenden Bewertungseinstufungen des Moduls Allgemeine Degradation (aktuell in der Validierungsphase – Betaversion Asterics 4.1 für Ländertest).
- Bewertungsergebnisse des Saprobienindex (Asterics/Perlodes Version 4.0.4).

Im Rahmen des Praxistests für den KLIWA-Index wurden zusätzlich folgende Werte rechnerisch ermittelt:

- Berechnung des KLIWA-Index$_{MZB}$ (in allen Korrekturvarianten) für alle 13.312 MZB-Proben mit Software Version 1.1.0 aus dem Vorgängerprojekt. Für die darauf aufbauenden Analysen wurde der KI$_{MZB(Typ/Kont-Korr)}$ verwendet, um damit gewässertypspezifisch transformierte und auf kontinuierliche Temperaturwerte umgerechnete Werten den Bewertungsergebnissen von PERLODES gegenüber stellen zu können.
- Umrechnung des Saprobienindexes in einen Saprobie-Score(neu) gemäß eines aktuell in der Validierungsphase befindlichem Vorschlags zur Neubewertung der Saprobie in Anlehnung an den MMI.

Zur Analyse der Zusammenhänge des KLIWA-Index$_{MZB}$ mit den PERLODES-Modulbewertungen, bzw. den ihnen zugrunde liegenden MMI(neu) und SI-Score(neu) wurde folgende Vorgehensweise gewählt:

- Berechnung linearer Regressionen zwischen dem $KI_{MZB(Typ/Kont-Korr)}$ und dem MMI(neu) sowie dem SI-Score(neu) je LAWA-Gewässertyp.
- Die Berechnungen wurden nur für die LAWA-Typen durchgeführt, für die im Vorgängerprojekt typgruppenspezifische Korrekturfaktoren ermittelt worden sind.
- Basierend auf den linearen Regressionen: Ermittlung der pro Grad Erhöhung des $KI_{MZB(Typ/Kont-Korr)}$-Werts für jeden LAWA-Typ resultierenden Verschlechterung der beiden PERLODES-Module „Allgemeine Degradation“ (klassifizierter MMI(neu)) und „Saprobie“ (klassifizierter SI-Score(neu)).

Abbildung 15 zeigt exemplarisch einen Scatterplot des MMI(neu) gegen den $KI_{MZB(Typ/Kont-Korr)}$ mit linearer Regression für den LAWA-Typ 09.2.

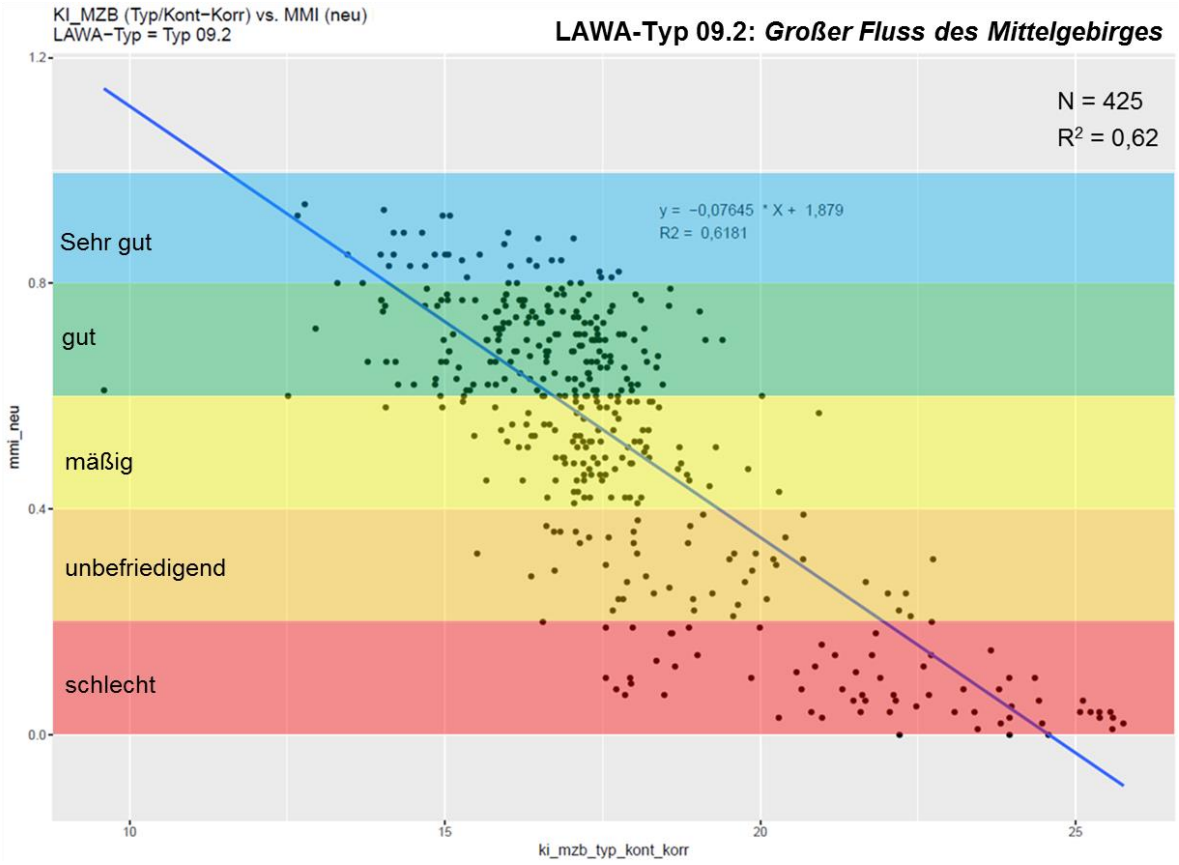


Abbildung 15. Scatterplot des MMI(neu) gegen den $KI_{MZB(Typ/Kont-Korr)}$ mit linearer Regression: LAWA-Typ 09.2 (N = 425).

Als Einfluss des $KI_{MZB(Typ/Kont-Korr)}$ auf die PERLODES-Modulbewertung, bzw. auf MMI(neu) und SI-Score(neu) lässt sich folgendes resümieren:

- Die Alpen- und Mittelgebirgsgewässertypen weisen die höchsten Bestimmtheitsmaße der linearen Korrelationen zwischen dem $KI_{MZB(Typ/Kont-Korr)}$ und dem MMI(neu) sowie dem SI-Score(neu) je LAWA-Gewässertyp auf (bis zu R^2 = 0,77 beim SI-Score(neu) für LAWA-Typ 05.1).
- Dagegen ist kein plausibler Zusammenhang zwischen dem $KI_{MZB(Typ/Kont-Korr)}$ und den Scores der PERLODES-Bewertungsmodule für den LAWA-Typ 19N nachweisbar.
- Der SI-Score(neu) korreliert im Durchschnitt aller Gewässertypen nur etwas besser mit dem $KI_{MZB(Typ/Kont-Korr)}$ als der MMI(neu).

- Die pro Grad Erhöhung des $KI_{MZB(Typ/Kont-Korr)}$-Werts für jeden LAWA-Typ ermittelten relativen Verschlechterungen der beiden PERLODES-Module „Allgemeine Degradation“ (klassifizierter MMI(neu)) und „Saprobie“ (klassifizierter SI-Score(neu)) rangieren bei Alpen- und Mittelgebirgsgewässern zwischen etwa ¼ und ½ Bewertungsklasse der PERLODES-Module.
- Die geringsten relativen Verschlechterungen der Modulbewertungen pro Grad Erhöhung des $KI_{MZB(Typ/Kont-Korr)}$-Werts treten bei den gefällearmen LAWA-Typen 14 und 19 auf.

Auf der Grundlage der dargestellten Konsequenzen einer Erhöhung des $KI_{MZB(Typ/Kont-Korr)}$ um ein Grad für die Bewertungseinstufungen der PERLODES-Module Allgemeine Degradation(neu) und Saprobie(neu) wurden die durch eine hypothetische Erhöhung des $KI_{MZB(Typ/Kont-Korr)}$ um 1° bzw. 2° zu erwartenden Verschiebungen der prozentualen Anteile der fünf Bewertungsklassen exemplarisch ermittelt. Dafür wurden die Modulbewertungen aller auswertbaren MZB-Beprobungen von 2013 als Ausgangssituation zugrunde gelegt und für die LAWA-Typen 05, 16 und 11 die relativen Veränderungen der einzelnen Anteile der Bewertungsklassen in Folge der beiden Indexerhöhungen bestimmt. Die Ergebnisse dieser Wirkungsprognosen sind in den nachfolgenden Tortendiagrammen exemplarisch für den LAWA-Typ 05 dargestellt (Abbildung 16).

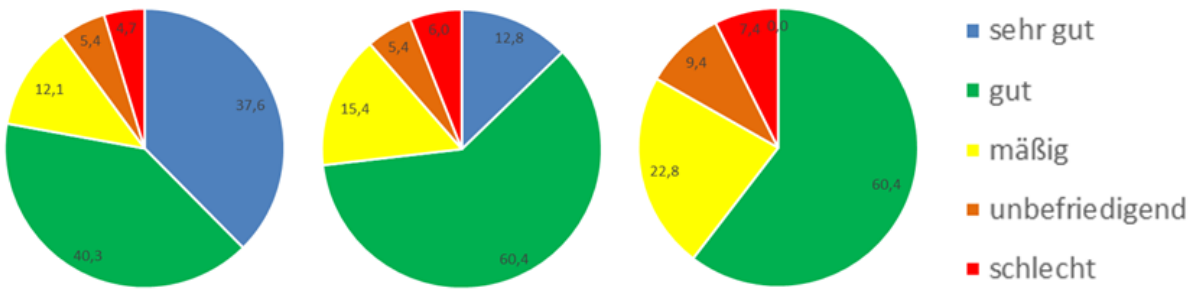


Abbildung 16. Prozentuale Verteilungen der ökologischen Zustandsklassen des MMI(neu) für den MZB-Datensatz aus dem Jahr 2013 (links), bei Erhöhung des $KI_{MZB(Typ/Kont-Korr)}$ um 1° (Mitte), bei Erhöhung des $KI_{MZB(Typ/Kont-Korr)}$ um 2° (rechts): LAWA-Typ 05 (N = 149).

6. Fazit

Zusammenfassend lässt sich Folgendes festhalten:

- Der KLIWA-$Index_{MZB}$ basiert auf statistisch hergeleiteten Präferenzspektren einzelner Arten für unterschiedliche sommerliche Wassertemperaturen.
- Der KLIWA-$Index_{MZB}$ indiziert nicht die Wassertemperatur allein, sondern die Atemhabitatbedingungen der Wirbellosenfauna von Fließgewässern insgesamt, allerdings ausgedrückt als Äquivalenttemperatur in Grad Celsius.
- Der KLIWA-$Index_{MZB}$ ist geeignet die Wirkungen des Klimawandels ebenso wie von belastungsmindernden Maßnahmen auf die Wirbellosenfauna der Fließgewässer zu indizieren.
- Der KLIWA-$Index_{MZB}$ ermöglicht gewässertypspezifische Bewertungsprognosen für unterschiedliche Szenarien.

Der anhand umfangreicher Auswertungen dreier unterschiedlicher Datengrundlagen durchgeführte Praxistest des KLIWA-$Index_{MZB}$ hat dessen gute Eignung zur Indikation sommerlicher Wassertemperaturen und deren Veränderungen in Fließgewässern bestätigt und gleichzeitig deutlich gemacht, dass es für eine Beurteilung thermischer Einflüsse auf das Makrozoobenthos unerlässlich ist, die gesamten Atemhabitatbedingungen, also neben der

Temperatur- auch die Strömungsverhältnisse sowie die trophischen und organischen Belastungen mit zu berücksichtigen.

Genau hier liegt somit auch der weitere Forschungs- und Untersuchungsbedarf. Ziel wäre es künftig Fließgeschwindigkeiten und Konzentrationswerte sauerstoffzehrender Belastungen in Temperatur-Äquivalente des KLIWA-Index$_{MZB}$ umrechnen zu können und damit die Wirkungen dieser Faktoren auch auf die Beziehung zwischen den sommerlichen Wassertemperaturen und dem KLIWA-Index$_{MZB}$ genauer beschreiben und modellieren zu können.

7. Literatur

Halle, M.; Müller, A. und A. Sundermann (2016): KLIWA Temperatur-MZB-Projekt: Ableitung von Temperaturpräferenzen des Makrozoobenthos für die Entwicklung eines Verfahrens zur Indikation biozönotischer Wirkungen des Klimawandels in Fließgewässern. Endbericht. Erarbeitet vom Projektteam umweltbüro essen, chromgruen und Senckenberg Gesellschaft für Naturforschung Frankfurt im Auftrag des Arbeitskreis-KLIWA (finanziert von Baden-Württemberg, Bayern, Rheinland-Pfalz), publiziert als KLIWA-Berichte Heft 20, Download unter http://www.kliwa.de/download/KLIWAHeft20.pdf.

Halle, M. und A. Müller (2017, noch unveröffentlicht): LAWA ACP-Projekt O 3.15: Ergänzende Arbeiten zur Korrelation zwischen biologischen Qualitätskomponenten und Allgemeinen physikalisch-chemischen Parametern in Fließgewässern. Endbericht. Erarbeitet vom Projektteam umweltbüro essen und chromgruen im Rahmen des Länderfinanzierungsprogramms „Wasser, Boden und Abfall“ (LFP O 3.15).

Höppe, P., 1999. The physiological equivalent temperature – a universal index for the biometeorological assessment of the thermal environment, Int J Biometeorol. 43: 71–75.

Jendritzky, G., Staiger, H., Bucher, K., Graetz, A., Laschewski, G., 2000. The perceived temperature: a method of Deutscher Wetterdienst for the assessment of cold stress and heat load for the human body. Internet workshop on Windchill, 2000, Meteorological Service of Canada, Environment Canada.

Korte, T. und M. Sommerhäuser (2011): „Untersuchung zur Verbreitung von wärmeliebenden Neozoen und deren Einfluss auf die Bewertung nach EG-Wasserrahmenrichtlinie“ erstellt im Rahmen des BMBF-Projekts „Auswirkungen des Klimawandels auf die Lebensgemeinschaften in großen Flüssen (dynaklim)“. Erhältlich als Download unter: http://www.dynaklim.de/dynaklim2pub/index/3000_projektergebnisse/3300_veroeffentlichungen/3510_dynaklim_publikationen.html.

Marten, M. et al. , LUBW (Landesanstalt für Umwelt Baden-Württemberg) (Hrsg.), 2011. Trendbiomonitoring - Biozönotisches Langzeit-Monitoring in Fließgewässern Baden-Württembergs. Erhältlich als Download unter: http://www.fachdokumente.lubw.baden-wuerttemberg.de/servlet/is/101750/?COMMAND=DisplayBericht&FIS=91063&OBJECT=101750&MODE=METADATA.

Schmidt-Kloiber, A., Hering, D. (Ed.), 2008. Distribution & Ecological Preferences of European Freshwater Organisms: Trichoptera: 1; www.freshwaterecology.info - Indicator Database for European Freshwater Invertebrates.

Schmidt-Kloiber, A., Hering, D. (Ed.), 2009. Plecoptera (Distribution and Ecological Preferences of European Freshwater Organisms); www.freshwaterecology.info - Indicator Database for European Freshwater Invertebrates.

Schmidt-Kloiber, A., Hering, D. (Ed.), 2009. Distribution & Ecological Preferences of European Freshwater Organisms: Ephemeroptera: 3; www.freshwaterecology.info - Indicator Database for European Freshwater Invertebrates.

Senckenberg Gesellschaft für Naturforschung, 2010. KLIWA - Einfluss des Klimawandels auf die Fließgewässerqualität – Literaturauswertung und erste Vulnerabilitätseinschätzung.

Universität Duisburg Essen, 2013. ASTERICS - einschließlich Perlodes (deutsches Bewertungssystem auf Grundlage des Makrozoobenthos) Version 4. Software-Handbuch (http://www.fliessgewaesserbewertung.de).

Auswirkungen des Klimawandels auf die Seeökosysteme in Süddeutschland

Dr. Jochen Schaumburg, LfU Bayern

1. Die Vielfalt und Komplexität von Seeökosystemen

Seen werden oft im Gegensatz zu Fließgewässern (Strömen, Flüssen und Bächen) auch als „Stehende Gewässer“ bezeichnet. Gemeint ist damit die im Vergleich zu Fließwassersystemen relativ lange Zeit des Wasseraustausches in einem Seebecken. Die sogenannte theoretische Erneuerungszeit in Seen kann anhand der Zu- und Abflussmengen berechnet werden und bezeichnet die Zeitdauer in der das Wasservolumen einmal ausgetauscht wird. Je nach Seetyp und hydrologischen Randbedingungen kann sie in Deutschland zwischen wenigen Wochen und mehreren Jahrzehnten betragen; der Wasseraustausch in Fließgewässern wird dagegen in Litern bis Kubikmetern/Sekunde gemessen und angegeben, aufgestaute Fließgewässer haben maximal wenige Tage Aufenthaltszeit.

Seeökosysteme verhalten sich jedoch fast nie „stehend“ im Sinne der dynamischen Prozesse, die in ihnen ablaufen. Die Verschiedenheit der Seetypen in Deutschland untereinander ist immens. Natürliche Seen werden z. B. anhand ihrer Temperaturschichtungseigenschaften, ihrer Durchmischungsdynamik, ihrer geographischen Lage, des geologischen Untergrundes und damit ihrer chemischen Eigenschaften sowie auch ihrer Größe, Tiefe und Form unterschieden. Bei künstlichen Seen unterscheidet man z. B. zwischen Abgrabungsseen (Baggerseen des Sand-, Kies- und Kohleabbaus) und Stauseen wie z. B. Talsperren und Speicher, die durch Aufstau von Fließgewässern im Haupt- oder Nebenschluss entstanden sind. Unter dem Begriff „Seen“ werden in der wasserwirtschaftlichen Praxis in der Regel all diese verschiedenen Seetypen geführt.

Wichtigstes ökologisches Unterscheidungsmerkmal zwischen Fließgewässern und Seen ist die Ausbildung charakteristischer Biozönosen für die jeweilige Gewässerart. Bei Fließgewässern sind das in der Regel solche, die auf die vorherrschende Strömung angewiesen bzw. an diese Strömung angepasst sind. In Seen finden wir sehr unterschiedliche Biozönosen, je nachdem, ob sie in der Freiwasserzone leben oder in der Ufer- bzw. Bodenzone. Im Freiwasser finden sich Lebensgemeinschaften, die eher Strömung meiden. Charakteristisch sind dort Planktonbiozönosen, mikroskopisch kleine Pflanzen- und Tierarten, die sich im Wasser schwebend ohne großräumige eigene Bewegungsfähigkeit in der oberflächennahen Wasserschicht aufhalten. Die pflanzliche Komponente (Phytoplankton, Algen) erhält dort die nötige Lichtmenge für die Durchführung der Photosynthese, die tierische Komponente (Zooplankton, Kleinkrebse, Rädertiere usw.) hat sich auf Algen und Bakterien als Nahrungsgrundlage spezialisiert – sie findet dort genügend Nahrung sowie Sauerstoff zum Atmen. Am Seeufer (Litoral) leben in der belichteten Bodenzone höhere Wasserpflanzen, wurzelnde Algen, Moose und Aufwuchsalgen bzw. Kleintiere der Bodenzone (Insektenlarven, Schnecken, Muscheln, Krebse usw.). Je nach See- bzw. Ufertyp finden sich bei den Kleintieren durchaus auch strömungsliebende Arten, wenn es sich z. B. um Brandungsufer handelt. Unterschiedlich spezialisierte Fischarten, die wiederum das Zooplankton im Freiwasser oder die Kleintiere am Ufer fressen, besiedeln alle Seelebensräume.

Seeökosysteme sind sowohl vertikal in den verschiedenen Tiefenschichten als auch horizontal über die Zeit (saisonal) sehr dynamisch und verschieden. Für die sogenannten geschichteten Seen sind in unseren Breiten zwei Schichtungs- und zwei Zirkulationsphasen typisch (dimiktische Seen). Durch die Dichteanomalie des Wassers bedingt, bildet sich in Seen mit genügend großer Tiefe (>10 m) eine temperaturbedingte stabile Schichtung aus. In der Sommerstagnation schichtet sich warmes Oberflächenwasser über kaltes Tiefenwasser ge-

trennt durch eine Sprungschicht, in der die Wassertemperatur mit zunehmender Tiefe rapide abfällt. Die Oberflächenschicht wird durch Einfluss von Wind und Wellen ständig umgewälzt und so auch mit Sauerstoff versorgt. Die Tiefenschicht bleibt von diesen Einflüssen unbeeinflusst, selbst starke Sommerstürme vermögen die Schichtung nicht aufzuheben. Es wird auch kein Sauerstoff eingetragen. Durch absterbende, absinkende Organismen, die durch Bakterien mit Hilfe von Sauerstoff remineralisiert werden, wird in der Tiefenschicht über den Sommer immer mehr Sauerstoff verbraucht. In Seen mit geringer (Primär-)Produktion (Algenwachstum) ist diese Zehrung gering und solche Seen haben auch am Ende der Sommerstagnation noch genügend Sauerstoff im Tiefenwasser. In hochproduktiven, oft stark mit übermäßigem Nährstoffangebot belasteten Seen werden große Mengen an Biomasse produziert und durch die hohe bakterielle Aktivität der Sauerstoff in der Tiefenzone restlos verbraucht. Diese Zone ist dann lebensfeindlich für alle Organismen, die Sauerstoff zum Atmen benötigen. Die Stagnationsphasen werden abgelöst durch Zirkulationsphasen, die stattfinden, wenn es jahreszeitlich bedingt zu einer Abkühlung der warmen Oberflächenschicht kommt. Die Dichteunterschiede der Schichten verschwinden und Wind ist nun in der Lage, das gesamte Seewasser umzuwälzen und dadurch mit Sauerstoff zu versorgen. Im Winter findet die zweite Stagnation statt, wenn Seen durch Eisbildung zufrieren. Nach Abschmelzen des Eises findet die zweite Zirkulation statt. Sogenannte polymiktische Seen sind zu flach um eine Schichtung auszubilden, das eindringende Sonnenlicht und damit Wärme kann sich fast bis zum Grund ausbreiten, es entsteht kein vertikaler Dichtegradient. In solchen Seen findet ganzjährig Zirkulation statt, außer in eisbedeckten Phasen. In ihnen gibt es während der eisfreien Zeit keine Probleme mit der Sauerstoffversorgung.

Der Wechsel von Schichtung und Zirkulation hat gravierende Auswirkungen auf die Seeökosysteme. Planktonzönosen haben oft einen sehr dynamischen Wechsel von Arten und Biomassen über eine Vegetationsperiode hinweg, bedingt durch die unterschiedlichen physikalischen und stofflichen Verhältnisse. Chemische Prozesse sind ebenfalls stark abhängig von den durch Zirkulation und Stagnation ausgelösten Verhältnissen in Seen. Weiterführende Informationen finden sich in der einschlägigen Fachliteratur (z. B. Schwoerbel 1999, Bohle 1995).

2. Bewertung des ökologischen Zustands von Seen

2.1 Rechtsgrundlage und Methodik

Seit Einführung der in den Mitgliedsstaaten der Europäischen Union gültigen Wasserrahmenrichtlinie (WRRL) wird der ökologische Zustand von oberirdischen Gewässern europaweit nach den gleichen Maßstäben und Regeln ermittelt und bewertet (Europäische Gemeinschaft 2000). Für Seen sind dies:

- Definition von biozönotischen Gewässertypen für Seen mit einer Fläche > 0,5 km² zur Schaffung einer Grundlage für eine typspezifische Bewertung. Dadurch werden regionale, naturräumliche, klimatische, geographische, geologische, hydrologische, chemische, physikalische und biologische Eigenschaften der Gewässer berücksichtigt.
- Typspezifische Bewertung der vier biologischen Qualitätskomponenten
    - Phytoplankton (Schwebalgen)
    - Makrophyten und Phytobenthos (Bodenflora höherer Wasserpflanzen und Aufwuchsalgen)
    - Makrozoobenthos (Kleintiere des Gewässerbodens)
    - Fische
- Gesamtbewertung eines Seewasserkörpers durch Worst-Case-Verschneidung der Biokomponenten-Einzelergebnisse, d. h. der schlechteste Einzelzustand bestimmt den Gesamtzustand

- Einbeziehung von unterstützenden Komponenten in die ökologische Bewertung
    - Chemisch-physikalische Kriterien (z. B. Temperatur, Sauerstoff, Nährstoffe, Versauerung, Versalzung)
    - Hydromorphologie (Wasserhaushalt, Gewässerstruktur und -morphologie)
- Bewertung der biologischen Komponenten in den fünf Zustandsklassen
    - Sehr gut
    - Gut
    - Mäßig
    - Unbefriedigend
    - Schlecht

Der sehr gute Zustand wird mit den Referenzbedingungen (naturnaher Zustand) gleichgesetzt, der gute Zustand ist der zu erreichende Zielzustand nach WRRL. Neben dem ökologischen Zustand ist auch der chemische Zustand zu ermitteln. Dabei ist zu prüfen, ob die für bestimmte Schadstoffe festgelegten Umweltqualitätsnormen überschritten bzw. eingehalten werden. Zur Ermöglichung der Bewertung sind nach festgelegten EU-Vorgaben Monitoringprogramme durchzuführen und nationale Bewertungsverfahren anzuwenden, die europaweit in einem Interkalibrierungsprozess abgeglichen wurden.

Wenn der Gewässerzustand schlechter als gut ist, sind Maßnahmen zur Erreichung des guten Zustands durchzuführen. Über Belastungen, Zustand und Maßnahmenumsetzung ist der EU-Kommission in alle sechs Jahre zu erstellenden Bewirtschaftungsplänen zu berichten.

2.2 Belastungsschwerpunkt und ökologischer Zustand der Seen in Deutschland

Hauptproblem der deutschen Seen ist deren Belastung durch **übermäßige Nährstoffeinträge (Eutrophierung)**, vor allem mit dem als limitierend für das Pflanzenwachstum wirkenden Nährstoff Phosphor. Die Phosphoreinträge stammen überwiegend aus zwei Quellen:

- Einleitung von geklärtem Abwasser aus kommunalen und industriellen Einleitern, überwiegend in die Seezuflüsse im Einzugsgebiet von Seen
- Diffuser Eintrag aus der Flächennutzung in den Seeeinzugsgebieten

Durch die enge Verknüpfung von Phosphorkonzentration und Pflanzenwachstum in Seen, reagieren besonders die beiden Biokomponenten Phytoplankton und Makrophyten/Phytobenthos auf übermäßige Phosphoreinträge. Die Bildung hoher Biomassen oder Pflanzenmengen von Arten, die hohe Nährstoffkonzentrationen benötigen oder tolerieren wird gefördert während Arten, die hohe Nährstoffkonzentrationen meiden, in ihrer Menge abnehmen oder verschwinden. Bei allen deutschen Seen ist der ökologische Zustand maßgeblich durch diese beiden Biokomponenten beschrieben und bewertet. Die Komponente Makrophyten und Phytobenthos, die bei den meisten Seebewertungen ausschlaggebend für den Gesamtzustand ist, wurde in Deutschland für den 2015 erstellten Bewirtschaftungsplan in 470 Seen bewertet. Der Anteil der als sehr gut und gut bewerteten Seen, also solchen, die die Ziele der WRRL erreichen, betrug 25 %. Der Anteil der mäßig bis schlecht bewerteten Seen betrug 75 %. Für diese Seen sind Maßnahmen erforderlich. Die zu ergreifenden Maßnahmen umfassen in diesem Falle alles, was v.a. die Phosphoreinträge in die Seen soweit reduziert, dass der gute Zustand erreichbar ist.

3. Auswirkungen des Klimawandels auf die Seeökosysteme

Wie oben dargelegt sind Seeökosysteme sehr vielfältig und komplex, was die Beschreibung und Quantifizierung der Auswirkungen des Klimawandels sehr erschwert. Erhöht wird diese Schwierigkeit noch durch die Tatsache, dass die bereits bestehenden Nährstoffbelastungen

das gesamte ökologische Gefüge in stark eutrophierten Seen bereits erheblich verändert und gestört haben und zwar in unterschiedlicher Intensität und Auswirkung je nach Seetyp. Die im KLIWA-Gebiet liegenden Gebirgs- und Mittelgebirgsseen sind durch eine natürlicherweise vorherrschende Nährstoffarmut und damit geringe Produktionsintensität (Trophie) gekennzeichnet. Solche Seen reagieren besonders empfindlich und heftig auf erhöhte Nährstoffbelastungen. Die Eutrophierung dieser Seen hatte daher bereits gravierende Auswirkungen auf deren Biozönosen und ihren Stoffhaushalt. Die Artenzusammensetzungen v.a. der pflanzlichen Biokomponenten haben sich stark verändert, die Produktionsintensität der Algen und Wasserpflanzen ist gravierend angestiegen und in der Folge findet ein stark erhöhter Abbau der Biomasse unter hohem Sauerstoffverbrauch statt, was in vielen Seen zeitweise zu erheblichen Sauerstoffdefiziten bzw. zu komplett sauerstofffreien Zonen führt. Als Folge davon werden auch die tierischen Biokomponenten stark in Mitleidenschaft gezogen und beeinträchtigt bzw. verändert.

Wie wirkt sich nun der Klimawandel auf Seeökosysteme aus? Die Beantwortung dieser Frage ist unter Berücksichtigung der bisherigen Ausführungen schwierig. Daher hat die KLIWA-AG Gewässerökologie eine Literaturstudie zu diesem Thema erarbeiten lassen. In dieser sind die aktuellen Erkenntnisse (Stand 2015) zusammengefasst (Werner & Hesselschwerdt 2015). Auf die wesentlichen Ergebnisse soll hier im Folgenden eingegangen werden.

Physikalische Veränderungen
Eine **Temperaturerhöhung des Oberflächenwassers** von Seen findet bereits fast weltweit statt (u. a. Arvola et al. 2010, Brunetti et al. 2009). Ein Anstieg bis zum Jahr 2100 um 1,5-2,5 °C in großen Seen und 0,8-1,3°in Alpenseen wird erwartet. Für das **Tiefenwasser** gibt es widersprüchliche Aussagen. Die langfristige Erwärmung der Luft führt zu Erwärmung des Hypolimnions um 0,1-0,2 °C pro Dekade. Extreme Hitzesommer führen bei tiefen Seen teilweise zur Abkühlung des Hypolimnions durch verminderten Wärmeaustausch. Die **Eisbedeckung** verringert sich bzw. findet nicht mehr statt.

Die Schichtung und Durchmischung verändern sich folgendermaßen:
Die Schichtungsdauer verlängert sich, die Schichtung beginnt früher im Jahr und wird stabiler. Der Austausch zwischen beiden Schichten nimmt ab. Durch ausbleibende Vereisung tendieren viele Seen zur Monomixie, d. h. Vollzirkulationen werden seltener, z. B. wird die Durchmischungshäufigkeit des Bodensees bis zum Jahr 2084 um 20-30 % abnehmen.

Stoffliche Veränderungen
Bedingt durch verschiedene voneinander abhängige Prozesse verändert sich der **Sauerstoffhaushalt** in den Seen. Die Löslichkeit von Sauerstoff im Wasser ist temperaturabhängig: je höher die Temperatur, desto geringer die Löslichkeit. Erhöhte Wassertemperaturen führen zu geringerer Sauerstoffkonzentration. Eintrag von Sauerstoff in das Hypolimnion (Tiefenwasserschicht) kann nur bei Zirkulation stattfinden. Während der Schichtung findet nur Sauerstoffeintrag in das Epilimnion (Oberflächenwasserschicht) statt, im Hypolimnion verbleibt lediglich der Sauerstoff, der nicht durch Zehrung verbraucht wird. In stärker erwärmtem Oberflächenwasser werden durch Algen größere Biomassen gebildet, die nach ihrem Absterben absinken und unter Sauerstoffverbrauch im Tiefenwasser und am Seegrund zersetzt werden. Dieser so erhöhte Sauerstoffbedarf führt früher zu Sauerstoffmangel und zu längeren anaeroben (sauerstofffreien) Phasen in der Tiefenzone.

Die **Phosphorkonzentration** in Seen ist eine wichtige Steuergröße für das Algen- und Pflanzenwachstum und wird durch zwei wesentliche Prozesse in Seen beeinflusst: Externer Phosphoreintrag aus dem Seeeinzugsgebiet findet dauerhaft statt. Diffuse Einträge werden möglicherweise durch den Klimawandel erhöht, da die erhöhte Frequenz von extremen Wetterereignissen mehr Phosphor mobilisiert, u. a. durch Oberflächenabschwemmungen bei Starkregenereignissen (Pierson et al 2010). Der externe Eintrag in das Epilimnion ist ein unmittelbarer Motor für die Primärproduktion.

Das Hypolimnion als eine interne Phosphorquelle für das Epilimnion wird durch den Klimawandel ebenfalls verstärkt. Zum Beispiel werden unter anaeroben Bedingungen (Anoxie) im Hypolimnion durch Rücklösungsprozesse aus dem Sediment Nährstoffe freigesetzt, die bei einer nächsten Vollzirkulation zusätzlich der Algenproduktion zugeführt werden. Je geringer der Sauerstoffgehalt im Hypolimnion ist, desto höher ist die Rücklösung (z. B. Eder 2013). Zusammen mit der stabileren Schichtung, resultierend aus den höheren Oberflächentemperaturen und den deswegen seltener werdenden Zirkulationsphasen, findet eine fortlaufende interne Düngung statt wodurch sich der Phosphorumsatz im Phosphorkreislauf verstärkt (u. a. Jankowski et al 2006, Straile et al 2003). Dieser Effekt ist v.a. wichtig bei Seen mit langer Wasserverweildauer.

Biologische Veränderungen

Pelagial: Phytoplankton, Zooplankton, Fische
Die Erwärmung des Epilimnions und der frühere Beginn der Schichtung führen zu **früher auftretenden Frühjahrsblüten von Algen**. Es kann eine **Verschiebung des Artgefüges** kommen, z. B. zu vermehrter Neigung zu Cyanobakterienblüten (viele Arten wärmeliebend) und zu verkürzten Diatomeenblüten (viele Arten kälteliebend). Davon abhängig werden Verschiebungen bei der Zooplanktonentwicklung erwartet, was zu **früheren Klarwasserstadien** führen kann. Diese wiederum hätten Effekte auf die Entwicklung der höheren Wasserpflanzen, die bei Klarwasser Entwicklungsvorteile gegenüber dem Phytoplankton haben. Treten Klarwasserstadien zu früh auf, ist ggf. die Wassertemperatur für bestimmte Pflanzenarten noch nicht optimal für deren Entwicklung, sodass die Wassertrübung nach der Klarwasserphase Vorteile für die Algen bringt. Es sind **Veränderungen der Zooplanktonartenzusammensetzung** und davon abhängig auch **Veränderungen bei der Fischbiozönose** (Arten/Mengen) zu erwarten. Durch Spezialisierungen auf bestimmte Futterorganismen und zeitliche Verschiebungen in deren Auftreten können Mangelsituationen z. B. bei Fischen eintreten. Die hohe Komplexität der Abhängigkeiten und von daher die niedrige Prognosesicherheit werden aus diesen Erläuterungen deutlich.

Litoral: Makrophyten, Phytobenthos, Makrozoobenthos, Fische
Extremere Hoch- und Niedrigwassersituationen und Erwärmung des Flachwassers führen zu extremeren Lebensverhältnissen im Lebensraum des Seelitorals. Für die dort lebenden Biozönosen der höheren Wasserpflanzen, der Aufwuchsalgen, der Kleintiere des Gewässerbodens sowie der Fische sind Artenverschiebungen zu erwarten. Wärmeliebende Arten breiten sich aus, kälteliebende Arten verschwinden. Neobiota werden ggf. gefördert. Diese Veränderungen werden sich auch auf die Biozönosen des Übergangsbereiches Wasser-Land auswirken. Das betrifft dann z. B. Amphibien, Reptilien, Vögel und weitere Organismen dieser Lebensräume.

Neobiota
Der Klimawandel fördert wärmeliebende Arten, sowohl einheimische als auch die aus fremden Gebieten eingewanderte, sogenannte Neobiota. Die Einwanderung von Neobiota in heimische Gewässer ist nicht in erster Linie Folge des Klimawandels sondern überwiegend Folge der menschlichen Mobilität (Flug-, Schiffs-, Bahn- und Straßenverkehr) einschließlich des Freizeitverhaltens. Deren Ausbreitung und teilweise Etablierung wird aber durch den Klimawandel gefördert. Solche Arten finden in Lebensräumen, die sich im Wandel befinden, oft geeignete Nischen, die zu diesem Zeitpunkt nicht durch heimische Arten besetzt waren. Es können plötzliche Massenentwicklungen von Wasserpflanzenarten oder auch wärmeliebenden Arten des Phytoplanktons, z. B. Cyanobakterien, auftreten. In manchen Fällen kommt es auch zur Verdrängung heimischer Arten durch die Neueinwanderer (z. B. Flohkrebs Dikerogammarus villosus).

Zusammenfassung wesentlicher Auswirkungen des Klimawandels auf Seeökosysteme

- Erwärmung unterschiedlichen Ausmaßes in den Wasserschichten
- Veränderung der Schichtungs- und Durchmischungseigenschaften
- Früher einsetzende und länger andauernde Schichtung
- Erhöhte Primärproduktion in der oberflächennahen Schicht
- Früher auftretende Algenblüten
- Erhöhter Abbau mit erhöhter Sauerstoffzehrung in der Tiefenschicht
- Früher auftretender Sauerstoffmangel
- Früher auftretende Uferpflanzenentwicklung
- Ausbleibende bzw. verminderte Vereisung
- Entwicklung zur Monomixie
- Veränderung der Artenzusammensetzung von Pflanzen und Tieren
- Häufigere Extremsituationen z. B. Hochwasser, Starkregen, Niedrigwasser
- Häufigere Trübung, Stoffschübe, Verkeimung
- Litoral besonders betroffener Lebensraum bzgl. Wasserstandsschwankungen

4. Anpassungsmaßnahmen

Ein Haupteffekt des Klimawandels ist eine in der Summe der Einzelauswirkungen resultierende Verstärkung der Eutrophierungswirkung, d. h. Nährstoffe, v.a. Phosphor werden durch die Klimaeffekte in noch höherem als dem bisherigen Maße mobilisiert und angereichert. Merkbar betroffen sind davon v.a. natürlicherweise nährstoffarme oligotrophe und mesotrophe Seen, d. h. Seen die wegen ihrer an Nährstoffarmut angepassten Biozönosen besonders selten geworden sind. Solche Seen sind prägend für die Landschaften im KLIWA-Gebiet.

Die vielfältigen durch den Klimawandel bedingten Veränderungen der Seeökosysteme wirken sich auch auf die Bewertung des ökologischen Zustands der Gewässer aus und werden sich negativ in den Bewertungsergebnissen niederschlagen, d. h. noch mehr Handlungsbedarf zur Verbesserung des ökologischen Zustands wird entstehen. Der Klimawandel wirkt der Maßnahmenumsetzung nach WRRL entgegen, d. h. die Maßnahmen erzielen u.U. nicht die gewünschte Wirkung zur Verbesserung des ökologischen Zustands, ohne dass die Qualität und der Umfang der Maßnahmenumsetzung noch eine erhebliche Steigerung gegenüber dem bisher geplanten Ausmaß erfahren.

Damit ist die wichtigste, weil wirksamste Anpassungsmaßnahme, die Nährstoffeinträge v.a. Phosphor, in die Seen noch drastischer zu reduzieren, als bisher erfolgt oder geplant. In Seeeinzugsgebieten sollten besonders strenge Regeln der Landnutzung und Abwasserbehandlung gelten.

5. Klimafolgenmonitoring Seen

Um das Ausmaß und die Auswirkungen der Klimaveränderungen in Seeökosystemen Süddeutschlands dokumentieren und bewerten zu können, soll ein Klimafolgenmonitoring an ausgewählten Seen des KLIWA-Gebietes etabliert werden. Die KLIWA-AG Gewässerökologie hat dazu einen Vorschlag erarbeitet, welcher zurzeit in den betroffenen Bundesländern diskutiert und abgestimmt wird. Das Messnetz wird ca. zwölf Seen verschiedener Größen und geografischer Lagen im KLIWA-Gebiet umfassen, z. B. auch hoch gelegene Alpenseen. Messdaten sollen soweit möglich automatisch erfasst werden, auch unter Einbeziehung von Methoden der Satellitenfernerkundung. Erfasst werden sollen Wassertemperatur, Sauerstoff, Trübung, Eisbedeckung, Chlorophyll a, Cyanobakterien- und Algenblüten sowie Wasser-

pflanzengürtel. Für die Auswertung und Einschätzung der Klimafolgen werden zusätzlich Messdaten aus den verschiedenen bereits langjährig etablierten Monitoringprogrammen der Bundesländer herangezogen werden. Nach Etablierung des Klimafolgenmonitorings ist der nächste Schritt die Definition von sogenannten Klimaindikatoren: das sind summarische Kenngrößen mit denen wesentliche Veränderungen erfasst und interpretiert werden können.

6. Literatur

Arvola, L., G. George, D. M. Livingstone, M. Jarvinen, T. Blenckner, M. T. Dokulil, E. Jennings, C. N. Aonghusa, P. Noges, T. Noges und G. A. Weyhenmeyer (2010): The impact of the changing climate on the thermal characteristics of lakes. Seiten 85-101 in G. George, editor. Impact of climate change on European lakes.

Bohle, Hans W. (1995): Limnische Systeme, Spezielle Ökologie, Springer Verlag Berlin, 267 S.

Brunetti, M., G. Lentini, M. Maugeri, T. Nanni, I. Auer, R. Bohm und W. Schoner (2009): Climate variability and change in the Greater Alpine Region over the last two centuries based on multivariable analysis. International Journal of Climatology 29: 2197-2225.

Eder, M. M. (2013): Climate sensitivity of a large lake. Mitteilungen Institut für Wasser- und Umweltsystemmodellierung, Universität Stuttgart 226:1-133.

Europäische Gemeinschaft (2000): Richtlinie 2000/60/EG des Europäischen Parlamentes und des Rates vom 23. Oktober 2000 zur Schaffung eines Ordnungsrahmens für Maßnahmen der Gemeinschaft im Bereich der Wasserpolitik. Amtsblatt der Europäischen Union, L 327/1, 22.12.2000.

Jankowski, T., D. M. Livingstone, H. Buhrer, R. Forster und P. Niederhauser (2006): Consequences of the 2003 European heat wave for lake temperature profiles, thermal stability, and hypolimnetic oxygen depletion: Implications for a warmer world. Limnology and Oceanography 51:815-819.

Pierson, D., L. Arvola, N. Allott, M. Jaervinen, E. Jennings, L. May, K. Moore und E. Schneiderman (2010): Modeling the effects of climate change on the supply of phosphate-phosphorus. Seiten 139-159 in G. George, editor. Impact of climate change on European lakes.

Schwoerbel, Jürgen (1999): Einführung in die Limnologie, 8. Auflage, Gustav Fischer Verlag Stuttgart, 465 S.

Straile, D., K. Johnk und H. Rossknecht (2003): Complex effects of winter warming on the physicochemical characteristics of a deep lake. Limnology and Oceanography 48:1432-1438.

Werner, Stefan, J. Hesselschwerdt (2015): Einfluss des Klimawandels auf Seen - Literaturauswertungsstudie im Rahmen des Kooperationsvorhabens KLIWA. Hrsg. KLIWA – Kooperationsvorhaben Klimaveränderung und Wasserwirtschaft, 125 S.

Auswirkungen extremer Niedrigwasserereignisse auf die Wasserbewirtschaftung

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

1. Einleitung

Das Thema Niedrigwasser gewinnt aufgrund des Klimawandels in den letzten Jahren zunehmend an Brisanz und stellt einen Schwerpunkt innerhalb von KLIWA dar. Niedrigwasser ist ein natürlicher, regelmäßig wiederkehrender Bestandteil des Abflussgeschehens in unseren Fließgewässern. Laut DIN 4049 definiert es sich für Fließgewässer als Phase, in welcher der gemessene Abfluss unter einen für dieses Gewässer typischen Schwellenwert fällt. Für den Begriff „extremes Niedrigwasser“ gibt es keine entsprechende Definition, da hierbei die Empfindlichkeit („Sensitivität“) des beeinflussten Systems (Einzugsgebiet oder die Gewässerökologie/ lokale Wassernutzung eine wichtige Rolle spielt. Zur quantitativen Eingrenzung werden meist Jährlichkeiten bzw. Quantile von Abflussmengen oder Andauern von Niedrigwasserperioden herangezogen. Aber auch pragmatische Ansätze über die Auswahl von historischen Niedrigwasserphasen, aus denen hohe Schäden bekannt wurden, sind eine Möglichkeit der rückblickenden, qualitativen Definition.
Im Großteil des KLIWA-Gebiets treten die niedrigsten Abflüsse im Jahresverlauf im Sommer bis Frühherbst auf. Denen geht als Ursache für gewöhnlich eine meteorologische Trockenheit voraus, das heißt, ein Niederschlagsmangel in Kombination mit hoher Verdunstung. Dagegen liegt die typische Niedrigwasserperiode im alpinen bzw. voralpinen Raum in den Wintermonaten, hervorgerufen durch den Niederschlagsrückhalt in Form von Schnee und Eis.
Die Gewässerökosysteme, wie auch die Wasserwirtschaft, sind an die in einem Gebiet typischen, durchschnittlichen Trockenheitsphasen und Niedrigwasserereignisse zumeist gut angepasst. Zu Beeinträchtigungen kann es jedoch kommen, wenn diese Ereignisse nun (zukünftig) stärker, häufiger oder länger auftreten als bisher. 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 (siehe Beitrag Iber „*Niedrigwasser und Trockenheit in der Vergangenheit, Gegenwart und Zukunft in Süddeutschland*“). Um die Auswirkungen extremer Niedrigwasserereignisse in Süddeutschland genauer zu beleuchten, wurden im Rahmen von KLIWA daher Pilotstudien in den Ländern Baden-Württemberg, Bayern und Rheinland-Pfalz durchgeführt (Abbildung 1). Für die gewählten Gebiete sind Niedrigwasserphasen im Sommer typisch. Ihre Auswahl erfolgte auf Grundlage bekannter niedrigwasserbedingter Probleme oder Nutzungskonflikte. Solche waren beispielsweise die Wasserentnahme zum Gemeingebrauch in Baden-Württemberg, die Speicherbewirtschaftung zur Niedrigwasseraufhöhung in Bayern oder die Mindestwassertiefen zur Fischausbreitung in Rheinland-Pfalz.
Ziel der Pilotstudien war die Erarbeitung konkreter Handlungsempfehlungen zur Anpassung an den Klimawandel (siehe Beitrag Dr. Stölzle: „*Niedrigwassermanagement – Synthese und Auswirkungen aus den Pilotgebieten und resultierende Handlungsempfehlungen*“). Einen umfassenden Überblick gibt das in Arbeit befindliche KLIWA-Heft 23 (KLIWA 2018).

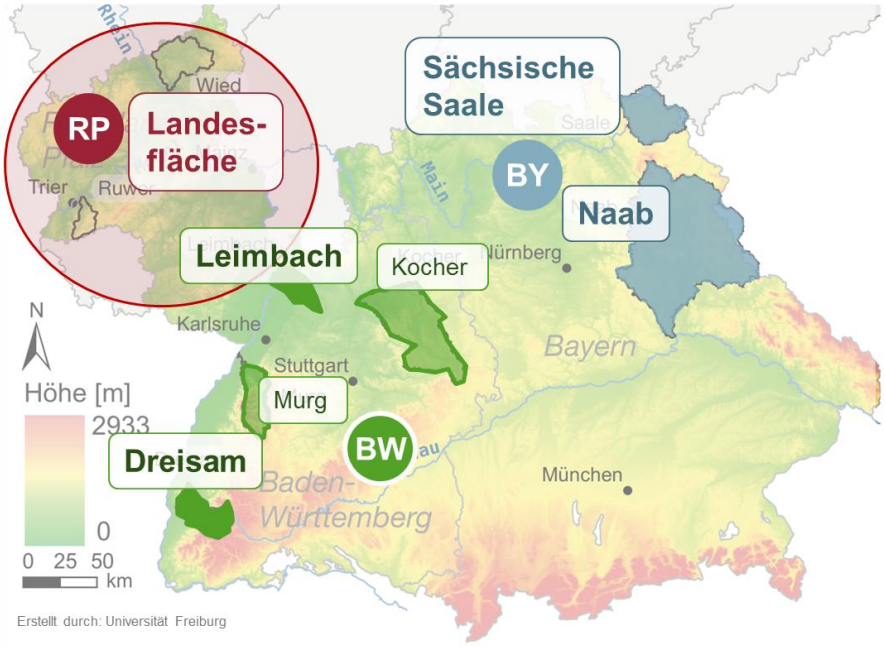


Abbildung 1. Überblick über die Lage der Pilotgebiete der KLIWA-Niedrigwasserstudien (Fettdruck) und der Gebiete der baden-württembergischen KLIMOPASS-Studien (verändert nach KLIWA 2018).

2. Methodik

2.1 Allgemeines

Bei der Bearbeitung der Klimawirkungsanalysen wählten die drei Bundesländer Baden-Württemberg, Bayern und Rheinland-Pfalz zum Teil unterschiedliche, in den Grundzügen aber abgestimmte, Herangehensweisen. Das allgemeine Vorgehen lässt sich in die Analyseketten nach IPCC (IPCC 2014) einordnen:

1. (Klimatische) Exposition bzw. Klimaänderungssignal + Sensitivität = **Auswirkung** sowie
2. **Auswirkung** + Anpassungskapazität = Vulnerabilität

Das Hauptaugenmerk lag dabei auf der Betrachtung der Auswirkungen. Auf die Vulnerabilität wurde in den Pilotstudien der Länder Baden-Württemberg und Bayern qualitativ eingegangen. Während Baden-Württemberg und Bayern je zwei Fallstudiengebiete betrachteten (Dreisam und Leimbach sowie Sächsische Saale und Naab), bezog sich die rheinland-pfälzische Studie auf die gesamte Landesfläche. Für Baden-Württemberg wurden später auch Ergebnisse aus zwei Studien des Projekts KLIMOPASS[4] herangezogen.
Die wasserwirtschaftlichen Nutzungen und ökologischen Funktionen, die durch Niedrigwasser beeinträchtigt werden können, hängen in einem vielschichtigen Wirkgefüge zusammen (Abbildung 2). Je nach Nutzung spielen die Wassermenge (blaue Pfeile) und die Wasserqualität (gelbe Pfeile) eine unterschiedlich starke Rolle. Nutzungskonflikte sind bei einer Niedrigwasserverschärfung zu erwarten. Jedoch kann das Wirkgefüge aufgrund der Komplexität der Beziehungen meist nicht in seiner Gesamtheit betrachtet werden. Daher wurden in den

[4] KLIMOPASS = Klimawandel und modellhafte Anpassung in Baden-Württemberg

Pilotstudien nur ausgewählte wasserwirtschaftliche Nutzungsbereiche untersucht. Deren Auswahl geschah anhand bereits bekannter oder vermuteter (auch zukünftiger) Konflikte.

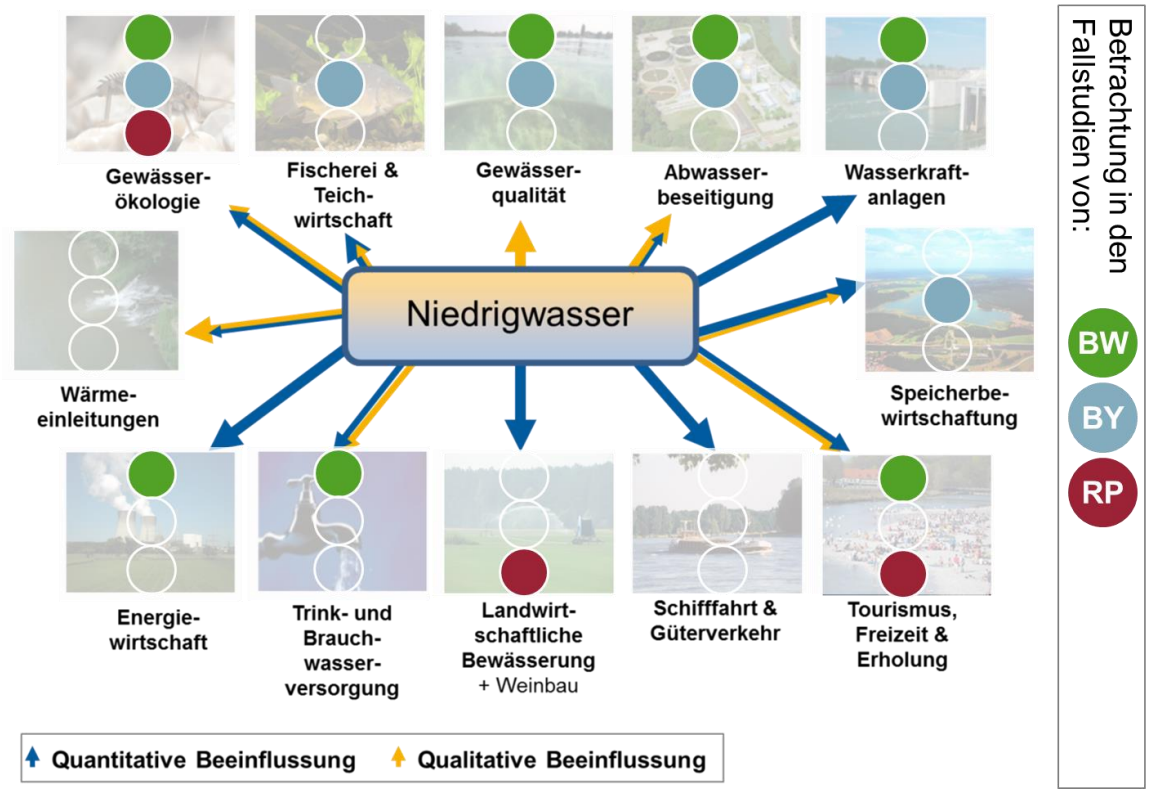


Abbildung 2. Schema zum Einfluss von Niedrigwasser auf Gewässerökologie und Wasserwirtschaft und Betrachtung der Nutzungsbereiche in den jeweiligen Fallstudien.

Zur Ermittlung der Auswirkungen wurden in den Pilotstudien unterschiedliche Schwerpunkte gesetzt und verschiedene Kombinationen von Niedrigwasserszenarien (Exposition), Sensitivität und Ansätze zur Auswirkungsableitung verfolgt (Abbildung 3). So konzentrierte sich Baden-Württemberg (Blauhut et al. 2017) auf die quantitative Analyse der Vergangenheit sowie auf die quantitative Sensitivitätsanalyse der hydrogeologischen Eigenschaften in seinen Pilotgebieten. Die Auswirkungen auf ein recht breites Feld der wasserwirtschaftlichen Nutzung wurden über qualitative (Experten-)Einschätzungen durch die lokale Wasserwirtschaftsverwaltung und Stakeholder abgeleitet. Zusätzlicher Analysebestandteil war die Ermittlung des Konfliktpotenzials (Abbildung 4). Im Gegenzug dazu orientierte sich Bayern (LfU 2017) an dem Vorgehen des „Netzwerks Vulnerabilität“ des UBA (Buth et al. 2015) und versuchte Auswirkungen auf die einzelnen Nutzungsbereiche mit Hilfe quantitativer Kennwerte und Schwellwertanalysen aus einer Wasserhaushaltsmodellierung zu beschreiben. Anschließend erfolgte eine Bewertung über eine qualitative Experteneinschätzung durch Vertreter der lokalen Wasserwirtschaftsverwaltung („Szenarienbasiert-qualitative Methode“). Das Vorgehen in Rheinland-Pfalz (LfU 2017) entspricht eher dem bayerischen quantitativen Ansatz, allerdings mit anderen Ausgangsszenarien und anderen Nutzungsbereichen sowie ohne Beteiligung der lokalen Wasserwirtschaftsverwaltung. Jedoch wurde die gesamte Landesfläche untersucht.

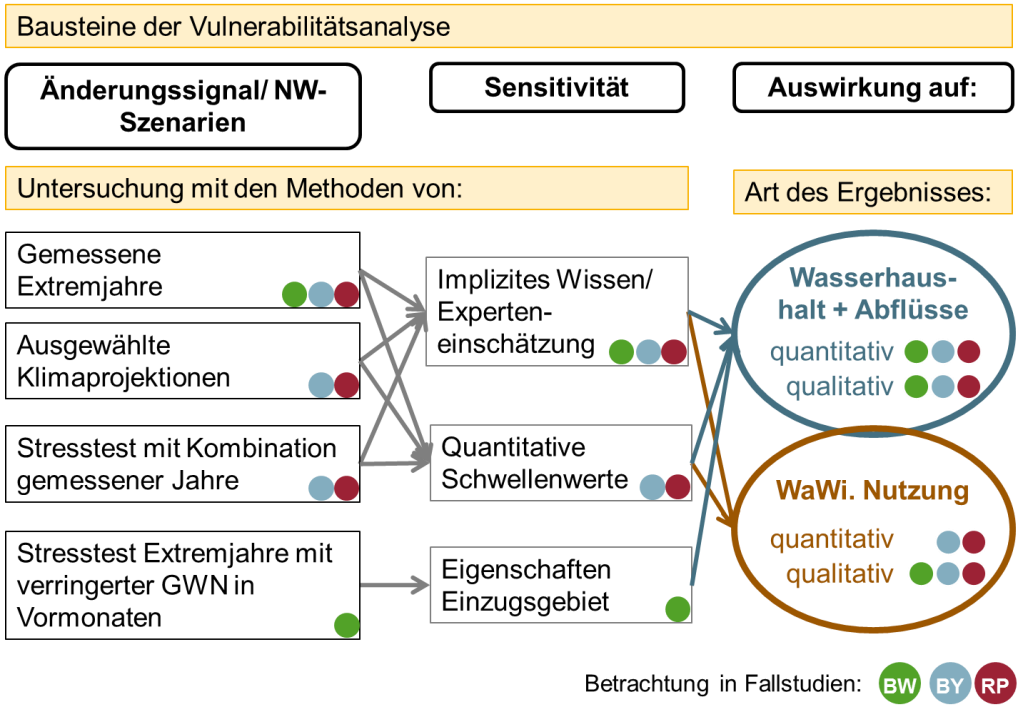


Abbildung 3. Herangehensweisen in der Untersuchung der ersten drei Bausteine der Vulnerabilitätsanalyse (ohne Anpassungskapazität) durch die Pilotstudien in Baden-Württemberg, Bayern und Rheinland-Pfalz. Der Begriff Änderungssignal ist mit der Exposition gleichzusetzen.

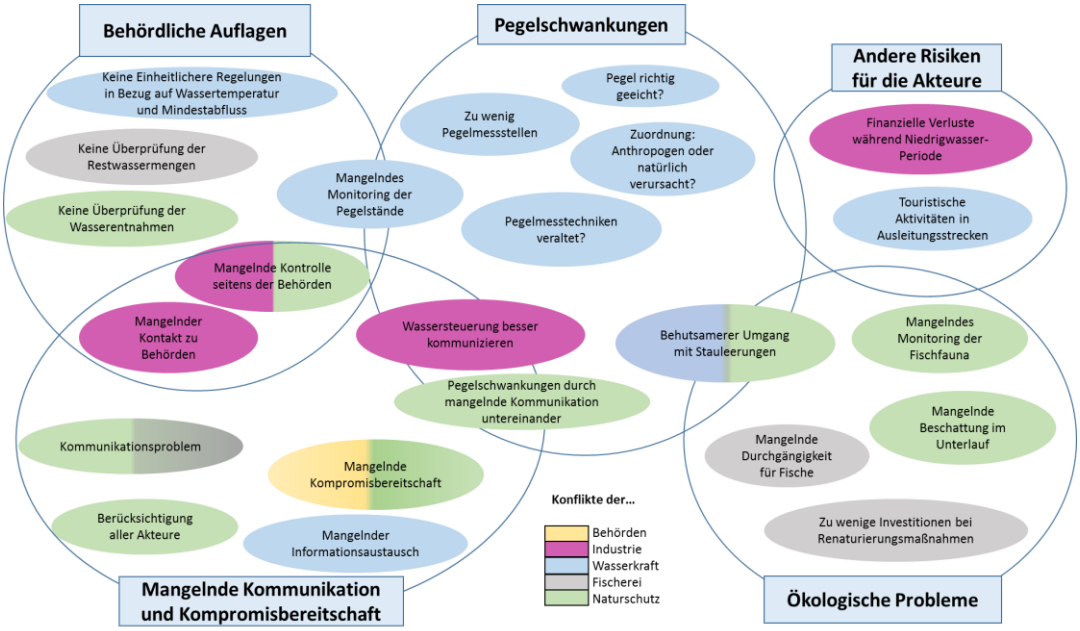


Abbildung 4. Beispiel für Konfliktanalyse aus KLIMOPASS-Studie Murg/Nordschwarzwald.

2.2 Szenarien auf Basis von Klimaprojektionen

In Bayern und Rheinland-Pfalz fanden ausgewählte Klimaprojektionen und darauf aufbauende Wasserhaushaltsmodellierungen als Niedrigwasserszenarien Anwendung. Für Rheinland-Pfalz war dies die Projektion A1B-ECHAM5-CCLM4.8 in drei Realisationen. Diese entspricht einem eher moderaten Änderungssignal. Die in KLIWA gebräuchliche „nahe Zukunft“ (2021-2050) wurde im Vergleich zur Referenz (1971-2000) ausgewertet. Im Vergleich dazu nutzte Bayern sowohl eine Projektion mit moderater Niedrigwasserverschärfung (A1B-HadRM-

HadGM3Q3, trockenere Sommer, aber feuchtere Winter in den Pilotgebieten) als auch eine Projektion mit ganzjährig trockeneren Verhältnissen (A1B-ECHAM5-WETTREG2010, „worst case“). Die Auswertung erfolgte zusätzlich für die „mittlere“ (2041-2070) und die „ferne Zukunft“ (2071-2100). Dies bot die Möglichkeit, eine Bandbreite der Niedrigwasserverschärfung aufzuspannen zwischen eher „geringen“ (HadGM3Q3, nahe Zukunft) und „extremem Änderungen“ (WETTREG2010, ferne Zukunft).

2.3 Stresstest-Szenarien auf Basis von gemessenen Jahren

Rheinland-Pfalz und Bayern wählten aus der gemessenen Meteorologie der Vergangenheit Jahre, welche entsprechend ihrer Niederschlags- und Temperaturcharakteristik bestimmte Eigenschaften aufwiesen (normal, trocken, feucht). Die meteorologischen Daten dieser Jahre wurden so zu neuen Zeitreihen kombiniert, dass sich Phasen starker Trockenheit und Erholungsphasen in enger Folge abwechseln und somit einen Stresstest für das Abflussgeschehen und die davon abhängigen Nutzungen darstellen (siehe Beitrag Dr. Neumann: „*Vulnerabilität von Grundwassersystemen Süddeutschlands – Ergebnisse von Stresstestuntersuchungen*“). Die gemeinsame erste Stresstestdekade enthält die dreifache Abfolge des Jahres 2003 (trockener Sommer), die zweite Stresstestdekade (nur BY) zusätzlich die dreifache Abfolge von trockenem Sommer und vorangehendem trockenen Winter. Die meteorologischen Zeitreihen dienten als Antrieb der Wasserhaushaltsmodelle.
Vorteile dieses Szenarienansatzes sind die gute Kommunizierbarkeit sowie die jahresweise Analyse von Stress- und Erholungsphasen. Ein Nachteil ist die unterschiedliche räumliche Ausprägung von Extremjahren und die damit schlechtere Vergleichbarkeit von Gebieten. Ein in einem Gebiet extrem trockenes Jahr muss in einem anderen Gebiet nicht zwangsläufig genauso extrem ausfallen. Ein weiterer Nachteil besteht darin, dass die gewählten Jahres- und Halbjahresperioden nicht immer komplett als trocken, normal oder feucht einzustufen sind, sondern nur im Mittel. Innerjährliche Perioden mit deutlich davon abweichenden Eigenschaften wirken sich unter Umständen ungewollt abmildernd oder verschärfend im Abflussgeschehen aus.

2.4 Stresstest-Szenarien auf Basis von verringerter Grundwasserneubildung

Im Niedrigwasserfall besteht der Großteil des Abflusses im oberirdischen Gewässer aus dem Basisabfluss, welcher durch das Grundwasser gespeist wird. Wie empfindlich der Gerinneabfluss eines Gebietes in Trockenzeiten reagiert, hängt dabei von den hydrogeologischen Puffereigenschaften als maßgebliche natürliche Steuerungsgröße ab.
In den beiden betrachteten Einzugsgebieten Baden-Württembergs Dreisam und Leimbach wurde mittels des Bodenwasserhaushaltsmodells GWN-BW zunächst die Grundwasserneubildung (GWN) in den historischen Trockenjahren 1976, 1992, 2003 und 2011 sowie ihren Vorgänger- und Nachfolgejahren modelliert. Für eine Analyse der Sensitivität der Einzugsgebiete wurden schließlich die tatsächlichen Grundwasserneubildungen der Vorjahre durch zahlreiche Variationen verminderter Grundwasserneubildung unterschiedlicher Stärke und Länge ersetzt (Abbildung 5, Reaktionszeitraum). Diese Variationen ergaben sich dadurch, dass die GWN je in den letzten 1, 2, …, 24 Monaten des Reaktionszeitraums auf ein 100-jährliches „Trocken“-Ereignis reduziert wurde. Im Regenerationszeitraum fand keine Änderung der GWN-Zeitreihe statt. Jede Variation des Reaktionszeitraums wurde einzeln mit der Zeitreihe des Regenerationszeitraums kombiniert und ging in ein einfaches, konzeptionelles Grundwassermodell ein, um den Basisabfluss in beiden Gewässern zu berechnen. Weitere Variationen ergaben sich durch andere Wiederkehrsintervalle oder andere Vorjahre (nicht dargestellt).
Über die simulierte Reaktion des Basisabflusses konnte abgebildet werden:

a) wie schnell und stark ein Gebiet auf Trockenheit reagiert;
b) wie lang es benötigt, um sich zu regenerieren;

c) welche Andauern und Ausprägungen von Trockenheit zu besonders kritischen Niedrigwassersituationen führen.

Diese Informationen sind ein Maß für die Sensitivität eines Einzugsgebiets.
Dieser Ansatz erlaubt, unterschiedliche Gebiete einem vergleichbaren Trockenstress auszusetzen. Ein Nachteil besteht in einer schlechteren Kommunizierbarkeit des komplexen Ansatzes (zwei miteinander verknüpfte Modelle, gleichzeitige Variation von Wiederkehrsintervall und Szenarienlänge). Auch ist die Kopplung der Grundwasserneubildungsszenarien an die für die GWN natürlicherweise ursächlichen hydrometeorologische Größen schlechter gegeben: Das Wiederkehrsintervall einer per Festlegung reduzierten Grundwasserneubildung lässt sich nicht direkt auf gleiche Wiederkehrsintervalle der hydrometeorologischen Größen rückübersetzen.

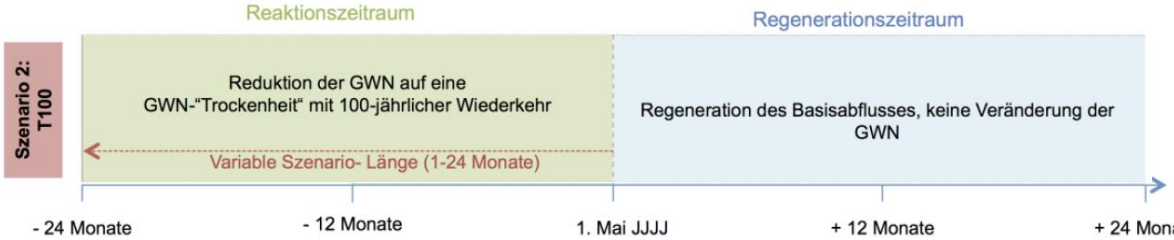


Abbildung 5. Beispiel zum schematischen Aufbau der unterschiedlichen Stresstestszenarien in Baden-Württemberg. Erläuterung siehe Text.

2.5 Sensitivität

Unter der Sensitivität wurde in den hiesigen Studien die derzeitige Ausstattung der betrachteten Systeme verstanden, also beispielsweise die hydro(geo-)logische Pufferkapazität des Systems „Einzugsgebiet“ oder die aktuelle technische Ausstattung von Wasserkraftanlagen des Systems „wasserwirtschaftliche Nutzung“. In Rheinland-Pfalz und Bayern wurden die Sensitivitäten quantitativ u. a. über die Verrechnung von Schwellenwerten abgebildet:

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

3. Ergebnisse

3.1 Allgemein

Die Ergebnisse der Pilotstudien zeigen, dass die betrachteten Einzugsgebiete bei gleichen Trockenheitsszenarien unterschiedlich stark in der Ausprägung und Andauer von Niedrigwasserphasen reagieren. Sie weisen damit auf die Relevanz der hydrogeologischen und sonstigen Gebietseigenschaften hinsichtlich der Niedrigwasserentstehung hin. 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 steuern 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.

Im Folgenden ist aus jeder Pilotstudie ein Detailbeispiel zu den ermittelten Niedrigwasserauswirkungen auf Grundlage unterschiedlicher Szenarienansätze herausgegriffen. Dabei stellt das rheinland-pfälzische Beispiel die Ergebnisse gemessener Jahre und simulierter Szenarien gegenüber, während sich das Beispiel aus Bayern auf den Stresstest in Kombination gemessener Jahre bezieht. Das Beispiel aus Baden-Württemberg gibt einen Ausschnitt aus dem Stresstest mit reduzierter Grundwasserneubildung wieder.

3.2 Unterschreitungshäufigkeit von Mindestwassertiefen zur Fischdurchgängigkeit

Pilotstudie: Rheinland-Pfalz
Nutzungsbereich: Gewässerökologie
Szenarienansatz: gemessene Extremjahre und Niedrigwasserszenarien
Entsprechend einer LAWA-Empfehlung zum Erhalt der Durchlässigkeit (LAWA 2001) sollte die Mindestwassertiefe in Forellen- bzw. Äschenregionen in Rheinland-Pfalz 20 cm betragen. Um zu untersuchen, ob diese Wassertiefen unter Niedrigwasserbedingungen noch gewährleistet sind, wurden sie über die Wasserstands-Abfluss-Beziehung an ausgewählten Pegeln in Grenzwerte von Abflussmengen umgerechnet. Diese Untersuchung besitzt allerdings nur einen stichprobenhaften Charakter, da verschiedene Unsicherheitsfaktoren hineinspielen:

- Die Morphologie kann sich im Gewässerverlauf stark verändern und nicht alle bezüglich der Fischwanderung ggf. problematischen Abschnitte (z. B. mit breitem, flachem Gewässerquerschnitt) werden erfasst. Flussaufwärts oder flussabwärts der Pegel können bereits nach kurzer Distanz andere Wasserstands- bzw. Abflussbedingungen herrschen.
- Die Ergebnisse einer Abflussmodellierung an kleinen Fließgewässern sind systembedingt häufig mit größeren Unsicherheiten behaftet als an großen. Geringe Niveauverschiebungen im täglichen Abfluss bringen schon große Abweichungen.

Zur Ableitung von Tendenzen in der Auswirkung extremer Abflüsse ist die Analyse dennoch geeignet.
Der Grenzwertfestlegung folgte die Untersuchung der Unterschreitungshäufigkeit dieser Mindestwassermengen pro Jahr sowohl für die Messwerte vergangener Extremjahre als auch für die beiden Szenarien aus Klimaprojektion und aus dem Stresstest. Dabei umfassen die drei CCLM4.8-Realisationen in der nahen Zukunft insgesamt 90 Einzeljahre. Aus diesen wurde jeweils die höchste und die niedrigste Unterschreitungshäufigkeit herausgelesen, um deren möglichen Wertebereich aufzuzeigen. Analog wurde mit der Bandbreite der zehn Stresstestjahre verfahren. Zur Vergleichbarkeit mit den gemessenen Einzeljahren wurde das Änderungssignal aus den Szenarien mit dem langjährigen Mittelwert der gemessenen Vergangenheit verrechnet.
Im Ergebnis ist an den vier betrachteten Pegeln bereits im langjährigen Mittel der gemessenen Vergangenheit eine Unterschreitungshäufigkeit der Mindestwassertiefe zwischen etwa fünf Tagen am Pegel Papiermühle und 41 Tagen am Pegel Hentern zu verzeichnen (Abbildung 6). Bei den historischen Trockenjahren sticht 1976 deutlich mit einer hohen Unterschreitungshäufigkeit von bis zu 153 Tagen heraus. Dagegen lagen die Häufigkeiten, mit Ausnahme des Pegels Hentern, im Jahr 2003 leicht über bzw. unter dem langjährigen Mittelwert. 2015 gab es in Papiermühle und Friedrichsthal gar keine Unterschreitung, in Nettegut nur an drei Tagen. Hieran zeigt sich, dass großräumig als extrem eingeschätzte Jahre wie 2003 und 2015 lokal nicht zwingend zu Auswirkungen führen müssen. Auch sind Änderungen in der Gewässermorphologie oder der wasserwirtschaftlichen Überprägung im Vergleich zu 1976 möglich, welche die Werte beeinflussen können.
Die Bandbreite der drei CCLM4.8-Projektionen in der nahen Zukunft bildet die historischen Extremjahre 2003 und 2015 ab, 1976 allerdings nicht. Hier spiegelt sich wider, dass es sich bei CCLM4.8 eher um eine Projektion mit moderatem Änderungssignal handelt. Auch deutet sich entsprechend des KLIWA-Ensembles (siehe Beitrag Iber: „Niedrigwasser und Trockenheit in der Vergangenheit, Gegenwart und Zukunft in Süddeutschland“) in der nahen Zukunft

für Rheinland-Pfalz eine leichte Entspannung der Niedrigwassersituation an. Zur detaillierteren Bewertung sowohl der historischen Extremjahre als auch der Projektionsergebnisse wären weitere Auswertungen hinsichtlich der Häufigkeitsverteilung notwendig. Auch wäre es interessant, weitere Projektionen hinzuzuziehen.
Die Bandbreite des Stresstests ist durch die Wahl der Extremjahre limitiert – in der rheinland-pfälzischen Stresstestdekade geht nur 2003 in 3-facher Wiederholung als extrem trockener klimatischer Antrieb für das Wasserhaushaltsmodell ein. Wider Erwarten liefert der Stresstest nicht an allen Pegeln höhere Unterschreitungshäufigkeiten als das gemessene Jahr 2003. Hier spielen aber vermutlich Unsicherheiten im Wasserhaushaltsmodell und die tatsächliche Ausprägung des Jahres 2003 im Gebiet eine entscheidende Rolle.

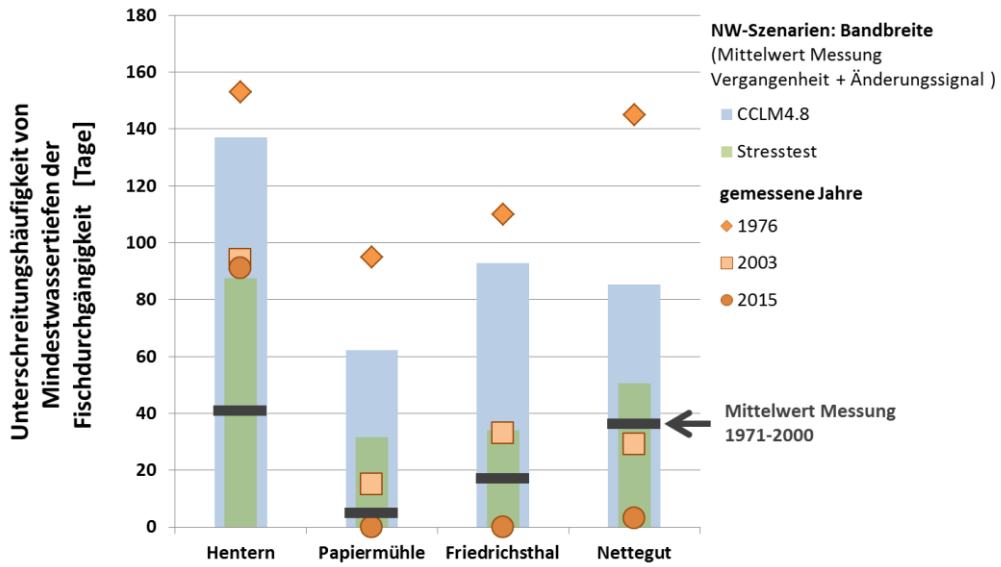


Abbildung 6. Mittlere jährliche Unterschreitungshäufigkeit von Mindestwassertiefen zur Fischwanderung abgeleitet aus Änderungssignalen (CCLM4.8 nahe Zukunft) bzw. Abweichung (Stresstest, Messung) zum Referenzzeitraum 1971-2000.

Fazit:

- Die Betrachtung kann nur eine Punktinformation liefern
- Die Unterschreitungshäufigkeiten der Mindestwassertiefen in gemessenen Jahren sind räumlich und quantitativ sehr unterschiedlich
- Eine tendenzielle Einordnung von Niedrigwasserszenarien gegenüber gemessenen Extremjahren ist möglich, die modellbedingten Unsicherheiten sind aber zu beachten
- Die gewählten Niedrigwasserszenarien reproduzieren zum Teil die Bandbreite der Vergangenheit

3.3 Niedrigwasseraufhöhung durch Förmitzspeicher

Pilotstudie: Bayern
Nutzungsbereich: Speicherbewirtschaftung
Szenarienansatz: Stresstest mit Kombination gemessener Jahre
Die Förmitztalsperre im Einzugsgebiet der Sächsischen Saale dient in ihrer Hauptfunktion der sommerlichen Niedrigwasseraufhöhung, in einer Nebenfunktion der Wasserkrafterzeugung und der Freizeitnutzung. Bezugspegel für die Niedrigwasseraufhöhung ist Hof mit einem festgelegten Mindestabfluss von 1 m³/s. Wie ein Vergleich der Abflussmodellierung im Referenzlauf mit und ohne Speicher zeigte, trägt der Speicher gegenwärtig zu einer Erhöhung des mittleren Niedrigwasserabflusses MNQ um etwa 20 % bei. Eine Frage der Pilotstu-

die war, wie groß der Effekt der Aufhöhung bei trockeneren Bedingungen wird und ob die Speicherkapazität ausreicht, um die Niedrigwasseraufhöhung auch unter extremen Trockenheitsbedingungen vorzuhalten. Zur Beantwortung kombiniert der Stresstest hier u. a. sowohl die dreifache Abfolge eines extrem trockenen Sommers (2003) als auch ganzjährig trockener Bedingungen (3x 1996/2003). Sogenannte „Normaljahre“ oder Jahre mit feuchtem Sommer oder feuchtem Winter dienen der Beurteilung des Regenerationsvermögens.
In der hiesigen Stresstestbetrachtung wird der NM_7Q (jährlich niedrigstes 7-Tagesmittel des täglichen Abflusses) als Kennwert zur Charakterisierung der jährlichen Niedrigstabflüsse am Pegel Hof verwendet (Abbildung 7, oben). Die ausgefüllten Balken beschreiben die Ausprägung des NM_7Q ohne Speichersee im Oberlauf. Das Jahr 2003 (2. Jahr des Stresstests) verursacht zunächst eine Reduktion der Niedrigstabflüsse um etwa 40 % gegenüber dem langjährigen Mittel 1971-2000; nach 3-facher Wiederholung (4. Jahr) von etwa 45 %. Durch seinen feuchten Winter führt 2003 zu keiner so starken Abweichung von der Referenz wie der trockene Einzelsommer im 13. Jahr (entspricht 1976) oder die dreifache Wiederholung ganzjähriger Trockenheit (15.-17. Jahr). Hier erreicht der NM_7Q sogar Minderungen um bis zu 60 %. Bereits im dritten Jahr der Wiederholung scheint sich zudem ein neuer Gleichgewichtszustand einzustellen, die Reduktion im Vergleich zum Vorjahr ist nur gering stärker ausgeprägt. Normaljahre, Jahre mit feuchten Sommern oder feuchten Wintern erzeugen nicht zwingend positive Abweichungen von der Referenz, also feuchtere Bedingungen und damit eine Erholung des Systems. Hier wirken sich ggf. weitere innerjährliche Eigenschaften der gewählten Jahre aus. So hatte das Jahr mit feuchtem Sommer einen eher zu trockenen Winter.
Mit Niedrigwasseraufhöhung (schraffierte Balken) fällt die Abweichung des NM_7Q in den trocknen Jahren merklich schwächer aus, meist ebenfalls um 20 %. Die mittleren Wasserstände im Förmitzspeicher (Abbildung 7, unten) liegen in der ersten Dekade des Stresstests meist auf einem ähnlichen Niveau. Allerdings kann der Speicher bei zu trockenen Wintern in der zweiten Stresstestdekade nicht ausreichend befüllt werden, um den sommerlichen Wasserbedarf zu decken. Hier sinken die Wasserstände stark.

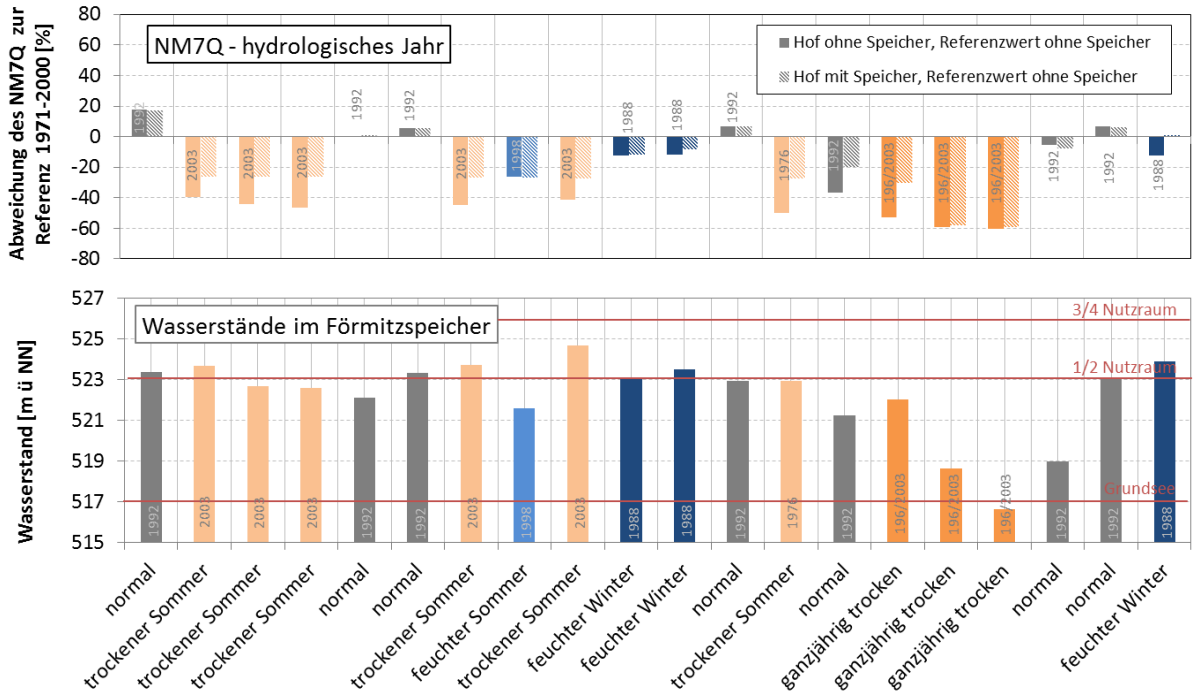


Abbildung 7. Oben: Abweichung des Niedrigwasserabflusses NM7Q zum Referenzlauf unter Stresstestbedingungen ohne und mit Niedrigwasseraufhöhung durch den Förmitzspeicher. Referenz ist die Messdatensimulation 1971-2000. Unten: Mittlere jährliche Wasserstände im Förmitzspeicher im Jahresverlauf (hydrologisches Jahr) des Stresstests. Die Farbgebung der Balken unterstreicht die Charakteristik der Einzeljahre (Normaljahr, trockener Sommer, etc.).

Im zweiten und dritten Jahr der ganzjährigen Trockenheit fallen die Wasserstände sogar unter Grundsee, was eine Abschaltung der Niedrigwasseraufhöhung bedeuten würde.
Hinweis zur Interpretation: Das Speichermodell gibt tendenziell etwas zu viel Wasser ab, in Realität fielen die Auswirkungen wohl weniger drastisch aus. Für die Szenarien-Betrachtung war das aber akzeptabel. Das zuständige Wasserwirtschaftsamt (WWA) sah den Belastungstest für seinen Speichersee daher als bestanden an. In Realität wird derzeit in Phasen guter Füllung des Förmitzspeichers eine hohe Speicherabgabe über die Turbine zur Wasserkrafterzeugung gefahren. Angesichts der Stresstestergebnisse wäre laut Einschätzung des WWA zu überdenken, ob dieses Vorgehen in einer zukünftigen Bewirtschaftung noch sinnvoll ist oder ob mehr Volumen für die Niedrigwasseraufhöhung zurückgehalten werden sollte.

Fazit:

- Der gewählte Stresstestansatz ist für einen Belastungstest geeignet.
- Die dreifache Kombination von historischen Extremjahren führt zu deutlichem Stress in den Abflussverhältnissen, besonders wenn auch die dazugehörigen Vorjahre leicht trockener waren als normal.
- Durch die Speicherbewirtschaftung ist eine Entschärfung solcher Stresssituationen möglich, allerdings nur so lange eine ausreichende Befüllung der Speicher über das Winterhalbjahr gewährleistet werden kann.
- Das Ergebnis ist nicht unmittelbar auf andere Speicherseen zu übertragen, sondern bedarf einer gesonderten Betrachtung.

3.4 Sensitivitätsanalyse Einzugsgebiet

Pilotstudie: Baden-Württemberg
Nutzungsbereich: natürlicher Abfluss
Szenarienansatz: Stresstest mit verringerter Grundwasserneubildung

Die Grundfrage für diese Untersuchung lautete: Wie hätte der Basisabfluss im Leimbach bzw. in der Dreisam in vergangenen Extremjahren reagiert, wenn die Grundwasserneubildung (GWN) in den beiden Vorjahren geringer gewesen wäre? Zur Methodik siehe Abschnitt 2.4.
Die Beschreibung der Ergebnisse erfolgt hier anhand des in den baden-württembergischen Pilotgebieten extremen Jahres 1992. Detaillierte Ergebnisse zu den Jahren 1976, 2003 und 2011 und ein Vergleich derselben finden sich im KLIWA-Heft 23 (KLIWA 2018).
Die gelben Balken in Abbildung repräsentieren die maximale Änderung des Basisabflusses gegenüber der Referenz (simulierter Basisabfluss ohne Änderung der GWN-Vorbedingungen) bei unterschiedlich langen Phasen („Szenariendauer“) einer bestimmten Jährlichkeit der Grundwasserneubildungstrockenheit. So beträgt die Reduzierung des Basisabflusses bei einem 50-jährigen Ereignis im Dreisam-Gebiet (Abbildung , Mitte) maximal rund 80 %, bei einem 200-jährlichen Ereignis über 90 %. Dieses Maximum tritt bei einer Szenariendauer von nur drei Monaten auf. Im Vergleich dazu erfolgt die maximale Reduktion im Leimbach-Gebiet eher bei einer Szenariendauer um die 18 Monate und auch mit geringeren Werten. Die Regenerationszeit (grüne Balken), also die Zeit, bis die Ganglinie des Szenarienbasisabflusses wieder die des Referenzbasisabflusses erreicht hat, unterscheidet sich zwischen beiden Gebieten deutlich. Während die maximale Regenerationsdauer im 3-monatigen Szenario im Dreisam-Gebiet weniger als 150 Tage beträgt, dauert es im Leimbach-Gebiet im 18-monatigen Szenario 600 Tage oder mehr. Ein ähnliches Verhalten zeigt sich auch für die anderen untersuchten Extremjahre (hier nicht dargestellt). Die deutlichsten Veränderungen im Basisabfluss zeigen sich für das Einzugsgebiet Dreisam bei Szenariendauern von drei bis sechs Monaten mit einer maximalen Veränderung das Basisabflusses um bis zu -75 % und Regenerationsdauern von bis zu 150 Tagen. Die maximale relative

Veränderung im Basisabfluss ist für den Leimbach in ähnlichen Größenordnungen, jedoch wird diese bei Szenariendauern von 15 bis 18 Monaten erreicht. Danach können Regenerationsdauern von bis zu 800 Tagen auftreten.
Dieses Verhalten erklärt sich über eine unterschiedlich starke Pufferwirkung der Grundwasserleiters im Gebiet. Das Leimbachgebiet verfügt offensichtlich über einen großen Grundwasserspeicher und ist demnach gut gepuffert. Kurzfristige Trockenperioden von weniger als fünf Monaten wirken sich somit nur gering aus, langanhaltende dagegen sehr stark. Im Vergleich dazu verfügt das Dreisam-Gebiet nur über wenig speicherfähige Grundwasserleiter und damit über eine geringe Pufferwirkung. Auch wird das Grundwasser-Oberflächenwasser-System hier während Niedrigwasser-Perioden schneller entkoppelt und es entsteht eine höhere Niedrigwasser-Dynamik. Damit führen vor allem kurzfristige Trockenperioden zu einer starken Verminderung des Abflusses, aber auch eine rasche Erholung ist möglich. Wenn auch aus Abbildung 8 nicht so klar ersichtlich, sind die Auswirkungen längerer Trockenperioden auch im Dreisam-Gebiet groß.
In der Gegenüberstellung der Gebietsreaktion auf unterschiedlich hohe Wiederkehrsintervalle fällt die Signalverstärkung nur moderat aus. Das lässt einerseits darauf schließen, dass es Grenzen in der Verminderung der Eingangswerte (GWN) gibt, aber auch die Gebietsspeicher irgendwann so leer gelaufen sind, dass keine weitere Reduktion des Basisabflusses mehr möglich ist.

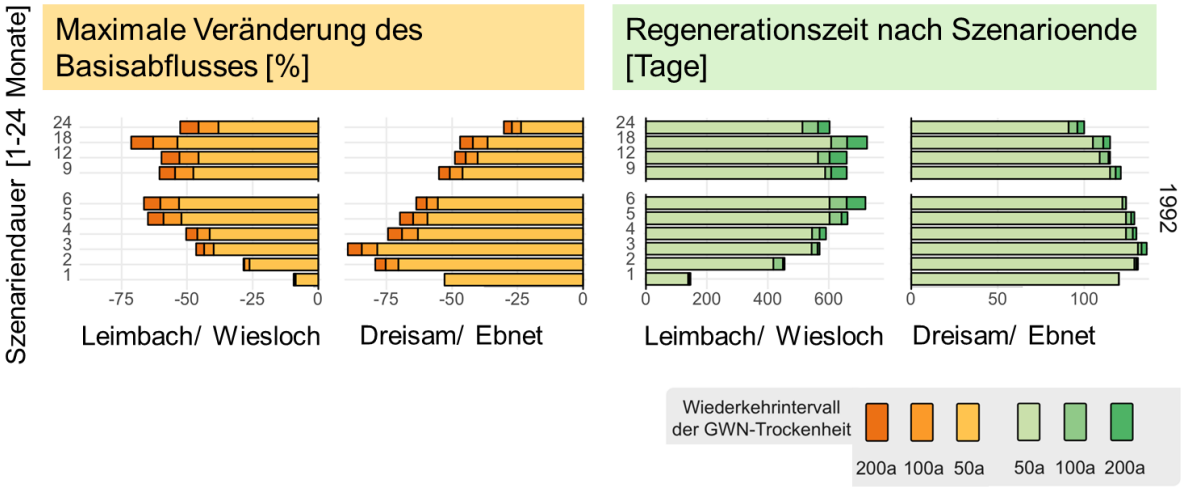


Abbildung 8. Maximale Veränderung des Basisabflusses und Regenerationsdauer für die Einzugsgebiete Leimbach und Dreisam für das Trockenjahr 1992, verschiedene Szenariodauern und Wiederkehrintervalle der synthetischen Grundwasserneubildungs-Trockenheit. Unterschiedliche Skalierung der Regenerationsdauern je Gebiet beachten. Abbildung verändert nach KLIWA 2017.

Fazit:

- Eine reduzierte Grundwasserneubildung führt zu einer Verringerung des Basisabflusses, allerdings bestimmen die Eigenschaften des Einzugsgebiets die Stärke der Reaktion und die Regenerationszeit.
- Eine längere Vortrockenheit führt nicht zwangsläufig zu stärkeren Abnahmen.
- Die angewandte Methode liefert eine gute Vergleichbarkeit zwischen Gebieten und ist im Ansatz übertragbar.

4. Zusammenfassung und Ausblick

Starke Trockenheit und extremes Niedrigwasser können zu extremen Auswirkungen bei der Gewässerökologie und wasserwirtschaftlichen Nutzungen führen. Die Stärke dieser Auswirkung hängt allerdings maßgeblich von Stärke und Dauer eines Niedrigwasserereignisses ab,

aber auch von der Empfindlichkeit der beeinflussten Nutzung. Ist die Ressource Wasser in einem Gebiet zudem bereits stark genutzt, d. h. liegen Nutzungskonflikte vor, können sich die Auswirkungen zusätzlich verstärken. Zum Teil werden in den Auswirkungen Beharrungszustände erreicht, eine deutliche Verschlechterung bei noch extremeren Zuständen ist dann nicht mehr zu erkennen.
Unterschiedliche Methoden helfen, die Auswirkungen extremer Niedrigwasserereignisse aus verschiedenen Blickwinkeln zu untersuchen und zu bewerten. So wurden in den Pilotstudien nicht nur klassische Klimaprojektionen betrachtet, sondern über die Stresstests und Vergangenheitsanalysen auch ergänzende Ansätze, um den methodischen Herausforderungen in der Untersuchung und Abbildung von Niedrigwasser zu begegnen. Ferner ist die räumliche Ausprägung von Niedrigwasser zum Teil sehr variabel. Daher nutzten die Studien unterschiedliche räumliche Blickwinkel von der punktuellen Analyse (alle Studien) über Gewässerlängsschnitte (BW) bis zur flächenhaften Betrachtung (RLP). Die hier gezeigten Beispiele konnten nur Schlaglichter aus den Pilotstudien zu besonders starken Niedrigwasserereignissen zeigen. Eine Zusammenfassung der allgemeinen Auswirkungen auf die in den Pilotstudien betrachteten Nutzungsbereiche gibt einerseits der folgende Artikel *„Niedrigwassermanagement – Synthese und Auswirkungen aus den Pilotgebieten und resultierende Handlungsempfehlungen*“ (Beitrag Dr. Stölzle), andererseits das in Vorbereitung befindliche KLIWA-Heft 23 (KLIWA 2018).

5. Literatur

Buth, Mareike; Kahlenborn, Walter; Savelsberg, Jonas; Becker, Nina; Bubeck, Philip; Kabisch, Sibylle et al. (2015): Vulnerabilität Deutschlands gegenüber dem Klimawandel. Climate change, 24/2015.

IPCC, Intergovernmental Panel on Climate Change (2014): Climate Change 2014 - Impacts, Adaptation and Vulnerability - Part B. Regional Aspects. Working Group II Contribution to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Part B, Cambridge, 696 S.

KLIWA (2018): Niedrigwasser in Süddeutschland. Analysen, Szenarien und Handlungsempfehlungen aus Pilotstudien, t, KLIWA-Berichte Heft 23. [in Vorbereitung].

LAWA, Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft Wasser (2001): Empfehlungen zur Ermittlung von Mindestabflüssen in Ausleitungsstrecken von Wasserkraftanlagen und zur Festsetzung im wasserrechtlichen Vollzug. Berlin.

LfU RP, Landesamt für Umwelt Rheinland-Pfalz (2017): Auswertungen zur zukünftigen Veränderung der Niedrigwassersituation in Rheinland-Pfalz. Abschlussbericht im Auftrag des Landesamtes für Umwelt Rheinland-Pfalz. Krumm, Julia; Trautmann Tim, [unveröffentlicht].

LfU, Bayerisches Landesamt für Umwelt (2017): Vorhaben KLIWA - Klimawandel und Auswirkungen auf die Wasserwirtschaft: Fallstudien Niedrigwasser Naab und Sächsische Saale. Abschlussbericht im Auftrag des Bayerischen Landesamtes für Umwelt (Veröffentlichung in Vorbereitung), bearbeitet durch HYDRON GmbH. Krumm, Julia; Gerlinger, Kai; Schweppe, Robert; Seibert, Mathias.

LUBW (2017): Pilotstudie zum Niedrigwassermanagement in Baden-Württemberg. Pilotgebiete: Dreisam und Leimbach. Abschlussbericht (unveröffentlicht). LUBW - Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg, Karlsruhe.

Niedrigwassermanagement – Synthese und Auswirkungen aus den Pilotgebieten und resultierende Handlungsempfehlungen

Dr. Michael Stölzle (Fakultät für Umwelt und Natürliche Ressourcen, Universität Freiburg), Christian Iber (LfU Rheinland-Pfalz), Maria Foltyn (LfU Bayern) und Wolfgang Hennegriff (LUBW)

1. Einleitung

Klimamodelle und resultierende Abflussprojektionen zeigen auf, dass sich sommerliche Niedrigwasserperioden in Süddeutschland zukünftig verstärken können. Die möglichen Veränderungen beziehen sich dabei auf längere und intensivere Niedrigwasserperioden, aber auch auf potenzielle 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 werden und bisherige Wassernutzungen weiterhin ermöglicht werden. Bisher wurde kein umfängliches Niedrigwassermanagement in den KLIWA-Bundesländern umgesetzt. Innerhalb von KLIWA wurden seit 2015 verschiedene Niedrigwasser-Pilotstudien durchgeführt. Diese hatten einerseits zum Ziel, die Auswirkungen von Niedrigwasser zu betrachten (siehe Beitrag Foltyn: „*Auswirkungen extremer Niedrigwasserereignisse auf die Wasserbewirtschaftung*“), andererseits die Grundprinzipien, zukünftige Möglichkeiten und Hemmnisse eines Niedrigwassermanagements in verschiedenen Untersuchungsgebieten in Baden-Württemberg, Bayern und Rheinland-Pfalz zu untersuchen.

Fragestellungen innerhalb dieses Beitrags:

- Welche Rollen nehmen Wassernutzungen, Auswirkungen von Niedrigwasser und mögliche Handlungsempfehlungen in einem dynamischen und partizipativen Niedrigwassermanagement ein?
- Wie können Auswirkungen und Handlungsempfehlungen zueinander in Kontext gesetzt werden?
- Mit welchen Methoden können Handlungsempfehlungen bewertet und konkretisiert werden?

Ziel dieses Symposium-Beitrags war es daher, die theoretische Basis für ein dynamisches und partizipatives Niedrigwassermanagement vorzustellen (Kapitel 2). Da ein möglichst erfolgreiches Niedrigwassermanagement Wassernutzungen und Auswirkungen von Niedrigwasser auf diese Nutzungen berücksichtigen sollte, werden in Kapitel 3 exemplarisch Wassernutzungen und eine Methode zur Bewertung der Auswirkungen auf diese Nutzungen vorgestellt. In Kapitel 4 zeigt abschließend ein Konzept zur Bewertung und Konkretisierung von Handlungsmaßnamen innerhalb eines Niedrigwassermanagements auf. Details zu den einzelnen Kapiteln finden sich in KLIWA (2018).

2. Niedrigwassermanagement

Niedrigwasser in Fließgewässern ist aufgrund seiner zahlreichen quantitativen und qualitativen Aspekte ein komplexes Phänomen in der Hydrologie. Ein gelungenes Niedrigwassermanagement muss zahlreiche Wassernutzungen entlang des Gewässers und verschiedenartige Auswirkungen von Niedrigwasser auf diese Wassernutzungen berücksichtigen.

Dabei ist auch von (zukünftigen) Wassernutzungskonflikten auszugehen. Das Niedrigwassermanagement sollte dynamisch sein, d. h. sich auf veränderte Niedrigwasserperioden einstellen können. Das Niedrigwassermanagement sollte aber auch partizipativ sein, d. h. spezifische Wassernutzungen und Auswirkungen berücksichtigen und den Dialog zwischen verschiedenen Wassernutzungen fördern, um Wassernutzungskonflikte zu mindern und zu verhindern. Abbildung 1 zeigt die Struktur und die verschiedenen Elemente eines dynamischen und partizipativen Niedrigwassermanagements in einer Übersicht:
Zu Beginn treten Trockenheits- und Niedrigwasserereignisse auf (vgl. 1. in Abbildung 1), welche zunächst akute Maßnahmen hervorrufen (2), z. B. Einschränkung Wasserentnahme, Abfischungen, Sauerstoffzufuhr. Auf Basis der vergangenen und zukünftig zu erwartenden Niedrigwasserereignisse wird eine Analyse (3) durchgeführt, um Charakteristika wie Dauer und Intensität der Niedrigwasserereignisse zu bewerten (4).

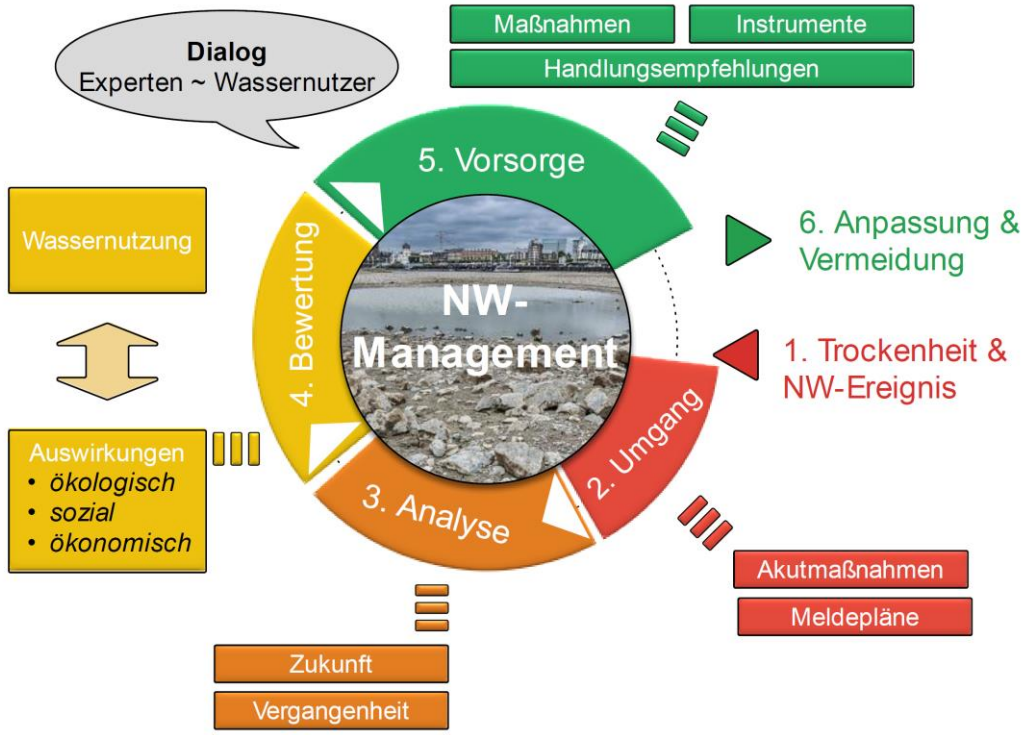


Abbildung 1. Systematik und Komponenten eines dynamischen und partizipativen Niedrigwassermanagements. Erläuterungen siehe Text. Verändert nach LfU (2016).

Für die Analyse können etwa statistische Auswertungen vergangener Ereignisse herangezogen werden, aber auch Projektionen aus Klimamodellen, um zukünftige Entwicklungen abzuschätzen. Die Bewertung (4) findet auf Basis der Auswirkungen statt und sollte dabei unterschiedliche ökologische, ökonomische und soziale Auswirkungen berücksichtigen. Es ist davon auszugehen, dass unterschiedliche Niedrigwasserereignisse auf verschiedenen Ebenen unterschiedlich starke Auswirkungen haben. Hierfür ist ein Abgleich mit den spezifischen, lokalen Wassernutzungen nötig, um ein Vorsorgekonzept (5) für das Einzugsgebiet oder Flussgebiet zu entwickeln. Dabei ist der Dialog zwischen Wasserexperten (z. B. Forschungseinrichtungen, Landesämter, Wasserwirtschaftsämter etc.) und den lokalen Wassernutzern und Kommunen unerlässlich. Nur der Dialog führt zu spezifisch angepassten Handlungsempfehlungen. Diese Empfehlungen können durch verschiedene Instrumente (z. B. planerische, administrative oder bauliche Maßnahmen) in ein Vorsorgekonzept überführt werden. Die Empfehlungen müssen aber auch hinsichtlich Relevanz, Umsetzbarkeit, Wirtschaftlichkeit etc. bewertet werden (vgl. Kapitel 4). Das Konzept hat zum Ziel, zukünftig bes-

ser an Niedrigwasserereignisse angepasst zu sein und eine Verminderung und/oder Vermeidung von Auswirkungen zu erreichen (6). Neue Niedrigwasserereignisse sowie neue Erkenntnisse über zukünftig zu erwartende Niedrigwasserereignisse sollten innerhalb des Niedrigwassermanagements stetig berücksichtigt werden (dynamischer Kreislauf).

3. Wassernutzungen und Auswirkungen

Die Pilotstudien, deren Ergebnisse im Rahmen des Niedrigwassersyntheseberichts zusammengeführt wurden, zeigen, dass sich die Wassernutzungen in verschiedenen Gebieten in Baden-Württemberg, Bayern und Rheinland-Pfalz deutlich unterscheiden. KLIWA (2018) bietet einen Überblick zu den relevanten Wassernutzungen. In Abbildung 2 sind exemplarisch zahlreiche Wassernutzungen zusammengestellt, deren Relevanz und Ausprägung vor Ort sehr unterschiedlich sein kann. Es ist davon auszugehen, dass in einem Einzugsgebiet zukünftig auch neue Wassernutzungen hinzukommen oder bisherige Wassernutzungen an Relevanz verlieren können (Dynamik der Wassernutzungen).



Abbildung 2. Zusammenstellung unterschiedlicher Wassernutzungen in einem Einzugsgebiet.

Die Bewertung der Auswirkungen erfolgt grundsätzlich entlang der tatsächlichen Wassernutzungen in einem Gebiet. Beispielhaft werden im Folgenden verschiedene Wassernutzungen aus den bayerischen Einzugsgebieten Sächsische Saale und Naab sowie ein Konzept zur Einschätzung der Auswirkungen vorgestellt. Details sind in der Pilotstudie hierzu erläutert (LFU, 2017). Dabei wurden verschiedene Wasserexperten (aus dem Bayerischen Landesamt für Umwelt und aus bayerischen Wasserwirtschaftsämtern) um eine Einschätzung hinsichtlich der zukünftigen Niedrigwasserauswirkungen in den Gebieten gebeten, wobei sie allein auf das dato bei ihnen vorhandene Wissen zurückgreifen sollten. Dieses Wissen schließt Auswirkungen aus der Vergangenheit sowie spezifisches Wissen über zukünftige Änderungen mit ein. In einem darauffolgenden Workshop wurden den Experten verschiedene Projektergebnisse präsentiert (z. B. Projektionen zukünftiger Abflussverhältnisse und Änderungssignale), um daraufhin eine zweite Einschätzung zu den Auswirkungen einzuholen, jedoch differenziert nach einer optimistischen und einer pessimistischen Einschätzung der

Zukunft. Diese Varianten sind schematisch vergleichbar mit unterschiedlichen Abflussprojektionen verschiedener Klimamodelle, welche eine Bandbreite der möglichen Veränderung bereitstellen. Anhand dieser expertenbasierten Einschätzung der Auswirkungen lassen sich folglich „Bandbreiten“ der möglichen, zukünftigen Auswirkungen in den Gebieten quantifizieren (Abbildung 3). Auswirkungen zukünftiger Niedrigwasser auf die Nutzungen „Teiche“ und „Abwasser“ wurden dabei beispielsweise als wahrscheinlich gleichbleibend oder vermindert eingestuft. Hinsichtlich der Nutzungen „Gewässerökologie“ und „Wasserkraft“ kam es durch das zusätzliche Wissen im zweiten Workshop teils zu vollkommen neuen Bewertungen. Die Analysen zu den Wassernutzungen „Wasserkraft“ oder „Gewässerökologie“ (Saale) zeigen auch, dass zusätzliche Informationen zu einer heterogeneren Bewertung der Auswirkungen zukünftiger Niedrigwasserereignisse führen können. Diese szenarienbasierte Auswirkungsanalyse zeigt, wie Expertenwissen in ein zukünftiges Niedrigwassermanagement eingeflochten werden kann. Generell beinhalten die Niedrigwasser-Pilotstudien (KLIWA, 2018) verschiedene Beispiele, wie die Zusammenführung unterschiedlicher Akteure (Experten und lokale Wassernutzer) starke Synergien hervorbringen, um z. B. Lösungsstrategien für (potenzielle) Wassernutzungskonflikte zu entwickeln. Unterschiedliche Instrumente des Niedrigwassermanagements, wie etwa Stakeholder-Workshops oder Befragungen von Experten können einen Prozess des partizipativen Niedrigwassermanagements anstoßen.

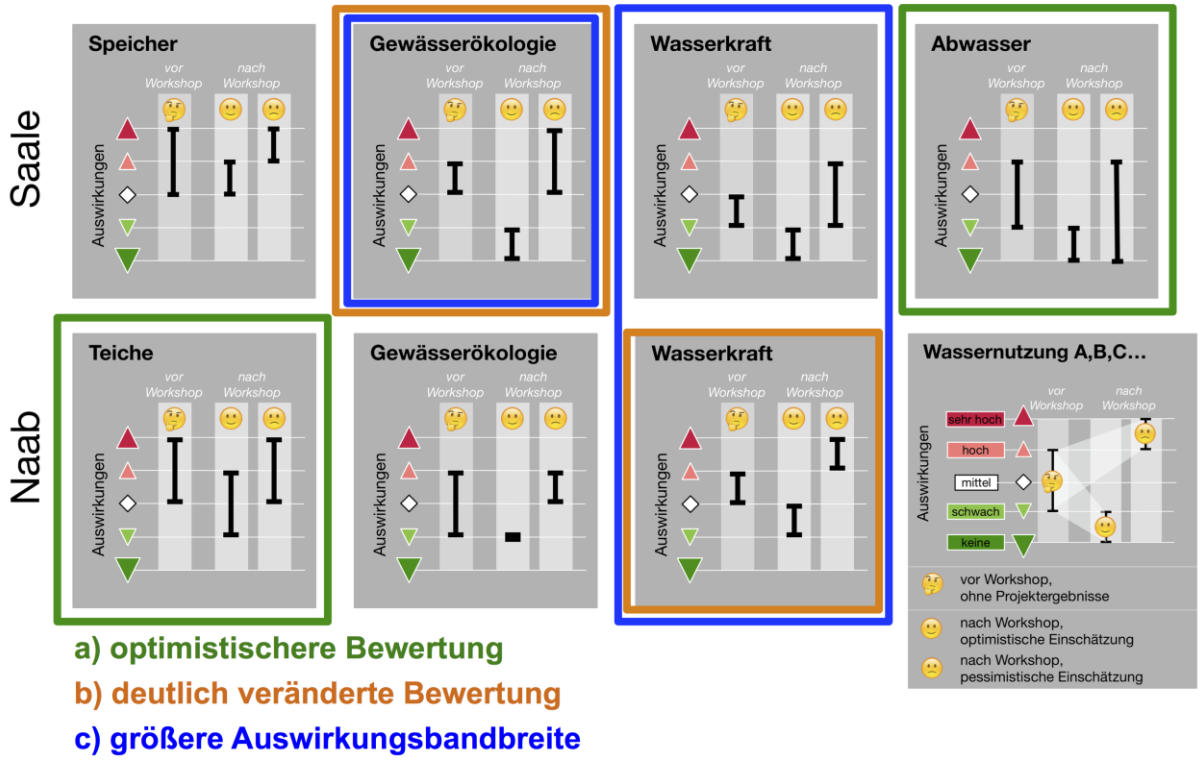


Abbildung 3. Expertenbewertung von Niedrigwasserauswirkungen auf verschiedene Wassernutzungen beispielhaft für die bayerischen Pilotgebiete Naab und Sächsische Saale visualisiert. Erläuterungen siehe Text. Durch zusätzliches Wissen der Experten werden zukünftige Auswirkungen zum Teil anders eingeschätzt, hierbei ergeben sich z. B. a) optimistischere Bewertungen, b) deutlich veränderte Bewertungen und c) mehr Bandbreite in den Bewertungen.

4. Konkretisierung und Bewertung von Handlungsmaßnamen

Die „Leitlinien für ein nachhaltiges Niedrigwassermanagement“ (LAWA, 2007) bieten einen guten theoretischen Rahmen für die Entwicklung und Etablierung eines Niedrigwassermana-

gements, bleiben in vielen Bereichen durch ihren Fokus auf die Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft aber zu unspezifisch. Die vorgestellten Handlungsempfehlungen hingegen sind vielmehr als Leitlinien für eine Konkretisierung nutzbar. Hierbei wurde in Niedrigwasservorsorge und Niedrigwassermanagement unterschieden. Angelehnt an das Hochwassermanagement sollen zukünftig Vorsorgekomponenten wie Akutmaßnahmen in das Niedrigwassermanagement integriert werden.

Die Konkretisierung und Bewertung von Handlungsempfehlungen in den KLIWA-Pilotstudien basiert auf folgenden Punkten:

1. Identifikation der Informationsquelle einer Maßnahme,
2. Bewertung des Aufwands zur Durchführung einer Maßnahme,
3. Konkretisierung der Maßnahme durch Pro- und Kontra-Abwägungen der Wirksamkeit,
4. Allgemeingültigkeit der Maßnahme, um die Übertragbarkeit festzustellen, und
5. Einstufung der Maßnahme hinsichtlich von No-Regret-Kriterien.

Das Ergebnis dieses Vorgehens ist ein umfangreicher Katalog an Maßnahmen zur Anpassung an Niedrigwasser, die durch verschiedene Experten in den Pilotstudien hinsichtlich ihrer Eignung vorgeprüft wurden. Hiermit soll eine Unterscheidung zwischen Handlungsoptionen und Handlungsempfehlungen vorangetrieben werden. Im Vorfeld der Umsetzung dieser Maßnahmen stellen die dabei erarbeiteten Bewertungskriterien eine wertvolle Richtschnur für weitere notwendige Prüfungen und Diskussionen durch die betroffenen Experten und Wassernutzer dar. Eine umfassende Zusammenstellung von Handlungsempfehlungen zum Niedrigwassermanagement mit den hier aufgeführten Kriterien zur Konkretisierung und Bewertung der Maßnahmen ist in KLIWA (2018) zu finden.

Informationsquelle
Die Bewertung der Informationsquelle zu einer Handlungsmaßnahme wird in wissens-, erfahrungs- und datenbasiert unterteilt. Wissensbasierte Handlungsmaßnahmen beruhen auf der Expertise von Experten oder auf Literaturrecherchen. Erfahrungsbasierte Handlungsempfehlungen werden durch den Dialog mit lokalen Wasserakteuren gewonnen (z. B. in Workshops zum Niedrigwassermanagement in einem Einzugsgebiet). Hydrologische Kennwerte, Analysen und Modellergebnisse werden als datenbasierte Informationsquellen genutzt, um Handlungsempfehlungen abzuleiten (z. B. Einhaltung der Restwassermenge). Die verschiedenen Quellen helfen die Maßnahme zu bewerten. Eine Metaanalyse im Rahmen dieses Beitrags hat gezeigt, dass etwa 75 % der Maßnahmen wissens- und erfahrungsbasiert sind, 25 % der Maßnahmen können auf Datenbasis abgeleitet werden. Datenbasierte Handlungsempfehlungen können dabei nahezu gänzlich auch durch wissens- und erfahrungsbasierte Informationen abgeleitet werden. Es ist jedoch davon auszugehen, dass datenbasierte Informationen in bestimmten Fällen einfacher nutzbar sind (z. B. Kennwert-Analyse).

Aufwand zur Durchführung
Hierbei soll die „Machbarkeit“ einer einzelnen Maßnahme bewertet werden. Der Aufwand zur Durchführung wurde unter politischen, administrativen und finanziellen Gesichtspunkten mit „hoch“, „mittel“ oder „gering“ eingestuft (KLIWA, 2018). In einer Metastudie für diesen Beitrag zeigte sich, dass der Aufwand bezüglich der „politischen“ Durchführung häufig als geringer eingestuft wurde als der „finanzielle“ oder „administrative“ Aufwand.

Konkretisierung
Auf Basis von Expertenwissen (Forschungseinrichtungen, Landesämter) wurde eine Gegenüberstellung der Vor- und Nachteile der einzelnen Maßnahmen durchgeführt. Ein Beispiel für eine Handlungsmaßnahme soll dies verdeutlichen. Die Maßnahme „Restwassermenge gewährleisten“ führt im Allgemeinen zu einer gewässerökologischen Verbesserung während Niedrigwasserperioden. Der gewässerökologische Zustand eines Fließgewässers ist häufig

für viele Wassernutzungen maßgeblich. Jedoch fehlen bisher flächendeckende, verbindliche,

einheitliche Regelungen zur Definition der Restwassermenge und die Aufarbeitung und Festlegung der Restwassermenge ist z. B. durch den variablen Wasserstand entlang von Fließgewässern aus administrativer Sicht sehr aufwendig.

Allgemeingültigkeit
Die Allgemeingültigkeit von Handlungsempfehlungen ist mittels der tatsächlichen lokalen Wassernutzungen bewertbar. Mit zunehmenden Wassernutzungen sinkt die Anzahl der (potenziellen) Handlungsempfehlungen und deren Allgemeingültigkeit nimmt zu. Stärker allgemeingültige Handlungsempfehlungen sind daher bei mehreren Wassernutzungen zur Minderung von Wassernutzungskonflikten relevant. Liegen spezifische, klar abzutrennende Wassernutzungen vor, so können auch spezifische Handlungsempfehlungen für einzelne Wassernutzungen entwickelt werden. Die Bewertung der Allgemeingültigkeit ist hilfreich, wenn Maßnahmen von einem Gebiet auf ein anderes übertragen werden, und, wenn eine Priorisierung möglicher Handlungsmaßnahmen zur Umsetzung durchgeführt wird. Die Maßnahme „Restwassermenge gewährleisten“ (siehe oben) ist beispielsweise stark allgemeingültig und häufig auf andere Gebiete übertragbar. Geht es jedoch um Besucherlenkung innerhalb des Kanusports, um von Niedrigwasser betroffene Gewässer zu entlasten, liegt eine sehr spezifische, weniger allgemeingültige Handlungsempfehlung vor.

No-Regret-Maßnahmen
No-Regret-Maßnahmen sind "Anpassungsmaßnahmen, die unabhängig vom Klimawandel ökonomisch, ökologisch und sozial sinnvoll sind. Sie werden vorsorglich ergriffen, um negative Auswirkungen zu vermeiden oder zu mindern. Ihr gesellschaftlicher Nutzen ist auch dann noch gegeben, wenn der primäre Grund für die ergriffene Strategie [...] nicht im erwarteten Ausmaß zum Tragen kommt." (UBA, 2017).

Mittels der No-Regret-Bewertung kann die Auswirkung einer einzelnen Maßnahme z. B. auf andere Wassernutzungen beurteilt werden. Eine umfängliche Einstufung der Handlungsempfehlungen ist in KLIWA (2018) zu finden. Es ist davon auszugehen, dass „No-Regret“-Bewertungen tendenziell häufiger ausgewiesen werden, wenn mehrere Wassernutzungen von einer Handlungsmaßnahme (potenziell) profitieren und diese einen stärker allgemeingültigen Charakter hat. Bauliche Maßnahmen sind beispielsweise häufig nicht als No-Regret-Maßnahmen einzustufen (vgl. Abschnitt „Aufwand zur Durchführung“) und zudem häufig auch „finanziell“ aufwendiger im Vergleich zu anderen Maßnahmen.

5. Schlussfolgerungen

Die verschiedenen Pilotstudien zeigen in der Synthese (KLIWA, 2018) das zahlreiche anwendbare Methoden entwickelt wurden, um ein erfolgreiches Niedrigwassermanagement zu etablieren:

- Spezifisches Wissen über zukünftige Abflussverhältnisse und die Vielfalt der Wassernutzungen ist wichtig, um ein partizipatives und dynamisches Niedrigwassermanagement zu etablieren. Expertenwissen und Expertise lokaler Wasserakteure ist maßgeblich für ein nachhaltiges Niedrigwassermanagement. Die Pilotstudien konnten dies beispielsweise mit Mitteln von Niedrigwasserszenarien und Expertenworkshops zeigen.
- Die Analyse der Wassernutzungen zeigt das Spektrum der (potenziellen) Auswirkungen während Niedrigwasser auf und dient als Ausgangspunkt für die Entwicklung konkreter Handlungsempfehlungen. Auswirkungen von Niedrigwasser können durch Experten und Wasserakteure bewertet und verglichen werden.

- Eine gelungene Niedrigwasservorsorge stützt sich auf einen Katalog von Handlungsempfehlungen, welche hinsichtlich Relevanz, Akzeptanz bei lokalen Wassernutzern, Umsetzbarkeit, Wirtschaftlichkeit und No-Regret-Aspekten konfiguriert wurde. Der Synthesebericht liefert einen solchen Katalog (KLIWA, 2018).
- Mit zunehmenden Wassernutzungen ist in der Regel eine zunehmende Allgemeingültigkeit von Handlungsempfehlungen verbunden und die Auswahl potenzieller Maßnahmen wird eingeschränkt. Die vorgestellte No-Regret-Systematik ist eine sinnvolle Ergänzung zur Bewertung von Durchführbarkeit und Konkretisierung der Handlungsmaßnahmen.

6. Literaturverzeichnis

KLIWA (2018): Niedrigwasser in Süddeutschland. Analysen, Szenarien und Handlungsempfehlungen Synthese aus Niedrigwasser-Pilotstudien. KLIWA-Berichte Heft 23 (in Vorbereitung).

LAWA (2007): Leitlinien für ein nachhaltiges Niedrigwassermanagement -Materialien-. Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft Wasser.

LfU, Bayerisches Landesamt für Umwelt [Hrsg.] (2016): Niedrigwasser in Bayern – Grundlagen, Veränderung und Auswirkungen. Bayerisches Landesamt für Umwelt.

LfU, Bayerisches Landesamt für Umwelt (2017): Vorhaben KLIWA - Klimawandel und Auswirkungen auf die Wasserwirtschaft: Fallstudien Niedrigwasser Naab und Sächsische Saale. Abschlussbericht im Auftrag des Bayerischen Landesamtes für Umwelt (Veröffentlichung in Vorbereitung), bearbeitet durch HYDRON GmbH.

UBA (2017): Online-Glossar des Umweltbundesamt. http://www.umweltbundesamt.de/service/glossar/n (Abruf: 25. Juni 2017).

Vulnerabilität von Grundwassersystemen Süddeutschlands – Ergebnisse von Stresstestuntersuchungen

Dr. Jörg Neumann, LfU Bayern

1. Einleitung

Der Begriff Vulnerabilität leitet sich vom lateinischen „vulnus“ (=Wunde) bzw. „vulnerare“ (=verwunden, verletzen) ab. In diesem Sinne steht Vulnerabilität grundsätzlich für „Verwundbarkeit“ bzw. „Verletzbarkeit“ und wird als Fachbegriff in unterschiedlichsten Bereichen (z. B. Medizin, Psychologie, Theologie, Ökonomie, Ökologie) eingesetzt. Im Kontext Klimawandel ist Vulnerabilität laut Definition des IPCC (2008) das Maß, zu dem eine Person, Region oder ein System gegenüber nachteiligen Auswirkungen von Klimaänderungen anfällig ist. Wesentliche Einflussfaktoren sind dabei die Exposition (= Art und Intensität der Klimaänderung), Sensitivität (= Ausmaß der Beeinflussung) und Anpassungsfähigkeit. Dieser theoretische Ansatz lässt sich genauso auf die Ressource Grundwasser übertragen. Entsprechende Untersuchungen waren in Deutschland bis zuletzt allerdings noch unterrepräsentiert (UBA, 2015). Im Rahmen von KLIWA wurde mit Hilfe von Stresstestsimulationen in Fallstudiengebieten die Reaktion der Systeme auf erhöhte Beanspruchung näher betrachtet. Der thematische Schwerpunkt lag dabei auf der Entwicklung von Quellschüttungen.

2. Vulnerabilität von Grundwassersystemen

Grundwasserleiter stellen vor allem dann vulnerable Systeme dar, wenn mögliche Nutzungen direkt betroffen sind. Dies betrifft in erster Linie die Trinkwassergewinnung, deren Versorgungssicherheit i. d. R. unmittelbar vom verfügbaren Grundwasserdargebot beeinflusst wird. Besonders deutlich wird dies bei einem Blick auf die Wassermangelgebiete in zahlreichen Entwicklungsländern. Zur Wasserversorgung dienen hier oft einfache Brunnen, die bei sinkenden Niederschlägen (→ Art und Ausmaß der Klimaänderung bzw. Exposition) häufiger trockenfallen können oder langfristig zu wenig Wasser liefern. Die auf diese Weise durch den Klimawandel eingeschränkte Versorgung mit lebenswichtigem Trinkwasser (→ Ausmaß der Beeinflussung bzw. Sensitivität) greift unmittelbar in die Existenzgrundlagen der Menschen ein. Die individuelle Anpassungsfähigkeit der Betroffenen ist gefordert (z. B. Vertiefung bestehender Brunnen, Bohren neuer Brunnen), um sich vor Ort auf die sich ändernden Umweltbedingungen einzustellen. Auch wenn es sich hierbei um ein extremes Beispiel handelt, gelten die aufgezeigten Zusammenhänge vom Grundsatz her auch für die Vulnerabilität genutzter Grundwassersysteme Süddeutschlands.

2.1 Einflussfaktoren Wasserhaushalt

Die Grundwasserneubildung ist Teil des natürlichen Wasserkreislaufs und stellt als Rest der Wasserbilanz eine besonders klimasensitive Größe dar. Ausgehend von der Niederschlagshöhe (N) wird die Grundwasserneubildung (GWN) direkt von der Höhe der tatsächlichen Verdunstung (V) sowie der Summe der schnellen Abflusskomponenten (Direktabfluss D) beeinflusst (GWN=N-V-D). Im Sinne der Nachhaltigkeit beeinflusst die Höhe der Grundwasserneubildung (neben anderen Einflussfaktoren) entscheidend das nutzbare Dargebot. Betrachtet man die für die Grundwasserneubildung relevanten Bilanzgrößen einzeln, so zeigen sich die möglichen Auswirkungen des Klimawandels besonders deutlich (Abb. 1):
Global steigende Lufttemperaturen bedeuten grundsätzlich eine erhöhte Strahlungsenergie in der Atmosphäre, was wiederum unmittelbare Auswirkungen auf die potentielle Verdunstung (Zunahme) hat. Weiterhin steuert die Lufttemperatur direkt die Schneedeckenentwicklung. Dies hat wiederum zur Folge, dass die wichtige Rücklage im Schneespeicher (und ver-

zögerte Abgabe daraus) zu Gunsten schnell wirksamer Abflüsse immer mehr an Bedeutung verliert. Steigende Temperaturen begünstigen somit in beiden Fällen tendenziell sinkende Grundwasserneubildungsraten.

Direkten Einfluss auf die Grundwasserneubildung haben klimawandelbedingte Änderungen des Niederschlagsgeschehens. Da die Grundwasserneubildung näherungsweise den nicht verdunstenden Anteil des Niederschlags abzüglich der schnellen Abflusskomponenten abbildet, wirkt sich die Niederschlagshöhe als prägendster Faktor auf die Größenordnung der Grundwasserneubildung aus. Dabei spielen neben der absoluten Höhe (Zu-/Abnahmen) vor allem die innerjährliche Verteilung sowie die Niederschlagsintensität eine wichtige Rolle. So bedeutet speziell im Winterhalbjahr ein Weniger an Niederschlag i. d. R. auch eine entsprechende Abnahme der Grundwasserneubildung. Höhere Niederschlagsintensitäten bewirken normalerweise eine Zunahme des Direktabflusses, was ebenfalls meist auf Kosten der Grundwasserneubildung geschieht.

Insgesamt kann festgestellt werden, dass alle klimawandelbedingten Einflüsse, die die Verdunstung stärken und/oder den Anteil der schnellen Abflusskomponenten erhöhen, zu einer Verringerung des grundwasserneubildungswirksamen Niederschlagsanteils führen. Die genannten Faktoren haben, zusammen mit einer möglichen Änderung der absoluten Niederschlagshöhe, eine unmittelbare Auswirkung auf die Grundwasserneubildung (als sensitivste Größe des Wasserhaushalts).

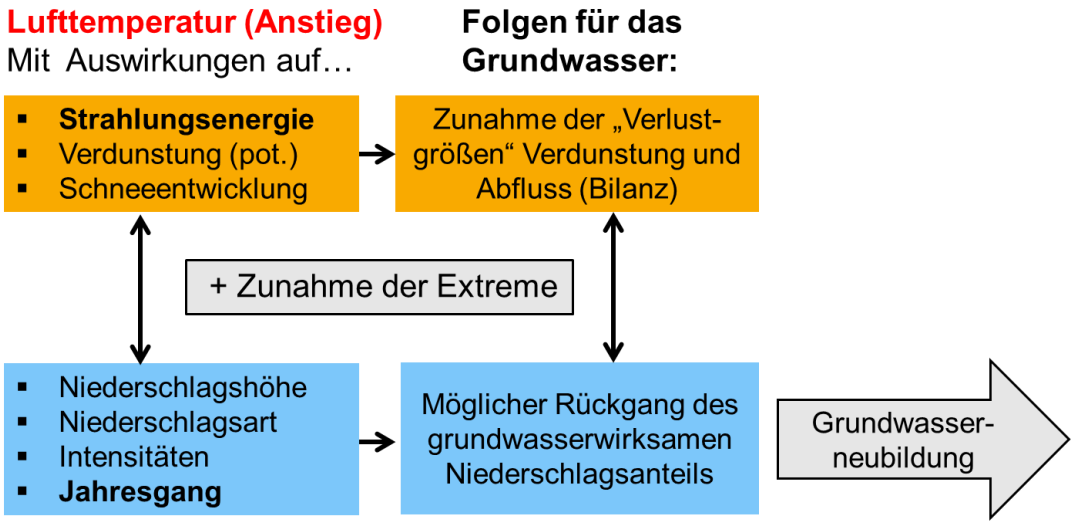


Abbildung 1. Auswirkungen klimatischer Einflussfaktoren auf die Wasserbilanz und die Entwicklung der Grundwasserneubildung.

Im Hinblick darauf, welche Größen der Wasserbilanz besonders vulnerabel auf den Klimawandel reagieren, lässt sich grundsätzlich folgende Aussage treffen: Je „enger“ die Wasserbilanz, d. h. je geringer der Anteil der Grundwasserneubildung am Niederschlag, desto empfindlicher reagiert das Grundwasser auf den Klimawandel (KLIWA 2017a). Veranschaulichen lässt sich dies am besten am konkreten Beispiel: Im Mittel beträgt die Grundwasserneubildung in Süddeutschland etwa 175 mm/a. Dies entspricht etwa 1/5 des mittleren jährlichen Niederschlags. Betrachtet man die vier Bundesländer einzeln, so zeigen sich jedoch deutliche Unterschiede. Beträgt der Anteil der Grundwasserneubildung in Bayern 22 % und in Baden-Württemberg 19 % des Niederschlags, so liegen die entsprechenden Zahlen in den niederschlagsärmeren Bundesländern Hessen (14 %) und Rheinland-Pfalz (13 %) deutlich niedriger. Dies bedeutet, dass in den zuletzt genannten Bundesländern von einem ohnehin schon sehr viel geringeren Niederschlagsdargebot nur ein deutlich kleinerer prozentualer

Niederschlagsanteil neubildungsrelevant wird. Als Folge dessen ist davon auszugehen, dass in den betroffenen Bereichen bereits vergleichsweise kleine Änderungen der Niederschlagshöhe eine sehr viel größere relative Änderung der Grundwasserneubildung zur Folge haben können. Besonders deutlich wird dies beim Vergleich konkreter Zahlen für einen besonders trockenen und einen vergleichsweise niederschlagsreichen Naturraum. Stellt man z. B. die Naturräume „Mainzer Becken“ und das „Süddeutsche Moränenland“ gegenüber und betrachtet die Zeiträume 2011-15 in Relation zum vieljährigen Mittel, so zeigt sich in beiden Fällen ein Niederschlagsdefizit von rund 8 %. Im Fall des Mainzer Beckens bewirkt dies ein Defizit der Grundwasserneubildung von mehr als 35 %, während der niederschlagsreiche Naturraum des Süddeutschen Moränenlandes nur eine prozentuale Abweichung von ca. 17 % zeigt. Ähnliche Tendenzen lassen sich in Abhängigkeit von der jeweiligen Wasserbilanz grundsätzlich in allen Naturräumen beobachten. Bezogen auf die vier Bundesländer ergibt sich das in Tabelle 1 dargestellte Bild (Kopp et al., 2018).

Tabelle 1. Vergleich der Absolutwerte (Angaben in mm/a) und prozentualen Änderungen der Niederschlagshöhe und deren Auswirkungen auf die Grundwasserneubildung, bezogen auf die vier Bundesländer Baden-Württemberg, Bayern, Hessen und Rheinland-Pfalz.

Region	Niederschlag 1951-2010	GWN 1951-2010	Niederschlag 2011-2015	GWN 2011-2015	Niederschlag rel. Änderung (%)	GWN rel. Änderung (%)
Baden-Württemberg	969	187	881	161	-9.1	-13.9
Bayern	938	206	852	173	-9.2	-16.0
Hessen	779	109	703	75	-9.8	-31.2
Rheinland-Pfalz	788	104	712	81	-9.6	-22.1
Süddeutschland	903	174	819	144	-9.3	-17.3

2.2 Hydrogeologische Aspekte

Neben den klimatischen Einflüssen auf die Wasserbilanz und den damit verbunden Auswirkungen auf die Grundwasserneubildung spielen besonders die regionalen Untergrundeigenschaften eine weitere wichtige Rolle im Hinblick auf die spezifische Vulnerabilität von Grundwassersystemen. So ist das für die Wasserversorgung nutzbare Grundwasserdargebot direkt abhängig vom Speichervermögen des Untergrundes bzw. der örtlichen Grundwasserführung der Gesteine. Gering ergiebige Grundwasservorkommen weisen deshalb prinzipiell ungünstigere Eigenschaften hinsichtlich der möglichen Auswirkungen des Klimawandels auf als ergiebigere Vorkommen. Abbildung 2 zeigt eine Übersicht Süddeutschlands über die mittlere Ergiebigkeit der Grundwasservorkommen (BMU, 2002). Entscheidende Einflussfaktoren sind der jeweilige Grundwasserleitertyp (Kluft-, Karst-, Lockergestein) sowie der verfügbare Porenraum. Betrachtet man die räumliche Verteilung der unterschiedlich ergiebigen Grundwasservorkommen in Süddeutschland, so fallen im Kartenbild die ergiebigen quartären Grundwasserleiter (u. a. Rheingraben, Schotterflächen im Voralpenland) deutlich auf. Demgegenüber sind insbesondere die von kristallinen Gesteinen (Schiefer, Granit, Gneis) geprägten Bereiche durch vergleichsweise geringe Ergiebigkeiten gekennzeichnet. Die hier oft hohen Grundwasserneubildungsraten sind Teil eines schnellen Grundwasserumsatzes und kommen somit nur teilweise dem für die öffentliche Wasserversorgung relevanten, nutzbaren Grundwasserdargebot zu Gute.

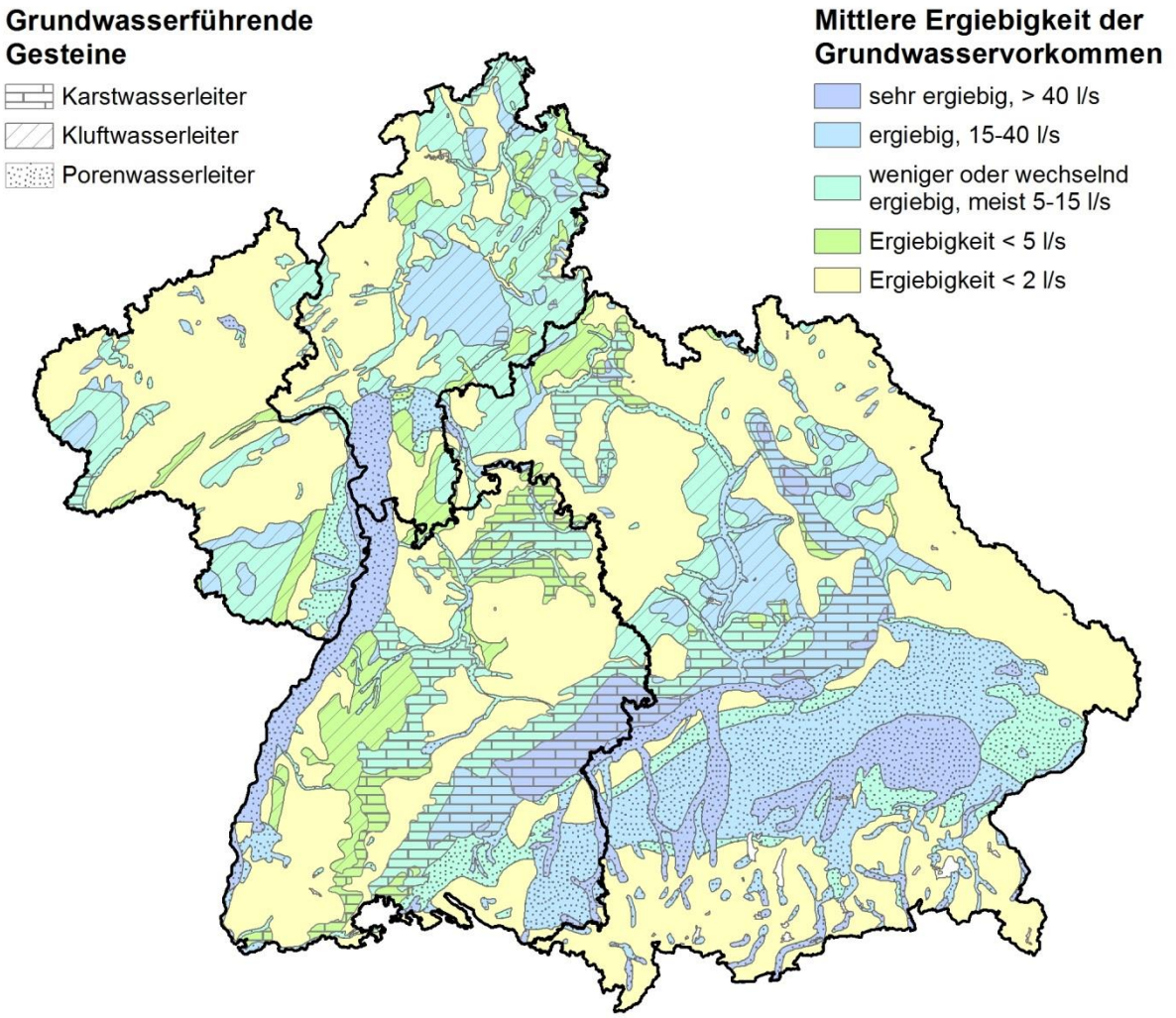


Abbildung 2. Mittlere Ergiebigkeit der Grundwasservorkommen in Süddeutschland unter Berücksichtigung der verschiedenen Grundwasserleitertypen (BMU, 2002).

2.3 Konsequenzen für die Grundwasserbewirtschaftung

Außer der Grundwasserneubildung und der Ergiebigkeit von Grundwasservorkommen als naturräumliche Faktoren entscheidet die Intensität der Bewirtschaftung letztlich über die Vulnerabilität von Grundwassersystemen. Bei geringer Grundwasserneubildung in wenig ergiebigen Bereichen ist theoretisch von den ungünstigsten naturräumlichen Voraussetzungen und der potentiell höchsten Anfälligkeit gegenüber den Auswirkungen des Klimawandels auszugehen. Eine reale Betroffenheit ergibt sich hier jedoch erst im Fall der tatsächlichen Ressourcennutzung. Dabei können auch ergiebige Grundwasserleiter, wie z. B. der Oberrheingraben bereichsweise so intensiv bewirtschaftet werden, dass bei einem Rückgang der Grundwasserneubildung bzw. des nutzbaren Dargebots trotzdem eine hohe Verletzbarkeit gegeben ist. Wenn keine betroffenen Nutzungen vorhanden sind, müssen im Umkehrschluss naturräumlich ungünstige Bedingungen nicht zwangsläufig eine hohe Vulnerabilität bedeuten. Das Zusammenspiel der drei Einzelaspekte zeigt Abbildung 3 schematisch.

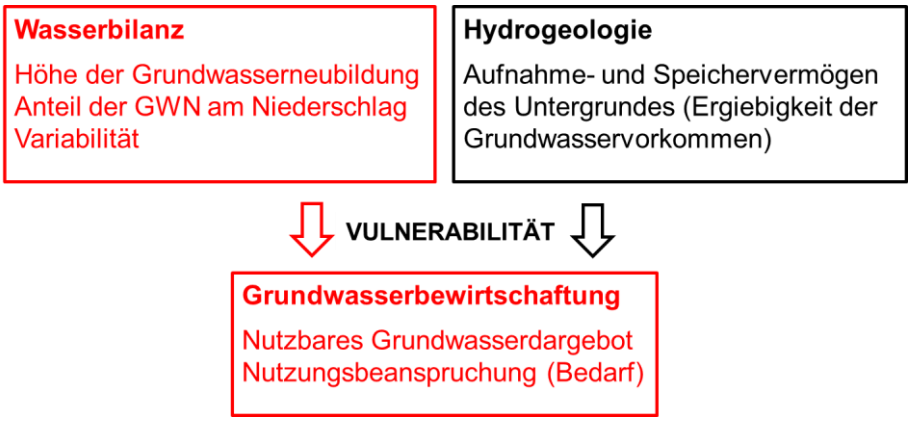


Abbildung 3. Vulnerabilität von Grundwassersystemen – Spannungsfeld zwischen Wasserbilanz, Hydrogeologie und Grundwasserbewirtschaftung.

3. Stresstestuntersuchungen

Im allgemeinen Sprachgebrauch wird als Stresstest eine spezielle Untersuchung bezeichnet, anhand der die Reaktion auf erhöhte Beanspruchung bzw. Belastung („Stress“) gemessen und beschrieben werden kann. Der Begriff wird in unterschiedlichen Fachdisziplinen verwendet, so z. B. in der Medizin, Finanzwirtschaft und Informatik und wurde 2011 von der Gesellschaft für deutsche Sprache zum Wort des Jahres gekürt. Im Fall des Grundwassers sollen mit Stresstestuntersuchungen die Reaktionen vulnerabler Systeme auf Extrembeanspruchungen betrachtet werden. Dabei wird hier, anders als bei Modellrechnungen auf Basis von Klimaprojektionen (= Blick in die Zukunft), auf gemessene Extreme bzw. Klimaverhältnisse aus der Vergangenheit zurückgegriffen.

Zentrale Frage bei der Durchführung von Stresstestuntersuchungen ist häufig, welche Auswirkungen z. B. eine Mehrfachabfolge von extremen Trockenjahren wie 2003 oder 2015 auf das Grundwasserdargebot und die betroffene Nutzung Wasserversorgung tatsächlich haben würde. In gleicher Weise können Erholungsreaktionen im Sinne der Frage von „Wie lange dauert es unter bestimmten Voraussetzungen, bis ein Defizit wieder ausgeglichen ist“ untersucht werden. Der Fokus der durchgeführten Untersuchungen lag hier auf dem nutzbaren Grundwasserdargebot von Quellen der öffentlichen Wasserversorgung in gering ergiebigen Grundwasserleitern. Die Stresstests wurden auf Basis bestehender Wasserhaushaltsmodelle in ausgewählten Fallstudiengebieten durchgeführt (KLIWA, 2017b).

3.1 Konzeption

Für die Stresstestuntersuchungen wurde ein dreißigjähriges Szenario auf Basis gemessener hydrologischer Halbjahre und Jahre entwickelt. Die Auswahl der Zeiträume erfolgte dabei anhand der ermittelten Abweichungen von Temperatur und Niederschlag in Abhängigkeit des regionalen vieljährigen Mittels. Ziel der Auswahl war es, vor allem extreme Trockenheit, überdurchschnittlich feuchte Bedingungen sowie durchschnittliche Verhältnisse abzubilden. Die gewählte Kombination bzw. Abfolge von Einzeljahren innerhalb des entwickelten Stresstestszenarios zeigt Tabelle 1 und wird nachfolgend näher beschrieben.

Tabelle 1. Auswahl und Kombination der Einzeljahre und Halbjahre als Grundlage für die Konzeption des entwickelten Stresstestszenarios (Beispiel Ostbayerisches Kristallin).

Zeitabschnitt	Charakteristik
0	Startjahr: Nasser Winter (1995)
1	Zeitraum 2011-2015
2	Zeitraum 2011-2015
3	6 trockene Jahre (2015)
4	2 „normale“ Jahre (2013)
5	6 feuchte Jahre (1995, 2009)
6	5 extrem trockene Jahre (Winter 2013/14 + Sommer Trockenjahr 2015)

Ausgehend von einem Modellstart mit gut gefüllten Speichern wurden insgesamt sechs aufeinander folgende, mehrjährige Zeitabschnitte festgelegt. Die Zeitabschnitte 1 und 2 umfassen dabei jeweils die Jahre 2011-2015 und beschreiben die Entwicklung der letzten fünf, in der Summe recht trockenen Jahre, in doppelter Abfolge. Im Anschluss daran folgen sechs weitere Jahre mit einem ausgeprägten Niederschlagsdefizit hintereinander. Als Grundlage für diesen Zeitabschnitt (3) diente das letzte Trockenjahr 2015. Auf diese Weise soll aufgezeigt werden, wie weit das Defizit unter diesen Bedingungen weiter anwachsen kann, bzw. wie weit die Quellschüttungen unter derartigen Extremverhältnissen absinken könnten. Zeitabschnitt 4 leitet dann mit zwei eher durchschnittlichen Jahren über in eine Phase mit einem deutlichen Wasserüberschuss und hoher Grundwasserneubildung (Zeitabschnitt 5). Die Intention hier war, zu zeigen, welchen Kompensationseffekt Durchschnittsjahre nach einer langen Trockenperiode haben können und welchen Einfluss ein hoher mehrjähriger Wasserüberschuss auf das Grundwasserdargebot haben könnte.

Im Anschluss sollte analog Zeitabschnitt 3 nochmals die Reaktion des Grundwassersystems auf extreme mehrjährige Trockenheit getestet werden (Zeitabschnitt 6). Anders als bei der sechs- bzw. siebenfachen Wiederholung des Trockenjahres 2015 (s. o.) wurden hierfür jedoch zwei extrem trockene Halbjahre miteinander kombiniert. Beispielhaft wurde dafür auf den Winter 2013/14 sowie das Sommerhalbjahr 2015 in fünffacher Abfolge zurückgegriffen. Das beschriebene Stresstestszenario wurde bisher in mehreren Fallstudiengebieten angewendet. Im weiteren Verlauf wird auf Ergebnisse aus dem Bereich der Fallstudie „Ilz/Ostbayerisches Kristallin“ (Abb. 4) näher eingegangen. Zusätzlich zu der hier vorgestellten Herangehensweise wurden speziell für Niedrigwasserauswertungen der Oberflächengewässer vergleichbare Stresstestkonzeptionen mit abweichender Szenariodauer entwickelt und angewendet (KLIWA, 2018). Darüber hinaus wurden im selben Kontext Stresstestansätze auf der Basis von statistischen Wahrscheinlichkeiten entwickelt und angewendet.

3.2 Anwendungsbeispiel Ostbayerisches Kristallin

Mit dem unter 3.1 beschriebenen Stresstestszenario wurde im Untersuchungsgebiet der Fallstudie Ilz das Modell ArcEGMO-PSCM angetrieben. Bereits für frühere Untersuchungen im Zusammenhang mit dem Projekt „Erhebung und Bewertung der öffentlichen Wasserversorgung“ wurden innerhalb des Modells Kontrollpunkte in den Quellbereichen festgelegt (KLIWA, 2013). Darauf aufbauend konnten nun auch Aussagen über die Entwicklung der Quellschüttungen unter den Rahmenbedingungen des Stresstestszenarios getroffen werden. Im vorliegenden Fall ergibt sich über die betrachteten 30 Jahre die in Abbildung 4 aufgezeigte prozentuale Änderung der sommerlichen Niedrigwasserabflüsse gegenüber dem vieljährigen Mittel der Periode 1951 bis 2010.

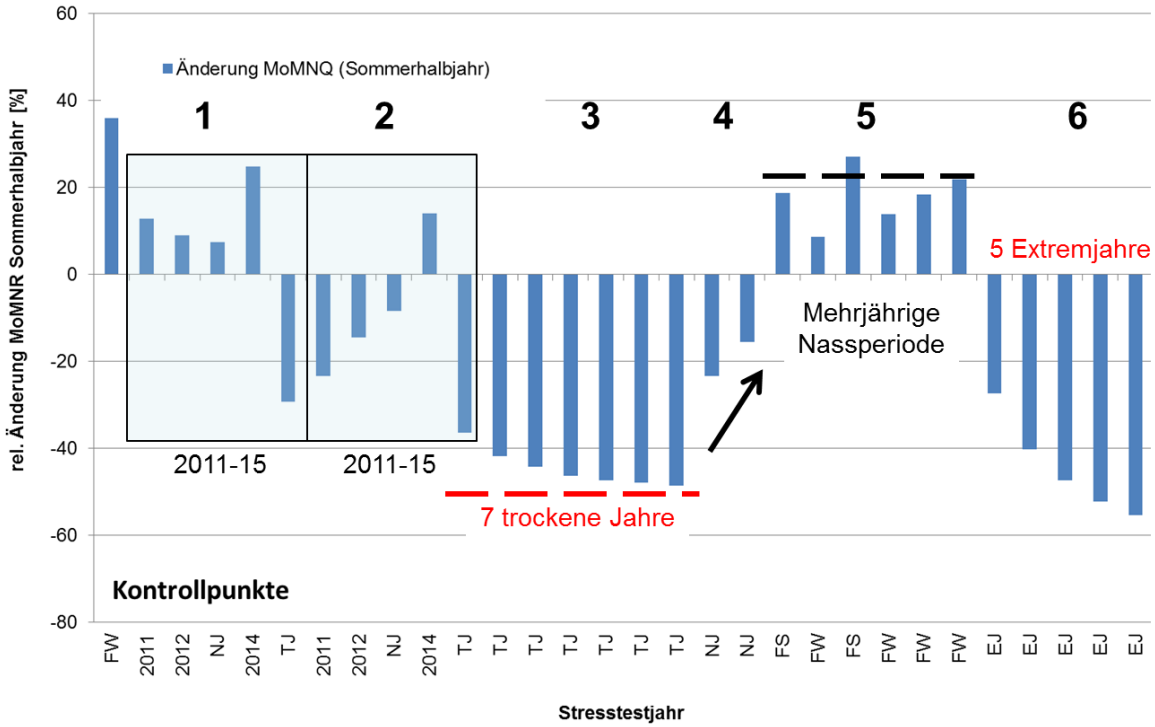


Abbildung 4. Prozentuale Änderung der Quellschüttungen an den Kontrollpunkten im Untersuchungsgebiet (Fallstudie Ilz) als Ergebnis der Stresstestsimulation.

Im zeitlichen Verlauf spiegelt der erste Abschnitt die tatsächliche Entwicklung der Jahre 2011-2015 wider. Ausgehend von überdurchschnittlichen Quellschüttungen im Startjahr zeigt sich ein steter Rückgang, der kurzzeitig nur durch das Jahr 2014 mit einem überdurchschnittlich feuchten Sommerhalbjahr unterbrochen wird. Daran anschließend bewirkt das Trockenjahr 2015 ein erneutes deutliches Absinken bis auf Werte von minus 30 %. Wiederum beginnend mit dem Jahr 2011 sind als Folge des vorangegangenen Defizits nur leicht steigende Schüttungen festzustellen, die hier erst durch das Jahr 2014 wieder in einen leichten Überschuss übergehen. Das Jahr 2015 bewirkt bei dieser im Vergleich zum ersten Zeitabschnitt trockeneren Vorgeschichte bereits ein Absinken auf Werte von nahezu minus 40 %.

Die anschließenden sechs Trockenjahre führen zu einem weiteren deutlichen Rückgang der Quellschüttungen um nochmals minus 10 %. Auffällig ist jedoch auch, dass der Grad der jährlichen Änderungen mit fortschreitender Zeitdauer geringer wird. Es kann daher vermutet werden, dass sich die insgesamt erreichten minus 50 % möglicherweise bereits einem neuen Gleichgewichtszustand für die hier vorgegebenen Bedingungen (Trockenjahr 2015) annähern. Die beiden Normaljahre im Anschluss an die Trockenperiode führen zwar zu einer spürbaren Entspannung der Situation, bewirken jedoch noch keine vollständige Erholung des Grundwasserdargebots. Dafür sind noch zusätzliche Nassjahre im weiteren Verlauf erforderlich. Interessant ist dabei, dass mehrjährige Niederschlags- und Neubildungsüberschüsse hier keine unbegrenzte Überkompensation des vorhergehenden Defizits bewirken können. Vielmehr kann ein Plus von mehr als 25 % gegenüber dem vieljährigen Mittel scheinbar nicht nennenswert überschritten werden. Im Untersuchungsgebiet wirkt sich dabei möglicherweise auch die geringe Ergiebigkeit bzw. das begrenzte Porenvolumen des Untergrundes limitierend aus. Die fünf extremen Trockenjahre am Ende des Stresstestszenarios zeigen dann wieder eine prinzipiell ähnliche Entwicklung wie die mehrmalige Wiederholung des Trockenjahres 2015 (s. o.). Da die Niederschläge bzw. die Grundwasserneubildung in diesem Fall allerdings nochmals niedriger sind, liegt auch der mögliche neue Gleichgewichtszustand erwartungsgemäß ebenfalls auf einem tieferen Niveau (minus 60 %).

4. Zusammenfassung

Die Vulnerabilität von Grundwassersystemen wird grundsätzlich geprägt von den klimatischen Rahmenbedingungen (Niederschlag, Verdunstung) und deren Auswirkungen auf die Grundwasserneubildung, naturräumlichen Voraussetzungen v. a. des Grundwasserleiters (Ergiebigkeit, Speichervermögen) und der jeweiligen Nutzungsbeanspruchung der Ressource z. B. durch die öffentliche Wasserversorgung. Mit Hilfe von Stresstestuntersuchungen auf der Basis einer Mehrfachabfolge extremer hydrologischer Einzeljahre und Halbjahre konnten die Auswirkungen von Extrembedingungen auf das nutzbare Grundwasserdargebot von Quelleinzugsgebieten aufgezeigt werden. Die durchgeführten Stresstestuntersuchungen erfolgten hier mit dem Modell ArcEGMO im Untersuchungsgebiet der Fallstudie Ilz (Bayerischer Wald, Ostbayerisches Kristallin) und zeigen beispielhaft die Reaktion eines gering ergiebigen Grundwasserleiters auf. Für das Modellgebiet konnten bereits nach dem ersten Trockenjahr Rückgänge der Quellschüttungen von bis zu minus 35 % festgestellt werden. Eine mehrjährige Trockenperiode ließ diese Defizite bis auf minus 60 % ansteigen. Entsprechende Klimasignale konnten größenordnungsmäßig auch an Hand aktueller Schüttungsdaten aus dem bayerischen Landesmessnetz Quellen verifiziert werden.

Die aufgezeigten Ergebnisse haben unmittelbare Konsequenzen für die Grundwasserbewirtschaftung vor Ort, da jeder Wasserversorger auf Grund eigener Erfahrungen aus der Vergangenheit (z. B. auf Basis der Trockenjahre 2003, 2015) gut einschätzen kann, ab welchem Schüttungsdefizit die Versorgungssicherheit nicht mehr gewährleistet ist. Ein weiterer Vorteil von Stresstestuntersuchungen ist, dass die zu erwartenden Auswirkungen von mehrjährigen Trockenperioden für die Praxis sehr viel besser greifbar sind, als z. B. die Ergebnisse von Modellrechnungen auf Basis regionaler Klimaprojektionen. Unter Berücksichtigung der Stresstestergebnisse kann dann im Einzelfall entschieden werden, welches Maß an Versorgungssicherheit jeweils erforderlich ist und welche Art von Anpassungsmaßnahmen („zweites Standbein“) bei Bedarf zu ergreifen sind.

5. Literatur

BMU (2002): Hydrologischer Atlas von Deutschland – Ergiebigkeit der Grundwasservorkommen. HAD, Tafel 5.2, Bonn/Berlin.

IPCC (2008): Klimaänderung 2007 – Synthesebericht. 109 S.

KLIWA (2013): Fallstudie Ilz – Auswirkungen des Klimawandels auf den Grundwasserhaushalt und die Wasserversorgung im Bayerischen Wald, KLIWA-Berichte Heft 19, 227-236.

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

KLIWA (2017b): Wasserversorgung und die Entwicklung des Dargebots in gering ergiebigen Grundwasserleitern. In: Klimaveränderung und Konsequenzen für die Wasserwirtschaft, Fachvorträge beim 5. KLIWA-Symposium am 22. und 23.05.2017, KLIWA-Berichte Heft 22.

KLIWA (2018): Niedrigwasser in Süddeutschland. Analysen, Szenarien und Handlungsempfehlungen aus Pilotstudien, KLIWA-Berichte Heft 23. [in Vorbereitung].

Kopp, B., Baumeister, C., Gudera, T., Hergesell, M., Kampf, J., Morhard, A. und Neumann, J. (2018): Entwicklung von Bodenwasserhaushalt und Grundwasserneubildung in Baden-Württemberg, Bayern, Rheinland-Pfalz und Hessen von 1951-2015. – Hydrologie und Wasserbewirtschaftung 01/2018. [Manuskript zum Druck eingereicht].

UBA (2015): Vulnerabilität Deutschlands gegenüber dem Klimawandel. – Climate Change 24/2015. 688 S., Dessau.

Wasserversorgung und die Entwicklung des Dargebots in gering ergiebigen Grundwasserleitern

Dr. Benjamin Kopp, LfU Bayern

1. Einleitung

Die öffentliche Wasserversorgung in Baden-Württemberg, Bayern, Rheinland-Pfalz und Hessen erfolgt durch rund 4 300 Wasserversorgungsunternehmen. Ihre Aufgabe ist es der Bevölkerung Trinkwasser in ausreichender Menge und Qualität zur Verfügung zu stellen. Das gewonnene Trinkwasser stammt überwiegend aus natürlichen Grundwasservorkommen, was eine nachhaltige Nutzung der Ressource Grundwasser erfordert.
Im Hinblick auf die Auswirkungen des Klimawandels ist zu erwarten, dass insbesondere gering ergiebige Grundwasserleiter mit geringem Speichervermögen vulnerabel auf verringerte Grundwasserneubildungsraten reagieren. Hierzu gehören Mittelgebirgsregionen wie das Rheinische Schiefergebirge, der südliche Schwarzwald oder das gesamte ostbayerische Grundgebirge. Ähnliches gilt für Teile des süddeutschen Moränenlandes und der alpinen Festgesteinsbereiche. In allen genannten Regionen stützt sich die öffentliche Trinkwasserversorgung zu einem hohen Anteil auf der Nutzung von Quellwasser. Bereits in den vergangenen beiden 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 (LfU, 2017).
Um Aussagen über die zukünftig zu erwartende Entwicklung der Quellschüttungen treffen zu können, wurden im Rahmen von KLIWA bisher sechs Fallstudien in Bayern zur Untersuchung der regionalen Auswirkungen des Klimawandels durchgeführt. Um zukünftigen Engpässen vorzubeugen, wird lokalen Wasserversorgern ohne redundante Versorgungsstruktur empfohlen, sich ein zweites Standbein aufzubauen. Hierzu gehören beispielweise der Verbund zu benachbarten Anlagen oder voneinander unabhängige Gewinnungsanlagen.

2. Wasserversorgung in Bayern

Die öffentliche Wasserversorgung in Bayern weist eine dezentrale Versorgungsstruktur auf. So betreiben insgesamt 2261 Wasserversorgungsunternehmen 2 976 Gewinnungsanlagen (LfStat, 2013). Auffallend ist eine große Anzahl kleiner Wasserversorgungsunternehmen (ca. 75 %), die in der Summe aber nur einen relativ geringen Anteil (ca. 15 %) des gesamten Wasseraufkommens erbringen.
Die insgesamt gewonnene Wassermenge beträgt ca. 850 Millionen m³/a (LfStat, 2013). Die wichtigste Gewinnungsart bildet hierbei die Nutzung von Grundwasser aus Brunnen (71 %), gefolgt von der Nutzung von Grundwasser aus Quellen (18 %) sowie die Nutzung von Uferfiltrat (8 %) und von Oberflächenwasser (3 %) (Abb. 1).

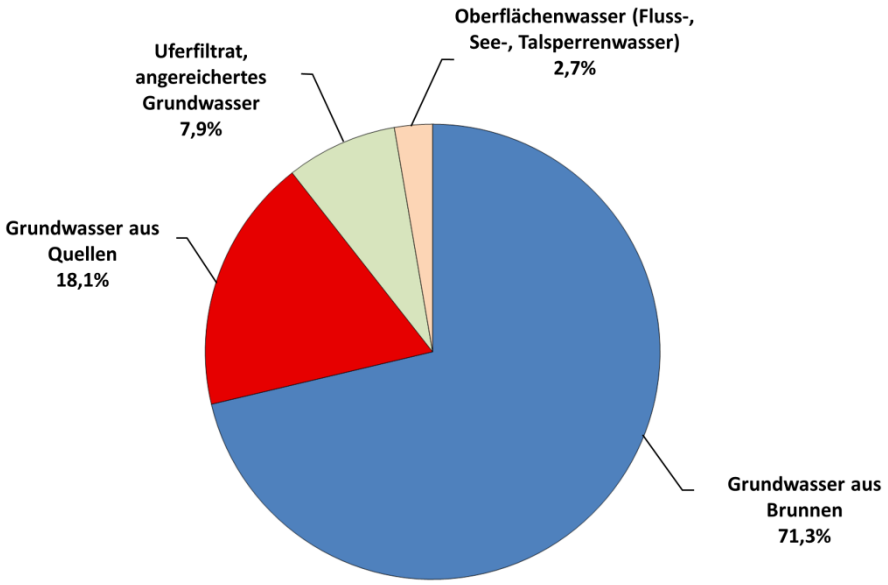


Abbildung 1. Anteil der gewonnenen Wassermenge je Gewinnungsart für die öffentliche Wasserversorgung in Bayern (LfStat, 2013).

3. Identifikation potentiell vulnerabler Gebiete

Weite Teile Bayerns weisen überwiegend ergiebige Grundwasservorkommen auf. In diesen Bereichen befindet sich auch die überwiegende Mehrheit der Brunnenfassungen der öffentlichen Wasserversorgung (Abb. 2). In den übrigen Regionen kann, auf Grund der vorherrschenden hydrogeologischen Eigenschaften mit gering ergiebigen Grundwasservorkommen, kein bzw. nur wenig Wasser aus Brunnenfassungen gewonnen werden. Diese Regionen liegen insbesondere im süddeutschen Moränengürtel, im gesamten ostbayerischen Kristallin sowie in Teilen des fränkischen Schichtstufenlandes. Die lokale Wasserversorgung stützt sich hier zu einem Großteil auf der Nutzung oft nur gering schüttender Quellen (Abb. 2). Diese reagieren besonders sensitiv auf verringerte Grundwasserneubildungsraten und verlängerte sommerliche Trockenperioden als Konsequenz von Änderungen des Klimageschehens. Entsprechend werden die genannten Gebiete als potentiell vulnerabel eingestuft.

Im Rahmen des LfU-Projekts „Erhebung und Bewertung der öffentlichen Wasserversorgung“, als Teil der Bayerischen Klimaanpassungsstrategie, wurde die Versorgungssicherheit aller bayerischen Wasserversorgungsanlagen hinsichtlich eines ausreichenden Wasserdargebotes und einer redundanten Versorgungsstruktur untersucht (WVB Bayern, 2017). Um frühzeitig potentiell gefährdete Wasserversorger zu erkennen, wurde bei der Abschätzung des Wasserbedarfs neben den Ergebnissen der Fallstudien zum künftig zur Verfügung stehenden Dargebot auch die jeweilige demographische Entwicklung berücksichtigt. Für die Bewertung der Versorgungssicherheit spielten genauso wasserwirtschaftliche Vorgaben zur Schützbarkeit und zur Wasserqualität der genutzten Rohwasserressourcen eine Rolle. Für Wasserversorgungsanlagen mit „eingeschränkter“ bzw. „stark eingeschränkter“ Versorgungssicherheit werden die Wasserversorger aus Vorsorgegründen dazu angehalten sich ein zweites oder auch weiteres Standbein zur Sicherstellung der künftigen Trinkwasserversorgung aufzubauen.

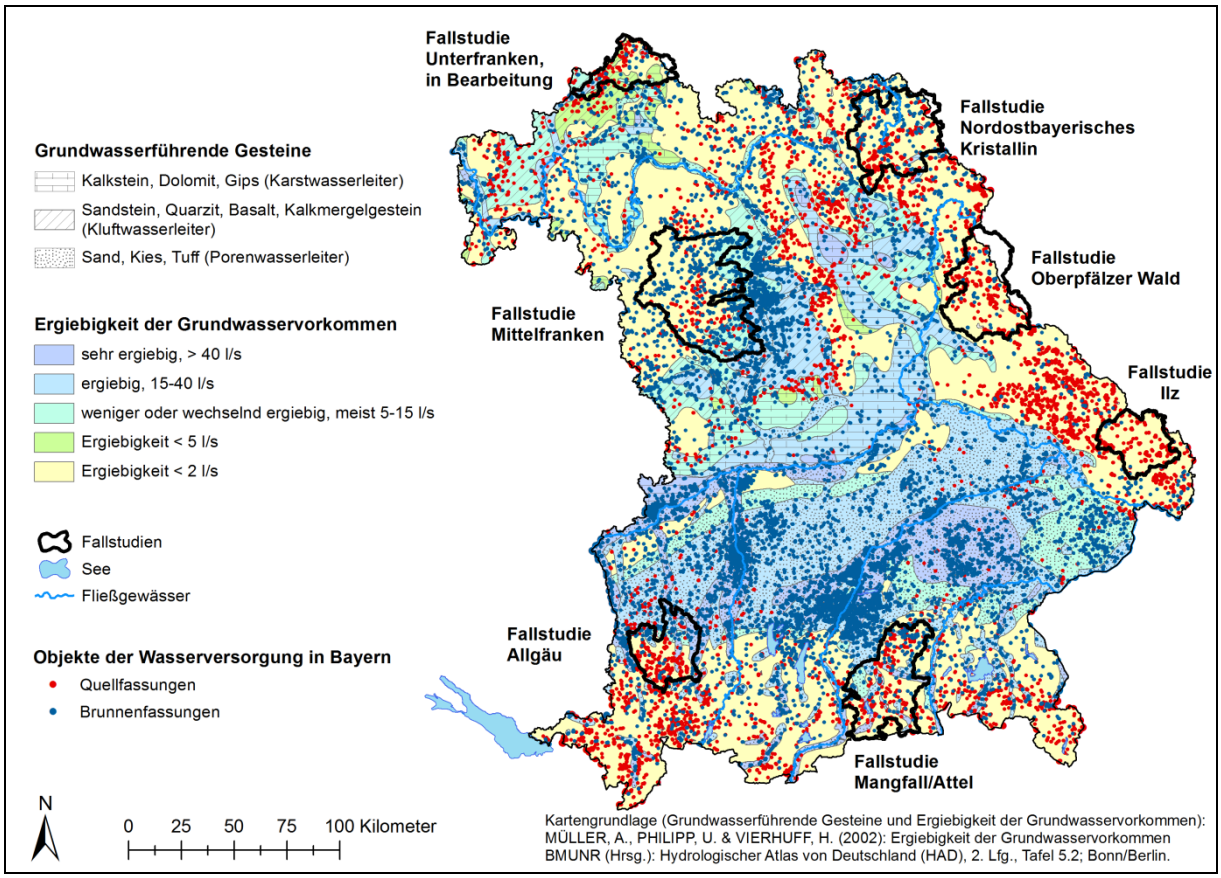


Abbildung 2. Grundwasserführende Gesteine und Ergiebigkeit der Grundwasservorkommen in Bayern (HAD 2002). Brunnenfassungen der öffentlichen Wasserversorgung (blau) sind überwiegend in ergiebigen Bereichen zu finden, während Quellfassungen (rot) in den gering ergiebigen Bereichen dominieren. Diese Regionen werden anhand der KLIWA-Fallstudien genauer untersucht (schwarze Umrandung).

4. Fallstudien zur Untersuchung der Dargebotsentwicklung

Zur näheren Untersuchung der regionalen Auswirkungen des Klimawandels auf den Wasserhaushalt und der Entwicklung von Quellschüttungen wurden für ausgewählte Bereiche in potentiell vulnerablen Gebieten Fallstudien durchgeführt. Die gewonnenen Ergebnisse werden in den Wasserversorgungsbilanzen der einzelnen Regierungsbezirke berücksichtigt (WVB Bayern, 2017). Da die die Wasserversorgungsbilanzen auf Ebene der Regierungsbezirke erstellt werden, erfolgte aus Vorsorgegründen die Übernahme der Fallstudienergebnisse auf alle übrigen geringergiebigen Bereiche des betrachteten Regierungsbezirks.
Bisher wurden sechs Fallstudien in Bayern abschließend bearbeitet (Abb. 2). Die Fallstudie Unterfranken soll bis Ende 2017/Anfang 2018 als siebte Fallstudie abgeschlossen werden. Detaillierte Ergebnisse zur Fallstudie „Ilz“ sind in KLIWA (2013) und LfU (2011) aufgeführt.

4.1 Methodik

Für jede Fallstudie wurde ein Wasserhaushaltsmodell (WHM) in hoher räumlicher Auflösung aufgestellt. Um auch kleinräumige Strukturen abbilden zu können, sollten rasterbasierte WHM eine maximale Rasterweite von 200 m aufweisen und vektorbasierte WHM eine vergleichbare Auflösung besitzen.

Anhand des WHM kann die räumliche und zeitliche Verteilung der Komponenten des Wasserhaushaltes für ein Gebiet berechnet werden. Bisher kamen drei verschiedene Modelle zum Einsatz, welche sich alle als geeignet erwiesen haben:

1. LARSIM (Fallstudie „Allgäu“)
2. ArcEGMO-PSCN (Fallstudien „Ilz“, „Mangfall/Attel“, „Unterfranken“)
3. WaSIM (Fallstudien „Oberpfälzer Wald“, „Mittelfranken“, „Nordostbayerisches Kristallin“)

Der Fokus der Modellaufstellung lag auf den Niedrigwasserabflüssen in den Quellgebieten. Um das Schüttungsverhalten in den Quellgebieten zu ermitteln wurden Ausgabestellen (Kontrollpunkte) im WHM implementiert. Zur Erfassung der Gebietswasserbilanz entspricht das jeweilige Fallstudiengebiet den Einzugsgebieten der betrachteten Fließgewässerpegel. Die Größe der einzelnen Fallstudiengebiete beträgt zwischen 640 km² (Fallstudie Unterfranken) und 2237 km² (Fallstudie Mittelfranken). Die Modellkalibrierung erfolgte anhand des Vergleichs gemessener und modellierter Tagesmittelwerte der Fließgewässerabflüsse unter Berücksichtigung einer plausiblen Wiedergabe des flächenhaften Wasserhaushalts. Hierzu wurde ein mehrjähriger Zeitraum ausgewählt, wobei der Fokus der Kalibrierung auf einer korrekten Wiedergabe der Niedrigwasserabflüsse während der Trockenzeiten lag. Nach erfolgter Validierung anhand eines ebenfalls mehrjährigen Zeitraumes wurden bisher zwei statistische regionale Klimaprojektionen gerechnet: WETTREG2006 und WETTREG2010 (je ECHAM5/A1B).
Die regionale Klimaprojektion WETTREG2006 weist eine geringe Temperaturzunahme am unteren Bereich des zu erwartenden Änderungssignals aus einem Ensemble von 30 SRES A1B Klimaprojektionen auf (Abb. 3a). Gleichzeitig zeigt WETTREG2006 eine mäßige Niederschlagsabnahme im hydrologischen Sommerhalbjahr (Mai bis Oktober) (Abb. 3b). Für das hydrologische Winterhalbjahr (November bis April) werden etwas höhere Niederschläge erwartet. Die Projektion gilt daher als vergleichsweise moderate Klimaprojektion. Hingegen weist WETTREG2010 stärkere Temperaturzunahmen und ganzjährig abnehmende Niederschläge auf (Abb. 3a und 3b), und wird daher als Worst-Case-Szenario betrachtet. Die Projektionen wurden für jedes Fallstudiengebiet auf plausible Wiedergabe der Niederschläge und Temperaturen für den Referenzzeitraum geprüft (Szenarioplausibilität). Die Szenarioplausibilität beschreibt die Abweichung der Niederschläge und Temperaturen zwischen dem Referenzzeitraum auf Basis gemessener Daten, sowie dem Referenzzeitraum auf Basis der Projektionsdaten.

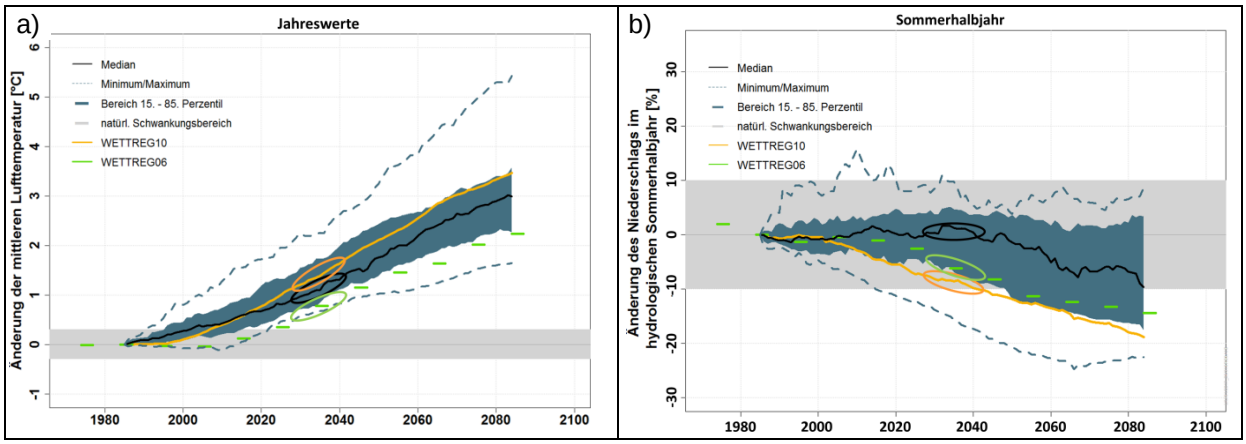


Abbildung 3a und 3b. Änderung der mittleren Jahreslufttemperatur (a) und Änderung des Niederschlags im hydrologischen Sommerhalbjahr (Mai bis Oktober) (b) anhand von 31 regionalen Klimaprojektionen bis 2100 im Vergleich zum Kontrollzeitraum (1971-2000) auf Basis des Emissionsszenarios A1B (30-jähriges gleitendes Mittel). Das graue Band zeigt die natürliche Variabilität im Kontrollzeitraum. Die im Rahmen der Fallstudien verwendeten Projektionen sind farblich markiert (WETTREG2006 (grün) und WETTREG2010 (orange)) (Quelle: LfU, 2017 modifiziert).

Für jede Fallstudie wurden die Veränderungen der wesentlichen Klima- und Wasserhaushaltsgrößen sowie der Abflusskomponenten in der nahen Zukunft (2021-2050) und in der fernen Zukunft (2071-2100) im Vergleich zum Referenzzeitraum (1971-2000) untersucht. Der Fokus lag hierbei auf der Änderung der mittleren monatlichen Quellschüttungen im Jahresverlauf in der nahen Zukunft gegenüber dem Referenzzeitraum.

4.2 Ergebnisse

4.2.1 Wasserhaushalt

Insgesamt zeigen alle Fallstudien ein vergleichbares Muster, wobei WETTREG2006 erwartungsgemäß die geringeren Abnahmen sowohl für die nahe Zukunft (2021-2050) als auch die ferne Zukunft (2071-2100) aufweist. Das Änderungssignal der Projektion WETTREG2006 (Tab. 1) für die ferne Zukunft entspricht in etwa dem Änderungssignal des Worst-Case-Szenarios WETTREG2010 (Tab. 2) in der nahen Zukunft.

Tabelle 1. Gebietsmittelwerte von Temperatur, Niederschlag, Gesamtabfluss und Grundwasserneubildung der einzelnen Fallstudien für den IST-Zeitraum 1971-2000 (Ist), die nahe Zukunft 2021-2050 (nZ) und die ferne Zukunft 2071-2100 (fZ). Ergebnisse der Projektion WETTREG2006.

Fallstudie	Temperatur Ist/nZ/fZ	Niederschlag Ist/nZ/fZ	Gesamtabfluss Ist/nZ/fZ	Grundwasserneubildung Ist/nZ/fZ
Nordostbayerisches Kristallin	6.5/7.2/8.7	856/838/878	367/335/344	142/129/133
Mittelfranken	8.4/9.1/10.6	673/648/643	154/132/133	48/42/41
Oberpfälzer Wald	6.5/7.2/8.6	827/798/803	357/328/321	73/67/63
Ilz/Bayerischer Wald	6.2/6.7/8.0	1059/1040/1048	544/544/533	122/121/112
Allgäu	7.8/8.7/10.2	1090/1076/1029	626/596/514	277/261/221
Mangfall/Attel	7.1/7.9/9.4	1367/1328/1283	779/718/619	300/270/223

Tabelle 2. Gebietsmittelwerte von Temperatur, Niederschlag, Gesamtabfluss und Grundwasserneubildung der einzelnen Fallstudien für den IST-Zeitraum 1971-2000 (Ist), die nahe Zukunft 2021-2050 (nZ) und die ferne Zukunft 2071-2100 (fZ). Ergebnisse der Projektion WETTREG2010.

Fallstudie	Temperatur Ist/nZ/fZ	Niederschlag Ist/nZ/fZ	Gesamtabfluss Ist/nZ/fZ	Grundwasserneubildung Ist/nZ/fZ
Nordostbayerisches Kristallin	6.7/8.1/10.1	866/831/809	355/291/230	137/110/86
Mittelfranken	8.5/9.9/12.1	671/649/608	140/112/81	47/39/29
Oberpfälzer Wald	7.0/8.3/10.3	833/786/746	353/296/275	71/62/55
Ilz/Bayerischer Wald	6.3/7.7/9.8	1136/1088/996	610/536/429	130/101/61
Allgäu	8.1/9.6/11.8	1105/1023/912	645/522/370	292/229/149
Mangfall/Attel	7.1/8.5/10.7	1403/1307/1202	799/633/423	302/226/134

Neben den projizierten Änderungen zwischen den Betrachtungszeiträumen zeigt sich auch eine innerjährliche Verschiebung der meteorologischen Eingangsgrößen, und somit auch der Wasserhaushaltsgrößen. Für den Zeitraum 2021-2050 (nZ) im Vergleich zu 1971-2000 (Ist) weist die Projektion WETTREG2006 überwiegend konstant bleibende Winterniederschläge und geringfügig erhöhte Frühjahrsniederschläge auf. Hingegen ist während der Sommermo-

nate eine deutlich Abnahme, und während der Herbstmonate eine geringe Abnahme der Niederschläge zu erwarten. Gleichzeitig erfolgt ganzjährig eine Zunahme der Lufttemperatur. Diese verringert die Schneeakkumulation und führt zu einer früher auftretenden Schneeschmelze. Zusätzlich resultiert die Temperaturzunahme in höheren Verdunstungsverlusten, sodass sich die Gesamtabflüsse (Niederschlag abzüglich tatsächlicher Verdunstung), trotz teilweise steigender Niederschlagsmengen, insgesamt verringern. Exemplarisch wird in Abbildung 4 die Änderung der Gesamtabflüsse auf Basis von WETTREG2006 für die hydrologischen Halbjahre in der nahen Zukunft für die Fallstudie „Nordostbayerisches Kristallin“ (LfU, 2013) gezeigt.

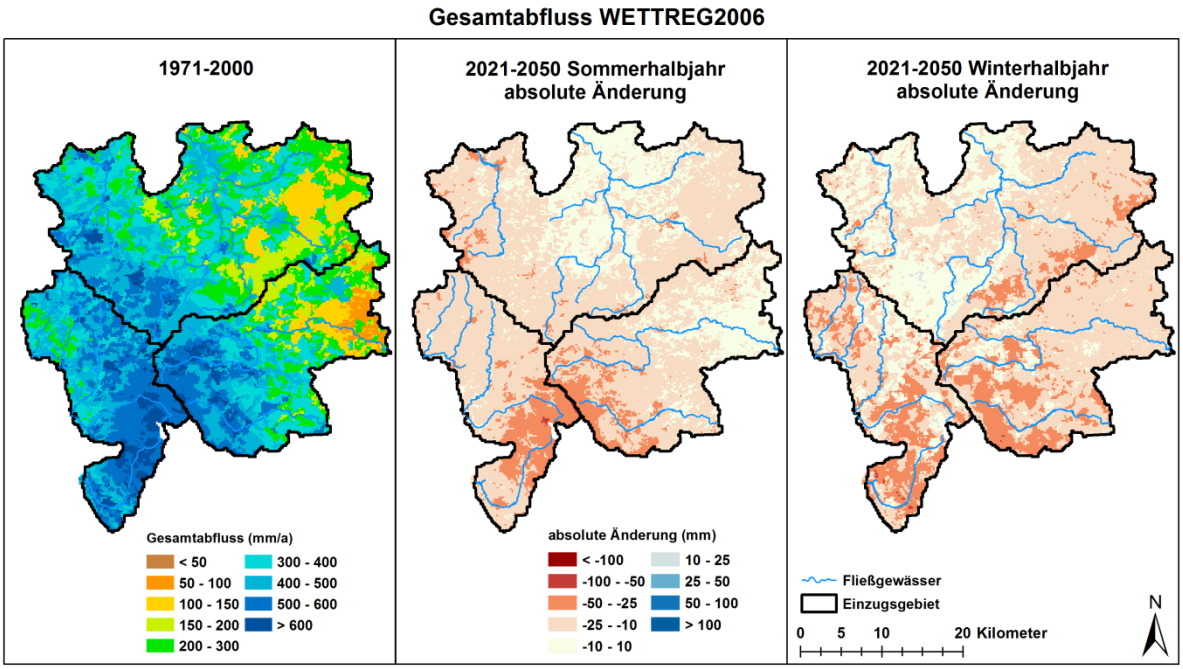


Abbildung 4. Mittlere jährliche projizierte Gesamtabflussmenge der Klimaprojektion WETTREG2006 (ECHAM5, A1B) für den Zeitraum 1971-2000 (links). Dargestellt sind die absoluten Änderungen (mm) der Gesamtabflüsse für das Sommerhalbjahr (Mitte) und das Winterhalbjahr (rechts) jeweils in der nahen Zukunft (2021-2050). Ergebnisse der Fallstudie „Nordostbayerisches Kristallin“ (LfU, 2013).

WETTREG2010 zeigt, je nach räumlicher Lage der Fallstudiengebiete, tendenziell gleichbleibende Niederschläge während der Monate Dezember bis April. In allen Fallstudiengebieten ist hingegen mit einer einheitlichen Verringerung der Niederschläge im verbleibenden Zeitraum Mai bis November zu rechnen. Da gleichzeitig die Temperaturzunahmen stärker ausfallen als bei WETTREG2006, sind die Abnahmen der Gesamtabflüsse ausgeprägter. Entsprechend führt die Kombination aus geringerer Schneeakkumulation, früher auftretender Schneeschmelze, geringeren Niederschlägen und höheren Verdunstungsbedarf zu teils deutlich erhöhten Niedrigwasserabflüssen im Januar und Februar, und einer ebenfalls verschärften und länger anhaltenden Niedrigwasserperiode. Exemplarisch wird in Abbildung 5 die Änderung der Gesamtabflüsse auf Basis von WETTREG2010 für die hydrologischen Halbjahre in der nahen Zukunft für die Fallstudie „Nordostbayerisches Kristallin“ (LfU, 2013) gezeigt.

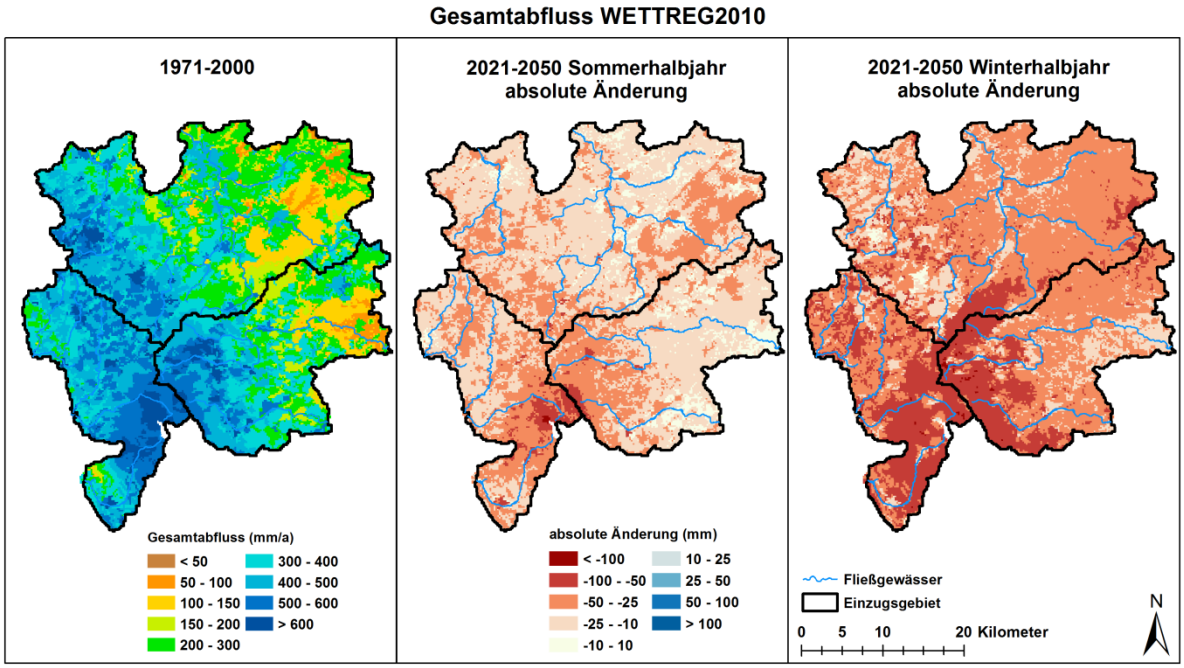


Abbildung 5. Mittlere jährliche projizierte Gesamtabflussmenge der Klimaprojektion WETTREG2010 (ECHAM5, A1B) für den Zeitraum 1971-2000 (links). Dargestellt sind die absoluten Änderungen (mm) der Gesamtabflüsse für das Sommerhalbjahr (Mitte) und das Winterhalbjahr (rechts) jeweils in der nahen Zukunft (2021-2050). Ergebnisse der Fallstudie „Nordostbayerisches Kristallin“ (LfU, 2013).

4.2.2 Niedrigwasserabflüsse und Quellschüttungen

Als Folge der zu erwartenden Änderungen im Jahresverlauf treten bei WETTREG2006 die höchsten monatlichen Abflüsse früher im Jahr auf. Die Niedrigwasserperiode wird durch den steigenden Verdunstungsbedarf auf Grund höherer Temperaturen und verringerten Niederschlägen im hydrologischen Sommerhalbjahr weiter verstärkt. Dies führt zu einer Verlängerung der sommerlichen Niedrigwasserperiode von April bis November. Abbildung 6 zeigt die Änderung der mittleren monatlichen Niedrigwasserabflüsse (MoMNQ) im Jahresverlauf auf Basis von WETTREG2006 in der nahen Zukunft für die Kontrollpunkte der Fallstudie „Oberpfälzer Wald„ (LfU, 2015a). In der fernen Zukunft (2071-2100) wirken sich die beschriebenen Änderungen noch einmal deutlicher aus.

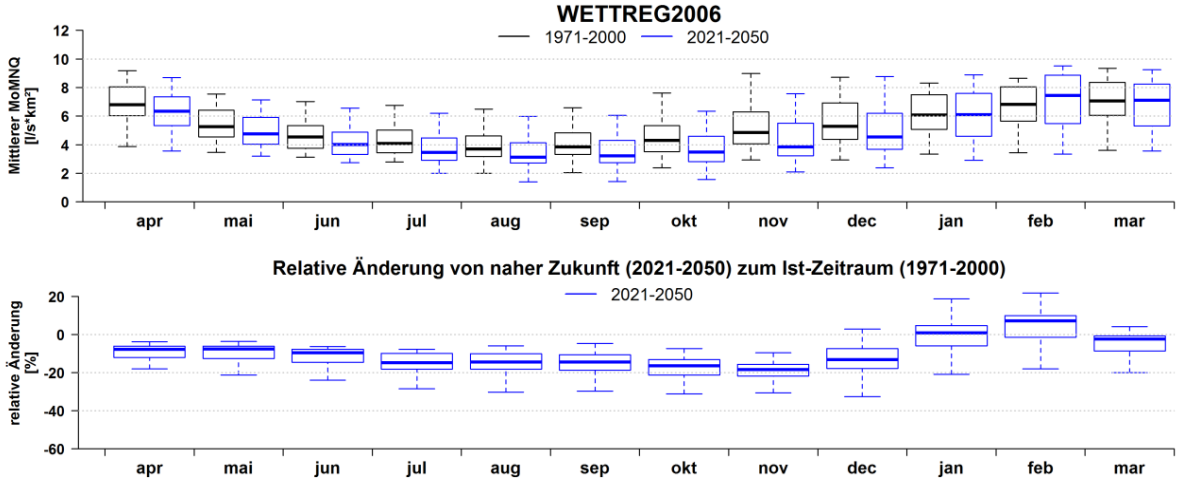


Abbildung 6. Vergleich des mittleren monatlichen Niedrigwasserabflusses (MoMNQ) des IST-Zeitraumes (1971-2000) und der nahen Zukunft (2021-2050) auf Basis von WETTREG2006 über alle betrachteten Quellen im Rahmen der Fallstudie „Oberpfälzer Wald“ (LfU, 2015a) als Absolutwerte (oben) und relative Abweichung (unten).

Während die mittleren monatlichen Niedrigwasserabflüsse (MoMNQ) bei WETTREG2010 von Januar bis Februar überwiegend unverändert bleiben, zeigt sich bereits ab März eine deutliche Abnahme der Niedrigwasserabflüsse. Diese verstärkt sich im weiteren Jahresverlauf und erreicht ein Minimum im Oktober. Gesteuert wird diese Entwicklung durch die sinkenden Niederschlagsmengen im Sommerhalbjahr, ganzjährig steigenden Temperaturen und dem damit einhergehenden höheren Verdunstungsbedarf. Abbildung 7 zeigt die Änderung des MoMNQ im Jahresverlauf auf Basis von WETTREG2010 in der nahen Zukunft für die Kontrollpunkte der Fallstudie „Oberpfälzer Wald“ (LfU, 2015a). In der fernen Zukunft (2071-2100) fallen die beschriebenen Änderungen dann noch einmal deutlicher aus.

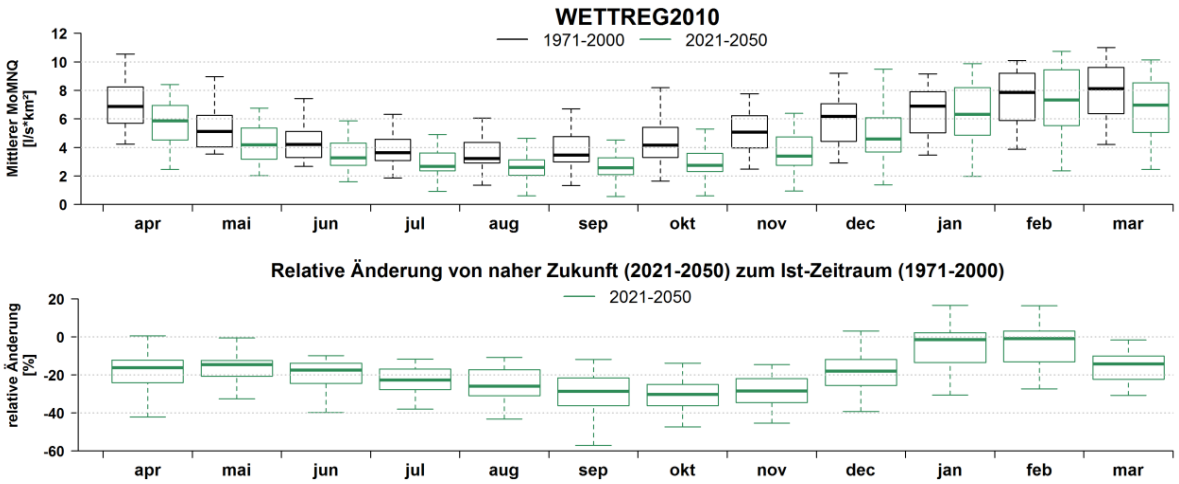


Abbildung 7. Vergleich des mittleren monatlichen Niedrigwasserabflusses (MoMNQ) des IST-Zeitraumes (1971-2000) und der nahen Zukunft (2021-2050) auf Basis von WETTREG2010 über alle betrachteten Quellen im Rahmen der Fallstudie „Oberpfälzer Wald“ (LfU, 2015a) als Absolutwerte (oben) und relative Abweichung (unten).

Für beide betrachteten Projektionen werden im Jahresverlauf die höchsten zu erwartenden Abnahmen für die Monate August bis November projiziert. Gleichzeitig sind während dieser Monate die Bedarfsmengen seitens der Bevölkerung am größten. Je nach den zu Grunde liegenden hydrogeologischen Verhältnissen sowie den zu erwartenden meteorologischen Änderungen in den einzelnen Fallstudiengebieten fallen die mittleren Quellschüttungsänderungen der Monate August bis November unterschiedlich aus (Abb. 8).
Während die Projektion WETTREG2006, nahe Zukunft, eher kleinere Änderungen (-10 bis -21 %) zeigt, steigen die Änderungen der Projektionen WETTREG2006, ferne Zukunft und WETTREG2010, nahe Zukunft auf rund -30 % an. Die größten Änderungen der mittleren Quellschüttung treten erwartungsgemäß in der Projektion WETTREG2010, ferne Zukunft auf und erreichen Werte bis zu -64 %.

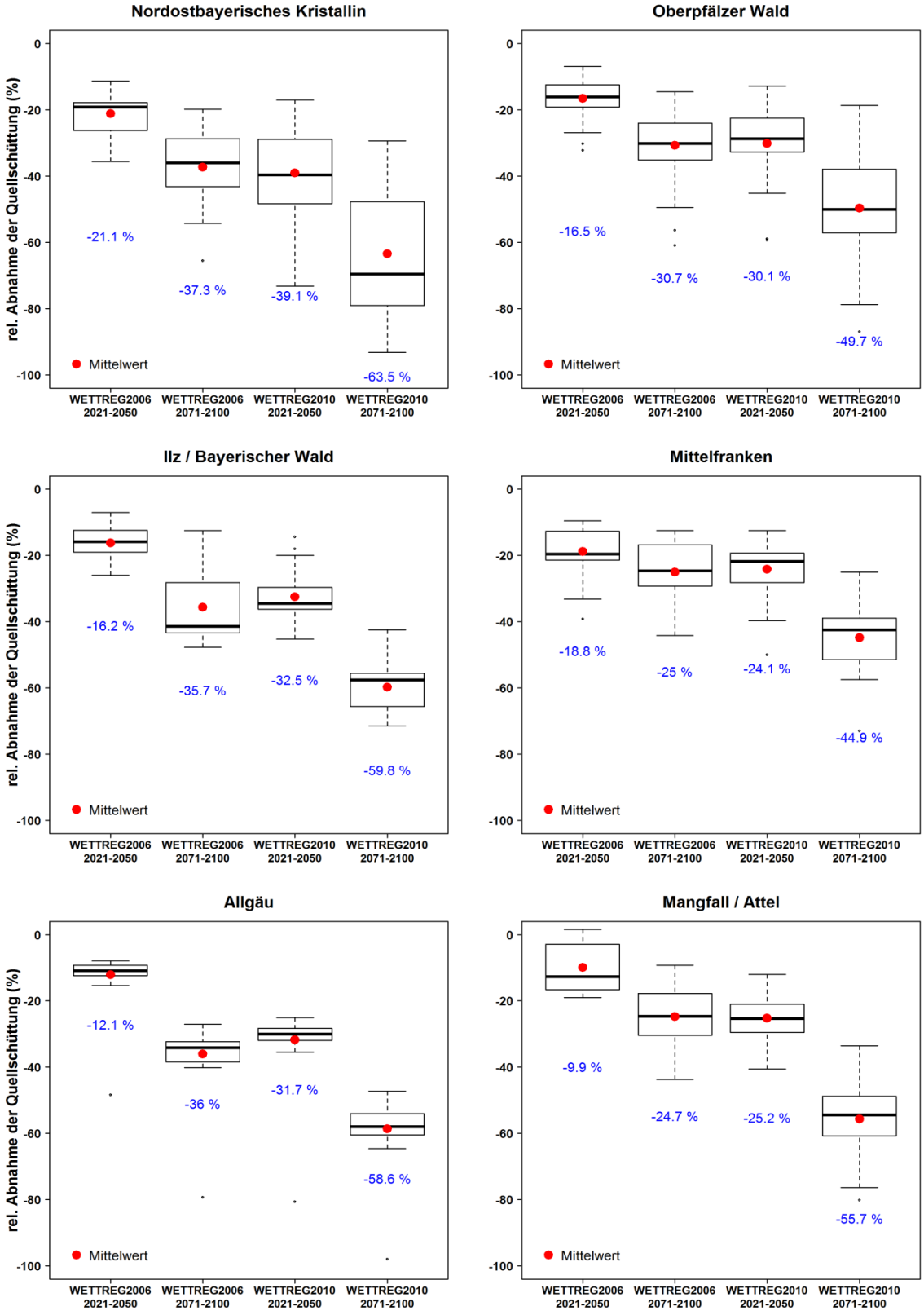


Abbildung 8. Mittlere projizierte Änderung der Quellschüttungen (August bis November) für die nahe (2021-2050) und ferne Zukunft (2071-2100) im Vergleich zum Referenzzeitraum (1971-2000). Ergebnisse der regionalen Klimaprojektionen WETTREG2006 und WETTREG2010 (ECAHM5, A1B) für die bisher abgeschlossenen sechs Fallstudiengebiete.

Entsprechend der klimatischen und hydrogeologischen Differenzierung in den einzelnen Modellgebieten können räumlich unterschiedliche Änderungssignale der Quellschüttungen innerhalb eines Untersuchungsgebietes auftreten. Sofern diese klar erkennbar sind, werden die Untersuchungsgebiete für die Ermittlung der zukünftig zu erwartenden Abnahmen der Quellschüttungen unterteilt.
Eine unterschiedliche Gebietsreaktion hat sich beispielsweise bei der Fallstudie „Mangfall/Attel“ (LfU, 2015b) gezeigt. Während die Quellobjekte südlich der Vorlandmolasse deutlich stärkere Quellschüttungsabnahmen aufweisen, fallen diese in den übrigen Gebieten meist geringer aus (Abb. 9). Eine räumliche Differenzierung der Änderungssignale weisen auch die Fallstudien „Nordostbayerisches Kristallin“ und „Ilz/Bayerischer Wald“ auf (Abb. 10).

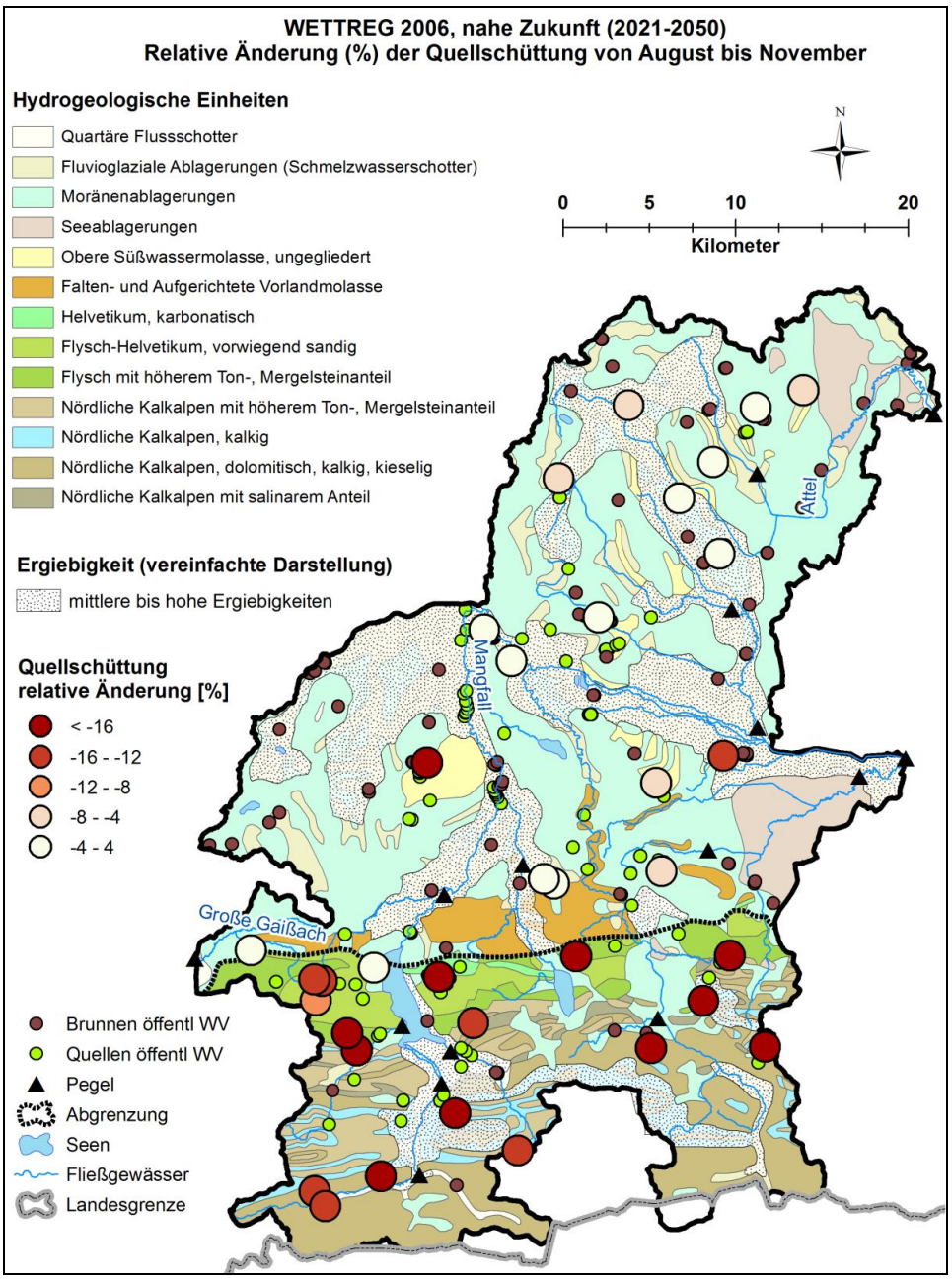


Abbildung 9. Räumliche Abgrenzung (schwarz gestrichelt) der Fallstudie „Mangfall/Attel“ anhand der Grenze von Helvetikum zu Faltenmolasse auf Basis des ermittelten Änderungssignals der sommerlichen Quellschüttungen in der nahen Zukunft (WETTREG2006) (LfU, 2015b).

4.3 Entwicklung von Anpassungsmaßnahmen

Die Fallstudienergebnisse auf Basis der Projektion WETTREG2006, nahe Zukunft (2021-2050), werden als repräsentativ für den jeweiligen Regierungsbezirk betrachtet. Aus Vorsorgegründen werden die Fallstudienergebnisse daher auf alle Bereiche innerhalb des jeweiligen Regierungsbezirkes mit ebenfalls gering ergiebigen Grundwasservorkommen übertragen. Diese Einteilung erfolgte auf Basis einer vereinfachten Darstellung der hydrogeologischen Übersichtskarte von Bayern (HK500, Blatt 2).
Als Ergebnis der Fallstudien ist für Bayern ein Süd-Nord-Gradient zu erkennen, mit insgesamt geringeren zukünftigen Quellschüttungsabnahmen in den südlichen Landesteilen, sowie deutlicheren Abnahmen in den nördlichen Landesteilen (Abb. 10). Ein ähnlicher Gradient zeigt sich auch innerhalb des Naturraumes „Ostbayerisches Kristallin“ mit etwas geringeren Abnahmen im Süden und deutlicheren Abnahmen im Norden.
Die ermittelten Abnahmen der Quellschüttungen gelten ausschließlich für Bereiche mit gering ergiebigen Grundwasservorkommen, wobei die Fallstudie „Mittelfranken“ (LfU, 2015c) eine Sonderstellung einnimmt. Auf Grund der in Mittelfranken vorherrschenden negativen klimatischen Wasserbilanz (Differenz aus Niederschlag (734 mm/a) und potentieller Verdunstung (755 mm/a)), gelten dort die ermittelten Abnahmen der Quellschüttungen unabhängig von der tatsächlichen Ergiebigkeit der Grundwasservorkommen.

Im Rahmen des LfU-Projekts „Erhebung und Bewertung der öffentlichen Wasserversorgung“, als Teil der Bayerischen Klimaanpassungsstrategie, wurde die Versorgungssicherheit aller bayerischen Wasserversorgungsanlagen hinsichtlich eines ausreichenden Wasserdargebotes und einer redundanten Versorgungsstruktur für den Zeitraum bis 2025 untersucht (WVB Bayern, 2017). Das künftig zur Verfügung stehende Dargebot betreffend, flossen hier die Ergebnisse der Fallstudien auf Basis der Projektion WETTREG2006 ein. Entsprechend des abweichenden Zeithorizontes zwischen Wasserversorgungsbilanz (bis 2025) und Fallstudien (2021-2050) werden die Ergebnisse für die nahe Zukunft in den Wasserbilanzen in abgeschwächter Form berücksichtigt. Ferner wurden für die Abschätzung des zukünftigen Wasserbedarfs auch die demographische Entwicklung sowie wasserwirtschaftliche Vorgaben zur Schützbarkeit und zur Wasserqualität der genutzten Rohwasserressourcen berücksichtigt. Für Wasserversorgungsanlagen mit „eingeschränkter“ bzw. „stark eingeschränkter“ Versorgungssicherheit werden die Wasserversorger dazu angehalten, auch unter Berücksichtigung des jeweils ermittelten klimatischen Dargebotsrückganges, sich aus Vorsorgegründen ein zweites oder auch weiteres Standbein zur Sicherstellung einer künftigen Trinkwasserversorgung der Bevölkerung aufzubauen.

Eine umfassende Zusammenstellung aller relevanten Einflussgrößen für die Trinkwasserversorgung jedes Regierungsbezirks kann den „Wasserversorgungsbilanzen“ entnommen werden. Diese wurden von den Bezirksregierungen in Zusammenarbeit mit den Wasserwirtschaftsämtern sowie dem Bayerischen Landesamt für Umwelt erstellt (WVB Bayern, 2017).

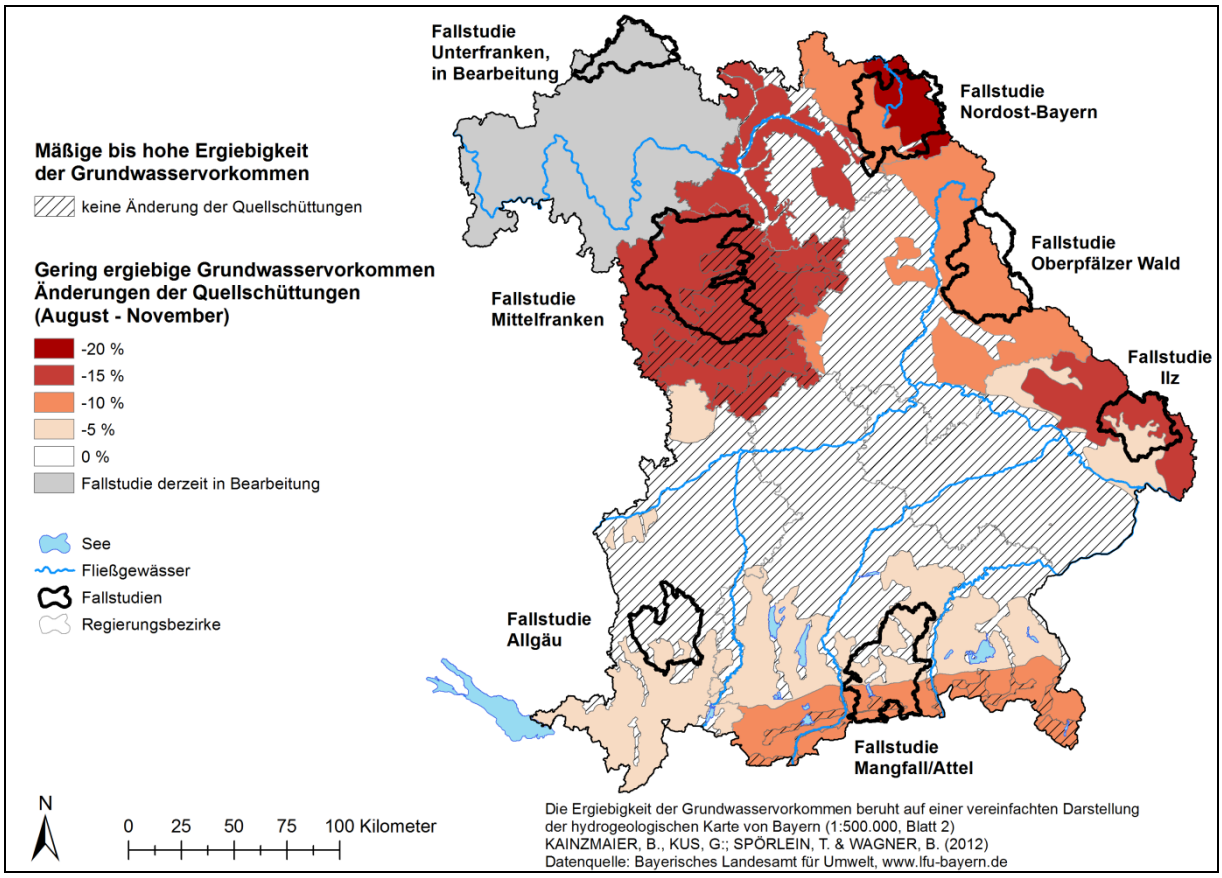


Abbildung 10. Aus Vorsorgegründen ausgesprochene Abnahme der Quellschüttungen bis 2025 zur Berücksichtigung des künftig zur Verfügung stehenden Dargebots als Eingangsgröße für die Bewertung der Wasserversorgungsanlagen im Rahmen der Wasserversorgungsbilanzen der Regierungsbezirke.

5. Zusammenfassung

Im Rahmen von KLIWA werden für den Bereich Grundwasser die zukünftig zu erwartenden Änderungen der Quellschüttungen anhand der statistischen Klimaprojektionen WETTREG2006 und WETTREG2010 (je ECHAM5/A1B) auf Basis von Fallstudien untersucht.
Anhand von räumlich hochaufgelösten Wasserhaushaltsmodellen wurden für das Bundesland Bayern bisher sechs Fallstudien für Regionen mit überwiegend gering ergiebigen Grundwasservorkommen gerechnet. Die öffentliche Wasserversorgung stützt sich in den ausgewählten Gebieten überwiegend auf der Nutzung von Quellwasser. In einigen Gebieten kam es während der beiden Trockenjahre 2003 und 2015 bereits vereinzelt zu Engpässen bei der Wasserversorgung. Als Ergebnis der Fallstudien ist für Bayern ein Süd-Nord-Gradient zu erkennen, mit insgesamt geringeren Quellschüttungsabnahmen in den südlichen Landesteilen, sowie deutlicheren Abnahmen in den nördlichen Landesteilen.
Um sich auf die zukünftig zu erwartenden Änderungen des Klimageschehens frühzeitig einstellen zu können, werden die ermittelten Änderungen der Quellschüttungen in den für die einzelnen Regierungsbezirke erhobenen Wasserversorgungsbilanzen, im Rahmen des Projekts „Erhebung und Bewertung der öffentlichen Wasserversorgung in Bayern“, berücksichtigt. Als Ergebnis werden die Wasserversorger mit Wasserversorgungsanlagen „eingeschränkter“ bzw. „stark eingeschränkter“ Versorgungssicherheit dazu angehalten, unter Berücksichtigung des jeweils ermittelten klimatischen Dargebotsrückganges, sich aus Vorsor-

gegründen ein zweites oder auch weiteres Standbein zur Sicherstellung einer künftigen Trinkwasserversorgung der Bevölkerung aufzubauen.

6. Literatur

HAD (2002): Hydrologischer Atlas von Deutschland - Ergiebigkeit der Grundwasservorkommen, Hrsg.: BMUNR, 2. Lfg., Tafel 5.2, Bonn/Berlin.

HK500 (2012): Hydrogeologische Karte von Bayern 1:500.000, Blatt 2, Klassifikation der hydrogeologischen Einheiten, Bayerisches Landesamt für Umwelt.

KLIWA (2013): Fallstudie Ilz – Auswirkungen des Klimawandels auf den Grundwasserhaushalt und die Wasserversorgung im Bayerischen Wald, KLIWA-Berichte Heft 19, Bayerisches Landesamt für Umwelt, S. pp. 227-236.

LfStat (2013): Öffentliche Wasserversorgung und Abwasserbeseitigung 2013, Bayerisches Landesamt für Statistik, https://www.statistik.bayern.de/statistik/umwelt/.

LfU (2011): KLIWA-Fallstudie Ilz/Bayerischer Wald, Bayerisches Landesamt für Umwelt.

LfU (2013): KLIWA-Fallstudie Nordostbayerisches Kristallin, Bayerisches Landesamt für Umwelt.

LfU (2015a): KLIWA-Fallstudie Oberpfälzer Wald, Bayerisches Landesamt für Umwelt.

LfU (2015b): KLIWA-Fallstudie Mangfall/Attel, Bayerisches Landesamt für Umwelt.

LfU (2015c): KLIWA-Fallstudie Mittelfranken, Bayerisches Landesamt für Umwelt.

LfU (2017): Niedrigwasser in Bayern – Grundlagen, Veränderung und Auswirkungen, Hrsg.: Bayerisches Landesamt für Umwelt (LfU), S. 240;

http://nid.bayern.de/files/docs/niedrigwasserbericht.pdf.

WVB Bayern (2017): Wasserversorgungsbilanzen der Regierungsbezirke Unterfranken, Mittelfranken, Oberfranken, Oberpfalz, Schwaben, Niederbayern, Oberbayern. (Download: https://www.lfu.bayern.de/wasser/trinkwasserversorgung_oeffentlich/projekte/index.htm).

Klimawandel in den Niederlanden – Hydrologische Auswirkungen und Anpassungsstrategien

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

1. Einleitung

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.
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. Im Jahr 2014 hat das KNMI 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 gemeinsam die Eckpunkte, innerhalb derer sich der Klimawandel in den Niederlanden wahrscheinlich vollziehen wird.
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. Beim Entwurf von Hochwasserschutzanlagen werden im Einklang mit der neuen Normierung die Folgen des Klimawandels berücksichtigt. Die Methode zur Ermittlung dieser Extremabflüsse besteht aus einem stochastischen Wettergenerator in Verbindung mit hydrologischer und hydraulischer Modellierung. 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 wurde eine Zunahme der extremen Hochwasser berechnet.

2. Delta-Programm in den Niederlanden

Das Delta-Programm umfasst Strategien zum Schutz der Niederlande vor Hochwasser und zur Gewährleistung der Wasserversorgung unter Berücksichtigung des Klimawandels. Im Rahmen des Delta-Programms arbeiten verschiedene Behörden und andere Organisationen zusammen. Die Pläne kommen unter der Leitung des Regierungskommissars für das Delta-Programm zustande. Sie zielen auf eine Gestaltung des Hochwasserschutzes, der Wasserversorgung und der Raumordnung im Jahr 2050 ab, die mit der Klimaänderung und den Auswirkungen auf den Wasserhaushalt Rechnung trägt, sodass die Niederlande flexibel auf die größeren Klimaextreme reagieren können.

Eine zentrale Rolle in dem Ansatz des Delta-Programms spielt das adaptive Delta-Management: Die Aufgaben der Wasserwirtschaft infolge des vermehrten Niederschlags, des steigenden Meeresspiegels und der höheren Abflüsse von Wasserläufen werden vorausschauend berücksichtigt. Damit soll erreicht werden, dass die jeweils erforderlichen Maßnahmen rechtzeitig ergriffen werden können und/oder einfach angepasst werden können, wenn sich die Erkenntnisse über das Tempo des Meeresspiegelanstiegs oder der Veränderungen an Niederschlag und Abfluss ändern. Beispielsweise, indem die Flüsse mehr Raum erhalten oder die Küste durch Sandaufspülungen geschützt wird.
Im Rahmen des Delta-Programms wurde untersucht, welche Lösungen für den Hochwasserschutz, die Sicherstellung der Wasserversorgung und eine gute Raumordnung in den Niederlanden kurz- und langfristig erforderlich sind. Es ist schwierig und zudem nicht wünschenswert, Maßnahmen schon jetzt für die nächsten fünfzig bis hundert Jahre vollständig festzulegen. Andererseits ist eine gute Vorbereitung wichtig. Die Umsetzung von Maßnahmen im Bereich des Hochwasserschutzes dauert mehrere Jahrzehnte, wie die Durchführung des Aktionsplans Hochwasser für den Rhein (IKSR, 2012) zeigt. Zudem sollte gewährleistet sein, dass die Lösungen zu dem Zeitpunkt, da sie benötigt werden, noch durchgeführt werden können.

3. Neue Hochwasserschutznormen

Ein wichtiges Ergebnis des Delta-Programms ist die Delta-Entscheidung zum Hochwasserschutz. Im Jahr 2017 sind neue Normen für die primären Hochwasserschutzanlagen in Kraft getreten. Dabei werden sowohl die Wahrscheinlichkeit einer Überflutung als auch ihre Folgen berücksichtigt. Außerdem werden neue Anforderungen an die Hochwasserschutzanlagen gestellt. Die Wahrscheinlichkeit, durch eine Überflutung ums Leben zu kommen, wird damit nirgendwo größer als 1:100.000 pro Jahr sein. An verschiedenen Stellen wird ein höherer Schutzgrad gelten: dort, wo es zu vielen Opfern oder großen wirtschaftlichen Schäden kommen kann oder wo „vitale Infrastruktur" mit großen Folgen für die gesamten Niederlande ausfallen kann. Ziel ist es, dass alle primären Hochwasserschutzanlagen im Jahr 2050 die neue Norm erfüllen. Dabei wurden mögliche Effekte des Klimawandels, aber auch das Wirtschaftswachstum berücksichtigt (Van Alphen, 2016).
Im Gegensatz zur bisher gültigen „Überschreitungsnorm", bei der das Überschreiten eines einzigen Bemessungsabflusses bzw. -wasserstandes maßgebend war für die Dimensionierung von Hochwasserschutzanlagen, handelt es sich bei der seit Januar 2017 geltenden neuen Hochwasserschutznorm um eine „Überflutungsnorm". In dieser „Überflutungsnorm" wird nicht nur die Versagenswahrscheinlich von Hochwasserschutzanlagen durch Überströmen der Anlage berücksichtigt, sondern auch Versagenswahrscheinlichkeiten anderer Mechanismen so wie Piping, Makrostabilität und Qualität der Deichabdeckung. Hierbei findet eine größere Bandbreite von Wasserständen Berücksichtigung. Zahlenmäßig ist die neue Norm im nicht tidebeeinflussten Gebiet von Rhein und Maas höher als die alte Norm Beide Normtypen sind jedoch zahlenmäßig nicht miteinander vergleichbar. Die Grundbegriffe dieser neuen Normierung wurden durch das *Expertisenetwerk Waterveiligheid* (Expertennetzwerk für den Hochwasserschutz, ENW) dargelegt (ENW, 2017).

4. Klimaszenarien für die Niederlande

In der niederländischen Wasserwirtschaft werden bereits seit geraumer Zeit die Folgen des Klimawandels berücksichtigt. Die Grundlage hierfür bilden die vom Koninklijk Nederlands Meteorologisch Instituut (KNMI) für die Niederlande erstellten Klima-Szenarien. Diese Klima-Szenarien in Verbindung mit sozioökonomischen Szenarien bilden die Grundlage für die Analysen, die im Rahmen des Delta-Programms durchgeführt wurden, und damit auch für die Maßnahmen. In den KNMI-Szenarien werden für die Niederlande künftig höhere Tempe-

raturen, ein rascher steigender Meeresspiegel, niederschlagsreichere Winter, eine Zunahme an Starkregenereignissen und eine höhere Wahrscheinlichkeit von trockeneren Sommern berücksichtigt.

Im Jahr 2014 hat das KNMI vier 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 gemeinsam 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 G" und „warm W") und die mögliche Veränderung des Luftströmungsmusters („niedriger Wert L" und „hoher Wert H") (Abbildung 1).

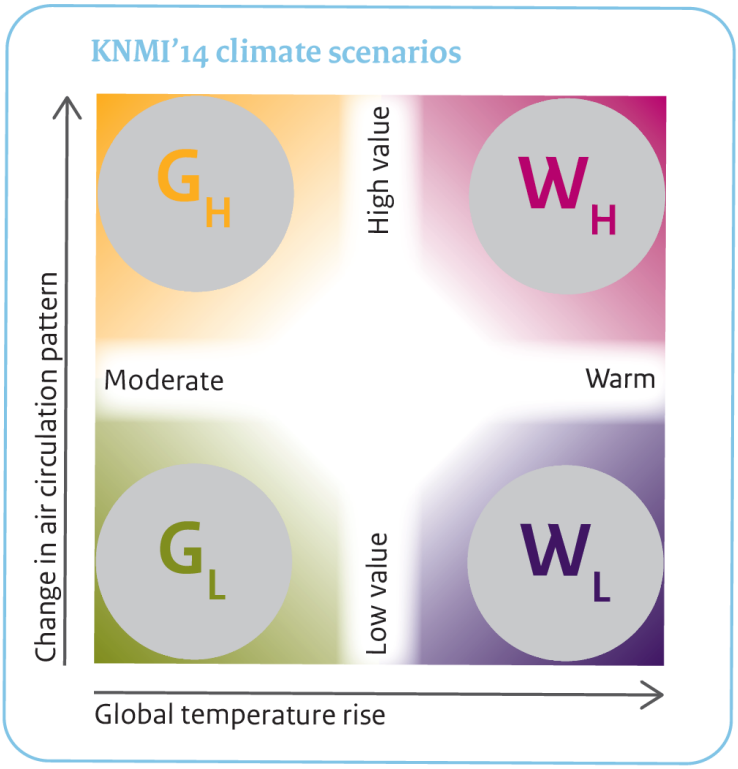


Abbildung 1. KNMI'14 Klima-Szenarien. Die vier KNMI'14-Szenarien unterscheiden sich in Bezug auf das Ausmaß, in dem die weltweite Temperatur steigt („gemäßigt G" und „warm W") und die mögliche Veränderung des Luftströmungsmusters („niedriger Wert L" und „hoher Wert H") (KNMI 2015).

5. Klimaszenarien für die Einzugsgebiete von Rhein und Maas

Für die Niederlande und Europa richten sich die Folgen nach den Veränderungen der weltweiten Durchschnittstemperatur und möglichen Veränderungen der Luftzirkulation. Die Folgen dieser Entwicklungen für die Einzugsgebiete von Maas und Rhein sind anders als die Folgen für das niederländische Hoheitsgebiet. Deswegen wurden für diese Einzugsgebiete entsprechende Szenarien erstellt. Dabei war es notwendig ein zusätzliches Szenario zur Darstellung der Wahrscheinlichkeit extremer Dürre für die Einzugsgebiete von Rhein und Maas zu erstellen (Lenderink und Beersma, 2015). Gemeinsam vermitteln diese Klima-Szenarien ein gutes Bild von der Bandbreite möglicher künftiger Veränderungen von Niederschlag und Temperatur.

Die KNMI-Szenarien sind mit Emissionsszenarien von Treibhausgasen verbunden. Von den vier vom IPCC differenzierten Emissionsszenarien (RCP 2.6, RCP 4.5, RCP 6.0 und RCP 8.5) wird das niedrige Szenario RCP 2.6 nicht verwendet, da es von einer unrealistisch hohen Emissionsreduzierung ausgeht. Die Bandbreite der übrigen IPCC-Szenarien wird mit den fünf neuen Szenarien größtenteils abgedeckt. In Szenario G (gemäßigt) steigt die weltweite Temperatur bis 2050 um 1 °C und bis 2085 um 1,5 °C. In Szenario W (warm) beträgt der Temperaturanstieg weltweit 2 °C beziehungsweise 3,5 °C. Innerhalb der Szenarien G und W wurde daraufhin zwischen einer kaum veränderten Luftströmung über den Niederlanden im Laufe der Jahreszeiten (L) und einer Luftströmung mit mehr Hochdruck über Westeuropa im Sommer (H) und häufiger auftretenden Tiefdruckgebieten mit viel Westwind im Winter unterschieden. In dem fünften, trockenen Szenario treten auch umfangreiche Dürren auf dem Kontinent im Sommer auf. Dieses Szenario wird als „W_H-dry“ bezeichnet.

Die KNMI’14-Szenarien für die Niederlande beruhen auf einer Kombination von EC-Earth-RACMO2-Klimamodellsimulationen. RACMO2 ist ein hochauflösendes regionales Klimamodell, das zur Übertragung der Ergebnisse globaler Klimamodelle auf kleinere Gebiete, wie etwa die Niederlande und das Rhein-Maas-Einzugsgebiet, genutzt wird. Die Konstruktion der vier KNMI’14-Szenarien wird in Lenderink et al. (2014) beschrieben. Das gleiche Verfahren wurde auch für die Erstellung entsprechender Szenarien im Einzugsgebiet von Rhein und Maas genutzt.

Für die Berechnung der Rhein-Abflüsse wurde das Niederschlagsabflussmodell HBV eingesetzt. Für die Erfassung der Auswirkungen des Klimawandels auf den Abfluss stehen unterschiedliche Methoden zur Verfügung. Das ist möglich, indem die Ausgabedaten des regionalen Klimamodells unmittelbar als Eingabedaten für das hydrologische Modell verwendet werden. Im Allgemeinen ist eine so genannte Bias-Korrektur erforderlich um die Referenzperiode korrekt zu beschreiben. Diese Korrektur wird dann auch für die Prognoseperiode verwendet (Sperna Weiland et al., 2015, 2016). Das KNMI hat zu diesem Zweck eine „Advanced Delta Change”-Methode (ADC) (Van Pelt et al., 2012) erstellt. Im Gegensatz zu der Standard-Delta-Methode ist es mit der ADC-Methode möglich, dass Veränderungen bei den Extremen von den durchschnittlichen Veränderungen abweichen.

6. Grade-Methode

Mit Einführung einer neuen Norm für den Hochwasserschutz für die primären Hochwasserschutzanlagen, u. a. an Rhein, Maas und an der Küste in den Niederlanden, hat sich sowohl die Methode als auch die in der Norm verwendete Höhe geändert. Vor dem Jahr 2017 wurde für die Flussgebiete von einer jährlichen Überschreitungswahrscheinlichkeit maßgebender Abflüsse bzw. Wasserstände von 1:1 250 ausgegangen. Die neue Norm wird unter Berücksichtigung der Deichstärke in einer Überflutungswahrscheinlichkeit ausgedrückt. Die Überflutungswahrscheinlichkeit im Flussgebiet liegt bei mindestens 1:10 000 pro Jahr. Zur Berechnung dieser Überflutungswahrscheinlichkeit müssen auch Abflüsse mit einer noch höheren Jährlichkeit bereitgestellt werden. Bereits bei einer Norm von 1:1 000 ist es schwierig, mit Extremwertverteilungen eine zuverlässige Aussage über die Abflüsse bei diesen Wiederholungszeiten zu treffen, während nur eine Zeitreihe von circa 100 Jahren zur Verfügung steht. Für noch höhere Wiederholungszeiten ist das selbstverständlich noch schwieriger. Deswegen wurde mit dem Übergang zu den neuen Normen auch zu einer anderen Methode für die Ermittlung der Abflüsse bei extremen Wiederholungszeiten übergegangen. Die Grundlage dieser Methode ist ein stochastischer Niederschlagsgenerator, der lange Temperatur- und Niederschlagsreihen erzeugt. Die gesamte Methode zur Berechnung langer Abflussreihen auf dieser Grundlage wird GRADE (Generator of Rainfall And Discharge Extremes) genannt (Hegnauer et al., 2014). GRADE besteht aus drei Komponenten:

Komponente 1: Stochastischer Wettergenerator

Der stochastische Wettergenerator für das Rhein- und Maas-Einzugsgebiet beruht auf dem Prinzip „Nearest Neighbour Resampling" und erzeugt sehr lange Niederschlags- und Temperaturzeitreihen an Tageswerten mit einer Länge von 50.000 Jahren. Die statistischen Eigenschaften dieser neuen Zeitreihen entsprechen den statistischen Eigenschaften der kürzeren Zeitreihen mit historischen Daten, die als Grundlage für den Wettergenerator verwendet werden. Nearest Neighbour Resampling wurde ursprünglich von Young (1994) vorgestellt. Lall und Sharma (1996) nutzten ein Nearest-Neighbour-Bootstrap-Verfahren zur Generierung hydrologischer Zeitreihen. Rajagopalan und Lall (1999) präsentierten eine Anwendung für täglichen Niederschlag und fünf andere meteorologische Variablen. Der Wettergenerator in GRADE nutzt im Prinzip die gleiche Methode (Buishand und Brandsma, 2001).

Komponente 2: Niederschlagabflussmodell

Mit dem HBV-Niederschlagsabflussmodell wird der Abfluss mit den synthetischen Niederschlags- und Temperaturreihen als Eingabewerte berechnet. HBV ist ein konzeptionelles hydrologisches Modell und weit verbreitet. In den Niederlanden wird es insbesondere für die Erstellung der Abflussprognosen von Rhein und Maas verwendet.

Komponente 3: Routing und hydrodynamisches Modell

HBV berechnet den Abfluss in Teileinzugsgebieten, der anschließend über das interne Routing von HBV zum Rhein bzw. zur Maas abgeführt wird. Für die Berechnung des Rheinabflusses ab Maxau wird das hydrodynamische 1D-Modell SOBEK verwendet. Von diesem Modell stehen zwei Versionen zur Verfügung. Eine Version, bei der das Wasser immer zwischen den Deichen bleibt und keine Überflutungen stattfinden und eine zweite Version, die Überflutungen der durch Hochwasserschutzanlagen geschützten Bereiche berücksichtigt. Hydrodynamische 2D-Berechnungen bilden die Grundlage für die Berücksichtigung dieser Überflutungen (Lammersen et al, 2002).

Ein wichtiger Vorteil dieser neuen Methode besteht darin, dass hydraulische Effekte berücksichtigt werden können. In diesem Fall handelt es sich unter anderem um Überflutungen, die bei Extremabflüssen auftreten und die eine Dämpfung der Extremabflüsse zur Folge haben. In Abbildung 2 wird dieser Effekt dargestellt. Die blaue Linie stellt die Verteilung der Hochwasserabflüsse ohne Berücksichtigung von Überflutungen dar. Sie stellen im logarithmischen Maßstab einen mehr oder weniger linearen Verlauf dar. Die grüne Linie stellt das Ergebnis der hydraulischen Berechnung mit Überflutung dar. Diese Linie liegt im Extrembereich deutlich niedriger. In der niederländischen Hochwasserschutzpolitik wird seit der Einführung der neuen Normen von der Extremwertverteilung unter Berücksichtigung von Überflutungen am Oberlauf ausgegangen.

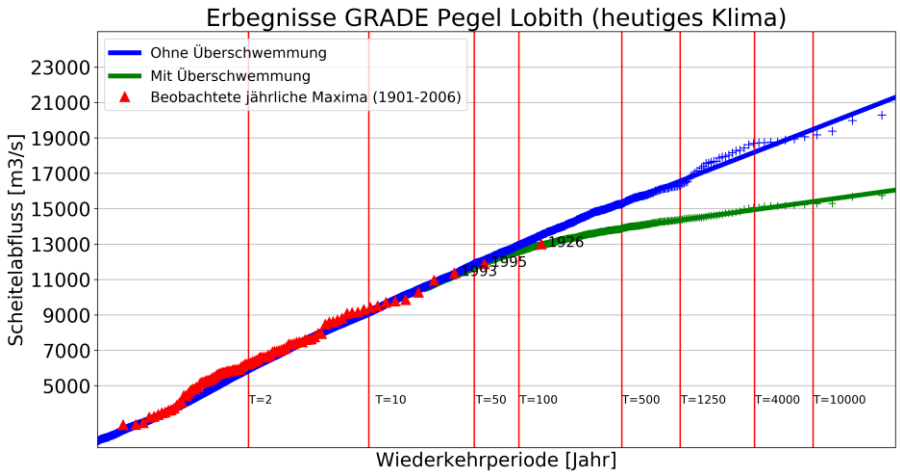


Abbildung 2. Ergebnisse der Grade-Berechnungen für den Rhein, Messstelle Lobith. Der Scheitelabfluss als Funktion der Wiederholungszeit, ohne Klimaänderung (Hegnauer et al., 2014).

7. Ergebnisse

Die Abflüsse für die KNMI'14-Klimaszenarien wurden mit Hilfe der Modelle in GRADE berechnet (Sperna Weiland et al., 2015). Abbildung 3 zeigt die Monatsmittel der Abflüsse bei Lobith als Bandbreite aller KNMI'14 Szenarien für 2050 und 2085. In Bezug auf die Monatsmittelwerte sind im Allgemeinen höhere Abflüsse im Winter und niedrigere Abflüsse im Sommer zu erkennen. Es findet eine Verschiebung der niedrigsten mittleren Abflüsse von September nach Juli/August statt. Das gegenwärtige monatsdurchschnittliche Abflussmuster des Rheins bei Lobith weist lediglich eine geringe Differenz zwischen den einzelnen Monaten auf. Infolge des Klimawandels wird sich die Abflussdifferenz (Amplitude) zwischen Sommer und Winter erhöhen.

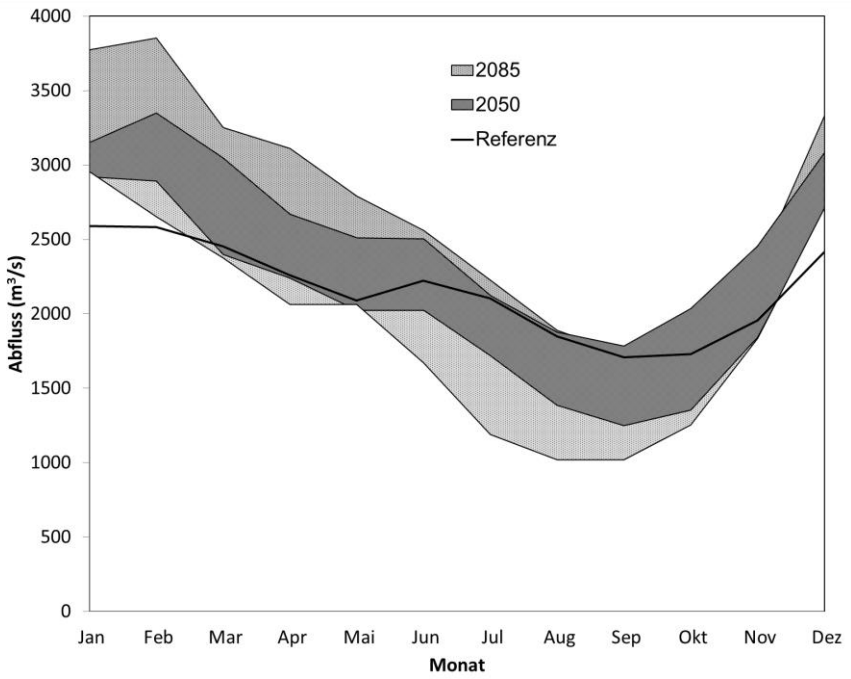


Abbildung 3. Monatsdurchschnittlicher Abfluss bei Lobith. Bandbreite der KNMI'14-Szenarien für 2050 und 2085 im Vergleich zum aktuellen monatsdurchschnittlichen Abfluss.

In Tabelle 1 sind die Ergebnisse der wichtigsten Abflussparameter als Bandbreite aller KNMI'14-Szenarien zusammengefasst und den entsprechenden Ergebnissen der IKSR (2011) gegenübergestellt.

Tabelle 1. Relative Veränderung von Niederschlag und Abflusscharakteristiken für die Messstation Lobith auf der Grundlage von KNMI'14-Klimaszenarien für die Zeithorizonte 2050 und 2085 gegenüber dem aktuellen Klima (Sperna Weiland et al., 2015). Dargestellt wird die Bandbreite der relativen Veränderung mit Hilfe des Mindestwerts (niedrig) und des Höchstwerts (hoch). Bei den HQ-Werten ist die Wirkung von Überflutungen auf die Hochwasserscheitel berücksichtigt. IKSR 2050 ist basiert auf den IKSR-Bericht 188 (IKSR, 2011) und berücksichtigt keine Überflutungen.

	KNMI'14 2050		IKSR 2050		KNMI'14 2085	
	niedrig	hoch	niedrig	hoch	niedrig	hoch
Niederschlag (%)						
Sommer	-15	0	-10	5	-30	0
Winter	5	15	0	15	5	30
Abfluss (%)						
MQ Sommer	-15	5	-10	10	-20	10
MQ Winter	5	25	0	15	15	40
NM7Q Sommer	-20	5	-10	10	-30	5
NM7Q Winter	-20	5	0	15	-30	5
Hochwasserabfluss (%)						
MHQ	5	20	0	20		
HQ10	15	20	-5	15	15	30
HQ100	10	10	0	20	10	15
HQ1000	5	10	-5	20	5	20
HQ10000	10	12	-	-	10	15

Wie bereits aus dem Jahresgang der Monatsmittelwerte ersichtlich, ist bereits bis 2050 tendenziell eine Zunahme der mittleren Winterabflüsse zu erkennen und mit einer Abnahme der mittleren Sommerabflüsse zu rechnen. Diese Tendenz verstärkt sich bis 2085.

Die niedrigen Abflüsse werden mit dem Parameter NM7Q charakterisiert. Auf der Grundlage von KNMI'14 wird je nach verwendetem Szenario mit einem leichten Anstieg bis zu einem starken Rückgang (-20 %) bis 2050 gerechnet, der sich verstärkt bis 2085.

Hohe Abflüsse

Für die hohen Abflüsse gelten in den Niederlanden im Zusammenhang mit den neuen Normen höhere Wiederholungszeiten als 1 000 Jahre. In allen Szenarien lässt sich eine Zunahme feststellen. Infolge der Berücksichtigung der Überflutungen am Oberlauf nehmen die extrem hohen Abflüsse weniger zu als bei Vernachlässigung der Überflutungen. Das zeigt sich auch bei HQ10 und HQ100 und höheren Wiederholungszeiten. Bei HQ 10 treten noch keine Überflutungen auf und lässt sich eine stärkere Zunahme des Extremabflusses feststellen. Auffällig ist weiterhin, dass die Bandbreite zwischen den einzelnen KNMI'14-Szenarien durch die Überflutung und die dadurch verursachte Dämpfung der Abflüsse gering bleibt.

Die extrem hohen Abflüsse treten bei Lobith im Winter auf. Ein Abfluss von gut 12 000 m^3/s (was den Hochwassern der Jahre 1993 und 1995 entspricht) wird nicht mehr durchschnittlich einmal in 100 Jahren auftreten, sondern im Jahr 2050 einmal in 30 Jahren und im Jahr 2085 in manchen Szenarien sogar öfter als einmal in zehn Jahren.

Vergleich mit IKSR

Die IKSR hat im Jahr 2011 auf der Grundlage der damals verfügbaren Informationen eine Übersicht über die voraussichtliche künftige Änderung des Abflussregimes erstellt. Obwohl es Unterschiede zwischen der Bandbreite auf der Grundlage von KNMI'14 und IKSR (2011) gibt, lässt sich in groben Zügen große Übereinstimmung erkennen (Tabelle 1). Dabei gilt es zu berücksichtigen, dass die Zuverlässigkeit von Klimamodellen und die Berechnung der

gesamten Modellkette, die bestimmte Annahmen enthält, begrenzt sind. In Bezug auf die durchschnittlichen Veränderungen ist die Richtung der Veränderung im Allgemeinen vergleichbar, obwohl es zahlenmäßige Unterschiede gibt. In Bezug auf Niedrigwasser erscheint die Richtung hin zu niedrigeren Abflüssen beim KNMI'14-Szenario stärker ausgeprägt zu sein als beim IKSR-Szenario.

8. 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 wurde eine Zunahme der extremen Hochwasser berechnet.

9. Literatur

Alphen J.van (2016) The Delta Programme and updated flood risk management policies in the Netherlands. J. Flood Risk Management (9) 310-319.

ENW, Expertisenetwerk Waterveiligheid, 2017, Grondslagen voor hoogwaterbescherming. https://www.enwinfo.nl/index.php/publicaties/grondslagen.

Hegnauer, M., Beersma, J.J., Van den Boogaard, H.F.P., Buishand, T.A. and Passchier, R.A. 2014. Generator of Rainfall and Discharge Extremes (GRADE) for the Rhine and Meuse basins: Final report of GRADE 2.0. Deltares report 1209424-004-ZWS-0018, Delft, The Netherlands. http://publications.deltares.nl/1209424_004_0018.pdf.

IKSR (2011) Szenarienstudie für das Abflussregime des Rheins Stand April 2011. IKSR Bericht 188, Koblenz http://www.iksr.org/uploads/media/188_d.pdf

IKSR (2012): Aktionsplan Hochwasser 1995-2010:Handlungsziele, Umsetzung und Ergebnisse Kurzbilanz. IKSR Bericht nr. 200, Koblenz. http://www.iksr.org/uploads/media/200_d.pdf

IPCC, 2013. Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. [Core Writing Team, Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 1535 pp, doi:10.1017/CBO9781107415324.

KNMI, 2015: KNMI'14 climate scenarios for the Netherlands; A guide for professionals in climate adaptation, KNMI, De Bilt, The Netherlands, 34 pp. http://www.climatescenarios.nl/images/Brochure_KNMI14_EN_2015.pdf.

Lall, U. and Sharma, A. 1996. A nearest neighbour bootstrap for resampling hydrologic time series. Water Resources Research 32: 697-693.

Lammersen, R & Engel, H & van de Langemheen, W & Buiteveld, H. (2002). Impact of river training and retention measures on flood peaks along the Rhine. Journal of Hydrology. 267. 115-124. 10.1016/S0022-1694(02)00144-0. Lenderink, G. and J.J. Beersma, 2015: The KNMI'14 WH,dry scenario for the Rhine and Meuse basins. KNMI publication: WR-2015-02, 12/2015, pp24 http://projects.knmi.nl/publications/fulltexts/wr_201502_scenarios_for_rhine_and_meuse_lenderink_beersma_final.pdf.

Lenderink, G., van den Hurk, B.J.J.M., Klein Tank, A.M.G., van Oldenborgh, G.J., van Meijgaard, E., de Vries, H. and Beersma, J.J. 2014. Preparing local climate change scenarios for the Netherlands using resampling of climate model output. *Environmental Research Letters* 9(11): 115008, doi:10.1088/1748-9326/9/11/115008.

Sperna Weiland, F., Hegnauer, M., Bouaziz, L. and Beersma, J.J. 2015. *Implications of the KNMI'14 climate scenarios for the discharge of the Rhine and Meuse; comparison with earlier scenario studies.* Report nr. 1220042-000-ZWS-004, Deltares, Delft, The Netherlands. http://publications.deltares.nl/1220042_000.pdf.

Sperna Weiland F., Hegnauer, M., Van den Boogaard, H., Buiteveld, H., Lammersen, R. and Beersma J (2016).: Implications of the IPCC 5th assessment and KNMI'14 scenarios on extreme flows in the rivers Rhine and Meuse, Sustainable Hydraulics in the Era of Global Change: Proceedings of the 4th IAHR Europe congress, edited by Sébastien Erpicum, Benjamin Dewals, Pierre Archambeau, Michel Pirotton. Taylor and Francis Group London, ISBN 978-1-138-02977-4.

Klimawandel in der Schweiz – Hydrologische Auswirkungen und Anpassungsstrategie

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

1. Einleitung

Die Schweiz reagiert sehr empfindlich auf den Klimawandel. Klimabeobachtungen zeigen bereits einen Anstieg der Lufttemperatur, der deutlich über dem globalen Durschnitt liegt. In den letzten Jahren wurde deshalb die Klimaveränderung in der Vergangenheit und für die Zukunft genauer untersucht. Beispielsweise wurden 2011 neue regionale Klimaszenarien für die Schweiz veröffentlicht (CH2011, 2011). Andere Forschungsprogramme beschäftigten sich mit den Auswirkungen des Klimawandels auf Hydrologie und Wasserwirtschaft, wie das vom Bundesamt für Umwelt initiierte Programm „Auswirkungen der Klimaveränderung auf die Gewässer und Wasserressourcen in der Schweiz CCHydro“ (BAFU, 2012) oder das nationale Forschungsprogramm 61 „Nachhaltige Wassernutzung“ (Björnsen Gurung und Stähli, 2016). Auswirkungen des Klimawandels auf den gesamten Kultur- und Naturraum Schweiz wurden in Brennpunkt Klima Schweiz (Akademie der Wissenschaften Schweiz, 2016) oder CH-2014 Impacts (CH2014-Impacts, 2014) dargestellt. Die Politik hat auf die Herausforderungen des Klimawandels reagiert und eine Strategie zur Anpassung an den Klimawandel und den dazu gehörigen Aktionsplan erstellt (Schweizerische Eidgenossenschaft 2012 und 2014). Seit 2014 werden die Maßnahmen des Aktionsplanes umgesetzt. Im Folgenden soll ein Überblick über den Klimawandel und seine Auswirkungen auf die Hydrologie der Schweiz gegeben werden (Kapitel 2), gefolgt von einer Zusammenfassung der Anpassungsstrategie (Kapitel 3). Zum Abschluss werden zwei Maßnahmen aus dem Aktionsplan genauer vorgestellt (Kapitel 4).

2. Der Klimawandel in der Schweiz und seine Auswirkungen auf Wasserressourcen und Gewässer

2.1 Klimawandel

Die Schweiz ist von der globalen Erwärmung überdurchschnittlich stark betroffen. Seit Messbeginn im Jahre 1864 ist die durchschnittliche Lufttemperatur über das Jahr gemittelt um fast 2°C angestiegen (MeteoSchweiz, 2015) (Abb. 1).
Bei den Niederschlägen ist bisher kein eindeutiger Trend zu beobachten (Scherrer et al. 2015) (Abb. 2).

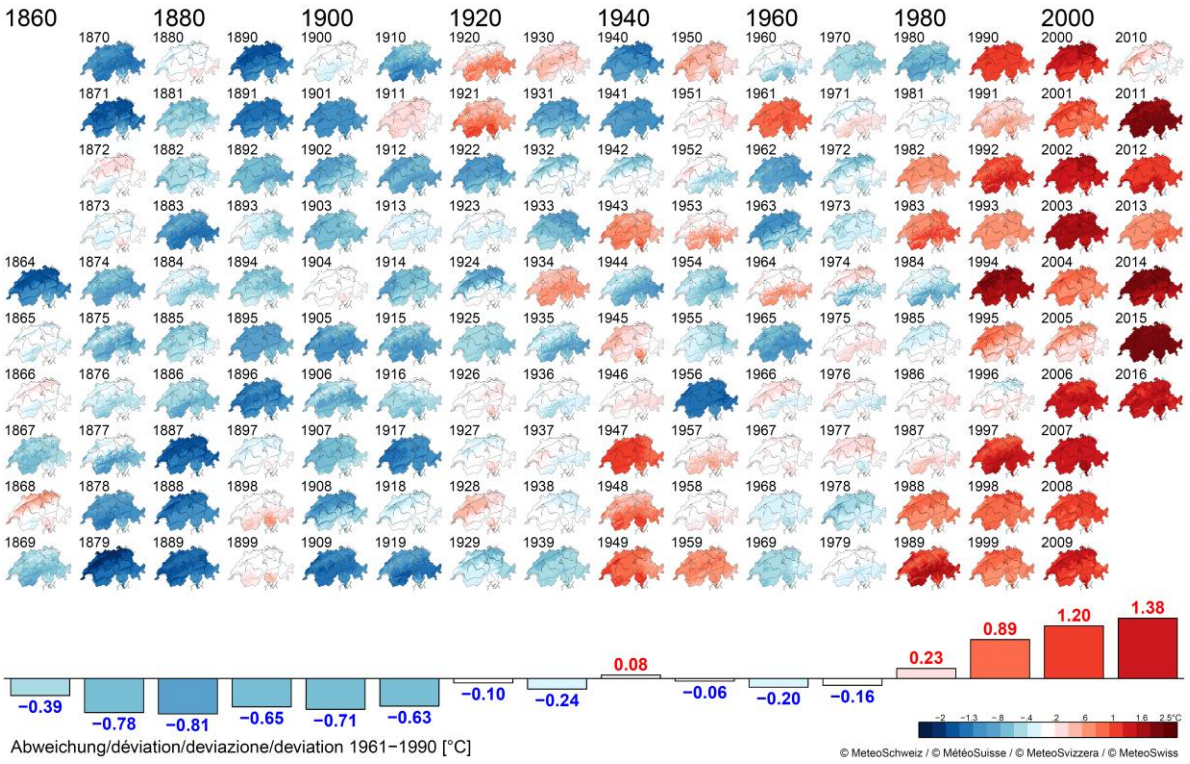


Abbildung 1. Abweichung der mittleren Jahrestemperatur von der Referenzperiode 1960-1990 seit 1864 (MeteoSchweiz 2016).

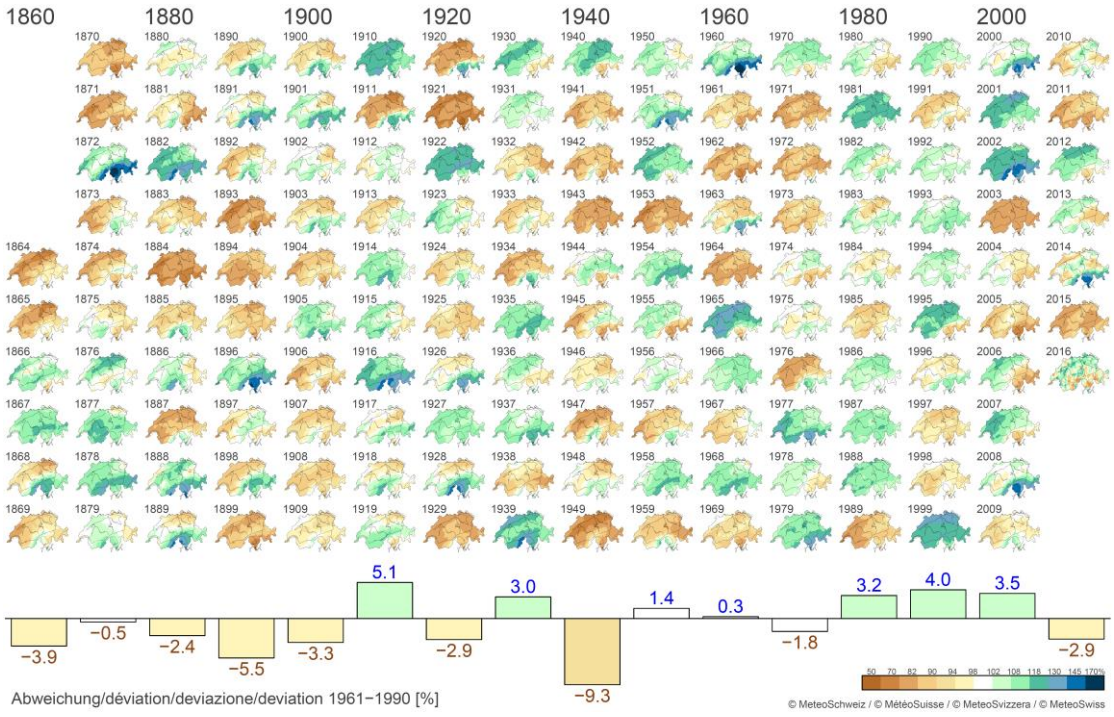


Abbildung 2. Abweichung der mittleren Jahresniederschläge von der Referenzperiode 1960-1990 seit 1864 (MeteoSchweiz 2016).

Für die Zukunft wird erwartet, dass die Temperaturen weiterhin überdurchschnittlich stark ansteigen werden. Bei den Niederschlägen wird im Sommer eine Abnahme und im Winter, insbesondere im Süden, eine Zunahme erwartet. Zudem dürften Extremereignisse (Starkniederschläge und Trockenheit) in Zukunft häufiger auftreten (CH2011, 2011).

2.2 Auswirkungen auf Wasserressourcen und Gewässer

Hydrologisch wird sich der Klimawandel vor allem auf die in Schnee und Gletschern gespeicherten Wassermengen, die jahreszeitliche Verteilung der Abflüsse und die Gewässertemperaturen auswirken.

2.2.1 Gletscher und Schnee

Bis Ende dieses Jahrhunderts wird sich die Gletscherfläche in den Schweizer Alpen weiter stark verringern. Gletscher werden nur noch in den hoch gelegenen Gebieten der Berner und Walliser Alpen zu finden sein. Bis 2100 wird das heute in den Gletschern gespeicherte Wasservolumen um 90 % geschmolzen sein (Abb. 3). Das größte Eisvolumen wird sich Ende des Jahrhunderts im Einzugsgebiet der Rhone (Wallis) befinden, wo heute etwa 80 % des Schweizer Gletschervolumens zu finden ist. Das Einzugsgebiet des Rheins verliert dagegen bis auf wenige Eisreste im Berner Oberland alle Gletscher. Das Engadin und das Tessin sind bis Ende des Jahrhunderts vollständig eisfrei (VAW, 2011).

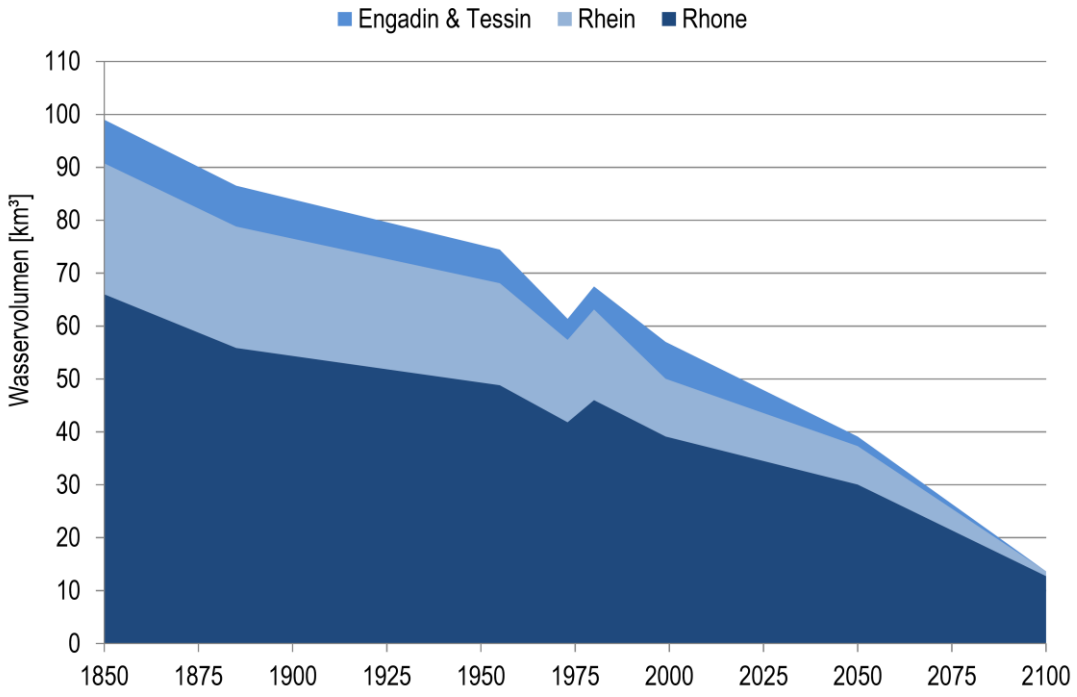


Abbildung 3. Entwicklung der in den Schweizer Gletschern gespeicherten Wasservolumen (Rhone- und Rhein-Einzugsgebiete, Engadin und Tessin) seit Ende der kleinen Eiszeit. Seit Ende der kleinen Eiszeit abgeschätzt (die Unsicherheit beträgt 20-30 %) und bis 2100 simuliert (Schädler 1985; Farinotti et al. 2009; Linsbauer et al. 2012).

Die Schneegrenze wird ansteigen und die in der Schneedecke saisonal zwischengespeicherte Wassermenge wird gegenüber heute um 2/3 reduziert sein (Abb. 4).

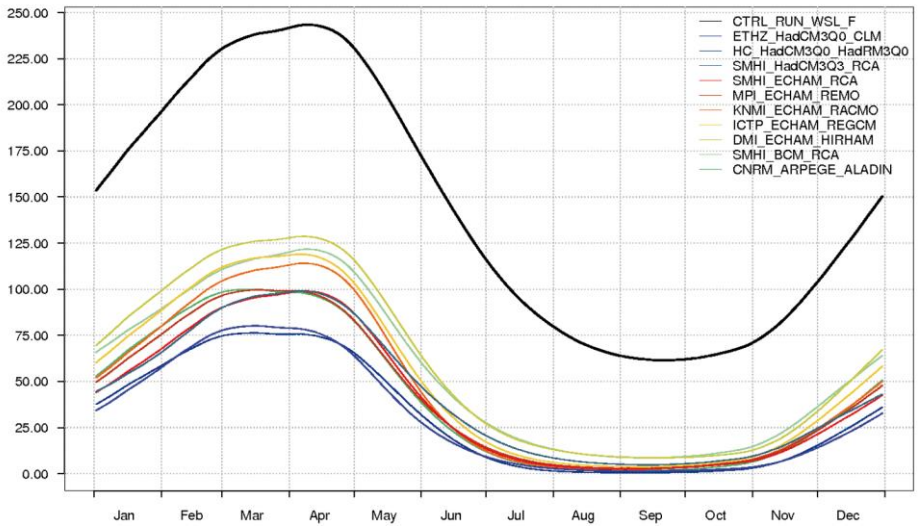


Abbildung 4. Jahresverlauf der Wasseräquivalente der Schneedecke (farbig, in mm) in der Schweiz für die Szenarioperiode 2070–2099 im Vergleich zum Kontrolllauf 1980–2009 (schwarz) basierend auf den verschiedenen Klimamodellketten (Zappa et al, 2012).

2.2.2 Veränderung der Abflussverhältnisse

Im Alpengebiet ist die Temperaturzunahme die wichtigste Einflussgröße auf die jahreszeitlichen Veränderungen der Abflüsse: Die Schneefallgrenze steigt an und die Schneereserven im Winter sowie die Gletschervolumen bzw. die Gletscherflächen schwinden. Aufgrund der höheren Temperaturen wird im Winter mehr Niederschlag in flüssiger Form fallen und damit direkt zum Abfluss beitragen. Die jahreszeitlichen Verteilungen der Abflüsse (Regime) werden sich fast in der ganzen Schweiz verändern (Köplin et al, 2011) (Abb. 5).

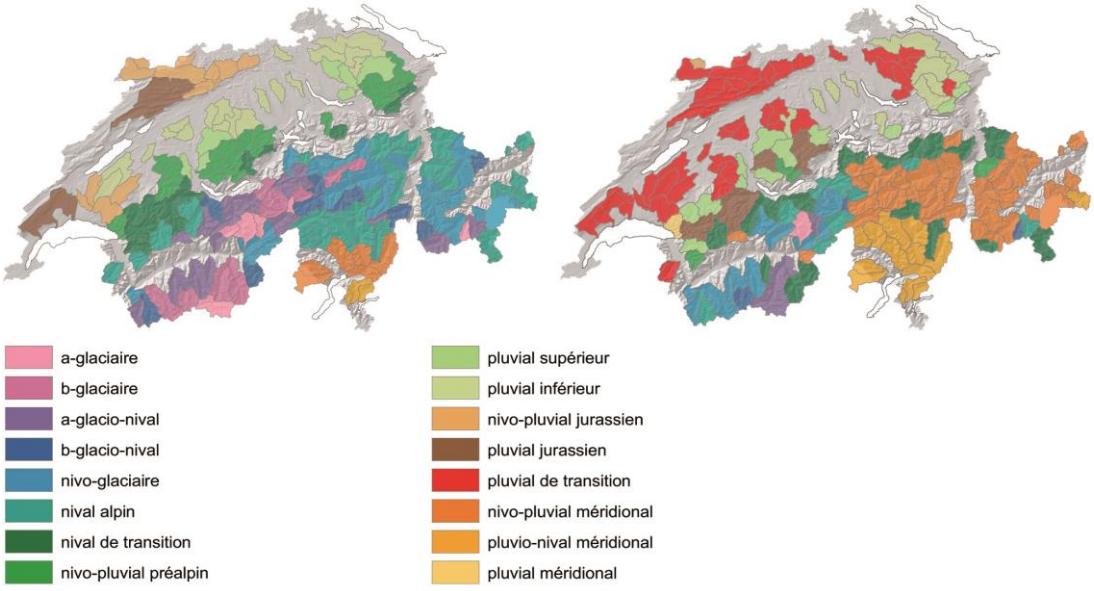


Abbildung 5. Abflussregime von 189 mesoskaligen Einzugsgebieten in der Schweiz. Links die Klassifikation aus dem Hydrologischen Atlas der Schweiz (HADES) für die Periode um 1950–1980 (Weingartner & Aschwanden 1992) und rechts für die ferne Zukunft um 2085 (Köplin et al, 2011).

Im Winter werden die Abflüsse in vielen Gebieten deutlich zunehmen, im Sommer hingegen werden sie aufgrund abnehmender Sommerniederschläge und kleineren Anteilen aus Schnee- und Gletscherschmelze zurückgehen (Zappa et al, 2012) (Abb. 6). Heute noch

weitgehend unbekannte Regimetypen mit einem jahreszeitlichen Abflussmaximum im Winter und einem deutlichen Minimum im August werden erscheinen. Die Jahresgesamtsummen der Abflüsse in der Schweiz verändern sich bis in die nahe Zukunft (2035) eher wenig und werden in vergletscherten Gebieten vorübergehend sogar zunehmen. Bis in die fernere Zukunft (2085) werden die Gesamtabflüsse zumeist leicht abnehmen (BAFU, 2013).

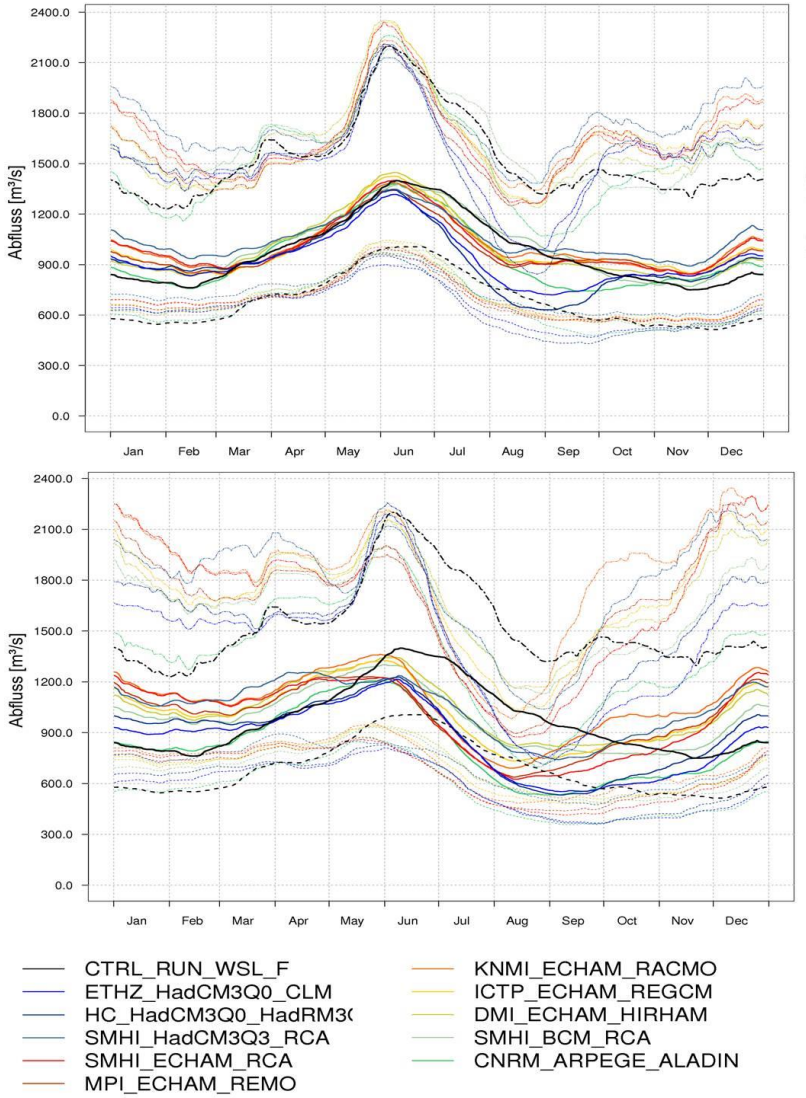


Abbildung 6. Abfluss im Rhein bei Basel Darstellung der 10 %-, 50 %- und 90 %-Quantile für die Kontrollperiode (schwarz) und alle zehn Klimaszenarien (farbig); oben für die nahe Zukunft um 2035, unten für die ferne Zukunft um 2085 (Zappa et al 2012).

2.2.3 Grundwasser

In den Grundwasserleitern des Juras, des Mittellands und der Voralpen erfolgt die Grundwasserneubildung durch Regen und Schneeschmelze. Es ist deshalb davon auszugehen, dass diese im Winter zunehmen und im Frühling infolge der fehlenden Schneeschmelze abnehmen wird. Die Grundwasserneubildung in alpinen Flusstalschottern wird mit abnehmender Schnee- und Gletscherschmelze im Sommer ebenfalls zurückgehen. Während den – wie von den Klimaszenarien prognostiziert – häufiger und länger anhaltenden Trockenperioden dürfte die Grundwasserexfiltration in die Fließgewässer zunehmen. Veränderungen der Grundwasserneubildung werden neben der Grundwassermenge auch die Grundwassertemperatur beeinflussen. Bei den durch Flusswasserinfiltration gespeisten Grundwasserleitern wird daher ein Anstieg der Grundwassertemperatur beobachtet, wie auch in urbanen Gebie-

ten, u. a. durch Wärmeeintrag aus der Gebäudekühlung. Ansteigende Grundwassertemperaturen können eine Zunahme der mikrobiellen Aktivität wie auch eine Abnahme der Sauerstoffkonzentration und im Extremfall Eisen- und Manganausfällungen bewirken (Schürch et al. 2012).

2.2.4 Hochwasser

Eine wärmer werdende Atmosphäre kann mehr Wasserdampf aufnehmen und bietet damit ein höheres Potenzial für Starkniederschläge. Zusätzlich führen die steigenden Temperaturen dazu, dass Niederschlag verstärkt als Regen und nicht als Schnee fällt (insbesondere im Frühjahr und Herbst in alpinen und voralpinen Einzugsgebieten, und im Sommer auch in sehr hoch gelegenen Gebieten). Deshalb ist mit einer Zunahme der Häufigkeit und Intensität von mittleren und großen Hochwasserereignissen sowie einer Verlängerung der potenziellen Hochwasserzeit im Frühling und Spätherbst zu rechnen. Nicht bekannt ist, wie sich die atmosphärische Zirkulation und damit die Häufigkeit von hochwasserauslösenden Wetterlagen infolge des Klimawandels verändern werden (Piaget et al, 2016).

2.2.5 Gewässertemperaturen und Ökologie

Steigende Lufttemperaturen, die Einleitung von warmem Wasser aus Kraftwerks- und Gebäudekühlungen und Abwasserreinigungsanlagen sowie das Fehlen schattenspendender Ufervegetation haben in den letzten Jahrzehnten die Wassertemperaturen vieler Oberflächengewässer deutlich ansteigen lassen (Abb. 7).
Eine höhere Wassertemperatur bewirkt, dass weniger Sauerstoff im Wasser gelöst wird. Gleichzeitig steigt die biologische Aktivität, womit ihr Sauerstoffbedarf zunimmt. Zusätzlich finden gewisse Krankheitserreger in wärmerem Wasser eine stärkere Verbreitung. Tiefere Pegelstände in den Sommermonaten werden weitere Zunahmen der Gewässertemperaturen verursachen und dadurch das Überleben gewisser Organismen gefährden.

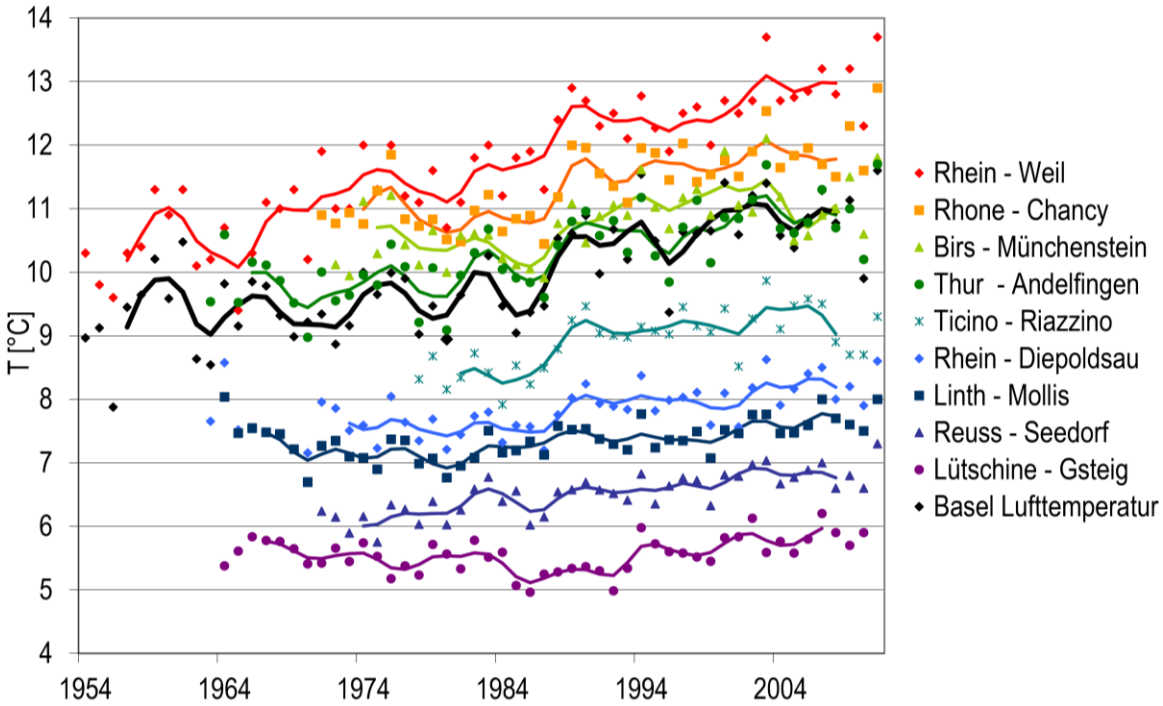


Abbildung 7. Wassertemperaturverlauf der letzten Dekaden für neun ausgewählte Stationen und Basel (Lufttemperatur) (BAFU, 2012). Für Stationen mit kalten mittleren Wassertemperaturen (z.B. Lütschine-Gsteig) ist der starke Anstieg zwischen 1987 und 1988 weniger deutlich. Zudem fällt die kleinere interannuelle Variabilität ihrer Wassertemperatur auf. Beides veranschaulicht den ausgleichenden Effekt der Gletscher (BAFU 2012).

2.2.6 Wasserressourcenprobleme

Mit der Verschiebung der Abflüsse vom Sommer in den Winter und einer erwarteten Zunahme von heißen und trockenen Sommern, sind häufigere und länger andauernde Niedrigwasserperioden, insbesondere im Spätsommer, zu erwarten (Mayer et al. 2011). Aufgrund der höheren Lufttemperaturen steigen auch Pflanzenwasserbedarf und Verdunstung. Deshalb wird auch der Wasserbedarf für die Bewässerung und der öffentlichen Wasserversorgung sowie die Wassertemperaturen ansteigen. Während heißen, trockenen Sommermonaten können für die aquatischen Ökosysteme kritische Werte erreicht werden. Als Folge kam es bereits in den letzten Jahren vermehrt zu lokalen Konflikten zwischen den verschiedenen Wassernutzern und dem Gewässerschutz, zu Versorgungsengpässen und gewässerökologischen Problemen (bspw. 2003, 2011, 2015).

2.2.7 Die Zukunft des Wasserschlosses Europas

Die Schweiz ist das Wasserschloss Europas und dies wird in absehbarer Zeit gesamthaft gesehen auch so bleiben. Durch die klimabedingten Veränderungen des Dargebots an Grund- und Oberflächenwasser wird es in Zukunft jedoch vermehrt zu temporären lokalen und auch regionalen Engpässen kommen, welche wasserwirtschaftliche Anpassungsmaßnahmen erfordern. Bei einem künftig wärmer und trockener werdenden Klima in Europa, wird die Wasserschloss-Funktion der Schweiz in Zukunft sogar noch an Bedeutung gewinnen.

3. Klimaanpassung in der Schweiz

Die schweizerische Anpassungsstrategie besteht aus zwei Teilen: Der erste Teil beinhaltet Ziele, Herausforderungen und Handlungsfelder bei der Anpassung an den Klimawandel. Er wurde 2012 von der Schweizer Regierung verabschiedet (Schweizerische Eidgenossenschaft 2012). Darauf aufbauend werden in einem zweiten Teil konkrete Anpassungsmaßnahmen in einem Aktionsplan zusammenfassend dargestellt (BAFU, 2014).
Ziel der Strategie ist es, die **Chancen** des Klimawandels zu nutzen, die **Risiken** des Klimawandels zu minimieren und die **Anpassungsfähigkeit** der Systeme zu steigern. In der Strategie werden Teilstrategien für neun stark vom Klimawandel betroffenen Sektoren zusammengefasst. Für jeden Sektor werden die wichtigsten Handlungsfelder der Anpassung identifiziert, Anpassungsziele für die Handlungsfelder formuliert und die Stossrichtung für die Erreichung dieser Ziele skizziert. Außerdem werden sektorenübergreifende Herausforderungen betrachtet. Tab. 1 zeigt die in der Strategie behandelten Sektoren und sektorenübergreifenden Herausforderungen. Im Aktionsplan sind 63 Maßnahmen zusammengefasst. Davon fokussieren 53 auf die Handlungsfelder der Sektoren. Neun Maßnahmen beinhalten die sektorenübergreifende Koordination und Verbesserung der Wissensgrundlagen.

Tabelle 1. In der Anpassungsstrategie betrachtete Sektoren und sektorenübergreifende Herausforderungen.

Sektoren	**Sektorübergreifende Herausforderungen**
• Wasserwirtschaft • Umgang mit Naturgefahren • Landwirtschaft • Waldwirtschaft • Energie (Verbrauch und Produktion) • Tourismus • Gesundheit	• Grössere Hitzebelastung in Städten • Zunehmende Sommertrockenheit • Steigendes Hochwasserrisiko • Abnehmende Hangstabilität und häufigere Massenbewegungen • Steigende Schneefallgrenze • Beeinträchtigung der Wasser-, Boden- und Luftqualität

- Biodiversitätsmanagement
- Raumentwicklung
- Veränderung von Lebensräumen, Artenzusammensetzung und Landschaft
- Ausbreitung von Schadorganismen, Krankheiten und gebietsfremden Arten

Im Rahmen der Teilstrategie Wasserwirtschaft wurden 30 relevante Bereiche überprüft und 14 als Handlungsfelder für die Anpassung priorisiert (Abb. 8). Die 14 Handlungsfelder können vier Bereichen mit Handlungsbedarf zugeordnet werden: (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. Darauf basierend wurden für den Sektor Wasserwirtschaft elf Maßnahmen festgelegt, dazu kommen zwei Maßnahmen zur Verbesserung der sektorenübergreifenden Wissensgrundlagen im Bereich Wasser.
Im Folgenden soll auf die Umsetzung von zwei dieser Maßnahmen genauer eingegangen werden.

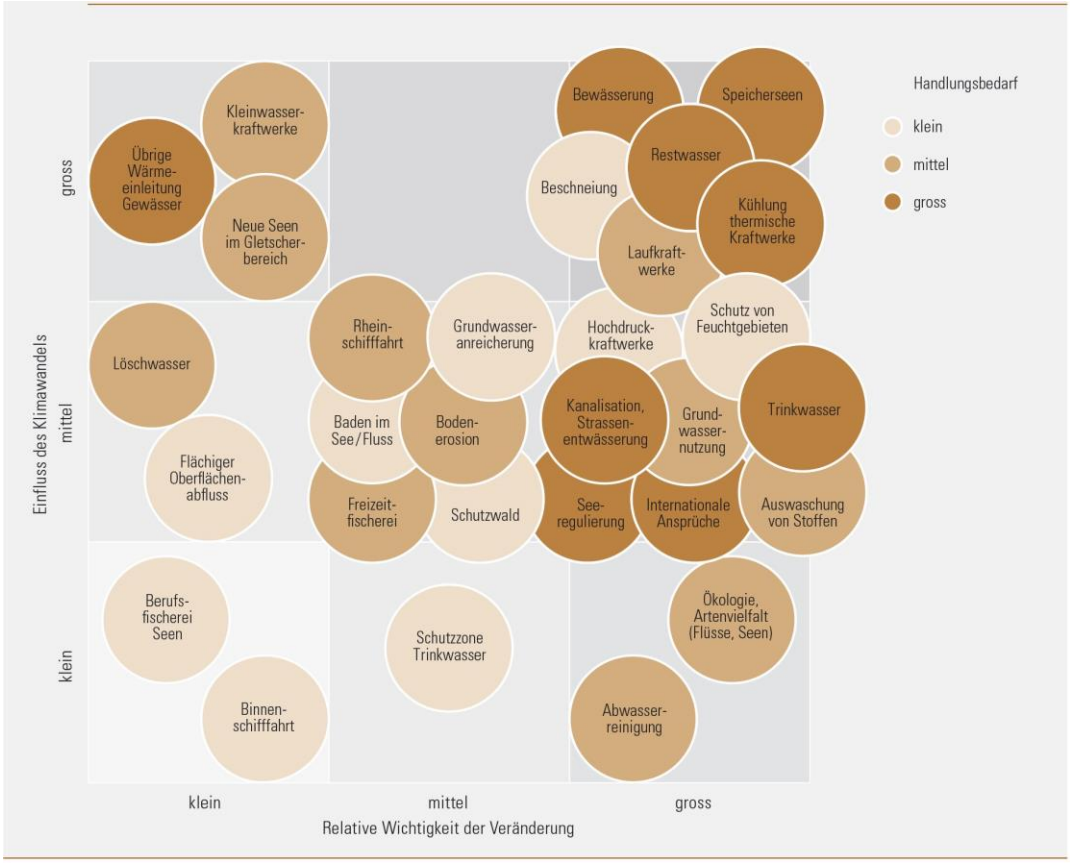


Abbildung 8. Beurteilung der relevanten Bereiche des Sektors Wasserwirtschaft bezüglich Einfluss des Klimawandels, relativer Wichtigkeit der Veränderungen und des klimabedingten Handlungsbedarfs (Schweizerische Eidgenossenschaft 2012).

4. Maßnahmen aus der Anpassungsstrategie

4.1 Hydro-CH2018: Hydrologische Grundlagen zum Klimawandel

Eine Maßnahme im Aktionsplan 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. Es bildet einen der Themenschwerpunkte des neu gegründeten Netzwerks „National Centre for Climate Services“ (NCCS) des Bundes. 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, wie das Projekt CCHydro (BAFU, 2012), soll bei Hydro-CH2018 auch der menschliche Handlungsspielraum z. B. in der Landwirtschaft oder bei der Speicherbewirtschaftung betrachtet werden. Es hat sich gezeigt, dass der zukünftige sozioökonomische Wandel mit berücksichtigt werden muss, da dieser die zukünftige Nachfrage nach Wasser stark beeinflussen wird. Damit werden weitere Maßnahmen der Anpassungsstrategie direkt umgesetzt oder unterstützt.
Ebenso sollen Klimadienstleistungen („climate services“) für den Bereich Wasser erarbeitet und verfügbar gemacht werden. Dies sind wissenschaftlich basierte Informationen und Daten über den vergangenen, heutigen und zukünftigen Wasserhaushalt. Sie dienen Behörden, Politik, Wirtschaft und Gesellschaft, klimabedingte Risiken zu verkleinern.

4.2 Praxisgrundlagen für ein regionales Wasserressourcenmanagement

Praxisgrundlagen in drei Modulen
Im Rahmen der Maßnahme hat das BAFU zusammen mit den Kantonen, Fachverbänden und den betroffenen Bundesämtern Praxisgrundlagen für ein regionales Wasserressourcenmanagement erarbeitet und bereits in einigen Regionen ausgetestet. Die Praxisgrundlagen sehen ein mehrstufiges Vorgehen vor: Die Kantone sollen Risikogebiete von Wasserknappheit identifizieren (Modul 1) und in den betroffenen Regionen die Wasserressourcen vorausschauend bewirtschaften (Modul 2). Daneben sind, wo noch nicht vorhanden, die nötigen Vorbereitungen für eine erfolgreiche kurzfristige Bewältigung von Ausnahmesituationen zu treffen (Modul 3).

Modul 1 – Risikogebiete identifizieren
Das vorgeschlagene Vorgehen nach Modul 1 (Chaix et al. 2016) erlaubt mit relativ geringem Aufwand eine Situationsanalyse. Dazu wird das Kantonsterritorium oder Einzugsgebiet in Bilanzierungsräume eingeteilt. Für diese werden die verschiedenen möglichen Problemfelder von Wasserknappheit gutachterlich untersucht. Daraus resultiert eine kantonale oder interkantonale Wasserknappheitshinweiskarte. Sie soll eine erste Übersicht geben, wo mit welchen Schwierigkeiten zu rechnen ist und welche Gebiete und Problemfelder genauer zu analysieren sind.

Mit seinen unterschiedlichen naturräumlichen Bedingungen und den sowohl urbanen als auch ländlichen Gebieten widerspiegelt der Kanton Bern die schweizweite Variabilität sehr gut. Die im Rahmen einer Pilotanwendung entstandene Wasserknappheitshinweiskarte des Kantons (Abb. 9) zeigt denn auch, dass die Herausforderungen bezüglich Wasserressourcen sehr unterschiedlich sein können und verschiedenste wasserwirtschaftliche Sektoren betreffen. Im Berner Jura mit seinen weitläufigen Karstlandschaften (Nordwesten) besteht ein hoher bis sehr hoher Handlungsbedarf bei der Sicherstellung der Trinkwasserversorgung und auch ein gewisser Handlungsbedarf für eine genügende Verdünnung bei der Einleitung des gereinigten Abwassers in die Vorfluter. Südlich davon anschliessend im Seeland – dem Ge-

müsegarten der Schweiz – dominieren dagegen Probleme und Konflikte rund um die Wasserbeschaffung und Verteilung für die landwirtschaftliche Bewässerung. Im Aare- und Emmental führen Nutzungskonflikte beim Grundwasserschutz und eine teilweise ebenfalls ungenügende Verdünnung bei der Einleitung des Abwassers in die Oberflächengewässer zu Problemen. Schaut man Richtung Voralpen und Alpen, nimmt der Druck auf die Wasserressourcen tendenziell ab. Mit der ansteigenden Schneefallgrenze und den abschmelzenden Gletschern dürften die Herausforderungen längerfristig allerdings auch hier zunehmen. So hat man im Berner Oberland zum Beispiel einen gewissen Handlungsbedarf für die Wasserbeschaffung zu Beschneiungszwecken identifiziert.

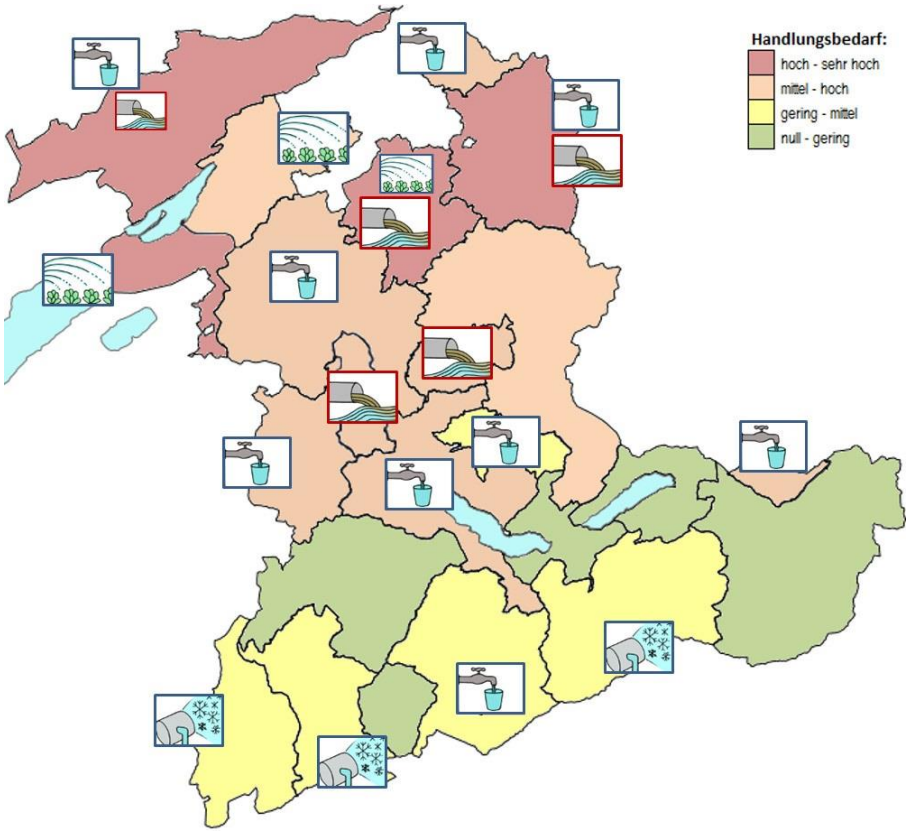


Abbildung 9. Wasserknappheitshinweiskarte Kanton Bern (provisorisch). Für jeden Bilanzierungsraum sind die Sektoren mit dem höchsten Handlungsbedarf (große Piktogramme) dargestellt. Besteht im selben Bilanzierungsraum bei einem weiteren Sektor ein mittlerer bis hoher Handlungsbedarf, ist dies mit einem kleinen Piktogramm gekennzeichnet (Chaix et al. 2016).

Für Bilanzierungsräume und Problemfelder, bei denen vertiefte Untersuchungen notwendig sind, zeigen Chaix et al. (2016) im Weiteren zahlreiche Möglichkeiten für quantitative Untersuchungen auf. Dabei gilt es nicht nur das Wasserdargebot für heute und der Zukunft abzuschätzen, sondern auch die tatsächlich erschlossenen und nachhaltig nutzbaren Wasserressourcen und den Wasserbedarf. Denn die meisten Maßnahmen für die Bewirtschaftung der Wasserressourcen setzten bisher beim Schutz der Ressource, bei der Erschließung, Verteilung oder beim Wasserbedarf an. Ein Kanton, welcher seine Teileinzugsgebiete quantitativ im Detail auf Wasserknappheitsprobleme untersucht hat, ist Thurgau. Im Rahmen eines vom BAFU geförderten Pilotprojekts zur Anpassung an den Klimawandel konnten so die Risikogebiete für Wasserknappheit identifiziert werden (Zahner et al. 2017).

Modul 2 – Wasserressourcen vorausschauend bewirtschaften
Damit in den Risikogebieten Knappheitssituationen so weit wie möglich vermieden werden können, sollen die Wasserressourcen präventiv bewirtschaftet werden. Die Wasserhoheit liegt in der Schweiz bei den Kantonen. Sie sind damit auch zuständig für die Planung und Bewirtschaftung der Wasserressourcen, sofern sie diese Aufgabe nicht an regionale oder kommunale Akteure weiterdelegieren. Da die wasserwirtschaftlichen Strukturen in der Schweiz sehr heterogen sind, präsentiert Modul 2 (Wehse et al. 2017) kein Standardvorgehen. Vielmehr geben die Autoren einen Überblick der verschiedensten bereits existierenden Planungsinstrumente der Schweizer Wasserwirtschaft und möglichen Maßnahmen für die Bewirtschaftung der Wasserressourcen. Die Idee ist, dass bestehende Planungsinstrumente gezielt, für das in der Schweiz relativ neue Thema der begrenzten Wasserressourcen, erweitert werden können. Der Bericht enthält eine Sammlung von rund 50 Maßnahmen zum Wasserressourcenmanagement (Abb. 10).

Kategorie	**Beispiele von Massnahmen** (nicht abschliessend)
Baulich	Verbindungsleitungen, Ausbau von Reservoiren, Bewässerungsbecken
Gesellschaftlich	Sensibilisierung der Bevölkerung, Anpassung von Kulturen in der Landwirtschaft
Finanziell	Kostendeckende Wasserpreise, Versicherung gegen Ernteausfälle, subventionstechnische Massnahmen
Organisatorisch	Zusammenschlüsse von Wasserversorgern, Mehrfachnutzung von Wasserspeichern, Einzugsgebietsmanagement
Regulatorisch	Verteilschlüssel/Kontingente für verschiedene Wassernutzer, Verbesserung der Konzessionierungspraxis
Wissensbezogen	Erfassung des effektiven Wasserverbrauchs von Konzessionären, Früherkennungssystem für Trockenheit

Abbildung 10. Beispiele von vorgeschlagenen Maßnahmen (Wehse et al. 2017).

Modul 3 – Ausnahmesituationen erfolgreich bewältigen
Trotz vorausschauender Bewirtschaftung besteht immer ein gewisses Restrisiko. So dürften auch künftig Ereignisse eintreten, die kurzfristige Bewältigungsstrategien erfordern. Das Modul 3 (Dübendorfer et al. 2015) umfasst deshalb einen Werkzeugkasten zum Umgang mit Ausnahmesituationen von Wasserknappheit. Mit seinem Werkzeugkasten will der Expertenbericht den kantonalen Fachstellen helfen, solche Situationen zu meistern, indem sie ihre bestehenden Strukturen gezielt mit Maßnahmen, Organisationsformen und Vorgehensmöglichkeiten ergänzen. Der Bericht umfasst erstens die rechtlichen Rahmenbedingungen zum Umgang mit Ausnahmesituationen. Zweitens liefert er Grundsätze und Kriterien für die Interessensabwägung und Priorisierung von Ansprüchen bei einer Verknappung der Wasserressourcen. Als dritten Punkt umfasst der Bericht eine Sammlung von rund 22 Maßnahmen, die auf praktischen Erfahrungen basieren.

5. Zusammenfassung

Der Klimawandel in der Schweiz ist ein Fakt und seine Auswirkungen können im Bereich Hydrologie und Wasserwirtschaft bereits heute beobachtet werden. Dank der schweizerischen Anpassungsstrategie und dem dazugehörigen Aktionsplan zur Anpassung an den Klimawandel sollen die Chancen des Klimawandels genutzt, die Risiken minimiert und die Anpassungsfähigkeit der Systeme gesteigert werden.

6. Literatur

Arnell N.W., Reynard N.S. (1996): *Literaturzitatbeispiel:* The effects of climate change due to global warming on river flows in Great Britain, J. Hydrology (183) 3-4, S pp. 397-424.

Akademie der Wissenschaften Schweiz (2016): *Brennpunkt Klima Schweiz. Grundlagen, Folgen und Perspektiven.* Swiss Academies Report 11(5), 216 S.

BAFU (2012): *Auswirkungen der Klimaänderung auf Wasserressourcen und Gewässer*. Synthesebericht zum Projekt «Klimaänderung und Hydrologie in der Schweiz» (CCHydro). Reihe Umweltwissen UW-1217-D, 76 S.

BAFU (2014): *Anpassung an den Klimawandel in der Schweiz. Aktionsplan 2014–2019. Zweiter Teil der Strategie des Bundesrates vom 9. April 2014*. Reihe Umwelt-Diverses, UD-1081-D, 100 S.

Björnsen Gurung A., Stähli M. (2014): *Wasserressourcen der Schweiz. Dargebot und Nutzung – heute und morgen.* Thematische Synthese 1 im Rahmen des nationalen Forschungsprogramms NFP&+ „Nachhaltige Wassernutzung“, Bern, 69 S.

CH2014-Impacts (2014), Toward Quantitative Scenarios of Climate Change Impacts in Switzerland, herausgegeben von OCCR, FOEN, MeteoSwiss, C2SM, Agroscope und ProClim, Bern, Schweiz, 136 pp.

IPCC, 2013: Climate Change (2013): The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 1535 pp, doi:10.1017/CBO9781107415324.

Farinotti D., Huss M., Bauder A., Funk M. (2009): *An estimate of the glacier ice volume in the Swiss Alps*. Global and Planetary Change 68.

MeteoSchweiz (2015): Klimareport 2014. Bundesamt für Meteorologie und Klimatologie (MeteoSchweiz), Zürich, 80 pp.

Schädler B. (1985): *Der Wasserhaushalt der Schweiz*. Mitteilung der Landeshydrologie. 225–231.

Scherrer, S.C., E.M. Fischer, R. Posselt, M.A. Liniger, M. Croci-Maspoli, R. Knutti (2016): *Emerging trends in heavy precipitation and hot temperature extremes in Switzerland*, J. Geophys. Res. Atmos., 121, doi:10.1002/2015JD024634.

Scherrer, S.C., M. Begert, M. Croci-Maspoli, C. Appenzeller (2015): *Long series of Swiss seasonal precipitation: regionalization, trends and influence of large-scale flow*, Int. J. Climatol., doi:10.1002/joc.4584.

Schweizerische Eidgenossenschaft (2012): *Anpassung an den Klimawandel in der Schweiz*. Ziele, Herausforderungen und Handlungsfelder. Erster Teil der Strategie des Bundesrates vom 2. März 2012. Reihe Umwelt-Diverses, UD-1055-D, 64.S.

Zahner S., Holzschuh R., Baumann M., Bleiker U. Hofer S. 2017: Wasserknappheit und Landwirtschaft. Neue Praxisgrundlagen am Beispiel des Kantons Thurgau. Géomatique Suisse 7-8/2017.

Studien im Auftrag des BAFU:

Die Studien sind, wo nicht anders gekennzeichnet, publiziert unter:

https://www.bafu.admin.ch/bafu/de/home/themen/wasser/fachinformationen/zustand-der-gewaesser/zustand-der-fliessgewaesser/wasserfuehrung-und-abflussregime-der-fliessgewaesser/klimaaenderung-und-hydrologie.html.

Chaix O., Wehse H., Gander Y., Zahner S. 2016: Bestimmung von Regionen mit Handlungsbedarf bei Trockenheit. Expertenbericht zum Umgang mit lokaler Wasserknappheit in der Schweiz. www.bafu.admin.ch/wasserressourcenmanagement.

Dübendorfer C., Tratschin R., Urfer D., Zahner S., Zysset A. 2015: Umgang mit Wasserressourcen in Ausnahmesituationen. Expertenbericht zum Umgang mit lokaler Wasserknappheit in der Schweiz. www.bafu.admin.ch/wasserressourcenmanagement.

Köplin N., Schädler B., Viviroli D., Weingartner R. 2011: Klimaänderung und Wasserhaushalt in sensitiven Bilanzierungsgebieten. 43 S.

Linsbauer A., Paul F., Haeberli W. 2012: Grossräumige Modellierung von Schwundszenarien für alle Schweizer Gletscher. Modellvergleich, Unsicherheiten und eine Analyse bezogen auf Großeinzugsgebiete.Schlussbericht CCHydro, Ergebnisse vom Teilprojekt CCGlinCH. 18 S.

Meyer R., Schädler B., Viviroli D., Weingartner R. 2011a: Auswirkungen der Klimaänderung auf die Niedrigwasserverhältnisse im Schweizer Mittelland für 2021–2050 und 2070–2099. 42 S.

Naef F. 2011: Untersuchung über die Auswirkungen der Zunahme der Hochwasserhäufigkeiten in neuerer Zeit und in Zukunft. 50 S.

VAW 2011: Gletscher- und Abflussveränderungen im Zeitraum 1900– 2100 in sieben Einzugsgebieten der Schweiz. 77 S.

Zappa M. et al. (2012): Natürlicher Wasserhaushalt der Schweiz und ihrer bedeutendsten Großeinzugsgebiete, 86.S.

Schürch M., Höhn E., Hunkeler D., Matousek F., Turberg P. 2012: Klimaänderung und deren Auswirkungen auf die Grundwasserressourcen − Resultate des gleichnamigen Workshops vom 11. Mai 2012.

Piaget N., Wernli H., Naef F., Smoorenburg M., Scholder-Aemisegger F., Graf M. 2016: Starkniederschläge und Hochwasser, 51. S.

Wehse H., Chaix O., Gander Y., Birrer A., Fritsch M., Meylan B., Zahner S. 2017: Erarbeitung von Maßnahmen zur langfristigen Sicherstellung der Wasserressourcen. www.bafu.admin.ch/wasserressourcenmanagement.

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

Dr. Gerhard Brahmer und Mario Hergesell
Hessisches Landesamt für Naturschutz, Umwelt und Geologie (HLNUG)

1. Einleitung

Zukünftige Klimaentwicklungen für Hessen können auf Basis einer Vielzahl vorliegender Klimaprojektionen abgeschätzt werden (Multi-Modell-Auswertung) (HLNUG, 2016). 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 Bodenwasserhaushaltsmodellen 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.

Nach Darstellung der Ergebnisse zu Untersuchungen von hydrologischen Zeitreihen der letzten 60 Jahre werden mit Klimaprojektionen Simulationen der hydrologischen Parameter durchgeführt und aus diesen mögliche Veränderungen gegenüber den aktuellen wasserwirtschaftlichen Verhältnissen abgeleitet. Diese Ergebnisse sollen hinsichtlich ihrer Anwendung zur Auswahl und Dimensionierung von Anpassungsmaßnahmen bewertet werden.

2. Entwicklung der hydrologischen Verhältnisse in den letzten 60 Jahren

2.1 Abflüsse in Oberflächengewässern

Abflusszeitreihen an Pegeln in Hessen wurden in Hinblick auf Instationaritäten und Trendverhalten untersucht (IAWG, 2009). Datengrundlage sind dabei die Tagesmittelwerte des Abflusses für 109 Pegel mit Beobachtungsperioden von 1930 (frühester Beginn) bis 2006 und die Hochwasserjahresserien von 107 Pegeln von 1920 (frühester Beginn) bis 2006. Neben klassischen Methoden wie lineare Regression auf die Zeit und Mann-Kendall-Test wurden insbesondere lokale Regressionen und instationäre Wahrscheinlichkeitsanalysen durchgeführt. In Abb. 1 sind die z-transformierten Jahresreihen von MQ, MNQ und MHQ der untersuchten Pegel dargestellt. Durch die z-Transformation haben alle Zeitreihen den Mittelwert 0 und die Standardverteilung 1 und können so vergleichbar dargestellt werden.

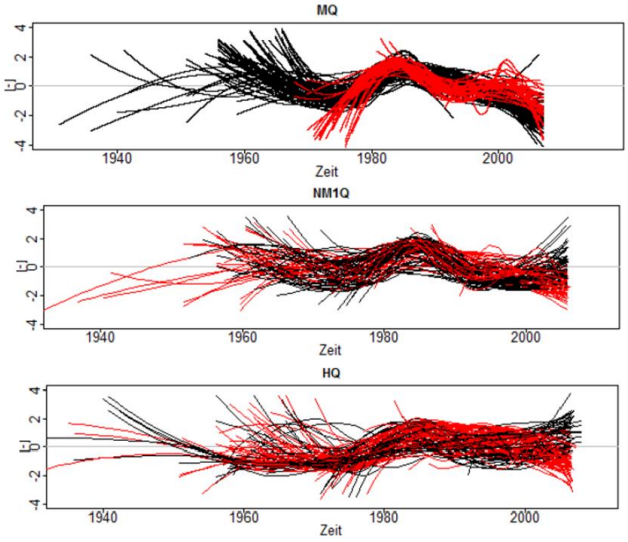


Abbildung 1. Trendverhalten für Abflusskenngrößen an hessischen Pegeln.

Die mittleren Abflüsse in Hessen zeigen deutliche, über viele Pegel hinweg gleichartige Instationaritäten. Wie lokal gewichtete Regressionen belegen, treten dabei lokale Maxima der mittleren Abflüsse Mitte der 80er Jahre auf. Überlagert wird diese Struktur von einer allgemeinen, langfristigen Tendenz zu einer geringfügigen Abnahme der Abflüsse bei zahlreichen Messstellen.

Für den mittleren Niedrigwasserabfluss MNQ ergeben sich für 25 Pegel signifikante Abnahmen, während die große Mehrzahl der Pegel keine Tendenz erkennen lässt. Niedrigwasserereignisse treten in Hessen im Mittel meist im August auf und zeigen über den untersuchten Zeitraum eine Tendenz zu früherem Einsetzen der Ereignisse. Vergleicht man die 30-jährlichen Reihen 1961-1990 und 1981-2010, so ist für 50 Pegel im Mittel ein Rückgang des MNQ um 10 % festzustellen.

Bei den jährlichen Hochwasserabflüssen zeigen 90 % der Pegel kein Trendverhalten. Die wenigen signifikanten Zu- oder Abnahmen sind eher Veränderungen im Einzugsgebiet zuzuschreiben. Bei der überwiegenden Zahl der Hochwasserjahresserien lässt sich ein stationäres Verhalten nachweisen. Hochwasserereignisse in Hessen treten im Mittel meist im Januar oder Februar auf. Dabei ist bei zahlreichen Pegeln die Tendenz zu späterem Auftreten der Hochwasser festzustellen. Auch für die Hochwasserquantile von HQ10 bis HQ100 lassen sich bei 94 von 107 untersuchten Pegeln keine Trends feststellen. Bei Verlängerung des Untersuchungszeitraumes um zehn Jahre (bis 2013) zeigen die überwiegende Anzahl der untersuchten Pegel Abnahmen für das HQ100 um etwa 5 bis 10 Prozent.

2.2 Grundwasserneubildung sowie Grundwasserstände und Quellschüttungen

In Hessen wird das Trinkwasser ausschließlich aus Grundwasser gewonnen. Die Kenntnis über mögliche langfristige Entwicklungen der regionalen Grundwasserverhältnisse ist daher von grundlegendem Interesse und eine Grundvoraussetzung für die nachhaltige Bewirtschaftung der Grundwasserressourcen. Daher hat Hessen zusammen mit den KLIWA-Ländern Baden-Württemberg, Bayern und Rheinland-Pfalz den Bodenwasserhaushalt und die daraus resultierende Grundwasserneubildung für die Vergangenheit (1951-2015) auf der Basis von Messdaten simuliert. Die flächendifferenzierte Simulation wurde länderübergreifend mit dem Bodenwasserhaushaltsmodell GWN-BW und einer nachgeschalteten Abflussseparation mittels Baseflow-Index (BFI) durchgeführt.

Der Niederschlag ist die mit Abstand wichtigste Einflussgröße für die Grundwasserneubildung. Für den Simulationszeitraum 1951-2015 zeigt der Jahresniederschlag in Hessen eine ausgeprägte Variabilität von Jahr zu Jahr aber keinen statistisch signifikanten Trend. Da die Grundwasserneubildung überwiegend im Winterhalbjahr stattfindet, ist vor allem der Winterniederschlag für die Regeneration der Grundwasserressourcen entscheidend. Auch für den Winterniederschlag ist über den 65 Jahre langen Gesamtzeitraum kein einheitlicher Trend feststellbar. Seit dem Jahr 2003 ist aber ein deutlicher Rückgang der Winterniederschläge zu beobachten (vgl. Abb. 2). Gleichzeitig hat die Verdunstung im hydrologischen Winterhalbjahr seit den 90er Jahren zugenommen (Abb. 3). Beides wirkt sich reduzierend auf die Grundwasserneubildung aus.

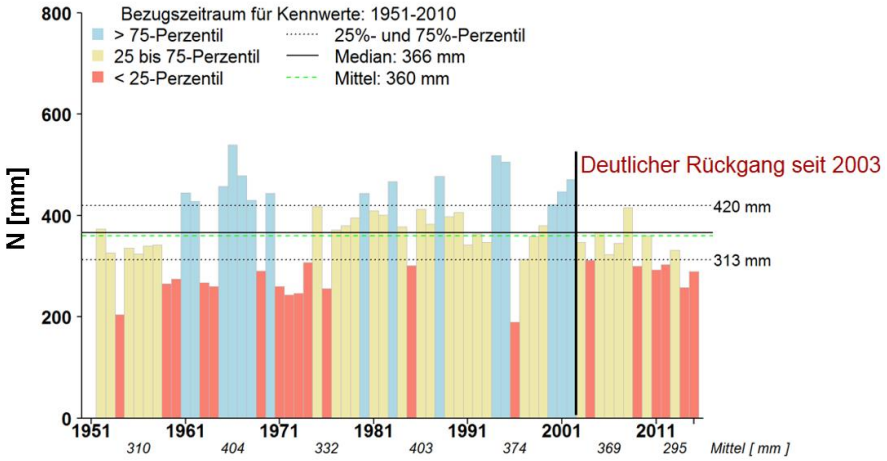


Abbildung 2. Veränderung der Niederschläge im hydrologischen Winterhalbjahr.

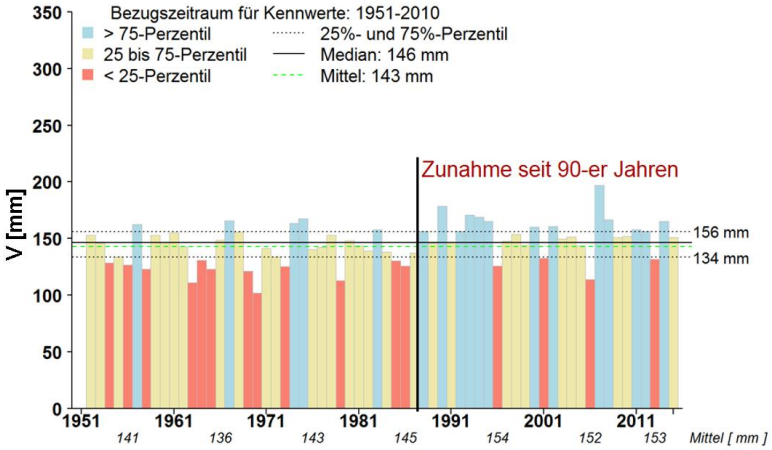


Abbildung 3. Veränderung der Verdunstung im hydrologischen Winterhalbjahr.

Für die Grundwasserneubildung ist über den gesamten Simulationszeitraum kein einheitlicher Trend erkennbar (Abb. 4). Auffällig ist die extreme Variabilität von Jahr zu Jahr 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.

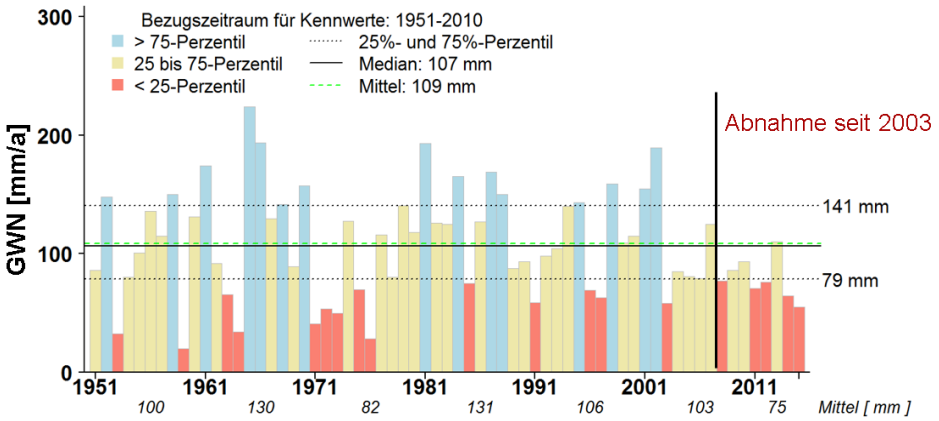


Abbildung 4. Veränderung der Grundwasserneubildung 1951-2015.

In Ergänzung zu der Bodenwasserhaushaltssimulation wurde das Langzeitverhalten von **Grundwasserständen** und **Quellschüttungen** untersucht. Für die Auswertung standen Beobachtungsdaten (seit den 1950er Jahren) von 538 Messstellen des Landesgrundwasserdienstes zur Verfügung. Die Studie hat ergeben, dass für etwa die Hälfte aller Messstellen keine Tendenz zu beobachten ist. Bei 41 % aller anthropogen unbeeinflussten Grundwasser- und Quellschüttungsmessstellen sind die Wasserstände und Schüttungen in den letzten Jahrzehnten tendenziell zurückgegangen, 11 % der Messstellen zeigen dagegen einen zunehmenden Trend.

3. Zukunftsprojektionen

3.1 Entwicklung der zukünftigen hydrologischen Verhältnisse

Die hier vorgestellten Ergebnisse für Oberflächengewässer in Hessen basieren auf dem Globalmodell ECHAM5 und dem Emissionsszenario A1B. In diesem Szenario wird von einer ausgewogenen Nutzung aller Energiequellen ausgegangen. Da die verschiedenen Emissionsszenarien bis zum Jahr 2050 relativ ähnliche Verläufe aufzeigen, wurde das Emissionsszenario A1B, in Anlehnung an die Schwerpunktsetzung im Kooperationsvorhaben KLIWA (Komischke und Ebert 2012), als Grundlage für diese Untersuchung ausgewählt. Als dynamisches Regionalmodell wurde das COSMO-CLM-Modell (Rockel et al. 2008) der Version 4.8 mit einer räumlichen Auflösung von 7x7 km²-Rasterzellen verwendet und eine lineare Bias-Korrektur der Klimagrößen Niederschlag, Temperatur, Globalstrahlung und relativer Luftfeuchtigkeit durchgeführt. Die Ergebnisse für die hydrologischen Kennwerte beinhalten die Bandbreite bisher durchgeführter Abflussprojektionen (Brahmer, 2006) bzw. dehnen sie zum Teil etwas aus.

Während von Mai bis August überwiegend Rückgänge der monatlichen **Niederschläge** in der Größenordnung von 5 % bis 15 % festzustellen sind, nehmen die Niederschläge in den übrigen Monaten in der Regel zu, für das Gesamtjahr um rund 5 % und für das hydrologische Winterhalbjahr um nahezu 15 %. Die größten Zunahmen mit mehr als 20 % treten in den Monaten März und November auf (Abb. 5).

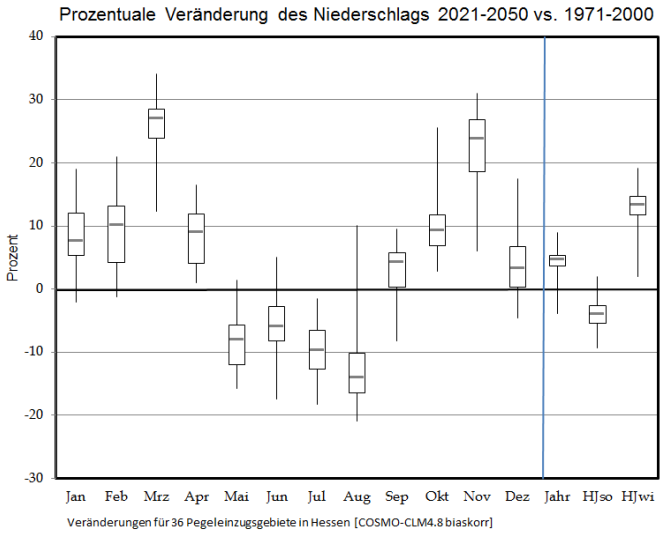


Abbildung 5. Veränderung der monatlichen Niederschläge in Hessen in der „nahen Zukunft“.

Aufgrund der zunehmenden Lufttemperatur sind Tage mit Schneefall und auch die Andauertage der Ausbildung einer **Schneedecke** in den Einzugsgebieten für die Zukunft zurückgehend. Von November bis April zeigt sich eine Abnahme der Tage mit Schneebedeckung um 30 bis 60 % (Median 48 %). Dies kann einerseits zu einem direkteren Abfluss mit geringerer Niederschlagsrücklage in der Schneedecke führen, der damit nicht unmittelbar hochwasserverschärfend wirkt, andererseits können geringmächtigere und relativ feuchte Schneedecken deutlich reaktiver auf Warmlufteinbrüche bzw. einsetzende Niederschläge reagieren und so zu Hochwasser führen. Dieses komplexe Zusammenwirken wird bei der Wasserhaushaltssimulation berücksichtigt und zeigt sich in den veränderten Abflussganglinien.

Für den Pegel Bad Hersfeld sind in Abb. 6 exemplarisch die mittleren monatlichen Hochwasserabflüsse (MoMHQ) für den Referenzzeitraum 1971-2000 (durchgezogene Linien) und für den Projektionszeitraum 2021-2050 (gestrichelte Linien) dargestellt. Die Ergebnisse zeigen eine gewisse Variation (Bandbreite) der Abflussprojektion, dahingehend, dass drei unterschiedliche Läufe (run 1 bis run 3) aus dem antreibenden Klimamodell mit unterschiedlichen Randbedingungen gestartet wurden. Für den Zukunftszeitraum sind insbesondere in den Wintermonaten November bis Januar deutliche Zunahmen der Hochwasserabflüsse zu erkennen.

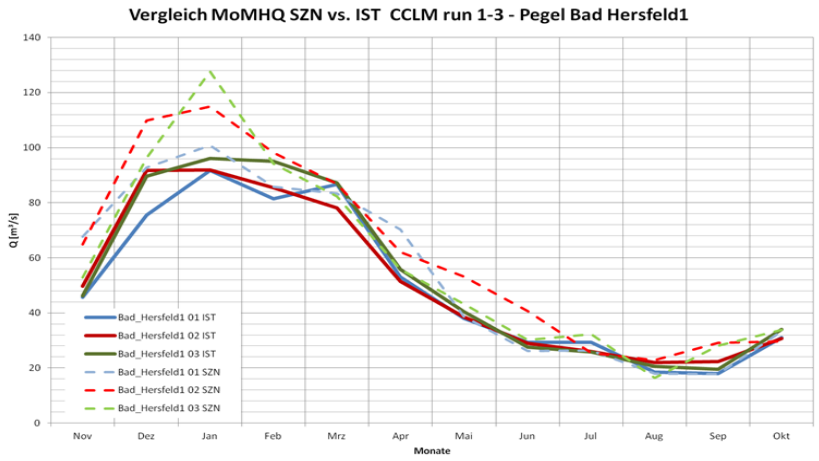


Abbildung 6. Vergleich der mittleren monatlichen Hochwasserabflüsse für unterschiedliche Modellruns im Referenz- und Zukunftszeitraum.

Aus den monatlichen Abflusskennwerten wurden gewässerkundliche Hauptwerte und aus täglichen Abflusswerten Jahresscheitelserien generiert. Die regionale Ausprägung der Veränderung für den Zukunftszeitraum 2021-2050 ist für die Hauptwerte MQ und MNQ (Abb. 7) sowie für die ermittelten Hochwasserquantile HQ10 und HQ100 (Abb. 8) in nachfolgenden Karten dargestellt.

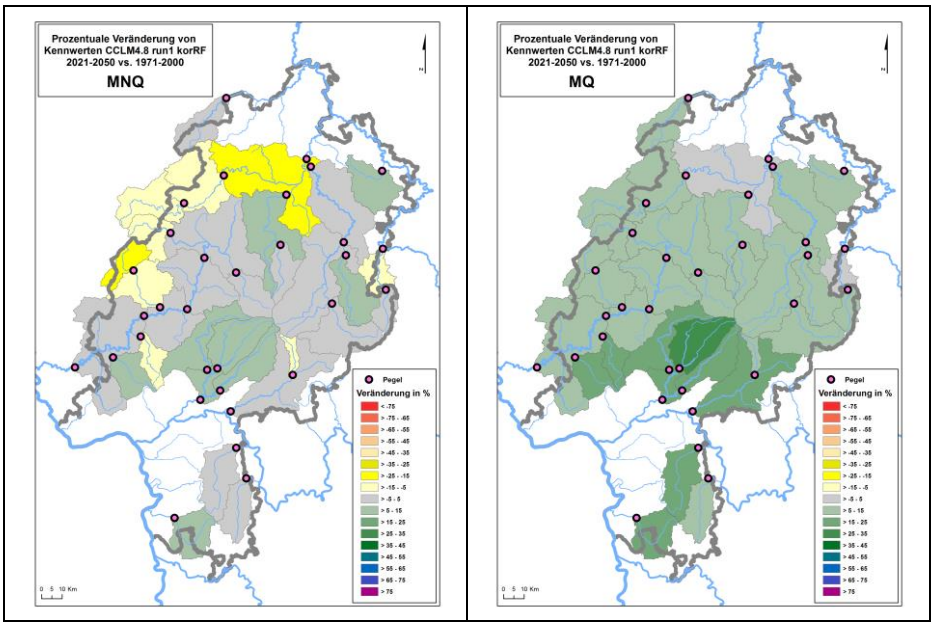


Abbildung 7. Prozentuale Veränderung der Kennwerte MNQ und MQ in Hessen für den Projektionszeitraum 2021-2050.

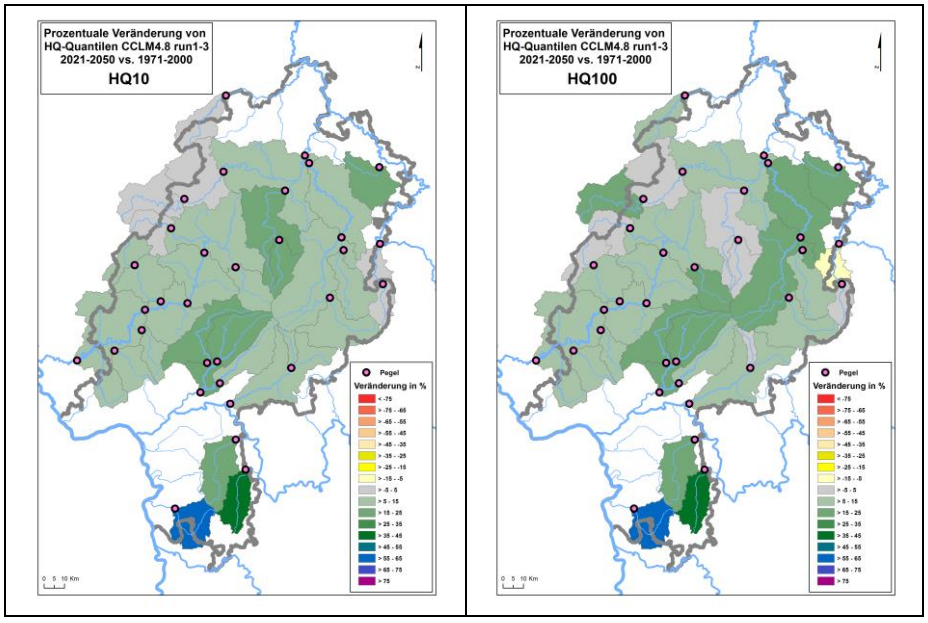


Abbildung 8. Prozentuale Veränderung der Hochwasser-Kennwerte HQ10 und HQ100 in Hessen für den Projektionszeitraum 2021-2050.

Der **mittlere jährliche Abfluss (MQ)** zeigt für alle Einzugsgebiete Zunahmen in der Zukunft, der Mittelwert über alle Einzugsgebiete liegt bei 14 % bei einer Spanne von 5 % bis 30 %. Auch hier spiegelt sich die Mehreinnahme bei der Wasserhaushaltsgröße Niederschlag wi-

der. Die Veränderung der Gebietsverdunstung ergibt nach den Ergebnissen der Wasserhaushaltssimulation keine signifikante Auswirkung in der Jahresmenge, während im hydrologischen Sommerhalbjahr aus den Simulationen im Mittel eine Abnahme um rund 3 % und im hydrologischen Winterhalbjahr eine Zunahme um 6 % resultiert. Für den Abfluss zeigen sich im hydrologischen Sommerhalbjahr durchweg Abnahmen um im Mittel - 4% bei einer Spanne von - 1% bis - 16 %. Für das Winterhalbjahr ergibt sich eine mittlere Abflusszunahme um 20 % bei einer Spanne von 10 % bis 35 %. Die geringeren Zunahmen treten in der nördlichen Landeshälfte auf.

Für die Kenngröße **mittlerer jährlicher Niedrigwasserabfluss (MNQ)** streuen die Veränderungen zu gleichen Teilen um den Nullwert. D. h. im Mittel über alle Einzugsgebiete ergibt sich keine Veränderung, 50 % der Werte liegen im Bereich zwischen Abnahmen um 5 % und Zunahmen um 5 %. Die gesamte Spannweite liegt bei Abnahmen um -17 % und Zunahmen um 9 %. Regional finden sich die größten Abnahmen des MNQ-Wertes mit Werten zwischen -12 % und -17 % im Lahngebiet und zwar in Gebieten des rheinischen Schiefergebirges. Geringe Speichermöglichkeiten in den Böden und ein hoher direkter Abflussanteil führen dort zu insgesamt geringen MNQ-Werten, die durch den Einfluss des Klimawandels offenbar noch geringer ausfallen. Die übrigen Pegel im Lahngebiet zeigen leichte Zunahmen zwischen 0 und 6 %, während sich für die Lahn selbst keine Veränderung ergibt. Auch im Maingebiet finden sich in der Hälfte der untersuchten Gebiete leichte Zunahmen (im Niddagebiet) und in der übrigen Hälfte unveränderte Werte oder leichte Abnahmen der MNQ-Werte, die Spannweite liegt zwischen - 6 % und 6 %. Im Fuldagebiet zeigen sich im Edergebiet Abnahmen, während an den übrigen Pegeln kaum Veränderungen zu verzeichnen sind. Größere Abnahmen um rund 10 % zeigen sich im östlichsten untersuchten Einzugsgebiet, der der Werra zufließenden Ulster. Während die Abflussprojektionen auf Basis gröberer statistischer Regionalmodelle durchweg Abnahmen des mittleren Niedrigwasserabflusses im Bereich von rund –15 % zeigten, erweitert sich die Spannbreite möglicher Entwicklungen auch zu zum Teil noch größeren Abnahmen, regional aber auch um leichte Zunahmen des Niedrigwasserabflusses.

Die mittels extremwertstatistischer Analysen ermittelten Veränderungen der Hochwasserquantile HQ10 und HQ100 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, einzelne deutlich stärkere Zunahmen in kleinen Einzugsgebieten sollten aus methodischen Gründen nicht überinterpretiert werden. Ähnlich wie bei den MQ-Werten treten größere Zunahmen der Hochwasserkenngröße im Maingebiet auf, wo alle Pegel Zunahmen in einer Größenordnung von etwa 20 % aufweisen. Die höchsten Zunahmen treffen für Gewässer des Odenwalds (Gersprenz, Mümling und Weschnitz) zu.

Die Verteilung der Veränderungen und die gesamt aufgetretenen Spannen der Abflusskennwerte MNQ, MQ und MHQ sind in Abb. 9 als Boxplots (Boxmitte = Median, Boxober- bzw. Untergrenze = 75% bzw. 25 %-Perzentil, die Whisker zeigen Minimum und Maximum der Werte) dargestellt.

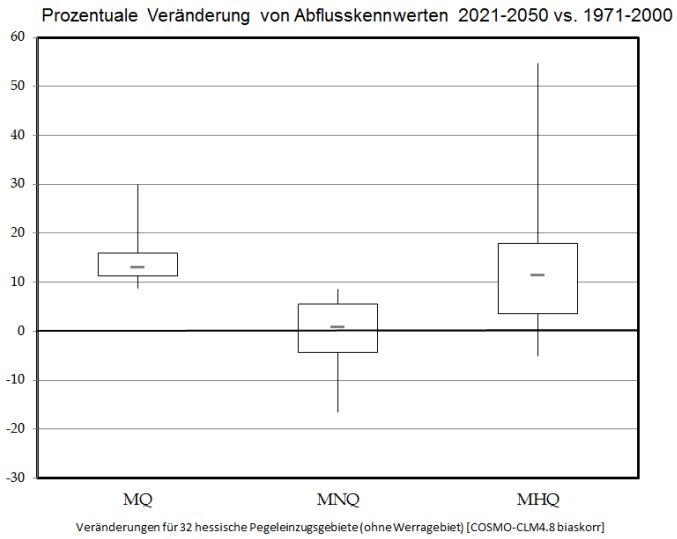


Abbildung 9. Boxplots der Veränderung der Abflusskennwerte für 32 hessische Pegel.

3.2 Bandbereite der Entwicklungsmöglichkeiten der Grundwasserneubildung

Wie bei der Simulation der historischen Zeitreihen wurde mittels des Bodenwasserhaushaltsmodells GWN-BW die Grundwasserneubildung auch für verschiedene Klimaprojektionen modelliert.
In Abb. 10 sind die Bandbreite und die dekadische Variabilität der Grundwasserneubildung dargestellt. Die schwarze Linie zeigt die beobachtete Variabilität der Grundwasserneubildung zwischen 1960 und 2010. Die übrigen Linien zeigen die Grundwasserneubildung verschiedener Wettreg-Projektionen bis zum Jahr 2100 und einer Star-Projektion (in gelb) bis zum Jahr 2050.

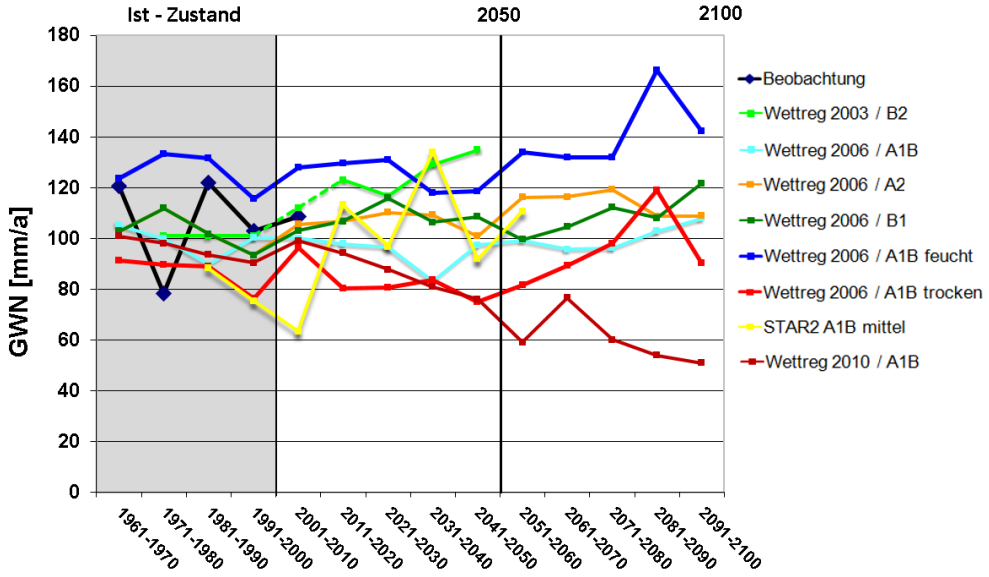


Abbildung 10. Projektionen der Grundwasserneubildung in der Zukunft.

Bis Mitte des Jahrhunderts liegt die Bandbreite der Wettreg-Projektionen innerhalb der Schwankungsbreite der Beobachtung in der Vergangenheit (ca. 80 bis 120 mm im Landesmittel). Nur die STAR-Daten zeigen eine größere Variabilität. Auf Grundlage der bisher betrachteten Klimaprojektionen ist für Hessen bis zum Jahr 2050 kein eindeutiger Trend für die

Grundwasserneubildung erkennbar Bis Ende des Jahrhunderts nimmt die Bandbreite deutlich zu und es zeigen sich unterschiedlich gerichtete Klimasignale. Allerdings ist das Ensemble zu klein, um statistische Aussagen zu treffen, es beinhaltet zudem ausschließlich statistische Regionalmodelle auf Basis eines globalen Klimamodells. Die ersten Ergebnisse stammen aus dem Jahr 2005 und beruhen auf dem B2 Szenario, Wettreg-2003 und ECHAM4 (grüne Linie). In diesem Fall wäre von einer Zunahme der Grundwasserneubildung um plus 25% bis zur Mitte des Jahrhunderts auszugehen. Die letzten Ergebnisse aus dem Jahr 2014 beruhen auf dem A1B Szenario, Wettreg 2010 und ECHAM5. In diesem Fall wäre von einer Abnahme der Grundwasserneubildung um 41% bis Ende des Jahrhunderts auszugehen.

4. Zusammenfassung und Bewertung der vorliegenden Ergebnisse

Aus den Ergebnissen zu den Oberflächengewässern lässt sich für Hessen in der nahen Zukunft i. d. R. eine Umverteilung mit Mehrabflüssen im Winter- und geringeren Abflüssen im Sommerhalbjahr ableiten. 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. Über alle untersuchten Projektionen hinweg und unter Berücksichtigung der Vulnerabilitäten sollte für die Veränderung von Niedrigwasserwerten (MNQ) eher von Abnahmen in einer Größenordnung von -15 % ausgegangen werden, im Sommerhalbjahr können diese Werte um -10 bis -20 % abnehmen, im Winterhalbjahr um 10 bis 30 % zunehmen. Eine Verschärfung der Hochwassersituation scheint wahrscheinlich, bedarf aber zur Quantifizierung weiterer Absicherungen. Auf Basis der vorliegenden Untersuchungen kann von zunehmenden MHQ-Werten für das Winterhalbjahr in einem Bereich von bis zu 30 % ausgegangen werden. Hochwasserextremwerte HQ10 bis HQ100 können sich in einem Bereich von 5 bis 25 % erhöhen. Besondere Vorsicht ist bei der Interpretation von Ergebnissen kleinerer Einzugsgebiete geboten, aber auch die regionalen Ergebnisse sollten nicht überinterpretiert werden, zumal sich bei unterschiedlichen Abflussprojektionen durchaus unterschiedliche räumliche Muster ergeben. Dabei ist allerdings die Tendenz zu geringeren Abflusszunahmen und z. T. zu Abflussabnahmen in Nord- und Osthessen ebenso wie die Tendenz zu ausgeprägten Abflusszunahmen in Südhessen in allen untersuchten Projektionen zu erkennen. Hinsichtlich möglicher Anpassungsmaßnahmen können auf Basis der vorliegenden Untersuchungen oben angegebene Veränderungskorridore abgeleitet und angewandt 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 nehmen die Bandbreite möglicher Entwicklungen der Grundwasserneubildung und damit auch die Unsicherheiten deutlich zu.

Da bisher kein eindeutiger Trend für die Entwicklung der Grundwasserneubildung erkennbar ist, kann diese zu- oder abnehmen. Einseitige Anpassungsmaßnahmen könnten demzufolge sogar kontraproduktiv sein. Anpassungsmaßnahmen durch veränderbare Bewirtschaftungsmaßnahmen scheinen hier eher angebracht. Das verwendete Ensemble erscheint zu klein für statistisch belastbare Aussagen und es basiert wie auch die Abflussprojektionen auf nur einem Globalmodell (ECHAM).

Trotz der Unsicherheiten ist es jedoch wahrscheinlich, dass bei feuchteren Wintern und trockeneren Sommern die Grundwasserneubildung und die Grundwasserstände gegenüber heute größeren saisonalen Schwankungen unterliegen werden. Aufgrund der trockeneren und wärmeren Sommer ist zukünftig mit rückläufigen Quellschüttungen zu rechnen, so dass die auf eigenen, örtlichen Gewinnungsanlagen beruhende, dezentrale Trinkwasserversor-

gung durch Quellwasser in den Mittelgebirgen während der Sommermonate zunehmend gefährdet sein dürfte. Bei wärmeren und trockeneren Sommern muss auch damit gerechnet werden, dass der Spitzenwasserbedarf ansteigt. Es ist auch davon auszugehen, dass der Bedarf an Beregnungswasser in der Landwirtschaft im Hessischen Ried infolge trockenerer und wärmerer Sommer sowie verlängerter Vegetationsperioden deutlich zunehmen wird. Ein erheblicher Mehrbedarf an Beregnungswasser könnte künftig eine Konkurrenzsituation zwischen Trinkwasserversorgung und landwirtschaftlicher Beregnung bewirken.

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 (HMUKLV, 2017). Eine Überprüfung und ggf. Nachjustierung der möglichen Veränderungskorridore zu hydrologischen Fragestellungen ist dabei auf Basis breiterer Ensemble-Untersuchungen und der Heranziehung weiterer globaler Antriebsmodelle anzustreben. Allerdings werden Anpassungsmaßnahmen immer auf Basis von letztlich nicht absicherbaren bzw. im Vergleich zu der eher robusten Temperaturentwicklung (was die Richtung anbelangt) mit deutlich unsichereren Änderungsannahmen für zukünftige niederschlagsbedingte Entwicklungen zu diskutieren sein. Insbesondere durch die geographische Lage Hessens im Übergangsbereich von signifikanter Niederschlagsabnahme in Südeuropa und signifikanter Niederschlagszunahme in Nordeuropa wird sich daran auch in Zukunft vermutlich wenig ändern.

5. Literatur

Brahmer, G. (2006): Auswirkungen des Klimawandels auf die Abflussverhältnisse hessischer Gewässer. Wasser und Abfall 12, S. 19-24.

HLNUG (2016), Fachzentrum Klimawandel: (http://www.hlnug.de/themen/fachzentrum-klima-

wandel/klimawandel/klimaprojektion-hessen.html).

HMUKLV (2017), Hessisches Ministerium für Umwelt, Klimaschutz, Landwirtschaft und Verbraucherschutz_2017:
https://umweltministerium.hessen.de/sites/default/files/media/hmuelv/integrierter_klimaschutzplan_web_barrierefrei.pdf.

IAWG (2009): Untersuchungen zur Instationarität von Abflusszeitreihen in Hessen, unveröff. Bericht, Ottobrunn, 2009.

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

Komischke, H. und Ebert, C. (2012): Regionale Klimaprojektionen bei KLIWA. In: AK KLIWA (Hrsg.): 5. KLIWA-Symposium am 06. Und 07. Dezember 2012 in Würzburg. KLIWA Berichte, Heft 19, S. 67 – 83.

Rockel, B., Will, A., Hense, A. (2008): The regional climate model COSMO-CLM (CCLM). Meteorologische Zeitschrift 17(4), S. 347–348.

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

Prof. Dr. Ralf Ludwig
Ludwig-Maximilians-Universität München

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 (500 m) 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*

Dr. Franz Schöll
Bundesanstalt für Gewässerkunde

1. Einleitung

Die Körbchenmuschel *Corbicula fluminea* (Abb. 1), ursprünglich in australasiatischen Faunenregnen 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 (Abb. 2), 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 (Grabow 1998, Schöll 2000, Müller et al. 2007), in Anlehnung an Beobachtungen aus Nordamerika (McMahon 1983).



Abbildung 1. Körbchenmuschel Corbicula fluminea (Foto: K. Grabow).

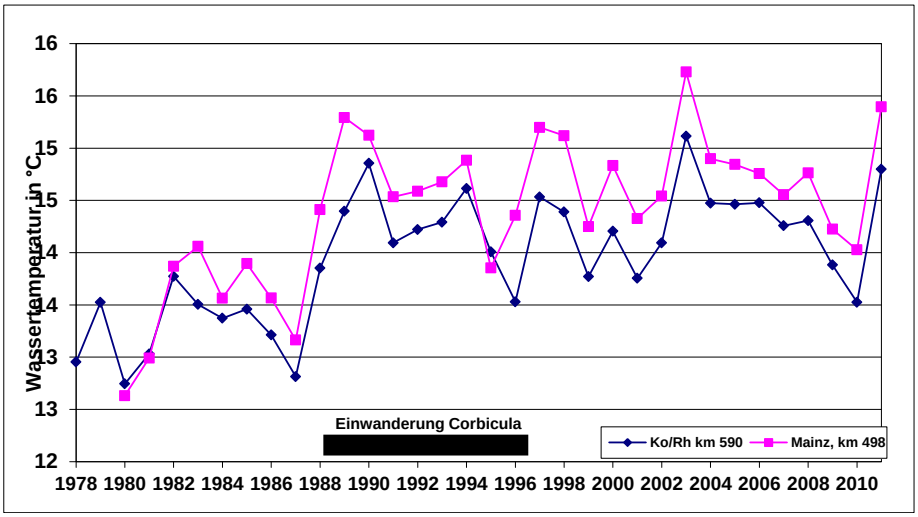


Abbildung 2. Mittlere Wassertemperaturen des Rheins an den Messstellen Koblenz und Mainz im langjährigen Vergleich (Keller 2013). Deutlich ist an allen Messstellen der Temperaturanstieg Ende der 1980er Jahre zu erkennen. Die Besiedlung des schiffbaren Rheins durch Corbicula fluminea erfolgte stromaufwärts zwischen 1986 (Niederlande) und 1996 (Basel) (Schöll 2000).

Allgemein gelten längere Temperaturperioden von unter 2 °C für *Corbicula* als kritisch (Mattice & Dye 1976, McMahon 1983). Laboruntersuchungen zeigen ebenfalls eine Abhängigkeit der Mortalitätsrate von der Wassertemperatur, allerdings erheblich weniger stark als vermutet (Müller & Baur 2011). Zusätzlich kommt es bei sehr kalten Winterperioden zu einer verringerten Reproduktion von *Corbicula* in der darauffolgenden Reproduktionsphase (Weitere et al. 2009; Viergutz et al. 2012). Um die Übertragbarkeit dieser Labordaten im Freiland zu prüfen, wurden Häufigkeit und Präsenz von *Corbicula* an verschiedenen Bundeswasserstraßen in Abhängigkeit von der vorherrschenden Wassertemperatur analysiert.

2. Material und Methoden

Analysiert wurden Tagesmittelwerte der Temperatur zwischen 2000 und 2010 an verschiedenen Messpegeln. Die Daten stammen aus den Datenbanken der jeweiligen Bundesländer bzw. des Bundes (Tab. 1). Daten zum Vorkommen von *Corbicula* wurden in verschiedenen Monitoringprogrammen der Bundesanstalt für Gewässerkunde erhoben. Dabei wurden in regelmäßigen Abständen (in der Regel alle 10-20 km) an Bundeswasserstraßen mit dem Schwimmgreifer Sedimentproben genommen und auf ihre Besiedlung hin untersucht. Die Untersuchungen wurden zwischen 2007 und 2010 durchgeführt (Rhein 2010, Main 2007, 2010, Neckar 2008 u. 2009, Mosel 2010, Saar 2010, Weser 2008, Elbe 2009, Oder 2007, Donau 2007 und 2010). Zur Interpretation der Ergebnisse wurden am Main auch Daten von 2011 und an der Oder von 2012 herangezogen. Daneben wurde auch die vorhandene Literatur gesichtet.

Tabelle 1. Messpegel mit Angabe der durchschnittlichen Anzahl von Tagen, an welchen bestimmte Wassertemperaturen (1, 2, 5 °C) zwischen 2000 und 2010 unterschritten wurden. Ebenfalls angegeben sind die jeweiligen Minima und Maxima/Jahr.

	<1°C			<2°C			<5°C		
	Min. (d/Jahr)	Max. (d/Jahr)	Jahresdurchschnitt	Min. (d/Jahr)	Max. (d/Jahr)	Jahresdurchschnitt	Min. (d/Jahr)	Max. (d/Jahr)	Jahresdurchschnitt
Donau, Passau	0	20	6	6	35	20	50	113	81
Donau, Vilshofen	0	15	3	0	33	15	33	112	76
Donau, Deggendorf	0	29	8	8	55	25	53	114	85
Elbe, Schmilka	0	10	3	0	30	13	19	105	65
Elbe, Schnackenburg	0	55	20	9	81	37	60	110	85
Main, Schweinfurt	0	27	8	2	55	23	48	111	85
Main, Kleinheubach	0	27	7	0	43	17	27	108	71
Main, Bischofsheim	0	1	0	0	13	3	14	93	49
Mosel, Perl	0	0	0	0	2	0	1	75	32
Mosel, Koblenz	0	14	3	0	23	7	19	93	52
Neckar, Gundelsheim	0	0	0	0	5	1	7	85	282
Neckar, Mannheim	0	9	1	0	13	2	3	85	27
Rhein, Weil	0	0	0	0	0	0	0	49	4
Rhein, Karlsruhe	0	0	0	0	0	0	6	56	27
Rhein, Worms	0	0	0	0	0	0	0	11	3
Rhein, Mainz	0	0	0	0	0	0	0	53	5
Rhein, Koblenz	0	0	0	0	1	0	3	52	18
Rhein, Lobith (NL)	0	0	0	0	3	0	0	68	6
Oder, Frankfurt	0	85	28	12	91	45	80	110	93
Saar,Kanzem	0	13	1	0	18	3	6	73	43
Weser, Hemeln*	0	11	4	8	33	19	46	110	67
Weser, Petershagen	0	0	0	0	6	1	10	68	32
Weser, Porta	0	0	0	0	8	2	10	100	40

Quelle: Sächsisches Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie: Elbe, Schmilka; Niedersächsischer Landesbetrieb für Wasserwirtschaft, Küsten- und Naturschutz: Weser, Hemeln u. Porta, Elbe Schnackenburg; Landesamt für Umwelt Bayern: Donau, Deggendorf, Vilshofen und Passau, Main, Schweinfurt und Kleinheubach; Hessisches Landesamt für Umwelt und Geologie: Main, Bischofsheim; Landesamt für Umwelt Rheinland-Pfalz: Rhein, Worms und Mainz, Mosel, Perl, Saar, Kanzem; Bundesanstalt für Gewässerkunde: Mosel, Koblenz, Rhein, Koblenz; Landesamt für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz Nordrhein-Westfalen: Rhein, Lobith; Landesamt für Umwelt, Gesundheit und Verbraucherschutz Brandenburg: Oder, Frankfurt; Landesanstalt für Umwelt Baden-Württemberg: Rhein, Karlsruhe, Neckar, Mannheim und Gundelsheim. * Daten von 2000-2003, 2009, 2010.

3. Ergebnisse

3.1 Temperatur

Die Temperatur wurde nach Anzahl von Tagen ausgewertet, an welchen bestimmte Wassertemperaturen (5, 2 und 1 °C) unterschritten wurden (Tab. 1, Abb. 3). In Abb. 3 sind die Pegel nach abnehmender Kälte angeordnet.

Es überrascht nicht, dass die Wassertemperatur von der geographischen Lage und der Einleitung von Kühlwasser abhängig ist. Am kältesten sind die unter kontinentalem Einfluss stehende Oder (Frankfurt) sowie die Mittelelbe (Schnackenburg) während die obere Elbe (Schmilka) offensichtlich wegen Einleitungen in Tschechien wärmer ist.

Im Rhein mit dem dort vorherrschenden wärmeren atlantischem Klima und zahlreichen Kühlwassereinleitungen kommen praktisch keine Tage unter 2 °C mehr vor (Karlsruhe, Worms, Mainz, Koblenz, Lobith). Der Main (Schweinfurt, Kleinheubach, Bischofsheim) ist insgesamt kälter als der Neckar (Gundelsheim, Mannheim). Seine Wassertemperatur liegt an der Mündung etwa 1 °C unter der des Rheins während der Neckar bis zur Stilllegung des Atomkraftwerks Obrigheim das Rheinwasser um ca. 1 °C erwärmte. Danach führte auch der Neckar dem Rhein kühleres Wassers zu (delta T = -0,72 °C). Die Niedrig-Temperaturen der oberen Mosel (Perl), die durch Wärmeeinleitung beeinflusst ist (AKW Cattenom) ähneln der des Rheins. Das Wasser der Mosel kühlt sich aber bis zur Mündung bei Koblenz ab und ähnelt den Temperaturen der unteren Saar (Kanzem).

Die Donau, südlich gelegen, hat ein relativ niedriges Temperaturniveau (Deggendorf). Der Zufluss der Isar, die durch einKernkraftwerk erwärmt wird (AKW Ohu), führt zu einem Temperaturanstieg (Vilshofen) in der Donau. Bis zum Pegel Passau ist eine leichte Abkühlung festzustellen -. Das Temperaturregime der Weser ist zweigeteilt. Bis zum AKW Grohnde relativ kalt (Hemeln), fehlen winterliche Wassertemperaturen flussabwärts (Petershagen).

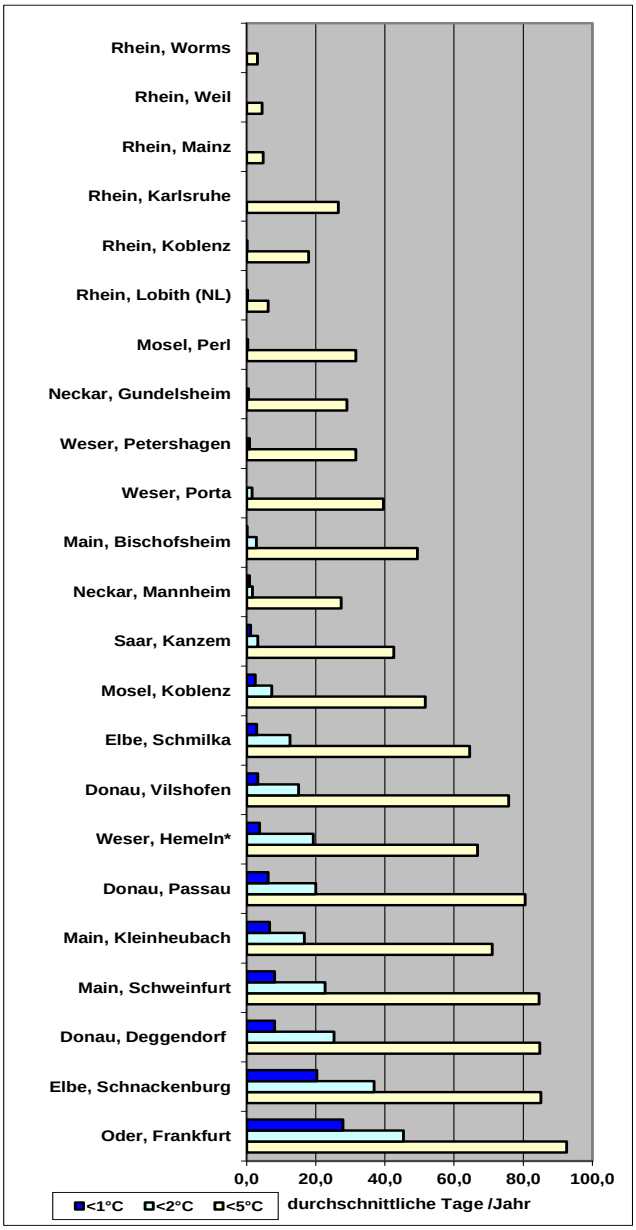


Abbildung 3. Messpegel mit Angabe der durchschnittlichen Anzahl von Tagen/Jahr, an welchen bestimmte Wassertemperaturen (1, 2, 5 °C) zwischen 2000 und 2010 unterschritten wurden. Anordnung von links nach rechts nach abnehmender Kälte (zuerst 1°C, dann 2°C und 5°C). * Daten von 2000-2003, 2009, 2010.

3.2 Vorkommen von *Corbicula fluminea*

Eine statistische Auswertung von Häufigkeiten aus dem allgemeinen Monitoring ist mit gewissen Unsicherheiten verbunden, da *Corbicula* verschiedene Habitate mit unterschiedlicher Präferenz besiedelt. Daneben müssen auch natürliche biozönotische Bestandsschwankungen und zufallsbedingten Verteilung der Organismen beachtet werden. wie sie in großen Fließgewässern häufig vorkommen. Sinnvoll erscheint für diese grobe Auswertung daher eine dreistufige Häufigkeit (vereinzelt = bis 5 Ind./m^2, wenig = bis 30 Ind./m^2, viel = über 30 Ind./m^2), wobei in der Stufe „viel“ auch Individuendichten von über 1000 Ind./m^2 erreicht werden können (Abb. 4).

Am Rhein und seinen Nebengewässern Neckar, Main, Mosel, Saar, gehört die Muschel zu den häufigsten Mollusken. Die Tiere besiedeln insbesondere die sandig-kiesige Stromsohle, wobei sie auf Grund ihrer dicken Schalen gegen den Geschiebetrieb relativ gut geschützt sind. Durchschnittliche Besiedlungsdichten von über 500 Ind./ m^2 sind keine Seltenheit, wobei lokal Abundanzen von mehr als 1000 Ind./ m^2 zu beobachten sind. Insbesondere unterhalb von Warmwassereinleitungen entwickelt die Art Bestände, die selbst mit „massenhaft“ nur unzureichend beschrieben werden können.

Die winterkalte Oder wäre aufgrund ihrer sandig-kiesigen Stromsohle hervorragend als *Corbicula*-Habitat geeignet, die Muschel kommt aber dort nur sehr vereinzelt vor. Besonders deutlich ist die temperaturabhängige Verbreitung von *Corbicula* innerhalb eines Flusses wie der Weser und der Elbe. In der wärmeren oberen Elbe ist die Art relativ häufig, während sie im weiteren kälteren Flussverlauf abnimmt und nicht mehr die Konstanz und Abundanz wie im Oberlauf erreicht. Ein zweiteiliges Verteilungsmuster von *Corbicula* ergibt sich auch in der Weser, allerdings in umgekehrter Form. Im kalten Oberlauf bis zum KKW Grohnde ist die Art nur lokal zu finden, darunter aber ist die Muschel häufig und erreicht mehrjährige Stadien. Auch an der Donau konnte sich *Corbicula* etablieren.

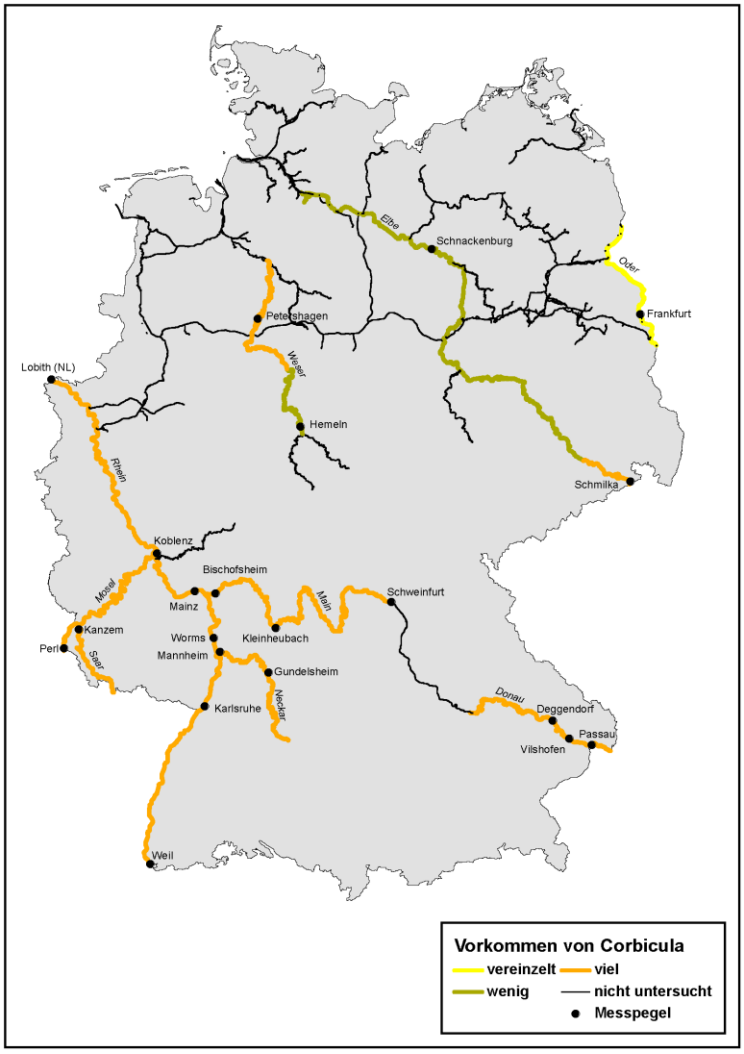


Abbildung 4. Häufigkeit von *Corbicula fluminea* und Standorte der Messpegel.

3.3 Temperatur als verbreitungsregulierender Faktor von *Corbicula*

Die Vermutung, dass für die Verbreitung von *Corbicula* die Minimaltemperatur des jeweiligen Gewässers eine entscheidende Rolle spielt, wird auch durch diese Untersuchung untermauert. Alle Flüsse oder Flussabschnitte, die unter Einfluss von Kühlwassereinleitungen stehen, werden von *Corbicula* dauerhaft in allen Größenklassen besiedelt. In den Abschnitten, die nicht durch Kühlwasser beeinflusst werden, hängt das Vorkommen von *Corbicula* von den Temperaturen im Winter ab. In der kalten Oder können sich nur in milden Wintern lokal Kleinbestände, die vorwiegend der 0+ Generation zuzuordnen sind, bilden, die aber nicht dauerhaft sind und bei entsprechender Kälte wieder absterben. Solche Massensterben nach längeren Kälteperioden wurden z. B. an der oberen Weser beobachtet.

Ab welcher Einwirkungsdauer niedrige Temperaturen auf Populationsebene sichtbare Effekte erzielen, lässt sich auf Grundlage dieser Untersuchung nur grob abschätzen, da die Einwirkungszeit von Winter zu Winter sehr unterschiedlich ist (an der Oder z. B. traten zwischen 2000 und 2010 je nach Winter zwischen zwölf und 91 Tagen Temperaturen unter 2°C auf, Tab. 1) und nicht zu jedem Jahr *Corbicula*-Daten vorliegen. Im freifließenden Fluss können schon Temperaturen, wie sie an der oberen Weser vorhanden sind, den Ansiedlungserfolg von *Corbicula* beeinträchtigen. Deutlichere langfristige Effekte lassen sich etwa ab dem Temperaturregime der Elbe bei Schnackenburg d. h. nach durchschnittlich (2000 - 2010) 20 Tagen unter 1°C und 35 Tagen unter 2 °C abschätzen.

In Hälterungsversuchen der Universität Basel wurde ebenfalls eine temperaturabhängige Mortalität von *Corbicula* festgestellt, allerdings lebten nach einem Monat noch sämtliche Muscheln, welche bei Wassertemperaturen von 0 und 2°C gehalten worden waren. Nach zwei Monaten in 0-grädigem Wasser lebten noch 45 % der Muscheln, bei 2°C noch 65 % (Müller und Baur 2011). Die Ergebnisse im Freiland lassen vermuten, dass für die Verbreitung von *Corbicula* die direkte Mortalität eine untergeordnete Rolle gegenüber der verringerten Reproduktion nach kalten Winterperioden spielt.

Bedeutung für das Vorkommen von *C. fluminea* besitzen sicherlich neben der Dauer der Niedrigtemperaturperiode die Stauregulierung und Grundwasserzutritt. An der Donau hat sich die Körbchenmuschel etabliert, obwohl die Donau ein ähnlich niedrigeres Temperaturniveau aufweist die obere Weser. Möglicherweise liegt an der Donau in grundwasserbeeinflussten Fließstrecken sowie in den staugeregulierten Bereichen das Temperaturniveau über der Stromsohle im Winter deutlich über dem des im übrigen Wasserkörpers.

4. Literatur

Grabow, K. (1998): *Corbicula "fluminalis*" in der Havel bei Berlin. - Lauterbornia 32, 15-16. Dinkelscherben.

Keller, M.(2013): Entwicklung der Rheinwassertemperaturen in den letzten Jahrzehnten. – Vortrag bei dem IKSR-Workshop: Auswirkungen des Klimawandels auf das Flussgebiet Rhein (30. und 31. Januar 2013 in Bonn).

Mattice, J.S. and Dye, L.L. (1976): Thermal tolerance of adult Asiatic clam. In: Esch, G.W., McFarlane, R.W. (eds) Thermal Ecology 2, Washington DC, 130-135.

McMahon, R.F. (1983): Ecology of the invasive pest bivalve *Corbicula*. In: RUSSEL-HUNTER, W.D. (Hrsg.): The Mollusca, Vol. 6 Ecology, 505-561, (Academic Press) New York.

Müller, O. and Baur, B. (2011) Survival of the Invasive Clam *Corbicula fluminea* (Müller) in Response to Winter Water Temperature Malacologia, 53(2), 367-371. 2011.

Müller, O., Herpich, J., Rosenberger, S., Möller, F., Müller, N., Noske, M. und Jähnert, K. (2007): Klimatische Begrenzung nach Osten? - Aktuelles Verbreitungsmuster von *Corbicula fluminea* in der Strom-Oder (Brandenburg). – Lauterbornia 59, 133-139.

Schöll, F. (2000): Die Temperatur als verbreitungsregulierender Faktor von *Corbicula fluminea* (O.F. Müller 1774). - Hydrologie und Wasserbewirtschaftung 44, 318-321.

Viergutz, C., Linn, C. and Weitere, M. (2012) Intra- and interannual variability surpasses direct temperature effects on the clearance rates of the invasive clam *Corbicula fluminea*, Marine Biology, 159, 2379-2387.

Weitere, M., Vohmann, A., Schulz, N., Linn, C., Dietrich, D. and Arndt, H. (2009): Linking environmental warming to the fitness of the invasive clam *Corbicula fluminea*. Global Change Biology, 15, 2838-2851.

Resümee und Schlusswort

Jürgen Reich
Ministerium für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft Baden-Württemberg

Mit dem zweitägigen Fachsymposium ist es gelungen, das breite Spektrum der Arbeitsbereiche des KLIWA-Projektverbundes sowie die daraus gewonnenen Erkenntnisse hinsichtlich konkreter regionaler Auswirkungen des Klimawandels für Süddeutschland einem breiten, fachlich interessierten Teilnehmerkreis zu präsentieren. So wie auch in dem vorangegangenen Symposium 2012 wurden die Ergebnisse aus Klimaprojektionen und Wirkungsmodellen vorgestellt, besonders betroffene wasserwirtschaftliche Einflussgrößen beleuchtet, Erkenntnisse für eine zielgerichtete Anpassungsstrategie vorgestellt und Handlungsfelder für eine zeitnahe Anpassung aufgezeigt. Der hiermit vorliegende Tagungsband gibt einen guten Überblick über die breit aufgestellten Themen des KLIWA-Projektverbundes, das methodische Vorgehen, aktuelle Erkenntnisse und Aktivitäten, die in den letzten fünf Jahren erarbeiteten Untersuchungsergebnisse sowie zukünftige Arbeitsfelder des Kooperationsvorhabens KLIWA.

Der erste Tag des Symposiums hat dabei insbesondere den wissenschaftlichen Hintergrund beleuchtet. Es wurde gezeigt, dass durch die Erweiterung und Verfeinerung regionaler Klimamodelle die Zukunftsprognosen angepasst und auf eine breitere Basis gestellt werden konnten. Dies ermöglicht, die Belastbarkeit von Zukunftsprojektionen sowie die zukünftigen wasserwirtschaftlichen Handlungsfelder besser einschätzen und beschreiben zu können und robuste Aussagen für notwendige Anpassungsmaßnahmen zu ermitteln. Es wurden Tendenzen, Trends und Entwicklungen der Klimaveränderungen beschrieben und aufgezeigt, wie die Auswirkungen des Klimawandels im Kooperationsverbund recherchiert und dokumentiert werden. Es wurde deutlich, dass die Klimaveränderungen – wie der Name sagt – keine statische, sondern eine variable Größe ist. Daher ist diese zwangsläufig mit einigen Unsicherheiten behaftet. Dies darf uns jedoch nicht daran hindern, an diesen wichtigen Themen weiterzuarbeiten und Handlungskonzepte zu erstellen, an aktuelle Erkenntnisse anzupassen und vor allem auch umzusetzen.

Das vorrangige Ziel des Vorhabens KLIWA ist, basierend auf den Erkenntnissen über Ausmaß und Auswirkungen des regionalen Klimawandels gezielt Handlungsempfehlungen für die Wasserwirtschaft abzuleiten. Diese Handlungsempfehlungen sollen die Grundlage für nachhaltige und integrale Vorsorgekonzepte bilden, die der frühzeitigen Anpassung vorhandener wasserwirtschaftlicher Systeme an die zu erwartenden Veränderungen in den verschiedenen betroffenen Bereichen dienen.

Am zweiten Tag des Symposiums wurden verschiedene Beispiele für vorhandene und geplante Konzepte vorgetragen und deren Wirkungen aufgezeigt.

Während der Arbeitsschwerpunkt im KLIWA-Verbund viele Jahre vor allem auf Themen wie Hoch- und Niedrigwasserabfluss, Hochwasserschutzmaßnahmen und -strategien, Änderungen im Niederschlagsverhalten lag, stehen heute aufgrund der Ereignisse der letzten Jahre die Themen Starkregen, Sturzfluten und Erosion im ländlichen Raum, Niedrigwassermanagement und Trinkwasserversorgung, Gewässerökologie und Anpassung der Gewässerökosysteme im Vordergrund. So hat insbesondere der zweite Tag deutlich gezeigt, dass viele neue Themenfelder und Betroffenheit durch den Klimawandel existieren. Diese müssen untersucht und Handlungsoptionen erarbeitet werden. Zum Beispiel wurde über hochaufgelöste Kartierungen des Starkregenrisikos mit Hilfe des Wetterradars, Erosionsmodellierung für den ländlichen Raum und das neue Klimamonitoring anhand des KLIWA-Index Makrozoobenthos berichtet. Bei diesen Themen stehen die Arbeiten teilweise noch sehr am Anfang. Für das gemeinsame Klimamonitoring der Länder wurde durch Herrn Minister Untersteller am Symposium der offizielle Start bekannt gegeben. Dies zeigt sehr anschaulich,

dass der KLIWA-Verbund sich inhaltlich immer weiterentwickelt und die Arbeitsschwerpunkte an aktuelle Erkenntnisse anpasst. Klimawandel kann - und nach diesen beiden Tagen wird es ganz eindeutig - nicht mehr geleugnet werden. Das haben Herr Prof. Dr. Lesch und Herr Dr. Becker anschaulich beschrieben. Die Ministerin Frau Scharf, Herr Staatssekretär Dr. Griese sowie Minister Untersteller haben ausgeführt, wie groß die Betroffenheit in den Ländern schon heute durch den Klimawandel sind, welche Herausforderungen und politische Aufgaben sich daraus ergeben und welche Maßnahmen sich bereits heute in der Umsetzung befinden. Die Arbeiten im KLIWA-Verbund sind dabei eine wesentliche Grundlage, um Handlungsoptionen und Empfehlungen zur Eindämmung und Anpassung an den Klimawandel zu entwickeln. Einig sind wir uns darüber, dass zur Umsetzung der Maßnahmen alle Menschen gefordert sind und nur ein entschlossenes und gemeinsames Handeln von Politik und Bevölkerung zum Ziel führen wird.

Vor diesem Hintergrund erscheint es schwierig zu glauben, dass es immer noch einen hohen Anteil an Klimawandelskeptikern in der Bevölkerung und in der Politik gibt. Daraus ergibt sich eine Aufgabe, der sich der KLIWA-Verbund in Zukunft noch gezielter stellen sollte: eine geeignete Kommunikation über die Ergebnisse des Klimawandels und erforderliche Handlungsfelder über den Bereich der bisher beteiligten Fachleute und Politiker hinaus. In diesem Zusammenhang hat mir heute Nachmittag eine neue Karte gut gefallen. Wir kennen bereits Starkregengefahrenkarten und Starkregenhinweiskarten, aber eine Wasserknappheitshinweiskarte ist neu und erscheint leicht verständlich. Mit solchen plakativen Botschaften sollten wir versuchen unsere Zielgruppe zu erweitern, um dem Klimawandel aber auch den Klimawandelskeptikern geschlossen entgegen treten zu können.

Zum Schluss darf ich mich bedanken, bei den Kollegen des KLIWA-Projektverbundes für die langjährige engagierte Arbeit, bei den Kolleginnen und Kollegen, die das Symposium so hervorragend organisiert haben, bei allen Referenten für die interessanten Vorträge und bei Ihnen, sehr geehrtes Auditorium, für Ihre Aufmerksamkeit und die regen konstruktiven Diskussionen. Ich hoffe, wir sehen uns zum 7. KLIWA-Symposium wieder, dann voraussichtlich unter der Schirmherrschaft von Rheinland-Pfalz.

Bis dahin alles Gute, bleiben sie uns gewogen und kommen sie gut nach Hause.

Verzeichnis der Referenten

Dr. Gerhard Brahmer Hessisches Landesamt für Naturschutz, Umwelt und Geologie Rheingaustraße 186 65203 Wiesbaden Gerhard.Brahmer@hlnug.hessen.de	Hendrik Buiteveld Rijkswaterstaat Postbus 2232 3500 GE Utrecht, NL hendrik.buiteveld@rws.nl
Dr. Jochen Fischer Landesamt für Umwelt Rheinland-Pfalz Kaiser-Friedrich-Straße 7 55116 Mainz Jochen.Fischer@lfu.rlp.de	Maria Foltyn Bayerisches Landesamt für Umwelt Hans-Högn-Str. 12 95030 Hof Maria.Foltyn@lfu.bayern.de
Thomas Gudera Landesanstalt für Umwelt Baden-Württemberg Griesbachstraße 1 76185 Karlsruhe Thomas.Gudera@lubw.bwl.de	Dr. Ingo Haag-Wanka HYDRON - Ingenieurgesellschaft für Umwelt und Wasserwirtschaft mbH Ritterstraße 9 76137 Karlsruhe Ingo.Haag@hydron-gmbh.de
Martin Halle umweltbüro essen Rellinghauser Str.334 F 45136 Essen martin.halle@umweltbuero-essen.de	Wolfgang Hennegriff Landratsamt Rastatt Am Schlossplatz 5 76437 Rastatt w.hennegriff@landkreis-rastatt.de
Christian Iber Landesamt für Umwelt Rheinland-Pfalz Kaiser-Friedrich-Straße 7 55116 Mainz Christian.Iber@lfu.rlp.de	Holger Komischke Bayerisches Landesamt für Umwelt Hans-Högn-Str. 12 95030 Hof Holger.Komischke@lfu.bayern.de

Dr. Benjamin Kopp Bayerisches Landesamt für Umwelt Hans-Högn-Str. 12 95030 Hof Benjamin.Kopp@lfu.bayern.de	Prof. Dr. Ralf Ludwig Ludwig-Maximilians-Universität München (LMU) Luisenstraße 37 80333 München r.ludwig@lmu.de
Dr. Jörg Neumann Bayerisches Landesamt für Umwelt Hans-Högn-Str. 12 95030 Hof Jörg.Neumann@lfu.bayern.de	Dr. Monika Rauthe Deutscher Wetterdienst Frankfurter Str. 135 63067 Offenbach Monika.Rauthe@dwd.de
Dr. Gerd Schädler Karlsruher Institut für Technologie (KIT) 76128 Karlsruhe Gerd.Schaedler@kit.edu	Dr. Jochen Schaumburg Bayerisches Landesamt für Umwelt Hans-Högn-Str. 12 95030 Hof jochen.schaumburg@lfu.bayern.de
Dr. Hans Schipper Karlsruher Institut für Technologie (KIT) Hermann-von-Helmholtz-Platz 1 76344 Eggenstein-Leopoldshafen schipper@kit.edu	Petra Schmocker-Fackel Bundesamt für Umwelt BAFU 3003 Bern, CH petra.schmocker-fackel@bafu.admin.ch
Dr. Franz Schöll Bundesanstalt für Gewässerkunde Am Mainzer Tor 1 56068 Koblenz Schoell@bafg.de	Dr. Michael Stölzle Albert-Ludwigs-University of Freiburg Friedrichstraße 39 79098 Freiburg michael.stoelzle@hydrology.uni-freiburg.de
Prof. Dr. Markus Weiler Albert-Ludwigs-University of Freiburg Friedrichstraße 39 79098 Freiburg markus.weiler@hydrology.uni-freiburg.de	Dr. Tanja Winterrath Deutscher Wetterdienst Frankfurter Str. 135 63067 Offenbach tanja.winterrath@dwd.de

Bisher erschienene KLIWA-Berichte

Herausgeber: Arbeitskreis KLIWA
(Landesanstalt für Umwelt Baden-Württemberg; Bayerisches Landesamt für Umwelt; Landesamt für Umwelt Rheinland-Pfalz und Deutscher Wetterdienst)

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.

Heft 2: Langzeitverhalten der Hochwasserabflüsse in Baden-Württemberg und Bayern, 98 S., ISBN 3-88251-284-9, Karlsruhe 2002.

Heft 3: Langzeitverhalten der mittleren Abflüsse in Baden-Württemberg und Bayern, 93 S., ISBN 3-88251-286-5, Karlsruhe 2003.

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.

Heft 5: Langzeitverhalten der Lufttemperatur in Baden-Württemberg und Bayern, 76 S., ISBN 3-937911-17-0, München 2005.

Heft 6: Langzeitverhalten der Schneedecke in Baden-Württemberg und Bayern, 88 S., ISBN 3-937911-18-9, München 2005.

Heft 7: Langzeitverhalten des Gebietsniederschlags in Baden-Württemberg und Bayern, 160 S., ISBN 3-937911-19-7, München 2005.

Heft 8: Langzeitverhalten der Starkniederschläge in Baden-Württemberg und Bayern, 93 S., ISBN 3-88148-412-4, Offenbach 2006.

Heft 9: Regionale Klimaszenarien für Süddeutschland – Abschätzung der Auswirkungen auf den Wasserhaushalt, 100 S., ISBN 3-88251-305-5, Karlsruhe 2006.

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.

Heft 11: Zum Einfluss des Klimas auf den Bodensee, 99 S., ISBN 978-3-88251-326-4, Karlsruhe 2007. 312 4.

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.

Heft 13: Modellunterstützte Untersuchungen zum Einfluss des Klimas auf den Bodensee, 128 S., ISBN 978-3-88251-345-5, Karlsruhe 2009.

Heft 14: Auswirkungen des Klimawandels auf Niedrigwasserverhältnisse in Baden-Württemberg, Bayern und Rheinland-Pfalz, 114 S., ISBN 978-3-88251-346-2, Karlsruhe 2009.

Heft 15: Klimaveränderung und Konsequenzen für die Wasserwirtschaft, Fachvorträge beim 4. KLIWA-Symposium am 3. und 4.12.2009 in Mainz, 313 S., ISBN 978-3-933123-20-6, Mainz 2010.

Heft 16: Auswirkungen des Klimawandels auf Niedrigwasserverhältnisse in Baden-Württemberg, Bayern und Rheinland-Pfalz, 114 S., ISBN 978-3-88251-346-2, Karlsruhe 2011.

Heft 17: Auswirkungen des Klimawandels auf Bodenwasserhaushalt und Grundwasserneubildung in Baden-Württemberg, Bayern und Rheinland-Pfalz, 112 S., ISBN 978-3-88251-363-9, Karlsruhe 2012.

Heft 18: Die Entwicklung von Großwetterlagen mit Auswirkungen auf den süddeutschen Raum, 154 S., ISBN 978-3-88251-346-2, Karlsruhe 2012.

Heft 19: 5. KLIWA-Symposium am 6. und 7. Dezember 2012 in Würzburg Fachvorträg Klimaveränderung und Konsequenzen für die Wasserwirtschaft, 257 S., Würzburg 2013.

Heft 20: Ableitung von Temperaturpräferenzen des Makrozoobenthos für die Entwicklung eines Verfahrens zur Indikation biozönotischer Wirkungen des Klimawandels in Fließgewässern, 142 S., ISBN 978-3-88251-389-9, Karlsruhe 2016.

Heft 21: Entwicklung von Bodenwasserhaushalt und Grundwasserneubildung in Baden-Württemberg, Bayern, Rheinland-Pfalz und Hessen (1951-2015), 101 S., ISBN 978-3-88251-395-0, Karlsruhe 2017.

Weitere aktuelle Informationen zu Projektergebnissen finden Sie unter unserer Internetseite:

http://www.kliwa.de